

ФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

523[84+854.3]

ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ В КВАЗАРАХ И ЯДРАХ ГАЛАКТИК

Л. М. Озерной

Компактное звездное скопление. — Аккрецирующая черная дыра. — Сверхмассивное вращающееся магнитоплазменное тело. — Обсуждение.

ВВЕДЕНИЕ

В цепи блистательных астрономических открытий последних десятилетий квазары и активные галактики занимают совершенно особое место. Астрофизики сравнительно легко «разделались» с объяснением таких удивительных феноменов как трехградусный микроволновый фон (реликтовое излучение горячей Вселенной¹), межзвездные радиолинии исключительно высокой яркостной температуры (космические мазеры²), пульсары (вращающиеся намагниченные нейтронные звезды^{3, 4}), рентгеновские источники (аккрецирующие нейтронные звезды, а также, возможно, белые карлики и «черные дыры»^{5, 6}). На очереди объяснение космических гамма-всплесков⁷, а также всплесков рентгеновского излучения, отождествляемых с шаровыми скоплениями. И лишь квазары и активные ядра галактик вот уже долгие годы не поддаются однозначной интерпретации.

Правда, несколько лет назад был сделан важный шаг и в этом направлении: данные, полученные с помощью крупнейших телескопов, показали в отношении самых близких квазаров, что это — явления в центрах весьма массивных эллипсоидальных галактик^{8, 9}. Кроме того, некоторые квазары были найдены входящими в небольшие группы и скопления галактик, имеющих те же (с точностью до обычной дисперсии скоростей) красные смещения, что и соответствующие квазары. Накопление данных выявило и глубокое качественное сходство проявлений активности в квазарах и ядрах беспокойных галактик (так называемых сейфертовских, N- и радиогалактик¹⁰). Все эти открытия, по существу, похоронили предположение о некосмологической природе красных смещений квазаров, как и основанные на нем многочисленные, нередко фантастические гипотезы о причинах активности квазаров. Однако загадочность проблемы источника энергии при этом только возросла. Ведь мощности, которые выделяются в квазарах, коль скоро они на космологических расстояниях, — наивысшие из известных физике. Полная светимость квазаров, переменная во времени, составляет у некоторых из них до $10^{47} \div 10^{48}$ эрг/сек, причем значительная часть ее не в тепловой форме (самой примитивной с термодинамической точки зрения), а в высокоорганизованной форме излучения релятивистских частиц в упорядоченных магнитных полях. Быстрота изменений светимости свидетельствует, что громадная мощность, в 10^3 — 10^4

раз превосходящая болометрическое излучение всех звезд нашей Галактики, выделяется в объеме с характерным размером $R \leq 10^{15} - 10^{16}$ см, что лишь немногим больше Солнечной системы!

Полная захватывающего драматизма история открытия квазаров, многообразие их свойств в сопоставлении со сходными проявлениями активности ядер галактик, а также многочисленные гипотезы о природе тех и других освещены в ряде обзоров¹⁰⁻¹⁶. Хотя до сих пор нет недостатка в гипотетических источниках энергии, нужных для объяснения квазарной и галактической активности, лишь три из них относят к наиболее вероятным: 1) компактное звездное скопление; 2) аккрецирующую черную дыру; 3) вращающееся магнитоплазменное тело. Примечательно, что новые гипотезы о природе активности, появившиеся на протяжении последних 7—10 лет вслед за новыми данными наблюдений, по существу, сводятся к одному из перечисленных источников. Названные источники, качественно удовлетворяющие основным требованиям, вытекающим из наблюдений, — компактности, большой светимости и ее переменности, более или менее длительному времени жизни, — имеют и сходные внешние параметры, такие, например, как масса и размер. Поэтому выбор между этими гипотезами мучительно труден и возможен лишь на основе детального, скрупулезного сопоставления их следствий (нередко тоже близких друг к другу) с данными наблюдений.

Похоже, однако, на то, что сведения о характере оптической переменности квазаров и ядер галактик, накопленные в ходе многолетних систематических наблюдений, сейчас позволяют заметно сузить круг мыслимых возможностей. Выяснилось, что ряд объектов обнаруживает примечательные регулярности в изменениях своего блеска: эти изменения содержат составляющую, близкую к периодической с периодом P_1 порядка нескольких десятков или сотен дней, а также квазипериодическую со-

ставляющую с длительность цикла P_2 порядка нескольких лет (см. таблицу).

