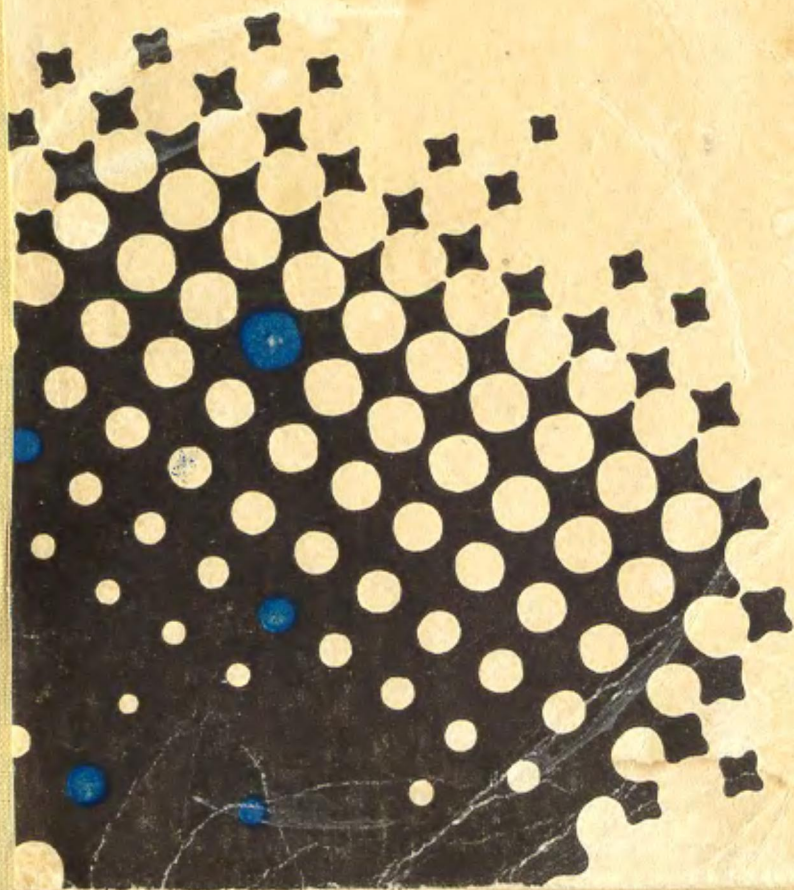


5
X-68

Галактики,
ядра
и квазары

Ф. Хойл



5
Х-68



ИЗДАТЕЛЬСТВО

«МИР»

FRED HOYLE

*Galaxies,
Nuclei,
and
Quasars*

HARPER & ROW, PUBLISHERS

NEW YORK, 1965

523

Р С Ф С Р
Министерство просвещения
МЫТИЩИНСКИЙ
ГОРОДСКОЙ ОТДЕЛ
народного образования
СРЕДНЯЯ ШКОЛА ойл
№ 24

..... 196 г.
Галактики,

ядра

и

квазары

Перевод с английского
К. А. Любарского

Под редакцией
Д. А. Франк-Каменецкого

Издательство „Мир“

Москва, 1968

W 2601

Английского ученого Фреда Хойла хорошо знают как видного астрофизика, всегда выдвигающего новые и смелые гипотезы. Он известен также как автор нескольких научно-фантастических романов, два из которых, «Черное облако» и «Андромеда», переведены на русский язык. На этот раз мы встречаемся с Хойлом-популяризатором, знакомящим читателей с передовым фронтом науки, на котором причудливо смыкаются микро- и макромиры — атомные ядра, гигантские галактики и таинственные квазары.

Автор вводит читателя в мир зарождающихся звезд, рассказывает ему о прошлом и будущем нашего Солнца. Затем перед читателем предстают «схлопывающиеся» гигантские звезды — квазары, «замыкающиеся» пространство и множество других интересных вещей. Но это не фантастика, это строгие выводы из тех же уравнений, которыми определяется путь Земли вокруг Солнца.

Книгу с увлечением прочтут все интересующиеся наукой, начиная со студентов младших курсов и кончая маститыми научными сотрудниками.

*Редакция космических исследований,
астрономии и геофизики*

От редактора

Автор этой книги — один из виднейших представителей современной астрофизики, зачинатель многих ее направлений. Он выделяется смелостью и оригинальностью мышления. Вся его научная деятельность — это блестящий фейерверк смелых идей. Пусть они не всегда прочно входят в науку, но, во всяком случае, они всегда способствуют ее прогрессу, вызывая острую дискуссию, а в борьбе мнений, как известно, рождается истина.

В таком именно стиле написана и предлагаемая вниманию читателя книга. В общедоступной форме, используя лишь минимальное число простейших формул, автор вводит читателя как в курс последних достижений астрономической науки, так и в свою творческую лабораторию, где рождаются идеи, с которыми подчас трудно согласиться, но которые будят мысль и ведут ее вперед. Притом основное внимание уделено не тому, что уже ясно и понятно, а тем неясностям, противоречиям и вообще трудным местам, где можно ожидать чего-то принципиально нового в ближайшем будущем.

Особенную ценность представляют первые три главы, в которых дан блестящий обзор новейших достижений астрономической науки, иллюстрированный прекрасными фотографиями. Следующие две главы посвящены вопросам общей космологии, и к содержанию их следует относиться с осторожностью. Хойл развивает здесь взгляды, тесно связанные с его излюбленной теорией «стационарной вселенной» и непрерывным рождением вещества. Не говоря уже о том, что теория самопроизвольного рождения вещества и С-поля не имеет никакой опоры в современной физике, она отнюдь не подтверждается и последними

астрономическими открытиями. Как прямые данные подсчета радиоисточников на больших расстояниях, так и косвенные, но веские аргументы, связанные с открытием реликтового космологического излучения, решительно говорят против стационарной космологии. Последняя глава книги — прекрасный, хотя и очень краткий очерк современной теории происхождения химических элементов, одним из творцов которой является сам автор книги.

В книге обсуждается много важных и увлекательных вопросов, и всегда со свежих и оригинальных позиций. Нужно отметить, что книга посвящена той проблематике, над которой работал и работает сам автор, и отражает его личную точку зрения. Автор не всегда отдает должное работам других исследователей, в частности советских астрономов. Так, в главе о галактиках не упомянуты работы В. А. Амбарцумяна и Б. А. Воронцова-Вельяминова, очень близкие идейно к содержанию этой главы.

Блестящая, хотя и во многом спорная книга Хойла представляет несомненный интерес для советского читателя. Следует только иметь в виду, что все идеи, связанные со стационарной космологией, — сюда относятся и непрерывное рождение вещества, и С-поле, и гипотеза внегалактического происхождения космических лучей — отнюдь не являются общепризнанными. Читателю следует ознакомиться с ортодоксальной теорией эволюционной космологии и горячей моделью вселенной, блестяще изложенной в ряде обзоров Я. Б. Зельдовича.

В настоящее время астрономия и космология переживают «период бури и натиска». Идет горячая научная дискуссия, непрерывно появляются новые факты и новые идеи. Книга Хойла вводит читателя в самую гущу борьбы идей, показывает не только результаты, но и самый процесс научного мышления. В этом большая ценность книги.

Д. А. Франк-Каменецкий

От автора

В основу шести глав этой книги положены лекции, прочитанные в 1964 г. слушателям университета. При обработке лекций я старался подчеркнуть чрезвычайно «подвижное» состояние современной астрономии и космологии. В этих областях сейчас делаются новые замечательные открытия. Я попытался уловить, насколько мог, наиболее волнующие черты происходящих событий. За предоставление иллюстраций к этой книге я признателен моим коллегам, прежде всего М. Бербидж, У. А. Фаулеру, Дж. В. Оуку, А. Р. Сэндейджу, М. Шмидту, и обсерватории Маунт Вилсон и Паломар.

Фред Хойл

1965 г.

1. Галактики

Естественно, нам лучше всего знакома та Галактика, в которой мы живем. О тонких деталях ее строения, о составляющих ее звездах, об их движениях, о содержании в ней газа и пыли нам известно гораздо больше, чем о других галактиках. Однако мы в точности не знаем, какова она в целом, как она выглядит со стороны. По общей массе и размерам она, по-видимому, очень похожа на туманность Андромеды — ближайшую к нам крупную галактику. Эта туманность числится в каталоге Мессье под номером 31 (обозначается М 31) и изображена на фото I. Скорее всего, что для далекого наблюдателя наша Галактика выглядит почти так же.

Существует много форм галактик. Их классификация по Хаббллу начинается с типа E0 — более или менее сферических аморфных систем (фото II). Самые яркие и массивные галактики относятся именно к этому типу. По массе они, вероятно, более чем в 10 раз превосходят М 31 или нашу Галактику, а по светимости — в 3—4 раза. Они содержат по порядку величины примерно миллион миллионов звезд. Уже здесь стоит упомянуть о двух удивительных особенностях этих систем, хотя я тем самым вторгнусь в область вопросов, рассматриваемых в следующей главе.

Слабых галактик больше, чем галактик высокой светимости, и это не удивительно. Что действительно странно, так это то, что все галактики с наибольшей светимостью, по-видимому, более или менее одинаковы. Создается впечатление, что независимо от того, возьмем ли мы в качестве примера выборку из двух десятков галактик или из тысячи, результат будет одним и тем же: если среди этих галактик имеются крупные типа E0, они будут одного и того же



Фото I. Большая галактика в Андромеде NGC 224 (M 31). Видны также галактики-спутники NGC 205 и 221. Фотография получена на 120-сантиметровом телескопе Шмидта обсерватории Маунт Вилсон и Паломар.

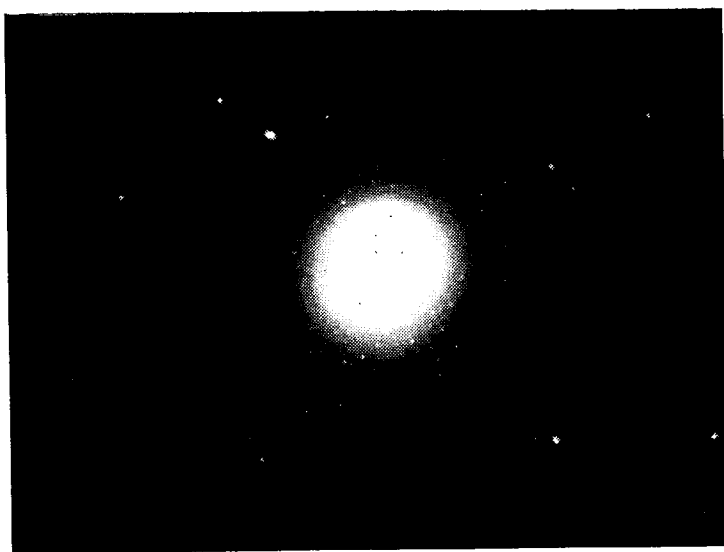


Фото II. Шаровая туманность в Деве (M 87). Фотография получена на 5-метровом телескопе обсерватории Маунт Вилсон и Паломар.

«калибра». Галактики явно могут достигать только определенного предела и никогда его не превышают. Почему?

Системы типа E0 выглядят на первый взгляд малоинтересными. Они содержат очень мало газа. В них возникает мало новых звезд, а возможно, что звезды не образуются совсем. Следовательно, они не содержат ярких молодых звезд. Однако сейчас мы знаем, что галактики E0 — это места невероятно мощной активности. На фото III видна струя какого-то вещества, выброшенного из центра большой галактики, изображенной на фото II. Наиболее примечательны центральные области всех таких систем. За небольшими исключениями они обладают очень маленькими и очень яркими центральными ядрами. Однако мы не можем сказать, насколько они малы, ибо, говоря языком специалистов, центральное ядрышко неразрешимо. Это означает, что дрожание, вызываемое земной атмосферой, не позволяет находящемуся на поверхности

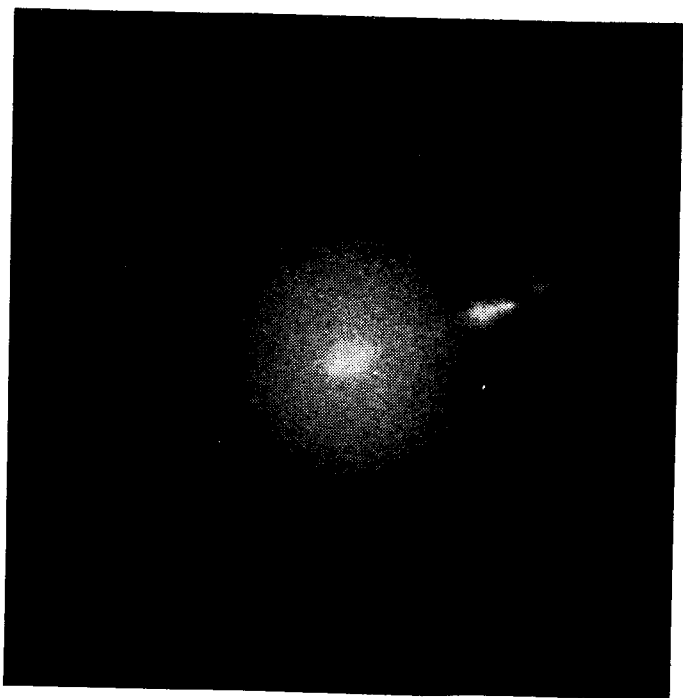


Фото III. Струя, выходящая из M 87 (NGC 4486).

Земли астроному измерить углы, меньшие $1''$, а ядра таких галактик меньше этой величины. Вероятно, что их диаметры порядка сотни световых лет, но окончательного ответа следует подождать, пока за пределы атмосферы не будет выведена орбитальная обсерватория или пока не будут проведены измерения на телескопе, установленном на воздушном шаре. Каким бы ни оказался окончательный ответ, уже ясно, что должна существовать огромная концентрация массы к центру этих объектов, и естественно предположить, что мощная активность, о которой я только что говорил, связана именно с этой концентрацией.

Распределение звезд в эллиптической галактике необычайно равномерно. Нет ничего похожего на чередование ярких и темных областей, характерное для спиральных галактик. В хаббловской последователь-

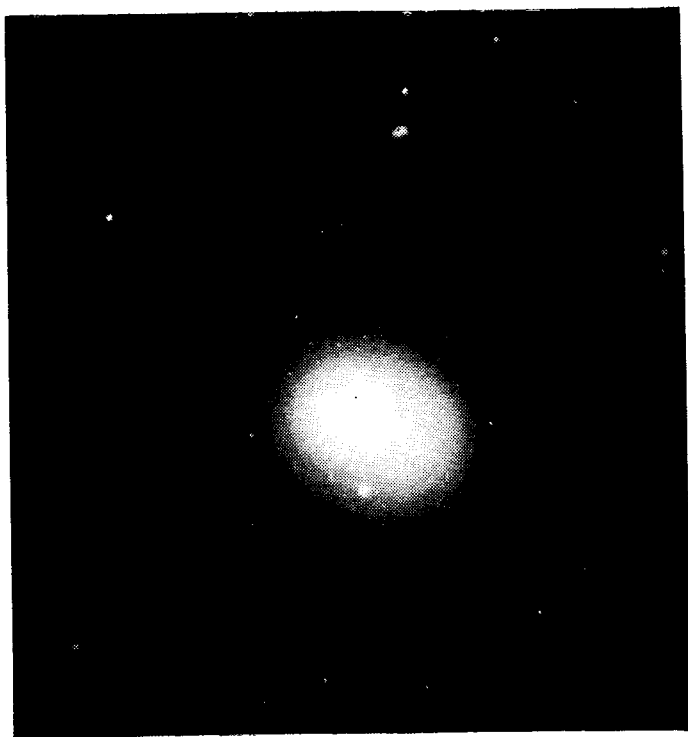


Фото IV. NGC 4472, эллиптическая галактика типа E2.

ности эллиптических галактик обозначения: E0, E1, E2 и т. д. до E7, отвечают все более и более плоским системам. В истинных эллиптических галактиках распределение яркости всегда равномерно. Линии равной яркости имеют эллиптическую форму — на это указывает само название галактик, и нет никакого намека на внутреннюю структуру. Двигаясь вдоль последовательности от E0 к E7, мы, вероятно, переходим к системам менее массивным и меньшей светимости. Создается впечатление, что у поздних типов вращение играет большую роль, хотя я должен подчеркнуть, что наблюдениями это подтверждено не было, и на основании некоторых теоретических соображений я серьезно сомневаюсь в правильности такой догадки.



Фото V. Галактика NGC 3115. У этой галактики концентрация к плоскости такая же, как у эллиптических галактик E7, но возможно, что эта галактика сложная и имеет дисковую составляющую.

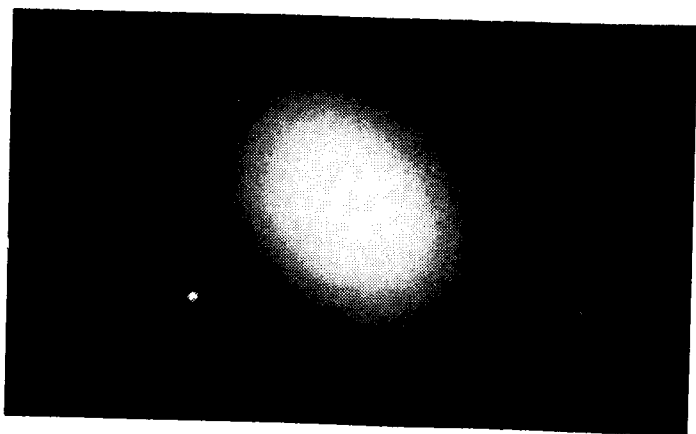


Фото VI. Эллиптическая галактика NGC 4365 типа E2 в облаке галактик в Деве.

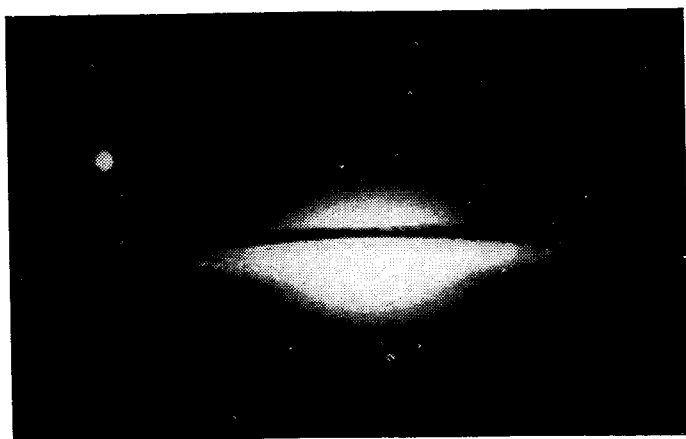


Фото VII. Спиральная туманность в Деве NGC 4594 (M 104), вид с ребра. Фотография получена на 5-метровом телескопе.

Минковский и Оорт измерили вращение в галактике типа E7 номер 3115 по Новому генеральному каталогу (обозначается NGC 3115), но это не обычная эллиптическая галактика. В ней четко видна внутренняя дисковидная структура. По-видимому, галактика представляет собой совокупность двух компонент: сравнительно тонкого, но яркого диска, окруженного более протяженным, но слабым эллиптическим ореолом (гало). Измеренное вращение может относиться к дисковой составляющей.

Только что упомянутая особенность — составная структура галактик — становится обычной, как только мы от эллиптических галактик переходим к спиральным. На фото VII показана широко известная галактика, похожая на шляпу-сомбреро. Она состоит из большого центрального ядра эллиптического типа, окруженного плоским диском. Хаббловскую последовательность спиральных галактик Sa, Sb, Sc можно описать, исходя из относительной роли ядра и спирального диска. На фото VII изображена галактика типа Sa. У галактик Sb ядро менее развито. К этому типу принадлежит туманность Андромеды (см. фото I) и, может быть, наша Галактика. В конце



Фото VIII. Спиральная туманность в Гончих Псах NGC 5194 (M 51). Туманность-спутник NGC 5194. Фотография получена на 5-метровом телескопе.

последовательности, у галактик типа Sc, центральная составляющая совсем слаба. На фото VIII показана широко известная галактика этого типа M 51*.

Не будет преувеличением сказать, что самая крупная проблема современной астрономии состоит в том, чтобы понять, почему существуют эти различные типы галактик и каково их происхождение. Свойства отдельных звезд, входящих в галактики, — это классический предмет астрофизики, тогда как образование галактик затрагивает космологию. Изучение галактик перекидывает мостик между обычной астрономией и астрофизикой, с одной стороны, и космологией — с другой.

О происхождении галактик почти ничего не известно. Обычная точка зрения состоит в том, что галактики — это острова материи, сохранившиеся в расширяющейся вселенной с того времени, когда она возникла в чудовищно плотном состоянии. Легко показать, что поведение вещества в любой области определяется точно теми же уравнениями, что и поведение простого расширяющегося облака газа в обычной ньютоновской теории тяготения. При достаточно большой начальной энергии отдельное облако расширяется до бесконечности, но если энергии недостаточно, расширение облака после достижения максимума сменяется сжатием под действием собственных сил тяготения. Согласно обычным взглядам, в большинстве областей энергии достаточно, чтобы обеспечить неограниченно продолжающееся расширение, но в исключительных случаях возможен местный дефицит энергии, вызывающий сжатие отдельных сгустков газа. Предполагается, что из них и образуются галактики. Я нахожу это объяснение неудовлетворительным, ибо оно не позволяет определить размеры галактик. Почему должен существовать описанный выше непонятный верхний предел масс и яркостей галактик? Было высказано предположение, что определяющую роль играет температура газа или излучения, которое в нем может присутствовать. Однако температура может определять только

*) В нашей литературе диск принято называть плоской, а «ореол», «гало», центральное ядро — сферической составляющей галактик. Для первой характерна концентрация к плоскости, для второй — к центру. — Прим. ред.

В. Сосис
Министерство просвещения
И. И. ШИШОВСКИЙ
ГОРОДСКОЙ ОТДЕЛ
названия
СРЕДНЕЙ ШКОЛЫ
№ 247

а не *верхний* предел масс галактик. Вот почему я сомневаюсь, что решение проблемы может быть найдено в этом направлении.

Другая традиционная точка зрения заключается в том, что мощным фактором, определяющим тип галактики, является ее вращение, или, точнее, момент количества движения. Так, последовательность эллиптических галактик от E0 до E7 рассматривается как последовательность с возрастающим моментом количества движения; для спиралей он считается еще более важным управляющим фактором. Я усматриваю в этой идее следующую трудность. Если тяготение и вращение являются основными факторами, определяющими тип галактики, то, мне думается, все галактики должны были бы иметь в точности одинаковое строение. Они могли бы различаться по массам, светимости или размерам, но формы их всегда оказывались бы одинаковыми. Совершенно ясно, что для формы решающим является тот момент, когда образуются звезды, а этот момент может зависеть только от соотношения гравитационных сил и сил, возникающих при вращении, если только эти силы действительно являются единственными определяющими факторами задачи. Это же отношение определяет и форму, так что образование звезд и становление формы галактики всегда происходило бы совместно. Это значит, что все галактики распадались бы на звезды в тот момент, когда при сжатии достигается определенная форма, соответствующая некоторому значению отношения указанных сил. Ясно, однако, что это не так: галактики имеют самые разнообразные формы. Напротив, как правило, почти одинаковыми оказываются размеры галактик. Во всяком случае, для основных классов галактик размер является более постоянным параметром, чем форма, масса или светимость. Можно с уверенностью заключить, что в этой задаче должны быть учтены другие соображения.

Почему столь важен момент звездообразования? Потому что, после того как звезды возникли, в их общем геометрическом расположении происходит мало изменений. На ранней стадии сжатия газовое облако, вероятно, более или менее сферическое. При сжатии (я говорю сейчас о *газе*), по мере того как силы, свя-

занные с вращением, становятся все более значительными, происходит постепенное уплощение облака. В конце концов газ соберется в тонкий диск. Если звезды не образуются до тех пор, пока газ не сожмется в диск, то мы, очевидно, будем иметь плоское распределение звезд того типа, который мы видим в спиральных и поздних эллиптических галактиках. Но если звезды образуются на ранних стадиях сжатия, когда облако почти сферическое, то распределение звезд будет таким, какое мы встречаем у ранних членов последовательности эллиптических галактик. Итак, если бы было известно, чем определяется момент звездообразования, то мы могли бы продвинуться довольно далеко в понимании различных типов галактик.

Звездообразование в нашей Галактике происходит в облаках, подобных тому, которое изображено на фото IX. Факторы, которые, как мы полагаем, регулируют этот процесс, определяются четырьмя различными видами сил. Кроме сил тяготения и вращения приходится учитывать магнитные силы и силы давления. Действие этих сил зависит от сложных и довольно неожиданных факторов, таких, как присутствие или отсутствие в газе мелких частиц пыли, и результат может полностью определяться именно этим обстоятельством. На фото X, изображающем эллиптическую галактику NGC 5128, видна гигантская полоса пыли. Это особенная галактика, и о ней я буду говорить в следующей главе. Найти пыль в системе, которая кажется эллиптической галактикой, неожиданно. Пыль обычна для спиралей, До недавнего времени считалось, что во всех эллиптических галактиках пыль практически отсутствует.

Если продумать до конца эти соображения, то они поистине озадачивают. Каков химический состав пылевых частиц? Наиболее вероятные вещества — это обычный лед и графит. Впрочем, частицы вполне могут состоять из смеси того и другого. Для получения льда необходима содержащая кислород вода, а графит состоит из углерода. Как мы увидим в последней главе, оба эти элемента образуются в звездах. Но как же появились эти вещества, если звезд до образования пыли быть не может? Что возникло раньше — курица или яйцо?



Фото IX. Большая туманность в Орионе NGC 1976 (M 42).
Фотография получена на 2,5-метровом телескопе.

До сих пор мы рассматривали только традиционные взгляды на происхождение галактик. Теперь мне хотелось бы рассказать немного о некоторых новых результатах, а также коснуться новых гипотез.

Нет никаких сомнений, что в спиральных галактиках вращение действительно играет важную роль. В результате наблюдений супругов Бербидж и Прендергаста стало возможным выяснить распределение масс в дисках ряда плоских спиральных галактик типа Sc. Зная распределение масс и используя измеренные значения скоростей вращения, можно легко найти распределение момента количества движения. Оказывается, что оно практически такое же, как в облаке с однородным вращением. Это служит веским под-



Фото X. NGC 5128. Этот объект является мощным источником радионизлучения. Фотография получена на 5-метровом телескопе.

тверждением того, что диски спиральных галактик *конденсировались* из таких облаков и что звездообразование было слабым или полностью отсутствовало до тех пор, пока газ не сконденсировался в виде диска.

Я должен подчеркнуть, что эти выводы относятся к галактикам Sc, у которых, как вы помните, очень слабо выражена эллиптическая составляющая*. Приложение подобных представлений к галактикам Sb и Sa встречается с трудностями при объяснении эллиптической составляющей. Вернемся к фото VII. Вполне

* В нашей литературе ее чаще, но менее точно называют сферической. — Прим. ред.

возможно, что плоская составляющая образовалась при конденсации облака точно так же, как у галактик Sc. Но что можно сказать о большом центральном ядре? Тот же вопрос, хотя и в меньшей степени, относится и к галактикам Sb.

В нашей собственной Галактике мы сталкиваемся с аналогичной проблемой при попытке объяснить происхождение ее сферической, или, точнее, эллиптической составляющей (гало). Гало состоит из системы шаровых скоплений, быстрых звезд и галактического ядра. Бааде различает две составляющие (диск и гало) и называет их I и II типами населения Галактики. Звезды, относящиеся к II типу, составляют сплюснутую эллиптическую систему с отношением осей приблизительно 1:2. Она содержит, вероятно, $1/10$ полной массы Галактики. Как возникло это гало? Согласно обычным представлениям, звезды гало сконденсировались первыми, т. е. они образовались до того, как сжимающееся газовое облако приобрело форму диска. Но можно спросить, почему же тогда остальная часть облака также не обратилась в звезды и почему наша Галактика не сделалась эллиптической, примерно типа E4, а стала спиральной? На этот вопрос убедительного ответа нет, и нелегко представить себе, каким он мог бы быть. Наиболее трудным должно было быть образование первых звезд, хотя бы уже из-за отсутствия пыли. Как только первые звезды сконденсировались, процесс дальнейшего звездообразования должен стать легче. Другое предположение состоит в том, что в образовании Галактики приняли участие два облака: сначала облако, которое смогло разделиться на звезды на ранних этапах, до превращения в диск, а затем облако, которое распалось на звезды только в стадии диска. Опять-таки трудно себе представить, как бы это могло произойти, так как при этом порядок звездообразования, по-видимому, получается обратным действительному. Вероятно, идею о двух облаках можно было бы использовать, если считать, что облако, из которого образовалось гало, было вторым, однако это противоречит распространенному убеждению, что звезды гало старше звезд диска.

Я подозреваю, что ключ к решению этой проблемы состоит в том, что угловая скорость вращения гало,

по-видимому, много меньше, чем диска. Правда, это противоречит представлению о том, что обе составляющие произошли из одного и того же облака. Возможно, хотя это и удивительно, что гало вообще не вращается. Под этим я подразумеваю, что система гало как целое имеет суммарный момент количества движения, равный нулю. Сколько звезд гало обращается в одну сторону, столько же и в противоположную. Если это удастся подтвердить, то вряд ли гало когда-либо могло прийти извне.

При анализе движений отдельных звезд Эгген выделил группу из нескольких сотен звезд с большими скоростями, которую можно считать принадлежащей к системе гало. Эти звезды обладают двумя замечательными свойствами. Во-первых, они почти не участвуют в общем вращении Галактики. Во-вторых, хотя многие из них двигаются по орбитам, уводящим их далеко от галактического центра, они тем не менее проникают глубоко в центральные области Галактики. Некоторые из них проходят практически через самый центр, в точности так, как если бы газ, из которого они образовались, был с силой выброшен из центра. В следующей главе я буду рассматривать много случаев, когда газ выходит из центров галактик, так что процессы, приводящие к выбросу вещества, действительно происходят. С этим едва ли можно спорить. Спор возникает о том, должен ли газ сначала стекать извне в центральные области, перед тем как быть выброшенным. Здравый смысл подсказывает, что именно так и должно быть. Однако втекание газа до сих пор не наблюдалось, тогда как свидетельств о выбросах, как мы увидим позднее, имеется множество. Более того, трудно понять, как вещество может иметь столь малый момент количества движения, чтобы попасть в самый центр. Я допускаю, что можно искать механизм обмена моментом количества движения между втекающим газом и газом, уже находящимся в диске, — возможно, через посредство магнитного поля. Можно попытаться построить теорию, в которой газ проникает к центру вдоль полярной оси галактики, а затем вытекает из центра в плоскости диска. Это, по-видимому, наиболее традиционный подход к решению проблемы.

В астрономии часто случается, что традиционные идеи бывают неплодотворными, особенно когда имеешь дело с совершенно новым явлением. И в данном случае есть признаки того, что традиционный подход дает нам очень немного. Например, слабого вытекания из центра недостаточно, чтобы объяснить происхождение гало. Необходим мощный выброс, и не только в плоскости диска, но и во всех направлениях. Дело в том, что не только одиночные звезды, но целые звездные скопления (шаровые) выглядят так, как если бы они были разбросаны во все стороны от центра Галактики. Процесс этот был столь мощным, что значительная часть вещества вообще покинула пределы нашей звездной системы. Известны звезды с орбитами, удаляющими их от центра на расстояние в 100 тысяч световых лет, и по меньшей мере одно звездное скопление, удаленное примерно на миллион световых лет, которое, вероятно, окончательно потеряно Галактикой. Возможно также, что слабые карликовые галактики, отдельные экземпляры которых расположены примерно в миллионе световых лет от Галактики, образовались из фрагментов, выброшенных из галактического центра или из центра М 31.

Энергия, необходимая для выброса такого количества вещества, должна быть внутреннего происхождения; энергии турбулентного движения, возникающего при вытекании, по-видимому, едва ли достаточно. Возникает мысль, что за это может быть ответственна ядерная энергия, но не та, которая вырабатывается в звездах, ибо на этой стадии нет звезд. Я уже упоминал о необходимости образования углерода и кислорода до возникновения звезд. Кажется привлекательной мысль о том, что пылеобразующие элементы могли быть синтезированы именно на этом этапе. Но в каком теле? Масштабы его должны быть значительно больше отдельной звезды. Мы только начинаем понимать, какие явления мы затрагиваем. Это тоже будет предметом следующих глав.

Если мы примем точку зрения, что эллиптическая система в нашей Галактике образовалась в одном или нескольких мощных процессах, охватывающих значительную часть Галактики, то естественно предположить, что подобные же процессы ответственны за воз-

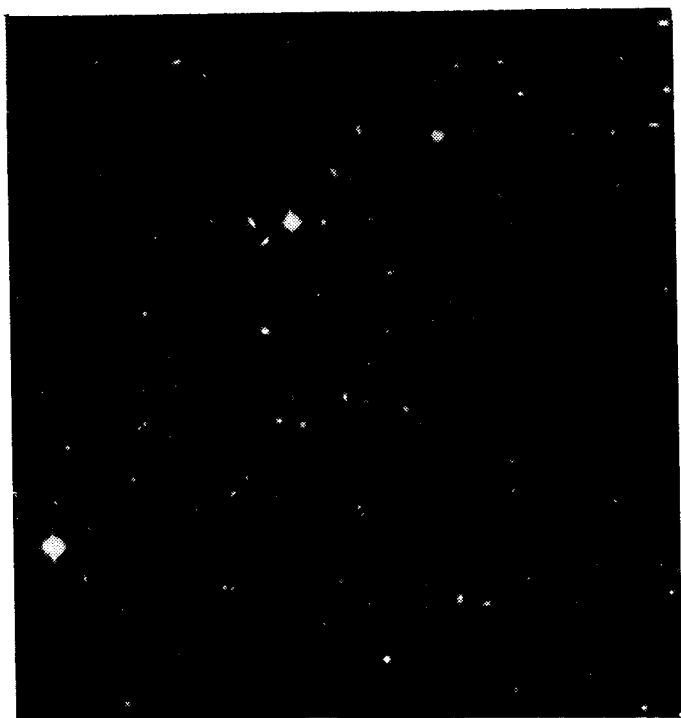


Фото XI. Скопление галактик в Северной Короне.
Фотография получена на 5-метровом телескопе.

никновение эллиптических галактик, а возможно, даже и всех групп галактик. В особенности соблазнительно думать, что гигантские системы типа E0 образовались, так сказать, «изнутри», а не «извне». Менее массивные уплощенные эллиптические галактики, скажем типа E5, могли бы быть фрагментами, выброшенными при мощных процессах, приведших к рождению более массивных систем E0.

Было бы удивительно, если бы таким путем не могли образоваться целые скопления, подобные тому, которое видно на фото XI.

