Апрель 1972 г. *Том 106, вып. 4*

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

523.11

ГАЛАКТИКИ И ВСЕЛЕННАЯ*)

Я. Оорт

Изучая вращение галактик и их распределение в пространстве, можно получить сведения о свойствах Вселенной.

Согласно общепринятой точке зрения, началом Вселенной явился гигантский взрыв, происшедший примерно 10 миллиардов (10^{19}) лет назад. Мы не знаем причин этого взрыва и что было до него, но можно многое сказать о том, что происходило *в результате* этого так называемого «большого взрыва (big bang)».

Некоторое время после взрыва масса Вселенной определялась в основном излучением, и это излучение очень сильно взаимодействовало с веществом. Этот период, названный Уилером стадией «огненного шара (fireball)», закончился, когда радиус или масштаб Вселенной достиг примерно 1/1000 ее современного масштаба. Возраст Вселенной был равен тогда примерно 300 000 лет, что составляет 1/30 000 от ее современного возраста. Примерно к этому времени прекратилось взаимодействие между веществом и излучением. Температура снизилась до нескольких тысяч градусов.

В плане наблюдений замечательным следствием «большого взрыва» является расширением Вселенной. Все далекие галактики удаляются от нас и друг от друга со скоростью, пропорциональной их расстоянию. Это и должно происходить с объектами, образовавшимися в одно и то же время из маленького объема. Ряд других характеристик Вселенной, наблюдаемых в настоящее время, также должны быть связаны с условиями на ранних стадиях взрыва.

В настоящей статье будут рассмотрены в основном вопросы о том, какую информацию о ранних стадиях Вселенной мы можем получить на основе изучения ее свойств, наблюдаемых в настоящее время, а также о том, как эту информацию можно использовать при интерпретации этих свойств.

Наиболее существенны следующие явления: 1) общее расширение Вселенной; 2) изотропное тепловое излучение («black body» radiation); 3) современное крупномасштабное распределение материи во Вселенной; 4) существование галактик; 5) вращение галактик; 6) эволюционные эффекты для плотности источников радиоизлучения; 7) неустойчивость ядер галактик.

РЕЛИКТОВОЕ ТЕПЛОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

В последние годы наблюдали излучение в диапазоне сантиметровых и миллиметровых волн. Насколько можно судить из полученных данных, спектр и интенсивность этого излучения соответствуют излучению черного тела с температурой около 3° К. Это излучение, впервые обнаруженное Пензиасом и Вильсоном [1a] всего пять лет назад, приходит, по-видимому,

*) J. H. Oort, Galaxies and the Universe, Science **170** (No. 3965), 1363 (1970). Перевод Н. И. Гинзбург.

из Вселенной. Оно приходит со всех сторон с одинаковой интенсивностью. Фактически его изотропность столь совершенна, что при относительно небольшом улучшении существующей точности можно надеяться измерить эффекты движения нашего Солнца и нашей Галактической системы относительно этого универсального поля излучения, что дало бы невероятно интересную информацию.

Вселенная, по-видимому, заполнена этим низкотемпературным излучением. Наличие такого излучения является необходимым следствием». теории расширяющейся Вселенной, связанной с «большим взрывом. Фактически уже 25 лет назад это излучение было предсказано Гамовым [16]. На основании своей теории о «большом взрыве» Гамов предсказал для нашего времени температуру излучения, равную 5° К, что удивительно близко к данным современных наблюдений. Это предсказание было полностью забыто, и открытие излучения явилось полной неожиданностью.

В начальной стадии взрыва излучение было, конечно, несравненно более интенсивным и соответствовало температуре 10^{12} градусов или выше. Тогда излучение состояло из жестких γ-лучей. Это начальное излучение «смягчалось» в результате расширения Вселенной и достигло температуры 3° К, которую мы сейчас и наблюдаем. Измеряя современную температуру, можно вычислить температуру и плотность излучения Вселенной в прошлом вплоть до самого «большого взрыва».

Другое интересное следствие 3-градусного излучения — это, как отметили Зельдович и его сотрудники, то обстоятельство, что с его помощью можно в конечном итоге определить крупномасштабные отклонения от однородности, существовавшие на стадии «огненного шара». Современная крупномасштабная структура Вселенной должна была образоваться именно из этих начальных неоднородностей, и очевидно, что непосредственная информация о них очень важна для понимания современной структуры Вселенной.

СРЕДНЯЯ ПЛОТНОСТЬ ВЕЩЕСТВА ВО ВСЕЛЕННОЙ. МЕЖГАЛАКТИЧЕСКИЙ ГАЗ

Обсудим теперь крупномасштабное распределение материи во Вселенной. Единственным способом изучения этого распределения в настоящее время является наблюдение галактик.

Прежде всего нужно обсудить вопрос о средней плотности,— вопрос, который имеет первостепенное значение. К сожалению, на него невозможно дать ответ с той точностью, как хотелось бы. Можно лишь грубо определить нижний предел, вычисляя общую плотность массы, связанную с галактиками. Эта оценка дает $3 \cdot 10^{-31}$ *г/см*^{3}, если взять постоянную Хаббла равной 75 *км/сек* на мегапарсек. Весьма вероятно, однако, что имеется значительно большее количество вещества, *не* сконденсированного в галактиках. Из предварительной теории процесса образования галактик, к которой мы вернемся ниже, я оценил, что в процессе образования галактик должна была быть вовлечена самое большое $^1/_{15}$ часть газа Вселенной. Если это так, то фактическая общая плотность должна составить по крайней мере $0{,}5 \cdot 10^{-29}$ *г/см*.