Таблица
Квазары и активные галактики с периодическими и квазипериодическими изменениями блеска

Объект	Классификация	P_1 , дни	P_2 , годы	Литература
3C 273	Квазар		$9 \pm 1,5$	17
3C 345	»	80,4	3	18, 19
3C 446	»	380		20
3C 454.3	»	339,6		21
3C 371	N-галактика	169	5	22
3C 120	N- или сейфертовская галактика	350	22,5	23
NGC 4151	Сейфертовская Галактика	130	5,1	24, 25
NGC 1275	»	29,5	1,3	26

фазы¹⁷. Вследствие такого сравнительно сложного характера блеска, сочетавшегося с более быстрой переменностью, и не адекватных ему методов статистической обработки, применявшихся большинством исследователей, утверждение¹⁷ о квазипериодическом изменении блеска и даже более слабое утверждение о неслучайном характере оптической переменности²⁸ вызвали в литературе дискуссию, затянувшуюся на многие годы (см.²⁹, где содержатся также ссылки на предыдущие работы). Но теперь едва ли можно сомневаться в реальности регулярного характера

Любопытно, что первые указания на возможное существование среди квазаров объектов с почти-периодическими изменениями блеска появились в отношении квазара 3C 273 сразу же при его открытии благодаря ценной коллекции фотопластинок с его изображением, снимавшимся на протяжении около 80 лет²⁷. Однако у 3C 273 изменения блеска оказались не вполне периодическими, а квазипериодическими или циклическими ввиду дрейфа

вариаций блеска, найденного уже у ряда источников и притом разными группами наблюдений. Правда, пока еще трудно судить о том, все ли периоды P_1 реальны, с какой точностью они поддерживаются и т. п. Если с дальнейшим накоплением наблюдений переменности конкретного источника отношение сигнал/шум при принятом значении P_1 будет возрастать, это станет окончательным свидетельством его реальности.

Регулярный характер вариаций блеска квазаров и ядер галактик может быть использован ныне в качестве эффективного средства для выбора между указанными выше возможными источниками активности. Обсудим выводы, к которым приводит детальное сопоставление³⁰ свойств этих источников с наблюдаемым характером переменности.

КОМПАКТНОЕ ЗВЕЗДНОЕ СКОПЛЕНИЕ

Известны два основных варианта энерговыделения в компактном скоплении звезд (см. обзоры^{14, 15}). Один из них отвечает поздней стадии эволюции галактического ядра, когда становятся существенными столкновения звезд. В зависимости от соотношения между среднеквадратичной скоростью звезд v и параболической скоростью на поверхности звезды v_p , звезды либо выделяют энергию непосредственно при столкновениях ($v \gg v_p$), либо слипаются ($v \ll v_p$), образуя короткоживущую массивную звезду, взрывающуюся затем подобно сверхновой.

Поскольку столкновения звезд происходят случайным и независимым образом, энерговыделение имеет также характер случайных некоррелированных импульсов. Имеется строгое доказательство²⁸ того, что такие импульсы противоречат неслучайному характеру изменений блеска квазара 3C 273. Ясно, что тем более невозможно объяснить этой моделью периодические и квазипериодические вариации блеска у объектов, перечисленных в таблице.

В другом варианте концепции компактного звездного скопления вспышки сверхновых происходят на ранней фазе эволюции галактического ядра, когда частота образования молодых массивных звезд, взрывающихся затем как сверхновые, могла быть значительно выше сегодняшней *). Если вспышки происходят случайно и независимым образом и складываются в наблюдаемые вариации светимости *линейно*, этот вариант будет обладать теми же трудностями, что и предыдущий.

Этих трудностей, по-видимому, можно избежать, если предположить, что сложение отдельных независимых импульсов происходит нелинейно, т. е. скопление вспыхивающих звезд обладает некоторыми *коллективными* свойствами. Такая ситуация предполагается в модели³¹, согласно которой в активном галактическом ядре, весьма компактном, происходят вспышки сверхновых с частотой $1-100 \text{ год}^{-1}$, приводящие к образованию пульсаров **). В этой «многопульсарной модели» (рис. 1) близкие вспышки сверхновых, сливаясь, образуют мигрирующие по скоплению зоны повышенной активности, имеющие некоторые коллективные свойства. В такой системе наличие периода P_1 и квазипериода P_2 можно попытаться объяснить сочетанием вращения и пульсаций (точнее, биений) скопления, содержащего много плазмы и общее магнитное поле. Модуляция потока излучения вращением должна обеспечиваться в этой модели посредством некоторой анизотропии излучения зоны повышенной активности. Однако

*) Отметим, что если фазы бурного звездообразования почему-либо повторяются на протяжении галактической истории, то повышенную частоту образования сверхновых не обязательно связывать только с ранней эволюцией галактик.

