

НОВОЕ
В ЖИЗНИ, НАУКЕ,
ТЕХНИКЕ

ЗНАНИЕ

6/1977

СЕРИЯ
КОСМОНАВТИКА, АСТРОНОМИЯ

Э. А. Дибай
НЕСТАЦИОНАРНЫЕ
ЯВЛЕНИЯ
В ГАЛАКТИКАХ



НОВОЕ
В ЖИЗНИ, НАУКЕ,
ТЕХНИКЕ

Серия «Космонавтика, астрономия»
№ 6, 1977 г.
Издается ежемесячно с 1971 г.

Э. А. Дибай,

доктор физико-математических наук

**НЕСТАЦИОНАРНЫЕ
ЯВЛЕНИЯ
В ГАЛАКТИКАХ**

ИЗДАТЕЛЬСТВО «ЗНАНИЕ»
Москва 1977

Дибай Э. А.

Д44 **Нестационарные явления в галактиках. М., «Знание», 1977.**

64 с. (Новое в жизни, науке, технике. Серия «Космонавтика, астрономия», 6. Издается ежемесячно с 1971 г.)

Последние десятилетия ознаменовались выдающимся достижением в области внегалактической астрономии — открытием активности ядер галактик и квазаров. В брошюре излагаются наблюдательные и теоретические аспекты изучения нестационарных астрофизических процессов, ответственных за явление активности галактик, а также освещаются вопросы эволюции этих внегалактических объектов.

Брошюра рассчитана на студентов и преподавателей вузов, учителей средних школ, а также на более широкий круг читателей, интересующихся современными проблемами астрофизики.

20605

527 + 524

Астрофизика последних лет изобилует удивительными открытиями. Развитие новых экспериментальных методов исследования космического излучения, таких, как методы радио-, инфракрасной и рентгеновской астрономии, привело к обнаружению целого ряда новых астрономических феноменов. Одной из совокупностей таких явлений, вызывающих всеобщий интерес на протяжении последнего времени, являются нестационарные явления в ядрах галактик и квазарах.

Уточним, что же понимают ученые под этой нестационарностью.

Как известно, свыше 90% вещества во Вселенной сосредоточено в звездах, которые, в свою очередь, образуют звездные системы — галактики. Таков Млечный Путь — система, в которой расположено Солнце, такова ближайшая к нам спиральная галактика — туманность Андромеды. Галактики состоят из большого числа звезд, и хотя каждая звезда в те или иные моменты своей жизни может оказаться переменной, излучение далекой галактики в среднем постоянно, поскольку отдельные изменения блеска звезд не видны на огромных расстояниях до них. Времена изменения светимости всей галактики ограничены процессами ее эволюции в целом, и, по-видимому, должны быть чрезвычайно длительными. Поэтому обнаружение (с помощью радиоастрономических, а впоследствии оптических методов) мощных кратковременных нестационарных процессов во внегалактических объектах было очень неожиданным и удивительным. Именно об этих процессах и связанных с ними результатах наблюдений (в основном оптических), полученных за последние годы, будет рассказано в этой брошюре.

Свойства галактик и методы их изучения

Звездные системы — галактики, состоят из очень большого числа звезд. Более близкие, наиболее хорошо изученные спиральные галактики имеют массы порядка 10^{11} — 10^{12} M_{\odot} (здесь и далее M_{\odot} — масса Солнца). Встречаются галактики с массами 10^9 — 10^{10} M_{\odot} . Помимо звезд, в галактиках наблюдаются газовые (светлые) и пылевые (в основном темные) межзвездные облака. В начале XX в. американский астроном Э. Хаббл предложил разделить все галактики на три основных класса: спиральные, эллиптические и неправильные. Эта классификация, основанная на внешних признаках, отражает и механические свойства галактик. Спиральные галактики, например, обладают быстрым вращением, тогда как скорости вращения эллиптических галактик невелики¹.

Сопоставление физических характеристик объектов, входящих в состав галактик, с пространственным распределением этих объектов позволило выделить два их основных типа (или «населения» галактики). Оказалось, что имеются объекты, образующие сферическую (шаровые скопления, переменные звезды типа RR Лиры и т. д.) и плоскую (газовые туманности, голубые горячие звезды, пылевые облака) подсистемы галактики. Различие характеристик «населений» галактики безусловно отражает различие в условиях их образования и эволюции. Так, концентрация газа в плоскости галактики безусловно вызвана вращением всей звездной системы. Сферические подсистемы состоят преимущественно из желто-красных, по-видимому, старых звезд, тогда как звезды плоских подсистем связаны с газовыми туманностями и, вероятно, образовались сравнительно недавно.

Одним из удивительных феноменов, обнаруженных в самом начале XX в. при изучении галактик, явилось их взаимное удаление. Причем, как обнаружил Э. Хаббл, галактики разбегаются со скоростью удале-

¹ Подробнее о классификации морфологических типов галактик можно узнать из брошюры А. В. Засова «Галактики» (М., «Знание», 1976. Серия «Космонавтика, астрономия», 2).

ния, прямо пропорциональной расстоянию до галактики. В настоящее время принято считать, что разбегание галактик, связанное с общим расширением окружающей нас части Вселенной, есть результат специфических событий, имевших место в очень отдаленном прошлом Вселенной. Отголоском этих «древних» событий (как иногда говорят, «большого взрыва») является теперь хорошо известное реликтовое излучение².

Разбегание галактик оказалось весьма «полезным» в том смысле, что с помощью соотношения Хаббла стало возможным с большой точностью определять их расстояния. Этот метод определения расстояний до галактик основан на хорошо известном в физике принципе (эффекте) Доплера—Физо, впервые внедренном в астрономическую практику известным русским астрономом А. А. Белопольским.

Допустим, имеется какой-либо источник колебаний (оптических, радио- и т. д.). Если этот источник движется относительно наблюдателя, то частота колебаний в системе координат наблюдателя будет меняться согласно этому принципу на величину, зависящую от отношения скорости движения источника к скорости света. При удалении источника частота его излучения (колебаний) уменьшается, при приближении — увеличивается. Если пользоваться не частотой, а длиной волны, то в системе координат наблюдателя движение источника будет описываться формулой $\Delta\lambda/\lambda = v/c$, где $\Delta\lambda$ — разность между смещенной и истинной длинами волн, v — скорость источника, c — скорость света. Поскольку галактики разбегаются, частоты их излучения должны уменьшаться, а длины волн расти. В этом случае говорят о так называемом «красном смещении» линий в их спектрах $z = \Delta\lambda/\lambda$. Зная величину этого красного смещения для данной галактики, мы можем определить расстояние до нее, пользуясь формулой Хаббла $D = cz/H$, где H — постоянная Хаббла (или параметр Хаббла). Численное значение H определяется из наблюдений, которые дают только приближенную величину этого параметра. К настоящему времени удалось сузить область возможных значений постоянной Хаббла до интервала

² О нем более подробно рассказывается в брошюре В. М. Чаругина «Реликтовое излучение» (М., «Знание», 1975. Серия «Космонавтика, астрономия», 9).

$H = 55\text{—}80$ (км/с)/Мпс. В данной брошюре будет использовано значение постоянной Хаббла $H = 75$ (км/с)/Мпс = $1,33 \cdot 10^{-18}$ с⁻¹.

Рассмотрим теперь основные методы исследования физических характеристик галактик. Довольно просто — с помощью фотографических или более точных фотоэлектрических измерений — измеряются цвета галактик. Они дают возможность построить распределение энергии излучения галактик (а также входящих в них отдельных звезд). Цвет излучения небесных тел тесно связан с таким важным физическим параметром, как температура: более горячие звезды — голубые, более холодные — красные. Например, более красные «короны» галактик указывают на то, что они состоят из холодных звезд, а в более голубые их плоские диски и спирали должны входить горячие голубые звезды. Цветовые характеристики можно измерять не только в оптическом, но и инфракрасном, рентгеновском и других диапазонах электромагнитного спектра.

Одним из очень информативных методов исследования излучения небесных тел (в том числе галактик) является спектральный метод. Если сфотографировать спектр галактики с помощью спектрографа (ввиду слабости блеска далеких галактик для этого необходимо использовать достаточно большие телескопы), то мы на фоне непрерывного спектра увидим набор спектральных линий — светлых и темных. Звезды, подобные Солнцу, имеют так называемый абсорбционный спектр, для которого характерно наличие узких темных линий, соответствующих различным химическим элементам и возникающих в верхних, наиболее холодных слоях звездной атмосферы. Таковы спектры большинства обычных звезд. Спектр излучения всей галактики также является абсорбционным, так как он вызван суммарным излучением входящих в галактику звезд.

Другой составной элемент галактик — межзвездный газ (газовые облака обычно наблюдаются вдоль спиральных рукавов) дает светлые так называемые эмиссионные линии. Их излучение определяется спецификой свечения межзвездного газа, перерабатывающего излучения близко расположенных горячих звезд. Отождествление спектральных линий тех или иных химических элементов (или ионов) позволяет судить о химическом

составе излучающего вещества (звезд и газа, входящих в галактику).

Очень ценную информацию при спектральных наблюдениях галактик можно получить, используя принцип Доплера. Например, при наблюдении вращающейся галактики, видимой под некоторым углом (в направлении оси вращения эффект Доплера ничего не дает), одна из частей галактики будет удаляться от нас, а другая — приближаться. В силу эффекта Доплера спектральные линии излучения удаляющейся части галактики должны сдвинуться в длинноволновую часть спектра, а линии излучения приближающейся части — в коротковолновую. Спектральная линия в результате станет наклонной, и величина этого наклона позволяет определять скорость вращения данной галактики.

Используя эффект Доплера, можно получить еще один вид информации с помощью анализа так называемых профилей (или контуров) спектральных линий галактик. Дело в том, что излучение галактики (в том числе и спектральные темные линии поглощения) является суммарным излучением (спектром) звезд. Однако если бы все звезды в галактике были неподвижны друг относительно друга, то линии в их спектрах были бы узкими (как в спектре отдельной звезды). Но звезды движутся в галактиках, и направления их скоростей различны, а тогда в силу эффекта Доплера это должно приводить к расширению (или «размытию») линий в спектре излучения всей галактики. Изучая профили спектральных линий, можно определить величину этого расширения и тем самым пространственные скорости отдельных звезд, входящих в галактику.

Другим примером проявления действия эффекта Доплера является такой грандиозный астрономический феномен, как взрыв сверхновой звезды. Феномен сверхновых звезд весьма необычен и загадочен. По-видимому, в конце своей жизни некоторые звезды внезапно взрываются, сбрасывая оболочку, разлетающуюся с огромными скоростями (до 10 тыс. км/с) в окружающее пространство. Разлет элементов газа расширяющейся оболочки в силу эффекта Доплера меняет частоту и длину волны излучения (для наземного наблюдателя). Если сфотографировать спектры сверхновых, то мы увидим широкие спектральные линии, соответствующие скоростям разлета газа.

Рассмотрим теперь основные механизмы излучения небесных тел. Излучение звезд (и галактик), как правило, является тепловым (или планковским), т. е. обычным излучением «горячей» среды, характеризующейся так называемым равновесным (максвелловским) распределением скоростей частиц. Тепловым является и излучение газовых туманностей в галактиках. Однако существуют в природе и неравновесные, или нетепловые, механизмы излучения. Наиболее известным из них является так называемое синхротронное излучение, названное так в связи с тем, что оно впервые наблюдалось в ускорителях синхротронного типа. Это излучение генерируется релятивистскими электронами (т. е. движущимися со скоростями, близкими к скорости света) в магнитных полях. Хорошо известным источником синхротронного излучения на небе является знаменитая Крабовидная туманность — остаток вспышки сверхновой в созвездии Тельца. Внегалактические источники синхротронного излучения обнаружены, как мы увидим дальше, в так называемых радиогалактиках (радиоизлучение обычных галактик является, естественно, тепловым).

Обратимся теперь непосредственно к теме нашей брошюры — нестационарным явлениям в галактиках.

Открытие галактик Сейферта

Изучение нестационарных явлений в мире галактик началось с работы К. Сейферта, опубликованной в 1943 г. в американском «Астрофизическом журнале». Выделив и проанализировав 12 галактик с очень яркими ядрами, К. Сейферт пришел к выводу, что ядра этих галактик представляют собой образования особого типа, характеристики которых не сводятся к характеристикам всех известных в то время астрономических объектов. Что же привело К. Сейферта к такому заключению?

12 галактик, описанных К. Сейфертом, обладали ядрами с необычными спектрами, имеющими широкие эмиссионные линии, что указывало на огромные скорости движения газа в ядрах (порядка нескольких тысяч километров в секунду). Ясно, что ни обычные звезды, ни газовые туманности не могут дать подобные спектры излучения. Казалось бы, широкие линии типич-

ны для сверхновых звезд, но сверхновые наблюдаются, как правило, во внешних частях галактик, и причина их концентрации к центру этих галактик была непонятна. Таким образом, все три основных в то время типа астрономических объектов — обычные звезды, газовые туманности и сверхновые, даже в любой комбинации друг с другом, не могли удовлетворительно объяснить наблюдаемый феномен. Поэтому-то Сейферт и решился сделать свое заключение об особенностях природы ядер изученных им галактик. Отметим, что хотя первые наблюдения спектров галактик с широкими эмиссионными линиями были получены еще в 1908 г., эти галактики справедливо связывают с именем Сейферта, впервые отметившего их необычность.

Статья Сейферта не вызвала откликов у ученых в течение двух десятков лет — типичный пример преждевременного открытия, опередившего научный «фон» своего времени. Интерес астрономов к галактикам с активными ядрами появился лишь в 60-е годы после выдающихся открытий радиоастрономии, в частности обнаружений радиогалактик и квазаров.

Астрономические объекты, регистрируемые по их радиоизлучению, называются космическими радиоисточниками и делятся (в зависимости от их принадлежности или нет Млечному Пути) на два основных класса — галактических и внегалактических. Наиболее известным представителем галактических радиоисточников является уже упоминаемая нами Крабовидная туманность. Первым внегалактическим радиоисточником стал Лебедь А, в 1954 г. отождествленный с оптическим объектом — слабой пекулярной (необычной) галактикой. В дальнейшем были отождествлены другие яркие радиогалактики³ — Персей А, Центавр А (см. обложку брошюры). Некоторые радиоисточники при более точных измерениях координат обнаружили весьма малые свои угловые размеры ($< 1''$). Один из них, 3С 48, совпадал по своему положению на небе со слабым оптическим объектом, имеющим весьма необычный спектр, и предполагалось, что это — «радиозвезда», находящаяся

³ Как оказалось в дальнейшем, пекулярные радиогалактики характеризуются мощным нетепловым радиоизлучением, в то время как радиоизлучение обычных галактик (обнаруженное несколько позже) является тепловым.

ся в нашей Галактике. Однако по мере увеличения числа обнаруживаемых «радиозвезд» и сходства их свойств с характерными для радиогалактик у ученых возникло предположение, что эти объекты являются также внегалактическими. Решающее доказательство этому было получено на обсерватории Маунт-Паломар (США) молодым стажером из Голландии М. Шмидтом, которому удалось расшифровать оптический спектр одного из таких объектов — ЗС 273. Оптический спектр этого радиоисточника имеет ряд линий, образующих четкую гармоническую последовательность, и Шмидт предположил, что это хорошо знакомые астрофизикам линии самого распространенного во Вселенной элемента — водорода, но только сдвинутые в красную область спектра на необычно большую величину $z = \Delta\lambda/\lambda = 0,16$. При интерпретации этого красного смещения как результата разбега галактик полученное из эффекта Доплера расстояние оказывалось равным 800 Мпс, а радиоисточник ЗС 273 сразу же «стал» одним из самых удаленных объектов во Вселенной. Впоследствии такие объекты стали называть квазарами (от *quasi star* — «квазизвезда»).

Открытие внегалактической природы ЗС 273, а затем и других квазизвездных источников, сразу поставило перед астрономами целый ряд порою, казалось, неразрешимых проблем. Тщательные измерения радиоструктуры ЗС 273, например, показали, что его радиоизлучение исходит из весьма малой области. А в связи с огромным («космологическим») расстоянием до объекта его мощность превосходила мощность излучения целой галактики, содержащей 10^{11} — 10^{12} звезд.

