

ПОДСЧЕТ РАДИОИСТОЧНИКОВ *)**М. С. Лонгейр****1. ВВЕДЕНИЕ**

Объединение радиоастрономии с космологией началось в 1950 г. Именно тогда одна из наиболее ярких «радиозвезд», открытая раньше, была отождествлена с удаленной галактикой. Эта «радиозвезда» — хорошо известный радиои источник Лебедь А — оказалась настолько мощной в радиодиапазоне, что аналогичные объекты можно было бы обнаруживать на расстояниях, существенно превышающих возможности оптических телескопов. Эти расстояния столь велики, что радиоволны, которые мы наблюдаем теперь, были излучены источниками еще в то время, когда Вселенная была значительно моложе. Поэтому появилась надежда на то, что при изучении очень слабых радиои источников удастся определить крупномасштабную структуру и эволюцию Вселенной.

Не вызвало затруднений перевести в область радиочастот все «классические» космологические тесты, употреблявшиеся для оптических наблюдений. К сожалению, большинство этих тестов предусматривает знание расстояний до рассматриваемых объектов, а с помощью одних только радиоданных мы никак не можем определить расстояния. В отличие от линий оптических спектров, радиоспектры обычно лишены тех характерных особенностей, по которым можно было бы определить красное смещение. Для определения расстояний до радиои источников существует только один способ, который заключается в отождествлении их с оптическими объектами, для которых можно определить красное смещение. Поэтому даже теперь, когда известны тысячи радиои источников, точные расстояния удалось определить только для сравнительно небольшой их части. Отождествление возможно лишь в том случае, когда положение радиои источника известно с очень большой точностью. Обычно это можно проделать только для относительно сильных источников. Но при этом, если даже и известны точные координаты радиои источника, нет уверенности, что отождествление с оптическим объектом удастся произвести, так как источник может оказаться настолько удаленным, что его нельзя обнаружить даже с помощью самых крупных современных телескопов. Помимо этих трудностей, которые, по-видимому, будут уменьшаться со временем, благодаря большим усилиям, направленным на изучение радиои источников, имеется ряд других существенных трудностей, возникающих при использовании радиои источников для космологических исследований. Цель «классической» космологии состояла в определении крупномасштабной динамики Вселенной по данным наблюдения удаленных

*) Автор весьма признателен Н. А. Лотовой за перевод рукописи статьи на русский язык.

галактик. Решения эйнштейновских уравнений поля, полученные Фридманом, показывают, как распространение световых сигналов связано с динамикой и распределением материи во Вселенной. Большинство классических космологических тестов включает выбор соответствующих «стандартов источников света» или «неизменяемого эталона длины» и отмечает, как изменяются наблюдаемые свойства стандарта в зависимости от расстояния до него. Изменение наблюдаемых свойств стандарта с расстоянием отражает геометрию и, следовательно, динамику Вселенной.*

Теперь известно, что благодаря значительной дисперсии собственных свойств внегалактических радиоисточников очень трудно выбрать такие стандартные объекты среди популяции радиоисточников. Действительно, ведь их собственная радиосветимость заключена в пределах, по крайней мере $10^6 : 1$, а их физические размеры — от сотен *кпс* до десятков *пс*. Оказалось, что невозможно найти такой критерий, с помощью которого можно было бы выбрать радиоисточники с похожими внутренними свойствами, хотя дальнейшие исследования привели к открытию новых соотношений, которые не были замечены прежде. При таких обстоятельствах применение этих тестов к различным моделям мира возможно только при статистическом подходе, когда сравниваются средние свойства близких и удаленных образцов. Хотя в тестах такого типа имеется много трудностей, но все же теперь имеется возможность для их осуществления. Пример такого использования радионаблюдений будет обсуждаться в гл. IV.

Существует также еще одна значительная трудность во всех подобных космологических тестах. Дело в том, что в классических космологических тестах преимущественно используют наблюдения весьма удаленных объектов. При этом крупномасштабная динамика Вселенной, относящаяся к моменту излучения радиоволн, отличается от той, которая существует в настоящее время, т. е. мы наблюдаем эпохи, которые являются существенно более молодыми, чем современная. Поэтому мы не можем определить, изменялись ли во времени «стандарты источников света» и «неизменяемый эталон длины». В настоящее время не существует способа для того, чтобы отличить этот эффект эволюции от изменений, связанных с различием геометрии в разных моделях мира.

Благодаря большому разнообразию свойств радиоисточников из наблюдений трудно установить путь их эволюции. В то же время для этих источников не существует таких закономерностей, которые наблюдаются в звездной астрономии и помогают понять эволюцию звезд различной массы. По-видимому, в будущем окажется возможным установить пути эволюции непосредственно из наблюдений, но пока еще в наблюдательных данных отсутствует какой-либо строгий порядок. Конечно, если в дальнейшем будет понята детальная астрофизика этих объектов, то станет возможным введение поправки на эволюционные изменения. Но пока еще физика внегалактических радиоисточников и галактик слишком мало известна нам, и в современной теории нет надежды на получение удовлетворительных оценок эффекта эволюции.

Поэтому создается впечатление, что, изучая популяции радиоисточников, нельзя получить надежную космологическую информацию. Однако это не так. Оказывается, что один из наиболее простых космологических тестов дает результат, который полностью противоречит предсказаниям всех простейших моделей мира и требует космологического объяснения. Этот тест заключается в подсчете радиоисточников.

Подсчет источников в принципе очень прост, и этот тест привлекателен своей простотой, так как предусматривает лишь определение общего

числа источников, более ярких, чем некоторые предельные значения наблюдаемой интенсивности. В диапазоне оптических волн этот тест оказывается очень сложным вследствие существования галактик и сверхгалактик. Кроме того, объекты, для которых имеется статистика, соответствуют значениям красных смещений z , меньшим 0,2, когда еще мало различие между разными моделями мира. Однако, как будет показано ниже, для радиоисточников таких проблем не существует.

Подсчет источников показывает, что слабых радиоисточников оказывается значительно больше, чем это можно было бы ожидать во всех простых моделях мира. Наиболее простое объяснение этого эффекта состоит в том, что или в прошлом было больше источников, или мощность радиоисточников в прошлом была гораздо больше, чем в настоящее время, а это значит, что на протяжении космологической эпохи должны изменяться или эволюционировать свойства радиоисточников.

Эти наблюдения и выводы вызвали много споров между последователями стационарной космологии и наблюдателями. Стационарная теория в ее наиболее простой форме приводит к модели мира, которая дает вполне определенные предсказания относительно крупномасштабной структуры Вселенной, и поэтому эта теория является весьма чувствительной к экспериментальной проверке. Причина этой особенности состоит в замене «космологического принципа», согласно которому Вселенная выглядит изотропной относительно любого наблюдателя, на более сильный «космологический принцип в прошлом», согласно которому Вселенная выглядит не только изотропной, но и сохраняет один и тот же вид относительно любого наблюдателя во все времена. Так как Вселенная расширяется, то необходимо возместить материю, которая при этом уходит, а для этого необходима гипотеза о непрерывном рождении материи. Наблюдения, согласно которым на больших расстояниях существует больше радиоисточников, несомненно противоречат космологическому принципу в прошлом. Для того чтобы согласовать счет радиоисточников со стационарной космологией, было выдвинуто много хитроумных предложений, но ни одно из них не согласуется со всеми существующими наблюдениями.

Можно думать, что возможный путь преодоления этих трудностей должен состоять в постулировании того, что красное смещение внегалактических объектов не вызвано одними лишь космологическими причинами. Например, оно может быть частично обусловлено гравитационными силами. Однако, каково бы ни было происхождение красного смещения, подсчет источников показывает, что земля расположена в одном из минимумов распределения радиоисточников. Можно показать, что вероятность случайного попадания Земли в центр такой области пренебрежимо мала ⁴⁸. На этом основании кажется вероятным, что источники принадлежат к космологически далеким популяциям.

В последнее время уделяется много внимания космологическим моделям, которые содержат λ -член. Была предпринята попытка объяснить некоторые аномалии в распределении красного смещения в излучении и абсорбции у квазизвездных объектов. В принципе в таких моделях можно получить ⁴² наклон счета источников свыше 1,5, но если учесть дисперсию в светимости радиоисточников, то наклон не может превышать 1,5. Кроме этого прямого доказательства эволюции, подсчет ничего не говорит нам о геометрии Вселенной. Тем не менее мы можем многое узнать о распределении внегалактических радиоисточников во Вселенной и о том, как они изменяются во времени.

Анализ счета радиоисточников показывает, что существуют довольно сильные ограничения на путь эволюции популяции радиоисточников.

