

# Кипятильник в холодильнике

## Сверхмассивные черные дыры в скоплениях галактик

Е.М.Чуразов

По современным представлениям все наблюдаемые астрономические объекты возникли из ничтожно малых флуктуаций плотности материи, заложенных на самых ранних этапах образования Вселенной. Вещество стягивается к областям, где плотность материи изначально оказалась чуть выше, чем в среднем по Вселенной, все увеличивая и увеличивая контраст плотности. Пространственный масштаб этих флуктуаций плотности задает конечную массу объекта, который сформируется в данном месте. А амплитуда начальных флуктуаций разного масштаба определяет характерное время, необходимое для формирования объектов заданной массы. В нашей Вселенной формирование структуры идет иерархическим образом — от объектов малой массы ко все более и более массивным образованиям. Иными словами, первыми начали образовываться звезды, затем галактики, а затем и скопления галактик. В настоящую эпоху именно скопления галактик являются «самыми массивными сформировавшимися объектами во Вселенной». Это выражение взято в кавычки, поскольку оно стало уже своего рода штампом при описании



*Евгений Михайлович Чуразов, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник отдела астрофизики высоких энергий Института космических исследований РАН. Область научных интересов — теоретическая астрофизика, рентгеновская астрономия.*

скоплений и встречается во множестве научных и популярных статей. Масса скопления галактик действительно очень велика — до  $10^{15}$  масс Солнца ( $M_{\odot}$ ), причем соотношение вкладов различных форм материи в их массу приблизительно такое же, как и во Вселенной в целом — 85% темной материи и 15% обычного вещества — барионов, т.е. привычных для нас водорода, гелия и более тяжелых элементов. И темная, и обычная материи образуют общую потенциальную яму, в которой сила гравитационного притяжения не дает космическим объектам разлетаться. Что касается обычного вещества, то из него состоят звезды в галактиках и горячий газ, заполняющий пространство между галактиками. А темную материю мы не видим прямо, но можем измерять ее массу по влиянию, оказываемому темной материей на движение галактик и распределение газа. В оптическом диапазоне, наблюдения в котором долгие годы служили единственным источником информации обо всех астрономических объектах, скопления галактик выглядят как участки неба, где плотность галактик заметно выше, чем в других местах (рис.1). Богатое скопление может содержать сотни галактик (из них несколько десятков действительно яркие галактики, а остальные — весьма слабые), заключенных в области размерами до нескольких миллионов световых лет. Галактики, естественно, не стоят на месте, а двигаются со скоростями порядка 1000 км/с. Скорость этих движений

© Чуразов Е.М., 2006

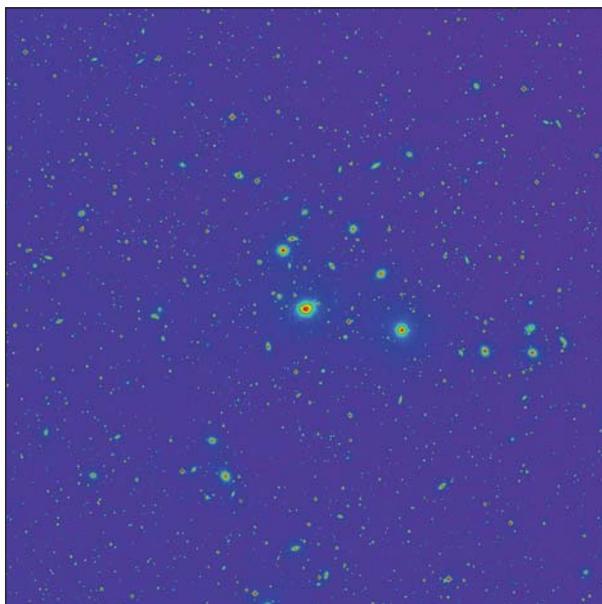


Рис.1. Оптическое изображение скопления галактик в созвездии Персея (данные Digital Sky Survey — DSS). Яркие пятна — отдельные массивные галактики. Наиболее массивная эллиптическая галактика NGC1275 расположена в самом центре скопления.