Напряженная интеллектуальная атмосфера в первые годы «эпохи квазаров» вызвала ряд курьезов. Так, популярный в настоящее время термин «квазар» (по этому образцу был назван и последующий новый астрофизический объект — пульсар) в течение нескольких лет не «пускался» на страницы редакцией американского «Астрофизического журнала», так как были неясны свойства такого объекта. Как сказал один из известных теоретиков, «квазары были открыты слишком рано».

После обнаружения квазаров галактики Сейферта вновь обратили на себя внимание ученых. Подобие свойств ядер галактик Сейферта, с одной стороны, и радиогалактик и квазаров, с другой, сразу было отме-

чено рядом исследователей. Именно тогда вывод Сейферта о необычности процессов в ядрах этих галактик получил всеобщее признание: В то же время, поскольку они в среднем ближе и соответственно ярче радиогалактик и квазаров, их было легче изучать в оптическом диапазоне.

В настоящее время известно около тысячи объектов с нестационарными ядрами, которые можно разбить на три основные⁴ группы:

галактики, подобные обнаруженным Сейфертом (сейфертовские галактики);

радиогалактики и квазары;

объекты типа VL Ящерицы (лацертиды).

(Порядковое расположение этих групп соответствует хронологической последовательности их открытия.)

Основные свойства активных нестационарных (сейфертовских) галактик можно сформулировать следующим образом:

1) нестационарные явления в галактиках связаны с их ядрами, на которые приходится значительная доля излучения всей галактики;

2) излучение ядер по наблюдениям в широком диапазоне длин волн является нетепловым;

3) излучение ядер, как правило, является переменным;

4) спектры излучения ядер содержат широкие эмиссионные линии, вызванные движением газа с большими скоростями.

Первое и четвертое свойства были сформулированы еще Сейфертом.

Все эти свойства в значительной степени являются независимыми (так, например, лацертиды не имеют широких эмиссионных линий в спектре), и они в той или иной мере служат основными признаками при поиске новых галактик с нестационарными ядрами.

Рассмотрим методы поиска нестационарных галактик более подробно. При обзорах неба с большими ра-

⁴ В отдельных случаях некоторые внегалактические объекты (NGC 1275, 3C 120) имеют типичное для радиогалактик мощное радиоизлучение, но в то же время спектр их оптического излучения имеет широкие эмиссионные линии, типичные для сейфертовских галактик. Однако в целом радиогалактики и сейфертовские галактики, как правило, отличаются по своим внешним проявлениям активности ядра.

диоантеннами обнаруживается огромное количество радиоисточников, причем измерения их потока на нескольких частотах позволяют построить спектр излучения радиоисточника. Те из радиоисточников с нетепловым спектром, которые отождествляются с оптическими галактиками, называют, как уже мы говорили, радиогалактиками, а в случае совпадения радиоисточника на небе со звездообразным оптическим объектом, обладающим большим красным смещением, — квазарами (квазизвездными источниками). В настоящее время известно свыше 600 радиогалактик и более 300 квазаров.

Однако существуют и оптические методы поиска галактик с активными ядрами. Один из них связан с определением цвета небесных тел. Поскольку большинство звезд в галактиках подобно нашему Солнцу и излучают в желто-красной части спектра, то наличие внегалактических объектов другого цвета (например, голубого или инфракрасного) уже служит указанием на их необычность. Именно точечные голубые внегалактические объекты стали первыми, пополнившими после галактик Сейферта список оптических нестационарных галактик. Они получили название квазизвездные галактики, которые являются наряду с квазарами так называемыми квазизвездными объектами (КЗО), но в отличие от квазаров не имеют заметного радиоизлучения.

Другой разновидностью того же метода является поиск инфракрасных внегалактических объектов, также непохожих по цвету на обычные звезды и, следовательно, на обычные галактики. Ряд нестационарных галактик был выявлен и по этому признаку. (Естественно, что решающим доказательством внегалактической природы объекта является получение его спектра, содержащего спектральные линии с большим красным смещением.)

Нестационарные галактики можно обнаружить и просто по переменности их блеска. Самое удивительное, что целый ряд переменных внегалактических объектов был к тому времени уже «открыт» астрономами и занесен в соответствующие каталоги, однако никто не догадывался об их внегалактической природе. Такова, например, «переменная звезда» BW в созвездии Тельца, оказавшаяся мощным радиоисточником 3С 120 с оптическим спектром, характерным для сейфертовских галактик: В качестве «переменных звезд» были уже известны и не-

которые другие внегалактические объекты: AP Весов, X Волос Вероники и т. д.

Переменность с большой амплитудой блеска как в радио-, так и в оптическом диапазонах характерна для лацертид, названных так по имени своего первого представителя — VL Lacertae (Ящерицы), также известного ранее, как «переменная звезда». Лацертиды стоят несколько особняком среди всех нестационарных внегалактических объектов⁵. Их оптические спектры являются чисто непрерывными, без каких-либо линий (что не позволяет определить до них расстояние с помощью красного смещения). Главная особенность лацертид — переменность их блеска в довольно широких пределах (на 6—7^m, что соответствует изменению их светимости в несколько сот раз). Излучение лацертид сильно поляризовано (до 50—60%), а это указывает на присутствие магнитного поля. Более подробно о лацертидах будет сказано несколько дальше.

Важную информацию о свойствах ядер галактик может дать изучение свойств всей галактики. В 1963 г. (еще до открытия квазаров) советский астроном Б. Е. Маркарян обратил внимание на то, что цвет излучения ряда галактик не соответствует их морфологическому типу. Мы уже упоминали ранее, что все звездное «население» галактик можно разбить на два основных типа: молодые (более горячие и, следовательно, голубые) звезды, концентрирующиеся в галактической плоскости вращения (диске галактики), и старые звезды (более холодные и желто-красные), образующие сферическую галактическую «корону». Используя мощный метровый телескоп системы Шмидта с объективной призмой, Б. Е. Маркарян обнаружил свыше тысячи галактик с «избытками» излучения в ультрафиолетовом диапазоне в их спектрах. Некоторые из этих галактик оказались спиральными и неправильными с большим количеством молодых (более голубых) звезд. Но у остальных галактик Маркаряна голубой цвет был связан с излучением их центральных частей, и это излучение не было типично для находящихся там старых звезд. Последнее при-

⁵ Несмотря на отдельные высказывания о возможности считать эти объекты лишь необычными звездами нашей Галактики, большинство астрономов сейчас считает, что лацертиды тесно связаны (возможно эволюционно) с активными ядрами галактик.

вело ученых к предположению о возможном влиянии нестационарных явлений в ядрах этих галактик на их цвет. В связи с этим понятен большой интерес астрономов к галактикам Маркаряна. В настоящее время на многих обсерваториях, в том числе зарубежных, исследованию спектров подобных объектов посвящены целые программы наблюдений⁶.

В результате этих исследований было выявлено, что примерно 10% галактик Маркаряна имеют широкие эмиссионные линии в спектре излучения их ядер, а это, если вспомнить свойства сейфертовских галактик (см. стр. 11), и указывает на нестационарность данной галактики. Такой признак легко использовать в практической работе. Действительно, достаточно одной-двух спектрограмм исследуемой галактики, чтобы при наличии в них широких эмиссионных линий уверенно отнести этот объект к сейфертовскому типу. Правда, среди астрономов нет пока единого мнения по вопросу о том, какую ширину линий или величину доплеровской скорости следует считать «границей», отделяющей сейфертовские галактики от обычных. Часто эта «граница» определяется величиной скорости 1000 км/с. Однако при таком подходе, видимо, теряется много галактик с меньшими ширинами линий. Галактику, может, имеет смысл относить к сейфертовскому типу, если ширина линий в спектре ядра соответствует скорости, превышающей характерную величину дисперсии скоростей в центральных частях галактик, вызванную хаотическими движениями звезд, т. е. 200—300 км/с.

Следующий признак нестационарности, используемый на практике, — это повышенная концентрация света в ядрах галактик. Еще Сейферт обнаружил, что изученные им галактики имеют светимости, отличающиеся от светимостей обычных галактик повышенной яркостью их центральных частей. Основываясь на этом признаке, советский астроном М. А. Аракелян составил целый каталог галактик с повышенной поверхностной яркостью, полагая, что в нем должны содержаться и сейфертовские объекты. Действительно, наблюдения этих галактик на Крымской станции ГАИШ с щелевым спектрографом показали, что среди них около 3% — сейфертовские.

⁶ В настоящее время наибольшее количество сейфертовских объектов обнаружено среди галактик Маркаряна.

Число сейфертовских галактик в настоящее время превышает сотню. Большая часть этих галактик (свыше 80%) обнаружена в СССР. Напомним, что в оригинальной статье Сейферта описаны всего 12 таких объектов.

Физические параметры ядер галактик

Для описания физических свойств активных ядер галактик мы выберем в качестве образца три наиболее близкие к нам и лучше всего изученные сейфертовские галактики — NGC 1068, NGC 1275 и NGC 4151. Самая яркая из них — NGC 1068 (спиральная галактика в созвездии Кита), хронологически стала первой галактикой, в спектре которой были обнаружены широкие эмиссионные линии. Она отождествлена со слабым радиоисточником 3С 71; и, кроме того, обладает мощным излучением в инфракрасном диапазоне спектра. Поскольку эта галактика относительно близка к нам (10 Мпс), то для нее удалось получить подробную картину движения межзвездного газа в ее ядре. Другая сейфертовская галактика, NGC 1275, является одновременно одной из самых ярких радиогалактик на небе (радиоисточник Персей А). Она отличается сложными морфологическими свойствами и, возможно, является двойной (или взаимодействующей). Галактика NGC 1275 обладает заметным инфракрасным излучением; а в последние годы появились сообщения об обнаружении от ее ядра сильного рентгеновского излучения. Очень интересное открытие было сделано астрономами обсерватории Китт-Пик (США) при фотографировании этой галактики через узкий фильтр, пропускающий красную спектральную линию водорода $H\alpha$. На полученных ими фотографиях была обнаружена волокнистая структура NGC 1275, подобная структуре известной Крабовидной туманности, причем волокна простираются вплоть до самых границ галактики. Физические свойства волокон и их происхождение пока совершенно неясны.

Оптический спектр ядра галактики NGC 1275 содержит те же линии, что и спектр галактики NGC 1068 (но меньшей интенсивности). Линии асимметричны и обладают сложной структурой.

Сейфертовская галактика NGC 4151 (спиральная галактика в созвездии Гончих Псов) имеет очень яркое голубое ядро, а вся галактика окружена слабым светящимся кольцом. Она является весьма слабым радиоисточником, но обладает заметным рентгеновским излучением. Спектроскопические исследования ее излучения позволили выделить в ядре отдельные облака межзвездного газа. Не исключено, что движение этих облаков происходит в плоскости галактики, т. е. по оси, перпендикулярной оси ее вращения.

Профили ярких спектральных линий водорода и дважды ионизованного кислорода для трех указанных галактик приведены на рис. 1. Линии дважды ионизованного кислорода [OIII] называются «запрещенными», так как они соответствуют так называемым метастабильным состояниям атома кислорода, которые в обычных лабораторных условиях чрезвычайно редки (маловероятны), однако в крайне разреженном космическом пространстве, при малой плотности газа и соответственно малом числе столкновений между атомами, эти состояния реализуются довольно часто.

Механизм излучения таких линий изучен достаточно полно. В частности, в Крымской астрофизической обсерватории АН СССР разработаны удобные таблицы, позволяющие по наблюдаемым интенсивностям эмиссионных линий определять значения параметров излучающего их газа. Для галактики NGC 1068 плотность межзвездного газа составляет $\sim 10^4$ частиц в 1 см^3 , температура — 20 тыс. К, скорости движения газа — 800 км/с, полная масса движущегося газа $\sim 10^6 M_{\odot}$. Зная массу и скорость движения газа, можно вычислить его кинетическую энергию, которая оказалась равной $\sim 10^{53}$ эрг.

На рис. 2 воспроизведен оптический спектр галактики NGC 1068. Он содержит линии различных элементов, таких, как водород, кислород, сера, азот, неон и др. в разных состояниях ионизации. Сравнение интенсивностей этих линий с теоретически рассчитанными позволяет оценить содержание соответствующих ионов (излучающих эти линии) относительно водорода, т. е. выявить химический состав газа в ядре галактики. Такой анализ был проведен в 1964 г. В. И. Проником и автором, и оказалось, что химический состав межзвездного газа в ядре NGC 1068 близок к нормальному (солнечному) составу. Этот результат очень важен, как мы

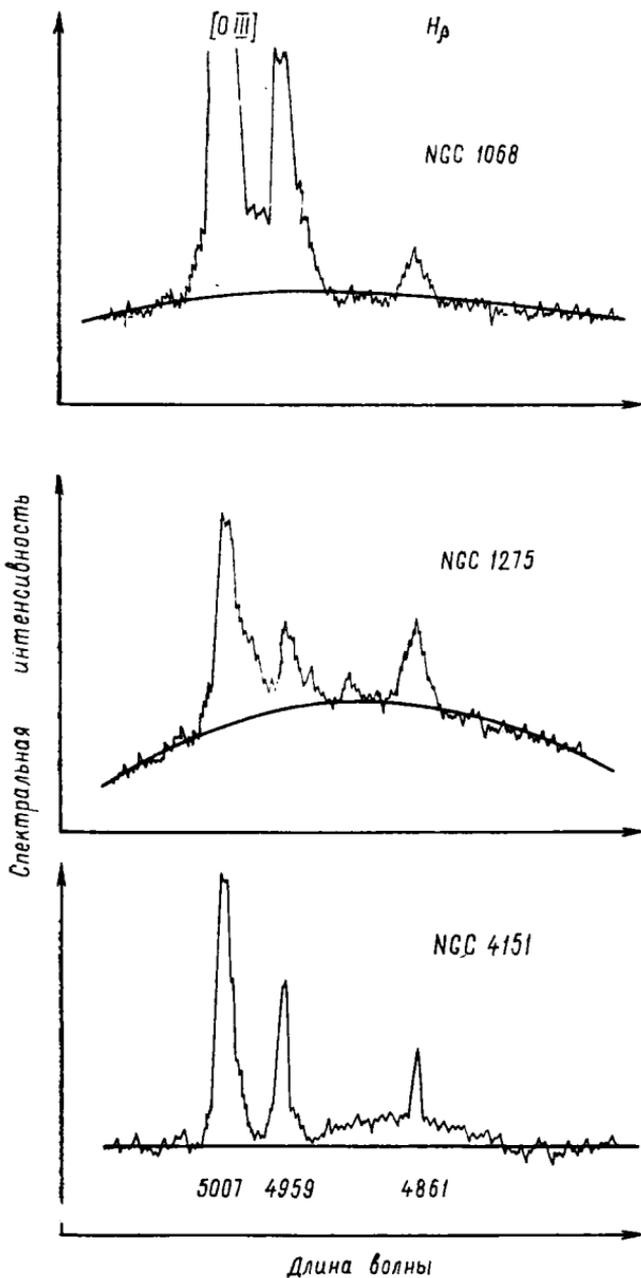


Рис. 1. Профили эмиссионных линий дублета дважды ионизованного кислорода [OIII] и водородной линии H β в спектрах трех сейфертовских галактик

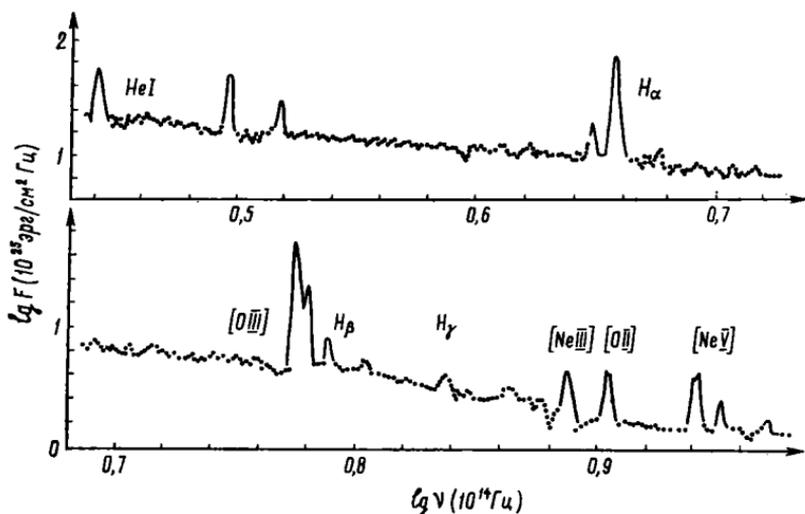


Рис. 2. Оптический спектр сейфертовской галактики NGC 1068

увидим в дальнейшем, для понимания природы активных ядер галактик.

