

Определение основных параметров сверхмассивных черных дыр

Ю.Н. ГНЕДИН,
доктор физико-математических наук
Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН
С.А. ГЕРАСЮТИН

Международная космическая рентгеновская обсерватория “Интеграл” (“Integral” – INTERNATIONAL Gamma Ray Astrophysical Laboratory), запущенная 17 октября 2002 г. с помощью российской ракеты-носителя “Протон”, внесла существенный вклад в исследование и наше понимание физики активных ядер галактик (которые и являются по существу сверхмассивными черными дырами с массами 10^5 – $10^{10} M_{\odot}$ и величиной гравитационного радиуса 3×10^5 – 10^{10} км; Земля и Вселенная, 2003, № 2; 2014, № 5). Выполненные обсерваторией измерения жесткого рентгеновского излучения активных ядер



галактик с энергией до 8–10 МэВ открыли новые возможности для определения основных параметров сверхмассивной черной дыры: масса, величина углового момента вращения, получившего название “спин”, радиус области образования

широких эмиссионных линий в аккреционном диске. Именно данные о рентгеновской светимости сверхмассивной черной дыры в жестком рентгеновском диапазоне составляют основу определения ее основных физических параметров.



Космическая обсерватория "Интеграл": основные детекторы излучения: IBIS – гамма-телескоп, SPI – рентгеновский спектрометр, JEM-X – рентгеновский монитор для получения изображения неба, OMC – оптический монитор для получения изображения неба в оптических лучах. Рисунок ESA.

КОСМИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ "ИНТЕГРАЛ"

Данные космических рентгеновских обсерваторий за последние 40 лет показывают, что небо в рентгеновских лучах существенно отличается от того небесного свода, который мы наблюдаем с помощью оптических телескопов (Земля и Вселенная, 2014, № 4). Тогда как в обычном ночном небе преобладают классические звезды; в рентгеновском небе главными

объектами являются двойные системы, содержащие нейтронные звезды и черные дыры (ЧД), а также остатки сверхновых звезд. Выдающееся достижение астрономии состоит в открытии других исключительно мощных источников рентгеновского излучения: например, сверхмассивных черных дыр (СЧД), находящихся в центре каждой галактики.

Замечательно, что обсерватория "Интеграл" уже в течение 15 лет обес-

печивает астрономическую общественность исключительно ценными данными наблюдений. Она открыла множество рентгеновских источников по всему небу, а также детально сканировала отдельные участки неба. Кроме того, она эффективно исследовала центральную полосу диска нашей Галактики в пределах $\pm 20^\circ$ (Земля и Вселенная, 2007, № 6; 2010, № 1). Данные наблюдений получены с такой высокой

точностью, которая до сих пор не превзойдена другими действующими рентгеновскими обсерваториями. Главным достижением обсерватории “Интеграл” является получение исключительно ценных данных о локальной популяции активных галактических ядер, в центре которых и находятся СЧД.

Серьезные успехи и научные открытия, полученные предшествующими обсерваториями, подвели ученых к мысли о создании полноценной космической лаборатории, действующей в диапазоне жесткого электромагнитного излучения. Это позволило не только моделировать изображение неба в рентгеновских лучах, но и проводить спектральный и временной анализ рентгеновских объектов в широком диапазоне энергий, включая миллионы электрон-вольт. Так была соз-

дана концепция международной астрофизической лаборатории “Интеграл” – совместного проекта Европейского и Российского космических агентств. Благодаря активному участию нашей страны в этом проекте российские ученые получили 25% времени для проведения собственных наблюдений.

На борту обсерватории функционируют приборы: гамма-телескоп IBIS с детекторами общей площадью около 2500 см², рентгеновский спектрометр SPI с высоким энергетическим разрешением и рентгеновский монитор JEM-X, осуществляющий восстановление изображения неба, полученного с использованием специальной аппаратуры. Широкое поле зрения, высокая чувствительность, длительное время работы на орбите и успешное функционирование научной аппаратуры

позволили не только детально исследовать отдельные объекты, но и реализовать большую программу глубоких обзоров всего неба и его областей, включающих Галактическую плоскость и центр нашей Галактики, а также Большое Магелланово Облако и ряд других близких галактик.

Анализ полученных данных позволил открыть множество новых источников жесткого рентгеновского излучения, в результате чего более чем в два раза увеличилось число ранее обнаруженных источников. В отличие от работы с использованием предыдущих космических обсерваторий, задействованных ранее в таких исследованиях, открытое с помощью “Интеграла” подавляющее большинство новых источников составляли галактические и СЧД, аккрецирующие белые карлики, нейтронные звезды.

Таблица 1

ЭНЕРГЕТИКА АСТРОФИЗИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Астрофизический объект или явление	Мощность излучения, эрг/с	Эквивалентная мощность ядерных бомб	Характерное время длительности излучения
Ядерная бомба	10^{28}	1	10^{-6} с
Вспышка на Солнце	10^{30}	100	100 с
Звезда типа Солнца	10^{33}	10^5	10^9 лет
Звездная супервспышка	$10^{33}-10^{38}$	10^5-10^{10}	часы – сутки
Вспыхивающая рентгеновская звезда	$10^{37}-10^{39}$	10^9-10^{11}	сутки – месяцы
Сверхновая	10^{44}	10^{16}	месяцы
Космический гамма-всплеск	$10^{50}-10^{52}$	$10^{22}-10^{24}$	1–100 с
Наша Галактика	10^{44}	10^{16}	10^9 лет
Ядро активной галактики. Квазар	$10^{45}-10^{49}$	$10^{17}-10^{21}$	10^9 лет

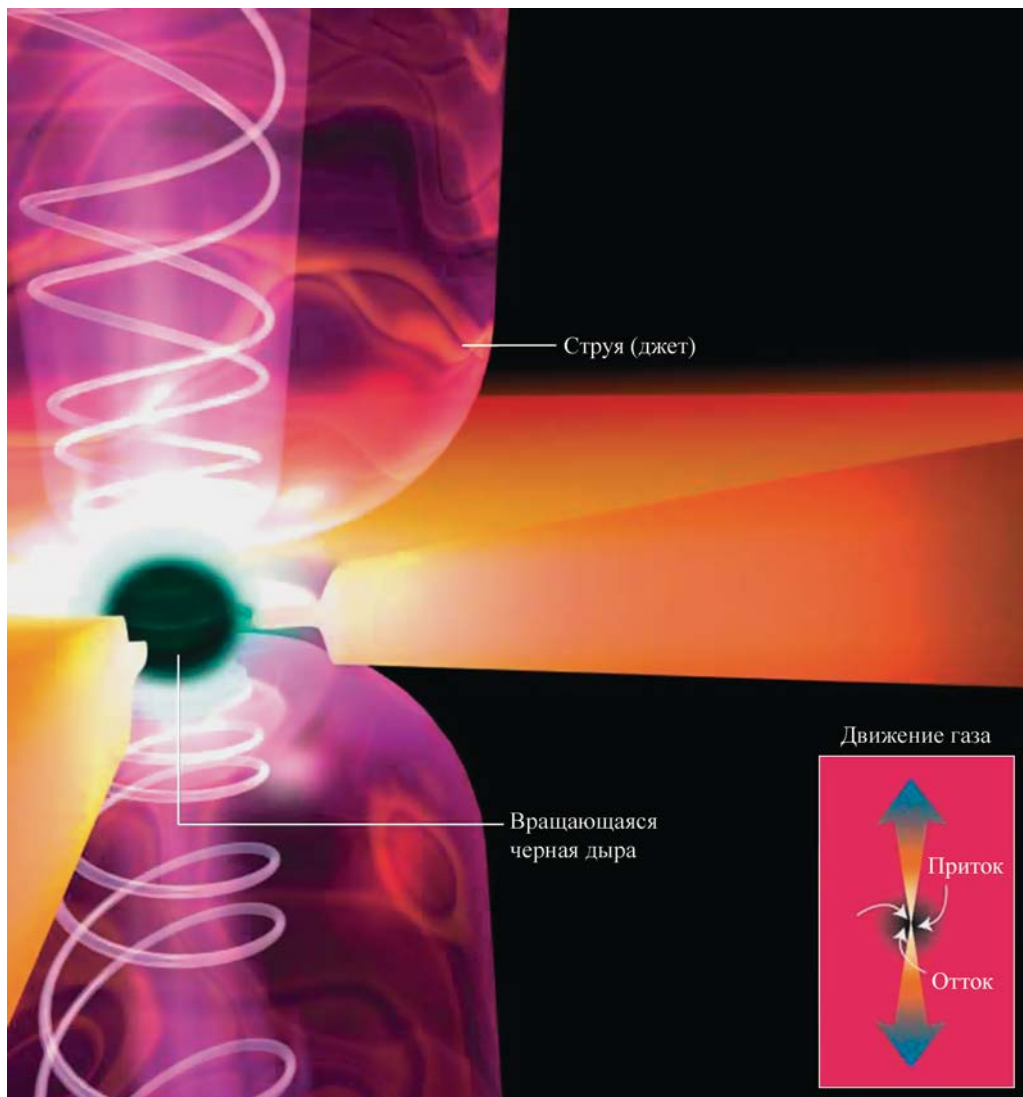


Схема вращения черной дыры. Падающее на нее вещество из звезды-компаньона передает свое вращение дыре, раскручивая ее внешнюю границу почти до скорости света; в результате из черной дыры выбрасываются струи плазмы – джеты. Рисунок NASA.

