

9 . ВНЕГАЛАКТИЧЕСКАЯ АСТРОНОМИЯ

§ 9.1. Внегалактическая природа спиральных и эллиптических туманностей.

Еще в период каталогизации туманностей было установлено, что среди них есть туманности зеленоватые, тяготеющие к Млечному Пути, и белые, его избегающие. Первые спектральные наблюдения, выполненные во второй половине XIX века, показали, что спектры их различны. Зеленый цвет первых обусловлен сильным свечением в эмиссионных линиях, расположенных в зеленой области спектра; почти сразу же стало понятно, что это газовые туманности. Природа белых туманностей, спектры которых похожи на спектры звезд, долгое время вызывала споры. Среди этих объектов были найдены туманности, демонстрирующие спиральную структуру, веретенообразные туманности, пересеченные темной полосой, тянущейся вдоль всего веретена, и аморфные туманности эллиптической формы. Споры шли между астрономами, поддерживающими две основные гипотезы. Согласно первой из них – это образования, принадлежащие нашей Галактике или ее ближайшим окрестностям; они в чем-то сходны с выделенными уже в начале XX века отражательными туманностями. Наличие в их центрах сгущений яркости и сходство спектров со спектрами звезд использовались в качестве аргументов в пользу этой гипотезы. Согласно второй из них – это удаленные от Галактики звездные системы, аналогичные нашей Галактике.

Важное открытие было сделано в 10-х годах XX в. Слайфером, который нашел, что линии в спектрах этих туманностей смещены (иногда довольно сильно) в красную сторону спектра («красное смещение»), чем они отличаются от отражательных туманностей нашей Галактики. Решение вопроса о природе туманностей требовало прямого определения расстояний до них и сопоставления их с размерами нашей Галактики, которые к 20-м годам были определены Шепли.

Задача была решена после введения в строй 2.5-м телескопа обсерватории Маунт Вилсон. С его помощью удалось выделить отдельные звездные объекты в спиральных ветвях нескольких туманностей; среди них были найдены переменные по блеску объекты и, наконец, Хаббл в 1923 г. нашел среди них цефеиды. Зависимость «период – светимость» для цефеид к тому времени уже была установлена, что позволило определить расстояния до нескольких спиральных туманностей – они оказались гораздо больше размеров нашей Галактики, Внегалактическая природа спиральных туманностей была установлена. Их стали называть спиральными галактиками.

Поиски в эллиптических туманностях цефеид и голубых сверхгигантов, найденных в спиральных галактиках, не привели к успеху. Лишь в 1944 г. Бааде удалось разложить на звезды эллиптические туманности и центральные области спиральных галактик, установив, что ярчайшими звездами в них являются красные гиганты, а голубые сверхгиганты и цефеиды отсутствуют. Были найдены расстояния до туманностей, и внегалактическая природа эллиптических туманностей, принимавшаяся ранее на основании косвенных соображений (в частности, наличие у них красного смещения) была непосредственно доказана.

После Второй мировой войны к оптическим наблюдениям галактик добавились наблюдения в радио диапазоне, а затем (после вынесения аппаратуры за атмосферу) в ультрафиолетовом и рентгеновском диапазонах.

§ 9.2. Классификация галактик.

Первую морфологическую классификацию галактик дал Хаббл в 1925 г. Все галактики он разделил на три основных типа: эллиптические, спиральные и иррегулярные. Первые два типа образуют «камертонную диаграмму» (Рис. 9.1). Ручку камертона образуют

эллиптические галактики, расположенные в порядке увеличения степени эллиптичности от $E0$ до $E7$, где числовой индекс определяется соотношением между осями эллипса: $n = 10 [(a-b)/a]$. Эллиптических галактик с индексом $n > 7$ не существует, Ветви камертона образуют спиральные галактики. Одна из них – это «нормальные» спирали S , вторая – «пересеченные» SB . Отличие состоит в том, что у первых спиральные ветви начинаются от центрального сгущения, у вторых в центральной области имеется «бар» (перекладина), от концов которого идут спиральные ветви.

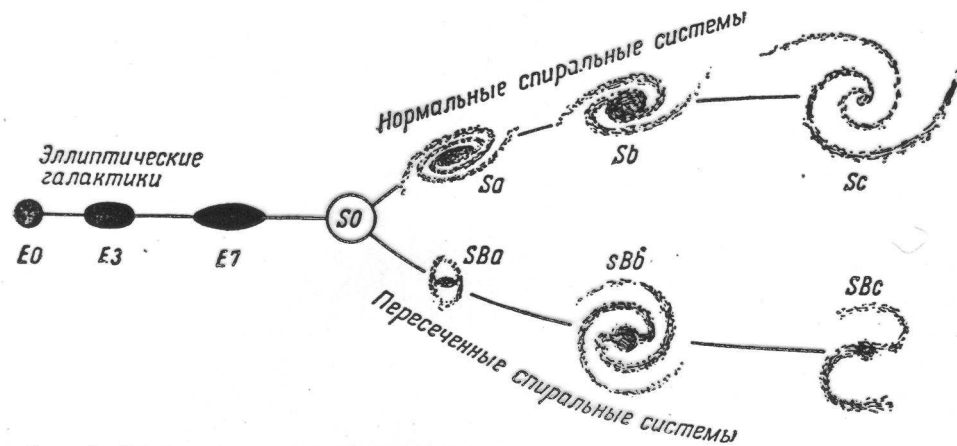


Рис.9.1. Хаббловская классификация галактик.

В зависимости от соотношения светимости центральной области («балджа») и спиральных ветвей, степени их закрученности и разрешения в них отдельных деталей галактике присваивается индекс от a до c . Иррегулярные галактики на диаграмме отсутствуют, но они как бы замыкают камертон. Как всегда, имеются объекты, не укладывающиеся в классификационную схему – их называют «некулярными галактиками».

Хаббловская классификация галактик оказалась настолько удачной, что используется с некоторыми уточнениями до сих пор. Основных уточнений два: между галактиками $E7$ и спиральными вставлен тип $S0$ – «линзовидные» галактики, у которых, как у спиральных, просматривается диск, но спиральные ветви отсутствуют. О линзовидных и спиральных галактиках говорят «дисковые». Иррегулярные галактики разделены на два типа – $Irr I$, которые разрешаются на отдельные детали, и $Irr II$, где такого разрешения нет. Кроме того, выделены галактики с кольцеобразными структурами в центре, им присваивается индекс r .

§ 9.3. Фотометрические характеристики.

Наблюдения с панорамным приемником (раньше с фотопластинками, теперь, главным образом, с ПЗС-матрицами) позволяют найти распределение яркости по галактике. Наблюдения, как правило, ведутся с фильтрами, осуществляющими ту или иную фотометрическую полосу обычно стандартной системы; после абсолютной привязки это дает распределение яркости по галактике в звездных величинах с квадратной секунды (m/\square'') в соответствующих полосах. Сопоставление распределений яркости, полученных в разных полосах, дает распределение цвета по галактике.

Если предельная наблюдаемая яркость составляет $\approx 1\%$ от яркости фона неба (в безлунную ночь), то интегрирование в пределах соответствующей изофоты позволяет найти с точностью до $\approx 1\%$ интегральные (или полные) звездные величины галактик и, как их разности, интегральные показатели цвета. Если расстояние r до галактики известно (на

определении расстояний до галактик мы остановимся позже), можно найти абсолютную звездную величину галактики в той или иной полосе, используя соотношение

$$M = m + 5 - 5 \lg r. \quad (9.1)$$

Оказывается, что среди галактик всех типов есть и гиганты с абсолютной величиной в видимой области около $M \approx -22^m$ и карлики с $M \approx -9^m$, что уже сравнимо со светимостью звездных скоплений).

Для представления зависимости поверхностной яркости от расстояния до центра галактики предлагались разные эмпирические формулы. В случае эллиптических галактик наилучшее представление дает формула Вокулера

$$I(r)/I_e = [(r/r_e)^{1/4} - 1], \quad (9.2)$$

где r_e – эффективный радиус, т.е. радиус, в пределах которого заключена половина светимости галактики, а I_e – яркость соответствующей ему изофоты. Эта формула подходит и для некоторых *SO* галактик, а также для балджей спиральных галактик. Падение яркости в диске спиральных галактик следует экспоненциальному закону

$$I(r) = I_0 e^{-r/h}, \quad (9.3)$$

(I_0 – яркость в центре, h – масштабный множитель). Сопоставление наблюдаемых профилей с теоретическими, даваемыми соотношениями (9.2) и (9.3), позволяет определить параметры r_e и I_e для эллиптических галактик и I_0 и h для дисковых (и все четыре параметра для спиральных галактик, где распределение яркости представляется суммой соотношений (9.2) и (9.3)). На рис. 9.2 представлено разложение наблюдаемого профиля яркости спиральной галактики на балдж и диск. Непосредственно из наблюдений параметры r_e и h определяются в секундах дуги. Знание расстояния до галактики позволяет найти их в линейных единицах (например, в *кпк*), что необходимо при интерпретации.

