

СВЕРХМАССИВНЫЕ ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ В ЯДРАХ ГАЛАКТИК

А. М. ЧЕРЕПАЩУК

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

SUPERMASSIVE BLACK HOLES IN THE GALACTIC NUCLEI

A. M. CHEREPASHCHUK

Much progress has been achieved recently in the measurements of the masses and characteristic sizes of galactic nuclei. These measurements allow to propose the existence of supermassive (masses up to 10^9 solar masses) black holes in the nuclei of galaxies.

В последние годы достигнут большой прогресс в измерениях масс и характерных размеров ядер галактик. Эти измерения дают веские основания предполагать, что в ядрах галактик существуют сверхмассивные (с массой до 10^9 солнечных масс) черные дыры.

ВВЕДЕНИЕ

Ядра галактик всегда привлекали особое внимание ученых. В последние годы выяснилось, что ядра галактик содержат сверхмассивные компактные объекты, по всей вероятности черные дыры. О новейших результатах измерения масс и размеров галактических ядер, позволяющих идентифицировать их с черными дырами, мы расскажем в статье.

Как известно (см., например, [2]), под черной дырой понимается область пространства–времени, в которой гравитационное поле настолько сильно, что даже свет не может уйти из нее на бесконечность. Черные дыры предсказываются общей теорией относительности (ОТО) А. Эйнштейна. Они обладают удивительными свойствами, важнейшее из которых – наличие у черной дыры горизонта событий, на котором с точки зрения далекого наблюдателя ход времени останавливается. Для невращающейся черной дыры радиус горизонта событий совпадает с гравитационным радиусом, характеризующим размер черной дыры:

$$r_g = \frac{2GM}{c^2}, \quad (1)$$

где G – гравитационная постоянная, M – масса, c – скорость света.

Гравитационный радиус r_g для Солнца составляет 3 км, для Земли – 8 мм, для ядра галактики с массой $10^9 M_\odot$ (M_\odot – масса Солнца) величина $r_g = 3 \cdot 10^9$ км = $3 \cdot 10^{14}$ см ≈ 20 астрономических единиц (а.е.) (1 а.е. = $1,5 \cdot 10^{13}$ см – среднее расстояние от Земли до Солнца).

СВОЙСТВА ЯДЕР ГАЛАКТИК

Галактики в большинстве случаев имеют в центральных частях компактные сгущения звезд и газа, которые принято называть ядрами (рис. 1). Обычно ядра выделяются в спиральных галактиках и трудноразличимы в неправильных галактиках (например, Магеллановых облаках). Среди галактик выделяется сравнительно немногочисленная (~1% от общего числа) группа галактик с активными ядрами. В активных ядрах галактик наблюдаются мощные нестационарные процессы,



Рис. 1. Ядро спиральной галактики М 100. Изображение получено с борта Космического телескопа им. Э. Хаббла

приводящие к высокой светимости ядер в рентгеновском, ультрафиолетовом, оптическом, инфракрасном и радиодиапазонах. Хотя галактики с активными ядрами сравнительно малочисленны, их изучение принципиально важно для выяснения природы галактических ядер.

Галактики с активными ядрами принято разделять на четыре основных типа: сейфертовские галактики, радиогалактики, лацертиды и квазары. Сейфертовские галактики в большинстве случаев представляют собой спиральные галактики с яркими ядрами, светящимися в непрерывном спектре, а также в сильных и широких линиях излучения водорода, гелия, азота и других элементов (рис. 2). Радиогалактики – в большинстве своем эллиптические галактики, обладающие мощным радиоизлучением, иногда превышающим по мощности их оптическое излучение. Лацертиды, получившие свое название от объекта VL Лацерты, характеризуются сильной оптической переменностью амплитудой до пяти звездных величин, переменным радиоизлучением и значительной поляризацией излучения. Наконец, знаменитые квазары также представляют собой очень активные ядра весьма удаленных галактик с красным смещением от $z = 0,158$ (соответствующее расстояние 630 Мпк, или около 2 млрд световых лет) для 3С273 до $z = 4$ (расстояние во многие миллиарды световых лет). Квазары – самые мощные по стационарному излучению объекты во Вселенной. Полная