СВЕРХМАССИВНЫЕ ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ

Самые мощные космические источники энергии – СЧД – выделяют примерно 10^{48} эрг/с. Такая огромная энергия возникает в процессе аккреции на эти ЧД. Аккрецию

можно заметить по множеству проявлений, в том числе наблюдая образование релятивистской струи плазмы (джета), вылетающей в сторону от ядра со скоростью, близкой к скорости света. Релятивистский поток продолжается, по

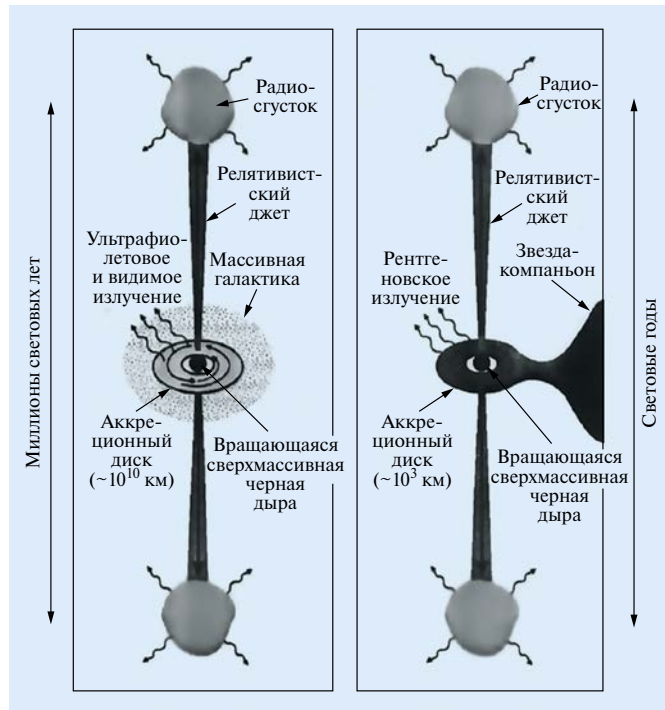
меньшей мере, на расстоянии в несколько килопарсек от ЧД. Выброс релятивистского джета – это универсальный физический процесс, так как джеты вылетают из активных галактических ядер, квазаров или тесных двойных

Наблюдаемые астрофизические объекты: квазары – мощные сверхмассивные черные дыры, микроквазары – черные дыры, имеющие звездные массы. Рисунок NASA.

систем, содержащих черные дыры и нейтронные звезды. Наиболее мощные струи характерны для СЧД. Природа физического механизма генерации таких струй релятивистской плазмы до сих пор не известна.

Современное представление об аккреционном диске как области, окружающей ЧД с магнитным полем вокруг ЧД, – наиболее популярная физическая модель. Взаимодействие между быстро вращающейся черной дырой и окружающим ее аккреционным диском и приводит к генерации рентгеновского и гамма-излучений в квазарах и активных ядрах галактик.

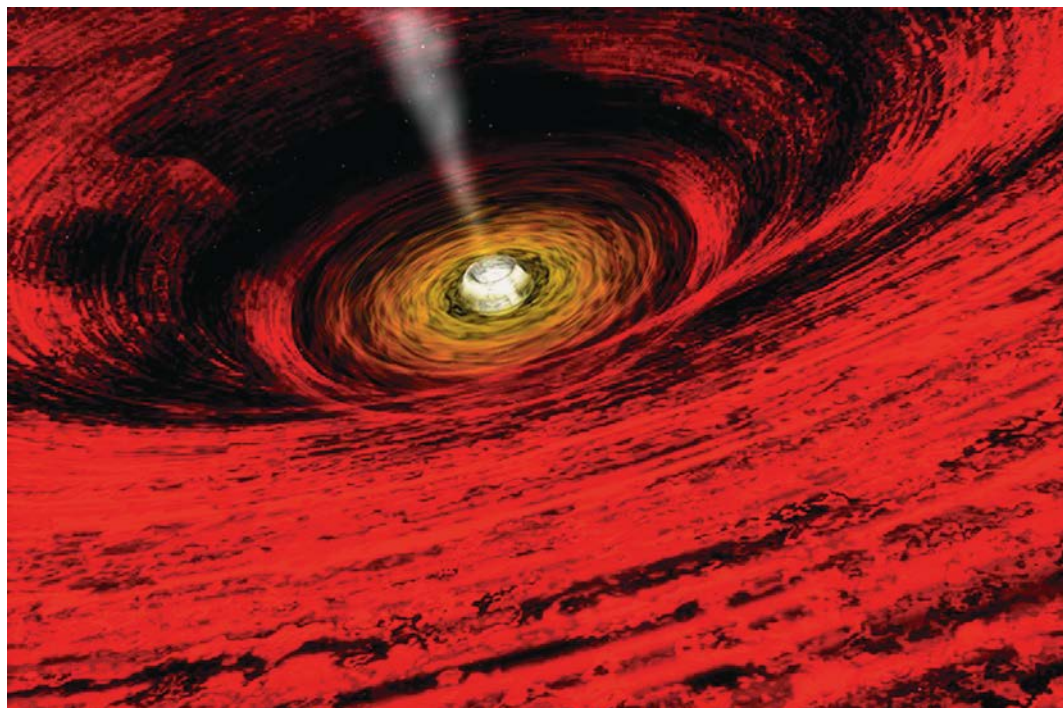
В настоящее время надежно установлено, что активность окологалактической области во многих галактиках обусловлена присутствием СЧД в центральных областях таких галактик. Движение газа и отдельных звезд вблизи центрального объекта галактики происходит под действием гравитации СЧД. Контролируемое гравитационное движение газа вблизи центральной черной дыры позволяет использовать теорему



вириала (связь между средним значением суммарной кинетической энергии системы частиц, движущихся в ограниченной области пространства, и действующими в этой системе силами установлена немецким физиком Р. Клаузиусом в 1870 г.) для оценки ее массы. В этом случае существует определенное соотношение между скоростью движения газа и радиусом аккреционного диска типа $V^2 : R^{-1}$, устанавливающее равенство между кинетической и потенциальной энергиями частицы в гравитационном поле. Величина скорости газа V определяется в результате измерения ширины широких эмиссионных линий.

Разнообразие физических условий в центральной области вокруг СЧД проявляется на характерной шкале расстояний R от центральной ЧД вплоть до $R = 100 R_g$, где $R_g = GM_{BH}/c^2$ – гравитационный радиус. Астрофизики пользуются наиболее популярным методом для определения радиуса области широких эмиссионных линий – измеряют корреляции между изменениями интенсивностей эмиссионных линий и непрерывным спектром излучения аккреционного диска.

Детальная картина физических условий в ближайшем окружении ЧД требует для своего описания реального понима-



Струя релятивистской плазмы, генерируемая вращающейся сверхмассивной черной дырой. Рисунок ESA.

ния механизма превращения гравитационной энергии аккрецирующего вещества в энергию излучения области, окружающей СЧД, включая область образования эмиссионных линий. Пока невозможно получить прямое изображение околоядерной области с помощью современных методов наблюдений. В этом случае большое значение приобретают косвенные методы, основанные на определении параметров характерных околоядерных областей излучения.

Главная задача современной астрофизики – определить массу СЧД

на основе упомянутой выше вириальной теоремы. Величина характерной скорости движения газа определяется в результате измерения ширины спектральных линий атомов газа, которая зависит от этой скорости, а величина самого радиуса – в результате измерения временной разницы амплитуд переменной излучения атомов газа и аккреционного диска, которую нужно умножить на скорость света.