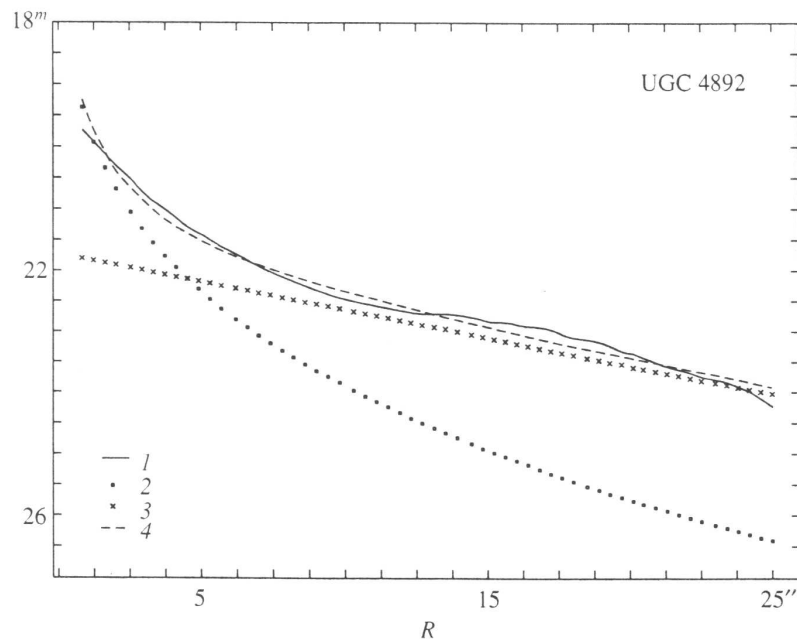


Рис. 9.2. Разложение профиля спиральной галактики на балдж и диск.

§ 9.4. Спектральные характеристики.

Спектр галактики без особенностей – это суммарный спектр, определяемый ее звездным населением. Хорошо заселенная на диаграмме Герцшпрунга-Рессела ветвь гигантов вносит основной вклад, поскольку число гигантов велико, а светимость их достаточно высока. Поэтому интегральные спектры галактик, если их классифицировать как звездные спектры, относятся к классам $G - K$. Наиболее сильными в них являются линии H и K Ca II, другие линии оказываются гораздо слабее. Поскольку скорости звезд по лучу зрения различны, линии расширены из-за доплеровских смещений. Из-за слабости объектов абсорбционные спектры галактик удается получить лишь для близких к центру областей. Лучевые скорости (в $км/с$) центральных областей после исправления за движение Солнца в Галактике по формуле

$$V_{ист} = V_{набл} + 237 \sin l \cos b, \quad (9.4)$$

(где l и b – галактические долгота и широта), дают красное смещение. В спектрах многих галактик, помимо абсорбционного спектра, даваемого звездным компонентом, видны эмиссионные линии. Их тоже можно использовать для определения красного смещения, причем выявление их проще, чем абсорбционных деталей, поскольку они возвышаются над континуумом и фиксирования континуума по существу не требуется.

В случае достаточного пространственного разрешения при определенных положениях щели спектрографа с длинной щелью относительно изображения галактики линии оказываются наклоненными в центральных областях и искривляются на периферии. Естественное объяснение этого – вращение галактики, вызывающее доплеровское смещение линий.

В случае спиральных галактик, видимых с ребра, различие в лучевых скоростях в центре и на периферии может достигать нескольких сот $км/с$. У эллиптических галактик эффект мал или отсутствует. Зависимость скорости вращения от расстояния до центра галактики носит название *кривой вращения*. Для ее построения необходимо знать расстояние до галактики, так как непосредственно из наблюдений определяется зависимость лучевой скорости от расстояния до центра в угловой мере (разумеется, должна быть внесена поправка за наклон галактики к лучу зрения $v_{ист} = v_{набл} / \sin i$, где i – угол между лучом зрения и перпендикуляром к плоскости галактики (осью вращения), который можно определить по отношению осей галактики: $\cos i = b/a$). Кривые вращения некоторых спиральных галактик приведены на рис.9.3.

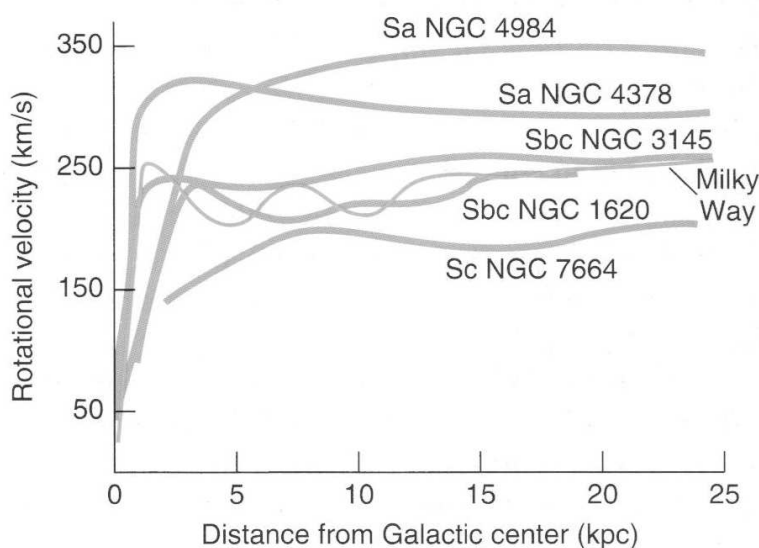


Рис.9.3. Кривые вращения спиральных галактик.

Наблюдения показывают, что центральные области спиральных галактик вращаются твердотельно (на кривой вращения имеет место линейный рост скорости с расстоянием). На некотором расстоянии от центра наклон кривой вращения изменяется. Если считать, что масса галактики сильно концентрируется к центру, мы вправе ожидать на периферии кеплеровского падения скорости. Считая, что в области максимума центробежное ускорение равно гравитационному, можно оценить массу галактики в области, ограниченной радиусом, где скорость максимальна

$$M = a v^2 / G \quad (9.5)$$

Напомним, что для определения положения максимума на кривой вращения и, следовательно, массы M необходимо знание расстояния до галактики.

Кеплеровское падение скорости, однако, наблюдается редко. Иногда скорость падает, но медленнее, чем по Кеплеру, иногда на кривой наблюдается плато, а иногда скорость продолжает медленно возрастать. В любом случае такие кривые вращения требуют наличия массы в периферийных областях галактики. Поскольку на современном этапе наблюдения не позволяют выявить носителей этой массы, она получила название *скрытой массы*. Ее наличие в гало галактик необходимо для объяснения кривых вращения. Представление кривых вращения при различных моделях распределения массы в гало позволяет оценить полную массу галактики.

Для галактик, где кривая вращения не определяется, массу оценивают с помощью теоремы вириала. Можно считать, что в галактике выполняется условие равенства 0 суммы удвоенной кинетической энергии T и потенциальной энергии Ω : $2T + \Omega = 0$. Вынося в выражении для кинетической энергии средний квадрат скорости звезд, получим $2T = M \langle v^2 \rangle$. Потенциальная энергия Ω зависит от распределения массы. Для сферической системы будет $\Omega = -\alpha GM^2/R$, где R – радиус галактики, а α – множитель, меняющийся от 3/5 до 3 в зависимости от распределения массы. Имеем $M \langle v^2 \rangle - \alpha GM^2/R = 0$. Или

$$M = R \langle v^2 \rangle / \alpha G \quad (9.6)$$

Величина $\langle v^2 \rangle$ находится по ширине абсорбционных линий. Берется спектр звезды сходного спектрального типа (там линия узкая, а в галактике она расширена из-за движений звезд) и определяется, чему должно быть равно $\langle v^2 \rangle$, чтобы из узкой спектральной линии звездного спектра сделать такую широкую, как в спектре галактики. Полные массы галактик заключены в пределах $10^7 - 10^{12}$ масс Солнца.

Спектральные наблюдения эмиссионных линий дают важную информацию о газовом компоненте галактик. Набор линий и их относительные интенсивности дают сведения о химическом составе, температуре и плотности газовых образований (методика анализа здесь аналогична методике анализа спектров газовых туманностей), изучение профилей линий дает сведения о движении газовых масс.

§ 9.5. Поляризационные характеристики.