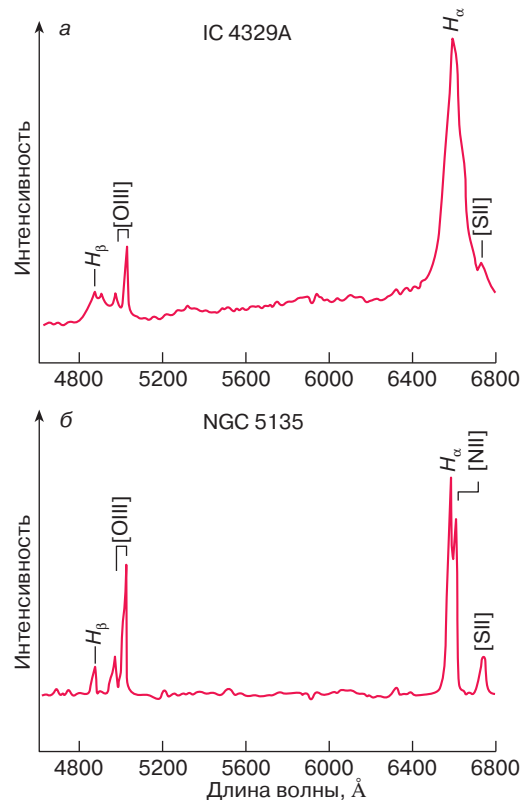


Рис. 2. Эмиссионные линии ядер сейфертовских галактик. У галактики IC 4329A, принадлежащей к типу Сейферт-1, разрешенные линии водорода H_{α} , H_{β} широкие, а запрещенные линии двукратно ионизованного кислорода [OIII] узкие. У галактики NGC 5135 (тип Сейферт-2) и запрещенные и разрешенные линии относительно узкие

светимость квазаров, включая радио-, инфракрасный, оптический, ультрафиолетовый, рентгеновский и гамма-диапазоны, достигает $10^{47} - 10^{48}$ эрг/с, что на три-четыре порядка превышает светимость родительской галактики.

Все галактики с активными ядрами обладают переменностью оптического излучения их ядер на временах от нескольких суток до многих лет. По максимальной скорости переменности (минимальному времени переменности t_0) оценивается характерный размер излучающей области $r_0 \leq ct_0$ (c – скорость света), который составляет $\sim 3 \cdot 10^{15} - 10^{17}$ см, то есть менее 1 пк. Ввиду столь малого объема, в котором выделяется гигантская энергия, требуется привлечение новых механизмов энерговыделения. Одним из таких механизмов принято считать аккрецию (то есть выпадение) вещества звезд и газа галактики на сверхмассивную черную дыру, расположенную в ядре галактики. Поскольку эффективность энерговыделения при аккреции на два порядка

выше, чем при ядерных реакциях, механизм аккреции на черную дыру в последние годы наиболее часто применяется при объяснении гигантской светимости квазаров и ядер активных галактик. У многих ядер активных галактик и квазаров наблюдаются сильно коллимированные выбросы вещества,двигающегося со скоростью, близкой к скорости света, которые принято называть джетами. Размеры джетов достигают десятков килопарсек, что больше размеров галактик. Принято считать, что происхождение джетов связано с магнитогидродинамическими процессами во внутренних частях аккреционного диска (то есть диска из выпадающего вещества) вокруг сверхмассивной черной дыры или с быстрым вращением самой черной дыры. Вращение и магнитное поле приводят к формированию сильных электрических полей, в которых заряженные частицы аккрецирующей плазмы ускоряются до релятивистских скоростей.

Таким образом, наблюдения квазаров и других галактик с активными ядрами привели ученых к выводу о возможном существовании сверхмассивных черных дыр в ядрах галактик. Для надежной идентификации ядер галактик со сверхмассивными черными дырами необходимо, как и в случае черных дыр звездной массы (см. [2]), дать оценки их масс и характерных размеров. Рассмотрим различные методы определения важнейших параметров ядер галактик.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАСС ЯДЕР АКТИВНЫХ ГАЛАКТИК

При определении масс ядер активных галактик используется тот факт, что светимость этих ядер велика, а в их спектрах наблюдаются мощные и широкие линии излучения. Ширины линий в шкале скоростей, рассчитанные по формуле эффекта Доплера, достигают 10^4 км/с.

Оценка массы ядра по эддингтоновскому пределу

В модели аккрецирующей черной дыры оценка массы ядра галактики может быть сделана в предположении, что его полная (болометрическая) светимость не превышает так называемого эддингтоновского предела

$$L_E = 1,3 \cdot 10^{38} \mu \frac{M}{M_\odot} \text{ эрг/с}, \quad (2)$$

где μ – число нуклонов на один электрон для аккрецирующей плазмы, M – масса ядра галактики.

Формула (2) была получена английским астрофизиком А. Эддингтоном при рассмотрении эволюции массивных звезд. Она соответствует случаю максимальной светимости, когда сила гравитационного притяжения центрального источника уравновешивается

силой отталкивания, обусловленной градиентом давления излучения.