Если мыслить такими категориями, то процесс приобретает огромное космологическое значение. Становится трудным, если не невозможным говорить о про-

стой конденсации, сопровождаемой выбросом. Проблема с моментом количества движения очевидна. Уже недостаточно простой схемы обмена моментом количества движения между вращающимся диском и втекающим веществом, такой, какая могла бы быть достаточной для нашей Галактики. Здесь мы скорее сталкиваемся с тем, что может оказаться связующим звеном между обычной астрономией и космологией.

В начале этой главы я подчеркивал, что совершенно неудовлетворительной чертой современных космологических теорий является их неспособность справиться (в количественном отношении) с проблемой происхождения галактик. Здесь мы имеем дело с той же проблемой, но подходим к ней не с космологической точки зрения, а с позиций обычной астрономии. Это значит, что мы неизбежно сталкиваемся с ней, проводя наблюдения над сравнительно небольшими частями вселенной — над нашей собственной Галактикой и над относительно близкими галактиками. Нет нужды заглядывать далеко в глубины космоса, чтобы осознать необычность стоящей перед нами задачи и понять, что нашим представлениям о возникновении галактик и даже о звездообразовании и происхождении химических элементов могут быть нанесены жестокие удары.

Что мы обнаруживаем, наблюдая удаленные от нас галактики? На рис. 1 мы видим знаменитую зависимость между красным смещением спектральных линий и звездной величиной ярчайших галактик в скоплениях. Этот рисунок заимствован у А. Сэндейджа. Красные смещения можно выражать через эквивалентные скорости. У объекта, удаляющегося от нас в обычном евклидовом пространстве, наблюдалось бы такое же красное смещение. Эквивалентная скорость — это скорость, которую должен иметь такой объект для того, чтобы получилось красное смещение наблюдаемой величины. Это просто способ представления наблюдений; конечно, мы не предполагаем, что мы в действительности имеем дело с евклидовым пространством. Если все ярчайшие галактики в скоплениях достигают описанного выше верхнего предела для галактик, то величина, отложенная по оси абсцисс, является мерой расстояния, и мы получаем зависимость между скоростью и расстоянием. Это хорошо известное соот-

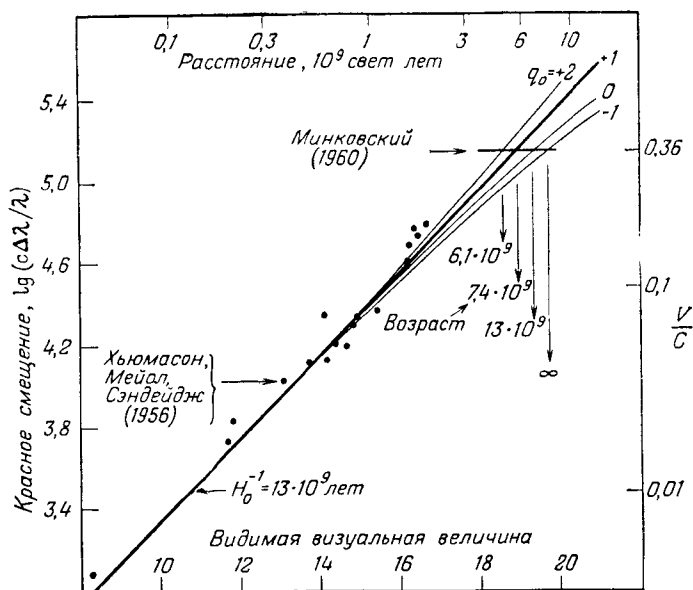


Рис. 1. Зависимость логарифма красного смещения (или скорости удаления от нас) от видимой звездной величины галактик. Расстояния в миллиардах световых лет.

ношение Хаббла $V=Hr$, где V — скорость, r — расстояние, а H — постоянная, именуемая постоянной Хаббла. Численное значение H по рис. 1 таково, что обратная ей величина H^{-1} немногим более 10 миллиардов лет. Этот интервал времени истолковывается следующим образом.

Если расширение, на которое указывает красное смещение, всегда было таким же, как сейчас, т. е. если красное смещение для данной галактики всегда имело одну и ту же величину, то вселенная возникла H^{-1} лет, т. е. примерно 13 миллиардов лет назад. Вселенная начала свое существование как бесконечно плотный, бесконечно горячий газ, заполняющий бесконечно малое пространство. Было ли так или не было, в принципе можно решить, взглянув на галактики, находящиеся на большом расстоянии. Если окажется, что они ложатся на кривую, отмеченную на рис. 1 циф-

рой 0, то обрисованная нами картина верна. Если же окажется, что далекие галактики ложатся на линию, среднюю между отмеченными 0 и +1, то вселенная начала свое существование с такого же сверхплотного, сверхгорячего состояния $2/3H^{-1}$ лет назад, что равно примерно 7—8 миллиардов лет. Расширение ее непрерывно замедлялось. Хотя оно будет продолжать замедляться и впредь, полностью оно никогда не прекратится.

Наблюдательные данные для галактик, нанесенные на рис. 1, говорят в пользу последнего варианта, или даже в пользу кривой, помеченной +1, о которой я буду говорить дальше. Однако интерпретация существенно зависит от того, имеют ли все наблюдаемые галактики в точности одинаковые светимости. Различие между близкими и удаленными галактиками всего лишь в 2 раза полностью меняет ситуацию: с кривой —1 на кривую +1. Почему удаленные галактики должны иметь светимости, систематически отличающиеся от светимостей близких галактик? Потому что последние мы наблюдаем такими, какие они сейчас, тогда как удаленные галактики видны такими, какими они были в момент, когда свет от них начал свой путь к нам. Для далеких галактик это произошло 3—4 миллиарда лет назад, и очень вероятно, что за столь долгое время произошли систематические изменения, достаточно большие, чтобы исказить истолкование этих кривых. Положение улучшилось бы при наблюдении еще более далеких галактик, ибо, как можно убедиться, при увеличении расстояния различные кривые расходятся. Сэндейдж произвел соответствующие оценки и пришел к выводу, что при учете эффекта светимости* галактики располагаются близ нулевой линии, но неопределенность столь велика, что возможной остается любая кривая между —1 и +1. Как мы сейчас увидим, эти два случая представляют особенный интерес.

Кривая для +1 соответствует случаю, когда вселенная расширяется до максимальных размеров, а затем начинает сжиматься. Что же произойдет в конце

* Под эффектом светимости подразумевается систематическое изменение светимости галактик со временем, о котором говорилось выше. — *Прим. ред.*

сжатия? Простейший математический подход к этой проблеме приводит к выводу, что вселенная должна возвратиться в сверхплотное и сверхгорячее состояние и в конце концов исчезнуть в особой точке (сингулярности). Несколько лет назад было высказано предположение, что эффект общего вращения вселенной может изменить этот вывод и заставить вселенную «отскокнуть» назад, так что вместо того, чтобы начинать и заканчивать свое существование в особой точке, вселенная будет совершать бесконечный ряд колебаний. Эта идея кажется привлекательной многим физикам, ибо это единственная космологическая теория, в которой можно избежать проблемы происхождения нуклонов. Если вселенная начала свое существование конечное время назад, то все нуклоны возникли в этот момент и для описания их происхождения нужно подыскать подходящий физический механизм, — именно такова моя собственная точка зрения в космологии.

Предположение о вращении, которое приводит к колебаниям вселенной, не решило проблемы. Этот случай был подвергнут более тщательному математическому анализу, и выяснилось, что вращение не предотвращает сжатия вселенной в особую точку. Следующий шаг еще запутал дело: утверждается, что если в математических уравнениях вообще не производить никаких упрощений, то может оказаться, что особая точка не будет достигаться.

Трудно иметь дело с оппонентом, который, проигрывая в споре, настаивает на том, что он окажется прав, если только вопрос усложнить. Я полагаю, что в ближайшие несколько лет мы будем вынуждены трудиться над все более сложной математикой, хотя нисколько не сомневаюсь, что положение в целом останется столь же безнадежным, как и до сих пор. Моя уверенность основывается на том, что во всех известных мне динамических колебательных системах где-то между крайними положениями находится равновесное, или стационарное, состояние. Правда, наш опыт в этом отношении ограничен лишь конечными, локализованными системами. Но в пульсирующей космологии вся вселенная должна быть конечной как по массе, так и по объему. Более того, во всех до сих пор рассмотренных случаях математическая структура

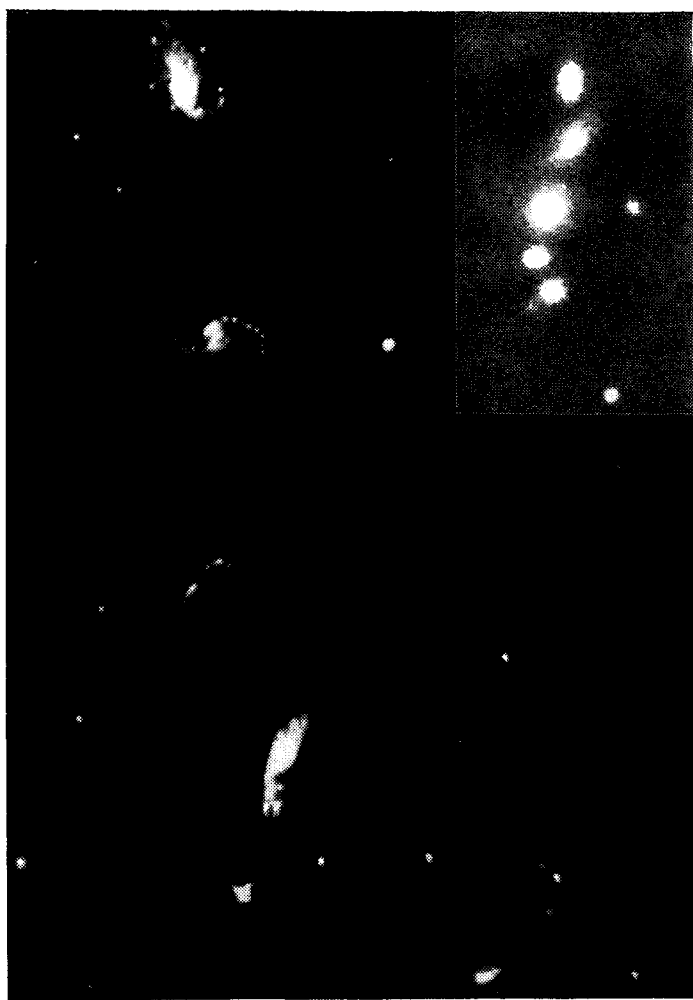


Фото XII и XIII. Примеры цепочек галактик.



Фото XIV. Эллиптическая галактика, сопровождаемая
замечательным облаком газа и звезд.



Фото XV. Галактика со струйными образованиями, выходящими в окружающее пространство.

уравнений сходна со структурой уравнений для локальных систем. Я хочу подчеркнуть, что не было найдено ни одного статического, или стационарного, решения нужного типа. Единственное известное статическое решение для вселенной было найдено Эйнштейном, но эйнштейновское решение этой задаче не отвечает. Отыскание такого решения должно быть гораздо более простым делом, чем получение полного динамического решения, так что я рассматриваю постоянные неудачи попыток найти статическое, или стационарное решение как сильнейшее указание на то, что колебания невозможны.

Как я уже сказал, альтернативой пульсирующей вселенной является допущение, что нуклоны каким-



Фото XVI. Острие, выходящее из галактики в межгалактическое пространство.

то образом должны возникать. В течение последних десяти лет я совместно с несколькими своими коллегами пытался рассмотреть проблему происхождения нуклонов, пользуясь обычными методами, принятыми в физике, т. е. исходя из принципа действия: условие образования частицы состоит в том, что действие инвариантно по отношению к появлению частицы или частиц. Оказалось, что такую теорию можно построить и что она тотчас же исключает особые точки, являющиеся бичом более ортодоксальных форм космологий. Дальнейшие следствия из этой теории я буду рассматривать в гл. 4. Здесь я скажу лишь, что возможным следствием из нее является кривая —1 на рис. 1.

Я подробно говорил об образовании галактик, и вас, вероятно, интересует, можно ли к этой проблеме



Фото XVII. Струйные «мосты» между галактиками.



Фото XVIII. Объект Мейола.

подойти путем прямых наблюдений. Почему просто не посмотреть, образуются ли в наше время галактики? Тогда проблема в значительной части могла бы быть решена простым наблюдением. К настоящему времени, когда развернулась работа с целью обнаружения у галактик различных особенностей, уже получены замечательные результаты. Во-первых, существуют геометрические конфигурации, наводящие на мысль, что отдельные группы галактик могут быть недавнего происхождения. На фото XII и XIII видны пять выстроившихся в линию галактик. Непохоже, чтобы такое расположение было случайным эффектом проекции, другими словами, чтобы совершенно не связанные между собой галактики оказались близкими друг к другу в двумерной проекции на небесную сферу. В этих цепочках галактики сходны и по размерам и по типу. Как долго могут существовать такие цепочки? Это очень важный вопрос. Ответ зависит от относительных движений галактик. Движения, как известно, разрушают линейное расположение галактик за сравнительно короткий срок, вероятно меньше, чем за миллиард лет. Наличие таких цепочек указывает, что составляющие

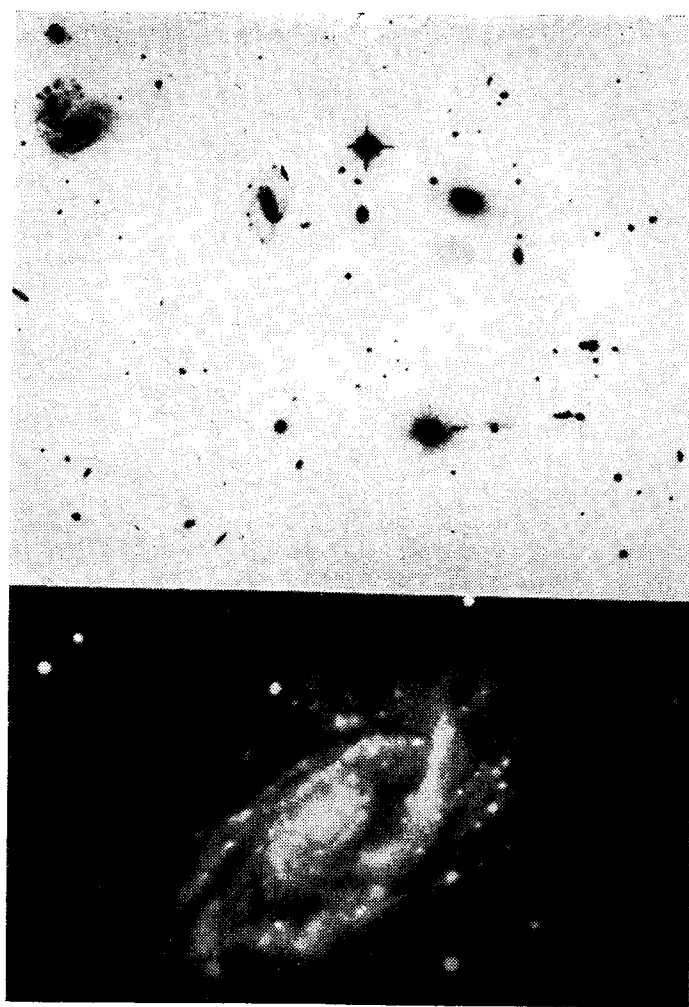


Фото XIX. Галактики с искаженными формами.

их галактики в космическом масштабе времени образовались очень недавно.

Далее, отдельные необычные галактики обнаруживают очень странные свойства. Посмотрите на фото XIV. Что это: образование новой галактики или целая галактика, разнесенная на куски каким-то фантастическим взрывом? М. Бербидж, получившая фотографии XII—XIX, придерживается первого объяснения, тогда как Сэндейдж — второго. Типичная группа галактик содержит примерно два десятка членов во главе с яркой эллиптической галактикой. Такие эллиптические галактики явно должны играть решающую роль в развитии групп галактик, и событие, подобное запечатленному на фото XIV, может быть ключом к тому, в какой форме проявляется их воздействие.

Перейдем теперь к струйным структурам. В галактиках иногда можно наблюдать струйки, исходящие из галактик в межгалактическое пространство. Примеры их показаны на фото XV—XVII. Каковы источники света, испускаемого этими слабыми струйками? Возможно, что это звезды, но с уверенностью мы этого не знаем. Очевидно, что между галактиками и окружающей их средой продолжается какое-то взаимодействие.

В связи с этими необычными явлениями необходимо подчеркнуть два обстоятельства. Во-первых, все объекты, о которых идет речь, это не маленькие, незначительные галактики, напротив, размеры их велики. Во-вторых, эти явления во многих случаях длятся довольно короткое время, и тот факт, что мы все же видим такие системы, указывает на то, что они не могут быть редкими.

Взгляните, наконец, на фото XVIII и XIX, и вы увидите настоящие чудеса.

2. Источники радиоизлучения

Когда в 1932 г. Янский впервые обнаружил космические радиоволны, не могло возникнуть и мысли о той удивительной ситуации, к которой это открытие приведет примерно через 30 лет. Даже в 40-х годах, когда новая наука, радиоастрономия, постепенно набирала силу, все думали лишь о простейших процессах излучения, возникающего в горячих облаках газа, расположенных в плоскости нашей Галактики (более точно, в результате свободно-свободных переходов в таком газе). Правда, излучение казалось слишком сильным для этого процесса, и было высказано много догадок относительно причин расхождения между расчетом и наблюдениями, но, я думаю, можно честно признаться, что никто не имел ни малейших подозрений, к чему это открытие приведет в ближайшие годы.

Пожалуй, крупнейшее после Янского открытие в радиоастрономии сделали Хей, Парсонс и Филлипс. Они обнаружили удивительно мощное радиоизлучение из небольшого участка неба в созвездии Лебедя. Это был первый дискретный источник радиоизлучения. За ним скоро последовали и другие. В наши дни составлены каталоги положений более тысячи таких источников. В конце концов, такие каталоги, вероятно, станут сравнимы с Каталогом звезд Генри Дрэпера, содержащим несколько сотен тысяч звезд.

Даже по сей день всего лишь сотня радионисточников уверенно отождествлена с оптически наблюдаемыми объектами. Первое отождествление было сделано Болтоном, который обнаружил, что положение на небе одного из недавно открытых источников радиоизлучения совпадает с Крабовидной туманностью (фото XX).



Фото XX. Крабовидная туманность в Тельце NGC 252 (M 1).
Остаток сверхновой 1054 г. н. э. Фотография в красных лучах
на 5-метровом телескопе.

Когда было обнаружено около 100 источников (пока еще ни с чем не отождествленных!), выяснилось, что эти источники не распределены по небу равномерно. По-моему, Миллс первый указал на то, что источники можно разделить на два класса. Источники первого класса сильно концентрируются к галактической плоскости, а остальные распределены по небу равномерно. Очевидно, что первый класс связан с Галактикой. Но из чего состоит второй, изотропный класс? Существовало две возможности. Изотропность означает либо что источники — это исключительно местное явление, по размерам много меньшее Галактики; либо что они очень далеки и по размерам гораздо

больше Галактики. Общее мнение склонялось в пользу местной интерпретации, и именно тогда для этих источников радиоизлучения было введено ошибочное название «радиозвезды».

Первое указание на ошибку появилось, когда Болтон отождествил один из источников с галактикой М 87 — большой галактикой типа Е0, о которой я рассказывал в предыдущей главе (см. фото II). Хэнбери Браун и Хазард обнаружили радиоволны от туманности Андромеды (см. фото I), и стало ясно, что по крайней мере часть изотропных источников должна быть внегалактического происхождения. Однако трудно было понять, каким образом все они могут быть внегалактическими. Их было слишком много, чтобы их можно было отождествить со слабо излучающими галактиками, подобными М 31, хотя трудности уменьшались, если предполагать, что все источники похожи на М 87, которая излучает гораздо сильнее, чем М 31. Т. Голд приводил доводы в пользу того, что изотропная составляющая имеет внегалактическое происхождение. Он высказывал мысль, что отдельные галактики могут излучать гораздо больше, чем другие. Но 15 лет назад такая точка зрения не была популярной. В то время позиции удерживали «радиозвезды». Я не заходил так далеко, как Голд, хотя и склонялся к внегалактической гипотезе, потому что, как я тогда указывал, было по меньшей мере полдюжины уверенных отождествлений с галактиками, а со звездами — ни одного.

Переворот произошел после оптического отождествления первого обнаруженного источника Лебедь А. Грэхем Смит в Кембридже впервые определил точное положение этого радиоисточника и переслал свои результаты Вальтеру Бааде на обсерваторию Маунт Вилсон и Паломар. Бааде тотчас же произвел ныне знаменитое отождествление этого радиоисточника с удаленным на полмиллиарда световых лет объектом, который выглядел как пара сталкивающихся галактик. Поразительным было то, что в виде радиоволн излучалось столько же энергии, сколько в форме видимого света. Минковский нашел, что значительная часть оптического излучения сосредоточена в эмиссионных линиях, в частности в линии O II 3727 Å и дуб-

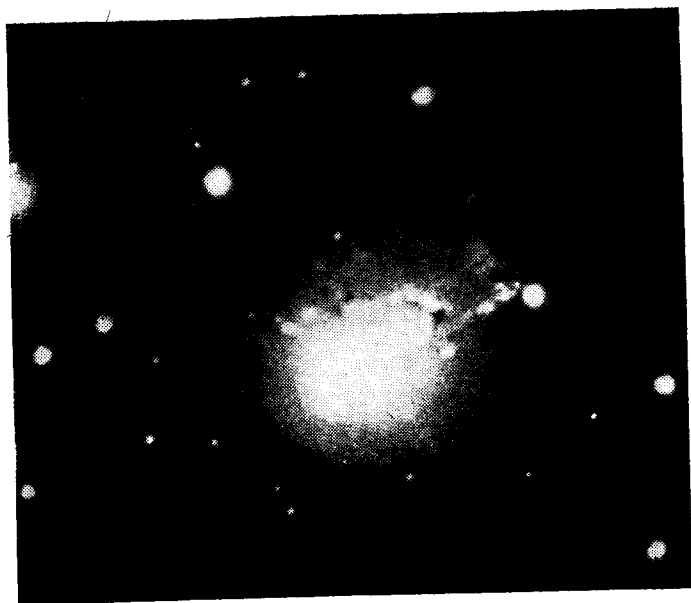


Фото XXI. Источник радиоизлучения в скоплении галактик в Персее. Фотография получена на 5-метровом телескопе.

лете O III 4959 и 5007 Å. Он нашел также линии еще более «ободранных» атомов, например Ne V, указывающие на то, что система содержит огромное количество весьма горячего газа. В то время полагали, что нагревание вызвано столкновением двух наблюдаемых галактик. Последующие отождествления радиоисточников, в частности с галактиками NGC 5128 в Центавре и NGC 1275 в Персее (см. фото X и XXI), казалось, тоже свидетельствовали в пользу гипотезы столкновения. Оба этих объекта считались местами столкновений эллиптических галактик со спиральными. В случае NGC 1275 Минковский нашел, что газ с огромной скоростью, до 3000 км/сек, движется относительно звездного фона, принадлежащего к эллиптической галактике. Это казалось прямым подтверждением мысли о столкновении с большой скоростью.

Какой процесс мог заставить галактику или пару галактик излучать такое фантастическое количество

энергии в виде радиоволн? Учеными США и Западной Европы в течение нескольких лет владела мысль, что энергия должна возникать из-за столкновения и что наиболее вероятным процессом являются плазменные колебания в горячем газе. Альвен и Герлофсон еще в 1950 г. пришли к правильной мысли, что излучение возникает при движении электронов очень высоких энергий в магнитном поле. Они применили результаты Швингера, который рассчитал подобный же процесс, происходящий в лаборатории в синхротроне; так возникло получившее широкое распространение название «синхротронное излучение». Однако Альвен и Герлофсон применили результаты Швингера к звездам, а не к галактикам. Первыми к мысли о применимости синхротронного механизма к галактикам пришли советские ученые И. С. Шкловский и В. Л. Гинзбург.

Отдавая должное Хатчинсону, ныне работающему в Саутгемптонском университете в Англии, я должен заметить, что он высказывал ту же идею даже до 1950 г., в бытность свою студентом Кавендишской лаборатории Кембриджского университета. Он довольно подробно разработал эту идею в диссертации, представленной на соискание конкурсной должности в мой родной Кембриджский колледж. Но недоверие к идее было столь велико, что он потерпел поражение. Я рад возможности заявить, что не был официальным рецензентом, хотя, насколько я помню, сделал замечание, что идея выглядит обещающей. Но это был слишком равнодушный отзыв, чтобы повлиять на решение. К несчастью, Хатчинсон был обескуражен этим и, насколько я знаю, до сих пор не опубликовал своей работы.

К большому огорчению, история науки изобилует подобными случаями, когда молодых людей отговаривали от публикации хороших идей, которые впоследствии оказывались правильными. Какой совет подать, какой рецепт можно предложить, чтобы предотвратить такие случаи? Вспомните плачевный пример Адамса и открытия Нептуна! Когда новость о том, что Галле открыл Нептун, как мы сейчас сказали бы, попала на первые полосы газет, у Адамса не было опубликовано ничего, на что он мог бы сослаться; не было даже письма в газету, адресованного неспециалистам! История была добра к Адамсу, признав его равенство

с Леверье в деле о Нептуне. Если бы Англия в то время не была господствующей политической силой, я сомневаюсь, хотя вам это и может показаться излишне циничным, чтобы Адамсу поверили хоть в малейшей степени. Но возвращаюсь к своему вопросу: что должен делать молодой человек, когда ему говорят, что идея, которую он очень ценит, ошибочна, когда ему говорят это старшие, более опытные люди, к которым он относится с большим уважением? Я думаю, что лучший совет, который здесь можно подать, это придерживаться правила: «публикуй, но коротко». Одной странички вполне достаточно; это изменило бы историю Адамса.

Электроны, ответственные за синхротронное излучение, должны иметь очень высокие энергии, превышающие 1 Гэв^* . В конце 50-х годов возник вопрос, каким образом электроны могут приобрести столь большие энергии, а также какова полная энергия всех электронов, необходимая для создания наблюдаемой интенсивности излучения? В результате первых же расчетов Бербиджа выяснилась поразительная ситуация. Требуемая полная энергия в ряде случаев была сравнима с энергией столкновения двух галактик. Так теоретики оказались лицом к лицу с фантастической проблемой: объяснить, каким образом энергия столкновения может превратиться с эффективностью почти 100% в энергию электронов, сравнимую с их энергией в космических лучах. В лучших лабораторных ускорителях эффективность составляет всего 1%. Каким образом в более или менее хаотических условиях межзвездного пространства эффективность может быть гораздо большей, чем в контролируемом лабораторном устройстве?

Эта дилемма была разрешена по крайней мере частично, когда стало понятно, что столкновение здесь не при чем. Супруги Бербидж измерили движения облаков газа в NGC 5128 (см. фото X) и нашли, что скорости облаков относительно звездного фона слишком

* Согласно общепринятой международной номенклатуре, единица энергии, равная миллиарду (10^9) электронвольт, называется гигаэлектронвольт и обозначается *Гэв*. В Англии и США ее иногда обозначают *Бэв*. — *Прим. ред.*



Фото XXII. Источник радиоизлучения Лебедь А. Фотография получена на 5-метровом телескопе.

малы, чтобы можно было говорить о столкновении двух галактик. А теперь представим себе, как бы выглядела NGC 5128, если бы она не была близка к нам, а наблюдалась с расстояния в полмиллиарда световых лет, как радиоисточник в Лебеде. Полоса пыли уже не была бы отчетливо видна, и мы считали бы, что это две приближающиеся друг к другу и сталкивающиеся галактики. Таково весьма вероятное объяснение видимой двойственности источника в Лебеде, показанного на фото XXII.

Смертельный удар гипотезе столкновения был нанесен последующими отождествлениями, сделанными за последние 2—3 года Мэтьюзом и Шмидтом в Калифорнийском технологическом институте. Большинство радиоисточников оказалось явно связанными с одиночными галактиками. Примеры этого приведены на фото XXIII и XXIV. Выяснилось, что во многих случаях двойными являются только радиоисточники, а не связанные с ними оптические галактики. Спектры обладают теми же свойствами, что и спектр источника в Лебеде, уже описанный мною: на непрерывный спектр накладываются сильные эмиссионные линии,

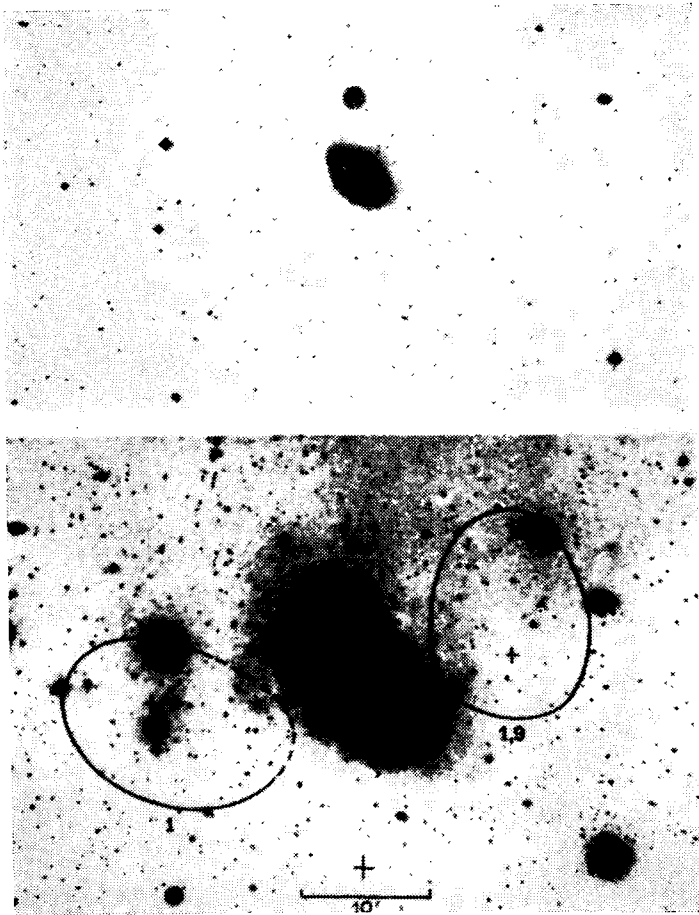


Фото XXIII. Радиогалактика Печь А. Расположенный поблизости источник радиоизлучения сфотографирован с короткой и длинной экспозициями. Сильно искаженная галактика простирается в области сильного радиоизлучения, отмеченные кривыми неправильной формы на нижней фотографии. Многие источники радиоизлучения имеют такую двойную структуру, и размеры их достигают полумиллиона световых лет.

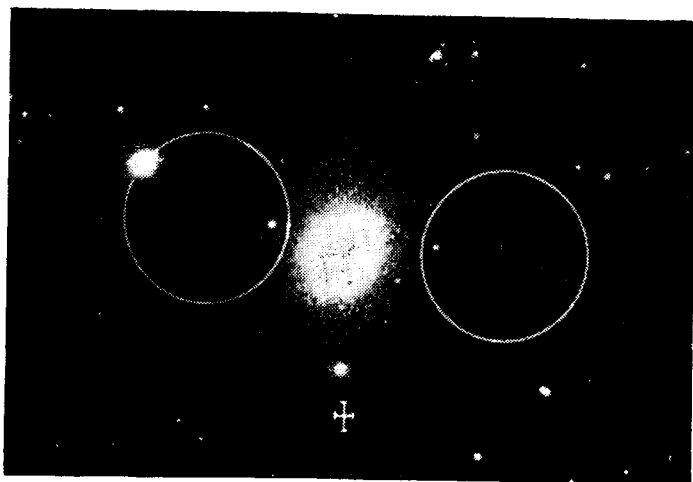


Фото XXIV. Галактика с двумя симметрично расположенными областями радиоизлучения; их расположение наводит на мысль о связи их возникновения с галактикой. По-видимому, происходит испускание частиц высокой энергии в противоположных направлениях.

особенно линия $O II 3727 \text{ \AA}$ и дублет $O II 4959-5007 \text{ \AA}$. Примеры таких спектров, полученных М. Шмидтом, показаны на фото XXV. Спектры эти столь характерны для радиоисточников, что галактика с таким спектром наверняка должна оказаться источником радиоизлучения. Однако поскольку получение спектров слабых объектов — долгая и утомительная работа, искать радиоисточники таким способом затруднительно. Сначала должны быть получены сведения о радиоизлучении. Для «оптического» астронома такие данные играют роль хорошей охотничьей собаки. На фото XXVI показан источник 3С 295 (источник № 295 по 3-му Кембриджскому каталогу), который, как считается, удален от нас на расстояние примерно 5 миллиардов световых лет. Эта галактика находится на пределе обнаружимости даже для 5-метрового телескопа. Минковский нашел в ее спектре яркую эмиссионную линию, которую он считает линией 3727 \AA , сдвинутой на 46% от своего обычного положения кос

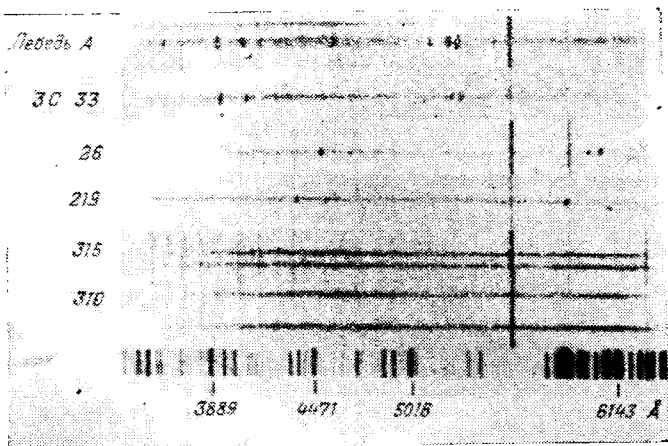


Фото XXV. Спектры галактик, связанных с радиогалактиками. На фоне непрерывного спектра выделяются эмиссионные линии, среди которых наиболее сильны линии O II 3727 Å, H β и дублет O III. Линии наблюдаются при других длинах волн из-за космологического красного смещения.

мологическим красным смещением. Это самая далекая измеренная галактика.

Есть ли что-либо общее у всех галактик, связанных с мощными источниками радиоизлучения? Уже в течение нескольких лет известно, что такие галактики необычайно ярки, но недавно в результате работ Сэндейджа выяснилось, что они достигают верхнего предела светимости, о котором я говорил в предыдущей главе. Это самые яркие и массивные из всех галактик; они имеют практически сферическую форму и относятся к типу E0. Довольно часто у этих галактик наблюдаются гигантские полосы пыли, совершенно несвойственные обычным эллиптическим галактикам. Очевидно, пыль как-то связана с процессами, приводящими к возникновению радиоизлучения этих галактик.