**) Эта модель является развитием более ранних работ^{32, 33}.

не ясно, как получить такую анизотропию, если только оси пульсаров не расположены в пространстве упорядоченно, что маловероятно³⁰.

При объяснении в многопульсарной модели других свойств активных галактик и квазаров возникают дополнительные трудности¹⁶. Сложность

этой модели, в значительной мере обусловленная произволом в выборе ее основных параметров, делает нелегким выяснение того, какой ценой имеющиеся трудности могут быть сняты или ослаблены.

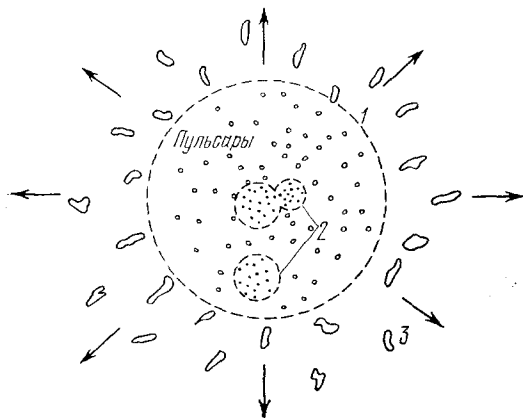


Рис. 1. Схема многопульсарной модели активного ядра.

1 — граница области, занятой сильными электромагнитными волнами, релятивистскими частицами и фотонами высоких частот; 2 — мигрирующие зоны повышенной частоты всплесков сверхновых и преобладания молодых пульсаров; 3 — газовые облака — продукты всплесков сверхновых.

АККРЕЦИРУЮЩАЯ ЧЕРНАЯ ДЫРА

Подкупающе простая идея источника энергии в ядрах галактик и квазаров состоит в том, что они содержат сверхмассивные черные дыры, «питающиеся» межзвездным газом³⁴. В типичных условиях падающий на дыру газ, обладая моментом вращения, образует вокруг нее диск. Диссипация энергии из диска осуществляется излучением, максимум

которого лежит в ультрафиолетовом и оптическом диапазонах³⁵.

Наблюдаемые оптические вариации потока излучения от ядер галактик и квазаров естественно связать в модели дисковой аккреции с существованием вблизи черной дыры одной или нескольких неоднородностей («горячих пятен»), вращающихся по кеплеровским орбитам постепенно уменьшающегося радиуса. Однако это объяснение сталкивается с двумя трудностями³⁰.

Во-первых, радиальный дрейф горячего пятна приведет к сокращению промежутка времени между максимумом и минимумом блеска и возрастанию амплитуды вариаций. Такого рода нарастающих «судорог» наблюдаемая переменность активных ядер и квазаров не показывает.

Во-вторых, отождествление наблюдаемого периода $P_1 \sim 10^7$ сек с кеплеровским периодом $\tau_K \sim (0,7 - 7) (M_h/M_\odot)$ сек области максимального энерговыделения, имеющей радиус порядка $0,8 - 5$ гравитационных радиусов, дает массу черной дыры $M_h \sim (1 - 0,1) \cdot 10^{11} M_\odot$. Однако известно, что динамика звезд в центральных областях галактик ограничивает возможную массу дыры много меньшей величиной: $M_h \leq 10^8 M_\odot$. Рассмотрение приливного разрушения звезд в окрестности черной дыры позволяет снизить этот верхний предел еще на несколько порядков величины³⁶.

Избежать этой трудности можно, если горячее пятно находится на расстоянии $R \sim 10^2 R_g$ от дыры (где вращение на много более медленное), а газ, окружающий черную дыру, является оптически толстым³⁰. Этим условием удовлетворяет модифицированная модель аккрецирующей дыры³⁷, изображенная на рис. 2.

В такой картине аккреции, отличной от обычно рассматриваемой, можно, по-видимому, объяснить и наблюдаемый квазипериод $P_2 \sim 1 \div$

÷ 10 лет, связав его с изменениями поступающего потока газа на черную дыру массы $M_h \sim 3 \cdot (10^5 - 10^6) M_\odot^*$.