До настоящего времени существует весьма мало прямых указаний в пользу существования этого межгалактического газа. С помощью изучения линии водорода (длина волны 21 *см*) астрономы в Лейдене и Гронингене открыли за последние годы в высоких галактических широтах удивительные облака, которые движутся с высокой скоростью, по-видимому, по направлению к галактической плоскости. Наиболее вероятным объяснением их движения, как мне кажется, является предположение,

что они образовались в результате падения на Галактику межгалактического газа [2]. Но даже если такая интерпретация правильна, явление носит слишком локальный характер, чтобы с его помощью оценить общую плотность межгалактического газа во Вселенной.

Температура межгалактического газа должна достигать по крайней мере сотен тысяч градусов, ибо в противном случае этот газ наблюдался бы в спектрах поглощения удаленных звездных радиоисточников (квазаров). Но этот газ не может быть горячее примерно миллиона градусов, поскольку в противном случае при принятой выше плотности наблюдалось бы более мощное излучение мягких рентгеновских лучей, чем это следует из наблюдений. Фактически наблюдения мягкого рентгена указывают на наличие изотропного излучения, которое может вполне являться излучением горячей межгалактической среды, но интерпретация результатов все еще несколько неопределенна. Если же такая интерпретация правильна, то мы приходим к общей плотности порядка 10^{-29} *г/см*^{3}, что совпадает с оценкой, полученной при рассмотрении процесса образования галактик.

Может быть, самым убедительным аргументом в пользу существования во Вселенной значительного количества межгалактического газа является наличие внутренних движений в некоторых скоплениях или группах галактик. Примером может служить центральная часть скопления в Деве, где скорости значительно выше тех, которые отвечают галактикам, удерживаемым вместе, хотя бы даже временно, в результате их собственного гравитационного притяжения. Необходимая для обеспечения стабильности скопления масса примерно в 25 раз больше массы всех входящих в скопление галактик. Еще более непосредственное и неопровержимое доказательство возникает при рассмотрении Местной группы галактик, в которой самые большие галактики — Туманность Андромеды и Галактика, содержащие почти всю видимую массу в группе, приближаются к друг другу со скоростью 102 *км/сек*. Такую скорость сближения можно понять только при предположении о наличии массы в форме межгалактического вещества, которая по крайней мере вдвое больше массы, содержащейся в обеих галактиках.

С упомянутой выше плотностью, равной 10^{-29} *г/см*^{3}, связано одно существенное обстоятельство. Эта плотность, грубо говоря, равна так называемой «критической» плотности, при которой Вселенная, расширяясь до бесконечного размера или радиуса, имеет на бесконечности равную нулю скорость. В несколько иных терминах физики говорят, что при плотности больше критической Вселенная должна быть не открытой бесконечной Вселенной, а замкнутой Вселенной с конечной массой. Это совпадение весьма удивительно. Существует ли физическая причина, приводящая к столь точному равенству между скоростью взрыва и скоростью, необходимой для разлета данной массы на бесконечность? Ведь обе эти скорости могли бы быть совершенно различны. Можно привести соображения, о том что при много меньшей скорости взрыва Вселенная сколлапсировала бы до появления и развития жизни, а при много бо́льших скоростях не было бы конденсации и не образовались бы галактики и звезды?

Радиогалактики и квазары в настоящее время можно наблюдать вплоть до расстояния, которое для замкнутой Вселенной должно быть равно примерно ее радиусу. Большинство этих радиоисточников двойные. На таких больших расстояниях угловое разрешение двойных источников сильно зависит от геометрии Вселенной. Есть основания надеяться, что в близком будущем измерения этих угловых расстояний в комбинации с более полным изучением структуры радиогалактик позволит астрономам определить радиус кривизны Вселенной, а следовательно, и среднюю плотность, которая непосредственно связана с этим радиусом.

КРУПНОМАСШТАБНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Вернемся теперь к наблюдениям и рассмотрим отклонения от однородности. На рис. 1, взятом из классических наблюдений Шепли и Эймса [3], изображено в галактических координатах распределение на небе галактик, яркость которых больше 13-й величины. Это распределение сильно неоднородно. Кроме плотного конгломерата вблизи северного галактического полюса (скопление в Деве), где на поверхности диаметром в 10°, или 9 миллиардов световых лет, сконцентрировано несколько сотен галактик, наблюдается значительная неоднородность по всему небу, как

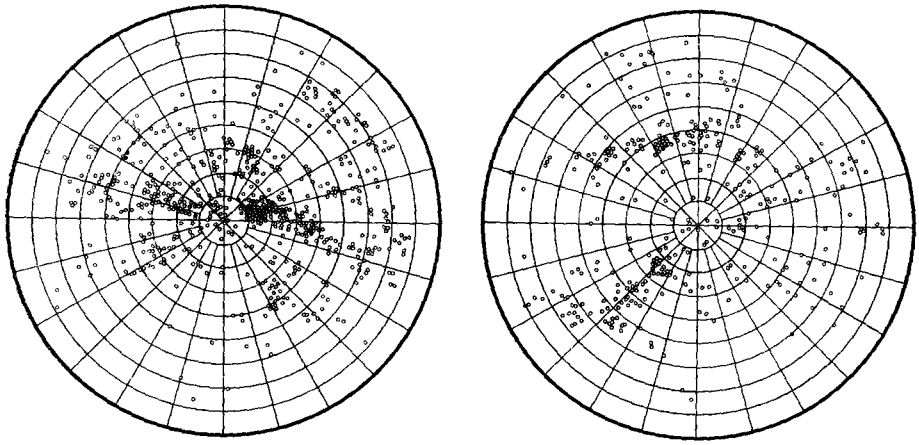

Рис. 1. Распределение галактик с яркостью больше 13-й величины.
Слева и справа приведены соответственно диаграммы северной и южной галактических полусфер Галактические полюсы расположены в центрах диаграмм. Внешняя окружность является галактическим экватором (по [3]).