Как уже отмечалось, среди галактических ядер квазары имеют наибольшую светимость, достигающую 10^{47} – 10^{48} эрг/с (заметим, что ядро нашей Галактики, которое не является активным, имеет болометрическую светимость всего $\sim 10^{37}$ – 10^{38} эрг/с). Поэтому оценка нижнего предела массы по эддингтоновскому пределу наиболее уместна именно для квазаров. Из условия $L_{\text{кв}} \leq L_E$ по формуле (2) получаем $M_{\text{кв}} \geq 10^9 M_\odot$. В середине 60-х годов, когда американский астроном М. Шмидт впервые отождествил квазары как объекты, находящиеся на космологических расстояниях, даже такая оценка массы квазара казалась достаточно убедительным свидетельством наличия сверхмассивных черных дыр. Последующее открытие быстрой переменности квазаров и активных ядер галактик на временах $t_0 = 1$ – 10 суток позволило сделать вывод о малых размерах излучающей области $r_0 \leq ct_0 \approx 3 \cdot 10^{15}$ – $3 \cdot 10^{16}$ см, что еще более укрепило уверенность астрономов в том, что именно аккреция вещества на сверхмассивные черные дыры является причиной столь сильной активности галактических ядер и мощного выделения энергии в них.

Обнаружение переменности квазаров и активных ядер галактик позволило развить метод оценки их массы, который значительно менее модельно зависим, чем описанный метод оценки массы по эддингтоновскому пределу.

Оценка массы активного ядра по переменности эмиссионных линий

Почти одновременно с открытием переменности ядер сейфертовских галактик в непрерывном спектре (1967–1968 годы) французские астрономы И. Андрийя и С. Суфрен сообщили о переменности эмиссионной линии в спектре ядра сейфертовской галактики NGC 3516 (за 25 лет линия водорода H_β почти полностью исчезла). Годом раньше советские астрофизики Э.А. Дибай и В.Ф. Есипов обнаружили переменность резонансной линии ионизованного магния MgII в спектре квазара 3C345 за время порядка года. Вдохновленные этими результатами, В.М. Люты́й и автор настоящей статьи решили поискать быструю переменность линий в спектрах ядер сейфертовских галактик с теми же характерными временами, что и у звезд, то есть порядка нескольких суток. Такая переменность была обнаружена. Более того, оказалось, что переменность интенсивностей эмиссионных линий водорода повторяет переменность непрерывного спектра, но с запаздыванием Δt на время около трех недель (рис. 3).

Линии излучения водорода в ядрах сейфертовских галактик состоят из двух компонент: узкой (ширина

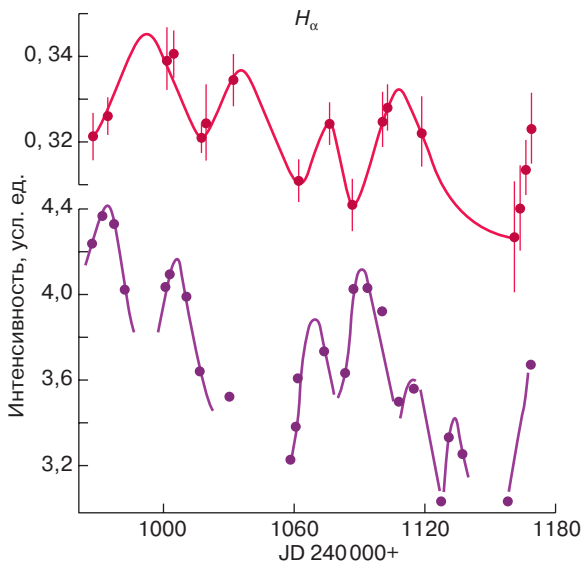


Рис. 3. Корреляция быстрой переменности эмиссионной линии H_{α} с переменностью непрерывного спектра в ядре сейфертовской галактики NGC 4151, найденная в 1970 году в работе В.М. Лютого и А.М. Черепашука. Вспышки в линии H_{α} (вверху) запаздывают на 20–25 дней относительно переменности непрерывного спектра (нижняя часть рисунка)

несколько сот км/с) и широкой (ширина несколько тысяч км/с). Плотность вещества в области формирования широкой компоненты эмиссионных линий выше, и быстрая переменность здесь более вероятна, поэтому за быструю переменность ответственна именно широкая компонента линий. Время запаздывания переменности интенсивности широкой компоненты эмиссионных линий относительно переменности непрерывного спектра было интерпретировано нами как время, обусловленное пролетом жесткого ионизирующего излучения, испускаемого центральным источником, до газовых облаков, излучающих широкую компоненту линий водорода. Тогда легко дать оценку верхнего предела для расстояния r газовых облаков от центра ядра галактики: $r < c\Delta t$. Точное значение величины r по наблюдаемому времени запаздывания Δt получается из решения задачи об исследовании структуры области возбуждения и ионизации газовых облаков под действием облучения их жестким излучением центрального источника.