При изучении звезд и туманностей мы сталкивались с тремя механизмами возникновения поляризации: поляризацией, возникающей при прохождении света через межзвездную пыль (эффект Дейвиса-Гринштейна), поляризацией, возникающей при рассеянии света (отражательные туманности, солнечная корона) и поляризацией, изначально присущей излучению (оптическое синхротронное излучение Крабовидной туманности). Поляризационное изучение внегалактических объектов показало, что в галактиках наблюдаются проявления всех трех механизмов. В темных полосах, пересекающих изображения некоторых галактик была найдена поляризация с

направлением, параллельным полосе, и уменьшением степени поляризации с удалением от центра (механизм Дейвиса-Гринштейна – в центре ситуация аналогична той, что в Галактике наблюдается в направлении созвездия Персея, на периферии – в направлении созвездия Лебеда). Обнаруженная радиальная поляризация на периферии галактики M82 не отличается от наблюдаемой в отражательных туманностях (см. рис. 9.4). Наконец, поляризация в джете галактики M 87 имеет ту же природу, что и поляризация излучения Крабовидной туманности.

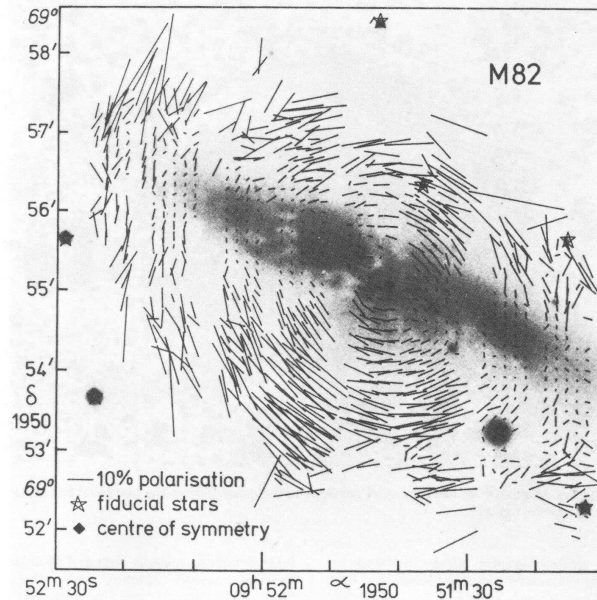


Рис. 9.4. Поляризация излучения в галактике M 82.

§ 9.6. Определение расстояний до галактик.

Как мы видели, для определения фундаментальных параметров галактик (массы и светимости) необходимо знать расстояние до галактики, Гигантские расстояния до галактик недоступны прямым измерениям, поэтому используются косвенные методы оценки. Для близких галактик, в которых удастся выделить отдельные объекты, может быть использован метод, аналогичный методу определения спектральных параллаксов звезд. Для выделяемых объектов, называемых индикаторами расстояния, должна быть известна абсолютная величина. Тогда измерение видимой величины позволяет найти расстояние по стандартной формуле $M = m + 5 - 5 \lg r [пк]$. Ясно, что индикаторами могут быть абсолютно яркие объекты, у которых разброс в абсолютных величинах либо мал, либо поддается учету. Некоторой трудностью является то, что величина m должна быть освобождена от влияния межзвездного поглощения как в нашей Галактике (что делается достаточно надежно), так и в галактике исследуемой, что практически неосуществимо. Поэтому индикаторы должны выбираться в таких районах галактики, где ожидаемое поглощение незначительно.

Наилучшими индикаторами расстояния являются классические цефеиды, для которых надежно прокалибрована зависимость *период - светимость*. Определение периода не вызывает принципиальных трудностей и позволяет найти абсолютную величину и, следовательно, расстояние до галактики с хорошей точностью. Галактики с определенными по цефеидам расстояниями, можно использовать для калибровки более ярких абсолютно индикаторов. Среди них красные сверхгиганты, удобные для определения расстояний в связи с очень малым разбросом их абсолютных величин, и ярчайшие голубые сверхгиганты, примерно на 5^m более яркие, чем цефеиды. Правда светимость их зависит от светимости галактики (которая неизвестна), и для определения

их абсолютных величин приходится применять итерации. Индикаторами, видимыми с гораздо больших расстояний, являются сверхновые звезды. Звезды *SN Ia* имеют очень малый разброс абсолютных величин в максимуме, но определение видимой величины в максимуме и принадлежности сверхновой к типу *SN Ia* может вызвать серьезные затруднения. В последнее время для близких галактик, где разрешение на звезды позволяет построить зависимость *видимая величина – показатель цвета* расстояния определяются по вершине ветви красных гигантов, положение которой на диаграмме *абсолютная величина – показатель цвета* надежно определено.

Расстояние до галактики может быть также определено, если в ней выделяется объект с известным линейным размером d , угловые размеры которого θ'' можно измерить. Тогда

$$d = r \theta'' / 206265. \quad (9.7)$$

Таковыми объектами являются гигантские области *H II*. К сожалению, их линейные размеры зависят, как и у голубых сверхгигантов, от светимости галактики, так что приходится прибегать к итерациям.

В далеких галактиках никакие индикаторы (кроме, может быть, сверхновых звезд) не выделяются. Вспышки сверхновых фиксируются не так уж часто, а вероятность вспышки в нужной галактике практически равны 0. Для далеких галактик используется метод определения расстояния по красному смещению. В 1929 г. Хаббл нашел, что величина красного смещения (лучевой скорости галактики, определяемой по эффекту Доплера $v = c \Delta\lambda/\lambda = cz$) пропорциональна расстоянию до нее:

$$v = H r. \quad (9.8)$$

Величина H называется постоянной Хаббла. По имевшемуся у него скудному материалу (см. рис. 9.5) Хаббл определил значение постоянной $H = 540 \text{ км/с/Мпк}$. По ряду причин

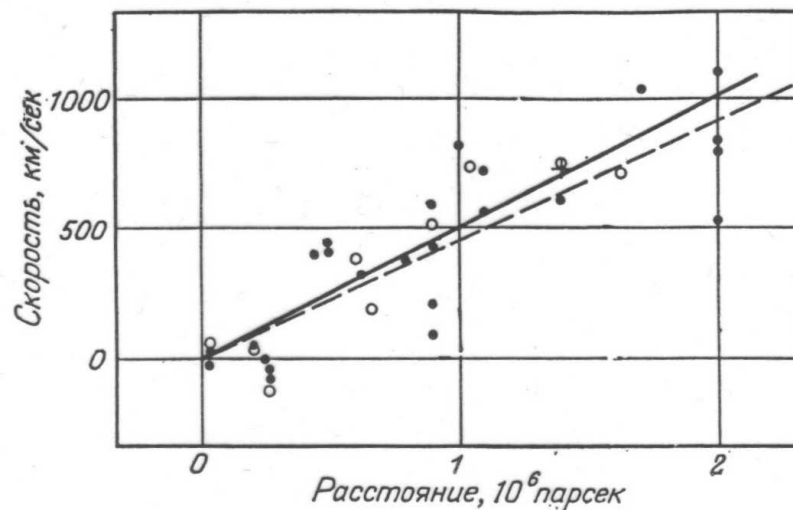


Рис 9.5. Установление Хабблом закона (9.8).

найденное Хабблом значение H оказалось сильно завышенным. Однако метод определения r по формуле (9.8), отражающей тот факт, что мы живем в расширяющейся Вселенной, используется повсеместно. Последние определения постоянной Хаббла дают для нее значение $H = 65 \text{ км/с/Мпк}$ (с ошибкой $\approx 10\%$). Определение постоянной Хаббла – сложная задача, потому что для прямого ее определения нужно знать лучевые скорости (которые измеряются непосредственно и не зависят от расстояния) и расстояния для очень далеких объектов. В случае близких галактик их собственные скорости сравнимы с

Хаббловской скоростью, что приводит к ошибочному определению постоянной Хаббла. По той же причине формула (9.8) неприменима для близких галактик.

Расстояния для ряда галактик и их фундаментальные параметры приведены в Табл. 9.1. Таблица содержит и карликовые, и гигантские галактики разных типов, так что она содержит сведения о том, в каких интервалах заключены массы и светимости галактик. Особый интерес представляет последний столбец, дающий отношение массы к светимости M/L (в солнечных единицах). Поскольку интервал, в котором заключены массы звезд, невелик, а светимостей – огромен, Объекты, в которых есть голубые звезды высокой светимости имеют гораздо меньшее значение M/L – это спиральные и иррегулярные (типа *Irr II*) галактики, в которых такие звезды присутствуют. В эллиптических галактиках, как мы уже упоминали, таких звезд нет.

