

SCIENTIFIC AMERICAN

КОСМОС

АЛЬМАНАХ



«В мире науки»

МОСКВА

2006

SCIENTIFIC AMERICAN

В МИРЕ НАУКИ

THE COSMOS

ALMANAC



«В мире науки»

MOSCOW
2006

КОСМОС

АЛЬМАНАХ

Раздел 1

Вселенная

Раздел 2

Галактики

Раздел 3

Звезды

Раздел 4

Планеты

МОСКВА
2006

УДК [52+629.78](082)
ББК 22.6+39.6
К 71

Руководитель проекта,
главный редактор журнала «В мире науки»
Капица Сергей Петрович

Редактор-составитель
Сурдин Владимир Георгиевич

Редактор
Мостинская Алла Юрьевна

К 71 **Космос:** альманах / Под рук. Капицы С.П. — М.: «В мире науки», 2006. — 224 с., ил.

ISBN 5-98944-001-4

Сборник научно-популярных статей по астрофизике, астрономии и космологии, опубликованных ведущими учеными мира за последние три года в журнале «В мире науки/Scientific American». Тематика статей охватывает самые актуальные проблемы науки о Вселенной и интересует как ученых-профессионалов, так и любителей науки.

УДК [52+629.78](082)
ББК 22.6+39.6

ISBN 5-98944-001-4

© «В мире науки», 2006
© «Scientific American», 2006

ПРЕДИСЛОВИЕ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

Редакция журнала «В мире науки» представляет читателям сборник статей, опубликованных за последние годы в нашем журнале и посвященных космосу. В первом разделе освещены последние достижения астрономии, начиная от проблем космологии, заканчивая строением и развитием мира в целом. Второй раздел посвящен исследованиям звездных систем, галактик, третий – звездной астрономии, четвертый – планетам. В статьях описаны как наблюдательные данные, так и последовательно изложено развитие наших представлений об этих объектах. Заметим, что наблюдения уже давно стали всеволновыми и не ограничены только видимым диапазоном света. Многие инструменты вынесены за пределы атмосферы, в том числе известный «Хаббл». Затраты на большие телескопы соотносимы с расходами на ускорители заряженных частиц, которые раскрывают мир самого малого. Физика же Вселенной обращается к результатам физики высоких энергий для интерпретации результатов наблюдений, перенимая методы исследований и подчеркивая идейное и методическое единство науки.

Ускорители и телескопы объединяет то, что и те и другие бывают как удачливыми, так и несчастливыми в своей судьбе. Несмотря на досадную оплошность, когда один из элементов оптики «Хаббла» был изготовлен с величайшей точностью, но не той формы, что потребовало исправления оптической системы уже на орбите, этот телескоп оказался, несомненно, счастливым. Полученные результаты значительно повлияли на наши представления о самых разных объектах, а сам инструмент оказался на редкость долгоживущим.

Появление нашего сборника, в составление которого значительный вклад внес консультант и редактор В.Г. Сурдин, происходит во время глубокой ревизии наших представлений о Вселенной. До последнего времени многим казалось, что все, что мы видим, и есть то, из чего состоит мир. Однако теперь выясняется, что существует грандиозная невидимая часть Вселенной, о которой мы пока только знаем, что ее гравитационное поле проявляется в том, что она ускоряет разлет галактик. Здесь нельзя не вспомнить Эйнштейна, который утверждал, что «Бог изощрен, но не злонамерен». По-видимому, и загадка солнечных нейтрино, на-

конец получила свое разрешение. Как и с темным веществом, именно усовершенствование методов наблюдений привело к этим открытиям.

Поскольку представленный сборник не дает систематического обзора современного состояния астрономии, от него нельзя требовать полноты изложения. Однако, как мгновенный снимок самых последних результатов, многие из которых будут развиты и дополнены, материалы, вошедшие в наш альманах, имеют свою интеллектуальную и даже эмоциональную ценность. Главное, они знакомят читателя с достижениями на самом переднем крае фундаментальных исследований природы, передают всю драму идей и негаданных открытий. Тем не менее эти исследования не обещают не только немедленной пользы, но даже не сулят отдаленной выгоды, которую некоторые ожидают и даже требуют получить взамен на миллиарды, потраченные на эти приборы и работы по их применению. Однако без этого современная наука не может развиваться. Как невидимая материя существенна для понимания ускорения мира, так и эти работы столь же необходимы, играя роль ускорителя самой машины познания, благодаря которой мы единственно отличаемся от братьев наших меньших.

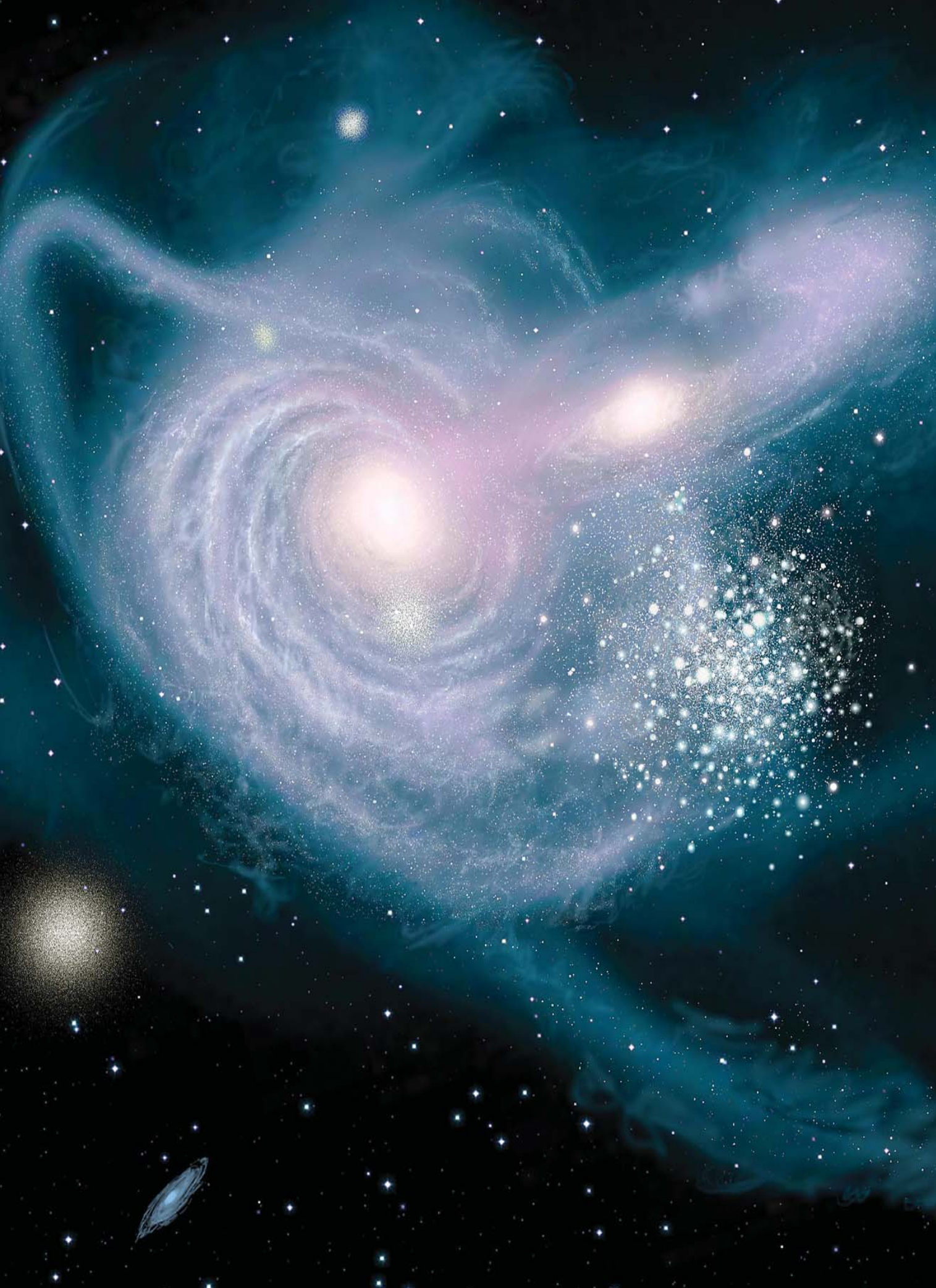
Впрочем, когда я наблюдаю за своей домашней кошкой, меня преследует мысль, что она понимает значительно больше, чем нам кажется. Именно поэтому следующий выпуск будет посвящен наукам о человеке, где также происходит революция в понимании того, чем и как мы отличаемся своим сознанием от той же кошки. Как и в астрономии, прогресс в этой области во многом связан с новыми методами и инструментами исследования. Чтобы представить размах этих работ, заметим, что на последней ежегодной конференции по нейронаукам в США присутствовало 30 тысяч ученых, из которых 300 получили образование в нашей стране, откуда приехало всего 8 участников. С другой стороны, в США затраты на лечение болезней, связанных с высшей нервной деятельностью, превышают потери от сердечно-сосудистых и онкологических заболеваний. Недаром говорят, что «все болезни от нервов, кроме той, что от удовольствия»...

С.П. Капица



**Мироздание с его неизмеримым
величием, с его сияющим отовсюду
бесконечным разнообразием
и красотой приводит нас
в безмолвное изумление.**

Иммануил Кант



СОДЕРЖАНИЕ

Раздел 1. Вселенная

1. ЧЕТЫРЕ КЛЮЧА К КОСМОЛОГИИ	13
2. ПЛАН ВСЕЛЕННОЙ	14
3. ПАРАЛЛЕЛЬНЫЕ ВСЕЛЕННЫЕ	21
4. МИФ О НАЧАЛЕ ВРЕМЕН	33
5. КОСМИЧЕСКАЯ СИМФОНИЯ	42
6. ОТ ЗАМЕДЛЕНИЯ К УСКОРЕНИЮ	51
7. КОСМИЧЕСКАЯ ЗАГАДКА	55
8. КТО НАРУШИЛ ЗАКОН ТЯГОТЕНИЯ	61

Раздел 2. Галактики

9. НАША РАСТУЩАЯ ГАЛАКТИКА	71
10. ИЗ ЖИЗНИ СПИРАЛЬНЫХ ГАЛАКТИК	79
11. ПОИСКИ ТЕМНОГО ВЕЩЕСТВА	85
12. МОЛОДЫЕ ШАРОВЫЕ СКОПЛЕНИЯ	91
13. КОГДА ЗВЕЗДЫ СТАЛКИВАЮТСЯ	95
14. ГДЕ СТАЛКИВАЮТСЯ ЗВЕЗДЫ	101
15. КОСМОС: КРИЗИС СРЕДНЕГО ВОЗРАСТА	103

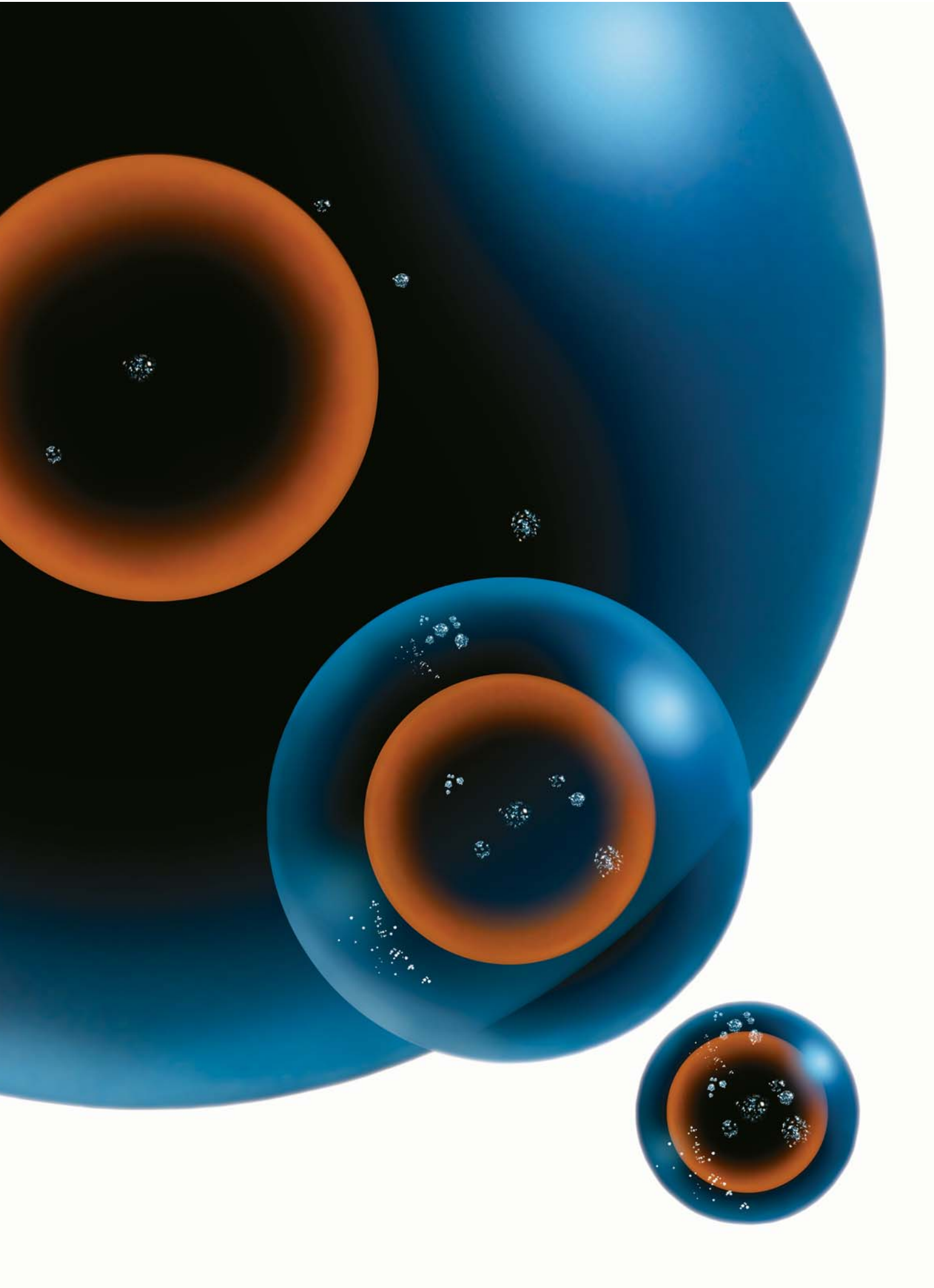
Раздел 3. Звезды

16. РАЗГАДКА ТАЙНЫ СОЛНЕЧНЫХ НЕЙТРИНО	111
17. ВСЕЛЕННАЯ ДИСКОВ	119
18. НЕОБЫЧНАЯ СМЕРТЬ ОБЫЧНЫХ ЗВЕЗД	125
19. МАГНИТАРЫ	134
20. ЯРЧАЙШИЕ ВЗРЫВЫ ВО ВСЕЛЕННОЙ	142

Раздел 4. Планеты

21. ВЛАЖНЫЙ МАРС	151
22. ЗАГАДОЧНЫЕ ЛАНДШАФТЫ МАРСА	154
23. МАРСИАНСКАЯ ОДИССЕЯ	162
24. НЕВИДИМКИ ПЛАНЕТНЫХ СИСТЕМ	168
25. «ЗВЕЗДОПОДОБНЫЕ» БРОДЯГИ	175
26. НОВАЯ ЛУНА	180
27. ВОТ И САТУРН!	187
28. ЯДЕРНЫЕ ВЗРЫВЫ НА ОРБИТЕ	193
29. ДЕЛО О ПОТЕРЯНОЙ ПЛАНЕТЕ	200

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ	207
УКАЗАТЕЛЬ ИМЕН	210
АВТОРЫ	213
ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА	216
ЖУРНАЛУ SCIENTIFIC AMERICAN – 160 ЛЕТ	220



ВСЕЛЕННАЯ

I

Эволюция снабдила нас интуицией
в отношении повседневной физики,
жизненно важной для наших далеких предков;
поэтому, как только мы выходим за рамки повседневности,
мы вполне можем ожидать странностей.

Макс Тегмарк
«ПАРАЛЛЕЛЬНЫЕ ВСЕЛЕННЫЕ»



ЧЕТЫРЕ КЛЮЧА К КОСМОЛОГИИ

Джордж Массер

Теория Большого взрыва прекрасно себя зарекомендовала.
Осталось только разобраться с таинственным ускорением.

Известие об ускорении расширения Вселенной вызвало волнение и шок в среде космологов.

В 1998 г. астрономы решили узнать, с какой скоростью замедляется расширение Вселенной, а вместо этого обнаружили: оно ускоряется. Если, несмотря на всю загадочность, принять космическое ускорение как должное, то оно решает массу проблем. До сенсационного открытия оставалось непонятным несоответствие возраста, плотности и массы Вселенной. Наличие ускорения все ставит на свои места и вместе с результатами сверхточных наблюдений и новыми гипотезами выводит теорию Большого взрыва на качественно новый уровень.

Принято считать, что давным-давно произошел Большой взрыв, породивший Вселенную. Теория не сообщает никаких подробностей о первом моменте творения, оставляя этот вопрос квантовой механике и метафизике. Она лишь утверждает, что космос всегда расширялся, разрежался и охлаждался. Правильнее всего представлять Большой взрыв не как единичное событие, а как продолжающийся процесс постепенного формирования порядка из хаоса. Последние наблюдения как нельзя лучше согласуются с этой моделью.

С точки зрения жизни на Земле, история мироздания началась с инфляции, которая смела все существовавшее ранее и сделала космос пустым и бесформенным. Затем она наполнила Вселенную практически одинаковым излучением, которое распределилось настолько случайным образом, насколько это вообще возможно.

Постепенно Вселенная стала сама собой упорядочиваться. Хорошо знакомые нам электроны и протоны сконденсировались из излучения, словно капельки воды из облака пара. По аморфной смеси пошли звуковые волны, придававшие ей форму. Материя упорно боролась за власть над миром и через несколько сотен тысяч лет после инфляции одержала полную победу над излучением, освободившись от его пут. Отголоски величайшего древнего сражения навсегда застыли в космическом микроволновом фоне.

Почти целую вечность материя самоорганизовывалась в тела все больших размеров: субгалактические сгустки, величественные галактики, галактические скопления и суперскопления. И лишь совсем недавно (по космологическим меркам) Вселенная превратилась в хорошо знакомое нам множество небесных тел, разделенных безднами практически пустого пространства, карту которого усердно составляют современные астрономы. Несколько миллиардов лет назад материя начала терять управление, и началось космическое ускорение. Похоже, у Большого взрыва открылось второе дыхание, не сулящее нам ничего хорошего. Все более быстрое расширение уже сейчас препятствует образованию крупных структур, а в будущем может привести к разрушению галактик, звезд и планет.

Разрабатывая целостное и согласующееся с результатами наблюдений описание космической истории, космологи вернулись к старому спору между теорией Большого взрыва и концепцией стационарной Вселенной. В науке нет ничего абсолютно достоверного, но ученые все четче осознают, что прежде всего нужно разобраться с фундаментальными вопросами, начиная с выяснения причин космического ускорения.

На сенсационное открытие 1998 г. космологи не отреагировали должным образом. Они просто стряхнули пыль с эйнштейновской космологической постоянной и записали на ее счет влияние таинственной темной энергии. Однако многие физики считают, что революционные открытия требуют революционных объяснений: быть может, на больших расстояниях нарушается закон тяготения.

Сегодня развитие космологии как никогда зависит от результатов новых экспериментальных и теоретических работ. Не приведет ли поток свежих идей к хаосу? Будет ли вновь установлен порядок? Неужели правы те, кто утверждает, что космос «абсурден»? Сможем ли мы вновь упорядочить представления о нем? ■

(«В мире науки», №5, 2004)

ПЛАН ВСЕЛЕННОЙ

Майкл Стросс

Новейшие космические карты позволили обнаружить самые крупные природные структуры – группы галактик, превосходящие по размеру прочие объекты Вселенной.

Еще в 70-х гг. космология – учение о Вселенной в целом – была наукой, в которой предположения преобладали над фактами. Сейчас космология обрела прочный теоретический фундамент, опирающийся на обширные данные систематических наблюдений. Модель Большого взрыва, согласно которой около 14 млрд. лет назад Вселенная начала расширяться из состояния с высокой плотностью и температурой, может объяснить движение галактик, соотношение водорода и гелия, а также свойства реликтового излучения – остатков тепла от расширяющегося и охлаждающегося газа.

Теперь космологи пытаются понять, как сформировалась структура Вселенной. Крупномасштабное распределение галактик, выявленное в ходе Слоановского цифрового обзора неба, подтвердило теоретические данные. Сейчас мы располагаем моделью того, как развивались мельчайшие колебания плотности от ранних этапов эволюции Вселенной до современного разнообразия объектов ночного неба.

Звезды распределены во Вселенной неоднородно: они сгруппированы в галактики разных размеров. Наше Солнце – одна из сотен миллиардов звезд нашей Галактики, диск которой имеет диаметр 100 тыс. световых лет. В свою очередь, Млечный Путь – это один из десятков миллиардов галактик наблюдаемой части Вселенной, ближайшая из которых удалена от нас на 2 млн. световых лет. Но и сами галактики организованы в определенном порядке: 5–10% из них сгруппированы в скопления, содержащие до 1000 галактик в объеме нескольких миллионов световых лет.

Ранее астрономы считали скопления галактик самыми крупными обособленными структурами, существующими в природе, что соответствовало модели Большого взрыва. Однако не следует забывать, что, когда Эйнштейн впервые применил общую теорию относительности к Вселенной, он сделал одно существенное упрощение: предположил, что она в среднем однородна (не имеет крупных уплотнений) и изотропна (выглядит одинаковой во всех направлениях). Космологический

принцип Эйнштейна лег в основу всех моделей Вселенной, включая Большой взрыв и некогда конкурировавшую с ним Стационарную модель Вселенной.

Большие структуры

Справедлив ли космологический принцип в масштабах больших, чем скопления галактик? Благодаря современным телескопам можно определить, какой из объектов мал и близок, а какой – удален и велик. Мы живем в расширяющейся Вселенной, где чем дальше находится галактика, тем быстрее она удаляется от нас. Мы можем наблюдать за таким движением, изучая красное смещение в спектре галактик. Дело в том, что энергия приходящих из галактики фотонов убывает (длина волны из голубой области спектра сдвигается в красную) на величину, зависящую от расстояния до галактики. Установив эту зависимость для близких галактик, где расстояние известно, астрономы используют ее для изучения более далеких галактик: измеряют красное смещение и вычисляют расстояние.

К 1970-м гг. усовершенствованные телескопы и приемники света позволили провести обширные обзоры красных смещений галактик. Были созданы трехмерные карты ближнего космоса. Еще учась в колледже, я прочел в *Scientific American* статью Стивена Грегори (Stephen A. Gregory) и Лерда Томпсона (Laird A. Thompson), описывающую первую из трехмерных карт (*Superclusters and Voids in the Distribution of Galaxies, March 1982*). Авторы намекали, что космологический принцип Эйнштейна может оказаться неверным: обнаружили уплотнения, значительно превосходящие одиночные скопления галактик, а также огромные пустоты между ними размером в десятки миллионов световых лет. Открытие этих совершенно новых структур во Вселенной произвело на меня неизгладимое впечатление и определило мой путь в науке.

В 1986 г. Валери де Лаппарен (Valerie de Lapparent), Маргарет Геллер (Margaret J. Geller) и Джон Хукра (John P. Huchra) из Гарвард-Смит-

соновского астрофизического центра (*CfA*) опубликовали карту распределения 1099 галактик. Наблюдения за этими галактиками стало частью обзора 15 тыс. галактик, подтвердившего богатство и повсеместность огромных структур. В ходе обзора была выявлена пенистая форма распределения галактик: они концентрируются вдоль поверхностей, огибающих огромные пустоты. Особо на карте выделялась структура, названная Великой Стеной и протянувшаяся на 700 млн. световых лет от одного края исследованной области до другого.

Отсутствие данных о протяженности Великой Стены усиливает подозрение, что космологический принцип, лежащий в основе теории расширяющейся Вселенной, может оказаться неверным. Неужели Эйнштейн не прав? Однородна ли Вселенная в среднем? Ясно, что для выяснения этих вопросов требуется более обширный обзор.

Горячая или холодная

Согласно теории Большого взрыва, современная структура в распределении галактик образовалась из неоднородностей, существовавших в почти идеально гладкой ранней Вселенной. Начальные флуктуации были едва заметны: плотности соседних областей различались примерно на 1/100 000 долю, что показали измерения температуры реликтового излучения (см. статью «Космическая симфония», стр. 42). Если в некоторой области пространства плотность была выше средней, то к ней наблюдалось более сильное гравитационное притяжение, поэтому вещество из ближайшего окружения втягивалось в нее. По той же причине область с плотностью меньше средней со временем теряла массу. Благодаря гравитационной неустойчивости наиболее плотные области превратились в гигантские сверхскопления галактик, которые мы теперь наблюдаем, а менее плотные стали обширными пустотами.

Когда первые обзоры красных смещений уже завершались, астрономы поняли, что ситуация не так уж проста: видимые нами в галактиках звезды и газ составляют лишь малую часть (около 2%) вещества Вселенной. Остальное вещество проявляет себя косвенным образом – через гравитацию. Были предложены различные модели этого скрытого вещества. Они разделились на две категории – холодную и горячую, и это различие играет решающую роль в эволюции структур.

По сценарию, предложенному Джеймсом Пиблсом (P. James E. Peebles) из Принстонского университета, первыми возникли небольшие объек-

ты типа галактик или даже меньше. Со временем гравитация объединила их в крупные структуры. Согласно этой модели, Великая Стена сформировалась недавно. Горячая же модель Якова Борисовича Зельдовича и его коллег из МГУ предполагает, что темное вещество в ранней Вселенной двигалось хаотически с большими скоростями и поэтому мелкие скопления разглаживались. Первыми сформировались крупные пласты и волокна протяженностью в миллионы световых лет, которые позже распались на галактики. В этом случае Великая Стена – древнее образование.

Итак, следующему поколению обзоров следовало не только проверить космологический принцип Эйнштейна и выявить крупномасштабные структуры Вселенной, но и разгадать тайну темного вещества. Один из таких обзоров в начале 1990-х гг. провели Стивен Шектман (Steven A. Shectman) из Института Карнеги (Вашингтон) и его коллеги из Обсерватории Лос-Кампанас (Чили) с помощью 2,5-метрового телескопа. Обзор содержит 26 418 галактик и покрывает существенно большее пространство, чем обзор *CfA*. Роберт Киршнер (Robert P. Kirshner) из *CfA* сказал, что обзор Лос-Кампанас показал такое же распределение галактик, что и *CfA*, и продемонстрировал, насколько грандиозна Великая Стена. Оказалось, что космологический принцип Эйнштейна действует: в больших масштабах космос однороден и изотропен.

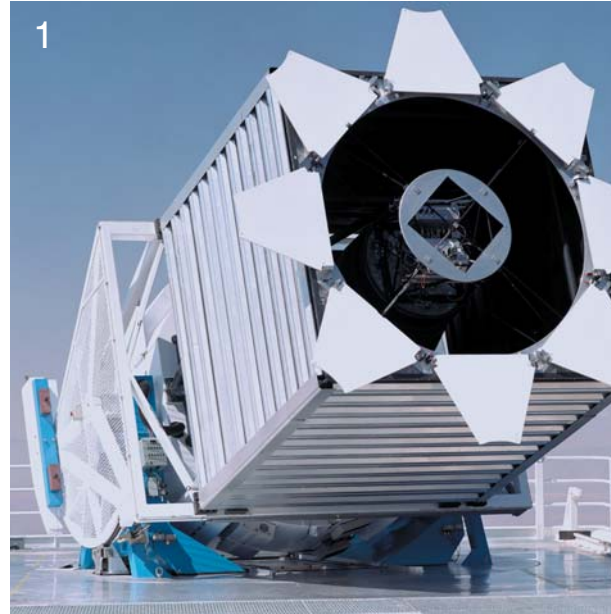
Но и обзор Лос-Кампанас недостаточно велик, чтобы его выводы стали решающими. Он ничего не говорит про области пространства размером 1–2 млрд. световых лет, где надежнее всего «работает» теория формирования скоплений, но наблюдать их очень сложно. Вариации числа

ОБЗОР: СТРУКТУРА КОСМОСА

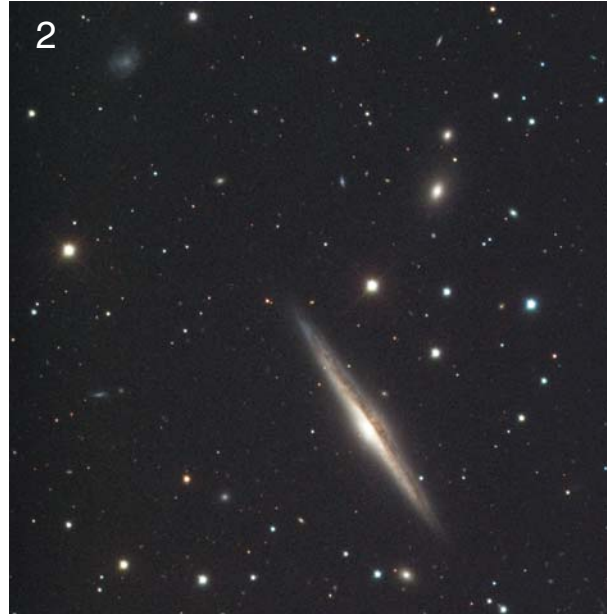
- Астрономы, как космические картографы, создают детальные трехмерные карты распределения галактик и их скоплений. Крупнейший из этих проектов, «Слоановский цифровой обзор неба», позволил получить данные о миллионе галактик вплоть до расстояния в 2 млрд. световых лет.
- Карты показали, что галактики собраны в гигантские структуры размером в сотни миллионов световых лет, которые выросли из слабых флуктуаций плотности, существовавших в юной Вселенной.
- Карты столь точны, что позволяют оценить космологические параметры независимо от результатов, полученных по реликтовому излучению. Теперь астрономы имеют верное представление об истории космоса (14 млрд. лет).

КАК СОСТАВИТЬ КОСМИЧЕСКУЮ КАРТУ В ЧЕТЫРЕ ПРИЕМА

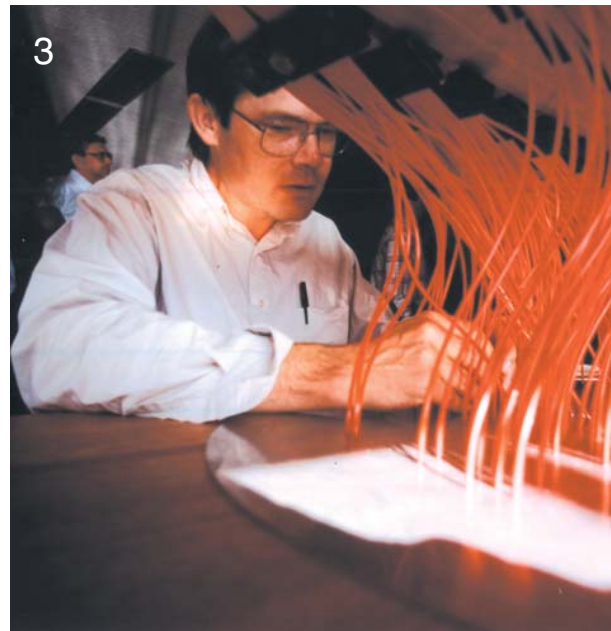
Слоановский цифровой обзор неба позволит создать самый совершенный атлас четверти всего небосвода. Наблюдения с помощью 2,5-метрового телескопа на вершине Апачи-Пойнт (шт. Нью-Мексико) займут пять лет.



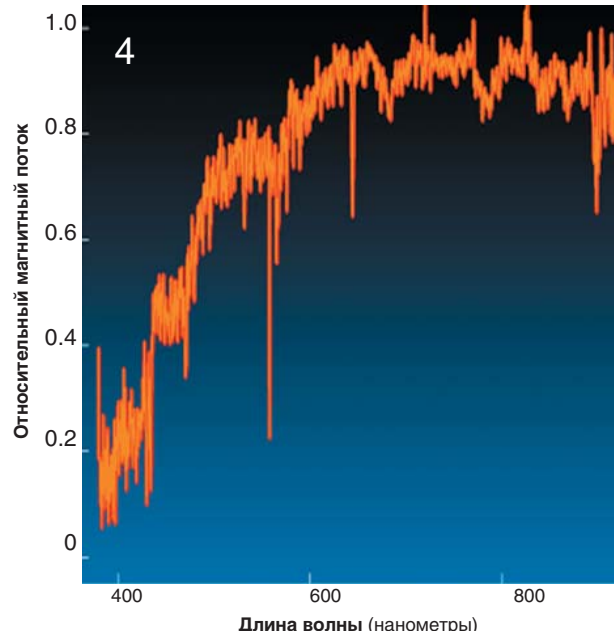
ШАГ 1: В ясные и безлунные ночи телескоп фотографирует небо сквозь 5 цветных фильтров со скоростью 20 квадратных градусов в час, регистрируя миллионы небесных тел за ночь.



ШАГ 2: Галактики и другие объекты автоматически распознаются и отбираются для последующей спектроскопии. Здесь показана спиральная галактика UGC 03214 в созвездии Ориона.



ШАГ 3: В фокус телескопа ставят металлическую пластину с 640 отверстиями по местам расположения галактик. Сквозь каждое отверстие их свет по оптическому волокну попадает в спектрограф, который может работать даже не в самые ясные ночи.



ШАГ 4: Эти спектры позволяют точно классифицировать объекты. По ним же астрономы измеряют и красное смещение линий, а значит, и расстояние до объектов.

галактик в столь крупных областях пространства незначительны, поэтому малейшие ошибки могут привести к «открытию» несуществующих скоплений.

Ясной ночью...

Делая обзор красных смещений, астрономы обычно включают в него все галактики ярче определенной звездной величины. Если они ошибутся с оценкой яркости галактик в какой-либо части неба, то из этой области в выборку может попасть большее число галактик, что приведет к появлению якобы обнаруженного скопления. Поэтому обзор красных смещений должен не только охватывать огромное пространство, но и быть точно откалиброван.

В 1980-х гг. Джеймс Ганн (James E. Gunn) из Принстона, Ричард Крон (Richard G. Kron) и Дональд Йорк (Donald G. York) из Чикагского университета постарались выяснить распределение галактик в пространстве максимально большего объема, доступного для наблюдений, и обеспечить при этом точную калибровку их яркости. Через 10 лет стартовал проект Слоановский цифровой обзор неба (SDSS) стоимостью \$80 млн., в котором были задействованы 200 астрономов. Для него используется специальный 2,5-метровый телескоп, работающий в двух режимах. В самые ясные ночи широкоугольная камера телескопа получает откалиброванные снимки неба в пяти широких спектральных диапазонах. Приемником света в камере служит ПЗС-матрица, очень чувствительное электронное устройство, точность которого равна долям процента.

В лунные ночи или при легкой облачности на телескопе работают два оптоволоконных спектрографа, одновременно регистрирующие спектры 608 объектов для определения их красных смещений. В отличие от других телескопов, которые в течение ночи используются для наблюдений по разным программам, этот телескоп предназначен только для одного вида исследований, которые проводятся каждую ночь в течение пяти лет. Сейчас наш проект прошел половину пути, измерив красные смещения миллиона галактик и квазаров. В качестве промежуточного этапа недавно был завершен анализ красных смещений первых 200 тыс. галактик.

Австралийские и британские астрономы создали спектрограф для 3,9-метрового англо-австралийского телескопа, позволяющий одновременно получать спектры 400 объектов в поле размером 2° (поэтому проект назвали «Двухградусное поле» — Two Degree Field, 2dF). Команда 2dF использовала

уже существующие каталоги галактик, составленные по тщательно откалиброванным и отсканированным фотографическим атласам. Длившаяся пять лет работа уже закончена: получен обзор красных смещений 221 414 галактик.

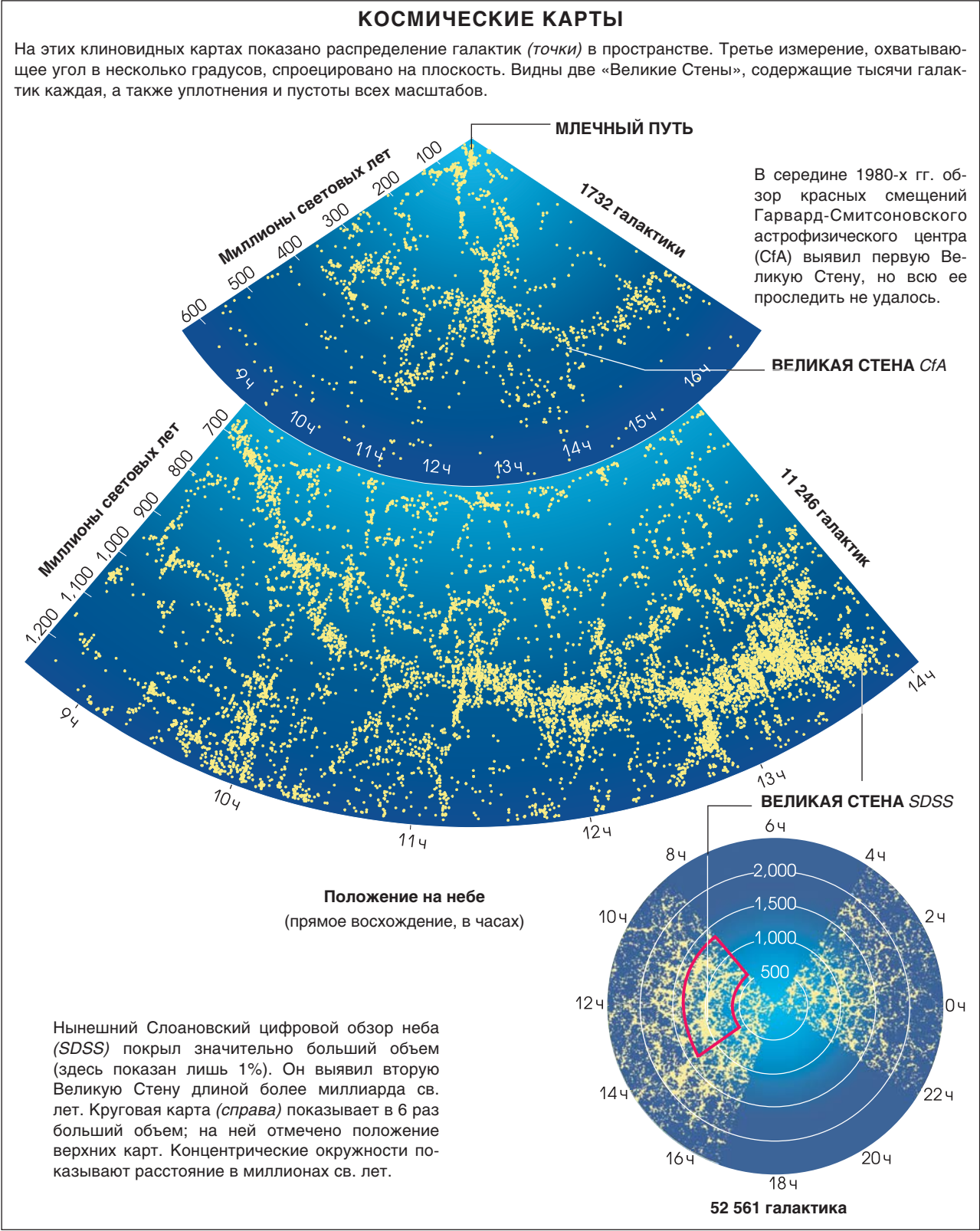
Наши обзоры показывают распределение галактик. Но как быть с темным веществом? Нет оснований предполагать, что расположение галактик в точности повторяет распределение темного вещества. Например, галактики могли бы формироваться только в областях с избыточной плотностью темного вещества — такой «пороговый» сценарий астрономы считают наиболее вероятным.

Анализируя предыдущие обзоры красных смещений, мы выяснили, что распределения галактик и темного вещества тесно связаны, но сделать однозначный выбор между простыми моделями «порогового» и «беспорогового» сценариев мы не смогли. Недавно Лисия Верде (Licia Verde) из Пенсильванского университета и ее коллеги использовали обзор 2dF для измерения тройных галактик. Оказалось, что число триплетов зависит от общей массы, включая и темное вещество. Исследователи предположили, что, по-видимому, реализуется «беспороговый» сценарий: галактики распределены в пространстве практически так же, как темное вещество. Это означает, что наши обзоры точно отражают организацию вещества в космосе.

Мощь спектра мощности

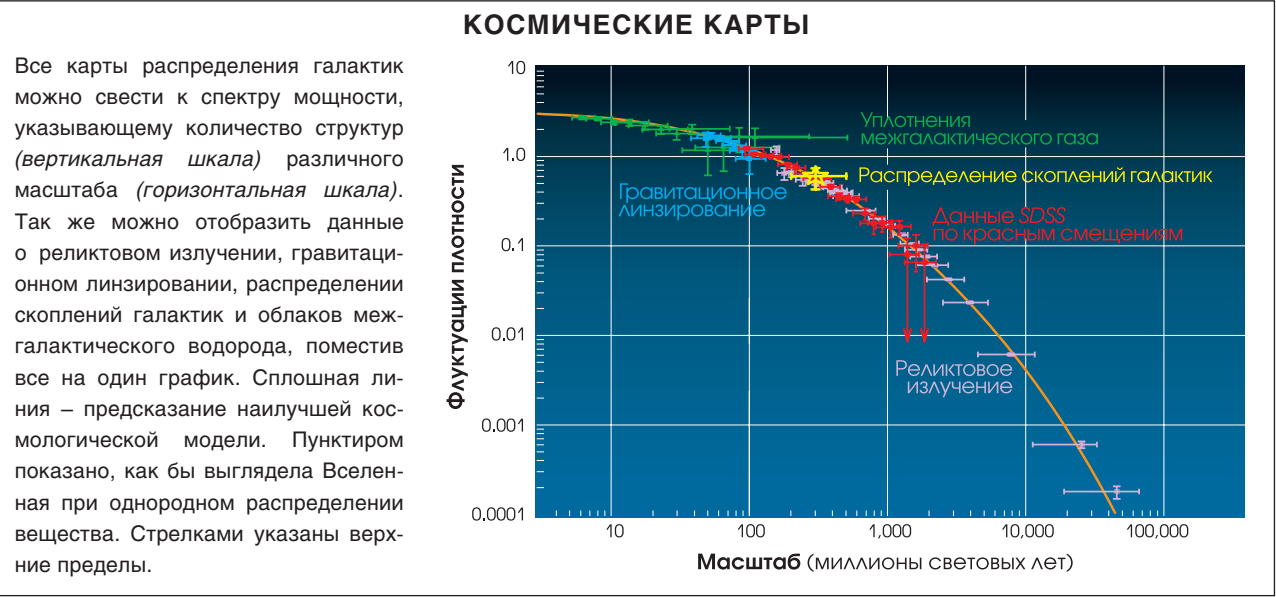
Наиболее полезным инструментом для анализа распределения галактик в пространстве служит спектр мощности. Представим, что сферы определенного радиуса, скажем, 40 млн. световых лет, разбросаны во Вселенной случайным образом. Посчитаем число галактик в каждой из них. Поскольку галактики сгруппированы, их количество в каждой сфере окажется разным. Изменение их числа и есть мера комковатости их распределения при заданном масштабе расстояний (в нашем случае — 40 млн. световых лет). Космологи проводят эти подсчеты для сфер всевозможных размеров, определяя степень комковатости в различных масштабах. Выявление относительного числа структур больших и малых размеров служит для них мощным космологическим тестом.

Спектры мощности были измерены как для обзора 2dF, так и для SDSS и оказались весьма схожими (см. рис. на стр. 19). С увеличением масштаба флуктуации уменьшаются. Слабые флуктуации означают, что распределение галактик очень близко к однородному, отвечающему космологическому принципу Эйнштейна.



Кроме того, на логарифмическом графике флуктуации не выстраиваются вдоль прямой линии, а их отклонение подтверждает тот факт, что дина-

мика Вселенной изменилась со временем. Из других наблюдений астрономы узнали, что в плотности энергии Вселенной доминирует вещество



и нечто, названное «темной энергией». Фотонами, энергия которых ослаблена расширением Вселенной, сегодня можно пренебречь. Зато в прошлом, когда возраст Вселенной был менее 75 тыс. лет, доминировали именно фотоны. Поэтому в ту эпоху гравитация не могла усиливать флуктуации со временем так же, как позже, что и отразилось в спектре мощности на больших масштабах (более 1,2 млрд. световых лет).

Точное значение масштаба позволило оценить полную плотность вещества во Вселенной: она оказалась близкой к критической плотности, равной $2,5 \cdot 10^{-27}$ кг/м³, что подтверждается и другими измерениями. Кроме того, все полученные результаты показывают, что темное вещество является холодным. Будучи горячим, оно бы сгладило флуктуации в распределении галактик на малых масштабах, а этого нет.

Наблюдаемые нами неоднородности в крупномасштабном распределении галактик могут быть просто усиленными неоднородностями плотности в ранней Вселенной, которые видны по реликтовому излучению. Поэтому мы можем сравнить флуктуации реликтового излучения со спектром мощности галактик. Как ни удивительно, из этих двух подходов мы получаем согласованный результат. На масштабах примерно в 1 млрд световых лет флуктуации плотности галактик составляют 1/10. А флуктуации реликтового излучения имеют амплитуду 1/100 000. Именно такой рост предсказывают модели, подтверждая то, что наш космологический сценарий – Большой взрыв, гравитационная неустойчивость и все остальное – действительно верен.

Исследования крупномасштабной структуры

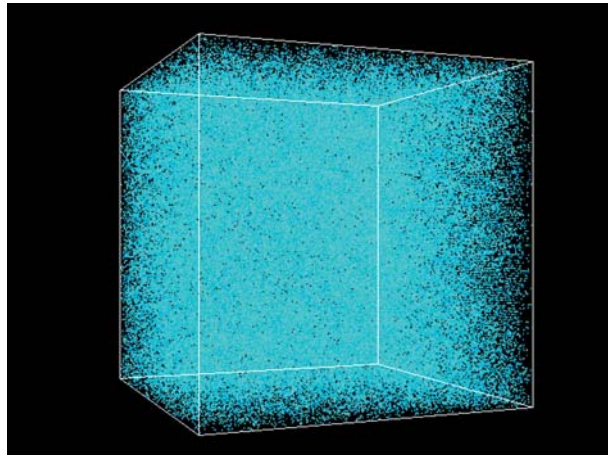
По обзору галактик SDSS в основном изучают структуру космоса в масштабах от 100 млн. до 1 млрд. световых лет. Для исследования еще более крупных образований в SDSS делается вторая выборка предельно ярких галактик, которая расширяет область исследований более чем до 5 млрд. световых лет. Третья выборка должна выявить маломасштабные структуры: в ней изучаются линии поглощения в спектрах далеких квазаров, свет которых проходит сквозь плотную сеть облаков водорода, еще не превратившихся в галактики.

Сейчас космологи пытаются связать результаты этих обзоров (показывающие структуру космоса сегодня и в недавнем прошлом) со свойствами реликтового излучения (отражающего космическую структуру на самой ранней стадии). В частности, спектр мощности реликтового излучения имеет ряд характерных горбов, отражающих соотношение темного и обычного вещества. Астрономы надеются найти подобные горбы в современном спектре мощности. Если это удастся, то появится еще одно доказательство того, что наблюдаемые сегодня флуктуации развились из тех, которые были в ранней Вселенной.

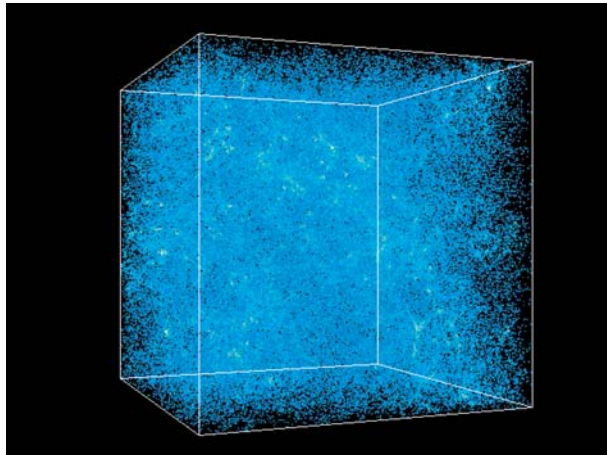
Другим способом проследить развитие структур во времени служит изучение распределения очень далеких галактик. В те далекие времена темное вещество должно быть более однородным, так как гравитационная неустойчивость действовала недолго. Но обзоры, проведенные

СТРОИТЕЛЬСТВО ВСЕЛЕННОЙ

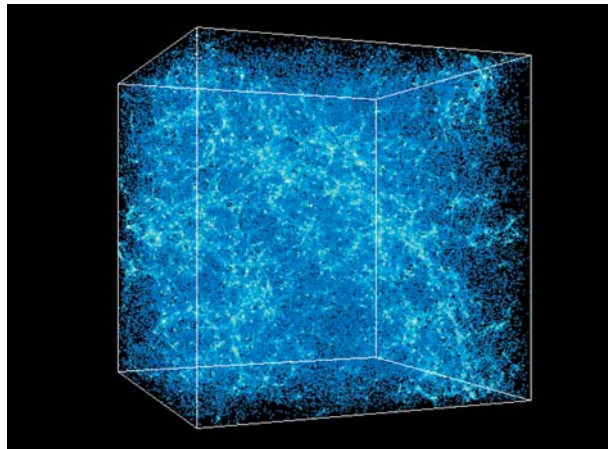
Чтобы связать современное распределение вещества (выявленное Слоановским и другими обзорами) с тем, которое было в ранней Вселенной (и проявляется сейчас в наблюдениях реликтового излучения), космологи создают компьютерные модели. Каждая картинка показывает модельную ситуацию через определенное время после Большого взрыва. Поскольку Вселенная расширяется, размеры областей разные: поперечник первой картинке около 5 млн. св. лет, а последней – около 140 млн. св. лет. Точками показано вещество. Эта модель рассчитана в Национальном центре применения суперкомпьютеров (полная динамическая версия доступна на cfcp.uchicago.edu/lss/filaments.html).



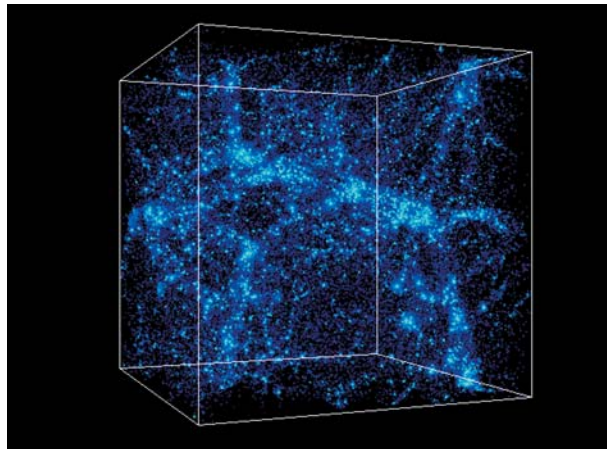
120 млн. лет. Вначале вещество распределялось почти однородно, с небольшими флуктуациями плотности.



490 млн. лет. Более плотные области оттягивают вещество из менее плотных. Формируются первые галактики.



1,2 млрд. лет. Со временем гравитация собирает вещество в гигантские волокна, создавая пустоты между ними.



13,7 млрд. лет (наше время). Рост крупных структур прекратился, поскольку космическое ускорение препятствует уплотнению.

Европейской южной обсерваторией в Чили и Обсерваторией Кека на Гавайях, показали, что очень далекие галактики сгруппированы так же, как и современные, и собраны в такие же волокнистые и пузырчатые структуры, как и ближние к нам галактики. Но в отличие от современных галактик, которые следуют за темным веществом, те ранние галактики должны быть больше сгруппированы, чем окружающее их темное вещество. Это может дать ключ к решению вопроса формирования галактик.

Ученые приблизились к пониманию путей развития структуры космоса: от мелких возмущений в «первичном супе» до скоплений звездных галактик в современной Вселенной. В ближайшие годы предстоит ответить на важные вопросы: какой механизм привел к усилению флуктуаций реликтового излучения? как формировались галактики? почему они обладают подобными свойствами? был ли другой путь? можно ли представить Вселенную с начальными флуктуациями большей или меньшей амплитуды? ■

(«В мире науки», №5, 2004)

ПАРАЛЛЕЛЬНЫЕ ВСЕЛЕННЫЕ

Макс Тегмарк

Эволюция снабдила нас интуицией
в отношении повседневной физики,
жизненно важной для наших далеких предков;
поэтому, как только мы выходим за рамки повседневности,
мы вполне можем ожидать странностей.

Простейшая и самая популярная космологическая модель предсказывает, что у нас есть двойник в галактике, удаленной на расстояние порядка 10 в степени 10^{28} метров. Расстояние столь велико, что находится за пределами досягаемости астрономических наблюдений, но это не делает нашего двойника менее реальным. Предположение основано на теории вероятности без привлечения представлений современной физики. Принимается лишь допущение, что пространство бесконечно и заполнено материей. Может существовать множество обитаемых планет, в том числе таких, где живут люди с такой же внешностью, такими же именами и воспоминаниями, прошедшие те же жизненные перипетии, что и мы.

Но нам никогда не будет дано увидеть наши иные жизни. Самое далекое расстояние, на которое мы способны заглянуть, это то, которое может пройти свет за 14 млрд. лет, протекших с момента Большого взрыва. Расстояние между самыми далекими от нас видимыми объектами составляет около $43 \cdot 10^{26}$ м; оно и определяет доступную для наблюдения область Вселенной, называемую объемом Хаббла, или объемом космического горизонта, или просто Вселенной. Вселенные наших двойников представляют собой сферы таких же размеров с центрами на их планетах. Это самый простой пример параллельных вселенных, каждая из которых является лишь малой частью сверхвселенной.

Само определение «вселенная» наводит на мысль, что оно навсегда останется в области метафизики. Однако граница между физикой и метафизикой определяется возможностью экспериментальной проверки теорий, а не существованием неподдающихся наблюдениям объектов. Границы физики постоянно расширяются, включая все более отвлеченные (и бывшие до того метафизическими) представления, например, о шаровидной Земле, невидимых электромагнитных

полях, замедлении времени при больших скоростях, суперпозиции квантовых состояний, искривлении пространства и черных дырах. В последние годы к этому перечню добавилось и представление о сверхвселенной. Оно основано на проверенных теориях – квантовой механике и теории относительности – и отвечает обоим основным критериям эмпирической науки: позволяет делать прогнозы и может быть опровергнуто. Ученые рассматривают четыре типа параллельных вселенных. Главный вопрос не в том, существует ли сверхвселенная, а сколько уровней она может иметь.

Уровень I За нашим космическим горизонтом

Параллельные вселенные наших двойников составляют первый уровень сверхвселенной. Это наименее спорный тип. Мы все признаем существование вещей, которых мы не видим, но могли бы увидеть, переместившись в другое место или просто подождав, как ждем появления корабля из-за горизонта. Подобный статус имеют объекты, находящиеся за пределами нашего космического горизонта. Размер доступной наблюдению области Вселенной ежегодно увеличивается на один световой год, поскольку нас достигает свет, исходящий из все более далеких областей, за которыми скрывается бесконечность, которую еще предстоит увидеть. Мы, вероятно, умрем задолго до того, как наши двойники окажутся в пределах досягаемости для наблюдений, но если расширение Вселенной поможет, наши потомки смогут увидеть их в достаточно мощные телескопы.

Уровень I сверхвселенной представляется до банальности очевидным. Как может пространство не быть бесконечным? Разве есть где-нибудь знак «Берегись! Конец пространства»? Если существует конец пространства, то что находится за ним? Однако теория гравитации Эйнштейна

поставила это интуитивное представление под сомнение. Пространство может быть конечным, если оно имеет положительную кривизну или необычную топологию. Сферическая, тороидальная или «кренделевидная» вселенная может иметь конечный объем, не имея границ. Фоновое космическое микроволновое излучение позволяет проверить существование подобных структур. Однако до сих пор факты говорят против них. Данным соответствует модель бесконечной вселенной, а на все прочие варианты наложены строгие ограничения.

Другой вариант таков: пространство бесконечно, но материя сосредоточена в ограниченной области вокруг нас. В одном из вариантов некогда популярной модели «островной Вселенной» принимается, что на больших масштабах вещество разрезается и имеет фрактальную структуру. В обоих случаях почти все вселенные в сверхвселенной уровня I должны быть пусты и безжизненны. Последние исследования трехмерного распределения галактик и фонового (реликтового) излучения показали, что распределение вещества стремится к однородному в больших масштабах и не образует структур размером более 10^{24} м. Если такая тенденция сохраняется, то пространство за пределами наблюдаемой Вселенной должно изобиловать галактиками, звездами и планетами.

Для наблюдателей в параллельных вселенных первого уровня действуют те же законы физики, что и для нас, но при иных стартовых условиях. Согласно современным теориям, процессы, протекавшие на начальных этапах Большого взрыва, беспорядочно разбросали вещество, так что была вероятность возникновения любых структур. Космологи принимают, что наша Вселенная с почти однородным распределением вещества

и начальными флуктуациями плотности порядка $1/105$ весьма типична (по крайней мере, среди тех, в которых есть наблюдатели). Оценки на основе этого допущения показывают, что ваша ближайшая точная копия находится на расстоянии 10 в степени 10^{28} м. На расстоянии 10 в степени 10^{92} м должна располагаться сфера радиусом 100 световых лет, идентичная той, в центре которой находимся мы; так что все, что в следующем веке увидим мы, увидят и находящиеся там наши двойники. На расстоянии около 10 в степени 10^{118} м от нас должен существовать объем Хаббла, идентичный нашему.

Эти оценки выведены путем подсчета возможного числа квантовых состояний, которые может иметь объем Хаббла, если его температура не превышает 108 К. Число состояний можно оценить, задавшись вопросом: сколько протонов способен вместить объем Хаббла с такой температурой? Ответ – 10^{118} . Однако каждый протон может либо присутствовать, либо отсутствовать, что дает 2 в степени 10^{118} возможных конфигураций. «Короб», содержащий такое количество объемов Хаббла, охватывает все возможности. Размер его составляет 10 в степени 10^{118} м. За его пределами вселенные, включая нашу, должны повторяться. Примерно те же цифры можно получить на основе термодинамических или квантовогравитационных оценок общего информационного содержания Вселенной.

Впрочем, наш ближайший двойник скорее всего находится к нам ближе, чем дают эти оценки, поскольку процесс формирования планет и эволюция жизни благоприятствуют этому. Астрономы полагают, что наш объем Хаббла содержит по крайней мере 10^{20} пригодных для жизни планет, некоторые из которых могут быть похожи на Землю.

В современной космологии понятие сверхвселенной уровня I широко применяется для проверки теории. Рассмотрим, как используют космологи реликтовое излучение для того, чтобы отвергнуть модель конечной сферической геометрии. Горячие и холодные «пятна» на картах реликтового излучения имеют характерный размер, зависящий от кривизны пространства. Так вот, размер наблюдаемых пятен слишком мал, чтобы согласоваться со сферической геометрией. Их средний размер случайным образом меняется от одного объема Хаббла к другому, поэтому не исключено, что наша Вселенная сферическая, но имеет аномально малые пятна. Когда космологи говорят, что они исключают сферическую модель на доверительном уровне $99,9\%$, они имеют в виду, что

ОБЗОР: СВЕРХВСЕЛЕННЫЕ

- Астрономические наблюдения свидетельствуют: параллельные вселенные уже не метафора. Пространство, по-видимому, бесконечно, а значит, все возможное становится реальным. За пределами досягаемости телескопов существуют области пространства, идентичные нашей и в этом смысле являющиеся параллельными вселенными. Ученые даже могут вычислить, как далеко они от нас находятся.
- Когда же космологи рассматривают некоторые спорные теории, то приходят к выводу, что другие вселенные могут иметь совершенно иные свойства и физические законы. Существование таких вселенных может объяснить особенности нашей Вселенной и ответить на фундаментальные вопросы о природе времени и познаваемости физического мира.

СВЕРХВСЕЛЕННАЯ УРОВНЯ I

Простейший тип параллельной вселенной – область пространства, столь далекая от нас, что ее нельзя наблюдать. Самое большое расстояние, на котором мы можем что-либо видеть, составляет сегодня около 4310^{26} м, или около 42 млрд. световых лет, – расстояние, которое мог

пройти свет с момента Большого взрыва. (Оно больше 14 млрд. световых лет, так как расширение пространства увеличивает расстояния.) Каждая из параллельных вселенных уровня I идентична нашей. Различия обусловлены лишь разницей в начальном распределении вещества.

Граница области, доступной для наблюдений

4310^{26} метров

Наша Вселенная

Параллельная вселенная

Параллельная вселенная

$10^{10^{18}}$ метров

Параллельная вселенная, тождественная нашей

Далека ли копия нашей Вселенной?

ИГРУШЕЧНАЯ ВСЕЛЕННАЯ

Представьте себе двухмерную вселенную, вмещающую 4 частицы. В ней возможны $24 = 16$ вариантов расположения частиц. Если таких вселенных больше 16 , расположения частиц должны повторяться. В этом примере расстояние до ближайшей тождественной вселенной составляет около 4 диаметров каждой вселенной.



НАША ВСЕЛЕННАЯ

Те же рассуждения применимы к нашей Вселенной, которая может вместить около 10^{118} субатомных частиц. Число возможных расположений в ней составляет 2 в степени 10^{118} . Умножая на диаметр Вселенной, получим оценку расстояния до ближайшей тождественной вселенной: 10 в степени 10^{118} м.

$2 \cdot 3 \cdot 10^{-13}$ метров

10^{118} частиц

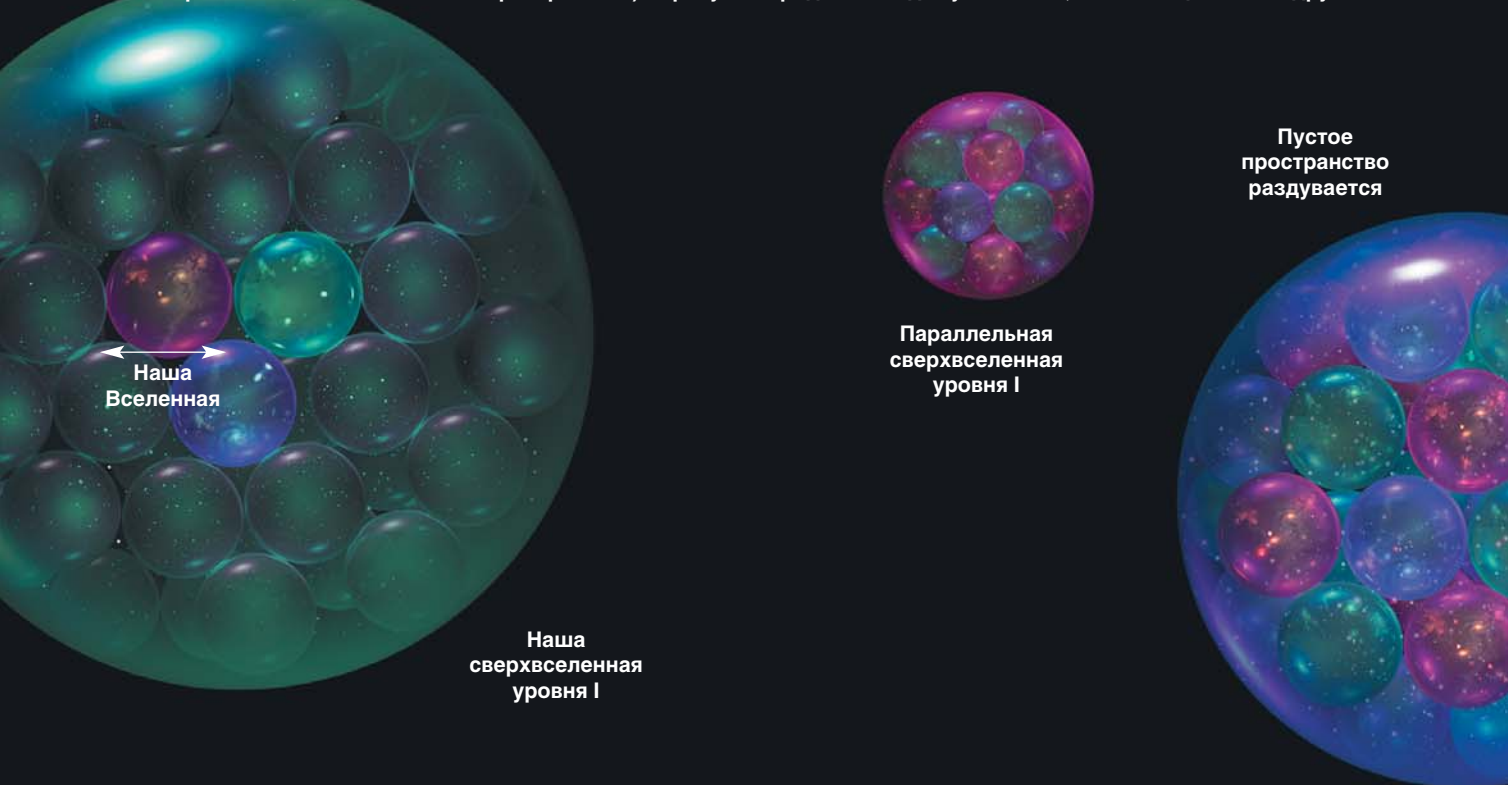
$2^{10^{118}}$ расположений

$8 \cdot 3 \cdot 10^{26}$ метров

СВЕРХВСЕЛЕННАЯ УРОВНЯ II

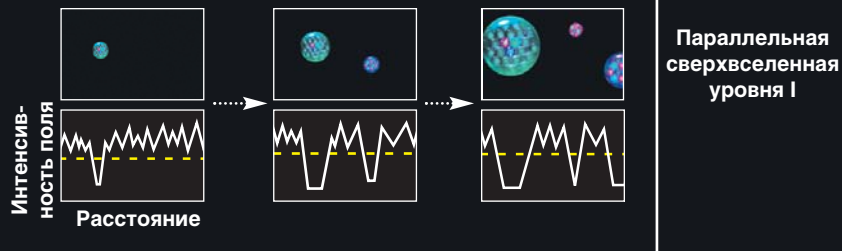
Теория космологической инфляции приводит к более сложному типу параллельных вселенных. Предполагается, что наша сверхвселенная уровня I (т.е. наша Вселенная и прилегающие к ней области пространства) образу-

ет домен в большем, но пустом пространстве, где существуют другие домены, не связанные с нашим. Флуктуации квантовых полей в процессе зарождения доменов придают каждому свойства, отличающие его от других.



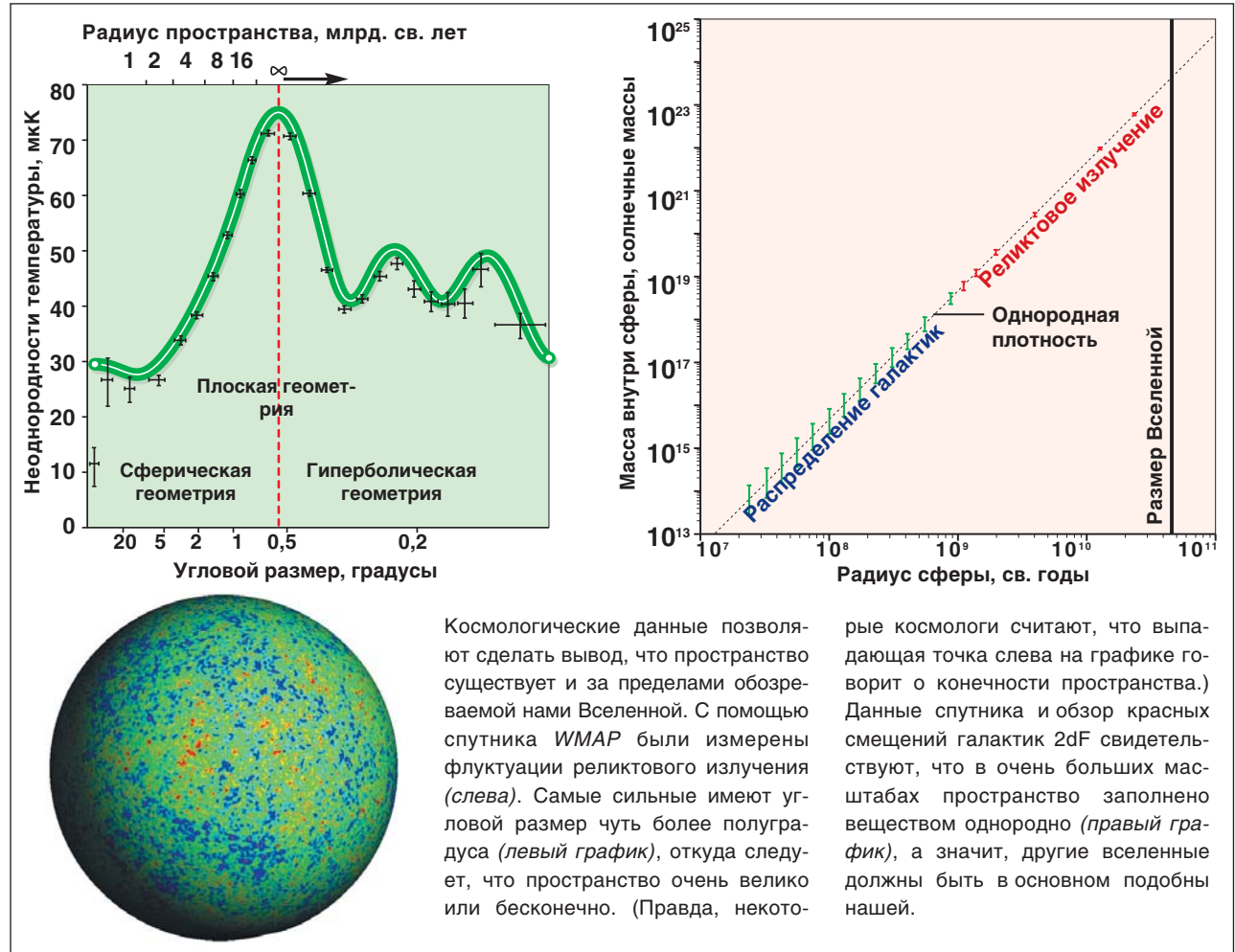
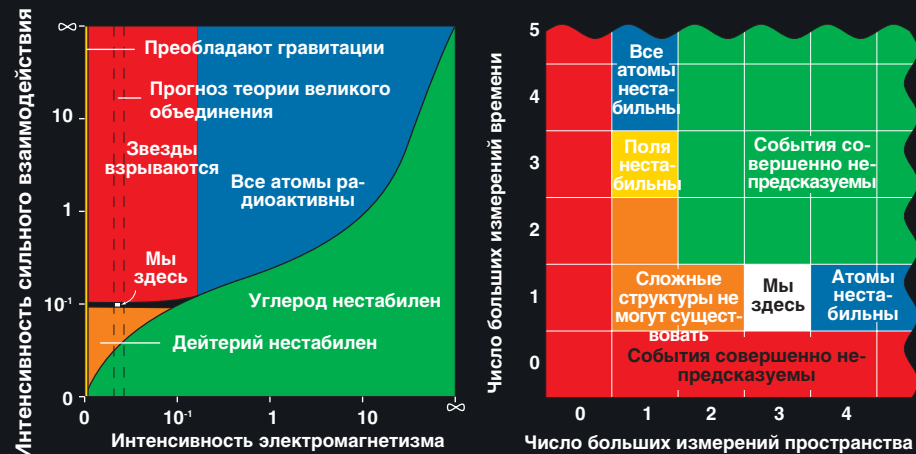
Зарождение доменов

Квантовое поле, называемое инфлатоном, вызывает быстрое раздувание пространства, в большей части которого случайные флуктуации не позволяют полю ослабевать. Области, в которых поле теряет интенсивность и расширение замедляется, становятся доменами.



Улики

Космологи заподозрили существование параллельных вселенных уровня II, изучая такие свойства нашей вселенной, как интенсивность природных сил (левая диаграмма) и число наблюдаемых измерений пространства и времени (правая диаграмма). Значения этих параметров, установленные в ходе случайных процессов в период рождения вселенной, благоприятны для возникновения жизни. Логично предполагать, что существуют вселенные с иными свойствами.



если модель верна, то меньше чем один объем Хаббла из тысячи будет характеризоваться столь малыми пятнами, как наблюдаемые.

Из этого следует, что теория сверхвселенной поддается проверке и может быть отвергнута, хотя мы и не в состоянии видеть иные вселенные. Главное – предсказать, что представляет собой ансамбль параллельных вселенных, и найти распределение вероятностей или то, что математики называют мерой ансамбля. Наша Вселенная должна быть одной из наиболее вероятных. Если же нет, если в рамках теории сверхвселенной наша Вселенная окажется маловероятной, то эта теория столкнется с трудностями. Как мы увидим далее, проблема меры может стать весьма острой.

Уровень II Другие постинфляционные домены

Если вам трудно было представить сверхвселенную уровня I, то попробуйте вообразить бесконечное множество таких сверхвселенных, часть которых имеет иную размерность про-

странства-времени и характеризуется иными физическими константами. В совокупности они составляют сверхвселенную уровня II, предсказанную теорией хаотической вечной инфляции.

Теория инфляции – это обобщение теории Большого взрыва, позволяющее устранить недостатки последней, например, неспособность объяснить, почему Вселенная столь велика, однородна и плоска. Быстрое растяжение пространства в давние времена позволяет объяснить эти и многие другие свойства Вселенной. Такое растяжение предсказывается широким классом теорий элементарных частиц, и все имеющиеся свидетельства подтверждают его. Выражение «хаотическая вечная» по отношению к инфляции указывает на то, что происходит в самых крупных масштабах. В целом пространство постоянно растягивается, но в некоторых областях расширение прекращается, и возникают отдельные домены, как изюминки в поднимающемся тесте. Появляется бесконечное множество таких доменов, и каждый из них служит зародышем

сверхвселенной уровня I, заполненной веществом, рожденным энергией поля, вызывающего инфляцию.

Соседние домены удалены от нас более чем на бесконечность, в том смысле, что их невозможно достичь, даже если вечно двигаться со скоростью света, поскольку пространство между нашим доменом и соседними растягивается быстрее, чем можно перемещаться в нем. Наши потомки никогда не увидят своих двойников на уровне II. А если расширение Вселенной ускоряется, как о том свидетельствуют наблюдения, то они никогда не увидят своих двойников даже на уровне I.

Сверхвселенная уровня II гораздо разнообразнее сверхвселенной уровня I. Домены различаются не только начальными условиями, но и своими фундаментальными свойствами. У физиков преобладает мнение, что размерность пространства-времени, свойства элементарных частиц и многие так называемые физические константы не встроены в физические законы, а являются результатом процессов, известных как нарушение симметрии. Предполагают, что пространство в нашей Вселенной некогда имело девять равноправных измерений. В начале космической истории три из них приняли участие в расширении и стали теми тремя измерениями, которые характеризуют сегодняшнюю Вселенную. Шесть остальных сейчас невозможно обнаружить либо потому, что они остались микроскопическими, сохранив тороидальную топологию, либо потому, что вся материя сосредоточена в трехмерной поверхности (мембране, или просто бране) в девятимерном пространстве. Так была нарушена исходная симметрия измерений. Квантовые флуктуации, обуславливающие хаотическую инфляцию, могли вызвать различные нарушения симметрии в разных кавернах. Одни могли стать четырехмерными; другие – содержать только два, а не три поколения кварков; а третьи – иметь более сильную космологическую постоянную, чем наша Вселенная.

Другой путь возникновения сверхвселенной уровня II можно представить как цикл рождений и разрушений вселенных. В 1930-е гг. физик Ричард Толмен (Richard C. Tolman) высказал эту идею, а недавно Пол Стейнхардт (Paul J. Steinhardt) из Принстонского университета и Нил Тьюрок (Neil Turok) из Кембриджского университета развили ее. Модель Стейнхардта и Тьюрока предусматривает вторую трехмерную брану, совершенно параллельную нашей и лишь смещенную относительно нее в измерении более высокого порядка. Эту параллельную вселенную нельзя считать отдельной, поскольку она взаимодействует с нашей. Однако ансамбль вселенных – прошлых,

нынешних и будущих, который эти браны образуют, представляет собой сверхвселенную с разнообразием, по-видимому, близким к возникающему в результате хаотической инфляции. Еще одну гипотезу сверхвселенной предложил физик Ли Смолин (Lee Smolin) из Института Периметра в г. Ватерлоо (пров. Онтарио, Канада). Его сверхвселенная по разнообразию близка к уровню II, но она мутирует и порождает новые вселенные посредством черных дыр, а не бран.

Хотя мы и не можем взаимодействовать с параллельными вселенными уровня II, космологи судят об их существовании по косвенным признакам, поскольку они могут быть причиной странных совпадений в нашей Вселенной. Например, в гостинице вам предоставляют номер 1967, и вы отмечаете, что родились в 1967 г. «Какое совпадение», – говорите вы. Однако, подумав, приходите к выводу, что это не так уж и удивительно. В гостинице сотни номеров, и вам не пришлось бы в голову задумываться о чем-либо, если бы предложили номер, ничего для вас не значащий. Если бы вы ничего не знали о гостиницах, то для объяснения этого совпадения вы могли бы предположить, что в гостинице существуют и другие номера.

В качестве более близкого примера рассмотрим массу Солнца. Как известно, светимость звезды определяется ее массой. С помощью законов физики мы можем вычислить, что жизнь на Земле может существовать лишь при условии, что масса Солнца лежит в пределах: от $1,6 \times 10^{30}$ до $2,4 \times 10^{30}$ кг. В противном случае климат Земли был бы холоднее, чем на Марсе, или жарче, чем на Венере. Измерения массы Солнца дали значение $2,0 \times 10^{30}$ кг. На первый взгляд, попадание массы Солнца в интервал значений, обеспечивающий жизнь на Земле, является случайным. Массы звезд занимают диапазон от 10^{29} до 10^{32} кг; если бы Солнце приобрело свою массу случайно, то шанс попасть именно в оптимальный для нашей биосферы интервал был бы крайне мал. Кажущееся совпадение можно объяснить, предположив существование ансамбля (в данном случае – множества планетных систем) и фактора отбора (наша планета должна быть пригодной для жизни). Такие критерии отбора, связанные с наблюдателем, называют антропными; и хотя упоминание о них обычно вызывает полемику, все же большинство физиков согласно, что пренебрегать этими критериями при отборе фундаментальных теорий нельзя.

А какое отношение все эти примеры имеют к параллельным вселенным? Оказывается, не-

большое изменение физических констант, определяемых нарушением симметрии, приводит к качественно иной вселенной – такой, в которой мы бы не могли существовать. Будь масса протона больше всего на 0,2%, протоны распадались бы с образованием нейтронов, делая атомы нестабильными. Будь силы электромагнитного взаимодействия слабее на 4%, не существовало бы водорода и обычных звезд. Будь слабое взаимодействие еще слабее, не было бы водорода; а будь оно сильнее, сверхновые не могли бы заполнять межзвездное пространство тяжелыми элементами. Будь космологическая постоянная заметно больше, Вселенная невероятно раздулась бы еще до того, как смогли образоваться галактики.

Приведенные примеры позволяют ожидать существование параллельных вселенных с иными значениями физических констант. Теория сверхвселенной второго уровня предсказывает, что физики никогда не смогут вывести значения этих констант из фундаментальных принципов, а смогут лишь рассчитывать распределение вероятностей различных наборов констант в совокупности всех вселенных. При этом результат должен согласоваться с нашим существованием в одной из них.

Уровень III Квантовое множество вселенных

Сверхвселенные уровней I и II содержат параллельные вселенные, чрезвычайно удаленные от нас за пределы возможностей астрономии. Однако следующий уровень сверхвселенной лежит прямо вокруг нас. Он возникает из знаменитой и весьма спорной интерпретации квантовой механики – идеи о том, что случайные квантовые процессы заставляют вселенную «размножаться», образуя множество своих копий – по одной для каждого возможного результата процесса.

В начале XX в. квантовая механика объяснила природу атомного мира, который не подчинялся законам классической ньютоновской механики. Несмотря на очевидные успехи, среди физиков шли жаркие споры о том, в чем же истинный смысл новой теории. Она определяет состояние Вселенной не в таких понятиях классической механики, как положения и скорости всех частиц, а через математический объект, называемый волновой функцией. Согласно уравнению Шрёдингера, это состояние изменяется с течением времени таким образом, который математики определяют термином «унитарный». Он означает, что волновая функция вращается в абстрактном бесконечномерном

пространстве, называемом гильбертовым. Хотя квантовую механику часто определяют как принципиально случайную и неопределенную, волновая функция эволюционирует вполне детерминистским образом. В отношении нее нет ничего случайного или неопределенного.

Самое трудное – связать волновую функцию с тем, что мы наблюдаем. Многие допустимые волновые функции соответствуют противоестественным ситуациям вроде той, когда кошка одновременно и мертва, и жива в виде так называемой суперпозиции. В 20-е гг. XX в. физики обошли эту странность, постулировав, что волновая функция коллапсирует к некоторому определенному классическому исходу, когда кто-либо осуществляет наблюдение. Это дополнение позволило объяснить результаты наблюдений, но превратило изящную унитарную теорию в неряшливую и не унитарную. Принципиальная случайность, приписываемая обычно квантовой механике, является следствием именно этого постулата.

Со временем физики отказались от этой точки зрения в пользу другой, предложенной в 1957 г. выпускником Принстонского университета Хью Эвереттом (Hugh Everett III). Он показал, что можно обойтись и без постулата о коллапсе. Чистая квантовая теория не налагает никаких ограничений. Хотя она и предсказывает, что одна классическая реальность постепенно расщепляется на суперпозицию нескольких таких реальностей, наблюдатель субъективно воспринимает это расщепление просто как небольшую хаотичность с распределением вероятностей, в точности совпадающим с тем, которое давал старый постулат коллапса. Эта суперпозиция классических вселенных и есть сверхвселенная уровня III.

Более сорока лет такая интерпретация смущала ученых. Однако физическую теорию легче понять, сравнивая две точки зрения: внешнюю, с позиции физика, изучающего математические уравнения (подобно птице, оглядывающей пейзаж с высоты своего полета); и внутреннюю, с позиции наблюдателя (назовем его лягушкой), живущего на ландшафте, обозреваемом птицей.

С точки зрения птицы, сверхвселенная уровня III является простой. Существует всего одна волновая функция, которая плавно эволюционирует во времени без расщепления и параллелизма. Абстрактный квантовый мир, описываемый эволюционирующей волновой функцией, содержит в себе огромное количество непрерывно расщепляющихся и сливающихся линий параллельных классических историй, а также ряд квантовых явлений, не поддающихся описанию

в рамках классических представлений. Но с точки зрения лягушки, можно видеть только малую часть этой реальности. Она может видеть вселенную уровня I, однако процесс нарушения когерентности, подобный коллапсу волновой функции, но с сохранением унитарности, не позволяет ей видеть параллельные копии самой себя на уровне III.

Когда наблюдателю задают вопрос, на который он должен быстро дать ответ, квантовый эффект в его мозге приводит к суперпозиции решений вроде такой: «продолжать читать статью» и «бросить читать статью». С точки зрения птицы, акт принятия решения заставляет человека размножиться на копии, одни из которых продолжают читать, а другие прекращают чтение. Однако с внутренней точки зрения, ни один из двойников не знает о существовании других и воспринимает расщепление просто как небольшую неопределенность, некоторую вероятность продолжения или прекращения чтения.

Сколько бы странным это ни казалось, но точно такая же ситуация возникает даже в супервселенной уровня I. Очевидно, вы решили продолжать чтение, но кто-то из ваших двойников в далекой галактике отложил журнал после первого же абзаца. Уровни I и III различаются только тем, где находятся ваши двойники. На уровне I они живут где-то далеко, в добром старом трехмерном пространстве, а на уровне III – на другой квантовой ветви бесконечномерного гильбертова пространства.

Существование уровня III возможно лишь при условии, что эволюция волновой функции во времени унитарна. До сих пор эксперименты не выявили ее отклонений от унитарности. В последние десятилетия ее подтверждали для всех более крупных систем, включая фуллерен C60 и оптические волокна километровой длины. В теоретическом плане положение об унитарности было подкреплено открытием нарушения когерентности. Некоторые теоретики, работающие в области квантовой гравитации, ставят ее под сомнение. В частности, предполагается, что испаряющиеся черные дыры могут разрушать информацию, а это не унитарный процесс. Однако недавние достижения в теории струн позволяют считать, что даже квантовое тяготение является унитарным. Если это так, то черные дыры не разрушают информацию, а просто передают ее куда-то.

Если физика унитарна, стандартная картина влияния квантовых флуктуаций на начальных этапах Большого взрыва должна быть изменена. Эти флуктуации не случайным образом опреде-

ляют суперпозицию всех возможных начальных условий, которые сосуществуют одновременно. При этом нарушение когерентности заставляет начальные условия вести себя классическим образом на различных квантовых ветвях. Ключевое положение гласит: распределение исходов на разных квантовых ветвях одного объема Хаббла (уровень III) идентично распределению исходов в разных объемах Хаббла одной квантовой ветви (уровень I). Это свойство квантовых флуктуаций известно в статистической механике как эргодичность.

Эти же рассуждения применимы к уровню II. Процесс нарушения симметрии приводит не к однозначному исходу, а к суперпозиции всех исходов, которые быстро расходятся по своим отдельным путям. Таким образом, если физические константы, размерность пространства-времени и проч. могут различаться в параллельных квантовых ветвях на уровне III, то они будут так же различаться в параллельных вселенных на уровне II.

Иными словами, сверхвселенная уровня III не добавляет ничего нового к тому, что имеется на уровнях I и II, лишь большее число копий тех же самых вселенных – такие же исторические линии развиваются снова и снова на разных квантовых ветвях. Горячие споры вокруг теории Эверетта, похоже, скоро утихнут в результате открытия столь же грандиозных, но менее спорных сверхвселенных уровней I и II.

Приложения этих идей глубоки. Например, такой вопрос: происходит ли экспоненциальное увеличение числа вселенных со временем? Ответ неожиданный: нет. С точки зрения птицы, существует только одна квантовая вселенная. А каково число отдельных вселенных в данный момент для лягушки? Это число заметно различающихся объемов Хаббла. Различия могут быть невелики: представьте себе планеты, движущиеся в иных направлениях, вообразите себя с кем-то другим в браке и т.д. На квантовом уровне существуют 10^8 в степени 10^{118} вселенных с температурой не выше 10^8 К. Число гигантское, но конечное.

Для лягушки эволюция волновой функции соответствует бесконечному движению от одного из этих 10^8 в степени 10^{118} состояний к другому. Сейчас вы находитесь во вселенной A, где и читаете это предложение. А теперь вы уже во вселенной B, где читаете следующее предложение. Иначе говоря, в B есть наблюдатель, идентичный наблюдателю во вселенной A, с той лишь разницей, что у него есть лишние воспоминания. В каждый момент существуют все возможные состояния, так что течение времени может происходить перед глазами

наблюдателя. Эту мысль выразил в своем научно-фантастическом романе «Город перестановок» (1994 г.) писатель Грег Иган (Greg Egan) и развили физик Дэвид Дойч (David Deutsch) из Оксфордского университета, независимый физик Джулиан Барбу (Julian Barbour) и др. Как видим, идея сверхвселенной может играть ключевую роль в понимании природы времени.

Уровень IV Другие математические структуры

Начальные условия и физические константы в сверхвселенных уровнях I, II и III могут различаться, но фундаментальные законы физики одинаковы. Почему мы на этом остановились? Почему не могут различаться сами физические законы? Как насчет вселенной, подчиняющейся классическим законам без каких-либо релятивистских эффектов? Как насчет времени, движущегося дискретными шагами, как в компьютере? А как насчет вселенной в виде пустого додекаэдра? В сверхвселенной уровня IV все эти альтернативы действительно существуют.

О том, что такая сверхвселенная не является абсурдной, свидетельствует соответствие мира отвлеченных рассуждений нашему реальному миру. Уравнения и другие математические понятия и структуры – числа, векторы, геометрические объекты – описывают реальность с удивительным правдоподобием. И наоборот, мы воспринимаем математические структуры как реальные. Да они и отвечают фундаментальному критерию реальности: одинаковы для всех, кто их изучает. Теорема будет верна независимо от того, кто ее доказал – человек, компьютер или интеллектуальный дельфин. Другие любознательные цивилизации найдут те же математические структуры, какие знаем мы. Поэтому математики говорят, что они не создают, а открывают математические объекты.

Существуют две логичные, но диаметрально противоположные парадигмы соотношения математики и физики, возникшие еще в древние времена. Согласно парадигме Аристотеля, физическая реальность первична, а математический язык является лишь удобным приближением. В рамках парадигмы Платона, истинно реальны именно математические структуры, а наблюдатели воспринимают их несовершенно. Иными словами, эти парадигмы различаются пониманием того, что первично – лягушачья точка зрения наблюдателя (парадигма Аристотеля) или птичий взгляд с высоты законов физики (точка зрения Платона).

Парадигма Аристотеля – это то, как мы воспринимали мир с раннего детства, задолго до того, как впервые слышали о математике. Точка зрения Платона – это приобретенное знание. Современные физики-теоретики склоняются к ней, предполагая, что математика хорошо описывает Вселенную именно потому, что Вселенная математична по своей природе. Тогда вся физика сводится к решению математической задачи, и безгранично умный математик может лишь на основе фундаментальных законов рассчитать картину мира на уровне лягушки, т.е. вычислить, какие наблюдатели существуют во Вселенной, что они воспринимают и какие языки они избрели для передачи своего восприятия.

Математическая структура – абстракция, неизменная сущность вне времени и пространства. Если бы история была кинофильмом, то математическая структура соответствовала не одному кадру, а фильму в целом. Возьмем для примера мир, состоящий из частиц нулевых размеров, распределенных в трехмерном пространстве. С точки зрения птицы, в четырехмерном пространстве-времени траектории частиц представляют собой «спагетти». Если лягушка видит частицы движущимися с постоянными скоростями, то птица видит пучок прямых, не сваренных «спагетти». Если лягушка видит две частицы, обращающиеся по орбитам, то птица видит две «спагеттины», свитые в двойную спираль. Для лягушки мир описывают законы движения и тяготения Ньютона, для птицы – геометрия «спагетти», т.е. математическая структура. Сама лягушка для нее – толстый их клубок, сложное переплетение которых соответствует группе частиц, хранящих и перерабатывающих информацию. Наш мир сложнее рассмотренного примера, и ученые не знают, какой из математических структур он соответствует.

В парадигме Платона заключен вопрос: почему наш мир таков, каков он есть? Для Аристотеля это бессмысленный вопрос: мир есть, и он таков! Но последователи Платона интересуются: а мог бы наш мир быть иным? Если Вселенная математична по сути, то почему в ее основе лежит только одна из множества математических структур? Похоже, что фундаментальная асимметрия заключена в самой сути природы.

Чтобы разгадать головоломку, я выдвинул предположение, что математическая симметрия существует: что все математические структуры реализуются физически, и каждая из них соответствует параллельной вселенной. Элементы этой сверхвселенной не находятся в одном и том

же пространстве, но существуют вне времени и пространства. В большинстве из них, вероятно, нет наблюдателей. Гипотезу можно рассматривать как крайний платонизм, утверждающий, что математические структуры платоновского мира идей, или «умственного пейзажа» математика Руди Ракера (Rudy Rucker) из Университета Сан-Хосе, существуют в физическом смысле. Это сродни тому, что космолог Джон Барроу (John D. Barrow) из Кембриджского университета называл «р в небесах», философ Роберт Нозик (Robert Nozick) из Гарвардского университета описывал как «принцип плодovitости», а философ Дэвид Льюис (David K. Lewis) из Принстонского университета именовал «модальной реальностью». Уровень IV замыкает иерархию сверхвселенных, поскольку любая самосогласованная физическая теория может быть выражена в форме некой математической структуры.

Гипотеза о сверхвселенной уровня IV позволяет сделать несколько поддающихся проверке предсказаний. Как и на уровне II, она включает ансамбль (в данном случае – совокупность всех математических структур) и эффекты отбора. Занимаясь классификацией математических структур, ученые должны заметить, что структура, описывающая наш мир, является наиболее общей из тех, что согласуются с наблюдениями. Поэтому результаты наших будущих наблюдений должны стать наиболее общими из числа тех, которые согласуются с данными прежних исследований, а данные прежних исследований – самыми общими из тех, что вообще совместимы с нашим существованием.

Оценить степень общности – непростая задача. Одна из поразительных и обнадеживающих черт математических структур состоит в том, что свойства симметрии и инвариантности, обеспечивающие простоту и упорядоченность нашей Вселенной, как правило, являются общими. Математические структуры обычно обладают этими свойствами по умолчанию, и для избавления от них требуется введение сложных аксиом.

Что говорил Оккам?

Таким образом, теории параллельных вселенных имеют четырехуровневую иерархию, где на каждом следующем уровне вселенные все менее напоминают нашу. Они могут характеризоваться различными начальными условиями (уровень I), физическими константами и частицами (уровень II) или физическими законами (уровень IV). Забавно, что наибольшей критике в последние десятилетия подвергался уровень III как единст-

венный, не вводящий качественно новых типов вселенных.

В грядущем десятилетии детальные измерения реликтового излучения и крупномасштабного распределения вещества во Вселенной позволят точнее определить кривизну и топологию пространства и подтвердить или опровергнуть существование уровня I. Эти же данные позволят получить сведения об уровне II путем проверки теории хаотической вечной инфляции. Успехи астрофизики и физики частиц высоких энергий помогут уточнить степень тонкой настройки физических констант, подкрепив или ослабив позиции уровня II.

Если усилия по созданию квантового компьютера будут успешными, появится дополнительный довод в пользу существования уровня III, поскольку для параллельных вычислений будет использоваться параллелизм этого уровня. Экспериментаторы ищут также свидетельства нарушения унитарности, которые позволят отвергнуть гипотезу о существовании уровня III. Наконец, успех или провал попытки решить главнейшую задачу современной физики – объединить общую теорию относительности с квантовой теорией поля – даст ответ на вопрос об уровне IV. Либо будет найдена математическая структура, точно описывающая нашу Вселенную, либо мы наткнемся на предел невероятной эффективности математики и будем вынуждены отказаться от гипотезы об уровне IV.

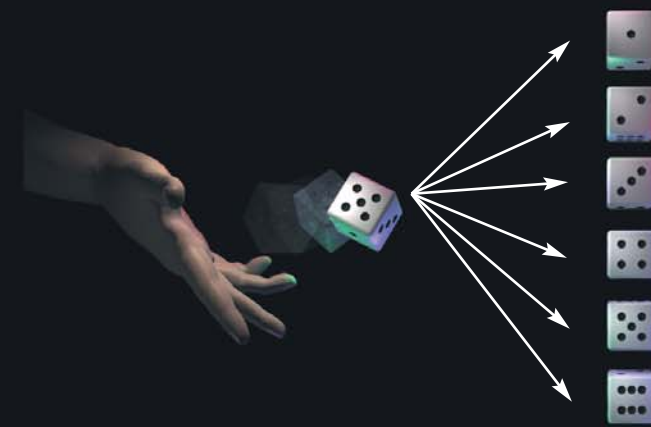
Итак, можно ли верить в параллельные вселенные? Основные доводы против их существования сводятся к тому, что это слишком расточительно и непостижимо. Первый аргумент состоит в том, что теории сверхвселенной уязвимы для «бритвы Оккама»*, поскольку они постулируют существование других вселенных, которые мы никогда не увидим. Зачем природе быть столь расточительной и «развлекаться» созданием бесконечного числа различных миров? Однако этот аргумент можно обратить в пользу существования сверхвселенной. В чем именно расточительна природа? Разумеется, не в пространстве, массе или количестве атомов: их бесконечно много уже содержится на уровне I, существование которого не вызывает сомнений, так что нет смысла беспокоиться, что природа потратит их еще сколько-то. Реальный вопрос состоит в кажущемся уменьшении простоты. Скептиков беспокоит

* Уильям Оккам (William Occam) – философ-схоласт XIV в., утверждавший, что понятия, не сводимые к интуитивному и опытному знанию, должны изгоняться из науки (принцип «бритвы Оккама»).

СВЕРХВСЕЛЕННАЯ УРОВНЯ III

Квантовая механика, обобщая понятие «в другом месте», предсказывает существование множества параллельных вселенных, расположенных в абстрактном пространстве

всех возможных состояний и проявляющих себя в таких лабораторных экспериментах, как интерференция волн и квантовые вычисления.

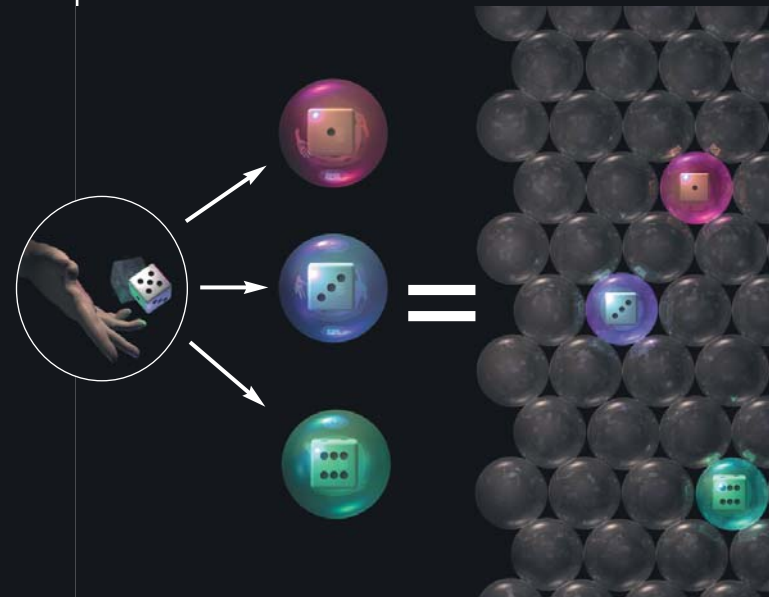


КВАНТОВЫЕ КОСТИ

Вообразите игральную кость, случайность выпадения сторон которой имеет чисто квантовую природу. Тогда, согласно квантовой механике, все шесть чисел должны выпадать одновременно, но вы наблюдаете иное; значит, можно предположить, что разные числа выпадают в разных вселенных. В каждой шестой из них выпадает 1, в другой шестой – 2 и т.д. Находясь в одной из вселенных, мы можем воспринимать только часть полной квантовой реальности.

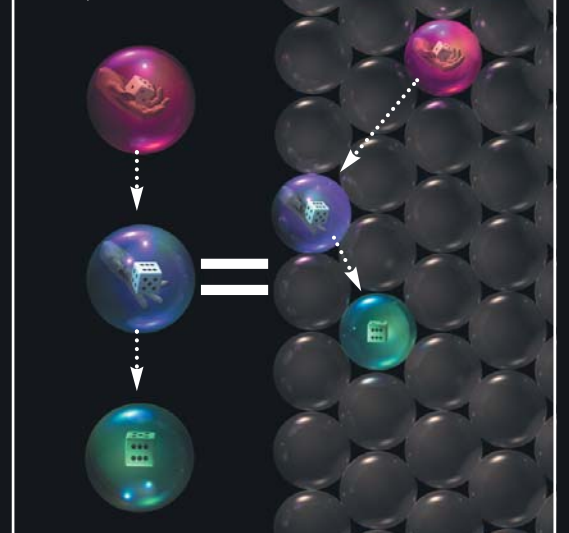
ЭРГОДИЧНОСТЬ

Согласно принципу эргодичности, квантовые параллельные вселенные эквивалентны более прозаичным типам параллельных вселенных. Со временем квантовая вселенная распадается на ряд новых вселенных (слева), которые не отличаются от уже существующих, например от других вселенных уровня I (справа). Важно, что параллельные вселенные любого типа охватывают различные пути развития событий.



ПРИРОДА ВРЕМЕНИ

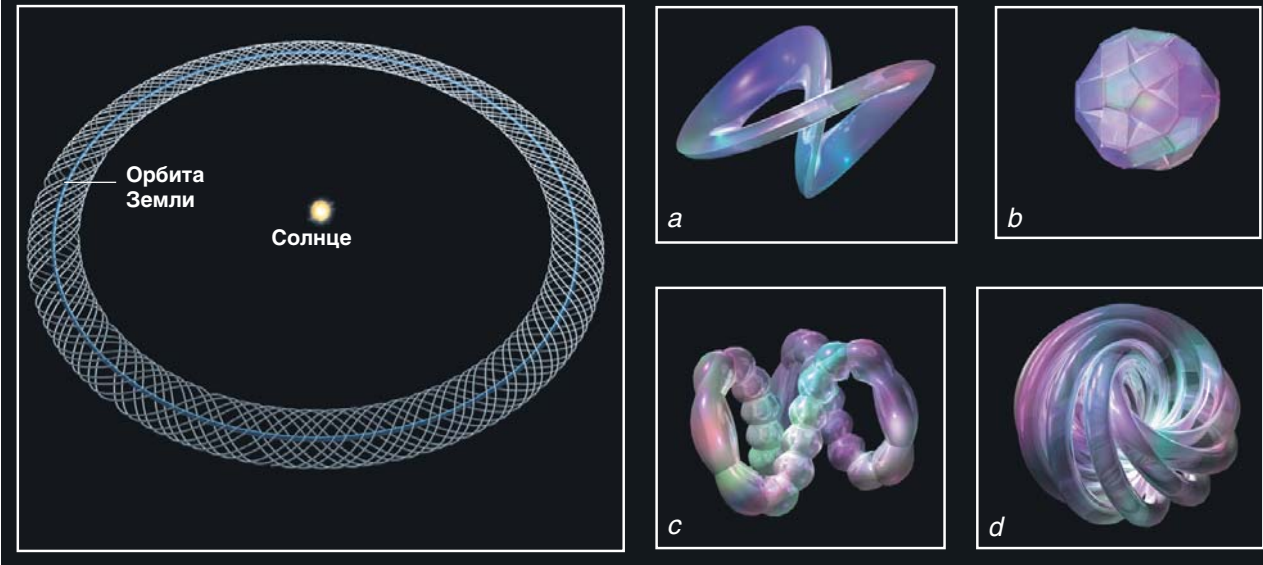
Большинство людей считает время средством описания изменений. В один момент вещество расположено одним образом, а в другой – уже иным (слева). Концепция множества вселенных подразумевает другую точку зрения. Если параллельные вселенные содержат все возможные расположения вещества (справа), то время – это просто средство размещения вселенных в последовательном порядке. Сами вселенные при этом представляются статичными, а все изменения являются иллюзией.



СВЕРХВСЕЛЕННАЯ УРОВНЯ IV

Вселенные могут различаться не только местоположением, космологическими свойствами или квантовыми состояниями, но и законами физики. Они существуют вне времени и пространства, и их почти невозможно изобразить. Человек может рассматривать их только абстрактно как статические скульптуры, представляющие математические структуры физических законов, которые управляют ими. Рассмотрим про-

стую вселенную, состоящую из Солнца, Земли и Луны, подчиняющихся законам Ньютона. Для объективного наблюдателя такая вселенная представляется кольцом (орбита Земли, «размазанная» во времени), обернутым «оплеткой» (орбита Луны вокруг Земли). Другие формы олицетворяют иные физические законы (a, b, c, d). Этот подход позволяет разрешить ряд фундаментальных проблем физики.



дополнительная информация, необходимая для описания невидимых миров.

Однако весь ансамбль часто бывает проще каждого из своих членов. Информационный объем алгоритма числа есть, грубо говоря, выраженная в битах длина самой короткой компьютерной программы, генерирующей это число. Возьмем для примера множество всех целых чисел. Что проще – все множество или отдельное число? На первый взгляд – второе. Однако первое можно построить с помощью очень простой программы, а отдельное число может быть чрезвычайно длинным. Поэтому все множество оказывается проще.

Аналогично, множество всех решений уравнений Эйнштейна для поля проще каждого конкретного решения – первое состоит всего из нескольких уравнений, а второе требует задания огромного количества начальных данных на некой гиперповерхности. Итак, сложность возрастает, когда мы сосредоточиваем внимание на отдельном элементе ансамбля, теряя симметрию и простоту, свойственные совокупности всех элементов.

В этом смысле сверхвселенные более высоких уровней проще. Переход от нашей Вселенной к сверхвселенной уровня I исключает необходимость задавать начальные условия. Дальнейший

переход к уровню II устраняет необходимость задавать физические константы, а на уровне IV вообще ничего задавать не нужно. Чрезмерная сложность – это лишь субъективное восприятие, точка зрения лягушки. А с позиции птицы, эта сверхвселенная едва ли может быть еще проще.

Жалобы на непостижимость имеют эстетическую, а не научную природу и оправданы лишь при аристотелевском мировосприятии. Когда мы задаем вопрос о природе реальности, не следует ли нам ожидать ответа, который может показаться странным?

Общее свойство всех четырех уровней сверхвселенной состоит в том, что простейшая и, по видимому, самая изящная теория по умолчанию включает в себя параллельные вселенные. Чтобы отвергнуть их существование, нужно усложнить теорию, добавив не подтверждаемые экспериментом процессы и придуманные для этого постулаты – о конечности пространства, коллапсе волновой функции и онтологической асимметрии. Наш выбор сводится к тому, что считать более расточительным и неэкономным – множество слов или множество вселенных. Возможно, со временем мы привыкнем к причудам нашего космоса и сочтем его странность очаровательной. ■

(«В мире науки», №8, 2003)

МИФ О НАЧАЛЕ ВРЕМЕН

Габриель Венециано

Согласно теории струн,
Большой взрыв был не началом образования Вселенной,
а лишь следствием ее предыдущего состояния.

Был ли Большой взрыв началом времени или Вселенная существовала и до него? Лет десять назад такой вопрос казался нелепым. В размышлениях о том, что было до Большого взрыва, космологи видели не больше смысла, чем в поисках пути, идущего от Северного полюса на север. Но развитие теоретической физики и, в частности, появление теории струн заставило ученых снова задуматься о предначальной эпохе.

Вопрос о начале начал занимал философов и богословов с давних времен. Он переплетается с множеством фундаментальных проблем, нашедших свое отражение в знаменитой картине Поля Гогена *«D’ou venons-nous? Que sommes-nous? Ou allons-nous?»* («Откуда мы пришли? Кто мы такие? Куда мы идем?»). Полотно изображает извечный цикл: рождение, жизнь и смерть – происхождение, идентификация и предназначение каждого индивидуума. Пытаясь разобраться в своем происхождении, мы возводим свою родословную к минувшим поколениям, ранним формам жизни и протожизни, химическим элементам, возникшим в молодой Вселенной и, наконец, к аморфной энергии, некогда заполнявшей пространство. Уходит ли наше фамильное древо корнями в бесконечность или космос так же не вечен, как и мы?

Еще древние греки ожесточенно спорили о происхождении времени. Аристотель отвергал идею о наличии некоего начала, объясняя это тем, что из ничего ничто не возникает. А поскольку Вселенная не могла возникнуть из небытия, значит, она существовала всегда. Таким образом, время должно бесконечно простираться в прошлое и в будущее. Христианские богословы отстаивали противоположную точку зрения. Так, Блаженный Августин утверждал, что Бог существует вне пространства и времени и может создавать их точно так же, как и другие аспекты нашего мира. На вопрос «Что Бог делал *прежде*, чем создал мир?» знаменитый теолог отвечал: «Время само является частью божьего творения, просто не было никакого *прежде*!»

Современные космологи пришли к похожему заключению на основании общей теории относительности Эйнштейна, согласно которой пространство и время – мягкие, податливые сущности. Во вселенских масштабах пространство по своей природе динамично: со временем оно расширяется или сокращается, увлекая за собой материю. В 1920-х гг. астрономы подтвердили, что наша Вселенная в настоящее время расширяется: галактики удаляются друг от друга. Из этого следует, что время не может бесконечно простираться в прошлое – еще в 1960-х гг. это доказали Стивен Хокинг (Steven Hawking) и Роджер Пенроуз (Roger Penrose). Если мы будем просматривать космическую историю в обратном порядке, то увидим, как все галактики будто проваливаются в черную дыру и сжимаются в единственную бесконечно малую точку – сингулярность. При этом плотность материи, ее температура и кривизна пространства-времени обращаются в бесконечность. На сингулярности наша космическая родословная обрывается и дальше в прошлое простираться не может.

Странное совпадение

Неизбежная сингулярность представляет собой серьезную космологическую проблему. В частности, она плохо согласуется с высокой степенью однородности и изотропности, которой характеризуется Вселенная в глобальном масштабе. Раз уж космос в широком смысле слова стал всюду одинаковым, значит, между отдаленными областями пространства существовала какая-то связь, координировавшая его свойства. Однако это противоречит старой космологической парадигме.

Давайте рассмотрим, что произошло за 13,7 млрд лет, прошедших с момента возникновения реликтового излучения. Из-за расширения Вселенной расстояние между галактиками выросло в 10 тыс. раз, тогда как радиус наблюдаемой Вселенной увеличился значительно больше – приблизительно в 1 млн раз (потому что скорость света

превышает скорость расширения). Сегодня мы наблюдаем те области Вселенной, которые не могли бы видеть 13,7 млрд. лет назад. Впервые в космической истории свет от наиболее отдаленных галактик достиг Млечного Пути.

Тем не менее свойства Млечного Пути в основном такие же, как у отдаленных галактик. Если на вечеринке вы встретите двух одинаково одетых людей, то это можно объяснить простым совпадением. Однако если в похожих нарядах будут десять человек – значит, они заранее договорились о форме одежды. Сегодня мы наблюдаем десятки тысяч независимых участков небесной сферы со статистически идентичными характеристиками реликтового фона. Возможно, такие области пространства уже при рождении были одинаковыми, т.е. однородность Вселенной – простое совпадение. Однако физики придумали два более правдоподобных объяснения: на начальной стадии развития Вселенная была либо намного меньше, либо намного старше, чем считалось раньше.

Чаще всего предпочтение отдается первой альтернативе. Считается, что молодая Вселенная прошла период инфляции, т.е. ускоряющегося расширения. До него галактики (точнее, их прародители) были очень плотно упакованы и поэтому стали похожи друг на друга. Во время инфляции они потеряли контакт, ибо свет не успевал за неистовым расширением. Когда инфляция закончилась, расширение начало замедляться и галактики снова оказались в поле зрения друг друга.

ОБЗОР: СТРУННАЯ КОСМОЛОГИЯ

- С давних пор философы спорят о том, есть ли у Вселенной определенное происхождение или она существовала всегда. Общая теория относительности подразумевает конечность бытия – расширяющаяся Вселенная должна была возникнуть в результате Большого взрыва.
- Однако в самом начале Большого взрыва теория относительности не действовала, поскольку все происходившее в тот момент процессы носили квантовый характер. В теории струн, которая претендует на звание квантовой теории гравитации, вводится новая фундаментальная физическая постоянная – минимальный квант длины. В результате старый сценарий Вселенной, рожденной в Большом взрыве, становится несостоятельным.
- Большой взрыв все же имел место, но плотность материи в тот момент не была бесконечной, а Вселенная, возможно, существовала и до него. Симметрия теории струн предполагает, что у времени нет ни начала, ни конца. Вселенная могла возникнуть почти пустой и сформироваться к моменту Большого взрыва или пройти несколько циклов гибели и возрождения. В любом случае эпоха до Большого взрыва оказала огромное влияние на современный космос.

Виновицей стремительного инфляционного всплеска физики считают потенциальную энергию, накопленную спустя 10^{-35} с после Большого взрыва в особом квантовом поле – инфлатоне. Потенциальная энергия в отличие от массы покоя и кинетической энергии приводит к гравитационному отталкиванию. Тяготение обычной материи замедляло бы расширение, а инфлатон, напротив, ускорял его. Появившаяся в 1981 г. теория инфляции точно объясняет результаты целого ряда наблюдений (см. «Четыре ключа к космологии», стр. 13). Однако до сих пор не ясно, что представлял собой инфлатон и откуда у него взялось столько потенциальной энергии.

Вторая альтернатива подразумевает отказ от сингулярности. Если время началось не в момент Большого взрыва, а Вселенная возникла задолго до начала нынешнего космического расширения, то у материи было достаточно времени, чтобы плавно самоорганизоваться. Поэтому ученые решили пересмотреть рассуждения, приводящие к мысли о сингулярности.