Найденная нами быстрая переменность интенсивностей эмиссионных линий и эффект запаздывания переменности линий относительно непрерывного спектра были подтверждены в последующих работах других авторов. Более того, оказалось, что время запаздывания для линий с более высокими потенциалами ионизации меньше, чем для линий с низкими потенциалами

ионизации. Это говорит о стратификации излучения в ядерной области: облака, излучающие линии с высокими потенциалами ионизации, расположены ближе к центру ядра, чем облака, испускающие линейчатое излучение с низкими потенциалами ионизации. Такая стратификация излучения в газовых облаках ядерной области подтверждает модель, согласно которой именно жесткое излучение центрального источника является источником ионизации и возбуждения линий излучения.

Поскольку изучение переменности эмиссионных линий и эффекта запаздывания позволяет зондировать самые центральные области галактического ядра, в последние годы была развернута широкая международная программа изучения спектральной переменности активных ядер галактик как с помощью крупнейших наземных телескопов, так и с борта Космического телескопа им. Э. Хаббла. К настоящему моменту время запаздывания Δt переменности линий водорода относительно непрерывного спектра измерено примерно для двух десятков ядер активных галактик. Расстояние r газовых облаков, излучающих широкую компоненту линий, от центра ядра меняется в пределах 5–80 световых суток, или $1,3 \cdot 10^{16}$ – $2,1 \cdot 10^{17}$ см. Характерные скорости движения V газовых облаков оцениваются по полуширине широкой компоненты профиля эмиссионной линии водорода и лежат в пределах $V = 1800$ – 6200 км/с. Тогда, зная скорость движения газового облака и расстояние его от тяготеющего центра в предположении, что скорости движения газовых облаков не сильно отличаются от круговых, можно оценить массу центрального источника по формуле

$$M = \frac{\eta V^2 r}{G}, \quad (3)$$

где параметр $\eta = 1$ – 3 в зависимости от модели движения газовых облаков вокруг тяготеющего центра (случай $\eta = 1$ соответствует движению газовых облаков по круговым орбитам). В основу формулы (3) положен закон тяготения Ньютона. Это правомочно, поскольку радиус области излучения линий газовыми облаками много больше гравитационного радиуса, поэтому поправки за эффекты ОТО пренебрежимо малы. Такой метод оценки массы ядра активной галактики впервые был применен советским астрофизиком Э.А. Дибеем в 1981 году. Найденные по формуле (3) оценки масс ядер 17 активных галактик лежат в пределах от $8,0 \cdot 10^6$ до $9,0 \cdot 10^7$ солнечных масс (табл. 1).

Таблица 1. Массы ядер активных галактик, определенные по запаздыванию переменности эмиссионной линии водорода H_{β} относительно переменности непрерывного спектра

Галактика	r	$\Delta\lambda_{H\beta}$	$M_{\text{ядра}}$
3C 120	44	2300	$3,4 \cdot 10^7$
Ark 120	39	5450	$1,7 \cdot 10^8$
Fairall 9	23	4200	$5,9 \cdot 10^7$
Mrk 79	18	6200	$1,0 \cdot 10^8$
Mrk 110	20	2500	$1,8 \cdot 10^7$
Mrk 279	10	5360	$4,2 \cdot 10^7$
Mrk 335	17	1800	$8,0 \cdot 10^6$
Mrk 509	80	2800	$9,0 \cdot 10^7$
Mrk 590	21	2300	$1,6 \cdot 10^7$
Mrk 817	16	4100	$3,8 \cdot 10^7$
NGC 3227	17	3900	$3,8 \cdot 10^7$
NGC 3516	7	4760	$2,3 \cdot 10^7$
NGC 3783	8	2980	$1,0 \cdot 10^7$
NGC 4151	5	4670	$1,6 \cdot 10^7$
NGC 4593	4	3720	$8,1 \cdot 10^6$
NGC 5548	19	5610	$8,8 \cdot 10^7$
NGC 7469	5	3388	$9,1 \cdot 10^6$

Примечание. r – радиус области излучения в линии H_{β} (в световых днях), оцененный по времени запаздывания Δt , $\Delta\lambda_{H\beta}$ – полуширина широкой компоненты эмиссионной линии H_{β} (в км/с); $M_{\text{ядра}}$ – масса ядра галактики (в массах Солнца).