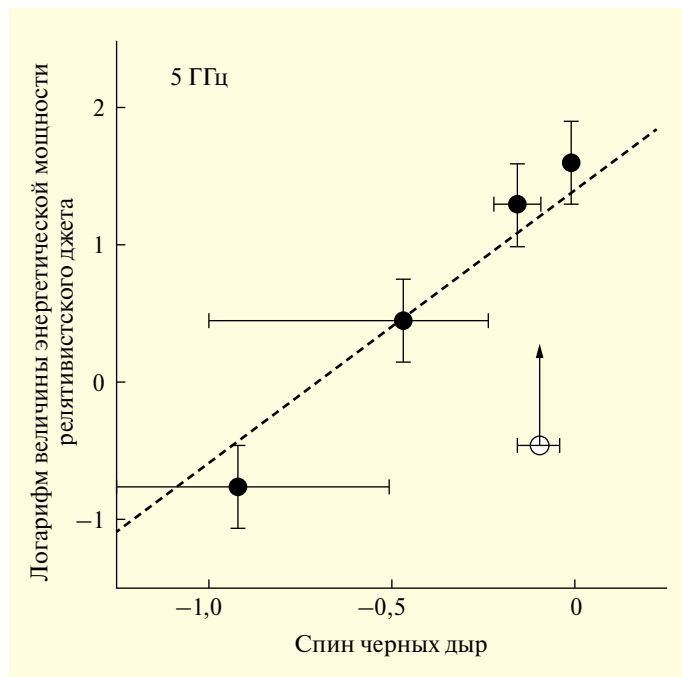
Астрофизики разработали довольно много методов для определения массы черной дыры. Оказалось, что характерный

радиус области широких эмиссионных линий аккрецирующего газа зависит от светимости аккреционного диска. Светимость, как правило, измеряется в определенном диапазоне длин волн электромагнитного излучения. С этой целью вполне успешно используется именно рентгеновское излучение довольно жесткого спектрального диапазона, измеряемое с помощью космической обсерватории “Интеграл”. Что касается полной ширины линии излучения атома или иона газа, используемой для определения массы СЧД, то наиболее часто

График зависимости мощности релятивистских струй (джетов) от величины спина аккрецирующей черной дыры. По данным А.М. Черепашука // Успехи физических наук. Т. 186. С. 878.

с этой целью используются бальмеровские линии атома водорода ($\lambda = 656,3$ нм и $\lambda = 486,1$ нм; $E = 1,89$ эВ и $2,55$ эВ) и линии высокоионизованных элементов магния ($\lambda = 279,5$ нм) и углерода ($\lambda = 154,9$ нм). Типичная величина измеренной кеплеровской скорости движения газа составляет несколько тысяч километров в секунду, а рентгеновская светимость (L_x), как правило, относится к области энергий, существенно превышающих величину 2 кэВ. В астрофизике принято измерять массу ЧД в величинах массы Солнца.

Другой важнейший физический элемент действующей ЧД – безразмерный угловой момент вращения ЧД, называемый спином. Традиционно величину спина принято обозначать буквой “ α ”; величина спина находится в интервале от минус единицы до плюс единицы. Положительные значения спина соответствуют ситуации, когда вращение черной дыры и газа в аккреционном диске происходит в одном и том



же направлении; отрицательные соответствуют противоположной ситуации: когда сама черная дыра и газ в аккреционном диске вращаются в противоположных направлениях.

Скорость вращения СЧД в центрах галактик может увеличиваться за счет падающего на них газа. Вращающаяся ЧД имеет радиус горизонта событий, превышающий гравитационный радиус, на котором вторая космическая скорость равна скорости света; поэтому, согласно теории относительности Эйнштейна, ЧД никогда не раскрутится до скорости света – сколько бы газа она не поглотила. Но многие ЧД вращаются достаточно быстро, что

способствует образованию исходящих от них мощных струй (джетов). Такой способностью обладают и ЧД, масса которых лишь в десятки, а не в миллиарды раз больше солнечной. Они тоже могут выбрасывать мощные струи со скоростью, близкой к скорости света, разогревая и расталкивая окружающий газ.

Очень важно, что вращение ЧД определяет во многом энергетику космического объекта. Так, мощность сильной струи релятивистской плазмы, которую создает вращающаяся ЧД, зависит от величины спина, она пропорциональна α^2 . Другое ее важное свойство – она определяет, как распределяется газ в аккреционном

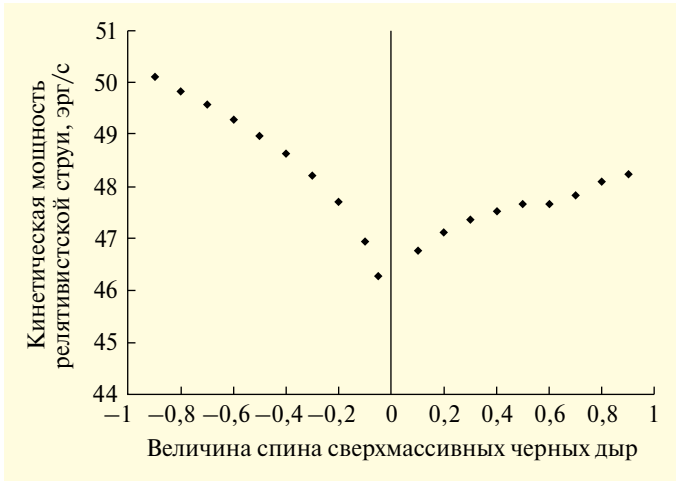


График зависимости кинетической мощности струи релятивистской плазмы от величины спина сверхмассивной черной дыры. Представлены результаты численных расчетов, выполненных в 2010 г. группой зарубежных астрофизиков под руководством профессора Д. Гарофало (США).

диске. Радиус последней устойчивой орбиты вращающегося по закону Кеплера газа в аккреционном диске – существенный физический элемент аккреционного диска. Последняя устойчивая орбита является

внутренней границей аккреционного диска, ее радиус зависит от массы ЧД и от ее спина. За этой границей газ без кеплеровского вращения и излучения стремительно движется к самой ЧД и уходит внутрь.

Определение величины спина – очень важная задача для понимания физического механизма действия мощной энергетической машины – СЧД.

Наиболее популярный метод определения спинов СЧД основан на измерении профиля рентгеновской линии излучения железа (К-альфа), она имеет энергию 6,4 кэВ. Конечно, чтобы точно установить величину спина, необходимо получить детальную картину спектрального распределения излучения как в самой линии, так и в ее ближайшей окрестности. Прежде всего, быстро вращающаяся ЧД дополнительно расширяет рентгеновскую линию. От величины спина ЧД зависит характерный внутренний радиус аккреционного

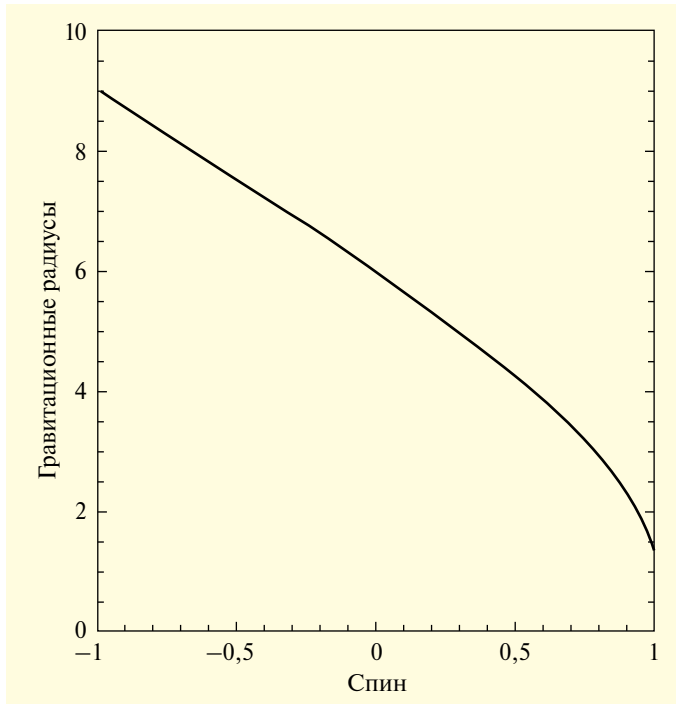


График зависимости радиуса последней устойчивой орбиты в аккреционном диске от спина сверхмассивной черной дыры. По данным J.E. McClintock et al. // arXiv: 1101.0811, 2011.