По-видимому, радиоизлучение исходит из самого центра галактики. Явление это, какова бы ни была его природа, бывает разной мощности. Из ядер отдельных галактик заметно истечение вещества с небольшой скоростью: от одной до ста солнечных масс в год. Вещество истекает из центра нашей Галактики, из

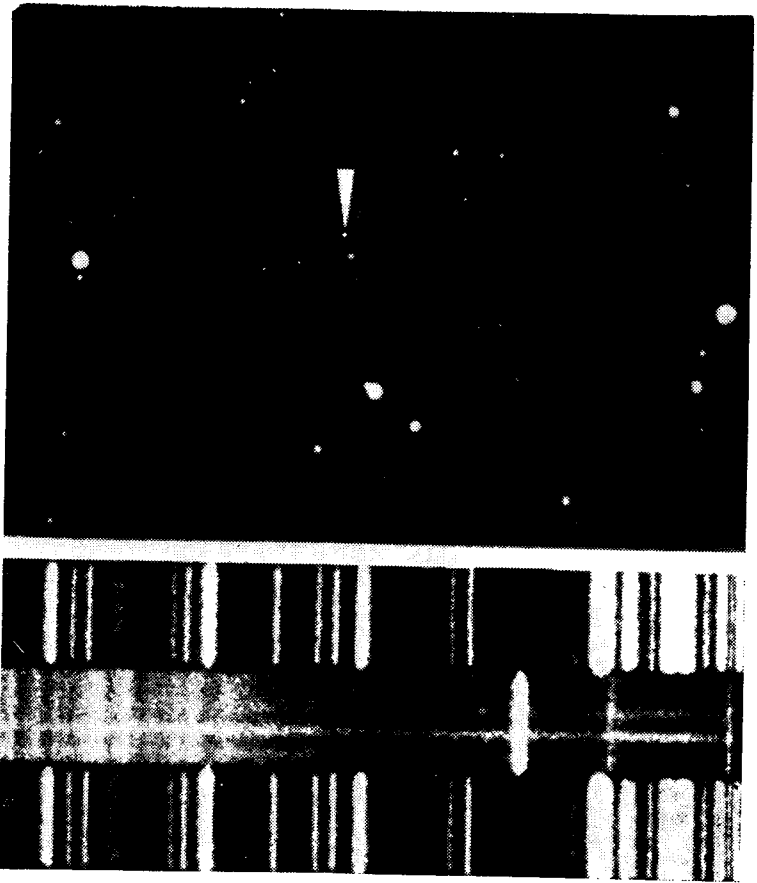


Фото XXVI. Наиболее удаленная галактика 3С 295 в Волонесе, изученная в 1960 г. при помощи 5-метрового телескопа. Этот объект — источник космического радионизлучения.

центра М 31 и хорошо известной галактики М 51 (см. фото VIII). Более мощное истечение, со скоростями около 500 км/сек, происходит из ядер особого класса спиралей Sc — сейфертовских галактик, названных по имени Сейферта, который первым выделил этот класс. Пожалуй, наиболее примечателен случай истечения из ядра туманности М 82, которая считается спиральной галактикой. Она недавно была подробно изучена Линдсом и Сэндейджем. На фото XXVII вы видите снимок этой галактики в обычном свете. Она интересна в двух отношениях: очень запылена и звезды в ней не разрешаются. Звезды, вероятно, скрыты пылью, но удивительно, что они не разрешаются даже во внешних областях. На фото XXVIII видна та же галактика, но это уже результат наложения нескольких пластинок, полученных в синих лучах. Здесь ясно видны потоки газа, выходящего по направлениям полярной оси. Очевидно, что они вызваны громадным взрывом, охватившим массу вещества по меньшей мере в миллион солнечных масс.

Галактика М 82 — слабый источник радиоизлучения. Она имеет неяркие петлеобразные выступы, заметные на снимках в непрерывном спектре; как показали Линдс и Сэндейдж, их излучение также поляризовано.

Это свидетельствует о том, что свет образуется посредством того же самого синхротронного механизма, что и радиоволны. Частота электромагнитного излучения, испускаемого при этом процессе, пропорциональна напряженности магнитного поля и квадрату энергии электрона. Следовательно, для излучения видимого света требуются либо значительно более высокие энергии электронов, чем для радиоволн, либо значительно более сильные поля. Обычно считают более правдоподобным наличие высокоэнергичных электронов с энергиями порядка 10^3 — 10^4 Гэв, а не очень сильных магнитных полей, которые понадобились бы в противном случае.

Наиболее примечательный случай поляризации света обнаружен у струи, выходящей из центра галактики М 87 (см. фото III). Это еще один пример процесса синхротронного излучения, и именно он укрепил синхротронную теорию. Шкловский предсказал, что

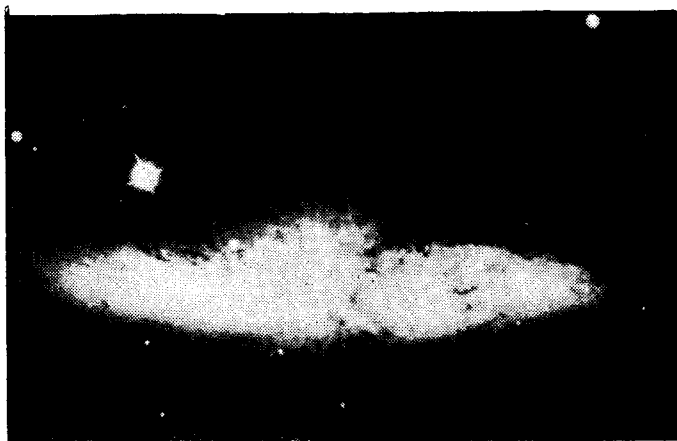


Фото XXVII. Фотография М 82, полученная в общих лучах.

излучение должно быть поляризованным, а Бааде подтвердил, что это именно так. Согласно синхротронной теории, поляризация должна наблюдаться также и в диапазоне радиоволн, но она оставалась необнаруженной в течение нескольких лет из-за одного неблагоприятного обстоятельства. Оказывается, что поляризация радиоволн действительно существует, но она исчезает у источников, лежащих в плоскости Галактики. Знаменитый источник в Лебеде, наиболее мощный из всех внегалактических источников, лежит как раз в галактической плоскости. Естественно было сначала заняться этим источником просто потому, что он такой мощный. Когда поляризация у этого источника найдена не была, наблюдатели были обескуражены. Если уж поляризацию не удалось обнаружить у самого мощного источника, то казалось маловероятным найти ее у более слабых источников. Так обстояло дело, пока не вступил в строй новый большой радиотелескоп в Парксе (Австралия) и стало возможным проводить систематические измерения поляризации. Радиоволны действительно оказались поляризованными, правда не в такой степени, как видимый свет, но все же поляризованными, как это и предсказывала теория.

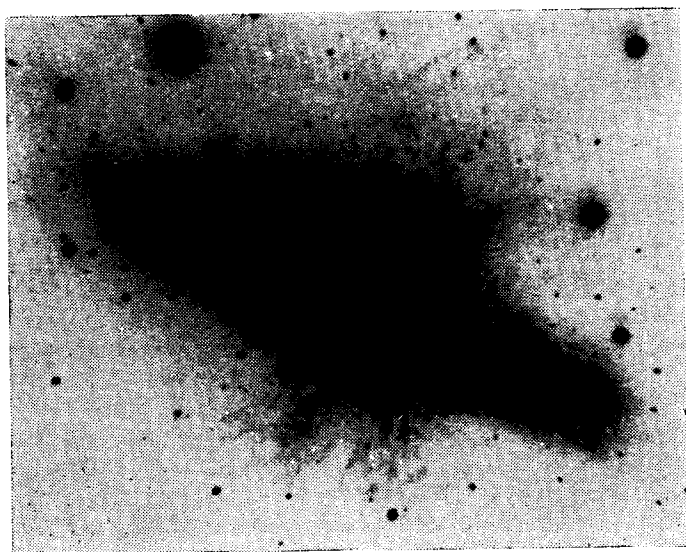


Фото XXVIII. Наложение трех негативов М 82, полученных в синих лучах. Заметны петлеобразные выступы.

Болтон, чье имя я уже упоминал в связи с отождествлением дискретных источников с Крабовидной туманностью и М 87 и который построил радиотелескоп в Калифорнийском технологическом институте, во время этих измерений руководил работой на австралийском инструменте. Он недавно сказал мне, что где бы он ни устанавливал какое-либо дорогостоящее оборудование, он любит всегда оправдывать затраченные деньги, по крайней мере перед собой, полученными на этом оборудовании результатами. Он считает, что открытие поляризации радиоизлучения, со всеми вытекающими отсюда последствиями, стоит примерно полмиллиона долларов — около $\frac{1}{3}$ стоимости телескопа. Ему представилась также счастливая возможность еще раз расплатиться за затраты проведенной в Парксе работой, которая привела к открытию квазизвездных источников радиоизлучения, или *кварзаров*. Этим открытием я и буду заниматься до конца настоящей главы.

История кварзаров началась с проводимой радиообсерваторией Джодрелл Бэнк (Англия) программы

измерений угловых размеров радиисточников, т. е. определения размеров на небе области, занимаемой радиисточником. При первом обзоре было исследовано около 300 источников. Было найдено, что их средний размер около 30". Многие источники были кратными, часто двойными, и индивидуальные размеры были гораздо меньше. Размеры всех источников лежали между 5" и несколькими минутами дуги, за исключением примерно десятка объектов, которые имели размер 1" дуги или даже еще меньше. Другими словами, выяснилось, что существует тип источников необычно малых размеров, и это, естественно, вызвало всеобщий интерес. Сначала считали, что это звездopodobные объекты, расположенные в нашей Галактике, и эта точка зрения продержалась до конца 1962 г. К этому времени Сэндейдж обнаружил, что один из этих объектов, ЗС 48, имеет чрезвычайно странный спектр, а Сэндейдж и Мэтьюз нашли, что световое излучение ЗС 48 переменное. Казалось, что это окончательно указывает на небольшой компактный объект звездной природы.

Тем временем к этой проблеме подошли с двух сторон. Прежде всего было ясно, что здесь приходится говорить о чем-то большем, нежели взрыв одиночной звезды. Шкловский предположил, что здесь мы наблюдаем одновременно большое число вспышек сверхновых, но почему же тогда в нашей Галактике сверхновых так мало? Бербидж выдвинул гипотезу о цепной реакции взрывов многих звезд, но чем может быть вызвана такая тесная связь между звездами? Летом 1962 г. Фаулер и я пришли к мысли собрать все звезды вместе в одно сверхтело, по массе в миллионы раз превышающее Солнце. Сейчас, двумя годами позже, эта мысль кажется вполне очевидной, но у астрономов выработался психологический барьер, из-за которого не допускалась даже возможность существования звездopodobных тел с массой больше 50 масс Солнца. Необходимо было сломать этот барьер. Однако вскоре возникли трудности. Наши массивные объекты в определенных обстоятельствах должны были быть ярче, чем целая галактика, и поначалу это казалось по меньшей мере весьма неприятным.

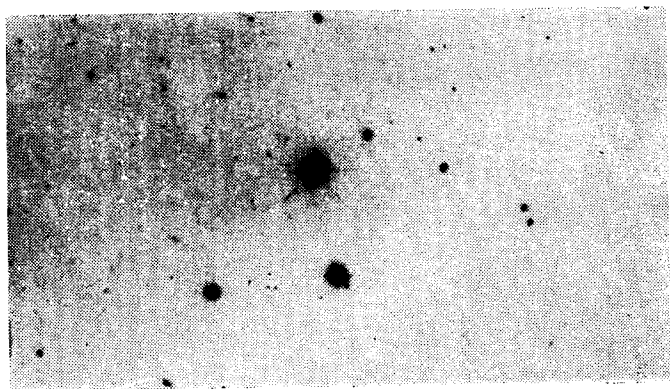


Фото XXIX. Самый яркий объект на этой фотографии, ЗС 273, расположен чуть левее центра. Из звездopodobного объекта влево вниз выходит слабая струя.

Совсем с другой стороны подошел к этому вопросу Хазард, предложивший следующую идею определения положений радиисточников. Иногда Луна, двигаясь по небу, проходит перед радиисточником и закрывает его. Поскольку мы более или менее точно знаем, где в данный момент находится Луна, все, что остается сделать, — это точно отметить моменты, когда источник исчезает за лунным диском и потом появляется вновь. Работая сначала на Джодрелл Бэнк над источником ЗС 212, Хазард определил его положение с точностью до 2—3", что было беспрецедентным достижением. Затем, переехав в Австралию и работая совместно с Макки и Шимминсом, он проделал подобное же определение для источника ЗС 273. При наблюдениях они предприняли невероятные меры предосторожности. Упоминание о них может оказаться небезынтересным. С телескопа было снято несколько тонн металла, чтобы сделать возможными наблюдения при меньших углах возвышения, чем обычный рабочий диапазон. За несколько часов до момента покрытия источника Лунной все местные широкоэвещательные радиостанции повторяли призыв: никто не должен включать радиопередатчики во время периода наблюдений. Все дороги, проходящие вблизи телескопа, патрулировались,

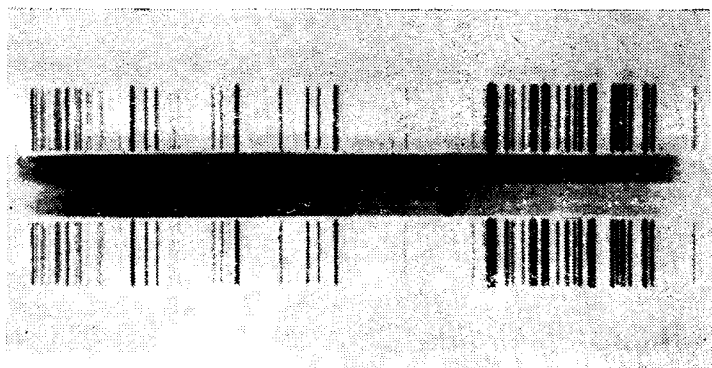


Фото ХХХ. Спектр ЗС 273. Самая сильная линия — $H\beta$. Слева от $H\beta$ чуть видны слабые линии $H\gamma$, $H\delta$. Слабая линия $O III$ находится справа от $H\beta$.

чтобы быть уверенным, что по соседству нет движущихся автомобилей. И последний штрих: после наблюдений Хазард и Болтон отвезли два дубликата записей в Сидней на отдельных самолетах.

Предосторожности стоили потраченных усилий: ЗС 273 оказался двойным источником, с двумя очень маленькими компонентами, удаленными друг от друга примерно на $20''$. Положение компонент было определено с точностью до $1''$. На фото ХХIX показана соответствующая область неба. Одна из компонент попадает на обычную, на первый взгляд, звезду 13-й величины. Однако при внимательном рассмотрении обнаруживается, что из «звезды» выходит слабая струя, простирающаяся на $20''$. На конце этой струи расположен второй из двух компонент радиоисточника.

Ясно, что следующий шаг должен был состоять в получении спектра предполагаемой звезды. На фото ХХХ приведен полученный Шмидтом спектр, в котором можно различить четыре линии. Что же это за линии? Они оказались, если идти справа налево, одной из линий дублета $O III$, расположенной у 5007 \AA , и линиями $H\beta$, $H\gamma$ и $H\delta$. Но все четыре линии смещены в красную сторону на 16%. Если красное смещение рассматривать как космологическое, то звезда 13-й видимой величины — это вообще не звезда, а

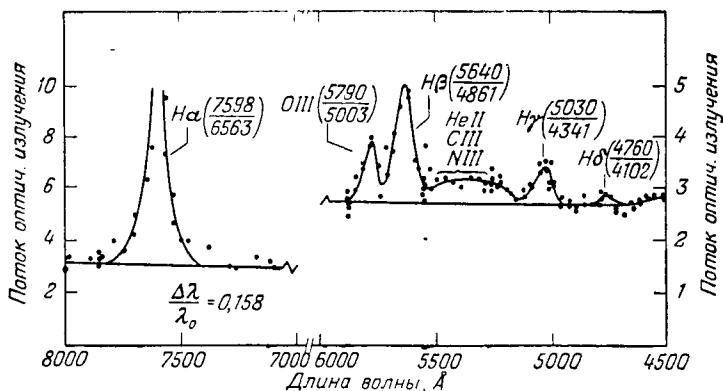


Рис. 2. 3C 273 имеет спектр, особенно удобный для интерпретации, так как в нем видны линии серии Бальмера H α , H β , H γ и H δ .

объект, в сотни раз более яркий, чем ярчайшие галактики. Очевидно, что, прежде чем прийти к такому фантастическому выводу, нужна была огромная осторожность. Во-первых, если красное смещение — это действительно красное смещение, то можно предсказать, где должна находиться линия H α . Ее действительно обнаружил Оук при помощи сканирующего спектрометра. На рис. 2 вы видите результаты, которые получил Оук для различных линий. Подлинность красного смещения не вызывает сомнений.

Далее, не может ли красное смещение быть вызвано чем-либо иным, в частности не может ли оно быть гравитационным? Тот факт, что в спектре присутствует линия O III, означает, что сверхплотная звезда, подобная белому карлику или нейтронной звезде, здесь не при чем. Плотность газа у поверхности такой звезды была бы слишком высока, чтобы могла появиться эта «запрещенная» линия. Если бы смещение было гравитационным, то для этого был бы необходим высокий гравитационный потенциал, но малое ускорение силы тяжести. Гринстейн и Шмидт при помощи изящных рассуждений такого рода пришли к выводу, что если бы найденное смещение было гравитационным, то объект должен был быть еще более удивительным по

своей природе, чем если оно космологическое. Следовательно, представляется весьма вероятным, что мы имеем дело с объектом значительно более ярким, чем целая галактика.

Сразу же стало понятно, что источник ЗС 48 с его странным спектром должен быть объектом того же рода. Как вы помните, было обнаружено, что блеск ЗС 48 меняется. Казалось абсурдным, что свет от чего-то более яркого, чем целая галактика, может заметно меняться за один год. Смит и Хоффлейт попробовали посмотреть гарвардскую фототеку. Поскольку ЗС 273 связан со сравнительно ярким объектом, он фотографировался до этого многократно. В фототеке было найдено множество пластинок, полученных почти за сто лет. При их анализе выявились колебания блеска. Конечно, некоторые неточности вызваны неоднородностью фотографических материалов, изготовленных в разное время, но ошибки едва ли могут сравниться по величине с обнаруженными изменениями. По-видимому, сейчас нет сомнений, что блеск ЗС 273 изменяется за несколько лет примерно на 50%. Это означает, что наш звездоподобный объект по размерам не может быть больше нескольких световых лет. Очевидно, мы имеем дело с компактным объектом, выделяющим энергию в масштабах, значительно больших, чем излучение энергии Солнцем. Ясно, что это не обычная звезда, и трудно — я думаю, невозможно — избежать вывода, что масса этого объекта превышает солнечную в миллион, а возможно, и в 100 миллионов раз.

В заключение этой главы я хотел бы вернуться к вопросу о «выходе» энергии и ее ресурсах. Хотя сейчас мы гораздо ближе к пониманию энергетических потребностей радиоисточников, кажется сомнительным, может ли привычная ядерная энергия (превращение водорода в гелий) обеспечить достаточный энергетический выход. Минимальная энергия, необходимая для наиболее мощных источников, порядка 10^{60} эрг. Это требование минимально по трем причинам: распределение энергии между электронами и магнитным полем принято оптимальным, считая, что энергия протонов и положительных ионов пренебрежимо мала и что 100% энергии источника превращается в энергию сверхбыстрых электронов. Вполне

умеренное снижение первого фактора в 10 раз увеличивает необходимую энергию до 10^{61} эрг. Если же мы примем такую же эффективность превращения энергии, какую можно достичь в лучших лабораторных ускорителях, то потребная энергия увеличится еще в 100 раз. Третий фактор также потребует десятикратного увеличения, если соотношение между электронами и протонами принять таким же, как в космических лучах. В итоге необходимая полная энергия достигнет фантастической величины 10^{64} эрг. Это сравнимо с выходом энергии при превращении в гелий целой галактики, состоящей из водорода, что даст 10^{63} эрг. Однако крайне невероятно, чтобы масса, равная целой галактике, была сконцентрирована в крохотном объеме в центрах галактик, даже в центральных областях крупных галактик E0.

Эти соображения привели Фаулера и меня к предположению, что источник энергии может быть не ядерным, а гравитационным. Тяготение способно выделить примерно в 100 раз больше энергии на единицу массы, чем ядерная энергия, так что необходимая масса может быть сокращена в 10^2 раз, примерно до $10^9 M_{\odot}$. Это уже совместимо с представлением о массе, которая может находиться в центре галактики типа E0. Центральные ядра спиральных галактик составляют, по-видимому, $10^7 M_{\odot}$, так что более слабые взрывные явления в спиральных вполне могут быть связаны с меньшими концентрациями масс*.

Необходимо подчеркнуть, что эти энергетические оценки относятся лишь к энергии, необходимой для объяснения радиоизлучения. Энергия, необходимая для видимого излучения квазаров, существенно меньше и может быть легко объяснена высвобождением ядерной энергии. Весьма вероятно, что оптическое излучение — это, так сказать, ядерный огонь, а высокоэнергичные электроны — гравитационный.

В этой области предстоит сделать еще много. Не известно, в частности, каким путем энергия тяготения превращается в энергию частиц? Как возникли эти огромные концентрации масс? Сейчас здесь

* M_{\odot} обозначает массу Солнца, так что $10^9 M_{\odot}$ — это величина, в 10^9 раз большая массы Солнца.

выдвигается множество предположений. В последних главах я расскажу о некоторых новейших работах. Возможно, что мы наконец-то получили ключ к связи между космологией и астрономией. Квазары выглядят так, как, согласно некоторым космологическим теориям, выглядела наша вселенная при ее возникновении. Последние десять лет существовали так называемая теория «большого взрыва», по которой вся вселенная возникла одновременно, и теория стационарной вселенной, по которой образование нуклонов спокойно происходит все время. Возможно, истина лежит где-то посередине. Возможно, наличие квазаров свидетельствует, что во вселенной вместо одного большого взрыва происходит множество маленьких. Тем не менее эти маленькие взрывы гораздо мощнее, чем спокойные процессы теории стационарной вселенной.

3. Рентгеновское излучение, гамма-излучение и космические лучи

Ныне для исследования вселенной начали применяться совершенно новые методы. В этом отношении радиоастрономия уже не является единственной. Теперь, когда мы поняли, что космические радиоволны в значительной степени вызваны высокоэнергичными электронами, радиоастрономия оказалась тесно связанной с изучением космических лучей. На самом деле, первичное явление — это, по-видимому, космические лучи. Излучение радиоволн — это вторичный, побочный результат происходящих в космическом пространстве удивительных процессов, связанных с гигантской энергией. Разгадать их — цель астрономии космических лучей. В этой области появились и другие новинки: рентгеновская и гамма-астрономия. Поговаривают даже о нейтринной астрономии, и первые опыты в этом направлении уже поставлены. В этой главе я попытаюсь рассказать, какой свет эти новые дисциплины проливают на проблемы астрономии, как они помогают более традиционным методам астрономических исследований и дополняют их.

Космические лучи в основном состоят из протонов. На 1 ядро гелия приходится около 10 протонов, и около 10 ядер гелия приходится на 1 более тяжелое ядро. Среди тяжелых ядер примерно 1 из 20 принадлежит к группе железа, т. е. к группе металлов, расположенных по соседству с железом, с атомными весами от 50 до 60. Это уже странно, ибо в обычном веществе звезд ядра группы железа гораздо менее распространены: в Солнце одно ядро железа приходится на сто тысяч протонов. В обычной астрофизике неизвестно вещество с таким же химическим составом, как у космических лучей. Это прискорбно, ибо будь такое вещество

известно, у нас в руках был бы ключ к тайне возникновения космических лучей.

Кое-какие предположения в этом направлении уже высказаны. В последней главе я опишу, как тяжелые ядра образуются из легких в результате происходящих в звездах процессов. Считается, что ядра группы железа синтезируются внутри таких звезд, которые становятся сверхновыми, так что космические лучи, возможно, обязаны своим возникновением мощным взрывам сверхновых. Имеются серьезные свидетельства в пользу того, что высокоэнергичные частицы в сверхновых действительно образуются, ибо все сверхновые, по-видимому, превращаются в источники радиоизлучения. Наиболее тщательно исследованным случаем является Крабовидная туманность (см. фото XX).

Кроме того, гораздо более продуктивными поставщиками космических лучей должны быть гигантские источники радиоизлучения: радиогалактики и квазары. Один мощный радиисточник эквивалентен более 10^{10} сверхновых. Возникает проблема, какая часть космических лучей, наблюдаемых в окрестностях Земли, приходит от близких сверхновых в нашей собственной Галактике. Ответ зависит от двух обстоятельств. Во-первых, в какой мере даже сильные источники могли бы привести к установлению наблюдаемой интенсивности во всем пространстве вселенной и, во-вторых, ограничены или нет космические лучи лишь пределами нашей Галактики. Давайте начнем со второго вопроса.

Само существование тяжелых ядер в космических лучах дает нам интересную информацию. Тяжелое ядро, скажем ядро железа, мчащееся со скоростью, близкой к скорости света, легко дробится. Если оно проходит через газ, даже такой разреженный, как межзвездный газ в плоскости Галактики, то через какое-то время оно обязательно столкнется с ядром газа и разобьется на осколки. Таким образом, само присутствие тяжелых ядер в космических лучах непосредственно свидетельствует о том, что эти ядра не могли находиться близ плоскости Млечного Пути дольше определенного промежутка времени. Это время можно рассчитать. Оказывается, что максимальное время составляет всего около миллиона лет. Воспользовавшись этим, можно построить такую сравнительно

простую теорию: космические лучи близ плоскости Галактики находятся в стационарном состоянии, при котором новообразующиеся космические лучи от сверхновых возмещают постоянную утечку лучей в межгалактическое пространство. Среднее время жизни космической частицы (до ее ускользания) порядка миллиона лет.

Эта простая теория сталкивается с тремя возражениями. С двумя из них она еще может справиться, но третье, по-моему, для нее смертельно. Полная энергия космических лучей в галактическом диске $\sim 10^{54}$ эрг. Эта энергия должна возобновляться каждый миллион лет. Но за миллион лет вспыхивает не более нескольких десятков тысяч сверхновых, поэтому каждая сверхновая должна выделять $\sim 10^{50}$ эрг в форме космических лучей. Это довольно большая, но не невозможная величина. Далее, согласно нарисованной нами картине, частиц, движущихся параллельно плоскости Галактики, должно быть несколько больше, чем движущихся в направлении, перпендикулярном этой плоскости: в движениях частиц должна существовать определенная анизотропия. Такой анизотропии экспериментально не обнаружено. Но эксперименты, конечно, не обладают идеальной точностью, и остается возможность, что ожидаемая степень анизотропии может быть столь мала, что осталась незамеченной. Расчеты показывают, что, возможно, так оно и есть, хотя рамки, в которых теория еще может существовать, неприятно узки. Третье затруднение состоит в том, что космические лучи не могут оставаться внутри Галактики в течение миллиона лет, если они не захватываются магнитным полем. Магнитное поле «связывает» обычный межзвездный газ и космические лучи; газ как бы подвергается давлению со стороны космических лучей. Давление космических лучей гораздо больше, чем обычное давление внутри газа. Оно столь велико, что космические лучи способны увеличить толщину слоя, в котором распределен межзвездный газ.

Энергия космических лучей сравнима и, возможно, превосходит гравитационную энергию расширения диска межзвездного газа от тонкого слоя до наблюдаемой в настоящее время толщины. Я думаю, что в таких условиях космические лучи должны были

бы прорвать в ряде мест «дыры» и попросту «вытечь» из Галактики всего лишь за тысячу лет или около того. В особенности это могло бы случиться в окрестностях сверхновых, генерирующих космические лучи.

Более традиционная теория, тоже основанная на обзавоении космических лучей в сверхновых, состоит в том, что космические лучи сосредоточены не в той же дисковидной области, что и межзвездный газ, а в гораздо большем более или менее сферическом объеме, окружающем всю Галактику, как если бы Галактика была погружена в гигантский «пузырь» космических лучей. Этим устраняется затруднение, связанное с межзвездным газом. Понижается также эффект анизотропии, и в этом отношении теория тоже улучшается. Хотя для заполнения пузыря, по крайней мере в 100 раз большего по объему, нужно гораздо больше энергии, зато и интервал времени тоже больше, ибо низкая плотность газа в пузыре может предохранять тяжелые ядра от дробления в течение примерно 100 миллионов лет. Чтобы заполнить пузырь космическими лучами, у сверхновых теперь оказывается времени в 100 раз больше. Однако положение все же остается затруднительным. Вместо того чтобы прорывать дыры в галактическом диске, космические лучи прорвут дыры в поверхности пузыря, если только количество газа в пузыре не будет больше, чем обычно считается. Трудность здесь в том, что должно одновременно выполняться несколько условий. В частности охлаждение газа должно вызывать его опускание из пузыря на внутренний диск. Газ не может быть стабильным, количество его должно пополняться извне или же он должен с силой выбрасываться из плоскости Галактики.

Хотя в этом направлении можно развить последовательную теорию, однако параметры ее, как показали Гинзбург и Сыроватский, могут быть заключены только в очень узких пределах. Теория все время балансирует на краю пропасти, так что альтернативная возможность—происхождение космических лучей в основном из внегалактических источников, несомненно, заслуживает внимания. Мы знаем, что для объяснения радионизлучения мощных источников необходима энергия в 10^{60} эрг в форме электронов. Электроны не-

сут с собой только около 1% полной энергии космических лучей, наблюдаемых в окрестностях Земли. Если то же самое справедливо и для космических лучей, генерируемых сверхмощными источниками, то энергия, связанная с каждым источником, должна быть в 100 раз больше энергии электронов, т. е. равна 10^{62} эрг. В пределах области пространства, которая наблюдается ныне астрономами, имеется около 100 тысяч активных источников. Все вместе они дают полную энергию 10^{67} эрг. На сколько надо еще умножить эту колоссальную величину, чтобы получить полную энергию всех космических лучей, образованных всеми источниками за все время существования галактик? Вероятно, еще на 10^4 , что поднимет итог до 10^{71} эрг. Последняя величина получена на основании предположения, что радионисточники, по-видимому, недолговечны. При очень вероятном предположении, что высокоэнергичные частицы испускаются в виде облаков, движущихся со скоростями, близкими к скорости света, наблюдаемые размеры источников наводят на мысль об их времени жизни всего лишь 10^5 — 10^6 лет; это очень мало по сравнению с 10^{10} лет — возрастом галактик. Последняя величина, которая нужна для этого расчета, — объем пространства, доступного современным астрономам. Объем, соответствующий линейным размерам приблизительно в 10 миллиардов световых лет, равен 10^{84} см³. Разделив полную энергию на объем, мы получим плотность энергии 10^{-13} эрг/см³, что настолько близко к наблюдаемой плотности энергии космических лучей (10^{-12} эрг/см³), насколько этого можно ожидать при столь грубых оценках. Отсюда следует важный вывод, что мощность радионисточников вполне может быть достаточной, чтобы заполнить все пространство наблюдаемой вселенной космическими лучами. Еще несколько лет назад сама возможность этого казалась неправдоподобной.

Правда, говоря откровенно, вывод этот не так уж удивителен. Постоянной причиной предпочтения, отдаваемого местному происхождению космических лучей, было желание понизить энергетические требования. Если космические лучи существуют только в галактиках, то потребность в энергии уменьшается в миллион раз по сравнению со случаем, когда космические лучи

заполняют все пространство. Дело в том, что объем «пузыря» вокруг Галактики равен 10^{69} см³, а средний объем пространства между галактиками 10^{75} см³. Галактики занимают только миллионную долю пространства, так что «местная» теория выгадывает в энергии в миллион раз. Но это лишь в предположении, что все галактики генерируют космические лучи примерно с равной эффективностью. Почти наверняка это столь же неверно, как и старое представление о том, что все галактики обладают одинаковой энергией радиоизлучения. Сейчас известны мощные источники с интенсивностью радиоизлучения в миллион раз больше, чем обычные галактики, такие, как наша, и вполне вероятно, что они испускают также и в миллион раз больше космических лучей. Это обстоятельство в прежних рассуждениях не учитывалось.

Нет никаких причин, по которым космические лучи должны быть повсюду одинаковы. Вблизи мощных источников плотность энергии, естественно, должна быть выше средней. Внутри крупных скоплений галактик, подобных облаку галактик в Деве, плотность также может быть выше средней. Вследствие нашей относительной близости к облаку в Деве плотность энергии в окрестностях Галактики может заметно превышать среднюю. Вполне возможно, что средняя плотность может быть на 1—2 порядка ниже наблюдаемой величины. Для нас важно лишь, чтобы средняя плотность в пространстве была в пределах 10^{-14} — 10^{-12} эрг/см³.

Существуют ли какие-либо наблюдательные свидетельства в пользу «местной» или «внегалактической» теории? Есть надежда, что такое свидетельство может дать рентгеновская или гамма-астрономия. Однако прежде чем объяснить, как это произойдет, я должен довольно подробно рассмотреть электронную составляющую космических лучей. Если не считать важнейшего обстоятельства, что электроны переносят лишь $\sim 1\%$ энергии наблюдаемых космических лучей, до сих пор я еще ничего не сказал об электронной составляющей. Однако электроны играют определяющую роль в создании наблюдаемых эффектов, ибо они испускают излучение гораздо легче, чем протоны или тяжелые ядра. Хотя электроны могут переносить толь-

ко 1% энергии, их излучательная способность гораздо больше, чем у обладающей большей энергией барионной составляющей.

Название «барион» относится к классу частиц, наиболее известными представителями которого являются протон и нейтрон. Другие барионы были обнаружены при столкновении частиц космических лучей с ядрами атомов в атмосфере Земли либо в лабораторных экспериментах. Известные ныне барионы сгруппированы следующим образом: (p, n) ; Λ ; $(\Sigma^-, \Sigma^0, \Sigma^+)$; (Ξ^-, Ξ^0) . В обычном веществе мы встречаемся только с протоном и нейтроном. Прочие барионы, в том числе, возможно, включающие и пока еще не известные частицы, появляются только в мире высоких энергий. По сравнению с энергиями, которые должны быть обычны в таком мире, энергия, связывающая протоны и нейтроны в обычном ядре, кажется пустяком. Ядерная энергия, основа ядерного оружия,— это безделица в сравнении с подлинным миром высоких энергий, который должен существовать где-то в природе. Я сказал «должен», ибо космические лучи каким-то образом возникают. Хотя условия, при которых они возникают, нам не очень понятны, мы по крайней мере можем утверждать, что это должно происходить именно в мире высоких энергий.

Единственную земную аналогию этому можно найти в огромных ускорителях, используемых в современной физике. Эти машины переносят нас из повседневности в совершенно новый мир, в котором, мне кажется, находятся истоки космологии. Забавно, что высказывались сомнения, можно ли позволить себе затратить 100 миллионов долларов на постройку новых ускорителей, в то время как тратятся многие *десятки миллиардов* для того, чтобы высадить человека на трухлявую грудку шлама, которую мы называем Луной. Это сравнение между тем, что явно стоит затрат, и тем, что их не стоит, показывает, до какой удивительной степени у человека активность коры еще подавляется глубинными подкорковыми центрами мозга.