в крупном, так и в мелком масштабе. В области ниже 20° галактической широты на распределение сильно влияет поглощение в нашей Галактике. В связи с этим поглощением едва ли можно наблюдать какие-либо галактики, расположенные ниже широты 10°. Но выше широты 20° эффекты поглощения малы и наблюдения отражают истинное распределение плотности галактик в пространстве.

Исследованный объем пространства имеет радиус, равный примерно 10^8 световых лет. Можно предполагать, что самые большие по размерам структурные детали Вселенной имеют примерно такую же протяженность. Чем больше наблюдаемая область, тем меньше меняется ее средняя плотность. При усреднении по области с диаметром в 10^9 световых лет Вселенная выглядит практически однородной и изотропно расширяющейся.

Наблюдения радиоисточников, которые производятся до еще более далеких расстояний, чем в случае обычных галактик, подтверждают, по-видимому, изотропность Вселенной, несмотря на высказываемые предположения, что для квазаров на небе должны наблюдаться большие отклонения от равномерного распределения.

Неоднородность в масштабе 10^8 световых лет и меньше, столь четко отраженная в каталоге Шепли — Эймса [3], скорее всего связана с крупномасштабными флуктуациями плотности, возникшими непосредственно при «большом взрыве». Концентрация масс порядка 10^{14}—10^{15} масс Солнца, подобная той, которая видна в скоплении в Деве и в его отростках (см. ниже), способна была бы сохраниться и в течение стадии «огненного шара». Поэтому в некотором смысле можно считать, что такие скопления масс отделились от окружающих частей Вселенной непосредственно

в самом начале и сохранялись впоследствии в течение всей эволюции как самостоятельные единицы. В связи с этим можно сделать некоторые непосредственные выводы об условиях существования Вселенной на ранних стадиях ее развития. Отличие упомянутых неоднородностей от окружающей среды могло быть связано с несколько большей плотностью либо со слегка меньшим расширением или с тем и другим вместе. Соответствующие отличия (контраст) от окружающего пространства должны были быть необычайно малы.

Из данных о нашей эпохе мы можем заключить, что в то время, когда прекратилось взаимодействие между веществом и излучением и условия в каком-то смысле начали приближаться к современным, контраст, необходимый для образования крупномасштабных неоднородностей, составлял

Рис. 2. Скопление галактик в Северной Короне (снято с помощью 200-дюймового телескопа на Маунт-Палоларе).

Круглые изображения с резкими границами — звезды нашей Галактики. Мелкие и часто удлиненные изображения являются удаленными галактиками в скоплении.

около двух миллионных долей. *Небольшое* запаздывание в расширении, вызванное соответствующим превышением плотности, или недостаточное расширение приводит к различию плотностей порядка от 100 до 1, что мы теперь и наблюдаем. В конечном итоге эти структуры могут полностью коллапсировать и превратиться в обычные плотные скопления галактик, такие, как в Северной Короне (рис. 2). Такой характер эволюции флуктуаций плотности с необычайно малой начальной амплитудой произошел бы даже в том случае, если бы средняя плотность во Вселенной была бы такой же низкой, как ее наинизший предел, оцененный только по одним галактикам.

Весьма характерная черта в распределении галактик — их стремление к образованию длинных цепочек. Примером могут служить отростки, расположенные по обе стороны скопления в Деве и простирающиеся на расстояние около 90°, или почти 100 миллионов световых лет. Две другие длинные цепочки можно видеть в южной галактической полусфере. Это свойство галактик озадачивало меня с самого начала, еще с того момента, когда я готовился к обзорной лекции на Сольвеевском конгрессе

1958 г. [4]. Однако проведенные недавно исследования эволюции сфероидальной газообразной массы в расширяющейся Вселенной показали, что такая масса всегда коллапсирует в первую очередь вдоль ее наименьшей оси Отношение осей невероятно растет в течение эволюции, так что, даже если во время прекращения взаимодействия между веществом и излучением форма области с избытком плотности отклоняется только на несколько процентов от точной сферы, коллапс приводит в первую очередь к нитевидной структуре Расчеты эволюции несферической массы были произведены Икком (частное сообщение)

Представляется весьма невероятным, чтобы исходные флуктуации плотности во Вселенной имели точно сферическую форму Поэтому удлиненные формы можно рассматривать как формы естественные, могущие при некотором избытке начальной плотности образоваться путем эволюции В конечном итоге коллапс будет происходить также и вдоль *длинных* осей. Очевидно, что этого пока в общем не происходит С точки зрения общего распределения вещества, наблюдаемого в настоящее время. Вселенная пока находится все еще в средней стадии эволюции По-видимому, только в весьма исключительных случаях происходил окончательный коллапс с образованием больших стабильных скоплений Такие соображения приводят к точке зрения, что большинство галактических скоплений могло образоваться лишь недавно и что их все меньше и меньше при удалении в прошлое Мы должны серьезно обсудить возможность того, что, скажем, до момента $z = 1$, когда возраст Вселенной был равен примерно одной трети ее настоящего возраста, вообще не было никаких скоплений