Обратимся теперь к сейфертовской галактике NGC 1275. Как и в случае галактики NGC 1068, профили «запрещенных» и водородных линий в спектре этой галактики примерно одинаковы. Такая однородность говорит о том, что линии излучения возникают в одном и том же объеме газа. «Запрещенные» линии позволяют получить плотность газа, равную около $3 \cdot 10^6$ частиц в 1 см^3 . Масса газовых облаков $\sim 10^2 M_{\odot}$, кинетическая энергия $\sim 10^{50}$ эрг. Оценка размеров объема газа, ответственного за излучение ядра галактики, дает для случая NGC 1275 величину порядка 10^{53} см^3 , что соответствует угловым размерам в тысячные доли секунды дуги (ясно, что такие размеры невозможно определить из наблюдений, так как видимые угловые размеры ядра из-за воздействия земной атмосферы можно регистрировать с точностью $\geq 1''$).

Поскольку NGC 1275 является радиогалактикой, обладающей сильным магнитным полем (в связи с нетепловым характером ее радиоизлучения), не исключено, что это поле оказывает определенное воздействие на динамику газа. При некоторых предположениях оценка магнитного поля дает величину порядка не-

скольких гаусс, а такая величина может обусловить несимметричность разлета межзвездного газа и тем самым объяснить наблюдаемую асимметрию профилей ее спектральных линий.

В отличие от предыдущих сейфертовских галактик в спектре ядра NGC 4151 профили линий имеют различную ширину (см. рис. 1): «запрещенные» линии узки, тогда как водородные линии имеют узкие максимумы, но широкие «крылья». Для объяснения этого феномена В. И. Проником и автором была выдвинута в 1966 г. гипотеза о наличии двух подсистем (зон) газа ядра этой галактики с различными физическими и кинематическими характеристиками: «запрещенные» линии возникают в зоне с малой плотностью и малыми скоростями газа, тогда как водородные линии — в зоне с большой плотностью и большими скоростями газа. Поскольку «запрещенные» линии исчезают в спектре при плотностях излучающего газа, больших 10^7 — 10^8 частиц в 1 см^3 , то плотность газа в водородной зоне больше этой величины, а скорости газа в водородной зоне должны достигать значений несколько тысяч километров в секунду.

Одной из очень важных проблем является определение пространственной конфигурации излучающего газа. С большими скоростями мы встречаемся в таких астрономических феноменах, как разлетающиеся в результате взрыва оболочки новых и сверхновых звезд и истекающие под действием сил светового давления оболочки звезд Вольф—Райе. Однако еще Сейферт отмечал, что профили линий в спектрах перечисленных объектов не похожи на профили спектральных линий сейфертовских галактик. В связи с этим для галактик типа NGC 4151 В. И. Проник и автор предположили, что более плотные и быстрые облака газа расположены во внутренних частях ядра, а менее плотные образуют внешнюю «корону» ядра (внешняя зона, видимо, непосредственно переходит в межзвездный газ центральных областей галактики). Не исключено, что динамика внешней зоны определяется ее гравитационным взаимодействием со звездным «населением» галактики. Так как внутренняя плотная зона имеет прямое отношение к нестационарности ядра, то в дальнейшем мы сосредоточим свое внимание именно на этой зоне.

Начнем с вопроса о характерной плотности газа в

плотной зоне ядер сейфертовских галактик. К сожалению, при больших плотностях излучающей среды исчезают «запрещенные» линии в спектре ядра, и, следовательно, уже нельзя пользоваться описанным ранее методом. Однако можно определить предельное значение плотности, исходя из отсутствия «запрещенных» линий. Они дали $n_e > 10^8$ частиц в 1 см^3 . Были попытки использовать для оценки плотности далекие «крылья» широких спектральных линий, предполагая, что форма их контуров вызвана эффектом электронного рассеяния. Для нескольких сейфертовских галактик с помощью этого метода была получена величина плотности 10^8 — 10^9 частиц в 1 см^3 . Некоторую информацию о плотности газа можно получить, изучая имеющиеся в спектрах некоторых нестационарных объектов линии иона железа Fe II. Наличие в спектре одновременно «запрещенных» и «разрешенных» линий Fe II возможно лишь при значении плотности $n_e \approx 10^9$ частиц в 1 см^3 . Проводился теоретический расчет интенсивностей спектральных линий при разных предположениях о физических условиях излучающего газа, а после сравнения этих результатов с наблюдениями такое «моделирование» условий дало для разных сейфертовских галактик величину плотности 10^8 — 10^{10} частиц в 1 см^3 . Суммируя эти оценки, можно принять, что характерная плотность газа в плотной зоне, в которой образуется излучение широких (из-за сильных движений газа) линий, равна $\sim 10^9$ частиц в 1 см^3 (или $\sim 10^{-15} \text{ г/см}^3$), причем плотность увеличивается к более центральному району ядра галактики.

Некоторые параметры плотной зоны ядра с быстро движущимся газом для отдельных нестационарных объектов перечислены в табл. 1. При расчете эффективного размера плотной зоны быстро движущегося газа предполагалось, что газ занимает одну тысячную ее объема. Величина характерного времени будет объяснена чуть позже. В табл. 1 в основном приведены близкие сейфертовские галактики и один квазар — 3C 273.

Свечение газовых облаков в ядрах галактик носит так называемый рекомбинационный характер, соответствующий тому, что атомы и ионы облаков переизлучают в видимом свете высокочастотное излучение, идущее из глубин ядра. Следовательно, перед тем как начать исследовать это излучение ядра, необходимо сначала его «отфильтровать» от наблюдаемого общего из-

Таблица 1

Объект	Масса газовых облаков, г	Кинетическая энергия, эрг	Характерный размер оболочки, см	Характерное время, с
3С 273	$7 \cdot 10^{36}$	$1 \cdot 10^{53}$	$2 \cdot 10^{18}$	$1 \cdot 10^{10}$
3С 120	$1 \cdot 10^{35}$	$5 \cdot 10^{51}$	$4 \cdot 10^{17}$	$1 \cdot 10^9$
Маркарян 79	$5 \cdot 10^{34}$	$7 \cdot 10^{50}$	$3 \cdot 10^{17}$	$2 \cdot 10^9$
NGC 1275	$3 \cdot 10^{34}$	$2 \cdot 10^{50}$	$2 \cdot 10^{17}$	$2 \cdot 10^8$
-NGC 5548	$2 \cdot 10^{34}$	$5 \cdot 10^{50}$	$2 \cdot 10^{17}$	$1 \cdot 10^9$
NGC 4151	$6 \cdot 10^{33}$	$2 \cdot 10^{50}$	$1 \cdot 10^{17}$	$6 \cdot 10^8$
NGC 4051	$1 \cdot 10^{32}$	$7 \cdot 10^{47}$	$4 \cdot 10^{16}$	$3 \cdot 10^8$

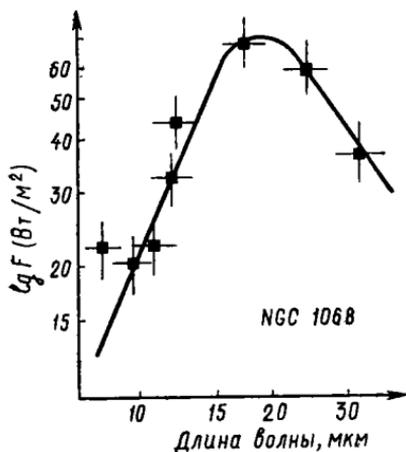


Рис. 3. Инфракрасный максимум в спектре сейфертовской галактики NGC 1068

лучения галактики, включающего излучения газовых облаков и входящих в галактику звезд.

Учет вклад газовой составляющей в общую светимость довольно просто, поскольку теория рекомбинационного излучения газа хорошо разработана. Сложнее обстоит дело с «фильтрацией» излучения звезд. Во-первых, сильно мешает чрезвычайная яркость ядра. Во-вторых, излучение галактики обычно представляют некоторым набором излучений звезд, имеющих различную температуру, т. е. излучением некоторой средней (или стандартной) галактики. Однако, вообще говоря, неясно, можно ли уподобить сейфертовскую галактику (даже без ядра) обычной галактике. Этот вопрос до сих пор является дискуссионным, и, скорее всего, сейфертовские галактики по своей структуре отличаются от обычных. Так или иначе, при некоторых предположениях можно получить «чистое» излучение центральных частей ядра, спектр которого, как оказывается, лучше всего описывается степенной функцией вида $F(\nu) \sim \nu^{-\alpha}$, где $F(\nu)$ — спектральный поток, α — некоторая постоянная, называемая «спектральным индексом» (см. рис. 2). Для типичных сейфертовских галактик величина α близка к 0,7, что совпадает с аналогичным значением для радиогалактик.

Поскольку излучение звезд сосредоточено в желто-красной области спектра, «избавиться» от звездного фо-

на окружающей ядро части галактики можно, используя другие спектральные диапазоны. Мы уже упоминали о радионаблюдениях внегалактических нестационарных объектов, которые проводят (как и оптические) с помощью наземных инструментов. Использование же других диапазонов требует вывода приемной аппаратуры за пределы земной атмосферы, что иногда является технически довольно сложной проблемой. Однако изучение галактик именно в этих диапазонах привело к неожиданным открытиям.

У многих сейфертовских объектов, в частности, было обнаружено мощное инфракрасное излучение (в области длин волн 25—100 мкм). Как отметил один из пионеров наблюдений инфракрасного излучения внегалактических объектов Ф. Лоу, сейфертовские галактики и радиогалактики (составляющие менее 1% всех галактик) на длине волны 50 мкм дают столько же излучения, сколько и все остальные галактики, вместе взятые.

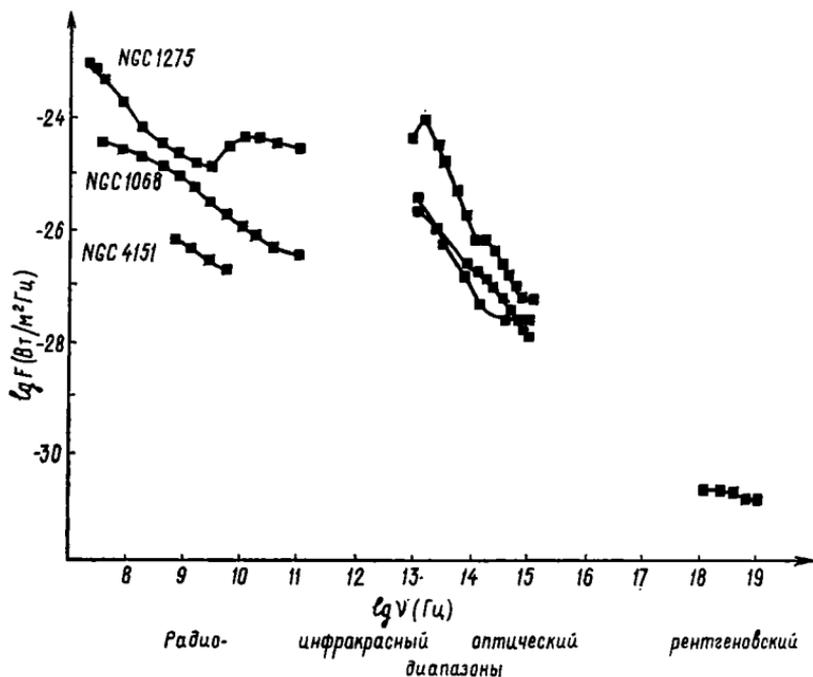


Рис. 4. Кривые распределения энергии в спектрах трех сейфертовских галактик

Правда, из-за сложности проведения инфракрасных наблюдений пока еще не удалось с достаточной уверенностью определить точную форму спектра инфракрасного излучения сейфертовских галактик. Вследствие недостаточного количества наблюдательных данных в настоящее время нет и достоверной теории инфракрасного излучения **сейфертовских галактик**. Хотя, например, для такой близкой и хорошо изученной галактики, как NGC 1068, установлен планковский (т. е. тепловой) характер ее инфракрасного излучения, причем максимум спектра на длине волны 20 мкм (рис. 3), соответствует температуре излучения $\sim 10^3$ К. Это излучение, по всей видимости, вызвано свечением пылевых частиц в центральных частях этой галактики. Но такой вид спектра не характерен для других сейфертовских галактик⁷.

В последние годы появились сообщения об обнаружении рентгеновского излучения (рис. 4) ряда сейфертовских галактик. По-видимому, это излучение имеет тепловое происхождение, т. е. соответствует излучению горячей плазмы (с температурой 10^8 — 10^9 К).

Относительно хорошо изучено радиоизлучение нестационарных внегалактических объектов. В большинстве случаев оно вызвано нетепловым, синхротронным механизмом. Некоторые авторы с помощью синхротронного механизма предлагают объяснять и инфракрасное излучение сейфертовских галактик. Следует также отметить, что в некоторых квазарах малые центральные (так называемые сверхкомпактные) радиоисточники объяснить синхротронным механизмом не удается, и природа их излучения пока остается загадкой.

Синхротронное излучение может проявлять себя и в оптическом диапазоне. Хотя излучение сейфертовских галактик в оптическом диапазоне изучено довольно детально, до сих пор пока нет единого мнения о его природе. Однако в случае синхронного механизма оптического излучения у сейфертовских галактик должна наблюдаться поляризация. Такая поляризация действительно была обнаружена в 1966 г. Н. М. Шаховским и

⁷ Более подробно об инфракрасном излучении сейфертовских галактик рассказывается в сборнике «Современные проблемы астрофизики» (М., «Знание», 1976. Серия «Космонавтика, астрономия», 11).

автором в СССР и М. Уокером в США (она оказалась небольшой — всего несколько процентов). В связи с этим отметим, что излучение лацертид, например, поляризовано очень сильно (степень поляризации достигает 50—60%).

Данные о распределении энергии в спектрах ядер галактик удобно представить на так называемой двухцветной диаграмме ($U-B$), ($B-V$), смысл которой заключается в следующем. Излучение небесных тел (звезд, квазаров, галактик) имеет цветовые (или спектральные) характеристики. Количество света объекта характеризуется с помощью звездных величин, которые обратно пропорциональны логарифму потока. Цветовые характеристики излучения, а именно — логарифм отношения потоков в разных участках спектра (или разности звездных величин) — носят название показателей цвета. В астрономической практике принято пользоваться тремя участками спектра: ультрафиолетовым U (длина волны 3600 Å), синим B (4200 Å) и визуальным V (5500 Å)⁸. Разности соответствующих звездных величин дают два цвета: ($U-B$) и ($B-V$). На рис. 5 приведены двухцветная диаграмма оптического излучения активных ядер галактик и двухцветная диаграмма, характерная для излучения звезд (различных температур). Очевидно, что ядра сейфертовских галактик по своему цвету (и соответственно по распределению энергии в непрерывном спектре) весьма отличаются от звезд. Однако следует сказать, что наблюдаемое распределение энергий может быть искажено поглощением света, а учет этого эффекта не всегда возможен.

Оказалось, что измерение цветовых характеристик позволяет четко выделить ядра сейфертовских галактик среди прочих объектов. При разнице ($B-V$) — $(1/2)(U-B) \geq 0,75$ объект с вероятностью 90% является сейфертовским. Но пока этот практически безошибочный способ выявления сейфертовских галактик не привел к открытию ни одной сейфертовской галактики (опытные наблюдатели «успевают» оценить цвет сейфертовской

⁸ Это так называемая UBV -система, широко распространенная в практике фотозлектрических наблюдений (с обычным фотоумножителем). Есть и другие многоцветовые системы, включающие, в частности, инфракрасную часть спектра, однако они требуют более сложной приемной аппаратуры.

галактики, как говорится, на глаз, еще до его точного измерения).