Во-первых, эффекты эволюции очень сильны, так что при красном смещении порядка 2 относительная пространственная плотность источников примерно в 1000 раз больше, чем в настоящее время. Во-вторых, эта сильная эволюция характерна только для наиболее мощных радиоисточников, эволюция слабых источников выражена значительно слабее или вовсе отсутствует. Эти выводы, которые первоначально были получены из результатов подсчета источников, подтверждаются последними данными по распределению красного смещения у квазизвездных объектов, а также последними обзорами радиоисточников.

Помимо очевидной важности этих вопросов для понимания физики радиоисточников, рассмотрение их при больших красных смещениях автоматически позволяет изучить поведение источников при различных физических условиях. Эволюция радиоисточников связана также с широким кругом других проблем, которые простираются от вопросов происхождения космических лучей до проблемы наблюдаемого фона рентгеновских и γ -лучей.

Ввиду особой важности, которую представляет знание космологической эволюции радиоисточников, необходимо уяснить следующие моменты: 1) в чем заключается доказательство существования космологической эволюции; 2) насколько детально можно определить эволюцию популяции радиоисточников.

В гл. II подробно обсуждаются наблюдения, в гл. III будет дана интерпретация этих результатов. В гл. IV будут обсуждены последние наблюдения и их интерпретация и, наконец, в гл. V — некоторые приложения этих результатов к другим разделам астрономии.

II. НАБЛЮДЕНИЯ

Начиная с 1950 г. развернулось большое соревнование между группами, работавшими в Кембридже и в Сиднее и последовательно получавшими различные каталоги источников, которые не согласовывались как между собой, так и с каталогами, полученными ранее. Сейчас стало ясно, что эти расхождения были связаны с непониманием и неучетом различных эффектов селекции, которые могут быть как наблюдательными, так и инструментальными. Оба эти эффекта существенно влияют на результаты полного обзора и подсчет радиоисточников. Каталоги источников, которые были получены начиная с 1960 г., находятся теперь в полном согласии между собой.

Наиболее важные каталоги радиоисточников были получены после 1960 г. Эти каталоги являются теперь стандартами, и на них основан подсчет радиоисточников.

1) Исправленный ЗС-каталог ² включает 328 наиболее сильных радиоисточников, наблюдавшихся на частоте 178 Мгц в северном полушарии, и охватывает область склонений $\delta \geq -05^\circ$ для потоков $S_{178} \geq 9,0 \cdot 10^{-26}$ вт·м⁻²гц⁻¹.

2) 4С-каталог ^{44, 21} содержит почти 5000 источников, имеющих $S_{178} \geq 2 \cdot 10^{-26}$ вт·м⁻²гц⁻¹ в области $-07^\circ < \delta < 80^\circ$. Этот обзор был выполнен с помощью интерферометра и поэтому содержит источники только с малыми угловыми размерами, главным образом меньшими 2',5. Это является большим преимуществом с точки зрения внегалактической астрономии, так как при этом автоматически исключаются почти все галактические источники, которые обладают значительно большими угловыми размерами.

3) Парксовский каталог ^{4, 16, 58} охватывает область неба $+20^\circ > \delta > -90^\circ$ с потоком, имеющим нижний предел около $2 \cdot 10^{-26}$ вт·м⁻²гц⁻¹

на частоте 408 $M\mu$. В этом обзоре имеются также измерения потока на частотах 750 и 1400 $M\mu$, благодаря чему удалось получить оценки подсчета источников на разных частотах. При этом, однако, необходимо помнить, что указанный каталог является полным лишь на нижней частоте 408 $M\mu$.

Для распространения подсчета на потоки малой плотности очень важным является также еще один обзор, именно северный околополярный обзор М. Райла и А. Невилла⁵². Этот обзор является первым, полученным по методу суперсинтеза, он охватывает небольшую область неба вблизи северного небесного полюса, но содержит источники с потоками вплоть до $0,25 \cdot 10^{-26} \text{ вт} \cdot \text{м}^{-2} \text{гц}^{-1}$.

Подсчет источников был выполнен Дж. Гауэром²⁰ на частоте 178 $M\mu$ на основе обзоров 4С и околополярного северного. Гауэр произвел тщательный анализ всевозможных эффектов селекции, могущих повлиять на результаты подсчета. Приведем некоторые примеры таких эффектов:

а) нелинейность шкалы потока, б) эффект разрешимости внегалактических источников, в) эффекты скопления источников и г) эффекты попадания слабых источников в диаграмму телескопа при наблюдении радиоисточников (confusion). Последний эффект является ответственным за множество затруднений, имевших место прежде. Поэтому он был подробно проанализирован и обсужден.

После учета всех этих эффектов Гауэр получил зависимость для подсчета, представленную на рис. 1, где N — общее число источников на стерадиан с потоком больше, чем предельное значение S . Это соотношение между N и S называется подсчетом радиоисточников. В пределах области $20 > S_{178} > 2 \cdot 10^{-26} \text{ вт} \cdot \text{м}^{-2} \text{гц}^{-1}$ наклон кривой подсчета равен $-1,8$. Наклон уменьшается при значениях S , меньших $2 \cdot 10^{-26} \text{ вт} \cdot \text{м}^{-2} \text{гц}^{-1}$, что наводит на мысль о том, что и относительное число источников убывает, т. е. кривая подсчета начинает сходиться (стремиться к некоторому фиксированному значению).

Такая сходимость предсказывалась Э. Хьюишем²², производившим статистический анализ некоторых исходных записей первой части обзора 4С. Хьюиш использовал метод, развитый П. Шейером⁵⁴, и определил $p(D)$ — распределение вероятности отклонений D , полученной на исходных записях обзора. Отклонения D отсчитываются от нуля интерференционных записей.

Физическая причина космологической эволюции такого вида в радиодиапазоне все еще неясна. Как уже отмечалось выше, наше понимание физики радиоисточников находится в начальной стадии. Наиболее

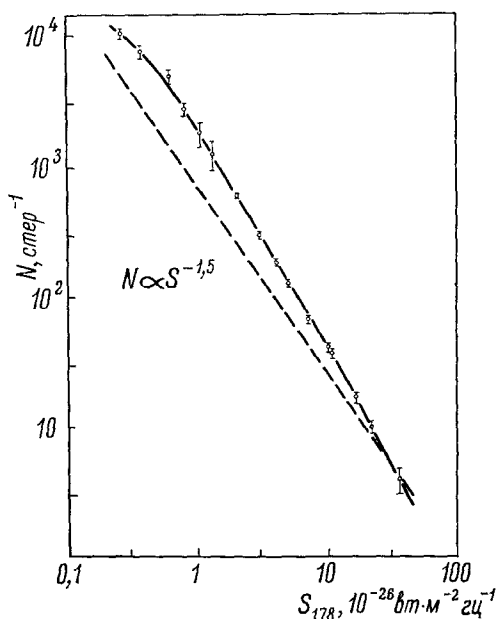


Рис. 1. Подсчет радиоисточников на частоте 178 $M\mu$, выполненный Гауэром²⁰ вплоть до $S_{178} = 0,25 \cdot 10^{-26} \text{ вт} \cdot \text{м}^{-2} \text{гц}^{-1}$.

Штриховая линия изображает зависимость $N \propto S^{-1,8}$, которая ожидается для однородной евклидовой Вселенной.

простая интерпретация состоит в том, что в прошлом была гораздо больше скорость рождения источников, или же в том, что свойства источников меняются в зависимости от физических условий, характерных для больших красных смещений. Тем не менее как вопрос о том, почему внегалактический объект становится мощным радиоисточником, так и детальная физика эволюции отдельных источников до сих пор остаются невыясненными.

В данной статье мы не будем обсуждать этот аспект космологической эволюции, несомненно, являющийся одной из важнейших физических задач, поставленных работами по счету источников. Мы сосредоточим внимание лишь на выяснении вопроса о том, насколько точно можно определить из наблюдений ту эволюцию, которая происходит в действительности. Функция $p(D)$ содержит информацию относительно распределения источников при потоках значительно меньших, чем те, для которых источники еще могут быть четко разрешены на отдельные.

Хьюиш показал, что кривая подсчета должна начинать сходиться при значениях S , меньших $2 \cdot 10^{-26} \text{ вт} \cdot \text{м}^{-2} \text{гц}^{-1}$, и этот вывод был подтвержден в обзоре Райла и Невилла⁵².

Подсчет по обзорам Южного полушария подтвердил существование наклона $-1,8$ для больших потоков на 408, 750 и 1400 Мгц. Наклон $-1,8$ был подтвержден также группой³⁹, работающей в Иллинойсе, и группой из Болоньи⁵, но область потоков и статистика в этих случаях были меньше, чем в кембриджских результатах, обсуждать которые мы будем ниже.