Таблица 9.1.
Некоторые физические характеристики галактик (преимущественно близких)

Название галактики	Тип	Диаметр		Расстояние, кпс	V	B - V	M_V	Лучевая скорость v_r , км/сек	$\lg \frac{M}{M_\odot}$	$\frac{M}{L}$ (M/L) _⊙
		d'	D , кпс							
Млечный Путь — Галактика	Sb		25	(10)		$0^m,8$	$-20^m,5$		11,2	8
Большое Магелланово Облако	Ir III	470	7	52	0,1	0,45	-48,7	+276	10,1	5
Малое Магелланово Облако	Ir IV	216	4	69	2,4	0,4	-46,9	+168	9,2	3
Туманность Андромеды M 31 = NGC 224	Sb	163	38	800	3,5	0,98	-21,0	-270	11,5	10
Спутник ее M 32 = NGC 221	E2	5	1,2	800	8,2	0,9	-46,3	-210	9,6	15
Спутник ее NGC 205	E5p	12	2,8	800	8,2	0,8	-46,3	-240	9,9	30
Туманность в Треугольнике M 33 = NGC 598	Sc	62	15	850	5,8	0,55	-48,7	-190	10,1	5
Система в Скульпторе	dE	45	1,3	110	7	0,8	-43		8,5	24
Система в Печи	dE	50	3	200	7	0,8	-45	+40	(9)	
NGC 6822	Ir IV	20	5	910	9,1	0,5	-46,3	-40	8,6	2
NGC 147	d E4	9	3	1 200	9,6	0,9	-45,8		9	6
NGC 185	d E0	6	2	1 200	9,5	0,9	-45,9	-340	9	6
IC 1613	Ir V	12	3	910	9,7	0,5	-45,2	-240	7,9	1
Система Вольфа — Лундмарка	E5	10	4	1 300?	10,8	0,5	-44,8			
NGC 6946	Sc	22	10	1 600	9	0,8	-47	+40		
NGC 2403	Sc	8	4	1 900	8,4	0,6	-48	+190	9,7	4
M 81 = NGC 3031 в Б. Медведице	Sc	25	18	3 800	6,9	1,02	-20,9	+80	11,1	4
M 82 = NGC 3034 в Б. Медведице	Ir II	10	11	3 800	8,2	0,91	-49,6	+400	10,4	14
M 87 = NGC 4486 = Virgo A	E1	4	14	12 000	8,9	0,97	-21,5	+1220	12,4	85

§ 9.7. Хаббловская диаграмма.

Объединяя формулы (9.1) и (9.8), получаем

$$m = M - 5 - 5 \lg (cz/H) = 5 \lg (cz) + (M - 5 - 5 \lg H). \quad (9.9)$$

Зависимость $\lg (cz)$ от m определяет *Хаббловскую диаграмму*. Для объектов с одной и той же абсолютной величиной это будет, очевидно, прямая с наклоном 0.2. Разброс в абсолютных величинах вносит рассеяние точек относительно прямой. Построенная по наблюдениям для объектов одного типа Хаббловская диаграмма, как правило, представляется прямой с наклоном 0.2. Разброс точек относительно прямой характеризует разброс абсолютных величин этих объектов. На рис. 9.6 приведена Хаббловская диаграмма для ярчайших галактик скоплений, построенная Сандейджем. Наклон прямой равен 0.2, а малый разброс на ней говорит о близости абсолютных величин этих галактик.

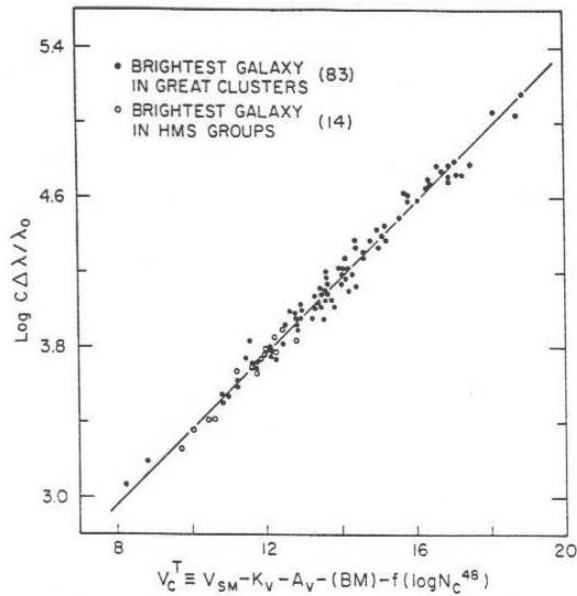


Рис 9.6. Хаббловская диаграмма для ярчайших галактик скоплений.

На рис.9.7 приведена аналогичная диаграмма для радиогалактик, также построенная Сандейджем (она нам понадобится в дальнейшем). Здесь разброс точек больше, но наклон также равен 0.2. Сопоставление точек пересечения прямых с осью абсцисс на диаграммах, построенных для объектов разного типа, дает разность их средних абсолютных величин. Для ярчайших галактик скоплений и радиогалактик, Хаббловские диаграммы для которых приведены на рис. 9.6 и 9.7, эта разность составляет около 0.5^m .

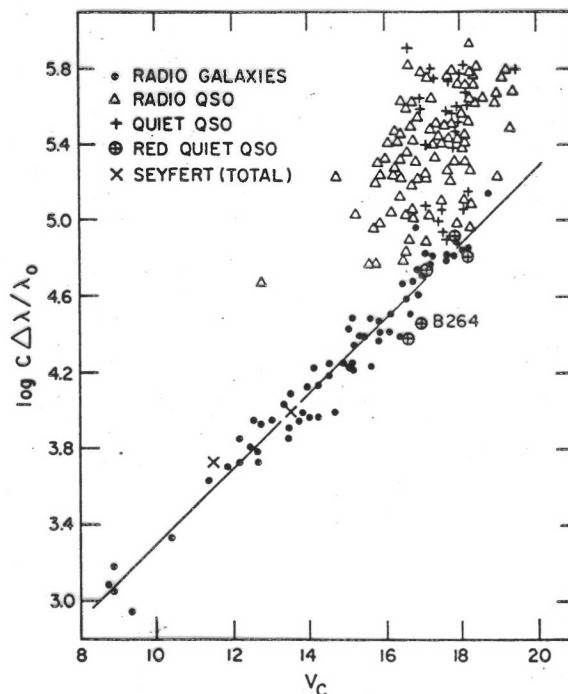


Рис.9.7. Хаббловская диаграмма для радиогалактик; нанесено также положение квазаров (объяснение см. ниже).

§ 9.8. Активные галактики.

Развитие радиоастрономических исследований привело в конце 40-х – начале 50-х годов XX в. к обнаружению дискретных источников радиоизлучения. Некоторые из наиболее сильных из них были отождествлены с галактиками, преимущественно пекулярными. Степенная зависимость плотности потока от частоты привела И.С.Шкловского к заключению о синхротронной природе радиоизлучения (что требует наличия высокоэнергичных электронов). Отождествление источника *Дева А* с галактикой *M 87*, у которой наблюдалось образование, напоминающее струю, направленную от ядра, и некоторые статистические соображения позволили В.А.Амбарцумяну в конце 50-х годов выдвинуть гипотезу об особой роли ядер галактик в их образовании и эволюции – гипотезу об активности ядер галактик.

Вскоре гипотеза активности ядер галактик получила подтверждение. (Справедливости ради следует отметить, что еще в 1943г. К.Сейферт, наблюдая галактики с особенно яркими ядрами, обнаружил среди них такие, в спектрах которых присутствуют широкие эмиссионные линии, свидетельствующие о скоростях газа, превышающих параболические). В начале 60-х годов были обнаружены следы взрыва в ядре галактики *M 82* (правда, впоследствии выяснилось, что это последствия не взрыва, а вспышки звездообразования, что также укладывается в рамки гипотезы об активности ядер) и некоторые дискретные радиоисточники были отождествлены со звездообразными объектами, получившими название *квазары* (квазизвездные радиоисточники). Природа их некоторое время оставалась невыясненной, поэтому их изучение велось вне связи с изучением галактик. Присутствующие в спектре одного из них (3C 273) эмиссионные линии были отождествлены в 1963 году М.Шмидтом и показали беспрецедентное по тем временам красное смещение объекта $z = 0.14$ и в предположении о космологической его природе – гигантскую светимость, на два порядка превышающую светимость гигантских галактик. Были обнаружены изменения блеска квазаров и наличие в их излучении поляризации.

Скорость переменности блеска накладывает из-за конечной скорости света c ограничения на размер объекта $R \leq c \tau$, где τ – характерное время переменности; за него можно принять, например, время, за которое блеск изменяется вдвое ($\approx 0.7^m$). Полученные малые размеры при гигантских светимостях указывают на огромные плотности энергии в этих объектах, что заставило некоторых исследователей усомниться в космологической природе красного смещения квазаров, Споры о природе красного смещения квазаров велись около 10 лет. В ходе этих споров сторонники локальных гипотез пытались установить физическую связь между галактикой (с малым красным смещением) и расположенным поблизости квазаром (с большим z). Сторонники космологической природы опирались на сходство свойств квазаров и галактик с активными ядрами, в частности, сейфертовских, у которых в середине 60-х годов была обнаружена, как и у квазаров, переменность блеска, наличие и переменность поляризации, синхротронное излучение и т.п.