отражает силу притяжения и размер такого массивного объекта, как скопление, подобно тому, как скорость движения планет отражает массу звезды и размер орбиты.

### Потоки охлаждения под рентгеном

В типичных скоплениях масса звезд в галактиках составляет не более нескольких процентов от общей массы скопления. Заметно бóльшую долю (~15%) обеспечивает разреженный газ, заполняющий весь объем скопления. В отличие от галактик, движущихся с высокими скоростями в поле тяготения скопления, газ как целое может быть совершенно неподвижен, а противодействует тяготению он благодаря своей высокой температуре. Газ в скоплениях разогрет до температур в десятки и сотни миллионов градусов. Он полностью ионизован, и «видеть» такой газ можно по его рентгеновскому излучению (рис.2, 3). Это рентгеновское излучение возникает при столкновении электронов с ионами и носит название «тормозного» излучения (оно генерируется при ускоренном движении заряженных частиц). По направлению к центру скопления плотность газа увеличивается, и возрастает частота столкновений электронов с ионами (как квадрат плотности газа). Соответственно растет и интенсивность тормозного

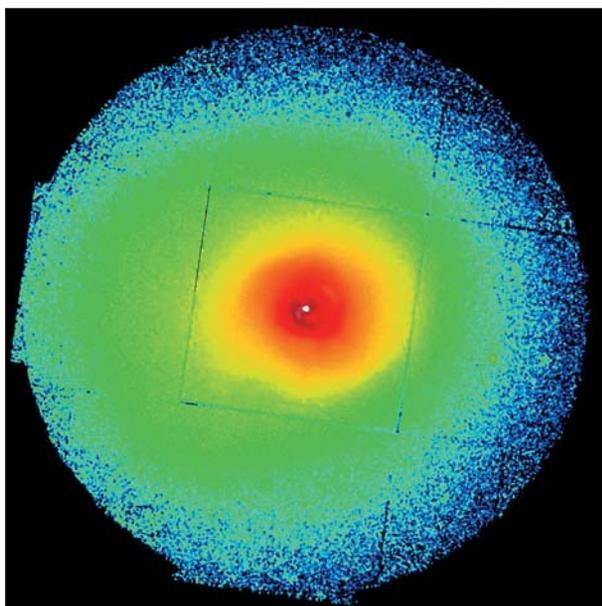


Рис.2. Изображение скопления галактик в созвездии Персея в рентгеновском диапазоне [1]. Цвет отражает яркость рентгеновского излучения — от голубого (маленькая яркость) на периферии скопления к красному (большая яркость) в центре скопления. Потенциальная яма, создаваемая темной материей, заполнена горячим газом. Этот газ и порождает рентгеновское излучение.

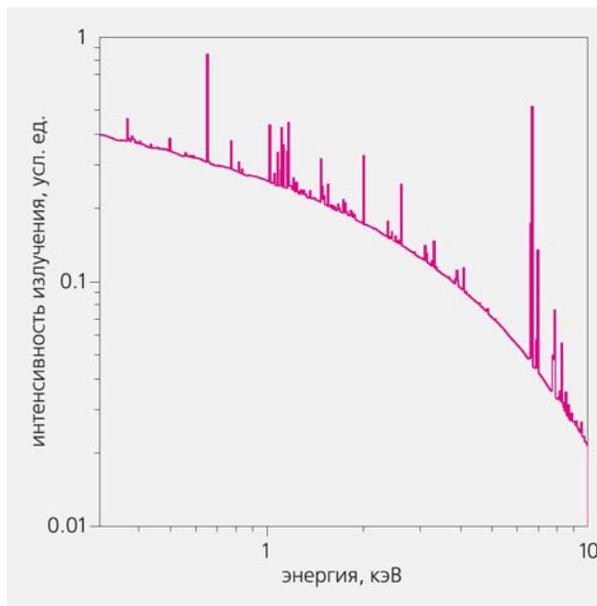


Рис.3. Теоретическая модель спектра излучения оптически тонкой плазмы с температурой около 50 млн градусов. Плавная кривая описывает тормозное излучение электронов, ускоряющихся в поле ионов. Отдельные линии связаны с излучением ионов таких элементов, как железо, кремний, сера и кальций, небольшие примеси которых содержатся в газе скоплений.