Кроме барионов, существуют и другие классы частиц. Группа лептонов включает электрон, μ -мезон и два вида нейтрино, обозначаемые соответственно

e^-, μ^-, ν, ν' . И у барионов и у лептонов есть античастицы: $e^+, \mu^+, \bar{\nu}, \bar{\nu}'$ для лептонов и (\bar{p}, \bar{n}) ; $\bar{\Lambda}$; $(\bar{\Sigma}^+, \bar{\Sigma}^0, \bar{\Sigma}^-)$; $(\bar{\Xi}^+, \bar{\Xi}^0)$ для барионов. Электрон и его античастица позитрон обозначаются символами e^-, e^+ , а не e, \bar{e} , подобно p, \bar{p} для протона и антипротона. Это объясняется просто традицией. Обозначение e^-, e^+ настолько привилось, что не имеет смысла его менять. Подобным же образом дело обстоит и для μ^-, μ^+ . Существует общее правило, что знак электрического заряда, связанного с частицей, при переходе к античастице меняется. Но переход от частицы к античастице затрагивает не только электрический заряд. Барионы Λ, Σ^0, Ξ^0 не имеют заряда, но их античастицы не то же самое, что частицы.

Наше окружение — и не только Земля и Галактика, но, весьма вероятно, и вся видимая вселенная — состоит в подавляющей части из вещества. Нет и намека на смееь равного количества частиц и античастиц. Как мы вскоре увидим, это создает поразительную логическую задачу. Нет сомнений, что античастицы во вселенной существуют, ибо имеется третий вид частиц — третья группа, в равной мере принадлежащая как веществу, так и антивеществу. Самый известный пример — это *фотон*, связанный с электромагнитным полем. Фотоны в равной степени взаимодействуют с заряженными частицами как вещества, так и антивещества. Фотоны высоких энергий создают электронные пары $e^- + e^+$, причем количества обычных электронов и позитронов всегда строго равны друг другу. Этот процесс происходит внутри массивных звезд, прошедших значительную часть своего «жизненного пути». Он влияет на скорость эволюции, а она в свою очередь влияет на протекающие в этих звездах процессы образования химических элементов. Год или два назад Фаулер и я нашли, что детали кривой содержания в космическом веществе распространенных металлов, таких, как железо, хром, никель и т. д., в большой степени зависят от процесса образования электронно-позитронных пар.

Остальную часть третьей группы составляют мезоны: (π^-, π^0, π^+) ; (K^+, K_1^0, K_2^0) ; $(K^-, \bar{K}_1^0, \bar{K}_2^0)$. π -Мезоны являются тем «клеем», который удерживает вме-

сте протоны и нейтроны в ядрах. π -Мезоны — это «пленники» в ядре, но когда вследствие каких-либо процессов они освобождаются и обретают самостоятельное существование, они быстро распадаются на μ -мезоны и нейтрино или на гамма-лучи:

$$\begin{aligned}\pi^- &\rightarrow \mu^- + \bar{\nu}, & 2,6 \cdot 10^{-8} \text{ сек}, \\ \pi^0 &\rightarrow \gamma + \gamma, & \text{менее } 10^{-15} \text{ сек}, \\ \pi^+ &\rightarrow \mu^+ + \nu', & 2,6 \cdot 10^{-8} \text{ сек};\end{aligned}$$

μ -мезоны сами быстро распадаются на электроны и нейтрино:

$$\begin{aligned}\mu^- &\rightarrow e^- + \nu' + \bar{\nu}, & 2,2 \cdot 10^{-6} \text{ сек}, \\ \mu^+ &\rightarrow e^+ + \bar{\nu}' + \nu, & 2,2 \cdot 10^{-6} \text{ сек}.\end{aligned}$$

Между π -мезонами и K -мезонами существуют странные различия. Нейтральный K -мезон (K^0) бывает двух видов: K_1^0 и K_2^0 . Античастицами для K^+ , K^0 являются K^- , \bar{K}^0 . Можно рассматривать π^+ как античастицу для π^- , но тогда мы должны считать π^0 своей собственной античастицей. Нет двух различных частиц π^0 , $\bar{\pi}^0$, тогда как K^0 и \bar{K}^0 отличаются друг от друга. K -мезоны в «свободном» виде также распадаются очень быстро. Главные способы распада K^+ таковы:

$$K^+ \rightarrow \mu^+ + \nu' \text{ или } \pi^+ + \pi^0, \quad 1,2 \cdot 10^{-8} \text{ сек}.$$

Основной способ распада K_1^0 :

$$K_1^0 \rightarrow \pi^- + \pi^+; \quad 10^{-10} \text{ сек},$$

а K_2^0 распадается по следующим схемам:

$$\begin{aligned}K_2^0 &\rightarrow \pi^+ + \mu^- + \bar{\nu}'; \quad \pi^- + \mu^+ + \nu'; \quad \pi^+ + e^- + \bar{\nu}; \\ &\pi^- + e^+ + \nu; \quad 6 \cdot 10^{-8} \text{ сек}.\end{aligned}$$

Поскольку π - и μ -мезоны в дальнейшем самопроизвольно распадаются, конечными продуктами распада всех видов мезонов (K , π или μ) являются просто электроны, позитроны и нейтрино различных видов.

Почему должны существовать все эти частицы, в чем состоит взаимосвязь между ними, какие еще частицы и с какими свойствами могут существовать — все это вопросы для специалиста по теоретической

физике, а не для астронома. Развитие идей о новых квантовых числах, «изотопическом спине» Кеммера и «странности» Гелл-Манна, слияние новых и старых квантовых чисел в мощном математическом аппарате Салама и Уорда, Гелл-Манна и Неемана, большие перспективы, открывающиеся сейчас в этой области, — это сложная и увлекательная история, но рассказать ее должны те, кто ее создает, а не те, кто о ней только читает! Для моих целей достаточно трех простых выводов:

1. «Свободные» мезоны, в частности μ -мезоны, образуются при столкновениях между барионами с большой энергией.

2. Во всех известных процессах, затрагивающих электрический заряд, сумма зарядов исходных частиц равна сумме зарядов конечных.

3. Во всех известных процессах возникновение (или распад) бариона всегда сопровождается возникновением (или распадом) антибариона.

Пункт (3) заставил Дж. Бербиджа и меня лет 10 назад исследовать возможность того, что вселенная состоит из вещества и антивещества в равных количествах. Мы столкнулись с тем, что не смогли подыскать подходящего процесса, обеспечивающего несмешивание двух видов материи. Ясно, что звезды не могут состоять в равной степени из обоих видов, иначе немедленно произошел бы взрыв звезды, гораздо более мощный, чем взрыв сверхновой. Два вида материи очень быстро аннигилировали бы в недрах звезды с образованием π - и K -мезонов. Выделилась бы энергия приблизительно 10^{21} эрг/г, что во 100 раз больше энергии, выделяющейся при слиянии ядер водорода. Аннигиляция — настолько мощный процесс, что даже разреженный межзвездный газ не может быть смесью равных количеств вещества и антивещества. Гораздо позже стало ясно, что такой смесью не может быть даже газ между галактиками, по крайней мере если его плотность такова, как обычно считается, т. е. около 10^{-29} г/см³. Дело в том, что среди мезонов, возникающих при протон-антипротонной аннигиляции, определенную часть составляют π^0 , а они распадаются на γ -лучи. Эти γ -лучи можно было бы обнаружить со спутников, но их найти не удалось, по крайней мере

с нужной интенсивностью. Приходится считать, что даже очень разреженный межгалактический газ не может быть однородной смесью частиц и античастиц.

Можно попытаться сохранить идею о равных количествах вещества и антивещества, принимая, что огромные объемы вещества размерами со скопления галактик перемежаются с подобными же объемами антивещества. Трудность, с которой столкнулись Бербидж и я, пытаюсь объяснить, как могло возникнуть такое разделение, можно обойти, заявив, что эти объемы никогда не были перемешаны. Помимо того, что последнее утверждение совершенно искусственно и явно выбрано так, чтобы избежать наблюдательной проверки, против него имеются и возражения. Во-первых, образование (или распад) барион-антибарионной пары, как это наблюдается в эксперименте, происходит *в одном и том же месте*; это значит, что и барион, и антибарион появляются (или исчезают) в том же самом месте. Не может быть, чтобы барион был в одном объеме, а антибарион — в каком-то другом, удаленном от него. Следовательно, образование пар должно приводить к более или менее однородной смеси двух видов материи.

Менее эмпирическое, а значит, и более интересное возражение нашел Фейнман, в то время когда Бербидж и я занимались нашей работой. Мир, симметричный по отношению к веществу и антивеществу, был бы также симметричен и по отношению к времени. Не было бы разницы между антинаблюдателем, воспринимающим вселенную от будущего к прошлому, и нашим обычным восприятием от прошлого к будущему. Дело в том, что частицы можно заменить на античастицы, поменяв направление времени. Однако разница сохранится из-за того, что электромагнитные процессы не меняют своего направления. Для нашего антинаблюдателя сохранится асимметрия времени, из-за которой разбить яйцо очень просто, но собрать его вновь не могут ни герой детской песенки Хампти-Дампти*, ни вся королевская рать. Антияйца по-преж-

* В прекрасном переводе С. Я. Маршака — Шалтай-Балтай. Но Хойл забыл песенку своего детства: собрать яйцо не могли ни лошади, ни люди короля, а яйцом был сам Хампти-Дампти. — *Прим. ред.*

нему будут разбиваться и не будут собираться сами собой, и направление времени при этом у них будет то же, что и у яиц в привычном нам мире. Связь асимметрии времени с асимметрией состава мира является серьезным указанием на то, что мы практически имеем дело лишь с одним видом материи.

В таких обстоятельствах, если мы продолжаем придерживаться эмпирического правила об образовании и распаде барнонов, мы должны предположить, что вещество, которое мы наблюдаем во вселенной, никогда не возникало из чего-то предшествующего. В противном случае возникли бы также и античастицы. Следовательно, мы приходим к вселенной без начала, и единственной космологией, хотя бы внешне согласующейся с фактами, становится пульсирующая модель, в которой вселенная попеременно то расширяется, то сжимается. Я рассмотрю эту проблему в следующей главе и поэтому не стану углубляться в нее сейчас. Замечу лишь, что при попытке объяснить, каким образом сжимающаяся вселенная снова начнет расширяться, возникают серьезные математические трудности. Итак, закончив это длинное отступление, я возвращаюсь к космическим лучам, в частности к проблеме происхождения электронной составляющей.

Ранее мы отметили, что тяжелые ядра легко дробятся, так что присутствие тяжелых ядер в космических лучах показывает, что частицы не проходили через массу газа больше 2—3 г водорода на 1 см^2 (т. е. в столбике сечением 1 см^2 вдоль всего пути частицы). Теперь мы должны отметить другой факт, из которого следует, что космические лучи действительно проходили через указанное количество газа. Наряду с углеродом, азотом и кислородом (С, N, O) среди легких элементов найдены ядра лития, бериллия и бора (Li, Be, B). Отношение числа ядер Li, Be, B к числу ядер С, N, O составляет примерно 1 : 3, что необычно велико по сравнению с отношениями, найденными для Солнца или Земли. Для Земли это отношение равно всего лишь около 10^{-6} . Как можно объяснить такое удивительно высокое содержание Li, Be и B в космических лучах? Только тем, что более тяжелые ядра С, N, O были частично раздроблены. А для этого нужно, чтобы ядра С, N, O прошли через 2—3 г водорода.

Таким образом, вместо нашего прежнего утверждения, что космические лучи прошли не более чем через несколько граммов водорода, мы можем сказать, что они действительно прошли через такое количество вещества. Следовательно, должны были быть столкновения между космическими лучами и протонами, т. е. ядрами, из которых состоит обычный в Галактике и в пространстве вне ее водород. В частности должны были происходить столкновения между протонами космических лучей, движущимися со скоростями, близкими к световой, и протонами более или менее неподвижного газа. Вероятно, столкновения испытывают 3—4% протонов космических лучей. В результате таких столкновений должны образовываться энергичные μ -мезоны. Распад этих мезонов на электроны и нейтрино приведет к образованию электронов с высокими энергиями. Таким может быть процесс образования электронов высоких энергий, ответственных за испускание радиоволн источниками радиоизлучения. Это предположение выдвинули независимо друг от друга Бербидж и Гинзбург несколько лет назад.

Обстоятельство, на первый взгляд говорящее в пользу этой теории, состоит в том, что энергия электронов автоматически получается много меньшей, чем энергия протонов космических лучей. Это объясняется тем, что только небольшая доля протонов участвует в столкновениях, а также тем, что только какая-то доля энергии столкновения переходит к вторичному электрону (или электронам). Часть энергии сохраняется у протонов, а остальное (около $\frac{2}{3}$) уносят нейтрино. Однако встает вопрос, будет ли остающейся энергии *достаточно* для электронов. По моим расчетам, возможен дефицит энергии в 3—10 раз. Сходный результат получили Гинзбург и Сыроватский, хотя в своей последней работе Бербидж и Гулд приходят к выводу, что энергии, переходящей к электронам, может хватить, т. е. она может составлять 1% от энергии протонов.

Более серьезную трудность для этой гипотезы составляет ожидаемое при протон-протонных столкновениях отношение электронов к позитронам. Столкновение начинается с двух протонов. Если в конце его оба протона сохраняются, то π^- - и π^+ -мезоны должны

образоваться в равных количествах, ибо изменения суммарного электрического заряда быть не может. В итоге это приведет к равному числу позитронов и электронов. Альтернативной возможностью является то, что один или оба протона могут превратиться в какие-либо другие барионы. Среди известных частиц ими могут быть n , Λ , Σ^- , Σ^0 , Σ^+ , Ξ^- или Ξ^0 . Только в случае Σ^+ заряд при превращении сохраняется. При барионных превращениях $p \rightarrow n$, Λ , Σ^0 , Ξ^0 исчезает единица положительного заряда. Это должно быть возмещено появлением избыточного π^+ -мезона. При превращениях же $p \rightarrow \Sigma^-$, Ξ^- исчезают две единицы положительного заряда, которые должны быть возмещены двумя избыточными π^+ -мезонами. Так как π^+ -мезоны, распадаясь, в конечном счете дают позитроны, то, следовательно, число позитронов, возникающих при столкновениях протонов космических лучей с медленно движущимися ядрами водорода, должно быть больше, чем число электронов. Однако недавние наблюдения де Шона, Гильдебранда и Мейера показали, что число электронов превосходит число позитронов в отношении 2:1 или более. Фактическое отношение оказалось обратным ожидаемому. Это принципиальное расхождение убедительно показывает, что электроны, наблюдавшиеся этими авторами, не были образованы исключительно при столкновениях барионов космических лучей с окружающим газом. Наблюдения были ограничены довольно низкими для космических лучей энергиями, и нельзя пренебрегать возможностью того, что наблюдавшиеся частицы приходили преимущественно от Солнца. Но это ставит другую, едва ли не более трудную задачу, ибо испускание Солнцем позитронов высоких энергий было бы чрезвычайно трудно объяснить. Вообще говоря, если мы возьмем обычное вещество и ускорим его до высоких энергий, — а именно это и происходит на Солнце, — мы получим обычные отрицательно заряженные электроны, но не позитроны. С другой стороны, если лептоны образуются при протон-протонных столкновениях, позитроны должны оказаться в избытке. В итоге ни один процесс по отдельности не дает правильного результата. Конечно, можно было бы подобрать их комбинацию, дающую наблюдаемое отношение электронов и позитронов, а

именно принять за источник позитронов столкновения, а за источник большей части электронов — ускоряющие процессы. Однако странно, что два столь различных способа получения энергичных частиц оказались приблизительно одинаково эффективными. Эта гипотеза выглядит очень искусственной.

Напрашивается мысль, что если мы начнем не с положительно заряженных протонов, а с электрически нейтральных частиц, то мы почти автоматически придем к правильному отношению. Возьмем какую-то гипотетическую нейтральную частицу (или частицы), которая не обязательно должна быть барионом. Пусть эти частицы превратятся в какую-то смесь барионов и лептонов. Тогда, поскольку барионы обычного вещества в конечном счете превращаются в положительно заряженные протоны, среди сопровождающих лептонов должен быть избыток отрицательного заряда. Однако в области высоких энергий должно возникать также и некоторое количество позитронов, например при распаде Σ^+ на μ^+ и нейтрон. Я попытаюсь развить эту мысль в гл. 5.

В заключение этой главы я хочу рассмотреть, какие доступные наблюдению эффекты можно ожидать от рассмотренных нами электронов и позитронов. Как я уже указывал, их излучательная способность много выше, чем у протонов, хотя энергия протонов раз в 100 больше. Это вызвано гораздо меньшей массой электрона и позитрона, из-за чего их ускорения в электромагнитных полях значительно больше, чем у протонов. Примером может быть излучение радиоволн. Радиоволны излучаются почти исключительно электронно-позитронной составляющей космических лучей, сколь бы она ни была незначительна с энергетической точки зрения. Какие же еще процессы излучения можно ожидать? Можно было бы составить целый каталог таких возможностей. Но вместо того, чтобы составлять такой всеобъемлющий список, я хочу остановиться на отдельных процессах, которые, как мне кажется, имеют особо важное значение.

Электроны излучают радиоволны потому, что они отклоняются магнитными полями. Отклонение связано с ускорением, а ускоряющаяся электрически заряженная частица всегда излучает. Частота излучения

пропорциональна квадрату энергии электрона E^2 и напряженности магнитного поля H , т. е. произведению E^2H . В источниках радиослучения E велико, но H (с земной точки зрения) мало. Следовательно, частота оказывается довольно низкой, она приходится на радиодиапазон, т. е. нижнюю часть электромагнитного спектра. Но если E и H вместе или по отдельности увеличиваются, то частота растет. Достаточный рост этих величин может переместить излучение в видимую область. Именно это и происходит в Крабовидной туманности и в струе галактики М87 (см. фото XX и III соответственно). В этих объектах видимый свет излучается при помощи того же механизма, что и радиоволны в большинстве источников. Этот процесс называется *синхротронным излучением*.

Трудно сомневаться в том, что при наличии чувствительных методов обнаружения инфракрасного излучения (лежащего в диапазоне между радиоволнами и видимым светом) мы должны были бы обнаружить объекты, испускающие инфракрасное синхротронное излучение. Весьма вероятно, что одним из них была бы Крабовидная туманность. Может ли таким же путем возникать излучение большей частоты — ультрафиолетовое или даже рентгеновское? Для этого нужны были бы электроны сверхвысоких энергий, а такие электроны очень быстро теряют свою энергию. Рентгеновское излучение скоро ослабло бы, если только электроны непрерывно не пополнялись бы из того или иного источника. Сейчас этот вопрос оживленно обсуждается, ибо рентгеновское излучение Крабовидной туманности действительно обнаружено. Это удалось сделать двум группам исследователей — Джиакони, Гурскому, Паolini и Росси в Массачусетском технологическом институте и Боуеру, Брайану, Чаббу и Фридману в Морской исследовательской лаборатории. Были найдены также и другие источники космического рентгеновского излучения, но они еще не отождествлены с оптически наблюдаемыми объектами. Волнение вызывает только что упомянутое мною обстоятельство: если за эти рентгеновские лучи ответственно синхротронное излучение (что вполне вероятно), то запас электронов сверхвысоких энергий должен быстро и непрерывно пополняться; другими словами,

необходим постоянно действующий источник подобных электронов. Это пробуждает надежду, что дальнейшие рентгеновские наблюдения помогут отыскать этот источник и выявить физические процессы, ответственные за образование быстрых электронов. Вооруженные такими знаниями, мы можем надеяться значительно продвинуться в понимании происхождения космических лучей.

Электроны и позитроны космических лучей могут создавать важные наблюдаемые эффекты и другим очень интересным путем. Этот процесс недавно был исследован Фелтеном и Моррисоном. Электроны высоких энергий могут отклоняться не только магнитным полем, но и видимым светом. Обычно нам приходится иметь дело с противоположным процессом — отклонением света электронами, потому что в нашем повседневном мире низких энергий воздействие на свет (изменение его направления) более заметно, чем воздействие на электрон. Но для световых квантов высоких энергий это уже неверно. Заметное отклонение света электроном действует на сам электрон как удар. То же самое справедливо и тогда, когда электрон имеет большую энергию, если даже энергия светового кванта невелика. Достаточно, чтобы высокую энергию имел или электрон, или квант. Дело в том, что значение имеет только относительная энергия кванта и электрона, и несущественно, считаем ли мы энергию сосредоточенной в свете или в электроне. Эффект будет тем же самым — сильная отдача электрона. Если начальный квант имеет низкую энергию, то отдача электрона сопровождается значительным увеличением энергии кванта. Оно пропорционально квадрату энергии электрона E^2 , так же как и частота синхротронного излучения. Аналогия между двумя процессами идет еще дальше. Сходство станет очевидным, если написать две формулы; одну для скорости, с которой электрон космических лучей теряет энергию при синхротронном излучении, а другую для скорости, с которой увеличивается энергия квантов видимого света, т. е. для *обратного комптон-эффекта*, как называется этот второй процесс. В одном случае формула содержит произведение $E^2 (h^2/8\pi)$, а в другом — произведение $E^2\rho$. Здесь ρ обозначает энергию света в единице

объема, а $H^2/8\pi$ — энергию магнитного поля также в единице объема. Числовые коэффициенты, на которые эти произведения должны быть умножены, чтобы получить численную величину энергии излучения, различаются только на множитель 2 (для синхротронного излучения коэффициент вдвое больше). Таким образом, мы приходим к выводу, что электроны и позитроны посредством обратного комптон-эффекта будут терять столько же энергии, как и посредством синхротронного излучения, если плотность энергии видимого света вдвое больше плотности магнитной энергии. Каково же положение в нашей Галактике с этой точки зрения?

Энергия видимого света звезд в районе Галактики, в котором находится Солнце, по сделанной много лет назад оценке, эквивалентна энергии поля теплового излучения при температуре около 4°K , что составляет около $2 \cdot 10^{-12}$ эрг/см³. Энергия поля излучения в короне Галактики (или в гало) приблизительно на порядок меньше, т. е. равна $2 \cdot 10^{-13}$ эрг/см³. Еще на порядок меньше плотность излучения во внегалактическом пространстве; она равна примерно 10^{-14} эрг/см³. Интересно, что плотность световой энергии вне пределов галактик не так мала, как могло бы показаться с первого взгляда. Причина этого состоит в том, что звезды галактик испускают излучение в течение очень долгого времени — примерно 10^{10} лет. Свет не остается внутри галактик, а постепенно заполняет гигантский объем межгалактического пространства. А какова энергия магнитного поля? Сейчас считается, что H внутри Галактики даже близ галактической плоскости довольно мало. Надежной оценкой считается значение $3 \cdot 10^{-6}$ гс, что дает $H^2/8\pi = 3 \cdot 10^{-13}$ эрг/см³. Таким образом, энергии в обеих формах вполне сравнимы друг с другом, особенно в гало, и, следовательно, излучение энергии, вызванное обратным комптон-эффектом, сравнимо с энергией синхротронного излучения, по крайней мере в нашей Галактике.

Почему величины всех этих форм энергии — космических лучей, света звезд, магнитного поля — столь близки друг другу: все они лежат в области 10^{-12} эрг/см³? Это трудный вопрос для астрофизика, и убедительного ответа на него пока нет. Что касается

меня, то я не разделяю мнения, что мы имеем здесь дело просто со случайным совпадением чисел.

Вернемся к обратному комптон-эффекту. На сколько увеличится энергия квантов видимого света, после того как они испытают столкновения с электронами высоких энергий? Ответ гласит: в E^2 раз, где E — энергия электрона, выраженная в единицах массы покоя электрона (масса электрона эквивалентна энергии $\sim 0,5 \cdot 10^6$ эв, немного меньше 10^{-6} эрг). Далее, чтобы выбрать разумное значение E^2 , полезно провести мысленную параллель с синхротронным процессом. При магнитном поле $H = 3 \cdot 10^{-6}$ гс величина E^2 , необходимая для создания радиоизлучения с частотой 100 Мгц, равна $\sim 10^7$. Следовательно, электроны, возбуждающие радиоизлучение Галактики с частотой 100 Мгц, увеличат энергию световых квантов при столкновениях с ними в 10^7 раз. Это огромная величина. Первоначально кванты имеют энергию около 3 эв. После столкновения их энергия равна $3 \cdot 10^7$ эв. Они превращаются в очень жесткие γ -лучи. Вспомним наш вывод, что Галактика должна излучать энергию из-за обратного комптон-эффекта примерно теми же темпами, какими она излучает радиоволны. Мы приходим к удивительному результату, что γ -излучение Галактики должно быть столь же велико, как и излучение радиоволн. Если не считать частных проблем, состоящих в том, что γ -лучи не проходят через земную атмосферу и, следовательно, обнаружить их гораздо труднее, чем радиоволны, вполне вероятно, что потенциальные возможности γ -астрономии столь же велики, как и возможности радиоастрономии.

Против этого можно возразить, что самые мощные радиогалактики не сходны с нашей: они излучают в миллион раз больше, чем обычные галактики. Внутри радиогалактик и вокруг них магнитное поле вполне может быть необычно мощным, что усиливает синхротронное излучение; радиоизлучение часто исходит также из огромных объемов, выходящих за видимые границы связанных с ними галактик. Плотность световой энергии внутри столь обширных объемов будет меньше, что говорит против возможности γ -излучения. Поэтому следует ожидать, что γ -излучение не может достигать столь же высокого уровня, как радиоизлучение.

А что говорят факты? В результате экспериментов Краушаара и Кларка на спутниках и экспериментов Дюзи, Хафнера, Каплона и Фацио на баллонах были найдены γ -лучи с энергией свыше $5 \cdot 10^7$ эв. Краушаар подчеркнул, что его результаты имеют предварительный характер и требуют подтверждения, так что к тому, о чем я буду говорить дальше, нужно относиться с осторожностью, особенно когда выводы (разумеется, если они верны) оказываются поразительными. Из результатов наблюдений следует, что энергия γ -лучей не только не меньше энергии радиоизлучения, а примерно в 100 раз больше! Энергии, проходящие через обращенную к небу площадку, таковы: для радиоволн с частотами 30—100 Мгц — около $3 \cdot 10^{-9}$ эрг/см²·сек; для γ -лучей с энергиями 50—200 Мэв — около 10^{-7} эрг/см²·сек по Краушаару и Кларку и около 10^{-6} эрг/см²·сек по Дюзи, Хафнеру, Каплону и Фацио. Если наблюдения верны, то, очевидно, создается удивительная ситуация, ибо никакие разумные представления, связанные с галактиками, такой результат, по видимому, дать не могут.

Область, где обратный комптон-эффект значительно преобладает над синхротронными процессами, — это пространство между галактиками. Мы уже отмечали, что интенсивность света звезд во внегалактическом пространстве весьма высока. С другой стороны, магнитное поле H , вероятно, довольно слабо, порядка 10^{-8} гс, так что величина H^2 при переходе от внутренних областей галактики к внешнему пространству уменьшается примерно в 10^5 раз. Синхротронное излучение должно резко ослабевать, даже если космические лучи и электроны существуют вне галактик с такой же большой плотностью энергии, как и внутри них. Но обратный комптон-эффект ослабевает лишь умеренно, примерно в 10^2 раз. Поскольку объем межгалактического пространства превышает объем галактик примерно в 10^6 раз, это означает, что величина обратного комптон-эффекта от всего пространства в целом будет превышать величину этого эффекта от галактик в 10^4 раз, если космические лучи повсюду одинаковы. На это важное обстоятельство указали Фелтен и Моррисон.

Проще всего задать прямой вопрос: какая плотность энергии электронов нужна для объяснения наблюдений, если считать их достоверными? При межгалактической плотности энергии света звезд 10^{-14} эрг/см³ необходимая плотность энергии электронов равна $2 \cdot 10^{-15}$ эрг/см³, если принять интенсивность γ -лучей по Дюзи, Хафнеру, Каплону и Фацио, и $\sim 4 \cdot 10^{-16}$ эрг/см³, если следовать данным Краушаара и Кларка. Эти величины относятся к электронам с энергиями больше 1—2 миллиарда эв. Полную необходимую плотность энергии электронов нужно положить равной 10^{-15} эрг/см³. Наконец, надо умножить эту величину на 10^2 , чтобы получить энергию протонов. В итоге получится примерно 10^{-13} эрг/см³, ибо мы вели расчет в предположении, что космические лучи повсюду одинаковы, а в окрестностях Земли энергия электронов составляет всего 1% от энергии протонов космических лучей. Как видно, результат согласуется с нашей прежней оценкой.

Отсюда ясна важность наземного измерения потока γ -лучей в интервале энергий 10—100 миллионов эв. Здесь мы имеем дело с самыми решающими наблюдениями современной астрономии. В зависимости от них мы сможем установить, универсальны ли космические лучи или нет. Почему эта проблема вызывает такое волнение? Потому что, если космические лучи действительно универсальны, то частицы и процессы высоких энергий должны играть решающую роль в регулировании локального состояния межгалактической среды. Тогда проблема происхождения и формирования галактик будет непосредственно связана с распределением и происхождением космических лучей. Одна галактика может тогда влиять на другую посредством генерируемых ею космических лучей. Могут быть целые скопления, условия в которых определяются какой-либо господствующей галактикой, что, как показывают наблюдения, действительно имеет место. От проблем, которые ставят перед нами наблюдаемые рентгеновское и гамма-излучение и космические лучи, зависит решение широкого круга вопросов, касающихся основ современной астрономии.

ЛИТЕРАТУРА

- Гинзбург В. Л., Сыроватский С. И., Происхождение космических лучей, М., 1963.
- Gould R. J., Burbidge G. R., Symposium on astronomical observations from space vehicles, *Annales d'Astrophysique*, 1965.
- Burbidge G. R., Hoyle F., *Nuovo Cimento*, **4**, 1, 1956.
- De Shong J. A., Jr., Hildebrand R. H., Meyer P., *Physical Review Letters*, **12**, 3, 1964.
- Bowyer S., Bryan E. T., Chubb T. A., Friedman N., *Nature*, **201**, 1307, 1964.
- Giacconi R., Gursky H., Paolini F. R., Rossi B. B., *Physical Review Letters*, **9**, 439, 1962.
- Felten J. E., Morrison P., *Physical Review Letters*, **10**, 453, 1963.
- Kraushaar W. L., Clark G. W., *Physical Review Letters*, **8**, 106, 1962.
- Duthie J. G., Hafner E. M., Kaplan M. F., Fazio G. G., *Physical Review Letters*, **10**, 364, 1963.

4. *Космология стационарной вселенной*

Причинам, по которым по одному и тому же поводу выдвигается так много научных теорий, вообще уделяется мало внимания. Тому, кто не работает активно в какой-либо области науки, трудно себе представить, как много можно сказать в пользу любой из множества противоречащих друг другу теорий. Поверхностное ознакомление с ними неизбежно создает у неспециалиста впечатление запутанной ситуации, и поистине можно простить обывателю его удивление тому, как ученые вообще могут быть в чем-либо уверены — уверены, так сказать, на законном основании! Но развитие науки неумолимо; несколько теорий может какое-то время конкурировать друг с другом, но рано или поздно все они, кроме одной, будут отброшены. Теория-победительница не обязательно будет «правильной», но она по крайней мере выжила. Вы вправе спросить, почему же получается так, что одна теория завоевывает все новые и новые позиции, а ее соперники постепенно умолкают? Что же меняет ситуацию? Если раньше существовал какой-то веский довод в пользу отброшенной ныне теории, то почему он перестал быть убедительным?

Существует по меньшей мере три причины для такого смещения акцентов. Простейшая возможность состоит в том, что появляются новые данные или новые аргументы, которые гораздо убедительнее, чем любые, существовавшие раньше. Хорошим примером, по моему собственному опыту, является чрезвычайно противоречивая проблема происхождения планет. Согласно первым гипотезам, более чем столетней давности, считалось, что планеты образовались одновременно с Солнцем. Лаплас предполагал даже, что вещество планет могло отделиться от Солнца, потому что последнее

вращалось очень быстро. Но затем именно этот пункт вызвал сомнения, ибо если бы все планеты упали обратно на Солнце, оно не стало бы вращаться столь быстро, чтобы создалась ротационная неустойчивость. Это явно означало, что в старой теории существовало противоречие, и астрономы занялись поисками новых идей. Они обратились к теории кратных звезд. Мысль состояла в том, что вещество планет произошло из другой звезды, которая одно время была членом двойной системы, в которую входило и Солнце. Поскольку сейчас у Солнца нет звезды-спутника, необходимо было каким-то образом избавиться от ставшего в конце концов нежелательным партнера. Были испробованы различные уловки, в том числе и та, которую предложил я. Я был увлечен на неверный путь, ибо таково было общее направление исследований в то время, когда я начал свою работу.

Каковы же были новые факты (или идеи), коренным образом изменившие ситуацию? Когда химический состав Солнца и планет стал известен лучше, выяснилось, что, хотя большую часть вещества всех планет, как и Солнца, составляют водород и гелий, все же избыток водорода и гелия по отношению к другим элементам далеко не так велик, как у Солнца. Более точно, водород и гелий составляют 99% вещества Солнца и всего лишь около 90% вещества планет. Таким образом, если вещество планет имеет солнечное происхождение, как предполагали ранние исследователи, то планеты должны были безвозвратно потерять огромное количество водорода и гелия. Простой расчет показывает, что если это так, то современные планеты могут содержать только $\frac{1}{10}$ первоначального количества вещества. Следовательно, довод, выдвигавшийся лет 30—40 назад, об обратном падении планет на Солнце не был справедливым. Необходимо обязательно учесть потерю водорода и гелия. Когда это было сделано, обнаружилось, что падение всего вещества планет на Солнце действительно вызвало бы ротационную неустойчивость. Таким образом, кажущееся противоречие с основной идеей старой теории было снято уточнением химического состава Солнца и планет. Появились и данные иного рода, которые также свидетельствовали в пользу возвращения к прежним

взглядам. Когда процесс звездообразования стал более понятен, выяснилось, что Солнце не могло бы сконденсироваться из разреженного межзвездного газа со столь медленным вращением, которым оно обладает сейчас. Первичное Солнце должно было вращаться быстро и должен был существовать какой-то процесс, замедлявший вращение и осуществлявший передачу момента количества движения. Куда? Совершенно очевидно, что планетам, как давно уже предполагал Лаплас.

Другая типичная причина осложнений такова. Пусть для какого-то определенного явления существует две теории: А и Б. Большинство специалистов в этой области интуитивно отдает предпочтение А, но, к несчастью, А непосредственно противоречит какому-либо наблюдению или эксперименту, который говорит в пользу менее привлекательной теории Б. Мы отступаем и начинаем придерживаться Б, разрабатывая как можно лучше следствия из нее, лишь бы получить посредственное согласие с другими экспериментами или наблюдениями, которые, возможно, гораздо лучше объяснялись бы при помощи А. Поскольку ни одна из теорий не объясняет явления должным образом, появляется искушение поискать третью теорию В. Но в конце концов может обнаружиться, что решающее наблюдение, которое казалось противоречащим А, было просто ошибочным, что А правильно и что мы проделали кучу бесполезной работы из-за неверного «факта».