Аккреция на черную дыру может быть обусловлена не только межзвездным газом — продуктом истечения из проэволюционировавших звезд, но и приливным разрушением звезд ^{34, 38}, попадающих в сферу радиуса $R_t \approx 10^{11} (M_h/M_\odot)^{1/3}$ см $\approx 10^{-2} (M_h/M_\odot)^{1/3}$ а. е. Если газ, освобождаемый в результате приливного разрушения звезд, движется затем вокруг черной дыры с кеплеровским периодом, то величина последнего

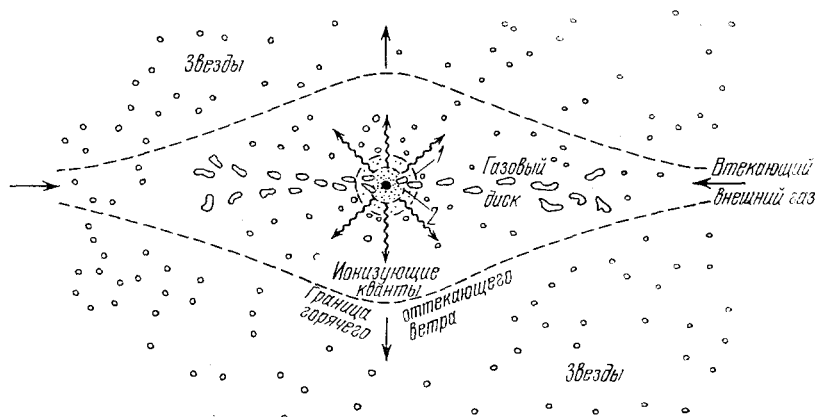


Рис. 2. Схематическое строение активного ядра, содержащего сверхмассивную аккрецирующую черную дыру.

1 — сфера приливного разрушения звезд; 2 — корона вокруг дыры.

составит $P \approx 9$ часов, независимо от M_h . Подобного короткого и притом универсального квазипериода в квазарах и ядрах сейферовских галактик не наблюдалось **).

Таким образом, в рамках стандартной картины дисковой аккреции объяснить наблюдаемые регулярности изменений блеска квазаров и активных галактик не удастся. Вместе с тем в более сложной модели аккрецирующей черной дыры, окруженной на большом расстоянии от нее толстым слоем плазмы, видимые трудности отсутствуют. В окружающей дыру короне может содержаться квазирегулярное магнитное поле, перезамыкания в котором могли бы давать нетепловые вспышки ⁴⁰. Однако по своим наблюдательным проявлениям такой объект уже трудно отличим от неколлапсировавшего тела, к обсуждению свойств которого мы сейчас и перейдем.

СВЕРХМАССИВНОЕ ВРАЩАЮЩЕЕСЯ МАГНИТОПЛАЗМЕННОЕ ТЕЛО

Уже в одной из первых работ по объяснению природы квазаров было обращено внимание на то, что в ходе гравитационного коллапса колоссально возрастет магнитное поле ⁴¹, которое может играть важную роль

*) В стандартной картине дисковой аккреции при такой массе следовало бы ожидать быстрой нерегулярной переменности с характерным временем 3—30 сек. Однако у исследованных ядер активных галактик минимальное характерное время нарастания блеска $\Delta t \geq 1$ день ²⁶. В модифицированной модели отсутствие указанной быстрой переменности естественно объясняется большой оптической толщей газа, окружающего черную дыру.

**) Любопытно, что довольно близкий к этой величине квазипериод изменений рентгеновского потока наблюдался от шарового скопления NGC 6624, где подозревают присутствие черной дыры ³⁹.

при трансформации гравитационной энергии в наблюдаемые формы активности квазаров и ядер галактик. Правда, на последних стадиях коллапса это поле исчезает⁴², но сама идея о существенной роли магнитного поля полностью сохраняет свою силу для равновесной квазистационарной плазменной конфигурации, образующейся в ходе гравитационного сжатия. Такой объект (своего рода сверхмассивная звезда⁴³) может образоваться на определенной стадии эволюции плотного звездного скопления или быть продуктом аккумуляции в галактическом ядре газа, потерянного в процессе эволюции звезд. В наиболее общем случае вклад в равновесие осуществляют радиация, вращение и магнитное поле; такое тело

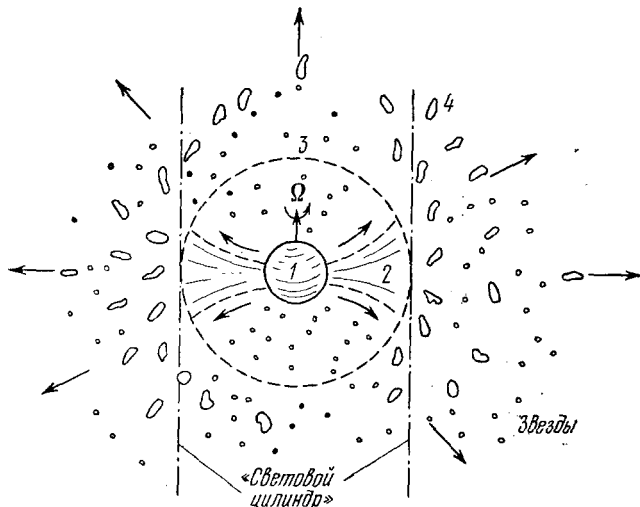


Рис. 3. Сверхмассивный наклонный ротор в активном ядре.