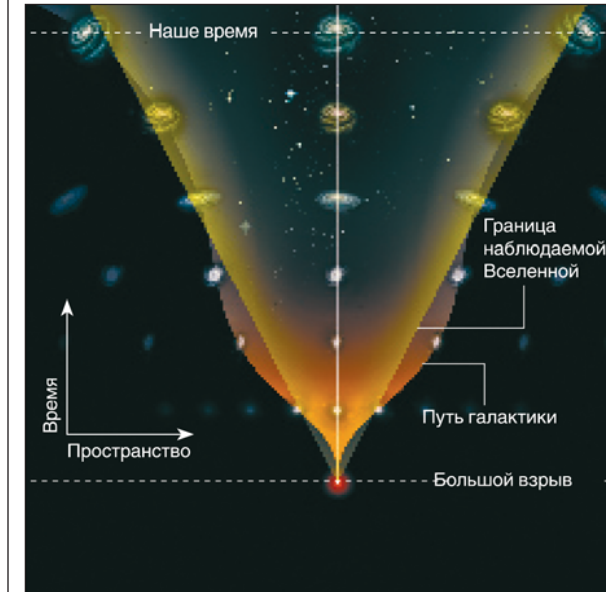
Весьма сомнительным представляется предположение о том, что теория относительности справедлива всегда. Ведь в ней не учитываются квантовые эффекты, которые должны были доминировать вблизи сингулярности. Чтобы окончательно во всем разобраться, нужно включить общую теорию относительности в квантовую теорию гравитации. Над этой задачей теоретики бились со времен Эйнштейна, но лишь в середине 1980-х гг. дело сдвинулось с мертвой точки.

Эволюция революции

Сегодня рассматриваются два подхода. В теории петлевой квантовой гравитации теория относительности сохраняется по существу нетронутой, изменяется только процедура ее применения в квантовой механике (см. статью Ли Смолина «Атомы пространства и времени», «В мире науки», №4, 2004 г.). В последние годы сторонники петлевой квантовой гравитации добились больших успехов и достигли глубокого понимания, однако их подход недостаточно кардинален для решения фундаментальных проблем квантования тяготения. С похожей проблемой столкнулись специалисты по теории элементарных частиц. В 1934 г. Энрико Ферми (Enrico Fermi) предложил эффективную теорию слабого ядерного взаимодействия, но попытки построить ее квантовый вариант поначалу потерпели фиаско. Требовалась не новая методика, а концептуальные изменения, которые были воплощены в теории электрослабого взаимо-

ДВЕ ВЕРСИИ НАЧАЛА

В нашей расширяющейся Вселенной галактики разбегаются, словно рассеивающаяся толпа. Они удаляются друг от друга со скоростью, пропорциональной расстоянию между ними: галактики, разделенные 500 млн. световых лет, разбегаются вдвое быстрее, чем галактики, разнесенные на 250 млн. световых лет. Таким образом, все наблюдаемые нами галактики должны были в момент Большого взрыва одновременно стартовать из одного и того же места. Это справедливо даже в том случае, если космическое расширение проходит периоды ускорения и замедления. На диаграммах пространства и времени (см. ниже) галактики перемещаются по извилистым путям в наблюдаемую часть пространства и из нее (желтый клин). Однако пока точно не известно, что же происходило в тот момент, когда галактики (или их предшественники) начали разлетаться.



В стандартной модели с Большим взрывом, основанной на общей теории относительности, расстояние между любыми двумя галактиками в определенный момент нашего прошлого равнялось нулю. До этого момента время не имеет смысла.



В моделях, учитывающих квантовые эффекты, в момент старта любые две галактики были разделены некоторым минимальным расстоянием. Такие сценарии не исключают возможности существования Вселенной до Большого взрыва.

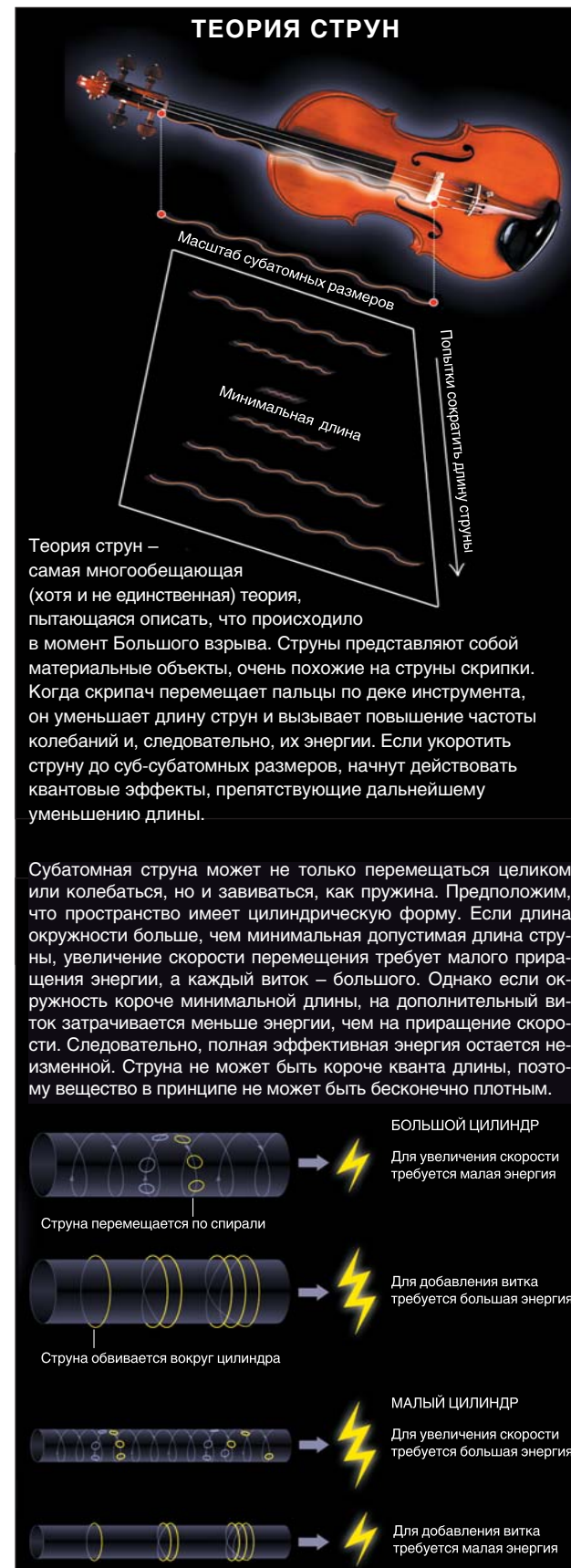
действия, предложенной Шелдоном Глэшоу (Sheldon Glashow), Стивеном Вейнбергом (Steven Weinberg) и Абдусом Саламом (Abdus Salam) в конце 1960-х гг.

Более обещающим мне представляется второй подход – теория струн, действительно революционная модификация теории Эйнштейна. Она выросла из модели, предложенной мною в 1968 г. для описания ядерных частиц (протонов и нейтронов) и их взаимодействий. К сожалению, модель оказалась не совсем удачной, и через несколько лет от нее отказались, предпочтя квантовую хромодинамику, согласно которой протоны и нейтроны состоят из кварков. Последние ведут себя так, словно связаны между собой упругими струнами. Изначально теория струн была посвящена описанию струнных свойств ядерного мира. Однако вскоре ее стали рассматривать как возможный вариант объеди-

нения общей теории относительности и квантовой механики.

Основная идея состоит в том, что элементарные частицы – не точечные, а бесконечно тонкие одномерные объекты, называемые струнами. Обширное семейство разнообразных элементарных частиц отражено множеством возможных форм колебаний струны. Как же столь бесхитростная теория описывает сложный мир частиц и их взаимодействий? Секрет в так называемой магии квантовых струн. Как только правила квантовой механики применяются к вибрирующей струне, вдоль которой колебания распространяются со скоростью света, у нее появляются новые свойства, тесно связанные с физикой элементарных частиц и космологией.

Во-первых, квантовые струны имеют конечный размер. Обычную (неквантовую) скрипичную струну можно было бы разрезать пополам,



затем одну из половинок снова порвать на две части и так далее, пока не получилась бы точечная частица с нулевой массой. Однако принцип неопределенности Гейзенберга не позволяет нам разделить струну на части длиной меньше, чем приблизительно 10^{-34} м. Мельчайший квант длины обозначается l_s и представляет собой природную константу, которая в теории струн стоит в одном ряду со скоростью света c и постоянной Планка h .

Во-вторых, даже безмассовые квантовые струны могут иметь угловой момент. В классической физике тело с нулевой массой не может обладать угловым моментом, поскольку он определяется как произведение скорости, массы и расстояния до оси. Но квантовые флуктуации изменяют ситуацию. Угловой момент крошечной струны может достигать $2h$, даже если ее масса равняется нулю, что в точности соответствует свойствам переносчиков всех известных фундаментальных сил, таких как фотон и гравитон. Исторически именно эта особенность углового момента привлекла внимание к теории струн как к кандидату на звание теории квантовой гравитации.

В-третьих, квантовые струны требуют существования дополнительных пространственных измерений. Классическая скрипичная струна будет колебаться независимо от того, каковы свойства пространства и времени. Квантовая струна более привередлива: уравнения, описывающие ее колебания, остаются непротиворечивыми только в том случае, если пространство-время сильно искривлено (что противоречит наблюдениям) или содержит шесть дополнительных измерений.

В-четвертых, физические постоянные, которые определяют свойства природы и входят в уравнения, отражающие закон Кулона и закон всемирного тяготения, перестают быть независимыми, фиксированными константами. В теории струн их значения динамически задаются полями, похожими на электромагнитное. Возможно, напряженность полей была неодинакова на протяжении различных космологических эпох или в отдаленных областях пространства. Теория струн получит серьезное экспериментальное подтверждение, если ученым удастся зарегистрировать хотя бы незначительное изменение физических констант.

Центральное место в теории струн занимает одно из таких полей – дилатон. Оно определяет общую силу всех взаимодействий. Величину дилатона можно истолковать как размер дополнительного пространственного измерения – 11-го по счету.

Связывание свободных концов

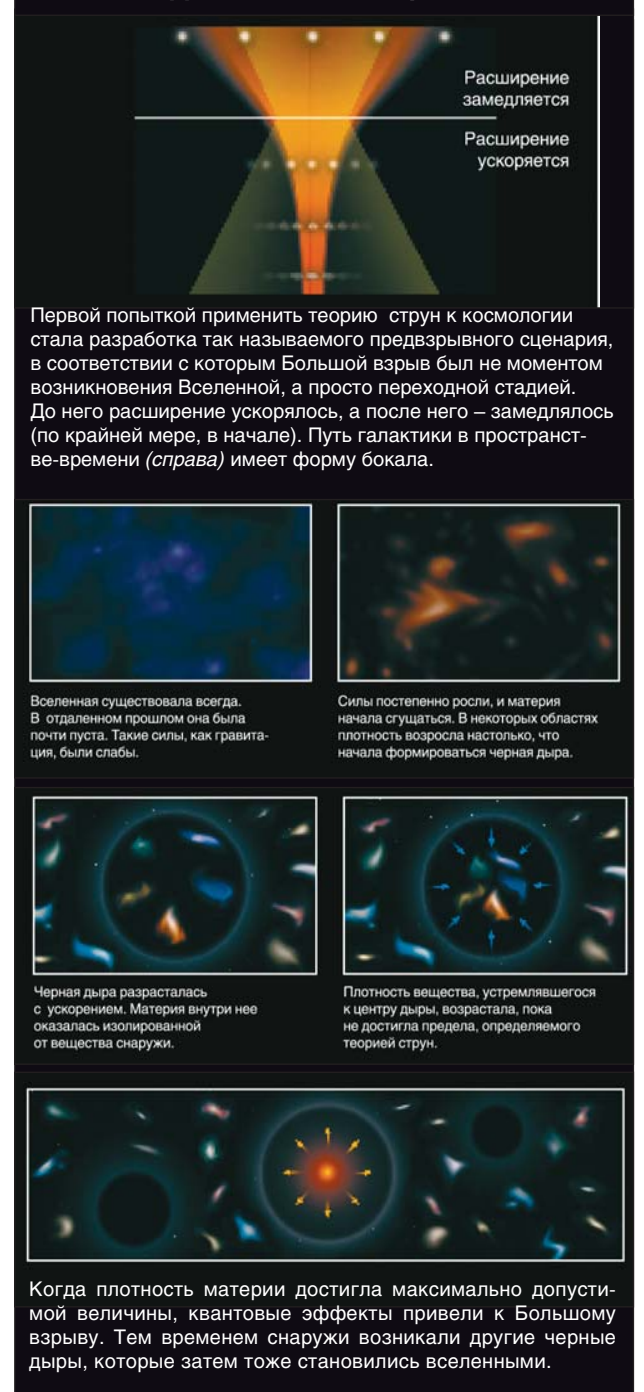
Наконец квантовые струны помогли физикам открыть новый вид природной симметрии – дуализм, который изменяет наше интуитивное представление о том, что происходит, когда объекты становятся чрезвычайно малыми. Я уже ссылаясь на одну из форм дуализма: обычно длинная струна тяжелее, чем короткая, но если мы попытаемся сделать ее короче фундаментальной длины l_s , то она снова начнет тяжелеть.

Поскольку струны могут двигаться более сложными способами, чем точечные частицы, существует и другая форма симметрии – Т-дуализм, который выражается в том, что маленькие и большие дополнительные измерения эквивалентны. Рассмотрим замкнутую струну (петлю), расположенную в цилиндрическом пространстве, круговое сечение которого представляет собой одно конечное дополнительное измерение. Струна может не только колебаться, но и вращаться вокруг цилиндра или наматываться на него (см. рис. на стр. 32).

Энергетическая стоимость обоих состояний струны зависит от размеров дополнительного измерения. Энергия наматывания прямо пропорциональна его радиусу: чем больше цилиндр, тем сильнее растягивается струна и тем больше энергии она запасает. Сдругой стороны, энергия, связанная с вращением, обратно пропорциональна радиусу: цилиндрам большего радиуса соответствуют более длинные волны, а значит, более низкие частоты и меньшие значения энергии. Если большой цилиндр заменить малым, два состояния движения могут поменяться ролями: энергия, связанная с вращением, может быть обеспечена наматыванием и наоборот. Внешний наблюдатель замечает только величину энергии, а не ее происхождение, поэтому для него большой и малый радиусы физически эквивалентны.

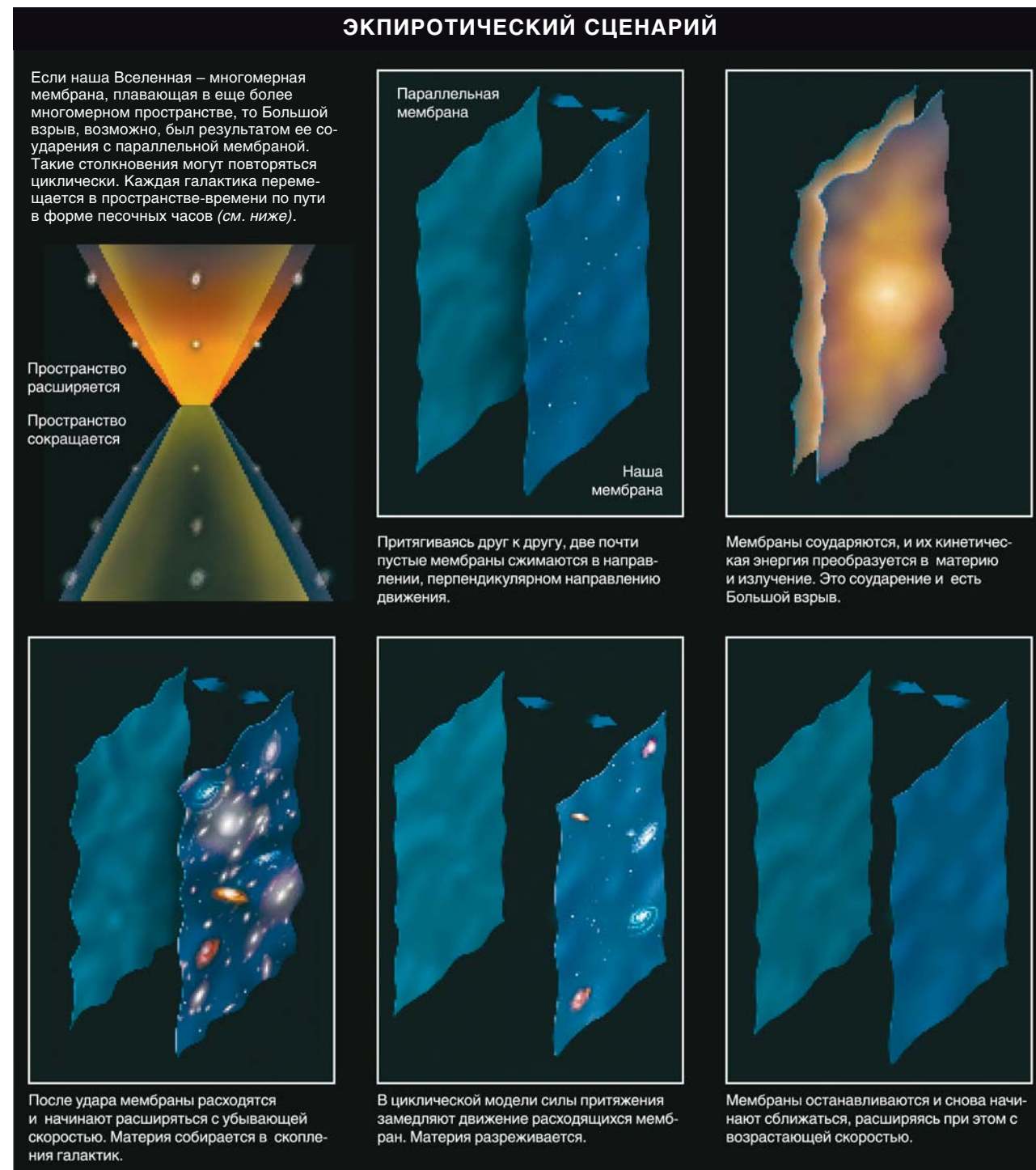
Хотя Т-дуализм обычно описывается на примере цилиндрических пространств, в которых одно из измерений (окружность) конечно, один из его вариантов применяется к обычным трем измерениям, которые, похоже, простираются безгранично. О расширении бесконечного пространства нужно говорить с осторожностью. Его полный размер не может измениться и остается бесконечным. Но все же оно способно расширяться в том смысле, что расположенные в нем тела (например галактики) могут удаляться друг от друга. В данном случае значение имеет не размер пространства в целом, а его масштабный коэффициент, в соответствии с которым происходит изменение расстояний между галактиками и их скоплениями, заметное по красному смещению.

ПРЕДВЗРЫВНОЙ СЦЕНАРИЙ



Согласно принципу Т-дуализма, вселенные и с малыми, и с большими масштабными коэффициентами эквивалентны. В уравнениях Эйнштейна такой симметрии нет; она является следствием унификации, заключенной в теории струн, причем центральную роль здесь играет дилатон.

Когда-то бытовало мнение, что Т-дуализм присущ только замкнутым струнам, поскольку



открытые струны не могут наматываться, так как их концы свободны. В 1995 г. Йозеф Полчински (Joseph Polchinski) из Калифорнийского университета в Санта-Барбаре показал, что принцип Т-дуализма применим к открытым струнам в том случае, когда переход от больших радиусов к малым сопровождается изменением условий на концах струны. До этого физики считали, что на

концы струн не действуют никакие силы и они абсолютно свободны. Вместе с тем Т-дуализм обеспечивается так называемыми граничными условиями Дирихле, при которых концы струн оказываются зафиксированными.

Условия на границе струны могут быть смешанными. Например, электроны могут оказаться струнами, чьи концы закреплены в семи

пространственных измерениях, но свободно движутся в пределах трех остальных, образующих подпространство, известное как мембрана Дирихле, или D-мембрана. В 1996 г. Петр Хорава (Petr Horava) из Калифорнийского университета и Эдвард Уиттен (Edward Witten) из Института специальных исследований в Принстоне, штат Нью-Джерси, предположили, что наша Вселенная расположена как раз на такой мембране (см. статьи «Информация в голографической Вселенной», «В мире науки», №11, 2003 г., и «Кто нарушил закон тяготения?», стр. 61). Наша неспособность воспринимать все 10-мерное величие пространства объясняется ограниченной подвижностью электронов и других частиц.

Приручение бесконечности

Все волшебные свойства квантовых струн указывают на то, что они ненавидят бесконечность. Струны не могут стянуться в бесконечно малую точку, и поэтому им не свойственны парадоксы, связанные с коллапсом. Отличие их размера от нуля и новые виды симметрии задают верхние границы для возрастающих физических величин и нижние – для убывающих. Специалисты по теории струн полагают, что, если проигрывать историю Вселенной назад, то кривизна пространства-времени будет расти. Однако она не станет бесконечной, как в традиционной сингулярности Большого взрыва: в некоторый момент ее значение достигнет максимума и снова начнет уменьшаться. До появления теории струн физики отчаянно пытались придумать механизм, который мог бы так чисто устранить сингулярность.

Условия вблизи нулевого момента времени, соответствующего началу Большого взрыва, настолько экстремальны, что никто пока не знает, как решать соответствующие уравнения. Тем не менее специалисты по теории струн берут на себя смелость высказывать догадки о том, что представляла собой Вселенная до Большого взрыва. Сейчас в ходу две модели.

Первую из них, известную как предвзрывной сценарий, мы начали разрабатывать в 1991 г. В ней принцип Т-дуализма объединяется с более известной симметрией обращения времени, в силу которой физические уравнения работают одинаково хорошо независимо от направления времени. Такая комбинация позволяет говорить о новых возможных вариантах космологии, в которых Вселенная, скажем, за 5 с до Большого взрыва расширялась с такой же скоростью, как и через 5 с после него. Однако изменение скорости расширения в эти моменты происходило

в противоположных направлениях: если после Большого взрыва расширение замедлялось, то перед ним – ускорялось. Короче говоря, Большой взрыв, возможно, был не моментом возникновения Вселенной, а просто внезапным переходом от ускорения к замедлению.

Прелесть такой картины состоит в том, что она автоматически подразумевает более глубокое понимание теории инфляции: Вселенная должна была пройти период ускорения, чтобы стать настолько однородной и изотропной. В стандартной теории ускорение после Большого взрыва происходит под действием введенного специально для этой цели инфлатона. В предвзрывном сценарии оно происходит перед взрывом как естественное следствие новых видов симметрии в теории струн.

В соответствии с такой моделью Вселенная перед Большим взрывом была почти идеальным зеркальным изображением самой себя после него (см. рис. на стр. 40). Если Вселенная безгранично устремляется в будущее, в котором ее содержимое разжижается до скудной кашицы, то она так же бескрайне простирается и в прошлое. Бесконечно давно она была почти пуста: ее заполнял лишь невероятно разреженный, хаотический газ из излучения и вещества. Силы природы, управляемые дилатоном, были настолько слабы, что частицы этого газа практически не взаимодействовали друг с другом.

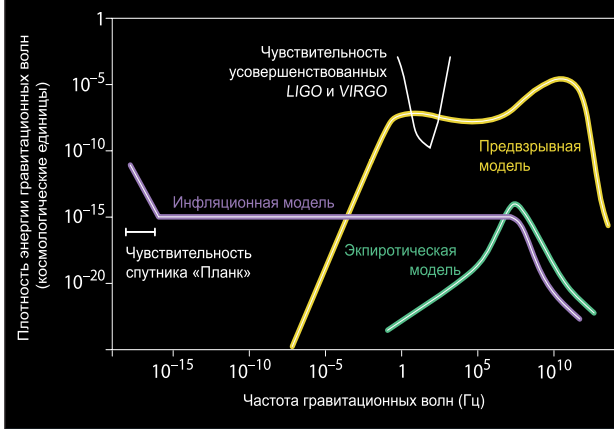
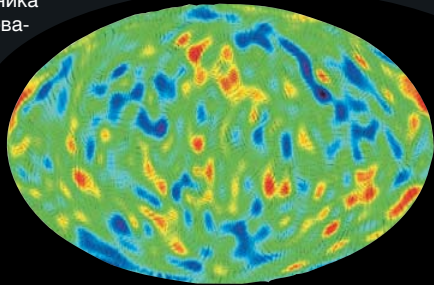
Но время шло, силы возрастали и стягивали материю воедино. Случайным образом материя скапливалась в некоторых участках пространства. Там ее плотность в конечном счете стала настолько высокой, что начали образовываться черные дыры. Вещество внутри таких областей оказывалось отрезанным от окружающего пространства, т.е. Вселенная разбивалась на обособленные части.

Внутри черной дыры пространство и время меняются ролями: ее центр – не точка пространства, а момент времени. Падающая в черную дыру материя, приближаясь к центру, становится все более плотной. Но, достигнув максимальных значений, допускаемых теорией струн, плотность, температура и кривизна пространства-времени внезапно начинают уменьшаться. Момент такого реверсирования и есть то, что мы называем Большим взрывом. Внутренность одной из описанных черных дыр и стала нашей Вселенной.

Неудивительно, что столь необычный сценарий вызвал множество споров. Так, Андрей Линде (Andrei Linde) из Стэнфордского университета утверждает, что для того, чтобы такая модель

ПРЕДВЗРЫВНОЙ СЦЕНАРИЙ

Не исключено, что изучить эпоху до Большого взрыва нам поможет гравитационное излучение, возможно, сохранившееся с тех далеких времен. Периодические вариации гравитационного поля можно зарегистрировать косвенно по их влиянию на поляризацию реликтового излучения (см. модель ниже) или непосредственно в наземных обсерваториях. Согласно предвзрывному и экпиротическому сценариям гравитационных волн, высокой частоты должно быть больше, а низкочастотных – меньше, чем в обычных инфляционных моделях (см. внизу). В недалеком будущем результаты наблюдений, которые планируется провести с помощью спутника «Планк» и обсерваторий LIGO и VIRGO, позволят выбрать одну из гипотез.



согласовывалась с наблюдениями, Вселенная должна была возникнуть из черной дыры гигантских размеров, значительно больших, чем масштаб длины в теории струн. Но ведь наши уравнения не накладывают никаких ограничений на размер черных дыр. Просто случилось так, что Вселенная сформировалась внутри достаточно большой дыры.

Более серьезное возражение приводят Тибо Дамур (Thibault Damour) из Института высших научных исследований в Бур-сюр-Ив во Франции и Марк Анно (Marc Henneaux) из Брюссельского свободного университета: материя и пространство-время вблизи момента Большого взрыва должны были вести себя хаотически, что наверняка противоречит наблюдаемой регулярности ранней Вселенной. Недавно я предположил, что в таком хаосе мог возникнуть плотный газ из миниатюрных «струнных дыр» – чрезвычайно малых и массивных струн, находящихся на грани

превращения в черные дыры. Возможно, в этом содержится ключ к решению проблемы, описанной Дамуром и Анно. Аналогичное предположение было высказано Томасом Бэнксом (Thomas Banks) из Рютгерса и Вилли Фишлером (Willy Fischler) из Техасского университета в Остине. Существуют и другие критические соображения, но нам еще предстоит выяснить, выявляют ли они какие-либо принципиальные недостатки описанной модели.

Соударение мембран

Другая популярная модель, подразумевающая существование Вселенной до Большого взрыва, – экпиротический сценарий (от греч. *ekpyrotic* – «пришедший из огня»), разработанный три года назад Джастином Каури (Justin Khoury) из Колумбийского университета, Полом Штейнхардтом (Paul Steinhardt) из Принстонского университета, Бартом Оврутом (Burt A. Ovrut) из Пенсильванского университета, Натаном Зейбергом (Nathan Seiberg) из Института углубленных исследований и Нейлом Тьюроком (Neil Turok) из Кембриджского университета. Он основан на предположении, что наша Вселенная – одна из многих D-мембран, дрейфующих в многомерном пространстве. Мембраны притягиваются друг к другу, а когда они сталкиваются, в них может произойти то, что мы называем Большим взрывом (см. рис. на стр. 38).

Не исключено, что коллизии происходят циклически. Две мембраны могут сталкиваться, отскакивать друг от друга, расходиться, притягиваться одна к другой, снова соударяться и так далее. Расходясь после удара, они немного растягиваются, а при очередном сближении снова сжимаются. Когда направление движения мембраны сменяется на противоположное, она расширяется с ускорением, поэтому наблюдаемое ускоряющееся расширение Вселенной может указывать на предстоящее столкновение.

У предвзрывного и экпиротического сценариев есть общие особенности. Оба они начинаются с большой, холодной, почти пустой Вселенной, и обоим свойственна трудная (и пока нерешенная) проблема перехода от состояния перед Большим взрывом к стадии после него. Математически главное различие между двумя моделями заключается в поведении дилатона. В предвзрывном сценарии это поле и, соответственно, все силы природы изначально очень слабы и постепенно усиливаются, достигая максимума в момент Большого взрыва. Для экпиротической модели справедливо обратное:

столкновение происходит тогда, когда значения сил минимальны.

Разработчики экпиротической схемы вначале надеялись, что слабость сил облегчит процедуру анализа столкновения, однако им приходится иметь дело с высокой кривизной пространства-времени, поэтому пока нельзя однозначно решить, удастся ли избежать сингулярности. Кроме того, этот сценарий должен протекать при весьма специфических обстоятельствах. Например, перед самым столкновением мембраны должны быть почти идеально параллельны друг другу, иначе вызванный им Большой взрыв будет недостаточно однородным. В циклической версии эта проблема стоит не так остро: последовательные соударения позволили бы мембранам выровняться.

Оставив пока в стороне трудности полного математического обоснования обеих моделей, ученые должны разобраться, удастся ли когда-нибудь проверить их экспериментально. На первый взгляд, описанные сценарии очень похожи на упражнения не в физике, а в метафизике: масса интересных идей, которые никогда не удастся подтвердить или опровергнуть результатами наблюдений. Такой взгляд слишком пессимистичен. Как стадия инфляции, так и довзрывная эпоха должны были оставить после себя артефакты, которые можно заметить и сегодня, например, в небольших вариациях температуры реликтового излучения.

Во-первых, наблюдения показывают, что температурные отклонения были сформированы акустическими волнами за несколько сотен тысяч лет. Регулярность флуктуаций свидетельствует о когерентности звуковых волн. Космологи уже отвергли целый ряд космологических моделей, не способных объяснить волновой синхронизм. Сценарии с инфляцией, эпохой до Большого взрыва и столкновением мембран успешно проходят это первое испытание. В них синфазные волны создаются квантовыми процессами, усилившимися в ходе ускоряющегося космического расширения.

Во-вторых, каждая модель предсказывает разное распределение температурных флуктуаций в зависимости от их углового размера. Оказалось, что большие и малые флуктуации имеют одинаковую амплитуду. (Отступления от этого правила наблюдаются только при очень малых масштабах, в которых изначальные отклонения изменились под действием более поздних процессов.) В инфляционных моделях это распределение воспроизводится с высокой точностью. Во время инфляции кривизна пространства изменялась относительно медленно, так что флуктуации раз-

личных размеров возникали в почти одинаковых условиях. Согласно обеим струнным моделям, кривизна менялась быстро. В результате амплитуда мелкомасштабных флуктуаций увеличивалась, однако другие процессы усиливали крупномасштабные отклонения температуры, выравнивая общее распределение. В экпиротическом сценарии этому способствует дополнительное пространственное измерение, разделяющее сталкивающиеся мембраны. В предвзрывной схеме за выравнивание распределения флуктуации отвечает аксион – квантовое поле, связанное с дилатоном. Короче говоря, все три модели согласуются с результатами наблюдений.

В-третьих, в ранней Вселенной температурные вариации могли возникать из-за флуктуаций плотности вещества и из-за слабых колебаний, вызванных гравитационными волнами. При инфляции обе причины имеют одинаковое значение, а в сценариях со струнами основную роль играют вариации плотности. Гравитационные волны должны были оставить свой отпечаток в поляризации реликтового излучения. Возможно, в будущем его удастся обнаружить с помощью космических обсерваторий, таких как спутник «Планк» Европейского космического агентства.

Четвертая проверка связана с распределением флуктуаций. В инфляционном и экпиротическом сценариях оно описывается законом Гаусса. Вместе с тем предвзрывная модель допускает значительные отклонения от нормального распределения.

Анализ реликтового излучения – не единственный способ проверить рассмотренные теории. Сценарий с эпохой до Большого взрыва подразумевает возникновение случайного фона гравитационных волн в некотором диапазоне частот, который в будущем можно будет обнаружить с помощью гравитационных обсерваторий. Кроме того, поскольку в струнных моделях изменяется дилатон, тесно связанный с электромагнитным полем, им обоим должны быть свойственны крупномасштабные флуктуации магнитного поля. Не исключено, что их остатки можно обнаружить в галактических и межгалактических магнитных полях.

Так когда же началось время? Наука пока не дает окончательного ответа. И все же согласно двум потенциально проверяемым теориям Вселенная – а значит, и время – существовала задолго до Большого взрыва. Если один из этих сценариев соответствует истине, то космос существовал всегда. Возможно, однажды он снова коллапсирует, но не исчезнет никогда. ■

(«В мире науки», №8, 2004)

КОСМИЧЕСКАЯ СИМФНИЯ

Уэйн Ху и Мартин Уайт

Звуковые волны, возникшие на ранних стадиях формирования Вселенной, содержат сведения о возрасте, составе и геометрии Космоса.

В начале был свет. На заре истории мироздания ионизованное вещество испускало излучение, а затем снова захватывало его. Позднее, когда Вселенная расширилась и остыла, электроны и протоны соединились, образовав нейтральные атомы, и вещество утратило способность захватывать свет. Спустя 14 млрд. лет испущенные во время великого освобождения света фотоны образуют космический микроволновый фон (КМФ), или реликтовое излучение.

Настройте телевизор на любую свободную от телевизионных каналов частоту, и около 1% помех, которые вы увидите на экране, будет обусловлено космическим микроволновым фоном. Астрономы установили, что реликтовое излучение принимается практически одинаково со всех направлений. Его всеобщность и постоянство свидетельствуют о том, что оно возникло задолго до того, как сформировались звезды, планеты и галактики. Простота Вселенной тех времен позволяет с высокой точностью предсказать свойства КМФ и сравнить их с результатами точнейших наблюдений, которые проводятся с помощью радиотелескопов, установленных на аэростатах и космических аппаратах. Изучение реликтового излучения помогает ученым найти ответы на некоторые вечные вопросы: из чего состоит Вселенная, каков ее возраст, откуда взялись все существующие в ней объекты?

Впервые КМФ был обнаружен в 1965 г. Арно Пензиасом (Arno Penzias) и Робертом Уилсоном (Robert Wilson), которые искали источник таинственного фоновых шума, принимаемого радиолокационными антеннами. Их открытие окончательно подтвердило теорию Большого взрыва, согласно которой Вселенная на ранних этапах существования представляла собой плотную горячую плазму, состоящую из заряженных частиц и фотонов. С тех пор в результате расширения Вселенной реликтовое излучение остыло до 2,7 К. Однако в момент, когда оно было испущено, его температура составляла около 3000 К.

Спектр КМФ, измеренный в 1990 г. искусственным спутником Земли *COBE (Cosmic Background Explorer)*, в точности совпал с расчетным. Однако это впечатляющее достижение затмила настоящая сенсация: *COBE* обнаружил небольшие, порядка 0,001%, различия температуры реликтового излучения, приходящего с разных направлений. Более 20 лет ученые пытались выявить анизотропность КМФ, которая помогла бы понять, как в ходе эволюции первичной плазмы образовались галактики, звезды и планеты.

В 2001 г. для составления карты КМФ был запущен космический аппарат *WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe)*, который отошел от Солнца на 1,5 млн. км дальше Земли и остался на околосолнечной орбите. На основании полученных с его помощью данных был сделан вывод, что пространственное распределение температуры реликтового излучения подчиняется определенной закономерности. Более того, результаты наблюдений позволили точнее оценить возраст, состав и геометрию Вселенной. Ученые словно пытались определить конструкцию музыкального инструмента по характеру его звучания. Однако космическую симфонию исполняют очень странные музыканты под аккомпанемент удивительных совпадений, в которых нам предстоит разобраться.

Еще в конце 1960-х гг. Джеймс Пиблз (P. James E. Peebles) и Джер Ю (Jer Yu) из Принстонского университета пришли к выводу, что в молодой Вселенной должны были распространяться звуковые волны. (Почти в то же время к очень похожим заключениям пришли Яков Зельдович и Рашид Сюняев из Московского института прикладной математики.) Когда излучение еще томилось в веществе, тесно связанные системы фотонов, электронов и протонов вели себя как газ, в котором любое возмущение плотности порождало продольную звуковую волну, представляющую собой распространяющуюся последовательность сжатий, нагревающих газ, и разрежений, охлаждающих его. Так возникла изменяющаяся картина вселенских температурных флуктуаций.

Поиск начал

Спустя 380 тыс. лет после Большого взрыва Вселенная выросла примерно до одной тысячной сегодняшних размеров. Температура газа понизилась, и протоны начали захватывать электроны, образуя атомы. Этот процесс, называемый рекомбинацией, коренным образом изменил обстановку. Фотоны практически перестали сталкиваться с заряженными частицами и впервые получили возможность свободно распространяться в пространстве. Так картина горячих и холодных областей, созданная звуковыми волнами, навеки застыла в структуре КМФ. Тогда же вещество освободилось от давления излучения, препятствовавшего образованию сгустков материи, которые под действием сил тяготения уплотнились и со временем стали звездами и галактиками. Современный уровень вариаций температуры КМФ, составляющий 0,001%, в точности соответствует амплитуде, необходимой для образования крупномасштабных структур, которые мы видим сегодня.

Что же послужило источником первичного возмущения, породившего звуковые волны? Вопрос непростой. Наблюдая за развитием Вселенной с самого начала, мы могли бы видеть лишь пространство, ограниченное так называемым горизонтом, радиус которого равен расстоянию, которое успел пройти свет с момента Большого взрыва. Поскольку информация не может передаваться быстрее света, горизонт определяет сферу влияния любого физического механизма. Если, пытаясь выяснить происхождение структур определенного размера, мы станем двигаться в прошлое, горизонт будет сужаться и в конце концов станет меньше, чем интересующие нас образования. Следовательно, ни один физический процесс, подчиняющийся закону причинности, не поможет нам разобраться в их генезисе (так называемая проблема горизонта).

Согласно теории инфляции, ускоренное расширение Вселенной сразу после Большого взрыва происходило под влиянием особого поля – инфлатона. Таким образом, сегодня мы видим лишь малую часть того, что наблюдалось до инфляции. Квантовые флуктуации инфлатона, усиленные быстрым расширением, привели к появлению начальных возмущений, приблизительно одинаковых по амплитуде как в малых, так и в больших областях пространства. Так в первичной плазме возникли пространственные колебания плотности энергии.

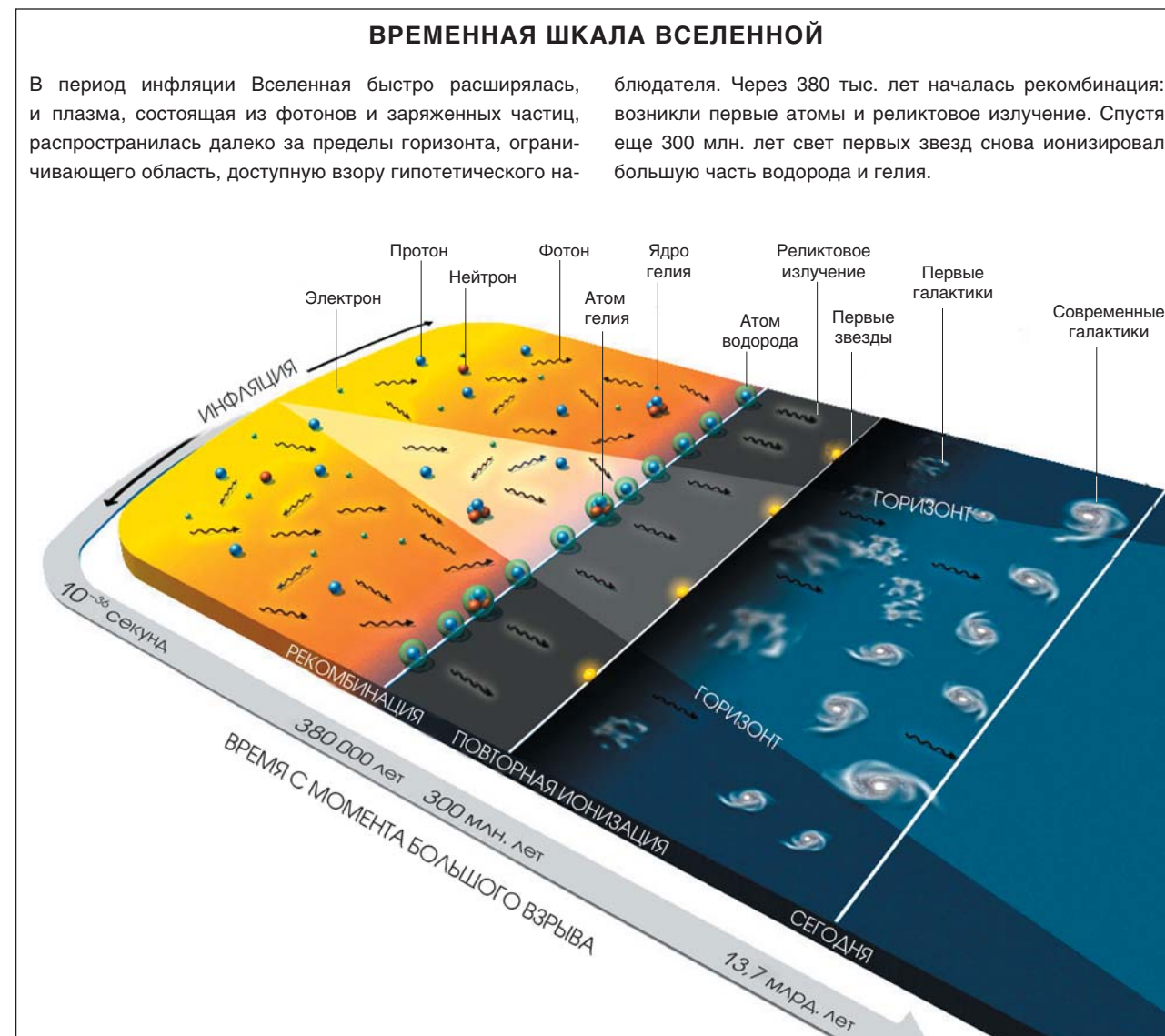
Картина звуковых волн, застывшая в КМФ, подтверждает теорию инфляции. Поскольку все

возмущения плотности появились одновременно в первый же момент творения, звуковые волны оказались синхронизированными по фазе. В результате сформировался спектр с обертонами, как у музыкального инструмента. Если дуть в трубу с открытыми концами, то основная частота звука будет соответствовать волне (моду колебаний) с максимальным смещением воздуха на концах трубы и минимальным в ее середине (см. верхний рис. на стр. 38). Длина волны основной моды равна удвоенной длине трубы. Но в звуке будут присутствовать обертоны, соответствующие волнам, которые вдвое, втрое, вчетверо и т.д. короче основной волны. Иными словами, частоты обертонов (высшие гармоники) равны основной частоте (первой гармонике), умноженной на 2, 3, 4 и т.д. Именно обертоны обогащают звук и позволяют отличить скрипку Страдивари от рядового инструмента.

Анализируя звук в ранней Вселенной, мы должны рассматривать волны, колеблющиеся во времени, а не в пространстве (см. рис. на стр. 38). Длине трубы будет соответствовать промежуток времени, в течение которого первичная плазма была заполнена звуковыми волнами, исчезнувшими во время рекомбинации. Предположим, что в начале инфляции в некоторой области пространства температура плазмы была максимальной (наибольшее положительное смещение). В процессе распространения звуковых волн ее плотность стала колебаться, и температура устремилась сначала к среднему (нулевое смещение), а затем к минимальному значению (наибольшее отрицательное смещение). Волна, благодаря которой температура в данной области упала до минимума точно ко времени рекомбинации, является основной модой ранней Вселенной. Обертоны с вдвое, втрое и т.д. большими частотами в этот момент обеспечивают

ОБЗОР: КОСМИЧЕСКАЯ АКУСТИКА

- Инфляция (быстрое расширение Вселенной в первые мгновения после Большого взрыва) возбудила звуковые волны, которые вызывали поочередные сжатия и расширения областей первичной плазмы.
- Когда Вселенная достаточно охладилась и образовались нейтральные атомы, картина распределения плотности, созданная акустическими волнами, запечатлелась в реликтовом излучении.
- Изучив акустическую модуляцию реликтового излучения, космологи смогли оценить возраст, состав и геометрию Вселенной. Выяснилось, что основным компонентом современной Вселенной является таинственная темная энергия.



максимальные смещения, положительные или отрицательные, в меньших областях пространства.

Анализируя результаты наблюдений реликтового излучения, космологи построили график зависимости величины температурных отклонений от размера горячих и холодных областей, т.е. энергетический спектр (см. стр. 48). Оказалось, что угловой размер зон с наибольшими вариациями температуры составляет около одного градуса. Во время рекомбинации их средний диаметр не превышал 1 млн. световых лет, но в ходе тысячекратного расширения Вселенной увеличился примерно до 1 млрд. световых лет. Наличие в энергетическом спектре нескольких ярко выраженных пиков, из которых первый и самый высокий соответствует основной моде, а все последующие – обертонам, подтверждает гипотезу об одновре-

менности возникновения звуковых волн. Если бы возмущения создавались непрерывно во времени, то спектр не был бы столь гармоничен.

Согласно теории инфляции амплитуды звуковых волн были примерно одинаковыми при любых пространственных масштабах. Однако после третьего пика наблюдается резкий спад спектра. Дело в том, что произошло затухание коротких звуковых волн. Акустическая волна не может распространяться, если ее длина меньше средней длины свободного пробега частиц, из которых состоит газ или плазма. При нормальном атмосферном давлении молекулы, из которых состоит воздух, между двумя соударениями успевают пролететь примерно 10^{-5} см. В первичной плазме накануне рекомбинации это расстояние составляло примерно 10 тыс. световых лет. (Плотность

Вселенной в те времена была большой только по сравнению с современным значением, которое с тех пор уменьшилось в миллион раз.) После того, как Вселенная расширилась в 1000 раз, оно увеличилось до 10 млн. световых лет. Поэтому амплитуды пиков энергетического спектра, которые соответствуют размерам, не превышающим 10 таких расстояний, быстро убывают.

Как музыканты отличают скрипку мирового класса от обычной по богатству обертонов, так и космологи определяют форму и состав Вселенной, анализируя спектр первичных звуковых волн. Карта КМФ помогает оценить угловые размеры холодных и горячих областей небесной сферы. А поскольку скорость, с которой распространялся звук в первичной плазме, известна, ученые смогли вычислить длину основной моды акустических колебаний на момент начала рекомбинации. Также стало известно, что фотоны реликтового излучения, достигшие Земли, прошли около 45 млрд. световых лет. (Хотя они двигались в течение 14 млрд. лет, расширение Вселенной удлинило их путь.)

Таким образом, космологи получили полную информацию о треугольнике, образованном волной, и убедились, что сумма его углов равна 180° . Значит, пространство нашей Вселенной практически плоское и подчиняется законам Евклидовой геометрии. Отсюда следует, что средняя плотность энергии в нем близка к так называемому критическому значению и составляет около 10^{-29} г/см³.

Интересные сведения о разделении вещества и энергии несут в себе амплитуды обертонов. Если поведение обычных звуковых волн определяется исключительно давлением в газе, то в молодой Вселенной заметное влияние на них оказывала гравитация. Сила тяготения сжимала вещество в более плотных областях и в зависимости от фазы колебаний усиливала или ослабляла сжатия и разрежения. Анализируя модуляцию волн, можно определить мощность гравитации, которая, в свою очередь, позволяет судить о материально-энергетическом составе среды.

На заре мироздания, как и ныне, существовало обычное вещество, состоящее в основном из барионов – протонов и нейтронов, и холодная темная материя, которая создает собственное гравитационное поле, но практически не взаимодействует с обычным веществом. Вклад в массу первичного газа и, следовательно, в тяготение вносило как обычное, так и темное вещество, но сжатую и разреженную в звуковых волнах подвергалось только первое. При рекомбинации основная вол-

на «застыла» в положении, когда в областях более высокой плотности газа гравитация усиливала сжатие обычного вещества (см. стр. 42). Однако первый обертон с вдвое меньшей длиной волны был «заморожен» в противоположной фазе, когда тяготение сжимало плазму, а давление газа расширяло ее. В результате первая гармоника вызвала меньшие отклонения температуры, чем основная волна. Поэтому второй пик энергетического спектра ниже первого. По соотношению их высот можно оценить, как в ранней Вселенной соотносились сила гравитации и давление излучения. По имеющимся данным, ко времени рекомбинации плотности энергий барионов и фотонов были примерно одинаковыми и составляли около 5% современного критического значения. Это в согласуется с результатами расчетов, основанных на изучении ядерных реакций синтеза легких элементов, протекавших в юной Вселенной.

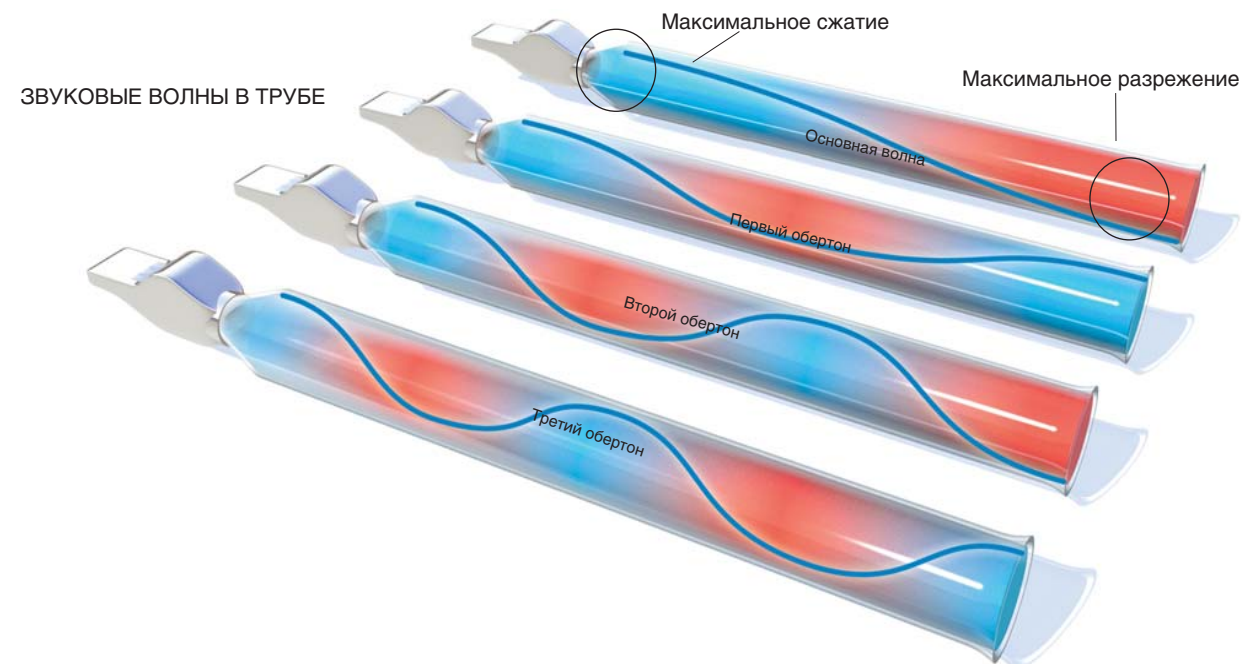
Однако в общей теории относительности утверждается, что тяготение в равной мере присуще и веществу, и энергии. Усиливались ли отклонения температуры гравитационным полем фотонов? Безусловно. Однако его воздействие уравнивалось другим фактором: после рекомбинации кванты реликтового излучения из более плотных областей теряли больше энергии, чем фотоны из менее плотных, поскольку им приходилось «выбираться» из более глубоких гравитационных ям. Речь идет об эффекте Сакса-Вольфа, который уменьшает амплитуду отклонений температуры КМФ, в точности компенсируя ее усиление полем тяготения света. В областях, которые были слишком велики и потому не подвержены акустическим колебаниям (их современные угловые размеры превышают 10), отклонения температуры обусловлены исключительно эффектом Сакса-Вольфа. Поэтому, как это ни парадоксально, наиболее крупные горячие зоны на карте КМФ соответствуют менее плотным районам.

Наконец, изучение КМФ позволяет оценить долю темного вещества во Вселенной. Гравитационного поля одних барионов недостаточно, чтобы модулировать отклонения температуры за пределами первого пика энергетического спектра. Чтобы гравитационные потенциальные ямы были достаточно глубокими, необходимо большое количество холодной темной материи. Измерив соотношения трех первых спектральных пиков, космологи установили, что ее плотность примерно в пять раз превышает плотность барионного вещества и составляет примерно 25% от нынешнего критического значения.

КОСМИЧЕСКИЕ ОБЕРТОНЫ

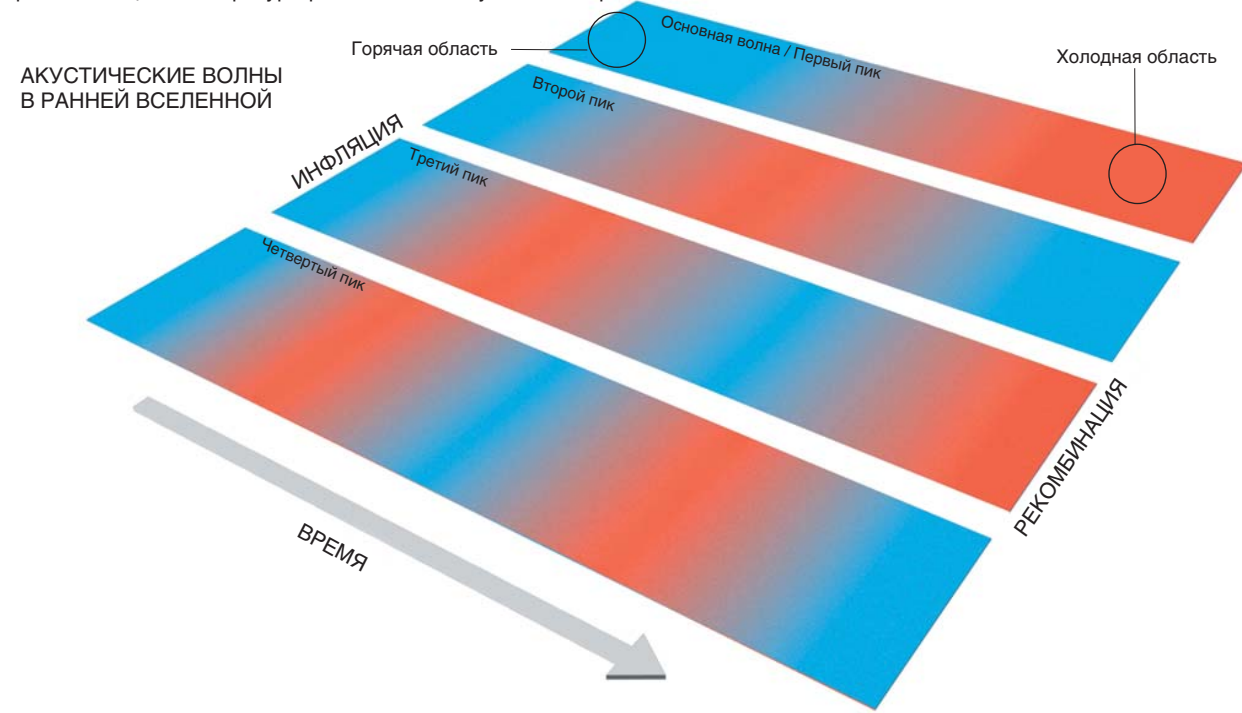
АКУСТИЧЕСКИЙ СПЕКТР ранней Вселенной содержал обертоны, свойственные музыкальным инструментам. Если вы дуете в трубу, основной тон соответствует волне с наибольшим сжатием воздуха (синий цвет) у мундштука и наи-

большим разрежением (красный цвет) у открытого конца. Но в звуке также присутствуют обертоны, длины волн которых в 2 (первый обертон), 3 (второй обертон), 4 (третий обертон) и т.д. раза меньше длины основной волны.



В МОЛОДОЙ ВСЕЛЕННОЙ звуковые волны колебались во времени, а не в пространстве. После инфляции основная волна вызвала сжатие плазмы в одних областях и расширение в других, в результате чего ко времени рекомбинации температура реликтового излучения в пер-

вых достигла максимума (синий цвет), а во вторых – минимума (красный цвет). Из-за наличия обертонов температура достигла максимальной и минимальной величины и в меньших областях.

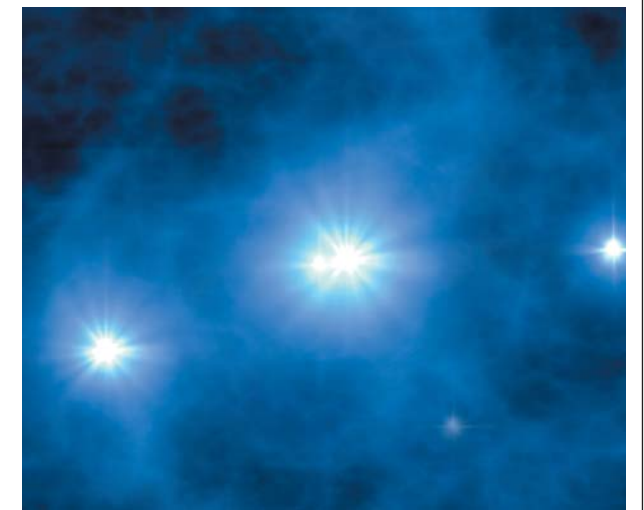


ОТЗВУКИ ДИССОНАНСА

Фотоны реликтового излучения, испущенные через 380 тыс. лет после Большого взрыва, в большинстве своем распространялись по наблюдаемой Вселенной беспрепятственно. Однако некоторые из них все же испытали рассеяние на заряженных частицах, что вызвало поляризацию излучения в обширных областях небесной сферы. Результаты поляризационных наблюдений, выполненных космическим аппаратом *WMAP*, свидетельствуют о том, что около 17% фотонов рассеялись разреженным ионизованным газом через несколько сотен миллионов лет после Большого взрыва.

Столь значительная доля рассеянных фотонов оказалась полной неожиданностью. Прежде космологи предполагали, что большая часть водорода и гелия была ионизована излучением первых звезд, очень массивных и ярких. Но по оценкам теоретиков, повторная ионизация произошла примерно через миллиард лет после Большого взрыва, и поэтому рассеяние должны были претерпеть лишь около 5% фотонов реликтового излучения. Данные, полученные от *WMAP*, говорят о том, что повторная ионизация произошла гораздо раньше. Так модель первого этапа формирования звезд была поставлена под сомнение. Не столь очевидным теперь кажется и то, что первоначальные флуктуации плотности в первичной плазме были примерно одинаковыми во всех масштабах. Если амплитуды мелких флуктуаций были больше амплитуд крупных, первые звезды могли сформироваться раньше. Сведения, добытые *WMAP*, содержат и другой намек на отклонение от масштабной инвариантности флуктуаций, установленной спутником *COBE*. В крупных масштабах,

соответствующих областям неба с угловыми размерами порядка 60° , *WMAP* и *COBE* обнаружили странный дефицит отклонений температуры реликтового излучения, который, впрочем, может оказаться просто результатом недостаточной статистики: поскольку угловой размер всего неба составляет 360° , столь крупных областей недостаточно, чтобы составить статистически достоверную выборку. Тем не менее некоторые теоретики считают, что этот дефицит свидетельствует об ошибочности моделей инфляции, темной энергии или топологии Вселенной.



ПЕРВЫЕ ЗВЕЗДЫ повторно ионизовали окружающий газ.

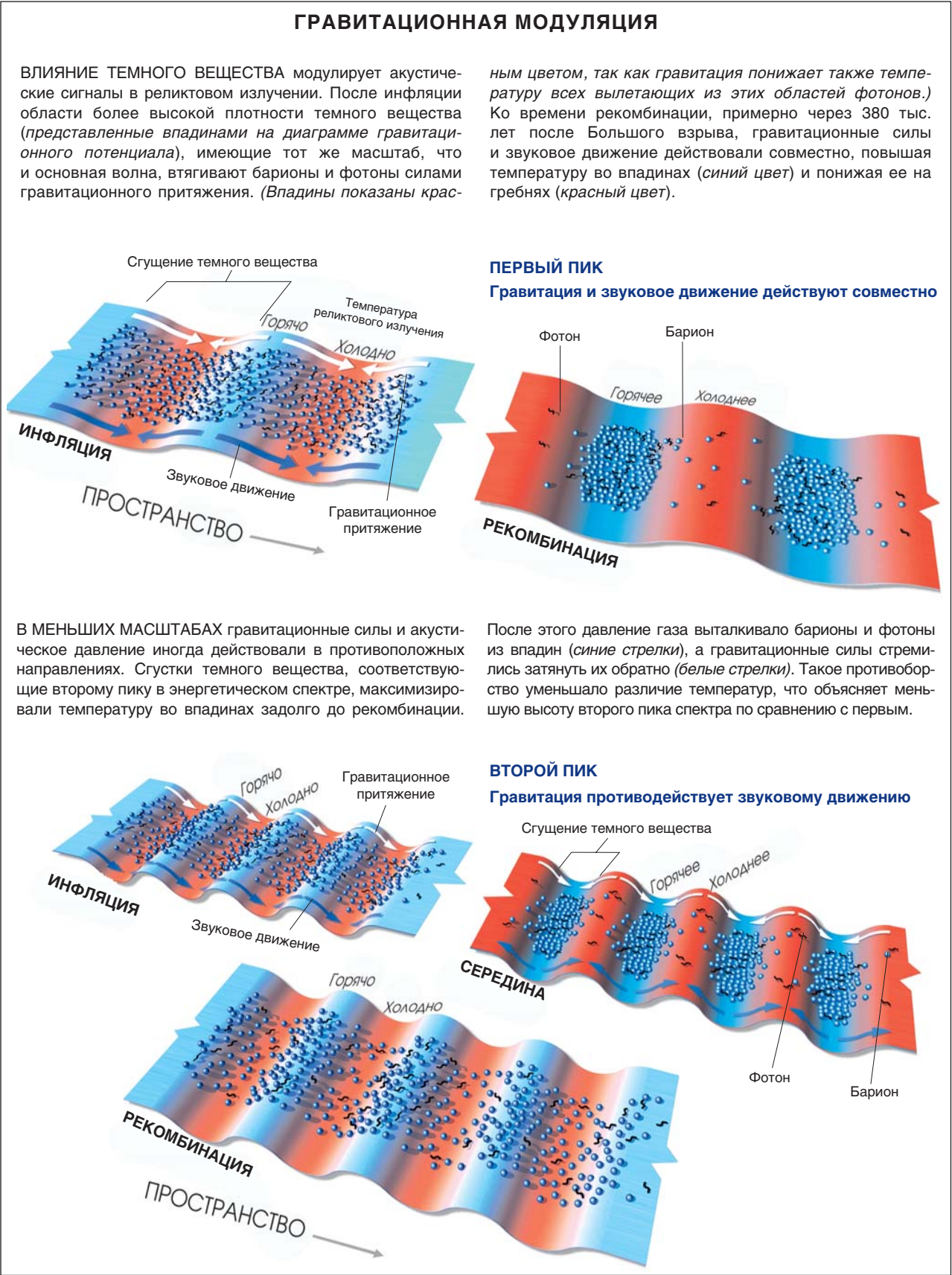
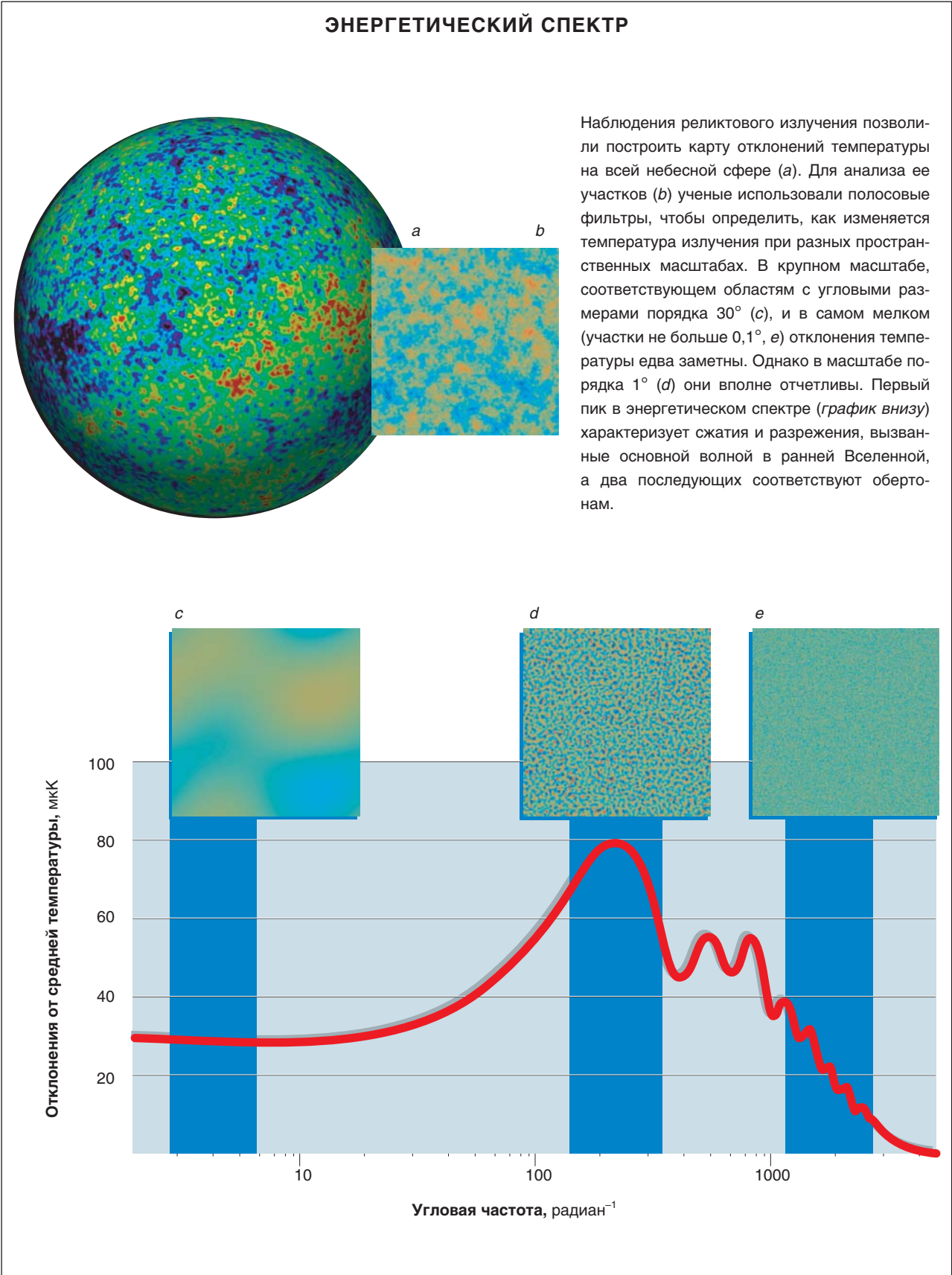
Поразительное созвучие

К сожалению, современное расчетное соотношение вещества и энергии оставляет неопределенной около 70% критической плотности. Для объяснения непонятного расхождения ученые постулировали существование таинственной темной энергии, влияние которой по мере расширения Вселенной росло. Таким образом, мы приходим к невероятному выводу: сегодня Вселенная состоит в основном из темной энергии и невидимого темного вещества. Хуже того, плотность энергии темного вещества в настоящее время почему-то соизмерима с плотностью темной энергии, хотя при рекомбинации первая намного превышала вторую. А на раннем этапе развития Вселенной доминировало еще одно таинственное поле – инфлатон, которое и определило ее структуру. Почему же мы должны полагаться на космологическую модель, основанную на гипотезе о существовании трех загадочных субстанций?

Во-первых, их существование позволяет объяснить множество известных фактов. Гипотеза

о темном веществе впервые была выдвинута еще в 30-х гг. для объяснения местной плотности массы в скоплениях галактик. Концепцию темной энергии Альберт Эйнштейн ввел еще в 1917 г., включив в свои уравнения так называемую космологическую константу, компенсирующую влияние тяготения. Позднее он отказался от нее, но она была возрождена в 1990-х гг., когда при изучении далеких сверхновых выяснилось, что расширение Вселенной ускоряется (см. статью «От замедления к ускорению» в этом альманахе). Оценка плотности энергии темного вещества и темной энергии по характеристикам КМФ удивительно хорошо совпадает с результатами астрономических наблюдений.

Во-вторых, описанная космологическая модель позволяет выдвигать перспективные гипотезы. В 1968 г. Джозеф Силк (Joseph Silk), работающий сегодня в Оксфордском университете, пришел к выводу, что высота акустических пиков в спектре КМФ должна убывать по определенному закону. При этом соответствующее излучение должно характеризоваться небольшой, но точно



известной поляризацией. Казалось бы, КМФ не может быть поляризован, поскольку рассеяние фотонов в первичной плазме должно было привести к случайному распределению их ориентаций. Но в малых масштабах фотоны испытывают сравнительно немного соударений и сохраняют свою ориентацию, выражающуюся в поляризации КМФ. Ее удалось измерить интерферометром *DASI (Degree Angular Scale Interferometer)* на антарктической станции Амундсен–Скотт, а позднее и космическим аппаратом *WMAP*. Последний обнаружил также крупномасштабную поляризацию, обусловленную рассеянием фотонов после рекомбинации (см. рис. стр. 47).

В-третьих, темная энергия ускоряет расширение Вселенной, за счет чего уменьшается глубина гравитационных потенциальных ям в местах галактических скоплений. Фотоны, пролетающие через такие области, получают энергетическую подпитку при падении в потенциальную яму. Выбираясь, они теряют меньше энергии, чем приобрели, поскольку глубина ямы к этому моменту оказывается меньше. Описанное явление, названное интегральным эффектом Сакса–Вольфа, привело к возникновению крупномасштабных вариаций температуры КМФ. Сопоставление результатов наблюдений крупных галактических структур с данными, полученными от *WMAP*, подтверждает эту гипотезу. Оценка количества темной энергии, необходимой для появления обширных температурных отклонений, совпадает со значениями, полученными при анализе энергетического спектра КМФ и взрывов далеких сверхновых.

Еще не вечер

Реликтовое излучение несет в себе важную информацию о самых первых моментах после Большого взрыва. Результаты исследования КМФ заметно укрепили позицию самых простых моделей инфляции, согласно которым амплитуды начальных флуктуаций плотности были одинаковыми во всех масштабах. Однако если дальнейшие измерения покажут, что это было не так, то придется привлечь более сложные гипотезы и даже совершенно иные парадигмы.

Чтобы больше узнать о физике инфляции, нужно определить, при каких энергиях она происходила. Когда Вселенная была горячее 10^{15} К, слабые ядерные и электромагнитные силы представляли собой разные аспекты одного и того же электрослабого взаимодействия. Если инфляция происходила при таких температурах, значит, инфлатон как-то связан с унификацией электро-

слабых сил. Однако она могла протекать при гораздо более высокой температуре, когда электро-слабое взаимодействие смешивалось с сильным ядерным. В таком случае инфляция скорее всего имеет отношение к великому объединению фундаментальных сил.

Кроме возбуждения флуктуаций плотности первичной плазмы инфляция породила пространственно-временные возмущения – гравитационные волны, длина которых соизмерима с размерами наблюдаемой Вселенной, а амплитуда пропорциональна квадрату температуры, при которой происходила инфляция. Отголоски гравитационных волн можно обнаружить в поляризации реликтового излучения.

Особенно полезным может оказаться изучение эффекта Зельдовича–Сюняева, который обусловлен рассеянием фотонов КМФ горячим ионизованным газом в скоплениях галактик и позволяет идентифицировать их в критический период около 5 млрд. лет назад, когда темная энергия начала ускорять расширение Вселенной. Число скоплений галактик характеризует амплитуду тогдашних флуктуаций плотности. Не менее интересен эффект гравитационных линз, который возникает при прохождении фотонов реликтового излучения через сверхмассивные структуры, искривляющие их траектории и искажающие распределение отклонений температуры и поляризации. Величина линзового эффекта характеризует амплитуду флуктуаций плотности, связанных с этими образованиями.

Однако для детального исследования инфляции и темной энергии ученым нужны КМФ-телескопы нового поколения, обладающие более высокими чувствительностью и разрешением. В 2007 г. Европейское космическое агентство планирует запустить космическую микроволновую обсерваторию «Планк» и вывести ее на одну орбиту с аппаратом *WMAP*. «Планк» сможет выявлять различия температуры КМФ, составляющие всего 5×10^{-6} К, и обнаруживать горячие и холодные пятна с угловыми размерами менее $0,1^\circ$. Такие измерения позволят ученым бросить беглый взгляд на весь диапазон акустических осцилляций в КМФ и уточнить спектр инфляции.

Хотя стандартная космологическая модель дает удивительно хорошее феноменологическое описание Вселенной, для более глубокого понимания ее тайн придется дожидаться результатов новых исследований. Не вызывает сомнения, что космологическая симфония будет и в дальнейшем очаровывать внимательных слушателей. ■

(«В мире науки», №5, 2004)

ОТ ЗАМЕДЛЕНИЯ К УСКОРЕНИЮ

Адам Рисс и Майкл Тернер

Далекие сверхновые указывают момент, когда расширение Вселенной перешло от замедляющегося к ускоряющемуся.

Гравитация удерживает планеты на их орбитах и связывает между собой галактики в огромные скопления. Начиная со времен Ньютона и до конца 1990-х гг. отличительной чертой гравитации считалось притяжение. И хотя общая теория относительности Эйнштейна допускает, что силы гравитации могут быть отталкивающими, большинство физиков считало это лишь теоретически возможным. До недавнего времени и астрономы были убеждены, что гравитация лишь замедляет расширение Вселенной.

В 1998 г. ученые обнаружили отталкивающие силы гравитации. Исследуя далекие сверхновые, они заметили, что их свечение слабее ожидавшегося. Наиболее вероятным объяснением было то, что свет от сверхновых, взорвавшихся миллиарды лет назад, прошел расстояние большее, чем предсказывали теоретики, а значит – расширение Вселенной не замедляется, а ускоряется. Такое представление настолько кардинально меняло традиционные представления, что некоторые астрономы попытались объяснить меньшую яркость сверхновых какими-то иными причинами, например, поглощением света межгалактической пылью. В последние годы наблюдения еще более далеких сверхновых подтвердили новую гипотезу.

Однако всегда ли расширение Вселенной шло с ускорением или оно возникло сравнительно недавно, около 5 млрд. лет назад?

Если бы выяснилось, что расширение ускорялось с самого начала, ученым пришлось бы пересмотреть представления об эволюции Вселенной. Если же, как полагают космологи, ускорение началось лишь недавно, то, установив, когда галактики начали набирать скорость, ученые смогли бы понять причину перехода от замедления к ускорению и предсказать судьбу Вселенной.

Битва титанов

75 лет назад американский астроном Эдвин Хаббл (Edwin Hubble) открыл расширение Вселенной, обнаружив, что далекие галактики удаляются от нас быстрее, чем близкие: скорость удаления галактики равна расстоянию до нее, умноженному на некий коэффициент, названный постоянной Хаббла. В контексте общей теории отно-

сительности Эйнштейна закон Хаббла отражает однородное расширение пространства или увеличение размеров Вселенной.

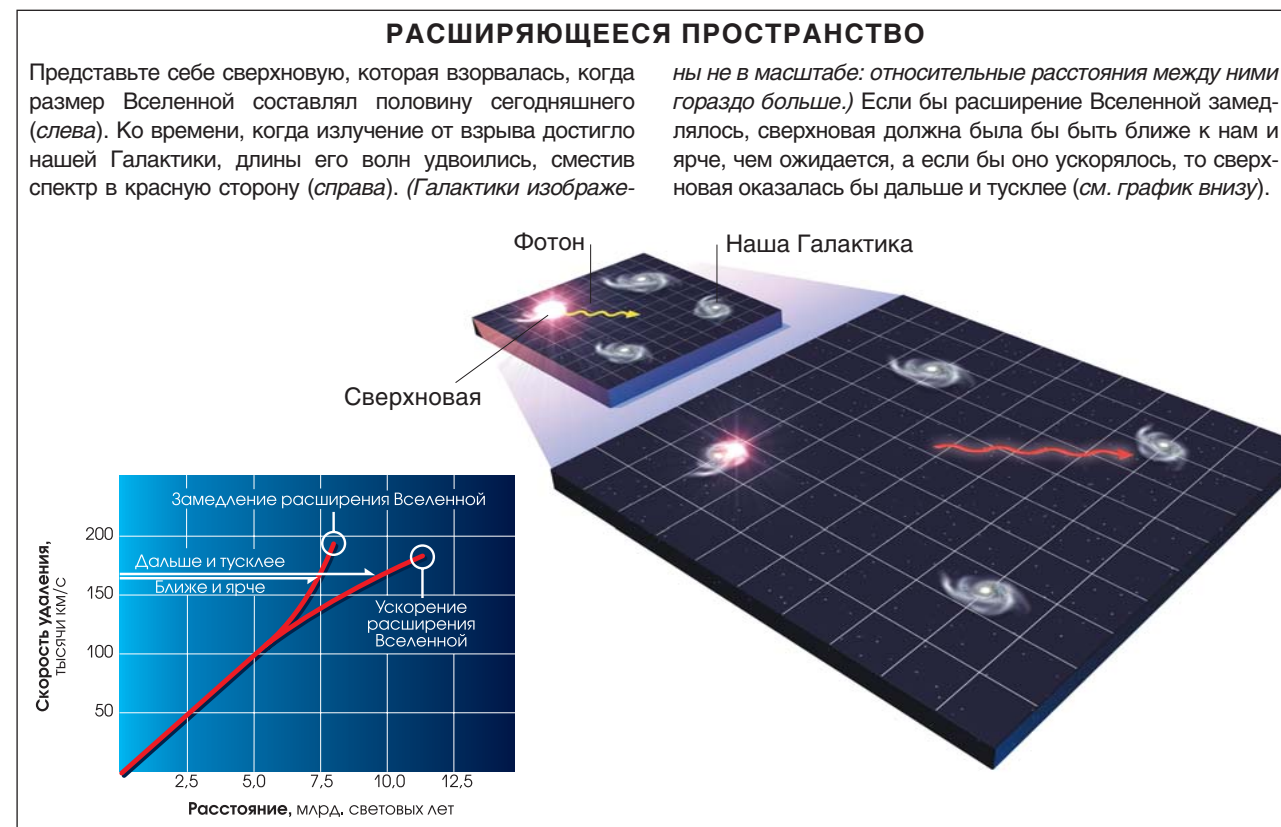
В теории Эйнштейна представление о гравитации как силе взаимного притяжения справедливо для всех известных форм вещества и энергии. Поэтому из общей теории относительности следует, что расширение Вселенной должно замедляться тем быстрее, чем выше плотность вещества и энергии в ней. Однако теория допускает существование форм энергии с необычными свойствами, при которых гравитация становится силой взаимного отталкивания. То, что расширение Вселенной не замедляется, а ускоряется, доказывает, что такая форма энергии существует. Ее называли темной энергией.

Характер расширения Вселенной определяется борьбой двух титанических сил: гравитационного притяжения и гравитационного отталкивания. Что победит в этом противоборстве, определяется соотношением плотностей сил притяжения вещества и сил отталкивания темной энергии. По мере расширения Вселенной плотность вещества в ней уменьшается, поскольку увеличивается объем пространства. Хотя о темной энергии известно мало, предполагают, что с расширением Вселенной ее плотность меняется незначительно.

Космологи считают, что расширение Вселенной не всегда ускорялось. В соответствии с космологической теорией, галактики, их скопления и более крупные структуры возникли из малых неоднородностей плотности вещества в молодой Вселенной, выявленных при наблюдении реликтового излучения. Более сильное гравитационное притяжение

ОБЗОР: РАСШИРЕНИЕ КОСМОСА

- В 1998 г. наблюдения далеких сверхновых показали, что расширение Вселенной ускоряется.
- Изучая удаленные сверхновые, ученые получили очередные свидетельства того, что сначала расширение Вселенной замедлялось.
- Определив время, на рубеже которого замедление расширения Вселенной сменилось ускорением, можно прояснить природу темной энергии и предсказать судьбу Вселенной.



в областях большей плотности вещества тормозило их расширение, что позволило им стать гравитационно-связанными объектами – от галактик наподобие нашей до гигантских скоплений. Но если бы расширение Вселенной ускорялось с самого начала, оно бы растянуло эти структуры еще до того, как они сформировались. Кроме того, два ключевых свойства ранней Вселенной – характер вариаций реликтового излучения и распространность легких элементов, образовавшихся в первые мгновения после Большого взрыва, – не согласовались бы с результатами наблюдений.

Тем не менее важно найти прямые свидетельства замедления расширения Вселенной на раннем этапе, что укрепило бы стандартную космологическую модель и дало ключ к пониманию причин сегодняшнего ускорения расширения. Наблюдая в телескоп далекие объекты, ученые исследуют историю Вселенной, зашифрованную в соотношении между расстояниями до галактик и скоростями их удаления. Если расширение Вселенной замедляется, скорости далеких галактик должны быть больше предсказанных законом Хаббла, а если оно ускоряется – меньше. Иными словами, если расширение ускоряется, галактика с данной скоростью должна лежать дальше, чем ожидается, а значит, ее светимость должна быть меньше.

Охота за сверхновыми

Чтобы проверить последнее утверждение, нужно найти такие астрономические объекты, для которых известна светимость – количество излучения, спускаемое за секунду, – и которые присутствуют во всех областях Вселенной. Этим условиям отвечают сверхновые типа Ia. Вспышки таких сверхновых столь ярки, что наземные телескопы обнаруживают их на расстоянии в половину размера видимой Вселенной, а космический телескоп «Хаббл» – на еще большем расстоянии. За последние 10 лет астрономы точно измерили светимость сверхновых типа Ia, так что по яркости их взрывов можно определять расстояния до них. А скорость удаления галактики, в которой находится сверхновая, вычисляют по величине красного смещения линий в спектре. Длина волны света, испущенного в эпоху, когда размер Вселенной составлял половину современного, сегодня должна стать вдвое больше, а значит, линия в спектре должна сместиться в красную сторону. Измерив красные смещения и видимые яркости многих сверхновых, расположенных на разных расстояниях от нас, можно восстановить историю расширения Вселенной.

К сожалению, сверхновые типа Ia редки. В галактике, аналогичной нашей, они вспыхивают раз в несколько столетий, и чтобы их обнаружить,

необходимо провести многократную съемку участка неба, содержащего тысячи галактик, и сопоставить полученные изображения. Собранные за 1998 г. данные, свидетельствующие об ускорении расширения Вселенной, получены двумя группами астрономов, которые искали сверхновые, взорвавшиеся около 5 млрд. лет назад, когда размер Вселенной составлял примерно 2/3 нынешнего. Однако некоторые специалисты сомневаются, что результаты наблюдений правильно истолкованы. В принципе, более слабую, чем ожидалось, яркость сверхновых можно объяснить не ускорением расширения Вселенной, а иной причиной. Например, их свет может быть ослаблен межгалактической пылью. А возможно, что светимость древних сверхновых была меньшей, поскольку химический состав Вселенной отличался от нынешнего – в нем было меньше тяжелых элементов, образующихся в результате ядерных реакций в звездах.

Если оба предположения верны, то наблюдаемые эффекты должны усиливаться с ростом красного смещения. Если же «виновато» ускоренное расширение Вселенной в более позднее время, после периода замедления, то очень далекие сверхновые должны выглядеть более яркими. Следовательно, наблюдения сверхновых, взорвавшихся, когда размер Вселенной был меньше 2/3 современного, могут свидетельствовать в пользу той или иной гипотезы.

Нелегко обнаружить сверхновую типа Ia, взорвавшуюся, когда размер Вселенной был около половины нынешнего, ведь ее яркость примерно в 10 млрд. раз меньше, чем у Сириуса – самой яркой звезды, наблюдаемой с Земли. Наземные телескопы не в состоянии зафиксировать подобные объекты, но космический телескоп «Хаббл» может. В 2001 г. один из авторов этой статьи (Рисс) сообщил, что телескопу «Хаббл» удалось заметить очень далекую сверхновую типа Ia (обозначенную как SN1997ff). Судя по красному смещению, она взорвалась около 10 млрд. лет назад, когда размер Вселенной составлял примерно 1/3 современного, и яркость ее гораздо больше той, какая должна быть согласно гипотезе о поглощении света космической пылью. Это стало первым прямым свидетельством того, что период замедления расширения Вселенной действительно был. Мы ожидали, что обнаружение сверхновых с еще большим красным смещением позволит точно установить время перехода от замедления к ускорению.

В 2002 г. размещение Усовершенствованной обзорной камеры на космическом телескопе «Хаббл» превратило его в инструмент поиска далеких сверхновых. Рисс вместе с коллегами обнаружил шесть сверхновых, взорвавшихся, когда раз-

мер Вселенной был менее половины нынешнего (более 7 млрд. лет назад). Вместе с SN1997ff это самые далекие из всех замеченных до сих пор сверхновых типа Ia. Наблюдения подтвердили существование раннего периода, когда расширение Вселенной замедлялось. «Точка перехода», когда замедление сменилось на ускорение, удалена от нас примерно на 5 млрд. лет. Это соответствует ожиданиям космологов.

Наша космическая судьба

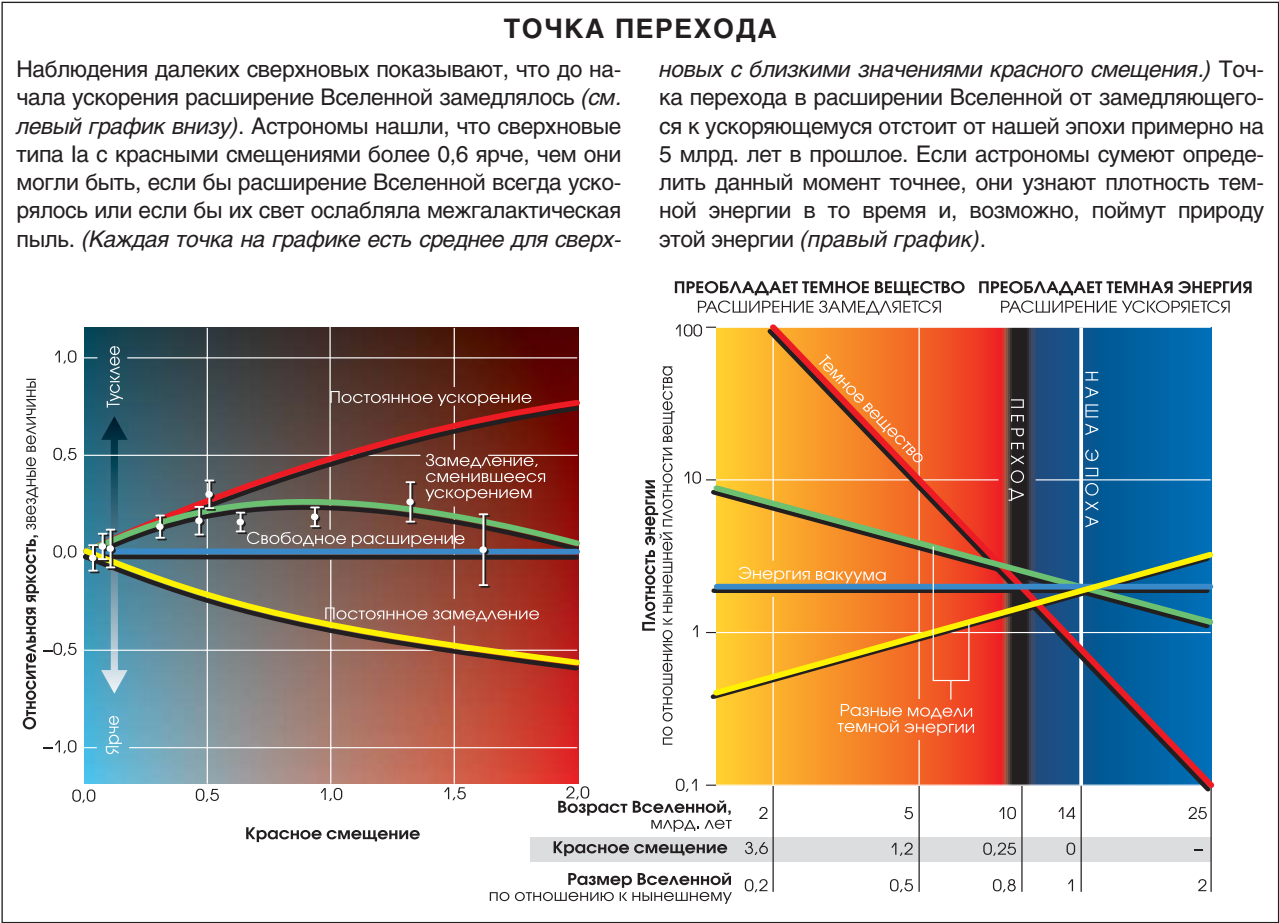
Изучение древних сверхновых дало ключ к пониманию темной энергии. Основным кандидатом на ее роль стала энергия вакуума, математически эквивалентная космологической постоянной, введенной Эйнштейном в 1917 г. Поскольку великий ученый стремился создать стационарную модель Вселенной, для уравнивания гравитационного притяжения вещества он ввел «жульнический космологический фактор». Плотность этой космологической константы составляла половину плотности вещества. Но чтобы вызвать ускорение расширения Вселенной, плотность этой константы должна быть вдвое больше плотности вещества.

Откуда может взяться такая плотность энергии? Принцип неопределенности в квантовой механике требует, чтобы вакуум был заполнен виртуальными частицами, непрерывно возникающими и исчезающими. Но когда теоретики попытались вычислить плотность энергии, связанной с квантовым вакуумом, то получили значение на 55 порядков выше необходимого. Будь плотность энергии вакуума такой большой, все вещество Вселенной сразу разлетелось бы в разные стороны и галактики не смогли бы образоваться.

Такое расхождение называли главным затруднением теоретической физики. Но, может быть, как раз в нем заключены ее перспективы. Теоретики ожидают, что учет нового принципа симметрии покажет, что энергия квантового вакуума равна нулю. Если так, то ускорение расширения Вселенной вызвано иной причиной.

Предлагается множество идей: от влияния скрытых размерностей Вселенной до энергии, связанной с новым полем, которое иногда называют квинтэссенцией («пятой сущностью»). В целом все предлагаемые гипотезы рассматривают темную энергию, плотность которой не остается постоянной и обычно уменьшается по мере расширения Вселенной (но может и возрастать). Не исключено, впрочем, что темной энергии вообще нет и нужно пересмотреть теорию гравитации Эйнштейна.

Поскольку варианты моделей предполагают разный характер изменения темной энергии,



меняются и значения того рубежа, когда замедление расширения сменилось его ускорением. Если с расширением Вселенной плотность темной энергии уменьшается, этот рубеж будет в более раннее время, чем в случае роста плотности темной энергии с расширением Вселенной. Модели, основанные на новых теориях гравитации, также приводят к различным значениям времени перехода от замедления к ускорению. Последние наблюдения сверхновых согласуются с теориями, в которых плотность темной энергии остается постоянной, но не противоречат и тем моделям, в которых она слабо меняется. Отброшены были только варианты, предполагающие значительное изменение плотности темной энергии.

До сих пор телескоп «Хаббл» остается единственным инструментом для поиска далеких сверхновых, рассказывающих о ранних этапах расширения Вселенной. Но ему уже помогают несколько наземных программ, повышающих точность измерений. Министерство энергетики США и NASA готовят совместный проект – «Объединенная миссия по изучению темной энергии» (*Joint Dark Energy Mission, JDEM*), в котором для поиска тысяч сверх-

новых типа Ia используется двухметровый широкоугольный космический телескоп. «Охотники за сверхновыми» надеются, что *JDEM* будет запущен в начале следующего десятилетия.

Раскрыв тайну ускорения расширения Вселенной, ученые смогут прогнозировать ее судьбу. Если плотность темной энергии остается постоянной или растет со временем, то примерно через 100 млрд. лет красное смещение почти всех галактик станет таким большим, что их уже нельзя будет увидеть. Если же плотность темной энергии уменьшается, то в будущем снова станет преобладать вещество и мы не потеряем возможность изучать Вселенную. Если плотность темной энергии непрерывно растет, то Вселенная со временем придет к «гиперускоренному» расширению, в результате чего сначала галактики, а затем звездные системы, планеты и даже атомные ядра разлетятся в разные стороны. Если же темная энергия уменьшится до отрицательных значений, Вселенная коллапсирует. Единственный способ предсказать наше космическое будущее – выяснить природу темной энергии. ■

(«В мире науки», №5, 2004)

КОСМИЧЕСКАЯ ЗАГАДКА

Лоренс Кросс и Майкл Тернер

Если расширение Вселенной будет ускоряться, то она может стать пустынной. Оранжевые шары – это видимая часть Вселенной, которая растет со скоростью света, а голубые – расширяющаяся часть пространства. По мере того как скорость расширения растет, все меньшее число скоплений галактик остается видимым.

В 1917 г., пытаясь согласовать общую теорию относительности с природой Вселенной, Эйнштейн столкнулся с неразрешимой на первый взгляд проблемой. Как и большинство его современников, он был уверен, что Вселенная должна быть стационарной (не расширяться и не сжиматься), но такое состояние было несовместимо с его уравнениями тяготения. Отчаявшись, Эйнштейн ввел дополнительный космологический член, который был призван обеспечить стационарность Вселенной, противодействуя гравитации.

Однако через 12 лет американский астроном Эдвин Хаббл (Edwin Hubble) обнаружил, что Вселенная отнюдь не стационарна. Он убедился, что далекие галактики быстро удаляются от нашей, причем скорости их движения прямо пропорциональны расстоянию от нас. Для объяснения расширяющейся Вселенной космологический член был не нужен, и Эйнштейн отказался от него. Американский физик русского происхождения Георгий Гамов писал: «...когда я обсуждал с Эйнштейном космологические проблемы, он заметил, что введение космологического члена было величайшей ошибкой в его жизни».

Однако космологическая постоянная, вновь появившись в уравнениях после того, как было доказано, что расширение Вселенной ускоряется, по иронии судьбы появилась в процессе изучения принципов квантовой механики – того направления физики, которое Эйнштейн так не любил. Сегодня многие ученые предполагают, что космологический член позволит выйти за рамки теории Эйнштейна, что приведет к более глубокому пониманию пространства, времени, гравитации, а возможно, и квантовой теории, которая объединяет гравитацию с другими силами природы. Это может изменить наши представления о Вселенной.

Рождение постоянной

Общая теория относительности появилась как результат работы Эйнштейна по развитию его

ключевого открытия в 1907 г. – эквивалентности гравитации и ускоренного движения. Эйнштейн показал, что физика в неподвижном лифте в гравитационном поле напряженностью *g* ничем не отличается от той, что в лифте, движущемся в пустом пространстве с постоянным ускорением *g*.

На Эйнштейна оказали большое влияние философские воззрения австрийского ученого Эрнста Маха (Ernst Mach), который отказался от идеи абсолютной системы отсчета для пространства-времени. В физике Ньютона инерция определяется как стремление тела двигаться с постоянной скоростью, если на него не действует сила. Понятие постоянной скорости требует инерциальной (т.е. не испытывающей ускорения) системы отсчета. Но ускорения по отношению к чему? Ньютон постулировал существование абсолютного пространства – неподвижной системы отсчета, определяющей все местные инерциальные, которые, по мнению Маха, определяются распределением материи в пространстве, и общая теория относительности вобрала себя это представление.

Теория Эйнштейна стала первой концепцией, которая позволила бы дать согласованную картину Вселенной и описать не только то, как движутся тела в пространстве и времени, но и динамические изменения самих пространства и времени. Пытаясь использовать новую теорию для описания Вселенной, ученый хотел получить конечное стационарное решение, связанное с принципом Маха (например, конечное распределение материи, разлетающейся в пустом пространстве, не соответствовало представлению Маха о том, что для определения пространства необходима материя). Это побудило Эйнштейна ввести в уравнения космологический член и получить стационарное решение, не имеющее границ, – его Вселенная искривлялась подобно поверхности шара (см. рис. на стр. 58). В масштабе Солнечной системы космологический член не поддавался физическому обнаружению, но в более крупных

масштабах он должен был создавать космическое «расталкивание», препятствующее гравитационному притяжению удаленных тел.

Однако интерес Эйнштейна к космологическому члену быстро погас. В 1917 г. голландский ученый Виллем де Ситтер (Willem de Sitter) показал, что он может получить для пространства-времени решение с космологическим членом даже в отсутствие материи. В 1922 г. советский физик Александр Фридман построил модели расширяющейся и сжимающейся вселенных, обойдясь без космологической постоянной. В 1930 г. британский астрофизик Артур Эддингтон (Arthur Eddington) показал, что вселенная Эйнштейна не стационарна: раз гравитационный и космологический члены так точно согласованы, малейшее возмущение должно привести к ее стремительному сжатию или расширению. В 1931 г., когда Хаббл убедительно доказал расширение Вселенной, Эйнштейн отказался от космологического члена.

Открытие Хаббла устранило необходимость в космологической постоянной для противодействия гравитации, которая в расширяющейся вселенной замедляет расширение. Но достаточно ли сильна гравитация, чтобы остановить расширение вселенной и заставить ее сжиматься и, в конце концов, коллапсировать? Или космос будет расширяться вечно? В моделях Фридмана ответ зависит от средней плотности материи: с высокой она коллапсирует, а с малой – будет расширяться вечно. Пограничным случаем станет вселенная критической плотности, которая будет расширяться, но с постоянно уменьшающейся скоростью. Поскольку в теории Эйнштейна средняя кривизна вселенной определяется средней плотностью материи, геометрия и конечная ее судьба связаны между собой. Вселенная высокой плотности имеет положительную кривизну, как поверхность шара, малой – отрицательную, как поверхность седла, а Вселенная критической плотности – пространственно плоская. В итоге

космологи пришли к заключению, что определение геометрии Вселенной и ее плотности позволит судить о ее конечной судьбе.

Энергия пустоты

В течение 60 лет космологический член был выброшен из космологии (кроме периода, когда он был включен в предложенную в конце 40-х гг. теорию стационарной вселенной, решительно отвергнутую в 60-х гг.). Если бы Эйнштейн не ввел эту постоянную после разработки общей теории относительности, ее присутствие все равно было бы неизбежным. Сегодня космологический член возник не из теории относительности, которая описывает природу в самых крупных масштабах, а из квантовой механики, физики самых малых масштабов.

Новая концепция космологического члена совершенно отлична от введенной Эйнштейном. Его первоначальное уравнение поля $G_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu}$, где G – гравитационная постоянная, характеризующая интенсивность гравитационного поля, связывает кривизну $G_{\mu\nu}$ пространства с распределением $T_{\mu\nu}$ материи и энергии. Когда Эйнштейн добавил космологический член, он поместил его в левой части уравнения, считая его свойством самого пространства (см. врез справа). Но если переставить этот член в правую часть, он получит совершенно иное значение – то самое, которое ему приписывают сегодня. Теперь он представляет загадочную новую форму плотности энергии, которая остается постоянной даже при расширении Вселенной, а итоговая гравитация оказывается силой отталкивания, а не притяжения.

В соответствии с лоренц-инвариантностью, фундаментальной симметрией, связанной как с частной, так и с общей теориями относительности, такой вид энергии может существовать только в пустом пространстве. Поэтому космологический член представляется еще более загадочным. На вопрос, чему равна энергия пустого пространства, большинство людей ответит – ничему. В конце концов, это единственное интуитивно понятное значение.

К сожалению, квантовая механика отнюдь не интуитивна. В очень малых масштабах, где квантовые эффекты становятся ощутимыми, даже пустое пространство не является таковым. В нем из вакуума появляются виртуальные пары частица-античастица, пролетают небольшое расстояние и вновь исчезают, причем все это происходит в столь незначительном промежутке времени, что их невозможно наблюдать. Однако косвенные эффекты очень важны и могут быть

измерены. В частности, виртуальные частицы влияют на спектр водорода, причем расчеты экспериментально подтверждены.

Приняв данное положение, мы должны рассмотреть возможность того, что виртуальные частицы могут наделять пустое пространство некоторой ненулевой энергией. Таким образом, квантовая механика заставляет учитывать эйнштейновскую космологическую постоянную, которая не может быть отвергнута как «теоретически неудовлетворительная». Однако все расчеты и оценки величины энергии пустого пространства приводят к абсурдно большим значениям – на 55–120 порядков превышающим энергию всей материи и излучения в наблюдаемой области Вселенной. Будь плотность энергии вакуума действительно столь большой, все вещество во Вселенной мгновенно разлетелось бы в разные стороны.

Эта проблема появилась еще в 30-х гг., когда были проведены первые расчеты свойств виртуальных частиц. Однако во всех областях физики, не связанных с гравитацией, абсолютная энергия системы не имеет значения, существенна только разность энергий различных состояний. Если ко всем значениям энергии добавить некоторую константу, из результатов вычислений она выпадет, так что ею легко пренебречь. Кроме того, в те времена немногие физики относились к космологии настолько серьезно, чтобы подумать о приложении к ней квантовой теории.

Однако теория относительности требует, чтобы в качестве источников гравитации рассматривались все формы энергии, включая энергию пустоты. В конце 60-х гг. советский физик Яков Борисович Зельдович предпринял первые попытки оценить плотность энергии вакуума. С тех пор теоретики и бьются над вопросом, почему их расчеты дают такие абсурдно большие значения энергии. Они полагают, что подавляющую часть энергии, если не всю ее, должен аннулировать какой-то механизм. Они считают, что самым правдоподобным значением плотности энергии вакуума должен быть ноль: ничто, даже квантовое, не должно ни на что влиять.

Пока теоретики в глубине души верили, что такой механизм компенсации энергии может существовать, они могли отложить решение проблемы космологической постоянной на будущее, так как ею можно было пренебречь. Однако вмешалась природа.

Шаг назад

Первое свидетельство неких несообразностей было получено в результате исследований замедления расширения Вселенной. Как мы помним,

СМЕНА ПРЕДСТАВЛЕНИЙ

В основе общей теории относительности лежит уравнение поля, которое утверждает, что геометрия пространства-времени (Эйнштейнов тензор кривизны $G_{\mu\nu}$) зависит от распределения вещества и энергии (тензора $T_{\mu\nu}$ энергии-импульса). [Тензор – это геометрическая или физическая величина, которая может быть представлена совокупностью (матрицей) чисел.] Иными словами, кривизну поля определяют вещество и энергия:

$$G_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu},$$

где G – ньютоновская постоянная, определяющая интенсивность гравитационного поля.

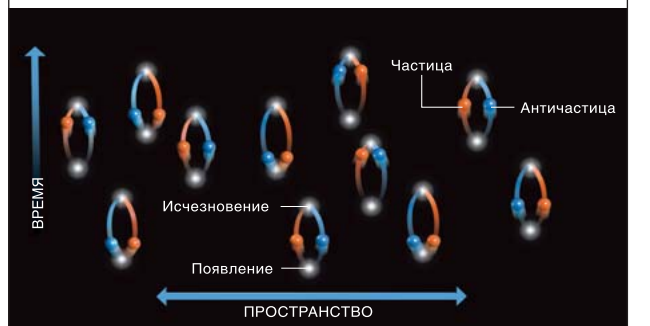
Чтобы получить модель стационарной Вселенной, Эйнштейн ввел космологическую постоянную Λ для компенсации гравитационного притяжения в космических масштабах. Он добавил ее (умноженную на метрический тензор $g_{\mu\nu}$, определяющий расстояния) к левой части уравнения поля, полагая, что эта постоянная является свойством самого пространства-времени:

$$G_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu}.$$

Когда выяснилось, что Вселенная расширяется, Эйнштейн отказался от нее. Необходимость в новой космологической постоянной, которую сегодня рассматривают физики, обусловлена квантовой теорией, согласно которой вакуум (пустое пространство) может обладать некоторой небольшой плотностью энергии. Плотность энергии вакуума ρ_{VAC} , умноженная на $g_{\mu\nu}$, должна находиться в правой части уравнения вместе с другой формой энергии:

$$G_{\mu\nu} = 8\pi G (T_{\mu\nu} + \rho_{\text{VAC}} g_{\mu\nu}).$$

Хотя в математическом отношении космологическая постоянная Эйнштейна и энергия вакуума эквивалентны, концептуально они различны: первая является свойством пространства, а вторая – формой энергии, обусловленной виртуальными парами частица-античастица. Квантовая теория утверждает, что частицы постоянно появляются в вакууме, существуют очень короткое время и исчезают (см. схему).



Хаббл обнаружил, что относительные скорости удаления далеких галактик пропорциональны их расстояниям от нашей Галактики. С точки зрения общей теории относительности, соотношение обусловлено расширением самого пространства, которое должно замедляться из-за гравитационного притяжения. Но поскольку очень далекие галактики видны такими, какими они были

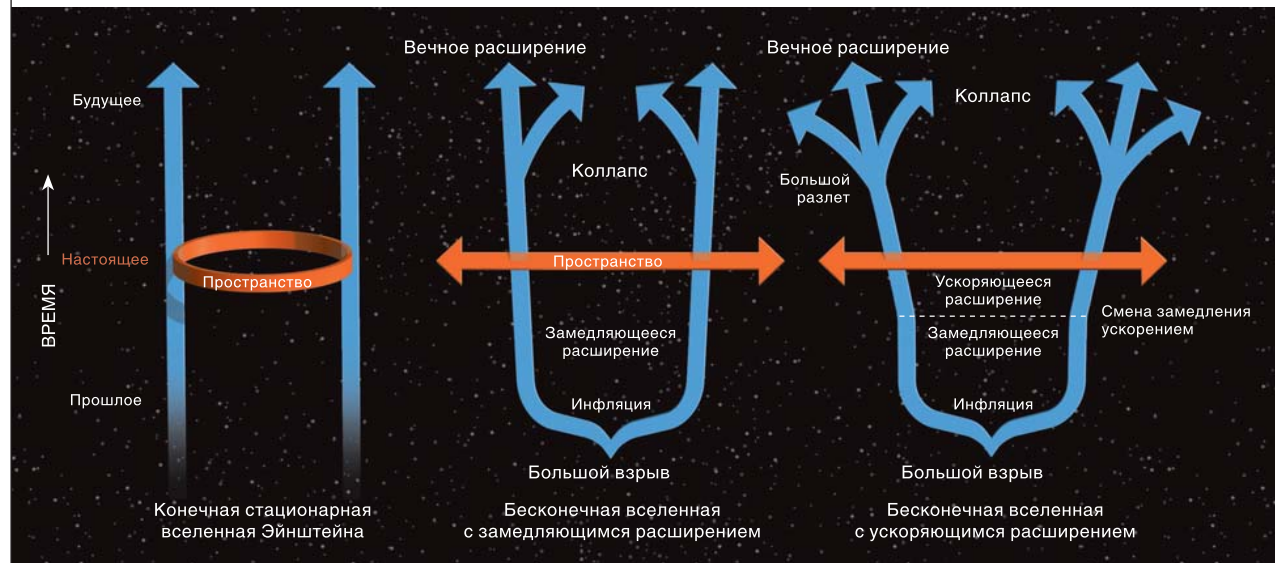
ОБЗОР: ВОЗВРАЩАЯСЬ К ПРОШЛОМУ

- Квантовая механика и теория относительности, а также полученные недавно свидетельства ускорения расширения Вселенной привели к тому, что ученые вновь вспомнили про космологический член, который сначала ввел, а потом отбросил Эйнштейн. Сегодня он представляет таинственную форму энергии, которая пронизывает пустое пространство и вызывает ускорение расширения Вселенной.
- Попытки понять природу загадочной энергии могут вывести физиков за пределы эйнштейновской теории, что может изменить наше представление о Вселенной.

МОДЕЛИ КОСМОСА: РАНЬШЕ И ТЕПЕРЬ

Космологическая модель Эйнштейна описывает конечную в пространстве, но бесконечную во времени вселенную. Ее размер постоянен, а пространственные границы отсутствуют. Она искривляется, замыкаясь подобно окружности (слева). После того как было обнаружено расширение Вселенной, космологи сосредоточились на модели бесконечной вселенной, расширение которой постоянно замедляется под действием сил тяготения (в середине).

В 1980-х гг. теоретики доработали модель, дополнив ее начальной фазой очень быстрого расширения (инфляцией). Наблюдения последних шести лет показали, что около 5 млрд. лет назад расширение Вселенной начало ускоряться (справа). Что ждет Вселенную в конечном итоге – продолжение расширения, коллапс или сверхбыстрое расширение, называемое Большим разлетом, – зависит от природы таинственной темной энергии, ускоряющей расширение Вселенной.



миллиарды лет назад, замедление должно приводить к нарушению линейности соотношения Хаббла. Наиболее далекие галактики должны удаляться быстрее, чем предсказывает его закон. Сложность, однако, представляют точные измерения расстояний до очень далеких вселенных и их скоростей.

Данные вычисления основываются на поиске эталонных «свечей» – объектов известной собственной светимости, достаточно ярких, чтобы их можно было видеть через всю Вселенную. Прорыв наступил в 1990-х гг. в результате калибровки сверхновых типа Ia, которые считаются взрывами белых карликов с массами около 1,4 массы Солнца. Для измерения замедления расширения Вселенной были созданы: Космологический проект «Сверхновая» во главе с Солом Перлмутером (Saul Perlmutter) в Национальной лаборатории им. Лоуренса в Беркли и Группа поиска сверхновых с большими z , возглавляемая Брайаном Шмидтом (Brian Schmidt) в обсерваториях Маунт-Стромло и Сайдинг-Спринг. В начале 1998 г. обе группы сделали одно и то же открытие: последние 5 млрд. лет расширение Вселенной не замедлялось, а ускорялось. Выяснилось, что до нынеш-

ней была фаза замедления (см. «От замедления к ускорению», «В мире науки», № 5, 2004).

Однако на существование некой неизвестной формы энергии, обуславливающей расширение Вселенной, указывают не только данные наблюдений сверхновых. Сегодня самую точную картину ранней Вселенной дали измерения космического микроволнового фона (КМФ) – остаточного излучения Большого взрыва, которое позволяет выявить свойства Вселенной в возрасте около 400 тыс. лет. К 2000 г. измерения угловых размеров неоднородностей КМФ достигли точности, которая позволила ученым установить, что геометрия Вселенной является плоской. Открытие было подтверждено данными космического аппарата WMAP (Уилкинсоновский зонд анизотропии микроволн) и другими экспериментами, проведенными в 2003 г.

Чтобы геометрия Вселенной была пространственно плоской, средняя плотность материи в ней должна быть равна критической. Однако многочисленные измерения всех ее форм, включая гипотетическое холодное темное вещество – море медленных частиц, которые не испускают свет, но обладают гравитационным притяжением, – показали, что плотность материи составляет лишь 30%

критической. Для того чтобы Вселенная была плоской, необходимо существование иной формы однородно распределенной энергии, не оказывающей заметного влияния на местную кластеризацию, но способной составить недостающие 70% критической плотности. Нужный эффект может дать энергия вакуума или что-то подобное.

Есть еще и третий ряд доводов в пользу того, что ускорение расширения Вселенной было недостающей частью космологической головоломки. В течение двух десятков лет основным объяснением структуры Вселенной были парадигма инфляции в сочетании с холодным темным веществом. Теория инфляции утверждает, что в первые моменты своего существования Вселенная мгновенно расширилась до огромных размеров, что обусловило плоскостность ее геометрии и вызвало квантовые флуктуации плотности энергии в масштабах от субатомного до космического. Быстрое расширение привело к наблюдаемой неоднородности КМФ и способствовало формированию нынешней структуры Вселенной. Образованием этих структур управляла гравитация холодного темного вещества, которого намного больше, чем обычного.

Однако к середине 90-х гг. данные наблюдений поставили эту парадигму под сомнение. Предсказанный уровень кластеризации вещества значительно отличался от измеренного, и Вселенная оказалась младше самых старых звезд. В 1995 г. авторы данной статьи указали, что расхождения исчезают, если принять, что около 2/3 критической плотности составляет энергия вакуума. (Предложенная модель отличается от замкнутой Вселенной Эйнштейна, в которой значение плотности космологической постоянной составляла половину плотности вещества.) Наше предположение было по меньшей мере дерзким.