Сейчас космологическая природа красного смещения квазаров не вызывает сомнения. Определяющую роль здесь сыграли работы Сандейджа, сопоставившего Хаббловскую диаграмму для квазаров с диаграммой для радиогалактик (см. рис.9.7). Он обратил внимание на то, что на ней отсутствуют объекты в треугольнике, ограниченном прямой для радиогалактик, вертикальной прямой, определяющей предельную звездную величину наблюдений и горизонтальной прямой, проведенной для минимального значения $lg(cz)$, найденного у квазаров. Если бы красное смещение квазаров было собственным (не космологическим), то более удаленные объекты с тем же z должны были бы попасть в этот треугольник, чего нет. Значит предположение о собственном красном смещении квазаров неверно. С другой стороны, если явление квазара есть проявление активности в ядре радиогалактики, то дополнительное квазарное излучение смещает точку по

горизонталь от прямой для радиогалактик влево, что согласуется с расположением квазаров на Хаббловской диаграмме. Прямым подтверждением этих рассуждений послужило обнаружение подстилающих галактик у ряда квазаров.

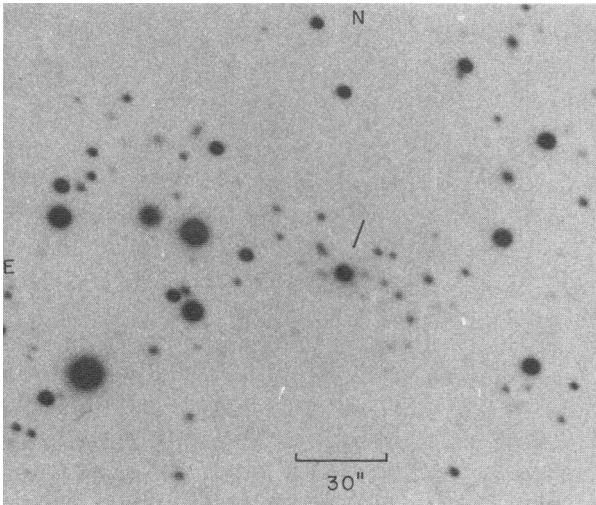


Рис. 9.8. Снимок области квазара 3С 206.

На рис. 9.8 представлен снимок области квазара 3С 206 с красным смещением ($z = 0.200$), полученный на 3.6-метровом телескопе в Чили, а на рис. 9.9 результаты его фотометрии. Видно, что на периферии наблюдаемое распределение яркости у квазара (точки) превосходит соответствующее распределение у точечного источника (крестики). Это проявляется подстилающая галактика, распределение яркости которой дается сплошной линией. (Попутно заметим, что на рис. 9.8 вокруг квазара наблюдается скопление галактик, причем галактика, в ядре которой находится квазар, очевидно, принадлежит этому скоплению, поскольку красное смещение у галактик скопления такое же, как у квазара – аргумент в пользу космологической природы красного смещения квазаров).

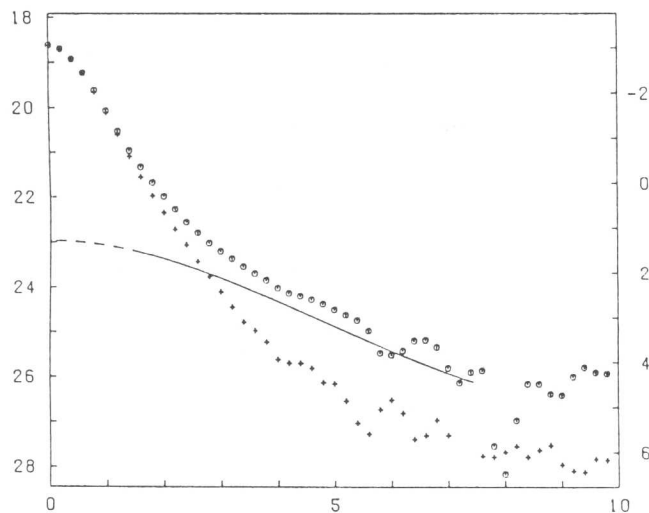


Рис 9.9. Выделение галактической подложки у квазара 3С 206.

Проявления активности в ядрах галактик многообразны. Наиболее наглядно они видны по наблюдениям в радио диапазоне, где зафиксированы струйные выбросы на килопарсековых (а иногда и мегапарсековых) масштабах. Пример гигантской струи представлен на рис. 9.10.

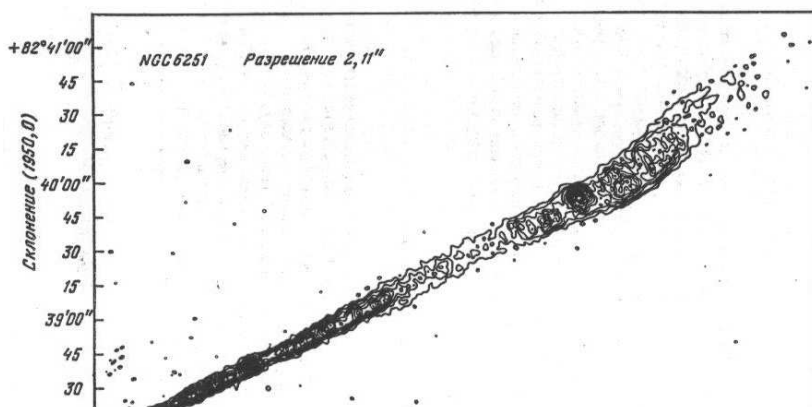
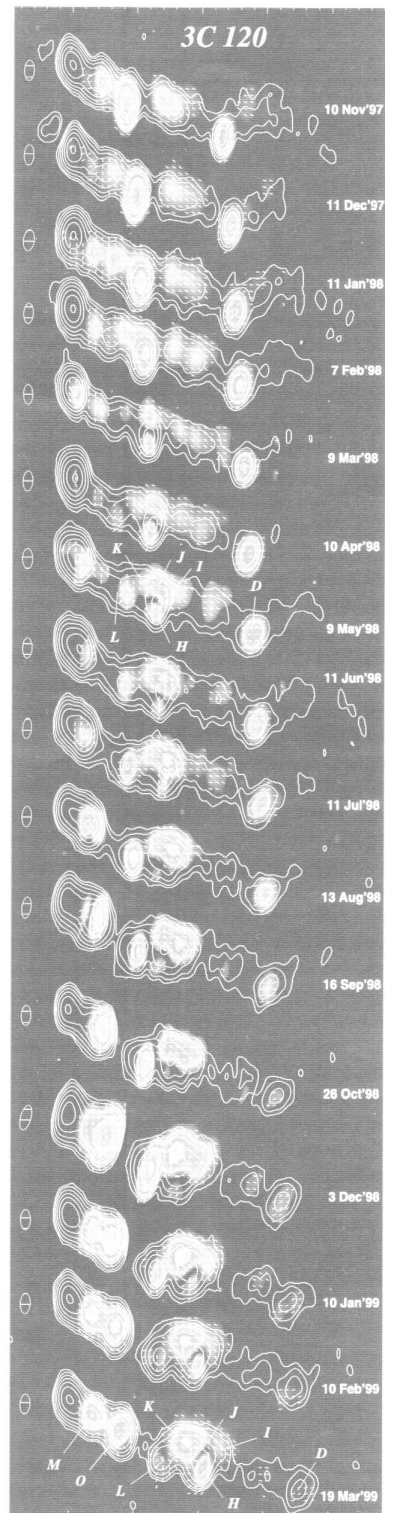


Рис. 9.10. Гигантская струя в галактике NGC 6251.

В отдельных случаях струю удастся наблюдать и в оптическом диапазоне. Однако основные события, связанные с активностью, разыгрываются в непосредственной близости от ядра, и оптического разрешения для установления структуры активных ядер недостаточно. Однако радиоинтерферометрические наблюдения со сверхдлинной базой фиксируют структуру активных ядер на парсековых масштабах, подтверждая выброс из центральных областей радиокомпонент, движущихся с кажущейся сверхсветовой скоростью, объясняемой движением их в направлении наблюдателя со скоростью, близкой к скорости света. На рис. 2.11 представлены изменения структуры ядерного радиоисточника объекта 3C 120 с ноября 1997 по март 1999 года. Отождествление отдельных компонентов позволяет определить кажущуюся скорость удаления их от ядра ($4 \div 6c$).

Рис. 9.11. Сверхсветовые движения компонентов у 3C 120.

В оптическом диапазоне наиболее ярким проявлением активности является наблюдаемая фотометрическая и поляризационная переменность. Для примера на рис. 9.12 приведены результаты многоцветного фотометрического мониторинга в оптической и ближней ИК областях спектра блазара S5 0716+174, полученные в 2001-2004 годах. Анализ переменности позволяет найти фундаментальные параметры переменных источников, ответственных за активность – распределение энергии в спектре и параметры поляризации. Эти источники расположены в непосредственной близости от “центральной машины”, и выяснение их природы может дать ключ к решению проблемы ядерной активности в целом.