1 — ротор; 2 — плазма, истекающая в результате ротационной неустойчивости; 3 — граница области, занятой низкочастотными электромагнитными волнами, релятивистскими частицами и фотонами высоких частот; 4 — газовые облака, ускоренные излучением и частицами ротора.

было названо магнитоидом⁴⁴. Его структура и эволюция при различном характере вращения и разной геометрии магнитного поля исследованы в⁴⁵. Ниже мы будем иметь дело лишь с простейшей реализацией магнитоида в виде сверхмассивного наклонного ротора, обладающего твердотельным вращением и квазидипольным магнитным полем. В «холодном» варианте такой ротор совпадает со «спинаром» (гигантским пульсаром)⁴⁶. Однако модель спинара не является в полной мере самосогласованной, и более предпочтителен «горячий» вариант ротора, в котором тепловая, вращательная и магнитная энергии — одного и того же порядка. Электродинамика, эволюция и наблюдательные проявления такого ротора детально рассмотрены в⁴⁷ (см. также обзоры^{15, 16}). Светимость ротора складывается из теплового и нетеплового излучения. Последнее связано с потерями низкочастотных ($\sim 10^{-6} - 10^{-8}$ гц) электромагнитных волн (магнитодипольного излучения), генерируемых ротором в ходе векового торможения вращения. Плазма, истекающая из ротора вследствие ротационной неустойчивости, достигает в виде двух струй «светового цилиндра» ($r = c/\Omega$), после чего растекается, «обволакивая» ротор (рис. 3). Сильная низкочастотная электромагнитная волна поглощается в тонком слое этой плазмы и ускоряет его частицы до энергий $\gamma = E/mc^2 \sim 10^3$. Ускоренные релятивистские электроны излучают в магнитном поле $H \sim 1$ э вблизи светового цилиндра преимущественно на частоте

$\nu \approx 10^6 H\gamma^2$ гц, которая приходится на субмиллиметровый и инфракрасный диапазон. В этом отношении, так же как и во многих других, сверхмассивный наклонный ротатор как модель источника энергии в активных ядрах хорошо объясняет основные особенности их нетеплового излучения, максимум которого лежит часто в основном в инфракрасных «пиках».

Как объяснить наблюдаемые регулярности в оптической переменности квазаров и ядер галактик?

Излучение ротатора ожидается меняющимся периодически и квазипериодически вследствие вращения, пульсаций и прерывистого характера истечения вещества (последнее обусловлено конкуренцией двух механизмов потери вращательного момента — истечения плазмы и натяжения магнитных силовых линий, связывающих теряемую массу с ротатором ⁴⁷). Анализ ³⁰ показал, что наблюдаемые регулярности качественно соответствуют ожидавшимся: период P_1 может быть объяснен вращением ротатора, а квазипериод P_2 — прерывистым истечением из него вещества. При этом получаются следующие простые оценки для основных параметров ротатора (массы M , радиуса R , напряженности полоидального магнитного поля H и экваториальной скорости вращения v_e), выраженных через наблюдаемые величины $p = P_1/800$ дней и $q = P_2/10$ лет:

$$M \approx p^{5/2} q^{-3/2} 10^8 M_{\odot}, \quad R \approx p^{3/2} q^{-1/2} 10^{16} \text{ см};$$

$$H \approx p^{-1/2} q^{-1/2} 10^6 \text{ э}; \quad v_e \approx p^{1/2} q^{-1/2} 10^4 \text{ км/сек.}$$

Взятые из таблицы значения P_1 и P_2 дают вполне разумные оценки параметров ротатора как источника энергии квазаров и активных ядер. Такие значения M , R , H и v_e обеспечивают как нужную светимость, так и длительность стадии активности ^{15, 16}.

ОБСУЖДЕНИЕ

Выше схематически очерчены три возможных источника активности квазаров и ядер галактик. Механизмы генерации в них энергии существенно различны. В компактном *звездном скоплении* энерговыделение обусловлено в конечном счете, либо столкновением и разрушением звезд (т. е. их кинетической энергией), либо связано с их слипанием, быстрой эволюцией образовавшихся массивных звезд и завершающей ядерной вспышкой. В дополнение к ядерному энерговыделению важную роль здесь может играть энергия вращения пульсаров — остатков звездных взрывов. В другом мыслимом источнике активности — сверхмассивном вращающемся магнитоплазменном теле (*магнитоиде*) происходит освобождение его гравитационной энергии через посредничество вращения и магнитного поля. Завершающие этапы жизни магнитоида, возможно, связаны с его фрагментацией и ядерными взрывами. Наконец, в третьем типе источника активности, — *черной дыре*, — также имеет место освобождение гравитационной энергии, которая здесь выделяется в газовом диске, окружающем дыру и медленно оседающем (аккредирующем) на нее.