Однако теперь, спустя почти 10 лет, все сошлось. Возрожденная космологическая постоянная позволила не только объяснить нынешнее ускорение расширения Вселенной и предшествовавшее ему замедление, но и увеличить возраст Вселенной до 14 млрд. лет и добавить ровно столько энергии, чтобы довести ее плотность до критического значения. Однако физики все еще не знают, действительно ли источником такой энергии служит квантовый вакуум. Поскольку необходимо было установить природу космологической постоянной, ученые стали заниматься количественным определением энергии вакуума, и головоломка стала еще более запутанной, чем тогда, когда физики пытались построить теорию, которая исключала бы энергию вакуума. Сегодня ученым необходимо понять, почему она может

быть отличной от нуля, но настолько малой, что ее влияние на космос стало существенным лишь несколько миллиардов лет назад.

Эйнштейн, рассматривая несовместимость частной теории относительности с теорией гравитации Ньютона, сделал открытие. Так же и современные физики, рассматривая теорию Эйнштейна, стремятся включить в нее законы квантовой механики. Возможно, космологические наблюдения позволят выявить связи гравитации с квантовой механикой. Эйнштейну помогла эквивалентность гравитации и физики ускоренных систем отсчета. Возможно, что сегодня путеводной звездой станет другой вид ускорения – ускорение расширения Вселенной.

Мир суперсимметрии

Многие физики считают, что объединить квантовую механику с гравитацией может теория струн (М-теория). Одно из ее основных положений – существование суперсимметрии, т.е. симметрии между частицами с полуцелым спином (такие фермионы, как кварки и лептоны) и частицами с целочисленным спином (такие бозоны, как фотоны, глюоны и другие носители сил взаимодействия). Там, где проявляется суперсимметрия, массы частицы и ее партнеры должны быть одинаковыми. Например, суперсимметричный электрон (сэлектрон) должен быть таким же легким, как электрон, и т.д. Кроме того, можно доказать, что в «супермире» квантовое ничто не будет иметь никакой массы, а вакуум должен иметь нулевую энергию. Предполагается, что в реальном мире сэлектрона с массой, равной массе электрона, не существует, иначе физики бы его обнаружили. Теоретики считают, что частицы-суперпартнеры в миллионы раз тяжелее электрона и поэтому, чтобы их обнаружить, нужны супермощные ускорители элементарных частиц. Возможно, что суперсимметрия – это нарушенная симметрия, при которой квантовое ничто может иметь некоторую массу.

Физики построили модели нарушенной суперсимметрии, в которых плотность энергии вакуума намного меньше абсурдно завышенных оценок, полученных ранее. Но даже эти значения намного больше тех, на которые указывают данные космологических наблюдений. Недавно выяснилось, что М-теория допускает бесконечное множество различных решений, которые приводят к слишком большим значениям плотности энергии вакуума. Но есть и такие, при которых она оказывается достаточно малой, чтобы согласовать ее с результатами космологических наблюдений (см. «Ландшафт теории струн», «В мире науки», №12, 2004 г.).

ИСТОРИЯ

90 лет назад Эйнштейн впервые ввел космологическую постоянную, затем она была отвергнута, модифицирована и воскрешена.

ФЕВРАЛЬ 1917 г. Эйнштейн ввел космологический член для компенсации гравитационного притяжения, что позволило ему построить теоретическую модель конечной стационарной Вселенной.

МАРТ 1917 г. Голландский космолог Виллем де Ситтер предложил модель с космологическим членом. Позже было показано, что ей соответствует ускоряющееся расширение Вселенной.

1922 г. Советский физик Александр Фридман построил модели расширяющейся и сжимающейся вселенных без использования космологической постоянной.

1929 г. Американский астроном Эдвин Хаббл обнаружил, что Вселенная расширяется. Двумя годами позже Эйн-

штейн отказался от космологического члена, назвав его «теоретически неудовлетворительным».

1967 г. Советский физик Яков Борисович Зельдович оценил плотность энергии квантового вакуума и нашел, что ей соответствует колоссальный космологический член.

1998 г. Две группы охотников за сверхновыми, возглавляемые Солом Перлмутером и Брайаном Шмидтом, сообщили, что расширение Вселенной ускоряется. Этот эффект мог быть описан модифицированным космологическим членом. После 1998 г. были получены более весомые подтверждения ускорения расширения Вселенной.

Еще одна особенность теории суперструн – постулирование существования большего числа пространственных измерений. К трем обычным измерениям добавляются еще 6 или 7 скрытых, и появляется еще одно объяснение ускорения расширения Вселенной. Георгий Двали (Georgi Dvali) из Нью-Йоркского университета и его коллеги предположили, что влияние этих дополнительных измерений может проявляться в виде дополнительного члена в эйнштейновском уравнении поля, который и может обуславливать ускорение расширения Вселенной. Ранее считалось, что различия между общей теорией относительности и последующими теориями проявляются в условиях малых, а не космических расстояний. Подход Двали противоречит этому мнению.

Возможно, что объяснение ускорения расширения Вселенной никак не будет связано с тем, что космологический член так мал, или с обобщением теории Эйнштейна для включения в нее квантовой механики. Общая теория относительности утверждает, что гравитация объекта пропорциональна сумме плотности его энергии и утренного внутреннего давления. Любой форме энергии с отрицательным внутренним давлением соответствует расталкивающая гравитация. Поэтому ускорение расширения Вселенной может быть вызвано просто существованием необычного вида энергии, называемого темной энергией, которая не предсказывается ни квантовой механикой, ни теорией суперструн.

Геометрия и конечная судьба Вселенной

Как бы то ни было, факт ускоренного расширения Вселенной навсегда изменил наши представления о будущем. Мы больше не связываем конечную судьбу мира с геометрией. Плоская вселенная, в которой доминирует положительная энергия вакуума, будет расширяться вечно и со все увеличивающейся скоростью, а вселенная, в которой преобладает

отрицательная энергия вакуума, в конце концов коллапсирует. Если же темная энергия вообще не является энергией вакуума, ее влияние на расширение Вселенной остается неясным. Возможно, что в отличие от космологической постоянной плотность темной энергии может со временем расти или уменьшаться. Если она будет увеличиваться, расширение Вселенной будет ускоряться, разрывая на части сначала галактики, потом планетные системы звезд, затем планеты и в конце концов атомы. Если же плотность темной энергии уменьшится, ускорение расширения может прекратиться. А если эта плотность станет отрицательной, Вселенная рано или поздно коллапсирует. Без знания деталей происхождения энергии, вызывающей расширение Вселенной, никакая совокупность космологических наблюдений не позволит определить ее конечную судьбу.

Будущее нашей Вселенной будет определять физика пустого пространства. Потребуются новые измерения расширения Вселенной и космических структур, которые укажут теоретикам направления работы. Планируются эксперименты, в том числе с использованием космического телескопа, предназначенного для наблюдения далеких сверхновых, и наземных телескопов для исследования темной энергии, а также ее влияния на крупномасштабные структуры.

Туман неизвестности привел Эйнштейна к тому, что он, пытаясь построить стационарную маховскую Вселенную, стал рассматривать космологический член. Сегодня неразбериха в отношении ускорения расширения Вселенной побуждает физиков использовать все возможные пути, чтобы понять природу энергии, ускоряющей расширение. Утешает лишь факт, что в итоге это может привести исследователей к объединению сил гравитации с другими силами природы, что и было самой заветной мечтой Эйнштейна. ■

(«В мире науки», №12, 2004)

КТО НАРУШИЛ ЗАКОН ТЯГОТЕНИЯ

Георгий Двали

Возможно, ускорение расширения Вселенной вызвано не темной энергией, а неизбежной утечкой гравитации.

Космологи и специалисты по физике элементарных частиц никогда еще не были столь озадачены. Почему расширение Вселенной ускоряется? Если бросить камень вертикально вверх, то под действием земного притяжения он будет удаляться от планеты с замедлением, а не с ускорением. Точно так же отдаленные галактики, разбросанные Большим взрывом в разные стороны, должны взаимно притягиваться и замедляться. Однако они удаляются друг от друга с ускорением, виновницей которого принято считать таинственную темную энергию. К сожалению, пока неизвестно, что она из себя представляет. Ясно одно: на самых больших наблюдаемых расстояниях гравитация ведет себя весьма необычно, превращаясь в отталкивающую силу.

Согласно законам физики тяготение порождается материей и энергией. Поэтому ученые приписывают странный вид гравитации странному виду материи или энергии. Таково обоснование существования темной энергии. Но, возможно, следует изменить сами законы. В истории науки уже был подобный прецедент: закон всемирного тяготения, открытый Ньютоном в XVII в., столкнулся с рядом концептуальных и экспериментальных ограничений и в 1915 г. уступил место общей теории относительности Эйнштейна (ОТО). У последней тоже есть свои трудности, в частности, связанные с ее применением при чрезвычайно малых расстояниях, с которыми мы сталкиваемся в квантовой механике. Так же как ньютоновская физика стала частным случаем ОТО, теория Эйнштейна со временем превратится в частный случай квантовой теории гравитации (КТГ).

Физики уже предложили несколько возможных подходов к КТГ, наиболее заметным из которых является теория струн. Когда гравитация действует на микроскопических расстояниях – например, в центре черной дыры, где огромная масса сжата в субатомный объем, – в игру вступают причудливые квантовые свойства материи, и теория струн описывает, как при этом изменяется закон тяготения.

Специалисты по теории струн обычно пренебрегают квантово-механическими эффектами, когда речь заходит о больших расстояниях. Однако последние космологические открытия заставили ученых пересмотреть некоторые положения. Четыре года назад мы задались вопросом: не поможет ли теория струн описать законы тяготения не только при микроскопических, но и при самых больших масштабах? Ключом к успеху могли бы стать предусмотренные в теории струн дополнительные пространственные измерения, в которых могут двигаться частицы.

Раньше считалось, что мы не в состоянии двигаться в дополнительных измерениях и наблюдать их из-за того, что они слишком малы. Но новейшие научные достижения показывают, что некоторые из них (или даже все) могут быть бесконечными и скрытыми от нас не потому, что их размеры невелики, а потому что частицы, составляющие наши тела, не могут покинуть пределы трех измерений. Только гравитоны, передающие гравитационное взаимодействие, способны вырваться из этой ловушки, в результате чего закон гравитации изменяется.

Квинтэссенция из ничего

Обнаружив космическое ускорение, астрономы поначалу решили приписать его влиянию так называемой космологической постоянной. Этот пресловутый параметр, введенный и затем отвергнутый Эйнштейном, выражает энергию, свойственную пространству как таковому. Совершенно пустой объем пространства, лишенный материи, должен содержать энергию, эквивалентную примерно 10^{-26} кг/м³. Хотя космологическая постоянная удачно согласуется со всеми известными данными, многие физики считают ее неприемлемой из-за необъяснимой малости. Действительно, она настолько ничтожна, что просто не могла играть заметной роли на протяжении большей части космической истории, включая ранний период формирования Вселенной. Кроме того, космологическая постоянная слишком мала по сравнению с энергией

физических процессов, которые могли бы вызвать ее появление.

Пытаясь обойти эту проблему, некоторые физики предположили, что ускорение вызвано не самим пространством, а энергетическим полем, заполняющим его, словно легкий туман. Потенциальная энергия некоторых пространственно однородных полей ведет себя в значительной степени как космологическая постоянная. Одно такое поле, известное как инфлатон, вызвало, как полагают, период ускоренного расширения (инфляции) на ранней стадии развития Вселенной. Вероятно, возникло другое похожее поле, спровоцировавшее очередную вселенскую инфляцию. Его назвали квинтэссенцией, т.е. пятым элементом наряду с землей, водой, воздухом и огнем. Как и космологическая постоянная, плотность энергии квинтэссенции должна быть очень маленькой. Впрочем, динамической величине легче достичь такого ничтожного значения, чем статической константе.

И космологическую постоянную, и квинтэссенцию относят к темной энергии. Других объяснений пока нет, поэтому физики всерьез задумываются о дополнительных измерениях, само наличие которых непременно повлияло бы на поведение гравитации. Согласно закону всемирного тяготения и с точки зрения ОТО сила гравитационного взаимодействия обратно пропорциональна квадрату расстояния между объектами. Еще в XIX в. Карл Фридрих Гаусс установил, что величина тяготения определяется плотностью линий гравитационного поля, которые при увеличении расстояния распределяются на все большую ограничивающую поверхность. В трехмерном пространстве граница двумерная, и ее площадь увеличивается как квадрат расстояния.

ОБЗОР: УТЕЧКА ГРАВИТАЦИИ

- Обычно астрономы связывают ускоренное расширение Вселенной с влиянием темной энергии. Возможно, дело не в ней, а в законах физики, которые перестают действовать на сверхдальних дистанциях.
- Новый закон тяготения можно вывести в рамках теории струн. Обычно ее рассматривают как теорию, посвященную самым мельчайшим объектам, однако она позволяет по-новому взглянуть и на некоторые макроскопические явления.
- В частности, теория струн предсказывает, что во Вселенной есть дополнительные измерения, в которые ускользает гравитация. Утечка тяготения может искривить пространственно-временной континуум и вызвать ускорение расширения Вселенной.

Если бы пространство было четырехмерным, то граница была бы трехмерной, т.е. объемом, величина которого пропорциональна кубу расстояния. Но тогда плотность силовых линий была бы связана с расстоянием обратной кубической зависимостью и гравитация была бы слабее, чем в трехмерном мире. В космологических масштабах такое ослабление тяготения может привести к ускорению расширения Вселенной.

Почему мы не замечали, что гравитация может свободно распространяться в дополнительное пространство? В связи с чем обычный трехмерный закон обратных квадратов так точно объясняет движение ракет и планет? Традиционный для теории струн ответ таков: дополнительные измерения компактны – свернуты в крошечные окружности. Долгое время считалось, что их размер сопоставим с так называемой длиной Планка (около 10^{-35} м), но в последних теоретических и экспериментальных работах показано, что он может достигать 0,2 мм. Влияние свернутых измерений на гравитацию проявляется только на малых расстояниях, сопоставимых или меньших, чем их радиус. На больших дистанциях действует традиционный закон тяготения.

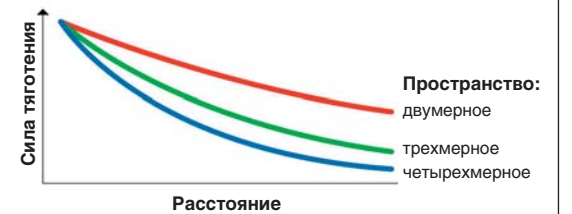
Пожизненное заключение

Идея о существовании свернутых измерений не лишена недостатков. Почему некоторые измерения (дополнительные) туго свернуты, тогда как другие (обычные) простираются в бесконечность? Другими словами, под влиянием материи и энергии свернутые измерения должны были бы распрямляться, если что-то не стабилизирует их. Не исключено, что стягиванию или расширению измерений препятствуют предсказываемые теорией струн поля, похожие на магнитные. Другое объяснение появилось в 1999 г.: возможно, все измерения, в том числе дополнительные, бесконечны. Наблюдаемая Вселенная – трехмерная поверхность, или мембрана, в мире с большим числом измерений. Обычная материя может существовать только в пределах мембраны, но некоторые силы, такие как тяготение, могут ускользать из нее.

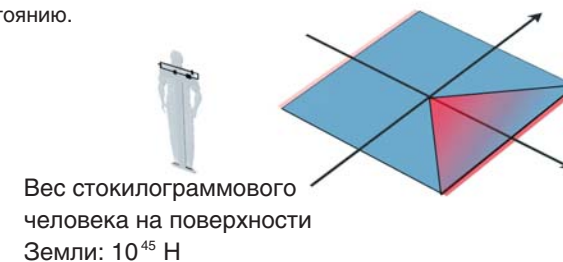
Гравитация обладает такой способностью, достойной Гудини, потому что фундаментально отличается от других сил. Согласно квантовой теории поля, силу тяготения переносят особые частицы – гравитоны. Гравитационное притяжение обусловлено их потоком между двумя телами, так же как сила электрического или магнитного взаимодействия обусловлена потоком фотонов между двумя заряженными частицами. Когда тяготение статично, гравитоны виртуальны: хотя

ОТ ФЛАТЛАНДИИ ДО ЧЕТЫРЕХ ИЗМЕРЕНИЙ

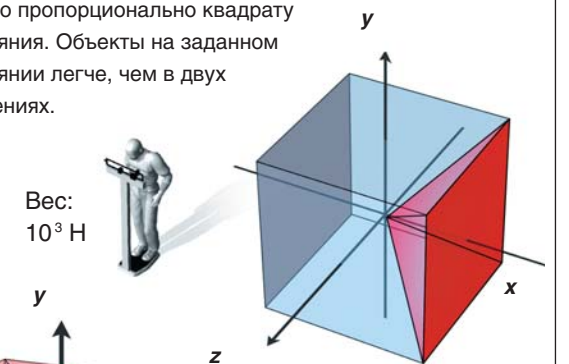
ИЗВЕСТНЫЙ ПЛАКАТ художника Джерри Муни (Gerry Moony) гласит: «Гравитация – не просто хорошая идея, а закон». Но все же этот закон довольно гибок. Например, он зависит от числа пространственных измерений. Гравитация ослабевает с расстоянием, потому что по мере удаления от своего источника она распределяется по все большей границе (на диаграммах показана красным).



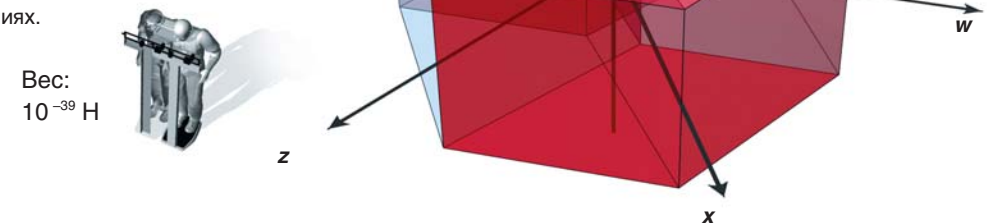
ДВА ИЗМЕРЕНИЯ: Граница – одномерная линия, которая увеличивается прямо пропорционально расстоянию. В результате сила тяготения убывает обратно пропорционально расстоянию.



ТРИ ИЗМЕРЕНИЯ: Граница становится двумерной, и гравитация ослабляется обратно пропорционально квадрату расстояния. Объекты на заданном расстоянии легче, чем в двух измерениях.



ЧЕТЫРЕ ИЗМЕРЕНИЯ: Этот случай трудно изобразить, но к нему применимы те же основные правила. Граница оказывается трехмерной, а тяготение убывает пропорционально кубу расстояния. Объекты еще легче, чем в трех измерениях.



обусловленную ими силу можно измерить, их нельзя наблюдать как независимые частицы. Солнце удерживает Землю на орбите, потому что испускает виртуальные гравитоны, которые наша планета поглощает. Реальные или непосредственно наблюдаемые гравитоны соответствуют гравитационным волнам, испускаемым при определенных обстоятельствах.

Согласно теории струн, гравитоны, как и все частицы, представляют собой колебания крошечных струн. Однако электрон, протон и фотон рассматриваются как колебания струн с разомкнутыми концами, подобных струнам скрипки,

а гравитон – как колебания замкнутой петли, подобной резиновому кольцу. Йозеф Полчински (Joseph Polchinski) из Института теоретической физики в Санта-Барбаре показал, что концы открытых струн должны быть зафиксированы в мембране. Если попробовать вытянуть открытую струну из мембраны, она станет длиннее, но ее концы останутся закрепленными. Напротив, замкнутые струны типа гравитонов ни к чему не привязаны и перемещаются во всем 10-мерном пространстве.

Безусловно, гравитоны не обладают абсолютной свободой, иначе классический закон тяготения

ТРИ СПОСОБА ВВЕДЕНИЯ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

АЛЬБЕРТА ЭЙНШТЕЙНА и его современников, в особенности Теодора Калуцу (Theodor Kaluza) и Оскара Клейна (Oscar Klein), привела в восхищение идея о существовании скрытых измерений, которая нашла свое воплощение в теории струн. Для ясности представьте себе нашу трехмерную Вселенную как плоскую сетку. Через каждую ее точку проходит линия, представляющая одно из дополнительных измерений.

ТРАДИЦИОННАЯ ТЕОРИЯ СТРУН: Долгое время считалось, что дополнительные измерения конечны и имеют вид окружностей суб-субатомного размера. Перемещаясь по такому измерению, крошечное существо в конечном счете возвратилось бы к отправной точке.

МОДЕЛЬ БЕСКОНЕЧНОГО ОБЪЕМА: Автор статьи и его коллеги предположили, что дополнительные измерения ничем не отличаются от трех обычных: они бесконечны и линейны.

Круговое
дополнительное
измерение

Гиперболическое
дополнительное
измерение

МОДЕЛЬ РЭНДАЛЛ-САНДРАМА: Недавно специалисты по теории струн предположили, что дополнительные измерения бесконечны по длине, но сильно искривлены, так что их объем сконцентрирован вокруг нашей Вселенной.

Линейное
дополнительное
измерение

был бы другим. Авторы гипотезы бесконечных измерений Лайза Рэндалл (Lisa Randall) из Гарвардского университета и Рэман Сандрем (Raman Sundrum) из Университета Джонса Гопкинса предположили, что гравитоны ограничены в перемещениях потому, что дополнительные измерения, в отличие от трех обычных, сильно искривлены и образуют впадину с крутыми стенками, из которой гравитонам трудно ускользнуть.

Дело в том, что дополнительные измерения так сильно изогнуты, что их эффективный объем конечен, несмотря на их безграничную протяженность. Как же бесконечное пространство может

иметь конечный объем? Вообразите, что вы наливаете воду в бездонный стакан, радиус которого уменьшается обратно пропорционально глубине. Чтобы наполнить его, достаточно конечного количества жидкости. Из-за кривизны стенок объем стакана сконцентрирован в его верхней части. Нечто похожее происходит в сценарии Рэндалл-Сандрама: объем дополнительного пространства концентрируется вблизи от нашей мембраны. Поэтому гравитоны вынуждены проводить большую часть времени около мембраны. Вероятность обнаружения гравитона быстро убывает с увеличением расстояния. Иными словами, его волновая функция достигает максимума

на мембране – эффект, который называют локализацией гравитации.

Сценарий Рэндалл-Сандрама концептуально отличается от идеи компактных (свернутых) измерений, но дает почти тот же самый результат. Обе модели изменяют закон тяготения для малых расстояний, но не затрагивают его в случае больших, так что ни одна из них не имеет отношения к проблеме космического ускорения.

Физика на мембране

Существует третий подход, подразумевающий нарушение стандартных законов гравитации в космологических масштабах и объясняющий ускорение без привлечения темной энергии. В 2000 г. мы вместе с Григорием Габададзе (Gregory Gabadadze) и Массимо Поррати (Massimo Porrati) из Нью-Йоркского университета предположили, что дополнительные измерения ничем не отличаются от обычных, наблюдаемых нами трех измерений. Они не являются ни свернутыми, ни сильно изогнутыми.

Даже в таком случае гравитоны не всегда могут двигаться, куда им заблагорассудится. Испущенные звездами и другими объектами, расположенными на мембране, они могут уходить в дополнительные измерения только после того, как пройдут некоторое критическое расстояние. Гравитоны ведут себя как звук в металлическом листе, удар по которому создает звуковую волну, распространяющуюся вдоль его поверхности. Но звук распространяется не только в плоскости: часть энергии уходит в окружающий воздух. Вблизи от места удара потеря энергии незначительна, однако по мере удаления от него она становится заметной.

В случае гравитонов такое рассеяние оказывает глубокое влияние на силу тяготения между объектами, удаленными на расстояние больше критического. Утечка открывает виртуальным гравитонам множество многомерных обходных маршрутов, что приводит к изменению закона гравитации. Просачивающиеся наружу реальные гравитоны теряются навсегда: для нас, привязанных к мембране, они просто исчезают.

В условиях маленьких масштабов дополнительные измерения проявляются так же, как в гипотезе свертывания и сценарии Рэндалл-Сандрама. На средних дистанциях, больших, чем размер струн, но меньших, чем расстояние утечки, гравитоны ведут себя как трехмерные и полностью подчиняются классическому закону тяготения.

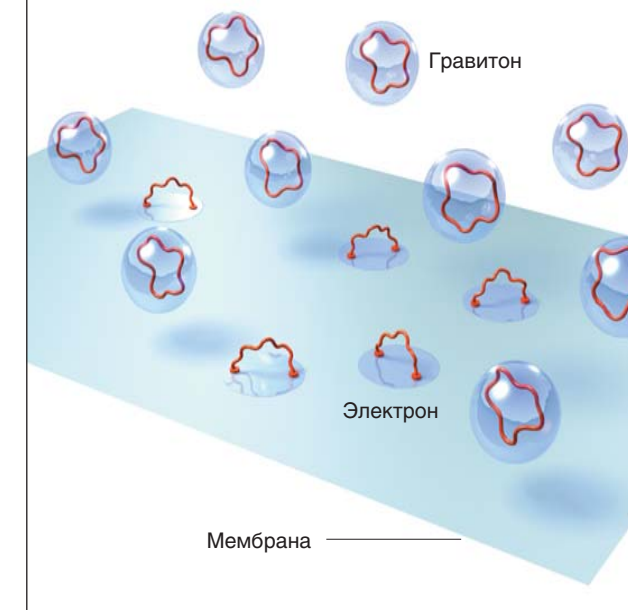
Главным действующим лицом является мембрана – полноценный материальный объект, в ко-

тором гравитация распространяется не так, как в окружающем пространстве. Обычные частицы, такие как электроны и протоны, могут существовать только на мембране. Даже на вид пустая, она содержит бурлящую массу виртуальных электронов, протонов и других частиц, непрерывно создаваемых и разрушаемых квантовыми флуктуациями. Эти частицы создают гравитацию и реагируют на нее. Окружающее пространство, напротив, действительно пусто, и гравитоны свободно пролетают через него, взаимодействуя только друг с другом.

Хорошая аналогия – диэлектрические материалы, такие как пластмасса, керамика или вода. Материал в отличие от вакуума содержит электрически заряженные частицы и может реагировать на электрическое поле. Хотя заряженные частицы не могут течь через диэлектрик как через проводник, они все же способны перераспределяться в его пределах. Если к такому материалу прикладывается электрическое поле, он становится электрически поляризованным. В воде,

ЖЕСТКИЕ СВЯЗИ МЕМБРАН

К СОЖАЛЕНИЮ, даже если дополнительные измерения существуют, люди никогда не смогут попасть в них. Частицы в наших телах – электроны, протоны, нейтроны – следует рассматривать как колебания струн с открытыми концами, которые закреплены в мембране, образующей нашу Вселенную. Гравитоны (кванты тяготения) не имеют концов и поэтому не привязаны к ней.



ПОЛЯРИЗОВАННАЯ МЕМБРАНА

ГРАВИТОНЫ не могут свободно скитаться по дополнительным измерениям. Наша трехмерная Вселенная (мембрана, показанная здесь как плоский лист) заполнена «виртуальными» частицами, которые непрерывно

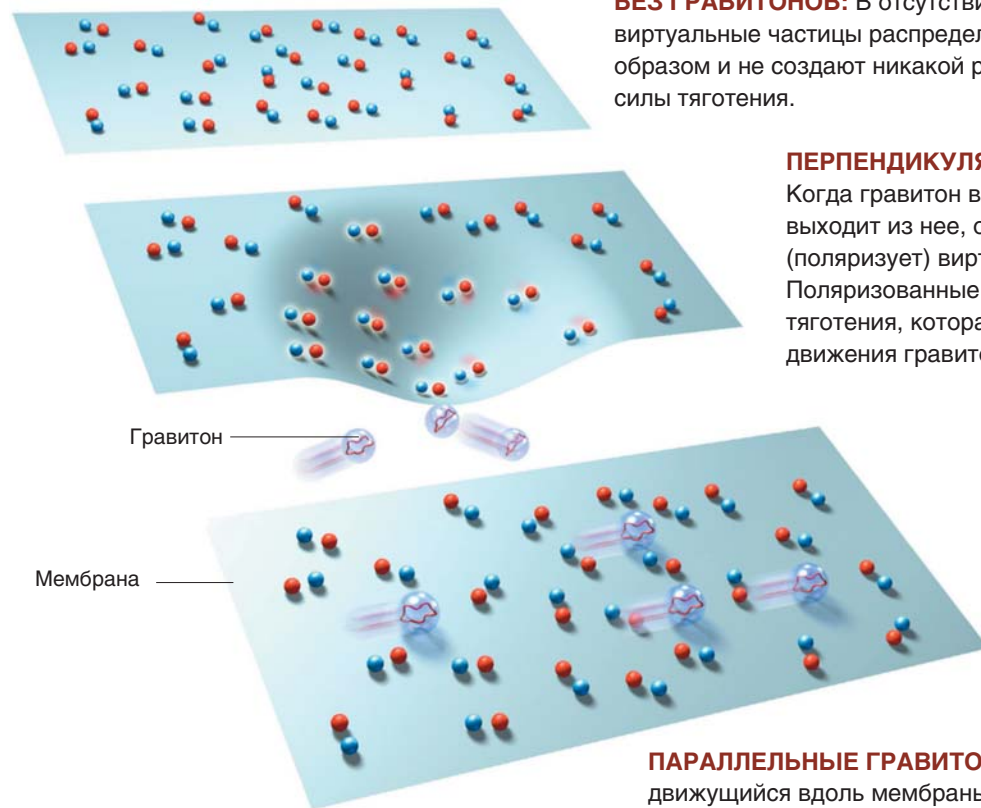
возникают и исчезают. Они появляются парами: одна частица с положительной энергией (синяя), другая — с отрицательной (красная). Такие пары могут препятствовать входу или выходу гравитонов из мембраны.

БЕЗ ГРАВИТОНОВ: В отсутствие гравитонов виртуальные частицы распределены случайным образом и не создают никакой результирующей силы тяготения.

ПЕРПЕНДИКУЛЯРНЫЕ ГРАВИТОНЫ:

Когда гравитон входит в мембрану или выходит из нее, он выстраивает (поляризует) виртуальные частицы. Поляризованные частицы создают силу тяготения, которая направлена против движения гравитона.

ПАРАЛЛЕЛЬНЫЕ ГРАВИТОНЫ: Гравитон, движущийся вдоль мембраны, никак не влияет на виртуальные частицы, потому что создаваемые им силы действуют перпендикулярно мембране. Виртуальные частицы, в свою очередь, не препятствуют движению гравитона.



например, молекулы поворачиваются так, чтобы их положительные концы (пары атомов водорода) были направлены в одну сторону, а отрицательные (атомы кислорода) — в другую. В хлориде натрия положительные ионы натрия и отрицательные ионы хлора немного смещаются в разные стороны.

Перераспределенные заряды создают собственное электрическое поле, которое частично компенсирует внешнее. Диэлектрик может таким образом влиять на распространение фотонов, представляющих собой колебания электрического и магнитного полей. Фотоны, проникающие в диэлектрик, поляризуют его и, в свою очередь,

частично нейтрализуются. Такой эффект наблюдается в том случае, когда длина волны фотонов лежит в определенном диапазоне: длинноволновые фотоны слишком слабы, чтобы поляризовать диэлектрик, а коротковолновые колеблются чересчур быстро, и заряженные частицы не успевают отреагировать. Поэтому вода прозрачна для радиоволн (имеющих большую длину волны) и для видимого света (малая длина волны), но непрозрачна для микроволн (промежуточная длина волны). На этом основана работа микроволновых печей.

Подобным образом квантовые флуктуации превращают мембрану в гравитационный эк-

вивалент диэлектрика. Все происходит так, как если бы мембрана была заполнена виртуальными частицами с положительной и отрицательной энергией. Если к мембране прикладывается внешнее гравитационное поле, она становится гравитационно поляризованной. Частицы с положительной и отрицательной энергией слегка смещаются друг относительно друга. Гравитон, воплощающий осциллирующее гравитационное поле, может поляризовать мембрану и нейтрализоваться в ней, если его длина волны оказывается в нужном диапазоне, который, по нашим расчетам, лежит между 0,1 мм (или меньше, в зависимости от числа дополнительных измерений) и приблизительно 10 млрд. световых лет.

Исчезновение угрожает только гравитонам, перемещающимся в мембрану или из нее. Частицы гравитации, подобно фотонам, являются поперечными волнами и колеблются перпендикулярно к направлению распространения. Гравитон, входящий в мембрану или выходящий из нее, толкает частицы вдоль мембраны, т.е. в направлении, в котором они могут двигаться. Поэтому такие гравитоны могут поляризовать мембрану и, в свою очередь, нейтрализоваться в ней. А гравитоны, перемещающиеся вдоль мембраны, пытаются вытолкнуть из нее частицы в запрещенном для них направлении. Такие гравитоны не поляризуют мембрану и двигаются по ней, не встречая сопротивления. На самом деле большинство гравитонов оказываются между двумя крайностями: они проносятся через пространство под косым углом к мембране и покрывают миллиарды световых лет, прежде чем исчезнуть в ней.

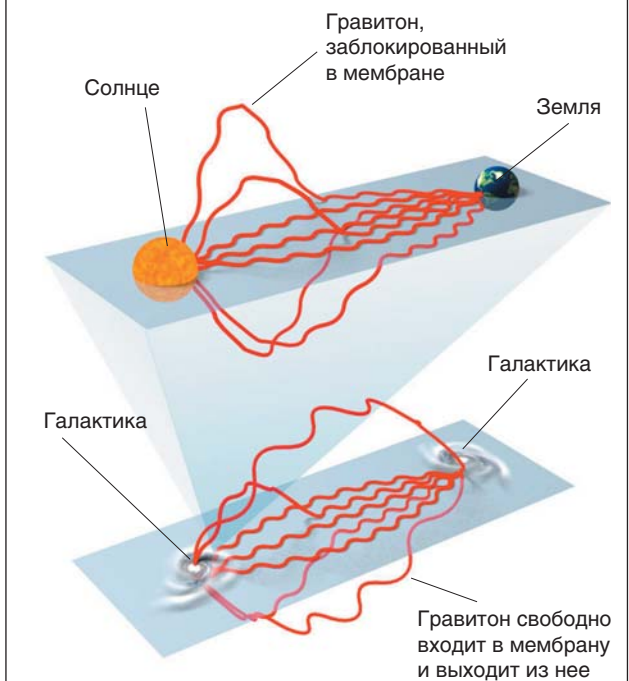
Искавление мембраны

Таким образом, мембрана сама экранирует себя от дополнительных измерений. Если гравитон промежуточной длины волны пытается ускользнуть из мембраны или проникнуть в нее, частицы в ней перераспределяются и препятствуют этому. В результате гравитоны движутся вдоль мембраны, и тяготение следует закону обратных квадратов. Вместе с тем через дополнительные измерения могут свободно проходить длинноволновые гравитоны, роль которых незначительна на малых расстояниях. Однако на дистанциях, сопоставимых с их длиной волны, они доминируют и ослабляют способность мембраны изолировать себя от дополнительных измерений. Поэтому сила тяготения начинает ослабляться пропорционально третьей (если только одно из дополни-

ГРАВИТАЦИЯ ДАЛЕКАЯ И БЛИЗКАЯ

ЧАСТИЦЫ В НАШЕЙ ВСЕЛЕННОЙ стремятся заблокировать те гравитоны, импульс которых достаточно велик, чтобы вызвать ответную реакцию. Гравитоны с малым импульсом (длинноволновые) беспрепятственно входят и выходят из мембраны.

Солнце притягивает Землю, испуская виртуальные гравитоны. Их длина волны относительно невелика (большой импульс), поэтому они не могут покинуть мембрану и ведут себя так, будто дополнительные измерения не существуют.



Две отдаленные галактики испускают длинноволновые гравитоны (низкий импульс), которые могут уходить в дополнительные измерения. Закон тяготения изменяется так, что сила взаимодействия между галактиками ослабевает.

тельных измерений бесконечно), четвертой (если два измерения бесконечны) или еще большей степени расстояния.

Отказавшись от предположения о существовании темной энергии, мы вместе с Габададзе и Седриком Дефейе (Cedric Deffayet) из Парижского института астрофизики пришли к выводу, что дополнительные измерения не только ослабляют тяготение, но и заставляют космическое расширение ускоряться. В шутку можно сказать, что, ослабляя гравитационный «клей», препятствующий расширению, рассеяние гравитонов уменьшает замедление настолько, что оно становится отрицательным и превращается

в ускорение. Разумеется, все не так просто, ведь приходится учитывать, как утечка изменяет общую теорию относительности.

Основная идея теории Эйнштейна состоит в том, что тяготение представляет собой результат искривления пространства-времени, связанного с плотностью материи и энергии в нем. Солнце притягивает Землю, изгибая вокруг себя пространство-время. Отсутствие какой-либо материи или энергии означает отсутствие деформации и, соответственно, гравитации. Однако в многомерной теории соотношение между искривлением и плотностью изменяется. Дополнительные измерения обуславливают появление в уравнениях поправочного члена, который придает кривизну даже пустой мембране. В результате утечка гравитонов создает в мембране напряжение, вводит в нее неустранимую деформацию, которая не зависит от плотности материи и энергии в пределах мембраны.

Со временем материя и энергия становятся более разреженными, искривление, которое они вызывают, уменьшается, и неустраняемая деформация начинает играть все большую роль. Кривизна Вселенной приближается к постоянной величине. Тот же самый эффект наблюдался бы, если Вселенная была бы заполнена субстанцией, которая не становится более разреженной с течением времени. Поэтому неустранимое искривление мембраны действует так же, как темная энергия, которая ускоряет космическое расширение.

Нарушители законов

В 2002 г. Тибо Дамур (Thibault Damour) и Антониос Папазоглу (Antonios Papazoglou) из Института фундаментальных научных исследований во Франции вместе с Яном Коганом (Ian Kogan) из Оксфордского университета предположили, что существует особый вид гравитонов, которые в отличие от обычных обладают небольшой массой. Давно известно, что гравитоны с массой не подчиняются обратноквадратической зависимости. Они нестабильны и постепенно распадаются, вызывая те же эффекты, что и при утечке гравитации: гравитоны, проходя огромные расстояния, постепенно исчезают, тяготение ослабляется, и космическое расширение ускоряется. Шон Кэрролл (Sean Carroll), Вайкрам Дувури (Vikram Duvvuri), Майкл Тернер (Michael Turner) из Чикагского университета и Марк Троден (Mark Trodden) из Сиракьюзского университета модифицировали теорию Эйнштейна для трех измерений, введя в урав-

нения поправочные члены, обратно пропорциональные кривизне пространства-времени. Они были бы пренебрежимо малы на ранней стадии развития Вселенной, но могли бы ускорить ее расширение в дальнейшем. Другие группы исследователей также пытались изменить закон тяготения, но их предложения не исключают потребности в темной энергии для объяснения ускорения.

Поскольку в сценариях с утечкой гравитации и с темной энергией переход от замедления к ускорению происходит совершенно по-разному, выбрать одну из предложенных моделей помогут наблюдения. В частности, большие надежды возлагаются на более точное и детальное исследование сверхновых.

Возможны и другие эмпирические проверки. Гравитационная волна, как и электромагнитная, может иметь преимущественное направление колебаний. ОТО допускает существование только двух таких направлений, но в альтернативных теориях их может быть и больше, что должно сказываться на движении планет. Вместе с Андреем Грузиновым (Andrei Gruzinov) и Матиасом Залдариагой (Matias Zaldarriaga) из Нью-Йоркского университета мы вычислили, что утечка гравитонов могла бы вызвать медленную прецессию орбиты Луны. Пока Луна делает один оборот вокруг Земли, точка ее наибольшего сближения с нашей планетой должна сдвигаться примерно на одну триллионную градуса, т.е. приблизительно на полмиллиметра. Такое смещение вскоре можно будет зарегистрировать в экспериментах по измерению расстояния до Луны, которое определяется с помощью лазерных лучей, отраженных от зеркал, оставленных на лунной поверхности американскими астронавтами. Сейчас погрешность лазерного дальномера составляет 1 см. Эрик Адельбергер (Eric Adelberger) и его коллеги из Вашингтонского университета предлагают использовать более мощные лазеры, позволяющие повысить точность измерений в 10 раз. Наблюдения с космического аппарата помогли бы выявить такую же прецессию орбиты Марса.

Долгое время считалось, что теория струн касается только чрезвычайно малых объектов, и никакой эксперимент не сможет подтвердить или опровергнуть ее. Возможно, космическое ускорение поможет ученым проникнуть в дополнительные измерения, пока недоступные для нас, и связать наимельчайшее со сверхбольшим. Не исключено, что судьба Вселенной «висит на струне». ■

(«В мире науки», №5, 2004)

ГАЛАКТИКИ

II

Нас окружает неведомая Вселенная,
в которой звезды составляют лишь 1% массы,
а весь разреженный газ
и другие формы обычного вещества – менее 5%.
Мы говорим: «темное вещество» и «темная энергия», –
на самом деле не понимая, что кроется за этими словами.

Дэвид Клайн
«ПОИСКИ ТЕМНОГО ВЕЩЕСТВА»



НАША РАСТУЩАЯ ГАЛАКТИКА

Барт Ваккер и Филипп Рихтер

Долгое время считалось, что молодость нашей Галактики уже прошла, но оказалось, что Млечный Путь – живой и динамично развивающийся объект.

Наблюдая и изучая особенности Млечного Пути, астрономы долгое время не могли понять общую структуру и историю нашей Галактики. До 1920 г. ученые не были уверены, что Галактика – отдельный объект, один из миллиардов подобных. К середине 50-х гг. они наконец составили план Галактики, представляющий собой величественный диск из звезд и газа. В 60-х гг. теоретики считали, что наша Галактика сформировалась на раннем этапе космической истории – по новейшим оценкам, около 13 млрд. лет назад – и с той поры не претерпевала существенных изменений.

Но выяснилось, что Галактика продолжает формироваться. Как и прежние открытия, это представление возникло в итоге изучения других галактик. Сегодня принято считать, что большинство из них образовалось при слиянии более мелких объектов. В нашей Галактике мы наблюдаем заключительный этап этого процесса: разрываются малые галактики-спутники, захватываются их звезды; из межгалактического пространства непрерывно поступают облака газа. Таким образом, формирование Галактики продолжается, о чем свидетельствуют высокоскоростные облака (*high-velocity clouds, HVC*) – таинственные сгустки водорода с массами до 10 млн. масс Солнца и поперечниками порядка 10 тыс. световых лет, с большой скоростью проносящиеся сквозь внешние области Галактики. Их открыли 41 год назад, но данные последних 5 лет показали: некоторые из этих облаков падают на Галактику. Оказалось, что Галактика «дышит», выталкивая газ, и втягивает его обратно, как бы делая вдохи и выдохи. Кроме того, свойства быстрых облаков говорят о существовании гигантской сферы горячей разреженной плазмы, окружающей нашу Галактику. Астрономы давно подозревали, что она существует, но немногие догадывались, насколько она велика.

Понять природу высокоскоростных облаков было трудно, поскольку, находясь внутри Галактики, невозможно точно определить их местоположение. Мы измеряли две координаты на небес-

ной сфере, но не имели данных о значении третьей – глубины. Неопределенность породила множество гипотез: согласно одним, эти облака находились в нашем непосредственном звездном окружении, согласно другим – далеко в межгалактическом пространстве.

Только с помощью наземных и орбитальных телескопов удалось определить положения этих облаков в мировом пространстве и получить ясное представление о нашем небесном городе.

Изолированная или открытая?

В нашей Галактике около 100 млрд. звезд, большинство из которых сосредоточено в тонком диске диаметром около 100 тыс. световых лет и толщиной около 3 тыс. световых лет. Они обращаются вокруг центра Галактики почти по круговым орбитам. В частности, Солнце несется со скоростью около 200 км/с. Другие 10 млрд. звезд образуют галактическое «гало» – гигантскую сферу, охватывающую диск. Межзвездное пространство заполнено газом и пылью, и основная часть этой межзвездной среды также движется по круговым орбитам вокруг центра Галактики и в еще большей степени, чем звезды, сконцентрирована в ее диске. Как и в атмосферах планет, межзвездная среда плотнее всего «на дне» – в плоскости галактического диска, – и по мере удаления от нее плотность уменьшается. Однако до 10% межзвездной среды находится вне диска и несется со скоростями, превышающими орбитальное движение на величину до 400 км/с. Это и есть высокоскоростные облака.

Их история началась в середине 1950-х, когда Гвидо Мюнх (Guido Munch) из Калифорнийского технологического института обнаружил плотные сгустки газа над плоскостью Галактики, где по всем правилам их быть не должно: с удалением от плоскости давление газа падает (как в атмосфере планеты), поэтому сгустки должны быстро рассеиваться. В 1956 г. Лайман Спитцер (Lyman Spitzer, Jr.) из Принстонского университета предположил, что сгустки удерживает от расширения давление горячей

газовой короны, окружающей Млечный Путь, – вариант солнечной короны галактического масштаба.

Вдохновленный идеей Спитцера, Ян Оорт (Jan Oort) из Лейденского университета в Нидерландах предположил, что и в галактическом гало может содержаться холодный плотный газ. Поиск холодных облаков на большом удалении от плоскости галактического диска в 1963 г. увенчался успехом. В отличие от сгустков, обнаруженных Мюнхом, они не следуют общему вращению Галактики, а, по-видимому, с большой скоростью падают к ее диску, отчего их и назвали высокоскоростными облаками. В том же году открыли объекты, движущиеся медленнее и названные облаками с промежуточными скоростями (*intermediate velocity clouds, IVC*).

Оорт развил свою идею и предположил, что по завершении начального этапа формирования Галактики на границе ее сферы притяжения остался «неиспользованный» газ, который достиг диска только теперь, спустя 10 млрд. лет. Вот он и наблюдается в виде высокоскоростных облаков. Данное предположение согласуется с моделью, в которой ученые пытаются объяснить химический состав Галактики. Тяжелые элементы образуются в звездах, и, когда те умирают, они рассеиваются в межзвездном пространстве. Вновь образующиеся звезды захватывают эти элементы, формируя еще большее их количество. Следовательно, если Галактика развивается в изоляции от внешнего мира, каждое последующее поколение звезд должно содержать больше тяжелых элементов, чем предшествующее.

Однако большинство звезд в окрестностях Солнца имеет почти одинаковое содержание тяжелых элементов независимо от возраста. Вероятно, Галактика не изолирована, и межзвездный газ непрерывно разбавляется более чистым материалом, который приносят высокоскоростные облака. Но подтвердить это предположение пока не удастся.

ОБЗОР: ВЫСОКОСКОРОСТНЫЕ ОБЛАКА

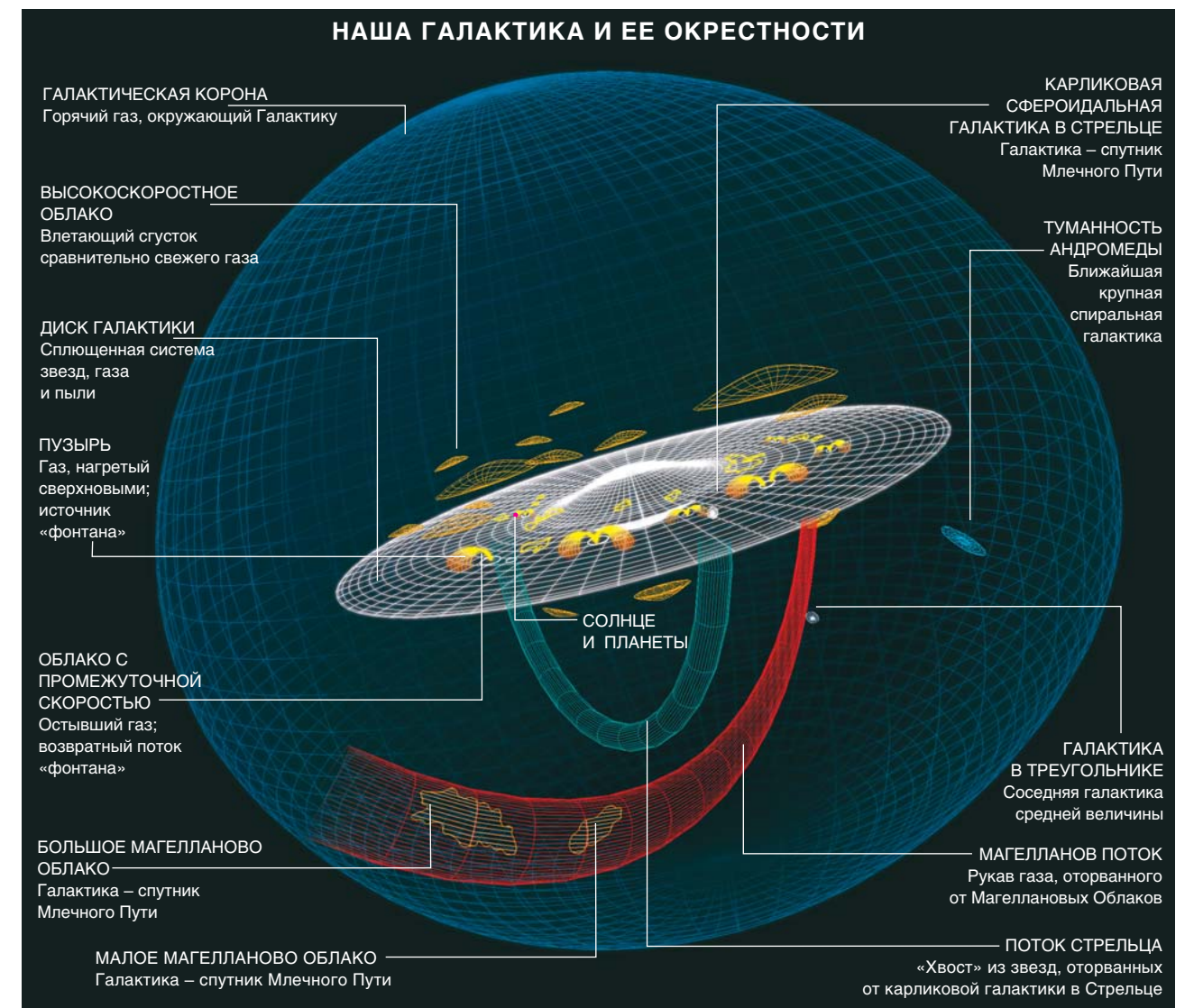
- С начала 1960-х гг. астрономы полагали, что наша и другие галактики родились в начале космической истории и медленно эволюционировали. Теперь доказано, что галактики продолжают расти, поглощая свежий газ и своих меньших соседей из межгалактического пространства.
- Поступающий в Галактику газ образует высокоскоростные облака, некоторые из них состоят из первичного газа.
- Эти облака существуют в нескольких формах: в сгустках нейтрального газа, напоминающего межгалактический; потоках газа, оторванного от соседних небольших галактик, и потоках сильно ионизованного газа, который может быть распределен в межгалактической окрестности.

Согласно другой гипотезе, высокоскоростные облака не имеют никакого отношения к поступающему потоку газа, а служат лишь частью «галактического фонтана». В 70-х гг. к такому заключению пришли Пол Шапиро (Paul Shapiro) из Техасского университета в Остине и Джордж Филд (George B. Field) из Гарвард-Смитсоновского астрофизического центра. Нагретый и ионизованный массивными звездами газ вылетает из диска в корону, образуя «атмосферу». Затем он охлаждается, становится нейтральным и вновь опускается к диску, осуществляя круговорот газа между диском и короной. В 1980 г. Джоэл Брегман (Joel Bregman) из Мичиганского университета в Анн-Арбор предположил, что высокоскоростные облака могут состоять из возвращающегося газа. Долгое время эта гипотеза давала лучшее объяснение их происхождению.

Унесенные приливом

Ни гипотеза Оорта, ни модель фонтана не объясняют всех свойств высокоскоростных облаков. Проблема еще сильнее запуталась, когда в начале 70-х гг. был открыт Магелланов Поток – «струя» газа, охватывающая Галактику. Он следует орбитам Большого и Малого Магеллановых Облаков – небольших галактик, обращающихся вокруг Млечного Пути подобно тому, как спутники обращаются вокруг планет. Обычно астрономы называют облаками сгустки газа или пыли, но это галактики из многих миллионов звезд, а называли их так за внешнее сходство с облаками в ночном небе. Сейчас они находятся на расстоянии около 150 тыс. световых лет от нашей Галактики – наименьшем из всех, на которых они находились когда-либо за время путешествия по своим вытянутым орбитам.

Магелланов Поток похож на цепочку высокоскоростных облаков. Значительная его часть движется со скоростями, несовместимыми с вращением Галактики. Однако ни одна из рассмотренных выше гипотез не объясняет этого. Согласно модели, предложенной в 1996 г. Лансом Гардинером (Lance T. Gardiner) из южнокорейского Университета Солнца и Луны и Масафуми Ногучи (Masafumi Noguchi) из японского Университета Тококу, эта цепочка облаков является приливным потоком, какие наблюдаются и в окрестностях некоторых других галактик. Около 2,2 млрд. лет назад, когда Магеллановы Облака подошли близко к нашей Галактике, совместное притяжение Галактики и Большого Магелланова Облака оторвало часть газа от внешней области Малого Магелланова Облака. Примерно половина этого газа, замедлившись, растянулась по орбите



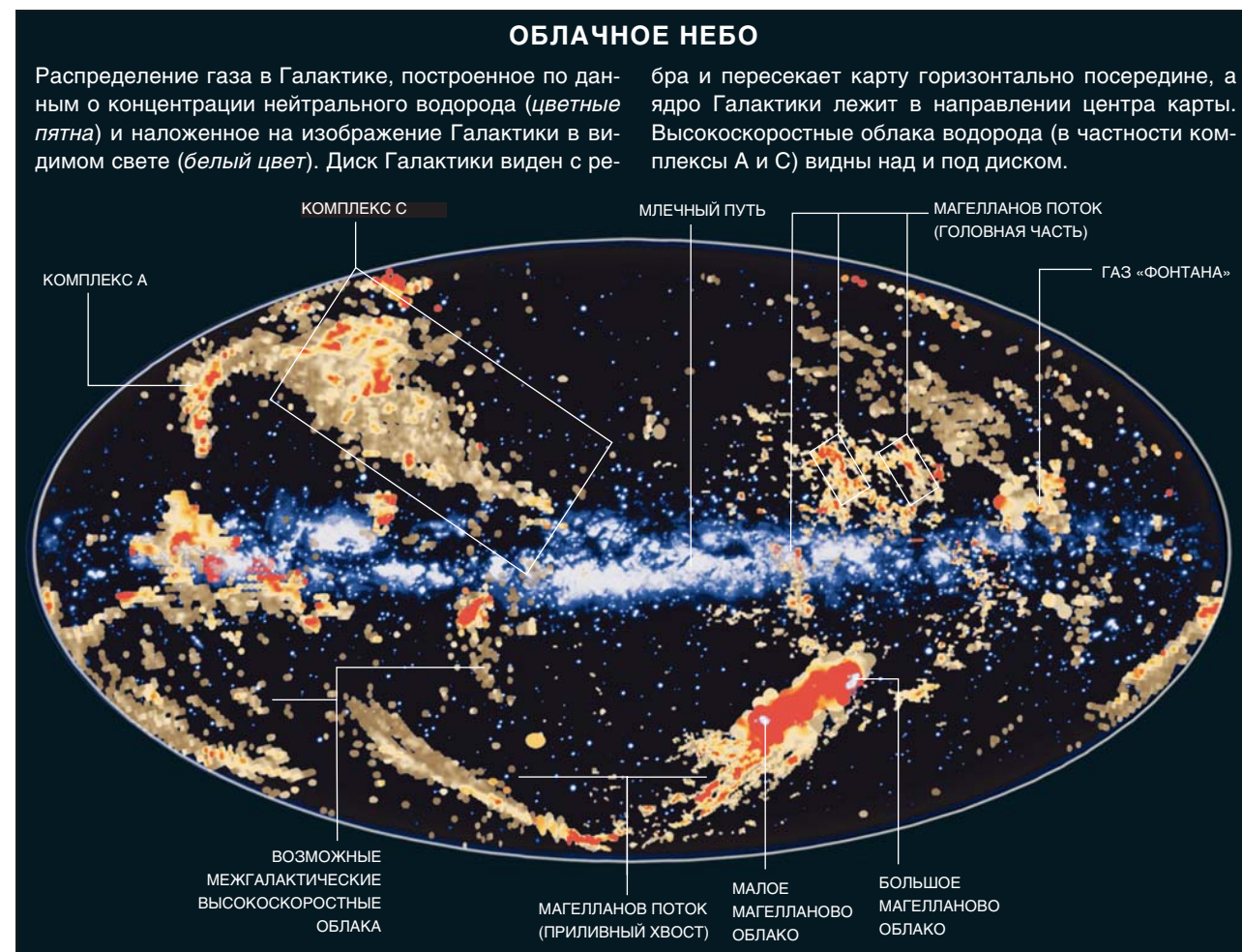
Магеллановых Облаков, отставая от них, а другая половина ускорилась и оказалась впереди этих галактик, образовав так называемый лидирующий рукав. Подобным образом газ мог отрываться и от других галактик – спутников Млечного Пути (см. врез на стр. 75).

Другая модель объясняет рождение Магелланова Потока силой сопротивления. Если Галактика имеет очень протяженную корону (гораздо большую, чем предполагал Спитцер), то эта корона может обдирать газ у Магеллановых Облаков. Согласно обеим моделям, Магеллановы Облака теряют много газа, создавая большинство высокоскоростных облаков.

В 1999 г. Лео Блитц (Leo Blitz) из Калифорнийского университета в Беркли предположил, что высокоскоростные облака могут располагаться на гораздо большем удалении, чем ранее считалось.

Они не проносятся по окраинам нашей Галактики, а плывут вокруг Местной группы галактик, включающей в себя кроме нашей Галактики и Туманности Андромеды еще 40 других небольших галактик, разбросанных в объеме поперечником около 4 млн. световых лет. В данном случае высокоскоростные облака должны быть остатками процесса формирования всей группы галактик.

Подобные идеи уже выдвигались лет тридцать назад, но были отвергнуты, поскольку на таких расстояниях газовые облака не могут быть устойчивыми. Однако Блитц предположил, что высокоскоростные облака – это сгустки темного вещества, в которые включено небольшое количество газа. Массы облаков должны быть вдесятеро больше, чем предполагали ранее, и это позволит облакам сохраниться. Такая гипотеза весьма привлекательна, поскольку устраняет одно давнее



затруднение: модели формирования галактик предсказывают, что темного вещества вокруг галактик должно было остаться больше, чем наблюдается. Высокоскоростные облака как раз и могут содержать эту недостающую темную массу.

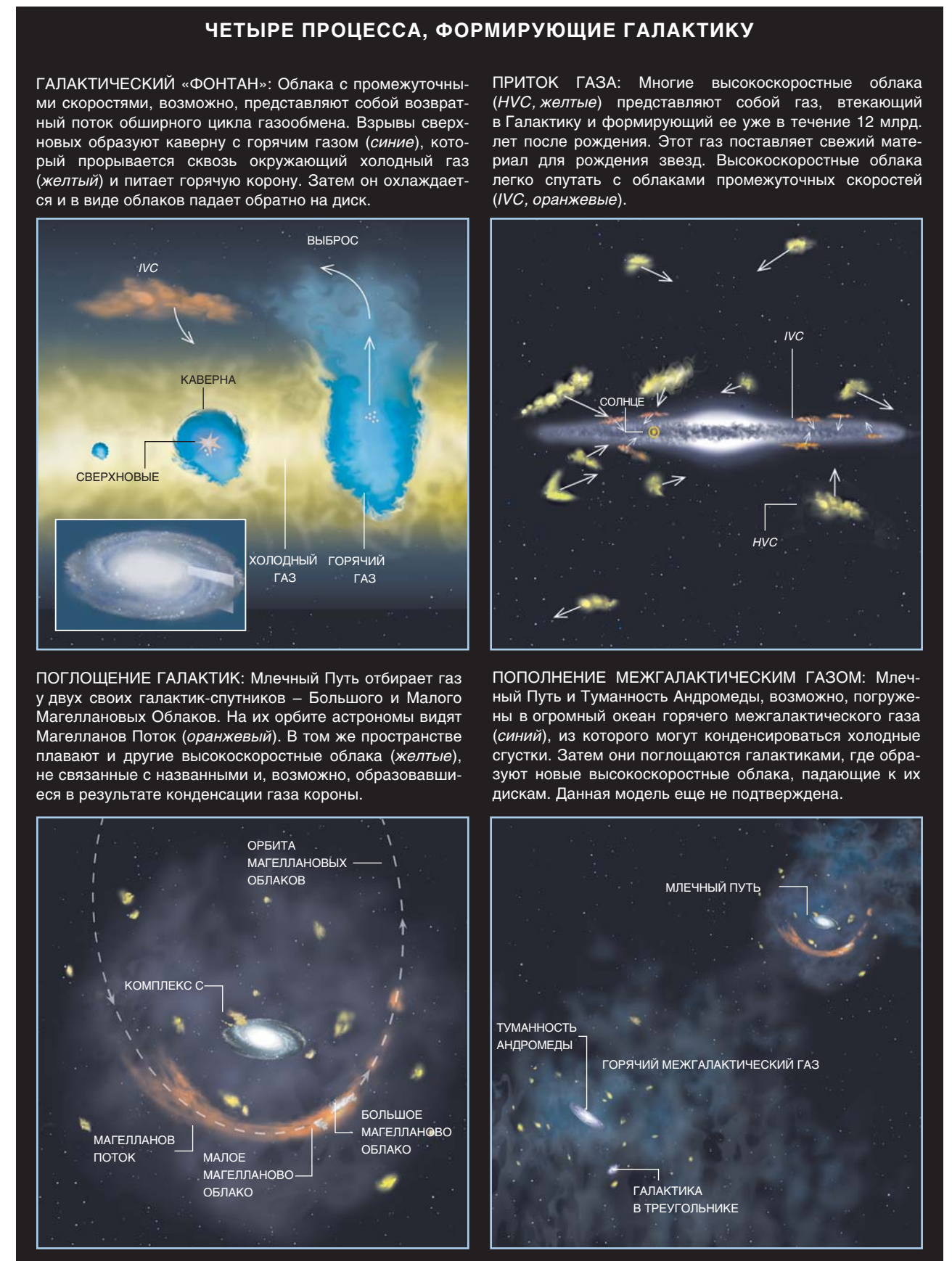
Идет разогрев

В XXI в. астрономы вошли уже с четырьмя гипотезами о природе высокоскоростных облаков: газ, оставшийся после формирования галактик; круговорот газа в «галактическом фонтане»; обрывки Магеллановых Облаков; межгалактическая смесь газа и темного вещества. Для того чтобы сделать выбор между ними, требовались новые данные.

К концу XX в. астрономы обследовали все небо в радиолинии нейтрального водорода, позволяющей обнаруживать газ с температурой около 100 К. В 1988 г. Аад Хульбош (Aad Hulbosch) из Неймегенского университета и один из авторов статьи (Ваккер) с помощью радиотелескопа Обсерватории Двингело в Нидерландах завершили обзор Северного полушария неба. В 2000 г. Рикардо

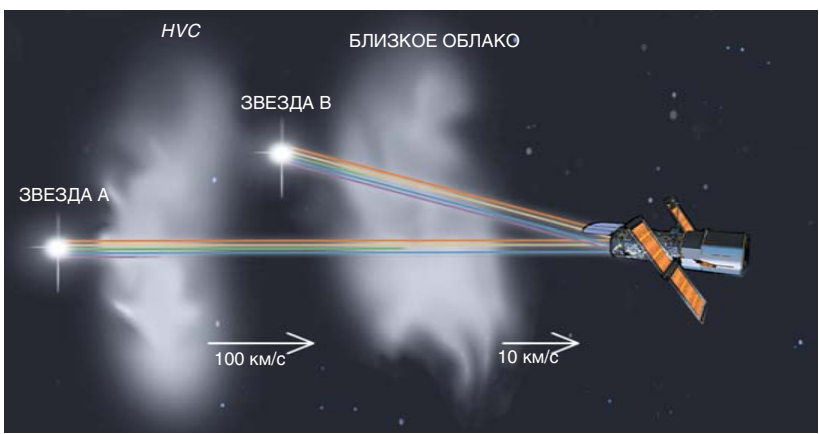
Моррас (Ricardo Morras) с коллегами на радиотелескопе Вилла Элиза (Villa Elisa) в Аргентине обследовал Южное полушарие (см. рисунок выше). Третий обзор опубликовали в 1997 г. Дап Хартман (Dap Hartmann) и Батлер Бартон (Butler Burton) из Лейденской обсерватории. Они провели полное картирование нейтрального водорода в Галактике, включая высокоскоростные облака и облака промежуточных скоростей.

Новые данные принесли наблюдения в видимом свете с помощью таких инструментов, как *Wisconsin Hydrogen-Alpha Mapper* (Висконсинский картировщик H α -излучения). Хотя нейтральный водород не излучает в оптическом диапазоне, ионизованный газ на это способен, а внешние области высокоскоростных облаков как раз ионизованы ультрафиолетовым излучением Галактики и других объектов. К тому же это излучение нагревает внешние части облаков до 8000 К. Яркость их видимого излучения указывает интенсивность радиационного поля вокруг облака, которая, в свою очередь, зависит от их



ЗАГЛЯДЫВАЯ ЗА ОБЛАКА

ДОЛГОЕ ВРЕМЯ АСТРОНОМЫ не могли выяснить ни состав высокоскоростных облаков (*HVC*), ни расстояние до них. Единственный способ узнать об их свойствах – исследовать линии поглощения в их спектре. Свет далеких звезд и галактик в основном проходит сквозь облака, но некоторые волны поглощаются, сообщая таким образом о свойствах облаков. Если в спектре звезды обнаруживаются линии поглощения, значит, между нами лежит облако. Расстояние до звезды дает верхний предел расстояния до облака. Отсутствие же поглощения дает нижний предел расстояния. Разумеется, влияние прочих факторов (погрешность определения расстояний до звезд; отсутствие в облаке элементов, дающих обнаружимые линии поглощения, и влияние поглощения веществом самих звезд) должно быть исключено. Наилучшие результаты дают измерения по линиям нейтрального кислорода и ионизованной серы, лежащим в ультрафиолетовой части спектра. Наблюдать их можно лишь за пределом земной атмосферы, например, с помощью космического телескопа «Хаббл» или спутника *FUSE*. Удобными источниками света для определения расстояний до высокоскоростных облаков служат переменные звезды типа *RR* Лиры и звезды голубой части горизонтальной ветви (на диаграмме Герцшпрунга–Рассела). Их много, расстояния до них измеряются весьма точно, и лишь немногие их спектральные линии перекрываются с линиями облаков. А для измерения содержания тяжелых элементов в облаке лучше использовать активные галактики, например квазары: в их спектре много ультрафиолетового излучения и мало линий поглощения. Звезда или галактика может просвечивать более одного облака. Но все облака движутся с разными скоростями, поэтому вследствие эффекта Доплера они поглощают излучение на несколько различающихся длинах волн. Для изучения по отдельности таких облаков требуются спектрометры с высоким разрешением, а значит, большие телескопы.



ПОПЕРЕЧНОЕ СЕЧЕНИЕ (не в масштабе)

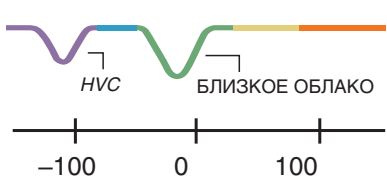
НАИБОЛЬШУЮ ТРУДНОСТЬ

при изучении быстрых облаков представляют измерения расстояний до них. Наилучший из имеющихся способов является косвенным и весьма приблизительным. Рассмотрим высокоскоростное облако, находящееся между звездами А и В, и более медленное облако, лежащее между нами и звездой В.



ВИД С ЗЕМЛИ

НАБЛЮДАЕМЫЙ СПЕКТР ЗВЕЗДЫ А

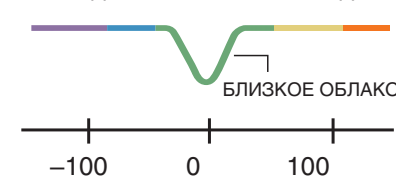


СКОРОСТЬ (км/с) ИЛИ ДЛИНА ВОЛН

ПО НАЛИЧИЮ ДВУХ ЛИНИЙ ПОГЛОЩЕНИЯ

в спектре звезды А астрономы делают вывод о присутствии двух облаков. Длины волн этих линий различаются из-за различия скоростей облаков.

НАБЛЮДАЕМЫЙ СПЕКТР ЗВЕЗДЫ В



СКОРОСТЬ (км/с) ИЛИ ДЛИНА ВОЛН

В СПЕКТРЕ ЗВЕЗДЫ В наблюдается только одна линия поглощения, значит, она должна находиться ближе высокоскоростного облака. Таким образом, две звезды, расстояния до которых могут быть определены независимо, задают верхний и нижний пределы расстояния до этого облака.

расстояния до диска Галактики. Поэтому яркость видимого излучения может служить для оценки расположения облаков.

Важнейшие сведения принесли наблюдения за спектральными линиями поглощения высокоскоростных облаков, которые дают информацию не об излучении газа, а о поглощении им света дру-

гих источников. Благодаря данным, полученным в Обсерватории Лас-Пальмос на Канарских островах, космическому телескопу «Хаббл» и спутнику *FUSE* (*Far Ultraviolet Spectroscopic Explorer*, «Исследователь спектра дальнего ультрафиолета»), запущенному в 1999 г., Лора Дэнли (Laura Danly) из Денверского университета оценила пределы

расстояний до облаков с промежуточными скоростями. Затем Хуго ван Верден (Hugo van Woerden) из Гронингенского университета в Нидерландах впервые измерил расстояние до облака с промежуточной скоростью (см. врез на стр. 28). Тем временем мы определили химический состав облаков.

Данные спутника *FUSE* говорят о наличии у высокоскоростных облаков очень горячего компонента. *FUSE* обнаружил линии поглощения сильно ионизованных атомов кислорода (потерявших до 5 из 8 внешних электронов). Такая степень ионизации говорит о температуре около 300 тыс. К, которая может возникнуть, когда холодный (100 К) нейтральный водород входит в соприкосновение с исключительно горячим (порядка миллиона кельвинов) газом. Но это же может наблюдаться и при охлаждении крайне горячего газа до температуры 300 тыс. К. Вместе с Блэром Сэвиджем (Blair D. Savage) из Висконсинского университета в Мадисоне и Кеннетом Сембахом (Kehheth Sembach) из Института космического телескопа в Балтиморе мы исследовали этот компонент высокоскоростных облаков.

Поведение комплексов

Используя новые данные, можно составить полный портрет высокоскоростных облаков. Мы начали с двух самых крупных – комплексов А и С, открытых еще в 1963 г. Комплекс А удален от нас на 25–30 тыс. световых лет, т.е. находится в галактическом гало. Расстояние до комплекса С составляет не менее 14 тыс. и, вероятно, не более 45 тыс. световых лет от галактической плоскости.

Обоим облакам свойствен недостаток тяжелых элементов: их концентрация там примерно в 10 раз меньше, чем на Солнце. Особенно мало содержание азота в комплексе С – почти в 50 раз меньше солнечного, что позволяет предположить: тяжелые элементы поступали в основном из массивных звезд, в которых образуется меньше азота по отношению к другим тяжелым элементам, чем в звездах малой массы. Согласно новейшим моделям молодой Вселенной, самые старые звезды весьма массивны. Вероятно, комплекс С является остатком древней Вселенной.

Брэд Гибсон (Brad Gibson) из Технологического университета Свинбурна в Мельбурне (Австралия) исследовал другую часть комплекса С и выяснил, что концентрация тяжелых элементов в ней вдвое выше измеренной нами ранее. Различие в составе говорит о том, что комплекс С начал смешиваться с другими облаками галактического гало, имеющими более высокую концентрацию тяжелых эле-

ПОТОКИ В ГАЛАКТИКЕ

В основном наша Галактика хорошо перемешивается: две звезды, родившиеся в одном месте, позже могут оказаться в совершенно разных частях неба. Но в последние годы астрономы выделили группы звезд, движущихся совместно и образующих «звездные потоки». Предполагают, что это остатки галактик – спутников Млечного Пути, разорванные приливными силами в ходе того же процесса, который формирует некоторые высокоскоростные облака. Тогда эти течения отмечают путь звезд от карликовых галактик к Млечному Пути. Они отличаются от Магелланова Потока, состоящего в основном из газа, а не звезд; но и они подтверждают, что наша Галактика продолжает расти. Об этом свидетельствует поток звезд, оторванных от карликовой сфероидальной галактики в Стрельце, который открыли в 1994 г. Родриго Ибата (Rodrigo Ibata) и его коллеги из Страсбургской обсерватории во Франции (см. рисунок выше). Данные, полученные в ходе Слоановского цифрового обзора неба, позволили обнаружить и другие звездные потоки. Один из них может быть связан с карликовой галактикой в Большом Псе, которую открыли недавно Ибата, Николя Мартен (Nicolas Martin) и их коллеги из Страсбургской обсерватории. За последние 2 млрд. лет эта галактика растянулась в спиральное кольцо звезд, лежащее в галактической плоскости.

ментов. Эндрю Фокс (Andrew Fox) из Висконсинского университета по данным об ионизованном кислороде и других ионах показал, что газ с температурой 300 тыс. К в комплексе С представляет собой промежуточную область между горячим и холодным газами. Похоже, мы застали комплекс С в процессе его слияния с Галактикой.

Итак, получены первые прямые свидетельства поступления свежего газа в Галактику. Комплекс С приносит за год массу нового вещества, эквивалентную 0,1–0,2 массы Солнца, а комплекс А – вдвое меньше, что в сумме составляет от 10 до 20% общей массы, необходимой для разбавления галактического газа и объяснения химического состава звезд. Остальную массу могут поставлять другие высокоскоростные облака. Правда, остается неясным, служат ли первичным источником этого газа остатки гало, глубокое межгалактическое пространство или карликовая галактика, поглощаемая нашей Галактикой.

Различное происхождение

Полученные данные исключают 3 из 4 гипотез о происхождении комплексов А и С. Идея о «фонтане» подразумевает, что облака зародились в диске Галактики и по составу близки к Солнцу, а это не так. Гипотеза о Магеллановом Потоке неверно предсказывает содержание тяжелых элементов. Наконец, предположение о темном веществе отпадает, поскольку высокоскоростные облака находятся не в межгалактическом пространстве.

Облака с промежуточными скоростями долгое время оставались в тени более заметных и таинственных высокоскоростных облаков. Астрономы измерили их состав, и оказалось, что он соответствует диску Галактики. Кроме того, выяснилось, что они находятся на расстоянии около 4 тыс. световых лет от диска, т.е. там, где и должны действовать «фонтаны». Итак, облака с промежуточными скоростями, а не высокоскоростные, представляют собой возвратные потоки «фонтанов».

Подтверждением тому стали молекулы водорода, найденные в облаках с промежуточными скоростями. Для формирования молекул требуются частицы межзвездной пыли, количество которых достаточно, если окружающий газ химически обогащен. С другой стороны, в комплексе С молекулярный водород не обнаружен. Таким образом, облака с промежуточными скоростями представляют внутренний газ Галактики, тогда как высокоскоростные облака – первичный газ, поступающий издалека.

Что же касается Магелланова Потока, то как минимум одно высокоскоростное облако представляется обрывком этого течения и находится в головной ее части. При этом по составу оно близко к Малому Магелланову Облаку, как установили в 1998 г. Линмин Лю (Limin Lu) и его коллеги из Висконсинского университета. Какова бы ни была сила, оторвавшая Поток от Малого Магелланова Облака, она его ускорила. Сила сопротивления не могла ускорить газ, это способна сделать только приливная сила. Итак, открытие группы Лю ответило на вопрос о происхождении Магелланова Потока.

Однако и сила сопротивления проявляет себя. Спутник *FUSE* обнаружил высокоионизированный кислород, связанный с Магеллановым Поток, а это указывает на то, что он окружен горячим газом. Следовательно, галактическая корона простирается гораздо дальше, чем предполагал Спитцер, – не на тысячи, а на сотни тысяч световых лет. Плотность этой короны недостаточна, чтобы срывать газ с Магеллановых Облаков, но после отрыва газа приливной силой трение о корону замедляет его, заставляя медленно падать в Галактику.

Подобным образом гипотеза о темном веществе хотя и не объясняет природы комплексов А и С, может «вписаться» в более широкую схему. Блитц ожидал, что межгалактические высокоскоростные облака имеют массы от 10 до 100 млн. масс Солнца. Однако в соседних группах галактик, подобных Местной группе, такие облака не обнаружены, хотя чувствительности современных приборов для этого достаточно. Кроме того, согласно гипотезе Блитца, видимое излучение высокоскоростных облаков должно быть крайне слабым, однако во всех случа-

ях, когда его искали, оно обнаруживалось. Расчеты показывают: если высокоскоростные облака очень далеки, то они должны быть либо полностью ионизованы, либо очень массивны, но ни то, ни другое не подтверждается наблюдениями. Итак, высокоскоростные облака не могут быть гипотетическими облаками темного вещества.

Роберт Браун (Robert Braun) из Обсерватории Двингело и Батлер Бартон (Butler Burton) с Винсентом де Хейем (Vincent de Heij) из Лейдена предположили, что наша Галактика и Туманность Андромеды окружены несколькими сотнями небольших облаков, состоящих в основном из темного вещества и ионизованного газа с примесью нейтрального водорода. Массы облаков могут составлять порядка 10 млн. масс Солнца, и они должны не плавать сквозь Местную группу, а находиться в пределах полумиллиона световых лет от ее главных галактик.

Маловероятно, что облака нейтрального газа разбросаны по Местной группе, но облака другого типа могут в ней присутствовать. По линиям ионизованного кислорода спутник *FUSE* нашел высокоскоростное облако, не содержащее нейтрального газа. Тодд Трипп (Todd M. Tripp) из Принстонского университета обнаружил подобные облака в других областях Вселенной. Из такого горячего газа могут состоять рукава, протянувшиеся в межгалактическом пространстве и возникающие при моделировании крупномасштабной эволюции Вселенной (см. Эван Скэннапьеко, Патрик Птижан и Том Броудхерст, «Абсолютная пустота», «В мире науки», №2, 2003). Полная масса вещества в этих структурах может превышать суммарную массу всех галактик, образуя резервуар, из которого наша Галактика может черпать газ для формирования новых звезд.

Высокоскоростные облака, окружающие Млечный Путь, напоминают, что мы живем в звездной системе, которая продолжает формироваться и эволюционировать. Вначале наша Галактика была окружена множеством меньших галактик-спутников и огромным количеством газа. В течение нескольких миллиардов лет она вобрала в себя большинство малых галактик. Одновременно Галактика выбрасывает газ, обогащенный тяжелыми элементами, в свое гало, а возможно, и в межгалактическое пространство.

В ближайшие 10 млрд. лет Млечный Путь поглотит еще больше галактик-спутников, образуя звездные потоки. Наша Галактика движется к столкновению с Туманностью Андромеды. Неизвестно, как будет выглядеть Млечный Путь в далеком будущем, но мы знаем, что его формирование еще не завершено. ■

(«В мире науки», №4, 2004)

ИЗ ЖИЗНИ СПИРАЛЬНЫХ ГАЛАКТИК

Алексей Фридман

Разрешив основной парадокс спиральной структуры, современная наука, однако, до сих пор не дала исчерпывающего ответа на вопрос о происхождении спиральных рукавов.

Более 2/3 видимой массы Метагалактики содержится в галактиках, своеобразных «кирпичиках» мироздания, около 70% которых – спиральные. Поэтому каждое новое открытие в этих астрономических объектах существенно расширяет наши представления о физической природе как имеющихся в Метагалактике структур, так и действующих в них силах.

Волновая концепция

Более полутора столетий назад (1845 г.) лорд Росс открыл спиральные рукава галактик. Данное событие сразу привлекло внимание многих астрономов к этим динамичным и загадочным структурам. Последующие 3/4 века ученые делали безуспешные попытки дать объяснение их происхождению, что заставило выдающегося английского астрофизика Джеймса Джинса печально заявить, что «в спиральных туманностях действуют совершенно неизвестные нам силы, которые только и способны объяснить неудачу при попытках понять происхождение спиральных ветвей...».

Прошло еще четверть века, прежде чем многолетние исследования другого крупного ученого, Бертиля Линдблада, асимметрии в распределении скоростей звезд в нашей Галактике привели его в 1926 г. к представлению о различных «подсистемах» Галактики, имеющих примерно одинаковые диаметры в галактической плоскости, вращающихся с одинаковыми скоростями и характеризующихся разной степенью сплюсненности. Позднее было установлено, что наибольшим моментом вращения обладают два диска – газовый и звездный, где наблюдаются спиральные рукава. Тот факт, что спиральные рукава находятся во вращающихся дисках галактик, дал возможность Линдбладу сделать последний решающий шаг к разгадке происхождения спиральных рукавов. Ученый впервые сделал предположение о том, что они имеют волновую природу.

Одним из выдающихся открытий XX в. стало понимание того, что Млечный Путь, который мы

видим в безлунную ясную ночь, есть малая область самой большой волны, которую человек способен разглядеть невооруженным глазом. Так разрешился основной парадокс спиральной структуры. Суть его в том, что галактические диски, в которых наблюдаются спиральные структуры, вращаются дифференциально, а не как твердое тело, т.е. угловая скорость вращения не является постоянной, а уменьшается от центра диска к его периферии. Это означает, что спиральные рукава, представляющие собой области повышенной концентрации (в несколько раз превышающей концентрацию фона) ионизованного и молекулярного газа и молодых звезд, должны были бы вовлекаться в дифференциальное вращение, постепенно увеличивая свою длину. В результате изначально повышенная концентрация плотности вещества в рукавах со временем должна бы уменьшаться и через несколько оборотов сравниться с фоном. Поскольку галактические диски за время своего существования совершают от десятка до сотни оборотов (в зависимости от того, идет ли речь о периферийной или центральной части диска), их спиральные рукава невозможно было бы наблюдать.

Концепция Линдблада о спиральных рукавах как волновых образованиях, вращающихся твердотельно и, следовательно, не подверженных растяжению в дифференциально вращающемся диске, разрешила это противоречие. Более того, волновая концепция стимулировала бурное развитие галактической динамики и внегалактической астрономии.

Солитоны

По мере развития технических возможностей наблюдательной астрономии обнаруживались новые особенности спиральной структуры, не находившие объяснения в рамках теории волн плотности, существенно разработанной такими известными астрофизиками, как Ц. Лин, Ф. Шу, А. Калнайс, А. и Ю. Тоомре, Д. Линден-Белл и др.

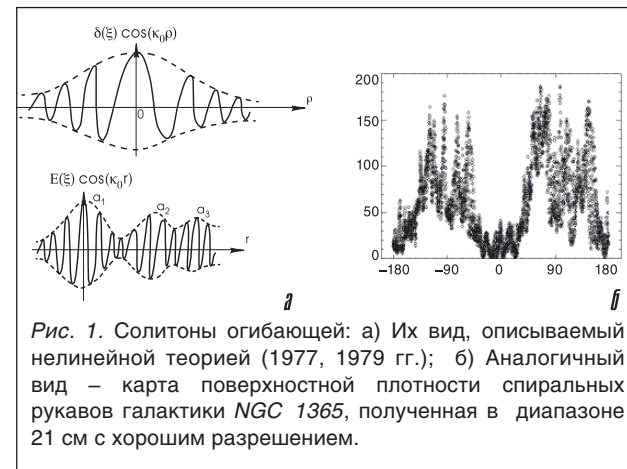


Рис. 1. Солитоны огибающей: а) Их вид, описываемый нелинейной теорией (1977, 1979 гг.); б) Аналогичный вид – карта поверхностной плотности спиральных рукавов галактики NGC 1365, полученная в диапазоне 21 см с хорошим разрешением.

Причина прежде всего состояла в том, что они развивали, в основном, линейную теорию волн плотности. В то же время наблюдения показывали, что плотность вещества в рукавах в несколько раз превосходит плотность фона. Таким образом, возникла необходимость создания нелинейной теории волн плотности, простейший вариант которой привел к качественно новой трактовке, описывающей спиральные рукава как солитоны огибающей (рис. 1а). Многочисленные наблюдения доказали их поразительную устойчивость при распространении в различных неоднородных средах. Сохранение спиральных рукавов на протяжении многих оборотов диска, т.е. в течение продолжительных динамических времен в дифференциально вращающейся неоднородной по плотности системе, вполне естественно, если считать рукава солитонами огибающей. Это подразумевает наличие внутри них короткопериодической осцилляторной структуры. Спустя 24 года после разработки нелинейной теории спиральных рукавов такая структура была обнаружена в спиральных рукавах галактики NGC 1365 – одной из ближайших к нам гигантских спиральных галактик (рис. 1б). Таким образом, открытие новой структуры подтвердило представления о солитонной природе спиральных рукавов.

Гидродинамическая неустойчивость в диске

Разрешив основной парадокс спиральной структуры и объяснив многие связанные с ней данные, современная наука, однако, до сих пор не дала исчерпывающего ответа на вопрос о происхождении спиральных рукавов. Очевидно, что причиной их возникновения является некая неустойчивость диска. Однако если это так, то она должна вызывать возмущение не только поверхностной плотности (т.е. те самые рукава), но

и других параметров диска, например, скорости. Однако до сих пор ничего подобного не было обнаружено. Немаловажную роль в решении вопроса о структурах в полях скоростей спиральных галактик сыграло определение их кривых вращения и наличие в некоторых из них скачков скорости. Это подтолкнуло ученых к созданию гравитационно-динамической обобщенной концепции спиральной структуры. Кроме сил самогравитации диска она учитывает также градиенты плотности и скорости. Проведенные российскими специалистами детальные исследования кривых вращения спиральных галактик показали, что не менее чем в половине из них наблюдаются скачки скорости на кривых вращения, которых достаточно, чтобы вызвать гидродинамическую неустойчивость в диске, ведущую к генерации спиральных рукавов. Доказанная тождественность динамических уравнений галактического самогравитирующего диска и вращающейся мелкой воды послужила основой для моделирования процесса генерации спиральных волн плотности на настольной экспериментальной установке. Ее схема показана на рис. 2а. Две независимо вращающиеся части установки – «ядро» (1) и «периферия» (2) – создают скачок скорости вращения мелкой воды (3), аналогичный наблюдаемому в спиральных галактиках (рис. 2б). Кроме всевозможных спиральных рукавов (рис. 2в), многообразие которых связано с различной величиной относительного скачка скорости вращения, между ними были обнаружены антициклоны (рис. 2г). Их центры находятся как раз в области скачка скорости. Так лабораторный эксперимент позволил предсказать существование новых структур в спиральных галактиках – гигантских антициклонов (их размеры всего лишь в 2 раза меньше радиального протяжения спиральных рукавов).

Спирально-вихревые структуры

Последующие годы были посвящены поиску удобной для наблюдения галактики с относительно большим скачком скорости. Семь лет спустя после предсказания гигантских антициклонов в галактиках были открыты вихревые структуры. Они были обнаружены в поле скоростей спиральной галактики Mrk 1040, имеющей большой скачок скорости на кривой вращения (рис. 3а). Антициклоны располагались между спиральными ветвями, а их центры – в окрестности скачка скорости (рис. 3б) в точном соответствии с модельным экспериментом на вращающейся мелкой воде (рис. 2).

Дальнейшие теоретические исследования показали, что антициклоны вместе со спиральными

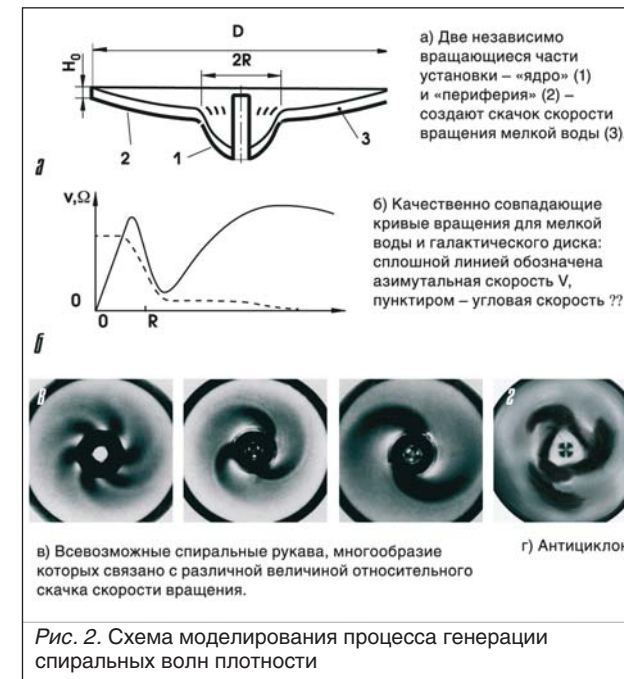


Рис. 2. Схема моделирования процесса генерации спиральных волн плотности

составляют единую спирально-вихревую структуру вне зависимости от вида кривой вращения и типа неустойчивости, их породившей. Это означает, что антициклоны должны присутствовать также в галактиках с гладкой кривой вращения.

Поиск антициклонов в галактиках с профилем вращения без каких-либо особенностей (а таких почти половина) весьма затруднен. Действительно, скачок на профиле скорости вращения является местом не только локализации центров вихрей, но и расположения коротационной окружности, где скорость спирального узора совпадает со скоростью галактического диска. Следовательно, со скачком скорости связана система координат, относительно которой спиральные рукава остаются неподвижными, а антициклоны – стационарными. Сепаратриса, отделяющая антициклон с «захваченными» газовыми облаками от других «пролетных» облаков, также расценивается как стационарная в системе координат, связанной с коротацией. В любой другой системе координат она не стационарна, и разделение траекторий с захваченными облаками в антициклоне и траекторий сполетными облаками проблематично. Другими словами, в любой системе координат, не связанной с коротацией, выделить антициклоны в настоящее время не представляется возможным.

Решение некорректной задачи

Как определить коротационную окружность в галактиках с гладкой кривой вращения? Как

выделить вихревые линии тока в плоскости галактики, если измеряется лишь одна компонента скорости вдоль луча зрения по доплеровскому смещению спектральных линий? Чтобы ответить на эти вопросы, российские ученые разработали метод решения некорректной задачи – определения трех компонент скорости газового диска, располагая данными измеренного поля лишь одной составляющей – лучевой скорости. Как известно, решение любой некорректной задачи невозможно без введения некоторых дополнительных предположений. Достоверность решения резко повышается, если адекватность используемых предположений удастся доказать путем анализа данных наблюдений. (Изложение метода решения некорректной задачи см. на след. странице.)

Параметры волны

В то время как использование гидродинамических уравнений для описания динамики газовых галактических дисков представляется заведомо оправданным, приближенное описание параметров волны в виде (2) требует отдельного обоснования. Для его подтверждения специалистами было предложено несколько наблюдательных тестов, самый простой и естественный из которых состоит в проверке преобладания второй гармоники в Фурье-спектре возмущенной плотности диска и первых трех гармоник в Фурье-спектре возмущенной лучевой скорости (напомним, что при подстановке (2) в (1) мы приходим к Фурье-разложению функции $V_{\text{изм}}$, содержащему только гармоники до третьей включительно).

В качестве примера приведем некоторые результаты, полученные при восстановлении описанным методом поля скоростей газового диска спиральной галактики NGC 157 из измеренного поля лучевой скорости этого диска.

Циклоны и антициклоны

На рис. 4а показан спектр Фурье возмущенной поверхностной плотности, а на рис. 4б – возмущенной лучевой скорости. Явное преобладание второй гармоники в первом случае и первых трех гармоник во втором служит веским аргументом в пользу корректности используемого метода. На рис. 5а показано векторное поле скоростей в плоскости газового диска NGC 157 в системе координат, вращающейся вместе со спиральным узором. Между спиральными рукавами хорошо видны вихревые структуры. Поскольку газ в них вращается против движения галактики в лабораторной системе координат, направление которого

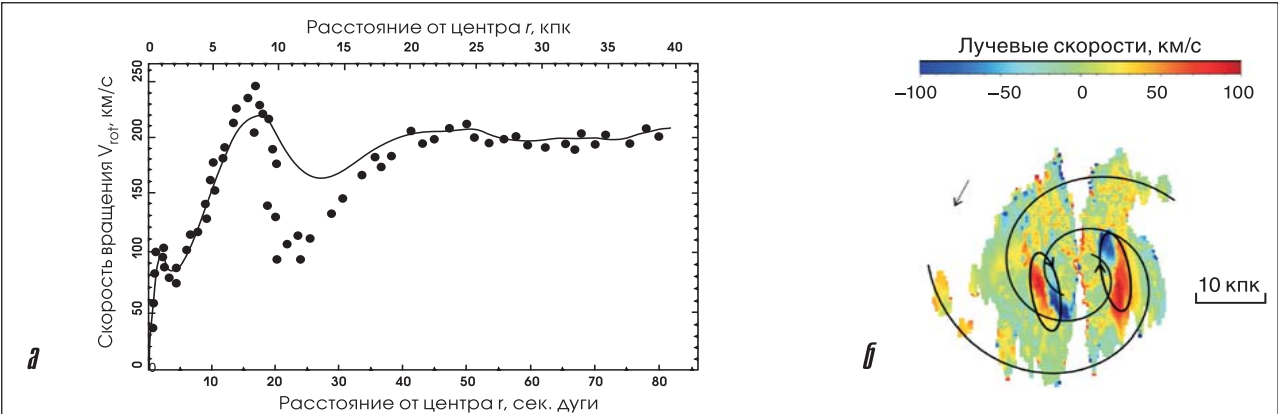


Рис. 3. Галактика Mrk 1040 со скачком скорости на кривой вращения, где впервые были обнаружены гигантские антициклоны: а) Усредненная по азимуту кривая вращения со скачком скорости. Точки – точки наблюдения вдоль линии узлов (т.е. линии пересечения плоскости галактики к плоскости неба, перпендикулярной лучу зрения); б) Распределение лучевых скоростей (вдоль луча зрения). Синий цвет означает движение к нам, красный – от нас. Более насыщенный цвет соответствует большей величине скорости. Проведенные сплошными линиями спирали соответствуют максимумам плотности спиральных рукавов. Обнаруженные антициклоны между спиральными рукавами обозначены эллипсами со стрелкой, указывающей направление вращения вихря.

МЕТОД РЕШЕНИЯ НЕКОРРЕКТНОЙ ЗАДАЧИ

Суть метода такова. Требуется определить пять составляющих поля скоростей: системную скорость $V_{\text{сис}}$ – скорость центра масс галактики, скорость вращения диска $V_{\text{вр}}$ и три компоненты скорости диска в волне плотности: V_r, V_ϕ, V_z – так называемые возмущенные скорости. Нетрудно найти связь этих пяти скоростей с измеряемой скоростью вдоль луча зрения $V_{\text{изм}}$:

$$V_{\text{изм}} = V_{\text{сис}} + (V_r \sin \phi + V_{\text{вр}} + V_\phi \cos \phi) \sin i + V_z \cos i \quad (1)$$

Здесь ϕ – азимутальный угол, r – радиус в галактоцентрической системе координат, i – угол наклона плоскости галактики к плоскости неба (перпендикулярной лучу зрения).

Возмущенные скорости V_r, V_ϕ, V_z заметно меньше скорости вращения $V_{\text{вр}}$, и их симметрия определяется формой спирального узора (в дальнейшем ограничимся рассмотрением двухрукавных галактик, составляющих подавляющее большинство подобных образований с регулярной спиральной структурой). Это обстоятельство позволяет представить возмущенные скорости в виде:

$$\begin{aligned} V_r(r, \phi) &= C_r(r) \cos(2\phi - F_r(r)), \\ V_\phi(r, \phi) &= C_\phi(r) \cos(2\phi - F_\phi(r)), \\ V_z(r, \phi) &= C_z(r) \cos(2\phi - F_z(r)). \end{aligned} \quad (2)$$

Представление возмущенных функций в упрощенном виде есть первое предположение, необходимое для решения данной некорректной задачи.

Ниже будут представлены аргументы в пользу справедливости такого приближения для реальных галактик.

Подставляя выражение (2) в соотношение (1), получим разложение измеряемой скорости $V_{\text{изм}}$ в ряд Фурье по азимутальному углу, содержащее гармоники от нулевой до третьей включительно. Разложив известную из наблюдений лучевую скорость $V_{\text{изм}}$ в ряд Фурье, определяем коэффициенты Фурье вплоть до третьей гармоники включительно. Их оказывается семь: $a_0, a_1, b_1, a_2, b_2, a_3, b_3$, где a_i – коэффициенты при $\cos$, а b_i – коэффициенты при $\sin$.

Для определения восьми неизвестных функций: $V_{\text{сис}}, V_{\text{вр}}, C_r, F_r, C_\phi, F_\phi, C_z, F_z$, требуется еще одно соотношение между ними. В качестве дополнительного уравнения используется какое-либо из гидродинамических уравнений, связывающее различные параметры волны плотности между собой, и в этом состоит второе (и последнее) предположение, необходимое для решения некорректной задачи.

(против часовой стрелки) видно по центральной части диска, эти вихри называются антициклонами. Центры вихрей находятся в окрестности коротационной окружности в соответствии с теоретическими выкладками и лабораторным моделированием.

Описанным методом были восстановлены поля скоростей десятка галактик, имеющих регулярную спиральную структуру, и во всех случаях обнаружены гигантские антициклоны (рис. 5б).

Дальнейшие теоретические исследования полей скоростей газовых дисков показали, что при достаточно высокой амплитуде спиральной волны плотности в них помимо антициклонов могут существовать и циклоны. Если антициклоны находятся между спиральными рукавами, то циклоны, согласно расчетам, должны располагаться в области спиральных рукавов (рис. 6а, где A – антициклон, C – циклон, $\sigma_{\text{max}}, \sigma_{\text{min}}, 0(\sigma)$ – линии максимумов, минимумов и нулевой величины возмущенной поверхностной плотности диска соответственно. Например, линия σ_{min} проходит между спиральными рукавами, σ_{max} – на гребне спиральных рукавов и т.д., а пунктирная окружность проведена на коротации). Выбрав спиральную галактику NGC 3631 и восстановив полное векторное поле скоростей ее газового диска в системе координат спирального узора, ученые на основании проведенных расчетов обнаружили гигантские циклоны как раз в тех областях диска, где и ожидали (рис. 6б, где длинная кривая, состоящая из кружков со звездочками, соответствует σ_{max} , сплошной круг – коротационная окружность).

Центральные перемиčky

История изучения спиральной структуры галактик тесно связана с исследованиями еще одного типа галактических структур – так называемых центральных перемиček, или баров. Последние представляют собой звездные эллипсоиды, наблюдающиеся в центральных областях более чем половины спиральных галактик. Как и спиральные рукава, центральными частями которых они, видимо, чаще всего и являются, бары вращаются твердотельно в плоскости галактического диска. Бары могут быть двух типов: быстрые и медленные. Вероятнее всего, быстрые бары образуются в результате так называемой бар-неустойчивости диска, в котором звезды движутся по орбитам, близким к круговым. Возникающий в этом случае бар вращается примерно с той же скоростью, что и галактический диск у его концов. Альтернативная возможность состоит в формировании медленного бара из звездной системы с преобладанием вытянутых в радиальном направлении орбит. Последняя может быть естественным результатом коллапса центральной части протогалактики, когда основная часть потенциальной гравитационной энергии переходит в кинетическую энергию преимущественно радиального движения звезд. Такая звездная система имеет тенденцию к трансформации из сферической в эллиптическую, поскольку малые трансверсальные скорости не могут препятствовать взаимному притяжению и сближению звезд (точнее, вытянутых звездных орбит). Описанный процесс составляет суть неустойчивости радиальных орбит, впервые исследованный В. Поляченко и И. Шухманом в 1972 г.

Неустойчивость радиальных орбит

Развитие неустойчивости радиальных орбит приводит к формированию медленного бара, вращение которого обусловлено прецессией орбит. В результате он вращается значительно медленнее скорости вращения самих звезд и скорости вращения диска в области концов бара. Условие существования медленного бара, совпадающее с условием границы неустойчивости радиальных орбит, было определено английским астрофизиком Линден-Беллом в 1979 г. Внешнее проявление баров обоих типов может быть весьма схожим, несмотря на разные механизмы их возникновения. До недавнего времени вопрос о существовании медленных баров в галактиках оставался открытым. Решение этой проблемы основано на исследовании отклика диска на гра-

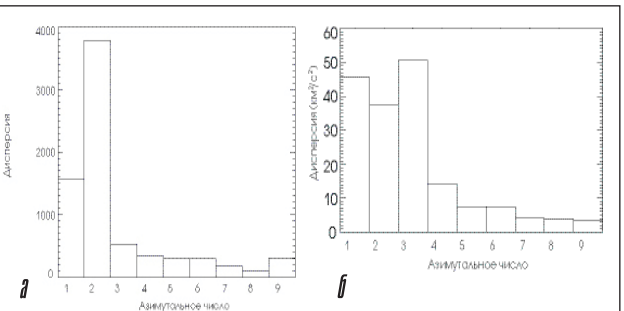
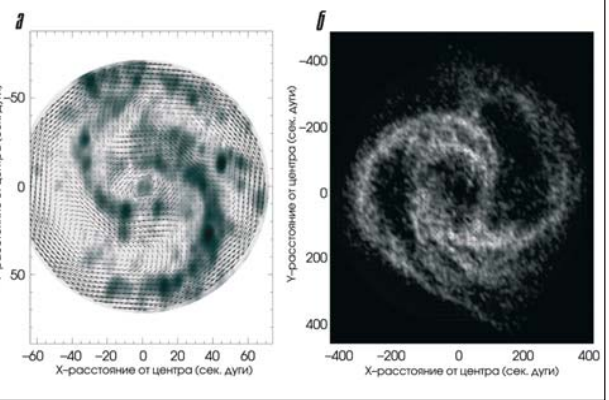


Рис. 4. Фурье-спектры возмущенных поверхностей плотности (а) и лучевой скорости (б).

витационный потенциал бара. Вбыстром баре отклик имеет вид отстающих (вращающихся концами назад) спиральных ветвей, сходных с обычными отстающими рукавами спиральных галактик. Медленный бар вызывает менее тривиальную структуру отклика, которая впервые была определена В. Поляченко в 1994 г. (рис. 7а). Она состоит из отходящей от концов бара туго закрученной лидирующей (вращающейся концами вперед) спирали, которая узкой радиальной области диска совершает, как правило, половину оборота до резкого перехода в основную отстающую спиральную ветвь.

В 2000 г., в ходе анализа результатов наблюдений спиральной галактики NGC 157, в центральной части ее диска была обнаружена именно такая структура, которую можно было проследить по линиям максимальных значений второй гармоники распределения поверхностной яркости в различных диапазонах длин волн (рис. 7б). Так было впервые доказано существование медленных баров в реальных галактиках и подтверждены сделанные ранее нетривиальные теоретические предсказания.

Рис. 5. Гигантские антициклоны в системе координат, вращающейся вместе со спиральным узором: а) Галактика NGC 157; б) Галактика NGC 1365



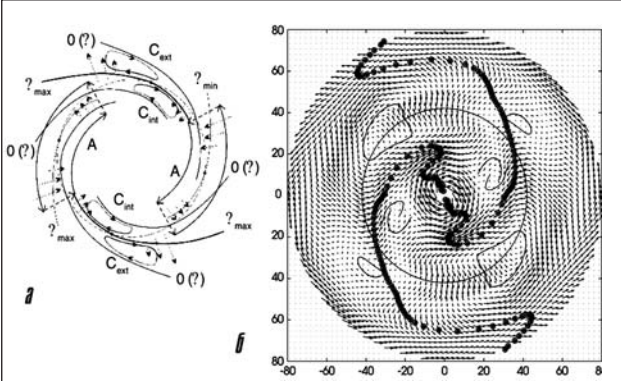


Рис. 6. Циклоны и антициклоны в полях скоростей газовых дисков: а) А – антициклон, С – циклон, $\sigma_{\max}$, $\sigma_{\min}$, $O_{(s)}$ – линии максимумов, минимумов и нулевой величины возмущенной поверхностной плотности диска соответственно. Например, линия $\sigma_{\min}$ проходит между спиральными рукавами, $\sigma_{\max}$ – на гребне спиральных рукавов и т.д., а пунктирная окружность проведена на коротации; б) Длинная кривая, состоящая из кружков со звездочками, соответствует $\sigma_{\max}$, сплошной круг – коротационная окружность.

Расширяя границы познания

В астрономии пока неизвестны случаи, когда открытия делались бы на основании результатов лабораторного моделирования с помощью специально разработанной экспериментальной установки. Все описанные выше структуры обладают совершенно иной физической природой, чем все известные до сих пор. Именно поэтому работы в этой области существенно расширяют границы познания динамических процессов, протекающих в спиральных галактиках. Такие открытия, как, например, гигантские вихри, по значимости

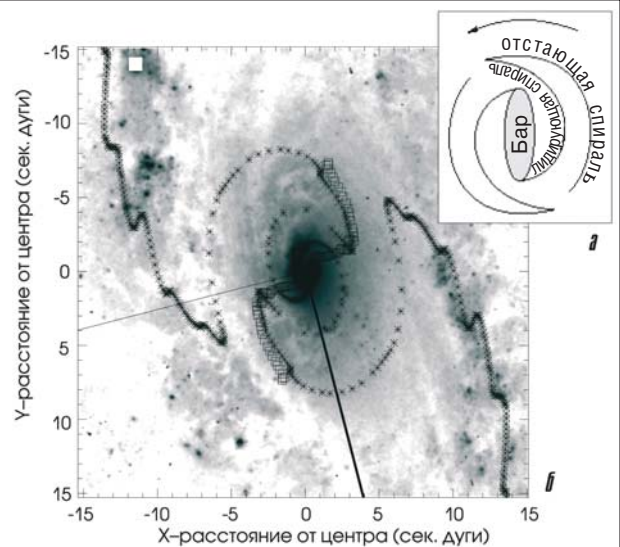


Рис. 7. Медленные бары галактик: а) Структура отклика медленного бара, состоящая из лидирующей спирали (у концов бара) и отстающей спирали (теория); б) Аналогичный отклик медленного бара в центральной части спиральной галактики NGC 157.

ничуть не уступают обнаружению спиральных рукавов галактик. Однако если последние не несут почти никакой информации о динамике диска, в котором они образовались, то расположение вихрей указывает как на местоположение основного, коротационного резонанса галактики, так и на механизм неустойчивости, породивший спирально-вихревую структуру. Таким образом, можно сказать, что гигантские вихри являются «динамическим портретом» галактики. И так же как состояние атмосферы в значительной степени определяется распределением циклонов и антициклонов, динамика галактики характеризуется ее вихревой структурой.

Описанный выше метод восстановления полного трехкомпонентного поля лучевых скоростей из однокомпонентного поля лучевой скорости, использующий естественные для данной задачи два дополнительных предположения, применим для решения некорректных задач, постоянно встречающихся в науке и технике. Наконец, многолетняя работа ученых над обнаружением предсказанных структур стимулировала мощное развитие техники наблюдений. В частности, описанные выше исследования потребовали перехода к бесцелевой спектроскопии и способствовали созданию на БТА, крупнейшем в Европе телескопе, современного измерительного комплекса на основе сканирующего интерферометра Фабри-Перо и пакетов обрабатывающих программ к нему. ■

(«В мире науки», №1, 2005)

ПОИСКИ ТЕМНОГО ВЕЩЕСТВА

Дэвид Клайн

В нашем воображении темное вещество – нечто, находящееся в неведомом мире. Нам не дано понять его сущность до тех пор, пока оно не будет исследовано в земных условиях.

Нас окружает неведомая Вселенная, где звезды занимают менее 1% ее массы, а весь разреженный газ и другие формы обычного вещества – меньше 5%. Мы говорим: «темное вещество» и «темная энергия» – на самом деле не совсем понимая, что кроется за словами.

Уже 70 лет астрономы собирают косвенные доказательства существования темного вещества, но их недостаточно и они не дают представления о свойствах гипотетического вещества. Известно только, что темное вещество, концентрируясь, увеличивает массу галактик и более крупных структур, таких как скопления галактик, и наверняка состоит из еще не открытых элементарных частиц. Темная же энергия, несмотря на сбивающее с толку сходство названия, – совершенно иная субстанция, включенная в картину мира только в 1998 г. Она равномерно распределена в пространстве и вызывает ускоренное расширение Вселенной.

Сущность темных элементов Вселенной раскрывает не астрономия, а корпускулярная физика. В последние годы ученые этих отраслей науки провели совместные симпозиумы по источникам и детектированию темного вещества и темной энергии Вселенной, ближайший из которых состоится в феврале 2004 г. в Марина-дель-Рей (шт. Калифорния). Обнаружить и изучить темное вещество, используя методы, применяемые при исследовании позитронов и нейтрино, – основная идея, обсуждаемая на таких встречах. Ученые ищут доказательства существования темного вещества не путем наблюдения далеких объектов, а в земных условиях.

Поиск частиц темной материи – один из самых сложных экспериментов в физике элементарных частиц (здесь следует упомянуть, что экспериментальное изучение природы темной энергии намного сложнее, чем обнаружение частиц темного вещества). На первом симпозиуме в феврале 1994 г. участники выразили сомнение в том, что имеющиеся детекторы частиц смогут обнару-

жить темное вещество, так как их чувствительность в тысячу раз ниже требуемой. С тех пор она повысилась в 1000 раз и вскоре увеличится еще на столько же. Возможно, мы вскоре узнаем, как выглядит Вселенная, или докажем существование темного вещества, или пересмотрим теории в современной физике.

Через увеличительное стекло

Из каких частиц может состоять темное вещество? Очевидно, что темное вещество не состоит из протонов, нейтронов или из чего-либо, в чей состав входят протоны и нейтроны, таких, например, как массивные звезды, ставшие черными дырами. Согласно расчетам первичного

ОБЗОР: ПОИСКИ ТЕМНОГО ВЕЩЕСТВА

Большинство астрономов считают, что Вселенная заполнена темным веществом. Но подтвердить гипотезу и определить свойства гипотетического вещества не позволяет недостаточная точность наблюдений. Исследователи в области корпускулярной физики пытаются выйти из положения, строя детекторы для обнаружения потока темного вещества, пронизывающего Землю.

Частицы темного вещества

Соударение с атомом

Радиоактивный распад

- Частицы темного вещества не склонны взаимодействовать с обычными атомами, однако такие контакты иногда происходят: частица темного вещества рикошетирует от атомного ядра, которое испытывает отдачу, и сталкивается с окружающими атомами, выделяя энергию в форме тепла или света.
- Трудно отличить выделение энергии от радиоактивного распада. Возможно, именно поэтому появились сообщения об обнаружении темного вещества.

СОСТАВ ВСЕЛЕННОЙ					
Вещество	Типичные частицы	Типичная масса (энергия) частиц, эВ	Число частиц в обозримой Вселенной	Вероятный вклад в общую массу Вселенной, %	Свидетельства существования
Обычное («барионное») вещество	Протоны, электроны	$10^6...10^9$	10^{78}	5	Прямые наблюдения, оценка по распространенности элементов
Излучение	Фотоны микроволн. космич. фона	10^{-4}	10^{87}	0,005	Наблюдения с помощью радиотелескопов
Горячее темное вещество	Нейтрино	≤ 1	10^{87}	0,3	Измерения нейтрино, модели формирования галактик
Холодное темное вещество	Суперсимметричные частицы	10^{11}	10^{77}	25	Оценка по динамике галактик
Темная энергия	«Скалярные» частицы	10^{-30} (в предположении, что темная энергия включает в себя частицы)	10^{118}	70	Ускорение расширения Вселенной по данным наблюдений сверхновых

термоядерного синтеза частиц в ходе Большого взрыва, их слишком мало, чтобы составить темное вещество. Результаты расчетов сопровождались измерениями первоначальных количеств водорода, гелия и лития во Вселенной.

Нейтрино, пронизывающие пространство и не вступающие в контакт с другими атомами, могут составлять лишь малую долю темного вещества. Эксперименты показали, что масса нейтрино очень мала и эти частицы слишком горячи, т.е. на ранних этапах формирования Вселенной двигались почти со скоростью света, а значит, из них не могли сложиться наблюдаемые космические структуры. Лучшее согласие с данными астрономических наблюдений представляет о холодном темном веществе, состоящем из еще не открытых тяжелых и медленных частиц.

Теория суперсимметрии предполагает существование нового семейства элементарных частиц – по суперпартнеру для каждой известной частицы. Гипотетические новые частицы должны быть тяжелее известных. Из них наиболее привлекательно нейтрино – сочетание суперпартнеров фотона (носителя электромагнитных сил), Z-бозона (носителя сил так называемого слабого взаимодействия) и других.