В общем, следует признать, что необходимо получить еще достаточно много наблюдательного материала, прежде чем мы поймем физику излучения нестационарных ядер галактик. По-видимому, в ядрах сейфертовских галактик наблюдается сложный конгломерат различных областей излучения с разными значениями физических параметров. С одной стороны, наблюдается тепловое излучение горячей плазмы. Доказательством этому (помимо рентгеновского излучения) является обнаружение в некоторых сейфертовских галактиках (например, NGC 4151) спектральных линий многократно ионизованного железа Fe X и Fe XIV. Зарегистрировано, кроме того, тепловое излучение относительно холодных волокон или облаков газа с температурой $\sim 10^4$ K, а в некоторых галактиках — тепловое инфракрасное излучение пыли. В то же время, наблюдается нетепловое излучение релятивистских электронов, дающее синхротронное радиоизлучение (возможно, частично проника-

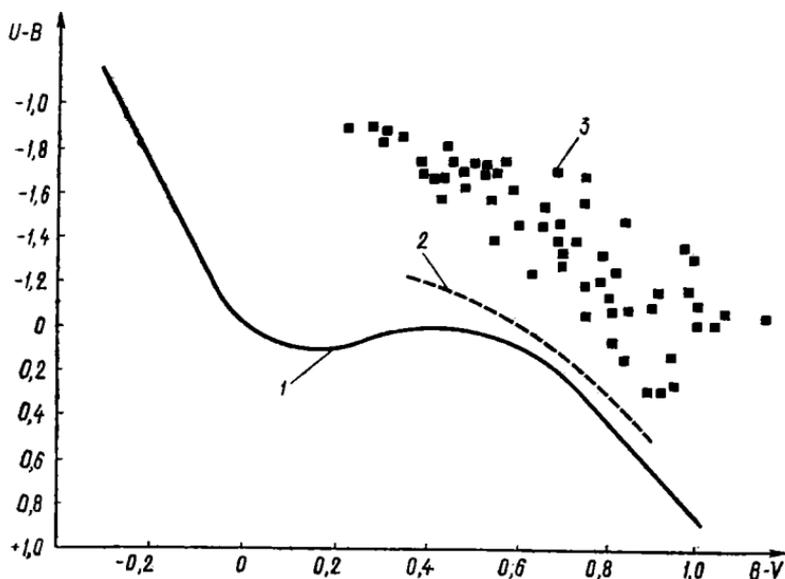


Рис. 5. Двухцветная диаграмма $U-B$, $B-V$: 1 — кривая цветов нормальных звезд; 2 — кривая интегральных цветов галактик; 3 — цвета ядер сейфертовских галактик

ющее в инфракрасный и оптический диапазоны спектра). Наконец, вследствие нестационарности ядер сейфертовских галактик возможны весьма сложные взаимодействия между различными их составляющими, суммарно обуславливающими общий поток излучения. Определение общего потока излучения галактики во всем спектре позволяет вычислить величину полной (или болометрической) светимости активных ядер (табл. 2).

Таблица 2

Объект	Логарифм болометрической светимости, (эрг/с)	Логарифм массы центрального тела, м/Мс	Характерное время переменности, дни
3С 273	47,0	8,8	30
Тонанцитла 256	>44,7	8,5	—
3С 120	45,3	8,5	15
3С 390.3	>44,0	9,0	5
Маркарян 205	>44,5	8,5	3
Маркарян 10	44,8	8,0	20
Маркарян 79	44,9	8,0	30
Маркарян 335	45,2	8,0	—
NGC 1275	45,3	7,5	20
NGC 7469	45,1	7,8	20
NGC 5548	44,9	8,2	100
NGC 3516	44,4	8,2	10
NGC 4151	44,3	8,0	30
NGC 3227	43,1	7,2	2
NGC 4051	42,7	6,7	1
NGC 1068	45,2	8,0	20

В этой таблице также приводятся масса центрального тела и характерное время переменности ядра (об определении этих величин будет сказано в следующих разделах).

При столь высокой плотности энергии излучения, которая характерна для активных ядер, это излучение должно оказывать заметное воздействие на динамику газа вокруг ядра. В самом деле, оценим плотность кинетической энергии газовых облаков. Для кинетической энергии на единицу объема ϵ_k получим $\epsilon_k = \rho v^2 / 2 \approx \approx 0,1$ эрг/см³, где ρ — плотность газа, а v — скорость движения его частиц. Плотность энергии излучения определяется выражением $L \cdot (4\pi r^2 c)^{-1}$, и при характерной

для ядер галактик светимости 10^{46} эрг/с дает величину, близкую к предыдущей. По-видимому, того же порядка и плотность магнитной энергии (для NGC 1275 это получается из независимых оценок). В конечном итоге мы можем написать $L \cdot (4\pi r^2 c)^{-1} \approx \rho v^2 / 2 \approx B^2 / 8\pi$. Этот очень важный результат потребует нам в дальнейшем при обсуждении теоретических моделей активного ядра.

Таким образом, спектроскопические методы позволяют изучать ядро вплоть до расстояний, до которых газ остается прозрачным (т. е. до размеров порядка $1 \text{ пс} \approx 10^{18} \text{ см}$), и с помощью этих методов можно получить представление о свойствах газовых облаков, окружающих активное ядро галактики. Однако основные события разыгрываются в более глубоких слоях ядра, под газовой оболочкой. Важную информацию о характере процессов в этих внутренних частях ядра несут наблюдения переменности блеска.

Характер переменности излучения активных ядер

Изучение переменности блеска нестационарных внегалактических объектов началось с открытия переменности первого квазара — 3С 273. Правда, еще ранее была обнаружена переменность радиисточника 3С 48, но поскольку о его внегалактической природе никто тогда не догадывался, этот факт не привлек к себе особого внимания ученых. Точно так же оставались без внимания «скрытые квазары», которые были известны как «переменные звезды» (BW Тельца-3С 120, VL Ящерицы и т. д.). Оптическая переменность квазара 3С 273 была открыта в 1964 г. советскими астрономами А. С. Шаровым и Ю. Н. Ефремовым, которые по предложению И. С. Шкловского исследовали коллекцию пластинок переменных звезд Государственного астрономического института им. Штернберга (ГАИШ). Несколькими месяцами позже аналогичная работа была проведена в США по «Гарвардскому патрулю» неба. Оказалось, что на протяжении нескольких десятков лет квазар 3С 273 значительно менял свой блеск (до полутора-двух звездных величин, т. е. блеск менялся в 3—5 раз). Это открытие оказалось столь неожиданным, что вызвало

большую дискуссию. При этом, в частности, выдвигались сомнения относительно самого факта переменности. Дело в том, что точность фотографического метода, вообще говоря, не очень высока, и, если не соблюдать особых мер предосторожности, легко можно получить ложную переменность. Подобная критика сыграла положительную роль в том смысле, что способствовала более тщательному проведению последующих наблюдений.

Отметим как курьез, что с тех пор как квазар 3С 273 начали исследовать с более точной (фотоэлектрической) техникой, его блеск почти перестал меняться (имея лишь флуктуации 0,2—0,3). Трудно сказать, испытывает ли сейчас квазар период своего относительного «спокойствия» или это и есть его реальная переменность.

Переменность блеска ядер сейфертовских галактик была открыта в 1966 г. А. Н. Дейчем в СССР и польским астрономом А. Пахольчиком, проводившим свои наблюдения в США. Измерения, сделанные с помощью так называемых кольцевых диафрагм (которые позволяют исключать свет периферийных частей галактики), показали, что переменным является именно ядро галактики. Таким образом, факт переменности активных ядер можно считать установленным достаточно надежно. Теперь рассмотрим, каков же характер этой переменности.

Переменность блеска активных галактических ядер, как и все прочие их свойства, является весьма необычной. Астрономы знают много классов физически переменных звезд, таких, как цефеиды, полу- и неправильные переменные, взрывные переменные (новые и сверхновые), пульсары и т. д. Среди них встречаются объекты как с правильными (периодическими), так и с неправильными колебаниями яркости. Но колебания блеска активных ядер галактик не имеют никакого аналога среди известных астрономических объектов.

Кривые изменения блеска сейфертовской галактики NGC 4151 и одной лацертиды (OJ 287) приведены на рис. 6 и 7. Как можно видеть, эти кривые имеют общие черты: наблюдаются долгопериодические циклы с характерными временами порядка нескольких лет, на которые накладываются более кратковременные колебания типа отдельных вспышек. Такая закономерность впервые была обнаружена (для квазара 3С 345) Т. Кин-

маном на Ликской обсерватории (США). В настоящее время стало ясно, что такой двойственный характер переменности присущ и всем нестационарным внегалактическим объектам. Но это касается оптической переменности нестационарных объектов, в то время как радиопереманность их ядер известна давно. Сообщения о переменности ядер в инфракрасном диапазоне, как отмечалось, пока не являются достаточно надежными. Чрезвычайно ценным, как мы увидим в дальнейшем, было обнаружение переменности в рентгеновском диапазоне.

Возвращаясь к оптической переменности, отметим тот интерес, который представляет для астрономов изучение переменности блеска активных ядер галактик в различных участках спектра. Пока относительно полно изучена переменность излучения ядер в U , B , V -участках. Изменение цвета активных ядер характеризуется двухцветной диаграммой. Из нее видно, что максимум блеска ядра приходится на область нетеплового излучения, минимум — на кривую, соответствующую суммарному излучению звезд галактики.

Одновременные наблюдения ряда внегалактических

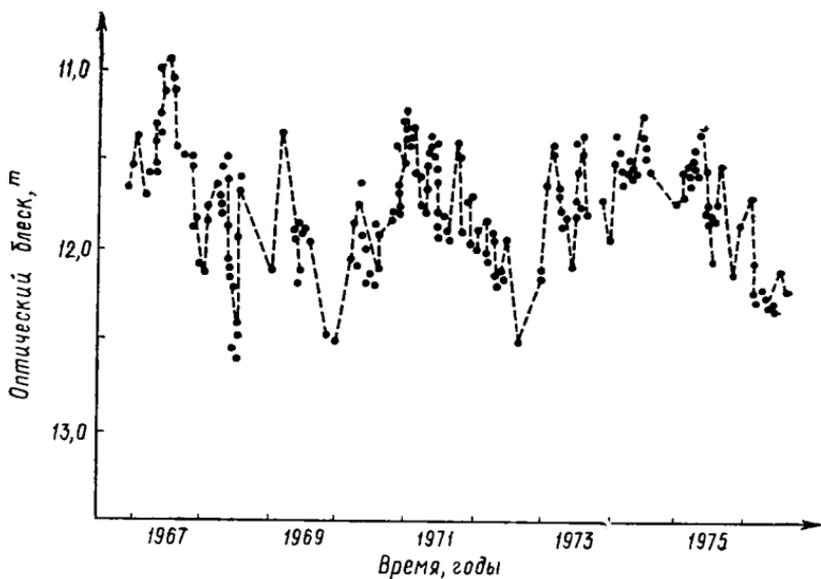


Рис. 6. Кривая блеска ядра сейфертовской галактики NGC 4151

нестационарных объектов, проведенные астрономами ГАИШ и Ленинградского государственного университета, показали, что переменность их блеска коррелирует с изменением поляризации. Этот результат можно объяснить наличием синхротронного механизма. С помощью этого же механизма объясняется и двухцветная диаграмма: в минимуме блеска синхротронное излучение ослабевает и доминирует излучение звезд галактики. Следует отметить, что полная «расшифровка» цветовых характеристик переменных ядер еще не сделана.

Сильные колебания поляризации излучения как по величине, так и по направлению наблюдаются у лацертид. Это обстоятельство, по-видимому, свидетельствует о сильной переменности магнитных полей в этих объектах. Однако удовлетворительной интерпретации наблюдений лацертид тоже не существует.

Колебания общего излучения активных ядер (непрерывный спектр) сказываются и на поведении спектральных линий. Такие изменения интенсивностей эмиссионных линий были впервые обнаружены молодым французским астрономом Сюзаной Суффрен у галактики NGC 3516. Теоретическое объяснение эффекта пе-

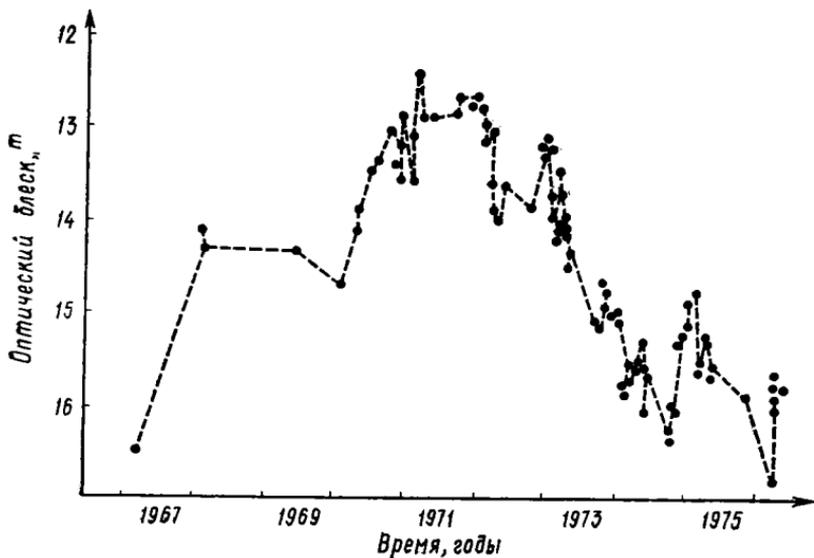


Рис. 7. Кривая блеска лацертиды OJ 287

ременности линий в активных ядрах было дано советским астрофизиком И. С. Шкловским.

Казалось бы, что эффект переменности линий можно объяснить расширением среды, сопровождающимся уменьшением плотности вещества, но тогда должно наблюдаться длительное (так называемое «вековое») изменение интенсивностей эмиссионных линий. Действительно, по-видимому, этот эффект имеет место, но с большим характерным временем. Между тем как реальные, четко регистрируемые изменения интенсивностей линий происходят в весьма короткие сроки. Так, в спектре квазара ЗС 345 наблюдалось сильное изменение интенсивности так называемой резонансной линии ионизованного магния ($\lambda_0=2908 \text{ \AA}$) за характерное время порядка недели.

И. С. Шкловский предположил, что облака газа в нестационарных объектах (в частности, в активных ядрах галактик) ионизируются потоком релятивистских частиц, и в случае «отключения» источника ионизации газ за время, определяемое его плотностью, рекомбинирует (эффект «нестационарной ионизации»). Наблюдаемые времена переменности интенсивности спектральной линии порядка недель и месяцев соответствуют плотностям газа порядка 10^7 — 10^8 частиц в 1 см^3 . Интересно, что это значение совпадает с полученным нами ранее, но при использовании других методов (см. табл. 1).

Таким образом, в нестационарных ядрах галактик наблюдаются как колебания интенсивности непрерывного спектра, так и интенсивности спектральных линий. Последний эффект, как мы уже говорили, является вторичным. Иногда во внегалактических объектах наблюдается изменение обеих этих интенсивностей. Так, в квазаре ЗС 446 в течение нескольких месяцев была зарегистрирована мощная вспышка, при которой линии спектра были «залиты» непрерывной составляющей. После ослабления общего блеска эмиссионные линии появились вновь. Не исключено, что отсутствие эмиссионных линий в спектрах лацертид вызвано этим же эффектом.

Большой интерес у астрономов вызывает вопрос о возможной периодичности переменности ядер галактик. В настоящее время, когда накоплен обширный наблюдательный материал о переменности для многих внегалактических объектов, проблема периодичности их бле-

ска более или менее проявилась. По всей видимости, можно сказать, что сообщения об обнаруженных периодах изменения блеска ядер галактик были ложными, поскольку были вызваны малым количеством времени наблюдений (по мере увеличения времени наблюдений предлагаемые «периоды» не подтверждались новыми наблюдательными данными). Правда, недавний анализ кривой изменения блеска галактики NGC 1275, проведенный на ЭВМ, дал некоторый регулярный цикл с характерным временем порядка нескольких лет. Этот результат можно заметить на кривой блеска (см. рис. 6) и невооруженным взглядом (крупномасштабные волны). Однако если не рассматривать подобные длинные циклы, т. е. ограничиться только отдельными вспышками, то расчет на ЭВМ с полной определенностью показывает, что последовательность наблюдаемых вспышек носит случайный характер.

Итак, для кривых блеска активных ядер галактик характерны две особенности: длинные «волны» (циклы) переменности и отдельные вспышки. Характерные времена (в данном случае, время возрастания блеска на среднюю амплитуду) длинных циклов — порядка нескольких лет, характерные времена вспышек — недели и месяцы. Эти характерные времена для ряда внегалактических нестационарных объектов и приведены в табл. 2 (см. стр. 27). Отметим большое значение более или менее непрерывных наблюдений («патрулирования») для точного определения минимальных времен переменности этих объектов. Такие наблюдения, проводимые у нас в стране и за рубежом, выявили минимальные времена для квазаров порядка нескольких дней, для сейфертовских галактик — сутки, в отдельных случаях — несколько часов.