Можно ли сейчас отдать предпочтение какому-либо из названных типов источников?

Как видно из изложенного, наблюдаемые регулярности в изменениях оптического излучения квазаров и активных ядер галактик в принципе предоставляют достаточно эффективное средство для селекции имеющихся гипотез о природе источника активности. Во всяком случае, некоторые простые модели оказывается возможным отбросить. К ним относится компактное скопление звезд, в котором отдельные вспышки, происходящие случайным и независимым образом, складываются линейно. Лишь

более сложная модель³¹, когда скопление звезд, вспыхивающих в виде сверхновых и образующих пульсары, обладает коллективными свойствами, в некоторых отношениях подобных единому телу, могла бы претендовать на существование, хотя уже сейчас она встречается с рядом трудностей, отмеченных выше (см. также¹⁶). К тому же остается неизвестным, может ли скопление с требуемыми параметрами сформироваться на ранней стадии галактики или стать таковым к наблюдаемому моменту времени.

Во всяком случае, можно констатировать, что модель источника активности ядер галактик и квазаров в виде суперпозиции случайно и независимо вспыхивающих звезд неприложима, по крайней мере, к таким объектам, которые демонстрируют регулярный характер своей переменности. Мы можем утверждать, что в таких объектах источником энергии является некоторая сильно связанная система, в пределе — единое тело. Остается установить — и это очень важный, но, как оказывается, весьма трудный вопрос, — какова природа этого тела?

Рассмотрение свойств подобного тела в коллапсировавшем состоянии (аккрецирующая черная дыра) показало, что опять-таки *простейшая* модель нестационарной аккреции (горячее пятно на поверхности диска) не объясняет наблюдаемой регулярности изменений блеска квазаров и ядер галактик. Более сложная модель, содержащая оптически толстую корону вокруг дыры, по-видимому, может быть совместима с наблюдаемым характером переменности. Примечательно, что модифицированная таким образом модель аккрецирующей дыры оказывается довольно близкой по своим внешним свойствам к магнитоиду — вращающемуся магнитоплазменному неколлапсировавшему телу.

Уже простейшая реализация магнитоида в виде сверхмассивного наклонного ротатора объясняет без видимых противоречий наблюдаемую регулярную переменность квазаров и ядер галактик: период P_1 связывается с вращением ротатора, а квазипериод P_2 — с прерывистым истечением из него вещества *). Полученные по наблюдаемым значениям P_1 и P_2 основные параметры ротатора вполне обеспечивают требуемую энергетику активности, а при условии рекуррентного воспроизводства ротаторов в ядрах галактик — и нужную общую длительность состояния активности.

Выше мы обсуждали альтернативные источники энергии в активных ядрах лишь с точки зрения их соответствия регулярному характеру наблюдаемой переменности. Это позволило заключить, что искомый источник не есть скопление случайно и независимо вспыхивающих тел, а представляет собой нечто единое целое. Для решения же более тонкого, хотя и принципиально важного вопроса, является ли этот источник черной дырой или еще неколлапсировавшим телом, нужно рассмотреть соответствие этих моделей всей совокупности наблюдаемых данных. К сожалению, это сопоставление осложняется недостаточной разработанностью имеющихся моделей (особенно это касается аккреции на черную дыру, необходимая модификация которой лишь схематически очерчена выше). Поэтому нельзя быть уверенным, что успешное объяснение в концепции магнитоида основных свойств квазаров и ядер активных галактик не может быть воспроизведено (по крайней мере, качественно) в рамках аккреции на черную дыру.

Однако, некоторые свойства магнитоида (помимо возможности почти-периодической модуляции его светимости) представляются довольно специфическими и их наблюдательное подтверждение было бы решающим для

*) Отметим, что трехосность магнитоида и отличие движения его материи от чисто вращательного (что прямо связано с ролью магнитного поля) не требуют строгого сохранения периода P_1 (см.³⁰).