Нельзя, по видимому, получить обсуждаемого выше большого отличия в распределении плотности, если не было соответственно больших отклонений от расширения в среднем Длинные образования, аналогичные двум отросткам в скоплении в Деве, близки, по-видимому, к предельной протяженности, и расширение вдоль цепочек должно происходить значительно медленнее, чем среднее расширение Вселенной на таком же расстоянии. Оценка средней радиальной скорости расширения различных частей цепочки, сделанное Иком и мною, указывает на то, что и в самом деле расширение может быть практически равно даже нулю При определении константы Хаббла, которая характеризует среднее расширение однородной Вселенной, желательно учесть локальные отклонения, которые могут сопутствовать таким большим скоплениям

Во всех предшествующих рассуждениях предполагалось, что, кроме галактик, имеется большое количество межгалактического газа, и что этот газ имеет такое же общее распределение, что и галактики Газ является *стабилизирующим* фактором, поскольку, по-видимому, он излучает бо́льшую часть кинетической энергии, приобретенной при коллапсе. Одновременно газ является и основным стабилизирующим фактором в случае больших симметричных скоплений типа скопления в Волосах Вероники и в Северной Короне.

ВРАЩЕНИЕ И ОБРАЗОВАНИЕ ГАЛАКТИК

До сих пор мы не обсуждали вопроса об образовании галактик Между тем процесс их образования, по-видимому, существенным образом отличается от процесса образования больших групп и скоплений галактик, только что нами рассмотренного

Во-первых, возникает вопрос о размерах галактик Галактики при своих относительно небольших массах (10^{11}—10^{12} масс Солнца и ниже) могли бы не сохраниться в течение стадии «огненного шара» Поэтому они,

может быть, и не являются непосредственным продуктом «большого взрыва», в отличие от групп и скоплений галактик. Во-вторых, большинство галактик должны были достигнуть своих современных форм много раньше, чем структуры, наблюдаемые в распределении галактик. Но наиболее важным свойством в вопросе образования галактик является их вращение.

В то время как большие скопления галактик вращаются очень медленно либо вообще не обнаруживают никакого вращения, отдельные галактики, как правило, быстро вращаются. Это в особенности относится к спиральным и S_0-галактикам. Из измерений вращения нашей собственной Галактики и некоторых близко расположенных спиральных галактик мы можем получить правильную оценку их угловых моментов и масс. При этом выявляются некоторые интересные обстоятельства.

До недавнего времени большинство космологов считали, что галактики произошли в результате крупномасштабных флуктуаций плотности с малой амплитудой, которые имели место во времена прекращения взаимодействия между веществом и излучением в конце стадии «огненного шара», т. е. в основном так же, как происходило описанное выше образование крупномасштабных неоднородностей в распределении галактик. Однако в ту эпоху общая плотность Вселенной была столь высока, что радиус объема, содержащего массу, равную массе галактики, был слишком мал, чтобы этот объем мог обладать угловым моментом, сравнимым с угловым моментом, наблюдаемым для спиральных галактик.

Мы можем поэтому считать, что угловой момент был внесен в «протогалактику» какими-либо внешними силами на более поздней стадии ее развития или что протогалактика сама отделилась от окружающей ее Вселенной в более позднюю эпоху, когда средняя плотность понизилась до такой степени, что ячейка, содержащая массу, равную массе галактики, могла обладать необходимым угловым моментом. В то время масштаб Вселенной должен был составлять $^1/_{30}$ от ее современного масштаба и быть в 30 раз больше, чем во времена прекращения взаимодействия между веществом и излучением. Первая возможность, обсуждавшаяся Хойлом [5] в 1951 г., была недавно вновь рассмотрена Пиблзом [6]. Однако несколько более подробное рассмотрение, основанное на обратной по времени экстраполяции современных условий во Вселенной, показывает, что возможные внешние воздействия на протогалактику были по крайней мере на порядок величины меньше необходимых, чтобы вызвать вращение, наблюдаемое у спиральных галактик [7]. Поэтому, видимо, нужно остановиться на второй альтернативе.

Здесь мы узнаём нечто новое, а именно, что в масштабе галактик Вселенная должна находиться в сильно турбулентном состоянии. Эта турбулентность во времена образования протогалактик должна была, по-видимому, быть следствием еще более сильной турбулентности в предшествующие эпохи, которая, быть может, возникла еще во время начального взрыва. Какой механизм ответствен за эту турбулентность, пока еще не ясно. Озерной и Чернин [8] выдвинули интересное предположение, что фотонные вихри с массой порядка галактической могут обеспечить требуемую турбулентность.

На основе приведенных выше соображений можно получить также некоторые сведения об эпохе, когда фактически образовалось большинство галактик. Рассуждать при этом можно следующим образом. Вполне можно предположить, что та самая турбулентность, которая вызвала вращение, могла также привести к образованию галактик в быстро расширяющейся Вселенной. Если представить себе вихрь галактических размеров, то потоки в таком вихре, необходимые для получения требуемого углового момента, не должны, по-видимому, быть направлены лишь в поперечном

направлении; они могут также течь в радиальном направлении по отношению к центру рассматриваемого объема. Если измерять скорости в системе отсчета, движущейся со средней скоростью расширения Вселенной, мы можем получить движения типа изображенных на рис. 3. В областях, где радиальные потоки текут наружу, объем будет увеличиваться быстрее, чем в среднем во Вселенной. Такие объемы, очевидно, рассеиваются и не образуют галактик. Но в случае областей, где потоки в основном направлены *внутрь*, общее расширение Вселенной локально замедляется и возникает возможность коллапса такого объема под влиянием его собственной гравитации.