Геометрическая структура активного ядра

Познакомившись с результатами спектрального анализа и наблюдений переменности блеска, мы можем обратиться к изучению геометрической структуры активного ядра нестационарных объектов. При этом необходимо отметить довольно малую информативность астро-

номических фотографий, получаемых с помощью наземной аппаратуры. «Неспокойствие» земной атмосферы ограничивает изображения ядер величиной в лучшем случае $\sim 1''$, что для типичных расстояний сейфертовских галактик соответствует области с характерным размером в несколько сот парсек ($\sim 10^{21}$ см). Некоторое преимущество здесь имеют наблюдения, проводимые на больших телескопах с длиннофокусными спектрографами. Например, М. Уокер с помощью такого спектрографа, установленного на 3-метровом рефлекторе Ликской обсерватории (США), исследовал газовые облака в ядре ряда галактик (дающие эмиссионные линии в спектре) вплоть до расстояния от центра в 200 пс. Интересные результаты были получены В. И. Проником с помощью 2,6-метрового телескопа Крымской астрофизической обсерватории АН СССР. Фотографируя спектры сейфертовской галактики NGC 4151 при помощи спектрографа с очень узкой щелью — $0,5''$ (для этого пришлось выбирать исключительно хорошие ночи и проводить экспонирование по 5—6 ч), он обнаружил, что, во-первых, наиболее занятая облаками область ядра по своим размерам меньше, чем считалось раньше и не превышает 100 пс, а во-вторых, вся внутренняя часть галактики очень быстро вращается, причем угловая скорость нарастает по мере приближения к центру галактики.

В 1968 г. известным американским астрофизиком М. Шварцшильдом был проведен уникальный эксперимент, позволивший получить очень интересные результаты. С помощью 30-сантиметрового телескопа, поднятого на стратосферном баллоне за пределы нижних, более плотных слоев земной атмосферы, им были получены фотографии сейфертовской галактики NGC 4151 с рекордным разрешением — $< 0,1''$. С тщательным учетом всех «инструментальных» эффектов М. Шварцшильд определил, что в ядре этой галактики область, занимаемая газовыми облаками, имеет угловые размеры $0,6''$, а область, ответственная за нетепловое излучение, — $0,08''$ (это соответствует линейным размерам всего в несколько парсек). Полученный результат крайне важен для правильного построения модели активного ядра. Если до получения этого результата серьезно рассматривалась возможность того, что газ в центральных областях галактики светится под действием иони-

зующего излучения окружающих звезд, то после эксперимента М. Шварцшильда с полной определенностью стало ясно, что источник ионизирующего излучения находится в самых центральных частях ядра.

Итак, наблюдения показали, что в пределах нескольких десятков-сотен парсек в ядрах галактик наблюдаются облака или волокна, излучающие узкие спектральные эмиссионные линии. Более плотные элементы газа (дающие в спектре широкие линии), находящиеся внутри области этих облаков, образуют зону с размерами, не превышающими нескольких долей парсека. Независимым подтверждением результатов спектральных наблюдений явились наблюдения переменности спектральных линий, проведенные советскими астрономами В. М. Лютым и А. М. Черепашуком. Ими было обнаружено, что изменение интенсивности спектральных линий происходит с некоторым временным сдвигом относительно изменения интенсивности непрерывного спектра. Оказалось, что колебания интенсивности спектральных линий запаздывают относительно изменений интенсивности непрерывного спектра на характерное время порядка месяца. Это запаздывание по времени соответствует расстоянию от переменного источника ионизации до переизлучающей газовой оболочки $R=ct$, где c — скорость света, а t — время запаздывания. Для хорошо изученных галактик NGC 4151 и NGC 3516 наблюдаемые времена запаздывания дают расстояние порядка 10^{18} см (или $\sim 0,3$ пс), что достаточно хорошо согласуется с оценками, полученными на основе спектроскопических определений. Наблюдения запаздывания дают непосредственные размеры плотной газовой оболочки, или области, в которой расположены быстродвижущие облака.

Примерно такие же размеры этой области ядра получены с помощью сложного, но широко распространенного в последние годы метода радиоинтерферометрии с так называемой сверхдлинной базой. В этом методе наблюдения ведутся с использованием трех-четырёх прецизионных радиоантенн, разнесенных на расстояния («базы») в несколько тысяч километров друг от друга, что позволяет достигнуть рекордного углового разрешения в тысячные и даже десятитысячные доли секунды дуги. Так, в одном из последних экспериментов, проведенном советскими учеными Института космических исследований и Крымской астрофизической обсерватории

совместно с американскими и австралийскими радиоастрономами, была исследована тонкая структура ряда внегалактических радиоисточников, в том числе квазара 3С 273 и сейфертовской галактики NGC 1275. В центральных районах этих источников были обнаружены компактные облака релятивистских частиц (ответственных за синхротронное излучение), движущихся со скоростями, близкими к скорости света. Наблюдения, проведенные в различные периоды, показали, что с течением времени увеличивается как расстояние между компонентами, так и сами размеры компонентов этих внегалактических источников. Таким образом, радионаблюдения дают непосредственное доказательство разлета компактных облаков релятивистской плазмы из активных ядер. В то же время, пределы интерферометрических исследований составляют тысячные доли угловой секунды, что для близких объектов (NGC 1275, 3С 120) соответствует линейным размерам порядка нескольких долей парсека (10^{17} — 10^{18} см), т. е., в общем, те же размеры, что и получаемые спектроскопическими методами⁹.

Дальнейшие сведения о более глубоких слоях активных ядер можно получить, изучая их оптическую переменность. Кривые блеска ядер сейфертовских галактик (см. рис. 6) имеют, как уже говорилось ранее, две компоненты: длинные циклы и отдельные вспышки. Характерные времена длинных циклов порядка нескольких лет, что, в общем-то, соответствует (по формуле $R = ct$) тем же размерам 10^{17} — 10^{18} см. Более короткие вспышки, порядка нескольких месяцев и недель, дают меньшие размеры — 10^{16} — 10^{17} см. Если эти вспышки были бы периодическими, то можно было бы говорить или о периоде вращения (и тем самым о размерах), или о колебании (вибрациях) некоторого единого тела, находящегося в центре галактики. Поскольку же вспышечная активность носит совершенно случайный характер, естественно предположить, что она вызвана хаотически расположенными малыми элементами (облаками) плазмы ядра, быстро меняющими свои свойства (плотность, температуру) за характерное время порядка дней или

⁹ Интересно отметить, что эти размеры даже уступают общепринятым в настоящее время размерам нашей Солнечной системы ($2 \cdot 10^5$ а. е. $\approx 3 \cdot 10^{18}$ см ≈ 1 пс).

недель. В связи с этим следует еще раз подчеркнуть ценность постоянных патрульных наблюдений активных галактик, так как установленные из них минимальные времена переменности позволят в будущем определить облачную структуру, узнать характерные размеры самых малых излучающих элементов плазмы ядра галактики. Что же мы имеем на сегодняшний момент?

К настоящему времени из патрульных наблюдений квазаров определены минимальные времена переменности порядка нескольких дней, для сейфертовских галактик — в отдельных случаях, доли дня. Это соответствует пределу линейных размеров 10^{15} — 10^{16} см. Однако этот предел, видимо, обусловлен границей прозрачности всей плазмы, окружающей ядро галактики и вот почему.

При большой плотности энергии излучения и практически полной ионизации частиц в ядре галактики степень непрозрачности в нем определяется взаимодействием излучения со свободными электронами плазмы, окружающей ядро. Астрономы часто пользуются специальной безразмерной величиной — «оптической толщиной» τ , которая характеризует степень непрозрачности. В случае достаточно однородной среды $\tau = \sigma n_e R$, где n_e — концентрация свободных электронов (поглощающих излучение), R — геометрическая толщина слоя, а коэффициент σ определяется видом взаимодействия частиц (электронов) с излучением. При $\tau \gg 1$ среда является практически непрозрачной («оптически толстой»). В ядрах галактик поглощение излучения, идущего, как мы видели, из центральных районов ядра, обусловлено обычным рассеянием квантов электромагнитного излучения на свободных (нерелятивистских) электронах, называемым томсоновским рассеянием. Зная характерные значения плотности электронов в ядре ($n_e = 10^{10}$ см $^{-3}$) и коэффициент томсоновского рассеяния ($\sigma_T = 6 \cdot 10^{-25}$ см 2), легко вычислить, что τ становится равной единице как раз при значении $R = 10^{16}$ см.

Таким образом, с помощью исследования оптической переменности, вообще говоря, невозможно исследовать более глубокие слои ядра галактики — при расстояниях 10^{15} — 10^{16} см плазма становится непрозрачной, и выяснить, что она скрывает, мы не в состоянии. Но, исчерпав «оптические» методы, попробуем получить некоторое представление о внутреннем строении ядра с по-

мощью динамических методов — попытаемся выяснить, какова, хотя бы по порядку величины, такая важная характеристика ядра, как его масса.

Массы центральных тел

Массу галактики можно определить с помощью закона Кеплера, используя распределение скоростей движения газа внутри галактики. Этот метод особенно удобен, если галактика вращается и содержит много газа. Тогда по спектральным линиям активных ядер можно построить для внутренних частей галактики поле скоростей движения газа, и, поскольку его движение уравновешивается суммарным полем тяготения звезд, то, используя закон Кеплера, можно в этом случае вычислить как полную массу галактики, так и массу какой-либо ее области (например, центральной). Подобные определения масс галактик делались уже неоднократно. Так, английские астрофизики М. и Дж. Бербидж измерили массы целого ряда спиральных галактик, в том числе двух сейфертовских — NGC 1068 и NGC 7469. Были получены и массы центральных областей этих галактик (угловые размеры этих областей из-за влияния земной атмосферы на наблюдения ограничены величиной $\leq 1''$): для NGC 1068 масса центральной области (диаметром 200 пс) оценивается в $10^8 M_{\odot}$, для NGC 7469 масса центральной области (диаметром 400 пс) — $10^9 M_{\odot}$. Поскольку эти оценки представляют собой суммарную массу звезд и самого активного ядра, то для последнего, следовательно, получены лишь верхний предел массы — 10^8 — $10^9 M_{\odot}$.

Другим способом массу галактики можно определить с помощью критической (эддингтоновской) светимости. Напомним, что обычные звезды не могут иметь сколь угодно большую или сколь угодно малую массу. Наличие нижнего предела массы звезды легко понять — сила гравитации (определяемая массой) должна быть достаточно большой, чтобы разрушить оболочки атомов и заставить их вступить в ядерные реакции нуклеосинтеза — главный источник энергии излучения звезд. При массах порядка $0,01 M_{\odot}$ (точное значение пока известно плохо) в звезде могут начаться ядерные реакции, и она

начнет светиться, при меньших же массах она будет представлять собой несветящееся тело — планету¹⁰.

У звезды существует также верхний предел массы, определяемый из следующих соображений. Равновесие вещества звезды определяется балансом сил гравитационного давления, с одной стороны, и силами газового и светового давлений, с другой. Гравитация стремится сжать звезду, лучевое и газовое давление — расширить. По мере увеличения массы звезды световое давление (давление излучения) нарастает очень быстро, как четвертая степень температуры, и по достижении некоторого предела начинает превосходить гравитационное давление. Таким образом, звезд очень большой массы быть не может, поскольку их внешние слои будут все время истекать во внешнее пространство. Масса звезды, соответствующая балансу гравитационного и светового давлений, носит название эддингтоновской. С этой массой связан и соответствующий предел светимости, определяемый следующим выражением: $L = 4\pi G m_p c M / \sigma_T$, где M — масса звезды, m_p — масса протона, c — скорость света, σ_T — коэффициент томсоновского рассеяния, G — постоянная тяготения. Точное значение эддингтоновского предела зависит от предположений о внутренней структуре звезды и по порядку величины составляет 100—200 M_\odot ; наибольшая масса звезды, уверенно измеренная (в двойной системе), составляет 60 M_\odot . Таким образом, для любого равновесного астрофизического объекта существуют верхние пределы массы и светимости, связанные между собой. Разумеется, при неравновесных процессах (взрывы новых и сверхновых) светимость такого объекта может превосходить критическую.

Советские астрофизики Я. Б. Зельдович и И. Д. Новиков оценили массу квазаров и ядер активных галактик, исходя из предположения, что светимость квазаров и ядер галактик близка к эддингтоновскому пределу. Используя наблюдаемую величину болометрической светимости квазара 3C 273, они получили для него массу $10^9 M_\odot$. Следует отметить, что для широкого применения оценок такого рода необходимо, чтобы свети-

¹⁰ По этой же причине не является звездой планета Юпитер, имеющая массу 0,001 M_\odot , хотя в ней и имеются, как показали результаты исследований, внутренние источники энергии.

мость квазаров и ядер галактик была действительно близка к критической; в общем же случае это предположение, вообще говоря, может и не выполняться.

В научной литературе имеется много работ, посвященных попыткам определения масс квазаров (по принадлежностям их к скоплениям, по характеристикам их радиоизлучения). Встречаются и весьма экзотические методы оценок, например, с использованием эффекта так называемых гравитационных линз. Однако мы не будем здесь рассматривать все эти приближенные методы, а вернемся к более надежным и хорошо зарекомендовавшим себя динамическим методам.

При оценках масс можно использовать скорости движения газовых облаков вокруг ядра. Здесь уже можно ограничиться расстоянием не в сотни, а всего лишь в несколько парсек. Такая возможность была указана впервые голландским астрономом Л. Вольтером, а затем использовалась другими авторами для определения масс квазаров. Попробуем применить этот метод и для активных ядер галактик.

Однако для того, чтобы пользоваться этим методом оценки массы ядра, необходимо, чтобы движение газовых облаков в ядре галактики было действительно гравитационно связанным с ее самой центральной областью (представляющей собой некоторое единое тело). Казалось бы, что для такого допущения нет никаких оснований. В самом деле, ведь обычно предполагают существование в ядре галактики взрывных процессов, сопровождающихся выбросами материи, и делается это на основании наблюдения в ядрах движения газа с большими скоростями. Но, вообще говоря, зная величину скорости газа, ничего определенного нельзя сказать о направлении его движения, которое можно было бы определить из смещения его спектральных линий.

Однако если даже и определено, допустим, красное смещение газа (что указывало бы на его удаление), мы ничего не могли бы сказать об общем движении газа в ядре. Действительно, если этот элемент газа находится на дальней от наблюдателя стороне ядра, то это, действительно, соответствовало бы расширению газовой оболочки ядра, но если на ближней стороне, то это соответствовало бы сжатию. Правда, в некоторых случаях с помощью исследования профилей спектральных линий излучения ядер галактик можно сделать вполне опре-

деленные выводы и об общем движении газа. Если, например, в широких эмиссионных спектральных линиях удастся обнаружить абсорбционные компоненты (узкие линии поглощения). Тогда, наличие абсорбционных компонент, например, в коротковолновом («синем») «крыле» профиля эмиссионной линии вполне определенно должно соответствовать общему расширению газовой оболочки (так как в этом случае элементы газа, ответственные за абсорбционные компоненты, действительно находятся на ближайшей к наблюдателю стороне газовой оболочки). Такая ситуация наблюдается в некоторых оболочках новых. Было сообщение о наблюдении абсорбционных компонент в «синем крыле» профилей линий водорода в спектре ядра галактики NGC 4151, что бесспорно связано с расширением газовой оболочки ядра этой галактики.

Казалось, что доказательство именно расширения газа около ядра галактики было получено, по крайней мере для одной сейфертовской галактики. Однако, как уже отмечалось, профили спектральных линий активных галактик совершенно не похожи на наблюдаемые в спектрах «простых» разлетающихся оболочек сверхновых. К тому же абсорбционные компоненты в профилях спектральных линий водорода в галактике NGC 4151 наблюдались недолго и очень скоро (на следующий год) пропали вовсе из спектра излучения ядра этой галактики. Все это дает основание предполагать, что газ около ядер активных галактик как бы «дышит», меняя направление общего процесса (от расширения к сжатию и наоборот)¹¹. В связи с этим не лишено смысла и предположение о том, что движение газовых облаков в ядре галактик может определяться гравитационным потенциалом центрального тела. При этом следует понимать наше предположение как верное лишь в статистическом смысле: одни ядра галактики в данный момент времени могут находиться в состоянии взрыва, тогда как другие — в состоянии сжатия.