предпочтения магнитоида в качестве источника энергии в квазарах и активных ядрах аккрецирующей черной дыре. Основанием для такого предпочтения могло бы стать следующее:

- 1) установление нетепловой (синхротронной) природы наблюдаемых инфракрасных пиков;
- 2) доказательство переменности инфракрасного континуума (включая циклические колебания светимости с тем же квазипериодом P_2 , что и в оптике);
- 3) большая величина магнитного поля в масштабе $10^{16} - 10^{17}$ см, которую можно обнаружить измерениями поляризации (особенно круговой) и фарадеевского вращения.

Любопытный эволюционный тест может быть указан в отношении ядер сейфертовских галактик, которые наряду с мощным излучением характеризуются также бурным истечением газовых масс из их ядер. Такое истечение, как известно, может быть обеспечено черной дырой лишь в случае, если ее светимость L близка к критической (так называемой эддингтоновской) светимости $L_E = 4\pi c G m_p M_h / \sigma_T = 1,3 \times 10^{38} (M_h / M_\odot) \text{ эрг/сек}$. Если в течение всей стадии активности ядра $L/L_E = \text{const}$ (конечно, с точностью до спорадических вариаций), то в ходе аккреции масса черной дыры, как легко показать, возрастает по закону

$$M_h = M_0 \exp\left(\frac{t}{\tau}\right), \quad \tau = 0,45 \cdot 10^9 \frac{\varepsilon}{1-\varepsilon} \frac{L_E}{L} \text{ (лет)},$$

где $\varepsilon = L/Mc^2$ — эффективность переработки аккрецируемой массы в излучение, M_0 — начальная масса черной дыры. Как отмечалось выше, из динамических аргументов следует, что в ядрах галактик $M_h < 10^8 M_\odot$ (эта либеральная оценка может быть еще понижена). Поскольку $M_0 \gg (3 - 10) \cdot M_\odot$, то $t/\tau < 17 \div 16$. Привлекая астрофизические аргументы, можно полагать, что время существования черных дыр в ядрах сейфертовских галактик сравнимо с их возрастом ($\sim 2 \cdot 10^{10}$ лет), т. е. $\tau > 1,2 \times 10^9$ лет. Отсюда немедленно следует, что $L/L_E < 0,4 \varepsilon / (1 - \varepsilon)$, что даже при максимально возможной $\varepsilon \sim 0,2$ явно недостаточно ($L/L_E < 0,1$), чтобы объяснить наблюдаемое мощное извержение газа из ядер сейфертовских галактик как отток из черной дыры.

Конечно, необходимо рассмотрение более реалистичной ситуации, чем $L/L_E = \text{const}$, однако серьезные сомнения в отношении аккрецирующей черной дыры как источника энергии в ядрах галактик подкрепляются независимыми аргументами, ограничивающими массу черных дыр в «спокойных» ядрах галактик (типа ядра нашей Галактики) весьма низкой величиной³⁵.

Сказанное не исключает возможности существования относительно маломассивных дыр не только в «спокойных», но и в активных галактических ядрах (и в квазарах). В активных ядрах галактик и в квазарах они мыслятся в виде своеобразного гибрида с много более массивным магнито-плазменным телом, причем ведущую роль в наблюдаемых проявлениях активности, видимо, играет неколлапсировавшая зона^{15, 16}.