В астрономии такого рода затруднения особенно часты. Если в экспериментальной науке подозревают, что какой-либо факт ошибочен, то обычно можно изменить первоначальный эксперимент и провести его по-иному. В астрономии это невозможно. Мы имеем дело не с экспериментом, а с наблюдением, и все, что можно сделать, — это повторить наблюдение. Часто наблюдение осуществляется на пределе возможностей инструмента, и это только ухудшает ситуацию. В прошлом астрономия страдала от ложных фактов больше, чем сейчас, не потому, что устранены присущие ей затруднения, а потому, что астрономы сейчас старательно расставляют вопросительные знаки, как только наблюдения сопряжены с очевидными трудностями и,

следовательно, потенциально подвержены ошибкам. Проблема для теоретика состоит не столько в том, чтобы избежать вступления на ложный путь, на который может подтолкнуть уверенно провозглашенный, но ложный факт, сколько в том, чтобы безопасно пробраться через минное поле вопросительных знаков. Особенно это справедливо для космологии, являющейся предметом этой главы.

Третья трудность в теоретической работе целиком создается самими теоретиками. Вы пытаетесь построить теорию для определенного явления и обнаруживаете, что существует несколько возможностей: А, Б, В... Вы начинаете систематически обследовать их по очереди, чтобы посмотреть, которая из них лучше удовлетворяет фактам. Вы начинаете с А. Вскоре, однако, вы осознаете, что А — это не просто прямая дорога. Она разветвляется. При первом разветвлении вы должны рассмотреть, скажем, две возможности: A_1 и A_2 . Следуя им, вы находите дальнейшие альтернативы и т. д. Возможности быстро умножаются в числе, и скоро вы начинаете понимать, что полный систематический анализ займет столько времени, что вы никогда не перейдете к Б, а тем более к В. Рассуждая логически, правильно было бы разделить проблему между всеми работающими в этой области исследователями. Но человеческая природа такова, что это невыполнимо. Каждый чувствовал бы, что правильный ответ находится совсем не на его участке, и был бы обижен тем, что ему не дают размышлять над другими вариантами. Таким образом, у каждого исследователя появляется стремление самому попытаться охватить все возможности. Ясно, что он будет искать способы сократить путь, срезая углы.

Соблазнительный, но неудовлетворительный метод срезания углов состоит в выборе «наиболее вероятной» ситуации в каждом из разветвлений. Факты и предшествующий опыт часто наводят на мысль, что вероятность правильности A_1 больше, чем A_2 . В этом случае легко продолжить исследование A_1 , оставив без внимания A_2 . Простейший расчет быстро показывает ошибочность такого рода действий. Предположим сначала, что теория А оказалась «правильной». Предположим затем, что мы оцениваем вероятность A_1 втрое боль-

шей, чем A_2 , т. е. $3/4$ для A_1 и $1/4$ для A_2 . Пусть нам представляется десять таких альтернатив и в каждом случае отношение вероятностей равно 3 : 1. Мы приходим в конце концов к теории, вероятность правильности которой равна $(3/4)^{10}$, т. е. только один шанс из 20! Хотя вы исследовали то, что вам казалось наиболее вероятной теорией, неисследованные вами возможности, *вместе взятые*, с большей вероятностью содержат нужный ответ, чем единственная исследованная возможность. Интуиция и предубеждение относительно того, какая из двух альтернативных возможностей выглядит более «вероятной», часто оказываются ошибочными. Наши попытки заглянуть вперед таким способом оканчиваются плачевно. Очень легко совершенно сбиться с пути. Прюделав то же самое также и для теорий Б, В, ..., мы приходим к «наиболее вероятным» путям исследования для Б, В, Затем мы приступаем к сравнению этих единственных направлений для А, Б, В, Может оказаться, что направление исследований для В выглядит привлекательнее. Кажется, что оно лучше удовлетворяет фактам, чем направление исследований для А, потому что мы во время наших «вероятностных» оценок пропустили правильное направление для А. Следовательно, мы можем окончательно ступить на ложный путь. Так совершенно ошибочной теории будет отдано предпочтение перед той, которая в конечном счете окажется верной, когда кто-нибудь возьмет на себя труд провести полное обследование правильной теории или же удачно наткнется на верный путь, несмотря на все разветвления.

Конечно, нет вполне надежной системы поисков кратчайшего пути. Если бы она существовала, то труд теоретика намного бы облегчился. Вы неминуемо должны отвергать большинство исследуемых вами возможностей, и на этом процессе отбраковки держится все. Необходимо и везение, чтобы вместе с водой не выплеснуть из ванны ребенка.

В астрономии нет другой проблемы, к которой эти соображения относились бы в большей степени, чем к космологии, к изучению вселенной в целом. Эта проблема больше, чем любая другая, связана с множеством факторов, к ней привлекается широкий ряд

наблюдений и весь арсенал физики. Рассмотрено так много теорий, в каждой из них исследовано такое количество возможностей, что некоторые астрономы и физики склонны избегать космологии как безнадежного занятия. Тем самым подразумевается, что удовлетворительную теорию найти столь маловероятно, что не стоит на это тратить усилий. Но даже если удовлетворительную теорию найти действительно нелегко, я думаю, что усилия мы приложить все-таки должны. В противном случае предрассудок пренебрежения космологией мог бы существовать бесконечно и сдерживать возможный в будущем прогресс. Мы всегда должны стараться построить наилучшую теорию, какую только мы способны создать, не претендуя на то, чтобы теория, наилучшая сегодня, оставалась таковой и через 100 лет.

Начнем с известного факта, что *в любом месте* число способов, которыми может быть распределено данное количество энергии, со временем стремится к возрастанию. Пусть вначале энергия сосредоточена в основном в одной частице. Позднее мы обнаружим, что часть этой энергии (возможно, большая) будет поделена между другими частицами. Это можно отнести ко всем формам энергии, в частности к энергии, связанной с массой частиц. Начав с простой смеси электронов и протонов и затем заменяя некоторые электрон-протонные пары на нейтрино-нейтронные и объединяя протоны и нейтроны в ядра, мы можем создать дефект массы примерно 1%. Именно этот процесс происходит в звездах и управляет их эволюцией. Мы обсудим его в гл. 6. Сейчас я просто хочу отметить, что естественные физические процессы, представленные на неопределенно долгое время самим себе в нынешних условиях, привели бы к тому, что простая смесь электронов и протонов перестала бы существовать. Выражаясь точнее, такая смесь рано или поздно преобразуется в звезды, и ядерные процессы в их недрах будут уничтожать свободные протоны, создавая из них тяжелые ядра. Из того факта, что большая часть вещества вселенной — это водород, т. е. смесь электронов и протонов в отношении 1:1, можно заключить, что наблюдаемое сейчас состояние

не могло существовать в течение неопределенно долгого времени.

Имеются три возможности:

1. Законы физики в прошлом были иными, чем сейчас.

2. Вселенная существует конечное время.

3. Распределение вещества во вселенной не всегда было таким, как сейчас.

Здесь наш путь разветвляется на три дороги. Большинство исследователей отвергают возможность (1), почти совсем не анализируя ее. Я не убежден в их правоте по причинам, которые затрону в гл. 6. Однако следует подчеркнуть, что мы не можем так свободно менять физические законы, как может показаться на первый взгляд. Свет от далеких галактик доходит до нас за несколько миллиардов лет. Путем спектроскопического изучения света можно получить информацию о законах, управлявших излучением миллиарды лет назад. Эта информация находится в полном согласии с точкой зрения, что в те эпохи эти законы были такими же, как сейчас. Кроме того, распад естественных радиоактивных веществ дает информацию о прошлой истории Земли и метеоритов. Физические процессы, связанные с распадом урана, с одной стороны, и рубидия-87 — с другой, совершенно различны. Однако данные, полученные и по распаду урана, и по распаду рубидия, рисуют историю Земли совершенно одинаково, и это вновь наводит на мысль, что законы природы не менялись в течение нескольких миллиардов лет.

Возможность (2) обсуждалась широко, ибо идея о мире с началом, но без конца является частью философских концепций иуданзма и производной от него христианской культуры. Причина, по которой концепции конечности и бесконечности столь тесно сплелись с этими культурами, по-видимому, состоит в том, что человек стал задумываться над проблемой бесконечности как раз в ту эпоху, когда эти религии создавались. Поскольку бесконечность рассматривалась как наиболее утонченная из имевших хождение идей, она примешивалась к этическим, правовым и прочим интеллектуальным концепциям эпохи. Но если только вы не хотите рассмотреть и возможность вселенной без

начала, но с концом, вам с этой идеей делать нечего. Два представления о вселенной: с началом, но без конца и с концом, но без начала, тождественны, что видно при простом обращении направления времени. Я хочу сказать, что никто не может отдавать предпочтение первому из этих представлений, не сочувствуя в той же мере второму и не греша при этом против логики.

Третья возможность оказывается удивительно плодотворной. Зададимся вопросом, как в больших масштабах может двигаться вещество вселенной, чтобы выполнялись два требования:

1. Во вселенной не должно быть привилегированного положения, не должно быть центра, т. е. места, из которого она выглядела бы иначе, чем из любого другого места.

2. Из положения, в котором мы находимся, вселенная должна выглядеть во всех направлениях одинаково.

Оказывается, что эти условия однородности и изотропности накладывают сильные ограничения на возможные движения. Представьте себе, что частицы материи (галактики для наших целей можно рассматривать как частицы) соединены стержнями. Тогда галактики и соединяющие их стержни образуют решетку, подобную кристаллической. Таково положение в любой определенный момент времени. Наши ограничения требуют, чтобы с течением времени форма решетки оставалась одной и той же. Единственное, что может меняться, — это длины воображаемых связующих стержней. Другими словами, может меняться *масштаб* решетки, но не ее форма. Например, три галактики образуют треугольник, форма которого всегда будет сохраняться. Следовательно, мы можем определить состояние вселенной в любой данный момент, просто задавая текущее значение масштаба решетки $S(t)$, где t — время.

Из теории относительности можно получить важную информацию о том, как S меняется с t . Однако мы вновь встречаемся с разветвлением. Существует несколько возможностей. Три случая, помеченные 0, $+1/2$, 1, показаны на рис. 3. Имеются и другие возможности, сильно отклоняющиеся от ортодоксальных взгля-

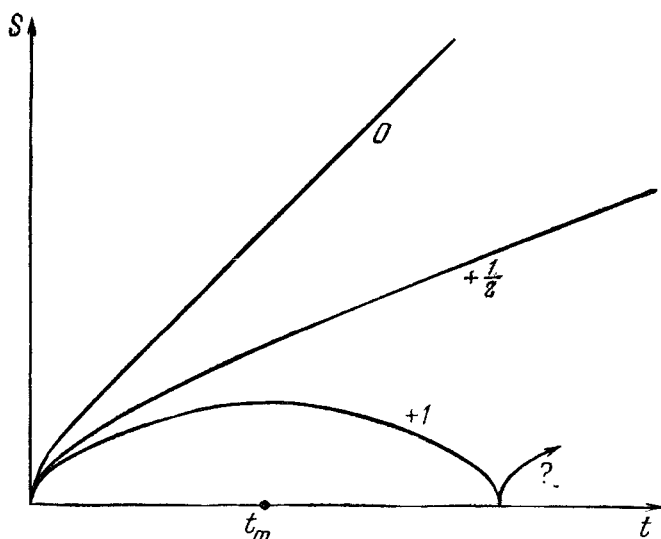


Рис. 3. Изменение масштаба со временем для различных типов космологий.

дов, и они на рис. 3 не показаны. По этим результатам можно предсказать, какие движения галактик должны наблюдаться. Предсказанные движения изображены на рис. 1 на стр. 27 (случаи 0 и +1 на рис. 1 соответствуют тем же случаям на рис. 3). Как уже объяснялось в связи с рис. 1, по вертикальной оси отложена величина, являющаяся мерой красного смещения спектральных линий. *Теория предсказывает именно красное смещение.* Под «движением» мы подразумеваем такое перемещение, которое необходимо, чтобы вызвать в лаборатории точно такое же красное смещение. По горизонтальной оси отложена величина, являющаяся мерой расстояния, при условии, что все галактики имеют одинаковую светимость.

Новейшие данные очень хорошо удовлетворяют кривой +1 на рис. 1. Однако различные кривые на рис. 1 расположены очень тесно, и, допустив, что далекие галактики имеют несколько иную светимость, можно предположить, что лучше подходит кривая + $1/2$ или даже кривая 0.

Для меньших расстояний все случаи дают одинаковую зависимость, а именно прямую линию. Тот факт, что наблюдается концентрация галактик вдоль этой линии, возможно, является наиболее существенным достижением теоретической космологии. Это серьезное указание на то, что изложенные выше ограничения (1) и (2) справедливы. Однако возникает существенная трудность. Из рис. 3 видно, что если мы будем двигаться назад по времени до определенного момента ($t=0$ на рис. 3), мы получим $S=0$. Масштаб решетки уменьшается до нуля, и все частицы, разделенные сейчас конечными расстояниями, соединятся; следовательно, плотность вещества станет бесконечной.

Как давно имела место эта исключительная ситуация? Путем комбинации теории и наблюдений мы приходим к моменту приблизительно 9 миллиардов лет назад для случая $+1/2$, 13 миллиардов — для случая 0 и 7 миллиардов лет — для случая $+1$. По совершенно независимым астрофизическим расчетам наилучшая оценка возраста нашей Галактики составляет от 10 до 15 миллиардов лет. Случай 0 и $+1/2$ с этой величиной можно согласовать, но согласование для случая $+1$ довольно сомнительно.

С другой стороны, случай $+1$ дает надежду избежать серьезного логического затруднения, с которым мы сталкиваемся в других случаях. Кривая $S(t)$ для случая $+1$ имеет форму арки. После достижения максимального значения при $t=t_m$ масштаб уменьшается. Он вновь обращается в нуль при $t=2t_m$. Формальная интерпретация этого результата состоит в том, что вселенная возникает в момент $t=0$ и исчезает при $t=2t_m$. Можно, однако, попытаться избежать этого вывода, полагая, что S уменьшается не точно до нуля, а до какого-то минимального значения, после чего оно

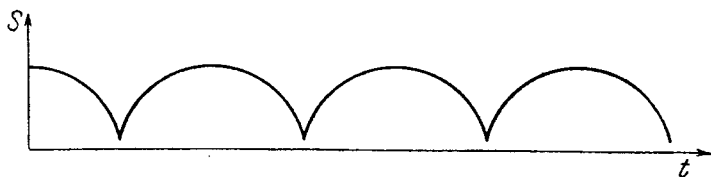
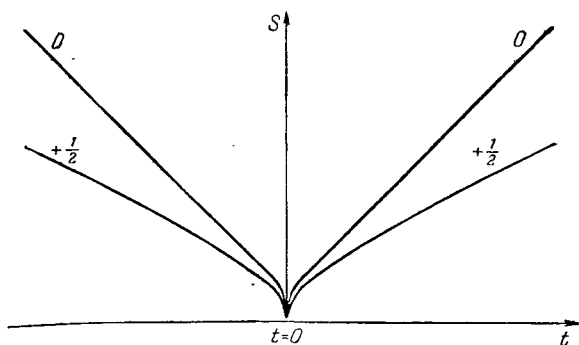


Рис. 4. Гипотетический вариант космологии $+1$ без сингулярностей.



Р и с. 5. Гипотетический вариант космологий 0 и $+1/2$ без сингулярностей.

вновь возрастает. Тогда масштаб будет меняться по кривой, представляющей собой последовательность арок, как показано на рис. 4. В этом случае мы имеем вселенную не только без конца, но и без начала. Вселенная пульсирует с периодом $2t_m$.

Сходную идею можно использовать и для других случаев, но выглядит это довольно искусственно. Можно сказать, что и в случае 0 , и в случае $+1/2$ мы имеем ситуацию, изображенную на рис. 5. Несущественно, в каком направлении мы отсчитываем время от оси симметрии, для которой на рис. 5 принято $t=0$. С одной стороны от нее вселенная сжимается, а с другой — расширяется, так что мы имеем картину вселенной, сжимающейся от бесконечно разреженного состояния, причем сжатие происходит вплоть до момента, когда достигается какое-то, пока неопределенное, минимальное значение S . После этого сжатие сменяется расширением, и вселенная возвращается в бесконечно разреженное состояние.

Пульсирующую модель, изображенную на рис. 4, можно подвергнуть довольно строгому испытанию, после которого доверие к ней значительно возрастает. Ясно, что в момент достижения наибольшей плотности галактики и звезды должны разрушаться. В противном случае внутри звезд от цикла к циклу постоянно происходило бы превращение вещества и водород превращался бы в более тяжелые элементы. После

достаточно большого числа циклов весь водород истощился бы, что противоречит наблюдениям. Этого можно избежать, если температура в моменты наивысшей плотности окажется достаточно высокой. Тогда галактики и звезды испарятся, вещество превратится в горячее облако газа. Можно показать, что при достаточно высокой температуре физические процессы приведут вещество в состояние смеси почти равного числа протонов и нейтронов. После поворотной точки, когда S начинает увеличиваться, температура падает. Нейтроны исчезают частично путем распада, частично объединяясь с протонами и образуя гелий. Оказывается, что все эти процессы поддаются довольно точному расчету, результатом которого является смесь водорода и гелия в отношении примерно 2:1 (по массе). Этот результат в довольно широких пределах не зависит от физических условий, если только температура достаточно высока. Отношение водорода к гелию, наблюдаемое в Солнце, звездах и межзвездном газе (как в нашей Галактике, так и в нескольких близких галактиках), действительно близко к 2:1. Согласно поразительное, хотя при строгом учете всех деталей и обнаруживаются расхождения: например, имеющиеся оценки содержания гелия на Солнце ниже расчетной величины примерно на 40%. Однако гелий — элемент, трудный для наблюдения, и нынешние результаты вполне могут быть ошибочными на эту величину.

Поистине удивительно, что литр солнечного вещества, если бы мы могли добыть его, мог бы опровергнуть космологию пульсирующей вселенной, представленную на рис. 3. Но из-за отсутствия такого образца мы можем лишь отметить этот результат как успех теории пульсирующей вселенной, указав и на упомянутое выше серьезное затруднение с возрастом.

Уравнения, определяющие поведение S , показывают, что в случае $+1$ должно существовать максимальное значение S , что расширение должно прекращаться и сменяться сжатием. Но противоположное утверждение из уравнений не следует: почему должно существовать минимальное значение S , при котором сжатие должно прекращаться и сменяться расширением? Действительно, если придерживаться ограниче-

ний (1) и (2) (на стр. 88), которые, как вы помните, привели к успешному объяснению наблюдательных данных рис. 1, то в этой теории не может быть смены сжатия на расширение.

Можно сказать, что если ограничения (1) и (2) являются хорошим приближением в настоящее время, то близ момента смены сжатия на расширение они неприменимы. Возможность пренебрежения ограничением (2), но не (1) была исследована довольно подробно. Как будто ситуацию это не улучшило. Однако предстоит еще проделать большую работу, прежде чем окончательно выяснится влияние отбрасывания ограничения (1). Менее трудная, но сходная проблема связана с гравитационным коллапсом ограниченного объекта. Она была довольно подробно исследована в связи с квазизвездными источниками радиоизлучения. Хорошо известно, что до сих пор все исследователи, исходившие из обычной теории, сталкивались с трудностями, связанными с той же самой проблемой «отскока» от особой точки, т. е. смены сжатия на расширение. До сих пор возможность такой смены не доказана, даже для ограниченного объекта.

При таких обстоятельствах теоретикам необходимо решить, хотят ли они по-прежнему идти в указанном выше направлении, исследуя все более и более сложные возможности, или они уже достигли такого этапа, на котором должны быть рассмотрены совершенно новые идеи. Следует учесть три обстоятельства:

а) Согласие с эмпирическими наблюдательными фактами.

б) Нежелание вводить понятия, не вытекающие из лабораторных экспериментов.

в) Неспособность ортодоксальных космологий справиться с рядом фактов, которые хотя и являются также выводом из наблюдений, но, по-видимому, имеют более фундаментальное значение, чем факты, подпадающие под категорию (а).

Существует рассказ о том, как покойный Вольфганг Паули прервал однажды оратора, употребившего слово «фундаментальный», возгласом: «Это философия, а значит, чепуха». Так что у меня есть прекрасное объяснение того, что я подразумеваю под фактами в пункте (а) и в пункте (в). Точные места, в которые

попадают наблюдаемые галактики на диаграммах типа рис. 1, — это факты класса (а). Такие факты не вызывают никакой эмоциональной реакции. Мы принимаем их такими, какие они есть. К классу (в) я отношу наблюдаемую асимметрию времени, тот факт, что события происходят в последовательности, которая несимметрична по отношению к прошлому и будущему. Обратите внимание, что я здесь не играю словами. Как я уже отмечал, обращение смысла прошлого и будущего — вещь совершенно тривиальная. Вместо того чтобы сказать: «Я родился в прошлом и умру в будущем», в равной степени можно сказать: «Я родился в будущем и умру в прошлом». Единственное различие здесь состоит в математическом обращении смысла времени, получаемом повсеместной заменой в уравнениях t на $-t$. Что действительно нетривиально, так это то, что общее направление от рождения к смерти, какая бы форма ни была избрана для его описания, одинаково и для всех животных и для перехода неорганического топлива в золу.

Избираемый нами путь зависит, как мне кажется, от относительного эмоционального воздействия (б) и (в). На меня (в) оказывает большее влияние, чем (б), потому что (в) для меня имеет большое значение, а (б) — нет, ибо я не верю, что всю физику можно открыть в земной лаборатории. Я полагаю, что многие из моих коллег думают иначе. По-видимому, лишь немногие физики склонны доказывать, что все можно открыть в лаборатории, но зато многие утверждают, что единственное надежное знание — это то, которое добыто в лаборатории. Пример закона всемирного тяготения показывает, что это не обязательно так. Менее уязвимая точка зрения состоит в том, что не следует отклоняться от того, что известно из лабораторных экспериментов, пока все возможности, согласующиеся с лабораторными данными, полностью не исследованы. Трудность здесь в том, что ни об одной теории нельзя сказать, что она «полностью исследована». Всегда можно продолжать работу над все более и более сложными случаями. Нужно решить, когда же наступает время для отхода от ортодоксального образа мышления. Ясно, что вынося такое решение, не все будут придерживаться единого взгляда,

ибо каждый оценивает спорные стороны проблемы, исходя из своих собственных пристрастий.

Что касается лично меня, я питаю сильную неприязнь к некоторым космологическим построениям. Я могу понять, что космология пульсирующей вселенной была выдвинута вначале, чтобы объяснить наблюдаемую асимметрию времени, но мне претит сама

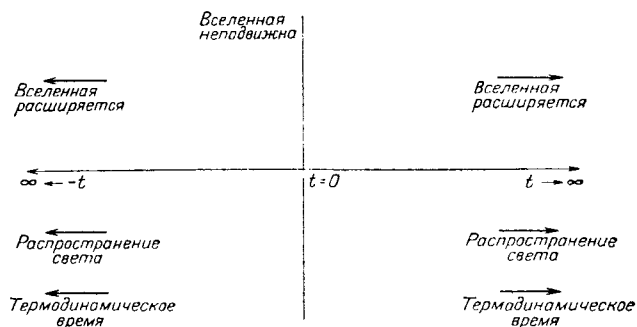


Рис. 6. Схема вселенной, симметричной относительно времени.

мысль о том, что для объяснения наиболее общих черт нашего бытия необходимы «начальные условия». Это значило бы, что вселенная — весьма убогая штука, способная лишь громыхать, как огромный завод, да и то после долгой наладки, подобно той старой автомашине, которую я водил в первые послевоенные годы. В космологических исследованиях я придерживаюсь точки зрения, что все важные черты вселенной уже содержатся в ее законах, а не привносятся извне. Таков один из применяемых мною способов сокращения пути. Лично я не трачу времени на исследование теорий, требующих особых начальных условий.

Если не считать недавно возникшей и еще не решенной проблемы, связанной с распадом K_2^0 -мезона, законы физики считаются симметричными по отношению к времени. Каким образом при действии симметричных относительно времени законов может возникнуть асимметрия времени? На рис. 6 схематично изображена симметричная относительно времени

ситуация. Симметрия имеет место относительно особой точки на оси времени, которую я для удобства выбрал при $t=0$. Поскольку, вообще говоря, маловероятно, что произвольный момент времени будет близок к $t=0$, такой момент будет находиться далеко вправо или влево от этой точки. Наблюдатель, живущий в такой момент, обнаружит, что в его окрестностях имеет место асимметрия времени, но асимметрия будет различной, в зависимости от того, находится ли наблюдатель справа или слева от $t=0$.

Рис. 6 показывает, как может быть в принципе решена проблема асимметрии времени, хотя, конечно, это ни в коей мере не доказывает реального существования такой схемы. Рисунок свидетельствует, что проблема не безнадежна, а также показывает, как ее можно было бы решить. Возвращаясь к рис. 5, мы встречаемся с подобной же ситуацией по отношению к поведению масштаба $S(t)$. Следовательно, космологии, представленные на рис. 5, дают большие возможности для понимания асимметрии времени, чем космология, представленная на рис. 4. Однако при детальном исследовании возникают трудности. Например, асимметричный характер распространения света, по видимому, объяснить нельзя. Возникает также трудность, связанная с «отскоком» при $t=0$, точно так же, как при смене сжатия расширением в космологии пульсирующей вселенной.

В предыдущей главе я обратил внимание на удивительное обстоятельство, что вселенная не состоит из равных количеств вещества и антивещества, если только не предположить, что два вида материи существуют в разделенных между собой объемах; однако последнее было бы очень трудно объяснить. Если отбросить эту идею как чересчур искусственную, то мы сталкиваемся с необходимостью либо отбросить эмпирическое правило, по которому барионы и антибарионы всегда возникают в равном количестве, либо предположить, что возникновение материи физически необъяснимо.

Второе предположение, по-видимому, неизбежно ведет к описанным выше космологиям и к все еще не решенной проблеме, каким образом может происходить смена сжатия вселенной расширением. Пер-

вое же предположение ведет к совершенно новой возможности, описанию которой я посвящаю остаток этой главы.

Идея о том, что каждая частица материи может возникать независимо от другой, ведет к концепции стационарной вселенной. Расширение вселенной должно со временем вызвать уменьшение плотности, если только не появляется новое вещество. В последнем случае эффект расширения было бы возможно компенсировать эффектом «рождения». Расстояния между галактиками при расширении увеличиваются, так что число галактик в единице объема также должно уменьшаться, если только из вновь созданного материала не создаются постоянно новые галактики. Следовательно, эта новая концепция стационарной вселенной приводит к требованию, что новые галактики должны образовываться непрерывно. Проверкой этого требования было исследование необычных галактик, описанных в гл. 1. Общий вывод из этих исследований состоит в том, что имеющиеся данные согласуются с таким требованием, хотя факт рождения новых галактик еще нельзя считать доказанным.

Концепция стационарной вселенной в своем первоначальном виде находится в противоречии с результатами подсчетов источников радиоизлучения, проведенных Райлом и Кларком. Их данные показывают, что или в прошлом радиисточников было больше, или они были более мощны, или то и другое вместе. Возможность изменения идеи строгой стационарности обсуждалась Нарликар ом и мною. Я полагаю, что сейчас следует предпочесть дальнейшее развитие теории, которое будет описано позже, в гл. 5.

Вернемся к изображенной на рис. 1 кривой —1. Это предсказанная кривая для стационарной теории. Поскольку наиболее удаленные галактики, вероятно, попадают между кривыми 0 и +1, это также свидетельствует против стационарности. Однако расхождение невелико, и, вероятно, его можно отнести за счет недостоверности данных.

Отложив пока рассмотрение концепции стационарности как способа описания вселенной, посмотрим, как подобная теория может быть сформулирована математически. Необходимо ввести новое поле, которое

можно назвать С-полем. Это поле действует на частицу (или частицы) в момент ее (их) возникновения. Можно представить себе частицу как линию в четырехмерном пространстве-времени. Возникновение частицы представляется началом, а исчезновение ее — концом линии, как на рис. 7. Понятия рождения и уничтожения частицы можно обратить, поменяв на-

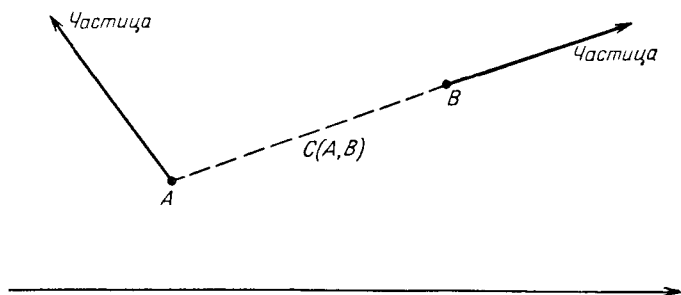


Рис. 7. Диаграмма рождения и гибели частиц в четырехмерном пространстве — времени.

правление времени t . Тогда становится очевидным, что я не выделяю возникновение частицы как нечто, противоположное аннигиляции, а скорее подчеркиваю, что у линий, представляющих частицы, могут быть концевые точки. В этих точках действует С-поле. Связь между концевыми точками частиц A и B на рис. 7 обозначена как $C(A, B)$.

С-поле распространяется в пространстве — времени точно так же, как и все другие поля, удовлетворяющие волновому уравнению. Полное значение С-поля в произвольной точке X есть сумма вкладов от всех концевых точек, что схематически показано на рис. 8. Если это суммарное С-поле содержит достаточно энергии, то возможно, что в точке X появится новая частица (или частицы). Требования к энергии таковы, что энергия С-поля должна по меньшей мере соответствовать массе созданной частицы (или частиц). Импульс созданных частиц равен импульсу, переносимому С-полем, так что импульс и энергия в

процессе рождения (и, конечно, в соответствующем процессе аннигиляции) строго сохраняются.

Выразив все это математически, можно проанализировать следствия из рождения и аннигиляции материи. Простейший случай, который можно рассмотреть, это тот, в котором выполняются ограничения (1) и (2) на стр. 88. Эти ограничения приводят к единственному возможному решению. Оно имеет любопытную симметрию, изображенную на рис. 9. Это симметрия того

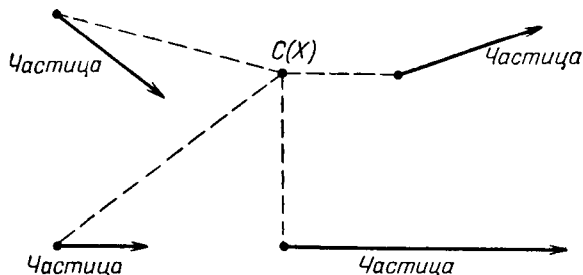


Рис. 8. К определению величины С-поля в произвольной точке.

рода, которая требуется для создания ситуации, уже обсуждавшейся в связи с рис. 6. Теперь мы встречаемся с добавочным свойством, состоящим в том, что концевые точки частиц также расположены симметрично относительно момента симметрии, который я вновь обозначил как $t=0$. Если принять за правило, что время всегда отсчитывается *в направлении от момента симметрии*, то вселенная расширяется при увеличении времени как вправо, так и влево на рис. 9. Если время отсчитывать таким способом, то частицы только создаются. Однако если считать, что время возрастает слева направо по обе стороны от $t=0$, то слева от $t=0$ вселенная сжимается и частицы аннигилируют, тогда как справа от $t=0$ вселенная расширяется и частицы создаются. Эти утверждения обращаются, если мы будем отсчитывать время справа налево.

В каком направлении во времени движется свет? Нарликар и я исследовали этот вопрос. Мы показали, что направления распространения, показанные на рис. 6, удовлетворяют решениям наших уравнений.

По-видимому, противоположное направление, т. е. движение к $t=0$, не удовлетворяет уравнениям, хотя мы еще не смогли найти этому полного доказательства.

Интересная особенность рис. 9 состоит в том, что, рассматривая рождение и аннигиляцию только частиц, а не античастиц, мы все же получаем двойной мир: один справа, а другой слева от $t=0$. Мое заявление, что мы имеем дело только с частицами, а не с античастицами, относится к случаю, когда мы отсчитываем время одинаково по обе стороны от $t=0$, т. е. слева направо. Но если время отсчитывать всегда от $t=0$, то при $t=0$ смысл понятий «частица» и «античастица» меняется. Если время отсчитывается от $t=0$, то мир справа от $t=0$ может быть миром вещества; мир слева от $t=0$ будет тогда миром антивещества. Это не просто игра словами. При условии, что направление распространения света и прочих полей также меняется между $t \rightarrow \infty$ и $-t \rightarrow \infty$, эксперименты в мире справа от $t=0$ дадут спиральность, противоположную той, которая получится слева от $t=0$ (например, в хорошо известном эксперименте с кобальтом-60).

Эта единственная космология, получающаяся из математических уравнений, включающих С-поле и учитывающих ограничения однородности и изотропности (1) и (2) на стр. 88 не является строго стационарной. Это видно из того, что в момент временной симметрии ($t=0$) вселенная не расширяется и не сжимается. Однако в высшей степени маловероятно, что наблюда-

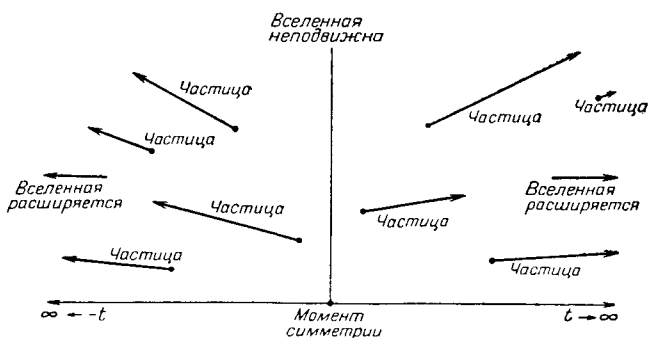


Рис. 9. Симметричная модель вселенной, построенная с учетом С-поля.

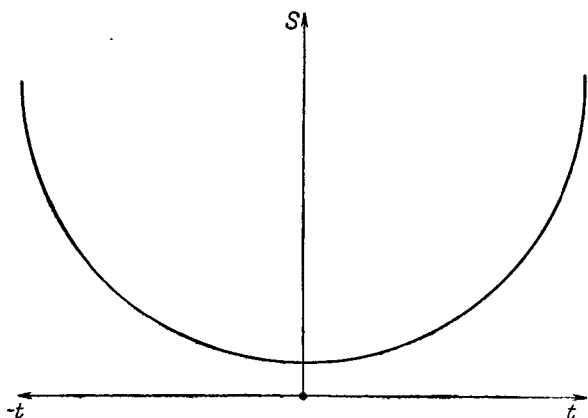


Рис. 10. Изменение масштаба со временем для модели, изображенной на рис. 9.