Используя хорошо известную формулу для тяготеющей массы $M = v^2 R / 2G$ (здесь v — скорость газа на

¹¹ Единственным бесспорным доказательством некоего процесса расширения в ядрах галактик является наличие разлетающихся радиокомпонент у ряда внегалактических радиисточников, а также оптически наблюдаемых выбросов вещества.

расстоянии R от центра, а G — постоянная тяготения), можно оценить массу ядра активной галактики. Отметим только, что в данную формулу входят полные скорости движения, тогда как мы наблюдаем у внегалактических объектов лишь лучевые компоненты скорости (т. е. по лучу зрения). Однако можно предположить, что в среднем лучевые скорости движения распределены в пространстве случайным образом (как и их полные компоненты), и тогда можно пользоваться и лучевыми компонентами скорости, так как полные скорости будут в этом случае от них отличаться на некоторый вполне определенный коэффициент (аналогичный метод используется при оценках масс галактик, входящих в двойные системы).

В табл. 2 (см. стр. 27) приведены оценки масс центральных тел ядер галактик, полученные с использованием именно этого метода. И хотя точность подобной оценки невелика (порядка самой величины), приведенные значения все же позволяют получить представление о возможных реальных массах центральных тел ядер галактик. Теперь, зная приблизительные оценки этих масс, а также располагая обширным наблюдательным материалом, можно сделать следующие выводы о возможной внутренней структуре ядра (рис. 8).

В самом центре ядра галактики, по-видимому, рас-

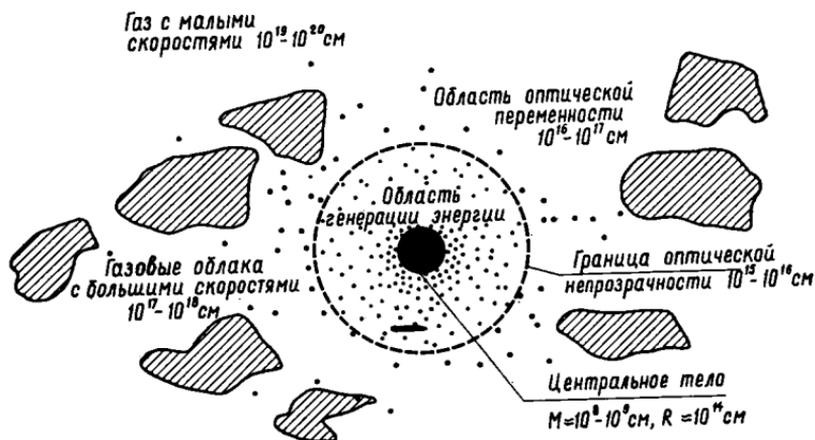


Рис. 8. Схематическое изображение активного ядра галактики

положено некое массивное (10^8 — $10^9 M_{\odot}$) тело, физические свойства которого нам пока неизвестны. Центральное тело окружено горячей плазмой (с увеличивающейся к центру плотностью), которая до расстояния порядка 10^{15} — 10^{16} см непрозрачна для оптического излучения. Дальше от центра находится область, ответственная за оптическую переменность (на расстоянии 10^{16} — 10^{17} см), еще дальше — быстро движущиеся облака газа и волокна (на расстоянии 10^{17} — 10^{18} см). И, наконец, во внешних частях ядра находятся облака газа, скорость движения которого невелика, а затем газ ядра переходит в обычный межзвездный газ галактики.

Рассмотрим теперь взаимодействие активного ядра с окружающей его частью галактики.

Взаимосвязь ядра и окружающей части галактики

После того как нестационарные внегалактические объекты стали изучать с помощью самых крупных телескопов, вокруг многих бывших «переменных звезд» были обнаружены слабые туманные оболочки. Оказалось, например, что объект BW Тельца (3C 120) имеет заметный ореол с угловым размером в несколько секунд дуги. А в 1975 г. группа французских исследователей с помощью метода электронной фотографии объекта 3C 120 обнаружила вокруг него целую галактику — со звездами и спиральными ветвями и по своим размерам превышающую нашу Галактику и туманность Андромеды.

Аналогичные результаты были получены в отношении нестационарного объекта (также бывшей «переменной звезды») VL Ящерицы — первого представителя загадочного семейства лацертид. С помощью 5-метрового рефлектора обсерватории Маунт-Паломар были получены спектры излучения слабой туманной оболочки, окружающей ядро этого объекта. В этом спектре были обнаружены линии поглощения ионизованного кальция, типичные для абсорбционных спектров галактик и имеющие красное смещение $z=0,07$, что соответствует расстоянию до объекта 300 Мпс. Этот результат был сначала подвергнут сомнению, но впоследствии был под-

твержден повторными измерениями. По-видимому, внегалактическую природу ВЛ Ящерицы можно считать вполне доказанной, как и то, что этот объект представляет собой ядро далекой галактики¹².

У более близких сейфертовских галактик «родительская» галактика видна достаточно отчетливо, и можно легко получить ее характеристики и сравнить с соответствующими характеристиками активных ядер. Проблема связи характеристик активных ядер с характеристиками галактик была поставлена известным советским астрофизиком В. А. Амбарцумяном еще в 1954 г. В настоящее время эта связь, по-видимому, достаточно надежно установлена. Например, имеются корреляция оптических светимостей ядер с интегральными светимостями галактик, а также инфракрасных светимостей ядер с интегральными светимостями. Каков смысл этих зависимостей?

Светимость всей галактики определяется суммой светимостей составляющих галактику звезд. Поскольку эти звезды между собой не взаимодействуют, то обнаруженные корреляции должны отражать связь с какой-то другой интегральной характеристикой галактики. Можно предположить, что такой характеристикой является масса галактики. Действительно, после того как для примерно дюжины сейфертовских галактик удалось определить массу, оказалось, что последняя хорошо коррелирует со светимостями активных ядер.

Рассмотрим теперь особенности галактик с активными ядрами по сравнению с обычными спиральными галактиками.

Когда ряд сейфертовских галактик был изучен радиоастрономическими методами на длине волны 21 см, оказалось, что в сейфертовских галактиках наблюдается определенный дефицит нейтрального водорода, дающего излучение на этой длине волны, по сравнению с

¹² Американские астрономы А. Сэндидж и Дж. Кристиан предположили, что квазары также являются ядрами очень удаленных гигантских галактик. Они построили для звезд и галактик соответствующие зависимости яркости и угловых размеров и нашли предельные расстояния, на которых еще возможно было выявить следы возможной галактики около квазара. Как оказалось, вокруг некоторых квазаров действительно были обнаружены туманные оболочки, которые, вообще говоря, могут быть окружающей их частью эллиптической галактики.

обычными спиральными галактиками. В 1964—1968 гг. на Крымской станции ГАИШ с помощью 125-сантиметрового рефлектора были проведены обширные фотоэлектрические наблюдения сейфертовских галактик в трех цветовых диапазонах спектра (U , B , V), что позволило получить распределение яркости по диску галактик. Сравнивая полученные результаты с соответствующими данными об «обычных» галактиках, А. В. Засов и В. М. Лютый обнаружили, что сейфертовские галактики отличаются от последних большей концентрацией яркости к центру. Аналогичная особенность, хотя и с меньшей определенностью, по-видимому, существует у нестационарных объектов по сравнению их с другими среди галактик Маркаряна.

Концентрация светимости, вообще говоря, означает концентрацию плотности вещества. Таким образом, сейфертовские галактики, по-видимому, обладают большей концентрацией вещества к центру, чем обычные галактики. Тогда становится понятным и относительный дефицит нейтрального водорода в ядрах сейфертовских галактик. При большей средней плотности процессы звездообразования идут интенсивнее, и быстрее исчерпывается материал, из которого формируются звезды,—нейтральный водород.

Если для всей совокупности объектов с нестационарными ядрами ввести безразмерный параметр отношения светимости ядра к интегральной светимости всей галактики L_*/L , то окажется, что у классических сейфертовских галактик $L_*/L = 10—30\%$, а у эллиптических галактик (радиогалактик) это отношение выше (у квазизвездных объектов, если те действительно являются ядрами галактик, это отношение близко к единице).

Подобная последовательность нестационарных внегалактических объектов определялась и ранее (по другим параметрам). Например, в самом начале эпохи внегалактической радиоастрономии У Морган, М. Шмидт и В. Мэтьюс заметили, что все известные тогда внегалактические радиисточники обнаруживают ту же последовательность — спиральные (сейфертовские) галактики, радиогалактики, квазары, определяемую ростом абсолютной мощности радиоизлучения. Хотя в настоящее время пока еще не вполне ясна взаимосвязь между оптическими и радиопотоками активных внегалактических объектов, можно все же допустить, что в сред-

нем оптические потоки, за редким исключением, соответствуют радиопотокам. Другими словами, указанная последовательность внегалактических объектов, по-видимому, соответствует возрастанию и болометрических (полных) светимостей (рис. 9). Очевидно, что и в этом случае увеличение полной светимости (а также отношения L_{ν}/L) можно связать с концентрацией вещества к центру объекта.

Рассмотрим теперь, как этот вывод соотносится с общей морфологической схемой классификации галактик. Хронологически первой была классификация Хаббла, который все галактики разделил на три основных класса: спиральные, неправильные и эллиптические. В следующей, более сложной схеме — классификации Моргана, сопоставлены интегральный спектр галактики

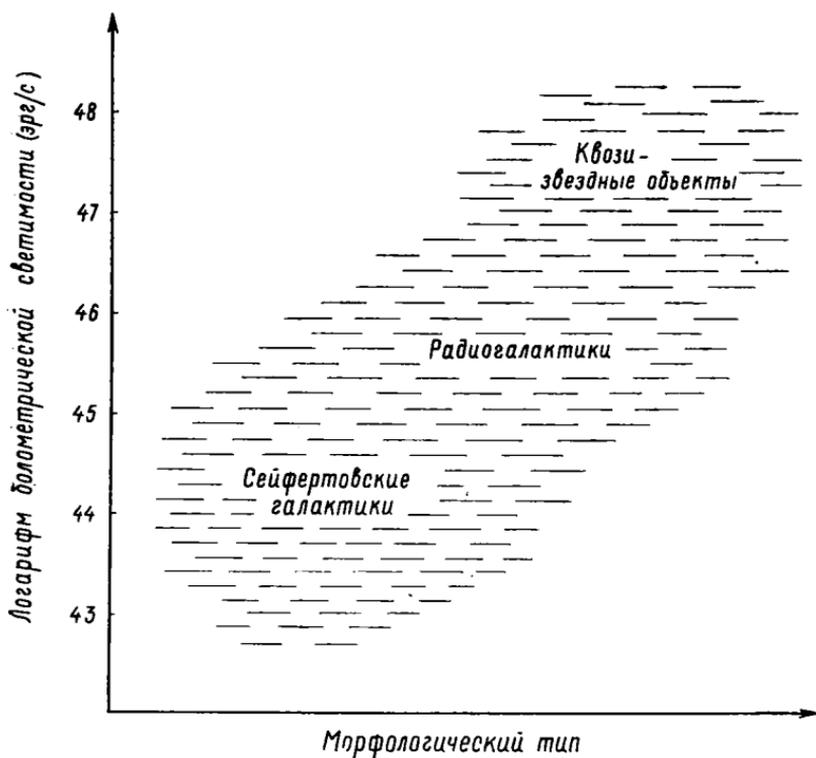


Рис. 9. Зависимость светимости нестационарных внегалактических объектов от морфологического типа

и степень концентрации светимости к центру. Спиральные галактики, имеющие в своем составе бело-голубые звезды, обладают относительно малой концентрацией вещества, тогда как галактики с желто-красными звездами показывают значительную концентрацию. Смысл классификации Моргана сводится к различию темпов звездообразования в зависимости от средней плотности системы. В эллиптических галактиках, обладающих достаточно большой концентрацией вещества, звезды быстро образуются и быстро эволюционируют — эллиптические галактики состоят в основном из старых звезд. В спиральных (а тем более в неправильных) галактиках звездообразование идет медленно, и в дисках спиральных галактик наблюдаются много молодых звезд.

Галактики с нестационарными ядрами, по-видимому, можно считать удовлетворяющими основным закономерностям, свойственным и обычным галактикам. Активные ядра наблюдаются в галактиках с большей концентрацией вещества к центру, чем в среднем для данного типа галактики. Другими словами, можно предположить, что отношение светимостей ядра и галактики определяется степенью концентрации плотности $L_*/L = f(\rho_0/\rho)$ или $L_* = f(\rho_0/\rho)L$. Эта формула, в общем, соответствует наблюдаемой зависимости светимостей ядер от светимостей галактик и также зависимости светимости ядра от среднего роста плотности к центру галактики. В то же время она носит общий характер, и необходимы дальнейшие наблюдения, чтобы провести детальное уточнение этой зависимости.

Таким образом, характеристики активных ядер оказываются тесно связанными с характеристиками галактик. Активные ядра возникают в галактиках, по-видимому, отличающихся по своей структуре (большая центральная плотность) от обычных галактик.

Характерные времена «жизни» активных ядер

Как мы установили в предыдущих параграфах, активное ядро представляет собой сложный конгломерат различных элементов, окружающих центральный массивный объект. Вся система является крайне нестациона-

нарной, причем характерные времена нестационарности наблюдаются в весьма широком интервале в зависимости от геометрической структуры и конкретных физических условий происходящих в ядре процессов.

Рассмотрим теперь минимальные времена переменности ядер, которые регистрируются при патрульных наблюдениях нестационарных галактик. В настоящее время эти наблюдения дают для квазаров минимальные времена порядка нескольких суток, для более слабых сейфертовских галактик — дни, в отдельных случаях — доли дня. Попытки найти более короткие флуктуации пока не дали положительного результата, хотя соответствующие программы планируются и ведутся на ряде обсерваторий.

Типичные (средние) времена переменности в оптическом диапазоне составляют десятки дней и месяцы. Эта переменность, по-видимому, соответствует локальным процессам неустойчивости в газовой оболочке (или, скажем, диске, если есть вращение) вокруг центрального тела. Сущность этих процессов не вполне понятна: не исключено, что получаемое из наблюдений ограничение на характерные времена оптической переменности вызвано непрозрачностью плазмы.

На кривых блеска ядер галактик наблюдаются и более длинные циклы переменности с характерными временами несколько лет (в отдельных случаях десятков лет). Относительная «плавность» длинных циклов наводит на мысль о своего рода упорядоченных движениях плазмы. В качестве одного из возможных типов такого движения могут быть вращательные движения внешних частей оболочки ядра. Из-за возможного «истекания» плазмы (вследствие различного вида неустойчивостей) характерные размеры могут меняться, что будет приводить к изменению соответствующих характерных времен.

На больших расстояниях от центрального тела расположены газовые облака (или волокна), движущиеся со скоростями несколько тысяч километров в секунду (их характерные времена приведены в табл. 1). Если эти облака существовали бы «сами по себе», то изменение некоторых параметров газа (например, плотности) привело бы к заметному изменению интенсивностей спектральных линий. Характерные кинематические

времена для типичных сейфертовских галактик составляют несколько сотен лет, для квазаров — тысяч лет.

Можно упомянуть также о характерных временах процессов в радиоизлучающей плазме. При наблюдениях с помощью радиоинтерферометров с сверхдлинной базой были зарегистрированы в самом центре ядра сверхкомпактные компоненты, которые меняют свои размеры и взаимные расстояния за характерные времена порядка нескольких месяцев. В дальнейшем эти компоненты удаляются на большие расстояния от «родительской» галактики и пополняют собой обширные области радиоизлучающей плазмы.

Рассмотрев поведение отдельных элементов активного ядра, перейдем к вопросу о времени «жизни» ядра в целом. Очевидно, непосредственные измерения времен даже в тысячи лет невозможны. Некоторые суждения о времени «жизни» активных ядер можно получить из статистических соображений (при изучении всей совокупности галактик с активными ядрами).