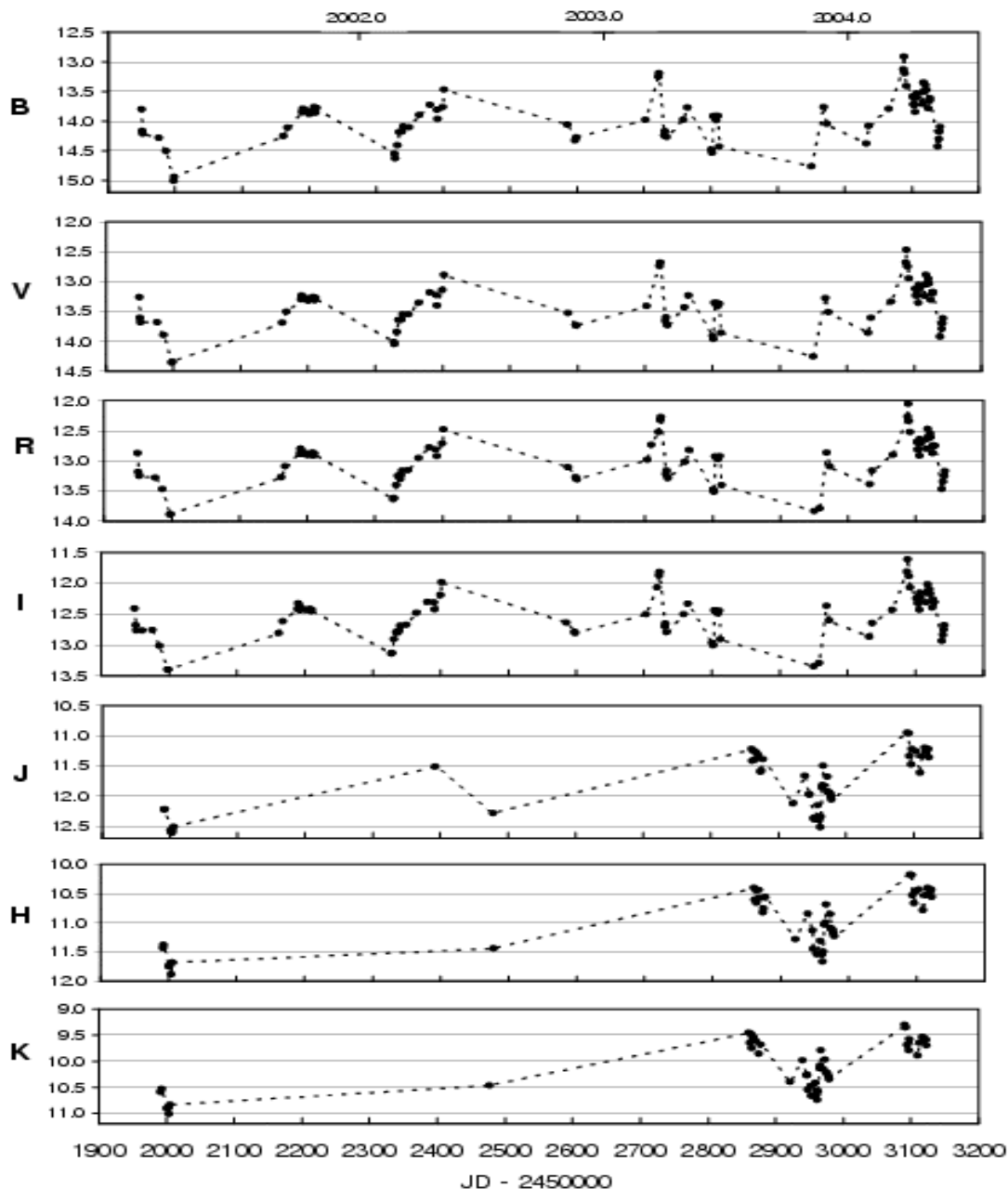


Рис. 9.12. Результаты многоцветного мониторинга блазара S5 0716+174.

К сожалению, эти источники в оптике не разрешаются, и их поток не наблюдается непосредственно – в наблюдаемое излучение вносят вклад подстилающая галактика, неразрешенный аккреционный диск, а также другие источники непрерывного и линейчатого излучения. Выделение излучения переменного источника – непростая задача, поскольку потоки других “вкладчиков” нельзя оценить непосредственно. Неправильный учет вклада других компонентов ведет к неправильным заключениям о поведении переменного источника. Поэтому очень важно получить информацию о распределении энергии и параметрах поляризации переменного источника прямо из наблюдений, *до внесения поправок за излучение других компонентов*. В некоторых случаях это удается сделать.

Пусть переменность в пределах некоторого временного интервала обусловлена единственным переменным источником. Если переменность вызвана только изменением его потока, а относительные параметры Стокса q и u (для поляриметрии) или относительное распределение энергии в спектре (для фотометрии) остаются неизменными, то в пространстве абсолютных параметров Стокса $\{I, Q, U\}$ или в n -мерном пространстве потоков $\{F_1, \dots, F_n\}$ (n – число спектральных полос, использованных при

многоцветных наблюдениях) точки, представляющие результаты наблюдений, должны лежать на “прямой линии”, направляющие тангенсы которой суть относительные параметры Стокса переменного источника (для поляриметрии) или отношения потоков в разных полосах, определяемые распределением энергии в его спектре (для фотометрии). На рис. 9.13 представлен трехмерный случай.

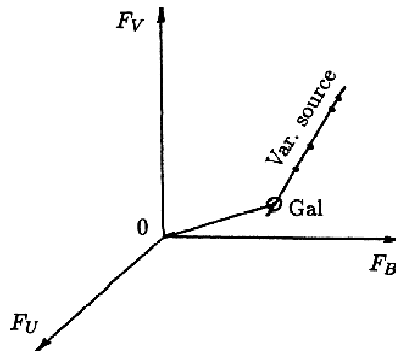


Рис. 9.13. Фотометрическое поведение в трехмерном пространстве.

С небольшими оговорками обратное утверждение тоже верно: если представляющие наблюдения точки лежат в этих пространствах на прямой линии, то относительные параметры Стокса или относительное распределение энергии переменного компонента **остаются неизменными**, а направляющие тангенсы линии дают параметры q и u или отношения потоков (т.е. относительное распределение энергии) для переменного источника.

Таким образом, изучение поведения в пространстве потоков позволяет ответить на вопрос, является ли относительное распределение энергии переменного источника, ответственного за фотометрическую переменность на рассматриваемом интервале времени, неизменным, и если “да”, то найти это распределение без предварительного исправления за вклад постоянного компонента. То же самое можно сказать и о параметрах Стокса. Это исключает все возможные ошибки, связанные с неправильным учетом вклада постоянного компонента.

Поскольку в случае фотометрии все проекции на плоскости $\{F_i, F_j\}$ представляют собой прямые с наклоном $(F_j/F_i)_{var}$ на практике потоки сравниваются попарно, причем одна из полос выбирается в качестве основной. В случае поляриметрии можно рассматривать плоскости $\{I, Q\}$ и $\{I, U\}$.

Рис. 9.14 иллюстрирует результаты анализа поляризационной переменности блазара OJ 287. Здесь сопоставлены абсолютные параметры Стокса для поляризационной вспышки в период JD 2445782-794. Ясно, что в пределах этого временного интервала относительные параметры Стокса переменного источника не менялись. Степень поляризации его излучения составляла около 35%.

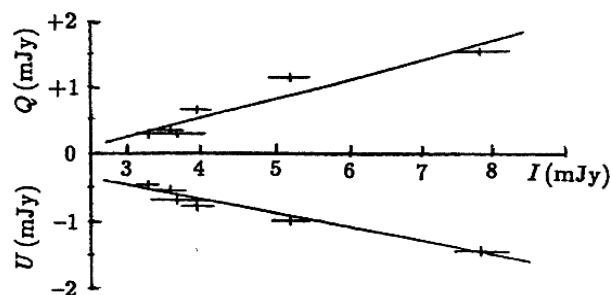


Рис. 9.14. OJ 287: сопоставление абсолютных параметров Стокса в поляризационной вспышке в интервале JD 2445782-794.

Результаты анализа цветовой переменности иллюстрирует рис. 9.15. Он относится к блазару S5 0716+714, кривые блеска которого приведены на рис. 9.12. На рисунке даются диаграммы «поток-поток» для оптической (слева) и ИК (справа) областей спектра. Точки очень хорошо лежат на прямых линиях. Это позволяет заключить, что в 2001- 2004 гг. относительное распределение энергии в спектре переменного источника оставалось постоянным как в оптической, так и в ближней ИК областях спектра.