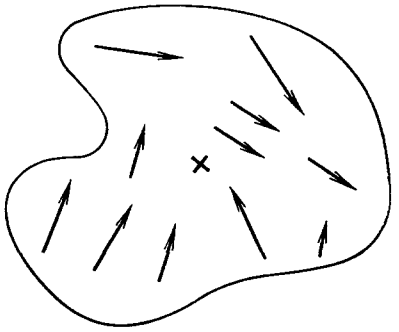

Рис. 3. Потоки, которые могут привести к образованию вращающейся галактики.

Из наблюдения вращения галактик можно получить оценку размера поперечных компонент скорости, а следовательно, в благоприятных случаях и некоторое представление о величине замедления расширения. В этом случае опять появляется возможность оценки времени, требуемого на повторный коллапс рассматриваемых объемов. Радиальные потоки будут, вообще говоря, компенсировать лишь часть расширения Вселенной. Вследствии этого рассматриваемый объем (или «протогалактика») сначала будет расширяться вместе со Вселенной, хотя и со значительно меньшей скоростью, и сколлапсирует намного позже. Именно в эту эпоху в результате коллапса газа, из которого состоит протогалактика, образуются *звезды* и возникает реальная галактика. Мы должны, таким образом, различать две эпохи в процессе рождения галактик:

1. Время, когда масса газа, образующего галактику, отделяется от окружающей его Вселенной и образует самостоятельную единицу. Это время мы можем называть временем начала протоспирали. В это время возраст Вселенной мог быть порядка $^1/_{100}$от ее настоящего возраста, который мы будем обозначать через t_0.

2. Время коллапса протогалактики. Это — время фактического рождения спиральной галактики. Его можно оценить лишь весьма приближенно. Для большинства галактик оно может совпадать с эпохой, когда возраст Вселенной составлял $^1/_4 \div {}^1/_5$ от ее настоящего возраста. Несомненно, соответствующие значения возрастов рождения галактик обладают большим разбросом, и легко себе представить, что некоторые галактики все еще образуются и в наши дни, в то время как другие образовались значительно раньше.

Интересным следствием этого процесса образования галактик является то обстоятельство, что «послеродовой» период очень продолжителен и простирается, по-видимому, далеко за пределы настоящего времени. Несмотря на то, что концентрация основной массы галактики происходит в упомянутое выше время ее образования, «послеродовой» период характеризуется продолжающимся натеканием газа из окружающей среды, хотя и в меньших количествах.

Как уже упоминалось выше, явления, указывающие на такой приток газа в нашу Галактику, были действительно обнаружены при наблюдениях линии на 21 *см*. Этот приток газа является очень важным эффектом, могущим оказывать влияние на динамику спиральных галактик, возможно, также на ядра галактик и к тому же на их химический состав.

Если процесс образования галактик происходит именно так, как описано выше, то конденсируется лишь часть газа Вселенной. Из общих соображений можно оценить, что эта часть вряд ли может превысить $^1/_{15}$ от общего объема, а скорее всего, она еще меньше. Если присоединить к этому оценку массы, содержащейся в галактике, то мы получим минимальную общую плотность, которая близка к упомянутому выше критическому значению. И тогда становится вполне правдоподобным, что Вселенная может иметь плотность выше критической и что она является конечной и замкнутой.

ЭВОЛЮЦИОННЫЕ ЭФФЕКТЫ

Перейдем теперь к описанию явления, которое поражает астрономов с того самого момента, как оно впервые было открыто Райлом [9] и его сотрудниками много лет назад. При обзоре радиоисточников, которые в те дни считались слабыми, Райл обнаружил, что их значительно больше, чем можно было ожидать на основе подсчета ярких радиоисточников. Волнующим было то, что, скорее всего, это аномальное увеличение можно было отнести за счет эволюции. Эти эволюционные эффекты были подтверждены позже независимым образом Шмидтом при измерении скоростей квазаров.

По-видимому, когда возраст Вселенной составлял $^1/_3$ от ее настоящего возраста, концентрация радиоисточников была примерно в сто раз больше, чем теперь. Этот фактор примерно в два раза больше геометрического фактора, связанного с уменьшением масштаба Вселенной в то время, и поэтому отражает истинный эволюционный эффект.

Если заглянуть еще глубже в прошлое, этот фактор продолжает увеличиваться, пока мы не достигнем времени $t = 0{,}20t_0$. Для еще более раннего времени количество сильных радиогалактик и квазаров быстро уменьшается. Не было обнаружено ни одного радиоисточника на расстоянии больше расстояния, соответствующего $t = 0{,}13t_0$.

Когда были открыты эволюционные эффекты, казалось удивительным, что столь огромные различия могут возникать на протяжении сравнительно близких эпох. Можно было бы ожидать возникновения радикально отличных условий в конце стадии «огненного шара», когда возраст Вселенной составлял $^1/_{10\,000}$ от ее настоящего возраста, но трудно ожидать больших изменений для возраста лишь в пять раз меньше настоящего.

Однако, как упоминалось выше, именно на этом отрезке времени произошло, по-видимому, существенное событие — рождение вращающихся галактик.