Количество сейфертовских объектов среди галактик Маркаряна составляет около 10%, для галактик повышенной яркости — 3%. Каков процент активных галактик среди обычных галактик, ответ дать довольно затруднительно, поскольку слабые галактики изучены крайне плохо. По-видимому, эта величина близка к 0,5%. Таким образом, можно предположить, что галактики с активными ядрами (при светимостях выше 10^{44} эрг/с) составляют примерно 1% обычных галактик. Эту цифру можно объяснить следующими двумя возможностями. Первая — ядра встречаются во всех галактиках; при этом ядра «мигают», проводя в активном состоянии 1% общего времени «жизни» галактики. Вторая возможность — ядра встречаются только в определенном классе галактик, тогда, очевидно, их общее время «жизни» должно по порядку величины соответствовать общему времени «жизни» галактики. Для выбора между этими двумя возможностями необходимо изучить макроскопические характеристики активных галактик. Если они вне ядра подобны обычным галактикам, то более вероятна короткая шкала, если же по своим свойствам активные галактики отличаются от обычных, более вероятна длинная шкала «жизни» активных ядер. Из вышеизложенного материала о ядрах галактик становится ясно, что нестационарные галак-

тики, скорее всего, отличаются по своей структуре от обычных. Это приводит к мысли о большей вероятности существования длинной шкалы их «жизни». Еще один аргумент связан с уже упоминавшейся корреляцией светимостей ядер (в широком диапазоне для волн) с интегральной светимостью галактики. Поскольку свойства галактики, в том числе ее светимость, не меняются на протяжении длительного времени, эта закономерность также приводит к выводу большой длительности жизни ядра.

Итак, мы получаем широкий спектр возможных характерных времен в активном ядре. Наблюдаемые процессы переменности характеризуются временами порядка дней, месяцев, лет и десятков лет. Не наблюдаемые непосредственно, но определяемые путем экстраполяции, времена изменения физических параметров составляют сотни и тысячи лет. Наконец, ядро в целом, по-видимому, продолжает свою деятельность в течение чрезвычайно длительных периодов порядка сотен миллионов и даже миллиардов лет.

Модели активных ядер галактик

Прежде чем переходить к теоретическим моделям активных ядер галактик, перечислим в общих чертах наблюдаемые характеристики. Спектроскопические данные говорят о наличии газовых облаков, движущихся с большими скоростями, порядка нескольких тысяч километров в секунду; фотометрические наблюдения свидетельствуют о процессах переменности потока излучения, который меняется в несколько раз за короткие промежутки времени (порядка месяцев или недель); радиоастрономические наблюдения говорят о выбросе или разлете облаков плазмы со скоростями, близкими к скорости света; активное ядро демонстрирует сложный набор свойств, проявляющих себя различным образом; по-видимому, главным свойством активных ядер является большая концентрация энергии в сравнительно небольшом объеме — остальные свойства в значительной степени являются «вторичными».

Активные ядра встречаются практически во всех типах галактик, хотя, возможно, и отсутствуют в непра-

вильных галактиках — с «рыхлой» структурой. Имеется некоторая дисперсия свойств активных ядер. Если, например, взять такой параметр, как болометрическая светимость, то он меняется в довольно широких пределах в зависимости от типа нестационарного объекта. Так, для оптических сейфертовских галактик болометрическая светимость заключена в пределах 10^{43} — 10^{45} эрг/с, для радиогалактик — 10^{45} — 10^{46} эрг/с, для квазаров — 10^{46} — 10^{47} эрг/с. Конечно, имеется заметная дисперсия характеристик и внутри каждого типа. Отметим также, что не исключено существование относительно слабых активных ядер типа ядра нашей Галактики, со светимостью около 10^{41} эрг/с. Однако такие ядра, хотя они в принципе могли бы быть довольно многочисленными, по-видимому, не могут наблюдаться во внешних галактиках ввиду их слабости.

Для изучения количественных характеристик активных ядер обратимся к табл. 2, содержащей значения болометрической светимости ядер, массы центрального тела и характерного времени переменности (оптические вспышки). Отметим, что такие данные не могут быть особенно многочисленными — то неизвестны расстояния и, следовательно, нельзя вычислить массу ядер (у лацертид), то не измерено инфракрасное излучение и невозможно в связи с этим определить полную светимость объекта, то нет достаточного количества наблюдательных данных для определения характера переменности. Какие выводы можно получить из приведенных в табл. 2 чисел?

При рассмотрении процессов в активных ядрах необходимо учитывать эффекты как специальной (частной), так и общей теории относительности. Это следует из целого ряда наблюдаемых особенностей ядер (разлет радиоисточников со световыми скоростями, большая плотность энергии и т. д.). Для объектов, описываемых теорией относительности, существует фундаментальное понятие гравитационного радиуса: объект, у которого радиус равен или меньше гравитационного, не может из-за бесконечно огромной силы гравитации излучать в пространство электромагнитное излучение. Он определяется соотношением $R_g = 2GM/c^2$, где M — масса тела, c — скорость света, G — постоянная тяготения. Коль скоро существует понятие критической длины, должно существовать и понятие критического времени переменности

сти $t > t_{\min} = R_g / c = 2GM/c^3$ (наблюдаемые времена переменности должны быть больше этой величины). Кроме того, у нас встречалось уже понятие критической (эддингтоновской) светимости — верхнего предела светимости любого равновесного астрофизического объекта $L = 4\pi Gm_p cM/\sigma_T$.

Если комбинировать приведенные соотношения, можно получить и соотношение между наблюдаемыми величинами Δt и L : $\Delta t = (1/2\pi) (\sigma_T/m_p c^4) \approx 7,8 \cdot 10^{-44} L$ (эрг/с). Результат сопоставления наблюдаемых величин Δt и L показан на рис. 10, а сравнение светимостей и масс — на рис. 11. Как можно видеть, наблюдаемые времена переменности больше критических.

Как уже отмечалось, скорее всего, полученное из наблюдений ограничение на времена переменности вызва-

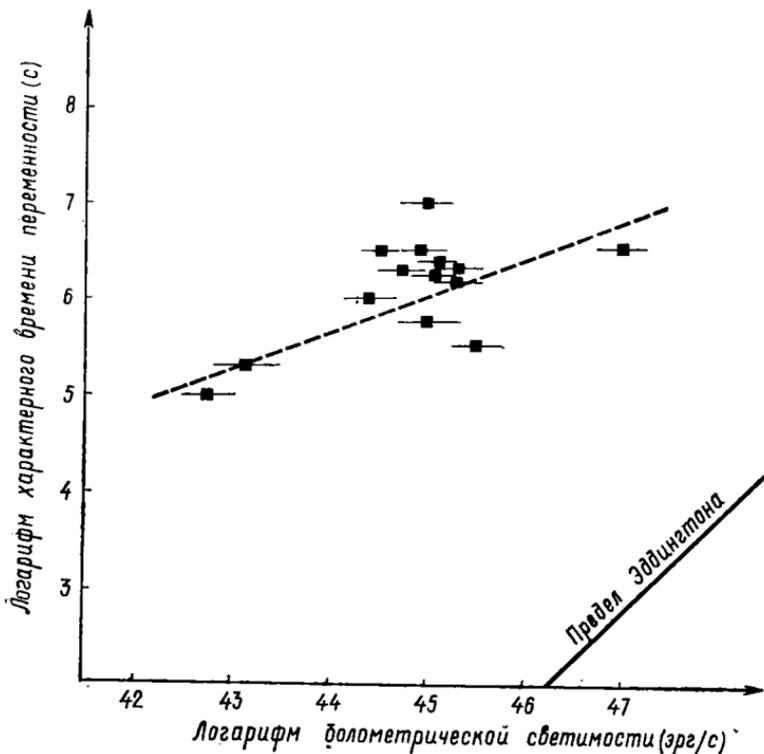


Рис. 10. Зависимость времени переменности от светимости активных ядер галактик

но непрозрачностью плазмы, наступающей из-за увеличения плотности по мере приближения к ядру. Этот предел — оптический; можно надеяться, что по мере развития техники рентгеновских наблюдений (для рентгена плазма более прозрачна) удастся проникнуть в более глубокие слои оболочки ядра¹³. Если бы удалось дока-

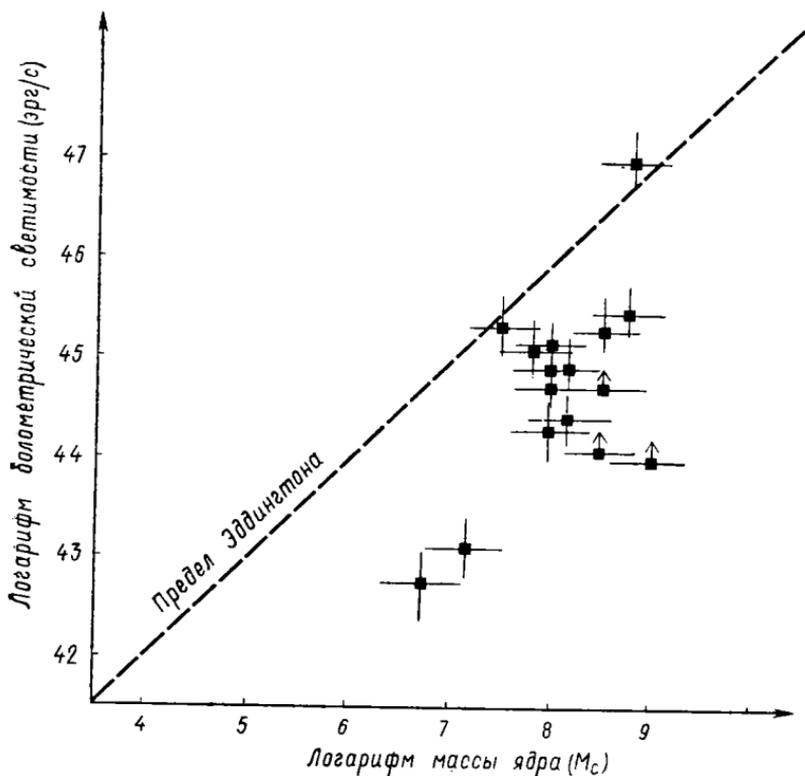


Рис. 11. Соотношение масса — светимость для активных ядер галактик

¹³ С помощью английского искусственного спутника Земли «Ариэль-5» недавно была обнаружена переменность излучения ядра сейфертовской галактики NGC 4151 в рентгеновском диапазоне (2—10 кэВ). Эта переменность коррелирует с оптической, однако характерное время рентгеновских всплесков меньше (~ 3 дня), чем характерное время оптической переменности (~ 10 дней). По-видимому, рентгеновское излучение возникает в более глубоких слоях газа в активном ядре.

зять, что нижняя граница времени переменности вызвана приближением к гравитационному радиусу, это дало бы исключительно важные сведения о физике центрального тела.

Далее, на рис. 10 и 11 видно, что наблюдаемые светимости ядер не превосходят критической (эддингтоновской) светимости. Этот результат следует рассматривать совместно с определением характерного времени «жизни» ядер («длинная шкала»). Активные ядра представляют собой образования, находящиеся в квазистационарном состоянии в течение длительного времени, при этом светимость близка к критической. Ясно, что это утверждение верно в статистическом смысле; отдельные объекты могут испытывать взрывы, вспышки и т. д., но вся совокупность активных ядер в среднем квазистационарна.

Существенной является связь активного ядра с окружающей частью галактики. По-видимому, активные ядра свойственны галактикам с определенной структурой, а именно, с повышенной концентрацией вещества к центру. Хотя детали этой взаимосвязи неясны, общая закономерность проявляется достаточно отчетливо.

Рассмотрение физики активных ядер требует предварительного разрешения ряда проблем. Главная проблема — где именно в ядре и каков источник энергии такой мощности и таких масштабов. Хронологически первой была выдвинута гипотеза столкновения двух галактик. Кинетическая энергия этого столкновения вполне достаточна для наблюдаемого радиоизлучения. Однако после того как было выяснено, что излучение активных ядер сосредоточено в малых объемах, идея столкновений (которые происходят на значительной площади) была оставлена. Отметим, что гипотеза столкновений галактик сразу после ее «рождения» (1954 г.) была подвергнута резкой критике советских ученых. В частности, В. А. Амбарцумян настойчиво подчеркивал идею о важной и закономерной роли ядер в общей проблеме эволюции галактик.

Следующей гипотезой, предложенной для объяснения светимости активных ядер, была гипотеза вспышек сверхновых звезд. Казалось бы, эта гипотеза не лишена привлекательности. В самом деле, при взрыве сверхновой ее светимость сравнивается со светимостью целой галактики. Однако обычно сверхновые наблюдаются на

периферии галактик; пришлось постулировать наличие в ядрах галактик некоторых специфических условий, благоприятных для вспышек сверхновых. В частности, предлагалась модель, при которой сверхновые возбуждают друг друга: одна вспышка вызывает следующую. Механизм подобной «цепной реакции» неясен. Отметим, что идеи вспышек сверхновых в той или иной форме до сих пор обсуждаются в литературе. Мы не будем рассматривать других, порой весьма экзотических гипотез (аннигиляция вещества и антивещества, радиоактивность и т. д.).

В 1964 г., сразу после открытия квазаров, английские астрофизики П. Фаулер и Ф. Хойл выдвинули для объяснения квазаров идею гравитационного коллапса (сжатия) некоторой большой массы, что могло бы обеспечить наблюдаемую энергетику квазаров. Такое большое тело получило название «сверхзвезды». Необычность этой идеи станет ясной, если мы вспомним, что астрономы пока еще не знают звезд с массой больше $60 M_{\odot}$. Некоторые предполагали, что «сверхзвезды» просто невозможны. Однако оказалось, что такая конфигурация может существовать, хотя будет весьма неустойчивой. При большой массе объекта гравитация будет столь сильна, что его вещество будет стремиться сжаться (состояние коллапса) с выделением гравитационной энергии. Отметим, что в физике вообще известно четыре вида физических взаимодействий: сильное, слабое, электромагнитное и гравитационное. Из них гравитационное является самым «слабым»; вместе с тем из гравитационного поля можно извлечь довольно много энергии. Другими словами, если бы удалось построить «гравитационную машину», ее КПД был бы довольно высок. Идея Фаулера и Хойла как раз и заключалась в том, что в квазарах действуют такие «гравитационные машины».

Своеобразным гибридом идей коллапса и идеи сверхновых является интересная гипотеза американского физика Ф. Дайсона. Ф. Дайсон предполагает, что процессы коллапса происходят локально в том или ином месте ядра квазара. В каждом эпизоде коллапсирует масса, соответствующая нескольким массам Солнца (больше предела Чандрасекара), и выделяется энергия mc^2 . Между коллапсом и выделением энергии в виде света существует некоторый временной интервал, который с

точки зрения наблюдений соответствует минимальному времени вспышек. Светимость квазара определяется энергией, выделяемой при коллапсе и равной Mc^2 , которая излучается за это минимальное время. В модели Дайсона можно определить светимость, температуру и плотность газа и т. д. с помощью простых оценок; при этом теоретические величины оказываются довольно близкими к определенным из наблюдений.

Модель, предложенная Дайсоном, примыкает к группе моделей, в которых ядро квазара представляется скоплением звезд—обычных, или нейтронных, или взрывающихся одна за другой в виде сверхновых. Общей чертой всех этих идей является представление активности ядра галактики как последовательности случайных событий. Действительно, как мы уже отмечали, такой феномен, как оптическая переменность блеска активных ядер (вспышки), по-видимому, является случайным. Однако ядро галактики в целом должно быть единым телом с некоторой макроскопической структурой. Об этом говорят результаты наблюдений, например, радиогалактик.

Вообще радиосвойства активных ядер чрезвычайно загадочны. Наблюдения, особенно радиоинтерферометрические, указывают на процессы последовательных выбросов облаков электронов со скоростями, близкими к скорости света. Выбросы происходят по некоторой оси разлета, в двух противоположных направлениях. В дальнейшем облака разлетаются в окружающее пространство и, взаимодействуя с межгалактической средой, постепенно тормозятся и погасают. Активные ядра галактик работают как циклические ускорители, причем наличие оси разлета говорит о некотором макроскопическом магнитном поле. Ясно, что в ядрах должно находиться некоторое единое тело, природа которого продолжает оставаться неясной (например, неизвестна причина выброса облаков плазмы). Имеется модель «пращи», при которой выбросы происходят в экваториальной плоскости некоторого вращающегося тела. Другая модель связывает выбросы облаков с процессами электромагнитного ускорения. На обложке этой брошюры изображена известная радиогалактика Центавр А (NGC 5128). Можно видеть, что направление выброса перпендикулярно экваториальной плоскости галактики, очерченной эффектной полосой газа и пыли. В этом случае,

по-видимому, выбросы происходят вдоль оси вращения.