Перед тем, как приступить к интерпретации этих результатов, необходимо и очень важно обсудить следующее. При больших масштабах, $\theta \sim 90-180^\circ$, анизотропное распределение источников может быть связано с анизотропным расширением Вселенной. При малых масштабах, $\theta \leq 10^\circ$, анизотропия может быть обусловлена скоплениями или сверхскоплениями радиоисточников. Исходя из статистики, Д. Голден²⁴ проанализировала распределение источников в 4С-каталоге, но она на всех масштабах не обнаружила отклонений от однородности и изотропности. Интересно, что этот анализ включал и галактическую плоскость, но в этих направлениях не было обнаружено избытка источников. Это подтверждает предположение о том, что почти все источники в 4С-каталоге являются внегалактическими.

Применяя статистический метод Шейера ко всем исходным записям 4С-обзора, Хьюзу и Лонгейру²⁶ удалось показать, что не существует данных о какой-либо анизотропии в распределении радиоисточников при $S_{178} > 0,2 \cdot 10^{-26} \text{ вт} \cdot \text{м}^{-2} \text{гц}^{-1}$.

В настоящее время наблюдения реликтового излучения оказываются более сильным критерием на однородность и изотропность Вселенной, но они относятся к области очень больших красных смещений, много больших, чем те, для которых получены результаты по наблюдениям радиоисточников^{41, 13}. Однако, исходя из связи между существованием радиоисточников и скоплений галактик, а также радиоисточников и множеством галактик вообще, очень важно, например, знать, имеется ли среди радиоисточников тенденция к скоплениям. До сих пор не существует данных в пользу какого-либо скопления радиоисточников.

В дальнейшем применительно к внегалактическим радиоисточникам будет очень важно использовать данные, относящиеся к наблюдаемому излучению фона. А. Брайдл⁷ получил оценку $30 \pm 7^\circ$ на частоте 178 Мгц. При включении эволюции эта часть данных накладывает сильное ограничение на возможные модели распределения радиоисточников.

III. ИНТЕРПРЕТАЦИЯ

Подсчет радиоисточников обсуждался уже многими авторами. Главное обсуждение подсчета в стационарной космологии имеется у М. Райла и Р. Кларка⁵⁰. Подробная интерпретация подсчета в рамках эволюционных космологических моделей была дана У. Дэвидсоном и М. Дэвисом¹⁴, М. Лонгейром³¹, Дж. Мак-Витти и Л. Шустерманом⁴⁰. Ниже будем придерживаться нашего рассмотрения этой проблемы³¹.

Легко показать, что в статической бесконечной Вселенной, однородно заполненной радиоисточниками, имеющими собственную светимость P и пространственную плотность $\rho(P)$, подсчет радиоисточников можно представить в виде

$$N(S) = \frac{1}{3} S^{-\frac{3}{2}} \int \rho(P) P^{\frac{3}{2}} dP, \quad (1)$$

где интегрирование проводится по всем значениям радиосветимостей. Эта формула, конечно, предполагает отсутствие космологической эволюции. Это называется подсчетом радиоисточников в евклидовой модели, и мы всегда получаем при этом $N \sim S^{-1,5}$. Сравним эту зависимость с той, которая получается из наблюдений (рис. 1).

Отметим, что в моделях общей теории относительности уравнение (1) заменяют более сложным выражением, которое в соответствии с различными космологическими моделями учитывает расширение Вселенной и эффекты сокращения времени. По сравнению с евклидовой моделью все учитывающие расширение простые модели предсказывают меньше источников при малых потоках⁵⁵. Это справедливо также и для стационарной космологии. Для того чтобы более отчетливо показать различие между подсчетом и предсказаниями, удобно перейти к относительным значениям подсчета N/N_0 , где N_0 — величина подсчета для евклидовой модели. Эта зависимость иллюстрируется на рис. 2.

Можно сделать нормировку подсчета радиоисточников на $1 \cdot 10^{-26} \text{ вт} \cdot \text{м}^{-2} \text{Гц}^{-1}$, и в этом случае мы вместо избытка удаленных источников получим их локальный недостаток. Фактически мы при-

ходим к неоднородности или локальному недостатку в масштабе Вселенной, что равносильно признанию существования крупномасштабной космологической эволюции.

Из рис. 1 и 2 видно, что между наблюдениями и теорией имеется значительное расхождение. Простейший способ объяснения этого различия заключается в постулате, согласно которому в прошлом либо мощность радиоисточников, либо их плотность были гораздо больше, чем в настоящее время. Заметим, что это утверждение относится к средним свойствам

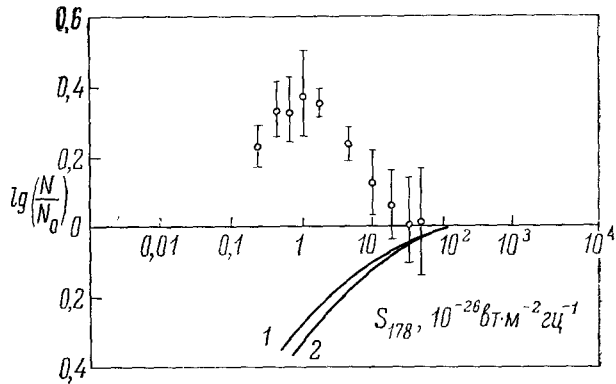


Рис. 2. Подсчет радиоисточников, представленный как N/N_0 , где N_0 — число источников, ожидаемых в евклидовой Вселенной ($N_0 \propto S^{-1,5}$).

Линии соответствуют предсказаниям модели Эйнштейна — Де Ситтера (1) при $q_0 = 1/2$, $\Omega = 11$, $\Lambda^2 = 0$ и стационарной космологии (2).

источников, так как обычно время их жизни гораздо короче космологического масштаба времени. Такой постулат неприемлем для стационарной космологии, так как по определению Вселенная всегда имеет один и тот же вид для любого наблюдателя.

Если попытаться выразить эту эволюцию в количественном виде, то возникает много трудностей. Мы должны знать следующее: 1) локальную функцию светимости внегалактических радиоисточников $\rho(P)$ (она определяет пространственную плотность источников с различной светимостью в современную эпоху ³⁵); 2) какую модель мира выбрать; 3) какой выбрать вид эволюции.

Локальная функция светимости может быть определена только по отношению к близким источникам, которые отождествлены с оптическими объектами. Для источников с высокой светимостью, которые, как правило, имеют красное смещение больше 0,2, определить локальную функцию светимости становится очень трудно. Причина этого заключается в следующем. Мы знаем, что эволюция становится важной, поскольку мощных радиоисточников, описанных в наших обзорах, оказывается больше, чем мы ожидали. Однако отсюда невозможно определить, сколько мощных источников в наблюдаемом распределении связано с эволюцией и сколько с локальной функцией светимости без эволюции. Эта проблема является главной при определении функции светимости для объектов с большими z , и она может быть решена только в процессе подбора модели. Для этого нужно сделать некоторые разумные предположения относительно локальной функции и, в соответствии с подходящей эволюцией, удовлетворить кривой подсчетов так, чтобы предсказываемое распределение источников соответствовало наблюдаемому числу мощных источников. Эта процедура и результирующая функция светимости были описаны Лонгейром ³¹. Изменения в функции светимости на основе последних данных по оптическому отождествлению ярких галактик были внесены Дж. Касуэллом и Д. Уиллсом ¹². В табл. I мы приводим наиболее надежные современные оценки функции светимости внегалактических радио-

Таблица I

Функция светимости внегалактических радиоисточников
в современную эпоху

(P — радиосветимость; пространственная плотность $\rho'(P)$
во втором столбце определяется как

$$\rho'(P) = \int_{P/10^{1/5}}^{10^{1/5}} \rho(P) dP,$$

т. е. $\rho'(P)$ — плотность источников в равных
логарифмических интервалах светимости P)

P , $\text{см гц}^{-1} \text{ стер}^{-1}$	$\rho'(P)$, нс^{-3}	P , $\text{см гц}^{-1} \text{ стер}^{-1}$	$\rho'(P)$, нс^{-3}
$2,5 \cdot 10^{27}$	$3,5 \cdot 10^{-29}$	$6,3 \cdot 10^{23}$	$9,0 \cdot 10^{-24}$
$1,0 \cdot 10^{27}$	$1,7 \cdot 10^{-28}$	$2,5 \cdot 10^{23}$	$9,4 \cdot 10^{-24}$
$4,0 \cdot 10^{26}$	$9,0 \cdot 10^{-28}$	$1,0 \cdot 10^{23}$	$1,8 \cdot 10^{-23}$
$1,6 \cdot 10^{26}$	$4,4 \cdot 10^{-27}$	$4,0 \cdot 10^{22}$	$4,7 \cdot 10^{-23}$
$6,3 \cdot 10^{25}$	$2,4 \cdot 10^{-26}$	$1,6 \cdot 10^{22}$	$2,0 \cdot 10^{-22}$
$2,5 \cdot 10^{25}$	$9,0 \cdot 10^{-26}$	$6,3 \cdot 10^{21}$	$8,3 \cdot 10^{-22}$
$1,0 \cdot 10^{25}$	$3,2 \cdot 10^{-25}$	$2,5 \cdot 10^{21}$	$2,1 \cdot 10^{-21}$
$4,0 \cdot 10^{24}$	$9,6 \cdot 10^{-25}$	$1,0 \cdot 10^{21}$	$6,7 \cdot 10^{-21}$
$1,6 \cdot 10^{24}$	$3,3 \cdot 10^{-24}$	$4,0 \cdot 10^{20}$	$4,5 \cdot 10^{-21}$

источников в широкой области радиосветимостей для современной эпохи (т. е. вносится поправка на эффекты эволюции при больших радиосветимостях).