излучения. Поэтому центральные части скоплений оказываются мощными источниками рентгеновского излучения (светимость до  $10^{45}$  эрг/с), и характеристики горячего газа (плотность, температура) могут быть надежно измерены.

Энергия, которая идет на рентгеновское излучение газа, черпается из тепловой энергии частиц (электронов и ионов). Но этот резервуар энергии не бесконечен. Например, при температуре  $50 \cdot 10^6$  К и плотности электронов  $10^{-2} \text{ см}^{-3}$  энергия одного кубического сантиметра газа составляет  $\sim 2 \cdot 10^{10}$  эрг. Темп потерь энергии этого же кубического сантиметра на излучение приблизительно равен  $2.7 \cdot 10^{-27}$  эрг/с. Нетрудно подсчитать, что за время порядка четверти миллиарда лет газ должен «высветить» весь запас своей энергии и начать остывать. Быстрее всего он остывает в центре скопления, где его плотность самая большая. Дело в том, что внутренняя энергия единицы объема растет линейно с плотностью газа, а темп потери энергии — квадратично. В плотных центральных областях температура газа падает, и он начинает сжиматься под давлением внешних слоев. При параметрах, характерных для газа в скоплениях галактик, время остывания газа заметно больше, чем, например, время распространения звуковых волн. Поэтому процесс охлаждения идет плавно, и в каждый момент времени газ находится в состоянии гидростатического равновесия. Сжатие приводит к повышению плотности, и процесс охлаждения еще более ускоряется. В результате охлаждающийся газ начинает оседать в центре скопления, и на его место приходят новые порции газа из внешних областей — развивается процесс, получивший название «поток охлаждения». Подробное обсуждение наблюдательных проявлений потоков охлаждения и различные теоретические модели приведены в обзоре А.Фабиана [2]. Самым очевидным свидетельством охлаждения газа служит образование области более холодного и плотного газа в центральной части скопления. Действительно, во многих скоплениях (пример приведен на рис.4) газ в центральной зоне заметно холоднее, чем газ во внешних областях. Одновременно в этой холодной зоне сильно возрастает плотность газа (рис.5). Исключением из этого правила являются скопления, в которых недавнее слияние нескольких менее массивных скоплений привело к сильному перемешиванию газа и разрушению центральной области, где он охлаждался.

Примеры, показанные на рисунках, дают убедительный аргумент в пользу концепции потоков охлаждения. На протяжении почти 30 лет считалось, что эта концепция в основном правильная и только некоторые детали подлежат уточнению. Однако среди «деталей» были и очень серьезные проблемы. В частности, совершенно непонятен был вопрос: до каких температур остывает газ и куда он потом девается? Как мы уже знаем, темп