Правда, приводимые оценки применимы только к спиральным галактикам, но можно предположить, что все галактики эволюционируют аналогичным образом и что отсутствие радиоисточников в более ранние времена связано с тем, что тогда галактик еще не было. Заманчиво также связать наличие очень яркой стадии у радиоисточников с моментом образования галактики или со временем, следующим за этим образованием, и полагать, что огромное увеличение количества радиоисточников в прошлом каким-то образом связано с сильным ростом скорости рождения галактик, что могло происходить, как мы только что видели, примерно в ту же эпоху.

ЯДРА ГАЛАКТИК И ИХ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ

Существование радиогалактик и их фантастически интригующие свойства заставляют нас остановиться на еще одной особенности Вселенной — стремлению к неустойчивости. Это свойство чрезвычайно важно; его универсальное значение было понято только после возникновения

радиоастрономии, хотя некоторые оптические доказательства существовали и ранее. Теперь общепринятой является точка зрения, что большинство, если не все, наблюдаемые явления крупномасштабной неустойчивости возникают в *ядрах* галактик и, вероятно, в ядрах, которые чрезвычайно малы по сравнению с общими размерами галактик.

Здесь нет возможности дать даже краткий обзор многообразия форм, в которых проявляется неустойчивость. Ограничимся несколькими примерами. В галактике NGC 1275 (рис. 4) имеется огромная масса ионизованного газа, возможно, равная ста миллионам солнечных масс, которая движется от галактики со скоростью 3000 *км/сек*. Очень вероятно, что эту массу газа привел в движение какой-либо механизм, связанный с ядром.

Если это так, то грандиозный взрыв, в результате которого газ был выброшен, должен был начаться несколько миллионов лет назад. Этот

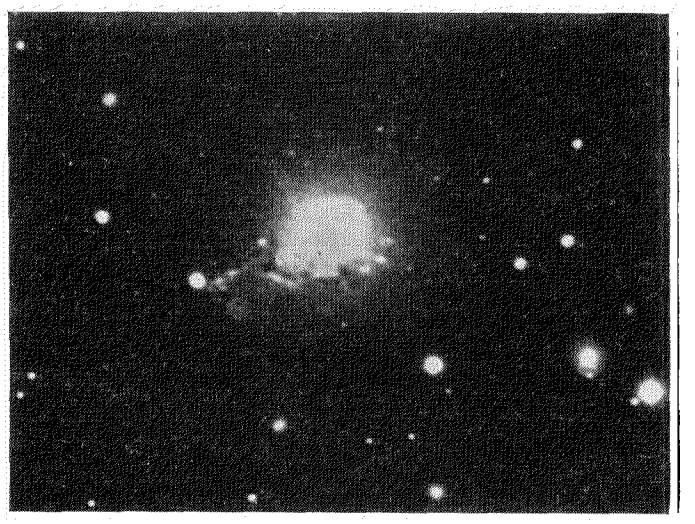

Рис. 4. Галактика NGC 1275.

Около половины ионизированного межзвездного газа движется со скоростью 3000 км/сек относительно галактики. Другая половина газа имеет такую же скорость, что и галактика. Галактика, расположенная от нас на расстоянии $2{,}2 \cdot 10^8$ *световых лет, является сильным радиоисточником Персей А (по* [15]*).*

взрыв имеет продолжающийся характер, поскольку он идет еще и сейчас. Кстати, галактика NGC 1275 является сильным радиоисточником и обладает рядом других удивительных свойств.

Различные эруптивные явления происходят в знаменитом радиоисточнике M 87, расположенном вблизи центра скопления в Деве. Оптически M 87 является просто обычной гигантской эллиптической звездной системой. Она имеет прекрасную правильную и симметричную форму, за исключением одной любопытной особенности, которая совсем не согласуется с правильностью звездной системы: имеется светящаяся струя, выходящая, по-видимому, из центра и простирающаяся на расстояние, равное примерно 5000 световых лет. Свет струи сильно поляризован и должен быть поэтому связан с синхротронным механизмом, который, как известно, ответствен за радиочастотное излучение радиогалактик. Так же как и в случае галактики NGC 1275, эта бурная активность, положившая начало струе и окружающему звездную систему большому гало с сильным радио-

излучением, может продолжаться длительное время, так как в ядре все еще наблюдается активность.

Наиболее грандиозные события наблюдаются в квазизвездных объектах или квазарах, истинная природа которых была впервые разгадана М. Шмидтом. Эти объекты являются «сигнальными огнями», с помощью которых можно исследовать самые удаленные части Вселенной.

Квазары испускают огромное количество излучения синхротронного типа. Это излучение столь мощно, что очень трудно понять, какой источник может создавать подобную энергию. Энергия, заключенная в квазаре, эквивалентна энергии, которая возникла бы при полной аннигиляции от 10^7 до 10^8 масс Солнца.

Активность такого масштаба, какой обладают квазары, чрезвычайно редка. Но активность галактических ядер, которая несколько слабее,— явление весьма обычное. Среди полудюжины ближайших гигантских галактик имеется по крайней мере две (M 82 и NGC 5128), свойства которых свидетельствуют о том, что недавно они являлись источниками бурной активности. В этой связи нужно упомянуть и о так называемых сейфертовских галактиках. Это — довольно часто встречающийся класс спиральных галактик, общая структура которых очень похожа на обычную спираль, за исключением того, что эти галактики обладают маленьким ядром, в котором видны дискретные облака, движующиеся со скоростями, вероятно, бóльшими скоростей выхода облака из галактики. Эти облака, масса которых в 10^3—10^4 раз больше массы Солнца, были, по-видимому, вытолкнуты очень маленьким ядром. Кроме того, в этих сейфертовских ядрах выделяются огромные количества энергии. Мы вполне можем задать вопрос: все ли большие галактики могут практически обладать ядрами, которые потенциально способны в определенные времена развить взрывную активность?