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАСС “СПОКОЙНЫХ” ЯДЕР ПО КИНЕМАТИКЕ ОКРУЖАЮЩИХ ИХ ЗВЕЗД

В описанном выше случае активных ядер галактик массы ядер определяются по светимости и переменности самого ядра. Мощное излучение активного ядра не позволяет исследовать распределение звезд и их скоростей вблизи ядра. Между тем, как отмечалось выше, галактики с активными ядрами составляют лишь малую долю (~1%) от общего числа галактик. В подавляющем большинстве случаев ядро галактики слабо выделяется на фоне соседних звезд. В этом случае появляется возможность изучать распределение и движение звезд вблизи ядра. Это дает возможность получить достаточно надежную динамическую оценку его массы.

Из спектральных и фотометрических наблюдений с высоким угловым разрешением можно найти распределение яркости $I(r)$ по поверхности галактики и распределение скоростей движения звезд (по доплеровским смещениям и уширению линий поглощения в суммарном спектре звезд галактики). Тогда из решения так называемого бесстолкновительного уравнения Больцмана для распределения звезд в коллективном гравитационном поле получается выражение для массы $M(r)$ внутри радиуса r от центра галактики. Таким образом можно оценить массу ядра и, что особенно

важно, определить отношение массы к светимости (в солнечных единицах) как функцию r . Для внеядерных областей галактик величина $M/L = 1-10$ (в солнечных единицах). В то же время для ядерных областей величина M/L может составлять многие десятки и сотни, что свидетельствует об избытке темной массы по сравнению со звездной компонентой. Это является дополнительным наблюдательным аргументом в пользу наличия черной дыры в ядре. Таким методом оценены массы примерно двух десятков ядер нормальных галактик (табл. 2). Например, для внешних частей галактики NGC 3115 ($r > 4''$) величина $M/L = 4$, но для $r < 2''$ $M/L = 50$, а масса ядра составляет $2 \cdot 10^9 M_{\odot}$. Достигнутое угловое разрешение позволяет для этой галактики заключить, что масса $2 \cdot 10^9 M_{\odot}$ заключена в объеме радиусом, не превышающим 1,7 пк, то есть средняя плотность вещества в этой области составляет $9,7 \cdot 10^7 M_{\odot}$ на кубический парсек. Заметим, что средняя плотность звезд в нашей Галактике в окрестностях Солнца составляет

Таблица 2. Массы ядер галактик, оцененные по кинематике звезд и газа вблизи ядра

Галактика	$M_{\text{ядра}}$	Радиус	Плотность	M/L
Наша Галактика	$2,6 \cdot 10^6$	0,006	$2,2 \cdot 10^{12}$	$>25-500$
M 31	$7,5 \cdot 10^7$	0,30	$6,6 \cdot 10^8$	>100
M 32	$3,4 \cdot 10^6$	0,30	$3,0 \cdot 10^7$	>20
M 33	$<5 \cdot 10^4$	$<0,30$	–	–
M 81	$4 \cdot 10^6$	2,6	$5,4 \cdot 10^4$	13
M 84	$1,5 \cdot 10^9$	8,1	$6,7 \cdot 10^5$	350
M 87	$3 \cdot 10^9$	3,5	$1,7 \cdot 10^7$	>110
NGC 205	$<9 \cdot 10^4$	0,35	–	–
NGC 1068	$1,7 \cdot 10^7$	0,65	$1,5 \cdot 10^7$	–
NGC 3079	$1,3 \cdot 10^6$	0,64	$1,2 \cdot 10^6$	–
NGC 3115	$2 \cdot 10^9$	1,7	$9,7 \cdot 10^7$	50
NGC 3377	$2,3 \cdot 10^8$	11,4	$3,7 \cdot 10^4$	>10
NGC 3379	$6 \cdot 10^7$	3,9	$2,4 \cdot 10^5$	–
NGC 4258	$3,6 \cdot 10^7$	0,012	$4,9 \cdot 10^{12}$	–
NGC 4261	$4,9 \cdot 10^8$	16,9	$2,4 \cdot 10^4$	2000
NGC 4342	$3,0 \cdot 10^8$	20,3	$8,6 \cdot 10^3$	–
NGC 4305	$<8 \cdot 10^4$	0,35	–	–
NGC 4486B	$6 \cdot 10^8$	12,2	$7,9 \cdot 10^4$	20
NGC 4594	$1 \cdot 10^9$	4,4	$2,8 \cdot 10^6$	>50
NGC 4945	$1,4 \cdot 10^6$	0,3	$1,2 \cdot 10^7$	–
NGC 6251	$7,5 \cdot 10^8$	44,4	$2,0 \cdot 10^3$	–
NGC 7052	$5 \cdot 10^8$	–	–	–
Circinus	$<4 \cdot 10^6$	11,0	–	–
Arp 102B	$2,2 \cdot 10^8$	0,0048	$4,7 \cdot 10^{14}$	–

Примечание. Масса ядра галактики $M_{\text{ядра}}$ – в массах Солнца M_{\odot} , радиус – в парсеках, плотность – в $M_{\odot}/\text{пк}^3$, M/L – в единицах M/L для Солнца.