Хотя до окончательного понимания природы активности в квазарах и галактических ядрах еще предстоит нелегкий путь успехов и разочарований, контуры искомых источников энергии уже начинают вырисовываться. Однако лишь дальнейшие исследования покажут, насколько оправдан этот оптимизм.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Я. Б. Зельдович, УФН 86, 303 (1965).
2. В. С. Стрельницкий, УФН 113, 463 (1974).
3. А. Хьюиш, УФН 97, 715 (1969); 117, 201 (1975).
4. В. Л. Гинзбург, УФН 103, 393 (1971).
5. Г. Гурский, Э. Ванден Хёвел, УФН 118, 673 (1976).
6. К. Торн, УФН 118, 453 (1976).
7. О. Ф. Прилущкий, И. Л. Розенталь, В. В. Усов, УФН 116, 517 (1975).
8. J. Kristian, *Astrophys. J.* 179, L 61 (1973).
9. J. B. Oke, J. Gunn, *ibid.* 189, L5 (1974).
10. G. R. Burbidge, *Ann. Rev. Astron. and Astrophys.* 8, 369 (1970).
11. Дж. Гринстейн, УФН 83, 549 (1964).
12. Дж. Бербидж, М. Бербидж, Квазары. М., «Мир», 1968.
13. Б. А. Воронцов-Вельяминов, Внегалактическая астрономия, [М., «Наука», 1972.
14. W. C. Saslaw, in: *The Formation and Dynamics of Galaxies* (Symp. IAU No. 58), Dordrecht, D. Reidel, 1974, p. 305.
15. Л. М. Озерной, сборник «Проблемы гравитации», Ереван, 1975; in: *Proc. of 1st European Astronomical Meeting*, v. 3, 1974, p. 65.
16. Л. М. Озерной, в кн. *Образование звезд и галактик*, М., «Наука», 1977.
17. Л. М. Озерной, В. Е. Чертопруд, *Астрон. ж.* 43, 20 (1966).
18. Л. М. Озерной, В. Е. Чертопруд, С. А. Чувакин, *ibid.* 46, 1317 (1969).
19. T. D. Kinman, E. Lamla, T. Ciurla, E. Harlan and C. A. Wirtanen, *Astrophys. J.* 152, 357 (1968).
20. M. J. Smith, R. D. Wolstencroft, *Astrophys. and Space Sci.* 8, 471 (1970).
21. P. K. Lü, J. H. Hunter, *Nature* 221, 755 (1969).
22. T. D. Kinman, Report at the Symp. IAU No 44, Uppsala, 1970.
23. M. K. Babadzanjan, E. T. Belokon', in: *Variable Stars and Stellar Evolution* (Symp. IAU No. 67), Dordrecht, D. Reidel, 1975, p. 611.
24. I. Jurkevich, P. D. Usher, B. S. P. Shen, *Astrophys. and Space Sci.* 10, 402 (1971).
25. M. K. Babadzanjan, E. T. Belokon', V. M. Lyuty, *Astron. and Astrophys.* (в печати).
26. A. G. Pacholczyk, in: *External Galaxies and Quasi-stellar Objects* (Symp. IAU No. 44), Dordrecht, D. Reidel, 1972, p. 165.
27. V. M. Lyuty, V. I. Pronik, in: *Variable Stars and Stellar Evolution* (Symp. IAU No. 67), Dordrecht, D. Reidel, 1975, p. 592.
28. H. J. Smith, in: *Quasi-stellar Sources and Gravitational Collapse*, Univ. of Chicago Press, 1965, p. 221.
29. Л. И. Гудзенко, Л. М. Озерной, В. Е. Чертопруд, *Nature* 215, 605 (1967); *Астрон. ж.* 48, 472 (1971).
30. V. E. Chertoprud, L. I. Gudzenko, L. M. Ozernoy, *Astrophys. J.* 182, L 53 (1973).
31. Л. М. Озерной, В. Е. Чертопруд, Л. И. Гудзенко, Препринт ФИАН СССР № 94, Москва, 1976.
32. Л. М. Озерной, В. В. Усов, Препринт ФИАН СССР № 73, Москва, 1976.
33. J. Arons, R. M. Kulsrud, J. P. Ostriker, *Astrophys. J.* 198, 687 (1975).
34. Н. С. Кардашев, *Астрон. ж.* 47, 465 (1970).
35. M. J. Rees, *Nature* 229, 312 (1971).
36. D. Lynden-Bell, *ibid.* 223, 690 (1969).
37. И. Д. Новиков, К. С. Торн, in: *Black Holes*, Ed. C. De Witt and B. De Witt, N.Y., Gordon and Breach, 1973, p. 343.
38. L. M. Ozernoy, *Observatory* 96, 67 (1976).
39. Л. М. Озерной, *Астрон. циркуляр*, № 804, 1 (1973).
40. J. G. Hills, *Nature* 254, 295 (1975).
41. G. W. Clark, J. G. Jernigan, H. Bradt, C. Canizares, W. H. G. Lewin, F. K. Li, W. Mayer, J. McClintock, H. Schopper, Preprint CSR-P-76-6; *Astrophys. J. Lett.* (в печати).
42. Л. А. Пустильник, В. Ф. Шварцман, *Proc. IAU-EPS Symp. «Magnetic Fields in the Cosmos»* (Crimea, April 6—11, 1976).
43. В. Л. Гинзбург, ДАН СССР 156, 43 (1964).
44. В. Л. Гинзбург, Л. М. Озерной, *ЖЭТФ* 47, 1030 (1964).
45. F. Hoyle, W. Fowler *Mon. Not. Roy Astr Soc.* 125, 169 (1963).
46. Л. М. Озерной, *Астрон. ж.* 43, 300 (1966).
47. L. M. Ozernoy, V. V. Usov, *Astrophys. and Space Sci.* 13, 3 (1971).
48. P. Morrison, *Astrophys. J.* 157, L73 (1969).
49. L. M. Ozernoy, V. V. Usov, *Astrophys. and Space Sci.* 25, 149 (1973).