Выбор космологической модели не является столь уж существенным, так как разница в геометриях различных моделей мира фактически не повлияет на большой разрыв между теорией и наблюдениями. Поэтому целесообразно использовать простейшую модель мира, модель Эйнштейна — Де Ситтера, для которой $\Omega = 1$, $\lambda = 0$, $q_0 = 1/2$. Эта модель согласуется с оптическими определениями параметра замедления $q_0 = 1 \pm 1^{53}$.

Зависимость функции светимости от эволюционных изменений схематически изображена на рис. 3 (заметим, что эта диаграмма относится к сопутствующим координатам — координатам, которые расширяются вместе со Вселенной.) Самое существенное изменение состоит в том, что в прошлом число мощных источников было относительно больше, а как мы будем описывать эти изменения математически, есть только вопрос вычислительных удобств. Отметим, что такие изменения должны иметь место независимо от эффекта увеличения плотности источников в прошлом в результате расширения Вселенной. Можно постулировать два вида эволюционных изменений:

1) в прошлом была больше средняя плотность источников в соответствии с a на рис. 3, или 2) в прошлом была больше средняя светимость источников, в соответствии с b на рис. 3.

Однако заметим, что это подразделение сделано только для удобства вычислений и речь не идет о каком-либо физическом различии между двумя типами эволюции.

Были рассмотрены эволюции вида:

$$a) \bar{\rho}(z) \propto (1+z)^{\beta}$$

и

$$b) \bar{p}(z) \propto (1+z)^{\gamma},$$

где черта символизирует просто тот факт, что эволюция скорее относится к средним величинам, чем к отдельным источникам.

Было установлено, что добиться удовлетворительного согласия между всеми данными наблюдений нелегко, и это накладывает следующие существенные ограничения на эволюцию радиоисточников:

1. *Необходимы эффекты сильной эволюции.* Для получения наблюдаемого наклона кривой подсчета, равного $-1,8$, необходимо включить сильную эволюцию и в выражениях, рассмотренных выше, положить $\beta \sim 5,4$ и $\gamma \sim 3,3$. Это, например, означает, что пространственная плотность источников при смещении z на единицу оказывается примерно в 40 раз больше, чем в современную эпоху.

2. *Сильная эволюция должна быть ограничена областью красных смещений $2,3 < z < 4$.* В выбранных для эволюции выражениях при стремлении z к бесконечности пространственная плотность источников

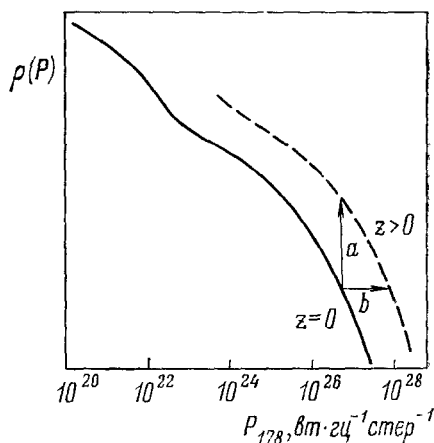


Рис. 3. Изменения функции светимости внегалактических радиоисточников в зависимости от эпохи иллюстрируют эквивалентность гипотез эволюции плотности и светимости.

и, следовательно, подсчет источников и интегральный фон радиоизлучения расходятся. Для того чтобы избежать этого, необходимо ограничить эффекты сильной эволюции областью красных смещений $2,3 < z < 4$. Определить поведение популяции радиоисточников за пределами этих границ красного смещения невозможно, можно лишь сказать, что там эволюция должна быть меньше. Рис. 4 иллюстрирует виды допустимой эволюции (см. обсуждение в работе¹⁵). Эта тема будет обсуждаться в гл. V.

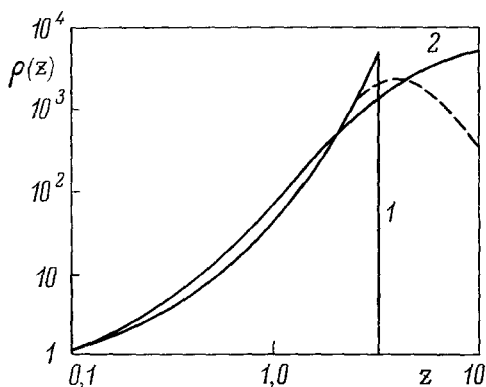


Рис. 4. Возможные изменения эволюции радиоисточников при больших красных смещениях, которые совместимы с подсчетом источников.

Кривые: 1—²¹, 2—¹⁵.

токе заключены примерно в пределах $10^5 : 1$, в то время как избыток источников имеется лишь в области потоков порядка $10^2 : 1$. Поэтому всем наблюдательным данным можно удовлетворить только путем ограничения силы эффектов эволюции у источников высокой светимости, имеющих $P_{178} > 10^{26} \text{ вт} \cdot \text{гц}^{-1} \text{ стер}^{-1}$. Интересно, что этот класс мощных радиоисточников соответствует квазизвездным радиоисточникам (КЗР, QSO), которые должны составлять значительную часть эволюционирующей компоненты популяции радиоисточников (см. ниже, п. 2 гл. IV).

Таковы выводы, которые удалось получить из подсчета радиоисточников до 1966 г. В следующей главе мы рассмотрим результаты последних исследований.

IV. ПОСЛЕДНИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

1. 5С-обзор радиоисточников *)

Кембриджский телескоп с базой в одну милю начал работать в 1964 г., и одна из главных его программ состояла в распространении подсчета радиоисточников на область очень слабых потоков.

Обзоры 5С охватывают небольшую часть неба (примерно 3° в диаметре), но в пределах этой области источники могут быть обнаружены вплоть до $S_{408} = 0,01 \cdot 10^{-26} \text{ вт} \cdot \text{м}^{-2} \text{гц}^{-1}$. Частота, на которой были выполнены обзоры 5С, равна 408 Мгц, и было необходимо переопределить полный подсчет для этой новой частоты. Процедура экстраполяции подсчета на различные частоты не является надежной, поскольку нет никакой гарантии в том, что поведение эволюционирующих радиоисточников на различных частотах будет одинаковым.

*) Необходимо упомянуть статью Райла^{50а}, в которой приводится превосходный обзор подсчета радиоисточников и подробное обсуждение обзоров 5С.

Анализы подсчетов на 408 Мгц были описаны в ⁴⁸, где использовались 5С1-и 5С2-обзоры ²⁹, ⁴⁷ вместе с дополнительным обзором ¹, в котором одно-мильный телескоп использовался на прохождение через меридиан инструмента. Он поэтому мог выполнить подсчет для больших потоков. Результаты этого подсчета приведены на рис. 5, откуда видно, что имеется полное согласие с подсчетом на 178 Мгц , и можно видеть также, что драматически подтверждается «сходимость», которая вытекала из работы Хьюиша ²² и из северного околополярного обзора. Интересно, что наклон кривой подсчета в области $0,1 > S_{408} > 0,01 \cdot 10^{-26}\text{ вт} \cdot \text{м}^{-2}\text{гц}^{-1}$ равен $-0,8$,

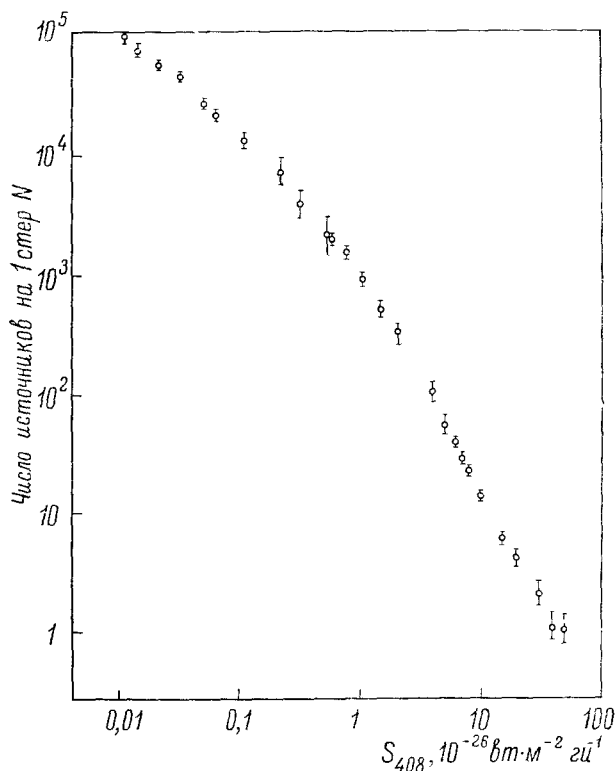


Рис. 5. Подсчет радиоисточников на частоте $\nu = 408\text{ Мгц}$, полученный Г. Пули и М. Райлом ⁴⁸ вплоть до $S_{408} = 0,01 \cdot 10^{-26}\text{ вт} \cdot \text{м}^{-2}\text{гц}^{-1}$.