$\sim 0,1 M_{\odot}$ на кубический парсек, то есть на девять порядков меньше.

Наиболее надежные и точные оценки масс ядер галактик получаются из прямых наблюдений вращательных скоростей газа вблизи ядра или измерений смещений индивидуальных звезд, обусловленных их движением вокруг ядра.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАССЫ ЯДРА ПО НАБЛЮДАЕМОЙ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ ОКРУЖАЮЩЕГО ЕГО ГАЗА

Наиболее надежные определения масс компактных объектов в ядрах галактик выполнены в последние годы с борта Космического телескопа им. Э. Хаббла и с помощью метода наземной радиоинтерферометрии со сверхдлинной базой (VLBI). В частности, для знаменитой галактики М 87, у которой из ядра вырывается яркий и протяженный джет, с борта телескопа им. Э. Хаббла группой Х. Форда (США) в 1994 году в центральной области размером $\sim 0,3''$ была обнаружена газовая спиральная структура, вращающаяся около ядра. Скорость вращения этой структуры, определенная спектроскопически по доплеровским сдвигам линий излучения

газа, составляет $V \approx 550$ км/с на линейном расстоянии от ядра $r = 6 \cdot 10^{19}$ см (~ 20 пк) (рис. 4).

В этом случае из условия равенства центростремительного ускорения и ускорения гравитационного притяжения

$$\frac{V^2}{r} = \frac{GM_{\text{ядра}}}{r^2}, \quad (4)$$

определяется масса ядра $M_{\text{ядра}}$:

$$M_{\text{ядра}} = \frac{rV^2}{G}, \quad (5)$$

которая составляет $M_{\text{ядра}} = 3 \cdot 10^9 M_{\odot}$. При этом отношение массы к светимости для ядра составляет $M/L > 110$, верхняя граница радиуса ядра составляет 3,5 пк, а средняя плотность ядра $1,7 \cdot 10^7$ солнечных масс на кубический парсек, что на восемь порядков выше средней плотности неядерных областей этой галактики.

Еще более впечатляющие результаты были получены в 1995 году группой Дж. Морана (США) по определению массы ядра галактики NGC 4258 (также имеющей релятивистский джет). Используя глобальную сеть наземных радиотелескопов в режиме гигантского

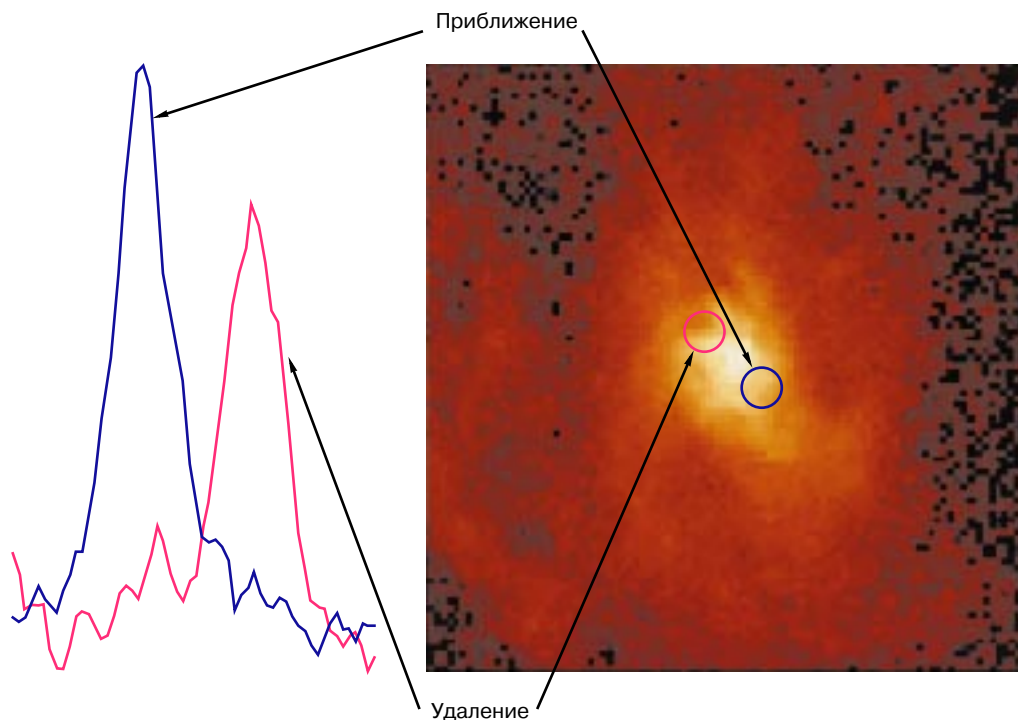


Рис. 4. Спектр различных частей газового диска, окружающего ядро галактики М 87, полученный с борта Космического телескопа им. Э. Хаббла. Из-за вращения газа вокруг черной дыры линии излучения различных частей диска испытывают доплеровское смещение. Скорость вращения газа вокруг черной дыры на расстоянии 20 пк составляет 550 км/с. Соответствующая масса черной дыры равна $3 \cdot 10^9$ солнечных масс