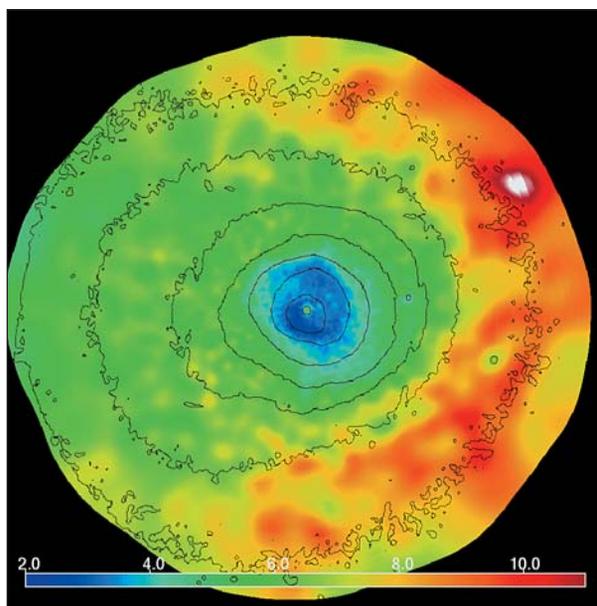


Рис.4. Карта распределения температуры газа (в килоэлектронвольтах) в Персее [1]. Шкала температур показана снизу. Четко видна более холодная центральная зона.

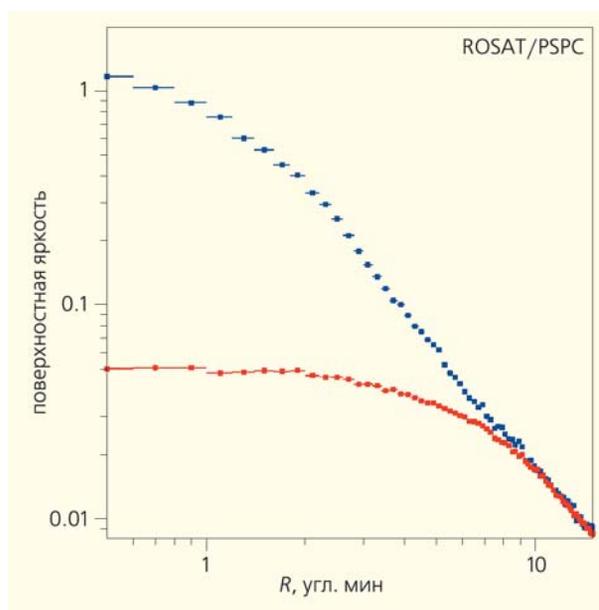


Рис.5. Сравнение профилей поверхностной яркости в скоплении с потоком охлаждения (синие точки) и без потока охлаждения (красные точки). Расстояние (в проекции на изображении) отсчитывается от центра скопления. Поверхностная яркость в рентгеновском диапазоне связана с плотностью газа, а в потоках охлаждения плотность газа сильно возрастает к центру скопления.

остывания зависит от плотности газа. По мере остывания и падения температуры его плотность увеличивается, чтобы давление остывающего газа приблизительно соответствовало давлению окружающих слоев. Поэтому растет и скорость остывания. И горячий газ, начавший остывать при температуре в десятки миллионов градусов, сначала остывает медленно, а затем все быстрее и быстрее, пока его температура не упадет ниже десяти тысяч градусов. При более низких температурах водород становится нейтральным, и процесс охлаждения качественно меняется и замедляется. Следовательно, можно ожидать, что остывший газ имеет температуру, не превышающую  $10^4$  К. С другой стороны, сравнение светимости центральных областей скоплений ( $\sim 10^{44} - 10^{45}$  эрг/с) с тепловой энергией одной частицы  $3/2kT$ , где  $T$  — температура газа,  $k$  — постоянная Больцмана, позволяет оценить: чтобы обеспечить наблюдаемую светимость, каждый год должна охлаждаться масса газа порядка 100—1000 солнечных масс (так называемый темп охлаждения). Тогда за характерное время жизни скопления порядка  $10^{10}$  лет масса охладившегося газа должна составить примерно  $10^{12} - 10^{13} M_{\odot}$ ! Многочисленные попытки обнаружить столь огромное количество газа не привели к успеху. В частности, было показано, что этот газ не может переработаться в звезды. В противном случае в центральных областях скоплений следовало бы ожидать темпа звездообразования, сравнимого с темпом охлаждения, т.е. порядка 100—1000 солнечных масс в год. Все скопления, где наблюдаются потоки охлаждения, действительно содержат в своем центре гигантскую эллиптическую галактику (см. пример на рис.1) с массой звезд порядка  $10^{12} M_{\odot}$ , но при темпе звездообразования даже в 100 солнечных масс в год эти галактики должны быть значительно более яркими в голубом свете, чем наблюдается. Реальный предел для темпа звездообразования в них более чем на порядок ниже предсказаний модели потоков охлаждения. Целый ряд моделей, часто весьма элегантных, был разработан для объяснения возникших проблем, и было очевидно, что нужны новые наблюдения, чтобы окончательно утвердить или опровергнуть простую модель потоков охлаждения. Такие данные появились с запуском европейской орбитальной рентгеновской обсерватории «XMM-Newton». Специальная дифракционная решетка для рентгеновского диапазона длин волн позволяет регистрировать рентгеновские эмиссионные линии различных тяжелых элементов (кислорода, железа, кремния), которые характерны для плазмы, имеющей температуру в диапазоне  $10^5 - 10^8$  К. Уже первые наблюдения потоков охлаждения в самых ярких скоплениях дали неожиданный результат (см., например, [3]) — в спектрах центральных зон скоплений практически отсутствуют линии, характерные для температур ниже 10 млн градусов! Иначе говоря, газ не охлаж-