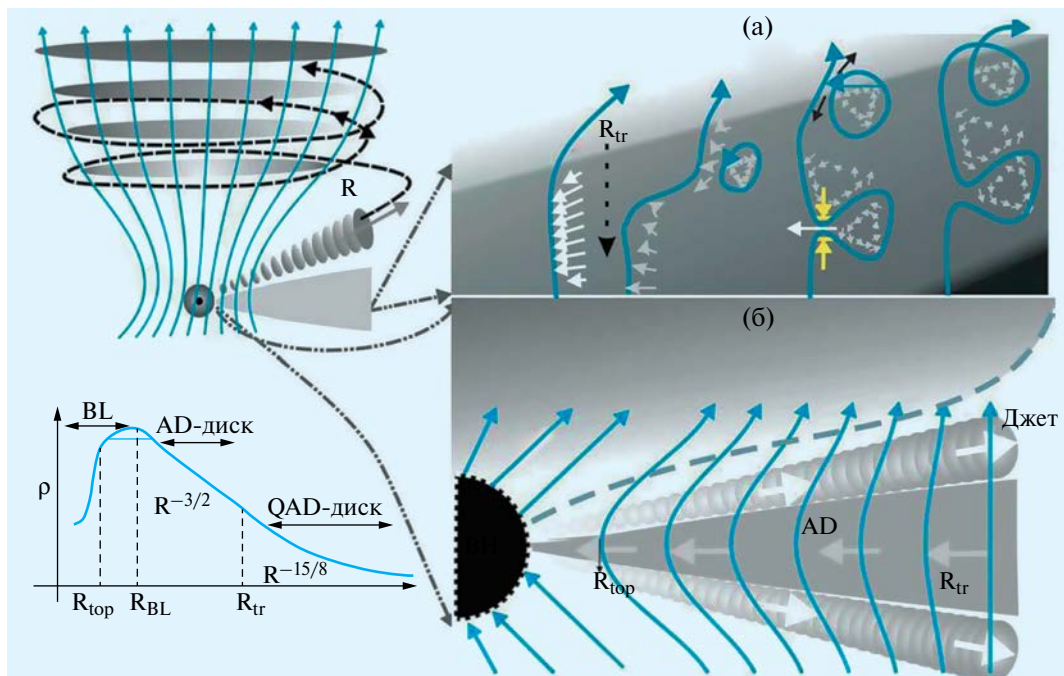


Схема стандартного аккреционного диска (AD), содержащего внутреннее магнитное поле. Модель Н.И. Шакуры и Р.А. Сюняева. Вверху слева – выброс релятивистской плазмы из ЧД (она обозначена кружком, серый конус справа – аккреционный диск, справа – схема аккреционного диска). Внизу слева – график распределения плотности газа в аккреционном диске в зависимости от его размера; (а) – стандартный аккреционный диск с магнитным полем, (б) – диск с горячей короной (стрелки показывают направления силовых линий магнитного поля). Обозначения: BL – область эмиссионных водородных линий, QAD – протяженный диск, R – радиус.

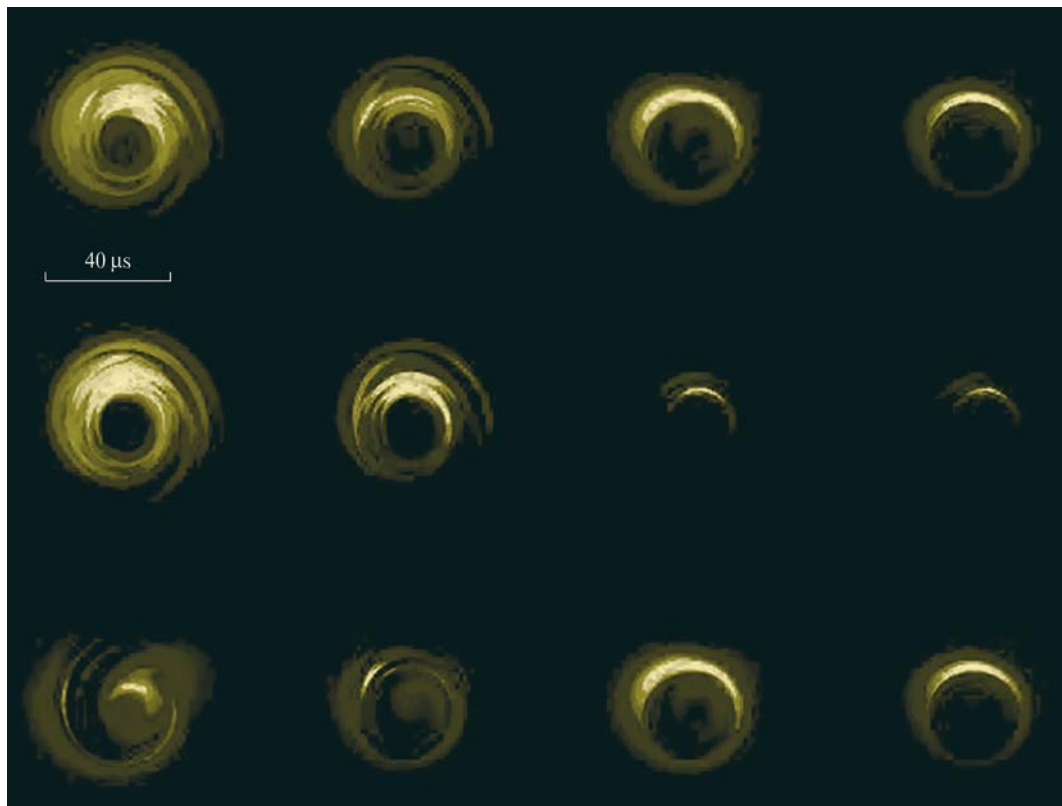
диска, вблизи которого и генерируется спектральная линия.

Другой довольно эффективный метод определения величины спина основан на определении энергетической мощности струи релятивистской плазмы (общепринятый термин – джет), которая генерируется совместно вращающейся ЧД и аккреционным диском. Оказывается, что величина кинетической мощности релятивистской струи пропорциональна

величине спина ЧД, возведенной в квадрат, и величине магнитного поля на горизонте событий ЧД, тоже возведенной во вторую степень. При определении величины кинетической мощности джета астрофизики используют численный коэффициент порядка единицы, который зависит от физического механизма, обеспечивающего генерацию релятивистской струи плазмы ЧД.

Оба метода имеют свои преимущества

и недостатки. Недостатком первого метода считается не всегда удачное определение реальной формы спектральной линии на основе данных наблюдений, поскольку ее истинная форма позволяет определить радиус последней устойчивой орбиты в аккреционном диске и на этой основе измерить спин. Главный недостаток второго метода заключается в недостаточно разработанных методиках определения кинетической мощности



Окрестности сверхмассивной черной дыры в центре галактики M87 (NGC 4486), расположенной в созвездии Дева. Изображения показывают изображения окрестностей центральной ЧД, полученные по разным моделям, рассчитанными астрофизиками. По данным А.М. Черепашука // *Успехи физических наук*. 2016. Т. 185. С. 878.

релятивистской струи, в особенности, величины магнитного поля на радиусе горизонта событий ЧД; они приводят к существенно различным результатам.

Сравнительно недавно ученые разработали новый метод определения величины спина вращающейся СЧД на основе теории стандартного аккреционного диска, развитой Н.И. Шакурой и Р.А. Сюняевым; астрофизики вывели уравнение, которое позволяет определить ве-

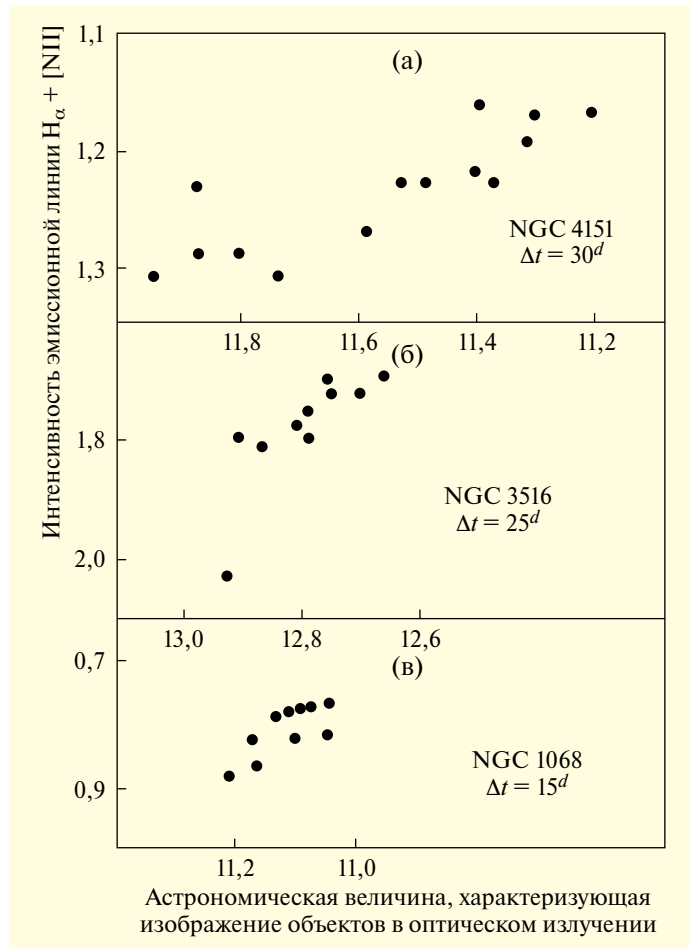
личину спина. Основными физическими параметрами, входящими в это уравнение, являются: L_{HX} – светимость объекта в жестком рентгеновском диапазоне (14–195 кэВ), L_{bol}/L_{Edd} – широко используемое в астрономии отношение полной (астрофизики называют ее болометрической) светимости объекта к так называемой эддингтоновской светимости, при которой давление световой энергии объекта сравнивается с давлением гравитирующего