Считается, что нейтрино обладает большой массой и является самой легкой и устойчивой из

суперсимметричных частиц. Она не может распадаться, так как продуктами распада могут быть только более легкие суперсимметричные, каких нет. Кроме того, нейтрино не имеет электрического заряда, и поэтому электромагнитные силы (например свет) на нее не действуют. Масса нейтрино, ее устойчивость и отсутствие заряда соответствуют требованиям к частицам холодного темного вещества.

Теория Большого взрыва позволяет оценить число нейтрино, возникших в горячей первичной плазме космоса, которая представляла собой хаотическую смесь всех видов частиц. Ни одна из них не могла просуществовать долго: она сталкивалась с еще одной, обе аннигилировали, но при этом порождали другие, которые продолжали процесс разрушения и созидания. По мере того как мир подвергался расширению и охлаждению, энергия столкновений падала, и частицы стали конденсироваться.

Нейтрино – частица, не склонная к столкновениям, и поэтому конденсация происходила на самых ранних этапах. Плотность Вселенной была большой, поэтому образовалось огромное число этих частиц. Оценка на основе предполагаемой массы нейтрино и малой склонности к столкновениям дает для суммарной массы всех нейтрино во Вселенной значение, близкое к оценке общей массы темного вещества в ней.

Что свидетельствует в пользу того, что оно и в самом деле является темным веществом.

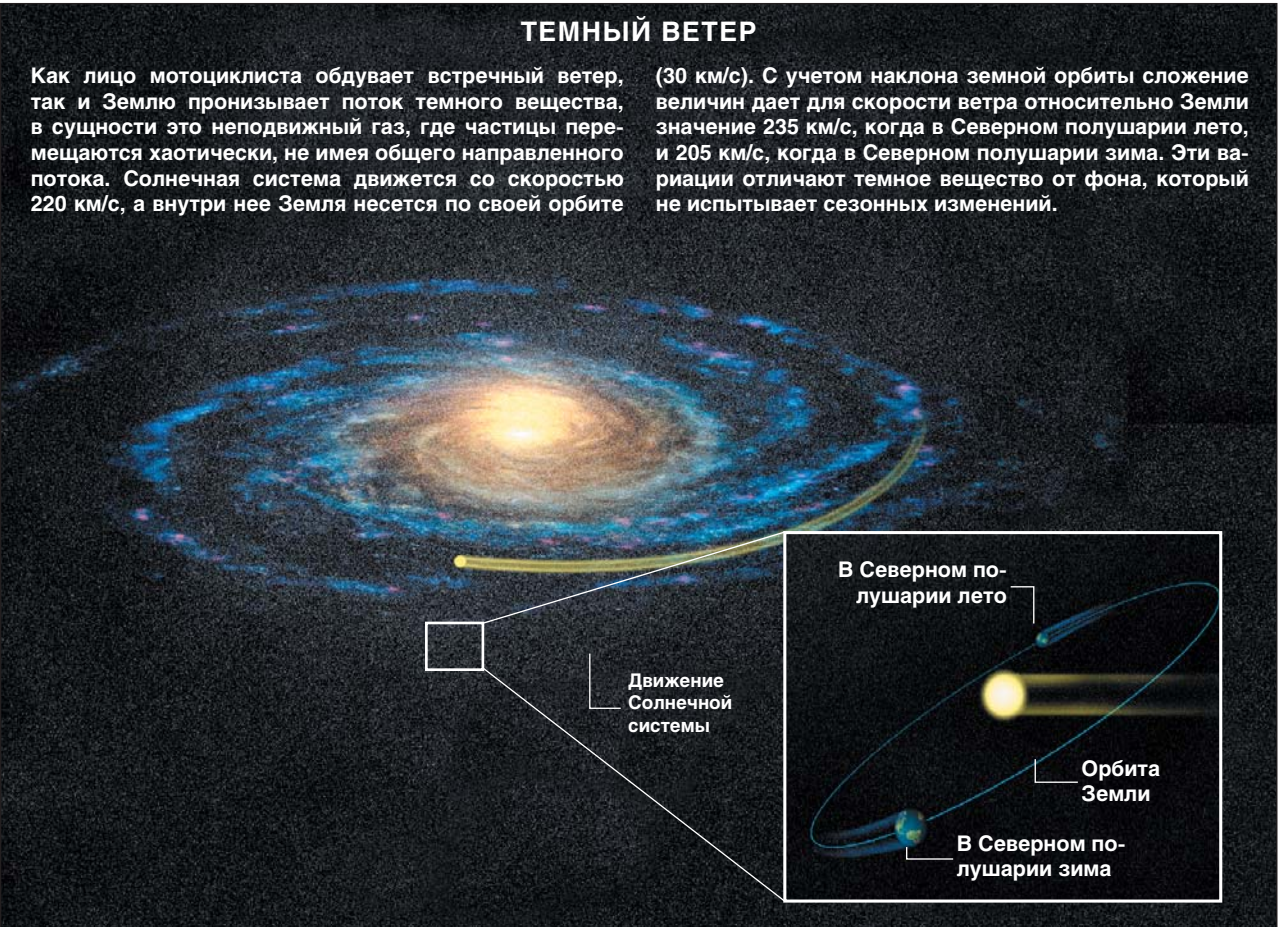
Как обнаружить темную материю

Ученым необходимо выяснить, как частица контактирует с обычным веществом. Астрономы полагают, что взаимодействие может быть только гравитационным, т.е. самым слабым из всех известных в природе. Если это так, то у физиков нет шансов обнаружить нейтрино. Однако возможно, что предположение астрономов – всего лишь удобная аппроксимация: нечто, позволяющее описывать космические структуры без учета конкретных свойств частиц.

Согласно теории суперсимметрии, во взаимодействиях нейтрино должны участвовать силы, более мощные, чем гравитационные: силы слабого взаимодействия. Подавляющее большинство нейтрино будет проходить сквозь слой вещества без всякого контакта, но изредка некоторые из них будут сталкиваться с атомными ядрами и передавать им небольшую часть своей энергии. Малая вероятность и слабость таких взаимодействий компенсируются огром-

ным количеством частиц, ведь предполагается, что темное вещество преобладает в Галактике. Будучи темным, оно не может и собираться в субгалактические сгустки вроде звезд или планет, так как не способно терять энергию путем испускания излучения. Вещество заполняет межзвездное пространство, подобно газу, а наша Солнечная система обращается вокруг центра Галактики, «продираясь» сквозь газ со скоростью 220 км/с (см. рис. 1 стр. 90). По оценкам астрономов, через квадратный метр площади каждую секунду пролетает миллиард частиц темного вещества.

Лешек Рошковски (Leszek Roszkowski) и его группа из Ланкастерского университета в Англии рассчитали интенсивность взаимодействия нейтрино с обычным веществом: она находится в пределах от 0,1 до 0,001 контакта в килограмме обычного вещества в сутки. Современные детекторы способны обнаружить интенсивности, близкие к верхней границе диапазона. Главная проблема сейчас не чувствительность детекторов, а радиоактивный фон вокруг нас. Все материалы на Земле, включая металлы, из которых



СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ ТЕМНОГО ВЕЩЕСТВА						
Проект	Местоположение	Год начала	Тип основного детектора	Материал основного детектора	Масса основного детектора, кг	Тип дискриминационного детектора
UKDMC	Булби, Англия	1997	Сцинтилляционный	Иодид натрия	5	Нет
DAMA	Гран-Сассо, Италия	1998	Сцинтилляционный	Иодид натрия	100	Нет
Rosebud	Канфранк, Испания	1998	Криогенный	Оксид алюминия	0,02	Тепловой
PICASSO	Садбери, Канада	2000	Жидкие капли	Фреон	0,001	Нет
SIMPLE	Рюстрель, Франция	2001	Жидкие капли	Фреон	0,001	Нет
DRIFT	Булби, Англия	2001	Ионизационный	Дисульфид углерода, газ	0,16	По направлению
Edelweiss	Фрежю, Франция	2001	Криогенный	Германий	1,3	Ионизационный, тепловой
ZEPLIN I	Булби, Англия	2001	Сцинтилляционный	Жидкий ксенон	4	Временной
CDMS II	Соудон, шт. Миннесота, США	2003	Криогенный	Кремний, германий	7	Ионизационный, тепловой
ZEPLIN II	Булби, Англия	2003	Сцинтилляционный	Жидкий ксенон	30	Ионизационный, сцинтилляционный
CRESST II	Гран-Сассо, Италия	2004	Криогенный	Оксид кальция и вольфрама	10	Сцинтилляционный, тепловой

делаются детекторы, содержат некоторое количество радиоактивных примесей (в частности, урана и тория), при распаде ядер которых возникают частицы, регистрируемые так же, как частицы темного вещества. Сигнал от земной радиоактивности обычно превышает ожидаемый импульс от нейтралينو в 10 раз. Если разместить детекторы над поверхностью Земли, космические лучи ухудшат ситуацию еще раз в 10. Чтобы обнаружить с достаточной достоверностью любую частицу темного вещества, уровень каждого из этих фоновых сигналов необходимо уменьшить в миллион раз.

Другие трудности

Перед физиками встали две задачи: обнаружить взаимодействие темного вещества с обычным и отделить мешающий фон. Что касается первой задачи, то для регистрации отдачи ядер, с которыми столкнулись нейтралино, проще всего измерить нагрев, вызываемый передачей кинетической энергии. Для этого материал детектора необходимо охладить до очень низкой температуры (до нескольких

милликельвинов). На этом же принципе работает так называемый криогенный детектор, предназначенный для регистрации отдельных фоонов (звуковых квантов в твердом теле, вызванных локальным нагревом, которые для краткости ниже будут называться квантами тепла) в веществе. Такие криогенные детекторы используются в двух программах криогенного поиска темного вещества – CDMS (Cryogenic Dark Matter Search) и Edelweiss. Они работают при температуре 25 мК и сконструированы так, чтобы детектировать отдельные фооны. Для регистрации повышения температуры в разных частях прибора в них применяются терморезисторы (термисторы). Отдельный детектор имеет массу в несколько сотен граммов. Для усиления сигнала можно составить группу, доведя суммарную массу датчиков до нескольких килограммов и более. Новейший детектор системы CDMS, установленный в шахте Соудона в штате Миннесота, начал сбор данных в конце 2002 г. Другой метод основан на использовании ионизации, создаваемой ядрами отдачи. Ядро

выбивает некоторые электроны из окружающих атомов, образуя возбужденные ионы (эксимеры), которые со временем вновь захватывают электроны и превращаются в обычные атомы. В некоторых веществах, в основном в сжиженных инертных газах (в частности, в жидком ксеноне), процесс ионизации вызывает испускание света, называемое сцинтилляцией. На его основе работают эксимерные лазеры, применяемые в глазной хирургии. В жидком ксеноне сцинтилляции очень интенсивны и длятся около 10 нс. Фотоумножитель способен усилить сигнал сцинтилляции до обнаружимого уровня. В начале 1990-х гг. группа Калифорнийского университета в Лос-Анджелесе во главе с Ван Хан

Гуо (Han Guo Wang) и автором настоящей статьи и группа Туринского университета в Италии во главе с Пьо Пикки (Pio Picchi) разработали в рамках проекта ZEPLIN двухфазные детекторы на жидком ксеноне. В приборах мощность светового сигнала усиливается газом, пронизанным электрическим полем, ускоряющим электроны, выбитые из атомов ядрами отдачи, и превращает небольшую группу частиц в лавину. Возможно создание 10-тонного детектора на жидком ксеноне, достаточно чувствительного, чтобы обнаруживать нейтралино даже при очень малой интенсивности их потока. В некоторых детекторах используется газообразный ксенон. Хотя его плотность меньше

СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЙ ДЕТЕКТОР



Проект ZEPLIN II (см. также внизу)

Принцип действия
Регистрация световых импульсов, возникающих при прохождении темных частиц через жидкий ксенон.

Преимущества

- Регистрация формы световых импульсов позволит отличать темные частицы от частиц обычного вещества.
- Определение свойств частиц.

КРИОГЕННЫЙ ДЕТЕКТОР

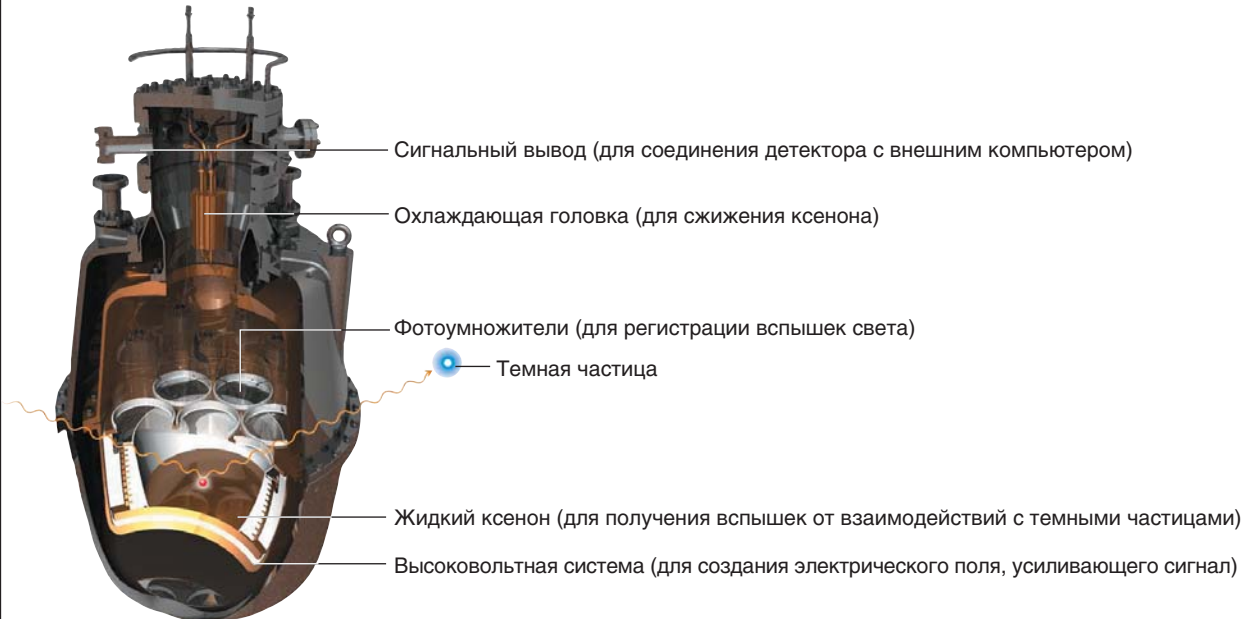


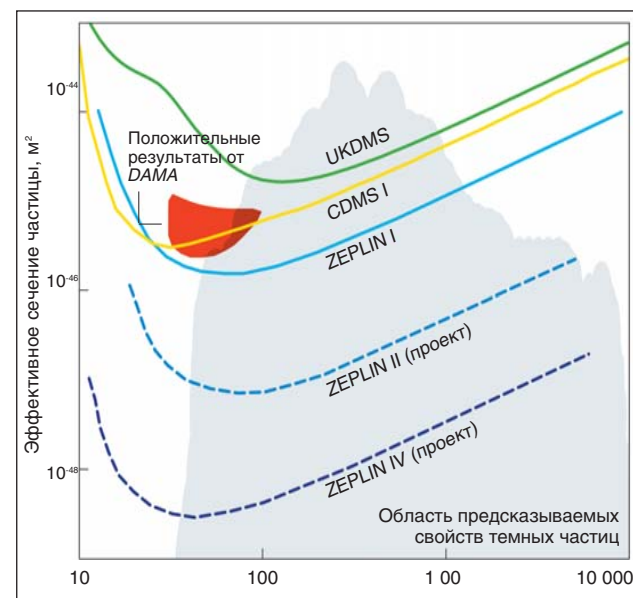
Проект CDMS II

Принцип действия
Регистрация малых тепловых импульсов, создаваемых темными частицами при прохождении через кристалл, охлажденный до очень низкой температуры.

Преимущества

- Простота.
- Чувствительность к частицам малых энергий.
- Точное определение энергии частиц.





плотности жидкого ксенона, газ легче выявляет следы, оставляемые ядрами отдачи, позволяющие судить о направлении частицы темного вещества, подтверждая, что отдача вызвана галактическим нейтрино. Такие детекторы разрабатываются для подземной лаборатории в Булби (Англия).

Ксенон обеспечивает низкий уровень фона и легко получается из атмосферы, но это не единственный материал, в котором возможны сцинтилляции. В эксперименте DAMA, проводимом в лаборатории Гран-Сассо вблизи Рима, в качестве сцинтиллятора используется иодид натрия (NaI). Детектор DAMA массой 100 кг – крупнейший в мире.

Говоря о разнице

Вторая важная задача – устранение фона радиоактивных примесей и космических лучей – решается в три этапа. Прежде всего исследователи отсекают космические лучи, помещая детекторы глубоко под землей и окружая их специальными экранами. Далее они тщательно очищают материал детектора, чтобы свести к минимуму радиоактивные примеси. Наконец, они конструируют специальные приборы, которые выявляют характерные сигналы, отличающие темное вещество от других частиц.

Даже если первые два этапа осуществлены, этого недостаточно. Поэтому в новом поколении детекторов темного вещества используются различные способы защиты от нежелательных воздействий. Первая линия обороны – выявление годовых вариаций сигнала. Когда в Северном

полушарии лето, поток темного вещества должен быть больше, чем тогда, когда там зима, ибо в первом случае скорость движения Земли по орбите суммируется со скоростью движения Солнечной системы сквозь Галактику, а во втором – вычитается из нее. Величина годовых вариаций может достигать нескольких процентов.

В наиболее передовых проектах применяется дополнительный детектор. Два датчика реагируют на разные виды частиц по-разному. В частности, фоновые частицы создают более интенсивную ионизацию, чем ядра отдачи от соударений с нейтрино. Сочетая два детектора, это различие можно уловить.

Поиски сигналов от темного вещества с использованием одного или нескольких из рассмотренных методов начались в конце 1980-х гг. Пока они не дали результатов, поскольку лишь недавно удалось достигнуть необходимых уровней чувствительности и подавления фона. Сообщение участников DAMA о том, что обнаружены годовые вариации, вызвало недоверие. Дело в том, что в исследованиях не использовалась система из нескольких детекторов для выделения искомого сигнала из фона. Данные других опытов, где такая система применялась, ставят под сомнение результаты эксперимента DAMA. Исследования Edelweiss, ZEPLIN I и CDMS I не подтвердили данные DAMA. Команда CDMS I сообщает, что доверительный уровень в их эксперименте составлял 98%. Так что результаты DAMA приходится приписывать радиоактивным эффектам. Окончательный вывод о существовании или отсутствии потока нейтрино позволят сделать детекторы следующего поколения. Если ничего не будет обнаружено, от теории суперсимметрии придется отказаться. Однако если удастся зафиксировать сигнал и его достоверность подтвердится, это станет одним из величайших открытий XXI в. Обнаружение 25% Вселенной (всего, кроме темной энергии) будет, несомненно, самым впечатляющим достижением. Если детекторы обнаружат частицы темного вещества, ускорители вроде большого адронного ускорителя ЦЕРНа близ Женевы, возможно, позволят создать их в лаборатории и проводить эксперименты в контролируемых условиях. Подтверждение теории суперсимметрии спровоцирует открытие новых частиц и подкрепит теорию струн, в которой суперсимметрия – неотъемлемая часть. Возможно, скоро будет раскрыта величайшая тайна астрофизики. ■

(«В мире науки», №7, 2003)

МОЛОДЫЕ ШАРОВЫЕ СКОПЛЕНИЯ

Стивен Зепф и Кит Ашман

Раньше считалось, что шаровые звездные скопления – старые и скучные обитатели Вселенной. Неожиданно выяснилось, что многие из них молоды.

Большей части Галактики звезды разбросаны, словно сельские дома на равнине. Разделенные громадными расстояниями, они живут почти независимо друг от друга. Однако некоторые области Галактики больше похожи на города. Речь идет о шаровых звездных скоплениях – группах из миллионов звезд, сосредоточенных в объеме, который в других местах приходится на одну звезду. Примерно в двухстах из них находятся некоторые из самых старых звезд нашей Галактики, а молодых светил там вообще не видно. Нередко астрономы сравнивали такие скопления с историческими районами старых городов, подобных Риму и Стамбулу, которые сформировались очень давно и с тех пор мало изменились.

По крайней мере так привыкли думать астрономы, вечно занятые составлением карты Вселенной. Но недавно зоркий глаз Космического телескопа «Хаббл» заметил огни новых звездных городов, полных кипучей деятельности. Такие шаровые звездные скопления, по-видимому, формируются при столкновениях галактик. Это открытие поможет астрономам узнать, когда возникли и как эволюционируют массивные галактики.

Шаровые скопления весьма распространены и присутствуют почти во всех галактиках. За редкими исключениями звезды каждого такого скопления имеют почти одинаковый возраст и состав. Это значит, что они появились в ходе вспышек звездообразования – одновременного рождения большого числа звезд в небольшой области пространства. В Млечном Пути этот процесс совпал с образованием самой Галактики, поэтому, изучая шаровые скопления, астрономы определяли возраст Вселенной и уточняли картину формирования галактик. Шаровые скопления Млечного Пути разбросаны по сферическому объему, простирающемуся далеко за пределы диска, в котором сосредоточено большинство звезд. По-видимому, Галактика когда-то имела шарообразную форму, но существенно сплюснулась уже на начальном этапе своей эволюции.

Тот факт, что шаровые скопления Млечного Пути имеют почтенный возраст, сильно повлиял на

изучение таких скоплений вообще. Что подумали бы марсиане, попавшие при посадке на Землю в дом престарелых, где живут одни восьмидесятилетние старики? Не видя других людей, они решили бы, что за последние 80 лет на нашей планете не родился ни один человек. Похожим было положение в астрономии в начале 1990-х гг. Большинство моделей происхождения шаровых звездных скоплений строилось на основе представлений об условиях, существовавших на раннем этапе эволюции Вселенной, исходя из предположения, что их формирование закончилось в далеком прошлом.

Слияние галактик порождает звездные скопления

Около 10 лет назад мы предложили несколько иную модель и независимо от Франсуа Швейцера (Francois Schweizer) из Обсерваторий Карнеги в Пасадине (шт. Калифорния) высказали предположение, что процесс формирования шаровых скоплений, возможно, продолжается и теперь, а отсутствие молодых скоплений – всего лишь артефакт, обусловленный ограниченностью наблюдений. Пусть в нашей Галактике все шаровые скопления действительно старые, но как обстоит дело в других галактиках? Не идет ли формирование

ОБЗОР: ГИГАНТСКИЕ ЗВЕЗДНЫЕ СКОПЛЕНИЯ

- Шаровые звездные скопления – это исключительно плотные группы звезд, содержащие сотни светил на кубический световой год пространства. В окрестностях нашего Солнца на каждую звезду приходится в сто раз больший объем.
- Раньше астрономы считали все шаровые скопления старыми, возникшими на заре космической истории, но недавно выяснилось, что они продолжают возникать и сегодня, причем именно в таких событиях, как столкновения галактик.
- Однако оказалось, что некоторые из скоплений молодые или имеют средний возраст, т.е. возникали на протяжении всей истории Вселенной. Они рождаются в процессе столкновения галактик и могут многое повеждать об этих важных событиях.

НЕБЕСНЫЕ БРИЛЛИАНТЫ

Снимок молодого шарового звездного скопления NGC 1850 (справа) в Большом Магеллановом Облаке, галактике-спутнике Млечного Пути, был сделан 2 года назад с помощью космического телескопа «Хаббл». Шаровые звездные скопления разбросаны вокруг спиральной галактики в пределах огромного шара, который астрономы называют гало. Большинство остальных звезд сосредоточено в сплюсненном диске (внизу), который содержит также две закрученные ветви (на боковой проекции не видны).



таких скоплений всегда, когда позволяют условия? Например, при столкновении двух спиральных галактик, содержащих много газа, из которого формируются звезды. Хотя галактики обычно разделены колоссальными расстояниями, все же наблюдаются случаи их столкновения. Нет нужды говорить, что они сопровождаются драматическими событиями. Слияние двух спиральных галактик часто порождает вспышки звездообразования – большие кратковременные всплески рождаемости звезд. Эта «коллизия» способна изменить и форму сталкивающихся галактик: в результате слияния двух спиральных галактик может образоваться одна эллиптическая галактика. Впрочем, раньше астрономы сомневались в этом. Их скептицизм опирался на тот факт, что в эллиптических галактиках больше шаровых звездных скоплений, чем в спиральных такой же массы. При простом суммировании двух спиралей количество шаровых скоплений на единицу массы галактики должно остаться прежним. Но если сам процесс слияния ведет к образованию новых шаровых скоплений, то их избыток объясним.

Для проверки нашей модели нужно было узнать, нет ли недавно сформировавшихся шаровых скоплений в богатых газом галактиках. Провести соответствующие наблюдения помог космический телескоп «Хаббл». Благодаря отсутствию атмосферных помех он позволил разглядеть в отда-

ленных галактиках отдельные звездные скопления. Наблюдая за галактиками, в которых происходят вспышки звездообразования, «Хаббл» обнаружил массивные и плотные молодые звездные скопления, сформировавшиеся в областях интенсивного звездообразования. По размерам и массам они близки к звездным скоплениям Млечного Пути. Значит, столкновения галактик могут приводить к формированию не только новых звезд, но и новых шаровых звездных скоплений.

Но как убедиться, что эти звездные скопления действительно являются молодыми аналогами тех, что имеются в нашей Галактике? Продолжая пример с марсианами, которые сначала были знакомы только с восьмидесятилетними землянами, можно сказать, что, увидев группу детей, они стали бы искать доказательства того, что старики и дети относятся к одному биологическому виду.

И стар, и млад

Чтобы установить родство старых и молодых шаровых звездных скоплений, нужно было обнаружить две популяции скоплений разного возраста в одной из старых эллиптических галактик. Если такая галактика образовалась в результате слияния спиральных галактик, то она должна содержать как старые шаровые скопления, существовавшие ранее в исходных спиральных галактиках, так и более молодые, возникшие в процессе слияния. Согласно разработанной нами модели,

эллиптическая галактика должна включать в себя примерно одинаковое количество и тех, и других скоплений.

Мы предположили, что два вида шаровых скоплений можно различить по цвету. Звезды в молодых скоплениях должны содержать много тяжелых химических элементов, поскольку сформировались из газа, который «загрязнился» ими при взрывах сверхновых. А вот звезды большинства старых шаровых скоплений в спиральных галактиках вроде нашей сравнительно бедны тяжелыми элементами. А чем больше тяжелых элементов содержится в звезде, тем более красный цвет она имеет, что обусловлено характером происходящих в ней процессов. Ядерный синтез в центре звезды создает излучение, поглощаемое внутри светила газом, давление которого не дает звезде сжиматься под действием собственного тяготения. Когда тяжелых элементов много, газ интенсивнее поглощает излучение, что позволяет поддерживать баланс тяготения и давления при более низкой

температуре, соответствующей красному оттенку. Результаты анализа цвета шаровых скоплений в эллиптических галактиках подтверждают существование бимодального распределения. В большинстве исследованных систем четко выявляются две популяции шаровых звездных скоплений – «голубая» и «красная», что подтверждает связь слияния галактик с образованием шаровых звездных скоплений.

Другим доказательством родства старых и молодых шаровых скоплений могло бы стать обнаружение скоплений промежуточного, «среднего» возраста. Трудность в том, что они мало чем отличаются от старых. Яркие молодые скопления состоят из массивных звезд, которые быстро эволюционируют и быстро умирают, после чего развитие скопления замедляется. В результате различие между шаровыми звездными скоплениями промежуточного возраста и старыми оказывается незначительным и распознать их по содержанию тяжелых элементов очень трудно.

РОЖДЕНИЕ ШАРОВЫХ ЗВЕЗДНЫХ СКОПЛЕНИЙ



Спиральные галактики, подошедшие слишком близко друг к другу, сталкиваются и сливаются. Млечный Путь через несколько миллиардов лет столкнется с ближайшей к нам галактикой – Туманностью Андромеды. В сталкивающихся галактиках содержатся древние шаровые скопления (красные кружки), образовавшиеся примерно в то же время, что и сами галактики. Захватывая друг друга, галактики сливаются в одну, но уже не спиральную, а эллиптическую систему. При столкновении давление газа внутри галактик повышается, что приводит к образованию новых шаровых скоплений (синие кружки). Недавно астрономы обнаружили эллиптические галактики с двумя различными популяциями шаровых скоплений.

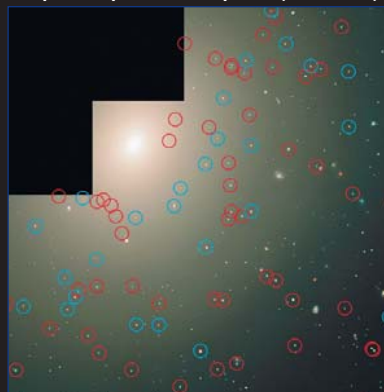
ТРИ ПОКОЛЕНИЯ ШАРОВЫХ ЗВЕЗДНЫХ СКОПЛЕНИЙ

Шаровые звездные скопления Млечного Пути – такие как *M80* (справа) – состоят из звезд древних, как сама Вселенная. Однако в эллиптической галактике *NGC 4365* (в центре) есть два вида шаровых скоплений – древние (помечены красными кружками) и среднего возраста (помечены синими кружками). В паре сталкивающихся галактик «Антенны» (*NGC 4038* и *NGC 4039*, крайнее правое изображение) есть еще более молодые скопления (врезка).

Старые (*M80*)



Старые и среднего возраста (*NGC 4365*)



Молодые (*NGC 4038* и *NGC 4039*)



Все же астрономы нашли шаровые скопления промежуточного возраста в нескольких эллиптических галактиках. Группа ученых из Южной европейской обсерватории в Германии и из обсерватории Мюнхенского университета обнаружила большую популяцию шаровых звездных скоплений в довольно обычной эллиптической галактике. Сотрудники Института космического телескопа сосредоточили свои исследования на эллиптических галактиках, в которых благодаря их несколько возмущенной форме (свидетельствующей, что они еще не достигли полной зрелости) и наличию более молодых звезд ожидалось присутствие шаровых звездных скоплений промежуточного возраста. Результаты детальных наблюдений подтвердили это предположение.

Сюрпризы плотности

Итак, установлено, что существуют шаровые звездные скопления всех возрастов: молодые – возрастом от нескольких миллионов до нескольких сотен миллионов лет (в сливающихся галактиках), среднего возраста – несколько миллиардов лет, старые – возрастом около 12 млрд. лет (только они были известны ранее). Некоторые результаты детального их изучения оказались неожиданными.

Плотность газа в областях вспышек звездообразования в 100–1000 раз больше, чем в типичных спиральных галактиках. Высокое давление сжимает газ до плотности, необходимой для формирования звезд. В диске нашей Галактики формирование звезд больше не приводит к рож-

дению шаровых скоплений: давление газа слишком мало. С другой стороны, рождение звезд на раннем этапе истории Вселенной вызывало нагрев облаков газа в карликовых и спиральных галактиках, что приводило к повышению давления. Именно это может быть причиной существования шаровых звездных скоплений в карликовых галактиках и во внешних областях спиральных галактик, избежавших крупных слияний. (Претерпев такое слияние, они бы уже не были карликовыми или спиральными.)

Было сделано еще одно важное открытие: примеры недавно сформировавшихся шаровых звездных скоплений не связаны с их массами: более массивные скопления несколько не крупнее, они просто плотнее. Этого никто не ожидал. Обычно чем больше масса объекта, связанного силой тяготения – такого как звезда или планета, – тем больше его размер. Но у молодых звездных скоплений это не так. На сегодня лучшее объяснение обнаруженного парадокса следующее: вначале скопления меньшей массы имеют меньшие размеры, но затем теряют часть звезд, и потеря массы ослабляет силы тяготения, в результате чего скопление расширяется.

Но интереснее всего то, что древние шаровые звездные скопления могут служить отличным инструментом для изучения истории космоса с эпохи Большого взрыва, когда формировались звезды и галактики, а более молодые скопления отражают эволюцию Вселенной до сегодняшнего дня. ■

(«В мире науки», №1, 2004)

КОГДА ЗВЕЗДЫ СТАЛКИВАЮТСЯ

Майкл Шара

Столкновение двух звезд – необыкновенное зрелище. Раньше оно считалось невозможным, но теперь известно, что для некоторых областей Галактики это обычное явление.

Не думаю, что кто-то мечтает увидеть подобное. Хотя диаметр белого карлика – меньше одной сотой диаметра Солнца, столкновение с ним вызовет катастрофическую последовательность событий. С приближением к Солнцу карлик начнет притягивать к себе его вещество, из-за чего светило станет похожим на грушу. К счастью, вероятность такого столкновения очень мала. Однако в более плотных частях Галактики, например в шаровых звездных скоплениях, такие события происходят довольно часто.

Из всех возможностей уничтожения жизни на Земле столкновение Солнца с другой звездой – самая драматичная. Если налетающим объектом будет белый карлик (сверхплотная звезда, в которой масса, близкая к массе Солнца, сосредоточена в объеме диаметром всего в одну сотую его диаметра), земляне смогут насладиться зрелищем великолепного фейерверка. Белый карлик врежется в Солнце со скоростью 600 км/с, вызвав мощную ударную волну, которая сожмет и разогреет его до температуры, превышающей температуру возбуждения термоядерной реакции. Карлик пронзит светило насквозь всего за час, но последствия будут необратимыми. За это время Солнце выделит столько термоядерной энергии, сколько оно обычно выделяет за 100 млн. лет. Возросшее давление выбросит газ со скоростью, намного превышающей скорость убегания, и за несколько часов Солнце полностью разрушится. А виновник катастрофы – белый карлик – беззаботно продолжит свой путь.

В отдаленном будущем Солнце (и Землю) могут ожидать разные бедствия, но столкновения с другой звездой – не из их числа. Простые расчеты британского астрофизика Джеймса Джинса (James Jeans), сделанные в начале XX в., позволяют утверждать, что ни одна из 100 млрд. звезд в диске нашей Галактики не сталкивалась с другой звездой.

Но выводы Джинса применимы лишь к окрестностям Солнца, где межзвездные расстояния огромны, а в других частях Галактики столкновения возможны. Плотные звездные скопления –

вот поистине котел, где происходят катастрофы. В последние годы здесь обнаружены тела, которые могли возникнуть только в результате разрушения звезд. Длительную эволюцию звездных скоплений могли нарушить столкновения звезд, и наиболее мощные из них можно наблюдать на полпути к границам Вселенной.

Мир, где звезда пожирает звезду

Открытие квазаров в 1963 г. побудило исследователей обратить особое внимание на столкновения звезд. Многие из квазаров излучают столько энергии, сколько 100 трлн. Солнц, а поскольку некоторые из них меняют яркость меньше чем за сутки, области, где порождается их энергия, должны иметь размеры не больше расстояния, которое может пройти свет за сутки, – это примерно размер нашей Солнечной системы. Астрономы задались вопросами: если миллионы звезд сосредоточить в таком незначительном объеме, будут ли они сталкиваться между собой? Могут ли подобные столкновения вызывать выделение столь огромных энергий?

К 1970 г. стало ясно, что ответ на второй вопрос отрицательный. Не могут столкновения звезд объяснить и образование узких струй, истекающих из

ОБЗОР: СТОЛКНОВЕНИЯ ЗВЕЗД

- Необходимо пересмотреть учебники. Вопреки здравому смыслу стало ясно, что в звездных скоплениях могут происходить столкновения. Особенно это касается шаровых звездных скоплений, где концентрация звезд велика и гравитационные силы увеличивают вероятность таких столкновений.
- О существовании столкновений звезд свидетельствуют факты. Во-первых, в шаровых звездных скоплениях существуют звезды, называемые голубыми бродягами, происхождение которых объясняется столкновениями звезд. Во-вторых, шаровые скопления содержат аномально большое количество рентгеновских источников, которые, вероятнее всего, являются продуктами столкновений звезд.

центральных областей многих квазаров, где генерируется энергия. Ответственность за это была возложена на сверхмассивные черные дыры. Правда, некоторые исследователи недавно высказали предположение, что столкновения звезд могут поставлять вещество в эти черные дыры.

Если ученые, изучающие внегалактические области Вселенной, отвергли возможность столкновения звезд, то их коллеги, занимающиеся Галактикой, признали ее. Спутник *Uhuru*, запущенный в 1970 г. для поиска источников рентгеновского излучения, обнаружил в Галактике около 100 таких источников. Целых 10% из них находятся в наиболее плотных шаровых звездных скоплениях, которые включают в себя лишь

0,01% всех звезд Галактики. Таким образом, число рентгеновских источников в этих скоплениях по какой-то причине непропорционально велико.

Что представляют собой рентгеновские источники? Предположим, что каждый из них – это пара звезд, одна из которых умерла и сжалась, превратившись в нейтронную звезду или черную дыру. Она пожирает звезду-партнера, втягивая в себя ее вещество, и тем самым нагревает газ до столь высокой температуры, что он начинает испускать рентгеновское излучение. Такие патологические пары редки. Лишь в одном случае из миллиарда совместная эволюция двух новорожденных звезд приводит к образованию яркой двойной рентгеновской системы.

ПРОЦЕССЫ, УВЕЛИЧИВАЮЩИЕ ВЕРОЯТНОСТЬ СТОЛКНОВЕНИЯ ЗВЕЗД

Испарение

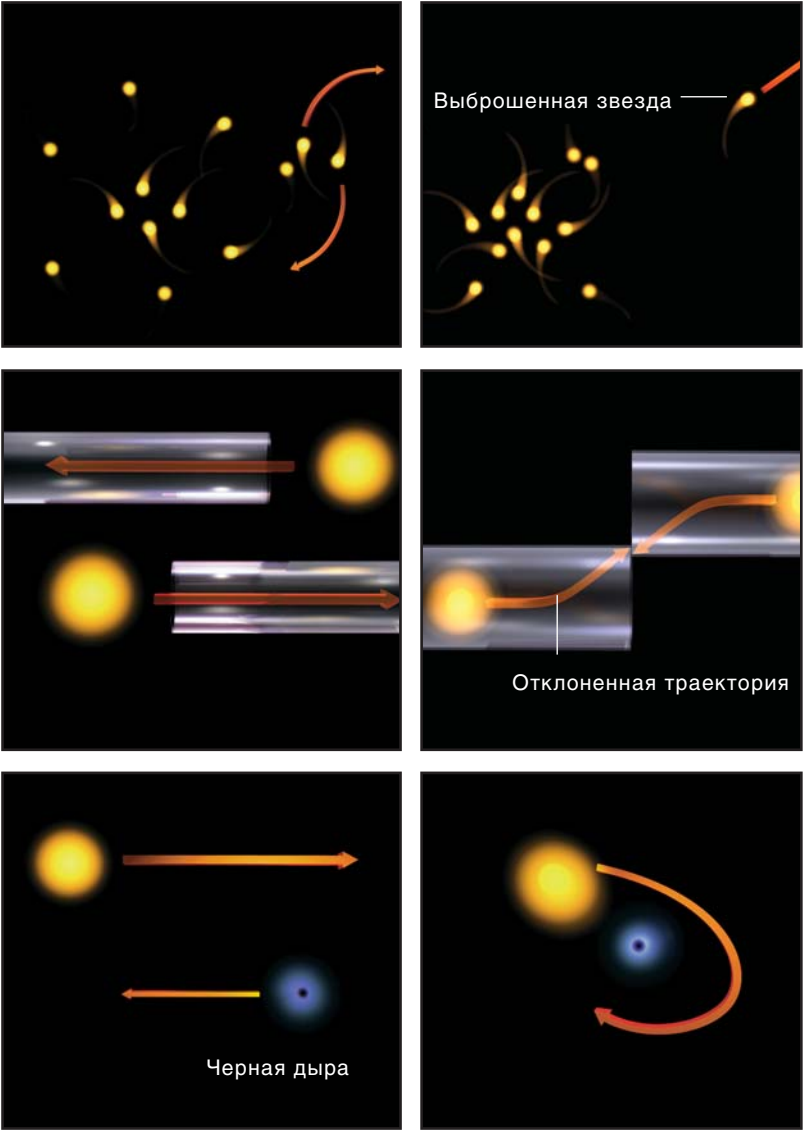
Звезды в шаровых звездных скоплениях напоминают пчелиный рой. Когда 3–4 звезды сближаются друг с другом, происходит перераспределение энергии. Как следствие – одна из звезд может оказаться за границей скопления. При этом оставшиеся звезды сближаются еще теснее и начинают сталкиваться между собой. Этот процесс занимает обычно несколько миллиардов лет.

Гравитационное притяжение

В космическом масштабе звезды представляют собой слишком маленькие мишени, чтобы столкнуться. Каждая из них перемещается в очень узком коридоре в пространстве, и, на первый взгляд, вероятность их пересечения ничтожно мала. Однако гравитационные силы делают звезды более крупными мишенями, отклоняя пути всех приближающихся к ним объектов. В итоге каждая звезда контролирует коридор, поперечник которого во много раз больше диаметра самой звезды, что увеличивает вероятность их пересечения, и следовательно, столкновения звезд.

Приливный захват

Черная дыра или нейтронная звезда – еще меньшие мишени, чем обычная звезда. Но они могут создавать мощные приливные эффекты, которые деформируют пролетающую поблизости звезду. В результате такой деформации происходит рассеяние энергии, что может заставить перейти две звезды на орбиты вокруг их общего центра масс. В таком случае столкновение становится лишь вопросом времени, поскольку последующие близкие прохождения будут приводить к дальнейшему отбору энергии орбитального движения.

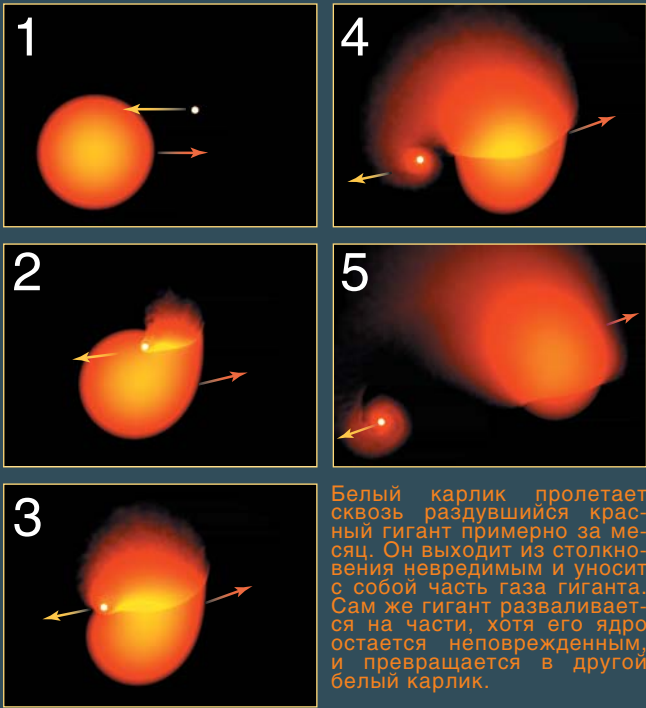


Результаты столкновений

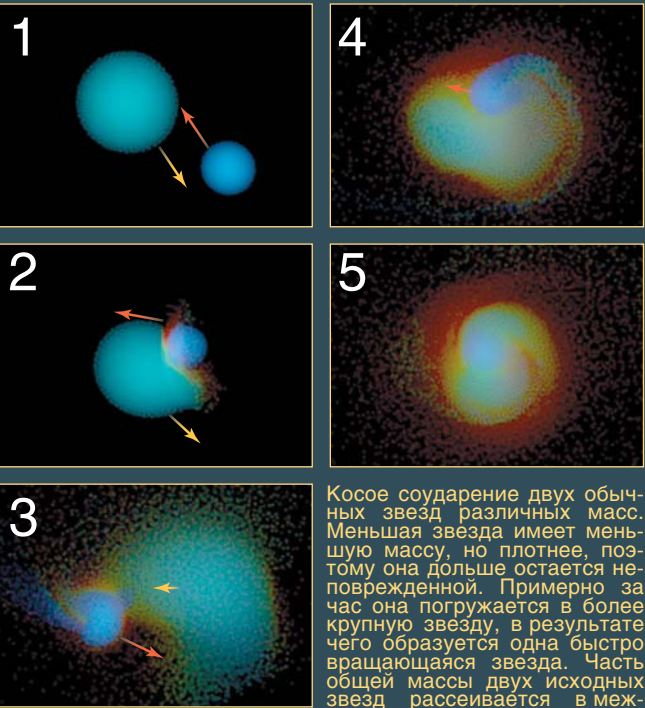
	Сверхгигант	Красный гигант	Звезда главной последовательности	Коричневый карлик	Белый карлик	Нейтронная звезда	Черная дыра
Черная дыра	Черная дыра + диск + белый карлик	Черная дыра + диск + белый карлик	Черная дыра + диск	Черная дыра + диск	Черная дыра + диск	Черная дыра + диск	Черная дыра
Нейтронная звезда	Нейтронная звезда или черная дыра + диск + белый карлик	Нейтронная звезда или черная дыра + диск + белый карлик	Нейтронная звезда или черная дыра + диск	Нейтронная звезда или черная дыра + диск	Нейтронная звезда или черная дыра + диск	Нейтронная звезда или черная дыра + диск	
Белый карлик	Белый карлик + белый карлик	Белый карлик + белый карлик	Белый карлик	Белый карлик или нейтронная звезда	Нейтронная звезда или белый карлик		
Коричневый карлик	Коричневый карлик + белый карлик	Коричневый карлик + белый карлик	Звезда главной последовательности	Звезда главной последовательности или коричневый карлик			
Звезда главной последовательности	Звезда главной последовательности + белый карлик	Звезда главной последовательности + белый карлик	Звезда главной последовательности				
Красный гигант	Белый карлик + белый карлик	Белый карлик + белый карлик					
Сверхгигант	Белый карлик + белый карлик						

Имеется семь основных типов звезд, самые плотные из которых – черные дыры, а наименее плотные – сверхгиганты. Наше Солнце относится к звездам главной последовательности. В приведенной таблице показаны результаты столкновений для 28 различных сочетаний типов звезд. Для многих сочетаний столкновения могут иметь разные исходы в зависимости от скорости соударения, угла и других параметров. Результаты, представленные в таблице, соответствуют столкновениям с умеренной скоростью и глубоким проникновением. Под таблицей показаны два примера таких столкновений.

Белый карлик налетает на красный гигант



Столкновение двух звезд главной последовательности



Белый карлик пролетает сквозь раздувшийся красный гигант примерно за месяц. Он выходит из столкновения невредимым и уносит с собой часть газа гиганта. Сам же гигант разваливается на части, хотя его ядро остается неповрежденным, и превращается в другой белый карлик.

Косое соударение двух обычных звезд различных масс. Меньшая звезда имеет меньшую массу, но плотнее, поэтому она дольше остается неповрежденной. Примерно за час она погружается в более крупную звезду, в результате чего образуется одна быстро вращающаяся звезда. Часть общей массы двух исходных звезд рассеивается в межзвездном пространстве.



Последствия столкновения Солнца с белым карликом. Солнце взрывается, как гигантская термоядерная бомба, и от него остается газовая туманность. Небольшая часть массы Солнца собирается в диск вокруг белого карлика, который продолжает свой полет. Земля сохраняется, но ее атмосфера и океаны испаряются. Гравитационное поле центральной звезды (Солнца) больше не удерживает планеты, и они улетают в межзвездное пространство, где кочуют по всей Галактике.

Как происходящее в шаровых скоплениях может объяснить эти противоречия? Стало ясно, что решающий фактор – высокая концентрация звезд. В радиусе всего нескольких десятков световых лет сосредоточены миллионы звезд (в таком же объеме в окрестностях Солнца находится лишь несколько сотен). Как пчелы в рое, они движутся по непрерывно изменяющимся орбитам. Звезды небольших масс, накопившие в ходе взаимодействия с более массивными одиночными и двойными достаточную энергию, могут выбрасываться за пределы скопления. Этот процесс называют испарением, поскольку он напоминает вылет молекул с поверхности жидкости. Оставшиеся звезды, потерявшие часть энергии, собираются ближе к центру скопления. По прошествии определенного времени они начинают сталкиваться между собой.

Даже в шаровых скоплениях расстояния между звездами очень велики по сравнению с их размерами. Однако в 1975 г. Джек Хилс (Jack G. Hills) и Кэрол Дей (Carol Day), работавшие тогда в Мичиганском университете, доказали, что вероятность столкновения определяется не только размерами звезд. Поскольку в шаровых скоплениях они движутся с малой (по космическим меркам) скоростью, всего в 10–20 км/с, гравитационные силы могут действовать во время сближения достаточно долго. Столкновение может произойти только при условии, что они летят прямо друг на друга. Под действием же гравитационных сил каждая звезда притягивается к другой, в результате чего их траектории сближаются. Из баллистических снарядов, летящих по заданным траекториям, они превращаются в управляемые снаряды, наводящиеся друг на друга. В результате вероятность столкновения увеличивается в 10 тыс. раз. Возможно, что за прошедшие 13 млрд. лет

около половины звезд в центральных областях некоторых шаровых скоплений претерпели одно или даже несколько столкновений.

Эндрю Фабиан (Andrew C. Fabian), Джеймс Прингл (James E. Pringle) и Мартин Рис (Martin J. Rees) из Кембриджского университета высказали предположение, что касательное столкновение или очень близкий пролет двух тел могут привести к тому, что две отдельные звезды образуют двойную. (Обычно близкое взаимодействие двух звездных тел симметрично: они сближаются, набирают скорость, проносятся мимо и, когда не задевают друг друга, расходятся.) Но если одно из них – нейтронная звезда или черная дыра, ее мощное гравитационное поле может деформировать другое тело, отобрав часть его кинетической энергии и не дав ему улететь. Такой процесс называют приливным захватом. Нейтронная звезда или черная дыра наслаждается своей добычей, испуская рентгеновские лучи.

Если во взаимодействии участвуют не две, а три звезды, вероятность образования рентгеновской двойной еще больше. Динамика взаимодействия трех тел очень сложна и в некоторых случаях хаотична. В этом случае звезды обычно перераспределяют свою энергию таким образом, что две более массивные образуют пару, а самая легкая удаляется прочь. Типичная ситуация: одиночная нейтронная звезда подлетает слишком близко к обычной двойной. Одна из составляющих этой двойной звезды улетает, а нейтронная занимает ее место, образуя рентгеновский источник. В итоге динамика трех тел и приливный захват приводят к 1000-кратному увеличению частоты образования рентгеновских источников в шаровых звездных скоплениях, что разрешает противоречие, выявленное спутником *Uhuru*.

Варианты столкновений

Что происходит, когда сталкиваются две звезды? Как и в автомобильной аварии, результат зависит от многих факторов: скорости соударения, внутренней структуры сталкивающихся объектов и параметров удара (лобовой или касательный удар). В одном случае у машины бывает повреждено крыло, в другом – транспортное средство не подлежит восстановлению. Лобовые соударения на больших скоростях наиболее эффективно превращают кинетическую энергию в тепло и давление, что приводит к полному разрушению объекта.

Для подробного изучения столкновений астрономы применяют суперкомпьютеры, но общий эффект определяется несколькими простыми принципами. Самую важную роль играет различие

плотностей. Более плотная звезда получает меньшие повреждения, подобно тому, как на пушечном ядре не останется следов при столкновении с арбузом. Первое исследование лобового столкновения (например, Солнца и белого карлика) было проведено мною и коллегами в 1970–80-х гг. Гиора Шавив (Giora Shaviv) и Оded Ревев работали тогда в Тель-Авивском университете, а сегодня трудятся в израильском Технологическом университете «Технион» в Хайфе. Мы выяснили, что солнцеподобная звезда при таком столкновении уничтожается, а белый карлик, который в 100 млн. раз плотнее, продолжает свой полет, не претерпев никаких изменений, кроме умеренного нагрева внешних слоев и аномального повышения количества азота на поверхности.

При касательном столкновении белому карлику труднее «замести следы». Это показало моделирование, которое провели я, Оded Ревев и Ноам Сокер (Noam Soker) в Университете Хайфы в Ораниме, в Виргинском университете, а также Марио Ливио (Mario Livio) из Института космического телескопа. Разрушенная солнцеподобная звезда может образовать массивный диск на орбите вокруг карлика. Существование таких дисков пока не доказано, но астрономы могут ошибочно принимать их за обменивающиеся массами двойные звезды в скоплениях.

При столкновении звезд одного типа, одной плотности и одного размера события развиваются совершенно иначе. В 1970-х годах моделирование столкновения двух солнцеподобных звезд провели Аластер Камерон (Alastair G. W. Cameron), который сейчас работает в Аризонском университете, и Фредерик Зейдл (Frederick G. P. Seidl) из Института космических исследований им. Годдарда NASA. Когда сферические звезды сталкиваются, они сжимают и деформируют друг друга, принимая форму полушарий. При этом температуры и плотности никогда не достигают значений, необходимых для возбуждения разрушительного термоядерного горения. Небольшая доля общей массы столкнувшихся звезд выбрасывается перпендикулярно направлению их взаимного движения, а основная часть массы смешивается. Примерно за один час обе звезды сливаются воедино.

Касательное соударение вероятнее лобового. Чаще всего массы сталкивающихся звезд различны. Подобный типичный случай исследовали Вилли Бенц (Willy Benz) из Бернского университета в Швейцарии, Фредерик Расио (Frederick A. Rasio) из Северо-Западного университета и Джеймс Ломбарди (James C. Lombardi) из Вассарского коллед-

жа. Касательное соударение – это красивый брачный танец, переходящий в вечный союз двух звезд.

Возникший объект кардинально отличается от одиночной звезды вроде Солнца, которая не может пополнять имевшийся в ней изначально запас топлива. Срок жизни солнцеподобной звезды предопределен: чем она массивнее, тем горячее и тем быстрее сжигает себя. Цвет характеризует ее температуру; именно он помогает компьютерным программам, моделирующим поведение звезды и выработку в ней энергии, с большой точностью предсказать срок ее жизни. Но звезда, образовавшаяся в результате слияния, не подчиняется этому общему правилу. Перемешивание двух слоев газа в процессе соударения может добавить свежую порцию водорода в ядро, омоложив звезду, как подбрасывание веток в угасающий костер помогает ему вновь разгореться. Поскольку образовавшийся объект массивнее, чем его «родители», он оказывается более горячим, более голубым и более ярким. Наблюдатели, которые будут определять его возраст по цвету и яркости, ошибутся.

Например, полный срок жизни Солнца составляет около 10 млрд. лет. Звезда вдвое большей массы в 10 раз ярче его, а продолжительность ее жизни составляет всего около 800 млн. лет. Поэтому, если две звезды, подобные Солнцу, прожив полжизни, столкнутся, они образуют единую горячую звезду, имеющую в момент своего образования возраст примерно в 5 млрд. лет, но ее вид будет соответствовать возрасту менее 800 млн. лет. При этом отпущенный ей срок будет зависеть от того, какое количество водорода попало в ядро в результате соударения. Обычно это время оказывается намного меньше, чем у «родителей». Даже своей смертью такая звезда отличается от других. Умирая, она сначала раздувается в красный гигант, затем превращается в планетарную туманность и в итоге становится белым карликом, который намного горячее других, более старых карликов сравнимой массы.

Становимся голубыми

В шаровом скоплении звезды, рожденные в результате слияния, стоят несколько особняком. Все прочие члены скопления образовались примерно в одно и то же время, а затем их температуры и яркости закономерно изменялись. Однако звезда, образовавшаяся в результате слияния, выпадает из общего синхронизма. Она выглядит неестественно молодой, сохранившейся, тогда, как другие звезды такой же яркости и такого же цвета уже сошли со сцены. Их существование

в ядрах плотных звездных скоплений – одно из самых замечательных предсказаний теории столкновений звезд.

Еще в начале 1950-х Аллан Сендидж из Вашингтонского института Карнеги обнаружил в шаровых скоплениях аномально горячие и яркие звезды, которые стали называть голубыми бродягами (blue stragglers). За многие годы ученые предложили более десятка теорий происхождения этих звезд. Однако лишь в прошлом десятилетии наблюдения с помощью космического телескопа «Хаббл» дали убедительные свидетельства их связи с соударениями звезд.

В 1991 г. Франческо Пареше (Francesco Paresce), Джордж Мейлан (George Meylan) и я, работая в Институте космического телескопа, обнаружили, что центр шарового звездного скопления 47 Тукана переполнен голубыми бродягами. А именно здесь, согласно теории соударений, они должны существовать в наибольшем количестве. Шестью годами позже Дэвид Зурек (David Zurek) из Института космического телескопа, Рекс Саффер (Rex A. Saffer) из Университета в Вильянуэва и я провели первое прямое измерение массы голубого бродяги. Она оказалась вдвое больше массы наиболее массивных нормальных звезд в скоплении, как и ожидалось в случае, если эта звезда образовалась в результате соударения двух звезд. Саффер с коллегами обнаружили еще одного голубого бродягу, масса которого оказалась втрое больше массы обычных звезд скопления. Иной возможности образования столь массивного объекта в данной среде, кроме слияния в результате соударения, астрономы не знают.

Сейчас мы измеряем массы и моменты количества движения десятков голубых бродяг. Тем временем наблюдатели ищут другие предсказанные эффекты соударений. Так, Джордж Джорговски (S. George Djorgovski) из Калифорнийского технологического института и его коллеги обнаружили явную нехватку красных гигантов вблизи ядер шаровых звездных скоплений. Поперечные сечения у красных гигантов в тысячи раз больше, чем у Солнца, поэтому эти огромные мишени при соударениях теряют внешние оболочки и переходят в другой класс.

Разумеется, все это косвенные свидетельства. Среднее время между столкновениями в 150 шаровых звездных скоплениях в нашей Галактике – около 10 тыс. лет. В остальной ее части оно измеряется миллиардами лет. Чтобы астрономы при нынешнем уровне развития техники могли непосредственно наблюдать столкновение, оно должно произойти на расстоянии не более нескольких

миллионов световых лет. В ближайшее время наблюдения за столкновениями звезд начнутся в гравитационно-волновых обсерваториях. Близкие взаимодействия между объектами с массами, соответствующими массам звезд, должны вызывать искажения континуума пространства-времени. Сигнал должен быть особенно сильным при столкновении черных дыр или нейтронных звезд. Огромные выбросы энергии, возможно, приводят к уже наблюдавшимся вспышкам гамма-излучения.

Компьютерное моделирование показывает, что эволюция звездных скоплений в большой степени управляется тесными двойными системами, которые обмениваются энергией и моментом количества движения со всем звездным скоплением в целом. Поскольку близкие взаимодействия одну за другой выбрасывают звезды за пределы скопления, оно может вообще исчезнуть. Пит Хат (Piet Hut) из Института передовых исследований в Принстоне и Элисон Силлз (Alison Sills) из Университета Макмастера в Онтарио утверждают, что звездная динамика и эволюция звезд влияют друг на друга посредством слабой обратной связи.

Интересны судьбы планет, чьи звезды испытали близкое взаимодействие. Численные расчеты Джэррода Харли (Jarrod R. Harley) из Американского музея естественной истории показали, что планеты часто поглощаются породившей их звездой или одной из сестер-планет. Они могут пуститься в дрейф по звездному скоплению или даже оказаться выброшенными за его пределы. Наблюдения Рона Гиллиланда (Ron Gilliland) и сотрудников из Института космического телескопа, выполненные с помощью телескопа «Хаббл», показали, что у звезд из ближайшего звездного скопления нет планет, близких по размеру к Юпитеру, хотя причина этого остается пока не вполне понятной.

Действительно, поразительны успехи в изучении столкновений звезд. Ранее одна мысль о такой возможности казалась нелепой, сегодня изучение этих столкновений стало одним из основных направлений астрофизики. Мнимое спокойствие ночного неба скрывает за собой Вселенную почти невообразимой разрушительной мощи, в разных местах которой ежечасно сталкиваются тысячи пар звезд. Современные возможности позволят наблюдать такие столкновения. Мы станем очевидцами насильственной гибели одних и возрождения в процессе столкновения других подобно Фениксу. ■

(«В мире науки», №3, 2004)

ГДЕ СТАЛКИВАЮТСЯ ЗВЕЗДЫ

Владимир СУРДИН

Взаимодействие звезд друг с другом – увлекательная тема, время от времени привлекающая пристальное внимание астрофизиков. Впервые это случилось в начале XX века, когда развитие теории приливов привело Джеймса Джинса к оригинальной идее о рождении нашей планетной системы в результате касательного столкновения Солнца с другой звездой. Предполагалось, что при этом между Солнцем и налетевшей звездой формируется приливная перемычка, часть вещества которой выходит на орбиту вокруг Солнца и образует планетную систему. В том виде, как предложил Джинс, теория не подтвердилась: в окрестностях Солнца тесные сближения звезд невероятно редки, да и случись такое сближение, выброшенное звездами вещество, как показали расчеты, рассеялось бы, не образуя планет.

Тем не менее идея Джинса обрела в наши дни второе дыхание. Оказалось, что звезды галактического диска, подобные нашему Солнцу, могут испытывать тесные сближения в период своей ранней молодости. Формирование звезд происходит в очень плотных ядрах гигантских межзвездных газовых облаков. Вскоре после своего рождения звезды своим излучением разрушают эти «коконы» и покидают их, но до этого многие из них успевают сблизиться друг с другом и оставить о себе память. Например, разрушить внешнюю часть или изменить ориентацию протопланетного диска, окружающего звезду. Вполне вероятно, что наклон плоскости нашей планетной системы к экватору вращения Солнца (около 7°) – как раз память о таком событии.

Второй раз астрономы заинтересовались случайными сближениями звезд в конце 30-х гг., когда Виктор Амазаспович Амбарцумян (СССР), Лайман Спитцер и Субраманьян Чандрасекар (США) доказали, что обмен энергией между звездами в процессе их сближения служит главным механизмом эволюции звездных скоплений. Идея пришла из кинетической теории газа: подобно сталкивающимся молекулам, сближающиеся звезды своим притяжением резко и непредсказуемо изменяют траектории друг друга, а вместе с этим и энергию своего движения. Те из звезд, которые немного «притормозили», опускаются к центру скопления, а те, что разогнались, – уходят на периферию скопления или вообще покидают его.

Этот процесс, напоминающий испарение молекул из блюда с водой, в мире звезд приводит к своеобразным последствиям. Например, испа-

рение жидкости вызывает охлаждение оставшейся в блюде воды, а «испарение» звезд ведет к разогреву скопления. Дело в том, что большую часть жизни звездное скопление проводит в уединении, и его можно считать изолированным. Не имея внешнего источника энергии, такое скопление вынуждено пользоваться внутренним источником, т.е. собственным гравитационным полем. Когда «горячие» звезды покидают скопление, оставшиеся, более «холодные» (т.е. медленно движущиеся) светила немного приближаются к центру скопления. И за счет этого «разогреваются» (разгоняются). В результате скопление, теряя звезды, не только сохраняет, но даже несколько увеличивает свою «температуру», отчего темп потери звезд из скопления возрастает еще сильнее. Поэтому к концу жизни эволюция звездного скопления ускоряется; жизненные процессы в нем не замедляются, а, напротив, усиливаются.

Используя мощные компьютеры, астрономы обнаруживают новые аспекты простого на первый взгляд процесса «испарения» звезд. Выяснилось, например, что вызванное потерей звезд сжатие скопления происходит неравномерно: ядро сжимается быстрее периферии. Когда перепад плотности между ядром и оболочкой скопления достигает критического

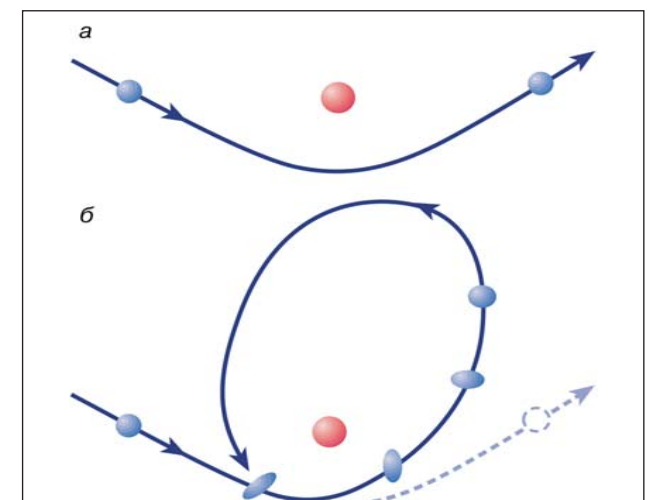
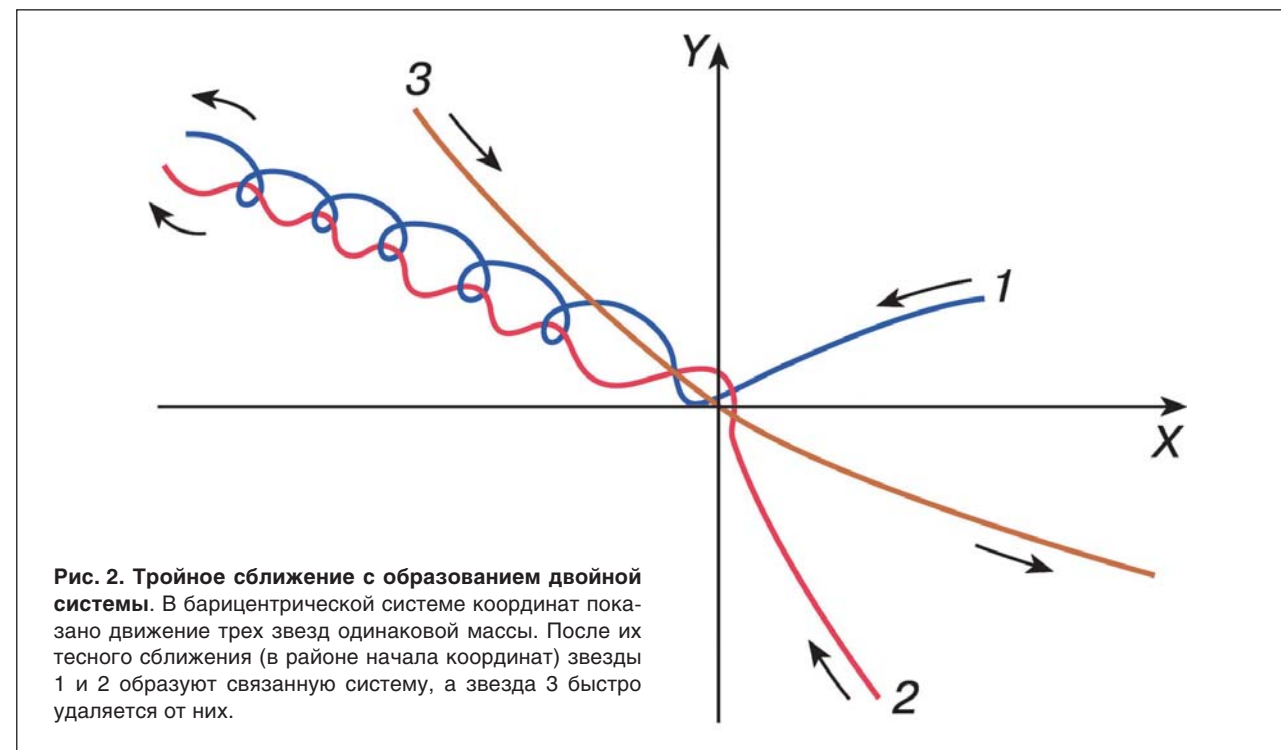


Рис. 1. Приливный захват звезд в двойную систему. Сближение двух звезд без учета приливного эффекта заканчивается их разлетом (а). Но с учетом приливного взаимодействия траектория искажается и становится замкнутой: звезды образуют двойную систему (б). Для простоты одна из звезд изображена здесь неподвижной и абсолютно жесткой, недеформируемой.



значения, то, как доказал еще в 1962 г. ленинградский астроном Вадим Анатольевич Антонов, начинается «гравитермическая катастрофа» – быстрое сжатие ядра. Но остается неясным, к чему она приводит.

С одной стороны, при сжатии ядра скопления сближение звезд в нем становится все более тесным, вплоть до физических столкновений и взаимного слияния светил. Значит ли это, что в центре скопления должен образоваться конгломерат из слипшихся звезд – некая «сверхзвезда»? Если да, то какова ее судьба? В 2002 г. в ядрах двух крупных звездных скоплений были обнаружены признаки очень массивных черных дыр: не результат ли слияния звезд?

Но, с другой стороны, тесные сближения звезд приводят к формированию компактных двойных систем. Происходит это как в результате приливного захвата (рис. 1), так и при тройных сближениях звезд (рис. 2). А последующее взаимодействие двойной звезды с одиночными происходит весьма своеобразно. Например, встретив массивную звезду, члены звездной пары производят обмен: массивная звезда входит в пару, а более легкая звезда стремительно покидает ее. Если встречаются две звездные пары, то более компактная становится еще компактнее, а более рыхлая теряет свою связанность и даже может разрушиться (как заметил один астроном: «И здесь богатые становятся богаче, а бедные – беднее»). Результат взаимодействия двойных и одиночных звезд – более интенсивное их движение, «разогрев» ядра скопления и возмож-

ная остановка его сжатия. Как видим, конкурирующие процессы в каждом конкретном скоплении могут по-разному решить судьбу их ядер. В этой области предстоит еще немало исследований.

Наконец, третий класс объектов, для которого оказались важны столкновения звезд, – это активные ядра галактик. После открытия в начале 60-х гг. наиболее мощных из них – квазаров – было предложено несколько механизмов выделения их колоссальной энергии. Среди прочего рассматривались и столкновения звезд; но на первое место быстро вышли сверхмассивные черные дыры, и к остальным механизмам теоретики потеряли интерес. Однако по мере накопления данных наблюдений стало ясно, что кроме сверхмощных и редких квазаров во Вселенной немало и других типов активных ядер галактик, не столь мощных, но от этого не менее интересных. Оказалось, что в ядрах так называемых сейфертовских галактик столкновения и слияния звезд весьма важны. Как показал автор этой статьи, там часто происходят последовательные слияния нескольких звезд, доводящие массу конгломерата до такого значения, при котором возможна вспышка сверхновой – гигантский взрыв, практически разрушающий звезду и весьма точно имитирующий свойства ядер сейфертовских галактик. Будущие исследования, несомненно, выявят и другие места во Вселенной, где ключевую роль играют столкновения звезд. ■

(«В мире науки», №3, 2004)

КОСМОС: КРИЗИС СРЕДНЕГО ВОЗРАСТА

Эми Баджер

Во Вселенной все еще рождаются звезды и черные дыры.

В течение последних 14 млрд. лет космическое строительство постепенно перемещается от крупных галактик к мелким. В течение первой половины жизни Вселенной в гигантских галактиках сформировалось огромное количество звезд и сверхмассивных черных дыр, которые дают энергию ярким квазарам. Во второй половине жизни активность гигантских галактик снизилась, но формирование звезд и черных дыр продолжалось в галактиках среднего размера, таких как наш Млечный Путь. В будущем основными участками космической активности станут карликовые галактики, каждая из которых содержит лишь несколько миллионов звезд.

До недавних пор большинство астрономов предполагали, что Вселенная вступила в свой весьма скучный средний возраст. Считалось, что ранняя история Вселенной (приблизительно до 6 млрд. лет после Большого взрыва) была эпохой космического фейерверка: галактики сталкивались и сливались, огромные черные дыры всасывали стремительные водовороты газа, рождалось большое количество звезд. Но в течение следующих 8 млрд. лет слияние галактик стало ослабевать, гигантские черные дыры успокоились, и формирование звезд замедлилось. Многие астрономы были убеждены, что приходит конец космической истории и в будущем нас ждет бесконечное расширение спокойной и стареющей Вселенной.

Но наблюдения последних лет показали, что сообщения о кончине Вселенной преувеличены. Благодаря новым космическим обсерваториям и оснащению наземных телескопов современными приборами астрономы обнаружили, что близкие к нам галактики были очень активны в недавнем прошлом. (Поскольку свет от более далеких галактик идет до нас дольше, мы наблюдаем их на более ранней стадии развития.) Рентгеновское излучение ядер относительно близких к нам галактик показало, что там скрыты чрезвычайно массивные черные дыры, все еще пожирающие окружающий газ и пыль. А при более детальном изучении света, испущенного галактиками различного возраста, выяснилось, что темп форми-

рования звезд не уменьшается так быстро, как считалось раньше.

Стало ясно, что в ранней Вселенной доминировали немногие гигантские галактики, содержащие колоссальные черные дыры и демонстрировавшие вспышки звездообразования. В современной же Вселенной формирование звезд и аккреция вещества на черные дыры происходит повсеместно, в том числе и во множестве средних и малых галактик.

Глубокие снимки

Чтобы восстановить историю Вселенной, астрономы сначала должны понять смысл того поразительного разнообразия объектов, которое они наблюдают. Наши самые точные оптические представления о Вселенной появились благодаря работе космического телескопа «Хаббл». На глубоких снимках двух крошечных участков неба, полученных аппаратом с десятисуточной экспозицией через четыре цветных фильтра, ученые обнаружили тысячи далеких галактик, наиболее старая из которых образовалась спустя всего 1 млрд лет после Большого взрыва. А на самых последних сверхглубоких снимках «Хаббла» видимость еще лучше. Астрономы хотят узнать, как самые старые и далекие объекты превратились в современные галактики. Понять связь настоящего с прошлым – одна из основных задач современной астрономии.

ОБЗОР: СРЕДНИЙ ВОЗРАСТ

- Ранняя история Вселенной была бурной эпохой, отмеченной столкновениями галактик, мощными вспышками формирования звезд и рождением массивных черных дыр. Благодаря спаду космической активности многие астрономы поверили, что славные дни Вселенной ушли в прошлое.
- В последние годы ученые обнаружили черные дыры, все еще активно пожирающие газ во многих близких к нам галактиках. Наблюдения также показали, что формирование звезд не заканчивалось так быстро, как думали раньше.
- В ранней Вселенной доминировало небольшое число гигантских галактик, теперь активными стали более мелкие из них.



Важным шагом станет разработка космической стратиграфии – выяснение того, какие объекты среди тысяч галактик на глубоком снимке расположены к нам ближе, а какие дальше. Стандартный способ решить поставленную задачу – получить спектр каждой галактики и измерить его красное смещение. Из-за расширения Вселенной линии в спектре далеких источников смещены в красную сторону: чем сильнее сдвинуты линии, тем дальше от нас источник в пространстве и времени. Например, единичное красное смещение означает, что длина волны возросла на 100%, то есть увеличилась вдвое. Свет от такого объекта был испущен примерно через 6 млн. лет после Большого взрыва, что меньше половины возраста Вселенной. На самом деле астрономы указывают глубину прошлого не в единицах времени, а в единицах красного смещения, поскольку прямо измеряется именно оно.

Определение красных смещений – надежный способ восстановить космическую историю, но на самых глубоких снимках практически невозможно измерить красное смещение всех галактик. Во-первых, их чрезвычайно много. Но еще важнее, что некоторые галактики чрезвычайно слабы, их тусклый свет состоит из одного фотона

дыры. Активное рождение звезд и рост черных дыр в ядрах галактик продолжались и 8–10,5 млрд. лет назад. Затем активность черных дыр и звездообразование в крупных галактиках стали затухать. Сегодня звезды в основном рождаются в небольших спиральных и неправильных галактиках.

в минуту на квадратный сантиметр. Когда получают спектр галактики, дифракционная решетка спектрографа рассеивает этот тусклый свет по большой площади детектора, что делает сигнал на каждой длине волны еще слабее.

В конце 1980-х Леннокс Кьюве (Lennox L. Cowie) из Астрономического института Гавайского университета и Саймон Лилли (Simon J. Lilly) из Технологического института в Цюрихе (Швейцария) разработали новый метод, позволяющий обойтись без сложного измерения красных смещений. Они фотографировали небо через светофильтры, пропускающие ультрафиолетовый, зеленый или красный свет, а затем измеряли яркость галактик в каждом из данных диапазонов (см. рис. на стр. 107). Таким образом, близкие галактики с молодыми звездами оказывались одинаково яркими во всех трех диапазонах.

Однако в спектре такой галактики имеется резкий обрыв сразу за ультрафиолетовым диапазоном, на длине волны 912 ангстрем. Он возникает потому, что нейтральный водород внутри и вокруг галактики поглощает излучение с более короткими длинами волн. Поскольку свет от далеких галактик смещен к красному концу спектра, обрыв перемещается к более длинным волнам. Если

красное смещение достаточно велико, то галактика не будет видна в ультрафиолетовом диапазоне, а если оно еще больше, то галактике не суждено быть обнаруженной и в зеленом диапазоне.

Таким методом Кьюве и Лилли смогли разделить галактики со звездообразованием на широкие интервалы по красному смещению, грубо указывающие их возраст. В 1996 г. Чарльз Стейдел (Charles C. Steidel) из Калифорнийского технологического института и его сотрудники использовали данный метод, чтобы выделить сотни древних галактик с формирующимися звездами и красным смещением около 3, т.е. с возрастом около 2 млрд. лет после Большого взрыва. Контрольные спектры некоторых из этих галактик, полученные с помощью мощнейшего десятиметрового телескопа «Кек» на Мауна-Кеа (Гавайи), подтвердили, что большинство из них действительно имеет такое красное смещение.

Как только красное смещение галактик измерено, можно приступить к реконструкции истории звездообразования. Из наблюдений ближайших галактик известно, что за определенное время на свет появляется небольшое число массивных и множество маломассивных звезд. На каждые 20 звезд, подобных Солнцу, рождается одна звезда с массой в 10 раз больше солнечной.

Массивные звезды излучают ультрафиолетовый и голубой свет, тогда как звезды малой массы – желтый и красный. Если красное смещение далекой галактики известно, астрономы могут определить ее истинный спектр (в ее собственной системе отсчета). Тогда, измерив полное ультрафиолетовое излучение галактики, исследователи могут оценить количество массивных звезд, которые живут всего лишь несколько десятков миллионов лет – краткий миг по галактическим стандартам. Если темп звездообразования замедляется, количество массивных звезд быстро снижается, поскольку они умирают вскоре после своего рождения. В нашей Галактике, вполне рядовой современной спиральной системе, количество наблюдаемых массивных светил указывает на то, что звезды формируются со скоростью нескольких солнечных масс в год. Однако в галактиках с большим красным смещением темп рождения звезд в 10 раз выше.

Когда Кьюве и Лилли вычислили скорости формирования звезд во всех наблюдавшихся ими галактиках, они пришли к поразительному выводу, что во Вселенной произошел поистинне демографический взрыв при красном смещении около 1.

В 1996 г. Пьеро Мадау (Piero Madau) из Калифорнийского университета в Санта-Крус применил метод, предложенный Кьюве и Лили, к анализу

данных глубокого северного снимка, полученного «Хабблом». Данные оказались идеальными для такого исследования из-за очень точного измерения интенсивности в четырех диапазонах спектра. Чтобы уточнить историю формирования звезд во Вселенной, Мадау объединил свои результаты с полученными из оптических наблюдений для низких красных смещений. Он обнаружил, что интенсивность формирования звезд достигала максимума, когда возраст Вселенной был приблизительно 4–6 млрд. лет. Такой результат привел многих астрономов к заключению, что лучшие дни Вселенной давно миновали.

Поглощающая история

Обзор галактик с помощью оптических телескопов не может выявить все объекты, существовавшие в ранней Вселенной. Чем дальше галактика, тем на нее больше влияет космологическое красное смещение. При достаточно большом смещении ультрафиолетовое и оптическое излучение галактики перемещается для земного наблюдателя в инфракрасную часть спектра. Кроме того, звездный свет нагревает частицы пыли, возникающие от взрывов сверхновых и других процессов, которые затем переизлучают энергию в далеком инфракрасном диапазоне. Свет удаленных источников, поглощенный и излученный уже пылью в далеком ИК-диапазоне, смещается из-за расширения Вселенной еще дальше – в субмиллиметровый диапазон. Поэтому яркие источники субмиллиметрового излучения часто указывают на места интенсивного формирования звезд.

До недавних пор астрономам трудно было проводить наблюдения с наземными телескопами в субмиллиметровом диапазоне потому, что водяной пар в атмосфере поглощает сигналы на данных волнах. Но ситуация улучшилась с введением в строй Матрицы субмиллиметровых болометров общего назначения (*Submillimeter Common-User Bolometer Array – SCUBA*), установленной на телескопе «Джеймс Клерк Максвелл» на Мауна-Кеа в 1997 г. (Расположенная на высоте 4 км над уровнем моря, эта обсерватория оказалась выше, чем 97% атмосферной воды.)

Несколько групп исследователей, одну из которых возглавляю я, использовали SCUBA, чтобы с высокой чувствительностью и большим охватом неба искать далекие закрытые пылью источники исключительно высокой светимости. Поскольку угловое разрешение довольно низкое, изображения галактик похожи на капли (см. иллюстрацию сверху). К тому же на снимке их довольно мало: даже после многих часов экспозиции лишь несколько

источников появляются на каждом изображении, полученном *SCUBA*, но они из числа самых ярких галактик во Вселенной. Трудно поверить, но до появления Матрицы субмиллиметровых болометров общего назначения мы даже не догадывались, что существовали такие мощные и далекие системы. Темп формирования звезд в них был в сотни раз выше, чем в современных галактиках, что служит еще одним подтверждением того, что Вселенная раньше была намного энергичнее, чем теперь.

Обнаруженные области звездообразования вызвали сенсацию; но вдруг мы узнаем, что во Вселенной существует и другая, скрытая от нас активность? К примеру, газ и пыль в галактиках могут закрывать излучение дисков вещества, вращающегося вокруг сверхмассивных черных дыр (которые весят в миллиарды раз больше Солнца). Считается, что такие диски служат источником энергии квазаров – необыкновенно мощных объектов, имеющих большое красное смещение, а также энергии активных ядер в центрах многих близлежащих галактик. Оптические исследования 1980-х гг. показали, что спустя несколько миллиардов лет после Большого взрыва квазаров было гораздо больше, чем активных галактических ядер. Поскольку сверхмассивные черные дыры, дающие энергию далеким квазарам, невозможно разрушить, астрономы предположили, что многие близлежащие галактики должны содержать в себе мертвые квазары, т.е. черные дыры, исчерпавшие «топливо».

Такие бездействующие сверхмассивные черные дыры действительно были найдены по их гравитационному влиянию на окружающие тела. Звезды и газ продолжают обращаться вокруг черных дыр, даже когда вещество не засасывается в них. В центре нашей Галактики обнаружилась почти спящая черная дыра. Результаты этих исследований позволили предположить, что большинство сверхмассивных черных дыр сформировалось еще в эпоху квазаров, поглотив в процессе бурного роста все окружавшее их вещество и затем перестав светить-



В ранней Вселенной с помощью субмиллиметровой камеры *SCUBA* на телескопе «Дж.К.Максвелл» обсерватории Мауна-Кеа (Гавайи) были открыты галактики предельно высокой светимости. Яркое пятно слева, вероятно, древняя, окутанная пылью галактика, в которой звезды рождаются с частотой более 1 тыс. Солнц в год.

ся, когда запасы топлива иссякли. Таким образом, активность квазаров, как и формирование звезд, была более энергичной в далеком прошлом, еще раз доказывая, что наступили скучные времена.

Однако наш сценарий на этом не исчерпывается. Объединив рентгеновские и оптические наблюдения, астрономы пересматривают вывод о том, что большинство квазаров давно потухло. Важно что рентген в отличие от видимого света может пройти через заслоняющие черную дыру газ и пыль. Земная же атмосфера не пропускает рентген, так что в поиске активных черных дыр астрономы надеются на космические телескопы типа рентгеновских обсерваторий «Чандра» и «XMM/Ньютон».

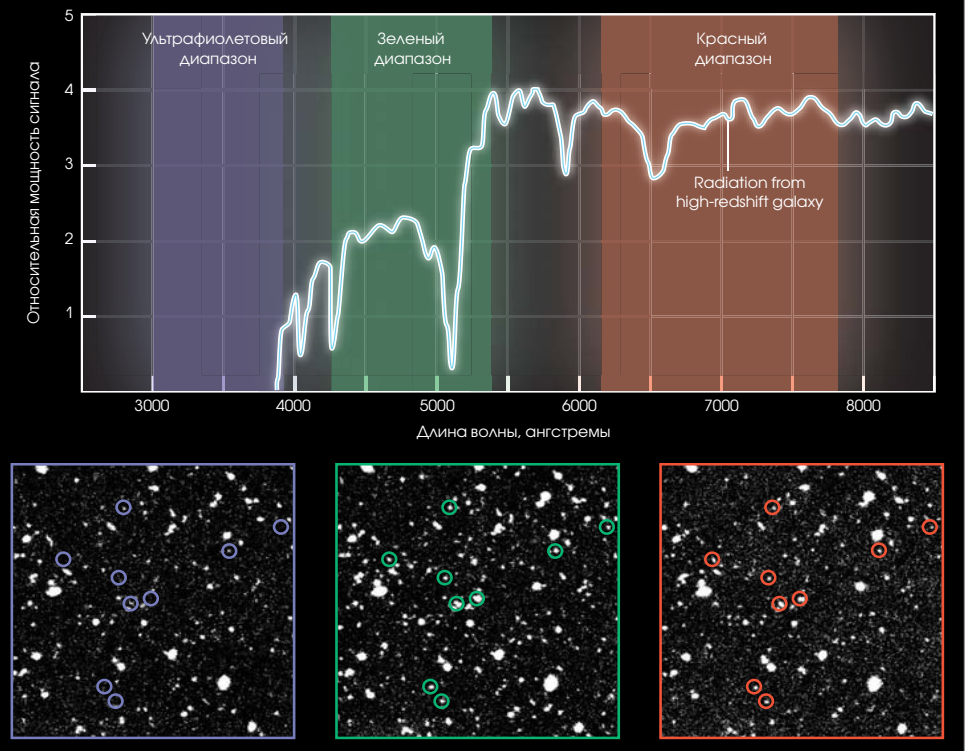
В 2000 г. Леннокс Кьюве, Ричард Мушотски (R.F.Mushotzky) из Годдардовского центра космических полетов NASA, Эрик Ричардс (E.A. Richards) из Аризонского университета и я использовали телескоп «Субару» на Мауна-Кеа для оптической идентификации 20 рентгеновских источников, найденных в ходе обзоров «Чандра». Затем с помощью десятиметрового телескопа «Кек» мы получили спектры этих объектов.

Результаты оказались неожиданными: многие активные сверхмассивные черные дыры, обнаруженные «Чандра», находятся в довольно близких крупных галактиках. Модели космического рентгеновского фона предсказывали существование большого числа невидимых сверхмассивных черных дыр, но никто не ожидал, что они у нас под носом! Более того, оптические спектры многих галактик не подтверждают активность этих объектов. Без рентгеновских наблюдений астрономы никогда бы не смогли обнаружить сверхмассивные черные дыры, скрывающиеся в ядрах галактик.

Соответственно, не все сверхмассивные черные дыры родились в эпоху квазаров. Похоже, что могучие объекты начали формироваться с самых ранних времен и до наших дней. Однако те сверхмассивные черные дыры, которые все еще активны, ведут себя иначе, чем далекие квазары, которые с завидным аппетитом пожирают вещество вокруг себя. А большинство близких источников, обнаруженных «Чандрой», воздержанны в «еде» и поэтому светят не так ярко. Ученые пока не поняли, в чем причина этого различия. Возможно, современным черным дырам просто достается меньше газа. Близлежащие галактики сталкиваются друг с другом реже, чем далекие древние звездные системы, а ведь именно столкновения могут поставлять вещество к черной дыре в галактическом центре.

«Чандра» позволил ученым приоткрыть еще одну завесу тайны: хотя умеренные источники рентгена значительно менее мощные, чем квазары

Для поиска самых древних галактик при обзоре неба астрономы используют светофильтры, выделяющие ультрафиолетовый, зеленый и красный участки спектра. Из-за расширения Вселенной свет древнейших галактик смещается в красную область. График (вверху) показывает, как довольно большое красное смещение (около 3) выводит излучение далекой галактики из ультрафиолетовой области. В результате изображение древней галактики проявляется в красном и зеленом фильтрах, но не в ультрафиолетовом (внизу).



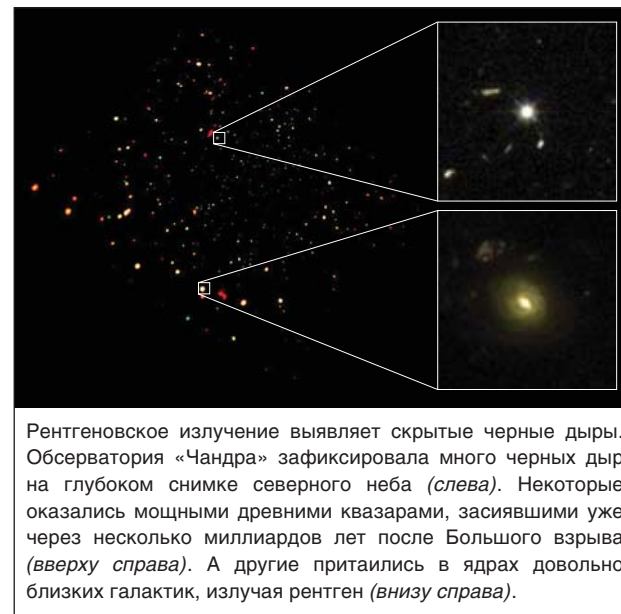
(в среднем раз в сто), совокупное излучение нынешних раз в десять слабее того, что в прежние времена производили квазары. Иными словами, состав Вселенной постепенно меняется от небольшого числа ярких объектов к большому количеству тусклых. Но даже при том, что нынче сверхмассивные черные дыры стали «меньше и дешевле», их суммарный эффект все еще велик.

Галактики со звездообразованием также мельчали. Несмотря на то что некоторые соседние с нами галактики столь же активно формируют звезды, как и сверхмощные, заполненные пылью галактики, обнаруженные на снимках камеры *SCUBA*, их пространственная плотность сверхвысокой светимости в современной Вселенной в 400 с лишним раз ниже, чем была в древней Вселенной. Однако вновь проявили себя небольшие галактики. Кьюве, Джиллиан Уилсон (J.Wilson) из Центра обработки инфракрасных наблюдений NASA, Дуг Берк (D.J.Burke) из Гарвард-Смитсоновского астрофизического центра и ваш покорный слуга уточнили плотность светимости во Вселенной, используя высококачественные изображения, полученные с большим набором фильтров, и спектроскопические данные. Мы обнаружили, что плотность оптической и ультрафиолетовой светимости практически не изменилась за космологическое время. Несмотря на то что полная интенсивность формирования звезд во второй поло-

вине жизни Вселенной снизилась (гигантские запыленные галактики больше не демонстрируют всплеск звездообразования), маленькие, близлежащие галактики, формирующие звезды, оказались настолько многочисленными, что плотность оптического и ультрафиолетового излучения снижается довольно медленно.

Бодрость средних лет

Новые компьютерные модели показывают, что переход от Вселенной, где доминировали немногочисленные крупные и мощные галактики, к Вселенной, заполненной множеством более мелких галактик, может быть следствием космического расширения, при котором галактики расходятся и их слияния становятся редкими. К тому же по мере снижения плотности газа, окружающего галактики, его становится легче нагреть. А поскольку горячий газ более упруг, чем холодный, он меньше поддается гравитационному сжатию в потенциальной яме галактики. Фабрицио Никастро (F. Nicastro) из Гарвард-Смитсоновского астрофизического центра и его коллеги недавно обнаружили теплый межгалактический туман, поглощающий ультрафиолетовое и рентгеновское излучение далеких квазаров и активных ядер галактик. Туман окружает нашу Галактику со всех сторон и заполняет Местную группу галактик, включающую наш Млечный Путь, галактику



Рентгеновское излучение выявляет скрытые черные дыры. Обсерватория «Чандра» зафиксировала много черных дыр на глубоком снимке северного неба (слева). Некоторые оказались мощными древними квазарами, засиявшими уже через несколько миллиардов лет после Большого взрыва (вверху справа). А другие притаились в ядрах довольно близких галактик, излучая рентген (внизу справа).

в Андромеде и еще 30 меньших членов. Вероятно, газ остался от ранней эпохи формирования галактик, но теперь он слишком горячий, чтобы продолжать участвовать в данном процессе. Вокруг маленьких галактик среда может быть более прохладной, поскольку они не в состоянии нагреть окружающий газ так же сильно, как большие галактики, в распоряжении которых были взрывы сверхновых звезд и энергия квазара. К тому же маленькие галактики не так жадно поглощают окружающее вещество, что позволяет им продлить свой скромный образ жизни до наших дней. Напротив, более крупные и расточительные галактики истощили свои ресурсы и больше не способны вобрать в себя вещество из своих окрестностей. Проводимые исследования свойств газа в маленьких близлежащих галактиках покажут, как они взаимодействуют с окружающей средой, что поможет лучше понять эволюцию галактик.

Главный вопрос все же остается нерешенным: как на столь раннем этапе эволюции Вселенной смогли возникнуть гигантские квазары? Слоановский цифровой обзор неба (крупнейший астрономический проект по картографированию четверти полного небосвода и измерению расстояний до более чем миллиона далеких объектов) позволил обнаружить квазары, которые существовали, когда Вселенная была в шестнадцать раз моложе, чем сейчас, т.е. спустя примерно 800 млн. лет после Большого взрыва. В 2003 г. Фабиан Уолтер (F. Walter) из Национальной радиоастрономической обсерватории и его сотрудники обнаружили линии угарного газа в излучении одного из таких квазаров. Поскольку углерод и кислород могли

появиться благодаря термоядерным реакциям в звездах, это открытие свидетельствует о том, что значительное количество звезд сформировалось в первые сотни миллионов лет жизни Вселенной. Недавние результаты исследователя микроволновой анизотропии «Вилкинсон» (спутника, наблюдающего космическое фоновое излучение), также указывают, что формирование звезд началось спустя всего 200 млн. лет после Большого взрыва.

Кроме того, компьютерное моделирование показало, что первые звезды были, скорее всего, в сотни раз массивнее Солнца. Они сияли так ярко, что полностью сожгли свое топливо за несколько десятков миллионов лет. Тогда самые массивные из них сжались в черные дыры, которые, возможно, стали зародышами сверхмассивных черных дыр, породивших первые квазары. Такое объяснение раннего появления квазаров подкрепляется изучением гамма-всплесков (см. «Ярчайшие взрывы во Вселенной», «В мире науки», стр. 142), которые, вероятно, возникают в результате коллапса очень массивных звезд в черные дыры. Поскольку гамма-всплески – самые мощные взрывы во Вселенной, произошедшие после Большого взрыва, астрономы обнаруживают их на очень больших расстояниях.

В ноябре 2004 г. для их исследования NASA запустило спутник «Свифт» стоимостью \$250 млн. с тремя телескопами для наблюдения взрывов в гамма-, рентгеновском, ультрафиолетовом и оптическом диапазонах. Изучая спектры гамма-всплесков и их послесвечение, «Свифт» поможет ученым лучше понять, как коллапсируют звезды и как начинался рост сверхмассивных черных дыр в ранней Вселенной.

Теперь астрономы благодаря обсерваториям «Чандра» и «ХММ/Ньютон», подобно суперменам из комиксов, которые при помощи «рентгеновского зрения» видят сквозь стены, наблюдают окутанные пылью области Вселенной. Как оказалось, гигантские галактики, изобилующие молодыми звездами, и жадные древние черные дыры теперь отживают свой век. Еще через несколько миллиардов лет небольшие галактики, которые сегодня довольно активны, израсходуют свое топливо, и свет в космосе почти померкнет. Нашу Галактику ожидает такая же судьба. По мере космического измельчания карликовые галактики (которые содержат всего несколько миллионов звезд, но являются самым многочисленным типом галактик во Вселенной) останутся единственными очагами звездообразования. Со временем Вселенная неизбежно будет темнеть, а старые галактики не умрут, а лишь медленно угаснут. ■

(«В мире науки», №4, 2005)

ЗВЕЗДЫ

III

Теория внутреннего строения и эволюции звезд – одна из самых успешных научных теорий XX столетия. Она прекрасно объясняет наблюдаемые свойства звезд: их излучение, цвет и даже большинство их причуд. Однако новая информация делает несостоятельными даже лучшие из теорий. Такова природа прогресса.

Брюс Балик и Адам Франк
«НЕОБЫЧНАЯ СМЕРТЬ ОБЫЧНЫХ ЗВЕЗД»



РАЗГАДКА ТАЙНЫ СОЛНЕЧНЫХ НЕЙТРИНО

Артур Макдональд, Джошуа Клейн и Дэвид Вок

Наблюдая за Солнцем из нейтринной обсерватории в Садбери, ученые доказали, что солнечные нейтрино меняют свой тип на пути к Земле.

На первый взгляд странно, что для изучения Солнца астрофизики решили построить детектор размером с 10-этажный дом на глубине двух километров под землей. Но именно это помогло разгадать загадку физических процессов, протекающих в недрах Солнца, мучившую ученых несколько десятилетий. Еще в 20-х гг. XX в. английский физик Артур Эддингтон предположил, что энергию Солнцу дает слияние атомных ядер. Предпринятые в 60-х гг. попытки экспериментально подтвердить гипотезу не дали ожидаемого результата: была зафиксирована лишь часть ожидаемого потока продуктов солнечных термоядерных реакций – неуловимых частиц нейтрино. Подтвердить гипотезу Эддингтона удалось лишь в 2002 г. благодаря наблюдениям в Садберийской нейтринной обсерватории (СНО), расположенной глубоко под землей недалеко от г. Садбери в канадской провинции Онтарио.

В отличие от большинства подобных установок, собранных за прошедшие 30 лет, СНО регистрирует рождающиеся в солнечном ядре нейтрино при помощи тяжелой воды, в молекулах которой все атомы водорода заменены его тяжелым изотопом – дейтерием, содержащим кроме протона еще и нейтрон. Это позволяет с равной эффективностью подсчитывать как электронные, так и мюонные и тау-нейтрино. Оказалось, что наблюдавшийся в ранних экспериментах дефицит солнечных нейтрино был вызван не ошибками экспериментаторов или недостатками теории строения Солнца, а ранее неизвестными свойствами самих нейтрино.

Нейтринный дефицит

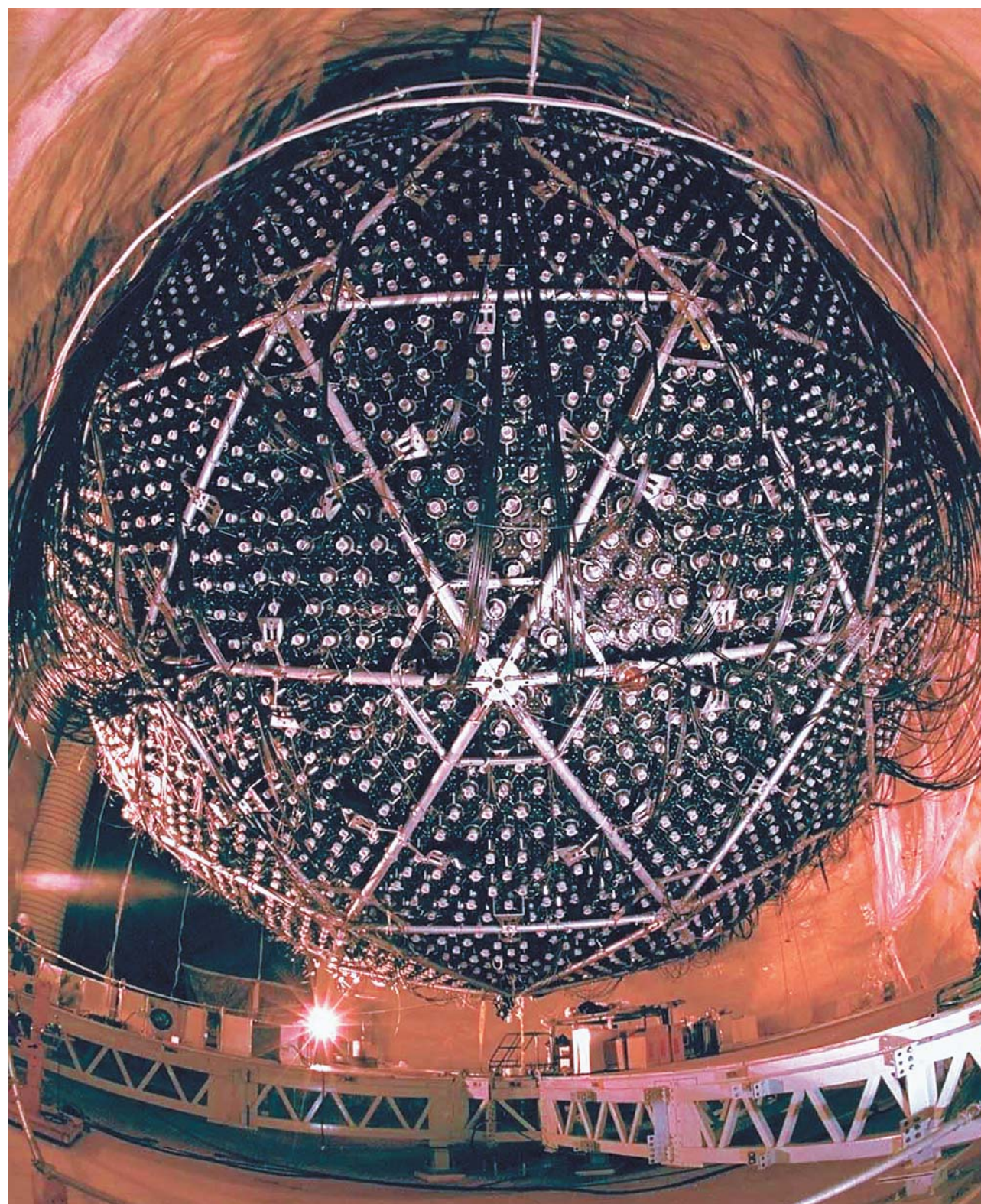
В начале 60-х гг. несколько ученых под руководством Раймонда Дэвиса (Raymond Davis) из Пенсильванского университета впервые попытались зарегистрировать нейтрино, вылетающие из недр нашего светила, и доказать, что источником солнечной энергии действительно служат термоядерные реакции. Установка Дэвиса разме-

щалась в бывшей золоторудной шахте в Южной Дакоте и регистрировала нейтрино радиохимическим методом. Бак детектора был заполнен 615 тоннами тетрахлорэтилена, который обычно используется в химчистке. Поглощаясь в этой жидкости, нейтрино превращает хлор в аргон. Однако Дэвис обнаруживал рождение нового атома аргона не каждые сутки, как предсказывала теория, а только раз в 2,5 дня. (В 2002 г. Раймонд Дэвис и Масатоши Кошиба (Masatoshi Koshihba) из Токийского университета получили Нобелевскую премию за пионерские работы по физике нейтрино.) На протяжении 30 лет после опытов Дэвиса все аналогичные эксперименты, несмотря на разнообразие методик, давали тот же результат. Количество приходящих от Солнца нейтрино всегда было меньше предсказываемого теорией: от 1/3 до 3/5 ожидаемого потока в зависимости от энергии регистрируемых частиц.

Пока экспериментаторы продолжали опыты, теоретики уточняли физическую модель Солнца. Они исходили из нескольких предположений: а) энергию Солнцу дает ядерный синтез; б) эта

ОБЗОР: НЕЙТРИННЫЕ ОСЦИЛЛЯЦИИ

- С 60-х гг. прошлого века интенсивность потока солнечных нейтрино, регистрируемых подземными детекторами, оказывалась меньше теоретической. Необъяснимое расхождение экспериментальных данных с результатами моделирования получило название «проблема солнечных нейтрино».
- Наблюдения, проведенные в Садберийской нейтринной обсерватории в 2002 г., помогли ученым ответить на вопрос 30-летней давности. Оказалось, что часть электронных нейтрино, возникающих в недрах Солнца, меняют свой аромат на пути к Земле и поэтому не регистрируются детекторами
- Результаты, полученные в Садбери, подтверждают истинность гелиофизической теории и свидетельствуют о том, что нейтрино, долгое время считавшиеся безмассовыми частицами, на самом деле обладают массой. Таким образом, стандартную модель физики элементарных частиц придется пересмотреть.



«Глаза» Садберийской нейтринной обсерватории – 9,5 тыс. фотоумножителей, расположенных на геодезической сфере диаметром 18 м, пристально наблюдают за тысячей тонн тяжелой воды, заключенной в шарообразный акриловый сосуд диаметром 12 м. Каждый фотоумножитель способен зарегистрировать даже единичный фотон. Материалы, из которых изготовлен детектор, тщательно очищены от радиоактивных примесей, чтобы их излучение не «ослепляло» фотодатчики потоком ложных отсчетов.

энергия поддерживает давление газа, уравнивающее гравитацию; в) химический состав солнечных недр в момент рождения звезды был таким же, каков он сейчас на ее поверхности. И хотя теоретический поток нейтрино по-прежнему был больше регистрируемого, все остальные результаты моделирования (например, спектр геосейсмических колебаний) очень хорошо согласовались с наблюдениями.

Загадочное различие между теорией и практикой стали называть «проблемой солнечных нейтрино». Многие физики верили, что несовпадение измеренного и расчетного количества есть следствие трудностей регистрации нейтрино. Тем не менее широкое распространение получила другая гипотеза. В Стандартной модели элементарных частиц существует три совершенно различных безмассовых типа нейтрино: это электронное, мюонное и тау-нейтрино. Термоядерные реакции в центре Солнца порождают только электронные нейтрино, и опыт Дэвиса был разработан как раз для их регистрации: только электронные нейтрино могут превратить хлор в аргон. Но если Стандартная модель неточна и типы нейтрино не разделены, а каким-то образом перемешаны, то электронное нейтрино на пути от Солнца может превратиться в другой аромат и не будет зарегистрировано.

Скорее всего тип нейтрино изменяется в процессе нейтринных осцилляций (см. рис. на стр. 114), которые подразумевают, что каждый аромат нейтрино (электронное, мюонное или тау) состоит из смеси трех состояний (обозначаемых как 1, 2 и 3), имеющих разные массы. Тогда электронное нейтрино может быть одной смесью состояний 1 и 2, а мюонное – другой. Теоретически такая смесь нейтрино способна колебаться между состояниями на пути от Солнца к Земле.

Первое свидетельство нейтринных осцилляций было получено в 1998 г. в проекте *Super-Kamiokande*, когда обнаружили, что вероятность исчезновения мюонных нейтрино, рожденных космическими лучами в верхних слоях атмосферы, зависит от пройденного ими пути. Мюонные нейтрино, регистрируемые детектором *Super-Kamiokande*, в результате осцилляций превращаются в тау-нейтрино, которые в большинстве своем остаются незамеченными.

Аналогично можно объяснить и дефицит солнечных нейтрино. Согласно одному из сценариев, они должны осциллировать во время 8-минутного путешествия сквозь вакуум от Солнца к Земле. В другой модели осцилляции особенно сильны в течение первых двух секунд пути сквозь само Солнце.

Подземный пост

Для поиска прямых доказательств осцилляции солнечных нейтрино была спроектирована обсерватория в Садбери, где для регистрации нейтрино используются различные виды их взаимодействия с тяжелой водой. В одной из реакций участвуют только электронные нейтрино, в других – все ароматы без исключения. Если от Солнца до Земли доходят только электронные нейтрино, т.е. нет никаких трансформаций, то количество нейтрино всех типов должно быть равно количеству электронных нейтрино. А если численность нейтрино всех ароматов заметно превосходит численность электронных, то солнечные нейтрино действительно меняют свой тип.

Поскольку в тяжелой воде содержатся ядра дейтерия (дейтроны), детектор может подсчитывать как отдельно электронные нейтрино, так и все типы вместе. Дейтроны могут взаимодействовать с нейтрино двумя способами: поглощать его нейтроном и рождать электрон, а также распадаться, освобождая нейтрон. В реакции поглощения участвуют только электронные нейтрино. Зато разрушить дейтрон могут нейтрино всех ароматов. В СНО также регистрируется рассеяние электронов на нейтрино любого типа. Впрочем, эта реакция гораздо менее чувствительна к мюонному и тау-нейтрино, чем распад дейтрона (см. рис. на стр. 114).

Еще в 60-х гг. Т. Дж. Дженкинс (Т. J. Jenkins) Ф. У. Дикс (F. W. Dix) из Университета в Ки-Уэсте (Флорида) использовали около 2 тонн тяжелой воды для проведения наблюдений в наземной лаборатории. Тогда следы солнечных нейтрино «потонули» на фоне космических лучей. В 1984 г. Херб Чен (Herb Chen) из Калифорнийского университета предложил для регистрации солнечных нейтрино разместить на дне никелевой шахты в Садбери тяжелую воду из канадского ядерного реактора CANDU.

Вскоре началось строительство нейтринного детектора СНО. Прозрачный акриловый (плексигласовый) резервуар диаметром 12 м наполнили 1 тыс. тонн тяжелой воды (см. рис. на стр. 112), за которой наблюдают 9,5 тыс. фотоумножителей, расположенных на геодезической сфере диаметром 18 м. Каждый такой приемник способен зарегистрировать даже единичный фотон. Вся конструкция погружена в обычную воду высшей степени очистки, которая заполняет полость, выдолбленную в скале на глубине 2 км.

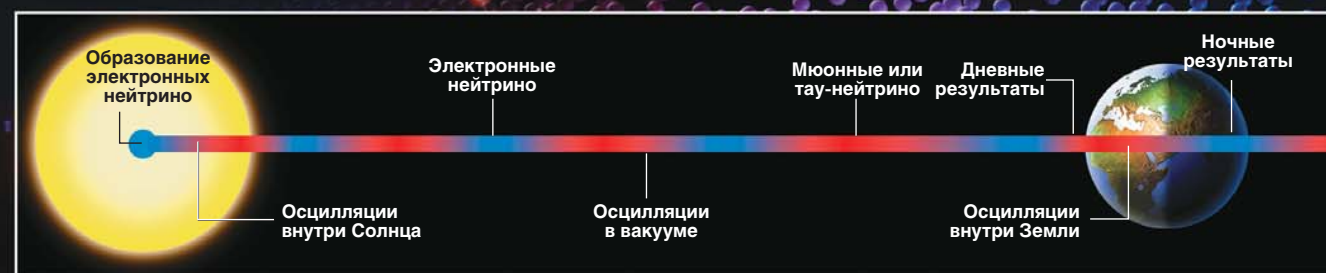
Семь раз отмерь

В дневное время нейтрино легко проникают к детектору СНО сквозь двухкилометровую толщу

ЛОВУШКА ДЛЯ НЕУЛОВИМЫХ НЕЙТРИНО

КАК ОСЦИЛЛИРУЮТ НЕЙТРИНО

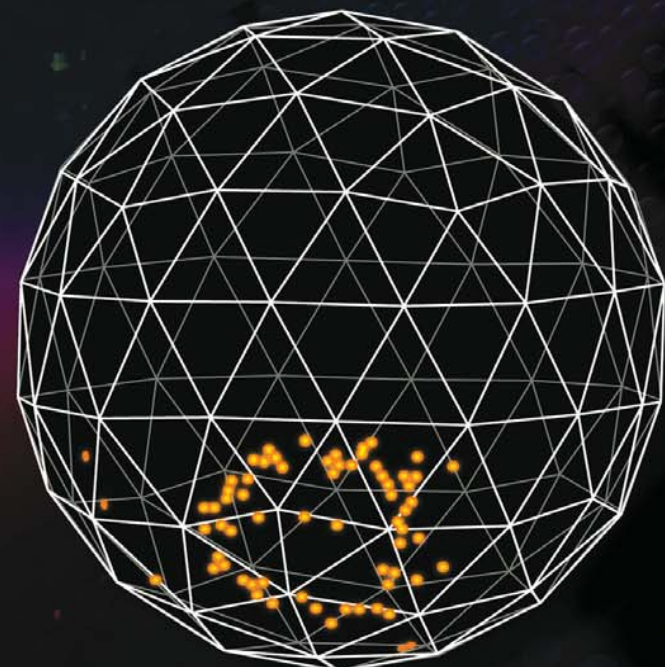
Электронное нейтрино (слева) – это суперпозиция нейтрино 1-го и 2-го типов, квантовые волны которых синфазны. Поскольку длины волн нейтрино разных типов различаются, при движении накапливается разность фаз, и в результате частица превращается в мюонное или тау-нейтрино (в середине). Продолжая осциллировать, нейтрино снова становится электронным (справа).