что очень сильно отличается от величины $-1,5$, к которой приближается наклон при малых расстояниях во всех расширяющихся моделях мира. Поэтому для любых космологических моделей радиоисточники из обзора 5С являются очень удаленными объектами, и не удивительно, что невозможно отождествить больше нескольких процентов этих источников ($\sim 5\%$), несмотря на очень высокую точность, с которой были известны положения источников. На рис. 6 подсчет, представленный в виде N/N_0 , сравнивается с предсказаниями эволюционных моделей мира, обсуждавшихся в гл. III. Из этого рисунка ясно, что старые модели очень хорошо согласуются с новыми наблюдениями, и потому все выводы, полученные в гл. III, могут быть отнесены к новым наблюдениям. Интересно, что общий интегральный фон радиоизлучения от дискретных источников, полученный в обзорах 5С, составляет примерно половину всего наблюдаемого фона и дальнейшая экстраполяция подсчетов с множителем

в выражении для потока, равным 10, при том же наклоне $-0,8$ может объяснить весь наблюдаемый фон излучения.

Недавние обзоры, выполненные на других частотах, полностью согласуются с новыми кембриджскими наблюдениями. Большой интерес представляет новый обзор А. Шимменса, Дж. Болтона и Дж. Уолла ⁵⁷ на

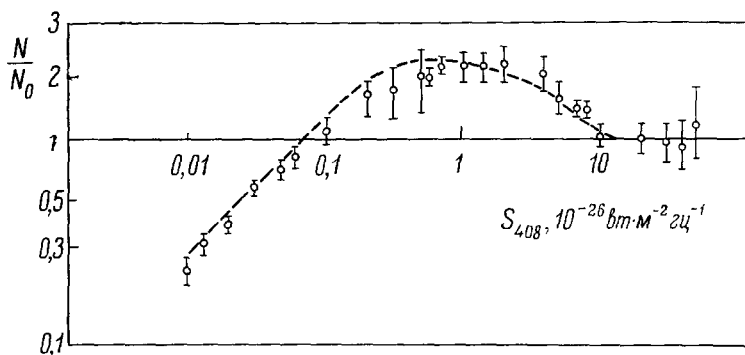


Рис. 6. Подсчет радиисточников на частоте 408 Мгц, представленный как N/N_0 (так же, как на рис. 2).

Штриховая линия изображает предсказания одной из моделей, обсуждаемых в гл. III.

2700 Мгц. Эти авторы установили, что для их обзора, связанного с очень слабыми источниками, наклон кривой подсчета равен $-1,4$, и это позволяло предположить наличие некоторого расхождения с обычной цифрой $-1,8$. Однако было показано, что если сравнить подсчеты в соответствующих областях S , то наклон кривой кембриджского подсчета также равен ⁴⁵ $-1,4$. Наклон $-1,8$ относится к области наибольших потоков, что согласуется с другими недавними обзорами, и это справедливо также для области высоких частот, как следует из работы Дж. Голта и Дж. Кеннеди ¹⁸ на 1420 Мгц, а также из работы К. Келлермана и др. ²⁸ на 6 см.

2. Распределение квазизвездных объектов

После открытия в 1963 г. квазизвездных объектов (квазаров) были предприняты большие усилия для объяснения их свойств и понимания их физической природы (см. обзор ¹⁰). Было установлено, что многие квазары принадлежат к числу наиболее мощных радиисточников, и к 1967 г. имелось уже достаточно данных для того, чтобы проверить, согласуется ли распределение квазаров с поведением эволюционных космологических моделей, описанных в гл. III. В этой проблеме, которая здесь будет обсуждаться, мы будем опираться на две работы — М. Лонгейра и П. Шейера ³⁴ и М. Шмидта ⁵⁶.

Анализ Шейера и автора был стимулирован работой Дж. Бербиджа, Ф. Хойла ⁴¹, которые утверждали, что для квазаров в области оптических и радиоволн не существует зависимости красного смещения от видимой величины объекта. Согласно космологическим гипотезам о происхождении красного смещения следует ожидать, что наиболее удаленные квазары с наибольшим красным смещением имеют самую слабую видимую величину, или наименьший радиопоток. Однако на практике корреляционная диаграмма «видимая величина (или поток) — красное смещение» имеет вид «диаграмм рассеяния». Используя 75 квазаров, для которых

имелись данные, мы провели подробный статистический анализ этой зависимости.

Было установлено, что для всех рассмотренных радиоисточников действительно не существует какой-либо зависимости между потоками малой величины и большим красным смещением, хотя для компактных источников, по-видимому, имеется значительная связь. В противоположность утверждению Бербиджа и Хойла, в области оптических волн была установлена существенная зависимость красного смещения от видимой величины. Однако в силу причины, о которой сейчас пойдет речь, эта зависимость не означает, что красное смещение зависит от расстояния. Связь между потоком S (или видимой величиной) и светимостью может быть записана в виде

$$S = \frac{P}{[\sin (Ar)/A]^2 (1+z)^{1+\alpha}},$$

где r — величина геодезического расстояния до квазара, A^2 — кривизна в космологической модели для настоящего времени и α — спектральный индекс источника (определяемый как $S \propto \nu^{-\alpha}$). Первый множитель в знаменателе показывает, что излучение распространяется по поверхности $[\sin (Ar)/A]^2$ и содержит зависимость видимой интенсивности от расстояния.

Второй множитель соответствует эффекту сокращения времени и является непосредственной причиной красного смещения, которое может быть либо доплеровским⁶¹, либо гравитационным²⁵, либо космологическим красным смещением. Отметим, что обсуждавшаяся выше светимость источника в случае гравитационной природы красного смещения понималась как светимость, измеряемая наблюдателем на самом источнике, а не удаленным наблюдателем. Такое определение светимости является обычным для источника, находящегося в сильных гравитационных полях. Поэтому прежде всего мы должны проверить, существует ли подлинная связь между видимой величиной и расстоянием, но сначала следует освободить этот эффект от эффекта сокращения времени. К счастью, это очень просто сделать, так как сейчас хорошо известны спектры источников как в оптическом, так и в радиодиапазоне.

Удалось установить, что то, что в радиодиапазоне первоначально принималось за «диаграмму рассеяния», является выражением связи между красным смещением и видимой величиной. Но при этом в пределах этой диаграммы тот источник, который наблюдается как наиболее яркий, имеет наибольшее красное смещение, т. е. эффект, как раз обратный тому, который мы обычно ожидаем! У компактных источников связь между красным смещением и видимой величиной вообще пропадает. Эти эффекты легко объяснить с помощью эволюционной космологии, описанной в гл. III, так как при большом красном смещении существует гораздо больше ярких источников, что может полностью объяснить обратную связь между красным смещением и видимой величиной. Было установлено, что наблюдаемые диаграммы находятся в точном количественном согласии с предсказаниями моделей, рассмотренных в гл. III.

В области оптических длин волн исчезает связь между красным смещением и видимой величиной и распределение точек становится неотличимым от случайного. Мы выполнили подробное исследование возможных случаев этого эффекта, в частности обсудили, связано ли это только с тем, что у квазаров имеется очень широкий разброс по абсолютной величине, что может завуалировать любую действительную связь. Исходя из того, что это маловероятно, мы предлагаем два возможных объяснения

данного эффекта. Либо красное смещение не зависит от расстояния, как это предполагали Дж. Бербидж и Э. Бербидж⁹, либо эволюционные эффекты выражены и в оптическом, и в радиодиапазоне. Если правильно последнее объяснение, то оно означает, что квазары невозможно использовать для космологических тестов, относящихся к зависимости «красное смещение — видимая величина», потому что, как это отмечалось в гл. III, когда имеет место эволюция, мы не можем отличить изменения пространственной плотности источников от изменений их средней светимости.