вещества. Существенную роль играет величина $\mu = \cos i$ – значение косинуса угла наклона луча зрения к поверхности аккреционного диска. Другим наиболее важным элементом в физике процесса аккреции считается величина $\varepsilon(\alpha)$, которая равна отношению между величинами полной светимости и скорости аккреции (измеряется в г/с), умноженной на квадрат скорости света. Ее принято называть коэффициентом радиационной эффективности;

График корреляции между величинами интенсивности эмиссионной водородной бальмеровской линии и непрерывным излучением в ядрах активных галактик NGC 4151 (а), NGC 3516 (б), NGC 1068 (в). По данным А.М. Черепашука // Успехи физических наук. 2016. Т. 186. С. 878.

он определяет эффективность перехода гравитационной энергии в энергию излучения аккреционного диска. Существенно, что этот коэффициент зависит от спина черной дыры и характер этой зависимости представлен, например, в известной монографии И.Д. Новикова и К. Торна ("Астрофизические черные дыры", 1973 г.).

Важнейший элемент для измерения углового момента (спина) вращающейся ЧД – светимость аккреционного диска L_{HX} в жестком рентгеновской диапазоне. Опубликовано много каталогов данных рентгеновских наблюдений, в которых представлены значения светимости в области 14–195 кэВ рентгеновского излучения многих активных ядер галактик. Теперь перейдем к решению другой задачи – определению величины спина вращающейся СЧД для ряда конкретных объектов.



ОПРЕДЕЛЕНИЕ СПИНА СЧД

Спины СЧД – это уникальные физические величины – так как от них зависит мощность узких релятивистских струй, генерируемых этими объектами, причем роль таких струй в развитии самой галактики, в центре которой и находится СЧД, исключительно велика. Установлено, что струи влияют на процесс рождения звезд в самой галактике. Поэтому знание о величинах

спинов СЧД очень важно. И здесь большую роль могут сыграть данные об излучении аккреционных дисков вокруг ЧД в жестком рентгеновском диапазоне, полученные с помощью космической обсерватории "Интеграл". Используя их, мы можем найти значение величины спина, определяющего скорость вращения СЧД для конкретных объектов Вселенной.

Продемонстрируем результат определения

величины спина СЧД на примере галактики Маркарян 110 (Mrk 110), которая находится от нас на расстоянии в 153,6 млн пк ($1 \text{ пк} = 3 \times 10^{16} \text{ м}$). Подчеркнем, что такое название присвоено нескольким галактикам в честь советского астронома Б.Е. Маркаряна (1913–1985), изучавшего активные галактики и составившего их детальный каталог. Такое название было присвоено особому классу галактик; в окрестностях ядер таких активных галактик наблюдается яркий выброс, состоящий из нескольких сгустков. Например, для активной сверхгигантской эллиптической галактики M87 (NGC 4486, Дева А; 53,5 млн св. лет от нас), имеющей радиус 147 тыс. св. лет и находящейся в созвездии Девы в локальной Вселенной, масса выброшенного вещества составляет $10^7 M_{\odot}$, скорость выброса – 3000 км/с, а его энергия равна 10^{55} Дж. Большую роль в формировании такого выброса играет именно струя релятивистской плазмы, простирающаяся как минимум на 4900 св. лет, образованная быстровращающейся СЧД, величина спина которой близка к единице.

Вернемся к объекту Mrk 110 и определим коэффициент радиационной эффективности его аккреционного диска $\varepsilon(\alpha)$,

существенно зависящий от величины спина вращающейся ЧД. Чтобы выполнить такое определение, необходимо знать скорость процесса аккреции и величину полной светимости аккреционного диска. Для этого необходимо знать, под каким углом наш телескоп “смотрит” на поверхность аккреционного диска.

Данные о таком важном параметре, как $\mu = \cos i$, где i – угол наклона диска к лучу зрения, могут быть получены на основе наблюдений собственной поляризации излучения астрономического объекта с плоскопараллельной атмосферой. Понятие поляризации электромагнитного излучения связано с направлением электрического вектора распространяющейся электромагнитной волны, перпендикулярным ее направлению. В итоге направленное излучение может иметь два взаимно перпендикулярных направления электрического вектора, причем интенсивности электромагнитных волн с такими направлениями могут не совпадать по величине. Именно такая ситуация происходит при рассеянии электромагнитного излучения на электронах. В тех случаях, когда интенсивности электромагнитного излучения в таких двух направлениях совпадают, излучение называется

неполяризованным. Величина поляризации, называемая степенью поляризации, определяется как отношение разности интенсивностей двух электромагнитных волн с разными направлениями электрического вектора к их сумме, причем величина степени поляризации существенно зависит от угла между направлением самого излучения и луча зрения на источник излучения с плоскопараллельной атмосферой, то есть именно от $\mu = \cos i$.

Выдающийся российский астрофизик В.В. Соболев разработал детальную теорию распространения излучения в оптически толстой плоскопараллельной атмосфере астрономических объектов, в которых большую роль играет процесс многократного рассеяния атмосферного излучения. Именно эта теория полностью применима к аккреционным дискам вокруг ЧД. Используя теорию В.В. Соболева, можно определить значение косинуса угла наклона луча зрения к направлению нормали к поверхности аккреционного диска.

Для галактики Mrk 110 степень поляризации излучения была измерена с помощью специального детектора, действующего одновременно как поляриметр и фотометр, в обсерваториях Стюарда и Университета штата

**ВЕЛИЧИНА СПИНА СВЕРХМАССИВНОЙ ЧЕРНОЙ ДЫРЫ В АКТИВНЫХ ЯДРАХ
ГАЛАКТИК. ПО ДАННЫМ НАБЛЮДЕНИЙ ОБСЕРВАТОРИИ “ИНТЕГРАЛ”**

Активная галактика	Степень поляризации оптического излуче- ния, в %	Косинус угла наклона $\mu = \cos i$	Значение спина сверхмассивной черной дыры
MCG 6–30–15	4,06	0,56	$\leq 0,99$
Fairall 9	0,5	0,848	$\leq 0,998$
SWIFT J21274+5654	0,22	0,932	0,55
1 H 0707–495	0,13	0,956	0,998
Mrk 335	0,28	0,914	0,3
NGC 3783	0,5	0,848	0,998
Ark 120	0,34	0,891	0,93
3C 120	0,92	0,743	0,95
Ark 564	0,52	0,848	0,97
Mrk 110	0,17	0,946	0,993
Ton S180	0,21	0,933	0,9
RBS 1124	1,29	0,669	$\leq 0,997$
Mrk 841	1,0	0,725	0,55
IRAS 13224+3809	0,38	0,882	0,998
Mrk 1018	0,3	0,905	0,87
NGC 4051	0,55	0,835	0,97
NGC 1365	0,91	0,745	0,998

Калифорния (США). Измеренная величина поляризации составляет 0,17% с ошибкой в 0,08%. Согласно теории В.В. Соболева, соответствующий параметр, определяющий косинус угла наклона, равен $\mu \leq 0,97$. Используя соответствующие опубликованные данные наблюдений, можно определить коэффициент радиационной эффективности $\varepsilon(\alpha)$, а затем и величину спина центральной СЧД в галактике Mrk 110; он равен $\alpha = 0,99$. Отметим, что принятый прямой метод определения спина, основанный на измерениях формы линий излучения в рентгеновском диапазоне, дает такую же величину спина СЧД

в галактике Mrk 110. Метод определения спинов центральных галактических ЧД с измеренной поляризацией оптического излучения основан на данных, полученных обсерваторией “Интеграл”. Спектрополяриметрические наблюдения, выполненные с помощью телескопа БТА-6м САО РАН, позволили определить величину спина СЧД в этих объектах.