ГДЕ ОСЦИЛЛИРУЮТ НЕЙТРИНО

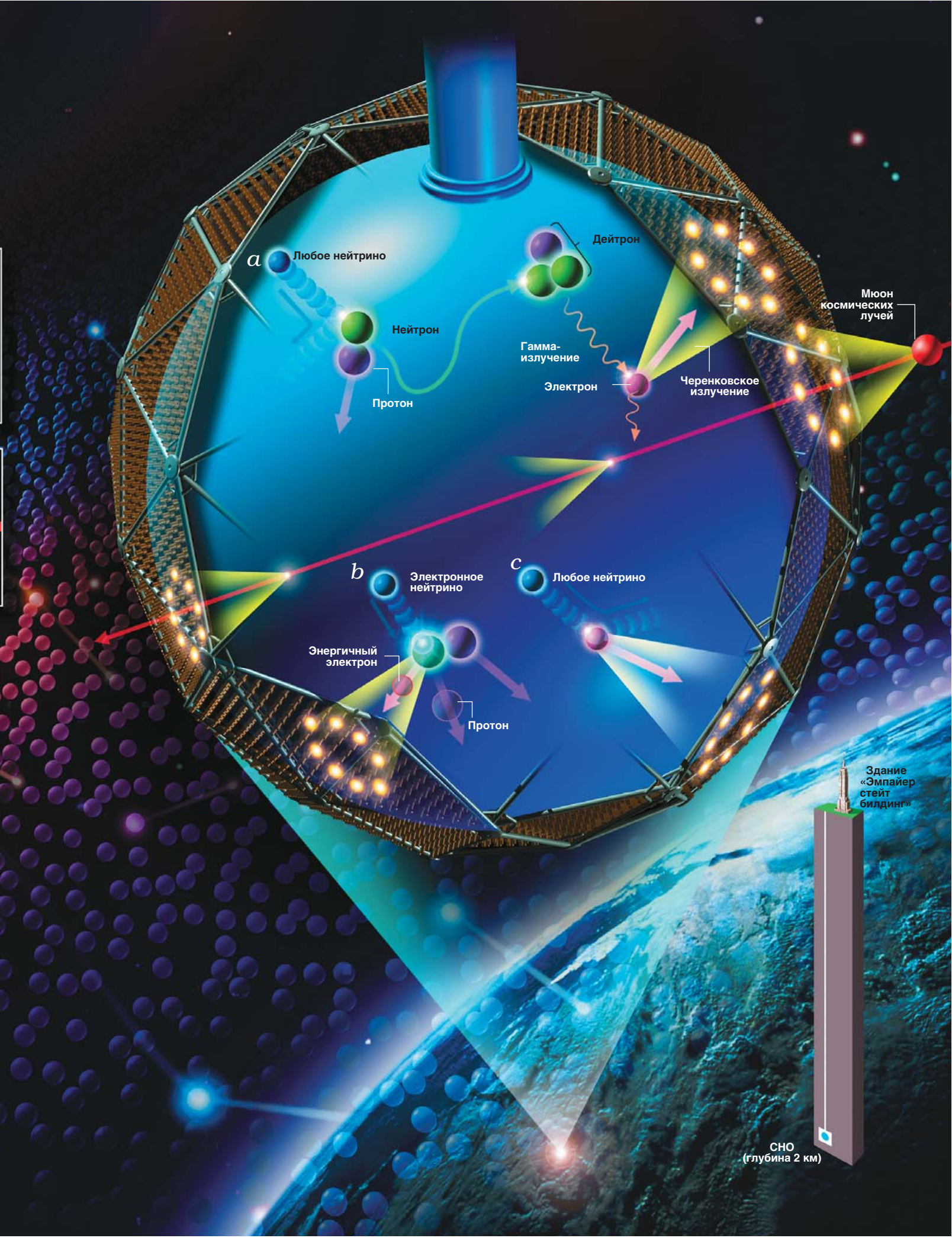
Электронные нейтрино, рожденные в недрах Солнца, могут осциллировать как внутри светила, так и на пути к Земле, в зависимости от соотношения масс и от степени смещения нейтрино 1-го и 2-го типов. Дополнительная осцилляция, по-видимому, происходит внутри Земли, о чем свидетельствует различие дневных и ночных результатов наблюдений.

ИЗ ВСЕХ ВСПЫШЕК ЛИШЬ ОДНА СВЯЗАНА С НЕЙТРИНО



КАК РЕГИСТРИРУЮТСЯ НЕЙТРИНО

Детектор Садберийской нейтринной обсерватории (СНО) (см. противоположную страницу) регистрирует характерные вспышки черенковского света, излучаемого высокоэнергичными электронами. Последние возникают в тяжелой воде (большая синяя сфера) в результате трех реакций. Распад дейтрона (а) происходит, когда нейтрино (синее) разбивает ядро дейтерия на протон (фиолетовый) и нейтрон (зеленый). При взаимодействии нейтрона с другим дейтроном испускается гамма-луч, освобождающий электрон (розовый), черенковское излучение которого регистрируется детектором. В ходе второй реакции (b) нейтрон поглощает нейтрино и превращается в протон и энергичный электрон. В эту реакцию могут вступать только электронные нейтрино. Гораздо реже нейтрино непосредственно сталкиваются с электронами (с). Мюоны космических лучей (красные) отличаются от нейтрино интенсивностью порождаемого ими черенковского излучения и местом его возникновения – как внутри, так и снаружи детектора. Количество мюонов снижается до приемлемого уровня благодаря расположению детектора на двухкилометровой глубине.



скалы, а ночью им нипочем и тысячи километров земного шара. Именно благодаря чрезвычайно слабому взаимодействию с веществом нейтрино очень интересны для гелиофизики. Фотоны солнечного света сотни тысяч лет рассеиваются электронами внутри Солнца, прежде чем достигнуть его поверхности. А вот рожденные в солнечном ядре нейтрино уже через две секунды покидают звезду и прилетают к нам прямо из области генерации солнечной энергии.

Раз уж ни само Солнце, ни Земля не способны препятствовать полету нейтрино, попытка поймать их с помощью детектора весом всего 1 тыс. тонн выглядит весьма сомнительной. Подавляющая часть нейтрино проходит сквозь детектор СНО, не замечая его, но все же в редких случаях одно из них сталкивается с электроном или ядром атома и высвобождает энергию, достаточную для регистрации. К счастью, слабое взаимодействие компенсируется огромной плотностью потока солнечных нейтрино: каждую секунду через каждый квадратный сантиметр земной поверхности проходят 5 млн. нейтрино высокой энергии. Поэтому с помощью детектора СНО удастся зарегистрировать около 10 нейтрино каждый день. Любая нейтринная реакция сопровождается возникновением энергичных электронов, которые легко заметить по черенковскому излучению – пучку света, возникающему подобно ударной волне от быстро движущейся частицы.

Свет редких нейтринных событий нужно отличить от вспышек черенковского излучения, вызываемого другими частицами, в частности мюонами космических лучей, рожденными в верхних слоях атмосферы и способными ослепить любой фотоумножитель. Километры скальной породы ослабляют поток мюонов до трех штук за час, а поскольку их появление в обычной воде вне детектора тоже сопровождается эффектом Черенкова, их легко отличить от нейтрино.

Гораздо более серьезный источник помех – радиоактивность материалов, из которых сделан сам детектор. Все его элементы – от тяжелой воды

и акрилового резервуара до стекла фотоумножителей и металла опорных конструкций – содержат естественные радиоактивные примеси. Кроме того, в воздухе шахты содержится газ радон. Находящиеся внутри СНО ядра радиоактивных элементов регулярно распадаются и высвобождают энергичные электроны или гамма-лучи, способные вызвать вспышку черенковского излучения, похожую на сигнал от нейтрино.

Перед создателями СНО стояла очень сложная задача: детектор должен подсчитывать нейтрино и определять, какая их часть участвует в каждой из трех реакций и сколько «ложных нейтрино» возникло, например, из-за радиоактивного загрязнения. Однопроцентная погрешность на каждом из этапов анализа сделает бесполезным сравнение потока электронных нейтрино с потоком нейтрино всех типов. За 306 дней работы (с ноября 1999 г. по май 2001 г.) в СНО было зарегистрировано около 500 млн. частиц. После обработки данных только 2928 из них остались кандидатами в нейтрино.

СНО не может однозначно определить тип каждой нейтринной реакции. Скажем, сигнал может быть результатом как распада дейтрона, так и поглощения нейтрино. К счастью, анализ множества сигналов позволяет выявить различие между реакциями. Например, распад дейтрона всегда сопровождается возникновением гамма-лучей с одинаковой энергией, а электроны, появляющиеся при поглощении нейтрино или в результате электронного рассеяния, имеют широкий спектр энергий. Кроме того, рассеяние порождает электроны, движущиеся со стороны Солнца, а вызванное распадом дейтронов черенковское излучение может приходиться с любого направления. Наконец, электронное рассеяние наблюдается как в легкой, так и в тяжелой воде, а другие реакции – нет. Учитывая все эти нюансы, можно определить, сколько раз имела место та или иная реакция.

После статистического анализа всех зарегистрированных в СНО событий 576 из них было отнесено

к распаду дейтронов, 1967 – к поглощению нейтрино и 263 – к электронному рассеянию. Остальные 122 случая были списаны на радиоактивность и другие фоновые явления. Учитывая ничтожную вероятность того, что нейтрино разрушит дейтрон, рассеется на электроне или будет поглощено, приходим к выводу: 1967 зарегистрированных случаев поглощения соответствуют 1,75 млн. электронных нейтрино, каждую секунду проходящих через каждый квадратный сантиметр земной поверхности над СНО. Это составляет только 35% от теоретической интенсивности. Как видим, результаты других нейтринных экспериментов подтвердились: фактический поток электронных нейтрино от Солнца намного меньше теоретического.

Остается ответить на главный вопрос: какова доля электронного аромата в общем потоке солнечных нейтрино? Отнесенные к распаду дейтронов 576 событий соответствуют интенсивности 5,09 млн. нейтрино на квадратный сантиметр в секунду – гораздо больше, чем 1,75 млн. электронных нейтрино. Итак, почти 2/3 приходящих от Солнца нейтрино являются мюонными или тау-нейтрино. А поскольку в результате термоядерных реакций в недрах светила возникают только электронные нейтрино, то некоторые из них должны трансформироваться на пути к Земле. За 20 лет экспериментов только с помощью *Super-Kamiokande* и СНО удалось выяснить, что нейтрино ведут себя совсем не так, как три безмассовых аромата, описанных в Стандартной модели. Наблюдая за превращениями нейтрино, мы еще раз убеждаемся в том, что микромир раскрыл еще не все свои тайны.

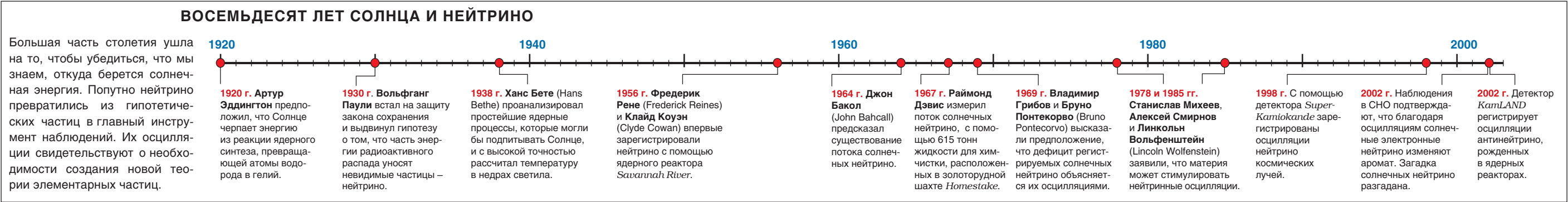
А как же быть с «проблемой солнечных нейтрино»? Объясняется ли наблюдаемый уже 30 лет дефицит превращением электронных нейтрино в другие ароматы? Да! Подсчитанные 5,09 млн. нейтрино прекрасно согласуются с прогнозами, составленными на основании гелиофизических моделей. Теперь мы вправе заявить, что действительно понимаем, как рождается солнечная энергия.

Солнце поведало нам много нового про нейтрино, и мы наконец можем вернуться к изначальной задаче Дэвиса и использовать эти удивительные частицы для изучения ближайшей к нам звезды. Например, с помощью нейтрино можно определить, какая часть солнечной энергии генерируется в прямом слиянии ядер водорода, а какая – в результате каталитических реакций с ядрами углерода.

Планы на будущее

Открытие, сделанное в СНО, гораздо важнее, чем просто разрешение «солнечной проблемы». Если в ходе осцилляций нейтрино изменяют свой тип, то они должны обладать массой покоя. Это имеет огромное космологическое значение, поскольку нейтрино – самые многочисленные во Вселенной частицы после фотонов. Наблюдения, проведенные с помощью *Super-Kamiokande* и СНО, позволили измерить не сами массы, а их разность. А так как она отлична от нуля, значит, по крайней мере некоторые ароматы имеют ненулевую массу. Дополнив информацию о разности масс значением верхнего предела массы электронных нейтрино, полученным из других экспериментов, приходим к выводу, что нейтрино вносят от 0,3% до 21% критической плотности плоской Вселенной. (Другие космологические данные недвусмысленно говорят о том, что Вселенная плоская.) Это количество не так уж мало (оно сравнимо с 4% плотности, вносимыми всеми звездами, газом и пылью), но его недостаточно, чтобы объяснить природу всего вещества, по-видимому, присутствующего во Вселенной. Поскольку нейтрино были последними известными нам частицами, которые могли бы возместить скрытую массу, то должен существовать хотя бы один тип еще не открытых частиц, плотность которых выше, чем у всех уже известных видов материи.

Сотрудники СНО также пытаются изучить влияние вещества на колебания нейтрино. Как уже говорилось, пролет сквозь Солнце может увеличивать вероятность осцилляций. Если это так, то



НЕКОТОРЫЕ ДРУГИЕ НЕЙТРИННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

HOMESTAKE: Радиохимический детектор солнечных нейтрино, расположенный в бывшей золоторудной шахте Homestake, штат Южная Дакота. Наблюдения начались в 1966 г. с использованием 615 тонн жидкости для хим-чистки. В 1996 г. на смену тетрахлорэтилену пришел рас-твор йодистого натрия, и регистрацию нейтрино стали осуществлять с помощью 100 тонн йода.

KAMIOKA: Здесь разместился *Super-Kamiokande* – детектор для изучения солнечных нейтрино и нейтрино космических лучей с помощью 500 тыс. тонн легкой воды. Он также регистрирует мюонные нейтрино, прилетающие из КЕК, расположенного в 250 км (проект «K2K»).

SAGE (российско-американский галлиевый эксперимент): Детектор расположен в Кавказских горах, на Баксане. Для наблюдений используется 50 тонн галлия, который позволяет регистрировать нейтрино низких энергий, порождаемые протонным синтезом внутри Солнца.

GRAN SASSO: Самая большая в мире подземная лаборатория, разместившаяся в недрах гор Гран-Сассо в 150 км к востоку от Рима. В 1991 г. там начался солнечно-нейтринный эксперимент *Gallex/GNO*, в котором задействовано 30 тонн галлия (в виде водного раствора трихлорида галлия).

MINIBOONE (нейтринный ускоритель): Находится в лаборатории им. Ферми, штат Иллинойс; введен в эксплуатацию в 2002 г. Пучки мюонных и антимюонных нейтрино проходят сквозь 500 м земли и затем регистрируются в баке с 800 тоннами минерального масла. Цель проекта – проверить сомнительные результаты эксперимента *LSND*, проведенного в Лос-Аламосской национальной лаборатории в 1995 г.

MINOS: Пучки нейтрино из лаборатории им. Ферми будут направляться на расположенный в 735 км детектор *Soudan*, штат Миннесота. Для регистрации нейтрино будет использоваться 5400 тонн железа, пронизанного пластиковыми детекторами частиц.

путешествие нейтрино сквозь тысячи километров земной тверди должно стимулировать обратный процесс. Поэтому ночью поток солнечных электронных нейтрино должен быть более интенсивен, чем днем. В принципе, данные, накопленные в СНО, вроде бы подтверждают эту гипотезу, но они пока недостаточно достоверны, чтобы с уверенностью говорить о наблюдаемом эффекте.

Характеристики Садберийской обсерватории постоянно улучшаются. В описанных выше экспериментах нейтроны, полученные при распаде дейтронов, регистрировались в тот момент, когда их захватывали другие атомы дейтерия, – малозаметный процесс, сопровождающийся слабым излучением. В мае 2001 г. в тяжелую воду добавили 2 тонны очищенного хлорида натрия (поваренная соль). Хлор захватывает нейтроны более активно, чем дейтерий, а возникающее при этом излучение гораздо заметнее на общем фоне. Недавно для СНО были изготовлены особо чистые детекторы – пропорциональные счетчики для непосредственной регистрации нейтронов. Они будут помещены

в тяжелую воду в июле 2003 г. Создание этих приборов стало большим техническим достижением: их собственный радиоактивный фон соответствует всего лишь одному отсчету на квадратный метр детектора за год. Таким образом, появится возможность проверить наши предыдущие результаты в независимом высокоточном эксперименте.

Подземная обсерватория в Садбери не единственная в своем роде. В декабре 2002 г. появились первые результаты японско-американского эксперимента *KamLAND*. Детектор, расположенный рядом с *Super-Kamiokande*, фиксирует электронные антинейтрино, поступающие от ядерных реакторов Японии и Кореи. Если осцилляции нейтрино изменяют их аромат, то и антинейтрино должны менять свой тип. *KamLAND* действительно фиксирует весьма небольшое количество электронных антинейтрино, а это значит, что они осциллируют на пути от реакторов к детектору.

Дальнейшие наблюдения за нейтрино помогут разгадать величайшую загадку Вселенной: почему она состоит из вещества, а не из антивещества? Выдающийся российский физик Андрей Сахаров первым указал на то, что переход от чистой энергии Большого взрыва к современной Вселенной, в которой вещество доминирует над антивеществом, мог произойти лишь в том случае, если законы природы для частиц и античастиц различны. Результаты тонких экспериментов с распадом частиц подтверждают, что законы физики действительно нарушают инвариантность зарядовой четности (СР-инвариантность). Правда, не до такой степени, чтобы обосновать окружающий нас избыток вещества над антивеществом. Вероятно, существуют еще не изученные явления, гораздо сильнее нарушающие СР-инвариантность. Возможно, именно к ним относятся нейтринные осцилляции.

Для наблюдения нарушений СР-инвариантности в осцилляциях нейтрино на Земле требуются еще две вещи. Во-первых, физики должны обнаружить третий тип нейтринных осцилляций – появление электронных нейтрино в мощном пучке мюонных нейтрино (такие эксперименты уже готовятся в США, Европе и Японии). Во-вторых, необходимо создать «нейтринную фабрику» – пучок нейтрино такой интенсивности, чтобы можно было наблюдать осцилляции на межконтинентальном расстоянии или даже на другой стороне Земли. Проекты подобной «фабрики» уже активно обсуждаются, но появится она лишь лет через десять. Не такой уж большой срок по сравнению с тридцатью годами подготовки к долгожданному эксперименту в Садбери... ■

(«В мире науки», №9, 2003)

ВСЕЛЕННАЯ ДИСКОВ

Омер Блэйс

Новые исследования помогают понять динамику развития вращающихся газовых дисков, окружающих молодые звезды и гигантские черные дыры.

Небесная карусель

Вращение помогает диску противостоять притяжению. Представьте себя на быстро крутящейся карусели. Если вы не схватились за одну из лошадок, то будете падать, двигаясь по касательной к кругу. Усилие вашей руки – это как раз та сила, которая помогает вам удержаться. Таким же образом вращение вещества в диске противостоит силе притяжения.

Вращающиеся объекты имеют момент импульса, значение которого пропорционально скорости вращения объекта и распределению его массы вокруг оси: чем дальше она от нее, тем больше (при той же скорости) момент импульса, который для понимания динамики вращающихся систем не менее важен, чем энергии, поскольку обе эти величины сохраняются. Момент, как и энергия, не может ни появиться, ни исчезнуть. К примеру, фигурист на льду начинает крутиться быстрее, когда прижимает руки к телу. Поскольку его момент импульса должен остаться постоянным, перемещение массы к оси вращения тела компенсируется увеличением скорости его вращения.

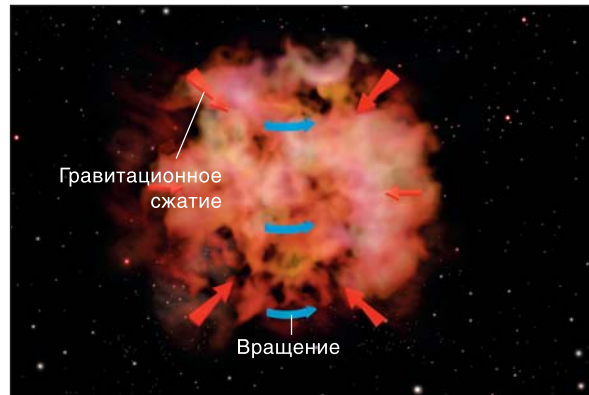
Закон сохранения момента импульса объясняет, почему диски столь распространены во Вселенной. Рассмотрим облако газа, которое сжимается под действием собственного тяготения. Все во Вселенной так или иначе вращается, поэтому можно предположить, что и облако имеет какой-то момент импульса. Если оно сжимается, то закон сохранения вынуждает его продолжать движение по кругу быстрее (см. врез на стр. 120).

ОБЗОР: АККРЕЦИОННЫЕ ДИСКИ

- Газовые диски встречаются во Вселенной вокруг новорожденных звезд, в двойных звездных системах, в центрах галактик.
- Чтобы объяснить излучение, идущее от дисков, ученые предположили, что вещество в них из-за магнито-ротационной неустойчивости движется турбулентно.
- Сейчас исследователи выясняют, как излучение проявляется в аккреционных дисках разного типа.

РОЖДЕНИЕ ДИСКА

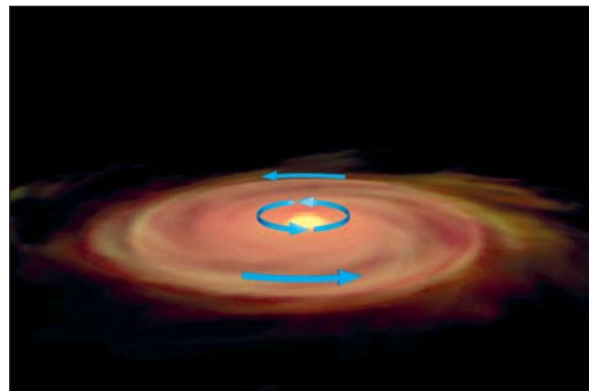
Закон сохранения момента импульса объясняет, почему диски так распространены во Вселенной. Момент импульса пропорционален скорости вращения объекта и удалению массы от оси вращения.



Облако межзвездного газа медленно вращается вокруг оси и сжимается под действием собственной гравитации. По мере сжатия облака скорость движения по кругу увеличивается.



Газ в экваториальной плоскости облака перемещается все медленнее, поскольку вращение начинает уравнивать гравитацию.



Через некоторое время все вещество облака собирается в экваториальной плоскости, где газ поддерживается вращением — его движение противостоит гравитации.

Постепенно вращение начинает уравнивать силу притяжения, от чего вещество перемещается к оси все медленнее и медленнее. Вдоль оси вращения вещество почти свободно падает к экваториальной плоскости, т.е. к плоскости, перпендикулярной оси. В результате получается диск, поддерживаемый вращением.

Ученые полагают, что именно так образуются протопланетные диски вокруг молодых звезд и приблизительно так же формируются газовые диски вокруг черных дыр в центрах галактик. Станет ли вся галактика диском, зависит от временного фактора. Спиральная галактика возникает, если газ сжался во вращающийся диск прежде, чем отдельные облака превратились в звезды, которые если и родились до того, как галактическое облако сжалось в диск, то в дальнейшем сохраняют свои хаотические орбиты вокруг галактического центра, формируя эллиптическую галактику. Правда, галактики формируются не в изоляции. Их взаимные столкновения и слияния существенно усложняют картину. По крайней мере, некоторые эллиптические галактики, а также балджи и гало спиральных галактик скорее всего являются результатом таких столкновений.

Аккреционные диски формируются и в двойных звездных системах, когда одна из звезд (например, маленький и плотный белый карлик) своим притяжением оттягивает газ у соседа (обычно у большей и не столь плотной звезды). Похищенный газ обладает значительным моментом импульса, полученным от орбитального движения двух звезд вокруг их общего центра масс. Поэтому газ не может прямо упасть на белый карлик, а формирует вокруг него диск.

Вспомнив, что год Меркурия короче земного (всего 88 суток), мы поймем, почему вещество внутренних областей диска совершает оборот по орбите за меньшее время, чем вещество внешних. Различие орбитальных периодов приводит к сдвигу: слои вещества на различных расстояниях от центра скользят друг относительно друга (см. врез слева). Если веществу в какой-нибудь форме присуще трение, оно будет замедлять быстро вращающиеся внутренние части диска и ускорять его медленно движущиеся внешние области. При этом момент импульса переносится от внутренних областей к внешним. В результате вещество внутренних областей не может сопротивляться гравитации и движется вниз по спирали к центральной звезде или черной дыре.

По мере того как вещество опускается к внутреннему краю аккреционного диска, оно отдает свою гравитационную потенциальную энергию,

одна часть которой идет на увеличение орбитальной скорости вещества (чем ниже орбита, тем выше скорость), а другая — за счет трения превращается в тепло. Поэтому вещество в диске может нагреться и превратиться в источник видимого, ультрафиолетового и рентгеновского излучения. Мощное энерговыделение аккреционных дисков навело астрономов на мысль о существовании черных дыр, которые сами по себе не могут испускать свет, но аккреционные диски вокруг них способны на это. (Здесь мы не касаемся теории Хокинга, согласно которой черные дыры должны испускать слабое излучение. Заметить его можно было бы лишь у самых малых из них, но пока оно нигде во Вселенной не наблюдалось.)

Согласно общей теории относительности Эйнштейна, энергия, выделяемая аккреционным диском вокруг черной дыры, должна составлять около 10% от энергии массы покоя вещества (равной массе, умноженной на квадрат скорости света). Такая чудовищная величина более чем в 10 раз превышает энергию, выделяющуюся при термоядерных реакциях. И все же она согласуется с наблюдениями излучения квазаров — очень ярких объектов, источниками энергии которых, как полагают, служат аккреционные диски вокруг сверхмассивных черных дыр в ядрах молодых галактик. Если вычислить полную энергию, испускаемую за все время всеми квазарами в некоторой области пространства, то она оказывается близка к 10% энергии массы покоя всех сверхмассивных черных дыр, наблюдаемых сегодня в той же части.

Космическая турбулентность

Какова природа трения внутри аккреционных дисков, приводящего к выделению гигантской энергии? Возможно, частицы вещества в диске сталкиваются и обмениваются энергией и моментом импульса. Такой механизм работает в кольцах Сатурна: песчинки, камни, валуны и их составляющие соприкасаются друг с другом, энергия переходит в тепло, а момент импульса переходит наружу. Кольца Сатурна в некотором смысле можно считать вязкой жидкостью, в которой сталкивающимися молекулами стали камни! Столкновения заставляют кольца растягиваться по радиусу, но спутники Сатурна действуют как резервуары момента импульса и ограничивают это растяжение.

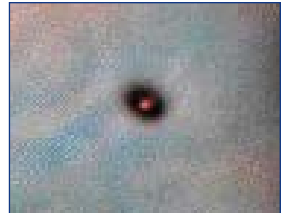
К сожалению, подобным образом невозможно объяснить активность других типов аккреционных дисков. В двойных системах или в центрах галактик столкновения частиц вызвали бы

ГАЛЕРЕЯ ДИСКОВ И ДЖЕТОВ

Астрономы наблюдают диски как вокруг молодых звезд в туманностях нашей собственной Галактики, так и в центрах других галактик, удаленных на миллионы световых лет. Многие из них по не совсем понятной причине испускают джеты частиц.

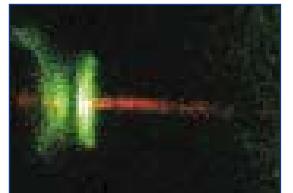
ПРОТОПЛАНЕТНЫЙ ДИСК

В туманности Ориона, удаленной на 1,5 тыс. световых лет от Земли, протопланетные диски окружают звезды, которым всего лишь 1 млн лет. Диски размером от 20 до 70 млрд. км состоят на 99% из газа и на 1% из пыли. Эволюция каждого из них может привести к рождению планетной системы, подобной нашей.



ДЖЕТ ОТ РОДИВШЕЙСЯ ЗВЕЗДЫ

Новорожденная звезда *HH-30*, расположенная на расстоянии 450 световых лет от Земли, окружена протопланетным диском, повернутым к нам ребром. Два газовых джета вылетают в противоположных направлениях из центра диска со скоростью 960 тыс. км/час. Возможно, магнитное поле звезды направляет газ.



СПИРАЛЬНАЯ ГАЛАКТИКА

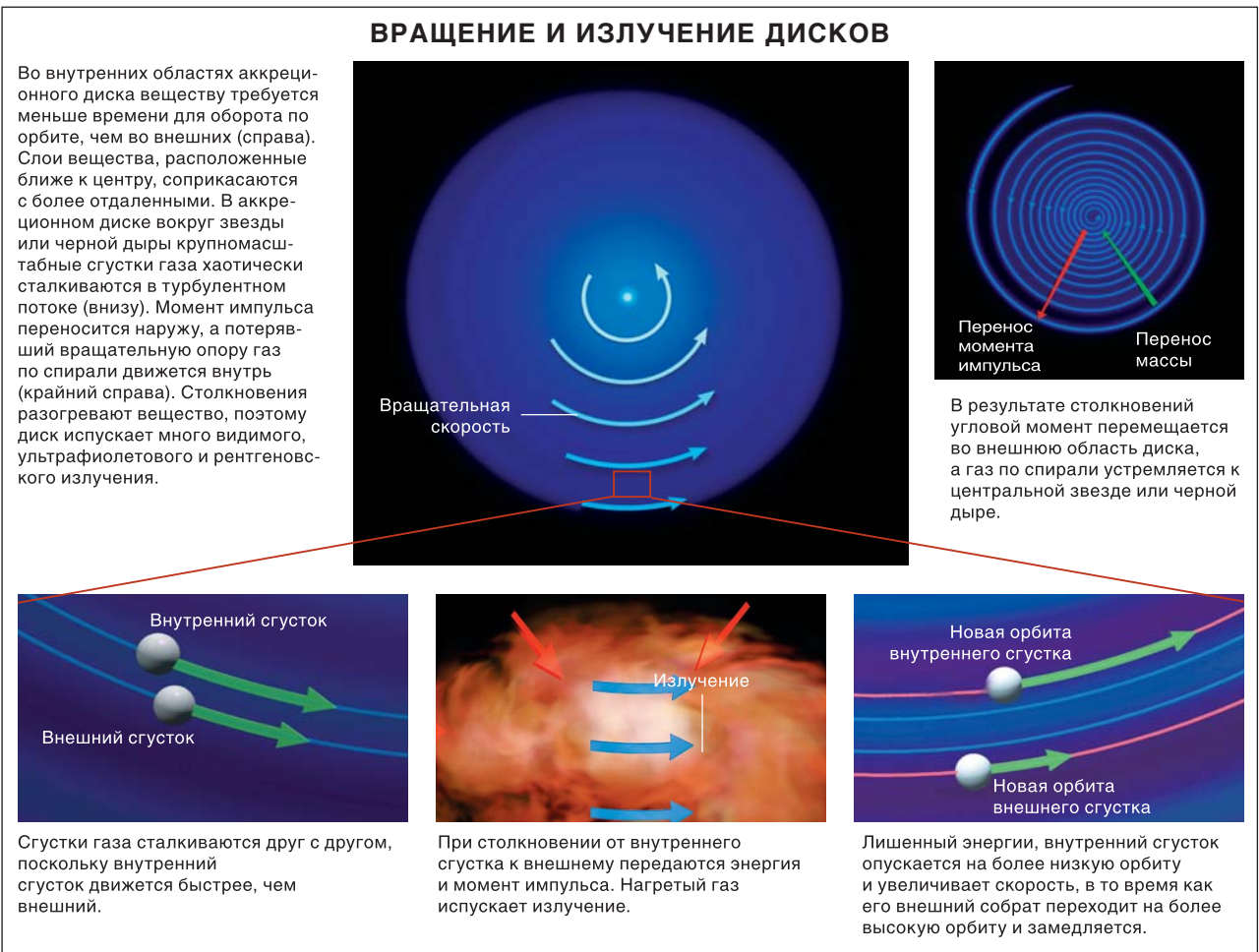
Галактика *NGC 7331*, удаленная от нас приблизительно на 50 млн. световых лет, — это диск, подобный нашей Галактике. Данные космического телескопа *Spitzer*, наблюдающего в инфракрасном диапазоне, указывают на присутствие сверхмассивной черной дыры в ядре этой галактики.



ДЖЕТ ОТ АКТИВНОЙ ГАЛАКТИКИ

Активное ядро гигантской эллиптической галактики *M87*, удаленной на 50 млн. световых лет от Земли, испускает джет из высокоскоростных электронов, протянувшийся на 6,5 тыс. световых лет от ядра галактики. Он уносит большую часть энергии аккреционного диска, вращающегося вокруг сверхмассивной черной дыры.





настолько малый приток массы к центру, что невозможно было бы объяснить гигантскую светимость дисков. Возможно, поток вещества в них усиливается крупномасштабными волнами, похожими на спиральные рукава галактик. Так же, как звуковые волны переносят в воздухе энергию, спиральные волны могут переносить в диске энергию и момент импульса наружу, облегчая аккрецию вещества. Астрономы нашли свидетельства существования спиральных волн в аккреционных дисках у некоторых двойных систем, которые, однако, не настолько сильны, чтобы обеспечить приток вещества, необходимый для возникновения наблюдаемого излучения.

Многие астрофизики полагают, что важнейший механизм трения в аккреционных дисках – турбулентность, ускоряющая поток вещества. Когда по трубе движется вода, ее вязкость снижает скорость течения у внутренней стенки трубы. Если же градиент скорости увеличится, то он в конечном счете дестабилизирует поток воды и сделает его бурным и хаотичным. Поскольку в аккреционных дисках потоки вещества облада-

ют разными скоростями, в 1970-х гг. астрофизики предположили, что диски могут быть турбулентными. Но когда они попробовали смоделировать это явление, решая уравнения движения жидкости на компьютерах, то не обнаружили условий для развития турбулентности в аккреционных дисках.

Возможно, компьютерное моделирование не было точным или аналогия с потоком жидкости в трубе не совсем верна и вращающиеся системы типа аккреционных дисков ведут себя иначе. Исследователи провели лабораторные опыты, пытаясь создать турбулентность в потоках, которые напоминают аккреционные диски, но результаты вновь оказались спорными. И все же астрофизики уверены, что аккреционные диски турбулентны. Впервые попытку рассчитать структуру турбулентного диска в 1973 г. предприняли российские астрофизики Николай Шакура и Рашид Сюняев. Они смогли построить теоретические модели аккреционных дисков и сравнить их с наблюдениями. Ученые показали, что иногда некоторые аккреционные диски в двойных звездных

системах на короткое время увеличивают свою светимость (например, карликовая Новая, вспышка аккреционного диска вокруг белого карлика в двойной системе), что вызвано неустойчивостью в диске, которая вынуждает вещество быстрее перемещаться внутрь.

Несмотря на вышеизложенные достижения, модель Шакуры–Сюняева ненамного приблизила нас к сути явлений. Расхождение между теорией и данными наблюдений может возникать, если предположение о турбулентности диска вообще неверно. С другой стороны, турбулентность, обеспечивая перенос момента импульса по диску, могла бы дать подобные эффекты, но исследователи не могут предсказать, какими они будут, пока не поймут процессов, стоящих за ними.

Астрономические гонки

В 1991 г. произошел прорыв в решении проблемы турбулентности. Стивен Балбус (S. Balbus) и Джон Холей (J. Hawley) из Виргинского университета предположили, что если вещество в аккреционном диске имеет высокую электропроводность и пронизано хотя бы слабым магнитным полем, то это приводит к неустойчивости в диске, постоянно возбуждающей турбулентность потока. Эффект назвали магнито-ротационной неустойчивостью. Она усиливает перенос момента импульса и выделение гравитационной энергии. Считается, что именно он играет основную роль в динамике большинства аккреционных дисков.

Магнитные силовые линии в хорошо проводящей среде перемещаются вместе с ней: куда движется вещество, туда и поле. Но магнитные силовые

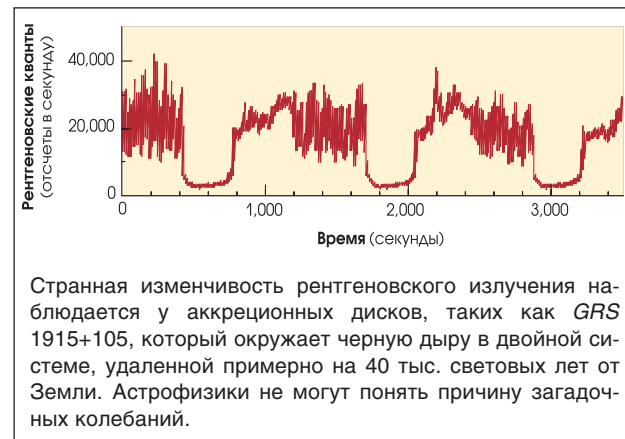
линии тоже влияют на среду. Словно резиновые нити, изогнутые силовые линии поля оказывают давление на вещество.

Неустойчивость приводит к турбулентности. Представим круговой трек с автомобилями, которые по внутренней стороне движутся быстрее, чем по внешней. Предположим, что они связаны цепями. Машины на внутренних дорожках должны терять момент импульса, поскольку их тянут назад, а у автомобилей на внешних он должен увеличиваться, поскольку их тянут вперед. В результате получается хаос. Так же развивается турбулентность в аккреционном диске.

Открытие магнито-ротационной неустойчивости изменило наше представление об аккреционных дисках. Похожая ситуация была в начале XX в., когда астрономы впервые поняли, что основным источником энергии звезд служат реакции ядерного синтеза. Теперь астрофизики нашли механизм, вырабатывающий еще большую энергию у объектов типа квазаров и активных ядер галактик (которые, как считается, тоже питаются веществом, падающим на сверхмассивные черные дыры). Сейчас ученые исследуют, как турбулентность, стимулированная магнито-ротационной неустойчивостью, функционирует в различных ситуациях и может ли она объяснить особенности поведения различных типов аккреционных дисков.

Например, действует ли механизм турбулентности в протопланетных дисках, менее компактных, а потому более прохладных, чем диски вокруг белых карликов, нейтронных звезд и черных дыр. Протопланетные диски в основном состоят из нейтрального газа и пыли и не содержат





электропроводящей плазмы. Может ли магнитное поле влиять на потоки такого вещества, пока не ясно.

Мы пытались выяснить, как магнито-ротационная неустойчивость действует в горячих и непрозрачных аккреционных дисках вокруг черных дыр, где турбулентность может быть сверхзвуковой, порождающей в плазме ударные волны, подобно тому, как сверхзвуковой самолет производит акустический удар. В результате могут рождаться фотоны с большой энергией, которые, вырываясь сквозь относительно прозрачные области между ударными волнами, создают излучение из окрестности черной дыры, которое и должны заметить астрономы.

Колебания и джеты

Многие аккреционные диски, по-видимому, пронизаны мощными турбулентными потоками и поэтому демонстрируют сильную переменность излучения. Хаотические изменения яркости, как это ни парадоксально, строго упорядочены: на фоне загадочных мерцаний вновь и вновь прослеживается характерная последовательность колебаний с определенной частотой (см. рис. наверху). Рентгеновский спутник *Rossi X-ray Timing Explorer*, способный регистрировать быстрые изменения рентгеновского излучения, может помочь в изучении колебаний в аккреционных дисках вокруг нейтронных звезд и черных дыр звездной массы, превышающей массу Солнца в 4–15 раз.

Астрофизики не знают, каковы причины изменчивости и почему частоты колебаний именно таковы. Роберт Вагонер (R. Wagoner) из Стэнфордского университета предположил, что так проявляются дискретные моды колебаний диска, подобные гармоническим колебаниям скрипичной струны. Как звуки скрипки могут рассказать нам о натяжении и массе ее струн, так и наблюдаемые частоты колебаний аккреционного диска способны

поведать о структуре диска и пространстве-времени вокруг нейтронной звезды или черной дыры.

Несмотря на то что большая часть гравитационной энергии падающего по спирали вещества в аккреционных дисках испускается в виде излучения, иногда часть энергии уносится ветром или струей частиц – джетом (см. врез на стр. 24). Астрономы пытаются понять, как генерируются такие потоки и чем определяется разделение энергии аккреции на излучательную и кинетическую и каковы механизмы выброса частиц. Возможно, иногда отток вещества оказывает решающее влияние на аккреционный диск, поскольку он уносит наружу не только массу и энергию, но и существенную часть момента импульса.

Один из возможных механизмов формирования некоторых типов истечения – давление фотонов, излучаемых аккреционным диском. Обладая нулевой массой покоя, они, рассеиваясь в веществе, обмениваются импульсом с его частицами и таким образом оказывают на них давление. Молодые массивные звезды испускают мощное ультрафиолетовое излучение, которое давит на окружающие звезду атомы и ионы и уносит их прочь, создавая звездный ветер. Точно так же ультрафиолетовые фотоны аккреционных дисков вокруг белых карликов, в активных ядрах галактик или квазарах могут разгонять ветер от диска.

Некоторые объекты из числа молодых звезд или активных ядер галактик формируют быстрые и узкие потоки частиц – джеты, простирающиеся на расстояние в несколько световых лет у первых и на миллионы световых лет у вторых. Поскольку джеты на таком большом расстоянии сохраняют вид узкого пучка, то становится ясным, что здесь замешаны магнитные поля. Поскольку сам аккреционный диск, по-видимому, намагничен, его вращение может закручивать магнитные силовые линии в спираль, удерживая джет от расширения. Еще в 1980-х гг. Роджер Блендфорд (R. Blandford) и Дэвид Пэйн (D. Payne) из Калифорнийского технологического института предположили, что вращение диска может способствовать выбросу вещества наружу вдоль линий поля, обеспечивая начальное ускорение и увеличение массы джета. К сожалению, мы пока не знаем, как связать хаотическую магнитную турбулентность аккреционного потока в диске с гораздо более упорядоченной структурой магнитного поля в джете. Изучая магнитную турбулентность в различных условиях, мы стремимся понять суть явлений, демонстрируемых спиральными дисками. В том числе и аккреционный диск, который породил нашу Солнечную систему. ■

(«В мире науки», №1, 2005)

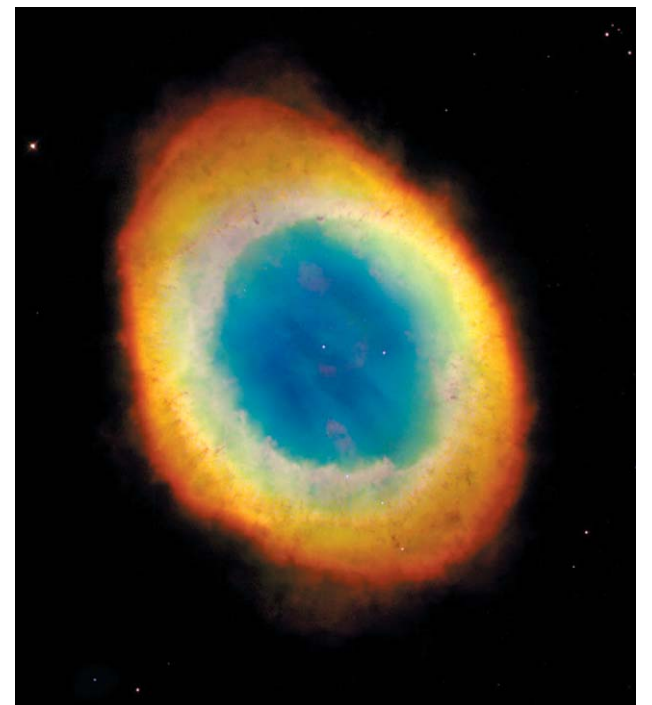
НЕОБЫЧНАЯ СМЕРТЬ ОБЫЧНЫХ ЗВЕЗД

Брюс Балик и Адам Франк

Кончина Солнца через 5 млрд. лет будет выглядеть захватывающе: как и другие звезды такого типа, оно превратится в планетарную туманность.

Желтая медуза и красные осьминоги плывут в кобальтовой воде. Вместе с плавным потоком колеблется и лес глубоководных водорослей. Переливающиеся розовые раковины обнимают друг друга, подобно паре влюбленных. Все эти удивительные стеклянные скульптуры созданы Дэйлом Чихули (Dale Chihuly). Для астрономов работы стеклодува, чья мастерская расположена недалеко от астрономического отделения Вашингтонского университета, несут иной смысл: не много найдется произведений, так убедительно передающих красоту космических объектов, называемых планетарными туманностями. Освещенные изнутри родительской звездой, расцвеченные флуоресцирующими атомами и ионами на фоне космической черноты, газовые структуры кажутся живыми. Ученые дали им прозвища – Муравей, Морская Звезда, Кошачий Глаз...

Термин «планетарные туманности», относящийся к размытым, похожим на облака объектам, видимым только в телескоп, придумал два столетия назад английский астроном Вильям Гершель (William Herschel), исследователь туманностей. Многие из них имеют округлую форму, которая напомнила ученому зеленоватый диск планеты Уран, им же и открытой. К тому же он полагал, что округлые туманности могут быть планетными системами, формирующимися вокруг молодых звезд. Термин прижился, несмотря на то что действительность оказалась иной: туманности такого типа состоят из газа, сброшенного умирающими звездами. Примерно через 5 млрд. лет Солнце закончит свой космический век изящным выбросом планетарной туманности, что не вполне соответствует теории эволюции звезд – основе, на которой базируется наше понимание космоса. Если звезды рождаются, живут и умирают круглыми, то как же они создают вокруг себя структуры, которые мы видим на фотографиях «Хаббла», подобные Муравью, Морской Звезде или Кошачьему Глазу?



Планетарная туманность Кольцо (M 57)

ОБЗОР: ПЛАНЕТАРНЫЕ ТУМАННОСТИ

- Планетарные туманности – затейливые остатки звезд умеренной массы, менее 8 масс Солнца. Умирая, звезда сбрасывает внешние слои, порождая ветер, который дует со скоростью до 1000 км/с. Постепенно светило обнажает свои горячие недра, ультрафиолетовое излучение которых ионизирует ветер и заставляет его светиться.
- Космический телескоп «Хаббл» выявил туманности с удивительно сложными очертаниями. Возможно, свою роль в этом играет магнитное поле, сцепленное с ядром и выталкивающее ветер. Близкая звезда-компаньон или массивная планета также могут за счет приливной силы формировать гигантские газовые кольца и придавать ветру форму песочных часов.



Кошачий Глаз

(NGC 6543) – одна из наиболее причудливых планетарных туманностей в нашей Галактике: многослойное и многоцветное газовое облако расположено примерно в 3 тыс. световых лет от Солнца. Астрономам нелегко было объяснить сложную форму туманности Кошачий Глаз, сфотографированной космическим телескопом «Хаббл» в 1994 г. Такие туманности не имеют ничего общего с планетами: их название – лишь исторический курьез. В действительности это предсмертный распад звезды умеренной массы.

И смерть приходит за ними

В течение XX в. астрономы поняли, что звезды четко делятся по типу смерти на два класса. Если масса звезды при рождении превышала восемь масс Солнца, то в конце жизни звезда внезапно взрывается как сверхновая, а менее массивные из них умирают долго и проводят свои последние годы, спазматически перерабатывая остатки топлива.

В недрах такой звезды на протяжении почти всей ее жизни термоядерные реакции сжигают водород, а затем гелий. Когда ядерное горение перемещается к свежему веществу, в окружающую ядро оболочку, то звезда раздувается в так называемый красный гигант. Как только водород сожжен, наступает очередь гелия. Его горение происходит неустойчиво, и звезда теряет стабильность. Ее сильные колебания вместе с давлением излучения раздувают слабо связанные поверхностные слои, создавая планетарную туманность.

Начиная с XVIII в. астрономы обнаружили и занесли в каталоги почти 1500 планетарных туманностей, а еще 10 тыс. их могут скрываться за плотными пылевыми облаками Галактики. В то время как сверхновые вспыхивают в Млечном

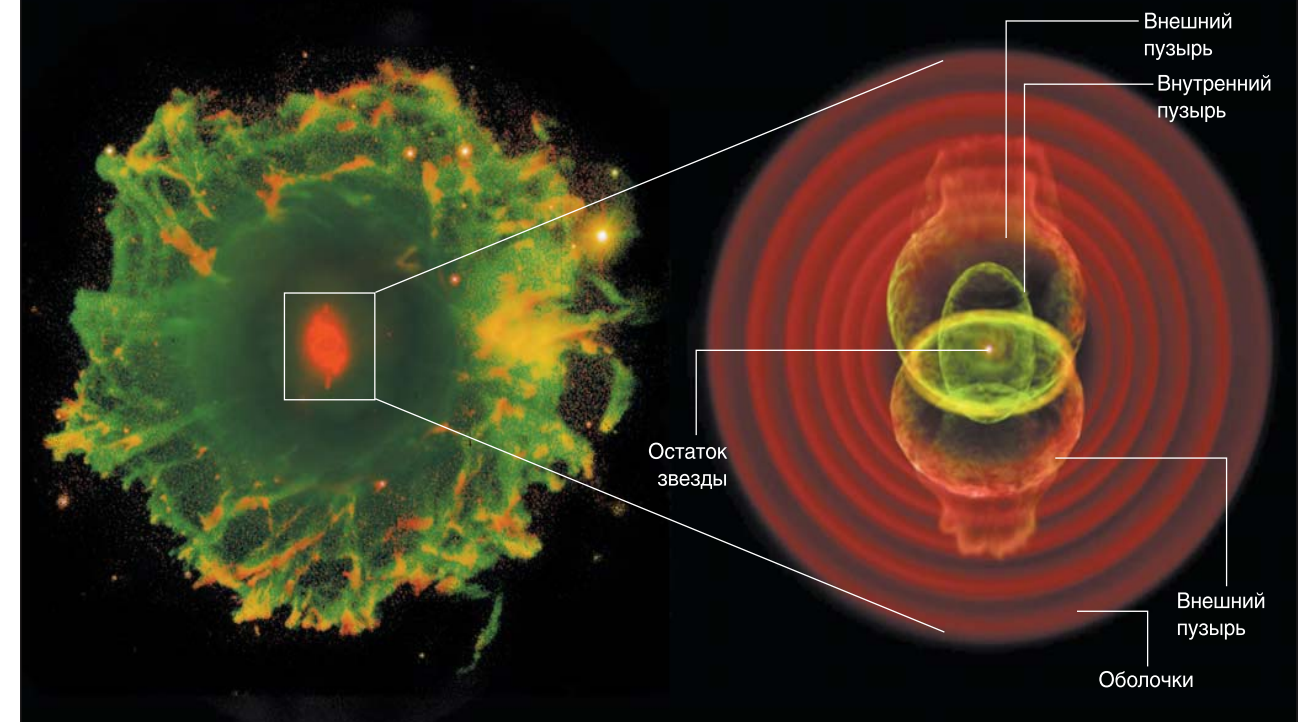
Пути лишь раз в несколько столетий, планетарные туманности рождаются каждый год. Конечно, сверхновые более зрелищны, но их остатки неприглядны и хаотичны, им недостает симметрии и изящества туманностей.

Планетарные туманности не столь уж легки и спокойны, они массивные и бурные: масса каждой – около трети солнечной и включает почти все оставшееся несожженным ядерное топливо звезды. В начальной стадии слабо связанные внешние слои звезды покидают ее со скоростью 10–20 км/с; этот относительно медленный ветер уносит большую часть массы туманности. Все сильнее обнажая ядро, звезда меняет свой цвет от апельсинового к желтому, затем к белому, и наконец – голубому. Когда температура ее поверхности становится выше 25 тыс. К, она заливает окружающий газ жестким ультрафиолетом, настолько мощным, что он разрывает молекулы и лишает их атомы электронов. Звездный ветер уносит все меньше массы со все большей скоростью. Спустя 100 тыс. – 1 млн. лет, в зависимости от начальной массы звезды, процесс прекращается, и от светила остается чрезвычайно плотный

СТРОЕНИЕ КОШАЧЬЕГО ГЛАЗА

Наземный телескоп выявил у Кошачьего Глаза «реснички» (слева) – клочковатый внешний газовый слой. Реконструированная художником внутренняя часть, или «зрачок» (справа), содержит остаток звезды, погруженный в яйцеобразную газовую оболочку, окруженную двумя экс-

центрическими пузырями, и все это обрамляют концентрические газовые оболочки. Очевидно, вещество внешних частей туманности выбрасывалось звездой в течение тысячелетий. Туманность развернута верхней частью к нам.



и горячий белый карлик – «тлеющий уголек», сжатый гравитацией в шарик размером с Землю.

Поскольку предполагалось, что силы, отталкивающие вещество от умирающих звезд, сферически симметричны, то астрономы до 1980-х гг. представляли планетарные туманности как расширяющиеся сферические пузыри. Однако с тех пор представления изменились.

Рассекая тьму

Еще в 1978 г. было замечено, что жизнь планетарных туманностей не так проста: ультрафиолетовые наблюдения показали, что умирающие звезды продолжают терять вещество и после того, как они сбросили свои внешние слои. Разреженный поток газа уносится со скоростью 1000 км/с, т.е. в 100 раз быстрее более плотного потока, сброшенного ранее.

Сан Куок (Sun Kwok) из Университета Калгари, Кристофер Пертон (Ch.R. Purton) из Доминьонской радио-астрофизической обсерватории Канады и Пим Фицджеральд (M.P. Fitzgerald) из Университета Ватерлоо разработали модель звездного ветра: когда быстрые потоки догоняют и таранят более

медленные, подобно бульдозеру, уплотняют перед собой слой газа. Оболочка из сжатого газа окружает почти пустую, но очень горячую полость, и постепенно быстрый поток очищает все больший объем.

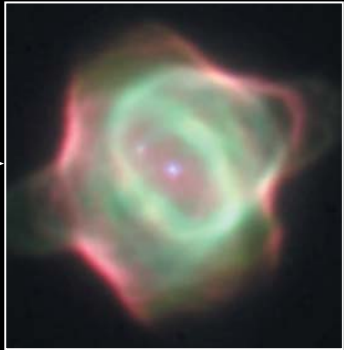
Модель взаимодействующих звездных ветров подходит для сферических или почти сферических планетарных туманностей. В 1980-е гг. наблюдатели выяснили, что сферические туманности очень редки, вероятно, их не более 10%. Большинство же имеет вытянутую или яйцеобразную форму, а некоторые состоят из двух пузырей, расположенных по бокам от умирающей звезды. Астрономы называют их биполярными.

Вместе с Винсентом Икке (V. Icke) и Гаррелтом Меллемой (G. Mellema) из Лейденского университета в Нидерландах мы развили концепцию взаимодействующих ветров. Представим, что медленные потоки сначала формируют плотный тор, вращающийся в плоскости экватора звезды, который отклоняет звездный ветер в полярном направлении, формируя эллиптическую туманность. Если тор очень плотный и компактный, то возникают туманности типа Песочных Часов.

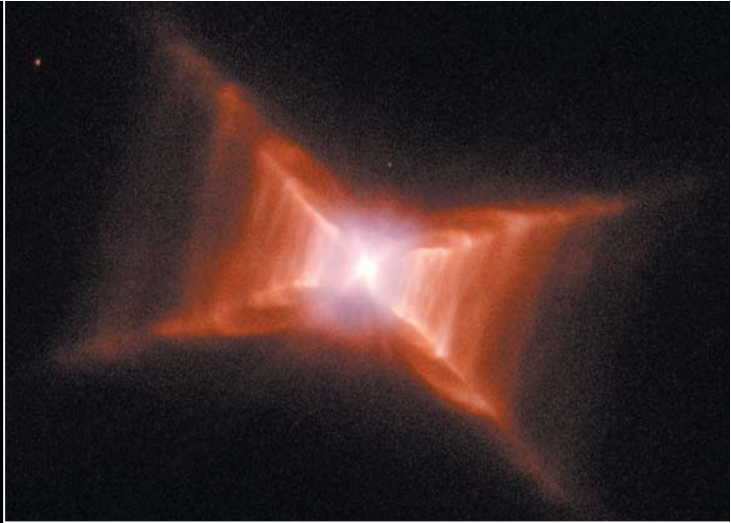
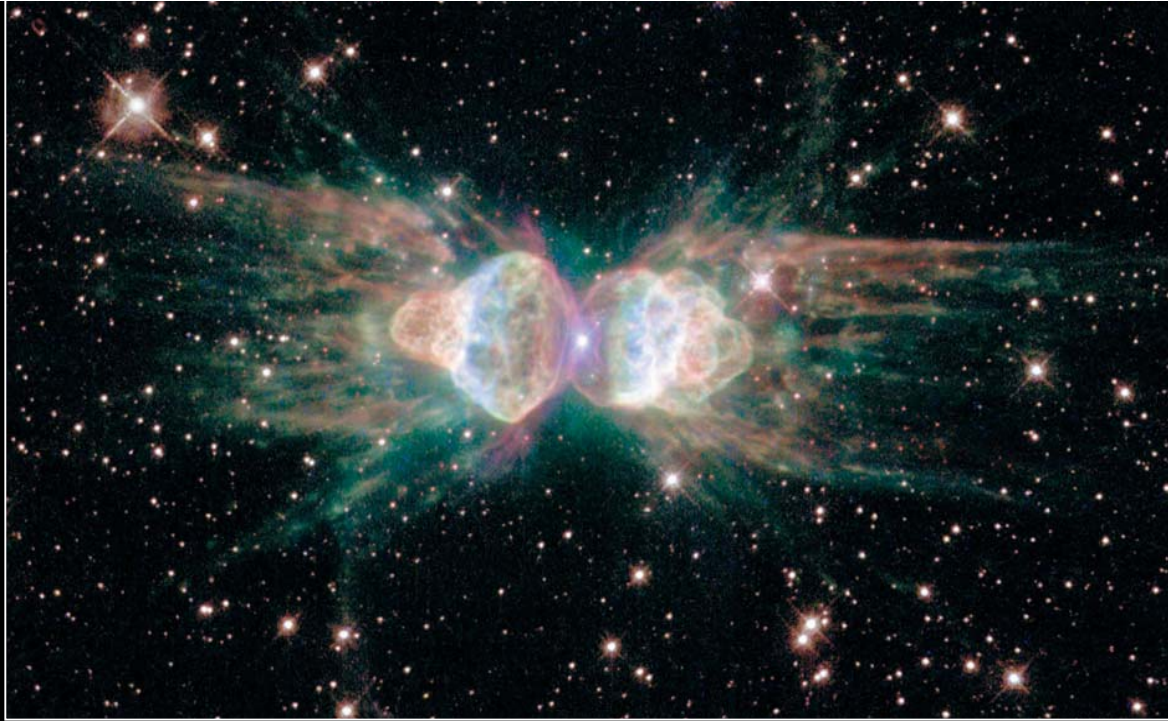
ГАЛЕРЕЯ ПЛАНЕТАРНЫХ ТУМАННОСТЕЙ

Изображения планетарных туманностей, полученные космическим телескопом «Хаббл», значительно более сложные и разнообразные, чем могли представить теоретики.

Скат (Heb 3-1357) – самая молодая из планетарных туманностей, зародившаяся лишь 20 лет назад. Вероятно, на ее форму влияют звезда-соседка и газовый тор.



Окруженная плотным, запыленным и насыщенным углеродом тором (вверху справа), центральная звезда туманности Жук (NGC 6302) – одна из самых горячих.

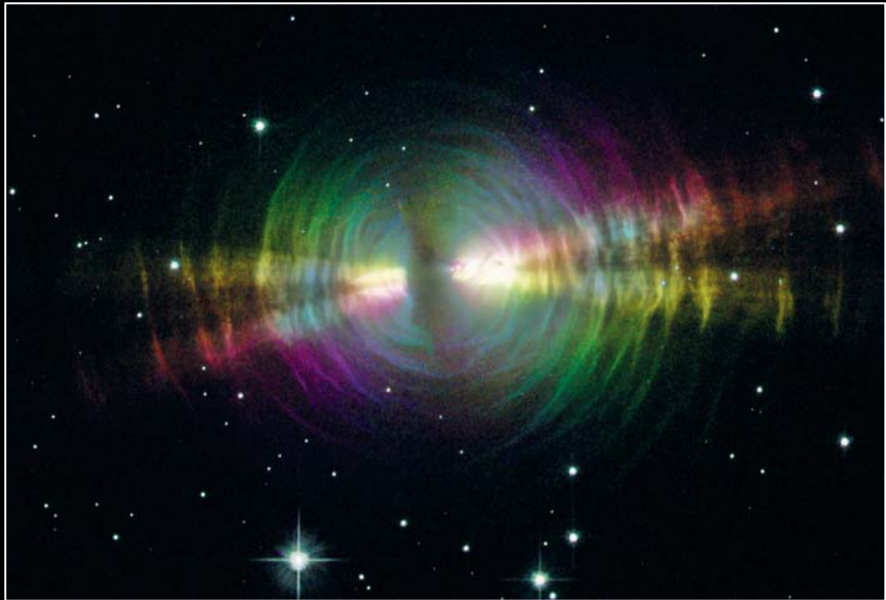


В туманности Муравей (Menzel 3) центральная звезда выбрасывает газ со скоростью 1000 км/сек.

Туманность Красный Прямоугольник (HD 44179) имеет форму коробки, поскольку конусы газа мы наблюдаем сбоку. Интерактивное изображение см. на www.spacetelescope.org/images/html/zoomable/heic0408a.html

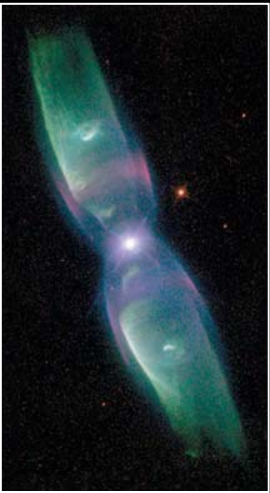


В туманности Голубой Снежок (NGC 7662) видны быстро движущиеся облачка газа неясного происхождения (красные пятнышки).

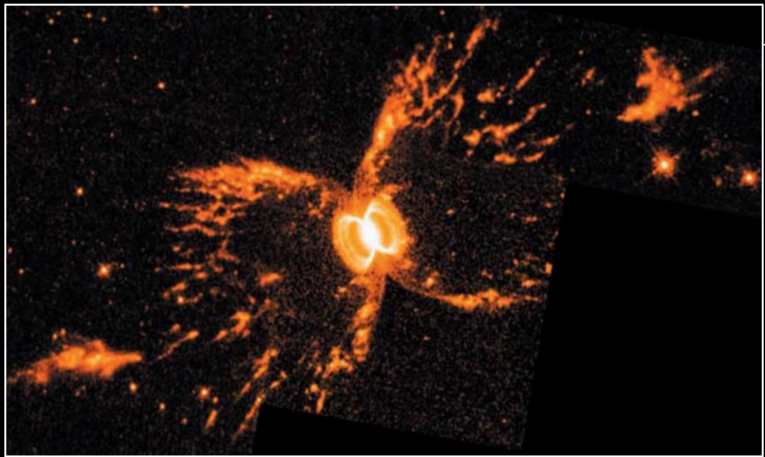


Центральная звезда туманности Яйцо (CRL 2688), как прожектор, освещает концентрические пылевые оболочки, протянувшиеся более чем на 0,1 светового года от звезды. Цветом показана поляризация света в разных направлениях.

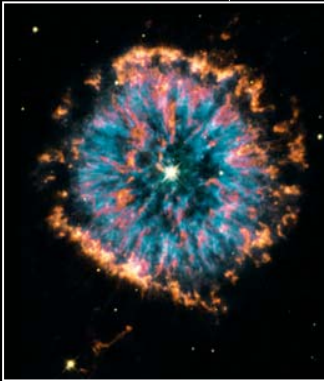
Одуванчик (NGC 6751) – это пример эллиптической планетарной туманности. Красным, зеленым и голубым показана, соответственно, слабая, умеренная и сильная ионизация газа.



В центре туманности Двойная Струя (M 2-9) находятся двойная звезда и газовый диск диаметром в 10 раз больше орбиты Плутона. Голубым и красным показаны атомы водорода и кислорода, зеленым – ионы азота.



На изображении Южной крабовидной туманности (He 2-104) в линии излучения азота видна маленькая яркая туманность, внедренная в более крупную. Породивший ее красный гигант обращается вокруг белого карлика.



ESA/NASA AND A. ZIJLSTRA University of Manchester (Жук); M. BOBROWSKY Orbital Sciences Corp. AND NASA (Скат); B. BALICK AND J. ALEXANDER University of Washington, A. HAJIAN U.S. Naval Observatory, Y. TERZIAN Cornell University, M. PERINOTTO University of Florence, P. PATRIARCHI Arcetri Observatory AND NASA (Голубой Снежок); B. BALICK, V. ICKE Leiden University, G. MELLEMA Stockholm University AND NASA (Двойная струя); NASA/ESA AND HUBBLE HERITAGE TEAM (STScI/AURA) (Муравей); NASA/ESA, H. VAN WINCKEL Catholic University of Leuven AND M. COHEN University of California, Berkeley (Красный Прямоугольник); NASA AND HUBBLE HERITAGE TEAM (STScI/AURA) (Яйцо); NASA AND HUBBLE HERITAGE TEAM (STScI/AURA) (Одуванчик); R. CORRADI Institute of Astrophysics of the Canary Islands, M. LIVIO STScI, B. Balick, U. MUNARI Astronomical Observatory of Padua/Asiago, H. SCHWARZ Nordic Optical Telescope AND NASA (Южная крабовидная туманность)

ТЕРРАКОТА

Планетарные туманности говорят о будущем нашей Солнечной системы. Когда Солнце сожрется, оно раздуется до размера нынешней орбиты Земли, заставив Меркурий и Венеру сгореть, подобно гигантским метеорам. Земля избежит такой участи, поскольку Солнце, потеряв часть своей массы, ослабит притяжение, и наша планета перейдет на новую, более удаленную орбиту. Солнце, как красный монстр, заполнит все небо. Когда один его край будет скрываться на западе, другой уже начнет восходить на востоке. Более холодное, чем сегодня (2000 К, а не 5800 К), оно все равно нагреет нашу планету. Земля станет свидетелем формирования планетарной туманности как бы изнутри. Солнце сбросит свои внешние слои, колоссально усилив современный солнечный ветер. Постепенно «красный бегемот» разденется до ядра, которое превратится в белый карлик. Освещенные его голубым светом, предметы на Земле будут отбрасывать резкие и черные как смоль тени. Восходы и закаты крохотного светила станут мгновенными. Мощное ультрафиолетовое излучение карлика разрушит все молекулярные связи, камень превратится в плазму, которая окутает планету жутким переливающимся туманом. Теряя излучение, белый карлик постепенно остынет и потухнет. Вскоре остынет и планета. Так погибнет наш мир – сначала в огне, а затем во льду.



Испепеленная красным гигантом – состарившимся Солнцем, – в будущем Земля станет удобным местом для наблюдения за рождающейся планетарной туманностью.

Модель воспроизводила все изображения, полученные к 1993 г. Компьютерные расчеты показали, что идея в основе верна, а новые наблюдения подтвердили, что медленные потоки вокруг экватора звезды более плотные.

Однако наша радость была недолгой. В 1994 г. «Хаббл» получил первое четкое изображение планетарной туманности Кошачий Глаз (NGC 6543), открытой Гершелем. Один из ее двух пересекающихся эллипсов – тонкая оболочка, окружающая овальную полость, – соответствовал модели. Но никто не мог предположить, что туманность будет окружена клочковатыми красными областями. Еще более странными казались полосы вне туманности, похожие на струи. Наша модель взаимодействующих ветров в лучшем случае верна лишь частично.

Крепкий орешек

Красивую научную идею не так-то легко отбросить. Сначала мы пытались игнорировать результаты наблюдений, надеясь, что Кошачий Глаз – аномалия. Но не тут-то было: другие изображения с «Хаббла» подтвердили, что в нашем

сценарии смерти звезды отсутствуют какие-то важные детали.

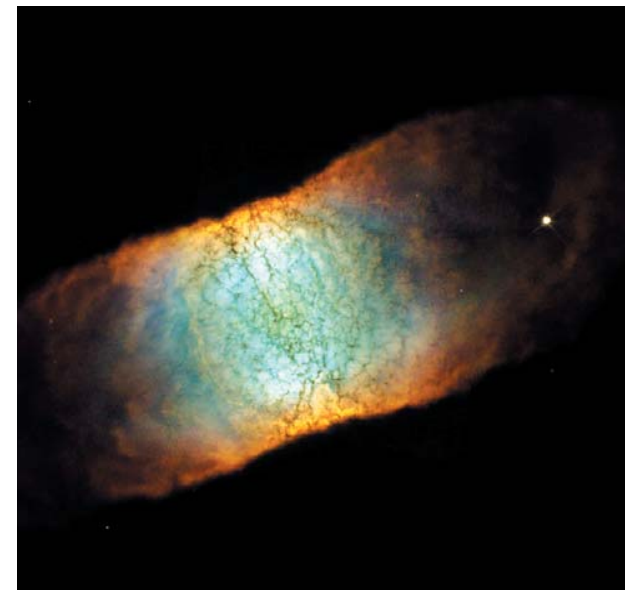
Среди планетарных туманностей самые необычные – биполярные. На снимках «Хаббла» они выглядят изысканно: мелкие детали симметрично входят в обе части туманности. Симметрия указывает на то, что вся структура рождалась когерентно, в регулярном процессе, действовавшем вблизи поверхности звезд.

Для таких объектов модель взаимодействующих ветров дает прогноз, который легко проверить: выйдя за пределы тора, газ должен вытекать наружу с постоянной скоростью, которая создает заметное доплеровское смещение в его спектре. К сожалению, такое испытание модель не выдерживает. В 2000 г. Романо Корради (Romano L.M. Corradi), работающий сейчас в Группе телескопов И. Ньютона Института астрофизики на Канарских островах, при помощи телескопа «Хаббл» изучил Южную крабовидную туманность (He2-104). Оказалось, что скорость ее расширения возрастает пропорционально расстоянию от звезды, а наиболее далекий от центра газ с самого начала двигался быстро. Прекрасная

туманность, похожая на песочные часы, могла сформироваться в результате извержения из звезды приблизительно 5700 лет назад. Жаль, но модель взаимодействующих ветров, предсказывавшая, что туманность формирует непрерывный поток, оказалась несостоятельной.

Корради и его коллеги обнаружили, что Южная крабовидная туманность на самом деле – две туманности, вложенные друг в друга, как матрешки. Сначала мы предположили, что внутренняя туманность моложе внешней, но наблюдения показали, что скорость расширения обеих туманностей увеличивается с расстоянием одинаково. Похоже, что вся сложная структура сформировалась одновременно примерно 6 тыс. лет назад.

Последний гвоздь в крышку гроба модели взаимодействующих ветров был вбит в конце 1990-х, когда Куок, Рагвендра Сахаи (Raghvendra Sahai), Джон Траугер (John Trauger) из Лаборатории реактивного движения в Пасадине (Калифорния) и Маргарет Мейкснер (Margaret Meixner) из Иллинойского университета опубликовали ряд новых изображений, полученных «Хабблом», – очень молодых планетарных туманностей, на стадии до или сразу после того, как звезда нагрела и ионизировала их. Ожидалось, что объекты будут не столь велики, но в целом похожи на взрослые туманности. Однако и на этот раз мы ошиблись: эмбриональные и юные планетарные туманности оказались чрезвычайно разнообразны. Их многочисленные оси симметрии не удается объяснить одной струей, как в нашей гипотезе. Модель взаимодействующих ветров завела нас в тупик. Как



Планетарная туманность Сетчатка Глаза (IC 4406)

отметили в своей статье 1998 г. Сахаи и Траугер, пришло время для поиска новой парадигмы.

Попробуем по-другому

Исследователи заключили, что один из основных факторов – гравитационное поле звезды-компаньона – становится решающим. По крайней мере половина всех светил, которые мы видим на небе, в действительности являются двойными. В большинстве систем компаньоны так далеки друг от друга, что живут независимо. Но у некоторых тесных пар притяжение одной звезды может значительно отклонить вещество, вытекающее из другой. Доля таких пар как раз соответствует доле биполярных объектов среди планетарных туманностей.

Согласно сценарию, предложенному Марио Ливио (Mario Livio) из Института космического телескопа и Ноамом Сокером (Noam Soker) из Института «Технион» (Израиль), компаньон захватывает вещество, оттекающее от умирающей звезды. В системе, где размер орбит меньше, чем у Меркурия, а орбитальный год измеряется земными сутками, такой обмен сложен. К моменту, когда вещество умирающей звезды достигает компаньона, последний стремительно перемещается по своей орбите. Вещество, оттянутое приливной силой от рыхлой умирающей звезды, образует хвост, тянущийся за более плотной звездой-компаньоном, плотный толстый диск, обращенный вокруг компаньона. Моделирование показывает, что компаньон, находящийся на столь же далекой, как у Нептуна, орбите, может окружить себя аккреционным диском.

Раздуваясь, умирающая звезда способна проглотить своего компаньона вместе с диском. Оказавшись на спиральной орбите в теле большей звезды, они разрушают ее изнутри. При этом вытекающие потоки формируют изогнутые струи. Постепенно компаньон погружается в звезду и наконец сливается с ее ядром, а выброс вещества прекращается. Возможно, поэтому некоторые туманности выглядят так, будто бы его приток в них внезапно прекратился.

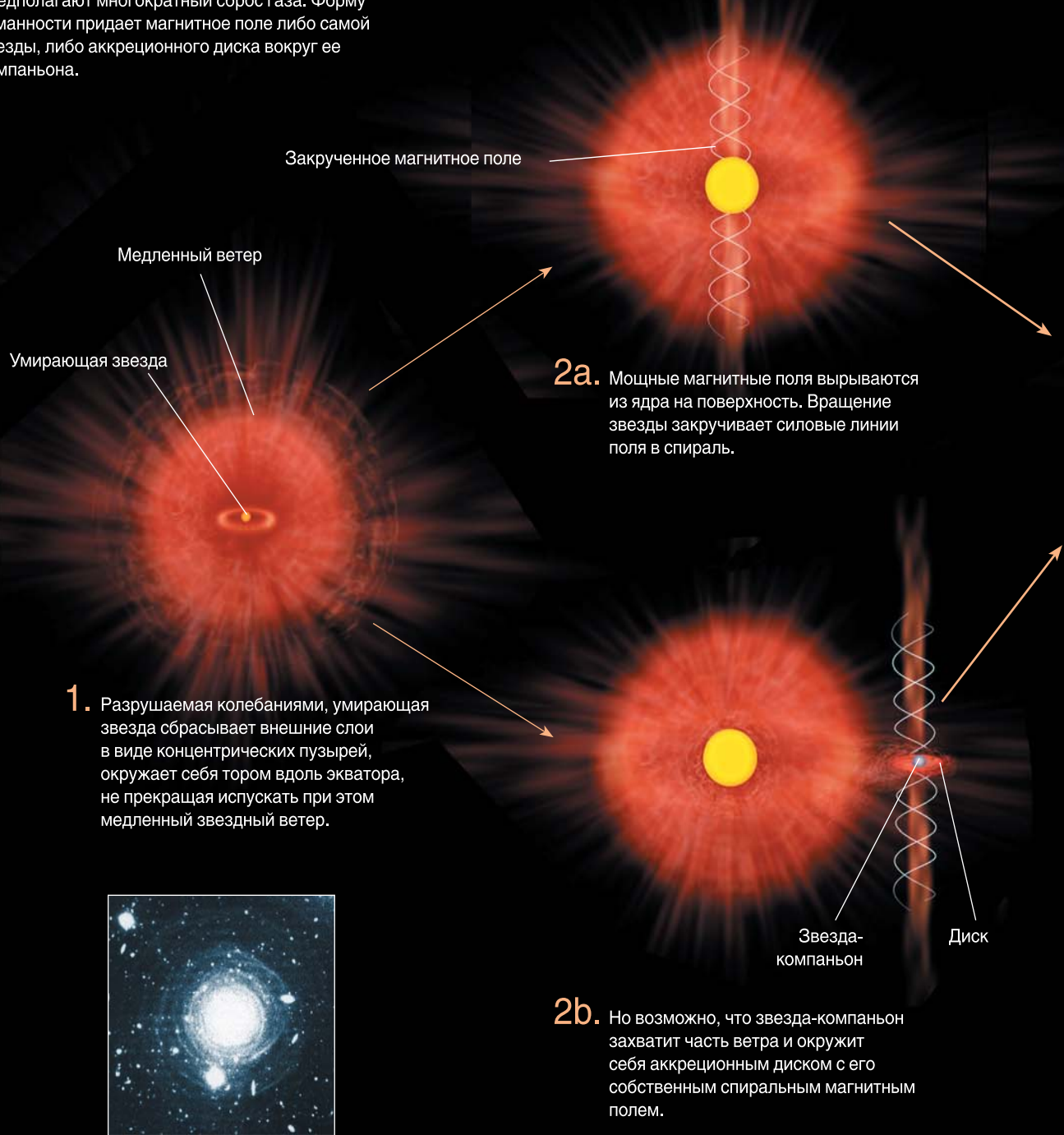
Магнитное управление

Звезда-соседка по двойной системе, вероятно, не единственный «скульптор» планетарной туманности. Другим игроком может быть мощное магнитное поле самой звезды или диска, окружающего звезду-соседку. Поскольку газ в космосе ионизован, магнитное поле способно управлять его движением. Сильные поля действуют как упругие резиновые нити, направляя газовые потоки.

КОГДА УМИРАЕТ ЗВЕЗДА, РОЖДАЕТСЯ ТУМАННОСТЬ

Странные очертания планетарных туманностей, выявленные «Хабблом», похоронили старые теории их формирования. Современные же гипотезы предполагают многократный сброс газа. Форму туманности придает магнитное поле либо самой звезды, либо аккреционного диска вокруг ее компаньона.

УВЕЛИЧЕННОЕ
ИЗОБРАЖЕНИЕ ЦЕНТРА



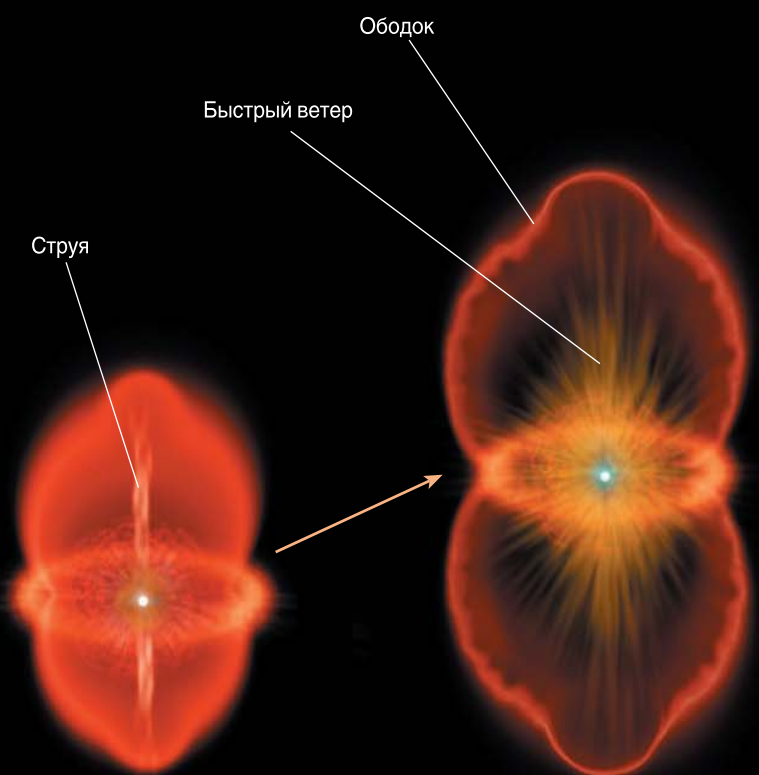
2a. Мощные магнитные поля вырываются из ядра на поверхность. Вращение звезды закручивает силовые линии поля в спираль.

1. Разрушаемая колебаниями, умирающая звезда сбрасывает внешние слои в виде концентрических пузырей, окружает себя тором вдоль экватора, не прекращая испускать при этом медленный звездный ветер.

2b. Но возможно, что звезда-компаньон захватит часть ветра и окружит себя аккреционным диском с его собственным спиральным магнитным полем.



IRC+10216



3. Где бы ни возникло магнитное поле, оно разгонит струю газа, которая врежется в медленный ветер. Тем временем тор придаст ветру форму песочных часов.

4. Звезда испускает быстрый ветер, который подпирает медленный ветер изнутри и создает газовый ободок.



Тыква (ОН 231.8+4.2)



Двойной Пузырь Хаббла

В конце 1990-х гг. Роджер Шевалье (Roger A. Chevalier) и Динг Люо (Ding Luo) из Виргинского университета предположили, что оттекающий звездный ветер уносит петли магнитного поля. Борьба газа с полем может придавать потоку экзотические формы, но, чтобы он мог его захватить, оно с самого начала должно быть довольно слабым, а значит, не может нести ответственность за генерацию ветра.

Как же сильные магнитные поля выбрасывают вещество в космос? Поскольку умирающая звезда бурлит из-за конвекции, связанное с ее ядром магнитное поле вместе с газом поднимается к поверхности. Если ядро вращается быстро, то поле наматывается на него, как пружина, а когда вырывается на поверхность, захватывает и выбрасывает вещество наружу. Подобное может происходить и в замагниченном аккреционном диске. Фактически как звезда, так и диск могут создать ветер. Несовпадение их осей объясняет некоторые странные многополюсные формы у молодых планетарных туманностей. Вместе с Эриком Блэкманом (Eric G. Blackman) из Рочестерского университета, Сином Мэттом (Sean Matt) из Университета Макмастера Адам Франк изучает эти эффекты. Магнитные поля, как и двойные звезды, дают дополнительные силы, способные создать намного большее разнообразие форм, чем это может модель взаимодействующих ветров.

Источники энергии звезд в процессе эволюции затухают, а внешние слои сбрасываются в космос. Фактически теория внутреннего строения и эволюции звезд – одна из самых успешных научных теорий XX столетия, которая объясняет наблюдаемые свойства большинства звезд: их излучение, цвет и даже большинство их причуд. Однако новая информация делает несостоятельными даже лучшие из теорий. Такова природа прогресса. Открытия часто, разрушая старое, позволяют решить наиболее важные вопросы и открывают путь к стремительному движению вперед, часто – в неожиданном направлении. ■

(«В мире науки», №9, 2004)

МАГНИТАРЫ

Крисса Кувелиоту, Роберт Дункан и Кристофер Томпсон

Некоторые звезды намагничены столь сильно, что излучают гигантские вспышки за счет энергии магнитного поля и существенно изменяют квантовые свойства вакуума.

5 марта 1979 г., сбросив спускаемые аппараты в ядовитую атмосферу Венеры, советские космические станции «Венера-11» и «Венера-12» продолжили полет по эллиптическим орбитам через внутреннюю часть Солнечной системы. Показания счетчиков радиации на борту обеих станций колебались в пределах 100 отсчетов в секунду. Однако в 10:51 по средневропейскому времени (EST) на аппараты обрушился поток гамма-излучения. За долю миллисекунды уровень радиации превысил 200 тыс. отсчетов в секунду. Через 11 сек. поток гамма-излучения накрыл космический зонд Helios-2 NASA, который также двигался по орбите вокруг Солнца. Стало ясно, что через Солнечную систему прошел плоский фронт излучения высокой энергии. Вскоре он дошел до Венеры, и на обрабатывавшемся вокруг нее спутнике Pioneer Venus Orbiter детектор зашкалило. Спустя несколько секунд поток достиг Земли и был зарегистрирован тремя спутниками Vela министерства обороны США, советским спутником «Прогноз-7» и космической обсерваторией Einstein. Наконец, на пути через Солнечную систему волновой фронт ударил по международной космической станции International Sun-Earth Explorer.

Всплеск жесткого гамма-излучения высокой энергии был в 100 раз интенсивнее всех предыду-

щих, приходивших из-за пределов Солнечной системы, и длился всего 0,2 сек. За ним последовал поток мягкого рентгеновского и гамма-излучения, пульсировавшего с периодом в 8 сек. и затухшего через три минуты. Спустя 14,5 часа в 01:17 6 марта в той же точке небесной сферы наблюдалась еще одна, но более слабая вспышка гамма-излучения. В течение последующих четырех лет группа ученых из Ленинградского физико-технического института им. А.Ф. Иоффе под руководством Евгения Мазеца зарегистрировала еще 16 вспышек. Они различались по интенсивности, но были слабее и короче всплеска 5 марта 1979 г.

Астрономы никогда не сталкивались с подобным. Сначала новые вспышки были внесены в каталоги уже хорошо известных и изученных гамма-всплесков (Gamma-Ray Bursts, GRB), хотя отличались от них по целому ряду признаков. В 80-х гг. Кевин Харли (Kevin C. Hurley) из Калифорнийского университета в Беркли обнаружил, что подобные взрывы происходили еще в двух областях неба. Вспышки у всех этих источников повторялись, в отличие от GRB, которые вспыхивали только один раз (см. Нейл Герелс, Луиджи Пиро и Питер Леонард «Ярчайшие взрывы во Вселенной», стр. 142). В июле 1986 г. на конференции в Тулузе астрономы пришли к согласию по вопросу о положении этих источников на небе и назвали их «повторными мягкими гамма-всплесками» (Soft Gamma Repeaters, SGR).

Прошло еще семь лет, прежде чем Дункан и Томпсон, двое из авторов настоящей статьи, придумали объяснение для этих странных объектов, и только в 1988 г. Кувелиоту и ее группа нашли убедительные свидетельства, подтверждающие предложенную модель. Последние наблюдения показали, что все это имеет отношение к еще одному типу загадочных небесных тел, известных под названием аномальных рентгеновских пульсаров (Anomalous X-ray Pulsars, AXP).

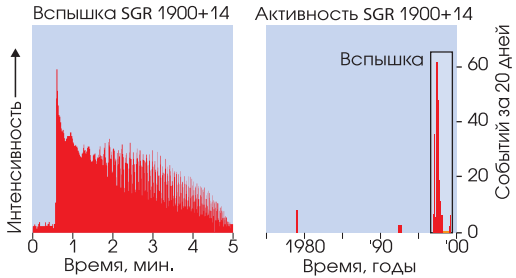
Нейтронные звезды – самые плотные из известных небесных тел: их масса, несколько пре-

КАНДИДАТЫ В МАГНИТАРЫ



Название	Год открытия	Период вращения, сек.
SGR 0526-66	1979	8,0
SGR 1900+14	1979	5,16
SGR 1806-20	1979	7,47
SGR 1801-23*	1997	?
SGR 1627-41	1998	?
AXP 1E 2259+586	1981	6,98
AXP 1E 1048-59**	1985	6,45
AXP 4U 0142+61	1993	8,69
AXP 1RXS 1708-40**	1997	11,0
AXP 1E 1841-045	1997	11,8
AXPAXJ 1844-0258	1998	6,97
AXP CXJ 0110-7211**	2002	5,44

* На карте не показано – положение точно не известно.
** Сокращенное название.



Гигантская вспышка в августе 1998 г. подтвердила существование магнитаров. Она началась с резкого всплеска излучения, длившегося менее 1 сек. (слева), за которым последовал ряд импульсов с периодом повторения 5,16 сек. Это была самая мощная вспышка объекта SGR 1900+14 со времени его открытия в 1979 г. (справа).

ОБЗОР: СВЕРХНАМАГНИЧЕННЫЕ НЕЙТРОННЫЕ ЗВЕЗДЫ

- Астрономы обнаружили несколько звезд, испускающих мощные вспышки гамма- и рентгеновского излучения, которые могут быть в миллионы раз ярче всех других известных повторяющихся вспышек. Огромная величина этих энергий и пульсации излучения указывают на нейтронные звезды – второй по экстремальности (после черных дыр) тип объектов во Вселенной.
- Эти нейтронные звезды обладают самыми сильными из измеренных магнитными полями, поэтому их и назвали магнитарами. Наблюдаемые вспышки могут объясняться магнитной неустойчивостью, подобной землетрясениям.
- Миллионы магнитаров дрейфуют через нашу Галактику незамеченными, т.к. сохраняют активность всего 10 тыс. лет.

вышающая массу Солнца, сосредоточена в шаре диаметром всего 20 км. Исследования SGR показали, что некоторые нейтронные звезды обладают настолько сильным магнитным полем, что оно существенно изменяет свойства вещества внутри звезд и квантовое состояние вакуума вокруг них, что и приводит к физическим эффектам, не наблюдаемым в других местах Вселенной.

Никто не ожидал

Поскольку всплеск радиации в марте 1979 г. был настолько сильным, теоретики предположили, что ее источник находится где-то в нашей Галактике на расстоянии не более нескольких сотен световых лет от Земли. В этом случае интенсивность рентгеновского и гамма-излучения объекта могла бы лежать ниже максимума стационарной светимости звезды, который был рассчитан в 1926 г. английским астрофизиком Артуром Эддингтоном (Arthur Eddington). Он определяется

давлением излучения, проходящего через горячие внешние слои звезды. Если интенсивность излучения превысит этот максимум, то его давление преодолеет силу гравитации, вызовет выброс вещества звезды и нарушит ее стационарность. А поток излучения, меньший предела Эддингтона, объяснить не сложно. Например, некоторые теоретики предполагали, что всплеск излучения мог быть вызван ударом сгустка вещества, например астероида или кометы, в расположенную неподалеку от нас нейтронную звезду.

Данные наблюдений вынудили ученых отказаться от этой гипотезы. Каждая из космических станций отметила время прибытия первого всплеска жесткого излучения, что позволило группе астрономов во главе с Томасом Клайном (Thomas Litton Cline) из Годдардовского центра космических полетов NASA определить методом триангуляции местоположение его источника. Оказалось, что оно совпадает с Большим Магел-

ДВА ТИПА НЕЙТРОННЫХ ЗВЕЗД

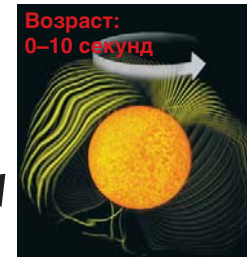
1 Предполагается, что большинство нейтронных звезд образуется из массивных, но обычных в остальных отношениях звезд с массами от 8 до 20 масс Солнца.

2 Массивные звезды умирают, взрываясь как сверхновые типа II, когда ядро звезды сжимается в плотный шар субатомных частиц.

3А. Если новорожденная нейтронная звезда вращается достаточно быстро, она создает интенсивное магнитное поле, силовые линии которого внутри звезды закручиваются.

4А. Магнитар разделяется на тонкие слои со скрученными магнитными силовыми линиями внутри и плавными снаружи. Он может испускать узкий пучок радиоизлучения.

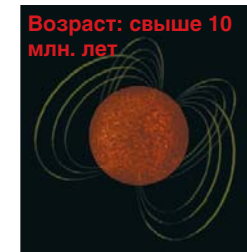
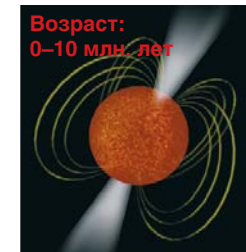
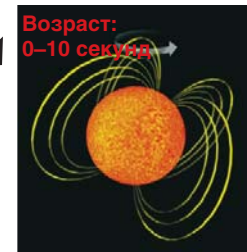
5А. Старый магнитар остывает, его магнитное поле ослабевает. Он излучает очень мало энергии.



3В. Если новорожденная нейтронная звезда вращается медленно, ее магнитное поле, будучи очень сильным по земным представлениям, не достигает уровня полей магнитаров.

4В. Пульсар среднего возраста холоднее такого же магнитара. Он испускает широкий пучок радиоизлучения, который легко улавливают радиотелескопы.

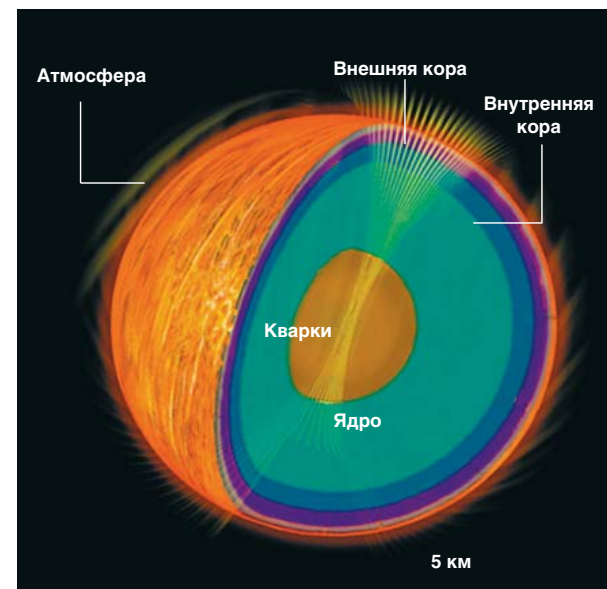
5В. Старый пульсар остывает и перестает испускать радиоизлучение.



Новорожденная нейтронная звезда

Магнитар

Обычный пульсар



Структура нейтронной звезды, основанная на теории ядерной материи. В коре нейтронной звезды, представляющей собой структуру из атомных ядер и электронов, могут происходить звездотрясения. Ядро состоит в основном из нейтронов и, возможно, кварков. Атмосфера из горячей плазмы может простирается всего на несколько сантиметров.

лановым Облаком – небольшой галактикой, удаленной от нас примерно на 170 тыс. световых лет. Точнее, положение источника совпадает с молодым остатком сверхновой – светящимися остатками звезды, которая взорвалась в Большом Магеллановом Облаке 5 тыс. лет назад. Если это не случайное совпадение, источник должен находиться в тысячу раз дальше от Земли, чем предполагалось вначале, следовательно, его интенсивность должна быть в миллион раз больше предела Эддингтона. В марте 1979 г. данный источник выделил за 0,2 сек. столько энергии, сколько Солнце излучает примерно за 10 тыс. лет, причем эта энергия была сконцентрирована в гамма-диапазоне, а не распределена по всему спектру электромагнитного излучения.

Обычная звезда не может выделять столько энергии, значит, источник должен быть чем-то необычным, например черной дырой или нейтронной звездой. Вариант черной дыры отвергли, т.к. интенсивность излучения менялась с периодом около 8 сек., а черная дыра – бесструктурный объект, который не может испускать строго периодические импульсы. Связь с остатком сверхновой еще больше подкрепляет гипотезу о нейтронной звезде, которая, как сейчас считается, образуется, когда запас ядерного топлива в ядре обычной звезды большой массы истощается, и она под действием сил гравитации коллапсирует, вызывая взрыв сверхновой.

Все же отождествление источника всплесков с нейтронной звездой не решило проблемы. Астрономам известно несколько нейтронных звезд, находящихся в остатках сверхновых, они являются радиопульсарами – объектами, которые периодически испускают импульсы радиоволн. Однако источник всплеска в марте 1979 г. вращался с периодом около 8 сек., что намного медленнее, чем вращение всех известных к тому времени радиопульсаров. И даже в «спокойное» время он испускал стационарный поток рентгеновского излучения такой большой интенсивности, которую не может объяснить торможение вращения нейтронной звезды. Странно и то, что источник заметно смещен от центра остатка сверхновой. Если он образовался в центре остатка, то для такого смещения он во время взрыва должен был приобрести скорость в 1000 км/с, не типичную для нейтронных звезд.

Наконец, необъяснимыми кажутся и сами всплески. Всплески рентгеновского излучения наблюдались у некоторых нейтронных звезд и раньше, но они никогда не превышали Эддингтоновского предела. Астрономы приписывали их

процессам термоядерного горения водорода или гелия либо процессам внезапной аккреции на звезду. Однако интенсивность всплесков SGR была беспрецедентна, и для ее объяснения требовался другой механизм.

Всегда замедляя вращение

Последний всплеск гамма-излучения от источника 5 марта 1979 г. был зарегистрирован в мае 1983 г. Два других SGR, расположенные в пределах нашей Галактики, были обнаружены в 1979 г. и остаются активными до сих пор, производя сотни всплесков в год. В 1998 г. был обнаружен четвертый SGR. Три из четырех этих объектов, вероятно, связаны с остатками сверхновых. Два из них находятся вблизи очень плотных скоплений массивных молодых звезд, что позволяет думать об их происхождении из таких звезд. Пятый кандидат в SGR вспыхивал всего дважды, и его точное положение на небе пока не установлено.

В 1996 г. исследователи Баолян Чен (Baolian L. Chang), Ричард Эпштейн (Richard I. Epstein), Роберт Гайер (Robert A. Guyer) и Алекс Янг (C. Alex Young) из Лос-Аламосской национальной лаборатории отметили, что всплески SGR похожи на землетрясения: всплески меньших энергий происходят чаще. Выпускник Алабамского университета в Хантсвилле Эрсин Гегюс (Ersin Gegus) подтвердил такое поведение для большой выборки всплесков различных источников. Подобные статистические свойства характерны для самоорганизующихся систем, достигающих критического состояния, при котором малое возмущение способно вызвать цепную реакцию. Такое поведение присуще самым различным системам – от обрушения песчаных склонов до магнитных всплесков на Солнце.

Но почему нейтронные звезды ведут себя таким образом? Изучение радиопульсаров, которые представляют собой быстро вращающиеся нейтронные звезды с сильными магнитными полями, помогло ответить на вопрос. Магнитное поле, поддерживаемое электрическими токами, протекающими глубоко внутри звезды, вращается вместе со звездой. Пучки радиоволн испускаются с магнитных полюсов звезды и перемещаются в пространстве из-за ее вращения, подобно сигнальным огням маяка, в результате чего и наблюдаются пульсации. Пульсары испускают также потоки заряженных частиц и низкочастотные электромагнитные волны, которые уносят энергию и угловой момент нейтронной звезды, в результате чего ее вращение постепенно замедляется.

Пожалуй, самый известный пульсар находится в Крабовидной туманности – остатке сверхновой, взорвавшейся в 1054 г. Период его вращения составляет сегодня 33 мс и за каждые сто лет увеличивается на 1,3 мс. Обратная экстраполяция дает для первоначального периода пульсара значение около 20 мс. Ученые считают, что вращение пульсара будет и дальше замедляться и в итоге его частота станет настолько малой, что он не сможет испускать радиоимпульсы. Темп замедления вращения был измерен почти для всех радиопульсаров, и, согласно теории, он зависит от напряженности магнитного поля звезды. Из этих наблюдений был сделан вывод, что большинство молодых радиопульсаров должно иметь магнитное поле между 10^{12} и 10^{13} Гс. (Для сравнения: магнит в динамике звуковой колонки имеет поле около 100 Гс.)

Вначале была конвективная печь

Все-таки вопрос остается открытым: откуда берется магнитное поле? Большинство астрономов предполагают, что оно возникло в те времена, когда звезда еще не стала сверхновой. Слабое магнитное поле имеют все звезды, и оно может усилиться просто в результате ее сжатия. Согласно уравнениям электродинамики Максвелла, уменьшение размеров намагниченного объекта в два раза увеличивает силу его магнитного поля в четыре раза. За время коллапса ядра массивной звезды, заканчивающегося рождением нейтронной звезды, его размеры уменьшаются в 10^5 раз, следовательно, магнитное поле должно усиливаться в 10^{10} раз.

Если магнитное поле ядра звезды с самого начала было достаточно сильно, сжатие ядра может объяснить намагниченность пульсара. К сожалению, измерить магнитное поле внутри звезды невозможно, так что проверить гипотезу нельзя. Кроме того, есть достаточно весомые основания полагать, что сжатие звезды – не единственная причина усиления поля.

В звезде газ может циркулировать в результате конвекции. Более горячие участки ионизованного газа всплывают, а более холодные – опускаются. Поскольку ионизованный газ хорошо проводит электрический ток, пронизывающие его магнитные силовые линии увлекаются потоком вещества. Таким образом, поле может изменяться и иногда усиливаться. Предполагается, что именно это явление, известное под названием динамо-механизма, может быть причиной возникновения магнитных полей у звезд и планет. Динамо-механизм может действовать на любой стадии жизни массивной звезды, если ее турбулентное ядро вращается дос-

таточно быстро. Более того, именно в течение короткого периода после превращения ядра в нейтронную звезду конвекция особенно сильна.

В 1986 г. Адам Бэрроуз (Adam Burrows) из Аризонского университета и Джеймс Латтимер (James M. Lattimer) из Университета штата Нью-Йорк с помощью компьютерного моделирования показали, что температура только что образовавшейся нейтронной звезды превышает 30 млрд. градусов. Горячая ядерная жидкость циркулирует с периодом 10 мс, обладая огромной кинетической энергией. Примерно через 10 сек. конвекция затухает.

Вскоре после моделирования, проведенного Бэрроузом и Латтимером, Дункан и Томпсон, работавшие тогда в Принстонском университете, оценили степень важности такой мощной конвекции для образования магнитного поля нейтронной звезды. В качестве исходной точки можно использовать Солнце. Когда вещество внутри него циркулирует, оно увлекает за собой магнитные силовые линии, отдавая магнитному полю около 10% своей кинетической энергии. Если движущаяся среда внутри нейтронной звезды также превращает в магнитное поле одну десятую своей кинетической энергии, то напряженность поля должна превысить 10^{15} Гс, что в 1000 раз больше полей большинства радиопульсаров.

Будет ли действовать динамо-машина во всем объеме звезды или только в отдельных ее областях, зависит от того, сравнима ли скорость вращения звезды со скоростью конвекции. В глубоких слоях внутри Солнца эти скорости близки, и магнитное поле может «самоорганизовываться» в крупном масштабе. Аналогично у новорожденной нейтронной звезды период вращения не превышает 10 мс, так что сверхсильные магнитные поля в ней могут широко распространиться. В 1992 г. мы назвали такие гипотетические нейтронные звезды магнитарами.

Верхний предел напряженности магнитного поля нейтронной звезды около 10^{17} Гс. При более сильных полях вещество внутри звезды начинает перемешиваться, и магнитное поле рассеивается. Во Вселенной нам не известны объекты, способные генерировать и поддерживать магнитные поля, превышающие названный предел. Одним из побочных следствий наших расчетов является вывод, что радиопульсары – это нейтронные звезды, в которых крупномасштабный динамо-механизм не заработал. Так, в случае пульсара в Крабе молодая нейтронная звезда вращалась с периодом около 20 мс, т. е. существенно медленнее, чем период конвекции.

Мерцающий маленький магнитар

Хотя концепция магнитара еще не разработана настолько, чтобы можно было объяснить природу SGR, ее выводы сейчас станут вам ясны. Магнитное поле должно действовать на вращение магнитара как сильный тормоз. За 5 тыс. лет поле в 10^{15} Гс замедлит вращение объекта настолько, что его период достигнет 8 сек., – что объясняет пульсации излучения, наблюдавшиеся во время всплеска в марте 1979 г.

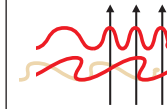
В процессе эволюции магнитное поле изменяет свою форму, порождая электрические токи, текущие вдоль магнитных силовых линий снаружи звезды, которые, в свою очередь, генерируют рентгеновские лучи. Одновременно магнитное поле движется через твердую кору магнитара, создавая в ней изгибные и растягивающие напряжения. Это вызывает нагрев внутренних слоев звезды и иногда приводит к разломам коры, сопровождающимся мощными «звездотрясениями». Выделяющаяся при этом электромагнитная энергия создает плотные облака электронов и позитронов, а также внезапные всплески мягкого гамма-излучения умеренной силы, которые дали название периодическим источникам SGR.

Реже магнитное поле становится нестабильным и претерпевает крупномасштабную перестройку. Подобные (но меньшие) выбросы происходят иногда и на Солнце, порождая солнечные вспышки. Магнитар может располагать энергией, достаточной для сверхмощных вспышек, подобных наблюдавшейся в марте 1979 г. Согласно теории, в течение первой полусекунды гигантского всплеска источником радиации был расширяющийся плазменный шар. В 1995 г. мы предположили, что часть его вещества была захвачена магнитными силовыми линиями и удерживалась вблизи звезды. Эта захваченная часть постепенно сжималась и испарялась, непрерывно испуская рентгеновские лучи. Исходя из количества выделившейся энергии, мы рассчитали, что для удержания этого огромного плазменного шара требовалось магнитное поле не менее 10^{14} Гс, что соответствует оценке, сделанной на основе скорости замедления вращения звезды.

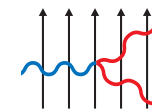
В 1992 г. Богдан Пачинский (Bohdan Paczynski) из Принстонского университета дал независимую оценку магнитного поля, отметив, что рентгеновские лучи могут легче проходить через электронные облака, если заряженные частицы находятся в сильном магнитном поле. Чтобы интенсивность потока рентгеновских лучей во вспышке могла быть такой большой, индукция магнитного поля должна была превышать 10^{14} Гс.

ЭКСТРЕМАЛЬНЫЕ МАГНИТНЫЕ ПОЛЯ

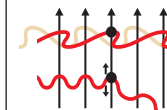
МАГНИТНЫЕ ПОЛЯ вносят смятение в излучение и вещество



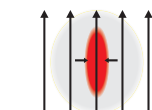
ДВУЛУЧПРЕЛОМЛЕНИЕ ВАКУУМА
Поляризованная световая волна (оранжевая линия) при входе в очень сильное магнитное поле (черные линии) меняет свою скорость, и следовательно, длину волны.



РАСЦЕПЛЕНИЕ ФОТОНОВ
Рентгеновские фотоны легко распадаются на два или сливаются друг с другом. Этот процесс важен в полях сильнее 10^{14} Гс.



ПОДАВЛЕНИЕ РАССЕЯНИЯ
Световая волна может проходить мимо электрона (черная точка) почти без возмущения, если магнитное поле не позволяет ему колебаться и вибрировать с частотой волны.



ДЕФОРМАЦИЯ АТОМОВ
Поля сильнее 10^9 Гс придают орбитам электронов сигарообразную форму. В поле интенсивностью 10^{14} Гс атом водорода сужается в 200 раз.

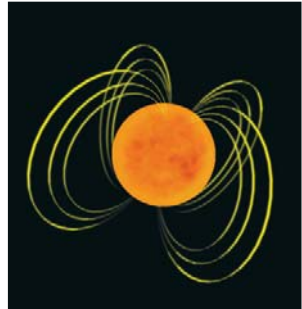
Теорию осложняет тот факт, что напряженность полей магнитаров превышает квантовый электродинамический порог, составляющий 4×10^{13} Гс. В столь сильных полях начинают твориться странные вещи: рентгеновские фотоны легко расщепляются на два или сливаются друг с другом. Поляризуется сам вакуум, в результате чего в нем возникает сильное двулучепреломление, как в кристалле кальцита. Атомы деформируются, превращаясь в вытянутые цилиндры диаметром меньше комптоновской длины волны электрона. Все эти странные эффекты влияют на наблюдательные проявления магнитаров. Физика этих явлений столь необычна, что она привлекает лишь немногих исследователей.

Новая вспышка

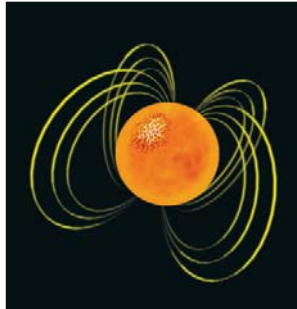
Исследователи продолжили наблюдения за источниками всплесков излучения. Первая благоприятная возможность появилась тогда, когда космическая гамма-обсерватория «Комптон» NASA в октябре 1993 г. зарегистрировала всплеск гамма-излучения. Этого давно ожидала Кувелиоту, присоединившаяся к команде обсерватории в Хантсвилле. Прибор, зарегистрировавший

КАК ПРОИСХОДЯТ ВСПЫШКИ МАГНИТАРА

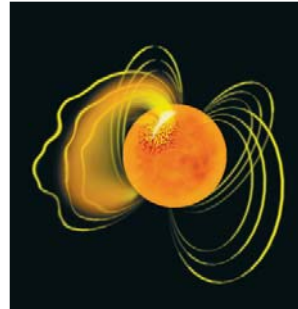
Магнитное поле звезды настолько сильно, что в твердой коре временами происходят разломы, высвобождая огромное количество энергии.



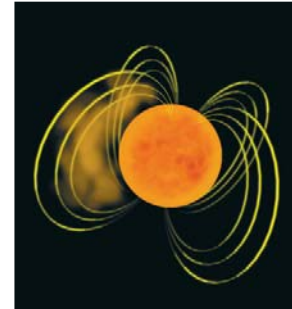
1 Большую часть времени магнитар спокоен, но вызванные магнитным полем напряжения в его твердой коре постепенно нарастают.



2 В определенный момент напряжения в коре превышают предел ее прочности, и она разламывается, вероятно, на множество мелких кусков.



3 Это «звездотрясение» порождает пульсирующий электрический ток, который быстро затухает, оставляя после себя раскаленный плазменный шар.



4 Плазменный шар охлаждается, испуская со своей поверхности рентгеновские лучи. За считанные минуты он испаряется.

событие, позволял определить местоположение источника лишь с точностью до сравнительно широкой полосы неба. Кувелиоту обратилась за помощью к команде японского спутника ASCA. Вскоре Тошио Мураками (Toshio Murakami) и его коллеги из японского Института космических наук и астронавтики обнаружили в той же области неба равномерно излучавший рентгеновский источник. Затем произошел еще один всплеск, снявший все сомнения, что этот объект представляет собой SGR. Впервые этот объект был обнаружен в 1979 г., и тогда ему было присвоено название SGR 1806-20.

В 1995 г. NASA запустила спутник *Rossi X-Ray Timing Explorer (RXTE)*, разработанный для высокоточной регистрации изменений интенсивности рентгеновского излучения. С его помощью Кувелиоту установила, что излучение от SGR 1806-20 пульсирует с периодом 7,47 сек., близким к периоду 8 сек., наблюдавшемуся у всплеска излучения в марте 1979 г. (от источника SGR 0526-66). За последующие пять лет период вращения SGR увеличился примерно на 0,2%. Хотя темп замедления кажется невысоким, он выше, чем у любого известного радиопульсара, что позволяет оценить магнитное поле источника в 10^{15} Гс.

Для более строгой проверки модели магнитара требовалась еще одна гигантская вспышка. Ранним утром 27 августа 1998 г., через 19 лет после вспышки, положившей начало астрономии SGR, к Земле из глубин мирового пространства при-

шла еще более мощная волна гамма-излучения. В результате детекторы семи научных космических станций зашкалили, а межпланетная станция *NASA Comet Asteroid Rendezvous Flyby* была вынуждена перейти в режим аварийного отключения. Гамма-лучи попали на ночную сторону Земли из источника, находящегося в зените над серединой Тихого океана.

В это раннее утро инженер-электрик Умран Инан (Umrhan S. Inan) и его коллеги из Стэнфордского университета собирали данные о распространении очень низкочастотных радиоволн вокруг Земли. В 3:22 по средневропейскому времени они обнаружили резкое изменение ионизованных верхних слоев атмосферы: нижняя граница ионосферы за пять минут опустилась с 85 до 60 км. Это удивительное явление было вызвано нейтронной звездой в удаленной от нас части Галактики, отстоящей от Земли на 20 тыс. световых лет.

Еще одна динамо-машина

Вспышка 27 августа 1998 г. была почти копией события марта 1979 г. На самом деле ее энергия была в десять раз меньше, но поскольку источник располагался ближе к Земле, интенсивность всплеска гамма-излучения была намного больше, чем любого из когда-либо зарегистрированных всплесков, пришедших из-за пределов Солнечной системы. В последние несколько сотен секунд вспышки наблюдались отчетливые пульсации с периодом 5,16 сек. С помощью спутника *RXTE*

группа Кувелиоту провела измерения скорости замедления вращения звезды. Она оказалась сравнима со скоростью замедления SGR 1806-20, соответственно их магнитные поля близки. Таким образом, в список магнитаров был внесен еще один SGR.

Точная локализация источников в рентгеновских лучах позволила изучать их с помощью радио- и инфракрасных телескопов (но не в видимом свете, который сильно поглощается межзвездной пылью). Этой проблемой занимались несколько астрономов, в том числе Дейл Фрейл (Dale Frail) из Национальной радиоастрономической лаборатории США и Шри Кулкарни (Shri Kulkarni) из Калифорнийского технологического института. Другие наблюдения показали, что все четыре подтвержденных SGR продолжают излучать энергию, хотя и более слабо, в промежутках между вспышками.