Исследования Шмидта⁵⁶ основаны на полном обзоре 38 квазаров из ЗС-каталога. Используемый тест «светимость — объем» является тестом, в котором объем пространства V , содержащий квазары, сравнивается с объемом V' , в который могут быть включены такие источники в пределах полного обзора. При однородном распределении источников (в сопутствующих координатах) средняя величина V/V' должна быть равна 0,5. Подробное исследование этого теста для ряда различных космологических моделей было выполнено М. Роуэном-Робинсоном⁴⁹. В действительности в полном обзоре Шмидта средняя величина V/V' равна 0,7, что означает, что источники концентрируются в сторону границы наблюдаемого пространства. Шмидт объяснял это как эволюционный эффект плотности источников. Величина эволюции, необходимая для объяснения избытка источников при больших красных смещениях, очень хорошо согласуется с величиной эволюции, получаемой из общего подсчета источников. Весьма приятная неожиданность! Казалось бы, новые данные о красном смещении обеспечивают независимое подтверждение эволюции, получаемой из подсчета, но это не так.

В моделях с положительной космологической постоянной λ , соответствующей отрицательному гравитационному эффекту, связанному с вакуумом⁶⁴, ожидаемое соотношение

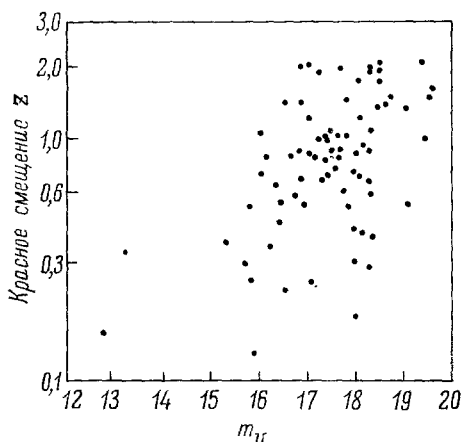


Рис. 7. Зависимость «красное смещение — видимая величина» для квазаров в области оптических волн иллюстрирует наличие кажущегося предела красных смещений у квазаров порядка $z \sim 2,3$.

красного смещения и видимой величины обсуждалось В. Петросьяном, Э. Солпитером и П. Секерешем⁴³. В том случае, когда λ -член несколько превышает критическое значение, при котором Вселенная была бы статичной (эйнштейновская Вселенная), существует такое значение величины красного смещения, при котором полностью прекращается расширение. В течение этого периода медленного расширения свет может обогнуть Вселенную один или несколько раз, что приводит к фокусировке световых лучей, исходящих из области вблизи антиподов наблюдателя. В этом случае при некотором отдельном значении красного смещения может быть объяснена концентрация ярких

источников. Рассмотренный случай зависимости видимой величины m_v от красного смещения в излучении z в действительности не имеет места (рис. 7). Отсутствие этого эффекта вряд ли может быть обусловлено селекцией, которая подавляет слабые, а не яркие источники.

Аналогичные модели с положительной космологической постоянной обсуждались Н. С. Кардашевым²⁷ для объяснения явной concentra-

пии красного смещения в поглощении вблизи $z = 1,95$, что было обнаружено Дж. Бербиджем и Э. Бербидж⁹. В этом случае абсорбция связывалась с периодом очень медленного расширения, который при соответствующем выборе параметров может иметь место при $z = 1,95$. Р. А. Сюняевым³⁰ были выдвинуты аргументы против моделей с λ -членом.

Во всех этих случаях счет источников не может быть объяснен с помощью только геометрических эффектов. Основная мысль состоит в том, что для большинства квазаров из полного обзора Шмидта предельный объем V' определяется по предельно малому потоку из пересмотренного ЗС-каталога, а не по предельной оптической величине. Эффект, вызываемый им, может быть проиллюстрирован на примере рассмотрения евклидовой Вселенной, в которой подсчет источников описывается в виде $N \propto S^{-\beta}$. В этом случае средняя величина V/V' равна $\beta/(\beta + 1,5)$, т. е. \bar{V}/V' зависит от наклона кривой подсчета источников. Для действительного распределения источников, где встречаются красные смещения порядка единицы и больше, это соотношение между \bar{V}/V' и β неверно, так как должны быть использованы действительные модели мира, но вместе с тем эта формула пригодна для того, чтобы проиллюстрировать внутреннюю связь между \bar{V}/V' и β . Более того, два теста не являются независимыми, и по существу метод Шмидта является скорее усложненным способом определения подсчета радиоисточников. Между прочим, оказывается несомненным, что для квазаров при подсчете источников наклон более крут, чем $-1,5$, что уже обсуждалось некоторыми авторами (см., например,¹¹). Поэтому появляется уверенность в том, что два метода дают одинаковые результаты для эволюции семейства радиоисточников. Исследование Шмидта позволяет также определить локальную функцию светимости квазаров более точно, чем это было возможно до сих пор.

Другая интересная особенность распределения квазаров заключается в видимом уменьшении их распределения при красном смещении около $z = 2,3$. Это особенно хорошо видно на рис. 7, который мы заимствовали из работы Лонгейра и Шейера³⁴. С тех пор, как была составлена эта диаграмма, были измерены большие красные смещения, такие, как 2,36, но недостаток источников при больших красных смещениях является все же поразительным.

Из рисунка ясно, что существуют квазары, которые могут быть обнаружены при больших красных смещениях, так как некоторые из них являются очень яркими в оптике. Возможно, что причина этого состоит в том, что по УФ и голубому цвету (UVB) трудно отличить удаленные квазары от звезд³⁰. Интересно, однако, что завал кривой получаемый при подсчете радиоисточников, имеет место также около этого красного смещения и оба эти завала могут быть связаны.

3. Тест «угловой диаметр — красное смещение» при использовании слабых радиоисточников

Как уже обсуждалось в гл. I, вследствие большой дисперсии физических свойств радиоисточников осуществление классических космологических тестов возможно лишь на основе статистики и данные должны удовлетворять следующим требованиям:

а) Существующие данные относятся к очень широкой области потоков, потому что, например, в случае евклидовой модели множителю 100 в потоке соответствует лишь множитель 10 в расстоянии.

б) В этой области потоков число источников должно быть заключено в хорошо известных пределах и быть достаточно велико при малой статистической ошибке.

в) При больших потоках необходимо знать физические свойства источников из обзора.

Такой же тест можно осуществить, используя угловые диаметры радиоисточников из новых обзоров, которые недавно были закончены в Кембридже. Это — обзоры 5С2 и 5С3^{47, 48} и новые результаты о структурах полного обзора источников в пересмотренном 3С-каталоге с разрешением в 23''^{37, 38}.

Использованная процедура заключается в соединении классического теста «угловой диаметр — красное смещение» с подсчетом радиоисточников (подробно об этом см. в работе³³). Угловые диаметры и красное смещение источников для полного числа из пересмотренного 3С-каталога используются для предсказания распределения угловых диаметров, которое следует ожидать при значительно меньших потоках, соответствующих обзором 5С, с множителем 200 в потоке. В действительности же вследствие того, что полуширина диаграммы направленности одномильного телескопа равна 80'' на частоте 408 МГц, необходимо предсказать лишь число источников, имеющих угловой диаметр больше 70''. Это значительно упрощает анализ, так как, вообще говоря, при больших потоках, которые только и нужны нам, обычно рассматриваются источники, имеющие угловые размеры, большие 70''. К счастью, источники с такими большими угловыми размерами обычно связаны с радиоисточниками, имеющими светимость в диапазоне $10^{24} < P_{178} < 10^{26}$ *вт·гц⁻¹стер⁻¹*. В результате имеется отождествление для 75% источников из 3С-обзора, и мы можем делать предсказания для различных моделей мира без учета космологической эволюции; такие предсказания являются точными в пределах статистических ошибок.

Таблица II
Полно число радиоисточников, ожидаемых в 5С2- и 5С3-обзорах с угловыми диаметрами $\geq 70''$ и $S_{408} \geq 0,03 \times 10^{-26}$ *вт·м⁻²гц⁻¹* для различных космологических моделей ($\lambda = 0$)

q_0	Число источников
0,1	2,0
0,5	2,3
1,0	2,2
3,0	2,5
10,0	2,6

Некоторые результаты этих расчетов представлены в табл. II, а именно полное число источников, которое следует ожидать в 5С2- и 5С3-обзорах с угловыми диаметрами больше 70'' при потоках $0,03 \cdot 10^{-26}$ *вт·м⁻²гц⁻¹*.