На основе анализа характеристик галактик, представленных в таблице 2 (указаны значения косинуса угла наклона аккреционного диска, определенные на основе измерений степени поляризации, а также спины СЧД), можно сделать главный вывод.

Он состоит в том, что большинство СЧД имеют значение спина, существенно превышающее величину $\alpha = 0,9$, поэтому они относятся к быстровращающимся ЧД. Методика определения спина ЧД, основанная на теории аккреционного диска, разработанной Н.И. Шакурой и Р.А. Сюняевым, позволяет выделить сильную зависимость величины спина от массы ЧД, угла наклона и светимости аккреционного диска. Итак, измерения степени поляризации излучения аккреционного диска позволяют определить величину угла наклона диска с наибольшей надежностью.

В представленном в таблице 2 списке галак-

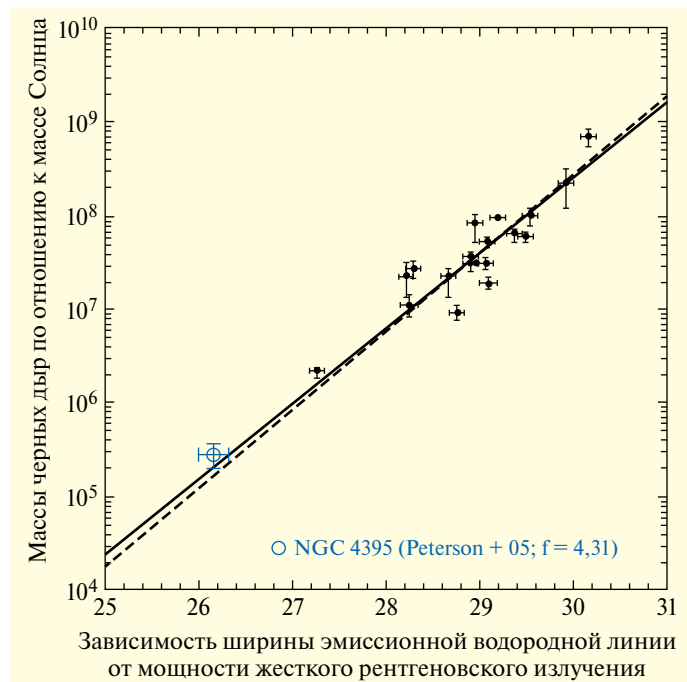


График определения масс сверхмассивных черных дыр в центрах галактик на основе измеренной мощности жесткого рентгеновского излучения. По данным космической обсерватории "Интеграл". Кружком обозначена галактика NGC 4395, крестиками – другие галактики. По осям: вертикаль – масса ЧД, горизонталь – зависимость ширины эмиссионной водородной линии от мощности жесткого рентгеновского излучения (La Franca F. et al. // MNRAS. 2015. V. 449. P. 1526).

тик полностью отсутствуют галактики, у которых центральные ЧД не обладают моментом вращения, они не имеют в центральных областях невращающиеся СЧД, у которых величина спина $\alpha = 0$. Подчеркнем, что сделанное заключение не зависит от выборки наблюдаемых галактик. Исследования, выполняемые астрофизиками в ГАО РАН, привели к открытию: большинство СЧД в нашей

Вселенной относятся к быстровращающимся ЧД. Отсюда возникли новые важные вопросы в современной астрофизике: почему и каким образом множество СЧД стали быстровращающимися ЧД?

СТРУКТУРА АККРЕЦИОННОГО ДИСКА ВОКРУГ СЧД

Большой интерес астрофизиков проявляется к проблеме структуры аккреционного диска, све-

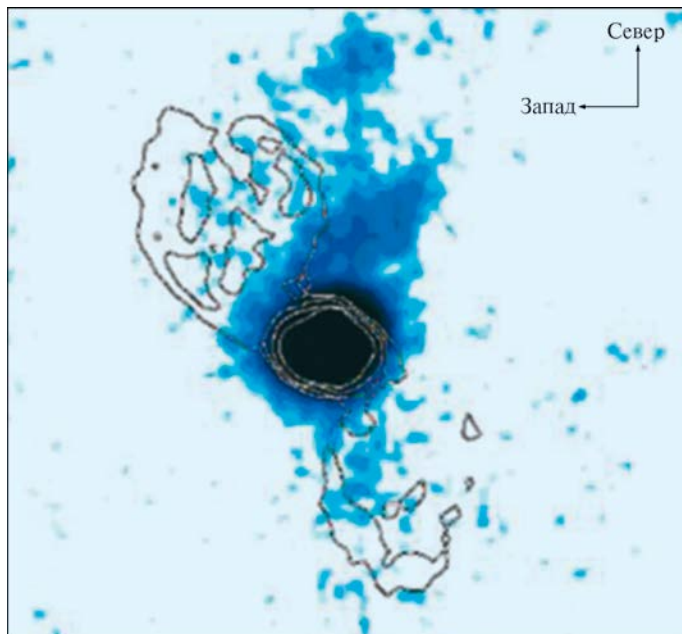
тимостью которого вносит существенный вклад в общую светимость галактической центральной ЧД. Общепринятая точка зрения заключается в том, что генерация оптического и рентгеновского непрерывных излучений происходит в аккреционном диске, толщина которого во много раз меньше его радиуса, получившего название стандартного. Теория стандартного диска разработана Н.И. Шакурой и Р.А. Сюняевым; она широко используется астрофизиками всего мира. Как правило, такой стандартный диск составляет внутреннюю область вокруг ЧД.

За создание теории аккреционного диска Н.И. Шакура и Р.А. Сюняев были удостоены Государственной премии Российской Федерации за 2016 г. (статья авторов на эту тему будет опубликована в одном из ближайших номеров журнала).

Основной метод определения массы центральной ЧД базируется на определении значений мощности эмиссионных линий, возникающих во внешних частях аккреционного диска. Настоящая структура этих внешних частей до сих пор не выяснена. По структуре таких линий определяется скорость вращения вещества вокруг ЧД и масса центрального объекта.

Наиболее популярный метод определения масс ЧД основан на использовании величин ширины линий излучения нейтрального водорода, названных бальмеровскими в честь швейцарского математика и физика И.Я. Бальмера (1825–1895), специализировавшегося в области спектроскопии. Он обнаружил закономерность в структуре спектральных линий атома водорода, показав, что длины волн видимой части спектра атома водорода связаны между собой простой зависимостью. Методика измерения массы СЧД зависит от структуры той области аккреционного диска, где генерируется излучение линий водорода. Разброс значений масс ЧД в галактиках, имеющийся в современной научной литературе, зависит от структуры той области аккреционного диска, в которой генерируются водородные атомные линии; одна из центральных задач современной физики аккреции заключается в определении структуры этой области.

Теперь перейдем к описанию методики, развиваемой в Пулковской обсерватории и позволяющей решить сформулированную задачу. Методика основана на теоретическом определении вириального параметра, она разработана группой зарубежных астрофизиков во главе с профессором



Галактика Mrk 6 диаметром 225 тыс. св. лет, находящаяся на расстоянии 174 млн св. лет от нас. Изображение получено в оптических лучах. По данным M.J. Kukula et al. // MNRAS. 1996. V. 280. P. 1283.