Сегодня можно сказать, что магнитные поля магнитаров измерены точнее магнитных полей пульсаров. В случае одиночных пульсаров единственным свидетельством того, что их магнитные поля достигают 10^{12} Гс, являются измеренные скорости замедления их вращения. В то время как сочетание быстрого замедления и ярких рентгеновских вспышек предоставляет несколько независимых аргументов в пользу того, что магнитные поля магнитаров составляют от 10^{14} до 10^{15} Гс. Алаа Ибрагим (Alaa Ibrahim) и его коллеги из Годдардовского центра космических полетов NASA представили еще одно свидетельство, говорящее о большой силе магнитных полей магнитаров, а именно рентгеновские циклотронные спектральные, генерируемые, по-видимому, протонами, обращающимися в магнитном поле напряженностью порядка 10^{15} Гс.

Интересно, связаны ли магнитары с какими-либо еще космическими явлениями, кроме SGR? Природа коротких гамма-всплесков еще не получила убедительного объяснения, но некоторые из них, возможно, возникают из-за вспышек на магнитарах в других галактиках. При наблюдении с очень больших расстояний даже гигантская вспышка может оказаться близкой к пределу чувствительности телескопа. При этом можно будет зафиксировать только короткий интенсивный всплеск жесткого гамма-излучения, поэтому телескопы регистрируют его как GRB, а не SGR.

В середине 90-х гг. Томпсон и Дункан предположили, что магнитарами могут оказаться также аномальные рентгеновские пульсары (AXP) – объекты, во многих отношениях подобные SGR. Но вспышек у таких пульсаров не наблюдалось.

Однако Виктория Каспи (Victoria M. Kaspi) и Фотис Гэврил (Fotis P. Gavril) из Университета Макгилла и Питер Вудз (Peter M. Woods) из Национального центра космических исследований и технологий в Хантсвилле зарегистрировали вспышки у двух из семи известных AXP. Один из этих объектов ассоциируется с остатками молодой сверхновой в созвездии Кассиопеи, другой AXP – первый кандидат в магнитары, зафиксированный в видимом свете. Три года назад его обнаружили Ферди Хуллеман (Ferdie Hulleman) и Мартин ван Керквик (Marten van Kerkwijk) из Утрехтского университета (Нидерланды), работавшие с Кулкарни. С тех пор Брайан Керн (Brian Kern) и Кристофер Мартин (Christopher Martin) из Калифорнийского технологического института наблюдают за его яркостью в видимом свете. Его излучение ослабевает и усиливается с периодом, равным периоду пульсаций рентгеновского излучения нейтронной звезды. Эти наблюдения подтверждают идею о том, что данный AXP является магнитаром. Будь он обычной нейтронной звездой, окруженной диском вещества, его видимое и инфракрасное излучения были бы намного интенсивнее, а их пульсации – гораздо слабее.

Последние открытия и полное молчание источника всплесков в Большом Магеллановом облаке в течение 20 лет наводят на мысль, что магнитары могут сохранять состояние покоя в течение нескольких лет и десятилетий, а затем внезапно проявлять высокую активность. Некоторые астрономы полагают, что AXP в среднем моложе, чем SGR, но вопрос остается открытым. Если и SGR, и AXP являются магнитарами, то они составляют, вероятно, значительную долю общего числа нейтронных звезд.

История магнитаров – напоминание о том, как много нам еще предстоит узнать о Вселенной. Сегодня мы едва различаем дюжину магнитаров среди бесчисленного множества звезд. Они проявляют себя лишь на доли секунды в таких лучах, которые регистрируют самые сложные современные телескопы. За 10 тыс. лет их магнитные поля затухают, и они перестают испускать интенсивное рентгеновское излучение. Таким образом, десяток обнаруженных магнитаров свидетельствует о существовании более миллиона, а возможно, и сотен миллионов им подобных. Старые, темные, давно потухшие магнитары, подобно удивительным мирам, странствуют в межзвездном пространстве. Какую тайну нам предстоит еще открыть? ■

(«В мире науки», №6, 2003)

ЯРЧАЙШИЕ ВЗРЫВЫ ВО ВСЕЛЕННОЙ

Нейл Герелс, Луиджи Пиро, Питер Леонаиро и Питер Леонард

Каждый раз, когда происходит всплеск гамма-излучения, рождается черная дыра.

Еще 10 лет назад никто не знал, чем вызваны гамма-всплески – вспышки излучения высокой энергии, наблюдаемые на небе. Сейчас астрономы считают их лебединой песней умирающих звезд. Черная дыра, возникающая при коллапсе гигантской звезды, частично засасывает ее остатки, но некоторое вещество выбрасывается наружу. При этом в ударных волнах рождается излучение.

Утром 23 января 1999 г. автоматический телескоп в Нью-Мексико зафиксировал в созвездии Северной Короны самый грандиозный взрыв, когда-либо замеченный человечеством. Вспышка была едва различима с расстояния в 9 млрд. световых лет (что составляет более половины размера наблюдаемой Вселенной). Если бы это произошло на расстоянии нескольких тысяч световых лет, то вспышка была бы яркой, как полуденное Солнце, а Земля получила бы такую дозу облучения, что на ней погубило бы все живое. Взрыв стал одной из наиболее захватывающих загадок астрономии: первый такой всплеск был обнаружен 2 июля 1967 г.

Выдающиеся открытия последних лет приблизили астрономов к разгадке тайны. До 1997 г. основные данные о гамма-всплесках были получены приборами *BATSE* (*Burst and Transient Source Experiment* – Эксперимент по вспыхивающим и временным источникам) на борту Обсерватории гамма-излучения «Комптон». Оказалось, что ежедневно наблюдается два–три гамма-всплеска, каждый из которых ярче прочих небесных гамма-источников. Каждая вспышка уникальна, но их можно разделить на две категории: короткие – длящиеся менее двух секунд, и длинные – более продолжительные. Спектроскопически у первых более жесткое гамма-излучение, чем у вторых. Упомянутый выше гамма-всплеск 1999 года длился полторы минуты.

Эксперименты *BATSE* показали, что вспышки распределены изотропно, т.е. равномерно рассеяны по небу. Этот факт опроверг широко распространенное мнение, что источники гамма-всплесков находятся в нашей Галактике. Они рассеяны во всей Вселенной, иначе форма Галактики и положение Земли (в стороне от ее центра)

вызвали бы концентрацию вспышек в определенных областях неба. К сожалению, исследования гамма-излучения не позволяют до конца прояснить вопрос. Попытки зарегистрировать гамма-всплески в других диапазонах излучения (например, в оптическом можно выявить галактики, в которых происходят вспышки, а значит, измерить расстояние до них) не увенчались успехом.

Стремительный прорыв

Запущенный в 1996 г. рентгеновский спутник *BeppoSAX* был создан космическими агентствами Италии и Нидерландов. Он позволил значительно расширить исследования и точно определить положение гамма-всплесков, обнаружить их рентгеновское послесвечение*, появляющееся после исчезновения гамма-сигнала и продолжающееся от нескольких дней до нескольких месяцев. Со временем оно ослабевает и смещается из рентгеновского диапазона в менее жесткий – оптический, а затем и в радиодиапазон. Рентгеновский спутник зафиксировал послесвечение только у длинных вспышек, у коротких оно пока не обнаружено. Используя данные спутника о положении вспышек, оптические и радиотелескопы выявили те области Вселенной, в которых произошли взрывы. Почти все галактики удалены на миллиарды световых лет, значит, вспышки были невероятно мощными. Очевидно, что экстремальные выбросы энергии порождаются экстраординарными причинами, поэтому исследователи начали связывать гамма-всплески с самыми необычными среди известных объектов – с черными дырами.

Среди первых гамма-всплесков, идентифицированных *BeppoSAX*, был *GRB970508*, открытый 8 мая 1997 г. Первые три недели яркость источника хаотически менялась, затем стабилизировалась и начала монотонно ослабевать. Резкие колебания, вероятно, были связаны не с самим источником вспышки, а с распространением излучения. Подобно тому как земная атмосфера вызывает видимые мерцания звезд, межзвездная плазма заставляет мигать радиоисточники. Планеты не мерцают, ибо расположены близко и выглядят дисками. Если *GRB970508* сначала мигал в радиодиапазоне, а затем перестал, значит, он «вырос» из точечного источника до различимого диска. Чтобы приобрести «размер в несколько световых недель», источник должен расширяться очень быстро – почти со скоростью света.

*Послесвечение — *afterglow* — иногда переводится как «ореол».

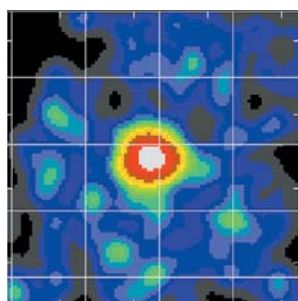
Данные *BeppoSAX* и последующие наблюдения изменили точку зрения астрономов на гамма-всплески. Была отброшена концепция о внезапном выделении энергии в течение нескольких секунд. Даже термин «послесвечение» сейчас признается неуместным: энергия высвечивается на обоих этапах в сопоставимых количествах. Спектр послесвечения характерен для электронов, движущихся в магнитном поле почти со скоростью света.

Январский всплеск 1999 года (*GRB990123*) был невероятно мощным. Если при вспышке энергия излучалась во все стороны одинаково, то светимость источника достигала нескольких единиц на 10^{45} Вт, т.е. он был в 10^{19} раз мощнее Солнца! Хотя в другом хорошо известном типе космической катастрофы – вспышке сверхновой – в целом выделяется приблизительно такая же энергия, которая в основном уходит в виде нейтрино,

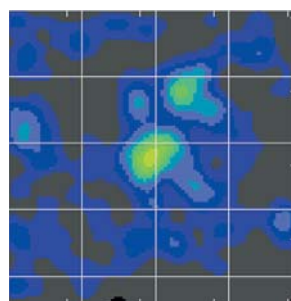
РЕНТГЕНОВСКИЕ ЛУЧИ. 28 февраля 1997 г., спустя 8 часов после гамма-всплеска, астрономы — включая одного из авторов (Пиро) — с помощью спутника *BeppoSAX* впервые зафиксировали рентгеновское послесвечение. На втором изображении, полученном через несколько дней, рентгеновский источник ослаб в 20 раз.

ОПТИЧЕСКИЕ ЛУЧИ. Столь же быстрая реакция астрономов на острове Пальма (Канарские о-ва) позволила заметить послесвечение того же гамма-всплеска в видимом диапазоне. Через неделю, когда яркость источника ослабла в 6 раз, стала заметна окружающая его галактика.

РЕНТГЕНОВСКИЕ ЛУЧИ

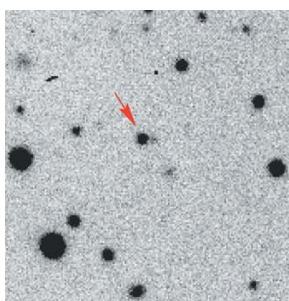


Восемь часов

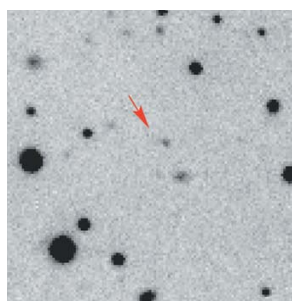


Трое суток

ОПТИЧЕСКИЕ ЛУЧИ

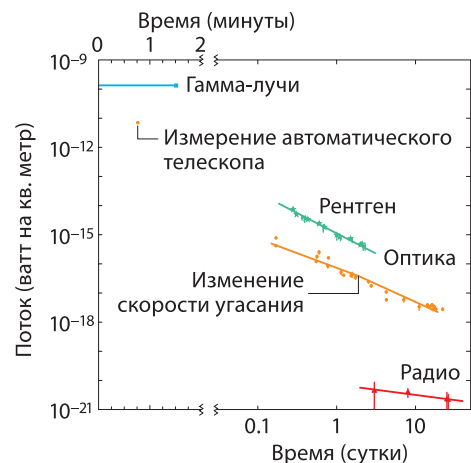
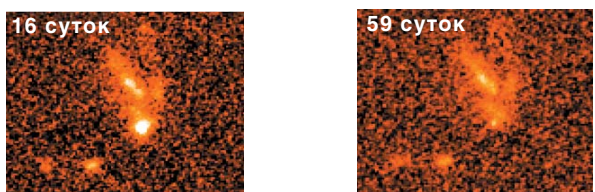


21 час



Восемь суток

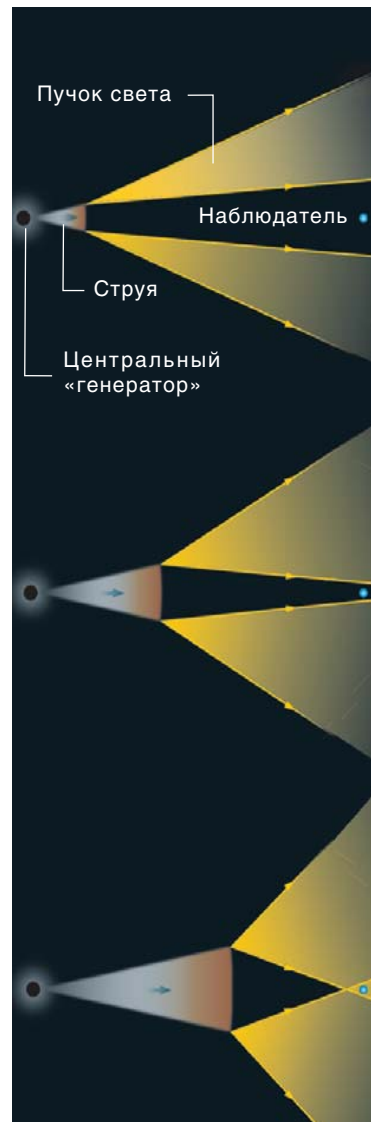
УГАСАНИЕ



Ярчайший из отмеченных до сих пор гамма-всплесков был 23 января 1999 г. Телескопы проследили за ним в гамма-лучах (на графике – голубой), рентгеновских (зеленый), оптических (оранжевый) и радиолучах (красный). В некоторый момент скорость угасания резко изменилась, указывая на то, что излучение рождается в узких струях быстро летящего вещества. Примерно через две недели после вспышки, когда оптическая яркость ослабла в 4 млн. раз, Космический телескоп «Хаббл» сделал фото, изображающее несколько искаженную галактику. Именно здесь интенсивно формируются звезды. Если вспышки вызваны взрывами массивных звезд, то для них это подходящее место.

ФОКУСИРОВКА

Релятивистский эффект влияет на наблюдение струи, рождающей гамма-всплеск.



1 Двигаясь почти со скоростью света, струя посылает излучение в узких пучках. Некоторые из них не попадают в область наблюдения.

2 Когда струя замедляется, пучки расширяются и все больше их попадает в поле наблюдения, отчего яркость тускнеющего источника спадает не так быстро.

3 Наконец наблюдатель видит уже всю струю, после чего яркость источника падает быстрее. Это и показали наблюдения.

а оставшаяся часть высвечивается более медленно, чем при гамма-всплеске. Поэтому светимость сверхновой на любом этапе значительно ниже, чем у гамма-всплеска. Даже яркие квазары выделяют «всего» около 10^{40} Вт.

Но если при вспышке энергия концентрируется в направлении наблюдателя, то оценку светимости можно снизить. Наблюдения послесвечений GRB990123 и некоторых других дали указания на такую фокусировку. Через два дня после вспышки темп падения яркости неожиданно возрастал, что и должно было происходить, если наблюдаемое излучение посылалось тонкой струей вещества, летящего почти со скоростью света. В результате релятивистского эффекта наблюдатель видит все большую и большую часть струи по мере ее замедления. В определенный момент он видит уже всю струю, поэтому в дальнейшем яркость падает значительно быстрее. Для GRB990123 угол раскрытия струи составил несколько градусов. Значит, мы можем наблюдать вспышку, только если она направлена вдоль нашего луча зрения. Эффект фокусировки уменьшает оценку излученной энергии примерно пропорционально квадрату угла струи. Например, при угле раскрытия в 10 градусов она покрывает около 1/500 части неба, поэтому оценка энергии уменьшается в 500 раз; при этом из 500 вспышек мы не заметим 499. Но даже с учетом эффекта фокусировки светимость GRB990123 составляет 10^{43} Вт!

Связь гамма-всплесков и сверхновых

Одним из наиболее интересных открытий стала связь между гамма-всплесками и сверхновыми. Ученые, наблюдавшие вспышку GRB980425, заметили взорвавшуюся сверхновую, обозначенную как SN1998bw. Вероятность случайного совпадения – 1:10000.

Взаимосвязь явлений подтверждается и присутствием линий железа в рентгеновских спектрах некоторых вспышек. Как известно, атомы железа образуются и выбрасываются в межзвездное пространство при взрывах сверхновых. Если атомы лишаются своих электронов, а затем вновь их захватывают, они излучают свет определенных длин волн, называемый спектральными линиями. Впервые такие линии заметили BeppoSAX и японский рентгеновский спутник ASCA в 1997 г., а позже их измерили другие обсерватории. Так, рентгеновская обсерватория Chandra (NASA) зафиксировала линии железа во вспышке GRB991216, что позволило измерить расстояние до нее. Оно совпало с оценкой

расстояния до галактики, в которой произошел взрыв.

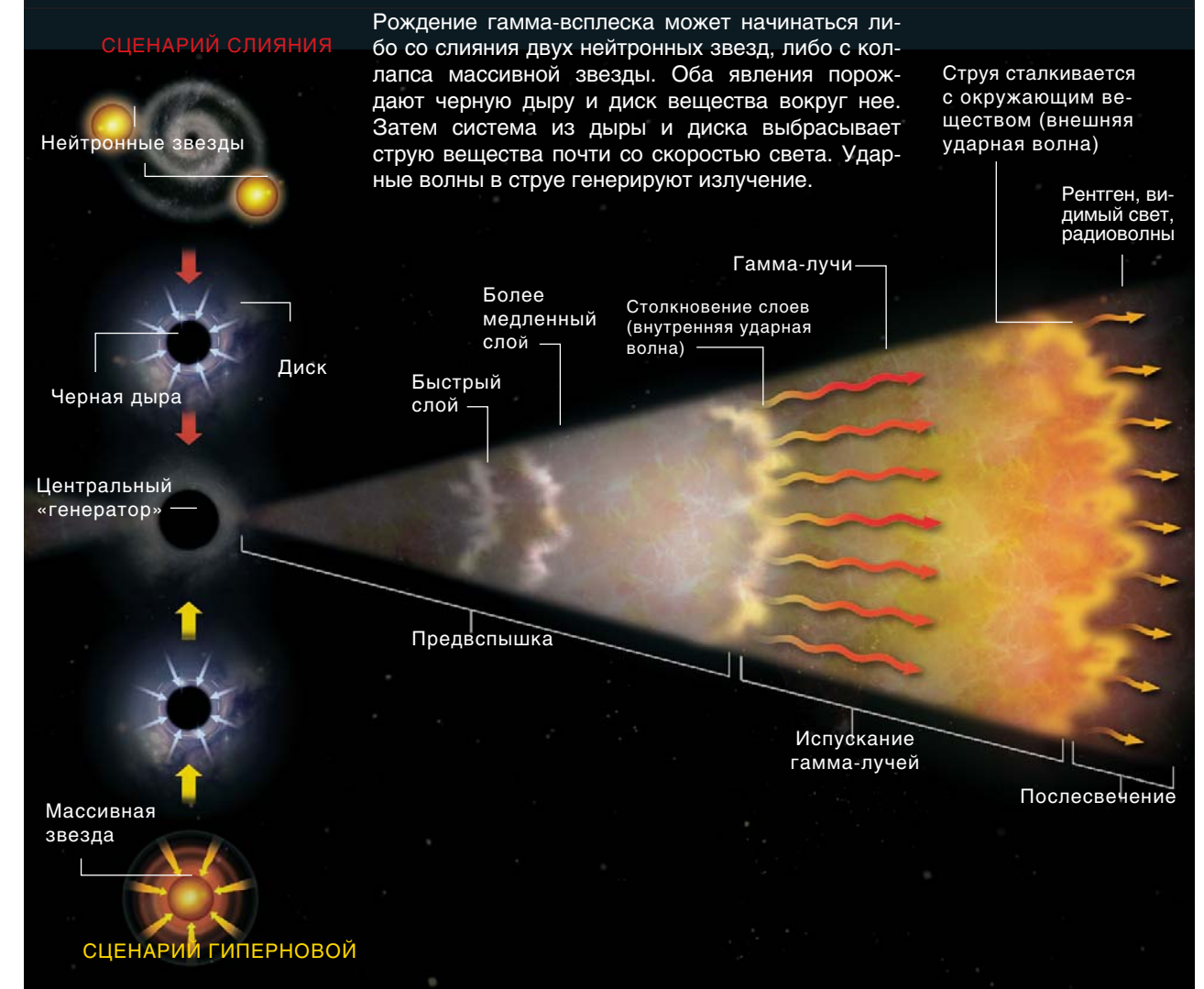
Дальнейшие наблюдения подтвердили связь гамма-всплесков со сверхновыми. В газовой оболочке, окружающей вспышку GRB011211, Многозеркальный рентгеновский спутник Европейского космического агентства обнаружил линии излучения кремния, серы, аргона и других элементов, обычно выбрасываемых сверхновыми.

Появляется все больше аргументов, что один и тот же объект может породить оба явления. Однако в наблюдаемой части Вселенной ежедневно вспыхивают сотни тысяч сверхновых, но возникает лишь пара гамма-всплесков. По одной из версий, при взрывах сверхновых выбрасываются струи вещества, вызывающие гамма-всплески.

Причем в большинстве случаев астрономы видят либо одно, либо другое. Если струя направлена на Землю, то в блеске вспышки не заметен свет сверхновой; если же струя направлена в сторону, то увидеть можно только сверхновую. Но если струя лишь немного отклонилась от нашего луча зрения – наблюдаются оба явления. Именно такая ситуация сложилась с GRB980425.

По другой гипотезе, с рождением сверхновых связан определенный тип гамма-всплесков. Из зафиксированных BATSE всплесков 90 выделили в особый класс, для которого характерны малая яркость и большая спектральная задержка, означающая, что высоко- и низкоэнергичные гамма-импульсы приходят с разницей в несколько секунд, и никто не знает, почему эти импульсы не синхронизованы. Но какой бы ни

ВСПЫШКА



ОБЗОР: ГАММА-ВСПЛЕСКИ

- В течение трех десятилетий исследование гамма-всплесков продвигалось крайне медленно: астрономы не понимали природу космического «фейерверка».
- Спустя пять лет стало понятно, что вспышки связаны с «родовыми муками» при появлении на свет черных дыр. Большинство из них возникает при коллапсе массивных звезд, демонстрирующих при этом вспышку излучения, заметную с расстояния в миллиарды световых лет.
- Разрабатывается теория, способная объяснить невероятное разнообразие вспышек.

была причина, эти странные гамма-всплески происходят с той же частотой, что и сверхновые типа *Ib/c*, возникающие при коллапсе ядра массивной звезды.

Гигантские огненные шары

Даже если не задумываться об источнике энергии гамма-всплесков, парадоксальной кажется их невероятная яркость. Быстрые вариации блеска указывают, что излучение рождается в небольшой области: светимость в 10^{19} солнечных выходит из области объемом в одно Солнце! При этом фотоны так плотно упакованы, что мешают друг другу вырваться наружу. Это напоминает людей в толпе, рвущихся в панике к выходу и мешающих друг другу выйти. Но если гамма-лучи не способны вырваться наружу, то как мы видим гамма-всплески?

Решение задачи заключается в том, что гамма-кванты сразу не излучаются. Вначале выделившаяся при взрыве энергия сохраняется в виде кинетической энергии расширяющейся оболочки (огненного шара), которая содержит фотоны, электроны и их античастицы – позитроны. Когда диаметр шара достигает 10–100 млрд. км, плот-

ность фотонов падает настолько, что гамма-кванты уже могут вырваться наружу. Часть кинетической энергии преобразуется в электромагнитное излучение, происходит гамма-всплеск.

Судя по всему, исходное гамма-излучение рождается внутренними ударными волнами, возникающими, когда быстрые части расширяющегося вещества сталкиваются с более медленными. Поскольку оболочка разрастается почти со скоростью света, временная шкала для внешнего наблюдателя, согласно теории относительности, сильно сжата: он видит вспышку продолжительностью в несколько секунд. Продолжая расширяться, огненный шар выметает окружающий газ. При этом на границе со сжатым внешним веществом формируется новая ударная волна, и она сохраняется, когда шар замедляет расширение. Этой волной объясняется послесвечение гамма-всплеска и перемещение максимума излучения из гамма-диапазона в рентгеновский, затем в видимый и, наконец, в радиодиапазон.

Хотя огненный шар может преобразовать энергию взрыва в наблюдаемое излучение, что же служит источником этой энергии? Вопрос еще предстоит решить. В одних моделях изучаются

СУДЬБА МАССИВНОЙ ЗВЕЗДЫ

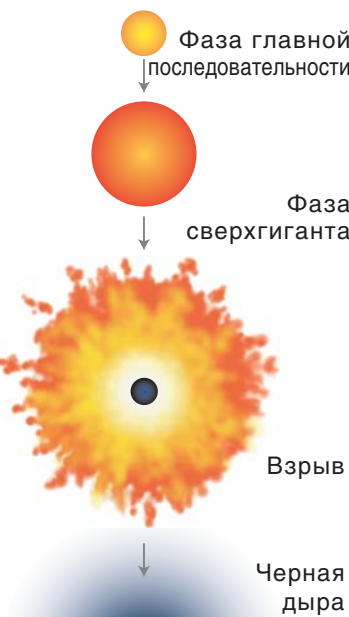
Большую часть своей жизни звезды находятся в спокойном состоянии, на главной последовательности, когда в их центральных областях под действием термоядерного синтеза водород превращается в гелий. На этой стадии эволюции находится и наше Солнце. Согласно теории строения звезд, более массивные, чем Солнце, светятся ярче и быстрее сгорают. Звезда, в 20 раз массивнее Солнца, сгорает в тысячу раз быстрее.

Когда водород в ядре звезды заканчивается, оно сжимается, нагревается, и начинается слияние более тяжелых элементов: гелия, кислорода, углерода. Постепенно звезда превращается в красный гигант или в сверхгигант. Если начальная масса звезды в 8 и более раз превышает солнечную, в ее недрах сливаются более тяжелые элементы вплоть до образования железа. Но при слиянии ядер последнего уже не выделяется энергия; напротив, для этого требуются дополнительные за-

траты. Поэтому звезда вдруг оказывается «без топлива».

В результате начинается коллапс звезды. Ее ядро сжимается в нейтронную звезду — шар радиусом всего в 10 км, но с массой, как минимум на 40% превышающей массу Солнца. Оставшееся вещество звезды выбрасывается в пространство в виде мощного взрыва сверхновой.

Для массы нейтронной звезды существует предел — от 2 до 3 масс Солнца. Если она оказывается больше, то возможен ее дальнейший коллапс в черную дыру. Этот рубеж может быть перейден, если достаточно вещества упадет на поверхность нейтронной звезды. Но черная дыра может и непосредственно сформироваться в ходе коллапса. Звезды с начальной массой более 20 масс Солнца могут в конце жизни порождать черные дыры. Именно этот процесс естественным образом объясняет гамма-всплески.



ТИПЫ ГАММА-ВСПЛЕСКОВ							
Тип (подтип) вспышки	Доля от всех вспышек	Характерная длительность первичной вспышки	Гамма-лучи в первичной вспышке свечении	Рентгеновские лучи в послесвечении	Оптические лучи в послесвечении	Гипотетический центральный «генератор»	Объяснение необычных свойств
Длинная (нормальная)	25%	20 сек.	✓	✓	✓	Взрыв массивной звезды	Необычных свойств нет
Длинная (темная, или «призрачная»)	30%	20 сек.	✓	✓	✗	Взрыв массивной звезды	Чрезвычайно удаленный, запыленный или действительно слабо излучающий в оптике
Длинная (рентгеновская)	25%	30 сек.	✓	✓	✗	Взрыв массивной звезды	Чрезвычайно удаленный или перенасыщенный барионами
Короткая	20%	0,3 сек.	✓	?	?	Слияние пары компактных объектов	Происходит не в области звездообразования, поэтому окружающий газ менее плотен и внешняя ударная волна слабее

гиперновые, или коллапсары, возникающие из звезд с исходной массой более 20 или 30 масс Солнца. Ядро такой звезды в определенный момент коллапсирует, в результате чего образуется быстро вращающаяся черная дыра, окруженная диском из остатков вещества.

В других моделях рассматриваются двойные системы, состоящие из компактных объектов, например, пара нейтронных звезд (представляющих сверхплотные остатки нормальных звезд) или нейтронная звезда в паре с черной дырой. Вращаясь друг вокруг друга, два объекта постепенно сближаются и сливаются*. Как и в случае с гиперновой, образуется одиночная черная дыра, окруженная диском.

Комбинация черной дыры и диска встречается во многих астрономических объектах. Особенность данной системы в необычно большой массе диска и в отсутствии звезды-компаньона, способной восполнять диск (из чего следует, что вся энергия выделяется в единственном «выстреле»). Черная дыра и диск – два гигантских резервуара энергии: гравитационная энергия диска и энергия вращения дыры. Но пока не совсем понятно, как именно эта энергия превращается в гамма-излучение. Возможно, при формировании диска

*Впервые детальный сценарий слияния пары нейтронных звезд, приводящий к сильной вспышке излучения, рассмотрели в 1984 г. московские астрофизики С.И. Блинников, И.Д. Новиков, Т.В. Переводчикова и А.Г. Полнарев.

генерируется магнитное поле, которое в 10^{15} раз сильнее магнитного поля Земли. В результате диск разогревается до столь высокой температуры, что образуется огненный шар из плазмы и гамма-лучей, который разлетается в виде двух тонких струй вдоль оси вращения диска.

Поскольку излучение гамма-всплеска одинаково хорошо объясняется как гиперновой, так и слиянием компактных объектов, требуются дополнительные характеристики вспышки, чтобы выбрать между двумя сценариями. Например, отождествление гамма-всплесков со сверхновыми говорит в пользу гиперновых, которые просто очень мощные сверхновые. Кроме того, гамма-всплески обычно наблюдаются именно там, где должны взрываться гиперновые, а именно в тех областях галактик, где протекает звездообразование. Массивные звезды взрываются вскоре (спустя несколько миллионов лет) после формирования, поэтому они умирают недалеко от места своего рождения. А вот для слияния компактных звезд требуется значительно большее время (миллиарды лет), за которое они разбредаются по всей галактике. Если компактные объекты – причина гамма-всплесков, то они бы не наблюдались преимущественно в областях звездообразования.

Судя по всему, гиперновые объясняют большинство гамма-всплесков; но на столь огромном полотне останется место и для слияния компактных звезд. Более того, разрабатываются альтернативные

модели. В одном из сценариев огненный шар образуется при выделении энергии из электрически заряженной черной дыры: как первая вспышка, так и послесвечение происходит оттого, что огненный шар сгребает окружающее вещество. Астрономы до сих пор не знают точно причины этих взрывов, не изучены и типы вспышек.

Взрывы из прошлого

До сих пор плохо исследованы темные, или «призрачные», гамма-всплески. Из 30 всплесков, изученных в диапазонах, отличных от гамма-лучей, 90% были видны в рентгеновских лучах. Однако в оптическом диапазоне были замечены только 50%.

Возможно, вспышки возникают в областях звездообразования, заполненных пылью, способной поглотить видимый свет, но не рентгеновские лучи. Может быть, «призраки» – это гамма-всплески, происходящие чрезвычайно далеко от нас. Поэтому те лучи, которые мы воспринимаем как свет, должны исходить из района вспышки как ультрафиолетовое излучение, а значит, они могут поглощаться межгалактическим газом. Критическим тестом для проверки этой гипотезы станет измерение расстояний по рентгеновским спектрам. Третье предположение: «призраки» по природе очень слабы в оптике. Пока больше доказательств в пользу пылевой гипотезы. Высокочувствительные оптические и радионаблюдения позволили отождествить вероятные галактики-хозяйки для двух темных гамма-всплесков, и обе они находятся на сравнительно небольшом расстоянии от нас.

Следующий шаг в астрономии гамма-всплесков – накопление данных о вспышках, послесвечениях и родительских галактиках. Наблюдателям необходимо измерить характеристики сотен вспышек всех типов, с послесвечением в оптическом диапазоне или без него. Сейчас астрономы регистрируют положение вспышек с помощью запущенного в октябре 2000 г. спутника *High Energy Transient Explorer* («Исследователь временных высокоэнергичных явлений») и межпланетной сети из нескольких маленьких гамма-детекторов, установленных на планетных зондах. Об-

серватория *Swift*, запуск которой запланирован на осень, сможет зарегистрировать в различных диапазонах спектра сотни гамма-всплесков и их послесвечений. Обнаружив гамма-всплеск, спутник будет автоматически включать свои рентгеновские и оптические телескопы. Столь быстрая реакция позволит определить, имел ли гамма-всплеск рентгеновское и оптическое послесвечение. Аппаратура будет чувствительна и к коротким вспышкам, до сих пор слабо изученным*.

Еще одна задача – разобраться с экстремально энергичным гамма-излучением. Например, при вспышке *GRB940217*, наблюдавшейся с борта Обсерватории гамма-излучения «Комптон», высокоэнергичные гамма-кванты регистрировались в течение часа после вспышки. Астрономы не понимают, как может поддерживаться такое жесткое и мощное послесвечение. Спутник *AGILE* Итальянского космического агентства, запланированный к запуску в 2004 г., будет наблюдать гамма-всплески именно высокой энергии. Сверхчувствительный космический гамма-телескоп большой площади, предполагаемый к запуску в 2006 г., также сыграет важную роль в изучении этого явления.

Другие космические обсерватории, не предназначенные специально для поиска гамма-всплесков, также внесут свой вклад в их исследование. Международная лаборатория гамма-астрофизики (*Integral*), запущенная 17 октября 2002 г., сможет фиксировать 10–20 гамма-всплесков в год. А намеченный к запуску лет через десять телескоп для обзора в жестком рентгеновском излучении будет иметь чувствительный гамма-детектор, способный регистрировать тысячи гамма-всплесков.

Ряд открытий в этой области показал, что гамма-всплески связаны с мощнейшими взрывами, происходящими во всех уголках Вселенной. Они позволяют нам представить Вселенную в раннюю эпоху звездообразования. ■

(«В мире науки», №4 2003)

* Аппарат *Swift* был запущен 20 ноября 2004 г. Он успешно работает на околоземной орбите, помогая обнаруживать и изучать источники гамма-всплесков. *Прим. Ред.)*

ПЛАНЕТЫ

IV

Важнейшее достижение астрономии
в предыдущем десятилетии — открытие планет
за пределом Солнечной системы.

Давид Ардила
«НЕВИДИМКИ ПЛАНЕТНЫХ СИСТЕМ»



ВЛАЖНЫЙ МАРС

Леонид Ксанфомалити

Обнаруженные на поверхности планеты, склоновые овраги испещрены следами водных потоков, что радикально изменяет представления о Марсе как сухой, гидрологически мертвой планете.

«Человеческий мир Марса, вероятно, значительно опередил нас во всем и достиг большого совершенства... они построили города и научились всяким искусствам», – говорилось в посвященной Марсу главе книги знаменитого французского популяризатора науки К. Фламариона «Живописная астрономия». В русском переводе труд вышел в 1897 г. Начиная с античных времен у ученых не было более популярной идеи, чем поиск жизни в других мирах. И не только у ученых. «В других краях, в других мирах такое ль небо, как у нас?» – пела Марфа из оперы Н.А. Римского-Корсакова «Царская невеста». С определенной натяжкой можно сказать, что похожее небо есть только у Марса. Но та единственная аминокислотная форма жизни, которую мы знаем, без воды существовать не может. Поэтому поиск жизни на Марсе начинается с поиска воды.

Установленная на спутнике Марса *Mars Global Surveyor (MGS)* камера высокого разрешения, способная различить образования размером в 1 м, позволила сделать важное открытие. Обнаруженные на поверхности планеты узкие, длинные склоновые овраги испещрены следами недавних водных потоков, что радикально изменяет представления о Марсе как сухой, гидрологически мертвой планете. До сих пор принято было считать, что темные следы на склонах долин и кратеров оставлены осыпями мелкого песка или камнепадами, но только не водой. Наличие воды в жидком состоянии на Марсе считалось невозможным из-за низкого атмосферного давления и температуры. Однако изучение снимков, полученных с новых аппаратов, в том числе и с нового аппарата *Mars Odyssey*, позволяет выделить ряд объектов, по-видимому, связанных с обильными источниками грунтовой воды, на склонах на глубине 200–500 м под уровнем прилегающих равнин.

Атмосферное давление и температура на Марсе действительно настолько низкие, что вода там

должна одновременно и испаряться, и замерзать. Все ее запасы сосредоточены главным образом в виде залегающего глубоко под поверхностью льда («вечной мерзлоты»). На планете можно найти низменности, где давление выше критического для существования жидкой воды, но температура и там остается предельно низкой: среднегодовая температура на экваторе близка к -60°C , а в полярных районах — к -120°C . Однако столь суровым Марс был не всегда. На ранних этапах истории (более 2 млрд. лет назад) на Красной планете существовали большие открытые водоемы.

Древние водные потоки оставили свой след на поверхности Марса. На рис. 1 показан снимок долины Нанеди в Земле Ксанфа с координатами $5,1^{\circ}\text{N}$ и $48,3^{\circ}\text{W}$. Размеры представленного здесь района 28×10 км. Сотни миллионов лет назад вода оставила здесь широкое, около 2,5 км, русло. Справа можно увидеть следы и более поздних потоков на дне долины, т.к. климат Марса менялся медленно. Есть свидетельства, что более 2 млрд. лет назад на Марсе мог существовать неглубокий океан.

Вместе с тем существуют и значительно более поздние свидетельства присутствия воды на планете. На рис. 2 хорошо видно смещение больших

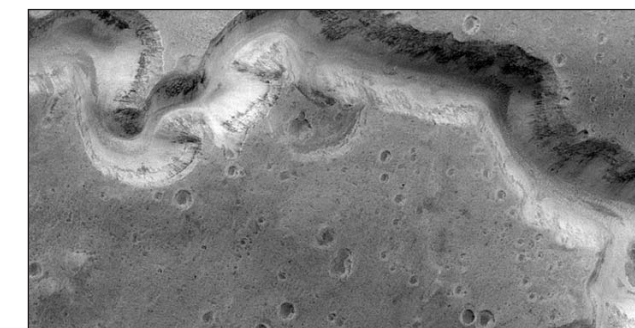


Рис. 1. Долина Нанеди – одно из многочисленных геологических свидетельств богатой водой древней истории Марса. (NASA/MSSS/Release MOC2-73 Nanedi.)

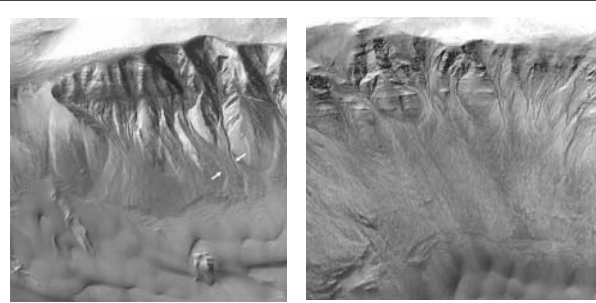


Рис. 2. Осыпи грунта и нитевидные овраги на склоне кратера (42,4°S, 158,2°W). Овраги похожи на следы извилистых горных рек, но в отличие от земных оврагов они расширяются вверх по склону. (MGS MOC Release No. MOC2-320. NASA/JPL/MSSS.)

Рис. 3. Склон небольшого кратера в том же районе (Ньютон), что и на рис. 6, с многочисленными извилистыми оврагами и осыпями сыпучего материала на дне. Извилистые овраги свидетельствуют о меньшей крутизне склона, но также сужаются вниз. (MGS MOC Release No. MOC2-317. NASA/JPL/MSSS.)

масс грунта по склону. Подобные оползни во многих районах Марса происходят, по-видимому, в современную эпоху. Наряду с осыпями здесь можно видеть нитевидные километровые овраги или борозды, спускающиеся по склону (показаны стрелками). Они очень похожи на промоины, остающиеся земными горными реками или ручьями, и образованы, как предполагается, потоками воды. Однако они имеют необычный вид: в отличие от земных склоновых рек, марсианские верхи склона широки, а затем сужаются, заканчиваются тонким ручьем и исчезают на дне долины или кратера. Кажется, будто они текли вверх по склону. Кстати, это говорит о том, что овраги не могли возникнуть под действием камнепада, селя или пылевых оползней. Их ширина и глубина в узкой части составляет 10–20 м, а протяженность варьируется от сотен метров до нескольких километров.

На снимках видно много таких оврагов, или промоин. Следы грунтовых вод наблюдаются в основном в пределах широт от 30°S до 30°N. Их источники всегда находятся на крутых склонах долин и кратеров на глубине 150–500 м под уровнем прилегающей равнины. По-видимому, на этих глубинах расположены горизонты грунтовых вод. Этот уровень выделяется и на склонах долины Нанеди (рис. 1).

Еще один небольшой кратер (центр 42°S, 158°W), расположенный внутри более крупного кратера Ньютон, показан на рис. 3. Виден склон с многочисленными извилистыми оврагами и осы-

пями на дне (размер участка на снимке 4,3х2,9 км). Как и на рис. 2, овраги и их притоки сужаются, спускаясь вниз по склону. Ученым удалось найти объяснение этому парадоксальному явлению. Если поток грунтовой воды вышел на поверхность и ринулся вниз, то в условиях Марса размер развивающейся промоины будет зависеть прежде всего от температуры поверхности. Если в экваториальной зоне Марса она в течение суток варьируется от –15°С до –50°С, поток должен постепенно впитываться в сухой морозный грунт и замерзает. Образуется канал из промерзшего грунта, по которому он устремляется дальше, наращивая промерзшее ложе и частично превращаясь в лед. Именно поэтому, в отличие от земных рек, потоки на Марсе сужаются вниз по склону. В некоторых случаях, когда дневная температура верхнего слоя грунта положительная, потоки могут распространяться на большие расстояния, но их интенсивность также должна уменьшаться с расстоянием из-за расхода воды на увлажнение песчаного грунта. Боковые ответвления тоже становятся все уже, поскольку вода в них быстро замерзает.

Форму оврагов (прямые на рис. 2 и извилистые на рис. 3), скорее всего, определяют, как и на Земле, крутизна склона и свойства почвы. По отвесным склонам поток несет с собой значительные массы грунта, в извилистых оврагах его существенно меньше. Под действием осыпей и ветров овраги постоянно разрушаются, а потому возраст их, скорее всего, невелик.

Источник, расположенный на склоне (рис. 4), создает след, протяженность которого достигает 6 км. Это, скорее всего, свидетельствует об увлажнении грунта с последующим его промерзанием. На снимке видно, что два источника, отстоящие один от другого примерно на 150 м, оставили следы разной плотности: более плотный и узкий возникает ниже и проходит вдоль менее плотного, но более широкого. Напрашивается вывод, что плотный след – более поздний и возник, когда верхний источник уже иссяк. В отличие от изображений на рис. 2 и 3, глубокого оврага здесь нет. Возможно, это молодой источник, а промоина формируется в течение достаточно длительного времени.

В условиях низкой температуры на Марсе переход воды в фазу льда следует рассматривать в динамике: выбрасываемая родниками теплая вода соприкасается с сухим холодным грунтом, частично впитывается и замерзает, образуя ледяное ложе, по которому поток распространяется дальше. Вода постепенно впитывается, и все большая



Рис. 4. След потока на склоне не достигает 6 км. Для земных грунтов потемнение соответствует увлажнению. Можно предположить, что более темный след относится к более позднему источнику. (MGS MOC m0807686b. NASA/JPL/MSSS.)

Рис. 7. Бассейн на дне небольшого кратера, расположенного внутри кратера Ньютон. Размер видимой части бассейна достигает 3,4 км. (MGS MOC Release No. MOC2-242. NASA/JPL/MSSS.)



Рис. 6. Склон кратера с протоками (39°S, 166°W). В нижней части снимка находится бассейн, подобный чашам на рис. 5 и 7, но значительно больший по размерам. (MGS MOC Release No. MOC2-320. NASA/JPL/MSSS.)

ее часть переходит в фазу льда. Длина русла зависит от температуры воды и грунта и в экваториальной зоне на гладких склонах может достигать нескольких километров.

Отвлечемся немного от Марса. Природный заповедник Памук-Кале (Турция) известен уникальными образованиями на горном склоне (рис. 5). Вода многочисленных термальных источников, обогащенная кальциевыми гидросолями, минерализуется, образуя расположенные каскадом гигантские чаши, заполненные водой (рис. 5а). Постепенно вода отступает (рис. 5б), образуя горизонтальные кромки. Когда источник иссякает, пустеют и чаши, окаймляющие плато неровной белой цепью (рис. 5в). На Марсе, даже с учетом втрое меньшей силы тяжести, никакие песчаные запруды не смогли бы удержать подобное количество воды. Но если поверхность очень холодная, поступающая вода, впитываясь в морозный грунт, могла бы быстро создать из льда и промерзшего грунта формы, обладающие теми же свойствами, что и в Памук-Кале.

В нижней части снимка (рис. 6) склона марсианского кратера с протоками (39°S, 166°W) находится такой же бассейн, как на рис. 5, но большего размера. Горизонтальная ось снимка около 1500 м. Ширина бассейна около 600 м, а площадь около 0,3 км². Его внешняя граница выделяется светлой окантовкой. Вероятно, это ледяная кромка. Главный источник находится, по-видимому, справа над чашей. Крутой склон свидетельствует о том, что поток должен нести с собой значительное количество грунта.

Еще больший бассейн можно видеть на дне небольшого кратера (центр 41°S, 160°W), расположенного внутри кратера Ньютон (рис. 7). Горизонтальная ось снимка составляет 7 км, а размер видимой части бассейна достигает 3,4 км. На крутом склоне видны многочисленные нитевидные следы потоков, возникающих в стенке вала кратера на глубине примерно 0,5 км под уровнем поверхности. Дно затуманено; возможно, это испарения над открытой поверхностью бассейна. Внешняя его граница, так же как на рис. 6, выделяется светлой окантовкой.

Марс – сухая и морозная планета, но в некоторых его районах действуют источники и, по-видимому, устойчивые каналы грунтовых вод. Наличие жидкой воды должно играть важную роль в современных гидрологических циклах на планете. Поиск жизни на Марсе начался с поиска воды, и она, по-видимому, найдена. Остается отыскать жизнь на Марсе. ■

(«В мире науки», №6, 2003)

ЗАГАДОЧНЫЕ ЛАНДШАФТЫ МАРСА

Арден Олби

Атмосфера Марса характеризуется сильными ветрами, высокими ледяными облаками, туманами, заморозками, пылевыми смерчами и бурями.

Красная планета

Капитан Джон Картер, герой приключенческих романов Эдгара Барроуза, отправился искать золото в Аризону, а оказался на засушливой планете, где светили две луны, жили шестиногие существа и прекрасные принцессы. Ее ландшафт напоминал древнюю, разрушенную Южную Аризону.

Как и фантасты, ученые обычно представляют Марс уменьшенной копией нашей планеты, но с более холодным и засушливым климатом. Считается, что его поверхность сформировалась под воздействием тех же процессов, что происходили на Земле. В начале XX в. многие думали, что на Марсе есть вода и придет время, когда там «будут яблони цвести», но миф развеялся в конце 1960-х, когда космическая станция обнаружила бесплодную, покрытую кратерами поверхность, гигантские горы, глубокие каньоны, вероятно, возникшие из-за суровых погодных условий. Изображения, полученные со станций *Viking* и *Mars Pathfinder*, напоминали самые мрачные земные ландшафты. Ученые сравнили экваториальные области Марса с американским Юго-Западом и выяснили, что полярные области схожи с Сухими долинами – бескрайними ледяными пустынями в Антарктиде.

Дальнейшие исследования показали, что такие сопоставления следует делать осмотрительно. Информация, собранная космическими станциями за последние пять лет, свидетельствует о том, что Марс – гораздо более сложная и загадочная планета, чем предполагалось ранее. На, казалось бы, простой вопрос: «Был ли Марс когда-либо теплым, влажным и пригодным для жизни?» – невозможно ответить однозначно.

Царство пыли

Исследование Марса шло неравномерно. За последние десять лет NASA потеряла на Красной планете три станции: *Mars Observer*, *Mars Climate Orbiter* – орбитальную станцию для изу-

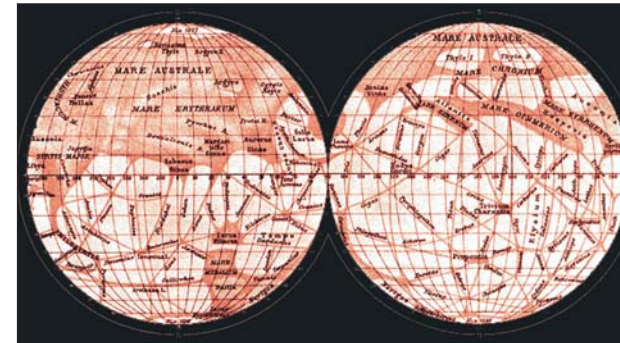
чения климата и *Mars Polar Lander* – станцию для посадки в полярной области. Затем пришел успех. С 1997 г. станция *Mars Global Surveyor*, старейший из действующих аппаратов, фотографирует поверхность планеты. Уже больше года станция *Mars Odyssey* обращается по орбите вокруг Марса, собирая сведения о составе воды и делая снимки в инфракрасных лучах. Когда статья готовилась к печати, NASA планировала запустить новые марсоходы, преемники знаменитого *Sojourner*. Европейское космическое агентство отправило на марсианскую орбиту станцию *Mars Express* со спускаемым аппаратом *Beagle 2*, которые придут к Марсу в декабре, почти одновременно с орбитальной станцией *Nozomi* японского Института космических наук и астронавтики.

Никогда ранее ученые не располагали столь полной информацией о поверхности и атмосфере Марса. Теперь появилась возможность изучать кратеры, каньоны и вулканы, воссоздающие картину далекого прошлого. Но пока не удастся понять, какие процессы сформировали рельеф поверхности в период между древней и нынешней историей Марса, разделенной миллиардами лет.

Несомненно, Марс и Земля похожи, но имеют-ся и принципиальные различия. Так, большую

ОБЗОР: ПОВЕРХНОСТЬ МАРСА

- Данные, полученные с искусственных спутников *Mars Global Surveyor* и *Mars Odyssey*, подтвердили, что в формировании марсианских ландшафтов принимали участие водные потоки, лед и ветер.
- Вопрос о том, был ли климат Марса мягким и влажным, остается открытым. Данные космических исследований свидетельствуют как в пользу такой возможности, так и против нее. Спускаемые аппараты – два американских и один европейский, – отправленные к Марсу в июне 2003 г., должны были получить важнейшие сведения, которые помогли бы решить этот вопрос.



Чтобы пересечь пешком область, расположенную на северной стороне кратера Ньютон в южном полушарии Марса (показанную слева), понадобится пять минут. Вы оставите следы на слегка заиндевевшей почве (светлые места на изображении), и вам придется карабкаться по песчаным дюнам и перепрыгивать через овражки.

часть земной поверхности покрывает почва, возникшая в процессе химической эрозии подстилающих горных пород или ледниковых морен, а на поверхности Марса лежит пыль – мелкозернистый материал, выпавший из атмосферы и скрывший весь древний ландшафт, за исключением самых крутых склонов. Толстый слой пыли покрывает даже высочайшие вулканы, а самые плотные слои лежат на участках, которые, если наблюдать в телескоп, кажутся нам светлыми областями. Оседая, она захватывает из атмосферы летучие вещества и образует покров из льдистой пыли. Позже лед улетучивается, оставляя в грунте характерные ямки. Интересно, что толщина льдистого пылевого покрова зависит от широты. Согласно данным, до 50% поверхности полюсов могут быть покрыты слоем льда. В свое время ледяная мантия стекала по склонам словно вязкая жидкость – совсем как земные ледники.

Второе отличие Марса от Земли – это ураганные ветры. Космические аппараты зафиксировали пылевые бури, проносящиеся над всей территорией планеты, мощные смерчи и лавины. По пылевым наносам позади препятствий можно судить о сезонных изменениях ветра.

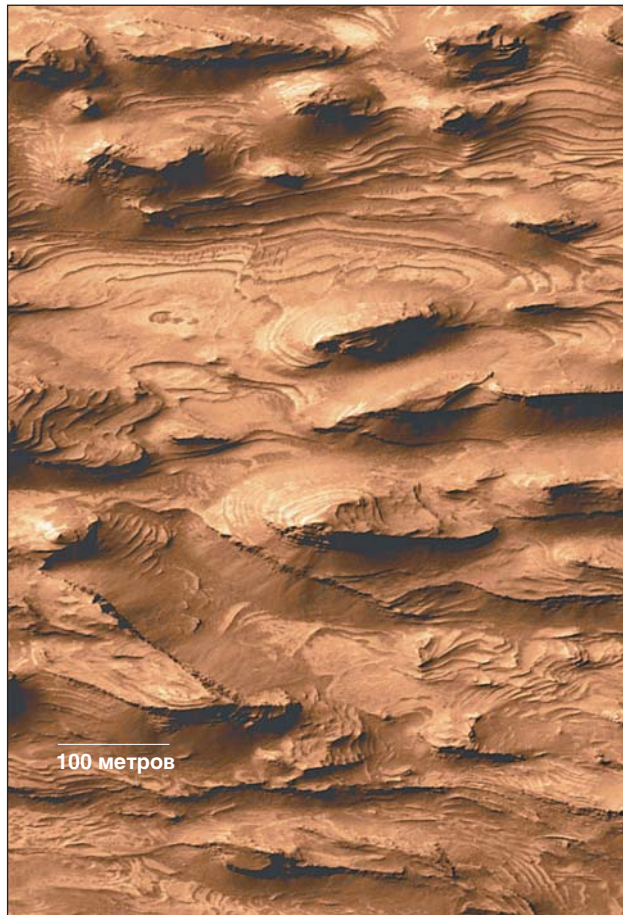
На свободных от пыли участках видны следы ветровой эрозии и отложения осадочных материалов. Признаки эрозии наблюдаются в кратерах, из которых материал был унесен ветром, и в ярдангах – гребнях, высеченных песком в подстилающих породах. На процесс отложения указывают обширные песчаные поверхности и дюны. Последние состоят из частиц размером с песчинку,

которые перемещаются как бы мелкими прыжками (сальтацией). Однако чтобы поднять их в воздух, нужен более сильный ветер, чем для возбуждения сальтации; поэтому основная часть пыли попадает в атмосферу во время бурь и смерчей. По-видимому, ветровая активность существует с тех лет, когда Солнечная система была еще молодой. На многих снимках видны два типа кратеров (возможно, образовавшиеся именно в то время): неглубокие, подвергшиеся эрозии кратеры, частично заполненные осадочным материалом и покрытые песчаными дюнами, другие – не тронуты стихией, они глубже и имеют чашевидную форму. Майкл Мейлин (Michael Malin) и Кеннет Эджетт (Kenneth Edgett) из компании *Malin Space Science Systems*, которая управляет камерой аппарата *Mars Global Surveyor*, предположили, что процессы формирования ландшафта происходили в определенной последовательности: сначала огромная масса песка переносилась ветром и частично оседала в кратерах, а позже образовывались чашевидные кратеры. Но откуда взялось такое гигантское количество песка, ответить пока невозможно.

Грозное небо Марса

Третье отличие Марса от Земли – удивительное разнообразие погодных и климатических циклов. Марсианский год составляет 687 земных суток. Угол наклона оси вращения Марса, определяющий смену времен года, очень близок к наклону земной оси. На Красной планете нет атмосферных осадков и океанов, столь важных для формирования погоды на Земле. В зависимости от времени года атмосферное давление (составляющее меньше 1% земного) изменяется в пределах 25%, что обусловлено конденсацией и сублимацией CO₂ у полюсов. Разреженная атмосфера не в состоянии сгладить суточные колебания температуры, которые на поверхности Марса достигают 100°C. Термические свойства атмосферы зависят от наличия в ней частиц пыли и льда, поэтому динамика процессов, происходящих в атмосфере Марса, достаточно сложная. Погода характеризуется сильными ветрами, высокими ледяными облаками, туманами, заморозками, пылевыми смерчами и бурями.

Как и на Земле, штормовые ветры приходят из северных полярных широт. Крупнейшие пылевые бури обычно зарождаются весной в южном полушарии, когда планета быстро прогревается, и нередко бушуют над всей планетой. *Mars Global Surveyor* проследил развитие глобальной пылевой



На дне каньона Кандор в системе долин Маринера ученые насчитали 100 слоев толщиной по 10 м каждый. Это могут быть как пласты осадочных пород, которые впоследствии прорезал каньон, так и пыль, осевшая в результате циклических атмосферных процессов. Фото получено аппаратом Mars Global Surveyor.

бури, которая началась в июне 2001 г. и длилась четыре месяца и была результатом слияния нескольких региональных бурь. Мейлин сравнил резкие климатические изменения в период пылевых бурь на Марсе с последствиями извержения вулкана Пинатубо в 1991 г., вызвавшими резкое похолодание на обширной территории.

Важную роль в динамике атмосферы играют полярные шапки. Наблюдения за их размером и формой свидетельствуют, что они в основном состоят из воды в твердом состоянии, а не из менее прочного сухого льда (твердого CO₂), который не может сохранять куполообразную форму. Важное открытие: идет быстрое разрушение слоя сухого льда, покрывающего часть южной полярной шапки. Ясно, что эрозия не вечна, как и оседание и выдувание пыли. Должны быть другие циклические явления, связанные с изменениями орбиты

Марса, которые вновь позволят появиться льду и пыли. Мейлин и Эджетт выдвинули предположение, что ветровая активность атмосферы в прошлом была значительно выше, а это еще раз подтверждает, что климат Марса меняется.

Четвертым важным отличием Марса от Земли является почти полное отсутствие воды в жидком состоянии. При существующей температуре и атмосферном давлении вода недолго остается на поверхности, однако может существовать в виде льда под слоем грунта в течение всего марсианского года, на что указывают характерные типы рельефа. Аппарат Mars Odyssey обнаружил лед на большей части Марса вне экваториальной зоны, а данные моделирования показывают, что он залегает на значительной глубине.

Впрочем, иногда вода все же течет на поверхности Марса. В 2000 г. Мейлин и Эджетт описали овраги, словно созданные водой. Было выдвинуто множество гипотез для объяснения их происхождения: выходы водоносных слоев (которые должны располагаться необъяснимо высоко на краях кратеров); фонтанирующие под давлением гейзеры; выбросы углекислого газа под большим давлением; вулканическое тепло на глубине. Позднее Филип Кристенсен (Philip Christensen) из Аризонского университета обнаружил овраги, расположенные прямо под скоплениями снега и льда, образование которых связано с марсианскими климатическими циклами. В более холодные периоды склоны покрываются смесью снега и пыли, затем Солнце нагревает это теплоизолирующее одеяло, и появляется талая вода, которая стекает по склону, образуя мелкие овраги. В более теплые периоды лед тает и даже иногда полностью испаряется.

Несмотря на обилие воды, климат Марса засушлив, а минералогический состав грунта говорит об отсутствии воды на поверхности. На Земле в процессе выветривания с участием теплых текучих вод образовались почвы с высоким содержанием кварца, гидратированные глины и такие соли, как карбонат и сульфат кальция. На Марсе космические аппараты пока не обнаружили залежей этих минералов. Темные марсианские базальтовые дюны состоят в основном из пироксена и плагиоклаза, которые на Земле быстро выветриваются. Из вышесказанного можно заключить, что нынешняя холодная и сухая атмосфера Марса сформировалась уже давно.

Марсианский «бутерброд»

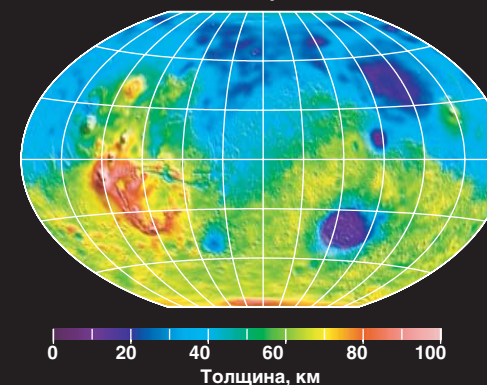
Всегда ли Марс отличался от Земли? Под покровом пыли и песка имеются многочисленные

ОБЩИЙ ВИД МАРСА

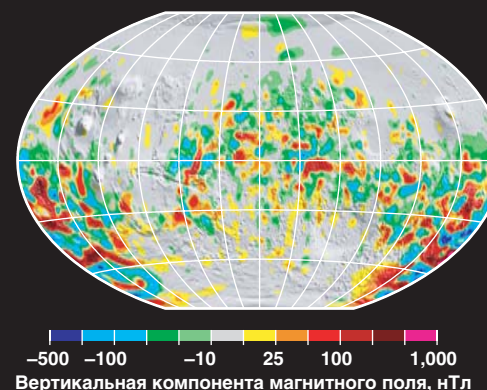


Предполагаемые места посадки: кратер Гусев (1), Земля Меридиана (2) и равнина Исиды (3).

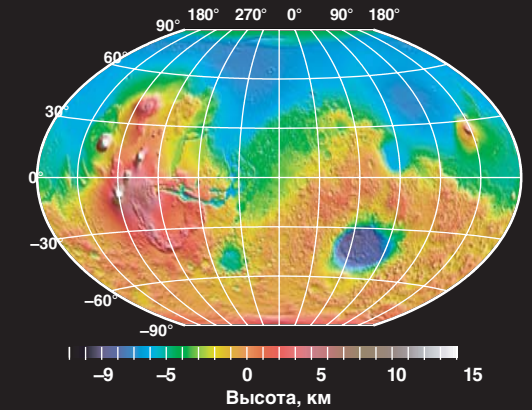
ИСТИННЫЕ ЦВЕТА. Марс – это четыре мира в одном: густо усеянное кратерами южное полушарие (с сетью долин, подобных речным), более ровное северное (со следами древних береговых линий), экваториальная зона (с гигантскими вулканами и каньонами) и полярные шапки (с причудливым рельефом). На карте совмещены изображения, полученные широкоугольной камерой, и данные измерения высот. Цвета близки к реальным.



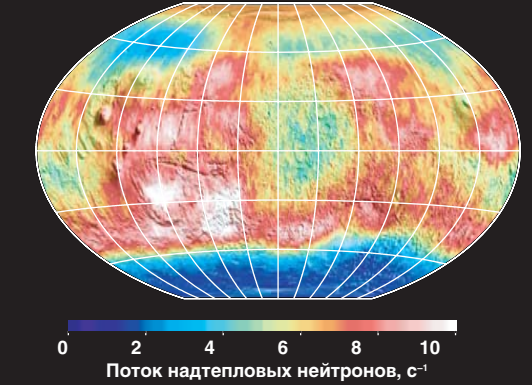
ТОЛЩИНА КОРЫ. Сопоставляя топографическую карту Марса с данными измерения его поля тяготения, исследователи смогли определить толщину твердой коры Марса. Она составляет около 40 км под северными равнинами и около 70 км под возвышенностями на юге. Толще всего она (красный цвет) под гигантскими вулканами Фарсида, а тоньше (пурпурный цвет) – под бассейном Эллада.



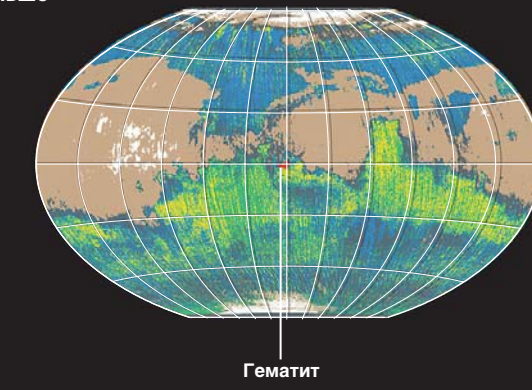
МАГНЕТИЗМ. У Марса нет единого магнитного поля, но некоторые участки его коры намагничены до более высоких значений, чем земная кора. На этих участках богатые железом породы напоминают стержневые магниты. Можно предположить, что в период затвердевания пород Марс обладал глобальным магнитным полем. Полосы, протянувшиеся с востока на запад, напоминают формы, сопутствующие движению платформ на Земле, но происхождения их неизвестно.



ТОПОГРАФИЯ. Разность высот между глубочайшими впадинами (темно-синий цвет) и самыми высокими вулканами (белый цвет) достигает 30 км, на Земле она составляет 20 км. Большой синий круг в южном полушарии – впадина Эллада, один из крупнейших кратеров во всей Солнечной системе.



ВОДА. Нейтроны, образующиеся в результате бомбардировки поверхности Марса космическими лучами, позволяют судить о присутствии воды на глубине до 1 м. Дефицит нейтронов средней энергии (надтепловых) свидетельствует о насыщенности водой (синий цвет), предполагаемого количества которой достаточно, чтобы дважды заполнить озеро Мичиган. На большей глубине воды может быть еще больше



ГЕОЛОГИЯ. Состав инфракрасных спектров указывает на типы горных пород. В южном полушарии преобладает базальт (зеленый цвет), а на севере – андезит (синий цвет). Близ экватора видны обнажения гематита (красный цвет), образовавшиеся, как правило, при наличии воды. Определить типы пород, скрытых пылью (желто-коричневый цвет) или облаками (белый цвет), пока не удастся.

Поехали!

NASA отправило к Марсу два новых марсохода, а Европейское космическое агентство – спускаемый аппарат. Они должны достигнуть Красной планеты в январе 2004 г. и начать геологические изыскания, чтобы определить роль воды в ее формировании и понять, был ли Марс пригоден для жизни.

Марсоходы дадут ученым небывалую свободу передвижения, так как каждый из них сможет проходить за день до 100 м. Для сравнения: марсоход *Sojourner* космического аппарата *Pathfinder*, опустившегося на Марс в 1997 г., прошел 100 м за все время своей работы. На мачте высотой 1,5 м расположены бинокулярная камера, а также термозмиссионный спектрометр – прибор, позволяющий анализировать состав веществ. На «руке» размещены – мессбауэровский и рентгеновский спектрометры, детектор альфа-частиц, микроскоп, скребок для очистки пород. Тарелка направленной антенны передает радиосигналы прямо на Землю, а черная штыревая антенна служит для связи через спутники *Mars Global Surveyor* или *Mars Odyssey*.

На основе сопоставления интересов геологии (особенности рельефа, связанные с работой с водой) и степени риска (крутые склоны и сильные ветры) из двух сотен предварительно намеченных мест посадки новых марсоходов были выбраны два. Это кратер Гусева, слоистые отложения которого могут оказаться озерными

осадками, и земля Меридиана, богатая крупнозернистым гематитом – минералом, образование которого связано с водой в жидком состоянии. Европейский спускаемый аппарат *Beagle 2* планируется посадить на равнине Исиды, которая, возможно, является бассейном, куда выносятся осадочный материал.



Марсоход NASA Mars Exploration Rover.

свидетельства того, что Красная планета менялась. Прежде всего ландшафты северного и южного полушарий Марса разительно отличаются друг от друга. Южное полушарие выше и изобилует кратерами (что свидетельствует о его древности), а на северном их меньше; здесь характерны обширные низменности. Между ними располагается плато Фарсида (промежуточное по возрасту) с гигантскими вулканами, по сравнению с которыми их земные собратья кажутся карликами.

Низменности северного полушария ровные, поэтому можно предположить, что значительную часть истории Марса они были днищами озер, выложенными многочисленными пластами лавы и осадочными породами южного происхож-

дения. На новых топографических картах видны древние кратеры, покрытые тонким слоем молодых отложений.

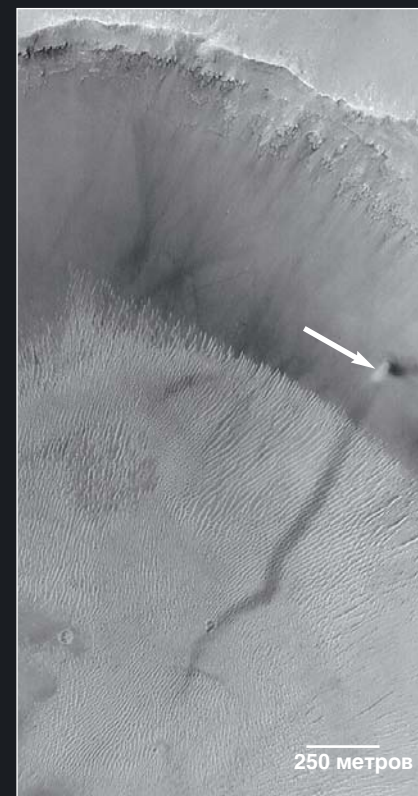
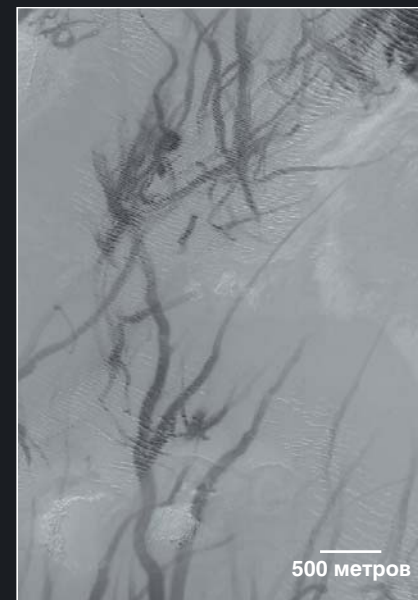
Вдоль края южных возвышенностей прослеживаются промоины, которые могли быть образованы только потоками воды. Они значительно больше своих земных аналогов. Знаменитый марсианский каньон долины Маринера в длину потянулся бы от Нью-Йорка до Лос-Анджелеса, а в ширину – от Нью-Йорка до Бостона. Глубина каньона сопоставима с высотой горы Маккинли. Ничего подобного на Земле нет. Его верховья, кажется, размыты водной стихией. Все марсианские промоины имеют схожие черты. И поскольку все они врезаются в плато Фарсида, то их возраст – средний.

Вытянутые островки и другие детали промоин напоминают скебленд на северо-западе США – земли, смытые до коренной породы споканским потоком в конце последнего ледникового периода (10 тыс. лет назад). В то время водоем размером с одно из Великих озер прорвал ледовую дамбу и обмелел за несколько дней. На Марсе подобные катастрофы были гораздо масштабнее. Они могли быть спровоцированы вулканическими источниками тепла или общим тепловым потоком из глубины планеты. Похоже, что тепло растопило лед под слоем вечной мерзлоты и создало огромное давление, под действием которого вода прорвала преграду и вырвалась на свободу.

Из всех особенностей марсианского рельефа, связанных с водой, больше всего споров вызывают сети долин. Разбросанные по всем возвышенностям южного полушария, они напоминают сети рек на Земле. Похоже, они были сформированы поверхностными водами, подпитываемыми таянием снега или даже дождями, которые в древние времена могли идти на Марсе. Это убедительный довод в пользу того, что когда-то Красная планета была такой же теплой и влажной, как Земля. Но марсианские реки отличаются от земных, питаемых дождями. Они больше напоминают русла рек пустынных областей, берущих начало из бедных подземных источников, обычно расположенных в амфитеатрах с крутыми склонами, а не из объединения мелких притоков.

Чтобы понять природу сетей долин, необходимо выяснить их возраст. Исследования северной части возвышенностей показали, что огромное количество эрозийного материала образовалось в период интенсивной метеоритной бомбардировки Марса на ранних этапах его истории, в результате чего менялся ландшафт и распределение водотоков. Кратеры заполнялись водой и обломками;

Смерчи, проносящиеся над равнинами к северо-западу от горы Олимп, оставляют за собой пылевые полосы (правое фото). Подобное наблюдалось и в бассейне Аргир (верхнее левое фото), и к востоку от долин Маринера (нижнее левое фото). Предполагается, что вихри захватывают светлую пыль, обнажая темный грунт. Изображение справа получено спутником *Mars Odyssey*, а два нижних – *Mars Global Surveyor*.



каналы начинали связывать их в сети, но удары метеоритов постоянно нарушали этот процесс. Так, равнина Аргир диаметром около 1 тыс. км, ставшая частью системы долин, по которым вода от Южного полюса идет в каналы, пересекающие экватор, когда-то была заполнена водой. Роль воды и льда в таких системах по-прежнему не ясна, но в любом случае они кардинально отличаются от земных водных систем.

Аппарат *Mars Global Surveyor* обнаружил слоистое строение верхней коры Марса, что видно почти на всех обнажениях пород – на стенах каньонов, склонах кратеров, столовых гор и долин. Слои, различающиеся по толщине, цвету и прочности, свидетельствуют о том, что на Марсе периоды отложения осадков, образования кратеров и эрозии последовательно сменяли друг друга. Лучшее всего сохранились самые старые пласты, а лежащие выше подвергались эрозии и уносились ветрами.

Откуда они появились? Отсутствие на изображениях валунов свидетельствует о том, что слои не были образованы потоками лавы, но они могут

состоять из вулканического пепла или могли возникнуть в результате ударов метеоритов о поверхность Марса. Например, на Луне ученые обнаружили наложения кольцевых структур, соответствующие кратерам разных возрастов. Марс тоже подвергался метеоритным атакам, взрывающим его поверхность, которую затем уносили вода и ветер.

Был ли Марс голубым?

Представления ученых о ранних этапах истории Марса стали еще менее определенными, чем раньше. Сомнения зародились, когда специалисты приступили к изучению воды в жидкой фазе. Ее наличие имеет принципиальное значение для геологических процессов, изменения климата и происхождения жизни. Древние сети долин и каналов, возможно, сформированные потоками, говорят об изобилии воды. Есть свидетельства того, что когда-то на Марсе шли дожди, и значит, его атмосфера некогда была более плотной. Но космические аппараты не обнаружили

признаков карбонатных осадочных пород, которые должны были образоваться, будь у Марса плотная атмосфера из углекислого газа.

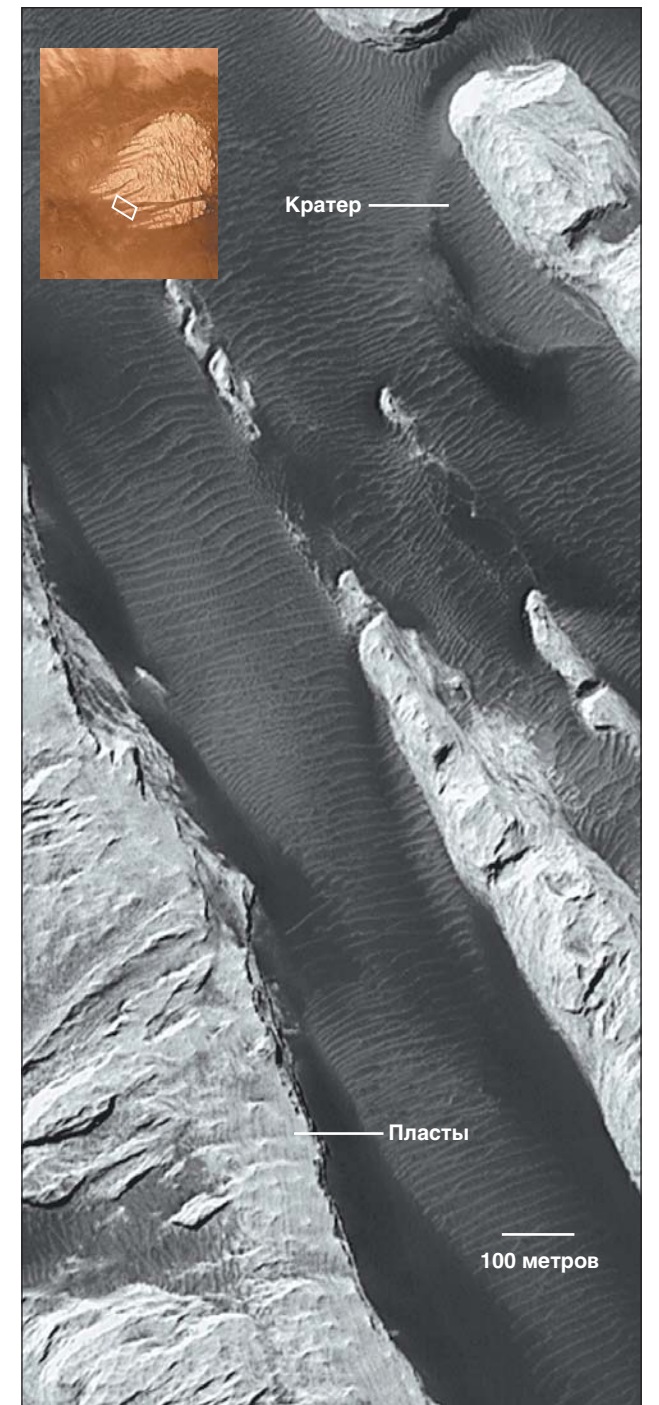
Для объяснения этого факта предложены три гипотезы. Согласно первой, атмосфера Марса на ранних этапах действительно была плотной: на планете даже могли существовать озера и океаны, свободные ото льда. Роберт Крэддок (Robert A. Craddock) из Национального музея авиации и космонавтики и Алан Ховард (Alan D. Howard) из Вирджинского университета предположили, что углекислый газ мог улечься в космос или связаться в карбонатных минералах, которые до сих пор не удалось обнаружить. Любопытно, что полученные аппаратом *Mars Odyssey* спектры выявили следы карбонатов в пыли.

Возможно, Марс всегда отличался разреженной атмосферой, был холодным, и стоячие воды покрывал лед. Стивен Клиффорд (Steven M. Clifford) из Института Луны и планет в Хьюстоне считает, что грунтовые воды могли пополняться за счет подтаивания ледников и толстого слоя вечной мерзлоты. Хед III (Head III) и Джон Мастед (John F. Mustard) из Университета Брауна указали на зависимость ледяного и пылевого покровов от географической широты – свидетельство изменений климата.

Это означает, что несмотря на то, что Марс был очень холодным, потепления могли «оживлять» планету. Перемены климата были вызваны изменениями орбиты, подобными тем, которые вызывали периоды оледенения на Земле. Согласно третьей гипотезе, климатические изменения были не столь значительны, чтобы на Красной планете потекли поверхностные воды. Мягкий климат существовал только в течение коротких периодов после падения крупных астероидов. Каждый «космический пришелец» приносил с собой насыщенное водой вещество, а при ударе об атмосферу выделялось достаточно энергии и воды, чтобы пошел дождь. Вскоре после этого Марс возвращался в прежнее замороженное состояние. А Виктор Бейкер (Victor Baker) из Аризонского университета считает, что вулканическая активность в районе Фарсиды способствовала тому, что на ранних этапах климат Марса был более мягким.

Возможно, ни одно из выдвинутых предположений не верно. Придется ждать результатов дальнейших исследований. В отличие от Земли на Марсе сохранилось много реликтовых ландшафтов, которые помогут планетологам понять условия их формирования и расшифровать геологическую историю планеты. ■

(«В мире науки», №10, 2003)



Белая скала, обнаруженная космическим аппаратом *Viking* в 1970-х гг. (вставка), – прекрасный пример того, сколь обманчивы марсианские ландшафты. Она похожа на груды соли, принесенной потоком воды, однако спектральные измерения показали, что это сцементированная марсианская пыль. Красноватая пыль, смешанная с черным песком, покрывает кратер (в правом верхнем углу снимка). Изображение, полученное с аппарата *Mars Global Surveyor*, свидетельствует об очень сложных напластовываниях геологических событий.

НЕПРЕРЫВНЫЙ МОНИТОРИНГ МАРСА

Спутники *Mars Global Surveyor* и *Mars Odyssey* обращаются вокруг Марса по орбитам, проходящим над полюсами планеты, что дает возможность приборам «сканировать» полосы дневной и ночной сторон планеты. Непрерывный мониторинг позволяет фиксировать изменения, происходящие на поверхности, в атмосфере, в гравитационном и магнитном полях.



На борту *Mars Global Surveyor* установлено пять основных приборов. Лазерный альтиметр проводит измерение геометрии Марса и топографическую съемку с точностью до 5 м. Камера передает изображения в красных и синих лучах с умеренным разрешением, а для выбранных участков – с разрешением до 1,4 м на элемент изображения (пиксел), что соответствует качеству снимков разведывательных спутников Земли, использовавшихся в 1960-х гг. Интерферометр Майкельсона обладает высоким спектральным разрешением и низким пространственным, однако достаточным для картирования минерального состава и тепловых свойств поверхности. Магнитометр измеряет магнитное поле, *Mars Odyssey* дополняет *Mars Global Surveyor*. Разрешение его камеры невелико, но она позволяет делать снимки в пяти выбранных спектральных полосах видимой области. Инфракрасная камера при низком спектральном обладает высоким пространственным разрешением. Еще один прибор измеряет потоки гамма-лучей и нейтронов, которые чувствительны к содержанию водорода непосредственно под поверхностью планеты. Таким образом, *Mars Odyssey* стал первым космическим аппаратом, позволяющим «заглянуть» в глубь Марса на 1 м. Оба аппарата, применяя разные методики, следят за состоянием атмосферы. Камеры ежедневно сканируют всю планету, подобно метеорологическим спутникам Земли. Спектрометр теплового излучения поверхности 12 раз в сутки регистрирует температуру, атмосферное давление, облачность и изменения количества пыли. Кроме того, дифракция, возникающая при прохождении радиоволн через атмосферу Марса, позволяет оценивать изменения температуры и давления.

МАРСИАНСКАЯ ОДИССЕЯ

Джордж Массер

Красная планета не жалует незваных гостей.

3 января 2004 г., 16:15 по тихоокеанскому времени, марсоход *Spirit*, спрятанный в защитной капсуле, отделился от межпланетного корабля, готовый войти в атмосферу Марса. Неделями инженеры и ученые составляли подробный список всех возможных неполадок. Взрывные болты могут не сработать в нужное время, сильный ветер может разmozжить аппарат о поверхность планеты, посадочный модуль может сесть вверх тормашками или безнадежно застрять между скалами, может исчезнуть радиосвязь. Как назло, перед самой посадкой на Марсе разразилась пыльная буря, уменьшившая плотность верхних слоев атмосферы. Поэтому раскрытие парашюта пришлось назначить на более раннее время. За четыре часа до входа капсулы в атмосферу помощник руководителя проекта Марк Адлер (Mark Adler) сказал: «Мы отправляем сложнейшую систему в незнакомую среду, но я спокоен и готов ко всему. Скорее всего потому, что недостаточно полно представляю себе положение вещей».

Такой фатализм обнадеживал. Если бы участники проекта заявили, что беспокоиться не о чем, это был бы тревожный симптом. С 1960 по 2002 г. США, Россия и Япония отправили на Марс 33 экспедиции, и 9 из них оказались успешными – не-

плохой результат для межпланетных исследований: из первых 33 полетов на Луну удачно завершились только 14. К сожалению, бывали и нелепые случаи: в 1999 г. экспедиция *Mars Climate Orbiter* провалилась из-за небрежности при переводе британских единиц в метрические и неспособности выявить ошибки в расчетах, когда космический аппарат сошел с курса. К тому же всего за неделю до того, как *Spirit* достиг Марса, британская станция *Beagle 2* нырнула в атмосферу планеты и пропала.

В 20:59 был получен сигнал, что *Spirit* начал свой головокружительный спуск. (На самом деле к этому моменту он уже опустился на планету, хотя еще не было известно как – целиком или в виде множества обломков.) В течение двух минут аппарат подвергался интенсивному нагреву в атмосфере и многократным перегрузкам. Еще через две минуты раскрылся парашют и отделилась капсула, а парой минут позже надулись подушки безопасности. Руководители экспедиции объявили, что *Spirit* сел на поверхность Марса.

В Центре управления все вскочили и стали обниматься, поздравляя друг друга. Однако вскоре стало ясно, что радоваться пока нечему: радиосигнал исчез. Роб Маннинг (Rob Manning), руководитель группы, разработавшей сценарий посадки,

вспоминает: «Когда связь пропала, возникло замешательство. Я старался взять себя в руки и действовать спокойно. Сначала процесс входа в атмосферу воспринимался как одна из многочисленных тренировок. Но когда сигнал начал замирать, все окончательно поняли, что это не репетиция».

Инженеры предупреждали, что *Spirit* может замолчать минут на десять, пока полностью не остановится. Кувыркающийся спускаемый аппарат – не лучшая платформа для передатчика. Однако прошли и 10, и 11, и 12 минут, а связи все не было. Тягостное ожидание затягивалось. Тонкая линия дрожала в самом низу дисплеев, свидетельствуя об отсутствии сигнала. Маннинг так внимательно всматривался в нее, что заметил момент, когда она вдруг подскочила к верхнему краю экрана. В 20:52, или в 14:51 по времени в месте посадки, *Spirit* сообщил о благополучном прибытии на Марс.

Одиссея Сквайрза

Словно мореплаватели, огибающие мыс Горн, ученые и инженеры вверяют себя в руки капризной судьбы, пытаюсь понять, что такое жизнь – уникальный феномен или широко распространенное во Вселенной явление. Стив Сквайрз (Steve Squyres), главный конструктор научно-исследовательской аппаратуры марсохода, 17 лет пытался добраться до Марса. Он написал и защитил кандидатскую всего за три года, а к концу 80-х гг. знал все о ледяных спутниках Юпитера, вулканических равнинах Венеры и скрывающих воду марсианских нагорьях. И все же чего-то не доставало в его карьере.

«Достижениями в нашей области мы обязаны людям, которые создают приборы, устанавливают их на космические аппараты и посылают на другие планеты, – объясняет Сквайрз. – Обработывая данные, полученные *Voyager*’ом и *Magellan*’ом, я не принимал участия в этих экспедициях, не конструировал для них аппаратуру и не калибровал ее. Я просто собирал готовую информацию и писал статьи – очень интересный и приносящий большое удовольствие способ сделать карьеру. И все же я чувствовал, что извлекаю пользу из усилий других людей. Поэтому мне очень хотелось когда-нибудь подготовить и запустить свой межпланетный аппарат».

В 1987 г. Сквайрз собрал команду, спроектировал фотокамеру и предложил NASA задействовать ее в проекте *Mars Pathfinder*. Однако от нее отказались, поскольку она имела неподходящие габариты. Тем временем Стив принял участие в разработке научного оборудования для станции *Mars Observer*. В сентябре 1992 г. она покинула околоземную орбиту, и – что бы вы думали? – радиосигнал исчез. Сквайрз, сидевший в зале управления запуском, закрыл лицо руками и произнес: «Похоже, мы потеряли его». Через 40 минут космический аппарат вновь дал знать о себе, но когда в следующем году он достиг Марса, связь оборвалась навсегда.

В 1993 г. Сквайрз и его команда предложили еще один комплект приборов, который снова был отвергнут. В разгар работы над проектом мобильной геологической лаборатории *Athena* в прессе появилось сообщение о том, что найденный в Антарктиде метеорит содержит признаки жизни, существовавшей на Марсе в далеком прошлом.

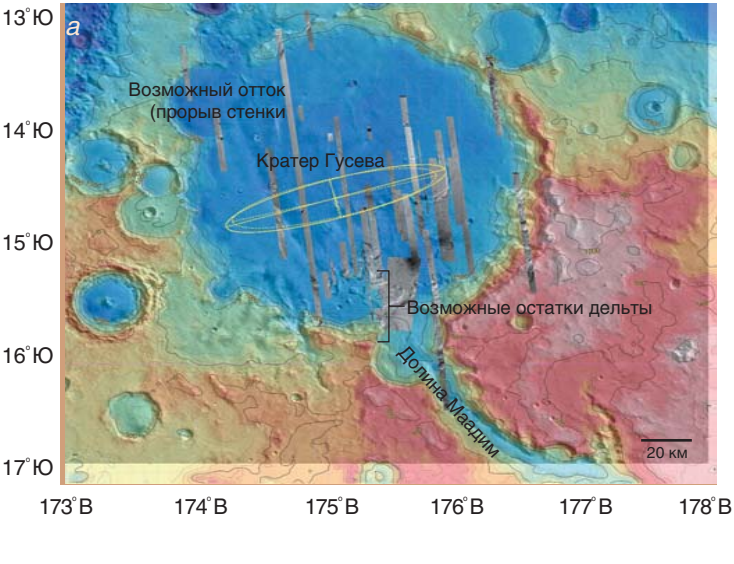
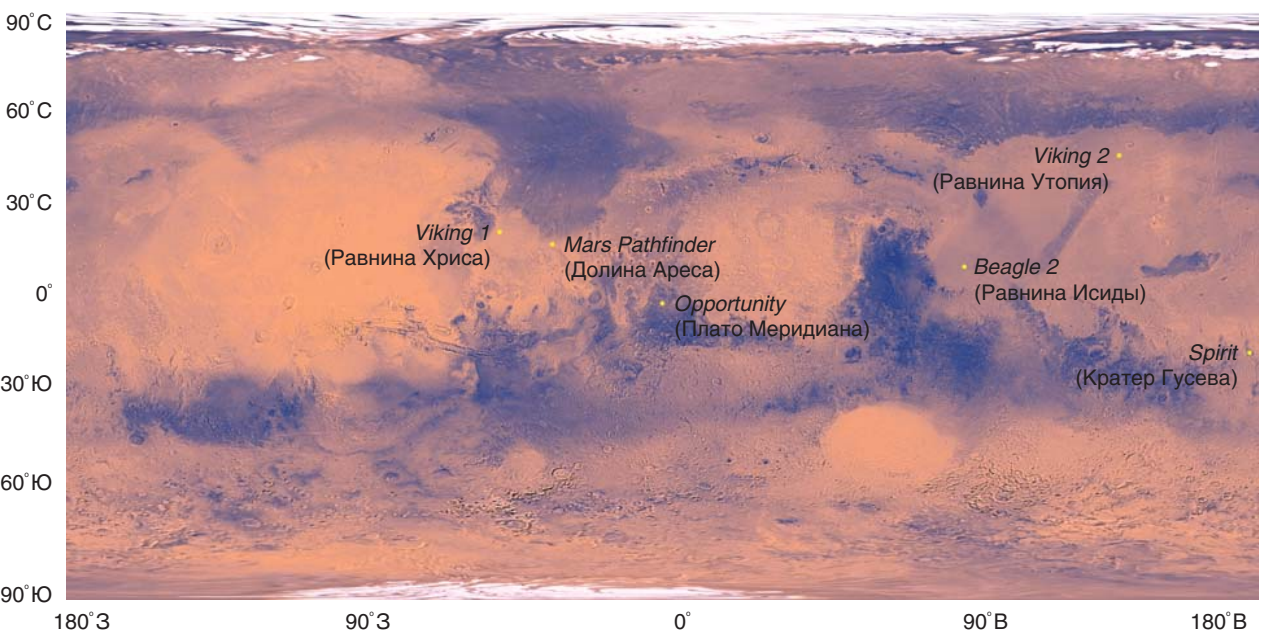


ВОСТОЧНАЯ ПАНОРАМА, снятая с места посадки *Spirit*’а: левый край соответствует направлению точно на север, а правый – точно на юг. Первая задача марсохода – доехать до кратера, расположенного в 250 м к северо-востоку от места посадки. Затем *Spirit* может отправиться к Восточным холмам высотой около 100 м, расположенным на расстоянии 3–4 км.

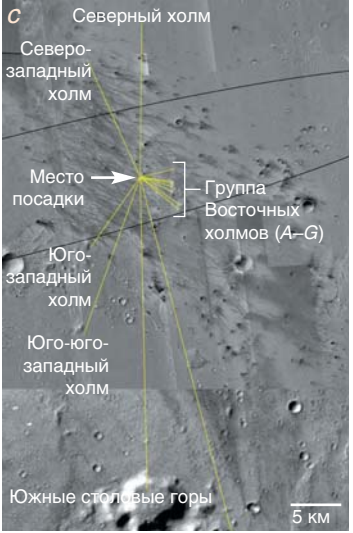
НОВЫЙ ПЛАЦДАРМ НА МАРСЕ

КРАТЕР ГУСЕВА, место посадки *Spirit'a*, – четвертая область Марса, увиденная людьми в подробностях. Кратер находится на границе между южными высокогорьями и северными равнинами и является одним из шести возможных высохших озер, обнаруженных

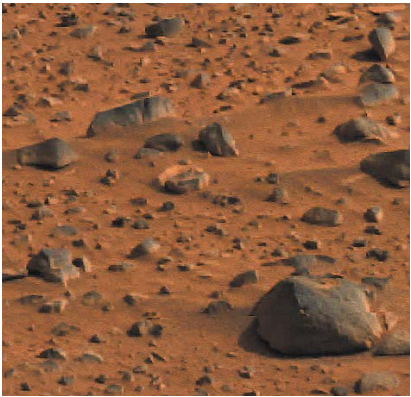
на Марсе. Места посадки злополучного *Beagle 2* и *Opportunity*, близнеца *Spirit'a*, тоже когда-то могли быть озерами. Посланный раньше *Mars Pathfinder* исследовал устье большого протока. Спускаемые аппараты *Viking'ов* сели на равнинах.



КРАТЕР ГУСЕВА находится на северной оконечности долины Маадим – каньона длиной 900 км. На обзорной топографической карте (а) вы видите полосы, для которых были получены изображения с высоким разрешением. Большая плотность кратеров говорит о преклонном возрасте этой территории, который составляет порядка 4 млрд. лет. На детальных изображениях (b и c) крупным планом показан район посадки аппарата. Эллипсами обозначена расчетная область приземления (которая со временем немного изменилась), а желтыми линиями – направления обзора севшего аппарата.



СЦЕНАРИЙ ПОСАДКИ *Spirit'a* был таким же, как и у аппарата *Mars Pathfinder* в 1997 г. *Spirit* вошел в атмосферу Марса со скоростью 5,4 км/с. Лобовое сопротивление теплового экрана затормозило аппарат до 430 м/с. Парашют помог снизить скорость до 70 м/с. Наконец тормозные ракеты погасили ее до нуля на высоте 7 м над поверхностью. (От применения ракет для торможения на всем пути отказались, так как оно потребовало бы исключительно точного измерения расстояний и сложной системы управления двигателями.) Защищенный надувными подушками, *Spirit* 28 раз отскочил от поверхности Марса и в итоге остановился в 300 м к юго-востоку от места первого касания.



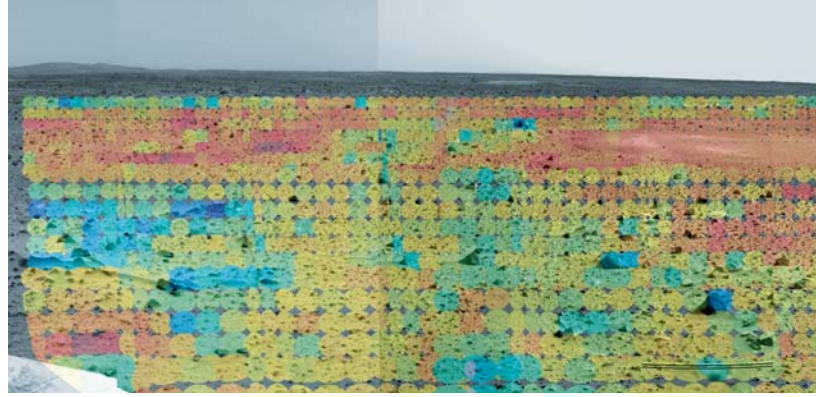
РОВНАЯ ПОВЕРХНОСТЬ КАМНЕЙ могла быть отполирована переносимыми ветром песчинками. Это один из первых цветных снимков, сделанных *Spirit'ом*.



ТЕМНЫЕ СЛЕДЫ, оставленные воздушными подушками, говорят о когезионности почвы: возможно, она представляет собой пыль, связанную электростатическими силами, или слабо сцементированную «корку» наподобие той, что обнаружил *Viking*.



СНИМКИ ВОСТОЧНЫХ ХОЛМОВ *E* (слева) и *F* (справа), сделанные с интервалом в несколько часов, иллюстрируют влияние пыли на видимость. Атмосфера над кратером Гусева оказалась более пыльной, чем прогнозировалось, поэтому марсоход нагревается сильнее, но получает меньше солнечной энергии. Холм *E* находится на расстоянии 3,1 км, а холм *F* – на расстоянии 4,2 км.



РЕЗУЛЬТАТ ТЕПЛОВОГО СКАНИРОВАНИЯ области от группы Восточных холмов до Сонной ложины. Пыль, тепловая инертность которой мала, теплее (красный цвет): она быстро нагревается солнцем. Камни обладают большей тепловой инерцией и дольше остаются холодными (синий цвет). Другие данные, полученные от инфракрасного спектрометра, свидетельствуют о присутствии карбоната магния и гидратированных минералов. Пока не ясно, как это связано с водяным прошлым кратера Гусева.

Поднятая шумиха разожгла всеобщий интерес к исследованию Красной планеты. В 1997 г. экспедиция *Mars Pathfinder* показала, на что способен марсоход, и в ноябре того же года руководство NASA одобрило план по созданию лаборатории *Athena*. Сквайрз стал руководителем 170 ученых и 600 инженеров.

Двумя годами позже NASA потеряло *Mars Climate Orbiter* и *Mars Polar Lander*. Хотя команда Сквайрза не принимала непосредственного участия в злополучных проектах, это подорвало веру в успех очередной марсианской программы. Ученые сетовали на недостаточное финансирование и излишнюю самоуверенность. В ответ NASA выделило дополнительные средства на создание марсоходов, увеличив стоимость проекта до \$ 820 млн. Наконец прошлым летом доработанные и усовершенствованные *Spirit* и его близнец *Opportunity* отправились в полет. «Нужно быть большим оптимистом, чтобы пройти через все то, что выпало нам, – заметил Сквайрз. – А чтобы подготовиться к любым неожиданностям, приходится заодно быть законченным пессимистом».

Сухая морозная планета

Пока велась разработка двух марсоходов, в области научных знаний о Марсе произошли большие перемены. Экспедиции *Mariner* и *Viking* 60-х и 70-х гг. обнаружили холодный, сухой и безжизненный мир, сохранивший следы былой активности: изящную сеть древних долин и более молодые обширные промоины. Ученые надеялись, что новые спускаемые аппараты обнаружат на Марсе минералы, для образования которых необходима вода, – карбонаты, глины и соли.

Спутники *Mars Global Surveyor* и *Mars Odyssey*, оснащенные теми же приборами, что и злополуч-

ный *Mars Observer*, занимались поисками этих веществ в течение шести с половиной лет, но практически ничего не нашли. Зато они обнаружили пласты оливина – минерала, который жидкая вода должна была разрушить. Вместе с тем были замечены промоины, ложа древних озер и образующийся в жидкой воде железоксидный минерал серый гематит (не путать с красным гематитом, т.е. ржавчиной). На планете существуют обширные резервуары льда и присутствуют следы геологической и ледниковой активности. Ученые в полном недоумении.

«Сейчас идут ожесточенные споры о том, каковы были условия на молодом Марсе, – пояснил геолог из JPL Мэтт Голомбек (Matt Golombek), возглавлявший научную группу проекта *Pathfinder*. – Запуск марсоходов – это первая попытка оказаться непосредственно на поверхности планеты и окончательно разобраться в ее прошлом».

Крайне осторожные разработчики проекта *Viking* послали два спускаемых модуля в самые скучные области Марса. (Справедливости ради нужно сказать, что, располагая аппаратом за \$3,5 млрд., который легко может опрокинуться, вы, вероятно, поступили бы так же.) Более смелая экспедиция *Pathfinder'a*, в сущности, тоже была всего лишь испытательным полетом. Команда Голомбека просто хотела исследовать как можно больше горных пород и мало заботилась о том, где сядет их детище. *Spirit* и *Opportunity* – первые спускаемые аппараты, которые предполагалось доставить в места, действительно интересующие ученых.

С орбиты кратер Гусева (новый дом *Spirit'a*) выглядит как дно высохшего озера с присущей ему тонкой слоистостью, остатками речного устья

и извилистыми террасами. Он расположен у северной оконечности долины Маадим, одной из самых больших на Марсе. *Opportunity* отправился на поиски серого гематита, который сосредоточен на Полуденной равнине. Геолог Фил Кристенсен (Phil Christensen) из Аризонского университета недавно исследовал топографию обнажений гематита и установил, что минерал образует тонкий плоский пласт. Таким образом, Полуденная равнина тоже могла быть дном озера.

Проверить эти предположения можно только на месте. Так, поскольку ветер не может переносить песчинки больше 5 мм, обнаружение более крупных зерен будет свидетельствовать о действии другого фактора эрозии – возможно, воды. Когда гематит образуется в озере (а не, скажем, в горячем источнике), зачастую в химической реакции участвует другой минерал – гетит, который могут обнаружить спектрометры марсоходов. Так шаг за шагом мы разберемся, почему Марс напоминает Землю и вместе с тем сильно отличается от нее.

Марс глазами землян

3 января, в 23:30 по тихоокеанскому времени, примерно через три часа после посадки, *Spirit* начал передавать первые данные, ретранслируемые искусственным спутником Марса *Odyssey*. Увиденное поразило наблюдателей, привыкших по опыту прежних экспедиций, что изображения строятся постепенно, строка за строкой, как будто поднимается занавес, скрывающий новый мир. На экране вспыхнули первые картины, и в зале управления появился кратер Гусева.

Основные камеры *Spirit'a* установлены на мачте высотой около 1,5 м, поэтому принимаемое

изображение соответствует тому, что вы увидели бы, стоя на поверхности Марса. И все же кое к чему предстояло привыкнуть. Джим Белл (Jim Bell), работавший над цветной панорамной камерой с 1994 г., пояснил: «В ходе проводившихся нами испытаний я понял важную вещь: то, что видит марсоход, значительно отличается от того, что вы увидели бы своими глазами. Плоское изображение на экране мешает вам воспринимать глубину. К тому же в том чужом мире нет ничего, что помогало бы определять расстояния и габариты объектов: ни деревьев, ни домов, вообще ничего привычного». Перед наблюдателями возник злобещий ландшафт: камни, впадины, холмы и столовые горы. Красота пейзажа завораживала.

Однако космические исследования подобны гаданию на ромашке: работает, не работает, работает, не работает... Никогда не знаешь, чем все кончится. Ранним утром 21 января ученые готовили *Spirit* к проведению анализа горных пород в скалах Адирондак. Аппарату была дана команда проверить инфракрасный спектрометр. *Spirit* подтвердил ее получение, но затем замолчал. За двое суток инженеры предприняли больше десятка попыток оживить его. Когда им наконец удалось восстановить связь, положение оказалось серьезным. Хотя неотвратимой опасности не было, *Spirit* перезагружался больше 60 раз, пытаясь устранить сбой, который не удавалось диагностировать. Руководитель проекта Пит Тейзинджер (Pete Theisinger) объявил: «Шансы на то, что аппарат полностью восстановится, невелики. Но и вероятность его окончательного выхода из строя тоже мала». А для космических исследований это уже успех. ■

(«В мире науки», №6, 2004)

ЗАПАДНАЯ ПАНОРАМА: угол обзора – 180° от южного до северного направления. Светлый участок – неглубокая Сонная лощина диаметром около 9 м, находящаяся на расстоянии 12 м. Темные пятна на пыльной поверхности могут быть следами, которые оставил кувыркающийся спускаемый аппарат.

ЮЖНЫЕ СТОЛОВЫЕ
ГОРЫ 1 и 2

ЮГО-ЮГО-ЗАПАДНЫЙ
ХОЛМ

ЮГО-ЗАПАДНЫЙ
ХОЛМ

САСИМИ

АДИРОНДАК

НАПРАВЛЕНИЕ СЪЕЗДА

СОННАЯ ЛОЩИНА

СЕВЕРО-ЗАПАДНЫЙ ХОЛМ

НЕВИДИМКИ ПЛАНЕТНЫХ СИСТЕМ

Дэвид Ардила

Солнечная система состоит не только из планет.
В ней есть также астероиды и кометы.
А существуют ли они в других планетных системах?

Все ли звезды в нашей Галактике окружены планетами или Солнце – исключение из общего правила? На этот важный вопрос современная астрономия пока не дала ответа. В течение последних девяти лет, наблюдая колебательные движения звезд, вызванные воздействием на них планет, астрономы обнаружили не менее 120 планет. Однако таким способом можно зафиксировать только самые массивные и сравнительно близкие к звездам планеты. Если применить этот метод к Солнечной системе, то можно было бы обнаружить Юпитер и, возможно, Сатурн, но более мелкие тела, которые делают Солнечную систему столь богатой и разнообразной – астероиды, кометы и планеты земного типа, – остались бы незамеченными.

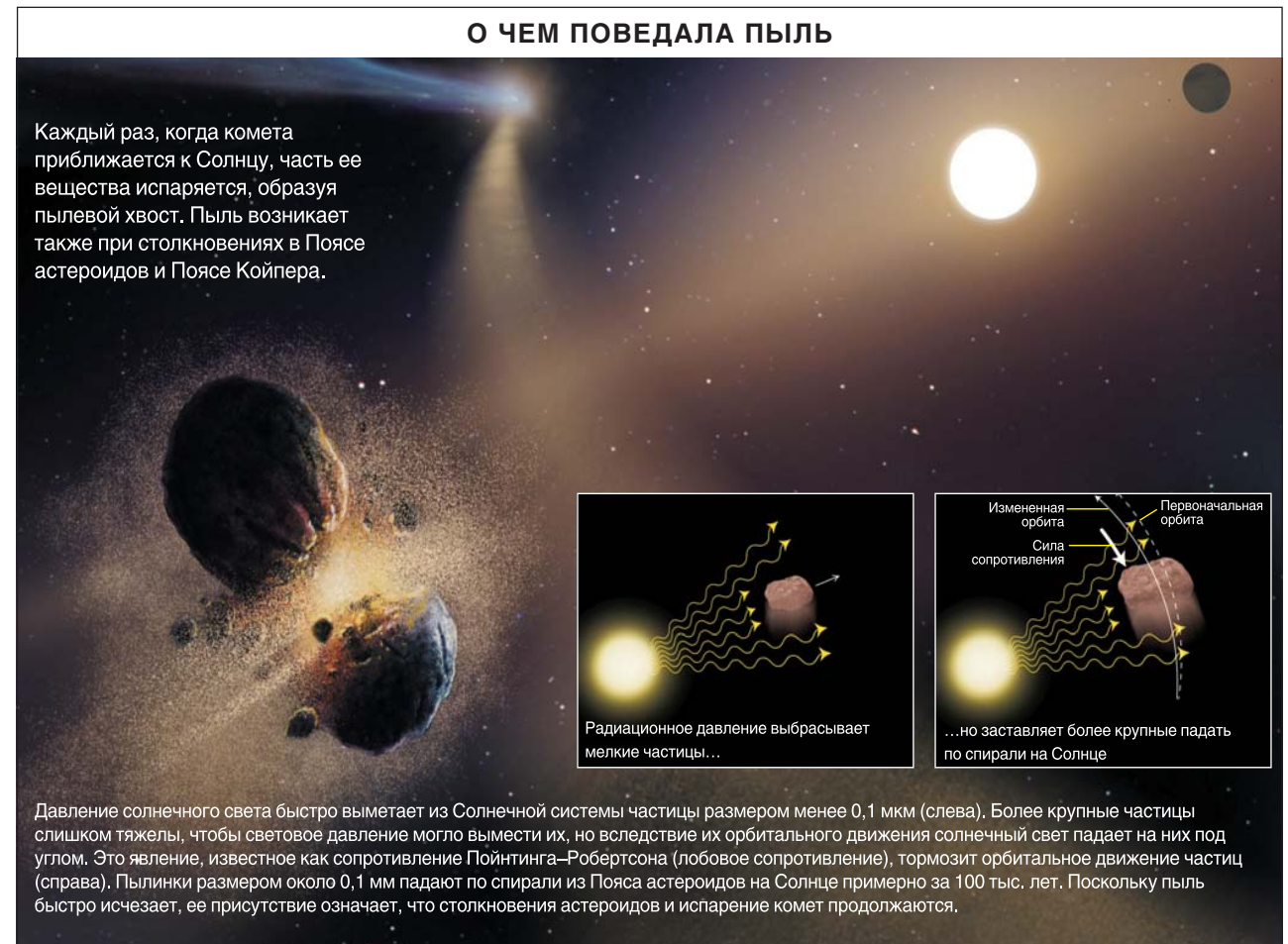
Как же обнаружить малые тела и воссоздать полную картину разнообразия планетных систем? Если посмотреть весной на западную часть неба сразу после захода Солнца, то можно увидеть область слабого свечения, простирающуюся вверх от горизонта. Зодиакальный свет возникает в результате отражения солнечного

света от частиц межпланетной пыли в Солнечной системе. Светящийся треугольник вытянут в направлении траектории видимого движения Солнца, из чего можно заключить, что пылевое облако имеет форму диска, лежащего в плоскости орбиты Земли. Но наличие этой пыли – загадка! Ведь ее частицы столь малы (их размеры, согласно оценкам, от 20 до 200 мкм), что давление солнечного света должно было бы заставить самые крупные из них быстро упасть на Солнце и сгореть, а мельчайшие частицы были бы выметены световым давлением за пределы Солнечной системы. Поэтому присутствие пыли можно объяснить лишь тем, что она постоянно пополняется.

Астрономы полагают, что пылинки образуются в результате столкновений астероидов и выброса вещества комет при их прохождении вблизи Солнца. В Главном поясе астероидов, расположенном между орбитами Марса и Юпитера, столкновения довольно часты. В результате выбрасывается пыль, а столкнувшиеся тела могут дробиться на осколки, которые будут еще миллионы лет тереться друг о друга, порождая еще больше пыли. Что касается комет, то Солнце испаряет грязный лед на их поверхности, образуя эффектные хвосты.

Образующаяся пыль распространяется за пределы орбиты Юпитера. Несмотря на то что ее полная масса составляет всего лишь тысячные доли массы Луны, свет, отраженный от пыли, примерно в 100 раз интенсивнее отраженного планетами. Причина этого состоит в большой суммарной площади поверхности пылевых частиц.

Аналогичный процесс происходит и в окрестностях других звезд. Двадцать лет назад инфракрасный астрономический спутник *IRAS* (*InfraRed Astronomy Satellite*) в ходе регулярных калибровочных наблюдений Веги обнаружил признаки существования диска из мелких час-



тиц вокруг этой звезды. В начале 1990-х гг. дополнительный анализ данных *IRAS* позволил предположить существование подобных пылевых дисков еще примерно у сотни звезд, однако непосредственно их наблюдать не удавалось. Лишь в конце 1990-х гг. наземные и орбитальные обсерватории дали детальные изображения нескольких дисков. Самые свежие данные поступили от Усовершенствованной обзорной камеры (*Advanced Camera for Surveys, ACS*) Космического телескопа «Хаббл» в 2002 г. и от Космического телескопа «Спицер» (*Spitzer Space Telescope*) – инфракрасного двойника «Хаббла», запущенного в августе 2003 г.

Эти данные оказались совершенно неожиданными. Некоторые диски выглядят отнюдь не бесструктурными: одни из них оказались гигантским подобием колец Сатурна, а в других обнаружили сгустки, дыры и спирали, которые могут быть вызваны невидимыми гигантскими планетами. В Солнечной системе астероиды и кометы сосуществуют с планетами земного типа и планетами-гигантами. Наличие дисков может указы-

вать на присутствие астероидов или комет, являющихся побочным продуктом формирования планет. Либо это обломки, возникшие при разрушении более крупных объектов (таково большинство астероидов), либо планетезимали – «кирпичи», из которых строятся планеты, часть которых так и не объединилась в более крупные тела (таковы кометы).

До сих пор астрономы, изучавшие вблизи лишь Солнечную систему, не могли понять, применимы ли их теории к другим планетным системам. Наблюдения пылевых дисков вокруг звезд различных масс и возрастов помогут определить место Солнечной системы в ряду других систем.