интерферометра, авторы изучили распределение компактных мазерных источников, излучающих очень узкие и мощные спектральные линии в ближайших окрестностях ядра этой галактики с очень высоким спектральным и угловым разрешением $\sim 0,001$. Оказалось, что 17 обнаруженных компактных мазерных источников, излучающих чрезвычайно узкие и мощные линии водяного пара, расположены в дискообразной структуре радиусом $r \approx 10^{17}$ см, видимой почти с ребра. Семнадцать точечных мазерных источников лежат в плоскости диска, вращающегося вокруг ядра по кеплеровскому закону (то есть линейная скорость V в диске подчиняется закону $V \sim \frac{1}{\sqrt{r}}$). Масса ядра для NGC 4258

составляет $3,6 \cdot 10^7 M_{\odot}$, верхний предел радиуса ядра 0,012 пк, средняя плотность ядра $4,0 \cdot 10^{12}$ солнечных масс на кубический парсек, что более чем на 13 порядков превышает среднюю плотность звезд вне ядерной области галактики!

Оба приведенных примера весьма показательны. Они свидетельствуют о том, что в ядрах галактик имеются сверхмассивные компактные темные тела, которые по всем наблюдательным признакам, скорее всего, являются черными дырами. Но самые убедительные свидетельства в пользу наличия черных дыр в ядрах галактик были получены в последние годы при изучении движения отдельных звезд вблизи ядра нашей Галактики.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАССЫ ЯДРА НАШЕЙ ГАЛАКТИКИ ПО ДВИЖЕНИЮ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ЗВЕЗД

В 1996 году была опубликована работа германских астрономов А. Экарта и Р. Генцеля, которые в течение трех лет наблюдали с высоким угловым разрешением центр нашей Галактики в инфракрасном диапазоне (ядро Галактики скрыто для земного наблюдателя мощным слоем межзвездной пыли, и только в инфракрасном диапазоне, для которого пыль прозрачна, можно непосредственно увидеть звезды вблизи ядра). В результате за три года наблюдений авторы смогли непосредственно увидеть и измерить перемещения звезд вблизи ядра Галактики, скорости которых достигали многих сотен км/с.

Была измерена дисперсия скоростей собственных движений звезд как функция их расстояния до ядра Галактики, которая прекрасно согласуется с дисперсией лучевых скоростей звезд, измеренных спектральным методом. Это доказывает, что распределение скоростей звезд вблизи ядра изотропно, что прекрасно согласуется с теорией. Сравнение наблюдаемого распределения дисперсии скоростей звезд вблизи ядра с теоретическим (рис. 5) позволяет дать надежную оценку

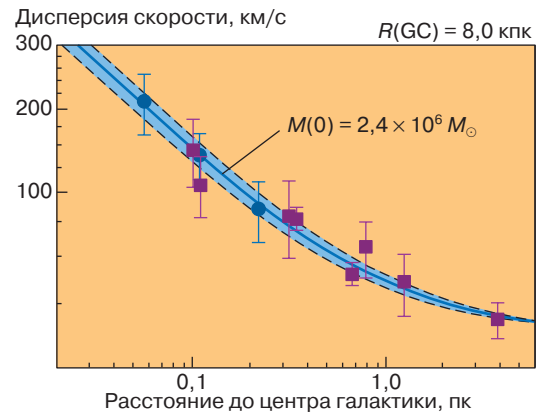


Рис. 5. Дисперсия лучевых скоростей звезд (квадратики) и скоростей собственных движений звезд в картинной плоскости (кружки) как функция расстояния до центра нашей Галактики. Сильное возрастание дисперсии скоростей с приближением к центру Галактики свидетельствует о наличии в ядре Галактики черной дыры с массой $2,4 \cdot 10^6$ солнечных масс

массы центрального ядра Галактики, которая составляет $2,4 \cdot 10^6 M_{\odot}$. Оцененный при этом верхний предел на радиус ядра Галактики составляет 0,006 пк, отношение массы к светимости $M/L > 25-500$, а средняя плотность ядра $2,2 \cdot 10^{12}$ солнечных масс на кубический парсек, что, как и в случае NGC 4258, на 13 порядков выше средней плотности неядерных областей Галактики.