тель, живущий в произвольный момент времени, окажется близ точки временной симметрии. Он будет жить или далеко вправо от этой точки ($t \rightarrow \infty$) или далеко влево ($-t \rightarrow \infty$). А решение уравнений в точках, лежащих далеко вправо или далеко влево, — это решение стационарной космологии. Например, плотность вещества в пространстве стремится сохранять стационарное значение. Масштаб S меняется по кривой, имеющей вид, изображенный на рис. 10.

Хотя при перечисленных условиях эта космология является единственно возможной, она содержит неопределенность, важность которой выяснится в следующей главе. Теория основывается на решающем постулате о связи S -поля с концевыми точками частиц. Поскольку эта связь *постулирована*, мы не знаем, насколько она сильна. Она может быть нулевой, и в этом случае мы возвратились бы к прежним теориям, обсуждавшимся в этой главе. Однако при условии, что эта связь не нулевая, мы приходим к только что описанной теории. Сила связи определяется одним числом, которое мы обозначим f . Это число определяет плотность вещества: плотность для больших t или больших $-t$ просто пропорциональна f . Единицы измерения можно выбрать так, что плотность, обозначаемая через ρ , будет точно равна f для больших t

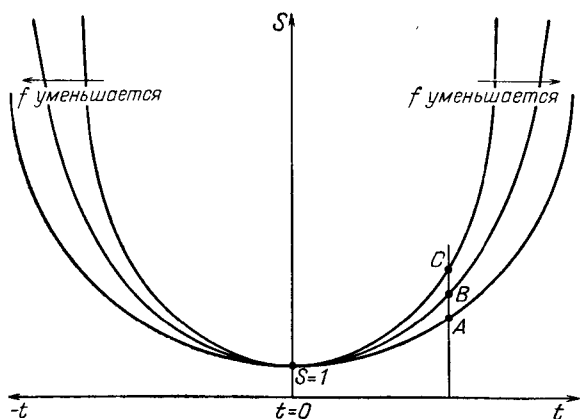


Рис. 11. То же, что на рис. 10, при разных значениях f .

или $-t$ ($\rho \rightarrow f$ при $|t| \rightarrow \infty$). Тогда плотность при $t=0$ равна $f/2$. Таким образом, плотность в разное время не строго одинакова. Она сохраняет стационарное значение, лишь когда мы находимся вдали от точки временной симметрии. Однако плотность меняется только между $f/2$ и f и не подвержена очень большим колебаниям, как в других космологиях, в которых ρ обратно пропорциональна кубу S ($\rho \sim S^{-3}$).

Как я уже сказал, мы а priori не знаем величины f . Естественно попытаться определить f , исходя из наблюдений. Это было сделано следующим образом. Вертикальный масштаб на рис. 10 также зависит от f . Принимая разные значения f , мы получим различные кривые (рис. 11). Все кривые построены так, что при $t=0$ они дают одинаковое значение S . Мы вправе это сделать, потому что S , как вы помните, это просто масштаб решетки и мы всегда можем выбрать единицу длины так, что S будет иметь любое определенное значение в какой-либо выбранный момент времени, скажем $S=1$ при $t=0$, как на рис. 11. Затем зафиксируем определенный момент времени и проведем для этого момента вертикальную линию. Линия пересечет различные кривые S в точках $A, B, C \dots$ и т. д. Из простого рассмотрения рис. 11 видно, что наклоны кривых S в этих точках различны. На-

клон кривой S при наблюдениях далеких галактик проявляется следующим образом.

Вернемся к рис. 1 на стр. 27. Вы помните, что кривые, изображенные на этом рисунке, представляют собой предсказанную зависимость красного смещения спектральных линий от расстояния. Точнее,

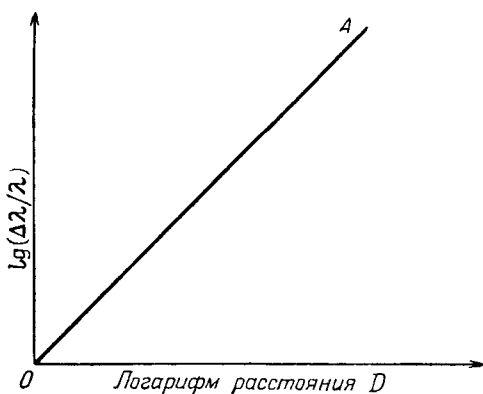


Рис. 12. Зависимость логарифма красного смещения от логарифма расстояния.

по оси ординат отложен логарифм красного смещения $\Delta\lambda/\lambda$, а по оси абсцисс — величина, зависящая от логарифма расстояния, как на рис. 12. Если не рассматривать очень больших расстояний, предсказанная кривая на рис. 12 изобразится прямой OA с наклоном 45° . Можно, однако, нарисовать бесконечное число линий, параллельных OA . Несколько таких линий показано на рис. 13. Какую из этих линий нужно выбрать, исходя из теории? Ответ зависит от наклона кривой S на рис. 11, а это в свою очередь зависит от выбираемой нами величины постоянной связи f . Но f нам неизвестна, так что мы должны обратить процедуру сравнения теории с наблюдениями. Мы должны начать с результатов наблюдений для близких галактик и посмотреть, на какую из семейства параллельных линий они ложатся. На рис. 13 в качестве иллюстрации показано, что галактики попадают на четвертую линию. Теперь мы видим, какой наклон кривой S необходим, чтобы получить чет-

вертующую линию и, наконец, получаем соответствующее значение f . Именно такая процедура была применена для определения численных характеристик теории. В следующей главе я опишу совершенно иной метод определения величины f .

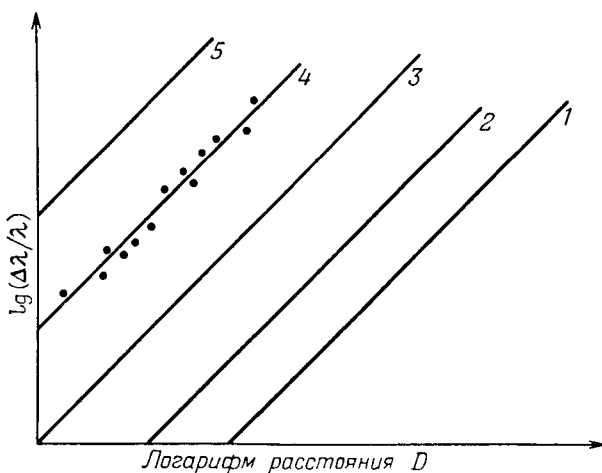


Рис. 13. То же, что на рис. 12, при разных значениях f .

Нам остается привести некоторые цифры. При f , определенном только что описанным способом, плотность вещества в пространстве составляет $\sim 10^{-29}$ г/см³. Это более чем в 10 раз превышает плотность, которая получилась бы, если бы все вещество галактик было равномерно распределено в пространстве. Следовательно теория требует, чтобы большая часть вещества вселенной была сосредоточена не в наблюдаемых галактиках. Это наводит на мысль, что во внегалактическом пространстве может существовать достаточно вещества для образования новых галактик.

Я уже отмечал ранее, что величину, отложенную по вертикали на рис. 1, можно интерпретировать как скорость лишь с некоторой осторожностью. В действительности мы измеряем лишь красное смещение спектральных линий, схематически показанное на рис. 14. На нем изображены пять линий a, b, c, d, e с измеренными в лаборатории длинами волн $\lambda_a, \lambda_b,$

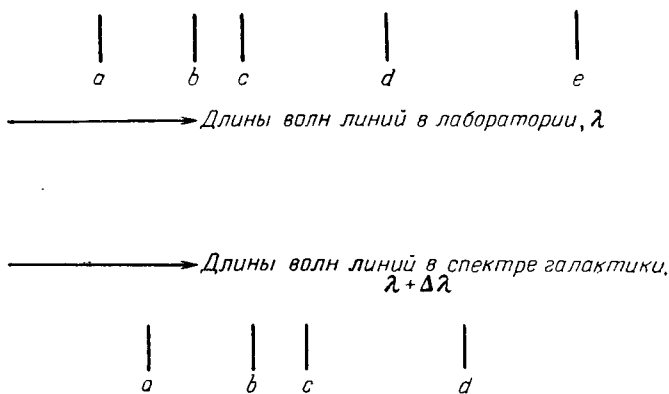


Рис. 14. Красное смещение спектральных линий.

$\lambda_c, \lambda_d, \lambda_e$. Те же пять линий появляются и в спектре галактики, но теперь их длины волн равны $\lambda_a + \Delta\lambda_a, \lambda_b + \Delta\lambda_b, \lambda_c + \Delta\lambda_c, \lambda_d + \Delta\lambda_d, \lambda_e + \Delta\lambda_e$. Откуда мы знаем, что это те же самые линии? Потому что отношения их длин волн одинаковы:

$$(\lambda_a + \Delta\lambda_a) : (\lambda_b + \Delta\lambda_b) : (\lambda_c + \Delta\lambda_c) : (\lambda_d + \Delta\lambda_d) : (\lambda_e + \Delta\lambda_e) = \\ = \lambda_a : \lambda_b : \lambda_c : \lambda_d : \lambda_e,$$

т. е.

$$\frac{\Delta\lambda_a}{\lambda_a} = \frac{\Delta\lambda_b}{\lambda_b} = \frac{\Delta\lambda_c}{\lambda_c} = \frac{\Delta\lambda_d}{\lambda_d} = \frac{\Delta\lambda_e}{\lambda_e} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda}.$$

Именно эта величина $\Delta\lambda/\lambda$ и отложена на предыдущих рисунках. Это то, что мы получаем из наблюдений. Измерения скорости мы не производили. Откуда же тогда появляется скорость? Почему мы часто говорим о «скоростях удаления» галактик?

В лаборатории было обнаружено, что длины волн спектральных линий в излучении, приходящем от удаляющегося объекта, увеличиваются и $\Delta\lambda/\lambda$ для всех линий одинаково, точно так же, как для галактик. Когда мы говорим о скорости галактики, мы подразумеваем скорость лабораторного источника света, при которой $\Delta\lambda/\lambda$ было бы таким же, какое наблюдается у этой галактики.

Зависимость между $\Delta\lambda/\lambda$ и скоростью для лабораторного источника света показана на рис. 15.

В начале кривая идет под углом 45° , но затем, при увеличении скорости, поднимается более круто, так что $\Delta\lambda/\lambda \rightarrow \infty$ по мере приближения к скорости света. Такое поведение кривой вызывает настоящую неразбериху, если при больших $\Delta\lambda/\lambda$ мы будем продолжать

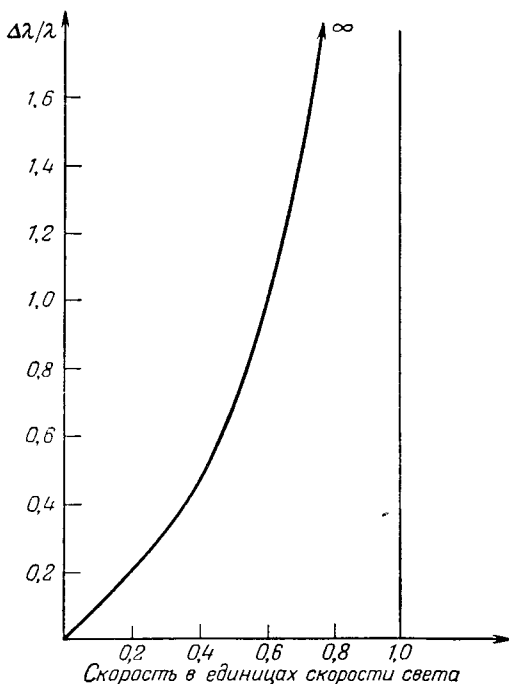


Рис. 15. Зависимость между $\Delta\lambda/\lambda$ и скоростью для лабораторного источника света или космологии $+ 1/2$.

истолковывать эту величину как скорость галактики. Пока мы остаемся на 45-градусном участке кривой на рис. 15, совершенно несущественно, говорим ли мы о действительно наблюдаемой величине $\Delta\lambda/\lambda$ или эквивалентной лабораторной скорости. Но когда $\Delta\lambda/\lambda$ приближается к бесконечности, ничего, кроме путаницы, не получается. Лучше придерживаться зависимости между $\Delta\lambda/\lambda$ и расстоянием, как на рис. 13. Прямолинейная зависимость между $\lg(\Delta\lambda/\lambda)$ и $\lg D$

(где D — расстояние), изображенная на рис. 13, относится только к близким галактикам, т. е. к галактикам, для которых $\Delta\lambda/\lambda$ много меньше единицы. Как же ведет себя кривая, когда $\Delta\lambda/\lambda$ становится большим?

Ответ на этот интересный вопрос зависит от того, с какой космологией мы имеем дело. Когда $\Delta\lambda/\lambda$ мало, все космологии дают на рис. 13 линию, идущую под углом 45° . Различия возникают, когда $\Delta\lambda/\lambda$ велико, что уже было продемонстрировано на рис. 1 (стр. 27). На рис. 16 я изобразил зависимость $\Delta\lambda/\lambda$ от расстояния для стационарной космологии (т. е. t не вблизи момента временной симметрии), а также зависимость для космологии $+1/2$. Последняя зависимость поясняет ситуацию, которая возникает для обсуждавшихся ранее в этой главе космологий. Космология $+1/2$ — это космология Эйнштейна и де Ситтера.

Прежде чем обсуждать эти кривые, необходимо пояснить, что D — это *современное* расстояние. Предположим, что мы могли бы мгновенно измерить (например, линейкой) расстояние до галактики. Это и было бы D . Выясняется любопытное обстоятельство: если кривая для стационарной теории идет под углом 45° до бесконечности, то для космологии $+1/2$ красное смещение $\Delta\lambda/\lambda$ стремится к бесконечности при определенном конечном значении D . Галактики с D , большим этой величины, вообще не могут наблюдаться. Чем же определяется это значение D ? Современной эпохой. Наблюдатель, который нарисует подобную кривую в будущем, обнаружит, что 45 -градусный участок простирается на большее расстояние. Он обнаружит также, что подъем $\Delta\lambda/\lambda \rightarrow \infty$ происходит при большем D . Однако кривая для стационарной космологии при увеличении t останется такой же.

Кривая для космологии $+1/2$ имеет такую же форму, что и лабораторная зависимость красного смещения от скорости (см. рис. 15). Если угодно, это сходство можно интерпретировать чисто формально, говоря, что скорость удаления галактики близ предельного значения D для космологии $+1/2$ приближается к скорости света. Но для стационарной теории такой интерпретации дать нельзя.

Вновь следует подчеркнуть, что все это относится к практически имеющей место ситуации, т. е. к свету, который мы сейчас улавливаем нашими реальными телескопами. Космология $+1/2$ утверждает, что современные наблюдения по необходимости ограни-

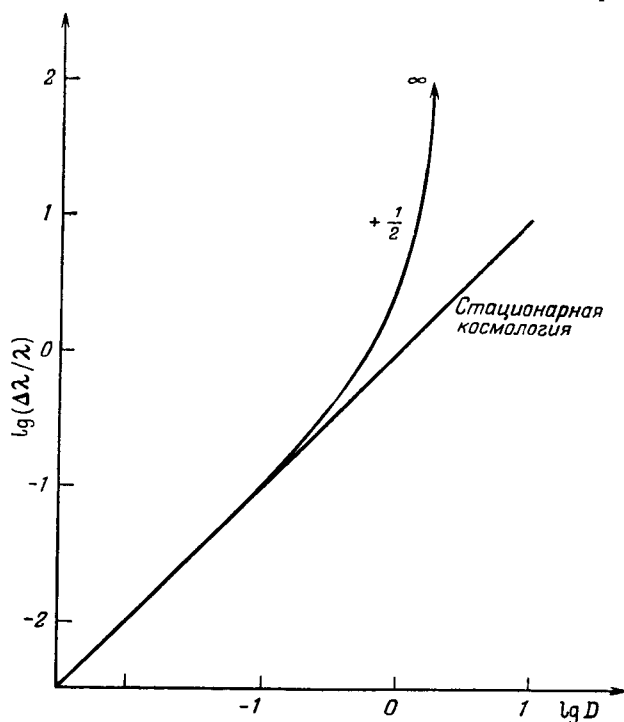


Рис. 16. Зависимость красного смещения $\Delta\lambda/\lambda$ от современного расстояния D для стационарной космологии и космологии $+1/2$. Масштаб D подобран так, что $\Delta\lambda/\lambda = D$ при малых D .

чены светом от галактик, расстояния до которых в настоящий момент не превышают определенного максимального значения. Стационарная теория позволяет получить свет от галактик, находящихся на произвольно большом расстоянии D . Предположим теперь, что мы ставим вопрос совершенно по-иному. Пусть нас интересует свет, излученный галактиками сегодня, который дойдет до наблюдателя в нашей

Галактике в какой-то момент в будущем. Какова зависимость между современным D и моментом в будущем T , когда этот свет дойдет до нас? За $T=0$ принят настоящий момент. Результаты для двух космологий показаны на рис. 17. Теперь возникает в точности обратная ситуация.

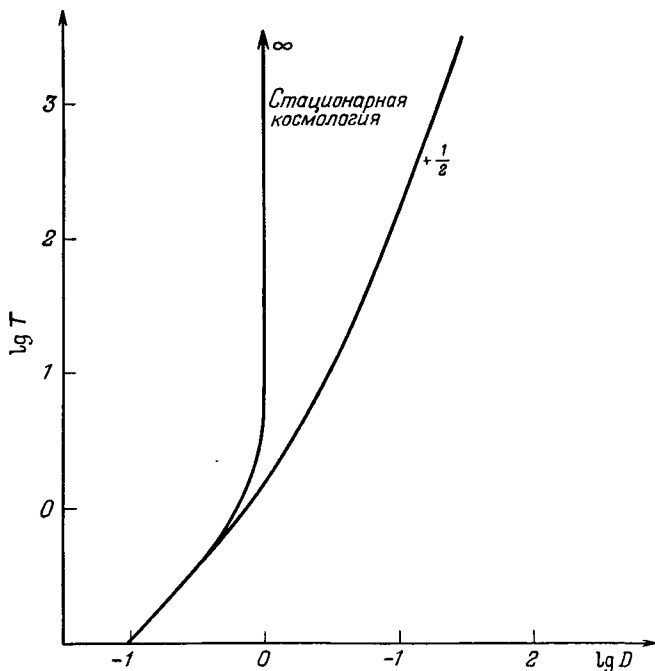


Рис. 17. Зависимость времени T от современного расстояния D для стационарной космологии и космологии $+1/2$. Единицы D и T выбраны так, что $\Delta\lambda/\lambda = D = T$. Величина D выражена в единицах D_{\max} .

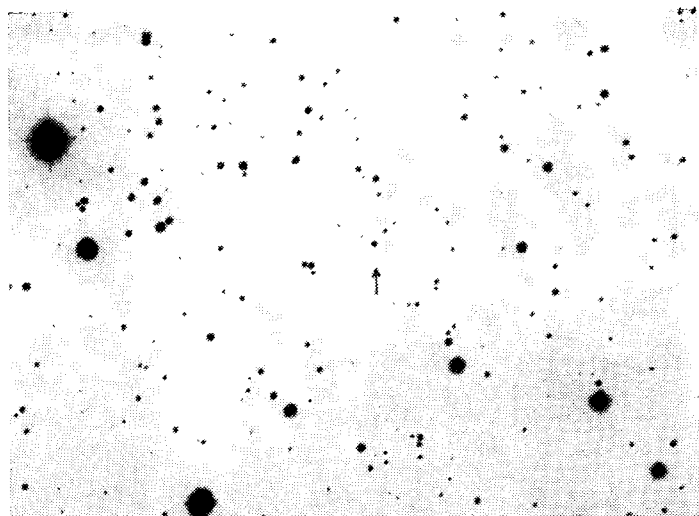
Максимальное расстояние существует для стационарной теории, но не существует для космологии $+1/2$. По стационарной теории, сколько бы ни ждал наш наблюдатель в Галактике, он никогда не сможет наблюдать сигналов, излученных в *настоящее время* галактикой, современное расстояние до которой больше D_{\max} . При величине f , определенной описанным

выше путем, D_{\max} оказывается равным приблизительно 10 000 миллионов световых лет, или 10^{28} см. Это предельное расстояние часто называется «радиусом наблюдаемой вселенной». Массу внутри наблюдаемой вселенной легко получить, умножив $4\pi D_{\max}^3/3$ на плотность, равную $\sim 10^{-29}$ г/см³. Эта масса составляет $\sim 10^{56}$ г, что в 10^{23} раз больше массы Солнца. Она часто называется «массой наблюдаемой вселенной». Однако важно понять, что все это относится к будущему.

Если ясно отдавать себе отчет, что рис. 16 и 17 относятся к совершенно разным проблемам (рис. 16 — к свету, который был излучен в прошлом и доходит до нас сейчас, а рис. 17 — к будущему), то становится очевидным, что можно наблюдать галактики или иные объекты, лежащие сейчас за пределами радиуса наблюдаемой вселенной; но испущенные ими в будущем сигналы никогда не будут получены — все это, конечно, в рамках стационарной теории. Предположим, что мы возьмем расстояние D_{\max} из рис. 17 и найдем соответствующее ему значение $\Delta\lambda/\lambda$ из рис. 16. Тогда мы узнаем, что любой объект, для которого красное смещение больше этой величины, *сейчас* лежит вне наблюдаемой вселенной. Оказывается, что соответствующее значение $\Delta\lambda/\lambda$ поразительно просто: $\Delta\lambda/\lambda = 1$.

Квезары с $\Delta\lambda/\lambda > 1$ недавно наблюдал Шмидт. Если красное смещение имеет космологическое происхождение, то эти объекты лежат дальше D_{\max} . Один из первых исследованных Шмидтом объектов, квазар 3С 147, показан на фото XXXI. У него $\Delta\lambda/\lambda = 0,545$, так что, если красное смещение имеет космологическую природу, у этого объекта современное значение D равно $0,545D_{\max}$.

Заканчивая эту главу, я хотел бы вернуться к пункту (в) на стр. 93. Он касается фактов, которые я считаю более «фундаментальными», чем непосредственные эмпирические факты, такие, как число звезд в отдельной галактике. В качестве примера фундаментального факта я привел известную всем по опыту асимметрию времени. Другое коренное свойство вселенной молчаливо подразумевалось во всех предыдущих рассуждениях, когда мы пользовались по-



Ф о т о ХХХI. Положение радиоисточника ЗС 147 указано стрелкой.

нятием одновременности. Говоря, что расстояние D — это расстояние в настоящий момент, мы подразумеваем, что «настоящий момент» имеет физический смысл на всем протяжении от нас до рассматриваемой галактики, вдоль всей линии, к которой мы прикладываем нашу воображаемую линейку. Одновременности всегда можно придать чисто геометрический смысл простым выбором координат. Оказывается, одновременность неожиданно играет решающую физическую роль во всей космологии.

Нетрудно видеть, что мы вводим в физическую картину одновременность при наложении ограничения (1) на стр. 88. Концепция неразличимости друг от друга разных мест подразумевает одновременность, ибо в нестатической вселенной различные места следует рассматривать *в одно и то же время*. Если время различно, то ограничение (1) не обязательно должно быть действительным для наблюдателей в разных местах. Удивительно то, что это ограничение действует. Оно приводит к согласующейся с наблюдениями линейной зависимости между $\Delta\lambda/\lambda$ и D для

не очень удаленных галактик. Это согласие я расценил как наиболее уверенное достижение космологии. Теперь мы видим, что это достижение основывается на том, что одновременность имеет физический смысл. Время и пространство играют почти такую же роль, что и в ньютоновской физике. Можно сказать, что причина, по которой ньютоновская физика дает вполне удовлетворительное описание мира, состоит в том, что она преимущественно имеет дело с явлениями, определяемыми космологической ситуацией.

Теория относительности утверждает, что для физических законов не может иметь значения выбор системы координат — системы измерения времени и пространства. Законы физики действуют совершенно одинаково в любой из бесконечного числа возможных координатных систем. Как же тогда физические законы вообще могут привести к одной выделенной системе координат и иметь в ней особый смысл, с чем мы, по-видимому, встречаемся в космологии? Теория относительности говорит о том, что поведение физической системы одинаково в любой из бесконечного числа возможных систем пространственно-временных координат. Физическая система будет «делать то же самое», независимо от координат, которые мы случайно выбрали для расчетов. Однако теория относительности никак не утверждает того, что и расчеты будут одинаково трудоемки во всех выбранных нами системах координат. В одной системе расчеты могут быть сравнительно просты, а в других — много сложнее. Именно такова ситуация в космологии. Например, расчеты, приводящие к рис. 1, могли бы быть проведены и в других системах пространственно-временных координат, и основные физические выводы были бы теми же самыми, но получить их было бы гораздо труднее.

Вы спросите, почему расчеты в одной системе легче, чем в других? Почему ограничение (1) становится особенно легким для понимания и изящным по форме в сходной с ньютоновской пространственно-временной системе, которой мы пользовались во всех предыдущих рассуждениях? Теория относительности не отвечает на этот вопрос, и в космологии обычно предполагается, что эта простота является отражением

того, каким путем возникала вселенная. Назад к первопричинам, к философии, против которой я ранее столь энергично возражал, к философии, которую Бонди выразил в фразе: «Вселенная такова, какая она есть, потому что она была такой, какой она была!»

Если мы оставим первопричины, то как же тогда понять особое значение системы времени, применявшейся во всех предыдущих рассуждениях? Положим $t=C$. Здесь C -поле есть физическая величина. В каждой точке пространства-времени C -поле имеет определенное численное значение, совершенно независимое от выбора системы координат. Полагая $t=C$, мы в неявной форме устанавливаем координату времени и даем определение тому, что мы подразумеваем под одновременностью. Время одинаково во всех точках, в которых C имеет одинаковое значение. Определение одновременности получается теперь физическим, а не геометрическим. В описанной выше стационарной теории соотношение $t=C$ действительно выполняется.

И последний вопрос: почему при таком выборе координаты времени распределение вещества во вселенной описывается проще? Ранее я говорил, что энергия и импульс возникающих частиц равны энергии и импульсу C -поля. Импульс C -поля имеет направление, перпендикулярное поверхности постоянного C . Следовательно, частицы возникают с вектором импульса-энергии, перпендикулярным поверхности постоянного C , которая, по нашему определению t , есть также и поверхность постоянного времени. Именно это свойство создает простоту описания.

5. *Радикальное изменение концепции стационарной вселенной*

В большей части рассуждений в предыдущей главе мы исходили из следующих ограничений.

1. Во вселенной не должно быть привилегированного положения, не должно быть «центра», т. е. места, из которого она выглядела бы иначе, чем из любого другого места.

2. Из положения, в котором мы находимся, вселенная должна выглядеть во всех направлениях одинаково.

Мы считали, что эти ограничения справедливы в *больших масштабах*, т. е. в масштабах, много больших, чем галактики, которые рассматривались просто как «частицы» пространственной решетки. Мы занимались исключительно свойствами этой крупномасштабной решетки.

Стевидно, эти ограничения в малых масштабах неприменимы. Посмотрев на Солнце, мы убеждаемся, что в этом направлении вселенная выглядит совсем иначе, чем во всех остальных. Сразу же возникает два вопроса:

Как примирить крупномасштабную однородность и изотропность с мелкомасштабной неоднородностью и неизотропностью?

Каков смысл понятия «масштаб», в частности, что значит «крупномасштабный»?

Эти вопросы затрагивают еще более глубокие аспекты космологии, и ответы на них пока только предположительные. Даже попытки ответить на второй вопрос, опираясь на непосредственные наблюдения, не приводят к вполне четким выводам. «Крупномасштабный», несомненно, означает «много больший размер галактики». Считается, что таким может быть расстояние порядка 100 миллионов световых лет, составляющее около 1% максимального доступного для

современных наблюдений расстояния. Только в масштабах больше этого применимы представления об однородности и изотропности. Если говорить об *объеме*, то область, которую уже нельзя рассматривать как однородную и изотропную, составляет приблизительно одну миллионную полного объема наблюдаемой вселенной.

Ортодоксальные космологии, описанные в первой части предыдущей главы, не дают удовлетворительного ответа на первый из поставленных выше вопросов. Однако космология Эйнштейна — де Ситтера, которую мы называли «космологией $+1/2$ », обладает преимуществом в другом отношении. Небольшие первоначальные неоднородности со временем становятся менее заметными, и в этой теории утверждается, что наблюдаемые неоднородности — галактики и скопления галактик — представляют собой изначальные отклонения от однородности и изотропности. Вновь мы возвращаемся к первопричинам — вселенная такова, какая она есть, потому что она была такой, какой она была.

Как только мы отбрасываем ограничения (1) и (2), космология, включающая С-поле, больше не может быть строго стационарной. При переходе к неоднородности и неизотропности математические уравнения теории сохраняются *без каких-либо изменений*. Однако решения этих уравнений становятся более сложными, и разумнее изучить их свойства, рассматривая относительно простые случаи, чем искать их решение в самом общем виде. Естественно рассмотреть случай сферически симметричного тела, окруженного однородной и изотропной вселенной. Если это тело удалить, то мы вернемся к ситуации, рассмотренной в предыдущей главе. Посмотрим теперь, как влияет присутствие этого тела на решение наших уравнений.

Рассмотрим сначала устойчивость тела в отсутствие С-поля. Тяготение стремится вызвать сжатие этого тела, т. е. коллапс, который непременно произойдет, если только гравитационные силы каким-то образом не уравновешены. Внутри звезды сила тяжести уравновешена силами давления. Внутри тела с массой, значительно больше звездной, порядка

$10^6 M_{\odot}$, сила тяжести все еще может быть уравновешена давлением, при условии, что тело достаточно «рассредоточено», т. е. при достаточно большом радиусе. Однако по мере уменьшения радиуса достигается рубеж, когда тело становится неустойчивым по отношению к коллапсу. Этот критический радиус примерно в 300 раз больше «гравитационного радиуса» тела; смысл последнего термина я должен разъяснить более подробно.

По ньютоновской теории первоначально покоившаяся частица, падая свободно с большого расстояния на поверхность тела с массой M и радиусом R , достигает ее со скоростью $(2GM/R)^{1/2}$. Если в формулу подставить массу Земли ($6 \cdot 10^{27}$ г) и ее радиус ($6 \cdot 10^8$ см), а также численное значение гравитационной постоянной G , мы получим ~ 11 км/сек. Это хорошо известная «скорость ускользания» с Земли. Она весьма важна для осуществления полетов на Луну; обращая задачу, можно сказать, что это также и та скорость, с которой частица должна быть выброшена с Земли, чтобы *удалиться* от нее на большое расстояние. Уравнения всегда лучше записывать в «безразмерном виде». Вместо того чтобы писать $V = (2GM/R)^{1/2}$, где V — скорость ускользания, мы, очевидно, можем записать

$$\frac{V}{c} = \frac{1}{c} \left(\frac{2GM}{R} \right)^{1/2} = \left(\frac{2GM}{c^2 R} \right)^{1/2},$$

где c — скорость света. Величина V/c , будучи отношением двух скоростей, теперь является безразмерным числом. Для Земли она мала, приблизительно $3 \cdot 10^{-5}$; для Солнца она составляет около $2 \cdot 10^{-3}$. Очевидно, для любой данной массы M отношение V/c увеличивается с уменьшением R , и при достаточно малом R оно достигает единицы. Это происходит при

$$R = 2GM/c^2.$$

Это и есть гравитационный радиус для массы M . Для Земли гравитационный радиус равен ~ 1 см, для Солнца ~ 3 км, для объекта с массой $10^6 M_{\odot}$ он составляет $3 \cdot 10^{11}$ см, примерно в 4 раза больше фактического радиуса Солнца.

При значении R , меньшем гравитационного радиуса, формула дает для V/c величину, большую единицы, но в этом случае она совершенно непригодна, ибо ньютоновская теория, на которой она основана, тут уже не применима даже приближенно. Расчеты должны проводиться в соответствии с общей теорией относительности Эйнштейна. С какого рода задачи мы имеем дело, определяется величиной $2GM/c^2R$. Если эта величина много меньше единицы, то гравитационное поле слабо, ньютоновская теория является хорошим приближением и локальная геометрия мало отличается от евклидовой. Но по мере того как $2GM/c^2R \rightarrow 1$ гравитационное поле становится сильным, и ни ньютоновская теория, ни геометрия Евклида даже отдаленно неприменимы к возникающей ситуации.

Вернемся теперь к неустойчивости нашего массивного тела. Я сказал, что неустойчивость наступает, когда его радиус составляет примерно 300 гравитационных радиусов. При этом

$$\frac{2GM}{c^2R} = \frac{1}{300}$$

и поле достаточно слабо. Когда происходит коллапс, $2GM/c^2R$ увеличивается и мы переходим к случаю сильного поля. Это явление называется «гравитационным коллапсом». Но прежде чем приступить к рассмотрению случая сильного поля, нужно рассмотреть возможность катастрофического высвобождения ядерной энергии внутри тела. Внезапный коллапс резко поднимет внутреннюю температуру, и ядерные процессы могут необычайно ускориться. Положение оказывается таким, что при не слишком большой массе катастрофическое высвобождение ядерной энергии может приостановить коллапс и привести к настоящему взрыву тела. Но даже ядерные процессы недостаточно сильны, чтобы остановить коллапс, когда масса в 10^6 раз превышает массу Солнца, а мы рассматриваем сейчас именно этот случай. Что происходит при стремительном сжатии такого объекта? Каков конечный результат коллапса? Объект *переходит границы* гравитационного радиуса и сжимается до «особой точки», до «сингулярности». С точки

зрения наблюдателя, движущегося вместе с телом, это происходит за конечный промежуток времени. Эта сингулярность имеет те же математические свойства, что и сингулярность, появляющаяся в ортодоксальных космологиях, которые обсуждались в начале предыдущей главы.

Мы столкнулись теперь с тревожной ситуацией. Пока дело касалось космологии, всегда можно было считать, что происхождение вселенной — отвлеченный вопрос, относящийся к далекому прошлому, и нам следует заняться более неотложными проблемами. Однако теперь ситуация изменилась. Снимите давление, поддерживающее Землю изнутри. Всего лишь за пять минут, *по вашим часам*, вы попадете в сингулярность. Конечно, в случае Земли физически невозможно убрать поддерживающее давление. Но это не меняет логики вещей, ибо у массивных объектов *поддерживающее давление отсутствует* и для них положение дел реально соответствует тому, которое мы предположили для Земли. Если бы такие массивные объекты в природе не существовали, мы имели бы дело лишь с логической задачей, но ее превращает в практическую проблему осознание того факта, что такие объекты, с массами до $10^8 M_{\odot}$, по-видимому, действительно существуют в мощных радиогалактиках и квазизвездных источниках.