Обломки повсюду

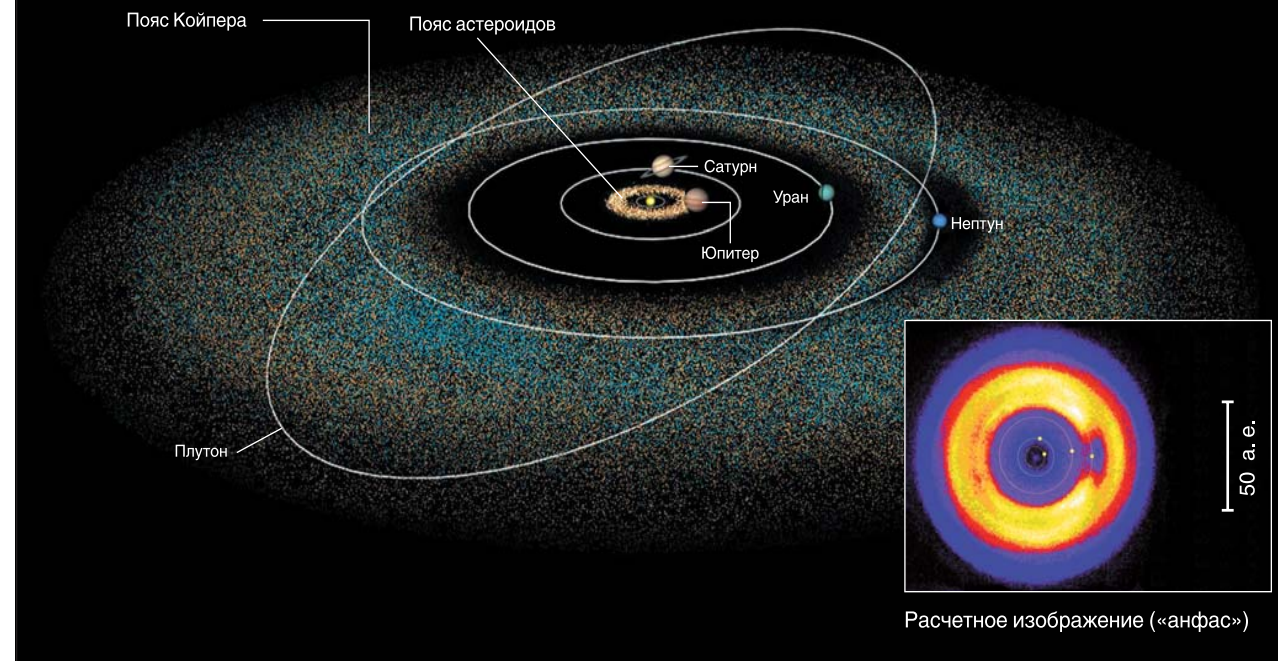
IRAS проработал всего 10 месяцев в 1983 г. За это время он провел полное обследование неба в средней и дальней инфракрасных областях спектра в диапазоне длин волн от 12 до 100 мкм. Наблюдения с поверхности Земли в этом диапазоне невозможны, поскольку земная атмосфера

ОБЗОР: НЕВИДИМЫЕ ПЛАНЕТЫ

- Важнейшее достижение астрономии в предыдущем десятилетии – открытие планет за пределами Солнечной системы.
- Наблюдатели еще не видят всего богатства космических тел, столь важных для изучения планетных систем, например, остатков вещества, из которого построены большие планеты.
- Чтобы узнать о мелких телах, астрономы исследуют пыль, возникающую при их столкновениях. Они обнаружили более 100 звезд, окруженных пылевыми дисками, и получили изображения десятка из них. Результаты изучения этих дисков позволяют предположить, что формирование планет в других областях Галактики происходит почти так же, как в нашей Солнечной системе.

ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ ПЛАНЕТ

Пылевые структуры не только указывают на существование астероидов и комет, но и позволяют обнаружить планеты. В Солнечной системе на распределение пыли в Поясе Койпера влияет притяжение Нептуна. Внешний наблюдатель увидел бы на инфракрасном изображении (врезка) пробелы и сгустки, из чего заключил бы о существовании гигантской планеты. Изображение, смоделированное на компьютере, очень похоже на то, что видели астрономы вокруг других звезд.



поглощает почти все излучение с такими длинами волн. Чтобы вещество излучало преимущественно в этом диапазоне, оно должно иметь довольно низкую температуру – от 50 до 100 К. Астрономы ожидали, что обычные звезды, поверхность которых разогрета до тысяч кельвинов, должны быть почти невидимы для *IRAS*.

Однако спутник показал, что некоторые звезды интенсивно излучают в этом диапазоне, испуская в десятки и даже сотни раз больше, чем обычные звезды. Такой избыток ИК-излучения наводит на мысль, что они окружены пылью. Предполагается, что свет звезды нагревает пыль, которая испускает ИК-излучение, создавая локальный максимум в спектре излучения звезды (см. рис. на стр. 171). Эти звезды настолько стары, что пыль не может быть остатком материала, из которого они сформировались, поэтому должна образовываться в результате столкновений или испарения невидимых тел.

Пространственное разрешение спутника *IRAS* было недостаточным для прямого наблюдения большинства пылевых дисков. Все обнаруженные

диски, кроме четырех, представлялись бесструктурными точками, но их яркость позволяла приближенно оценить их размеры – от 100 до 1000 астрономических единиц (а. е.), что в 20–200 раз больше расстояния от Солнца до Юпитера. Анализ их спектра показал, что состав этих дисков близок к веществу комет Солнечной системы, а также позволил оценить геометрию пылевых дисков. Те из них, которые наблюдал спутник *IRAS*, имели неоднородную температуру: более близкие к звезде части были теплее, чем периферийные зоны. Интересно, что в большинстве дисков не обнаружено пыли с температурой, заметно превышающей 200 К, что оказалось ниже ожидаемой (если бы диски простирались до непосредственной окрестности звезд). Из этого следует, что диски имеют отверстия в центре. Для астрономов это стало первым указанием на то, что диски могут иметь структуру, предполагающую присутствие невидимых планет.

В 1984 г., после открытий, сделанных спутником *IRAS*, Брэдфорд Смит (Bradford A. Smith), работавший тогда в Аризонском университете,

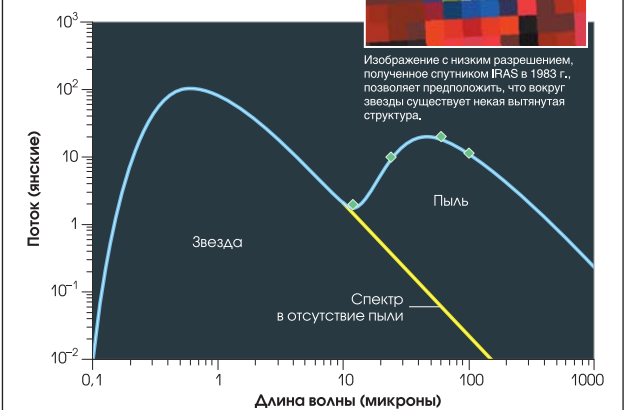
и Ричард Террил (Richard J. Terril) из Лаборатории реактивного движения наблюдали спомощью 2,5-м телескопа обсерватории Лас-Кампанас в Чили звезду β Живописца. Чтобы обнаружить слабо излучающее вещество пылевого диска на фоне яркого свечения звезды, они применили коронографическую маску – маленький диск в фокусе телескопа, блокирующий прямое излучение звезды. Изображение в видимом свете выявило величественный диск, простирающийся до расстояний более 400 а. е. от звезды. Более поздние наблюдения дали для радиуса этого диска оценку в 1400 а. е.

Расстояние до β Живописца – всего 60 световых лет. Ее диск очень велик и ярк и виден с ребра, что увеличивает его кажущуюся яркость и существенно облегчает наблюдения. К сожалению, применение коронографического метода не помогло астрономам различить другие диски. При наблюдении с Земли в видимом свете звезды имеют некий размер, определяемый размытием изображения в земной атмосфере. Поэтому маска коронографа, заслоняя изображение звезды, обычно закрывает и весь диск. В дальней ИК-области, где длины волн больше, звезды светят слабее, так что обнаружить диски легче. Но излучение этих длин волн поглощается земной атмосферой. Излучение с еще большей длиной волны, приближающейся к миллиметру, может быть обнаружено с поверхности Земли, но до конца 1990-х гг. инструменты, способные регистрировать это субмиллиметровое излучение, обладали плохим разрешением и низкой чувствительностью.

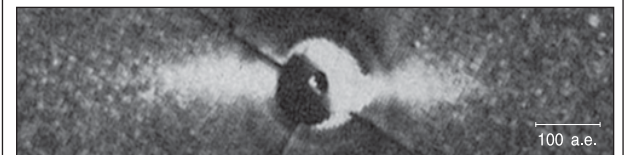
Прорыв произошел, когда была создана Матрица субмиллиметровых болометров общего пользования (*Submillimeter Common-User Bolometer Array, SCUBA*) – высокочувствительная камера, способная детектировать излучение с длинами волн порядка миллиметра. В 1997 г. группа под руководством Уэйна Холланда (Wayne S. Holland) и Джейн Гривз (Jane S. Greaves), работавших тогда в Объединенном астрономическом центре на Гавайях, использовала камеру *SCUBA*, смонтированную на телескопе «Джеймс Клерк Максвелл» Обсерватории Мауна-Кеа. Полученные изображения нескольких звезд, наблюдавшихся ранее с помощью спутника *IRAS*, подтвердили существование дисков не только у Живописца, но и у нескольких других звезд. С тех пор при помощи *SCUBA*, наземных детекторов ИК-излучения и космического телескопа «Хаббл» было обнаружено еще около дюжины дисков. Но в некоторых случаях избыток ИК-излучения был

 β ЖИВОПИСЦА

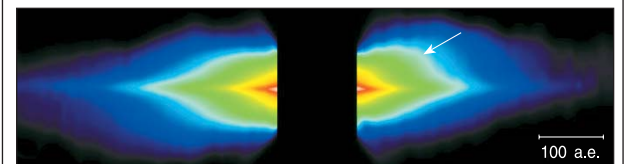
Пылевой диск вокруг звезды β Живописца, отстоящий от Земли на 63 световых года, изучен лучше других дисков, расположенных вне Солнечной системы



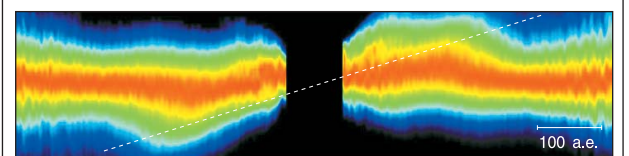
Спектр излучения β Живописца отличается от такового для обычных звезд. Избыток излучения в инфракрасной области – признак существования пыли. Ромбики – данные измерений *IRAS*.



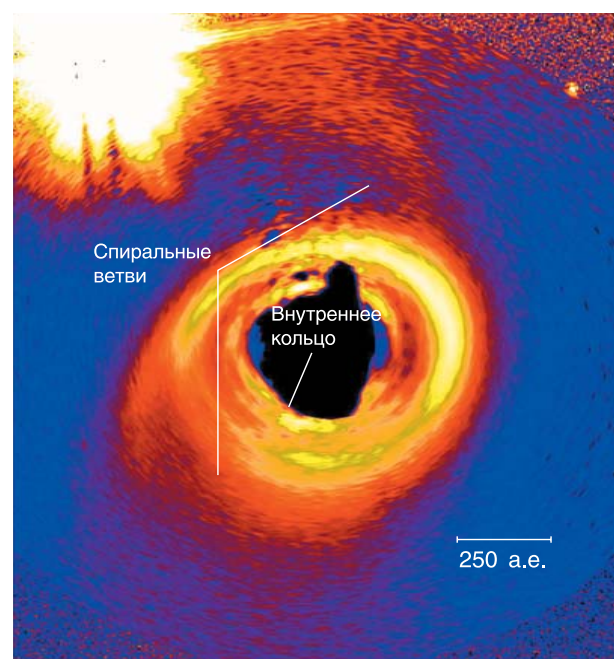
Более детальное изображение в видимом свете получено в 1984 г. Виден диск, обращенный к наблюдателю ребром. Темные прямые линии и кольца – это артефакты аппаратуры, используемой для затенения самой звезды



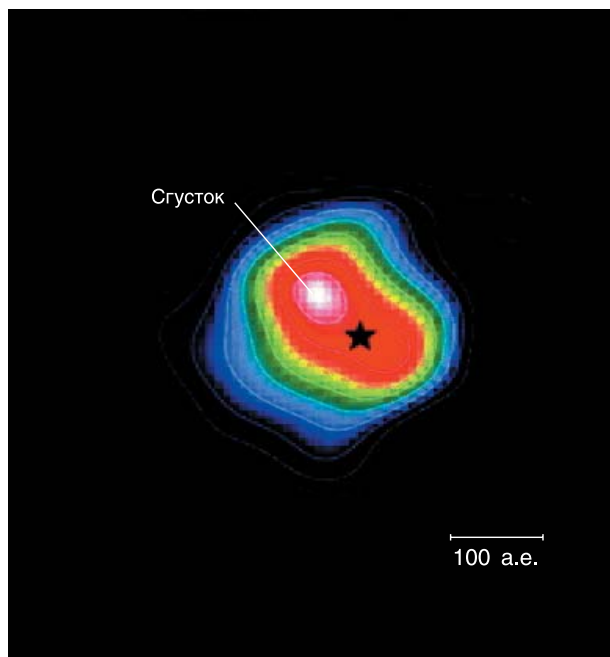
Изображение в видимом свете, полученное космическим телескопом «Хаббл» в 1995 г. Видно «вздутие» диска (показано стрелкой), возможно, вызванное коричневым карликом или проходящей звездой. Цветом передана яркость.



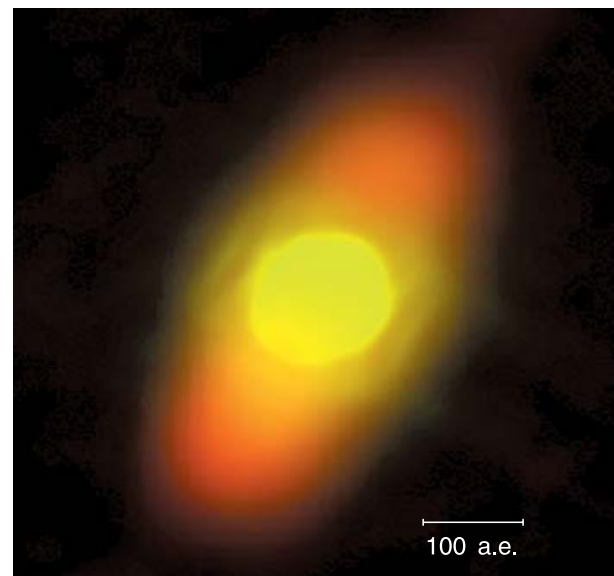
На изображении, полученном «Хабблом» в 1997 г., видно искривление (пунктирная линия) внутренней части диска. Эта особенность позволяет предположить присутствие гигантской планеты на наклонной орбите.



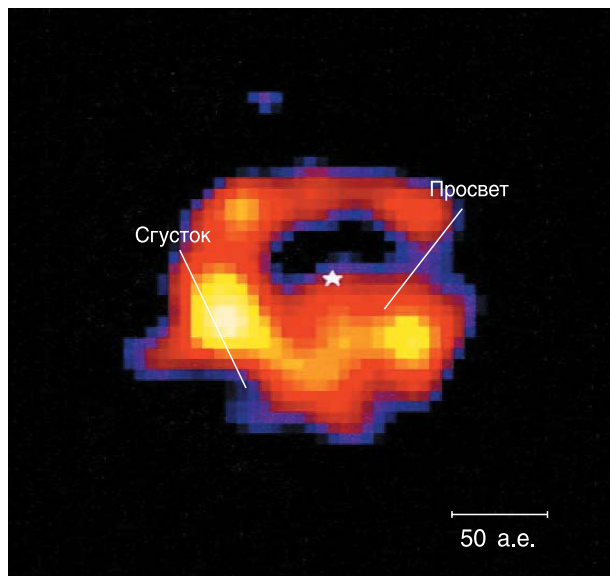
Изображение пыли вокруг звезды *HD 141569*, удаленной от Земли на 330 св. лет. Видны две большие спиральные ветви. Они могли быть созданы звездой-компаньоном. Внутреннее кольцо может быть признаком существования невидимой планеты. Цвета характеризуют плотность вещества, наблюдаемого в видимом свете.



Система Веги (25 св. лет от Земли). Черной звездочкой в центре отмечено положение самой звезды. По данным компьютерного моделирования, яркий объект (левее и выше звезды) — это планета с массой, вдвое большей массы Юпитера. Изображение получено в субмиллиметровых волнах. Масса Веги, как и масса *HD 141569*, вдвое больше массы Солнца.



Система Фомальгаута (25 св. лет от Земли). Ее левая нижняя сторона крупнее правой верхней, что, возможно, обусловлено недавним столкновением астероидов. Центр кольца заполнен теплой пылью, подобной зодиакальной пыли в Солнечной системе. Изображение получено в дальнем инфракрасном излучении.



Система ϵ Эридана (10 св. лет от Земли). Сгустки и дыры могут быть результатом воздействия планеты с массой около массы Сатурна, движущейся по вытянутой орбите. Спектральные данные позволяют предположить существование другой планеты, находящейся ближе к звезде. Изображение получено в субмиллиметровых волнах.

вызван фоновыми объектами или близлежащими межзвездными облаками, не связанными с наблюдаемой звездой.

Кометные рои

В начале 1990-х гг. астрономы получили подтверждение существования Пояса Койпера — зоны ледяных тел, простирающейся от орбиты Нептуна за орбиту Плутона, предположения о существовании которой выдвигались уже давно. Соударения в этом поясе порождают второй, более холодный пылевой диск, который трудно увидеть с Земли, поскольку он, как и мы, погружен в яркий ореол теплого зодиакального света.

Представляется, что аналогом пылевых дисков вокруг большинства звезд является именно Пояс Койпера, а не зодиакальный диск. Действительно, в некоторых случаях астрономы обнаруживали у звезд кроме большого холодного диска еще и более слабый теплый диск — аналог нашего зодиакального.

Хотя койперовский диск простирается на более далекое расстояние от Солнца, чем зодиакальный, и содержит, вероятно, раз в десять больше пыли, он все же гораздо меньше других. Так, диск вокруг Живописца содержит по крайней мере в 10 тыс. раз больше пыли, чем Пояс Койпера в Солнечной системе. Частота столкновений планетезималей, приводящих к образованию пыли, пропорциональна квадрату числа объектов; следовательно, при равенстве всех прочих условий Живописца должна содержать в 100 раз больше планетезималей, чем Солнце.

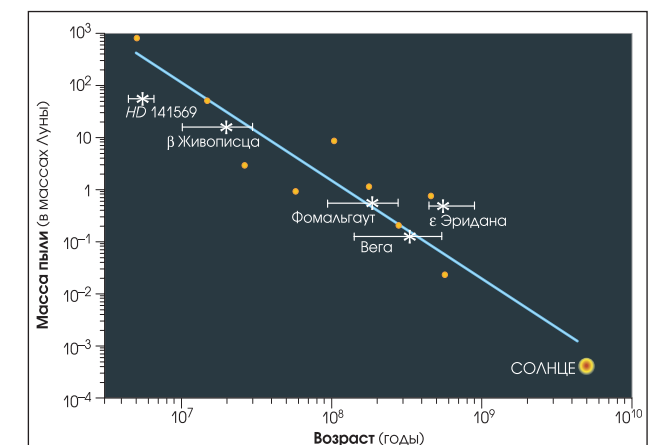
Астрономы полагают, что количество пыли связано с возрастом системы. Земле 4,5 млрд. лет, а Живописца — всего 15 млн. Из результатов наблюдений можно сделать вывод, что количество пыли со временем уменьшается (см. рис. справа). Причина этого, вероятно, в том, что «популяция» исходных планетезималей убывает. Те самые столкновения, при которых образуется пыль, разрушают сталкивающиеся тела. Более того, гравитационные взаимодействия с планетами могут либо выбрасывать астероиды и кометы за пределы планетной системы, либо затягивать их к центральной звезде. Некоторые линии поглощения в спектре Живописца то появляются, то исчезают, и астрономы предполагают, что они обусловлены кометами, которые падают на звезду и сгорают. За год может произойти до 200 таких событий. Вероятно, в молодой Солнечной системе тоже было много астероидов и комет, число которых со временем уменьшилось.

У большинства звезд, в спектре которых виден избыток ИК-излучения, массы больше, чем у Солнца. Возможно, это связано с тем, что более массивные звезды легче обнаружить, т.к. они горячее и поэтому должны сильнее нагревать пыль. Они также могли возникать из более крупного диска, содержащего больше пыли. Остается неясным, в какой степени выводы, сделанные на основе этих наблюдений, могут быть применимы к наиболее общему классу систем. В частности, более горячие звезды должны быстрее рассеивать диски, из которых они получились, что влияет на скорость формирования планет и эволюции планетезималей.

Невидимые планеты

А есть ли в обнаруженных системах кроме планетезималей еще и настоящие планеты? Даже в самых молодых системах гигантские планеты, состоящие в основном из газа, или уже сформировались, или никогда не смогут образоваться, т.к. сейчас в этих дисках слишком мало газа. Похоже, что диски и планеты вообще избегают друг друга. Из сотни звезд, у которых астрономы обнаружили планеты, только две имеют инфракрасный избыток в спектре, указывающий на присутствие пылевого диска.

Однако сами диски могут свидетельствовать о присутствии планет. Кометный «дождь», падающий на Живописца, трудно объяснить, если



По мере старения звезды окружающая ее пыль убывает, вероятно, потому, что поставляющие ее астероиды и кометы постепенно разрушаются. Это соотношение позволяет предположить, что все системы эволюционируют в основном одинаково. Данные получены Инфракрасной космической обсерваторией. Оранжевыми точками показаны звездные скопления. Точка «Солнце» представляет только зодиакальную пыль. Количество пыли в Поясе Койпера неизвестно, но оно может быть раз в десять больше.

в системе нет планет, оказывающих гравитационное воздействие. Более того, на некоторых изображениях дисков обнаруживаются не только крупномасштабные структуры – кольца и сгустки, но и большие спирали. Планеты с наклонными орбитами могут затягивать пыль на свои орбиты, искажая этим форму диска. Они способны и выметать пыль, образуя полости и кольца, или формировать след, который выглядит как сгусток; наша Земля оставляет такой отпечаток в зодиакальной пыли.

Но доводы о существовании планет в этих дисках не вполне убедительны. Планеты, способные формировать наблюдаемые особенности, должны располагаться на большем расстоянии, чем Нептун от Солнца; но могут ли они формироваться так далеко? Возможно, что некоторые планеты появились на меньших расстояниях от звезды, а затем удалились от нее (такое предположение высказывалось и для Нептуна). Для сохранения момента импульса в этом случае необходимо, чтобы другая большая планета вроде Юпитера приблизилась к звезде. Однако признаков присутствия такого второго объекта пока нигде не обнаружено. Полученные данные неоднозначны, и различные группы исследователей пока не пришли к согласию о положениях и массах планет.

Некоторые наблюдаемые особенности можно объяснить не только гравитационным притяжением планет. Ряд астрономов считает, что кольца есть во всех молодых системах. Когда планетезимали растут и объединяются, они разрушают диски, увеличивая частоту соударений и скорость образования пыли. Другие говорят, что кольца пыли могут спонтанно формироваться на краях газовых дисков. Большие градиенты давления на краю диска тормозят пылевые частицы, которые иначе были бы выброшены за пределы планетной системы.

В 2003 г. мои коллеги из Университета Джонса Гопкинса и я с помощью коронографа камеры ACS на космическом телескопе «Хаббл» наблюдали звезду *HD 141569*. Полученные ранее изображения показали, что у нее есть два кольца. На наших же картинках обнаружили длинные спиральные ветви пыли, похожие на те, что наблюдаются в спиральных галактиках. Это позволяет предположить, что исследуемые ранее кольца – фрагменты спиралей. У звезды *HD 141569* есть две звезды-компаньона. Считается, что около 100 тыс. лет назад они прошли близко к диску, разрушив и растянув его. Это и могло породить наблюдаемые спирали. Ряд ученых утверждают, что диск сформировали многократные

взаимодействия со звездами-компаньонами. Следовательно, некоторые особенности пылевых дисков могли возникнуть под влиянием не планет, а иных тел.

Неоднозначность толкования обусловлена тем, что у нас очень мало четких изображений дисков, и каждое из них – особый случай. В декабре 2003 г. Карл Штапельфельдт (Karl R. Stapelfeldt) из Лаборатории реактивного движения опубликовал первые изображения пылевого диска вокруг звезды Фомальгаут, полученные телескопом «Спицер», который оснащен детекторами дальнего ИК-излучения того же диапазона длин волн, что и детекторы спутника *IRAS*, но в 1000 раз более чувствительными. Они способны обнаружить малое количество пыли и, следовательно, изучить большее число дисков. На изображении, полученном в излучении с длиной волны 70 мкм, форма диска видна достаточно хорошо – он представляет собой видимое с ребра кольцо радиусом почти 200 а.е. Одна его сторона ярче другой, вероятно, из-за недавнего столкновения астероидов, а возможно, это следствие гравитационного влияния некой невидимой планеты. На длине волны 24 мкм, видна концентрация сравнительно теплого вещества вблизи звезды – явное подобие нашего зодиакального облака. Это наводит на мысль о том, что у Фомальгаута есть нечто, похожее на пояс астероидов в Солнечной системе.

Наличие пылевых дисков подтвердило, что рядом с другими звездами, а не только у Солнца, есть астероиды и кометы, возникшие в процессе формирования планет. Отсюда следует, что Солнечная система, в принципе, подобна другим планетным системам. Однако даже наименьший из обнаруженных пылевых дисков содержит в 50 раз больше пыли, чем имеется в Солнечной системе. В чем причина различия? Либо планеты Солнечной системы уже вытеснили большинство планетезималей, либо Солнце изначально возникло с необычно малым диском. Или, может быть, чувствительность современной аппаратуры недостаточна для обнаружения истинных аналогов нашей Солнечной системы?

Астрономам еще только предстоит создать детальную и согласованную картину формирования и эволюции планет вокруг звезд различных масс. Дальнейшие наблюдения с помощью космических телескопов «Хаббл» и «Спицер», а также наземных телескопов, помогут узнать, насколько важное место занимает Солнечная система среди других планетных систем. ■

(«В мире науки», №7, 2004)

«ЗВЕЗДОПОДОБНЫЕ» БРОДЯГИ

Юрий Чудецкий

Из темных недр безграничного космоса на огромной скорости мчится громадный астероид, грозя гибелью всему живому на Земле. Удар – и...

До поры до времени это всего лишь страшная сказка, рассказанная на ночь беспечному человечеству. Однако любая сказка – «добрым молодцам урок».

Не так давно, около года назад, мир облетела сенсационная весть о том, что 1 февраля 2019 г. астероид 2002 NT7 диаметром более 2 км может столкнуться с Землей. Вскоре, правда, ученые сообщили, что нашей планете на сей раз ничто не угрожает и конец света откладывается по крайней мере до 1 февраля 2060 г., когда этот объект снова появится в наших краях. Однако специалисты в области космических исследований сходятся во мнении, что земляне не вправе пренебрегать угрозой космических столкновений. Что мы знаем о небесных телах, несущих потенциальную опасность? Кто они, таинственные и грозные пришельцы из глубин Вселенной?

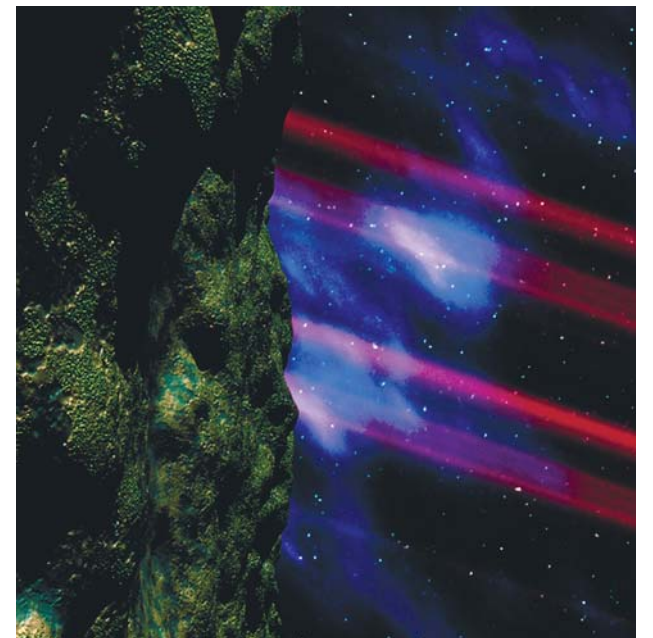
Итак, астероиды – это твердые каменные небесные тела, которые, подобно планетам, движутся по околосолнечным эллиптическим орбитам, но имеют меньшие размеры, а потому их еще называют малыми планетами. Их диаметры – от нескольких десятков метров до 1000 км (размер самого крупного астероида – Цереры).

Термин «астероид» («звездopodobный») введен английским астрономом XVIII в. Уильямом Гершелем для характеристики внешнего вида этих объектов при наблюдении в телескоп: различить видимые диски даже у самых больших астероидов невозможно, и они выглядят как сияющие в ночи звезды, хотя, как и другие планеты, ничего не излучают, а лишь отражают солнечный свет.

Гости из Вселенной

Вблизи внутреннего края главного пояса астероидов, расположенного между Марсом и Юпитером, существуют орбиты, далеко выходящие за пределы своего «ареала распространения», способные пересекаться с путями следования Марса, Земли, Венеры и даже Меркурия. В первую очередь это группы астероидов Амура, Аполлона и Атона (по названиям крупнейших представителей, входящих в них). Орбиты не стабильны и относитель-

но быстро эволюционируют под действием гравитационных полей планет земной группы. В частности, «амурцы» движутся по эллиптическим орбитам, перигелийное расстояние (минимальное удаление от Солнца) которых не превышает 1,3 а.е. (астрономических единиц, причем за 1 а.е. принято среднее удаление Земли от Солнца, равное примерно 149,6 млн. км). Орбита «аполлонцев» проникает и внутрь земной траектории, а представители «атонской группы» движутся в основном внутри орбиты нашей планеты. Подобное соседство может создавать угрозу столкновения с Землей. Существует даже общее определение этой группы малых планет – «астероиды, сближающиеся с Землей». На сегодняшний день таких объектов обнаружено около 800, но их общее количество может оказаться значительно большим – до 2 тыс. размером более 1 км и до 135 тыс. размером от 100 м. Можно утверждать, что столкновения с относительно небольшими телами (несколько десятков метров) происходят примерно раз в 10 лет. Подобные явления могут приводить к катастрофам локального, регионального и глобального характера.





Только в XX в. на Земле произошло три значительных события, обусловленных такого рода «авариями». В 1908 г. падение Тунгусского метеорита на реке Подкаменная Тунгуска сопровождалось взрывом мощностью 10–20 Мт. В 1930 г. произошел аналогичный взрыв мегатонного класса в бассейне реки Амазонки, а в 1947 г. на Землю обрушился Сихотэ-Алиньский метеорит. В последнее десятилетие в околоземной атмосфере было зарегистрировано сгорание десятка тел, размеры которых колеблются от 10 до 40 м.

Конечно, события, подобные падению Тунгусского метеорита, возможны лишь раз в 100–300 лет, однако в современном перенаселенном мире с высокой концентрацией опасных промышленных объектов они могут привести к гибели десятков миллионов человек и нанести материальный ущерб, сопоставимый с валовым национальным продуктом наиболее развитых стран.

К гораздо большим жертвам и разрушениям могут привести региональные катастрофы. Так, падение тела размером в 300–500 м в океан вызовет волну цунами, способную опустошить обширные прибрежные территории. Свидетельства о таких явлениях сохранились в исторической памяти всех народов в виде мифов и легенд о потопах, которые подтверждаются археологами и геологами. Судя по описаниям, подобные события могли быть обусловлены столкновениями с космическими телами, которые, к счастью, случаются лишь раз в 10–100 тыс. лет.

Между тем в последнее время участились «визиты» малых планет в окрестности Земли. Так, Аполлон приблизился к нам на расстояние в 11 млн. км, а спустя несколько лет Адонис подошел на 1,5 млн. км, затем Гермес прошел на расстоянии всего 800 тыс. км (расстояние между Землей и Луной составляет порядка 400 тыс. км). В марте 1989 г. трехсотметровое небесное тело пересекло орбиту Земли в точке, где она находилась всего за шесть часов до этого, причем его появление было неожиданным – его засекли уже в момент удаления. В мае 1996 г. астероид диаметром 500 м пролетел всего в 450 тыс. км от нас, а шесть суток спустя еще один полторакилометровый «гость» приблизился на расстояние 3 млн. км. В 2004 г. ожидается возвращение астероида Тоутатис, который в ноябре 1996 г. пронесся в 5 млн. км от Земли, а на этот раз намерен подойти в 3,5 раза ближе.

Участившиеся факты сближения Земли с мелкими космическими телами тревожат ученых. Ведь для глобальной катастрофы достаточно метеорита размером 1 км в поперечнике.

Что ждет нас в случае катастрофы?

Удар астероида диаметром порядка 100 м о поверхность Земли уничтожит все в радиусе до 1000 км от места падения, пожары охватят обширные территории, в атмосферу будет выброшено огромное количество пепла и пыли,

которые будут затем оседать в течение нескольких лет. Солнечные лучи не смогут пробиться к поверхности планеты, и резкое похолодание погубит многие виды растений и животных, прекратится фотосинтез. А когда наконец пыль осядет и циркуляция воздуха восстановится, увеличение количества углекислого газа в атмосфере вызовет парниковый эффект. Температура в околоземном слое повысится, начнется таяние полярных льдов, и большая часть суши будет затоплена. В довершение бед нарушится магнитное поле Земли, изменится динамика тектонических процессов, возрастет активность вулканов.

Наглядным примером планеты, погибшей в результате астероидно-кометной бомбардировки, стал Марс. Его поверхность буквально испещрена ударными кратерами и покрыта, будто кровью, красным налетом, что хорошо видно с Земли. Такой цвет мог образоваться только в процессе высокотемпературного воздействия при ударе небесных тел и при обязательном наличии на планете воды и кислорода. Это свидетельствует о том, что в далеком прошлом на Марсе было много воды и воздуха. Следовательно, на нем вполне могла существовать растительная, а возможно, и разумная форма жизни (см. статью Л. Ксанфомалити «Влажный Марс», стр. 151). Интенсивная бомбардировка его поверхности астероидами и кометами привела к тому, что Марс превратился в безжизненную пустыню.

Геологические данные свидетельствуют, что Земля неоднократно подвергалась подобным «нападениям». Глобальные катастрофы случаются раз в 100 тыс. – 1 млн. лет. Некоторые из них приводили к смене геологических периодов и эпох. Вероятность сохраняется и в наши дни.

Геологические и атмосферные процессы стерли с лица Земли следы многих столкновений. Тем не менее на поверхности планеты обнаружено свыше 140 кратеров ударного происхождения размером до 200 км и возрастом до 2 млрд. лет. Самый крупный из них, в районе полуострова Юкатан, имеет диаметр около 2 тыс. км – сейчас это Мексиканский залив. Он образовался примерно 65 млн. лет назад при ударе небесного тела диаметром около 10 км. На этом завершилась эпоха динозавров.

До недавнего времени считалось, что падение крупного метеорита случается раз в несколько миллионов лет и опасность ничтожно мала. Но количество астероидов, периодически сближающихся с Землей, оказалось намного больше, чем мы могли себе представить.

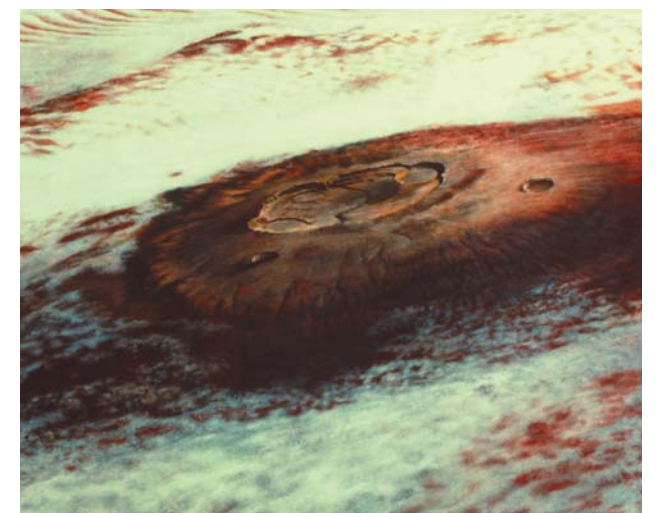
Еще один враг

Кометы в отличие от астероидов состоят из смеси водяного льда и пылевидных твердых частиц, которые по мере приближения к Солнцу начинают испаряться, в результате чего вокруг ядра кометы появляется газопылевой «хвост». Большинство комет сосредоточено за границами Солнечной системы в так называемом облаке Оорта, а также в поясе Койпера, расположенном за орбитой Нептуна. В них находится около 100 млрд. кометных ядер. За счет возмущающего воздействия планет и ближайших к ним звезд, а также столкновений друг с другом, ядра комет сходят со своих орбит и приближаются к Солнцу. При этом они, как и астероиды, периодически сталкиваются с нашей планетой. В настоящее время обнаружено около 200 комет, сближающихся с Землей, общее же их число может составлять более 20 тыс.

Классификация астероидной опасности

Американским астрономом Р. Бинзелом (R. Binzel) была разработана шкала оценки опасности столкновения с Землей астероидов и комет. Она была представлена на симпозиуме в Турине и получила название в честь этого итальянского города, а в 1999 г. была утверждена Международным астрономическим союзом.

Туринская шкала состоит из 10 пунктов, в соответствии с которыми небесные тела классифицируются (с учетом их размера и относительной скорости) по степени опасности для Земли. К нулевой категории отнесены те, о которых с уверенностью можно сказать, что они никоим образом нам не угрожают. К первой – те, что все же заслуживают внимательного наблюдения, во 2-ю, 3-ю и 4-ю категорию входят планеты, вызывающие



оправданное беспокойство. Представители 5–7-й категорий несут реальную угрозу, а объекты из последних неизбежно столкнутся с нами, причем последствия могут привести как к локальным разрушениям, так и к глобальной катастрофе.

Быть или не быть – вот в чем вопрос

Современная цивилизация достигла достаточного уровня развития технологий и промышленности, чтобы создать системы и средства для своевременного выявления угрозы космического столкновения и его предотвращения. Однако для прогнозирования катастроф наших знаний об опасных пришельцах из космоса явно недостаточно, технические средства для оперативного выявления угрозы не внедрены, системы предотвращения столкновений не созданы.

Сегодня человечество стоит перед дилеммой: пойти на относительно необременительные затраты (несколько сотен миллионов долларов в год) и создать систему обеспечения космической безопасности или, надеясь на волю случая, откладывать решение вопроса до ближайшего (и, возможно, последнего) катастрофического столкновения.

Из семейств астероидов, сближающихся с Землей, наиболее полно изучены лишь самые крупные, размером более 1 км, – самые удобные для наблюдения. К настоящему времени объявлено об открытии около половины таких объектов, и ожидается, что к 2010 г. будет известно более 90%. Однако возникает острая потребность в создании международной программы наблюдения за вновь открытыми телами, осуществление ко-



торой позволит выявить наиболее опасные объекты задолго до их сближения с Землей.

Для организации космической защиты необходимо учитывать в первую очередь свойства потенциальных «врагов»: их форму, строение, состояние поверхности и прилегающих к ней слоев, физико-механические и химические свойства составляющего вещества. Такие данные частично были получены с помощью наземных или дистанционных космических наблюдений. Более полную информацию могли бы дать космические экспедиции с посадкой аппаратов на астероид, комплексным исследованием поверхности и доставкой образцов на Землю. Такая информация позволит выбрать оптимальные способы и средства предотвращения столкновения для различных, в том числе экстремальных, сценариев развития событий.

В последние годы темпы поступления информации растут. Дистанционно с помощью космической станции *Galileo* были получены данные об астероидах основного пояса Иды, Гаспра и Матильды. С помощью наземных радиолокаторов исследовались параметры орбит и свойства 68 объектов. США, Япония, Евросоюз готовят новые космические экспедиции.

Сложнее обстоит дело с нейтрализацией угрозы столкновений с относительно мелкими объектами (более 10 м), которые грозят катастрофой локального масштаба. Вероятность подобных явлений относительно высока, а возможности прогноза малы, поскольку количество объектов значительно, а их наблюдение как на большом удалении от Земли, так и при непосредственном сближении затруднено. Так, по предварительным подсчетам, количество тел размером более 100 м составляет 100–200 тыс. В основе стратегии защиты от них лежит непрерывный контроль за космическим пространством в непосредственной близости от Земли и наличие дееспособной системы нейтрализации. Современный уровень технологического развития ведущих стран мира (в том числе России) позволяет приступить к созданию Системы защиты Земли от астероидной и кометной опасности, в задачи которой входит:

- обнаружение и идентификация естественных космических объектов, орбиты которых могут пересекать земную;
- определение степени угрозы столкновения и его последствий для биосферы и цивилизации;
- организация мер по предотвращению катастрофических последствий;

В состав системы защиты должны войти:

- система наблюдения за опасными объектами;

- ракетные и ракетно-технические средства доставки (ракетоносители, разгонные блоки, космические перехватчики);
- средства воздействия на космические тела;
- глобальный командно-измерительный комплекс;
- централизованный блок управления средствами системы защиты.

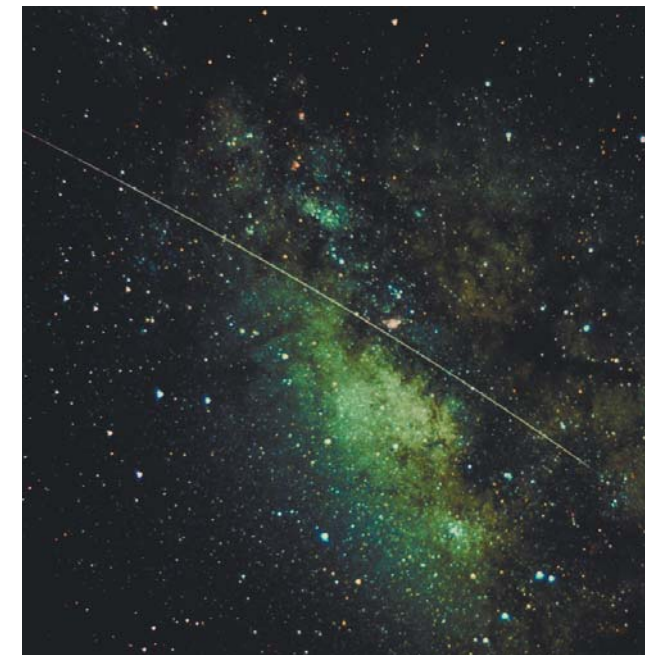
Все на борьбу с астероидами!

Десять лет назад, в мае 1993 г., в Санкт-Петербурге состоялась Первая международная конференция «Астероидная опасность–93». Наибольшее внимание ученых привлекли такие аспекты проблемы, как вероятность встречи Земли с опасными космическими объектами, требования к системам оптических и радиолокационных наблюдений, позволяющим фиксировать приближение космических пришельцев и прогнозировать их орбиты, а также способы защиты Земли от столкновений.

Для эффективной защиты необходима разработка способов уничтожения данных объектов, которые сводятся к двум возможностям: разрушение «врага» до его соприкосновения с нашей планетой или увод его с опасной орбиты.

Для устранения опасных космических объектов в настоящее время рассматриваются два вида воздействия: ядерное и кинетическое. Предполагается, что в случае обнаружения астероида или кометы навстречу направляются ракеты, снабженные специальными зарядами, причем в первом случае для разрушения объекта используется энергия мощного ядерного заряда, во втором – собственная кинетическая энергия небесного тела.

«Отец» американской водородной бомбы Эдвард Теллер одним из первых предложил воздействовать на опасных гостей ракетами с мощными ядерными зарядами, и возможность такого метода была всесторонне рассмотрена учеными-атомщиками и разработчиками ракетных систем. Оказалось, что если доставка ядерного заряда к объекту осуществима имеющимися ракетами-носителями, то эффективное использование энергии взрыва ядерного заряда сопряжено с большими техническими трудностями. При сильном взрыве на твердой поверхности лишь 15–20% энергии идет на уничтожение, а при заглубленном взрыве разрушительная сила возрастает в 5–6 раз. Однако осуществление подобного взрыва в объекте, движущемся со скоростью 40–60 м/с, – весьма сложная техническая задача. Кроме того, испытания мощных ядерных зарядов на Земле и вывод их в космическое пространство запрещены международными соглашениями



и вызывают большие опасения с точки зрения экологической безопасности. Поэтому столь радикальный способ воздействия, вероятно, не имеет серьезной перспективы.

Альтернативой является кинетический способ, т.е. использование собственной кинетической энергии тела для его ликвидации. Впервые этот метод был предложен российскими учеными на Первой международной конференции по астероидной опасности. На пути движения астероида создается искусственное пылевое образование из малых частиц, которые будут взаимодействовать с его поверхностью, образуя кратеры с выбросом некоторой массы, пропорциональной кинетической энергии соударяющихся тел, таким образом опасный объект будет разрушаться. Использование известных теоретических моделей сильного взрыва позволяет выбрать две модели нейтрализации: полное уничтожение тела вплоть до его испарения или разделение на мелкие фрагменты, не представляющие опасности. Расчеты показывают, что для полного распыления соотношение между массой частиц облака и массой тела при скорости 40–60 км/с должно быть 10^{-4} – 10^{-5} , т.е. для ликвидации железного астероида диаметром 10 м необходимая масса частиц облака должна составить порядка 10 тыс. кг. Учитывая, что ракетостроение имеет определенный опыт создания в космосе искусственных образований, состоящих из частиц малых размеров, кинетический способ воздействия может быть экспериментально опробован. ■

(«В мире науки», №9, 2003)

НОВАЯ ЛУНА

Пол Спадис

Луна не спешит раскрывать свои секреты.

Лишенная атмосферы Луна стала первым планетным объектом, исследованным космическими аппаратами, и первым небесным телом, на котором побывали люди. Но у планетологов до сих пор остается много вопросов об ее истории, химическом составе и внутреннем строении. В последние годы ученые неоднократно призывали к возобновлению исследований Луны. Европейское космическое агентство и Япония планируют послать на лунную орбиту несколько зондов, а NASA рассматривает вопрос о посадке беспилотного аппарата на обратной стороне Луны. Собранные данные должны пролить свет на историю планет внутренней части Солнечной системы – Меркурия, Венеры, Марса и в первую очередь Земли. Поскольку за последние 3 млрд. лет поверхность Луны почти не изменилась, ее изучение может стать ключом к пониманию процесса формирования и эволюции ближайших к Солнцу планет.

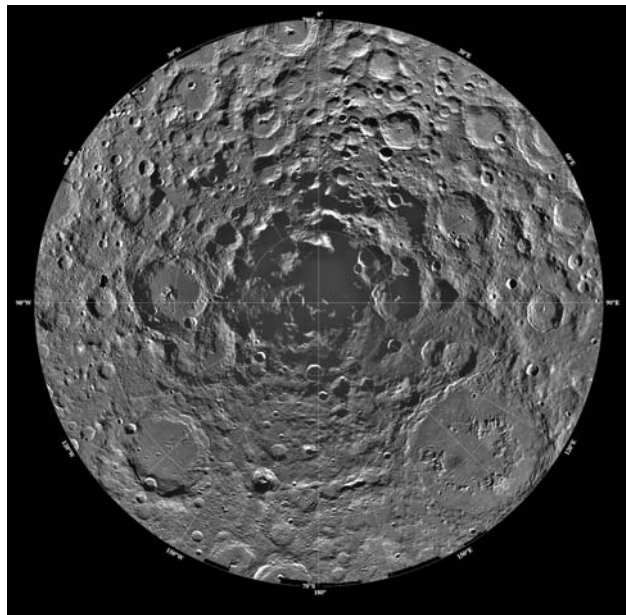
Около 400 лет назад астрономы начали изучать Луну с помощью телескопов и обнаружили, что для ее поверхности характерны два типа ландшафта: светлые неровные возвышенности, обильно усеянные кратерами, и более темные, сравнительно ровные низменности, которые Галилео Галилей назвал морями. Один из величайших сюрпризов космического века преподнесла астрономам советская космическая станция «Луна 3». С ее помощью в 1959 г. была сфотографирована обратная сторона Луны, которую раньше никто не видел, так как она никогда не бывает обращена к Земле. Оказалось, что сокрытая от земного наблюдателя часть лунной поверхности практически лишена темных морей, преобладающих на види-

мой с Земли стороне. Ученые до сих пор не разобрались в природе этого загадочного феномена.

На основании анализа лунных пород и грунтов, доставленных на Землю астронавтами «Аполлонов» и автоматическими станциями «Луна», ученые составили представление об эволюции Луны. Она сформировалась около 4,5 млрд. лет назад, когда с молодой Землей столкнулось небесное тело размером с Марс и на околоземную орбиту было выброшено облако испарившихся горных пород, которое постепенно сгустилось и образовало естественный спутник нашей планеты. Процесс протекал настолько быстро, что выделившееся в результате тепло превратило внешние слои формирующейся Луны в океан расплавленных горных пород, покрывающий всю поверхность нового небесного тела. Позднее из более легких минералов, плававших на поверхности магмы, образовалась кора.

Затем последовала интенсивная бомбардировка лунной поверхности кометами, астероидами и метеоритами. При ударах наиболее крупных тел образовались огромные кратеры и бассейны поперечником свыше 2 тыс. км. За последующие 300–400 млн. лет многие из них (по крайней мере, на обращенной к Земле стороне Луны) заполнились богатой железом базальтовой лавой и превратились в наблюдаемые нами темные моря. Со временем интенсивность бомбардировки уменьшилась, удары стали более редкими и менее мощными. Именно поэтому в морях, которые моложе возвышенностей, кратеры попадаются редко, да и то только мелкие. За последние 3 млрд. лет на Луне почти ничего не происходило. После затухания вулканической деятельности лишь время от времени на ее поверхности возникали новые ударные кратеры, шел постоянный дождь микрометеоритов, а более 30 лет назад Луну посетили гости с Земли.

Прекрасно сохранившиеся следы метеоритных бомбардировок, вулканической и тектонической деятельности, а также близость к Земле делают Луну идеальным объектом для изучения событий, происходивших в нашей части Солнечной системы на ранних этапах ее истории. Ведь за миллиарды лет геологической активности следы упавших астероидов и комет практически полностью стерлись с лица нашей планеты.



ЮЖНАЯ ПОЛЯРНАЯ ОБЛАСТЬ ЛУНЫ. Изображение составлено из 1 500 кадров, снятых в 1994 г. видеокамерами автоматической станции «Клементина» в видимом и ультрафиолетовом диапазонах спектра. Центр изображения соответствует полюсу, а край – 70° ю.ш. И «Клементина», и «Лунный разведчик» обнаружили признаки присутствия водяного льда в постоянно затененных участках вблизи обоих полюсов Луны.

Селенологи многое узнали из материалов экспедиций, организованных в рамках программы «Аполлон». Но даже гостям с Земли Луна раскрыла не все свои тайны. Тогда ученые решили составить глобальную карту Луны с помощью армады разнообразных автоматических зондов. В начале 90-х гг. межпланетный аппарат «Галилео», отправленный к Юпитеру, обнаружил необычные признаки богатых железом пород в самом большом на Луне бассейне, который раскинулся в Южном полушарии с обратной стороны и называется Южный полюс – Эйткен (SPA). С помощью спектральных фильтров «Галилео» провел картирование нескольких морей и сообщил на Землю ценные сведения о составе их поверхности. Есть надежда, что данные, поступающие с космических аппаратов, позволят планетологам определить последовательность лавовых потоков в морях.

Моря и возвышенности

В 1994 г. министерство обороны США запустило зонд «Клементина» (Clementine), чтобы провести космические испытания легких датчиков, разработанных для национальной системы противоракетной обороны. Аппарат пробыл на окололунной полярной орбите 71 день. За это время ученые

успели просканировать поверхность Луны на 11 длинах волн в видимом и инфракрасном диапазонах спектра. С помощью установленного на борту «Клементины» лазерного дальномера была составлена первая в мире глобальная топографическая карта естественного спутника Земли. Точнейшие радиоизмерения орбиты зонда позволили получить детальную информацию о гравитационном поле Луны, а результаты импровизированного радиолокационного эксперимента показали, что в постоянно затененных зонах вблизи ее Южного полюса, возможно, есть залежи водяного льда.

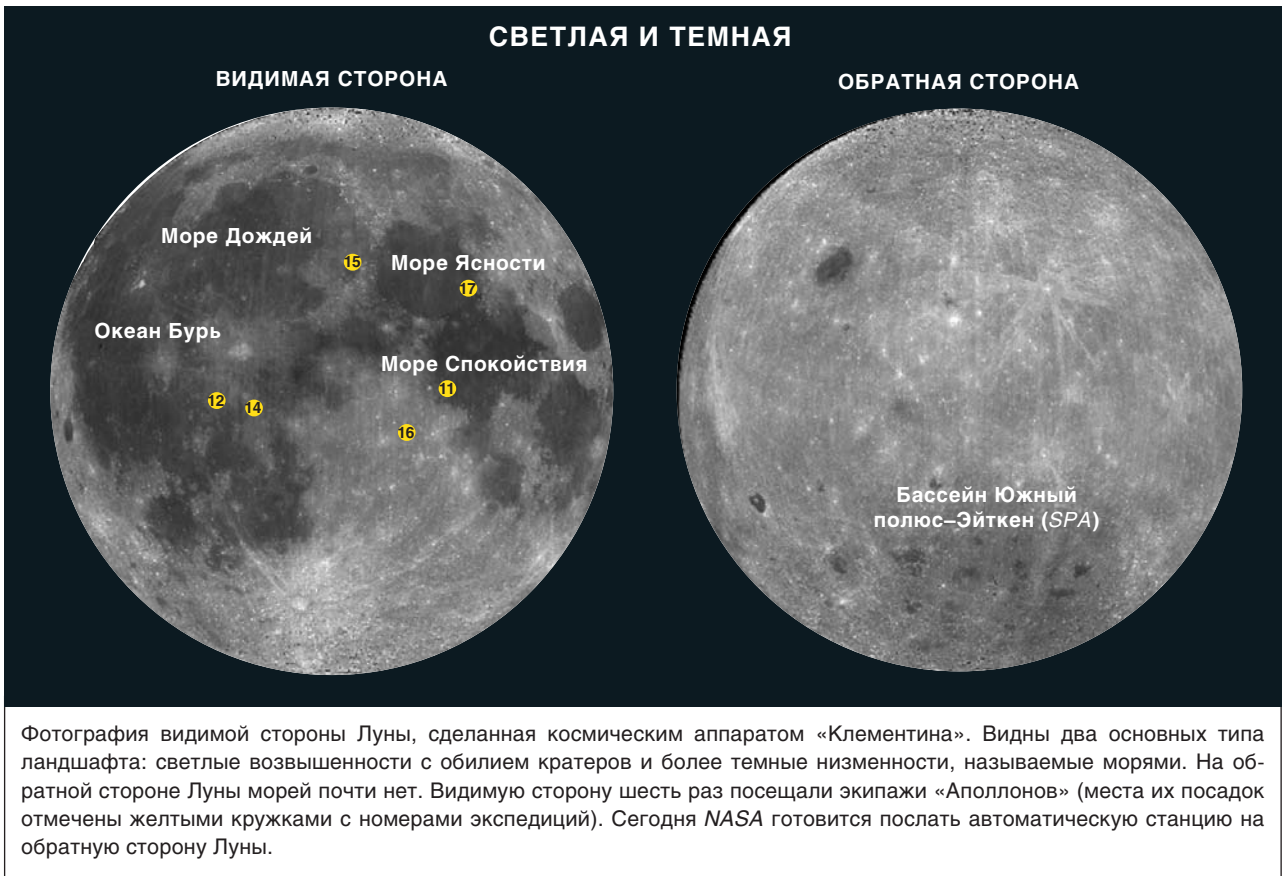
В 1998 г. в рамках программы «Дискавери» NASA вывело на окололунную полярную орбиту аппарат «Лунный разведчик» (Lunar Prospector). На основании полученных в ходе экспедиции результатов нейтронной и гамма-спектроскопии была составлена геологическая карта лунной поверхности. На этот раз отложения водяного льда были обнаружены не только вблизи Южного, но и вблизи Северного полюса Луны. С помощью альфа-спектрометра была измерена эмиссия газов из лунных недр, а показания магнитометра позволили составить карту поверхностных магнитных аномалий. В конце концов зонд сознательно обрушили на поверхность Луны. Надеясь увидеть выброс водяного пара, астрономы устремили наземные и космические телескопы в точку падения «Лунного разведчика», но ничего подобного так и не обнаружили.

Сопоставление результатов экспедиций «Аполлонов», «Клементины» и «Лунного разведчика» заставило ученых пересмотреть свои взгляды на строение и историю Луны. Например, в Океане Бурь, огромной впадине в западной части видимой стороны, астронавты «Аполлона 12» и «Аполлона 14» обнаружили аномальные базальтовые породы, богатые следовыми элементами, совокупность которых известна под названием KREEP (здесь К означает калий, REE – редкоземельные элементы, и Р – фосфор). Геологи называют их несовместимыми, потому что они плохо вписываются в кристаллические структуры большинства порообразующих минералов. Присутствие пород с большим содержанием KREEP говорит о том, что на молодой Луне протекали интенсивные процессы плавления и дифференциации, в ходе которых несовместимые элементы концентрировались в расплавленной части все более кристаллизующейся системы. «Лунный разведчик» установил, что концентрация KREEP по непонятным пока причинам выше всего в Океане Бурь.

С помощью искусственных спутников Луны селенологи убедились, что на лунных возвышенностях преобладает анортозит – вулканическая порода, богатая кальцием и алюминием и состоящая

ОБЗОР: ТАЙНЫ ЛУНЫ

- В 1990-х гг. космические аппараты «Клементина» и «Лунный разведчик» помогли ученым составить глобальную гравитационную, магнитную, топографическую и геологическую карту Луны.
- Полученные сведения позволили объяснить ряд открытий, сделанных экспедициями в рамках программы «Аполлон», но подняли новые вопросы, в частности об интенсивной бомбардировке Луны, произошедшей около 4 млрд. лет назад.
- Европейское космическое агентство, Япония и США планируют послать на Луну несколько автоматических станций, чтобы раскрыть некоторые ее тайны.



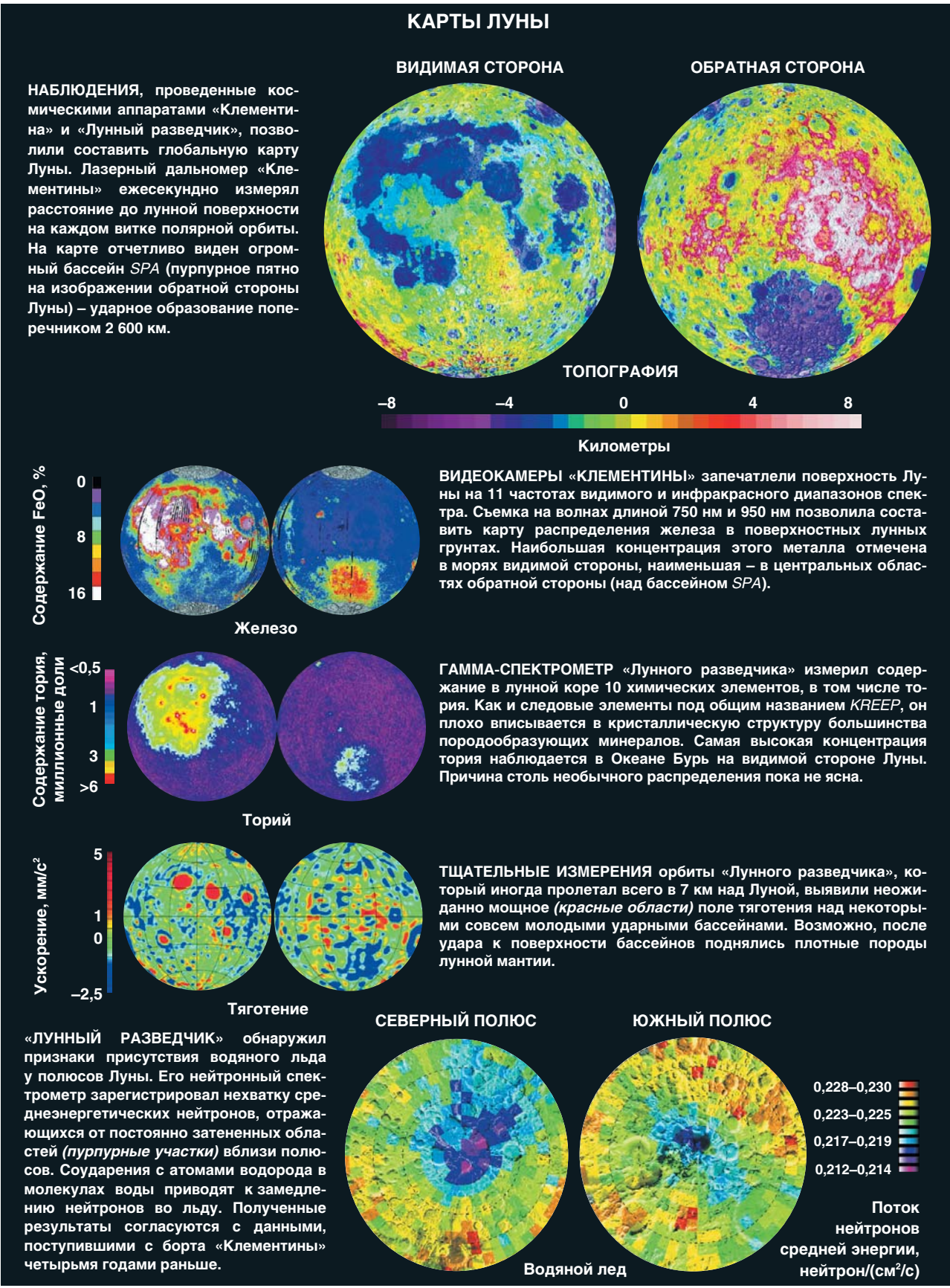
в основном из полевого шпата. Она образовалась на раннем этапе истории Луны, когда ее периферийная часть была полностью расплавлена и менее плотный анортозит плавал на поверхности густого магматического океана. Поскольку единственным источником тепла, способным расплавить всю Луну, мог быть только процесс слияния малых тел, избыток анортозита в лунной коре подтверждает теорию, согласно которой спутник Земли образовался из осколков, возникших при столкновении планет.

Наконец селенологи смогли объяснить удивительное открытие, сделанное экипажем «Аполлона 11» во время первого прилунения, когда в образцах морского базальта было зарегистрировано необычайно высокое содержание титана. Геологи тщетно пытались разобраться, как могли тяжелые, богатые титаном магмы пробиться наверх через анортозитовую лунную кору невысокой плотности. С помощью «Клементины» и «Лунного разведчика» ученые установили, что титановые лавы, пробы которых были взяты астронавтами «Аполлона 11» в Море Спокойствия, встречаются на Луне крайне редко.

Поскольку каждый поток лавы обычно характеризуется индивидуальным однородным составом,

информация, переданная с «Клементины» и «Лунного разведчика», вполне пригодна для составления карты лавовых потоков в лунных морях. Их возраст можно оценить по плотности ударных кратеров: чем старше поток, тем дольше он подвергался бомбардировке и, следовательно, тем больше на нем должно быть кратеров. С помощью радиоизотопного анализа образцов, собранных экспедициями «Аполлонов», ученые уже определили возраст лавовых потоков в местах посадки и оценили возраст других потоков, сопоставляя плотности кратеров. Выяснилось, что, несмотря на существенное различие состава, основная масса лавы изверглась в период от 3,8 до 3 млрд. лет назад.

Хотя темный оттенок больше присущ лунным морям, некоторые возвышенности тоже характеризуются промежуточной отражательной способностью и сравнительно высоким содержанием железа. Многие из них представляют собой морские отложения, покрытые слоем камней, выброшенных при ударах, в результате которых появились лунные бассейны. Поскольку морская лава старше горных обломков, засыпавших ее около 3,8 млрд. лет назад, можно утверждать, что магматические извержения начались задолго до того,



как образовались породы, образцы которых были собраны экспедициями «Аполлонов». Древние потоки в морях наиболее распространены на обратной стороне Луны и в областях лимба (пограничных между видимой и обратной сторонами).

По горам, по долам

Луна – это мир неровного рельефа. Разность высот между самой низкой точкой (в бассейне SPA) и самой высокой (гребень кратера Королева на обратной стороне Луны) превышает 16 км. На Земле, где эта величина составляет около 20 км, поверхность сформировалась в результате тектонической деятельности, которая создала горные хребты и океанские желоба. В отличие от Земли Луна обладает статичной внешней оболочкой: лунная кора остыла и затвердела не менее 4 млрд. лет назад. Лунные пейзажи составляют исключительно

кратеры и моря. Неудивительно, что самые низкие точки располагаются в самом большом бассейне, хотя несколько странно, что такая крупная и древняя особенность рельефа сохранила свой первоначальный вид почти неизменным.

Внутренняя структура Луны тоже весьма неоднородна. Радиоизмерения траектории «Лунного разведчика», высота орбиты которого иногда составляла не более 7 км, неожиданно выявили сильное тяготение над некоторыми из самых молодых ударных бассейнов. Морские базальты вряд ли могли стать причиной гравитационных аномалий: толщина отдельных лавовых потоков колеблется от одного до нескольких десятков метров, а глубина их наслоений обычно не превышает 200 м. Ученые склонны считать, что сгустки массы образованы плотными горными породами лунной мантии, поднявшимися к поверхности после удара.

Необычная асимметрия Луны, на видимой стороне которой преобладают темные моря, а на обратной – светлые возвышенности, также может быть вызвана различием внутренней структуры. Скорее всего кора на видимой стороне тоньше, и поэтому там поднимающейся магме легче пробиться на поверхность, чем на обратной стороне. В огромном бассейне SPA совсем немного морской лавы, и основная ее часть сосредоточена на обратной стороне Луны в виде тонких непротяженных отложений. Вместе с тем на видимой стороне даже самые маленькие бассейны заполнены лавой.

Согласно топографической карте Луны, составленной с помощью лазерного дальномера, бассейн SPA имеет 2 600 км в поперечнике и является самым большим ударным кратером во всей Солнечной системе. Всего на Луне насчитывается более 45 бассейнов (ударных образований диаметром свыше 300 км), из которых SPA – самый старый, а Восточный – самый молодой.

Радиоизотопный анализ доставленных на Землю пород, расплавленных при ударе астероидов и комет о поверхность Луны, показал, что все бассейны, в которых садились советские и американские станции, образовались в период с 3,9 до 3,8 млрд. лет назад. По-видимому, в течение короткого промежутка времени Луна подвергалась интенсивной бомбардировке, которую называли лунным катаклизмом.

Что же послужило причиной древней катастрофы? Модели развития Солнечной системы основаны на предположении, что в период между 4,5 и 4 млрд. лет назад интенсивность бомбардировки уменьшалась, поскольку большинство планетезималей – каменных тел, образовавшихся из протопланетной туманности, – было постепенно выброшено за пределы внутренней части Солнечной системы или поглощено внешними планетами. Если исследования подтвердят, что лунный катаклизм действительно имел место, представления об истории внутренних планет придется серьезно пересмотреть. Возможно, около 3,9 млрд. лет назад некое очень крупное тело из пояса астероидов развалилось на части, и его обломки были выброшены в направлении системы Земля–Луна. Но в таком случае история образования лунных кратеров уникальна и не может служить руководством для датировки особенностей рельефа на всех остальных планетах, за исключением Земли.

Чтобы установить, происходил ли лунный катаклизм на самом деле, нужно определить точный возраст бассейна SPA – древнейшего из всех существующих. Самый старый бассейн, надежно датированный по расплавленным при ударе образ-

цам из Моря Ясности, появился 3,87 млрд. лет назад. Удар, образовавший SPA, наверняка произошел уже после того, как лунная кора затвердела, т.е. не раньше 4,3 млрд. лет назад. Следовательно, бассейн SPA возник в промежутке между двумя указанными датами. Но ближе к которой из них?

Если SPA окажется ровесником других бассейнов, то лунный катаклизм скорее всего имел место. Если же он появился вскоре после затвердевания лунной коры, то допущение о катастрофе станет ненужным. Процесс образования кратеров на Луне можно будет считать свидетельством экспоненциального спада интенсивности метеоритной бомбардировки. Тогда изучение Луны поможет ученым разобраться в истории возникновения кратеров на других внутренних планетах Солнечной системы, например на Марсе. Однако для датировки SPA нужно добыть оплавленные образцы его грунта.

Во мраке

Возможно, самым удивительным результатом исследований «Клементины» и «Лунного разведчика» стало получение свидетельств существования водяного льда на лунных полюсах. Поскольку ось вращения Луны наклонена всего на 1,5°, т.е. почти перпендикулярна плоскости земной орбиты, Солнце на лунных полюсах всегда висит над самым горизонтом. (Для сравнения напомним, что ось вращения Земли наклонена примерно на 23°.) Рядом с полюсом любой объект, возвышающийся над поверхностью на 600 м, всегда освещен Солнцем, а в низины глубиной более 600 м солнечный свет никогда не попадает. Слабый радиоактивный распад в недрах Луны и ничтожное космическое излучение – единственные источники тепла в лощинах вечного мрака, где последние 2–3 млрд. лет температура колеблется от –223 до –203 °С. В темных холодных ловушках вполне мог скопиться водяной лед, принесенный на Луну кометами и метеоритами.

Хотя на «Клементине» не было специальных приборов для поиска льда, руководители экспедиции провели эксперимент с использованием бортового радиопередатчика. Каменистая поверхность рассеивает радиоволны хаотично, а лед частично их поглощает и частично отражает. Когда радиолуч «Клементины» был направлен на постоянно затененный участок поверхности рядом с Южным полюсом Луны, отраженный сигнал оказался характерным для ледяной поверхности. Четыре года спустя нейтронный спектрометр «Лунного разведчика» выявил присутствие большого количества водорода в затененных участках у обоих полюсов. Вероятнее всего, обнаруженный

СНОВА НА ЛУНУ				
 Возобновление научного интереса к Луне подтолкнуло космические агентства к разработке новых экспедиций.				
Аппарат	Страна	Дата запуска	Масса без топлива, кг	Исследования
ПРОШЛЫЕ И НЫНЕШНИЕ ЭКСПЕДИЦИИ				
«Клементина»	США	25.01.1994	227	Картирование топографии и состава поверхности с помощью видеокамер и лазерного дальномера. Радарный эксперимент выявил признаки присутствия водяного льда у полюсов.
«Лунный разведчик»	США	07.01.1998	158	С помощью спектрометров построены карты распределения химических элементов в лунной коре и подтверждено присутствие льда. С помощью магнитометра и электронного рефлектометра измерены магнитные поля.
SMART 1	Европейское космическое агентство	27.09.2003	280	В начале 2005 г. видеокамеры и спектрометры начнут снимать карту распределения минералов на Луне и исследовать темные кратеры на предмет присутствия льда.
БУДУЩИЕ ЭКСПЕДИЦИИ				
Lunar A	Япония 2004 г.	Авг. – сент.	520	Орбитальная станция сбросит два зонда, которые зароятся в грунт на противоположных сторонах Луны. Сейсмометры и тепловые датчики будут исследовать недра Луны.
SELENE	Япония	2005 г.	1 600	При помощи системы видеокамер, спектрометров и других приборов будут составлены детальные карты топографии, состава поверхности, а также гравитационного и магнитного полей Луны.
Экспедиция бассейн SPA	США	Не позднее 2010 г.	Пока не известна	Робот-луноход соберет со дна лунного бассейна образцы грунта и горных пород, которые будут затем доставлены на Землю для анализа состава и определения возраста.

водород входит в состав водяного льда. По последним оценкам, общее количество льда в поверхностных полярных слоях толщиной приблизительно 0,3 м составляет около 10 млрд. тонн. Однако уточнить состав и степень чистоты так похожего на лед вещества смогут только новые экспедиции на Луну.

Полученные «Клементиной» изображения свидетельствуют о том, что на некоторые приполярные участки лунной поверхности почти постоянно попадает солнечный свет. Так, область, находящаяся недалеко от края кратера Шеклтона, освещается Солнцем более 75% периода вращения Луны. Тепловые условия здесь сравнительно мягкие – температура поверхности колеблется в пределах от –60 до –40°C (в экваториальной зоне – от –150 до +100°C). Размещение автоматической или обитаемой станции в одном из таких освещаемых районов существенно облегчит задачу создания оборудования, способного работать в экстремальных температурных условиях. Лед, добываемый в расположенных неподалеку постоянно затененных низинах, будет прекрасным источником воды для жизнеобеспечения и получения ракетного топлива (расщепляя воду, можно получать жидкие водород и кислород – самое эффективное химическое топливо).

Возвращение на Луну

Успехи «Клементины» и «Лунного разведчика» вдохновили ученых на организацию новых экспедиций к Луне. В сентябре 2003 г. Европейское космическое агентство запустило космический аппарат *SMART 1*, чтобы в ходе 16-месячного полета к Луне испытать ионные двигатели. После выхода на окололунную орбиту он будет картировать поверхность Луны с помощью видеокамеры и рентгеновского детектора. В этом году Япония планирует вывести на окололунную орбиту аппарат «Лунар А» (*Lunar A*), который сбросит на Луну два зонда, оснащенных сейсмометрами и тепловыми датчиками. Они соберут информацию о внутреннем строении Луны и, возможно, составят карту ее ядра. А на 2005 г. намечен запуск более крупной японской орбитальной станции *SELENA*, которая проведет еще более детальное картирование Луны с использованием видеокамер, лазерного высотомера, радара и рентгеновского и гамма-спектрометров.

Чтобы определить, имел ли место лунный катаклизм, США собираются отправить на Луну автоматическую станцию, которая доставит на Землю пробы грунта из бассейна *SPA*. Поскольку в состав расплавленного материала входят веще-

ства всех пород, испытавших удар астероида или кометы, изучение образцов позволит определить состав и структуру лунной коры в точке посадки. Ученые полагают, что упавшее тело вполне могло пробить лунную кору и выплеснуть на поверхность часть внешнего слоя мантии, возможно, с глубин до 120 км. Если гипотеза верна, то у селенологов появится уникальная возможность изучить состав лунных недр. Для повышения достоверности минералогического анализа и точности определения возраста также будут взяты пробы близлежащих скальных пород.

Очень важно выбрать такое место посадки, чтобы аппарат смог собрать подходящие по составу и геологической структуре образцы. Для этого ученые могут воспользоваться результатами дистанционных измерений. Чтобы сесть на обратной стороне Луны, спускаемый аппарат будет действовать либо автоматически, либо получая команды с Земли через спутник-ретранслятор.

Важнейшим элементом спускаемого аппарата станет возвращаемый модуль, оснащенный ракетным двигателем для взлета с Луны и выхода на траекторию полета к Земле. После торможения в земной атмосфере он приземлится в каком-нибудь отдаленном пустынном районе и включит радиомаяк, чтобы привлечь поисковую группу. Таким образом, проект технически сложен, но вполне осуществим.

NASA уже объявило конкурс на лучший проект экспедиции за образцами из бассейна *SPA*, которая может быть проведена до 2010 г. Но когда же на Луну снова полетят астронавты? Отправка людей на Луну предоставляет уникальную возможность для проведения целого спектра исследований – от планетологических до астрономических. Наличие водяного льда на лунных полюсах позволит создать постоянно действующую обитаемую станцию. Недавно специалисты NASA подготовили эскизный проект новой лунной экспедиции, который предусматривает использование существующей пусковой и транспортной инфраструктуры.

Однако для возвращения астронавтов на Луну нужны политические решения, а не научные обоснования. Межпланетный полет человека никогда не будет предпринят в чисто научных целях. Подобные экспедиции должны решать широкий круг национальных задач. Но если мы все же вернемся на Луну, у нас появится потрясающая перспектива для научных исследований, которые скорее всего покажут нам, что история нашей ближайшей космической соседки гораздо сложнее и интереснее, чем мы когда-либо воображали. ■

(«В мире науки», №3, 2004)

ВОТ И САТУРН!

Джонатан Лунин

Космический аппарат *Cassini–Huygens* раскроет тайны Сатурна, его колец и гигантского спутника – Титана.

Раним утром 15 октября 1997 г. с мыса Канаверал во Флориде были запущены орбитальный аппарат *Cassini* и зонд *Huygens* – самый сложный из когда-либо созданных космических роботов. Впереди их ожидало семь лет межпланетного путешествия, а ученых – первое длительное исследование системы Сатурна.

В июле 2004 г. космический аппарат *Cassini-Huygens* достигнет второй по величине планеты Солнечной системы и выйдет на орбиту вокруг нее. После того как более 20 лет назад *Pioneer 11*, и *Voyager 1* и *Voyager 2* пролетели мимо Сатурна и передали результаты наблюдений, исследователи с нетерпением ждали новую экспедицию. Хотя Сатурн меньше Юпитера, его изучение поможет понять эволюцию всех газовых планет-гигантов. Свита Сатурна состоит из 30 маленьких ледяных спутников и одного тела размером с планету – Титана, обладающего плотной атмосферой, которая особенно интересует ученых. (Ее исследование может прояснить проблему возникновения жизни на Земле.) Кроме того, астрономы хотят выяснить, как сформировались кольца Сатурна и как мощное магнитное поле планеты воздействует на ледяные спутники и верхние слои атмосферы Титана.

Ученые надеются, что *Cassini-Huygens* повторит успех аппарата *Galileo*, который за 8 лет работы на орбите вокруг Юпитера изменил наше представление о природе планеты и ее спутников. Но есть важные различия между этими двумя экспедициями. *Galileo* сбросил зонд в атмосферу Юпитера, а *Cassini*, находясь на орбите Сатурна, пошлет зонд *Huygens* к Титану. В отличие от *Galileo*, *Cassini-Huygens* – международный проект: NASA построила орбитальный аппарат *Cassini* и управляет полетом, а Европейское космическое агентство (ESA) разработало зонд *Huygens*.

Замысел экспедиции

Сатурн расположен вдвое дальше от Солнца, чем Юпитер, – на расстоянии 1,4 млрд. км. На нем наблюдается меньше темных полос (поясов) и светлых зон, образованных течениями ватмосфере. Магнитосфера Сатурна – область, где доминирует его магнитное поле, – намного спокойнее,

чем у Юпитера, создающего радиопомехи, которые легко принимаются на Земле. Атмосферу у Титана астрономы обнаружили еще в 1943 г., но, кроме этого, о нем и других спутниках Сатурна было мало известно до наступления космической эры. Любителям астрономии Сатурн всегда казался красивой и таинственной копией грозного Юпитера, парящей в далекой холодной глубине.

Первым аппаратом, долетевшим до Сатурна, был *Pioneer 11* – весьма простой зонд, пролетевший мимо Юпитера в 1974 г. и мимо Сатурна в 1979 г. Его приборы обнаружили прежде неизвестное кольцо Сатурна (кольцо *F*), дистанционно измерили состав атмосферы и параметры магнитного поля планеты. Аппараты *Voyager 1* и *2*, пролетевшие мимо Сатурна соответственно в 1980 и 1981 г., располагали более чувствительными приборами, которые обнаружили в его кольцах темные радиальные пересекающиеся полосы, которые, возможно, образованы пылью, висящей над плоскостью колец. Измерения показали, что кольца состоят из частиц различного размера: от огромных валунов до крошечных пылинок.

Аппараты *Voyager* передали изображения поверхности многих ледяных спутников Сатурна, но самым интересным из всех оказался окутанный атмосферой Титан. *Voyager 1* подлетел на расстояние в 4 тыс. км к этому второму по величине спутнику в Солнечной системе (после Ганимеда у Юпитера). Непроницаемый оранжевый туман закрывал поверхность Титана от телекамер зонда,

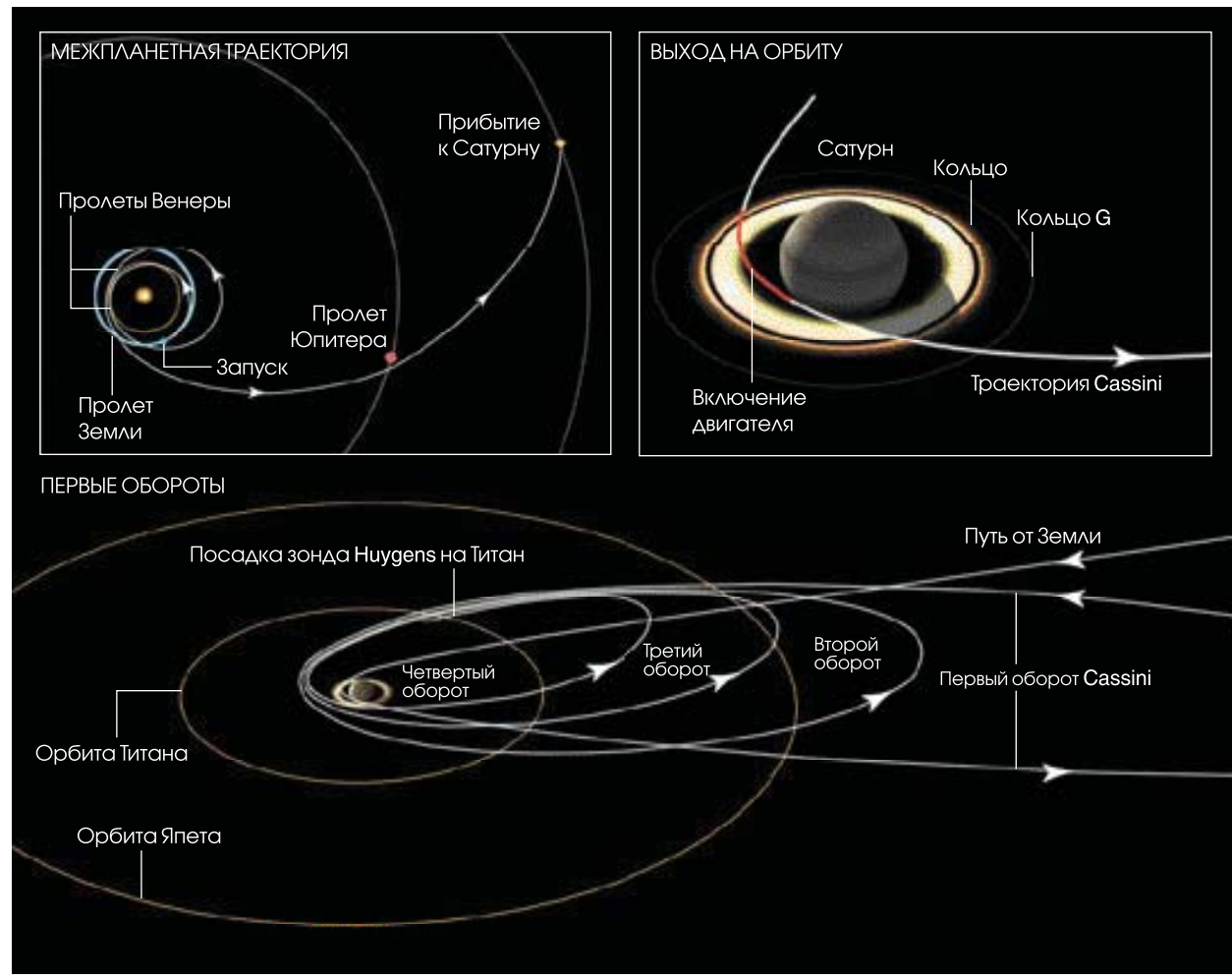
ОБЗОРЫ: ПОЛЕТ К САТУРНУ

- Запущенный в 1997 г. аппарат *Cassini-Huygens* выходит на орбиту вокруг Сатурна в июле 2004 г. и начинает четырехлетнее исследование атмосферы планеты, ее спутников, колец и магнитного поля.
- В декабре *Cassini* пошлет зонд *Huygens* к Титану, крупнейшему спутнику Сатурна. В течение трех часов зонд будет спускаться на парашюте, что позволит ученым изучить атмосферу Титана и его поверхность, которая, возможно, покрыта морями жидких углеводородов.
- Экспедиция будет исследовать процессы, формирующие атмосферу, поверхность и кольца планет и предоставит новые сведения о Солнечной системе.

ТЕРНИСТЫЙ ПУТЬ

Космический тандем *Cassini-Huygens* преодолел более 3 млрд. км на пути к Сатурну. Для увеличения скорости аппарат совершил четыре гравитационных маневра, облетев дважды Венеру, Землю и Юпитер (верхний левый рис.). Промчавшись 1 июля в промежутке между кольцами F и G Сатурна, *Cassini* при наибольшем сближе-

нии с планетой запустит свой двигатель на торможение (красная линия на верхнем правом рис.). Это замедлит аппарат и переведет его на эллиптическую орбиту (нижний рис.). Последующие включения двигателя скорректируют орбиту, обеспечивая встречу зонда Huygens с Титаном.



но другие приборы измерили температуру и давление в атмосфере и показали, что она в основном состоит из азота с небольшой примесью метана.

Оказалось, что динамика атмосферы Титана подобна земной. В обеих атмосферах доминирует азот, но на Титане метан играет такую же метеорологическую роль, какую вода играет на Земле. Он также служит основой органических химических реакций, начинающихся в верхней атмосфере Титана с разрыва ее молекул ультрафиолетовым излучением Солнца. Ученые полагают, что в этот атмосферный цикл может быть включен и дождь из жидких углеводородов, которые могут накапливаться в озерах или даже океанах на поверхности

спутника. Температура поверхности (около -179°C) слишком низка для жидкой воды, но достаточна для существования резервуаров с жидкими углеводородами. Известно, что жизнь не смогла развиваться на Титане, но анализ органических химических циклов на этом спутнике поможет разгадать тайну зарождения жизни на Земле.

Результаты экспедиции *Voyager*’ов воодушевили исследователей, и они решили создать орбитальный аппарат, который мог бы провести всестороннее исследование системы Сатурна. В начале 1980-х гг. финансирование планетных исследований было ограничено, поэтому руководители NASA и ESA задумались об объединении ресурсов.

В 1982–1983 гг. на встрече европейских и американских ученых, посвященной совместным исследованиям Солнечной системы, в первую очередь обсуждалась экспедиция в систему Сатурна.

Удивительное путешествие

Хотя было ясно, что основой миссии станет орбитальный аппарат для исследования атмосферы Сатурна, его колец, спутников и магнитосферы, разгорелся спор о том, куда направить атмосферный зонд: на Сатурн, на Титан или на оба тела. Последний вариант был слишком дорогим. В конце концов выбрали Титан, поскольку всех волновала загадка его атмосферы. К 1985 г. в ESA разработали новую конструкцию спускаемого аппарата, который мог работать в плотной атмосфере Титана в условиях малой силы тяжести. Зонд назвали в честь Христиана Гюйгенса (Christiaan Huygens) – голландского астронома XVII в., открывшего Титан. Орбитальный аппарат (спутник), созданный в Лаборатории реактивного движения в Пасадине (Калифорния), получил имя в честь франко-итальянского астронома XVII столетия Жана-Доминика Кассини (Jean Dominique Cassini), открывшего четыре спутника Сатурна и основной промежуток в его кольцах – деление Кассини. Общая стоимость экспедиции – около \$3 млрд., из которых примерно 25% внесли европейцы.

Спутник *Cassini* и зонд *Huygens* – один из самых больших и тяжелых межпланетных аппаратов из когда-либо построенных. На спутнике 12 научных приборов, а на зонде – 6 (см. вставку на стр. 192). Заправленный горючим, *Cassini-Huygens* весит около 5,5 т, а его высота составляет 6,8 м. Поскольку *Cassini* удаляется вдвое дальше, чем *Galileo*, ему потребовалась более устойчивая система связи и мощная антенна (предоставленная Космическим агентством Италии), больше топлива для маневрирования и более высокая электрическая мощность. Как и в случае *Galileo*, для питания *Cassini* используется естественный распад радиоактивного плутония, генерирующего тепло, которое преобразуется в электричество.

Хотя *Cassini-Huygens* был запущен при помощи самой мощной американской ракеты *Titan 4B* с разгонной ступенью *Centaur*, аппарат весил слишком много, чтобы послать его непосредственно к Сатурну. Следуя примеру предыдущих экспедиций в глубины Солнечной системы, *Cassini* благодаря нескольким гравитационным маневрам смог набрать необходимую скорость. Подлетая близко к планетам, аппарат получал дополнительное ускорение. С 1998 по 2000 г. *Cassini* облетел Венеру (дважды), Землю и Юпитер, а в декабре 2000 г.,

проходя мимо Юпитера, исследовал его магнитосферу издалека, в то время как *Galileo* делал аналогичные измерения с более близкого расстояния. Такие одновременные наблюдения проводились впервые. Они показали, что магнитосфера Юпитера несимметричная, с неожиданным избытком ионов и электронов с одной ее стороны. *Cassini* передал прекрасные изображения Юпитера, детально запечатлевшие его бурную атмосферу.

В 2000 г. при испытании системы связи был выявлен недостаток конструкции, который не позволил бы *Cassini* получить данные от зонда *Huygens*, когда тот будет спускаться к поверхности Титана. (Затем сведения должны быть переданы на Землю.) Радиоприемник спутника не смог получить информацию от зонда во время испытаний, моделировавших доплеровское смещение частоты сигнала, которое будет иметь место при спуске. Инженеры изменили запланированную траекторию полета, чтобы, уменьшив относительную скорость спутника и зонда, свести к минимуму доплеровское смещение.

Прибытие *Cassini* в систему Сатурна произойдет 11 июня 2004 г., когда аппарат минует Фебу – спутник, обращающийся по нерегулярной эллиптической орбите на расстоянии около 13 млн. км от планеты. *Cassini* пройдет на расстоянии 2 тыс. км от этого спутника размером 220 км, который, возможно, состоит из первичного вещества, более 4,5 млрд. лет назад сформировавшего твердые ядра планет-гигантов. Спустя три недели, 1 июля, *Cassini* приблизится к Сатурну с тыльной стороны плоскости колец и пролетит в широкую щель между кольцами F и G. Затем будет запущен двигатель, который в течение 97 минут выдаст тормозной импульс, чтобы замедлить полет космического аппарата и вывести его на орбиту вокруг Сатурна. Пока двигатель будет работать, *Cassini* пролетит на ближайшем расстоянии (18 тыс. км) от Сатурна. Если все пройдет по плану, этот маневр переведет *Cassini* на эллиптическую орбиту, которая будет позже скорректирована дополнительными включениями двигателя (см. рис. на стр. 65).

Спуск к Титану

В течение шести месяцев *Cassini* дважды приблизится к Титаном. Он займется исследованием атмосферы и поверхности гигантского спутника, а также подготовится к посадке зонда. 25 декабря *Cassini* выпустит *Huygens*, который полетит к Титану, питаясь энергией от батарей. 14 января 2005 г. зонд войдет в атмосферу гиганта, простирающуюся над поверхностью на 1 тыс. км, т.е. в 10 раз больше, чем атмосфера

ТАИНСТВЕННАЯ СИСТЕМА САТУРНА

Цель экспедиции Cassini-Huygens – гигантская газовая планета, окруженная массивными кольцами и мощным магнитным полем, сопровождаемая огромным спутником и множеством мелких ледяных лун.

Сатурн
Диаметр: 120536 км
Расстояние от Солнца: 1,4 млрд. км

Изображение Сатурна *Cassini* получил в марте, когда был на расстоянии около 56 млн. км от планеты. Имея массу вдвое меньше, чем у Юпитера, Сатурн в основном состоит из водорода и гелия с примесью метана и аммиака. Сатурн излучает много тепла. Причиной разогрева может быть трение капелек жидкого гелия, опускающихся к центру планеты сквозь более легкий жидкий водород. Если гипотеза верна, то в атмосфере Сатурна должен быть недостаток гелия. *Voyager 1* измерял содержание гелия, но полученные данные были неоднозначны. Инфракрасный спектрометр аппарата *Cassini* сможет более точно определить количество гелия и измерит поток тепла от Сатурна. Эти данные покажут, действительно ли гелий и водород разделяются в недрах планеты.



Магнитосфера
Простирается на 1,5 млн. км по направлению к Солнцу и в десятки раз дальше в противоположную сторону

Магнитосфера Сатурна более симметрична, чем Юпитера, и генерирует намного меньше радишумов, возможно потому, что электропроводимость недр Сатурна меньше, чем у Юпитера. Тем не менее захваченные магнитным полем планеты ионы достаточно энергичны, чтобы оказать влияние на атмосферу Титана и вызывать мощные полярные сияния над полюсами Сатурна, которое запечатлел Космический телескоп «Хаббл». Исследования *Cassini* позволяют лучше понять строение магнитосфер планет.



Кольца
Радиусы колец: от 67 тыс. км (внутренний край кольца D) до 483 тыс. км (внешний край кольца E).
Почему кольца Сатурна (данное фото в 1981 г. передал *Voyager 2*) выглядят гораздо ярче и массивнее, чем кольца других планет-гигантов Солнечной системы? Телекамеры и спектрометры *Cassini* более тщательно исследуют их

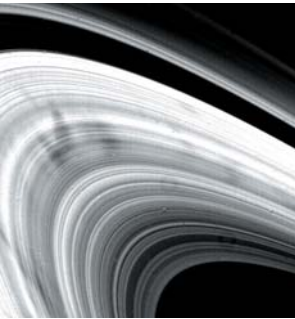
Земли (см. главный рис. на стр. 192). При входе в атмосферу тепловой экран в форме блюдца защитит зонд от перегрева. На высоте 170 км развернется парашют, который замедлит и стабилизирует спуск. При прохождении зонда сквозь слой оранжевого тумана газовый хроматограф и масс-спектрометр (GCMS) будет анализировать состав атмосферы. Другой прибор соберет и выпарит твердые частицы, чтобы их можно было изучить при помощи GCMS. В это же время камера спуска (*Descent Imager*) и спектральный радиометр (*DISR*) сделают снимки облаков метана.

Когда зонд опустится до высоты около 50 км, *DISR* начнет передавать панорамные снимки ландшафта. На последних сотнях метров спуска белая лампа осветит поверхность, которая обычно выглядит грязно-красной, поскольку атмосфера поглощает синие лучи солнечного света. Это позволит *DISR* сделать спектральный анализ поверхности. Для определения силы ветра на Титане на протяжении всего спуска будет отслеживаться сдвиг частоты радиосигнала зонда, а анализатор структуры атмосферы (*Huygens Atmospheric Structure Instrument – HASI*) измерит температуру, давление и электрическое поле, которое может указать на присутствие молний. Весь спуск займет от 2,5 до 3 часов.

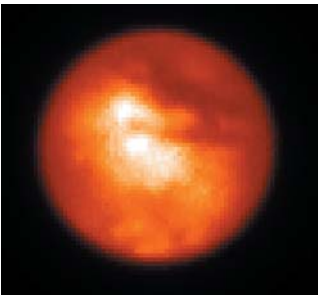
Основная цель *Huygens’a* – исследовать атмосферу Титана, поэтому не было предпринято специальных мер, чтобы гарантировать его сохранность после приземления. Ученых интересует природа поверхности спутника. Покрыта ли она жидкими углеводородами? Имеются ли на ней следы геологической активности или эволюции органического вещества? Или же Титан – просто ледяной спутник, покрытый кратерами? Поэтому зонд оснастили комплексом для изучения поверхности (*Surface Science Package – SSP*), который на заключительной стадии спуска при помощи звуковых волн измерит неровность поверхности. А *HASI* сделает подобные измерения, используя сигналы радара.

При столкновении с Титаном, которое должно произойти на скорости в несколько метров в секунду, акселерометры зонда передадут данные через SSP, чтобы определить, является ли поверхность жесткой, снежной или жидкой. Если зонд переживет посадку, то он сможет трижды по 30 минут передать данные на орбитальный аппарат *Cassini*, прежде чем тот скроется за горизонтом спутника. Если *Huygens* сядет в углеводородное озеро или океан, то SSP измерит температуру, плотность и другие параметры жидкости. Его

структуру. Радиоантенна *Cassini* пошлет сигналы сквозь кольца к Земле, что позволит изучить свойства их частиц. Ученые будут искать доказательства электромагнитного подъема частиц пыли, который впервые заметил *Voyager* (на фото – темные полосы поперек колец). Все это поможет лучше понять процесс формирования планет в газо-пылевых дисках, окружающих новорожденные звезды.



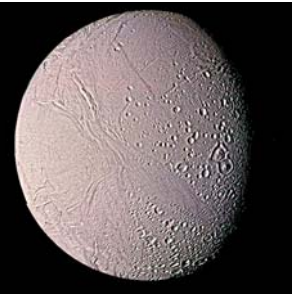
Титан
Диаметр: 5150 км
Расстояние от Сатурна: 1,2 млн. км



Титан больше Меркурия, его атмосфера более плотная, чем у Земли. Температура на поверхности (179°C) говорит о том, что жизнь там вряд ли возможна. Но тепло, исходящее из недр спутника или от падающих на его поверхность крупных комет, может порождать километ-

ровые озера жидкой воды, способной сохраняться под коркой льда сотни лет, если растворенный в ней аммиак сыграет роль антифриза. В озерах из простых углеводов и нитритов могут формироваться аминокислоты, пурины, сахара и другие компоненты живого вещества. На поверхности Титана следы этих процессов могли сохраниться в виде различных органических отложений, которые могут обнаружить приборы *Cassini*. (Фото Титана получено при помощи телескопа *Кек II*.)

Ледяные спутники
Диаметр: от 20 км (Пан – самый маленький спутник) до 1528 км (Рея – самый большой спутник после Титана).
Расстояние от Сатурна: от 133600 км (Пан – наиболее близкий спутник) до 23 млн. км (Имир – самый дальний).
Все спутники Сатурна, за исключением Титана, намного меньше галилеевых спутников Юпитера. На рисунке справа показан очень гладкий Энцелад (фото *Voyager’a 2*) со следами обширного выравнивания поверхности, что характерно для гораздо более массивных спутников. Напротив, Япет имеет неоднородную поверхность: полушарие, обращенное в сторону орбитального движения, намного темнее другого полушария спутника. *Cassini* изучит спутники вблизи с помощью телекамер, спектрометров, радара и детекторов частиц.



датчики вычислят скорость звука внутри жидкости и, возможно, ее глубину. Тем временем *DISR* получит изображения, а *GCMS* попытается определить состав углеводородов. *Huygens* может плавать в жидких углеводородах, хотя их плотность меньше плотности воды.

Четырехлетний вояж

После спуска *Huygens’a* орбитальный аппарат *Cassini* продолжит изучение Титана в течение своего четырехлетнего тура по системе Сатурна. За это время *Cassini* 76 раз облетит вокруг Сатурна, и почти на каждом обороте он будет находиться недалеко от Титана. Каждое сближение станет изменять орбиту *Cassini*, давая ему возможность получать панорамные изображения других спутников Сатурна, его колец и магнитосферы. В отличие от *Galileo* или *Voyagera*, аппарат *Cassini* не имеет подвижных платформ для наведения своих приборов: чтобы уменьшить стоимость проекта, их жестко прикрепили к телу аппарата.

На Земле вода определяет изменения ландшафта, обмен энергией и массой между поверхностью и атмосферой; а на Титане ту же роль играет метан. Но поскольку в атмосфере Титана метан непрерывно разрушается за счет фотохимических

реакций, вызванных ультрафиолетовым излучением Солнца, то он должен как-то восстанавливаться с поверхности или из недр спутника, или при столкновении с кометами. Как определил *Voyager*, его количество на Титане достигает критической точки метана, достаточное для формирования облаков и дождя. Но его концентрации не хватает, чтобы чистый жидкий метан покрыл поверхность: капли метанового дождя до падения на поверхность должны испаряться. Если на Титане существуют моря, то они должны состоять из жидкого этана (продукта фотохимических реакций в атмосфере), смешанного с растворенным в нем метаном.

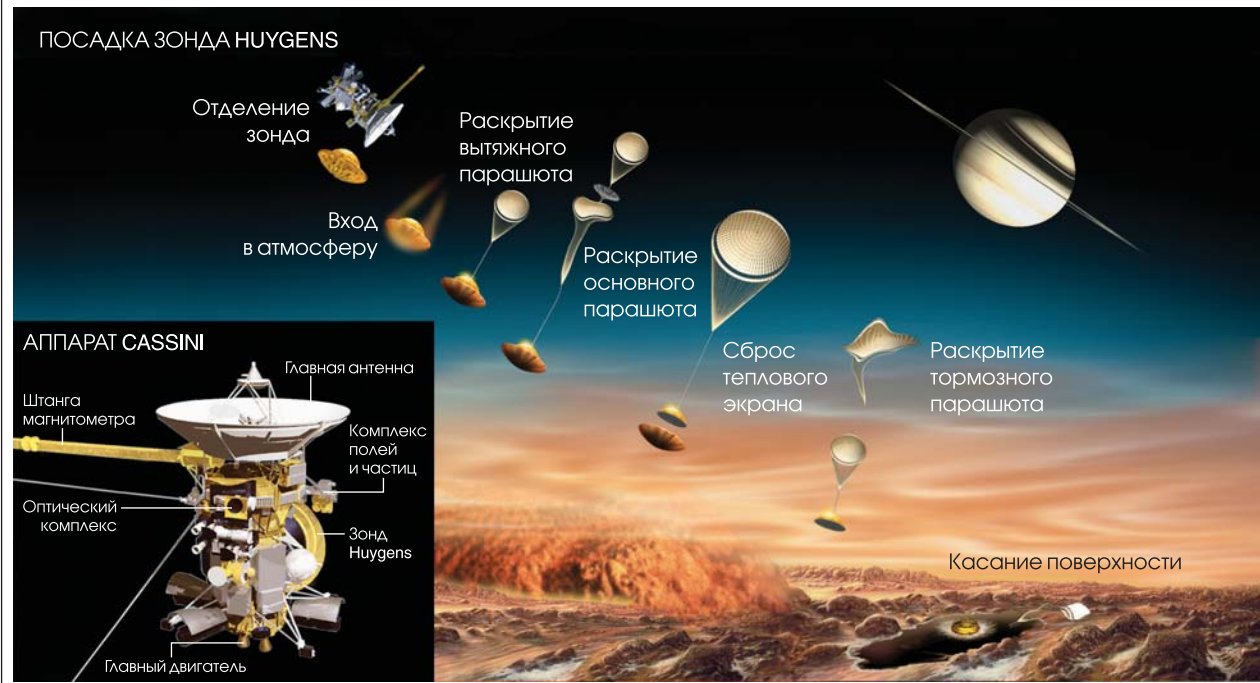
Понять, откуда появляется метан и куда деваются продукты его фотохимических реакций – одна из важнейших задач экспедиции *Cassini-Huygens*. Покрыта ли поверхность Титана морями из смеси метана и этана? Новые данные радиотелескопа в Аресибо на о. Пуэрто-Рико указывают, что дело, возможно, обстоит именно так, но подтвердить предположение смогут только *Cassini* и *Huygens*. Если морей или озер не обнаружится, то возможно, на Титане за всю его историю не было достаточно метана и этана, чтобы сформировать их. При таких обстоятельствах нынешний состав

РАЗВЕДЧИК ТИТАНА

25 декабря *Cassini* спустит 320-кг зонд *Huygens*, который 14 января 2005 г. войдет в атмосферу Титана со скоростью около 20 тыс. км/час. Когда он опустится до высоты около 170 км, парашюты замедлят его спуск и будет сброшен тепловой экран, позволяя научным приборам начать исследование атмосферы и поверхности спутника. Зонд передаст эти данные на орбитальный аппарат *Cassini*, который пошлет их на Землю.

Позже *Cassini* (на вставке) будет изучать Титан. Оптический комплекс аппарата включает две телекамеры и несколько спектрометров. Комплекс полей и частиц состоит из нескольких приборов для исследования магнитосферы Сатурна – области, где доминирует его магнитное поле. Одни приборы регистрируют заряженные частицы, захваченные полем; другие же измеряют потоки пыли и час-

тиц, вырванных с поверхности ледяных спутников ударами быстрых ионов. Когда *Cassini* пройдет на расстоянии около 1 тыс. км над поверхностью спутника, приборы произведут прямой анализ верхней атмосферы Титана, а магнитометр, вынесенный на 11-метровой штанге, измерит характеристики магнитного поля Сатурна. Четырехметровая антенна связи *Cassini* будет использована как радар: «тарелка» может посылать радиоимпульсы к твердым телам и получать отраженные сигналы, указывающие форму и шероховатость поверхности. Сквозь атмосферу Титана радар увидит детали его поверхности. Кроме того, он измерит микроволновое излучение Титана и температуру ее поверхности и атмосферы. Наконец, антенна связи поможет исследовать атмосферу Сатурна и Титана, посылая сквозь них радиосигналы к Земле.



и объем атмосферы спутника, поддерживаемый парниковым эффектом метана, есть лишь счастливая случайность, связанная с недавним падением ядра кометы или выбросом газа из недр спутника. Сейчас ученые пытаются понять, откуда на Титане появились азот и метан и почему он является единственным спутником в Солнечной системе, обладающим плотной атмосферой.

Благодаря приборам зонда мы сможем получить ответы на эти вопросы. Телекамеры, спектрометры и радар, способный видеть сквозь густой туман, будут искать углеводородные моря на поверхности Титана. Другие приборы изучат взаимодействие атмосферы Титана с заряженными частицами из магнитосферы Сатурна. Радиосигналы исследуют атмосферу спутника и покажут,

как меняется ее температура при изменении широты и высоты. Эти данные вместе с изображениями, переданными орбитальным аппаратом, возможно, помогут обнаружить метановые дожди. Облака метана будут сфотографированы и измерены их температура и давление. Кроме того, вычислив долю метана, содержащего дейтерий, и отношение количества азота к благородным газам аргону и криптону, возможно, удастся определить источники метана и азота в атмосфере спутника.

После первого пролета *Cassini* вдоль Титана и посадки на него зонда *Huygens* орбитальный аппарат продолжит изучение гигантского спутника, который таит в себе множество неожиданных открытий. ■

(«В мире науки», №8, 2004)

ЯДЕРНЫЕ ВЗРЫВЫ НА ОРБИТЕ

Дэниел Дюпон

Распространение ядерного оружия и баллистических ракет создает угрозу атомного удара по глобальной системе искусственных спутников Земли.

9 июля 1962 г. в США на атолле Джонстон в Тихом океане прошли испытания термоядерного взрыва в космосе. Запуск ядерной боеголовки с использованием баллистической ракеты *Thor*, под кодовым названием «Морская звезда-1», был последним в серии подобных экспериментов, проводившихся на протяжении четырех лет министерством обороны США. В тот момент, когда ракета прочертила в небе дымный след, мало кто мог предположить, насколько неожиданными окажутся последствия высотного взрыва мощностью 1,4 мегатонны.

Тем временем на Гавайях, примерно в 1300 км от места событий, информация о последнем взрыве «радужной бомбы» просочилась в печать, и население островов с нетерпением ожидало начала «фейерверка». Когда боеголовка взорвалась на высоте 400 км, ослепительная вспышка на мгновения озарила море и небо подобно полуденному солнцу, после чего небеса на секунду приобрели светло-зеленый цвет.

Однако большинство жителей Гавайских островов наблюдали менее приятные последствия взрыва. На острове Оаху внезапно погасло уличное освещение, перестала приниматься местная радиостанция, а также пропала телефонная связь. Где-то в Тихом океане на полминуты нарушилась работа высокочастотных систем радиосвязи. Позже ученые установили, что «Морская звезда» послала в пространство электромагнитный импульс (ЭМИ) гигантской разрушительной силы, который захлестнул огромную территорию вокруг эпицентра взрыва.

В течение нескольких минут небо над горизонтом окрасилось в кроваво-красный цвет. Ученые с нетерпением ожидали именно этого момента. Во всех предыдущих высотных испытаниях в космосе возникало облако заряженных частиц, которое через некоторое время деформировалось магнитным полем Земли и вытягивалось вдоль ее естественных радиационных поясов, обрисовывая их структуру (см. иллюстрацию на стр. 195). Но никто не ожидал того, что случилось в последующие месяцы: интенсивные искусственные радиационные пояса вывели из строя семь спутни-

ков, обращавшихся на низких околоземных орбитах, – треть существовавшего тогда космического флота.

Тревога: высотные ядерные взрывы!

Сегодня ИСЗ используются в связи, навигации, телевидении и радиовещании. Согласно данным Ассоциации спутниковой промышленности, на низких орбитах обращается около 250 коммерческих и военных спутников, и большинство из них абсолютно беспомощно перед радиацией, которую может вызвать высотный атомный взрыв. Стремительное увеличение производства ядерного оружия и баллистических ракет вызывает опасения и заставляет задуматься о будущем мировой спутниковой системы. Один небольшой ядерный заряд, взорванный на выбранной высоте над США, «может повлиять на связь, электронику и другие системы, что нанесет непоправимый ущерб экономике страны», – утверждает Роберт Норрис (Robert Norris), старший научный сотрудник Совета по охране природных ресурсов, принимающий участие в ядерной программе.

США, Россия, Китай, Великобритания, Франция, Израиль, Индия, Пакистан и, возможно, Северная Корея сейчас обладают такими возможностями.

Отчет за 2001 г., выпущенный комитетом Дональда Рамсфелда (Donald H. Rumsfeld), нынешнего министра обороны (официально этот комитет носит название: комиссия по безопасности управления и организации национальных космических

ОБЗОР: ЯДЕРНЫЕ ВЗРЫВЫ НА ОРБИТЕ

- Взрыв ядерного заряда на низкой орбите на несколько лет нарушит нормальную работу коммерческих и гражданских спутников.
- Все больше стран (и, возможно, негосударственных структур) получают доступ к ядерному оружию и баллистическим ракетам. Пока вероятность агрессии невелика, но, принимая во внимание чудовищные последствия, забывать о ней нельзя.
- Если ядерный взрыв в космосе все же произойдет, воздействие низкочастотными радиоволнами может уменьшить количество опасных заряженных частиц и очистить пространство для работы спутников.



Испытание, проведенное в 1958 г. министерством обороны США, назвали «Апельсин». 1,9-мегатонная атомная бомба была взорвана на высоте около 43 км над атоллom Джонстон в Тихом океане.

исследований), предупреждает, что «США могут ожидать «космический Перл-Харбор». Далее в этом документе содержится призыв к руководству государства предпринимать более активные действия, чтобы снизить угрозу неожиданного нападения и его возможных последствий.

Система противоракетной обороны, которую создает США, чтобы оградить себя и своих союзников от атак с использованием ракет дальнего действия, не слишком надежна и скорее всего не способна полностью защитить эти страны. Грубо говоря, если против ракеты с ядерной боеголовкой и дистанционным взрывателем применить противоракету, то этим можно спровоцировать высотный ядерный взрыв.

В 2001 г. Управление обороны Пентагона по снижению угрозы (*Defense Threat Reduce Agency, DTRA*) попыталось оценить возможные последствия испытаний для низкоорбитальных спутников. Результаты неутешительные: одного небольшого ядерного заряда (от 10 до 20 килотонн – как бомба, сброшенная на Хиросиму), взорванного на высоте от 125 до 300 км, «достаточно, чтобы на несколько недель или даже месяцев вывести из строя все спутники, не имеющие специальной защиты от радиации». Денис Пападопулос (K. Dennis Papadopoulos), специалист по физике плазмы из Мэрилендского университета, иного мнения: «10-килотонная ядерная бомба, взорванная на специально рассчитанной высоте, может привести к потере 90% всех низкоорбитальных спутников примерно на месяц».

Согласно отчету управления, в некоторых точках околоземного пространства в результате высотного ядерного взрыва уровень радиации

может увеличиться на 3–4 порядка и оставаться повышенным в течение двух лет. Все спутники, оказавшиеся в зоне с повышенным фоном, будут накапливать радиацию гораздо быстрее, чем предполагалось при проектировании, что значительно снизит быстродействие электроники и приведет к росту потребления энергии. Вероятно, в первую очередь откажет система ориентации или связи, и спутники уже не смогут выполнять свои задачи или их срок службы значительно сократится. К тому же высокий уровень радиации мешает запуску ремонтных бригад. «Пилотируемые космические полеты должны быть прекращены на год или более, пока уровень радиации не снизится», – отмечается в отчете. Подсчитано, что издержки на замену аппаратуры, выведенной из строя последствиями высотного ядерного взрыва, составят более \$100 млрд. (Не считая общих экономических потерь от утраты возможностей, предоставляемых космической техникой!) «К сожалению, мы не придаем угрозе высотных ядерных взрывов того значения, которого она заслуживает», – предостерегает Курт Велдон (Curt Weldon), сторонник развертывания системы ПРО и ядерной обороны, член комитета по вооружениям палаты представителей конгресса США.

Низкая орбита – высокий риск

Сегодня изучаются последствия американских и советских ядерных испытаний в космосе, проводившихся в 1950-х и 1960-х гг. Известно, что ядерный взрыв в атмосфере создает быстро расширяющееся облако раскаленного газа (плазмоид), которое посылает вовне ударную волну. В то же время оно испускает во всех направлениях чудовищное количество энергии в виде теплового излучения, высокоэнергичных рентгеновских и гамма-квантов, быстрых нейтронов и ионизированных остатков самой ядерной боеголовки. Вблизи Земли атмосфера поглощает излучение, из-за чего воздух нагревается до экстремально высокой температуры. Этого достаточно, чтобы «мягко посадить» ядерное облако на Землю. Молекулы воздуха ослабляют генерацию электромагнитного импульса. Поэтому основные разрушения от ядерного взрыва, произведенного недалеко от поверхности, вызваны ударными волнами, стирающими все с лица Земли, ветрами неимоверной силы и поистине адской жарой.