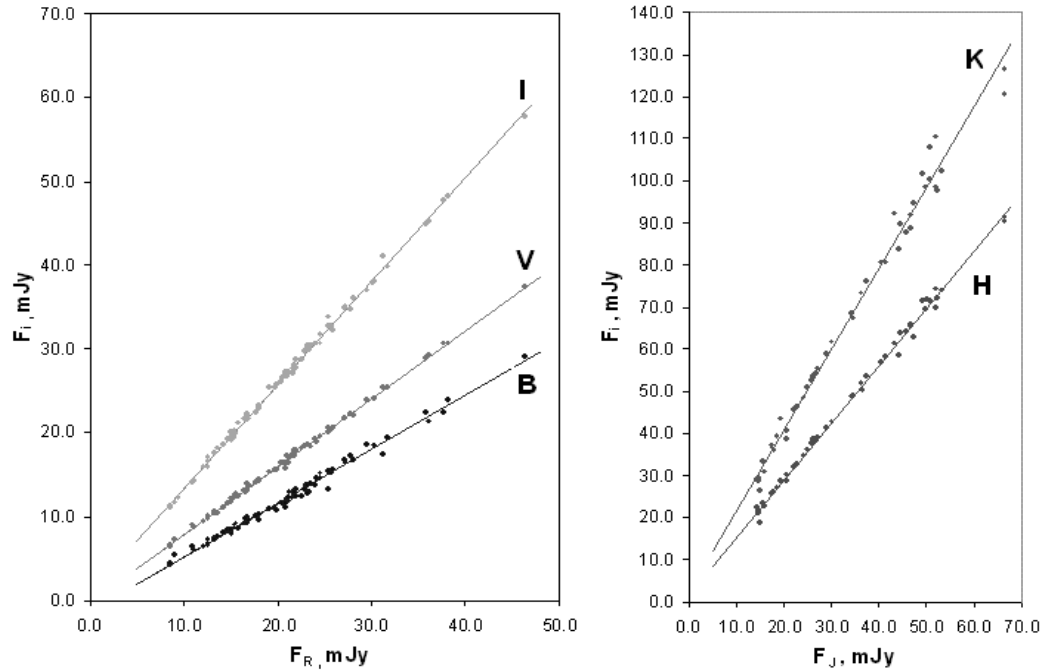
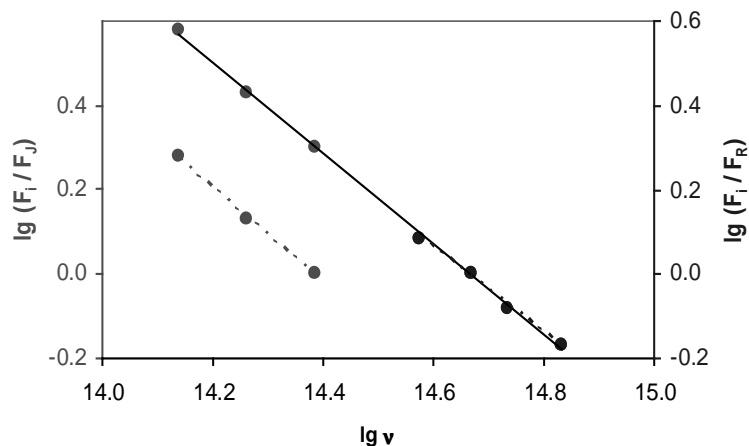


Рис. 9.15. Диаграммы «поток-поток» для блазара S5 0716+714 (2001-2004 гг.)

Относительное распределение энергии в спектре переменного компонента представлено на рис. 9.16. Оно прекрасно представляется степенным законом $F_\nu \sim \nu^{-1.12}$. Ясно, что в оптическом и ближнем ИК диапазонах действует один и тот же переменный источник, поскольку оптический и ИК спектры сшиваются без скачка и излома. Степенной характер спектра и обычно наблюдаемая у S5 0716+714 высокая и быстро меняющаяся поляризация не оставляют сомнения в том, что источник, ответственный за переменность S5 0716+714 в 2001–2004 гг., имеет синхротронную природу.



9.16. Распределение энергии в спектре переменного компонента у S5 0716+714 в 2001-2004 гг.

Синхротронное излучение возникает при движении релятивистских электронов в магнитном поле. Релятивистские электроны в джете, очевидно, имеются – об этом говорят

наблюдаемые кажущиеся сверхсветовые скорости выброшенных радио компонент (для их объяснения требуются направленные к наблюдателю скорости, близкие к скорости света). Магнитное поле в джетах тоже присутствует, как это следует из теоретических соображений (речь идет о формировании джетов) и прямых наблюдений джетов в радиодиапазоне. Скорость переменности в разных диапазонах различна, что, учитывая оценку $R \leq c \tau$, позволяет локализовать в джете переменные источники, ответственные за переменность в разных диапазонах. На рис. 9.17 представлена наиболее популярная в настоящее время модель джета. В основании его лежит черная дыра и питающий ее замагниченный аккреционный диск, Вращение его создает условия для выброса плазмы в перпендикулярном к нему направлении. Она движется в спиралевидном магнитном поле в области коллимации и ускорения. Вниз по джету распространяется ударная волна, упорядочивающая магнитное поле, что приводит к появлению наблюдаемой поляризации излучения с направлением, совпадающим с направлением джета. Эта модель хорошо объясняет наблюдательные данные, получаемые в разных спектральных диапазонах от γ до радио.

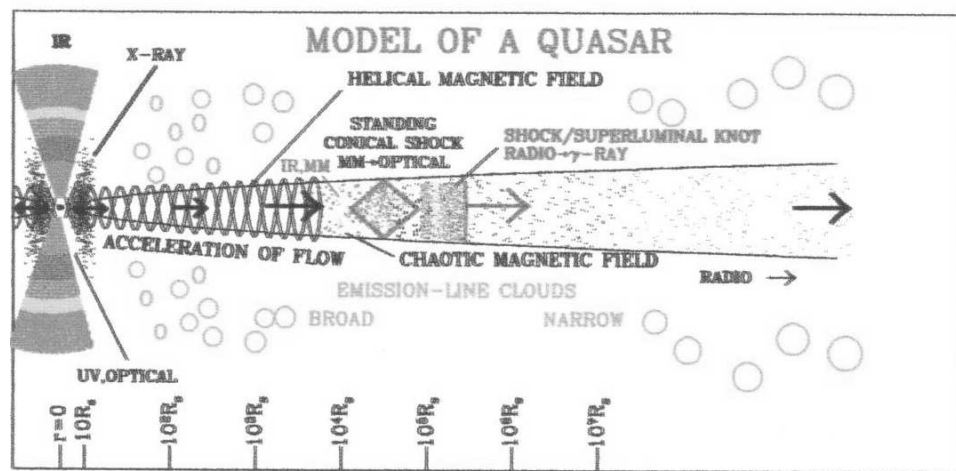


Рис. 9.17. Модель джета.

Структура активной галактики на разных пространственных масштабах представлена на рис. 9.18. На мегапарсековых масштабах имеются радиолопасти, подпитывание их энергией осуществляется джетами (радиолопасти есть далеко не у всех активных галактик), сама галактика почти не выделяется. На следующем рисунке основным объектом является галактика, рядом с ней спутник, взаимодействие с которым инициирует активность ядра (впрочем, наличие спутника вовсе необязательно), видны килопарсековые джеты, излучающие в радиодиапазоне. На масштабе в 1 килопарсек видна центральная часть галактики и начинает проявляться ее активное ядро. На масштабе 100 парсек виден поглощающий пылевой тор, окружающий самые центральные области. На масштабе 1 парсек мы находимся внутри тора в непосредственной близости от ядра. На следующем рисунке виден аккреционный диск, питающий черную дыру, корона вокруг него и основания джетов, дающие оптическое излучение. На предпоследнем рисунке видны центральные части диска, излучающие в рентгеновском и γ диапазонах. На последнем изображена центральная черная дыра. На четвертом и пятом рисунках видны газовые облака, дающие, соответственно, узкие и широкие эмиссионные линии. У некоторых активных галактик (объектов типа BL Lac, или лацертид) эмиссионных линий не наблюдается, они либо бедны газом, либо у них недостаточно ионизирующего излучения для возбуждения свечения облаков.