Нарликар и я нашли, что проблема решительным образом меняется, если в уравнения ввести S -поле. Вместо того чтобы сжаться до сингулярности, объект «отскакивает» от особой точки и начинает колебаться. Величина M , использованная для определения гравитационного радиуса, является мерой полной энергии объекта. Основной вклад в суммарную энергию вносит масса вещества согласно обычному соотношению $E = Mc^2$. Но теперь мы должны добавить вклад энергии S -поля, а она входит со знаком минус, так что M уменьшается. Соответственно уменьшается и гравитационный радиус. Хотя перед тем, как происходит «отскок», R становится небольшим, в противоположность обычной теории тело не попадает в пределы истинного гравитационного радиуса. Различие возникает из-за отрицательного знака вклада, вносимого S -полем,

Существует также и полностью статическое решение для объекта, в котором обычные гравитационные силы уравновешены действием С-поля. В самом деле, статическое решение является частным случаем решения с колебаниями. Представим себе объект, колеблющийся между минимальным радиусом R_1 и максимальным R_2 , и будем постепенно уменьшать разность между R_1 и R_2 , пока они не совпадут. Гравитационный параметр $2GM/c^2R$ в статическом решении может оказаться очень близким к единице, а это означает, что гравитационное поле будет сильным. В случае колебаний $2GM/c^2R$ тоже приближается к единице. Как это влияет на рождение вещества в окрестностях такого объекта?

С-поле, падающее на тело, ведет себя так же, как световая волна: проходя через гравитационное поле тела, оно изменяет свою энергию. Мы можем рассмотреть две сходные проблемы:

а) Световой квант падает с большого расстояния на тело массы M и радиуса R . Вблизи объекта квант вызывает образование электронно-позитронных пар.

б) С-поле падает с большого расстояния на то же самое тело. Вблизи тела оно вызывает образование по меньшей мере одного бариона и, возможно, электронов или нейтрино.

В случае (а) энергия образовавшейся электронно-позитронной пары равна начальной энергии кванта, умноженной на $[1 - (2GM/c^2R)]^{-1/2}$. Этот множитель может быть велик, ибо $2GM/c^2R$ близко к единице.

В случае (б) ровно во столько же раз увеличивается энергия бариона (и сопровождающих его частиц) по сравнению с энергией порождающего поля на большом расстоянии от тела. В то время как частицы, возникающие на большом расстоянии, по-видимому, будут двигаться медленно, частицы, возникающие в сильном гравитационном поле, — для того чтобы они обладали необходимой энергией, — должны двигаться со скоростью, близкой к скорости света. Другими словами, они должны быть *космическими лучами*. Итак, поскольку космические лучи связаны с сильными гравитационными полями, массивными объектами и, по-видимому, с сильно сжимающимися сверхновыми, естественно предположить, что космические

лучи и возникающее в таких полях вещество — это одно и то же. Возникновение космических лучей более вероятно в случае колебаний, чем в статическом случае.

Для получения все более и более высоких энергий $2GM/c^2R$ должно быть все ближе и ближе к единице. Это означает, что чем выше энергия, тем меньше становится объем, в котором может происходить рождение вещества. Ситуация схематически изображена

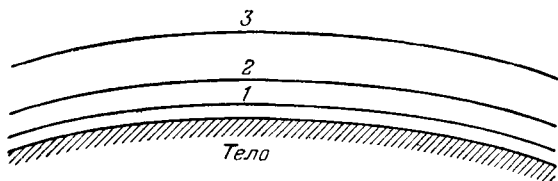


Рис. 18. Относительная величина объемов, в которых возникают частицы различных энергий.

на рис. 18. Показаны части трех сфер 1, 2, 3., концентрических с телом. На сфере 1 множитель для энергии $[1 - (2GM/c^2R)]^{-1/2}$ вдвое больше, чем на сфере 2, а на сфере 2 — вдвое больше, чем на сфере 3... Расчет, опирающийся на величины соответствующих объемов (а также учитывающий влияние гравитационного поля на промежутки времени, в течение которого происходит возникновение вещества), приводит к тому, что число частиц космических лучей, образовавшихся в каком-либо интервале энергии, например от E до $2E$, должно быть обратно пропорционально E^3 . Это настолько хорошо согласуется с наблюдаемым распределением по энергиям космических лучей в окрестностях Земли, а также с распределением энергии, которое электроны космических лучей должны иметь почти во всех мощных источниках радиоизлучения, что, очевидно, эти идеи заслуживают серьезного рассмотрения.

Однако возникают большие трудности, как только мы попытаемся сопоставить предсказанную скорость образования частиц близ массивных объектов с наблюдаемым выходом энергии у радиоисточников. Если принимать значение постоянной связи f , определенное, как описано в предыдущей главе, то пред-

сказываемая скорость образования частиц получается слишком малой. Напомним, что f определено не на основе каких-либо теоретических соображений, а путем эмпирического подбора по наблюдаемой скорости расширения вселенной. Предположим теперь, что мы изменили f так, чтобы согласовать его не с расширением вселенной, а с требованиями, которые налагают источники космических лучей. Какого рода космология при этом получится? Продолжает существовать стационарное решение, но оно уже не соответствует ничему похожему на наблюдаемую вселенную. Средняя плотность вещества, при соответствующем выборе единиц равная f , сильно меняется: от прежнего значения 10^{-29} г/см³ до гораздо большей величины порядка 10^{-8} г/см³. Радиус наблюдаемой вселенной сокращается с 10^{28} до 10^{18} см, а ее масса — от 10^{23} до 10^{13} M_{\odot} . Ясно, что мы живем совсем не в такой вселенной! Но любопытно, что масса наблюдаемой вселенной теперь получилась порядка той, которую имеет типичное скопление галактик. До сих пор никакого убедительного объяснения этой массе дано не было. Мы уже видели, что ортодоксальные космологии обязаны для объяснения существования галактик ввести «начальные возмущения», и эти возмущения подбираются так, чтобы получался правильный ответ; это выглядит довольно неубедительно. В прежней стационарной теории попытка объяснить образование групп галактик как конденсаций в разреженной среде с плотностью 10^{-29} г/см³ тоже не оказалась успешной. Теперь, когда мы видим, что типичная масса среднего скопления галактик является в теории как решающая фундаментальная величина, имеет смысл рассматривать ситуацию дальше.

До того как мы пришли к этим соображениям, Нарликар и я уже стали беспокоиться о локальной устойчивости стационарного решения — в рамках старой теории. Стационарное решение, несомненно, устойчиво к временным возмущениям, если придерживаться ограничений однородности и изотропности (1) и (2). Мы отказались от этих ограничений и стали рассматривать местные сгущения вещества — галактики и скопления галактик. Оказалось, что средняя скорость образования вещества скорее может

определяться массами, радиусами и числом местных сгущений, чем материей, распределенной во всем пространстве строго равномерно. Это может быть в том случае, если число сгущений не слишком велико. В противном случае, когда сгущений много, область возникновения вещества, связанная с одним сгущением, сливается с областями у соседних сгущений, и мы имеем практически однородное распределение. Возможно, что крупномасштабные стационарные условия поддерживаются совокупным действием ряда участков, каждый из которых вносит больший вклад, чем давал бы соответствующий объем в случае строгой однородности. Действительно, *всегда* существует стационарное решение, соответствующее *любому* распределению местных неоднородностей. Стационарные решения, соответствующие различным распределениям неоднородностей, отличаются тем, что они соответствуют различным эффективным значениям постоянной связи f .

Можно ожидать, что местные неоднородности будут меняться со временем. Их массы могут увеличиваться за счет порождения вещества. Расширение вселенной стремится понизить их плотность, если только неоднородности не делятся на части, и т. д. Поскольку изменения происходят достаточно медленно, всегда поддерживается стационарное состояние, соответствующее существующим в данный момент неоднородностям. Все происходит так, как если бы значение f медленно изменялось. Однако внезапные флуктуации в отдельных областях пространства могут вызвать значительные отклонения от соответствующего стационарного состояния. В исключительных случаях это выглядит так, как если бы возникновение вещества почти полностью прекратилось и f упало до нуля. Если это случится в области размером порядка миллиона световых лет, то возникнет флуктуация, которая разовьется в состояние, очень напоминающее наблюдаемую вселенную.

Если образование вещества в такой области прекратится, расширение будет происходить почти как в космологии Эйнштейна — де Ситтера, т. е. в космологии $+1/2$. Различия возникают из-за того, что область неустойчивости ограничена. Существует макси-

мальная степень расширения, которая может быть достигнута до того, как рассматриваемая область заполнится веществом из окружающих областей. Общий эффект будет состоять в том, что эта ограниченная область испытает ряд колебаний, так что масштаб S для этой области будет меняться по волнистой кривой, как на рис. 19, а не по гладкой кривой,

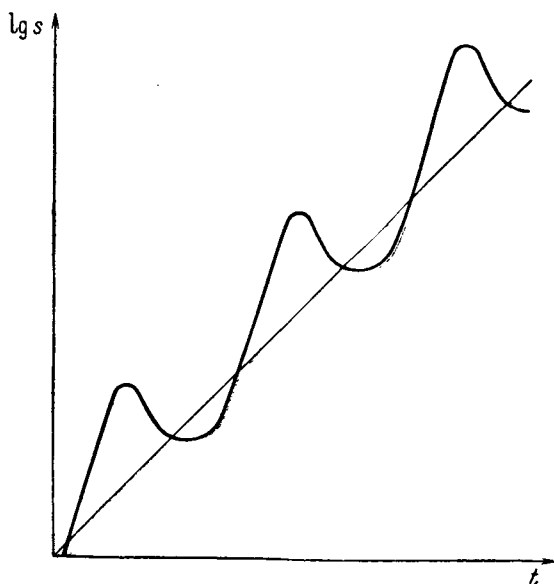


Рис. 19. Изменение масштаба со временем в области неустойчивости. Кривая S колеблется относительно прямой линии.

как было бы, если бы неустойчивость не развилась. Амплитуда колебаний зависит от размеров области: чем больше область неустойчивости, тем больше колебания.

Живем ли мы во флуктуации от стационарного состояния, которое существует при высокой плотности 10^{-8} г/см³? Началось ли расширение наблюдаемой вселенной с этой плотности и вернемся ли мы к ней в конечном счете? Живем ли мы в своего рода ограниченном пузыре низкой плотности? Данные, которыми мы располагаем, склоняют нас к положительному ответу

на эти вопросы. Рассмотрим сначала проблему конденсации галактик. Зависимость между S и t по Эйнштейну — де Ситтеру обладает тем важным свойством, что в любом месте вещество имеет минимальную энергию, необходимую для неограниченного расширения. Небольшой дефицит энергии в каком-либо месте приведет к тому, что вещество будет расширяться до каких-то определенных пределов, а затем наступит сжатие с образованием местной конденсации. В нашем случае дефицит энергии возникает в локальных неоднородностях, заключающих в себе избыточные концентрации вещества. Где бы ни существовало сгущение вещества, оно будет стремиться задержать расширение окружающего вещества, что ведет к образованию конденсации с первоначальным сгущением в ее центре. Такие неоднородности будут иметь массы меньшие, и, возможно, значительно меньшие, чем масса наблюдаемой вселенной для стационарного решения, которая в рассматриваемом случае составляет приблизительно $10^{13} M_{\odot}$. По размерам неоднородности будут меньше радиуса наблюдаемой вселенной, равного в этом случае 10^{18} см, т. е. одному световому году.

Причина, по которой конденсации должны иметь меньший масштаб, чем радиус наблюдаемой вселенной, поясняется на рис. 17. Рисунок показывает, что этот радиус является естественным пределом для передачи сигналов. События, происходящие на расстоянии, большем радиуса наблюдаемой вселенной, не могут влиять ни на что, происходящее в данной точке. Отдельная конденсация не может простираться дальше этого радиуса, ибо противоположные стороны конденсации перестали бы сообщаться друг с другом.

Можно определить количество вещества, которое центральное сгущение определенной массы будет удерживать от непрерывного расширения. Если потребовать, чтобы расширение прекращалось, когда размеры всей ограниченной системы достигнут масштабов галактики ($100\,000$ световых лет), тогда центральное сгущение с массой в $10^9 M_{\odot}$ будет удерживать полную массу в $10^{12} M_{\odot}$, а сгущение с массой в центре $10^7 M_{\odot}$ удержит примерно $3 \cdot 10^{10} M_{\odot}$. Предположим теперь, что вещество конденсируется в звезды. Каково

будет распределение яркости возникающего объекта в проекции на небесную сферу? Расчеты показывают, что, не считая центрального участка, поверхностная яркость будет падать обратно пропорционально расстоянию от центра в степени $5/3$, что согласуется с недавними наблюдениями нескольких почти сферических галактик, выполненными Лиллером. Здесь согласие с наблюдениями превосходное. Из теории вытекают также и другие свойства галактик, имеющих заметную эллиптичность, такие, как удивительное постоянство эллиптичности у контуров различных яркостей (изофот). Понятно также, почему в самом центре эллиптических галактик имеется массивное сгущение. По теории эти сгущения сосредоточены в областях, по размерам меньших 10^{18} см. Именно таковы сгущения, проявляющие себя как радиоисточники. Они обладают большой концентрацией вещества, ибо это остатки высокоплотного состояния вселенной, основного состояния, относительно которого происходят колебания, изображенные на рис. 19.

Ряд других выводов теории также хорошо согласуется с наблюдениями. По этой теории зависимость между $\Delta\lambda/\lambda$ и D будет такой же, как в космологии $+1/2$. Можно ожидать, что галактики попадут между кривыми 0 и $+1$ на рис. 1, и это, по-видимому, действительно так. Подсчеты числа радиоисточников, проведенные Райлом и Кларком, более не создают серьезных затруднений, как это было в теории однородной стационарной вселенной. И радиоисточники, рассматриваемые как остатки прежнего состояния вселенной, более не представляют загадки.

Мне кажется, что описанная выше картина образования галактик, которую дает эта теория, является достаточно убедительной. Если теория верна, то, может быть, удастся наконец совладать с этой до сих пор не разрешенной проблемой. То, что говорилось выше, относится только к эллиптическим галактикам. Ничто не может помешать конденсации вещества и на гораздо более поздних стадиях расширения, например в современную эпоху, если в межгалактической среде существуют соответствующие флуктуации давления. В гл. 3 указывалось, что в этом отношении важную роль могло бы сыграть давление космических

лучей. Эти последующие конденсации имеют существенно иные свойства, нежели описанные выше. До сих пор мы имели вещество, обладавшее первоначально высокой плотностью и приобретающее более низкую плотность при расширении, но дальнейшее расширение его задерживалось. Эволюция шла от высокой к значительно более низкой плотности. С другой стороны, более поздние конденсации идут в противоположном направлении — от низкой к высокой плотности. Сблзнительно отождествить второй случай с образованием спиральных галактик и с плоскими дисками, образующимися вокруг эллиптических систем. В гл. 1 мы видели, что имеется много указаний на то, что существовало два пути образования галактик. В частности наша Галактика, по-видимому, может быть двухкомпонентной системой. Кажется, мы приближаемся к пониманию причин существования двух составляющих. Эллиптические галактики — это простые системы, возникшие при расширении, остатками первоначальной высокой плотности в центре. Спиральные галактики — это результаты конденсации, в которой принимали участие частицы высоких энергий и магнитные поля.

Я хотел бы вернуться к роли S -поля в предотвращении сжатия объектов при коллапсе до сингулярности. Объект с массой, скажем, $10^7 M_{\odot}$ совершает «отскок» от особой точки за очень короткое время: по часам наблюдателя, находящегося на объекте, — всего за сотню секунд. Однако время, необходимое для такого отскока, может быть совсем иным с точки зрения удаленного наблюдателя, поскольку это время увеличивается в $[1 - (2GM/c^2R)]^{-1/2}$ раз. Эту величину мы уже использовали ранее; значения M и R должны быть взяты для точки отскока. Так как $2GM/c^2R$ очень близко к единице, то этот множитель велик, и для внешнего наблюдателя отскок займет сравнительно долгое время.

Возможно, что в этом и состоит объяснение как источников радиоизлучения в центрах галактик, так и квазаров. Объекты, сжатие которых началось в фазе высокой плотности или даже перед ней *и для которых, с точки зрения связанного с ними наблюдателя, прошло всего лишь несколько минут, сейчас взрываются*

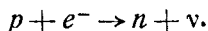
подобно расширяются. Для нас, находящихся вовне, произошла длительная задержка, вызванная упомянутой выше причиной. Вполне может быть, что мы наблюдаем объекты, которые были типичны для совершенно иного состояния нашей части вселенной, для стационарного состояния, от которого мы сейчас отклонились.

Можно было бы попытаться подобным же образом объяснить радиоисточники и в космологии пульсирующей вселенной, в космологии +1. Однако я должен напомнить, что до сих пор в этой космологии не было дано удовлетворительного объяснения отскока массивного объекта.

И наконец, каковы размеры того «пузыря», в котором мы живем? При расширении от плотности 10^{-8} до 10^{-29} г/см³ масштаб S увеличился в 10^7 раз. Следовательно, если размеры нашей области неустойчивости первоначально равнялись всего лишь миллиону световых лет, сейчас она имеет в диаметре примерно 10^{13} световых лет, что в тысячу раз больше вселенной, доступной нашим телескопам. Вселенная в целом сохраняет свои стационарные свойства, так что абстрактные рассуждения предыдущей главы, например об асимметрии времени, по-прежнему остаются в силе. Могут существовать и другие «пузыри», кроме нашего, и размеры их могут быть различными. Любопытно предположить, что некоторые наблюдаемые в лаборатории свойства, которые мы полагаем неизменными, могут оказаться связанными с флуктуацией и зависеть от размеров нашего «пузыря». Значения, найденные нами для безразмерных физических величин или для некоторых из них, вполне возможно относятся только к нашей области пространства. Если их значения в других местах иные, то диапазон возможных свойств материи может быть несравненно богаче, чем обычно предполагается.

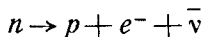
6. Очерк истории вещества

История вещества — не то же самое, что его возникновение. Это история о том, как из простейших кирпичей — протонов и электронов — были построены более сложные атомы. Атомы состоят из ядер, окруженных электронами, а ядра состоят из смеси протонов и нейтронов. Поэтому, если мы хотим понять, как образуются ядра, нужно, чтобы часть первоначальных протонов превратилась в нейтроны, что может произойти при β -процессе:

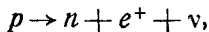


Здесь p обозначает протон, e^- — обычный отрицательно заряженный электрон, n — нейтрон и ν — нейтрино. Для того чтобы эта реакция пошла, необходима энергия, ибо масса нейтрона больше суммы масс протона и электрона, грубо говоря, на $\frac{3}{4}$ миллиона эв. Необходимая энергия поступает, как мы увидим, из звездных недр.

На рис. 20 приведено несколько примеров того, как из нейтронов и протонов построены ядра хорошо знакомых атомов. Известно свыше 1400 различных ядер, 280 из них стабильны. Большинство нестабильных ядер, примерно 1100, известно только в лаборатории, ибо они быстро распадаются либо путем β -процесса, либо выбрасывая ядро гелия, состоящее из двух протонов и двух нейтронов. β -процесс может принимать и другие формы, кроме приведенной выше, например



или



где e^+ — это электрон с положительным зарядом, античастица для e^- , а $\bar{\nu}$ — античастица для нейтрино ν . Небольшая часть нестабильных ядер распадается очень медленно — за время порядка возраста солнечной системы. Таковы, например, найденные на Земле изотопы уран-235 и уран-238, первый с 92 протонами и 143 нейтронами, а второй с 92 протонами и 146 нейтронами. Проблема, с которой мы сталкиваемся, пытаясь понять историю вещества, состоит в том, чтобы объяснить, каким образом все обнаруженные в природе ядра, числом более 300, образовались из протонов и электронов. Следует заметить, что выражение «обнаруженные в природе» означает (за единственным исключением) «обнаруженные на Земле». Исключение составляет элемент технеций, который на Земле не найден, если не считать, конечно, тех случаев, когда он изготавливается искусственно в лаборатории. Зато технеций наблюдается в звездах, относящихся к особому спектральному классу S. Линии технеция видны в спектре (e), в третьей паре звезд-

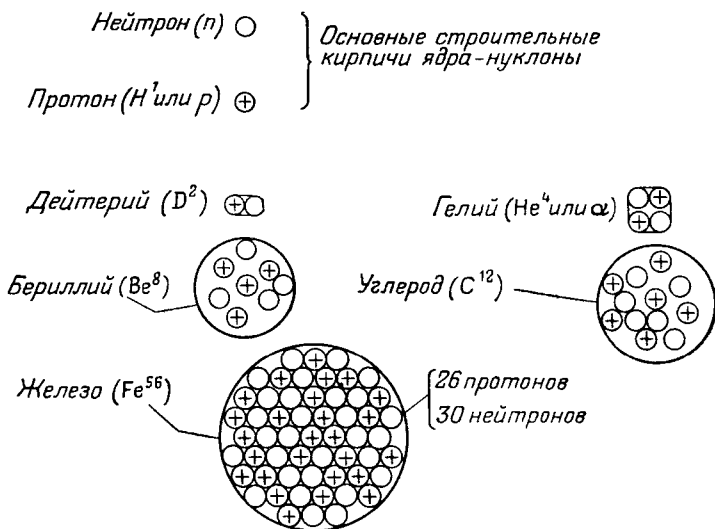


Рис. 20. Ядра некоторых распространенных элементов. В действительности все нуклоны находятся в быстром движении.

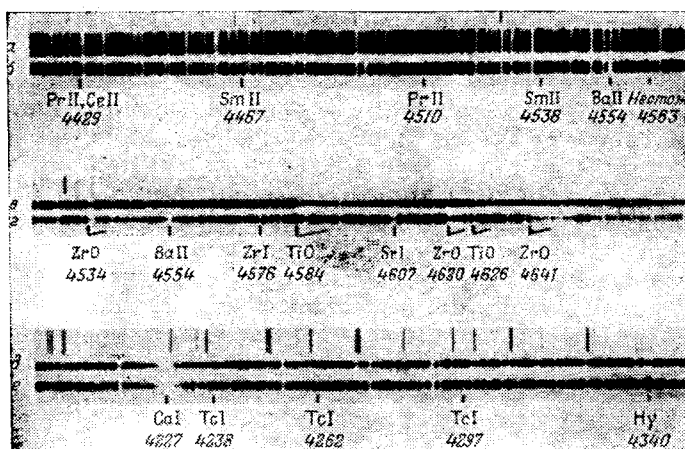


Фото XXXII. Спектры звезд, свидетельствующие о присутствии в их атмосферах продуктов медленного процесса захвата нейтронов.

ных спектров, приведенных на фото XXXII. Это спектр звезды R Андромеды. К первой и второй паре этих спектров я вернусь позже.

В XIX в. думали, что все различные виды атомов неизменны, что они неспособны превращаться друг в друга. Предположить обратное значило вызвать в памяти образ шарлатана-алхимика. То обстоятельство, что большинство атомных весов кратно атомному весу водорода, по-видимому, впервые заметил английский физик Уильям Праут. Он предположил, что более тяжелые элементы могут быть составлены из легчайшего элемента — водорода. Однако, как отметил мой друг Уильям А. Фаулер, Праут не счел достойной своей подписи ни одну из двух своих статей по этому вопросу, хотя он и подписался под статьями о соке виноградной лозы, о чернилах каракатицы и об экскрементах боа-констриктора.

Все изменила физика XX в. Открытие естественной радиоактивности показало, что элементы не неизменны. Открытие изотопов (ядер с одинаковым числом протонов, но разным числом нейтронов) привело

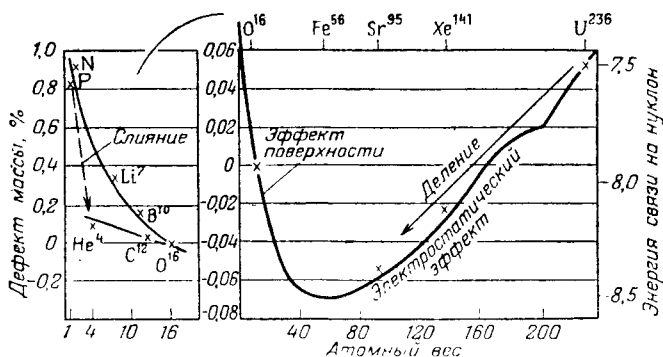


Рис. 21. Кривая плотности упаковки ядер, показывающая возможность их слияния и деления. Выделение энергии происходит по соотношению Эйнштейна $E = Mc^2$. Единица атомного веса соответствует 931,15 Мэв.

к возрождению гипотезы Праута. Было показано, что те элементы, атомные веса которых не были приблизительно равны целому кратному атомного веса водорода, например элемент хлор, состоят из смеси изотопов, обладающих этим свойством. Эти два открытия оказались решающими.

Когда массы атомов были измерены с гораздо большей точностью, чем раньше, было обнаружено, что при слиянии двух или более ядер легких элементов или при дроблении ядер очень тяжелых элементов может быть получен беспрецедентно большой выход энергии. Эти результаты сведены воедино на рис. 21. Наиболее прочно связанные ядра имеют атомные веса между 50 и 65. Более легкие ядра менее прочно связаны, потому что отношение поверхности к объему у них больше, а нуклон на поверхности ядра удерживается слабее, чем внутри. (Под «нуклоном» я подразумеваю просто ядерную частицу — нейтрон или протон.) С другой стороны, связь в более тяжелых ядрах слабее из-за влияния электростатического отталкивания, усиливающегося с зарядом ядра. Эти два совершенно различных физических эффекта слабее всего сказываются в области атомных весов от 50 до 65. В середине этой области находится элемент железо, и его изотоп железо-56 (26 протонов, 30 нейт-

ронов) — это одно из наиболее прочно связанных ядер. Оказывается, что железо столь распространено в привычном нам мире именно потому, что его ядро наиболее прочно связано.

Начало этому открытию положили в 1920 г. работы Астона. Но уже раньше стало ясно, что в звездах должен существовать источник энергии, гораздо более мощный, чем какой-либо из традиционных источников; уголь и нефть, например, в миллион раз

Выделение энергии	
$H^1 + H^1 \rightarrow D^2 + \beta^+ + \nu$	1,19 · 2 = 2,38 <i>Мэв</i>
$D^2 + H^1 \rightarrow He^3 + \gamma$	5,49 · 2 = 10,98
$He^3 + He^3 \rightarrow He^4 + 2H^1$	<u>12,85</u>
или	26,21 (2% <i>ν</i> теряется)
$He^3 + He^4 \rightarrow Be^7 + \gamma$	1,58
$Be^7 + e^- \rightarrow Li^7 + \nu + \gamma$	—→ 0,05
$Li^7 + H^1 \rightarrow 2He^4$	<u>17,34</u>
или	25,65 (4% <i>ν</i> теряется)
$Be^7 + H^1 \rightarrow B^8 + \gamma$	—→ 0,14
$B^8 \rightarrow Be^8 + \beta^+ + \nu$	7,7
$Be^8 \rightarrow 2He^4$	<u>3,0</u>
<hr style="width: 100%;"/>	19,1 (29% <i>ν</i> теряется)
$4H^1 \rightarrow He^4$	26,72 <i>Мэв</i>

Рис. 22. Протон-протонная цепочка.

менее эффективны. Когда результаты, приведенные на рис. 21, стали известны, естественно было сделать вывод, что внутри звезд должны происходить процессы ядерных превращений. Существовало две возможности: либо легкие элементы сливаются в более тяжелые, либо тяжелые элементы распадаются на более легкие.

Джинс предпочел дробление тяжелых элементов на том основании, что возможность синтеза легких элементов экспериментально не была доказана, тогда как дробление было известным явлением для всех

элементов тяжелее висмута. Эддингтон занял противоположную позицию, показав своими расчетами, что решающим фактором в этом вопросе является внутренняя температура звезд, а если в звездах идут процессы дробления, то это было бы маловероятно. Для физиков того времени аргументы Эддингтона выглядели неубедительными, ибо вычисленные им температуры, порядка 20 миллионов градусов, казались слишком низкими, чтобы оказывать существенное воздействие на скорость слияния ядер. Это было еще до

Выделение энергии	
→ C ¹² + H ¹ → N ¹³ + γ	1,95
N ¹³ → C ¹³ + β ⁺ + ν	1,50
C ¹³ + H ¹ → N ¹⁴ + γ	7,54
→ N ¹⁴ + H ¹ → O ¹⁵ + γ	7,35
O ¹⁵ → N ¹⁵ + β ⁺ + ν	1,73
N ¹⁵ + H ¹ → C ¹² + He ⁴	4,96
	(6% ν теряется) 25,03 Мэв
или (~ 1/1000)	
N ¹⁵ + H ¹ → O ¹⁶ + γ	12,11
O ¹⁶ + H ¹ → F ¹⁷ + γ	0,59
F ¹⁷ → O ¹⁷ + β ⁺ + ν	1,76
O ¹⁷ + H ¹ → N ¹⁴ + He ⁴	1,20
	(10 ⁻³) 15,66 Мэв

4H ¹ → He ⁴	26,72

Рис. 23. Углеродно-азотный цикл.

того, как развитие квантовой теории привело к установлению важного обстоятельства, что электрический заряд ядра не полностью защищает его от столкновений с другими ядрами даже при «низких» температурах, полученных Эддингтоном. Правильный способ учета таких столкновений впервые был разработан Гамовым, и в результате построенной им теории вскоре стало ясно, что Эддингтон, в конце концов, не так уж ошибался. В действительности же оказалось,

что Эддингтон был совершенно прав. Но все это выяснилось позднее. В 1920 г., когда дела шли не слишком блестяще, Эддингтон ответил своим критикам, что если недра звезд недостаточно горячи для слияния ядер, то пусть они пойдут и поищут местечка потеплее*.

Если развитие квантовой теории решительно изменило всю теоретическую физику, то в области эксперимента положение изменилось с открытием возможности искусственного превращения элементов путем бомбардировки их протонами средней энергии. Физики смогли ответить на вопрос, поставленный расчетами Эддингтона: какие ядерные реакции внутри звезд могут обеспечить значительный выход энергии при температурах, не превышающих 20 миллионов градусов. Ответ был дан, с одной стороны, Бете и Кричфилдом, развившими более ранние работы Аткинсона и Хоутерманса, с другой — Гамовым и Теллером. Выяснились две возможности, которые получили название *протон-протонной цепочки* и *углеродно-азотного цикла*. В последующие годы были уточнены отдельные детали, но в принципе картина не изменилась. Ход реакций показан на рис. 22 для протон-протонной цепочки и на рис. 23 для углеродно-азотного цикла. Оба процесса приводят к превращению водорода в гелий в точности так, как и предполагал Эддингтон еще в 1920 г.

Выход энергии при превращении водорода в гелий огромен. Превращение всего лишь 10% массы Солнца дало бы достаточно энергии для поддержания свечения Солнца на современном уровне в течение 10 миллиардов лет, что примерно вдвое больше возраста солнечной системы.

Взглянем на звезды, в которых происходят эти процессы. На фото XXXIII показано хорошо известное скопление Плеяды, легко заметное невооруженным глазом. Самые яркие звезды на фото XXXIII «работают» в основном на углеродно-азотном цикле. Фото XXXIV и XXXV изображают участки Млечного

* Эддингтон имел в виду ад. — Прим. ред.

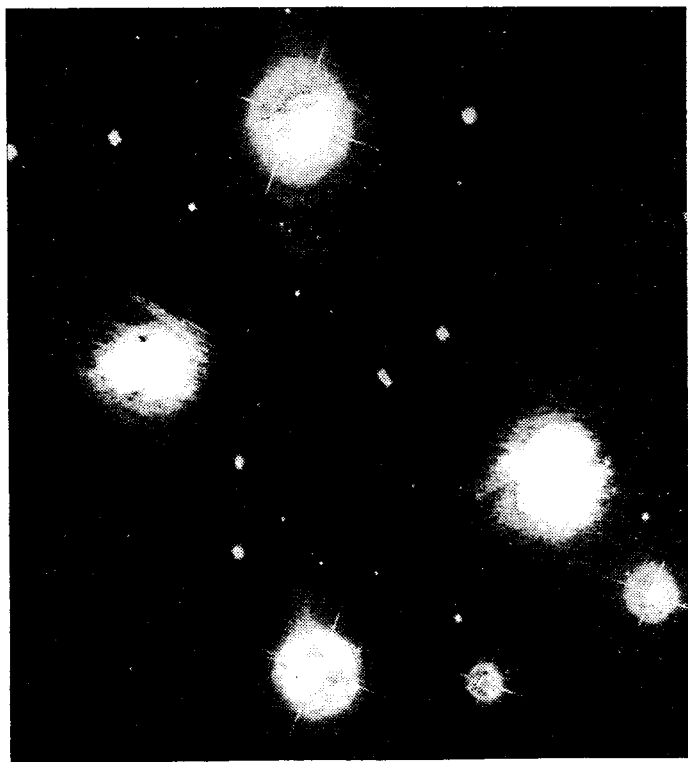
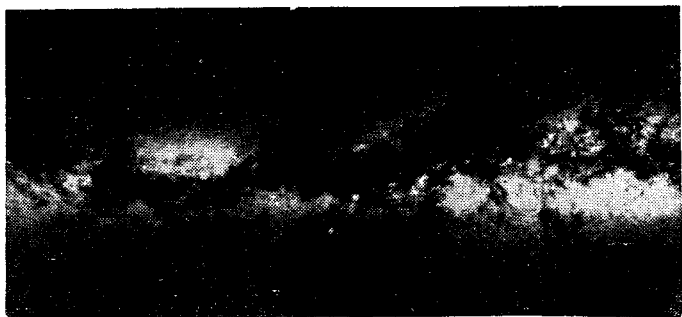


Фото XXXIII. NGC 1432 (Плеяды), рассеянное звездное скопление в Тельце. Фотография на 2,5-метровом телескопе.



Фото XXXIV. Созвездие Ориона и окружающие области.
Фотография объективом Тессар с фокусным расстоянием 25 см.



Ф о т о XXXV. Мозаика Млечного Пути от Стрельца до Кассиопеи.

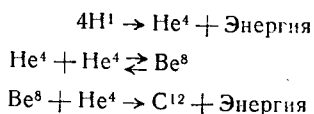
Пути. Большинство звезд на этих фотографиях «работает» на протон-протонной цепочке. Чем определяется степень эффективности каждого из этих двух процессов? Очевидно, температурой. При низких температурах (порядка 10 миллионов градусов) преобладает протон-протонная цепочка; при более высоких (выше 20 миллионов градусов) — углеродно-азотный цикл. Расчетами Эддингтона уже было показано, что низкие температуры существуют в слабых звездах малой массы, а высокие — в ярких, массивных звездах.

Звезды обладают важным свойством, радикально отличающим их от привычных нам предметов окружающего мира. Отнимите тепло от обычного предмета, и он, естественно, охладится. Отнимите энергию от звезды, и она, вопреки ожиданиям, нагреется! Это различие возникает из-за того, что гравитационное поле звезды сжимает ее, что приводит к увеличению температуры. Предположим теперь, что внутри какой-либо звезды не происходит превращения водорода в гелий, ибо температура слишком низка. Излучение энергии в пространство поверхностью звезды представляет собой потерю энергии, и в соответствии с тем, что я только что сказал, звезда должна сжиматься. При этом она разогревается. Так будет продолжаться до тех пор, пока температура не окажется достаточно высокой для превращения водорода в гелий. В действительности процесс разогревания

прекратится только тогда, когда в ходе ядерных реакций будет образовываться достаточно энергии, чтобы точно скомпенсировать ее потери. Мы видим, что звезды — это термоядерные реакторы, автоматически поддерживающие выход энергии на уровне ее потерь.