В связи с этим интересно остановиться на некоем явлении, происходящем в нашей Галактике. В некоторых аспектах значительно легче изучать центральные области в Галактике, чем в значительно более удаленных внешних галактиках.

Наблюдаются явления двух типов, непосредственно касающиеся проблемы неустойчивости. Первое из них связано с тем, что Галактика содержит маленькое ядро, испускающее синхротронное излучение на радиочастотах. Оно испускает также излучение иного типа в далекой инфракрасной области, которое дает такой же необычный спектр, как ядра сейфертовских галактик, но с интенсивностью примерно в 30 000 раз меньшей. Кроме того, в Галактике существует, по-видимому, очень плотное звездное «ядро», центральная концентрация звезд в котором по крайней мере в 10^8 раз больше плотности звезд, близких к нашему Солнцу (рис. 5, *а*). В недавно появившемся обзоре [10] более подробно разобраны явления, происходящие в ядре и в центральной области. Низкая интенсивность инфракрасного излучения указывает на то, что сейчас их активность невелика. Имеются, однако, признаки того, что в прошлом эта активность могла носить другой характер. В 1965 г. Шейн, проводя в Двингало наблюдения на линии 21 *см*, нашел, что в центральной области вне галактического диска имеются большие количества газа, который, по-видимому, был выброшен из центра менее чем 10 миллионов лет назад. Последующие тщательные наблюдения Ван-дер-Крёйта [115] подтвердили это предположение. Взрыв происходит, вероятно, в двух, примерно противоположных, направлениях, составляющих большой угол с плоскостью Галактики, и с ним связана масса, равная по крйней мере 10^8 солнечных масс. Эти «облака» схематически изображены на рис. 5, *б*, на котором приведен разрез, проходящий через центральную область Галактики и перпенди-

кулярный галактической плоскости. Если такая интерпретация правильна, то это должно означать, что в недалеком прошлом ядро нашей Галактики было весьма активно.

Связанные с расширением движения *в диске*, в котором участвуют такие массивные структуры, как спиральные рукава, известны уже давно. Их особенно подробно исследовал Ругор [12]. Для объяснения больших радиальных скоростей рукавов в плоскости диска раньше можно было привлекать механизмы, отличные от выброса вещества из ядер. Но теперь, когда существует непосредственное доказательство того, чтоб большие массы газа фактически были выброшены из ядра, мы можем полагать, что

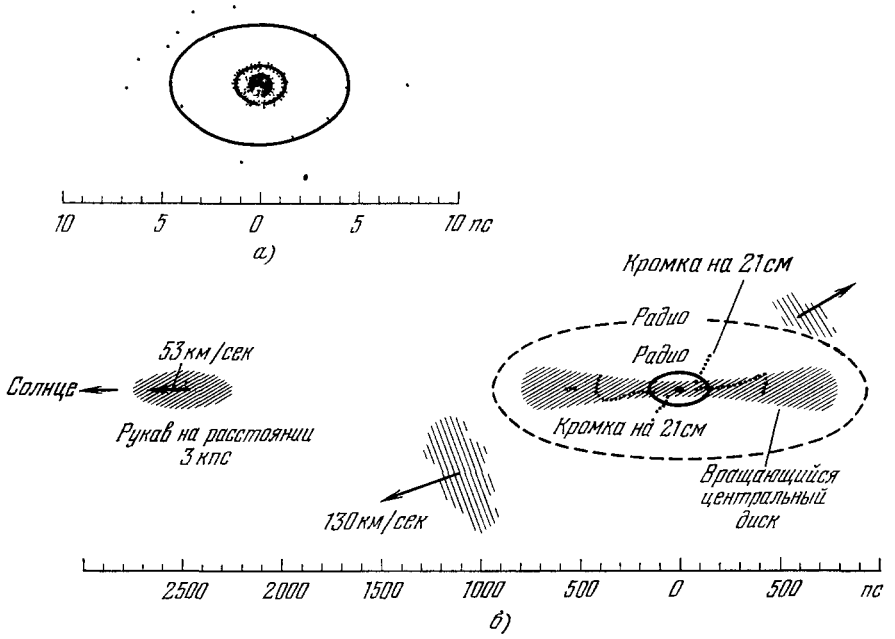

Рис. 5 Схема центральной области ядра нашей Галактики

Черный диск (*а*) имеет протяженность «сейфертовской» сердцевины Эллипс на этом же рисунке схематически изображает контуры центрального радиоисточника Стрелец А.

эти рукава также были приведены в движение веществом, выброшенным из ядра. Теоретический анализ этой возможности был проведен Ван-дер-Крейтом. Чтобы объяснить движения объекта типа рукава, расположенного на расстоянии в 3 *кпс* от пентра Галактики, огромные массы газа должны были быть выброшены с высокой скоростью.

Каково в конечном счета происхождение этого удивительного явления, порождаемого галактическими ядрами?