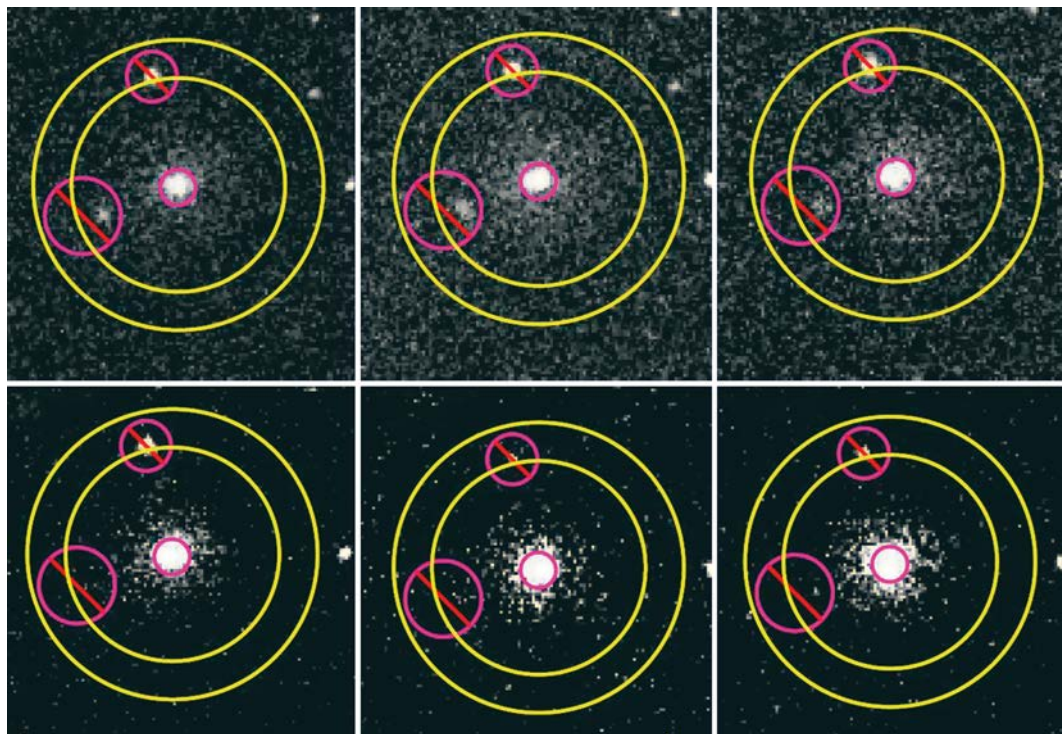
С. Коллином. В соответствии с ней можно получить выражение, позволяющее определять основные параметры области генерации широких эмиссионных линий:

$$\sqrt{A^2 + \sin^2 i} = \frac{FWHM}{2c} \left(\frac{R}{R_g} \right)^{1/2},$$

где $FWHM$ – общепринятое в астрономии обозначение полной ширины наблюдаемой линии излучения, R – характерное расстояние от центральной ЧД до области широких эмиссионных линий, которое принято называть радиусом, R_g – гравитационный радиус, равный произведению постоянной гравитации

и массы ЧД, деленной на квадрат скорости света c . Величина A определяет геометрию области излучения; она представляет отношение толщины дискообразной области излучения линий к ее радиусу.

Надежный метод определения радиуса области широких эмиссионных линий, основанный на измерении временной задержки сигнала переменной излучения между спектральными линиями и непрерывным спектром. Величина $\sin i$ надежно определяется в результате наблюдений степени поляризации излучения наблюдаемых



Галактика Fairall 9, расположенная в 2,4 млн св. лет от нас. На рисунке показано шесть изображений галактики, полученных в разных спектральных диапазонах оптического излучения; они обозначены принятыми для астрономов-наблюдателей названиями отдельных участков спектра оптического излучения. По данным P. Pal et al. // MNRAS. 2017. V. 466. P. 1777.

атомных линий водорода, магния и углерода.

В качестве примера рассмотрим хорошо изученную галактику Mrk 6, расположенную от нас на расстоянии в 174 млн св. лет. Измеренная поляризация составляет $p_i(\mu) = 0,85 \pm 0,04$, отсюда, на основании теории В.В. Соболева, получаем значение $\sin i = 0,65$. Измеренная величина $A^2 + \sin^2 i = 0,6$, отсюда следует, что безразмерная геометрическая толщина области образования широких эмиссионных линий

составляет $A = 0,42$. Это означает, что, в отличие от стандартной модели аккреционного диска, область генерации широких эмиссионных линий является геометрически толстым диском. Такой вывод очень важен для развития физики аккреции материи на СЧД.

Результаты наблюдений космической обсерватории "Интеграл" помогли открыть новую страницу в области физики аккреции, а также в понимании процесса образования мощных

направленных струй релятивистской плазмы в активных ядрах галактик (Земля и Вселенная, 2016, № 6). Дело в том, что традиционно наблюдаются широкие эмиссионные линии в области оптического и ультрафиолетового спектральных диапазонов, например, для атома водорода – это водородные балмеровские линии. В то же время водородные линии Пашена находятся в инфракрасном диапазоне электромагнитного спектра излучения

**ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ТОЛЩИНЫ ОБЛАСТЕЙ ВОДОРОДНЫХ ЭМИССИОННЫХ
ЛИНИЙ ПАШЕНА И БАЛЬМЕРА В АКТИВНЫХ ГАЛАКТИКАХ**

Активная галактика	A – геометрическая толщина области линий Пашена	A – геометрическая толщина области линий Бальмера
3C 120	0,43	0,23
Ark 120	0,36	0,1
Fairall 9	0,33	0,16
Mrk 279	0,49	0,4
Mrk 290	0,4	0,4
Mrk 335	0,36	0,19
Mrk 509	0,25	0,19
NGC 3516	0,56	0,47
NGC 3783	0,5	0,37
NGC 4051	0,58	0,37
NGC 4593	0,58	0,54
NGC 5548	0,5	0,5
NGC 7469	0,57	0,4

($\lambda = 1094\text{--}1675$ нм, $E = 0,38\text{--}1,0$ эВ). Оказалось, что существует довольно сильная корреляция между интенсивностями линий Пашена и интенсивностью жесткого рентгеновского излучения. Удалось установить прямую связь между радиусом области, где генерируются водородные линии Пашена, и рентгеновской светимостью в области, где величина энергии составляет $E = 14\text{--}195$ кэВ.

Для определения геометрии области широких эмиссионных водородных линий Пашена, возникающих в инфракрасной области спектра, можно использовать приведенное выше уравнение, где величина $FWHM$ является значением полной ширины не бальмеровской линии,

а соответствующей линии Пашена.

Рассмотрим весьма популярный объект – квазар Fairall 9 – имеющий космологическое красное смещение, равное 0,047. Используя приведенную формулу и имеющиеся в литературе данные о массе СЧД в квазаре Fairall 9, ширине эмиссионной линии Пашена, степени поляризации излучения в этом объекте, а также светимости жесткого рентгеновского излучения этого объекта, полученного космической обсерваторией “Интеграл”, можно оценить геометрическую толщину области излучения широких эмиссионных линий Пашена. Для данного объекта эта величина оказалась равной $A = 0,33$. Отметим, что для бальмеровских

линий водорода в этом объекте геометрическая толщина равна $A = 0,16$, что примерно вдвое меньше, чем для области линий Пашена. Результат исключительно важен для понимания физики аккреции на СЧД.

Отметим, что водородные линии Пашена также могут быть использованы для определения масс СЧД. В таблице 3 представлены параметры геометрической толщины областей аккреционного потока, где образуются водородные эмиссионные линии Пашена и Бальмера. Рост их значений означает увеличение толщины области генерации эмиссионных линий. Главный вывод состоит в том, что области генерации эмиссионных линий являются геометрически толстыми,

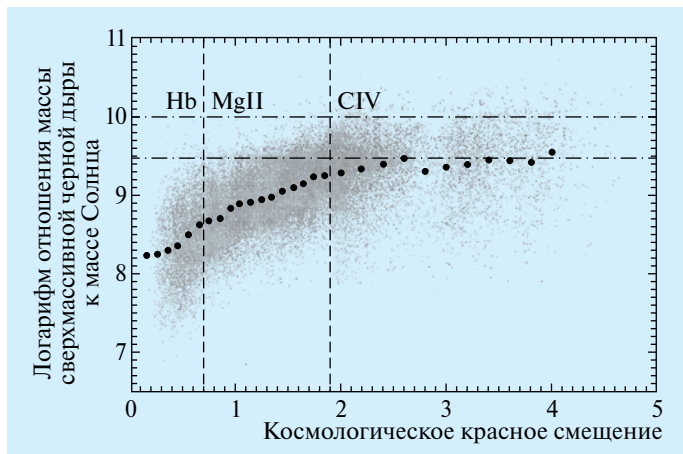


График зависимости массы сверхмассивной черной дыры от космологического красного смещения. Точки обозначают отдельные объекты, вверху представлены общепринятые обозначения линий водорода, магния и углерода. По данным А.М. Черепашука // Успехи физических наук. 2016. Т. 186. С. 778.

в отличие от модели стандартного аккреционного диска, в котором генерируется непрерывное излучение; это свидетельствует о сложности структуры аккреционного потока, падающего на СЧД. Данные наблюдений обсерватории “Интеграл” позволили получить новую информацию о структуре аккреционного диска вокруг СЧД, заключающуюся в том, что толщина аккреционного потока увеличивается с ростом расстояния от СЧД.