Звезды с массами большими, чем у Солнца, сжигают свой водород быстрее Солнца, иногда очень быстро. Это приводит нас к проблеме исчерпания водорода. Что происходит, когда запасы водорода в центральных частях звезды истощаются? Мы уже знаем, звезда, вместо того чтобы охладиться, будет сжиматься и становиться горячее. При возросших температурах увеличивается вероятность «включения» реакций, более сложных, чем простое превращение водорода в гелий. Расчеты показывают, что при температурах порядка 100 миллионов градусов ядра гелия сливаются с образованием углерода, кислорода и, возможно, некоторого количества неона. Происходящие при этом процессы описаны на рис. 24.

Синтез гелия и углерода



Углеродно-азотный каталитический цикл Бете

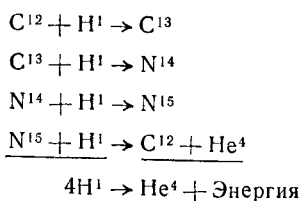


Рис. 24. Ядерные процессы в звездах, I.

Многое определяется тем экспериментальным фактом, что два ядра гелия (две α -частицы) не образуют стабильного ядра. Две α -частицы сливаются на один миг в нестабильное ядро бериллия Be^8 , которое вновь распадается на две α -частицы. В это краткое мгновение случайно подходит третья α -частица и присо-

единяется к двум другим, испуская гамма-квант. В результате получается обычное ядро углерода C^{12} . Следующая α -частица, добавляющаяся к C^{12} , создает обычное ядро кислорода O^{16} . Весьма вероятно, что

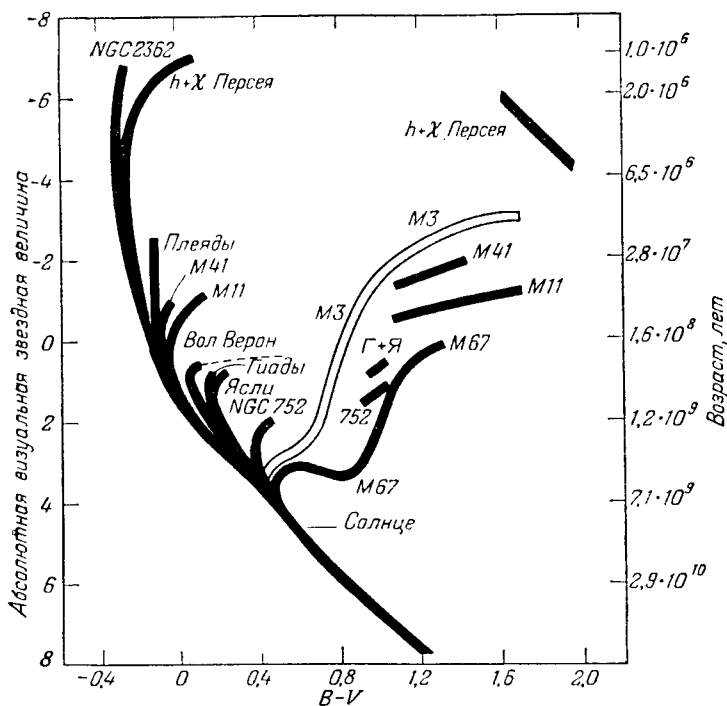


Рис. 25. Диаграммы Герцшпрунга—Рессела для рассеянных звездных скоплений (незачерненная линия относится к шаровому скоплению М 3). Г+Я—Гиады и Плеяды.

углерод в наших телах и кислород, которым мы дышим, столь распространенные в привычном нам мире, возникли в ходе именно такого процесса «выгорания» гелия.

Познакомимся теперь со звездами, в которых происходит сгорание гелия. На рис. 25 изображена составленная Сэндейджем разновидность диаграммы Герцшпрунга—Рессела. Вертикальная координата—

это светимость, так что вверху диаграммы яркие звезды, а внизу слабые. Звезды с высокой температурой поверхности находятся слева, а с низкой — справа. Вообще можно сказать, что звезды, лежащие в верхнем левом углу — средних размеров и очень яркие, в верхнем правом — гиганты, одновременно и огромные по размерам и очень яркие; звезды, лежащие внизу справа — и малы и слабы, а внизу слева — белые карлики, звезды очень малых размеров и очень слабые.

На рис. 25 Сэндейдж отметил места, где находятся отдельные звезды в нескольких звездных скоплениях. Скопления — это группы звезд практически одинакового возраста, но эти звезды отличаются друг от друга по массе и, следовательно, по скорости протекания ядерных реакций в их недрах. Это значит, что они отличаются по скорости эволюции. Рисунок совершенно ясно показывает, что в ходе эволюции звезды удаляются от главной последовательности, проходящей из нижнего правого в верхний левый угол, и переходят в область гигантов. Расчеты подтверждают, что такое эволюционное развитие вызвано исчерпанием водорода в центральных областях звезды. Слияние ядер гелия в углерод и кислород начинается впервые именно у гигантов. Вероятно, во многих звездах-гигантах происходит сгорание и водорода и гелия, но сгорание гелия происходит близ центра, а водорода — в более удаленных от центра частях. Это может происходить во многих наблюдаемых на небе гигантах. Многие звезды на фото XXXIV и XXXV являются гигантами.

Прежде чем продолжать, я не могу отказать себе в удовольствии высказать парочку довольно фантастических идей. Предположим, что Be^8 , ядро, состоящее из двух α -частиц, оказалось бы умеренно стабильным, с энергией связи, например, 10^6 эв. Как это сказало бы на астрофизических явлениях? Тогда гелий был бы чрезвычайно неустойчивым ядерным горючим. Начало сгорания гелия в гигантах — так называемая гелиевая вспышка — было бы таким, что все гиганты были бы уничтожены мощными взрывами. Взрывающихся звезд, сверхновых, было бы гораздо больше, чем наблюдается в действительности.

На фото XX мы видим хорошо известную Крабовидную туманность, которая может быть остатком от взрыва звезды. Можно быть вполне уверенным, что этот взрыв произошел не в момент начала сгорания гелия, а на более поздних этапах звездной эволюции, к которым я сейчас перейду. Я хочу лишь сказать, что если бы ядро Be^8 было стабильным, то объекты, подобные изображенному на фото XX, были бы гораздо более распространенными. Возможно, что тогда в эволюции звезды больше ничего не происходило бы и ее ядерное развитие ограничивалось бы сгоранием гелия. Тогда углерод был бы гораздо более распространенным элементом, чем он является в действительности.

Но кроме того, что нарушилось бы существующее распределение химических элементов, произошли бы и другие изменения. Например, в веществе, которое пошло на образование планет нашей солнечной системы, был бы большой избыток углерода. Весьма вероятно, что во внутренних областях, близ того места, где сейчас находится планета Меркурий, конденсировалась бы массивная планета, состоящая главным образом из графита.

Соотношение между элементами углеродом и кислородом имеет решающее значение не только для химии живых организмов, но и для распределения планет. Если бы углерод был более распространен, чем кислород, то, я думаю, неизбежно ближе всего к Солнцу находилась бы большая планета из графита. Соотношение между углеродом и кислородом зависит не только от свойств Be^8 , но и от тонких деталей в системе уровней энергии ядер C^{12} и O^{16} . Эти системы представлены на рис. 26 и 27. Заметьте, что у C^{12} есть уровень, расположенный чуть выше энергии, соответствующей сумме масс покоя Be^8 и α -частицы. Это означает, что C^{12} может образовываться в ходе «резонансной реакции», и это его свойство ускоряет выгорание гелия, частично компенсируя неустойчивость Be^8 .

При сочетании этого резонанса с неустойчивостью Be^8 создается компромиссное положение. Будь ядра Be^8 стабильными, реакция выгорания гелия была бы столь мощной, что звездная эволюция, а следовательно,

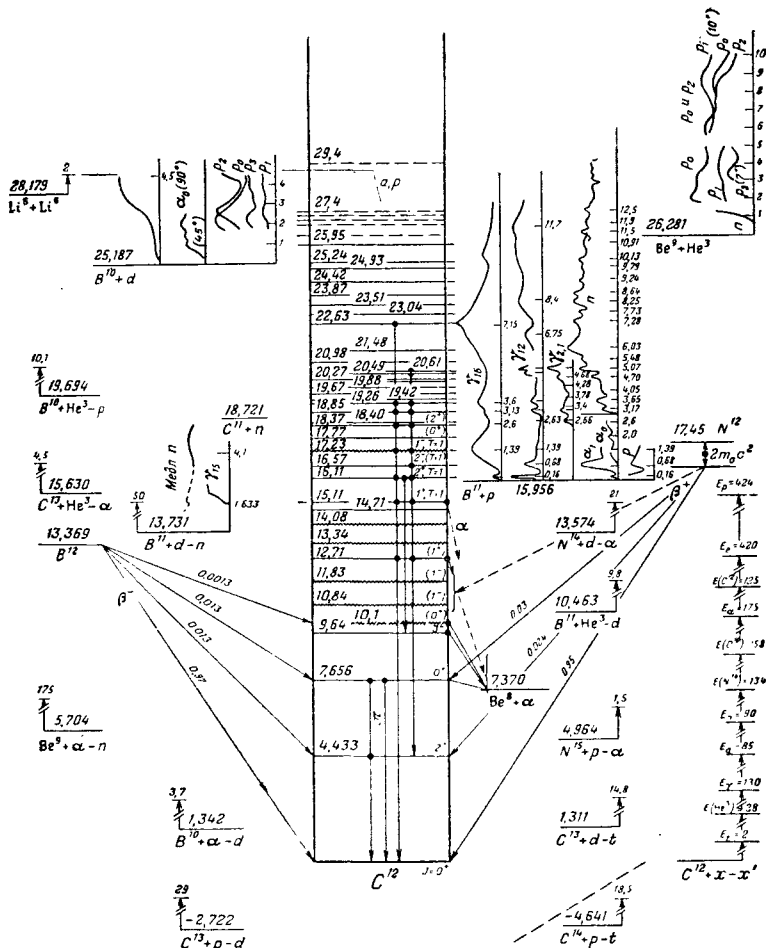


Рис. 26. Диаграмма уровней энергии для ядра C^{12} .

и нуклеосинтез происходили бы в более ограниченных пределах и результаты были бы менее интересными. Не будь у ядра C^{12} благоприятно расположенного резонансного уровня, скорость образования углерода была бы столь низка, что в мире существовало бы очень мало углерода; возникла бы ситуация,

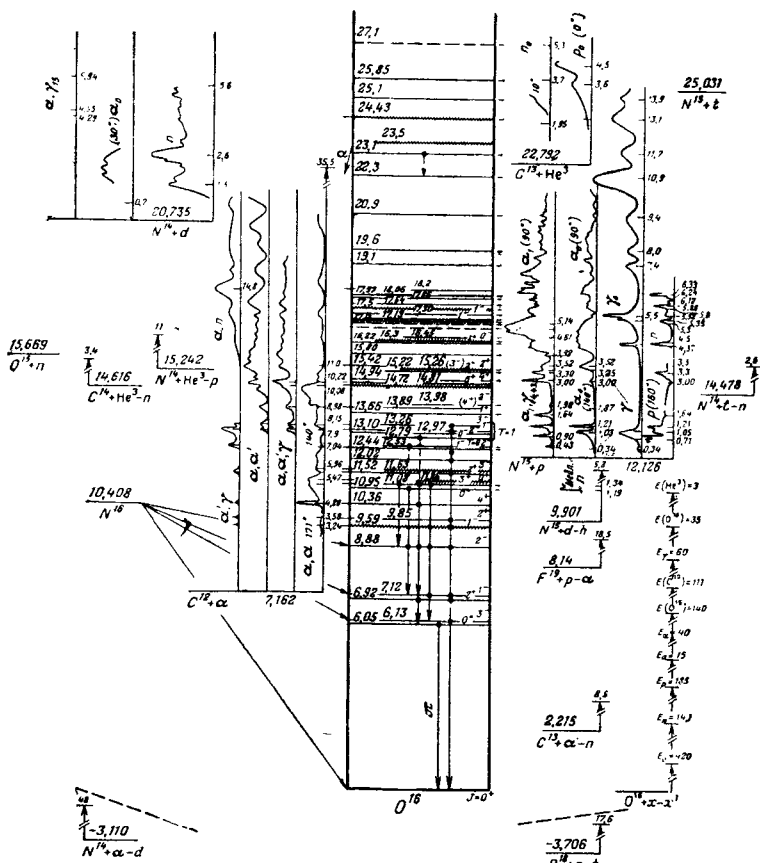


Рис. 27. Диаграмма уровней энергии для ядра O^{16} .

прямо противоположная графитной планете. Обратимся, наконец, к ядру O^{16} . Если бы у него имелся подобный же благоприятно расположенный резонансный уровень, то превращение C^{12} в O^{16} при добавлении α -частицы настолько ускорилось бы, что в мире опять оказалось бы мало углерода. При изучении системы уровней O^{16} мы обнаруживаем, что уровень, очень близкий к энергии суммы масс покоя C^{12} и α -частицы, на самом деле существует, но, к счастью, он расположен *ниже*, так что в действительности резо-

в момент рождения состоит *не из чистого водорода*. Очевидно, осуществляется схема обмена, изображенная на рис. 28.

Теперь я хочу воспользоваться рассмотренной выше идеей об исчерпании водорода, ведущем к сжатию и разогреванию, но уже в применении к исчерпанию гелия. В точности то же самое может произойти вновь. Вследствие истощения запасов гелия поднимается температура, и углерод и кислород сами вовлекаются в дальнейшие реакции. Продуктами их являются такие элементы, как неон, натрий, магний, алюминий, кремний и сера. Когда то же самое повторяется вновь, выгорают даже эти последние ядра. Как далеко может зайти это последовательное истощение запасов топлива, сопровождаемое сжатием и разогревом и приводящее к выгоранию все нового и нового ядерного горючего? Не до бесконечности, ибо для реакций слияния ядер с выделением энергии имеется предел. Вы помните, что наиболее прочно связаны ядра с атомными весами от 50 до 65. Эти ядра уже не выгорают с выделением энергии. Если рассматривать ядра как горючее, то на этом диапазоне атомных весов дальнейшее продвижение заканчивается.

Следовательно, можно ожидать, что итоговый результат звездной эволюции и выгорания ядерного топлива сводится к слиянию первоначальных легких элементов (водорода и гелия) в ядра с последовательно возрастающими атомными весами, до тех пор пока не образуются ядра с весами от 50 до 65. Этот диапазон весов, который часто называют «элементами группы железа», представляет собой, так сказать, ядерную золу, в которую превращаются легкие вещества, если допустить, что температура поднимается достаточно высоко, примерно до 3 миллиардов градусов.

Какие мы можем сделать прогнозы? На рис. 29 схематически представлена относительная распространенность элементов в солнечной системе и в других звездах, подобных Солнцу. Обратите внимание на пик, расположенный как раз в области атомных весов приблизительно от 50 до чуть больше 60. Здесь находится тот тупик, о котором мы говорили выше. Максимум образуется в этом месте потому, что здесь элементы накапливаются и дальнейшие процессы

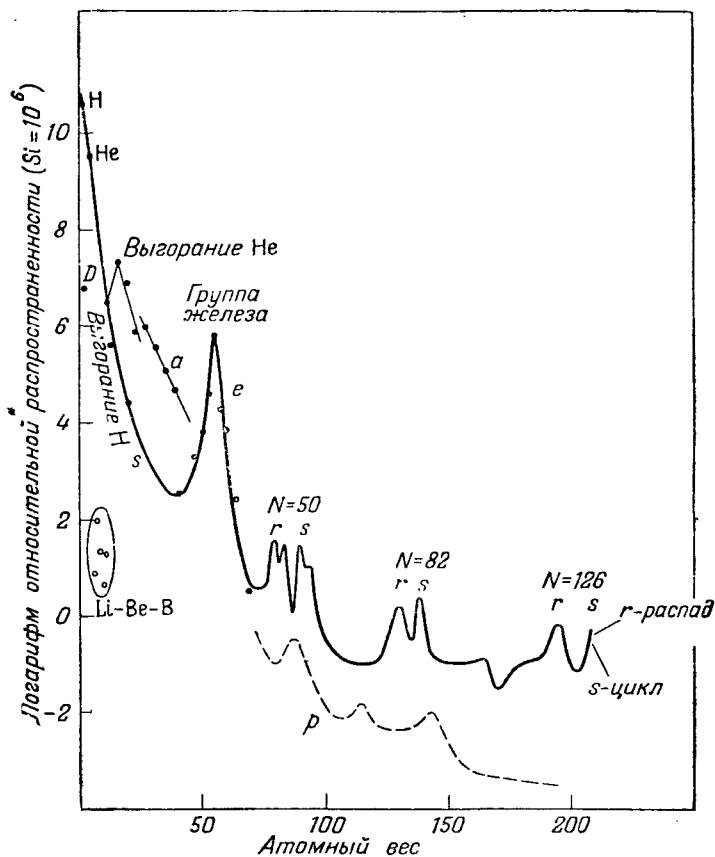


Рис. 29. Схематическая кривая распространенности элементов.

слияния происходить не могут. Тут мы встречаем такие элементы, как хром, марганец, железо, кобальт и никель. Снижающуюся распространенность элементов от водорода до кальция легко можно объяснить следующим образом. К настоящему моменту выгорела только часть водорода, и потому водород является наиболее обильным элементом. Далее, выгорела только часть гелия, и поэтому гелий более распространен, чем углерод и кислород. То же самое относится к соотношению между углеродом и кисло-

родом, с одной стороны, и магнием и кремнием — с другой. Тенденция к уменьшению распространенности меняется на обратную только у элементов группы железа из-за эффекта накопления. Различные буквы, нанесенные на диаграмме, относятся к разным

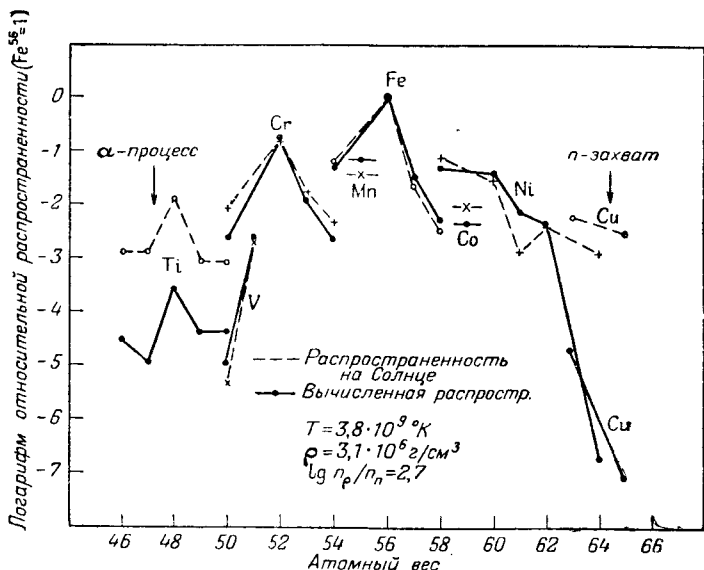


Рис. 30. Сравнение вычисленных и наблюдаемых распространенностей ядер группы железа (равновесный процесс в сверхновых II типа).

этапам сложной температурной эволюции, о которой мы говорили. Прежде чем покончить с вопросом об образовании элементов группы железа, стоит взглянуть более внимательно на расчетные и наблюдаемые распространенности в этой группе. Согласие оказывается в высшей степени удовлетворительным, что видно из рис. 30.

Эти представления убедительно объясняют эволюцию вещества от исходной точки, от водорода, до атомных весов порядка 60, т. е. до ядер, содержащих примерно 60 нуклонов (нейтронов плюс протонов). Но атомные веса многих обнаруженных в природе

ядер еще больше. Известны стабильные ядра вплоть до атомного веса 209, а естественные радиоактивные ядра обнаружены вплоть до изотопа урана, содержащего 92 протона и 146 нейтронов. Как же они образовались?

Прежде чем ответить на этот вопрос, заметим, что нам нужно объяснить происхождение тяжелых ядер лишь с очень малой распространенностью. Масштаб распространенности на рис. 29 логарифмический, откуда видно, что типичная распространенность тяжелых элементов меньше, чем водорода, в 10^{10} раз.

Синтез металлов

Равновесные ядерные процессы



Наиболее стабильные ядра (Fe, Ni, Cu и др.)

Синтез тяжелых элементов по Гринштейну и Камерону

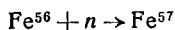
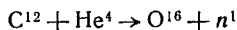


Рис. 31. Ядерные процессы в звездах, II.

Следовательно, достаточно весьма небольшого побочного выхода нашего основного процесса, чтобы объяснить синтез очень тяжелых ядер. Крайне низкие распространенности последних совершенно ясно говорят о том, что процессы, ведущие к их синтезу, по своей природе *должны* быть побочными.

Вы, возможно, помните, что ядро C^{13} образуется в углеродно-азотном цикле (см. рис. 24). После истощения водорода, когда температура поднимается до значений, необходимых для выгорания гелия (чуть выше 100 миллионов градусов), C^{13} , соединяясь с α -частицей, дает O^{16} плюс нейтрон. Что случится с освободившимся таким образом нейтроном? В соответствующих условиях нейтрон присоединяется, но не к более распространенным легким элементам, а к ядру группы железа. Возникает ситуация, изображен-

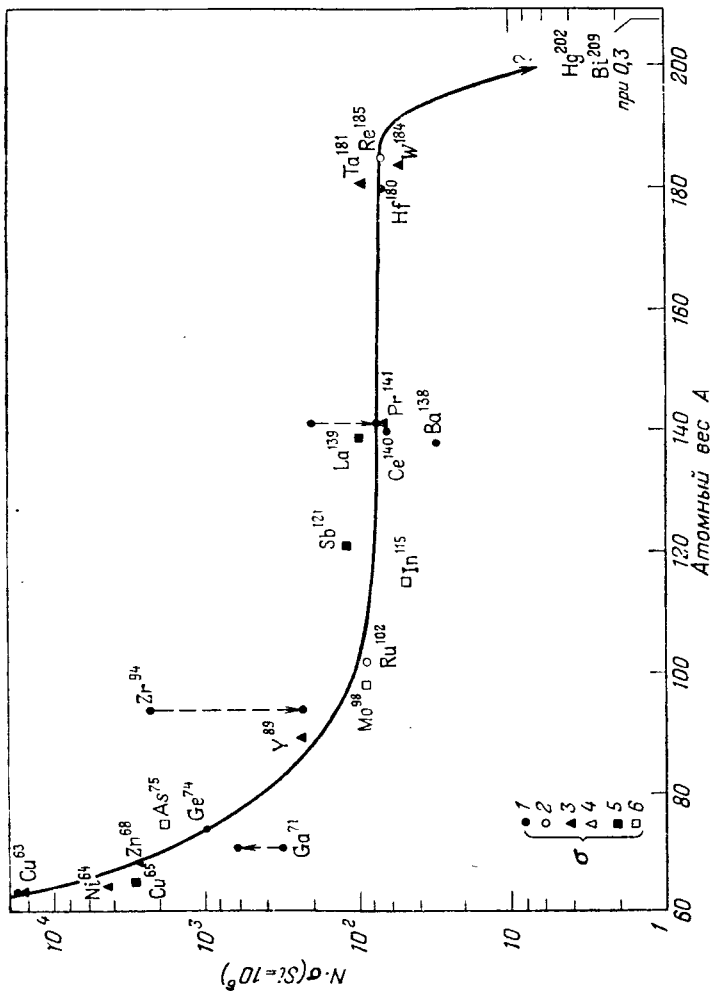
ная на рис. 31. Поскольку ядер C^{13} может быть много больше, чем ядер группы железа, на каждое из ядер этой группы может приходиться много нейтронов. Таким образом, каждое такое ядро может захватить много нейтронов, существенно увеличивая при этом свой атомный вес.

Как можно проверить эту гипотезу? Во-первых, можно ожидать, что произведение наблюдаемой относительной распространенности на сечение захвата нейтрона (практически на вероятность захвата нейтрона данным ядром) будет плавно меняться с атомным весом. Это происходит потому, что ядро с высокой вероятностью захвата будет легче превращаться в следующий член ряда, чем ядро, у которого вероятность захвата мала. На рис. 32 показан график величины этого произведения примерно для половины всех тяжелых ядер. Подчеркнем, что при построении этой диаграммы были использованы измеренные сечения и наблюдаемые распространенности. Особенное впечатление производят два кажущихся расхождения. Оказалось, что они вызваны ошибочными значениями сечений. После их исправления, как можно видеть, точки переместились на кривую.

Эта кривая означает, что ядра с малыми сечениями (т. е. малой вероятностью захвата нейтронов) имеют сравнительно большую распространенность. Особенно выдающимися примерами являются элементы стронций и барий. Любопытно, что известны звезды, в которых обнаружено исключительное обилие этих элементов. Такие звезды называются «бариевыми». Примеры их были показаны на фото XXXII. Очень вероятно, что стронций и барий действительно образовались *in situ* и, следовательно, в звездах на самом деле происходит процесс захвата нейтронов. Еще более убедительное подтверждение, равносильное решающему доказательству, дает элемент технеций. У технеция нет стабильных изотопов и в естественном состоянии он на Земле не встречается, но период полураспада Te^{99} равен $2 \cdot 10^5$ лет, и он образуется в той же цепочке процессов захвата нейтрона, что и стронций и барий. Технеций обнаружен у особого класса звезд; пример спектра такой звезды также приведен на фото XXXII.

Р и с. 32. Зависимость величины $\lambda_{0\beta}$ от атомного веса для медленного процесса в красных гигантах; $T \approx 10^8$ °К, $kT \approx 10$ кэВ. N — распространённость по Зюссону Юри ($Si = 10^6$), σ — сечение захвата нейтрона в $\lambda_{0\beta}$, измеренное при энергии 25 кэВ.

- 1 — Ок-Ридж; медленный s -процесс;
 2 — Ок-Ридж; s -процесс, исправленный за вклад быстрого r -процесса;
 3 — Ливермор; s -процесс;
 4 — Ливермор; s -процесс, исправленный за r -процесс;
 5 — среднее; s -процесс;
 6 — среднее; s -процесс, исправленный за r -процесс.



Рассмотрим подробнее процесс захвата нейтронов, предполагая, что нейтроны добавляются довольно медленно, с характеристическим временем, скажем, 10^5 лет. Это значит, что между актами захвата проходит достаточно времени для того, чтобы могли происходить β -процессы. На рис. 33 показана часть цепочки нейтронного захвата, проходящая через элементы кадмий, индий и олово. Выясняется важное обстоятельство,

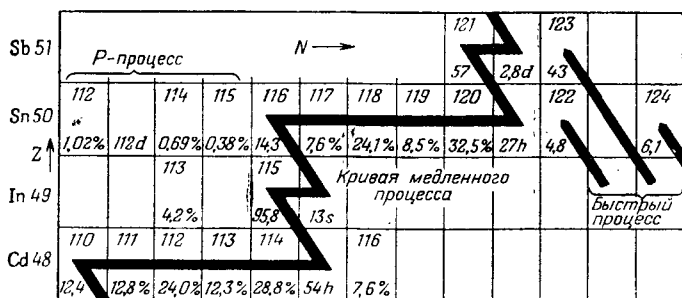


Рис. 33. Часть цепочки нейтронного захвата.

ство, что не все наблюдающиеся стабильные изотопы кадмия и олова образуются таким путем. Кривая не проходит ни через Cd^{116} , ни через Sn^{122} или Sn^{124} вследствие того, что существуют β -процессы с характерным временем порядка суток. Чтобы образовались пропущенные ядра, необходимо, чтобы цепочка нейтронного захвата срабатывала за очень малое характерное время, порядка нескольких секунд, так, чтобы β -процессы не успели произойти. Необходимо, следовательно, чтобы в одних случаях захват нейтронов осуществлялся медленно (например, при обычном выгорании гелия), а в других — очень быстро. Последний случай можно связать, например, с условиями, которые возникают во взрывающихся звездах, таких, как в примере с Крабовидной туманностью (см. фото XX).

Я уже приводил веские аргументы в пользу существования медленного процесса. Располагаем ли мы доказательствами быстрого процесса захвата нейтронов? Можно рассчитать относительные распро-

странности ядер, ожидающиеся в результате быстрого процесса. Результаты расчета представлены в виде гистограммы на рис. 34, где нанесены также наблюдаемые относительные распространенности тех тяжелых ядер, которые не показаны на рис. 32.

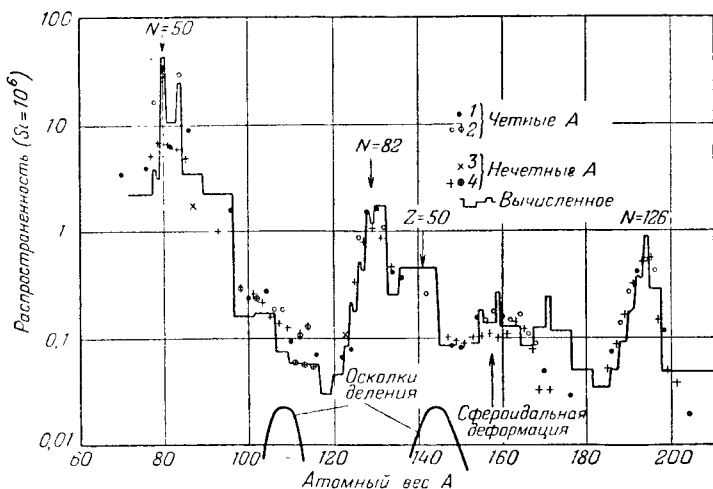


Рис. 34. Сравнение расчетных и наблюдаемых распространенностей тяжелых ядер, возникающих в ходе быстрого процесса захвата нейтронов. Для четных значений A : 1 — образуется только в быстром процессе; 2 — вероятно, образуется в быстром процессе. Для нечетных значений A : 3 — образуется только в быстром процессе; 4 — вероятно, образуется в быстром процессе.

Согласие между наблюдениями и расчетом поразительно.

В одной главе я мог дать, естественно, лишь короткий набросок того, что нам известно относительно причастности звезд к процессу ядерного синтеза. Я надеюсь, что в какой-то степени показал, что речь идет не о туманных идеях, что возможен уже целый ряд количественных расчетов, что мы действительно кое-что знаем об идущих в недрах звезд процессах. Наши знания по этому вопросу полнее с ядерной стороны, чем с астрофизической, но это и неудивительно. За последние три десятилетия на подробное изучение ядерной физики были затрачены куда более значи-

тельные усилия и израсходовано несравненно больше денег, чем на астрономию. Исследователи в области ядерной физики исчисляются тысячами против нескольких десятков астрофизиков. Космические программы не изменили существенно положения дел. От космических программ на изучение звезд перепадает лишь крохи, и это, по-видимому, будет продолжаться и в дальнейшем. Можно подумать, что НАСА* существует только для того, чтобы высадить человека на Луну. Я не верю, что из исследований кучи шлама, которую представляет собой поверхность Луны, выйдет что-нибудь путное. Однако я не собираюсь сейчас обсуждать вопрос о том, что более интересно для исследования — Луна или звезды. Я просто хочу сказать, что это разные вещи, и не следует воображать, будто гигантский финансовый бюджет НАСА означает, что астрономия сейчас пользуется мощной поддержкой. Долгое время астрономия была бедной родственницей физических наук. Сейчас положение значительно лучше, но бедная родственница по-прежнему бедна.

Такой конец для книги был бы слишком жалобным. Я предпочел бы вернуться к моим фантастическим рассуждениям об энергии связи Be^8 и удивительном расположении энергетических уровней в ядрах C^{12} и O^{16} . Я затронул, с моей точки зрения, увлекательный предмет для размышлений, но затем постепенно уклонился от него. Ясно, что сейчас у нас более чем достаточно забот с выяснением устройства того мира, который мы видим. Но я думаю, что следует проявить чуточку интереса и к тем странным безразмерным величинам, существующим в физике, от которых, в конечном счете, должно зависеть точное положение энергетических уровней в ядрах C^{12} и O^{16} . Неизменны ли эти величины, подобно атомам в физике XIX в.? Может ли существовать непротиворечивая физика с иными значениями этих величин?

К этим вопросам, по-видимому, существует два подхода. Во-первых, можно стараться показать, что сохранение точных численных значений этих безраз-

* НАСА — Национальное управление США по авиации и исследованию космического пространства. — *Прим. ред.*

мерных величин совершенно необходимо для логической непротиворечивости физики. Другая точка зрения состоит в том, что некоторые, если не все эти величины подвержены флуктуациям и что в других областях вселенной их значения могут быть иными. Я склоняюсь к этой второй точке зрения, ибо некоторые числовые совпадения имеют характер флуктуаций (например, отношение электростатической и гравитационной сил — порядка корня квадратного из числа частиц внутри куба со стороной c/H , где H — постоянная Хаббла). С этой точки зрения расположение уровней в ядрах C^{12} и O^{16} более уже не выглядит удивительной случайностью. Это может просто означать, что, так как подобные нам существа зависят от соотношения между углеродом и кислородом, они могут существовать только в тех частях вселенной, где эти уровни оказались расположенными нужным образом. В других областях уровень в ядре O^{16} может быть чуть выше, так что происходит сильное резонансное поглощение α -частицы ядром C^{12} . В таких областях кислород будет несравненно более распространенным, чем углерод, и существа, подобные нам, существовать не смогут.

ОГЛАВЛЕНИЕ

От редактора	5
От автора	7
1. Галактики	9
2. Источники радиоизлучения	38
3. Рентгеновское излучение, гамма-излучение и космические лучи	59
4. Космология стационарной вселенной	81
5. Радикальное изменение концепции стационарной вселенной	114
6. Очерк истории вещества	128

Ф. ХОЙЛ

**Галактики, ядра
и квазары**

Редактор Р. Г. Золина
Художник Г. И. Юлицкий
Художественный редактор
Н. А. Фильчагина
Технический редактор В. П. Сизова
Корректор А. Ф. Рыбальченко

Сдано в производство 12/XII 1967 г.

Подписано к печати 14/V 1968 г.

Бумага № 2 84×108¹/₃₂ = 2,44 бум. л.

Печ. л. 8,19. Уч.-изд. л. 7,4. Изд. № 27/4387.

Цена 35 коп. Зак. 1003.

ИЗДАТЕЛЬСТВО „МИР“

Москва, 1-й Рижский пер., 2

Ленинградская типография № 2

имени Евгении Соколовой

Главполиграфпрома Комитета по печати

при Совете Министров СССР.

Измайловский пр., 29

35 коп.