Суммируя изложенное, можно заключить, что для 41 галактики (см. табл. 1 и 2) к настоящему времени известны надежные оценки масс и характерных размеров ядер. Эти оценки делают весьма вероятной гипотезу о том, что в ядрах галактик находятся сверхмассивные черные дыры.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как и в случае черных дыр звездной массы, мы не можем считать окончательно доказанным существование сверхмассивных черных дыр в ядрах галактик, поскольку для такого доказательства требуется выполнение не только необходимых, но и достаточных критериев, предоставляемых ОТО А. Эйнштейна. Существование черных дыр можно было бы считать доказанным, если бы из наблюдений удалось показать, что радиус массивного тела равен его гравитационному радиусу $r_g = \frac{2GM}{c^2}$.

Как отмечалось выше, современные оценки верхних пределов для характерных размеров компактных объектов примерно на порядок больше, чем величины их гравитационных радиусов.

Приведем новые наблюдательные факты, дополнительно свидетельствующие о наличии в ядрах галактик сверхмассивных черных дыр.

Ввиду большого отношения массы к светимости $M/L > 100$ для ядер галактик отвергается модель скопления обычных звезд в ядре: если бы ядро было плотным скоплением обычных звезд типа Солнца, оно бы светило по крайней мере в 100 раз ярче, чем наблюдается. Из моделей, альтернативных сверхмассивной черной дыре, остается следующая: скопление темных тел (белых карликов, коричневых карликов, нейтронных звезд и черных дыр звездной массы). Как недавно было показано рядом теоретических групп, скопление темных тел в ядре галактики при плотности больше 10^{12} солнечных масс на кубический парсек испаряется за счет коллективных взаимодействий в суммарном гравитационном поле за время порядка 10^8 лет, что на два порядка меньше возраста галактик. Поэтому по крайней мере в двух случаях: ядро нашей Галактики и ядро галактики NGC 4258 (см. табл. 2), где измеренная плотность больше 10^{12} солнечных масс на кубический парсек, остается возможность только сверхмассивной черной дыры.

Рентгеновские наблюдения ядер галактик, выполненные с высоким спектральным разрешением с борта японской орбитальной обсерватории “Аска”, позволили построить средний профиль линии излучения 24-кратно ионизованного железа Fe XXV на энергии 6,7 кэВ. Оказалось, что профиль этой линии состоит из двух компонент: узкой, имеющей стандартную энергию 6,7 кэВ и широкой, смещенной в низкоэнергичную часть спектра. Величина этого смещения в модели гравитационного красного смещения соответствует расположению горячего газа, излучающего в рентгеновском диапазоне, на расстоянии всего в шесть гравитационных радиусов от центрального объекта. Скорость движения горячего газа на этом расстоянии, оцениваемая по ширине широкой компоненты профи-

ля линии FeXXV, равна 100 000 км/с, или 1/3 скорости света! Эти факты прекрасно согласуются с моделью сверхмассивной черной дыры в ядрах галактик.

Замечательно то, что намечается корреляция между массой сверхмассивной черной дыры в ядре галактики и массой галактического балджа – центрального сгущения звезд, окружающего ядро: чем больше масса балджа, тем больше масса центральной черной дыры. Наблюдения приводят к важному выводу о том, что около 1% вещества балджа галактики сформировалось в центральную черную дыру, а остальные 99% – звезды, газ и пыль балджа. Этот фундаментальный наблюдательный факт накладывает ограничения на механизмы образования сверхмассивных черных дыр в ядрах галактик.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Гинзбург В.Л. О физике и астрофизике. М.: Бюро “Квантум”, 1995.
2. Черепашук А.М. Черные дыры в двойных звездных системах // Соросовский Образовательный Журнал. 1997. № 3. С. 87–93.
3. Новиков И.Д. Черные дыры и Вселенная. М.: Мол. гвардия, 1985.
4. Лютый В.М., Черепашук А.М. Новое о спектрах ядер активных галактик // Земля и Вселенная. 1990. № 4. С. 3.
5. Воронцов-Вельяминов Б.А. Внегалактическая астрономия. М.: Наука, 1978. С. 298.

Рецензент статьи А.В. Засов

* * *

Анатолий Михайлович Черепашук, доктор физико-математических наук, профессор, зав. кафедрой астрофизики и звездной астрономии физического факультета МГУ, директор Государственного астрономического института им. П.К. Штернберга МГУ, член-корреспондент РАН. Область научных интересов – физика тесных двойных звезд, обратные задачи астрофизики. Автор свыше 250 научных работ и десяти монографий.