Очевидно, что этот тест при современной статистике не является достаточно чувствительным, потому что существует лишь небольшое различие между предсказаниями для различных моделей мира. Вводя поправку на статистические ошибки, мы должны ожидать число источников $2,2 \pm 1$. В действительности обнаружено 10 источников из 5С2- и 5С3-обзоров с $\theta \geq 70''$ и $S_{408} \geq 0,03 \cdot 10^{-26}$ *вт·м⁻²гц⁻¹*, что существенно больше предсказаний. Это интерпретируется как доказательство эволюции источников с большим угловым диаметром в диапазоне $10^{24} < P_{178} < 10^{26}$ *вт·гц⁻¹стер⁻¹*. Однако эволюционные эффекты

т, связанные с этими источниками, являются значительно более слабыми, чем эволюционные эффекты у источников со светимостью $P_{178} \geq 10^{26}$ *вт·гц⁻¹стер⁻¹*; эволюция вида $\rho(z) \sim (1+z)^{\beta}$, где величина $\beta \sim 3$ является достаточной, чтобы объяснить эти расхождения.

Этот результат полностью согласуется с предыдущим анализом, который показал, что сильные эволюционные эффекты могут быть связаны лишь с мощными внегалактическими источниками.

V. НЕКОТОРЫЕ ДРУГИЕ АСПЕКТЫ КОСМОЛОГИЧЕСКОЙ ЭВОЛЮЦИИ РАДИОИСТОЧНИКОВ

Эволюция важна для физики радиоисточников, и то, что в прошлом существовало значительно больше мощных радиоисточников, имеет важное значение и в других областях астрономии. Хорошо известно, что радиоизлучение, наблюдаемое у мощных радиоисточников, непосредственно связано с количеством космических лучей в источнике и общие потоки порядка 10^{62} эрг могут быть связаны с одним дискретным мощным радиоисточником⁵¹. Поэтому то, что в прошлом таких источников было гораздо больше, должно приниматься во внимание во всех расчетах, связанных с происхождением космического излучения.

Это имеет особое применение по отношению к фону рентгеновского излучения при энергиях больше 1 Мэв. Релятивистские электроны в радиоисточниках, помимо синхротронного механизма, генерирующего радиоизлучение, генерируют также вследствие обратного комптоновского рассеяния рентгеновские лучи^{19a, 17}. В метагалактическом пространстве это рассеяние связано с взаимодействием релятивистских электронов с реликтовым чернотельным излучением. Так как плотность энергии реликтового излучения очень быстро изменяется в зависимости от красного смещения — по закону $(1+z)^4$, при больших красных смещениях это обратное комптоновское рассеяние будет очень мощным источником рентгеновских лучей. Однако можно показать, что наблюдаемый рентгеновский фон нельзя получить без включения космологической эволюции^{6, 3}. Если рассмотреть такую эволюцию, которая дает согласие с подсчетом радиоисточников, то можно получить наблюдаемую интенсивность. Но в этой модели имеются трудности, которые связаны с уменьшением наклона спектра рентгеновского фона в области ниже примерно 40 кэв (см., например, ^{19b, 62}). По-видимому, для получения правильного общего спектра рентгеновского фона при энергиях больше 1 кэв следует рассмотреть физические процессы, включенные в эволюцию дискретных источников³².

Такое использование эволюции для объяснения рентгеновского фона было употреблено Дж. Силхом⁵⁹, но его модель требует эволюции свойств у нормальных галактик, которые имеют рентгеновское излучение, аналогичное нашей галактике. Возможно, что такая эволюция, конечно, может иметь место в диапазоне рентгеновских волн, но для нормальных галактик, которые являются очень слабыми радиоисточниками, она совершенно несовместима с наблюдаемым радиофоном. Как уже подчеркивалось, только класс наиболее сильных радиоисточников может обладать сильными эволюционными эффектами.

Ф. Лоу и У. Такер³⁶ тоже высказывали предположение, что если для квазаров и систем, таких, как сейфертовские и *N*-галактики, эволюция является существенной в диапазоне инфракрасных волн, более коротких, чем 0,3 мм, то их интегральное излучение фона может преобладать над чернотельным реликтовым излучением. Этот вывод должен быть подтвержден подсчетом источников в диапазоне инфракрасных волн.

В теории метагалактического происхождения космических лучей Дж. Бербидж⁸ и А. Хиллас²³ также обращались к эволюции. Локальное распределение радиоисточников может обеспечить только $10^{-(3 \div 4)}$ часть наблюдаемой плотности энергии космических лучей. И снова эволюция была призвана для того, чтобы устранить это расхождение. Согласно Хилласу космические лучи, наблюдаемые в настоящее время, возникают в основном при $z \sim 10$. Эта цифра, принимаемая вследствие потерь, происходящих при образовании электрон-позитронных пар во взаимодей-

ствии космических лучей с реликтовым излучением, может обеспечить наблюдаемый излом в спектре космических лучей вблизи 10^{15} эв. При этом можно показать, что величина эволюции при $z \sim 10$ должна быть подобна той, которая получена из подсчета радиоисточников, т. е. эволюция должна иметь вид $\rho(z) \propto (1+z)^\beta$, где $\beta \sim 5-6$. Однако подсчет радиоисточников требует такой эволюции, которая оканчивается при $z \sim 3-4$. Эту трудность можно преодолеть, если постулировать, что обратные комптоновские потери становятся существенными при $z \sim 3-4$, и поэтому при красном смещении выше этого значения наблюдаемая плотность радиоисточников значительно понижается. Это получается только за счет образования рентгеновских и γ -лучей, и можно показать, что существует простая связь между наблюдаемым потоком рентгеновских лучей и локальной плотностью энергии космических лучей, которая не зависит от точных деталей эволюции радиоисточников³². Эти расчеты показывают, что количество рентгеновских лучей, возникающих согласно Хилласу, а также в ряде моделей, связанных с метagalактической природой космических лучей, превосходит наблюдаемую величину примерно в 500 раз. Однако представляется возможным объяснить высокоэнергичный хвост распределения космических лучей, при $E > 10^{17}$ эв, за счет внегалактического происхождения.

Эти расчеты связаны также с некоторыми другими аспектами распределения радиоисточников и с природой излома при $z \sim 3-4$. Проведенное выше обсуждение и расчеты радиофона показывают, что радиофон не может полностью принадлежать обратному комптоновскому рассеянию, и должно существовать некоторое физическое изменение в эволюции популяции радиоисточников. Возможно, что эти результаты вытекают вследствие выбора из законов эволюционного поведения и, как было показано¹⁵, можно получить модель эволюции радиоисточников, в которых их распределение простирается вплоть до значений красного смещения, превышающих $z = 4$. По-видимому, эти модели подразумевают быструю эволюцию при малых красных смещениях и слабую эволюцию при больших красных смещениях. Однако когда мы рассматриваем эту эволюцию с точки зрения космологического времени, а не красного смещения, эти изменения эволюции исчезают. Возможно, что существует подлинный излом в распределении радиоисточников при этом красном смещении, который может быть связан с эпохой образования галактик (см. ⁶³). Только дальнейшие наблюдения слабых радиоисточников смогут помочь разрешить эту проблему.

VI. ВЫВОДЫ

В настоящее время представляется, что главные особенности эволюции популяции радиоисточников могут быть поняты в рамках эволюционных моделей мира в соответствии с обсуждением в гл. III, а именно:

- 1) существенны эффекты сильной эволюции;
- 2) эволюция относится только к области небольших красных смещений, меньших $z \sim 3-4$, свыше которых или эволюция очень слаба, или существует ограничение на популяцию радиоисточников;
- 3) эффекты сильной эволюции относятся только к классу наиболее мощных радиоисточников, хотя возможна и слабая эволюция, связанная с внутренне слабыми радиоисточниками.

Кажется, что эти эффекты все являются скорее внутренними по отношению к популяции радиоисточников, чем вызванными влиянием таких эффектов, как обратное комптоновское рассеяние.

С целью подробно объяснить эту эволюцию и понять ее, исходя из физики радиоисточников, было выполнено много работ. Эти результаты находят также широкое применение в других разделах астрономии. Обсуждение их было только начато в гл. V.

В настоящее время нет недостатка в программах важных исследований, которые должны быть выполнены. Сюда относятся: а) определение подсчета источников на различных радиочастотах для очень низких потоков; б) подсчет радиоспокойных квазаров; в) подсчет инфракрасных объектов; г) обнаружение рентгеновских лучей в удаленных радиогалактиках и определение их числа в диапазоне рентгеновских волн; д) природа радиоисточников 4С-каталога.