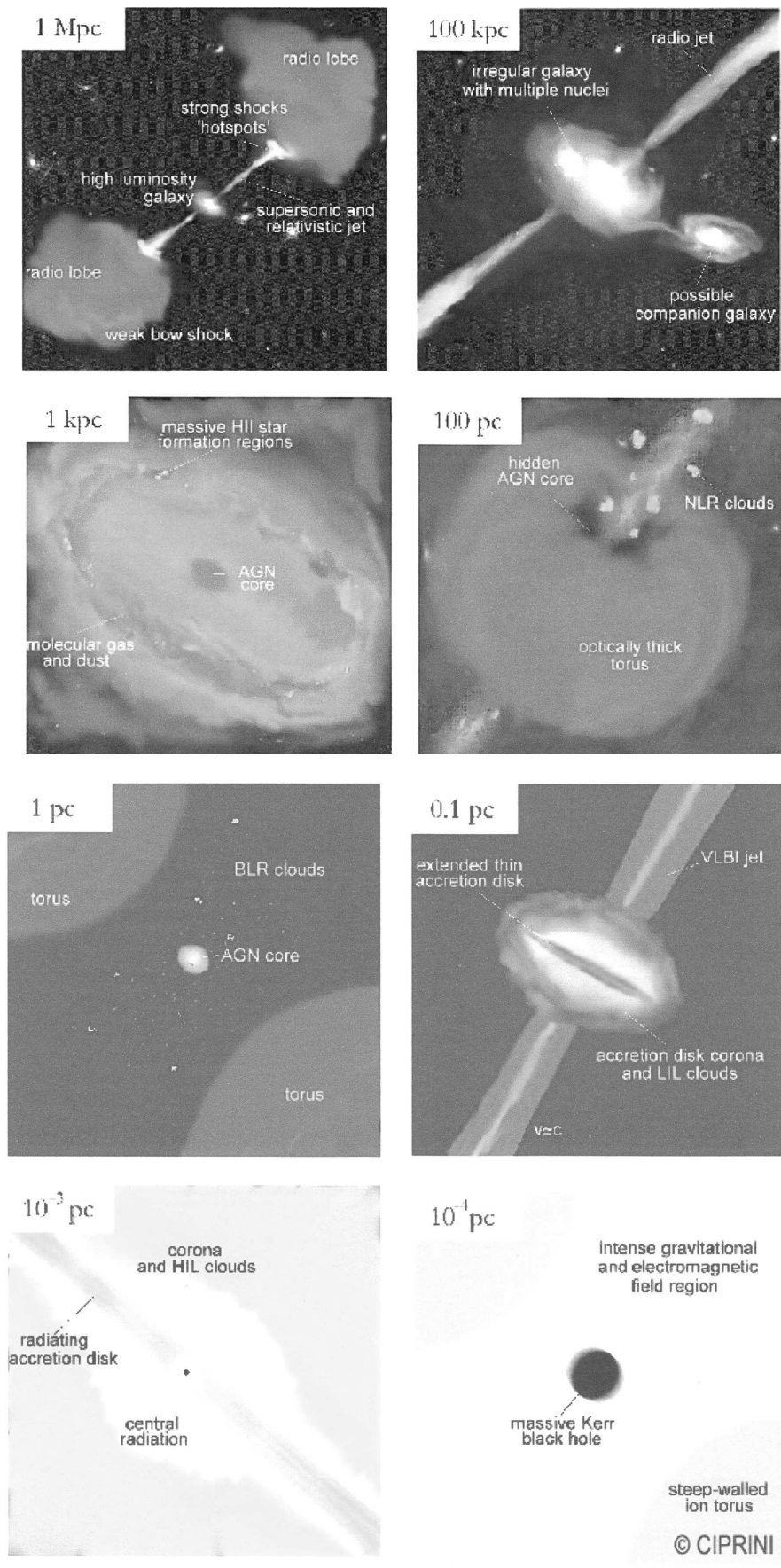


Рис. 9.18. Структура активной галактики на разных масштабах, сторона квадрата указана в верхнем левом углу.

§ 9.9. Понятие о космологии, реликтовое излучение.

Космология – наука, изучающая структуру и эволюцию Вселенной на разных пространственно-временных масштабах. После теоретических работ Эйнштейна (1917 г.) и Фридмана (1922-24 гг.) модель расширяющейся Вселенной была подтверждена Хабблом (1929 г.), установившим соотношение (9.8), показывающее, что *сейчас* мы живем в расширяющейся Вселенной. Но остались вопросы, с чего и как началось это расширение и какова дальнейшая судьба нашей Вселенной.

В 40-х годах прошлого века после пионерских теоретических работ Гамова успешно разрабатывалась модель «большого взрыва», с которого началось расширение. В первые секунды своего существования Вселенная была очень горячей (модель «горячей Вселенной», предложенная Гамовым) и излучение ее следовало закону Планка. По мере расширения температура падала, но распределение энергии по-прежнему должно было оставаться чернотельным. Оценки температуры в настоящий момент давали значения порядка нескольких градусов Кельвина. Модель горячей Вселенной получила наблюдательное подтверждение в результате обнаружения в 1964 г. Пензиасом и Вильсоном изотропного теплового излучения с температурой 2.7 K . Спектр его представлен на рис. 9.19, на котором сплошная кривая дает планковский спектр для $T = 2.726\text{ K}$; она идеально представляет результаты наблюдений. Излучение получило название *реликтового*, поскольку оно отражает свойства Вселенной на самых ранних этапах ее развития. Обнаруженные в самое последнее время малые флуктуации реликтового излучения имеют огромное значение для объяснения механизма образования наблюдаемых крупномасштабных структур Вселенной – галактик и их скоплений.

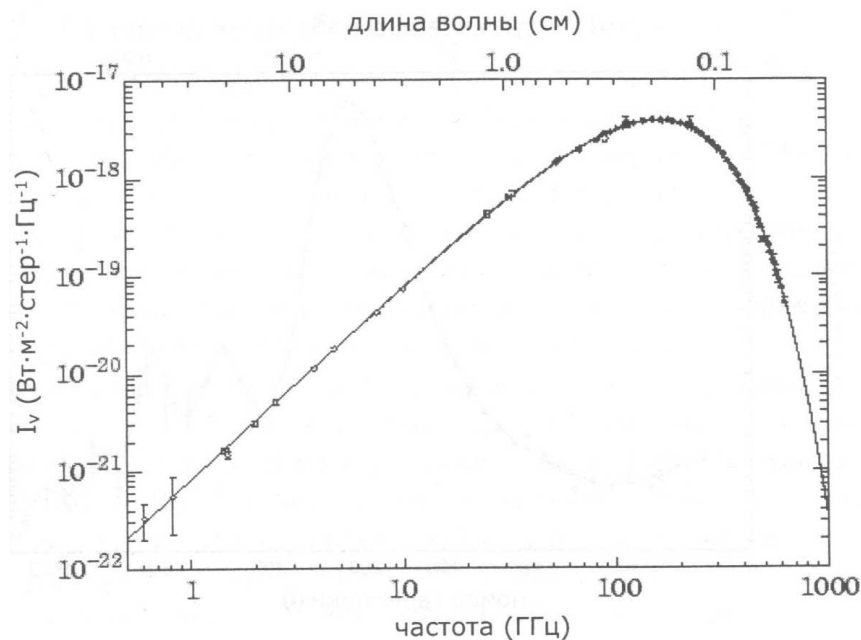


Рис. 9.19. Спектр реликтового излучения; сплошная кривая – чернотельный спектр с температурой 2.726 K .

Что касается будущего нашей Вселенной, то рассчитаны разные модели при разных значениях доли плотности всей материи (видимой и скрытой) Ω_m и «темной энергии» Ω_Λ в единицах критической массы. Отметим, что доля наблюдаемого вещества (видимой материи) составляет не более 0.05. Наличие темной энергии обеспечивает наблюдаемое (в частности, по данным о сверхновых типа Ia) ускоренное расширение Вселенной. Изменение масштабного фактора (от которого зависят все расстояния во Вселенной) со временем для разных моделей представлено на рис. 9.20. Согласно современным

представлениям $\Omega_m \approx 0.3$. Остальное приходится на темную энергию. Природа темной энергии пока не установлена.

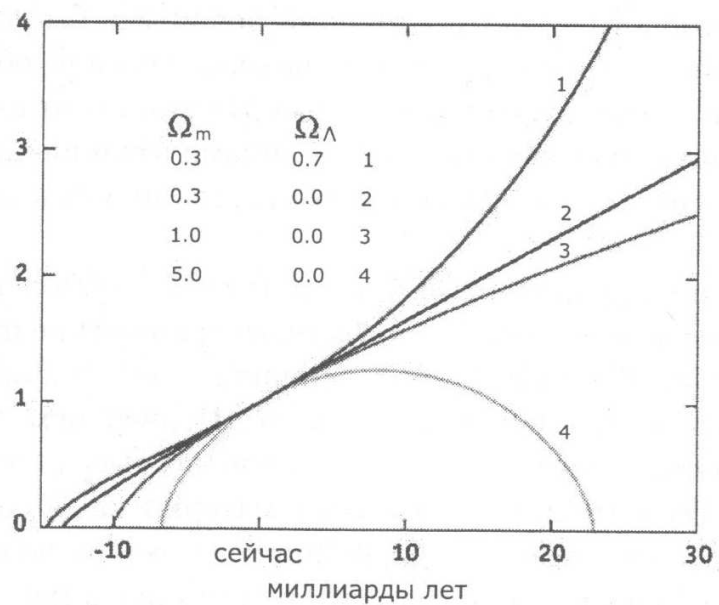


Рис. 9.20. Изменение масштабного фактора со временем для разных моделей Вселенной.