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ БУДУЩЕЙ АСТРОНОМИИ

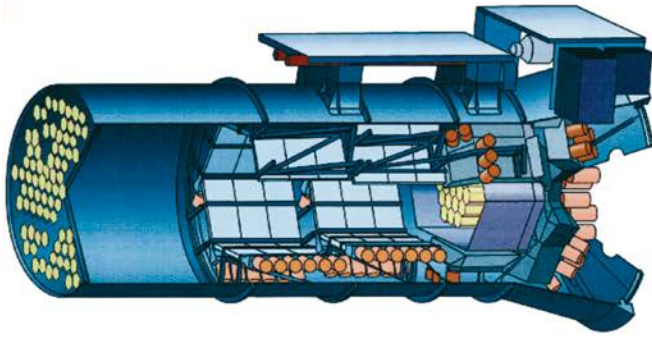
Выполнив детальный обзор плоскости нашей Галактики, обсерватория представила детальную информацию о рентгеновских двойных системах, в состав которых входят нейтронные звезды и ЧД звездных масс (Земля и Вселенная, 2014, № 5;

2016, № 4). Обнаружены рентгеновские двойные системы с оптическим компонентом очень большой массы. В качестве примера плодотворной работы обсерватории можно привести открытие довольно мощного гамма-излучения Крабовидной туманности, которое оказалось сильно поляризованным; оно направлено вдоль оси центрального пульсара.

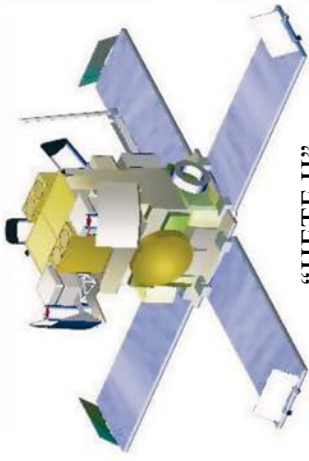
Благодаря обсерватории “Интеграл” пополнились данные глубоких рентгеновских обзоров небесной сферы и в особенности сделан прорыв в изучении рентгеновского излучения Вселенной в жестких рентгеновских лучах (выше 10 кэВ). Удалось получить детальную информацию о ядрах активных галактик – СЧД (Земля и Вселенная, 2015, № 5). Важность такой информации чрезвычайно возрастает в связи с тем, что оптическое и мягкое

рентгеновские излучения часто оказывается значительно сильно поглощенным в веществе самой галактики. Высокая эффективность работы обсерватории “Интеграл” позволила преодолеть эту трудность: удалось весьма продвинуться в определении масс СЧД и особенно важного физического параметра – углового момента вращения СЧД (спина). Получена детальная информация о структуре аккреционного потока, образующегося вокруг СЧД.

Неожиданное открытие мощных СЧД на ранней стадии развития Вселенной привело к появлению приоритетного направления развития астрономических исследований, связанного с проблемой образования массивных ЧД на ранней стадии эволюции Вселенной. Если характерный возраст Вселенной оценивается в



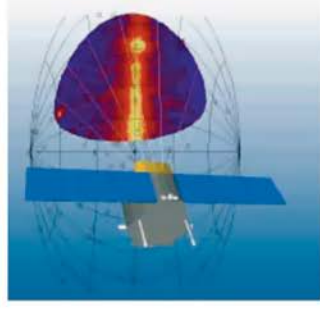
“Интеграл”



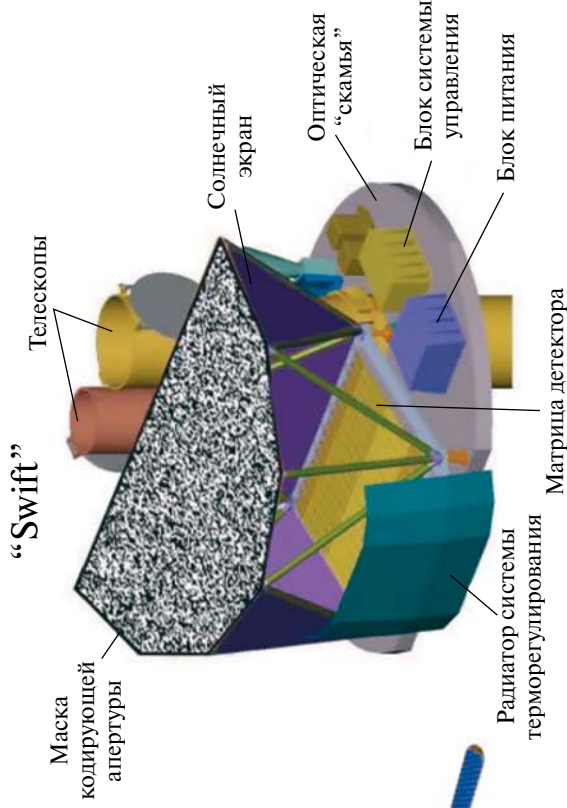
“HETE-2”



“Ферми” (“GLAST”)



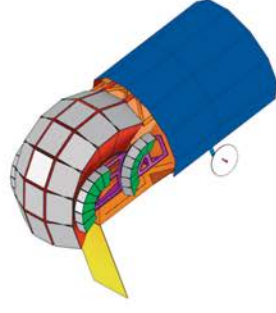
“AGILE”



“Swift”



“RHESSI”



“EXIST”

Действующие космические рентгеновские обсерватории: “HETE-2” (запущена в 2000 г.), “Интеграл” (2002), “RHESSI” (2002), “Swift” (2004), “AGILE” (2007), “Ферми” (“GLAST”, 2008) и будущая проектируемая рентгеновская обсерватория “EXIST” (запуск намечен на 2028 г.). Рисунки NASA, ESA.

13,5 млрд лет, то обнаруженные гигантские СЧД имеют время жизни меньше, чем один миллиард лет, причем их масса существенно превышает массу массивных ЧД в ближайшей окрестности Вселенной, достигая $10^9 M_{\odot}$. Возникает вопрос: каким образом могут образоваться такие массивные ЧД за такой короткий по астрономическим понятиям период времени?

Сочетание полученных обсерваторией “Интеграл” данных со спектрополяриметрическими наблюдениями оптического излучения активных ядер галактик, включая данные

наблюдений на российском телескопе БТА-6м САО РАН, позволили создать надежную методику определения углового момента вращения СЧД, а также определить характерные физические параметры их аккреционного диска.

В настоящее время детально обсуждается стратегический план развития астрономических исследований, включая стратегию развития как наземной, так и космической астрономии и астрофизики. Что касается развития космической астрономии, то в настоящее время в детальной разработке находится большая серия проектов новых

космических обсерваторий. Уже существуют детальные схемы будущих рентгеновских обсерваторий, их запуск планируется в период 2018–2025 гг.

Нас ожидает эпоха замечательных астрономических открытий. Замечательно, что в сентябре 2018 г. на околоземную орбиту планируется вывести российскую космическую рентгеновскую обсерваторию “Спектр-Рентген-Гамма”, проект которой разработан в ИКИ РАН под руководством академика Р.А. Сюняева. Программа такой обсерватории включает детальный обзор небесной сферы, предполагается открыть более миллиона новых ЧД.

Информация

Сложные структуры туманности “Сатурн”

Изображения эффективной планетарной туманности NGC 7009 Сатурн, находящейся в 5 тыс. св. лет от нас в созвездии Водолея, недавно получены с помощью мощного спектрографа MUSE, смонтированного на 8,2-м телескопе VLT Европейской Южной Обсерватории (ESO; см. стр. 2 обложки, сверху). Название туманности объясняется ее необычной формой,

напоминающей Сатурн с системой колец.

Картографирование газопылевых структур туманности поможет понять детали эволюции и то, как они приобретают свои причудливые формы и сложную симметрию. Международная группа астрономов под руководством Джереми Уэлша (ESO) сумела заглянуть за пылевую вуаль туманности “Сатурн”: на основе снимков составлена карта распределения пыли внутри туманности, имеющей вид группы накладывающихся друг на друга множества пузырей неправильной формы. Туманность имеет внешнюю оболочку и гало; в ее эллиптической внутренней оболочке обнаружены сложные

структуры – нитевидные образования и волнообразные детали.

Туманность “Сатурн” когда-то была маломассивной звездой, превратившейся в красного гиганта и затем сбросившей свои внешние оболочки: выброшенное вещество под действием интенсивного звездного ветра разлеталось в окружающее пространство, оно “возбуждалось” ультрафиолетовым излучением горячего ядра звезды. Так образовалась околозвездная туманность, состоящая из пыли и ярко светящегося горячего газа. В центре туманности находится обреченная звезда в процессе преобразования в белого карлика.

*Пресс-релиз ESO,
27 сентября 2017 г*