Существуют две основные проблемы, а именно: источник энергии и источник огромных количеств испускаемого вещества. Представляется возможным, что источником является очень большая сверхплотная быстро вращающаяся масса, содержащая сильное магнитное поле с осью, наклоненной по отношению к оси вращения. Это предположение, впервые высказанное Морризоном [13], было вызвано открытием пульсара в Крабовидной туманности — оболочки сверхновой, которая за последние 15—20 лет дала нам сведений о взрывах во Вселенной больше, чем, возможно, все другие небесные объекты, вместе взятые. Однако все еще совершенно не ясно, может ли такой более или менее обычный подход действительно

объяснить все затрагиваемые явления. Противоположная точка зрения поддерживается Амбарцумяном, который в прошлом проявил большую интуицию в отношении явлений, о которых никто даже и не подозревал, и предвидел фундаментальное значение галактических ядер задолго до того, как было обнаружено большинство относящихся к этому вопросу явлений [14]. Он неоднократно высказывал предположения, что ядра галактик существовали с самого начала, вероятно, как остаточные фрагменты взрыва, послужившего началом Вселенной, и что эти ядра обладают свойствами, которые могут объяснить все наблюдаемые в галактике явления.

Хотя в настоящее время большинство астрономов воздерживаются от принятия такой весьма радикальной точки зрения в отношении происхождения галактик, нужно помнить, что имеется целая категория явлений неустойчивостей, не нашедших пока удовлетворительного объяснения. При изучении галактических ядер мы только теперь достигли границ большой неизвестной области, и дальнейшие наблюдения, может быть, выявят данные, которые неожиданно изменят наши современные представления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выше кратко был освещен вопрос о том, что нам дает изучение галактик для понимания свойств Вселенной. Предполагается, что Вселенная возникла при общем «взрыве» и что наблюдаемое в наши дни всеобщее расширение Вселенной, а также тепловое излучение с температурой 3° К являются следствиями этого взрыва. Современная средняя плотность во Вселенной близка, вероятно, к критическому значению, равному 10^{-29} *г/см*^{3}. Примерно лишь 3% этого вещества находится в галактиках, остальная часть вещества, вероятно, представляет собой межгалактический газ при температуре между 10^5 и 10^6 °К. Наблюдения в нашей Галактике показывают, что в нее все еще поступает этот межгалактический газ.

Распределение вещества во Вселенной весьма неоднородно. Даже вне скоплений галактик отношение плотностей порядка 100/1 вполне обычно. Это указывает на то, что сильно удлиненные формы, которые, по-видимому, характерны для наиболее протяженных областей с высокой галактической плотностью, являются естественным следствием расширения Вселенной. Наибольшие структурные элементы имеют размеры порядка 10^8 световых лет. Эти структурные элементы находятся, видимо, в средней стадии своей эволюции. Плотные скопления галактик могут являться весьма недавним образованием.

Большой угловой момент на единицу массы в спиральных галактиках говорит о том, что во время их отделения — много времени спустя после окончания стадии «огненного шара»— Вселенная должна была находиться в невероятно турбулентном состоянии. После их отделения протогалактики сначала расширились и превратились в звездные системы только после вторичного коллапса, который мог произойти, когда значения отношения t/t_0 лежали приблизительно между от 0,1 до 0,2 (t_0 — современный возраст Вселенной). Этот период мог совпасть с периодом появления большого количества мощных радиоисточников.

В последнем разделе был дан весьма краткий обзор явлений большой неустойчивости, наблюдаемых в некоторых галактиках. Эти явления связаны, по-видимому, с галактическими ядрами. Имеются данные о том, что ядра большинства крупных галактик время от времени оказываются исключительно активными.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. a) A. A. Penzias, R. W. Wilson, Astrophys. J. **142**, 419 (1965); б) G. Gamow, Rev. Mod. Phys. **21**, 367 (1949).
2. J. H. Oort, Nature **224**, 1158 (1969).
3. H. Shapley, A. Ames, Ann. Harvard Obs. 88, 43 (1932).
4. J. H. Oort, La Structure et l'Evolution de l'Univers (Inst. Phys. Solvay, v. 11) Brussels, 1958, p. 163.
5. F. Hoyle, Problems of Cosmical Aerodinamics (I.U.T.A.M. and I.A.U. Symposium on the Motions of Masses of Cosmical Dimensions), Central Air Documentation Office, Dayton, Ohio, 1951, p. 195.
6. P. J. E. Peebles, Astrophys. J. **155**, 393 (1969).
7. J. H. Oort, Astron.—Astrophys. **7**, 381 (1970).
8. Л. М. Озерной, А. Д. Чернин, Астрон. ж. **44**, 1134 (1967); **45** 1137 (1968).
9. M. Ryle, Ann. Rev. Astron. Astrophys. **6**, 249 (1968).
10. J. H. Oort, The Nuclei of Galaxies, Pontificae Academiae Scientiarum Seripta Varia Nr. 35, Rome, 1971, p. 321.
11. P. C. van der Kruit, Astron.—Astrophys. **4**, 462 (1970).
12. G. W. Rougoor, Bull. Astr. Instr. (Neth.) **17**, 381 (1964).
13. Ph. Morrison, Astrophys. J. **157**, L73 (1969).
14. V. A. Ambarzumian. см. [4], p. 241, а также —The Structure and Evolution of Galaxies (Inst. Phys. Solvay, v. 13), Brussels, 1965, p. 1.
15. R. Minkowski,— Radio Astronomy (I.A.U. Symposium No. 4; H. C. van de Hulst, Ed.), Cambr. Univ. Press., L., 1957, p. 111.