Высотные ядерные взрывы (обычно более 40 км) сопровождаются совершенно другими эффектами. Поскольку они происходят практически в безвоздушном пространстве, облако плазмы расширяется гораздо быстрее и достигает большего

размера, чем это было бы у поверхности, а излучение проникает гораздо дальше.

Денис Пападопулос объясняет, что возникающий при этом сильный электромагнитный импульс имеет сложную структуру. В первые несколько десятков наносекунд около 0,1% энергии, произведенной взрывом, высвечивается в виде гамма-излучения с энергией квантов от 1 до 3 МэВ (мегаэлектронвольт, единица измерения энергии). Мощный поток гамма-квантов ударяет в земную атмосферу, где они сталкиваются с молекулами воздуха и отрывают от них электроны (отскакивание электрона при столкновении с гамма-квантом физики называют эффектом Комптона). Так образуется лавина комптоновских электронов с энергиями порядка 1 МэВ, которые движутся по спиральным траекториям вдоль силовых линий магнитного поля Земли. Создающиеся нестабильные электрические поля и токи генерируют на высоте от 30 до 50 км над поверхностью Земли электромагнитное излучение в диапазоне радиочастот от 15 до 250 МГц.

По словам Дениса Пападопулоса, для мегатонной бомбы, взорванной на высоте 200 км, диаметр излучающей области будет примерно 600 км. Высотный ЭМИ может создать разность потенциалов, достаточную, чтобы разрушить любые

чувствительные электрические цепи и приборы, находящиеся на земле в пределах прямой видимости. «Но на высокой орбите поле, создаваемое ЭМИ, не так сильно и в целом создает меньше помех», – добавляет он.

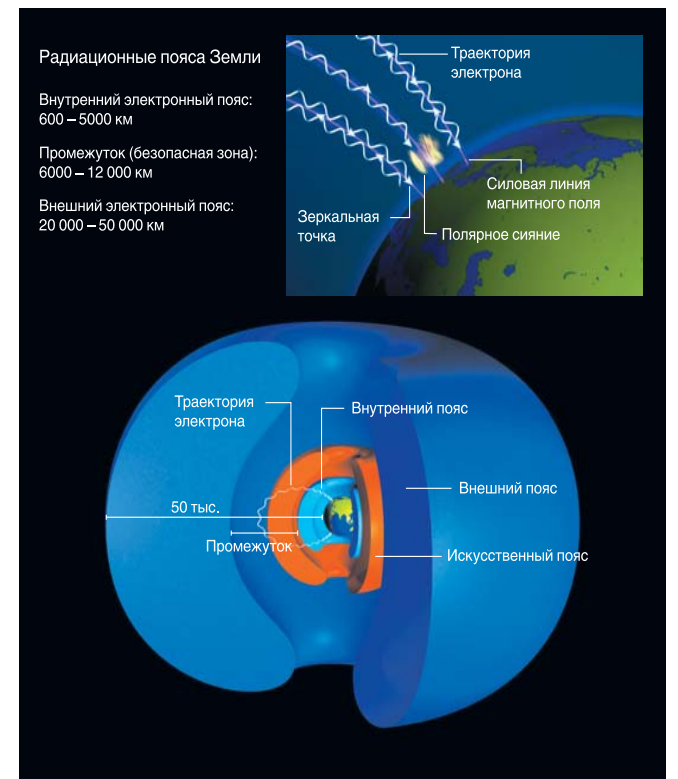
Ученые утверждают что, по крайней мере 70% энергосвечения атомной бомбы приходится на электромагнитное излучение в рентгеновском диапазоне, которое, как и сопутствующее ему гамма-излучение и нейтроны с высокой энергией, проникает сквозь все предметы, встречаемые на пути. Энергия излучения уменьшается с расстоянием, поэтому спутники, находящиеся далеко от места взрыва, страдают меньше, чем оказавшиеся поблизости.

«Мягкий рентген» – рентгеновские лучи с низкой энергией, которые также образуются при высотном ядерном взрыве, – не проникает внутрь космического аппарата, но нагревает его оболочку, что может вывести из строя электронную начинку спутника. К тому же мягкий рентген разрушает покрытие солнечных батарей, значительно ухудшая их способность вырабатывать энергию, а также портит оптические поверхности датчиков положения и телескопов. Рентгеновское излучение более высокой энергии, воздействуя на

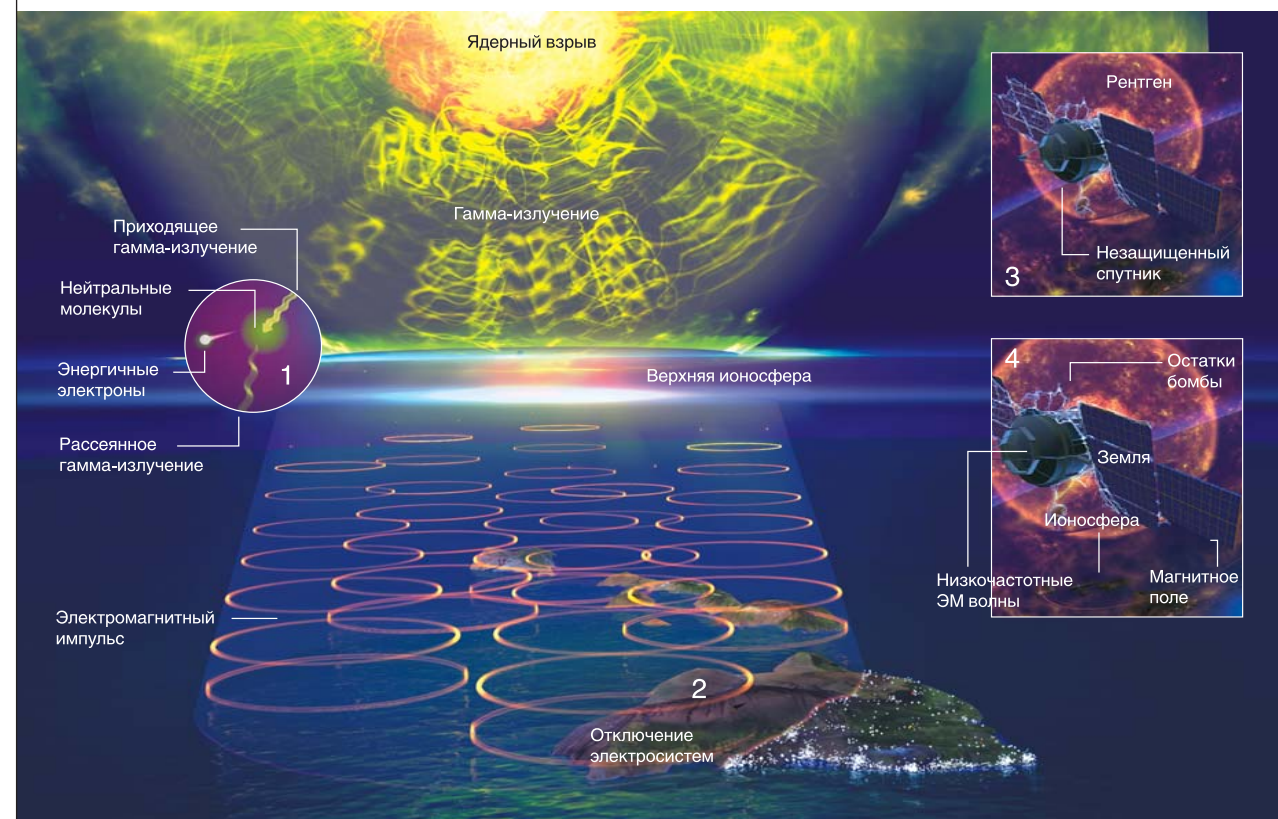
МАГНИТНЫЕ ОКРЕСТНОСТИ ЗЕМЛИ

Дипольное магнитное поле нашей планеты захватывает электроны солнечного ветра (или образовавшиеся при ядерном взрыве), которые движутся вдоль силовых линий от одного полюса к другому. Электроны заполняют область тороидальной формы (как пончик), опоясывающую земной шар и названную радиационными поясами. Между внешним и внутренним поясами имеется промежуток – область с относительно малым количеством электронов, там ИСЗ находятся в безопасности. Если в результате высотного ядерного взрыва радиационные пояса «раздуются» от поступивших в них электронов, то заряженные частицы заполнят и эту область и выведут из строя электронную начинку спутников.

Когда электрон приближается к концу магнитной линии, возле полюсов, где магнитные силы больше, он замедляется. В некоторой точке – ее называют зеркальной точкой – частица останавливается и начинает двигаться обратно вдоль силовой линии магнитного поля. Высота зеркальной точки над поверхностью Земли зависит от так называемого питч-угла частицы – угла между линией магнитного поля и направлением скорости частицы, которая летит по спирали вокруг силовой линии. Для частиц, питч-углы которых острые (движение скорее параллельно линиям магнитного поля, чем перпендикулярно), зеркальная точка лежит ниже 100 км, и такие частицы могут сталкиваться с молекулами атмосферы, вызывая полярные сияния. Если зеркальная точка расположена выше 100 км, то частицы путешествуют от полюса к полюсу.



ПОСЛЕДСТВИЯ ВЫСОТНОГО ЯДЕРНОГО ВЗРЫВА



Обычно взрыв ядерной бомбы на орбите сопровождается следующая последовательность событий. В первые десятки наносекунд происходит мощный выброс гамма-квантов, которые, сталкиваясь с нейтральными молекулами на высоте 30–40 км в атмосфере Земли, рождают высокоэнергичные электроны (1). Эти заряженные частицы, летящие с огромной скоростью, генерируют мощный ЭМИ, который может вывести из строя любую чувствительную электронику, находящуюся в пределах его досягаемости на поверхности Земли (2).

В течение следующих нескольких секунд большая часть энергии боеголовки «высветится» в форме рентгеновского излучения (3). Когда эти мощные электромагнитные волны встречаются на своем пути незащищенный спутник, они вызывают сильные токи и напряжения в теле спутника, отчего перегорает вся его хитроумная электронная начинка.

Остатки боеголовки в виде ионизированного вещества, расталкиваемые расширяющимся плазмойдом, пролетят еще несколько сотен километров. Эти заряженные частицы взаимодействуют с магнитным полем Земли, отчего возникает электрическое поле, меняющееся с низкой частотой (4). Эти медленно осциллирующие волны распространяются вокруг земного шара, отражаясь от поверхности Земли и нижнего края ионосферы. Несмотря на то что электрическое поле слабо, оно может создавать значительные напряжения между концами протяженных наземных или подводных линий электропередач, что разрушает электрические цепи даже вдали от места взрыва.

В течение следующих недель и месяцев энергичные электроны, захваченные магнитным полем, постепенно выведут из строя электрические системы всех спутников на своем пути.

спутник, вызывает образование потоков электронов, которые приводят к возникновению сильных электрических токов и напряжений, способных попросту сжечь чувствительные электросхемы.

Как считает Денис Пападопулос, ионизованное вещество самой боеголовки вступает во взаимодействие с магнитным полем Земли, которое выталкивается из области радиусом 100–200 км, и его движение приводит к возникновению низкочастотных электрических колебаний. Эти медленно осциллирующие волны отражаются от поверх-

ности Земли и нижних слоев ионосферы, в результате чего эффективно распространяются вокруг земного шара. Несмотря на то что амплитуда электрического поля невелика (менее милливольт на метр), на больших расстояниях, например, на концах наземных или подводных линий электропередач, может возникнуть значительное напряжение, что вызовет многочисленные пробой в электрических цепях. Именно этот эффект вызвал аварии в электрических и телефонных сетях Гавайев после эксперимента «Морская звезда».

После проявления первых последствий взрыва на сцену выходит сам плазмойд. Это облако энергичных электронов и протонов ускоряется магнитным полем в магнитосфере Земли, в результате естественные радиационные пояса, окружающие планету, увеличатся в размерах. Кроме того, некоторые частицы «убегают» из этих областей и образуют искусственные радиационные пояса в промежутке между естественными. Этот эффект назван в честь Николаса Христофилоса (Nicholas Christofilos), предсказавшего его в середине 1950-х гг. В конце 1950-х гг. США произвели серию ядерных взрывов в космосе (проект «Аргус»), полностью подтвердивших гипотезу Христофилоса, считавшего, что искусственные радиационные пояса смогут блокировать радиосвязь или даже выводить из строя попадающие в них баллистические ракеты.

Защита спутников

Пентагон уже несколько десятилетий разрабатывает программу защиты своих космических аппаратов. Многие военные спутники были переведены на высокие орбиты, считающиеся относительно безопасными в случае ядерного взрыва. На некоторые спутники установили специальные экраны, защищающие электронику от радиации; по сути, это Фарадеевы клетки – замкнутые металлические оболочки, не пропускающие внутрь внешнее электромагнитное поле. (Обычно чувствительные элементы спутника окружают оболочкой из алюминия толщиной от 1 мм до 1 см.)

Согласно некоторым оценкам, усиление спутника специальными экранирующими панелями и создание защищенных узлов системы, а также выведение на орбиту дополнительной массы повышает его общую стоимость на 20–50%. Электронные компоненты, способные выдержать повышение радиационного уровня в 100 раз без ущерба для работоспособности, имеют рабочую полосу частот в 10 раз меньше, чем выпускаемые сейчас, что может на порядок увеличить расходы на эксплуатацию.

Денис Пападопулос считает, что серьезной проблемой, возникающей при высотном ядерном взрыве, является то, что диэлектриками накапливается заряд, возникающий из-за обстрела спутника быстрыми электронами с энергией порядка 1 МэВ. Высокоэнергичные электроны проникают сквозь корпус или защитный кожух спутника и, тормозясь, застревают в полупроводниковых электронных элементах и солнечных батареях. Присутствие «чужаков» создает разность потенциалов там, где ее быть не должно, что ведет к разрядке аккумуляторов и возникновению нежела-

тельных токов, приводящих к разрушению системы. При этом, если толщина защитного экрана превышает 1 см, объясняет Денис Пападопулос, то ее эффективность снижается, поскольку в этом случае столкновение с высокоэнергичной частицей провоцирует интенсивное электромагнитное тормозное излучение (т. е. излучение, возникающее при резком уменьшении скорости заряженной частицы, вызванном столкновением с другим телом).

Ларри Лонгден (Larry Longden) из компании *Maxwell Technologies*, производящей защиту для искусственных спутников, утверждает, что на спутнике можно установить датчик, регистрирующий уровень радиации. При превышении допустимого предела сигналом с Земли можно будет выключить бортовой компьютер и подождать, пока снизится фон радиации.

Вслед за бомбой

Если сегодня противник взорвет ядерную бомбу в космосе, то США не смогут полностью избежать последствий этого взрыва. Однако в будущем, похоже, это станет возможным. Грэг Гине (Greg Ginet), руководитель проекта исследовательской лаборатории военно-воздушных сил, говорит, что можно ликвидировать радиацию «быстрее, чем природа сама справится с возникшей про-



В рамках испытания проекта «Царь-рыба» американская баллистическая ракета *Thor* подняла ядерную боеголовку (мощностью менее 1 мегатонны) на высоту 97 км. Красное свечение – результат ударного возбуждения атомов кислорода. Необычная структура, наблюдаемая в нижней части фотографии, – результат взаимодействия высокоэнергичных электронов с молекулами воздуха. В 1962 г. этот взрыв на три часа нарушил радиосвязь в районе Тихого океана.

блемой». В рамках проекта, финансируемого Управлением перспективного планирования оборонных научно-исследовательских работ США (*Defense Advanced Research Project Agency, DARPA*), сейчас изучается вопрос, могут ли искусственно созданные радиоволны очень низкой частоты способствовать «выдуванию» радиации из областей, где проходят низкие орбиты.

Для того чтобы лучше понять, как метод работает, Денис Пападопулос предлагает рассмотреть следующую аналогию. Радиационный пояс Земли в каком-то отношении напоминает протекающую чашку. Магнитные силы «закачивают» энергичные частицы, т.е. плазму, в радиационные пояса. Скорость, с которой плазма «вытекает» оттуда, зависит от амплитуды низкочастотных волн (волн с частотами от 1 Гц до 20 кГц) в ближайшей окрестности. Однако ядерный взрыв переполняет «чашку», поэтому возникают дополнительные, искусственные радиационные пояса. Способ, с помощью которого можно быстрее удалить плазму

из магнитосферы, означает увеличение скорости вытекания из «чашки», грубо говоря, просто расширения вней «дыры».

Теоретически можно создать флотилии специальных спутников, которые бы генерировали низкочастотные радиоволны в непосредственной близости от радиационных поясов. Поэтому *DARPA* совместно с военно-воздушными силами проводит эксперименты с низкочастотными излучателями в рамках проекта *HAARP* (*High Frequency Active Auroral Research Program* – Программа активного высокочастотного исследования авроральной области) в местечке Гакона на Аляске. В *HAARP* ученые изучают активные образования в ионосфере и то, как можно искусственно управлять их свойствами. Проект предполагает исследования в области технологий связи с подводными лодками и другими объектами, находящимися под земной поверхностью. Важно также проверить, можно ли с помощью установок уменьшить концентрацию заряженных частиц

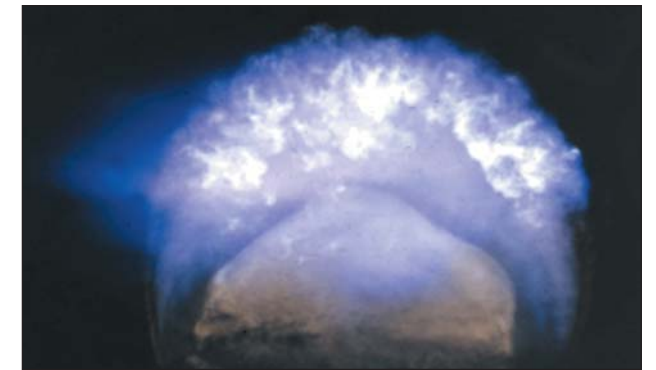
в радиационных поясах Земли. Сейчас ученые определяют, сколько спутников требуется для создания глобальной системы подавления искусственных радиационных поясов. Им помогает работа ученых Стэнфордского университета, выполненная в 1970–1980-х гг., которые использовали излучатель низкочастотных радиоволн, расположенный в районе Южного полюса для того, чтобы посылать волны к радиационным поясам. Было замечено, что временами амплитуда волн значительно усиливалась электронами, захваченными радиационными поясами. Денис Пападопулос утверждает, что это происходит потому, что свободная энергия частиц в магнитной «ловушке» передается электромагнитным волнам. Этот резонансный процесс сродни тому, что происходит в лазерах на свободных электронах, где переменное магнитное поле ускоряет электроны, которые излучают в синхротронном режиме.

Именно данный эффект лежит в основе идеи *HAARP*. Поскольку низкочастотные волны, излучаемые спутником, можно усилить естественным способом, без привлечения техники, то можно использовать излучатель меньшей мощности, что значительно удешевит проект. Исследователи из министерства обороны США показали, что это снизит количество требуемых спутников до 10.

Ученые продемонстрировали, что установки могут генерировать колебания низких и сверхнизких частот и эффективно «впрыскивать» их в радиационные пояса. Это было сделано путем периодических вариаций аврорального электроджета – природного токового слоя в ионосфере Земли на высоте около 100 км. Модуляция потока электронов производилась с помощью естественной антенны, излучающей волны низких и сверхнизких частот, которую создавали путем периодического включения и выключения высокочастотного передатчика, изменявшего температуру, а значит, и проводимость ионосферной плазмы. Исследователи ожидают, что метод поможет оценить жизнеспособность плана, согласно которому будет создана система усиления радиоволн и уменьшения концентрации заряженных частиц в радиационных поясах. Космический эксперимент для проверки данной гипотезы может быть проведен в течение ближайших 10 лет.

Так ли мала угроза?

Международные кризисы могут привести к высотным ядерным взрывам. Используя методы, применяемые военными стратегами при планировании и моделировании развития конфликтных ситуаций, группа *DTRA* предложила два воз-



Испытание *Teak* было проведено министерством обороны США в 1958 г., которое должно было исследовать эффекты, полезные для противоракетной обороны. Ракета типа *Redstone* вынесла 1,9-мегатонную атомную бомбу в верхние слои атмосферы, где ее взорвали на высоте 77 км.

можных сценария, которые могут быть реализованы до 2010 г. Первый: индийские бронетанковые войска пересекают границу с Пакистаном во время очередной вооруженной стычки за судьбу Кашмира, и правительство Пакистана отвечает взрывом 10-килотонной ядерной бомбы в 300 км над Нью-Дели. Согласно второму сценарию, Северная Корея перед лицом возможной агрессии принимает решение взорвать ядерную боеголовку над своей собственной территорией, при этом срабатывает американская система ПРО, которая уничтожает ракету на высоте 150 км.

Джон Пайк (John Pike), возглавляющий наблюдательную оборонную организацию «Глобальная безопасность», считает вполне возможным сценарий развития событий, при котором Северная Корея произведет ядерные испытания согласно своей космической программе.

Эксперты рассмотрели и другие возможные варианты. Некоторые из них предполагают высотный ядерный взрыв над территорией США, что вряд ли будет возможным. Подвижная морская платформа вполне может служить для пуска самой простой ракеты с небольшой боеголовкой, которая тем не менее способна нанести серьезный ущерб.

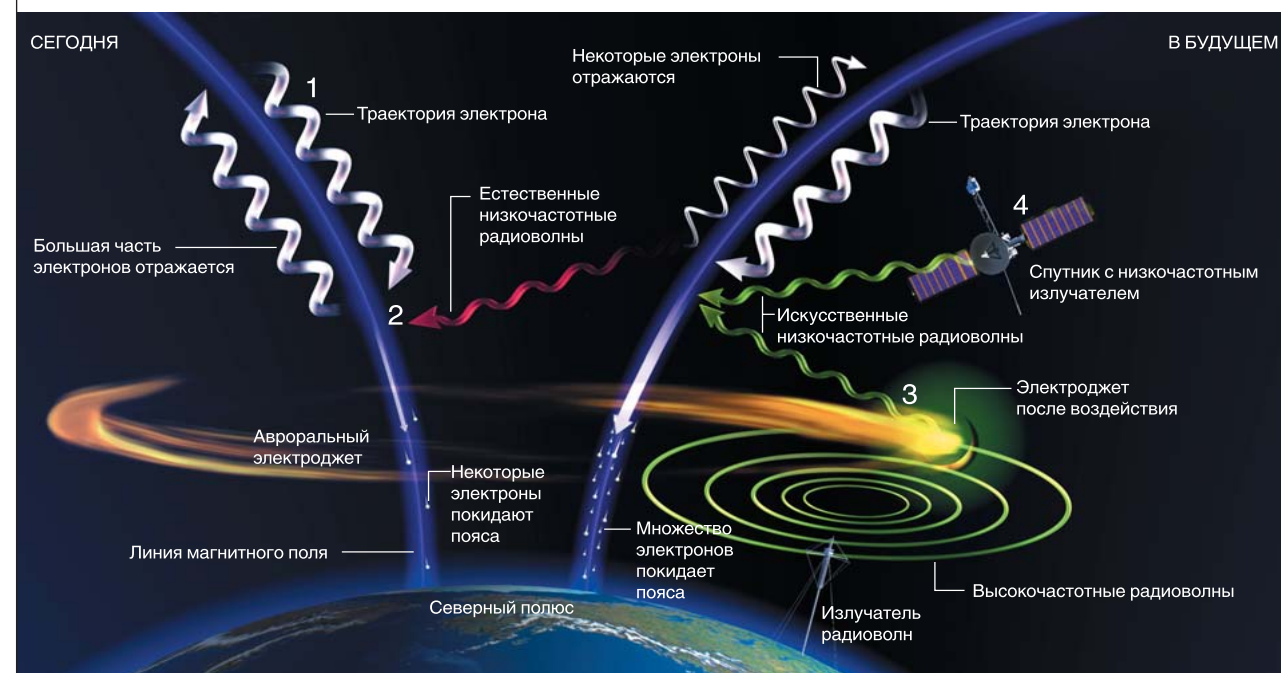
Кроме того, существует проблема адекватного ответа на агрессию. Безусловно, ядерная атака на США или страны-союзницы подразумевает немедленный военный ответ. Но как быть с высотным ядерным взрывом? Курт Велдон считает: «С нравственной точки зрения проблема стоит так: оправдывает ли ядерный взрыв в космосе вторжение на территорию агрессора и убийство людей? Будет ли ответный ядерный удар? Возможно, что нет».

(«В мире науки», №9, 2004)

СМЯГЧЕНИЕ ПОСЛЕДСТВИЙ ВЫСОТНОГО ЯДЕРНОГО ВЗРЫВА

Для естественного распада радиационного пояса, образовавшегося в результате взрыва, может потребоваться несколько лет. Его время жизни зависит от того, насколько быстро электроны покидают магнитное поле Земли. Большая часть этих захваченных электронов летает от одного полюса к другому вдоль силовых линий магнитного поля (1). Радиоволны низких и сверхнизких частот взаимодействуют с электронами вблизи полюса и заставляют их отклоняться от своей первоначальной траектории, что значительно повышает вероятность выпадения заряженных частиц на Зем-

лю (2). Ученые обнаружили, что если искусственно создавать такие волны вблизи полюсов, то можно увеличить темп потери электронов. Фокусируя переменное высокочастотное излучение (переменность достигается периодическим включением/выключением излучателя) на авроральной области ионосферы в 100 км от поверхности над полюсами, можно управлять электрическим током в ионосфере и тем самым искусственно генерировать низкочастотные волны (3). Возможно, что когда-нибудь для этого будут запускать спутник, излучающий низкочастотные радиоволны (4).



ДЕЛО О ПОТЕРЯННОЙ ПЛАНЕТЕ

Уильям Шихан, Николас Коллерстром и Крэг Вафф

Англичане украли Нептун?

«Этой звезды нет на карте!» – воскликнул студент-астроном Генрих Луи д'Арре, из Берлинской обсерватории, разложив на столе карту звездного неба. И его слова услышал весь мир.

Ночью 23 сентября 1846 г. астроном Иоганн Готфрид Галле (Johann Gottfried Galle) и его коллега д'Арре занимались проверкой предположения, сделанного французским математиком Урбеном Жаном Жозефом Леверье (Urbain Jean Joseph Le Verrier). Согласно предложенной гипотезе, Уран, считавшийся в те времена наиболее удаленной от Солнца планетой, отклоняется от вычисленной для него орбиты из-за гравитационного влияния другой, но невидимой. Всего за пять дней до этой сентябрьской ночи Леверье писал Галле: «Наблюдения Урана можно объяснить, лишь учтя воздействие новой, неизвестной до сих пор планеты, и, что самое интересное, на эклиптике есть лишь одно место, где она может располагаться».

Менее получаса понадобилось Галле, чтобы найти маленькое голубое пятнышко в пределах одного градуса от указанного места. Когда на следующую ночь телескоп был направлен на тот же объект, оказалось, что он немного переместился на фоне звезд. Галле сразу же написал Леверье:

ОБЗОР: КТО ОТКРЫЛ НЕПТУН?

- В начале XIX в. существовала проблема скрытой массы: планета Уран отклонялась от вычисленной орбиты. Загадка разрешилась в 1846 г., когда наблюдатели обнаружили Нептун, притяжение которого сбивало Уран с орбиты.
- Историки традиционно делили славу первооткрывателя планеты между французским теоретиком Урбеном Леверье и англичанином Джоном Адамсом.
- Когда началось повторное расследование роли Адамса в открытии планеты, пачка важных документов без вести пропала из британского архива. Они всплыли в Чили в 1998 г. А летом 2004 г. авторы обнаружили еще некоторые документы.
- Адамс провел некоторые интересные вычисления, но не заслужил славы первооткрывателя Нептуна.

«Планета, которую вы предсказали, действительно существует!»

История о математически вычисленной и обнаруженной в телескоп планете, которую Леверье назвал Нептуном, – одна из самых знаменитых и часто упоминаемых в астрономии. Широко известна и дискуссия, разгоревшаяся вскоре после того, как Галле объявил об открытии. Выяснилось, что молодой и малоизвестный английский математик Джон Коч Адамс (John Couch Adams) также занимался этой проблемой и предсказал почти то же положение планеты, что и Леверье.

Французские астрономы скептически отнеслись к заявлению Адамса. Но, как следует из отчета Лондонского Королевского астрономического общества, на заседании 13 ноября 1846 г. Королевский астроном Джордж Бидделл Эри (George Biddell Airy) зачитал некий документ, подтвердивший, что осенью 1845 г. он действительно получил от Адамса предсказание о положении планеты, и это побудило его начать поиск космического объекта, однако результаты не были обнародованы.

Большинство пересказов знаменитой истории открытия Нептуна так или иначе опирается на выступление Эри. Главные действующие лица – Леверье, Адамс, Эри и астроном Кембриджского университета Джеймс Челлис (James Challis), также пытавшийся обнаружить планету. Так, Адамс предстал застенчивым героем, которого в журнале Королевского общества восхваляли как величайшего астронома-теоретика Англии уступающего разве что Ньютону. Говорили, что Адамс и Леверье стали друзьями. Челлис же представлялся лентяем, погубившим все дело. А Эри выглядел гнусным бюрократом, описанным в 1976 г. Айзеком Азимовым как тщеславный, завистливый, недалекий человек, который за мелкими деталями был не в состоянии увидеть картину в целом... «Это был мерзкий человек, с которым Адамс пытался общаться».

Где документы?

Прошли годы, и у некоторых историков появились сомнения в правильности версии открытия

Нептуна. Одним из первых в ее достоверности усомнился английский астроном Уильям Смарт (William M. Smart), унаследовавший научные работы Адамса. В конце 1980-х Аллан Чепмен (Allan Chapman) из Оксфордского университета, а позже Роберт Смит (Robert Smith) из Университета Джонса Гопкинса, обнаружили новые документы. Но еще в конце 1960-х независимый аналитик из Балтимора Деннис Роулинс (Dennis Rawlins) предположил, что английские астрономы в XIX в. сознательно сфабриковали или, по крайней мере, приукрасили эту историю.

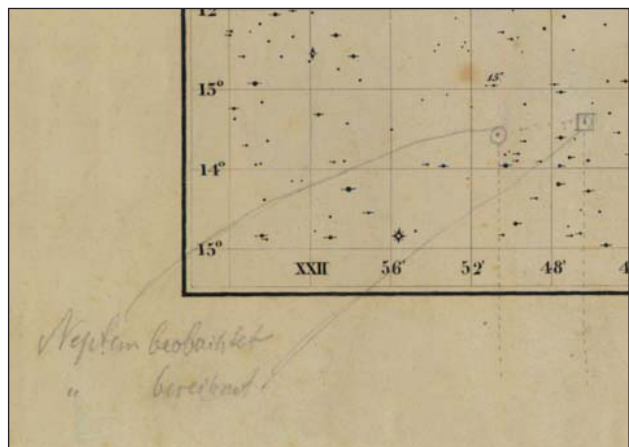
Все сомнения могли бы разрешиться, если бы историки познакомились с документом, процитированным Эри. Но всякий раз, еще с середины 1960-х, когда они просили предоставить им материал, библиотекари Гринвичской обсерватории отвечали, что он недоступен. Его местонахождение было тайной, почти столь же захватывающей, как история с самим Нептуном. Как могли документы, связанные с одним из важнейших событий в астрономии, исчезнуть бесследно?

И Роулинс, и гринвичские библиотекари подозревали, что бумаги были в руках у астронома Олина Эггена (Olin Eggen), работавшего первым помощником королевского астронома в начале 1960-х. Он брал их из библиотеки, чтобы написать биографические статьи об Эри и Челлисе. Поскольку он был последним, кто держал ценные бумаги в руках, то у него в первую очередь и следовало их искать. Но Эгген, который сначала переехал в Австралию, а затем в Чили, отрицал наличие у него пропавших документов, а библиотекари отказывались на него давить, опасаясь, что, желая замести следы, он может просто их уничтожить.

Все сохранялось в тайне более 30 лет, до смерти Эггена в октябре 1998 г. Когда коллеги пришли в его квартиру в чилийском Институте астрономии, они нашли пропавшие бумаги и еще много бесценных книг из библиотеки Гринвичской обсерватории. Все материалы весом более 100 кг упаковали в два больших ящика и вернули в Кембриджскую библиотеку, где сейчас хранится архив Гринвичской обсерватории. (Сотрудники библиотеки тут же сделали резервные копии.) Неожиданная находка вместе с дополнительными документами, обнаруженными в другом архиве, позволила нам пересмотреть историю открытия Нептуна.

Сбившийся с курса

Меркурий, Венера, Марс, Юпитер и Сатурн видны невооруженным глазом и поэтому были известны с незапамятных времен. Первой планетой, обнаруженной в телескоп, стал Уран. Орга-



Триумф небесной механики.

Эту карту звездного неба использовали немецкие астрономы Иоганн Галле и Генрих Луи д'Арре ночью 23 сентября 1846 г. Значками отмечено место обнаружения Нептуна и положение, предсказанное для него французским астрономом Урбеном Жаном Жозефом Леверье. Галле не знал, что английский математик Джон Коч Адамс тоже предсказал положение планеты в этой же области.

нист и любитель астрономии Вильям Гершель ночью 13 марта 1781 г. проводил обзор неба с помощью самодельного 6-дюймового рефлектора. Он заметил, что крошечный желто-зеленый диск в созвездии Близнецов скорее похож на комету, чем на звезду. Последующие наблюдения и вычисления других астрономов доказали, что объект Гершеля – не комета, которая должна иметь очень вытянутую эллиптическую орбиту, а планета, обращающаяся вокруг Солнца по устойчивой, почти круговой орбите на расстоянии, вдвое большем, чем Сатурн.

Никто из астрономов не предполагал, что в Солнечной системе может быть неизвестная планета. Просматривая старые звездные каталоги, они обнаружили, что новая планета, которую немецкий астроном Иоганн Элерт Бодде (Johann Elert Bode) назвал Ураном, была впервые обнаружена еще в 1690 г., а до 1781 г. замечена 20 раз, но каждый раз ее ошибочно принимали за звезду. В 1821 г. французский астроном Алексис Бувар (Alexis Bouvard) собрал данные всех наблюдений и обнаружил серьезное несоответствие. Даже после учета гравитационного влияния планет-гигантов Юпитера и Сатурна он не смог привести данные о движении Урана, опираясь на законы Ньютона. Почему законы механики и тяготения не работают? Быть может, неизвестная среда оказывает сопротивление движению планеты? Или на Уран воздействует еще одно неизвестное тело? Это была



версия XIX в. – проблема скрытой массы, так интригующая астрономов сегодня.

Великий немецкий астроном Фридрих Вильгельм Бессель (Friedrich Wilhelm Bessel) намеревался открыть тайну, но умер, не закончив работу. Первым полным опубликованным исследованием стала работа Леверье, появившаяся 1 июня 1846 г. в журнале Французской Академии наук. Он предсказал, что 1 января 1847 г. трансурановую планету можно будет обнаружить на средней долготе 325° (см. рис. на стр. 58). Журнал попал в Англию в конце месяца, и как только Эри прочел его, он понял, что уже видел подобную информацию предыдущей осенью, изложенную на клочке бумаги, оставленном в его доме студентом колледжа святого Джона Кембриджского университета.

Эфирное создание

Студента звали Адамс, Его жизнь в чем-то напоминала судьбу Исаака Ньютона. Оба росли в сельской местности Англии: Ньютон был сыном неграмотного мелкого землевладельца в Ланкашире, Адамс – сыном крестьянина в Корнуолле. Оба с ранних лет интересовались математикой и природными явлениями, следя за сезонным движением Солнца, делая отметки на оконных рамах и стенах комнаты. Они отличались умеренностью, привередливостью и религиозной щепетильностью. Современники считали их эксцентричными и рассеянными мечтателями. (В наши дни Ньютону и Адамсу приписали бы синдром Асперджера, который иногда называют высокоинтеллектуальным аутизмом.)

Адамс родился 5 июня 1819 г. К 10 годам у него проявился талант к математике. Простудировав все книги по астрономии и математике, которые смог найти, он еще подростком вычислил местное время солнечного затмения для Корнуолла – нетривиальная задача в эпоху до электронных калькуляторов и компьютеров. Рассказывают, что он наблюдал небо, прислоняясь к древнему кельтскому кресту недалеко от дома. Однако плохое зрение не позволило ему стать астрономом-наблюдателем. Случайное обстоятельство (на землях, принадлежащих его семье, была обнаружена марганцевая руда, используемая в сталелитейном деле) открыло бывшему бедняку дорогу в Кембридж, куда он и поступил в 1839 г.

Адамс получал все университетские призы по математике. При этом он был неприметным, почти бестелесным и отрешенным существом. Студенты вспоминали его как «парня невысокого роста, который быстро ходил и носил потрепанное пальто».

В июле 1841 г., еще учась в колледже, Адамс наткнулся в книжном магазине Кембриджа на работу Эри 1832 г. «Доклад о развитии астрономии», где говорилось о росте отклонения в движении Урана от предвычисленной орбиты. Прочтя его, Адамс записал в свой дневник: «После того как получу ученую степень, начну исследовать еще не изученные отклонения в движении Урана, чтобы выяснить, не может ли быть их причиной неизвестная планета, находящаяся за ним».

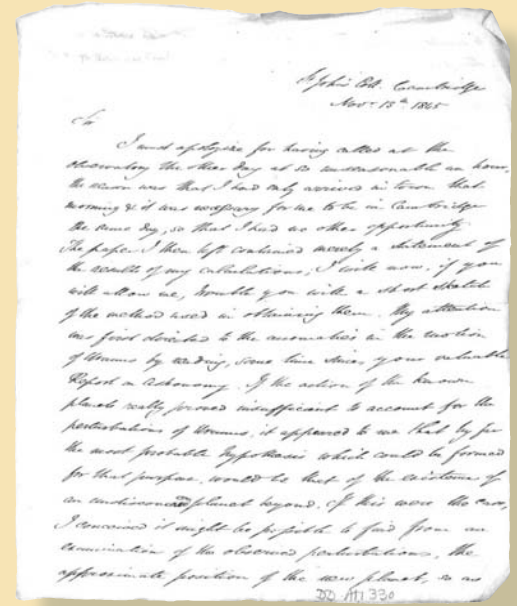
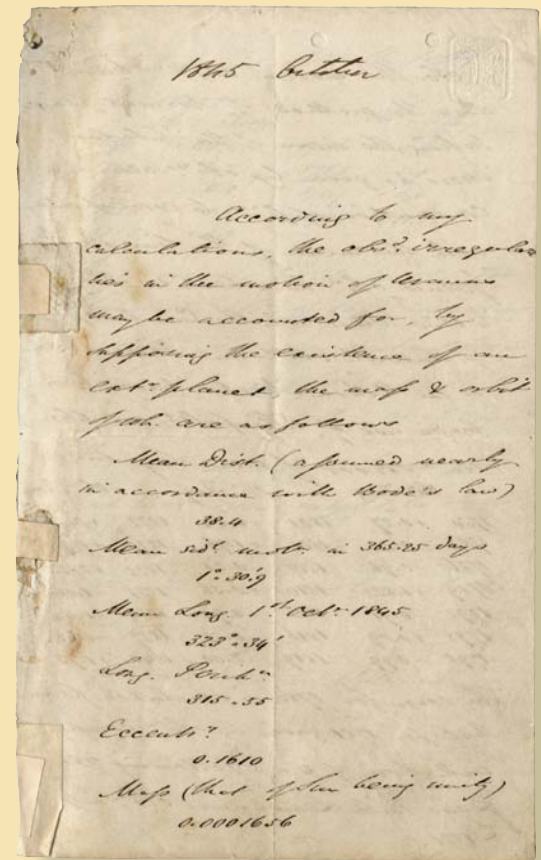
Конек Адамса

В течение следующих пяти лет Адамс, по-видимому, обращался к проблеме движения Урана лишь время от времени. Она не казалась ему срочным делом, поскольку уже многие годы ждала своего решения. Окончив в 1843 г. колледж, он достал наблюдательные данные о движении Урана через Челлиса, чья обсерватория была в миле

от Сент-Джонса (St. John's). Занятый преподаванием, Адамс брался за трудоемкие вычисления лишь во время каникул. Он любил такую работу.

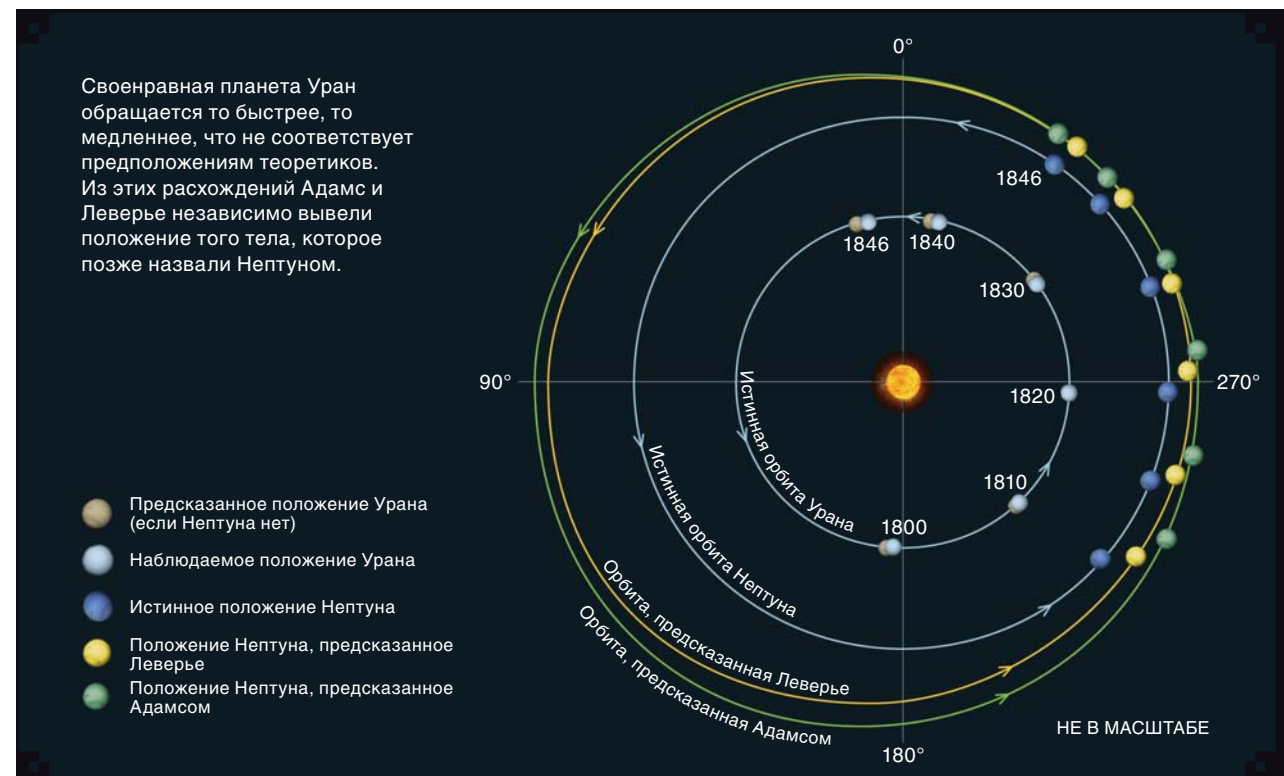
В качестве первого приближения он предположил, что неизвестная планета расположена на расстоянии 38 астрономических единиц от Солнца, т.е. вдвое дальше Урана, в соответствии с законом Тициуса–Боде (эмпирическое правило,

Документы о Нептуне обнаружили в 1998 г. Украденные 30 лет назад астрономом Олином Эггеном из библиотеки Королевской Гринвичской обсерватории, они были найдены в вещах Эггена после его смерти. Бумаги свидетельствуют о том, как астрономы Викторианской эпохи создавали официальную версию открытия Нептуна.



Среди документов есть свидетельство, долгое время считавшееся главным доказательством того, что Джон Коч Адамс первым предсказал существование и вычислил положение Нептуна. В октябре 1845 г. Адамс оставил записку в почтовом ящике Королевского астронома Джорджа Эри. Но она неубедительна: в ней есть результаты, но нет никаких деталей вычислений.

Письмо, которое Адамс начал писать Эри, проливает свет на загадку, почему Адамс не ответил на запрос Эри о дополнительных данных. Если бы у него был ответ, то англичане, возможно, нашли бы Нептун самостоятельно, задолго до того, как это сделали французы и немцы. Письмо доказывает, что Адамс считал вопрос Эри важным, хотя позже и утверждал обратное. Очевидно, другие дела отвлекли его от этой проблемы.



довольно точно указывающее размеры орбит всех планет до Урана включительно). Манипулируя значениями орбитальных параметров предполагаемой планеты, он пытался уменьшить остаточный член – расхождение между предсказанным и наблюдаемым положением Урана. Метод последовательных приближений, известный как теория возмущений, позже стал основным методом математической физики.

В середине сентября 1845 г. Адамс каким-то образом сообщил результаты своих летних расчетов Челлису. Но как? Многие историки указывают на один из листов, озаглавленный как «Новая планета», найденный в бумагах Адамса, где рукой Челлиса было написано: «Получено в сентябре 1845». Но тут не все ясно. Да и термин «новая планета» в то время почти не использовался. Совершенно не очевидно, что Адамс вообще сообщил свои результаты Челлису. Если учесть, что общались они нерегулярно, неудивительно, что сообщение не побудило Челлиса к обзору ночного неба. Он вообще сомневался, что теория возмущений способна точно предсказать положение планеты. Впоследствии ученый говорил, что, хотя задача и была ясна, не было никакой уверенности в положительном результате. Однако он сообщил Эри, что Адамс завершил некоторые вычисления.

Адамс решил нанести визит Эри. 21 октября 1845 г. он дважды посетил дом Эри в Грин-

вич-Хилл. Но они так никогда и не встретились. Адамс оставил клочок бумаги для Эри. Он-то и стал решающим документом, позволившим англичанам заявить об открытии (см. иллюстрацию на стр. 203). Краткая заметка содержала описание орбитальных элементов неизвестной планеты. Ее орбита существенно отличалась от круговой, а средняя долгота планеты 1 октября 1845 г. составляла $323^{\circ}34'$. Записка также содержала колонки остаточных членов в пределах примерно одной секунды дуги, которые Адамс указал, чтобы продемонстрировать, что его теория может объяснить аномальное движение Урана. Однако в ней не было детального изложения самой теории и вычислений. Более того, чтобы наблюдатель смог использовать данные для наведения телескопа, нужно было перевести средние орбитальные элементы в фактические положения планеты на небе. Версия письма, которую Эри опубликовал позднее, была подправлена (она оказалась без ключевой фразы, очевидно, чтобы скрыть эти недостатки).

Необъяснимое молчание

Несмотря на то что позже многие критики обвиняли Эри в том, что он оказался не способен понять всю важность документа, в действительности тот сразу же ответил Адамсу: «Я очень благодарен за письмо с результатами, оставленное

Вами несколько дней назад и показывающее, что возмущения [отклонения по долготе] в положении Урана вызваны планетой с предполагаемыми элементами... Я буду рад, если Вы сообщите, может ли предполагаемое возмущение объяснить [также и] радиус-вектор Урана».

Далее Эри пишет, что в 1830-х он, основываясь на множестве наблюдений, определил, что Уран кроме отклонения по долготе находится немного дальше от Солнца, чем должен быть. Если бы Адамс ответил на письмо Эри, то, возможно, тот распорядился бы начать поиски и англичане смогли бы с полным правом претендовать на открытие Нептуна. Но Адамс не ответил. Почему?

Сам Адамс так и не дал объяснений. В старости он говорил, что расценил вопрос Эри как «тривиальный» и недостойный ответа. Но в статье, подводящей итоги его вычислений (уже после открытия Нептуна), он признавал, что ошибка радиус-вектора иногда была значительной. В декабре 1846 г. кембриджский геолог Адам Седжвик (Adam Sedgwick) спросил Адамса, была ли его необщительность вызвана раздражением из-за несостоявшейся встречи с Эри, и Адамс ответил, что нет. Он сослался на свою медлительность и на нелюбовь писать письма.

Из документа, обнаруженного в 2004 г. в бумагах семейства Адамсов в Корнуолле, мы знаем, что Джон Адамс начал писать письмо к Эри, но так и не отослал его. В письме, датированном 13 ноября 1845 г., говорится о намерении описать свои методы. Там же Адамс обещает представить краткий отчет о своих ранних работах, но после двух страниц текст обрывается. В других бумагах тех же дней приводится формула, дающая неправильный радиус-вектор, но детали вычислений не раскрываются. Как видим, Адамс понимал важность вопроса Эри, но по каким-то причинам не смог дать полный ответ.

После открытия Нептуна Адамс написал Эри, что он обдумывал возможность самостоятельного поиска предполагаемой планеты с помощью маленького телескопа в обсерватории колледжа. При этом он признавал, что, не объяснив деталей своих вычислений Челлису или Эри, был не в состоянии убедить их начать немедленный поиск планеты.

Затишье перед бурей

Всю первую половину 1846 г. Адамс занимался вычислением орбит фрагментов кометы, которая только что раскололась на две части.

Только в июне 1846 г., когда статья Леверье попала в Англию, Эри предложил Челлису начать

поиск. Адамс присоединился к этой работе, вычисляя положение предполагаемой планеты на небе в конце лета и начале осени. Как впервые отметил историк Роулинс (Rawlins), эти вычисления базировались на круговой орбите Леверье, а не на собственной теории Адамса. Челлис начал поиски 29 июля. Его журнал наблюдений доказывает, что он был дотошным астрономом. Не подозревая о существовании звездной карты Берлинской академии, перекрывающей изучаемую область неба (карты, которую Галле и д'Арре используют в конце сентября), Челлис в конце концов сам составил карту неба. Он зарисовывал положение каждого наблюдаемого объекта дважды. Эта работа отнимала уйму времени и не позволяла обследовать большую область, как этого требовал Эри. Весь сентябрь Челлис наблюдал 3000 звезд и дважды – 4 и 12 августа – зарисовал объект, который позже будет опознан как Нептун. Но из-за того, что он не сравнивал положения зарисованных объектов сразу после наблюдений, он упустил свой шанс открыть Нептун.

Тем временем Адамс уточнил свои расчеты и направил их в письме к Эри от 2 сентября. Он давно сомневался, насколько оправданно использование закона Тициуса–Боде и может ли орбита гипотетической планеты быть существенно некруговой. Во время летних каникул он проделал вычисления и обнаружил, что меньшая по размеру круговая орбита лучше соответствует наблюдениям. Затем он продолжал вносить поправки, рассматривая возможность еще меньшей орбиты, которая, как он думал, могла бы дать долготу, отличную от его первоначального прогноза.

Новые предположения Адамса, как мы теперь знаем, переместили бы планету к области резонанса с Ураном, то есть в то место, где гравитационное влияние накапливается, что перечеркнуло бы использованный Адамсом математический метод. Но это уже не имело значения: новые вычисления были проведены слишком поздно, чтобы повлиять на наблюдения искателей планеты.

Одна из особенностей работы Адамса заключалась в том, что он всегда описывал свою планету как абстрактную. Леверье же, наоборот, опубликовал конкретные положения для своей гипотетической планеты и указывал на нее как на реальный физический объект, находящийся у холодных границ Солнечной системы. В августовской статье он смело предположил, что планету можно будет распознать в телескоп по ее диску. Когда данная информация появилась в Англии, Челлис стал больше внимания уделять внешнему виду объектов, которые заносил в каталог. 29 сентября



Первые сомнения французов относительно законности английских притязаний на открытие Нептуна отражены в карикатуре, появившейся 7 ноября 1846 г. в *L'Illustration*. Подпись гласит: «Г-н Адамс обнаруживает новую планету в докладе г-на Леверье». Документальные свидетельства положили конец сомнениям.

он отметил, что один из них «кажется дискообразным». Однако несколькими днями ранее этот же объект был опознан в Берлинской обсерватории как планета. Гипотеза подтвердилась.

Англичане украли Нептун

Изучив документы, мы пришли к выводу, что современники Адамса в Англии доверяли ему больше, чем он того заслуживал, даже если учесть, что он выполнил некоторые интересные вычисления. В первую очередь он заслуживает славы как первый исследователь, применивший теорию возмущений к движению планет. Вероятно, он был уверен в точности и непогрешимости своих результатов, но теперь мы понимаем, что историки переоценивают степень достоверности его предсказания.

Как бы там ни было, открытие – это не только исследование интересующей проблемы и выполнение некоторых вычислений, но и информирование общественности о том, что сделано открытие. Адамс решил только первую половину задачи. Как ни странно, личные качества Леверье, его напори-

стость и резкость, что было полной противоположностью застенчивости и наивности Адамса, – срабатывали против него: британское научное сообщество дружно выступило в защиту Адамса, тогда как Леверье был непопулярен среди коллег.

История еще раз демонстрирует, насколько важна удача при совершении открытия. Ведь ни Адамс, ни Леверье не предсказали правильную орбиту Нептуна. Оба они переоценили расстояние планеты от Солнца и смогли определить долготу только из-за удачного положения планет на орбитах. Такие вещи часто случаются в науке (что и произошло при открытии Плутона почти столетие спустя).

Теперь, когда страсти, вызванные международной конкуренцией 1840-х, утихли и оригиналы документов опять стали доступны историкам для исследований, мы можем подтвердить, что в деле открытия Нептуна достоин лавров лишь тот, кто верно предсказал положение планеты и убедил астрономов в необходимости ее поиска. А это сделал только Леверье. ■

(«В мире науки», №2, 2005)

Предметный указатель

- Аккреционный диск 119
Аксион 140
Активные ядра галактик 102
Анортозит 181
Антропный принцип 26
Аполлон, астероид 175, 176
«Аполлон», полеты на Луну 180—184
Аромат (тип кварка) 184
Астероиды 135, 161, 168—180
Белые карлики 58, 94—99, 120—130
Бог 33
Большое Магелланово Облако 73—75, 92, 135—141
Большой взрыв 13, 14, 19—25, 28, 33—43, 58, 86, 94, 103, 118
— экпиротический сценарий 40
Брана (многомерная мембрана) 26
Вега, звезда 172
Великая Стена (космология) 15
«Венера-11, -12», зонды 134
Волновая функция 27, 64
Время 33, 34
Вселенная 13, 14, 19—22
Вспышки звездообразования 92, 103
Высокоскоростные облака 71—78
Галактика Млечный Путь 14, 72, 78, 79, 93, 103, 107
Галактики
— взаимодействующие 72
— карликовые 103, 108
— столкновения 91—93
«Галилео», зонд 181 (*см. также Galileo*)
Гамма-всплеск 134, 141
— повторный мягкий 141
Гелиосейсмические колебания 113
Гематит 157, 158, 166, 167
Гермес, астероид 176
Гетит 167
Гиперновые звезды 145, 147
Голубой Снежок (*NGC 7662*), планетарная туманность 128
Голубые бродяги 100
Гравитационные возмущения в движении планет 204
Гравитационный маневр 188, 189
Гравитация 45, 49, 51, 56, 59, 62, 65
— квантовая теория 27, 57
Гравитационное отталкивание 34, 51
Гравитационные волны 41, 50
Гравитон 36, 61—67
Гравитермическая катастрофа 103
Двойная Струя (M2-9), планетарная туманность 128
Двойной Пузырь Хаббла, планетарная туманность 133
«Двухградусное поле» (обзор неба) 17
Джет 121, 124
Дилатон 36—41
Динамо-механизм 138
Долина Нанеди 151, 152
Жук (*NGC 6302*), планетарная туманность 128
Закон Хаббла 51, 52
Звезда
— Живописца 171, 173
— Эридана 172
Зельдовича-Сюняева, эффект 50
Зодиакальный свет 168
Инфлатон 24
Инфляции, теория 25
Ионосфера 196, 198
Испарение звезд из скопления 96
Карликовая галактика в Большом Псе 77
Карликовая сфероидальная галактика в Стрельце 73, 77
Квазар 19, 76, 95, 102, 106—108, 121, 124
Квинтэссенция (космология) 53, 61, 62
«Клементина», зонд 180—184
Коллапс звезды 108, 137—140, 144, 146
Кольца Сатурна 169, 187—190
Кометы 135, 166—205
«Комптон», гамма-обсерватория 139, 140, 146
Комптона, эффект 195
Коронограф, звездный 171, 174
Космический микроволновый фон — (*см. Реликтовое излучение*)
Космологическая константа ... (*см. Космологическая постоянная*)
Космологическая постоянная 27, 55, 57, 59, 61, 62
Космологический принцип Эйнштейна 14, 15
Космологический член ... (*см. Космологическая постоянная*)
Кошачий Глаз (*NGC 6543*), планетарная туманность 126

Крабовидная туманность 131, 138

Красный гигант 126, 146

Красный Прямоугольник (*HD 44179*), планетарная туманность 129

Луна, лазерная локация 68, 181—186

«Луна-3», зонд 180

«Лунный разведчик», зонд 180, 181, 183

Магелланов Поток 72—75

Магнитар 134—141

Магнито-ротационная неустойчивость 119, 123, 124

«Максвелл», телескоп 105, 106, 171

Малое Магелланово Облако 73—75

Марс 151, 154, 162

- поиски жизни 158
- полярные шапки 156, 157

Межпланетная пыль 141

Мембрана Дирихле (*D*-мембрана) 39

Метафизика 13, 21

М-теория 59

Муравей (*Menzel 3*), планетарная туманность 129

Нейтралино 86—90

Нейтрино

- космологическое 86
- осцилляции 113

Нейтронная звезда 96, 98

Нептун, открытие 200

Новорожденная звезда 121

Облака с промежуточными скоростями 72

Объем Хаббла 21, 22, 28

Одуванчик (*NGC 6751*), планетарная туманность 129

Остатки сверхновых 137, 141

Парадигма Аристотеля 29

Парадигма Платона 29

Параллельные вселенные 21

Планетарные туманности 125

Планетезимали 169, 174

Планет, формирование 168

«Планк» (микроволновый спутник) 41, 50

Послесвечение гамма-всплеска 142, 146

Предвзрывной сценарий 39

Приливный захват 96, 101

Повторная ионизация Вселенной 47

Постоянная Хаббла 51

Пояс Койпера 173

«Прогноз-7» (спутник) 134

Протопланетная туманность 185

Протопланетный диск 119—123

Пульсар (*см. Радиопульсар, Рентгеновский пульсар*)

Пылевой околозвездный диск 168—175, 191

Радиационные пояса Земли 193—199

Радиопульсар 137, 140

Реликтовое излучение 50, 42

- вариации температуры 14, 15, 25, 40
- поляризация 39, 40

Рентгеновский пульсар 137, 138, 141

- аномальный 134, 140

Рэндалл-Сандрама, сценарий 64

Садберийская нейтринная обсерватория 111—114

Сакса–Вольфа, эффект 45

Сверхвселенная 21-32

Сверхновые звезды 47, 51, 73, 75, 93, 102, 126, 136, 144—147

- типа *Ia* 52—54, 58

«Свифт», спутник (*см. Swift*)

Сейфертовские галактики 102

Сетчатка Глаза (*IC 4406*), планетарная туманность 131

Сингулярность 33, 39

Сихотэ-Алинский метеорит 176

Скат (*Hen 3-1357*), планетарная туманность 128

Скопления галактик 13—15, 55, 85

Сверхскопления галактик 15

Слоановский цифровой обзор неба 14—18

Солнечный свет, давление 168

Солнце, внутреннее строение 111

Стандартная модель (физика элементарных частиц) 113

Стационарной Вселенной, теория 13, 54

Струн, теория 28, 32—41

«Субару», телескоп 106

Суперсимметрии, теория 59

Т-дуализм 37—39

Темная энергия 43, 50, 54, 60, 68, 85

Темное вещество 15, 17, 19, 20, 45, 58, 83, 85, 87, 90

Темп звездообразования 105

Термоядерные реакции 111, 126

Титан (спутник Сатурна) 187—190

Тициуса-Бодe, правило 203, 205

Тройное сближение звезд 102

Тунгусский метеорит 176

Туринская шкала астероидной опасности 177

Тыква (*ОН 231.8+4.2*), планетарная туманность 133

Уран, открытие 125, 200

Феба 189

Физические константы 26, 32

Фомальгаут, звезда 172, 174

Фотон 14, 19, 36, 42—45, 47, 50

Фуллерен 28

«Хаббл», телескоп 52, 54, 76, 91, 92, 100, 103, 105, 125, 130, 143, 169, 171, 174

Христофилоса, эффект 197

Хромодинамика, квантовая 35

«Чандра», рентгеновский телескоп 106, 108

Черенковское излучение 115

Черные дыры 26, 28, 39, 40, 96, 97, 121, 124, 130, 144, 146

- сверхмассивные 102, 121, 123

Шакуры–Сюняева, модель 123

Шаровое звездное скопление 91, 94

Эклиптика 119

Экпиротический сценарий 91, 94

Электромагнитный импульс (ЭМИ) 193, 195

Энергия вакуума 53—60

Эргодичность 26

Южная крабовидная туманность (*He2-104*), планетарная туманность 129

Южный полюс — Эйткен (лунный бассейн) 180, 182

Ядерный взрыв, высотный 193—199

Яйцо (*CRL 2688*), планетарная туманность 129

2dF, обзор неба 17, 25

AGILE, гамма-обсерватория 148

ASCA, рентгеновский спутник 140, 144

BATSE, прибор 140, 142

Beagle-2, зонд 154, 158, 160, 162

BeppoSAX, рентгеновский спутник 142—144

Cassini, зонд 186—190

CDMS (Cryogenic Dark Matter Search) 88, 90

Chandra, рентгеновский спутник (*см. «Чандра»*)

Clementine, зонд 181

COBE (Cosmic Background Explorer) 42, 44

Comet Asteroid Rendezvous Flyby 140

Compton, гамма-обсерватория (*см. «Комптон»*)

CRESST, эксперимент 88

DAMA, эксперимент 86, 90

DASI (Degree Angular Scale Interferometer) 50

DRIFT, эксперимент 88

Edelweiss, эксперимент 88, 90

Einstein, рентгеновский спутник 134

FUSE, ультрафиолетовый спутник 76—78

Galileo, зонд 178, 181, 187, 189, 191

Gran Sasso, подземная лаборатория 118

HAARP (High frequency Active Auroral Research Program) 198, 199

Helios-2, зонд 134

High Energy Transient Explorer 148

Homestake, детектор нейтрино 117, 118

Huygens, зонд 187—192

Integral, рентгеновский спутник 148

IRC+10216, звезда 132

IRAS, инфракрасный спутник 168—171, 174

JDEM, космический телескоп 54

KamLAND, детектор нейтрино 117, 118

KREEP, лунные породы 181, 183

Lunar A, зонд 184, 186

Lunar Prospector, зонд 181

Mars Climat Orbiter, зонд 154, 162, 166

Mars Global Surveyor, зонд 151, 154—161, 166

Mars Express, зонд 154

Mars Observer, зонд 154, 163, 166

Mars Odyssey, зонд 151, 154, 156, 158—161, 166, 167

Mars Pathfinder, зонд 154, 157, 158, 163—166

Mars Polar Lander, зонд 154, 166

MINIBOONE, нейтринный ускоритель 118

Opportunity, марсоход 164, 166, 167

PICASSO, эксперимент 88

Pioneer-11, зонд 187

Pioneer Venus Orbiter, зонд 134

Rosebud (эксперимент) 88

RXTE (Rossi X-ray Timing Explorer) 140

SAGE, детектор нейтрино 118

SCUBA, субмиллиметровая камера 105—107

SDSS, обзор неба 17—19

SELENE, зонд 184

SMART-1, зонд 184, 186

SIMPLE, эксперимент 88

Sojourner, марсоход 154, 158

Spirit, марсоход 162—167

Spitzer, инфракрасный спутник 121, 169

Super-Kamiokande, детектор нейтрино 113, 117, 118

Swift, орбитальная обсерватория 148

Uhuru, рентгеновский спутник 96, 98

UKDMC, эксперимент 88

Vela, рентгеновский спутник 134

Viking, зонд 154, 161, 164, 166

Voyager, зонд 163, 187, 188, 191

WMAP, микроволновый спутник 25, 42, 47, 50, 58

XMM/Ньютон, рентгеновский спутник 106, 108

ZEPLIN, эксперимент 87, 88, 90

Указатель имен

Адамс, Джон Коч 200, 201, 203
Адельбергер, Эрик 68
Адлер, Марк 162
Азимов, Айзек 200
Адельберг, Эрик 68
Амбарцумян, Виктор Амазаспович 101
Анно, Марк 40
Антонов, Вадим Анатольевич 102
Ардила, Дэвид 168, 215
Аристотель 33
Ашман, Кит 88, 91
Баджер, Эми 103, 214
Бакол, Джон 117
Балбюс, Стивен 123
Балик, Брюс 125, 214
Барбу, Джулиан 29
Барроу, Джон 30
Бартон, Батлер 74, 78
Бейкер, Виктор 161
Белл, Джим 167
Бенц, Вилли 99
Берк, Дуг 107
Бете, Ханс 116
Бессель, Фридерих Вильгельм 202
Бинзел, Р. 177
Блендфорд, Роджер 124
Блэкман, Эрик 133
Блитц, Лео 73
Блэйс, Омер 119, 214
Блэкман, Эрик 133
Боде, Иоган Элерт 201
Браун, Роберт 78
Брегман, Джоэл 72
Бувар, Алексис 201
Бэнкс, Томас 40
Бэрроуз, Адам 138
Вагонер, Роберт 124
Ваккер, Барт 71, 213
ван Верден, Хуго 77
ван Керквик, Мартин 141
Ван Хан Гуо 89
Вафф, Крэг 200
Вейнберг, Стивен 35
Венециано, Габриель 33, 213
Верде, Лисия 17
Вок, Дэвид 111, 214
Вольфенштейн, Линкольн 117
Вудз, Питер 141
Габададзе, Григорий 65, 67
Гайер, Роберт 137

Галле, Иоганн Готфрид 200, 201
Ганн, Джеймс 17
Гардинер, Ланс 72
Гаусс, Карл Фридрих 62
Геллер, Маргарет 14
Герелс, Нейл 142, 214
Гершель, Вильям 125
Гёгюс, Эрсин 137
Гибсон, Брэд 77
Гиллиланд, Рон 100
Гине Григ, 197
Глэшоу, Шелдон 35
Гоген, Поль 33
Голомбек, Матт 166
Грегори, Стивен 14
Грибов, Владимир 117
Гривз, Джейн 171
Грузинов, Андрей 68
Гэврил, Фотис 141
Гюйгенс, Христиан 189
Дамур, Тибо 40, 68
д'Арре, Генрих Луи 200, 201
Двали, Георгий 60, 213
Дей, Кэрол 98
де Лашпарен, Валери 14
де Ситтер, Виллем 56
Дефейе, Седрик 67
де Хей, Винсент 78
Дженкинс, Т. Дж. 113
Джинс, Джеймс 79
Джорговски, Джордж 100
Дикс, Ф. У. 113
Дойч, Дэвид 29
Дуввури, Вайкрам 68
Дункан, Роберт 100, 214
Дэвис, Раймонд 111, 117
Дэнли, Лора 76
Дюпон, Дэниел 193, 215
Залдариага, Матиас 68
Зейберг, Натан 40
Зейдл, Фредерик 99
Зельдович, Яков Борисович 15, 42
Зепф, Стивен 91, 214
Зурек, Дэвид 100
Ибрагим, Алаа 141
Иган, Грег 29
Икке, Винсент 127
Инан, Умран 140
Йорк, Дональд 17
Калуца, Теодор 64

Камерон, Аластер 99
Каспи, Виктория 141
Кассини, Жан-Доминик 189
Каури, Джастин 40
Керн, Брайан 141
Кишнер, Роберт 15
Клайн, Дэвид 85, 214
Клайн, Томас 135
Клейн, Джошуа 111, 214
Клиффорд, Стивен 161
Коган, Ян 68
Коллерстром, Николас 200
Корради, Романо 130
Коуэн, Клайд 117
Кошиба, Масатоши
Кристенсен, Фил 167
Кристофилоса, Николас 197
Крон, Ричард 17
Кросс, Лоренс 55, 213
Крэдок, Роберт 161
Ксанфомалити, Леонид Васильевич 151, 215
Кувелиоту, Крисса 134, 214
Кулкарни, Шри 141
Куок, Сан 127
Кювье, Леннокс 104
Кэррол, Шон 68
Латтимер, Джеймс 138
Леверье, Урбен Жан Жозеф 200
Леонард, Питер 142, 214
Леонаиро, Питер 142
Ливио, Марио 99
Лилли, Саймон 104
Линде, Андрей 39
Ломбарди, Джеймс 99
Лонгден, Ларри 197
Лунин, Джонатан 187, 215
Луо, Динг 133
Льюис, Дэвид 30
Лю, Лимин 78
Мадау, Пьер 105
Макдональд, Артур 111, 214
Маннинг, Роб 162
Мартин, Кристофер 141
Массер, Джордж 13, 162, 215
Мах, Эрнст 55
Мейкснер, Маргарет 131
Мейлан, Джордж 100
Мейлин, Майкл 155
Меллема, Гаррел 127
Михеев, Станислав 117
Моррас, Рикардо 74
Мураками, Тошио 140
Мушотски, Ричард 106
Мэтт, Син 133

Мюнх, Гвидо 71
Никастро, Фабрицио 107
Ногучи, Масафуми 72
Нозик, Роберт 30
Норрис, Роберт 193
Ньютон, Исаак 51, 61, 130, 202
Оврут, Барт 40
Оккам, Уильям 30
Олби, Арден 154, 215
Оорт, Ян 72
Пайк, Джон 199
Пападопулос, Денис 194
Папазоглу, Антониос 65
Пареше, Франческо 100
Пачинский, Богдан 139
Паули, Вольфганг 117
Пензиас, Арно 42
Пенроуз, Роджер 33
Перлмуттер, Сол 58
Пертон, Кристофер 127
Пиблс, Джеймс 15, 42
Пикки, Пьо 89
Пиро, Луиджи 142, 214
Полчински, Йозеф 38, 63
Понтекорво, Бруно 117
Прингл, Джеймс 98
Поррати, Массимо 65
Пэйн, Дэвид 124
Ракер, Руди 30
Рамсфелд, Дональд 193
Рашио, Фредерик 99
Рендал, Сандра 64
Рене, Фредерик 117
Рис, Мартин 98
Рисс, Адам 51, 213
Рихтер, Филипп 71
Рошковски, Лешек 87
Роулинс, Деннис 201
Сквайрз, Стив 163
Салам, Абдус 35
Сандрам, Рэман 64
Саффер, Рекс 100
Сахаи, Рагвендра 131
Сембах, Кеннет 77
Сендидж, Аллан 100
Силк, Джозеф 47
Силлз, Элисон 100
Сквайрз, Стив 161
Смарт, Уильям 201
Смирнов, Алексей 117
Смит, Брэдфорд 170
Смит, Роберт 201
Смолин, Ли 26
Сокер, Ноам 99, 131

Спадис, Пол 180, 215
Спитцер, Лайман 71
Стейдал, Чарльз 105
Стейнхардт, Пол 26
Стросс, Майкл 14, 213
Сурдин, Владимир Георгиевич 101, 214
Сэвидж, Блэр 77
Сюняев, Рашид Алиевич 42, 50
Тегмарк, Макс 21, 213
Тейзинджер, Пит 167
Теллер, Эдвард 179
Тернер, Майкл 51, 55, 68, 213
Террил, Ричард 171
Толмен, Ричард 26
Томпсон, Кристофер 134, 214
Томпсон, Лерд 14
Траугер, Джон 131
Трипп, Тодд 78
Троден, Марк 68
Тьюрок, Нил 26, 40
Уайт, Мартин 42, 213
Уилсон, Джиллиан 107
Уилсон, Роберт 42
Уиттен, Эдвард 39
Уолтер, Фабиан 108
Фабиан, Эндрю 98
Ферми, Энрико 34
Филд, Джордж 72
Фицджеральд, Пим 127
Фишлер, Вилли 40
Фламмарион, Камил 149
Фридман, Алексей Максимович 79, 214
Фокс, Эндрю 77
Франк, Адам 125
Фрейл, Дейл 141
Хаббл, Эдвин 51, 55
Харли, Джэррод 100
Харди, Кевин 134

Хартман, Дап 74
Хат, Пит 100
Хилс, Джек 98
Ховард, Алан 161
Хокинг, Стивен 33
Хoley, Джон 123
Холланд, Уэйн 171
Хорава, Петр 38
Христофилос, Николас 197
Ху, Уэйн 42, 213
Хукра, Джон 14
Хульбош, Аад 74
Хюллеман, Ферди 141
Челлис, Джеймс 200
Чен, Баолянъ 113, 137
Чепмен, Аллан 201
Чихули, Дэйл 125
Чудецкий, Юрий Викторович 171, 215
Шакура, Николай Иванович 122
Шапиро, Пол 72
Шара, Майкл 95, 214
Швейцер, Франсуа 91
Шевалье, Роджер 132
Шектман, Стивен 15
Шивив, Гиора 99
Шихан, Уильям 200, 215
Шмидт, Брайан 58
Штапельфельд, Карл 171
Штейнхардт, Пол 40
Эверетт, Хью 27
Эддингтон, Артур 56, 117, 135
Эджетт, Кеннет 155
Эйнштейн, Альберт 53, 56
Эгген, Олин 201
Эпштейн, Ричард 137
Эри, Джордж Бидделл 200
Ю, Джер 42
Янг, Алекс 137

АВТОРЫ

Майкл Стросс (Michael A. Strauss) — офици­альный представитель проекта Слоановский ци­фровой обзор неба. Он защитил диссертацию по физике в Калифорнийском университете в Берк­ли, стажировался в Калифорнийском технологи­ческом институте и Принстонском университете, сейчас преподает в Принстоне.

Макс Тегмарк (Max Tegmark) — профессор фи­зики и астрономии в Пенсильванском универ­ситете, специалист по анализу микроволнового космического фона и образованию скоплений галактик. Многие из его работ основаны на кон­цепции параллельных вселенных: это оценка сви­детельств бесконечности пространства и космо­логической инфляции, изучение нарушения квантовой когерентности и исследование вероят­ности того, что амплитуда флуктуаций реликтово­го излучения, размерность пространства-времени и законы физики могут различаться в разных об­ластях мира.

Габриель Венециано (Gabriele Veneziano) — физик-теоретик из *CERN*, создал теорию струн в конце 1960-х гг. Однако вскоре она была при­знана ошибочной, так как не объясняла всех свойств атомного ядра. Поэтому Венециано за­нялся квантовой хромодинамикой. В 1980-х гг. о теории струн заговорили как о теории кванто­вой гравитации, и Венециано первым применил ее к черным дырам и космологии.

Уэйн Ху (Wayne Hu) и **Мартин Уайт** (Martin White) — изучают историю Вселенной. Ху защи­тил кандидатскую диссертацию по физике в Ка­лифорнийском университете в 1995 г. Сейчас он профессор астрономии и астрофизики в Чикаг­ском университете. Уайт защитил кандидатскую диссертацию по физике в 1992 г. в Йельском уни­верситете. Позднее он стал профессором астроно­мии и физики в Беркли.

Адам Рисс (Adam G. Riess) и **Майкл Тернер** (Michael S. Turner) — ведущие специалисты по ис­тории расширения Вселенной. Рисс сотруднича­ет с Институтом космического телескопа и уни­верситетом Джонса Гопкинса. В 1998 г. он воз­главлял исследование, проведенное группой по изучению сверхновых с большим красным сме­щением, в результате которого было объявлено

об открытии ускорения расширения Вселенной. Тернер, заслуженный раунеровский профессор Чикагского университета, сегодня занимает пост помощника директора по физико-математичес­ким наукам Национального научного совета США. В его статье (1995 г.), опубликованной в соавторст­ве с Лоренсом Кроссом (Lawrence M. Krauss), пред­сказано ускорение расширения Вселенной и вве­ден термин «темная энергия».

Лоренс Кросс (Lawrence M.Krauss) и **Майкл Тернер** (Michael S. Turner) — первыми предпо­ложили, что во Вселенной доминирует космологи­ческий член. Их прогноз (1995 г.) об ускорении расширения Вселенной был подтвержден данны­ми астрономических наблюдений. В настоящее время является деканом физического факультета Университета Западного резервного района в Кливленде (шт. Огайо). Тернер, профессор Чи­кагского университета, работает заместителем директора Национального научного фонда США по математическим и физическим наукам.

Георгий Двали (Georgi Dvali) — вырос в Грузии и защитил кандидатскую диссертацию в Тбилис­ском институте физики им. Э.Л. Андроникашвили. Поработав в Пизанском университете в Италии, в институте *CERN* вблизи Женевы и в Междуна­родном центре теоретической физики в Триесте, он стал сотрудником физического факультета в Нью-Йоркском университете.

Барт Ваккер (Bart P. Wakker) и **Филипп Рихтер** (Philipp Richter) — астрономы, в основном наблю­дающие в ультрафиолетовом и радиодиапазонах спектра. Ваккер заинтересовался астрономией после полета «Аполлона-8» к Луне. Диссертацию по высокоскоростным облакам он написал в Гро­нингенском университете (Нидерланды), после чего проработал 5 лет в Иллинойском универ­ситет, а в 1995 г. перешел в Висконсинский уни­верситете. Рихтер получил докторскую степень в Боннском университете (Германия), где иссле­довал диффузный молекулярный газ в Магелла­новых Облаках и гало нашей Галактики. В 1999 г. в Висконсинском университете вместе с Вакке­ром занялся изучением высокоскоростных обла­ков. В 2002 г. Рихтер переехал в Италию для ра­боты в Астрофизической обсерватории Арчетри во Флоренции, а недавно вернулся в Бонн.

Алексей Максимович Фридман — академик РАН, профессор МГУ и МФТИ, лауреат Государственных премий СССР и РФ. В настоящее время А.М. Фридман руководит отделом физики звездных и планетных систем Института астрономии РАН.

Дэвид Клайн (David C. Cline) — профессор физики Калифорнийского университета в Лос-Анджелесе. Его исследования касаются наиболее важных разделов корпускулярной физики: нейтрино высоких энергий, распада протонов и открытых в 1983 г. W- и Z-бозонов, носителей сил слабого взаимодействия. Сейчас он занимается исследованиями темного вещества и участвует в работах на детекторе CMS ЦЕРНа рядом с Женевой.

Стивен Зепф (Stephen E. Zepf) и Кит Ашман (Keith M. Ashman) — занимаются исследованием шаровых звездных скоплений. Зепф — профессор физики и астрономии Университета штата Мичиган. Раньше он работал в разных институтах США и Великобритании. Ашман, сотрудник физического факультета Миссурийского университета в Канзас-Сити.

Майкл Шара (Michael Shara) — возглавляет отдел астрофизики Американского музея естественной истории в Нью-Йорке. До этого он 17 лет проработал в Институте космического телескопа, где руководил обработкой и анализом данных, полученных с помощью космического телескопа «Хаббл».

Владимир Георгиевич Сурдин — астроном, окончил МГУ в 1976 г. В 1980 г. защитил кандидатскую диссертацию и начал работать в Государственном астрономическом институте им. П.К.Штернберга (МГУ). Научные интересы лежат в области звездной динамики: изучает эволюцию звездных скоплений, звездных и газовых объектов в галактиках, взаимодействие звезд с межзвездной средой. Читает лекции студентам и пишет научно-популярные книги и статьи.

Эми Баджер (Amy J. Barger) — профессор астрономии в Висконсинском университете в Мадисоне, преподает в Гавайском университете в Маноа. Баджер защитила диссертацию по астрономии в 1997 г. в Кембриджском университете, а затем проводила исследования в Астрономическом институте Гавайского университета. Как космолог-наблюдатель она исследует далекие объекты Вселенной с помощью рентгеновской обсерватории «Чандра», космического телескопа

«Хаббл» и оптических телескопов в обсерваториях Кит-Пик в Аризоне и Мауна-Кеа на Гавайях.

Артур Макдональд (Arthur B. McDonald), **Джошуа Клейн** (Joshua Klein), **Дэвид Вок** (David L. Wark) — исследователи Садберийской нейтринной обсерватории (СНО), насчитывающей 130 сотрудников. Макдональд — профессор Королевского университета в Кингстоне, провинция Онтарио, директор СНО с 1989 г. Клейн получил докторскую степень в Принстонском университете в 1994 г. и начал работу для СНО в Пенсильванском университете. Он также преподает физику в Техасском университете. Вок работал в различных университетах Великобритании, в настоящее время участвует в нескольких нейтринных проектах, включая СНО.

Омер Блэйс (Omer Blaes) — профессор физики Калифорнийского университета в Санта-Барбаре, изучает динамику аккреционных дисков. Блэйс — теоретик, работающий в области астрофизики высоких энергий. Кроме аккреционных дисков в сферу его научных интересов входит физика компактных объектов — черных дыр, нейтронных звезд и белых карликов.

Брюс Балик (Bruce Balick) и Адам Франк (Adam Frank) — авторы множества статей, посвященных наблюдениям и теории планетарных туманностей и их звезд-предшественниц. Балик, профессор Рочестерского университета, занимается различными направлениями астрофизической динамики жидкостей: от смерти звезд до рождения планет.

Крисса Кувелиоту (Chryssa Kouveliotou), **Роберт Дункан** (Robert C. Duncan), **Кристофер Томпсон** (Christopher Thompson) изучают магнитары в общей сложности 40 лет. Кувелиоту — наблюдатель, работает в Национальном центре космических наук и технологий в Хантсвилле (штат Алабама). В число наблюдаемых ею объектов кроме повторных мягких гамма-всплесков (SGR) входят «обычные» гамма-всплески и двойные рентгеновские системы. Дункан и Томпсон — теоретики: первый работает в Техасском университете в Остине, второй — в Канадском институте теоретической астрофизики в Торонто.

Нейл Герелс (Neil Gehrels), **Луиджи Пиро** (Luigi Piro) и **Питер Леонард** (Peter J. T. Leonard) — изучают гамма-всплески теоретически и путем наблюдений. Герелс и Пиро в основном наблюда-

тели — ведущие ученые Обсерватории гамма-излучений «Комптон» и спутника *VerroSAX*. Леонард — теоретик. Герелс возглавляет отдел космических лучей, гамма-лучей и гравитационно-волновой астрофизики в Лаборатории астрофизики высоких энергий Годдардовского центра космических полетов (NASA). Пиро работает в Институте внеатмосферной астрофизики и космической физики Центра ядерных исследований в Риме. Леонард от Корпорации прикладных научных систем обеспечивает космические эксперименты Годдардовского центра.

Леонид Васильевич Ксанфомалити — доктор физ.-мат. наук, заведующий лабораторией и главный научный сотрудник Института космических исследований РАН, заслуженный деятель науки РФ. Научные интересы: исследования Солнечной системы и планетных систем других звезд, происхождение жизни, строение Вселенной, техника исследований космоса, астрономические наблюдения.

Арден Олби (Arden L. Albee) — научный руководитель проектов *Mars Global Surveyor* и *Mars Observer* — профессор геологии и астрономии Калифорнийского технологического института; с 1978 по 1984 г. возглавлял Лабораторию реактивного движения NASA. Круг его научных интересов — полевые геологические изыскания, исследования горных пород, метеоритов, комет.

Джордж Массер (George Musser) — штатный корреспондент журнала *Scientific American*, в начале 90-х гг. был аспирантом Стива Сквайрза.

Давид Ардила (David R. Ardila) — изучал физику в Колумбии в Андском университете. Степень доктора философии он получил в Калифорнийском университете в Беркли и в 2002 г. пришел в группу Камеры ACS в университете Джонса Гопкинса. Кроме пылевых дисков он изучает дозвездные диски, формирование планет и коричневых карликов.

Юрий Викторович Чудецкий — доктор технических наук, профессор аэрокосмического факультета Московского государственного авиационного института (технического университета) МАИ. Специалист в области ракетно-космической техники. Руководил проектными исследованиями и испытаниями головных частей баллистических ракет. Область научных интересов: способы защиты Земли от опасных космических объектов и эколо-

гическая безопасность в аэрокосмической технике. Лауреат Государственной премии.

Пол Спадис (Paul D. Spudis) — старший научный сотрудник Лаборатории прикладной физики Университета Джонса Гопкинса. С 1982 г. он возглавляет программу планетной геологии в Центре космических исследований NASA и занимается изучением метеоритных бомбардировок и вулканических процессов. С 1980 по 1990 г. Спадис работал в астрогеологическом отделе Геологической службы США, а с 1990 по 2002 г. — в Институте Луны и планет в Хьюстоне. В 1994 г. он был заместителем руководителя научной группы лунной экспедиции «Клементина» в министерстве обороны США.

Джонатан Лунин (Jonathan I. Lunine) — междисциплинарный специалист экспедиции *Cassini-Huygens*, профессор физики и планетологии, возглавляющий Программу теоретической астрофизики Аризонского университета. Лунин изучает формирование и эволюцию планетных систем, условия обитания в космосе и органическое вещество во внешних областях Солнечной системы.

Дэниел Дюпон (Daniel G. Dupont) — более 11 лет освещает проблемы науки, техники и национальной безопасности, является редактором новостного интернет-портала IncideDefence.com, а также выпускает серию информационных бюллетеней *Inside the Pentagon*. Его статьи выходили в таких изданиях, как *The Washington Post*, *Mother Jones*, *Government Executive* и других. Дэниел Дюпон постоянно сотрудничает с журналом *Scientific American*.

Уильям Шихан (William Sheehan), **Николас Коллерстром** (Nicolas Kollerstrom), **Крэг Вафф** (Crag B. Waff) — историки науки, совместно изучившие открытие Нептуна. Шихан — психиатр, специализирующийся на аутизме и синдроме Асперджера, внештатный редактор журнала *Sky&Telescope* и Гутгенхаймский степендиат, награжденный медалью Восточной астрономической ассоциации за работу по Марсу. Его имя присвоено астероиду №16 037. Коллерстром — научный сотрудник Лондонского университетского колледжа и один из основателей Историко-астрономической ассоциации. Вафф — историк исследовательской лаборатории BBC на авиабазе Райт-Паттерсон в Дейтоне (шт. Огайо). Вместе с Коллерстромом он готовил сборник работ о предсказании и открытии Нептуна.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

ПЛАН ВСЕЛЕННОЙ

Cosmological Physics. John A. Peacock. Cambridge University Press, 1999.

Cosmology: The Science of the Universe. Second edition. Edward Harrison. Cambridge University Press, 2000.

The 2dF Galaxy Redshift Survey: The Power Spectrum and the Matter Content of the Universe. Will J. Percival et al. in Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol. 327, No.4, pages 1297—1306, November 2001. Available online at arXiv.org/abs/astro-ph/0105252

The Three-Dimensional Power Spectrum of Galaxies from the Sloan Digital Sky Survey. Max Tegmark et al. in press in the Astrophysical Journal; 2004. astro-ph/0310725

The official Web site of the Sloan Digital Sky Survey is www.sdss.org.

The official Web site of the 2DF Galaxy Redshift Survey is msowww.anu.edu.au/2dFGRS

МИФ О НАЧАЛЕ ВРЕМЕН

Superstring Cosmology. James E. Lidsey, David Wands and Edmund J. Copeland in Physics Reports, Vol. 337, Nos. 4—5, pages 343—492; October 2000. hep-th/9909061

From Big Crunch to Big Bang. Justin Khoury, Burt A. Ovrut, Nathan Seiberg, Paul J. Steinhardt and Neil Turok in Physical Review D, Vol. 65, No. 8, Paper no. 086007; April 15, 2002. hep-th/0108187

A Cyclic Model of the Universe. Paul J. Steinhardt and Neil Turok in Science, Vol. 296, No. 5572, pages 1436—1439; May 24, 2002. hep-th/0111030

The Pre-Big Bang Scenario in String Cosmology. Maurizio Gasperini and Gabriele Veneziano in Physics Reports, Vol. 373, Nos. 1—2, pages 1—212; January 2003. hep-th/0207130

КОСМИЧЕСКАЯ СИМФОНИЯ

Wrinkles in Time. George Smoot and Keay Davidson. William Morrow, 1994.

3K: The Cosmic Microwave Background Radiation. R. B. Partridge. Cambridge University Press, 1995.

The Inflationary Universe: The Quest for a New Theory of Cosmic Origins. Alan H. Guth and Alan P. Lightman. Perseus, 1998.

Дополнительные сведения о *WMAP* и космическом микроволновом фоне можно найти на map.gsfc.nasa.gov и background.uchicago.edu

ОТ ЗАМЕДЛЕНИЯ К УСКОРЕНИЮ

Do Type Ia Supernovae Provide Direct Evidence for Past Deceleration in the Universe? Michael S. Turner and Adam G. Riess in Astrophysical Journal, Vol. 569, Part 1, pages 18—22; April 10, 2002.

The Extravagant Universe: Exploding Stars, Dark Energy and the Accelerating Cosmos. Robert P. Kirshner. Princeton University Press, 2002.

Connecting Quarks with the Cosmos. Committee on the Physics of the Universe, National Research Council. National Academies Press, 2003.

Is Cosmos Speed-Up Due to New Gravitational Physics? Sean M. Carroll, Vikram Duvvuri, Mark Trodden and Michael S. Turner in Physical Review Letters (in press).

КОСМИЧЕСКАЯ ЗАГАДКА

Subtle Is The Lord: The Science and Life of Albert Einstein. Abraham Pais. Oxford University Press, 1982.

The Cosmological Constant Problem. Steven Weinberg in Reviews of Modern Physics, Vol. 61, No.1, pages 1—23; 1989.

The Observational Case for a Low Density Universe with a Non-Zero Cosmological Constant. J. P. Ostriker and J. Steinhardt in Nature, Vol. 377, pages 600—602; October 19, 1995.

The Cosmological Constant Is Back. Lawrence M. Krauss and Michael Turner in General Relativity and Gravitation, Vol.27, No.11, page 1135; 1995.

Geometry and Destiny. Lawrence M. Krauss and Michael Turner in General Relativity and Gravitation, Vol. 31, No.10, pages 1453—1459; October 1999.

КТО НАРУШИЛ ЗАКОН ТЯГОТЕНИЯ

The Elegant Universe: Superstrings, Hidden Dimensions, and the Quest for the Ultimate Theory. Brian Greene. W. W. Norton, 2003.

An Alternative to Compactification. Lisa Randall and Raman Sundrum in Physical Review Letters, Vol. 83, No. 23, page 4690—4693; December 6, 1999. Доступно на arXiv.org/abs/hep-th/9906064

Accelerated Universe from Gravity Leaking to Extra Dimensions. Cedric Deffayet, Gia Dvali and Gregory Gabadadze in Physical Review D, Vol. 65, paper number 044023; 2002. arXiv.org/abs/astro-ph/0105068

The Accelerated Universe and the Moon. Gia Dvali, Andrei Gruzinov and Matias Zaldarriaga in Physical Review D, Vol. 68, paper number 024012; 2003. arXiv.org/abs/hep-ph/0212069

Tests of the Gravitational Inverse-Square Law. E.G. Adelberger, B.R. Heckel and A.E. Nelson in Annual Review of Nuclear and Particle Science, Vol. 53, pages 77—121; December 2003. arXiv.org/abs/hep-ph/0307284

Введение в теорию струн можно найти по адресу superstringtheory.com

НАША РАСТУЩАЯ ГАЛАКТИКА

High-Velocity Clouds. Bart P. Wakker and Hugo van Woerden in Annular Review of Astronomy and Astrophysics, Vol. 35, pages 217—266; September 1997.

A Confirmed Location in the Galactic Halo for the High-Velocity Cloud «Chain A.» Hugo van Woerden, Ulrich J. Schwarz, Reynier F. Peletier, Bart P. Wakker and Peter M.W. Kalberla in Nature, Vol. 400, pages 138—141; July 8, 1999. Доступно на: arXiv.org/abs/astro-ph/9907107

Accretion of Low-Metallicity Gas by the Milky Way. Bart P. Wakker, J. Chris Howk, Blair D. Savage, Hugo van Woerden, Steve R. Tufte, Ulrich J. Schwarz, Robert Benjamin, Ronald J. Reynolds, Reynier F. Peletier and Peter M.W. Kalberla in Nature, Vol. 402, No. 6760; pages 388—390; November 25, 1999.

A Far Ultraviolet Spectroscopic Explorer Survey of Molecular Hydrogen in Intermediate-Velocity Clouds in the Milky Way Halo. P. Richter, B.P. Wakker, B.D. Savage and K.R. Sembach in Astrophysical Journal, Vol. 586, No.1, pages 230—248; March 20, 2003. Доступно на: arXiv.org/abs/astro-ph/0211356

Highly Ionized High-Velocity Gas in the Vicinity of the Galaxy. K.R. Sembach, B.P. Wakker, B.D. Savage, P. Richter, M. Meade, J.M. Shull, E.B. Jenkins, G. Sonneborn and H.W. Moos in Astrophysical Journal, Supplement Series, Vol.

146, No.1, pages 165—208; May 2003. Доступно на: arXiv.org/abs/astro-ph/0207562

ПОИСКИ ТЕМНОГО ВЕЩЕСТВА

Through a Universe Darkly: A Cosmic Tale of Ancient Ethers, Dark Matter, and the Fate of the Universe. Marcia Bartusiak. HarperCollins, 1993.

Just Six Numbers: The Deep Forces That Shape the Universe/ Martin J. Rees. Basic books, 2001.

Sources and Detection of Dark Matter and Dark Energy in the Universe. Edited by David B. Cline. Springer Verlag, 2001.

МОЛОДЫЕ ШАРОВЫЕ СКОПЛЕНИЯ

Keith M. Ashman and Stephen E. Zepf, **Globular Cluster Systems**, Cambridge University Press, 1998.

Bruce W. Carney and William E. Harris, **Star Clusters**, Springer-Verlag, 2001.

The Young, the Old and the Globular: Special Section on Globular Clusters, SCIENCE, Vol. 299, pp. 59—75, January 3, 2003.

Francois Schweizer. **Formation of Globular Clusters in Merging Galaxies, in New Horizons in Globular Cluster Astronomy.** Edited by Giampaolo Piotto, Georges Meylan, George Djorgovski and Marco Riello. Astronomical Society of the Pacific conference Series, Vol. 296, 2003. Доступно на arXiv.org/abs/astro-ph/0212243

КОГДА ЗВЕЗДЫ СТАЛКИВАЮТСЯ

Кинг А.Р. **Введение в классическую звездную динамику.** — М.: УПСС, 2002.

Саслау У. **Гравитационная физика звездных и галактических систем.** — М.: Мир, 1989.

Спитцер Л. **Динамическая эволюция шаровых скоплений.** — М.: Мир, 1990.

Сурдин В.Г. **Динамика звездных систем.** — М.: МЦНМО, 2001.

Сурдин В.Г. **Рождение звезд.** — М.: УПСС, 2001.

КОСМОС: КРИЗИС СРЕДНЕГО ВОЗРАСТА

Star Formation History since z = 1 as Inferred from Rest-Frame Ultraviolet Luminosity Density Evolution. Gillian Wilson et al. in Astronomical Journal, Vol.124, pages 1258—1265; September 2002. Available online at www.arxiv.org/abs/astro-ph/0203168

The Cosmic Evolution of Hard X-ray Selected Active Galactic Nuclei. Amy J.Barger et al. in

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

Astronomical Journal (in press). Available online at www.arxiv.org/abs/astro-ph/0410527

Supermassive Black Holes in the Distant Universe. Edited by Amy J.Barger. Astrophysics and Space Science Library, Vol. 308. Springer, 2004.

РАЗГАДКА ТАЙНЫ СОЛНЕЧНЫХ НЕЙТРИНО

Arthur B. McDonald, Джошуа Клейн **The Origin of Neutrino Mass.** Hitoshi Murayama in Physics World, Vol. 15, No. 5, pages 35—39; May 2002.

The Asymmetry between Matter and Anti-matter. Helen R. Quinn in Physics Today, Vol. 56, No. 2, pages 30—35; February 2003.

Адрес веб-сайта ЧО: www.sno.phy.queensu.ca

Адрес веб-сайта о нейтринных осцилляциях: www.neutrinooscillation.org

ВСЕЛЕННАЯ ДИСКОВ

Gravity's Fatal Attraction: Black Holes in the Universe. M. Begelman and M. J. Rees. W. H. Freeman and Company, 1998.

Accretion Power in Astrophysics. Third edition. Juhan Frank, Andrew King and Derek Raine. Cambridge University Press, 2002.

Accretion Processes in Star Formation. Lee Hartmann. Cambridge University Press, 2004.

<http://imagine.gsfc.nasa.gov/>

НЕОБЫЧНАЯ СМЕРТЬ ОБЫЧНЫХ ЗВЕЗД

Костякова Е.Б. **Физика планетарных туманностей.** — М.: Наука, 1982.

Потташ С. **Планетарные туманности: изучение поздних стадий звездной эволюции.** — М.: Мир, 1987.

Cosmic Butterflies: The Colorful Mysteries of Planetary Nebulae. Sun Kwok. Cambridge University Press, 2001.

Shapes and Shaping of Planetary Nebulae. Bruce Balick and Adam Frank in Annual Review of Astronomy and Astrophysics, Vol. 40, pages 439—486; 2002.

На многих сайтах в Интернете есть изображения планетарных туманностей, например: www.astro.washington.edu/balick/WFPC2 www.blackskies.com/intro.html#NEBULAE hubblesite.org/newscenter/archive/category/nebula/planetary ad.usno.navy.mil/pne www.astronomynotes.com/evoltn/s1.htm www.blackskies.com/neb101.htm

МАГНИТАРЫ

Flash! The Hunt for the Biggest Explosions in the Universe. Govert Schilling. Cambridge University Press, 2002.

ЯРЧАЙШИЕ ВЗРЫВЫ ВО ВСЕЛЕННОЙ

The Biggest Bangs.The Mystery of Gamma-Ray Bursts. The Most Violent Explosions in the Universt. Jonathan I. Katz. Oxford University Press, 2002.

Flash! The Hunt for the Biggest Explosions in the Universe. Govert Schilling. Cambridge University Press, 2002.

ЗАГАДОЧНЫЕ ЛАНДШАФТЫ МАРСА

Mars 2000. Arden L. Albee in Annual Review of Earth and Planetary Science, vol. 28, page 281—304; 2000

Mars: The Lure of the Red Planet. William Sheehen James O'Maara. Prometheus Books, 2001.

Бурба Г. А. **Номенклатура деталей рельефа Марса.** М.: Наука, 1981.

Ксанфомалити Л.В. **Парад планет.** — М.: Наука-Физматлит, 1997.

Маров М. Я. **Планеты Солнечной системы.** — М.: Наука, 1986.

Марс: великое противостояние. Под ред. В.Г. Сурдина. — М.: Физматлит, 2003.

НЕВИДИМКИ ПЛАНЕТНЫХ СИСТЕМ

Planetary Material around Main-Sequence Stars. A. M. Lagrange, D. E. Backman, and P. Artimowicz in Protostars and Planets IV. Edited by Vincent Mannings, Alan Boss and Sara Russell. University of Arizona, 2000.

Star Factories: The Birth of Stars and Planets. Ray Jayawardhana. Raintree/Steck-Vaoghn, 2000.

Distant Wanderers: The Search for Planets beyond the Solar System. Bruce Dorminey. Springer-Verlag, 2001.

Dusty Circumstellar Disks. Benjamin Zuckerman in Annual Review of Astronomy and Astrophysics, Vol. 39, pages 549—580; September 2001.HST/ACS Coronagraphic Imaging of the Circumstellar Disk around HD1415659A. Mark Clampin et al. in Asrophysical Journal, Vol. 126, No. 1, pages 385—392; July 2003. Доступно на arXiv.org/abs/astro-ph/0303605

Ипатов С.И. **Миграция небесных тел в Солнечной системе.** — М.: УРСС, 2000.

Симоненко А.Н. **Астероиды.** — М.: Наука, 1985.

Сурдин В.Г. **Рождение звезд.** — М.: УРСС, 2001.

ЗВЕЗДОПОДОБНЫЕ БРОДЯГИ

Чернявский Г.М., Чудецкий Ю.В. **Конверсия и некоторые задачи астероидной опасности.** Международная конференция «Астероидная опасность-93» 25—27 мая 1993г. СПб: изд-во ИТА РАН, 1993 г. с.99—100.

Румынский А.Н., Сазонов В.С., Финченко В.С. **Разрушение опасных космических объектов с помощью взрыва.** Международная конференция «Космическая защита Земли-2000», 11—15 сентября 2000 г., Евпатория, Крым, Украина.

Симонов И.В. **О целесообразности использования космических техногенных отходов при уменьшении астероидно-космической опасности.** — М.: ДАН РАН, №2, 1997 г., с. 196—199.

Зайцев А.В. **Концептуальный проект системы планетарной защиты «Цитадель».** Международная конференция «Космическая защита-2000», 11—15 сентября 2000 г., Евпатория, Украина.

НОВАЯ ЛУНА

The Once and Future Moon. Paul D. Spudis. Smithsonian Institution University Press, 1996.

A New Moon for the Twenty-First Century. G.Jeffrey Taylor in Planetary Science Research Discoveries, August 2000. Доступно на: www.psrд.hawaii.edu/Aug00/newMoon.html

Lunar Meteorites and the Lunar Cataclysm. Barbara A. Cohen in Planetary Science Research Discoveries, January 2001. Доступно на: www.psrд.hawaii.edu/Jan01/LunarCataclysm.html

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

The Clementine Atlas of the Moon. D. Ben G. Bussey and Paul D. Spudis. Cambridge University Press, 2004.

БОТ И САТУРН

Lifting Titan`s Veil: Exploring the Giant Moon of Saturn. Ralph Lorenz and Jacqueline Mitton. Cambridge University Press, 2002.

Mission to Saturn: Cassini and the Huygens Probe. David M. Harland. Springer-Verlag and Praxis Publishing, 2002.

The Cassini-Huygens Mission: Overview, Objectives and Huygens Instrumentarium. Edited by Christopher T. Russell. Kluwer Academic Publishers, 2003.

ЯДЕРНЫЕ ВЗРЫВЫ НА ОРБИТЕ

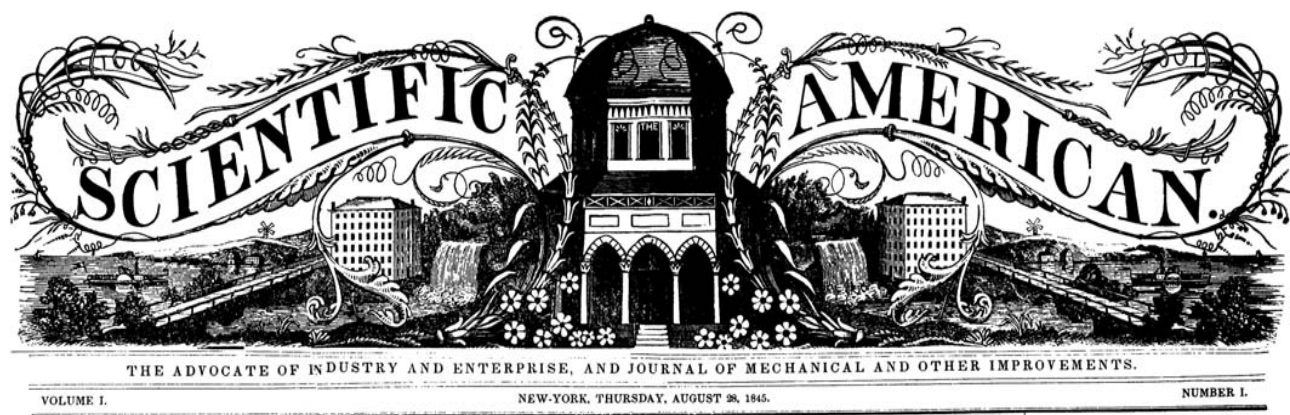
The Effect of Nuclear Weapons. Samuel Glasstone and Philip J. Dolan. U.S. Government Printin Office. www.princeton.edu/~globsec/publications/effects/effects.shtml

The Elliott School of International Affairs, Security Space Forum Resource Center. Доступно по адресу www.gwu.edu/~spi/spaceforum/resource.html

The Nuclear Weapon Archive: A Guide to Nuclear Weapons. <http://nuclearweaponarchive.org>

Информационное совещание DTRA: **«High-Altitude Nuclear Detonations against Low-Earth Satellites»**, апрель 2001. www.fas.org/spp/military/program/asat/haleos.pdf

Информационное совещание Дениела Пападопулоса: **«Satellite Threat Due to High-Altitude Nuclear Detonations»**. www.lightwatcher.com/chemtrails/Papadopoulos-chemtrails.pdf



Журналу Scientific American – 160 лет

На заре своего существования *Scientific American* выглядел более чем скромно. В 1845 г. художник и изобретатель Руфус Портер (Rufus Porter) начал издавать еженедельную листовку. Дедушка *Scientific American* носил длинное название «*The Advocate of Industry and Enterprise, and Journal of Mechanical and Other Improvements*» и был посвящен в основном событиям в области промышленности и предпринимательства и отчасти изобретениям. Однако менее чем через год Портеру наскучила издательская деятельность, и он продал свое детище Орсону Мунну (Orson Munn) и Альфреду Бичу (Alfred Beach) за \$800.

Журнал начал стремительно развиваться и занял важное место в жизни научного сообщества. Так, он способствовал созданию филиала Патентного агентства США (1850 г.), целью которого было обеспечение технической поддержки и легальных консультаций изобретателям, и к началу XX в. более 100 тыс. изобретений были запатентованы благодаря *Scientific American*.

...Тогда, на пороге промышленной революции, когда основным средством передвижения еще оставалась лошадь, а главным орудием медицины – кровопускание, каждое техническое изобретение воспринималось как откровение. Казалось, что человечество стоит на грани новой эры – эры невиданных возможностей и прорывов. Столетиями человечество развивалось крайне медленно. Несмотря на великие открытия Кеплера и Ньютона (XVI–XVII вв.), вопреки интеллектуальному порыву энциклопедистов XVIII в., достижения научной мысли практически не оказывали влияния на повседневную жизнь миллионов людей. Поэтому когда аккумулируемый годами научный

потенциал многих поколений ученых стал приносить зримые плоды, воплотившиеся в чудомашины, восторгам публики не было конца. И сотрудники *Scientific American* увлеклись новинками технологий не меньше своих читателей. Так, в 1899 г. вышла публикация, посвященная велосипедам и автомобилям, журналисты с восхищением фиксировали преодоление все новых порогов скорости, в том числе мировой рекорд, установленный Генри Фордом на льду озера Сент-Клер в Мичигане.

Журнал с интересом следил за открытиями и достижениями и тем самым приобрел уважение и доверие среди ученых и изобретателей. На страницах *Scientific American* появлялись публикации о бессемеровском процессе преобразования чугуна в сталь, телефоне, лампе накаливания и т.д.

Между тем издание ставило себе новые рубежи – информировать своих читателей о последних тенденциях научной мысли раньше, чем эти сведения станут достоянием общественности. Так, фотографии самолета братьев Райт появились на страницах журнала за два года до их удачного полета в местечке Кити Хоук в Северной Калифорнии.* В 1921 г. Роберт Годдард (Robert Goddard), один из пионеров космонавтики, опубликовал в *Scientific American* большую статью о своей работе по конструированию ракеты, способной покрыть «межпланетные расстояния».

В 1948 г. издание, много лет принадлежавшее корпорации Munn & Co, приобрели Джеральд Пил (Gerard Piel), Деннис Фленнеган (Dennis Flanagan)

* «Успех братьев Райт, породивший немало сомнений». Журнал «В мире науки», № 3, 2004 г.

и Дональд Миллер (Donald Miller), которые и создали собственно *Scientific American, Inc.* Так открылась следующая страница развития журнала – к работе редакции стали привлекаться сами ученые, авторы научных разработок и открытий. До сих пор ни один журнал не делал ничего подобного. Отныне читатели имели возможность получать информацию не только первыми, но и из первых рук.

Сегодня издание по-прежнему остается в авангарде мировой научной мысли. Появление спутниковой связи, статьи о развитии полиомакцины, материалы, посвященные созданию искусственного сердца; сообщения об уникальных археологических находках и антропологических исследованиях, погружение в недра космоса и бездны океана, скрытая от посторонних глаз жизнь галактик и молекул, чудесные возможности микрочипов и тайны подсознания – все это находит отражение на страницах журнала.

Авторами материалов SA в разное время стали более 120 лауреатов Нобелевской премии, причем многие из них опубликовали результаты своих исследований задолго до присуждения им награды. *Scientific American* пользовался уважением таких колоссов мировой науки, как А.Эйнштейн, Ф.Крик, Д.Салк, Л.Паулинг.

Листая страницы *Scientific American*, читатели видят, как самые дерзкие замыслы становятся явью, завтра прочно входят в повседневную жизнь, а послезавтра вызывают лишь снисходительную улыбку – устарело. И новые поколения ученых и изобретателей разворачивают на страницах журнала блистательные и фантазмагорические картины будущего, которое скоро найдет свое воплощение.

Сегодня, в эпоху высоких технологий и скоростей, мир стремительно движется вперед, и *Scientific American* старается не только не отставать, но и опережать события, отмечая тенденции развития научной мысли. Каким будет мир завтра? Постоянные читатели уже могут составить себе некоторое представление об этом и даже попытаться вместе с учеными и журналистами ответить на самые важные вопросы о грядущем – от наиболее серьезных до самых наивных: на чем будут ездить через 100 лет? Удается ли продлить человеческую жизнь? Каким предстанет общество будущего?

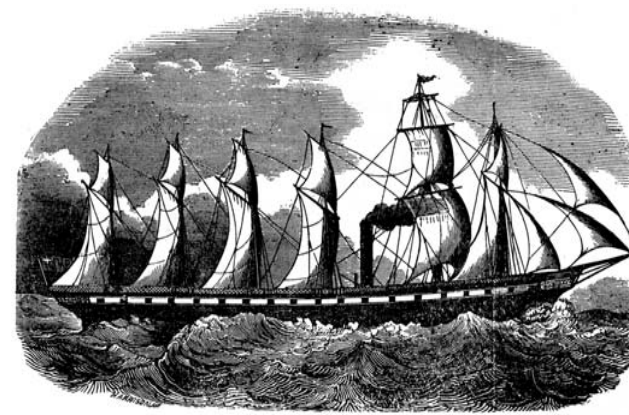
В 1986 г. журнал в очередной раз сменил владельца – им стал основатель немецкой редакции *Verlagsgruppe* Георг фон Хольцбринк (Georg von Holtzbrinck). Сегодня издание возглавляет 7-й по счету редактор Джон Ренни (John Rennie), в 2002 г.

получивший премию *Sagan* за популяризацию науки.

Одной из проблем и парадоксов нынешней эпохи является тот факт, что, живя в едином информационном пространстве, интеллектуалы часто имеют мало доступа к грамотной, полноценной, квалифицированной и дифференцированной научной информации. Читателям предлагается либо множество популярных журналов, где интересные сведения перемежаются с псевдонаучными, либо сугубо научные профессиональные и узкоспециализированные издания, доступные пониманию лишь ученых. *Scientific American* пытается восполнить этот пробел – сотрудники журнала стремятся к тому, чтобы самые сложные проблемы излагались доступным языком. Студенты и преподаватели, ученые разных направлений и просто те, кто интересуется наукой, получают возможность познакомиться с трудами современных исследователей.

Подобно тому, как сама наука дает все новые мощные победы, *Scientific American* также растет и развивается. Сегодня его читают в разных уголках мира на 15 языках, совокупный тираж превышает 1 млн. экземпляров. Причем национальные издания, будь то французское, польское или русское, имеют возможность знакомить свою аудиторию не только с событиями на мировой научной арене, но и с открытиями и разработками ученых своих стран.

Scientific American – один из наиболее авторитетных научных изданий с давними традициями скрупулезного и тщательного подхода к своим материалам и с новыми устремлениями к расширению кругозора. Журнал открыт для любой новой, интересной и, что важно, достоверной информации. Таким образом, *Scientific American* потчует своих читателей «научными деликатесами», которые получает из рук тех, кто их делает.



SCIENTIFIC AMERICAN
«В МИРЕ НАУКИ»

КОСМОС

АЛЬМАНАХ

Руководитель проекта,
главный редактор журнала «В мире науки»

Капица Сергей Петрович

Редактор-составитель *Владимир Сурдин*
Ведущий редактор *Алла Мостинская*
Дизайн и верстка *Любовь Рочева*
Корректор *Юлиана Староверова*

ЗАО «В мире науки»

Москва, ул. Радио, д. 22, офис 408.
Телефон: (495) 727-35-30, тел./факс (495) 105-03-72
e-mail: edit@sciam.ru; **www.sciam.ru**