Успехи физики пульсаров побудили некоторых теоретиков высказать идею о том, что в ядрах галактик могут находиться своего рода гигантские пульсары — вращающиеся магнитные тела большой массы. Вращение должно удерживать такое тело от коллапса, а излучение происходит, как и у пульсаров, вдоль магнитных полюсов. Если эта модель справедлива, естественно было бы ожидать периодических кривых блеска (как у пульсаров), чего не наблюдается. Возможно, что периодические изменения яркости не видны, так как квазипульсар окутан непрозрачной «шубой» из газа. В настоящее время вопрос о справедливости такой модели остается открытым.

Вернемся к идее гравитационного коллапса. Если вещество сжимается, то оно уходит под гравитационный радиус; возникает состояние, образно названное «черной дырой». При уходе вещества под гравитационный радиус «отключается» электромагнитное взаимодействие с окружающей средой (гравитационное остается). Идею о том, что в ядрах галактик могут находиться такие «черные дыры», высказал английский астроном Д. Линден-Белл. Е. Салпитер и Я. Б. Зельдович показали, что если на «черную дыру» падает вещество, то, ускоряясь, оно будет нагреваться и светиться. Светимость зависит от степени притока массы следующим образом: $L = \beta c^2 \Delta M / \Delta t$, где β — некоторый коэффициент, зависящий от геометрии системы и показывающий, какая часть энергии падающего газа превращается в излучение. Для наших порядковых оценок достаточно считать β равной $\sim 0,1$. Посмотрим, какую массу надо «скармливать» «черной дыре» для обеспечения светимости сейфертовской галактики. При $L \approx 10^{46}$ эрг/с и $c = 3 \cdot 10^{10}$ см/с имеем 10^{26} г/с ≈ 1 Мс/год. Для квазаров, светимость которых в несколько раз выше, эта величина также без труда реализуется. Таким образом, при наличии в ядре галактики «черной дыры» гравитационное взаимодействие галактики с ядром способно обеспечить светимость ядра в течение длительного времени. Также привлекательной чертой этой модели (с теоретической точки зрения) является отсутствие трудности с проблемой стабилизации тела в условиях сильного гравитационного поля.

Итак, возможно, что центральное тело является

«черной дырой» массой (согласно оценкам) порядка 10^8 — 10^9 M_{\odot} . Гравитационный радиус такого тела порядка 10^{14} см, и процессы энерговыделения происходят вблизи гравитационного радиуса. «Черная дыра» окутана плотным непрозрачным газом, который становится прозрачным для оптического излучения на расстояниях $\sim 10^{16}$ см. В газовой оболочке «черной дыры» должны происходить различные процессы неустойчивости, приводящие, в частности, к процессам оптической переменности. Одним из возможных процессов является так называемая неустойчивость Релея—Тейлора, при которой отдельные облака или элементы газа, поддерживаемые против сил тяжести лучистым давлением, время от времени падают на ядро. Их гравитационная энергия высвечивается в виде излучения. Другой возможностью являются процессы тепловой неустойчивости. Поведение плазмы в таком объекте в целом чрезвычайно сложно, и сейчас изучение соответствующих физических процессов только начинается. Мощным толчком для развития плазменной астрофизики явились астрономические наблюдения квазаров и ядер галактик.

«Черная дыра» с массой порядка 10^8 — 10^9 M_{\odot} обычно называется «сверхмассивной», так как в звездной физике обычно оперируют с массами возможных «черных дыр» не более 10—30 M_{\odot} . Однако ядро находится в галактике, имеющей полную массу 10^{11} — 10^{12} M_{\odot} . Ясно, что такое ядро составляет ничтожно малую долю общей массы галактики. Рассмотрение взаимодействия ядра со звездами галактики привело Г. Хиллса к весьма интересной гипотезе об эволюции ядра. Он предположил, что в галактике в результате случайных причин имеется небольшая «черная дыра» с массой порядка 100 M_{\odot} . В дальнейшем она растет, увеличивая свою массу за счет близко проходящих звезд. Если звезда приближается к центру на расстояние меньше некоторого критического, то она разрывается под действием приливных сил со стороны «черной дыры». Часть вещества уходит под гравитационный радиус, увеличивая тем самым массу «черной дыры», и часть вещества звезды выбрасывается наружу. Этот газ наблюдается в виде быстродвижущихся облаков, дающих широкие эмиссионные линии в спектре. При увеличении массы «черной дыры» увеличивается и радиус захвата и т. д. Процесс развивается в течение некоторого времени. Г. Хиллс по-

лучил важную формулу для времени эволюции активного ядра галактики, светимость которой в результате падения газа близка к критической $t = c\sigma_T \cdot (4\pi G m_p)^{-1}$ (примечательно, что в формулу входят только фундаментальные константы). Это время составляет $5 \cdot 10^8$ лет.

Более сложные рассуждения приводят к оценке массы «черной дыры», которую она приобретает за время t . Это значение массы составляет $3 \cdot 10^8 M_\odot$. По достижении указанной величины «черная дыра» уже не разрушает звезду. Это обстоятельство можно пояснить следующими простыми соображениями. Оценим среднюю плотность «черной дыры», точнее говоря, области пространства внутри гравитационного радиуса: $\rho = 3M/4\pi R_g^3 = = 3c^6/8\pi G^3 M^2$. При $M = 3 \cdot 10^8 M_\odot$ эта плотность составляет несколько граммов на кубический сантиметр. (Отметим, что средняя плотность «черной дыры» с массой $1 M_\odot$ составляла бы 10^{15} г/см³.) Такова же (порядка 1 г/см³) средняя плотность звезды типа нашего Солнца. После того как «черная дыра» приобрела массу $3 \cdot 10^8 M_\odot$ и ее плотность сравнялась с плотностью вещества звезд, в силу критерия приливной устойчивости она уже не разрушает звезды галактики.

Можно оценить также температуру излучения вещества, падающего на «черную дыру». В астрофизике известна формула светимости космических тел в зависимости от их радиуса и температуры $L = 4\pi R^2 \sigma T^4$, где $\sigma = 5,6 \cdot 10^{-5}$ г/с³К⁴ — постоянная Стефана—Больцмана. Подставляя в эту формулу выражение критической светимости L_* вместо L и выражение гравитационного радиуса R_g вместо R , получим

$$T = \left[\frac{1}{4} \frac{m_p c^5}{\sigma_T G \sigma M} \right]^{1/4} \approx 10^{7,5} (M_\odot/M)^{1/4} \text{ К},$$

что при $10^8 - 10^9 M_\odot$ дает $T \sim 10^5$ К в хорошем согласии с наблюдениями.

Эволюция центрального ядра после «приобретения» массы $5 \cdot 10^8 M_\odot$ пока нам неизвестна. Необходимы дальнейшие исследования. В частности, по мнению советского астрофизика В. Ю. Теребижа, таким образом можно объяснить объекты типа VL Ящерицы (лацертиды). В самом деле, отличительным свойством лацертид является отсутствие эмиссионных линий газовой оболочки (яркие линии типичны для сейфертовских галактик

и квазаров). Возможно, что лацертиды соответствуют поздним стадиям эволюции центрального тела в центре галактики, когда оно уже лишилось газовой оболочки.

Таким образом, наблюдения ядер галактик заставляют взглянуть по-новому на, казалось бы, хорошо знакомые системы — галактики. Существовавшее еще несколько лет назад представление, согласно которому галактики — просто механически связанные системы из отдельных не взаимодействующих между собой точек звезд, постепенно сменяется представлениями о сложных процессах в ядрах галактик. По-видимому, ядрам активных галактик присуща определенного типа структура (с большой концентрацией вещества к центру). Взаимодействие вещества (звезд или газа) галактики с ее ядром дает весь тот богатый спектр проявлений явлений нестационарности, который мы и наблюдаем в виде активности ядер галактик.

Квазары

Следует отметить, что мы до сих пор не говорили подробно о квазарах, однако следует хотя бы кратко упомянуть об их основных особенностях.

Во-первых, квазары и радиогалактики, как правило, отличаются по своим радиоспектрам. Если радиогалактики имеют радиоспектры, хорошо объясняемые механизмом синхротронного излучения, то спектры квазаров часто бывают более сложными, что затрудняет их теоретическую интерпретацию. Малые компактные компоненты радиоизлучения (компактные источники) в самых внутренних частях квазаров, как правило, демонстрируют свойства, не укладывающиеся в теорию синхротронного излучения.

Квазары — самые мощные источники во Вселенной. При их светимостях 10^{47} — 10^{48} эрг/с они являются «маяками», обнаруживаемыми на огромных расстояниях. В настоящее время именно квазары определяют видимые границы Вселенной. Достаточно сказать, что самый удаленный квазар OQ 172 имеет красное смещение $z = 3,5$. При таких красных смещениях (близких к единице и превышающих единицу) уже становится неприемлимой простая формула нерелятивистского эффекта

Доплера. На таких больших расстояниях становится неоднозначным и само понятие расстояния.

Говорить о расстоянии можно только в рамках какой-либо конкретной космологической модели. С изучением удаленных квазаров связаны надежды астрономов определить тип реальной космологической модели, т. е. ответить на вопрос, какова геометрическая структура окружающего нас мира. В частности, одним из фундаментальных вопросов в этой проблеме является следующий: кончаются ли квазары на каком-то расстоянии или они находятся еще дальше. Ясно, что только наблюдения могут дать ответ на этот вопрос. На ряде обсерваторий, в том числе в СССР, планируются соответствующие эксперименты. Можно подозревать, что слабые радионисточники соответствуют объектам (радиогалактикам и квазарам), видимым на еще больших расстояниях; однако пока не проведено оптическое отождествление и не получен оптический спектр объекта, говорить о расстоянии нельзя.

Следующая проблема, специфическая для квазаров, это линии поглощения в их спектрах. В спектрах некоторых хорошо изученных квазаров наблюдается множество (свыше 200) линий поглощения, причем эти линии в отличие от широких эмиссионных линий, возникающих в газовой оболочке вокруг ядра, являются узкими. Проблема отождествления этих линий сама по себе достаточно сложна; оказалось, что линии можно сгруппировать в серии, каждая из которых имеет свое собственное красное смещение (и тем самым свое расстояние). Не имея возможности входить в детали, отметим, что линии, как сейчас принято считать, возникают в холодных облаках газа, просвечиваемых излучением квазара. Эти облака находятся на некотором расстоянии между квазаром и наблюдателем; расстояния можно оценить по красному смещению всей серии линии поглощения. Если разница красных смещений эмиссионных и абсорбционных линий невелика, естественно думать, что поглощающие облака принадлежат галактике, ядром которой является квазар. Скорость движения облаков наружу от ядра принято объяснять наличием лучевого давления от мощного ядра.

Имеются дополнительные важные аргументы в пользу такого предположения, а именно, химический состав таких облаков. Как выяснилось, содержание химических

элементов в облаках вокруг квазара соответствует таковому в облаках нашего Млечного Пути, определенному по недавним ракетным спутниковым наблюдениям (наблюдались ультрафиолетовые участки спектра, недоступные на земной поверхности из-за поглощения света земной атмосферой). Как отмечает И. С. Шкловский, нормальное (близкое к солнечному) содержание химических элементов в спектрах квазаров является весьма важным фактором. В модели, в которой квазары считаются ядрами гигантских галактик, этот факт получает естественное объяснение. Правда, отметим, что линии поглощения часто имеют красное смещение, сильно отличающееся от красного смещения квазара. В таких случаях нужно предполагать прохождение света через газовые облака, возможно, принадлежащие галактикам, а возможно, и межгалактической среде, и находящиеся на некотором расстоянии между квазаром и Солнцем. Проблема линий поглощения в квазарах требует еще своего объяснения.

В целом, хотя было бы естественно считать квазары ядрами далеких галактик, излучение которых непосредственно не регистрируется ввиду очень яркого ядра (квазара), но обнаруживается косвенными методами, проблему нельзя считать решенной окончательно. В некоторых случаях туманные оболочки вокруг ядер показывают не линии поглощения, вызванные звездами, а линии излучения горячего газа (ЗС 48). Хотя родство квазаров и ядер галактик весьма вероятно, в этом направлении нужны дальнейшие исследования.

Отметим в заключение, что квазары можно обнаруживать не только радиоастрономическими, но и оптическими методами. Так, американские астрофизики П. Осмер и М. Смит на южноамериканской объединенной обсерватории поставили специальную программу выявления далеких квазаров. Они предположили, что при больших красных смещениях (порядка 2,5—3) можно ожидать яркую водородную линию La . Эта линия имеет собственную длину волны 1216 Å и из-за огромного красного смещения $z=3$ попадает в видимый диапазон. Действительно, им удалось обнаружить свыше 50 объектов с яркими линиями, последующие перенаблюдения которых с большим спектральным разрешением показали, что свыше 90% этих объектов действительно являются далекими квазарами. Успех такой программы все-

ляет надежду на то, что увлекательные загадки физики квазаров в скором времени в значительной степени получат свое решение.

Подведем некоторые итоги. Изучение нестационарных процессов в ядрах галактик приводит к чрезвычайно обширным и сложным проблемам, не ограниченным чисто астрофизическими рамками, а захватывающими различные области физики в целом. Сюда относятся проблемы гравитационного коллапса и проблемы физики «черных дыр», новые проблемы динамики галактик, а также грандиозные явления разрушения звезд приливными силами ядра. Многие из этих проблем находятся в самой начальной стадии своего излучения; мощный импульс для их постановки и развития был дан при изучении новых, полученных лишь в последние годы результатов астрономических наблюдений.

Автор надеется, что ему удалось показать сложность и разнообразие задач, стоящих перед астрофизиками при изучении активных ядер галактик. По существу, многие, если не все проблемы являются в значительной степени дискуссионными, и прийти к общей точке зрения удается далеко не всегда. Тем не менее, напряженная работа наблюдателей приносит свои плоды. Годы, прошедшие после открытия квазаров, обогатили науку целым рядом замечательных достижений, существенно расширивших наше понимание сложных процессов окружающей Вселенной.

ЛИТЕРАТУРА

- Засов А. В. Галактики (Серия «Космонавтика, астрономия», 2). М., «Знание», 1976.
- Курильчик В. Н. Двойные внегалактические радиоисточники (Серия «Космонавтика, астрономия», 8). М., «Знание», 1974.
- Матвеевко Л. М. Радиоинтерферометры (Серия «Космонавтика, астрономия», 3). М., «Знание», 1974.
- Новиков И. Д. Черные дыры во Вселенной (Серия «Космонавтика, астрономия», 7). М., «Знание», 1977.
- Чаругин В. М. Реликтовое излучение (Серия «Космонавтика, астрономия», 9). М., «Знание», 1975.
- Шакура Н. И. Нейтронные звезды и «черные дыры» в двойных звездных системах (Серия «Космонавтика, астрономия», 1). М., «Знание», 1976.

СОДЕРЖАНИЕ

Свойства галактик и методы их изучения	4
Открытие галактик Сейферта	8
Физические параметры ядер галактик	15
Характер переменности излучения активных ядер	28
Геометрическая структура активного ядра	33
Массы центральных тел	38
Взаимосвязь ядра и окружающей части галактики	43
Характерные времена «жизни» активных ядер	47
Модели активных ядер галактик	50
Квазары	60
Литература	63

Эрнест Апушевич Д и б а й

НЕСТАЦИОНАРНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ГАЛАКТИКАХ

Главный отраслевой редактор И. Г. Вирко
Редактор Е. Ю. Ермаков
Младший редактор Т. И. Полякова
Обложка А. А. Астрецова
Худож. редактор В. Н. Конюхов
Техн. редактор Т. Ф. Айдарханова
Корректор Н. Д. Мелешкина

Т-06488. Индекс заказа 74206. Сдано в набор 17/III-77 г. Подписано к печати 6/V-77 г. Формат бумаги 84×108¹/₃₂. Бумага типографская № 3. Бум. л. 1,0. Печ. л. 2,0. Усл. печ. л. 3,36. Уч.-изд. л. 3,40. Тираж 30 500 экз. Издательство «Знание». 101835, Москва, Центр, проезд Серова, д. 4. Заказ 508. Типография Всесоюзного общества «Знание». Москва, Центр, Новая пл., д. 3/4.
Цена 11 коп.

11 коп.

Индекс 70101