Эта последняя программа является особенно важной в проблеме радиоисточников. Вообще, когда избыток источников является наибольшим по сравнению с предсказаниями простых моделей мира, существует заметная вероятность обнаружить весьма удаленные источники, для которых эффекты эволюции являются исключительно важными. К счастью, источники в области слабых потоков 4С-каталога являются идеальными для этой цели. Исключительно важным представляется оптическое отождествление, определение красного смещения, радиоструктуры и спектральных данных.

Теперь все эти проблемы начинают обсуждаться. Все они требуют изобретательности и мастерства наблюдателей, работы вблизи пределов, поставленных технологическими возможностями, а многие из них приводят к немалым практическим трудностям и требуют большой настойчивости в работе. Однако значение этих работ для нашего понимания Вселенной, ее эволюции и природы физических процессов, влияющих на эту эволюцию, вполне оправдывает те большие усилия, которые затрачиваются на решение этой проблемы.

Кавендишская радиоастрономическая обсерватория,
Кембридж, Великобритания

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. J. A. Bailey, G. G. Pooley, *Mont. Not. Roy. Astron. Soc.* **138**, 57 (1968).
2. A. S. Bennett, *Mem. Roy. Astron. Soc.* **68**, 163 (1962).
3. R. Bergamini, P. Londrillo, G. Setti, *Nuovo Cimento* **52B**, 495 (1967).
4. J. G. Bolton, F. F. Gardner, M. B. Mackay, *Austr. J. Phys.* **17**, 340 (1964).
5. A. Bracessi, M. Ceccarelli, R. Fanti, G. Giovannini, *Nuovo Cimento* **41B**, 92 (1966).
6. K. Brecher, P. Morrison, *Astrophys. J. Lett.* **150**, L61 (1967).
7. A. H. Bridle, *Mont. Not. Roy. Astron. Soc.* **136**, 219 (1967).
8. G. R. Burbidge, *Progr. Theor. Phys.* **27**, 999 (1962); *Sci American* **215**, 32 (1966).
9. G. R. Burbidge, E. M. Burbidge, *Astrophys. J. Lett.* **148**, L107 (1967).
10. G. R. Burbidge, E. M. Burbidge, *Quasi-stellar Objects*, W. H. Freeman and Company, 1968.
11. G. R. Burbidge, F. Hoyle, *Nature*, **216**, 351 (1967).
12. J. L. Caswell, D. Wills, *Mont. Not. Roy. Astron. Soc.* **135**, 231 (1967).
13. E. K. Conklin, R. N. Bracewell, *Nature*, **216**, 777 (1967).
14. W. Davidson, M. Davies, *Mont. Not. Roy. Astron. Soc.* **127**, 241 (1964) (опечатку см. **128**, 363 (1964)).
15. A. G. Doroshkevich, M. S. Longair, Ya. B. Zeldovich, *Mont. Not. Roy. Astron. Soc.* (1969) (в печати).
16. G. A. Day, A. J. Shimmins, R. D. Ekers, D. J. Cole, *Austr. J. Phys.* **19**, 35 (1966).
17. J. E. Felten, P. Morrison, *Astrophys. J.* **146**, 686 (1966).
18. J. A. Galt, J. E. D. Kennedy, *Astron. J.* **73**, 135 (1968).

19. а) В. Л. Гинзбург, С. И. Сыроватский, Происхождение космических лучей, М., Изд-во АН СССР, 1963. б) R. S. Gould, *Am. J. Phys.* **35**, 346 (1967).
20. J. F. R. Gower, *Mont. Not. Roy. Astron. Soc.* **133**, 151 (1966).
21. J. E. R. Gower, P. F. Scott, D. Wills, *Mem. Roy. Astron. Soc.* **71**, 49 (1967).
22. A. Hewish, *Mont. Not. Roy. Astron. Soc.* **123**, 167 (1961).
23. A. M. Hillas, *Proc. 10th International Conference on Cosmic Rays, Calgary*, 1967.
24. D. J. Holden, *Mont. Not. Roy. Astron. Soc.* **133**, 225 (1966).
25. F. Hoyle, W. A. Fowler, *Nature*, **213**, 373 (1967).
26. R. G. Hughes, M. S. Longair, *Mont. Not. Roy. Astron. Soc.* **135**, 131 (1967).
27. N. S. Kardashev, *Astrophys. J. Lett.* **150**, L135 (1968).
28. K. I. Kellermann, I. I. K. Pauling-Toth, M. M. Davis, *Astrophys. Lett.* **2**, 105 (1968).
29. S. Kenderdine, N. Ryle, G. G. Pooley, *Mont. Not. Roy. Astron. Soc.* **134**, 189 (1966).
30. C. Lari, G. Setti, *Nuovo Cimento* **52B**, 507 (1967).
31. M. S. Longair, *Mont. Not. Roy. Astron. Soc.* **133**, 421 (1966).
32. M. S. Longair, *Astrophys. and Space Sci.* (1969) (в печати).
33. M. S. Longair, G. G. Pooley, *Mont. Not. Roy. Astron. Soc.* (1969) (в печати).
34. M. S. Longair, P. A. G. Scheuer, *Nature* **215**, 919 (1967).
35. M. S. Longair, P. F. Scott, *Mont. Not. Roy. Astron. Soc.* **129**, 419 (1965).
36. F. J. Low, W. H. Tucker, *Phys. Rev. Lett.* **21**, 1538 (1968).
37. G. H. Macdonald, S. Kenderdine, A. C. Neville, *Mont. Not. Roy. Astron. Soc.* **138**, 259 (1968).
38. C. D. Mackay, B. Elsmore, *Mont. Not. Roy. Astron. Soc.* (1969) (в печати).
39. J. M. Macleod, G. W. Swenson, K. S. Yang, J. R. Dickel, *Astron. J.* **70**, 756 (1965).
40. G. C. McVittie, L. Schusterman, *Astron. J.* **71**, 137 (1966).
41. R. B. Partridge, D. T. Wilkinson, *Phys. Rev. Lett.* **18**, 557 (1967).
42. V. Petrosian, *Astrophys. J.* **155**, 1029 (1969).
43. V. Petrosian, E. E. Salpeter, P. Szekeres, *Astrophys. J.* **147**, 1222 (1967).
44. J. D. H. Pilkington, P. F. Scott, *Mem. Roy. Astron. Soc.* **69**, 183 (1965).
45. G. G. Pooley, *Nature* **218**, 153 (1969) (в печати).
46. G. G. Pooley, *Mont. Not. Roy. Astron. Soc.* (1969) (в печати).
47. G. G. Pooley, S. Kenderdine, *Mont. Not. Roy. Astron. Soc.* **139**, 529 (1969).
48. G. G. Pooley, N. Ryle, *Mont. Not. Roy. Astron. Soc.* **139**, 515 (1969).
49. M. Rowan-Robinson, *Mont. Not. Roy. Astr. Soc.* **138**, 445 (1968).
50. а) M. Ryle, *Ann. Rev. Astron. and Astrophys.* **6**, 249 (1968). б) M. Ryle, R. W. Clarke, *Mont. Not. Roy. Astron. Soc.* **122**, 349 (1961).
51. N. Ryle, N. S. Longair, *Mont. Not. Roy. Astr. Soc.* **136**, 123 (1967).
52. M. Ryle, A. C. Neville, *Mont. Not. Roy. Astr. Soc.* **125**, 39 (1962).
53. A. R. Sandage, *Astrophys. J.* **133**, 355 (1961).
54. P. A. G. Scheuer, *Proc. Cambridge Phil. Soc., Math. Phys. Sci.* **53**, 764 (1957).
55. P. A. G. Scheuer, *Radio Astronomy and Cosmology*, vol. 9, Ch. «Stars and Stellar Systems» (Ed. by A. R. Sandage), 1969.
56. M. Schmidt, *Astrophys. J.* **151**, 393 (1969).
57. A. J. Shimmins, J. A. Bolton, J. V. Wall, *Nature* **217**, 818 (1968).
58. A. J. Shimmins, G. A. Day, R. D. Ekers, D. J. Cole, *Austr. J. Phys.* **19**, 837 (1966).
59. J. Silk, *Astrophys. J. Lett.* **151**, L19 (1968).
60. Р. А. Сюняев, *Астрон. ж.* **46** (5), 929 (1969).
61. J. Terrell, *Science* **145**, 918 (1964).
62. Л. А. Вайнштейн, В. Г. Курош, С. Л. Мандельштам, Л. П. Пресняков, С. И. Сыроватский, Р. А. Сюняев, И. П. Тиндо, *Косм. исследования* **6**, 242 (1968).
63. Я. Б. Зельдович, И. Д. Новиков, *Релятивистская астрофизика*, М., «Наука», 1968.
64. Я. Б. Зельдович, *УФН* **95** (2), 209 (1968).