дается ниже примерно  $10^7$  К, что полностью противоречит концепции потоков охлаждения. Хотя даже сейчас продолжают попытки объяснить и эти результаты в рамках стандартной модели потоков охлаждения, для большинства астрофизиков наблюдения обсерватории «XMM-Newton» стали четким сигналом к поиску новой концепции. В действительности, однако, стандартная формулировка модели потоков охлаждения содержит одну оговорку: «потери газа на излучение приводят ко все более быстрому охлаждению и формированию потоков газа *при отсутствии других источников энергии*». Новая концепция не подвергает сомнению тот факт, что газ теряет свою энергию на излучение, а концентрируется на поиске *других источников энергии*, которые могут скомпенсировать потери газа и предотвратить его быстрое охлаждение. Рассмотрим роль сверхмассивных черных дыр как возможных источников такой энергии.

## Черные дыры надувают пузыри

В центрах большинства (а вероятно, и всех) галактик присутствуют сверхмассивные черные дыры. Массы этих черных дыр зависят от свойств самой галактики — чем массивнее галактика, тем тяжелее и центральная черная дыра. Не является исключением и наша Галактика — масса «нашей» сверхмассивной черной дыры, определенная по движению вокруг нее отдельных звезд, равна примерно  $3.6 \cdot 10^6 M_{\odot}$ . Интересно, что масса черной дыры зависит не прямо от полной массы галактики, а наиболее жестко связана с массой «балджа» — одной из компонент, составляющей типичную галактику. Звезды балджа имеют квазисферическое распределение, в отличие от звезд диска. Наша Галактика спиральная и обладает сравнительно маленьким балджем. Отсюда и «скромная» масса черной дыры. Эллиптические галактики целиком состоят из балджей, и в них массы черных дыр могут достигать нескольких миллиардов солнечных масс. Некоторые из этих сверхмассивных черных дыр, называемые квазарами или активными ядрами галактик, оказываются ярчайшими источниками излучения во всем диапазоне электромагнитных волн, со светимостями до  $10^{46} - 10^{47}$  эрг/с. Другие сверхмассивные черные дыры, как, например, сверхмассивная черная дыра в нашей Галактике, напротив, очень слабые источники излучения. Различие между яркими и слабыми источниками, по-видимому, связано с разницей в количестве вещества, падающего на них и создающего наблюдаемое излучение.

Как уже говорилось раньше, самые большие эллиптические галактики обнаружены в центрах скоплений галактик, как раз в той области, где газ теряет свою энергию на излучение. Может ли сверхмассивная черная дыра быть тем источни-

ком энергии, который не дает газу охлаждаться? С точки зрения бюджета энергии, это несомненно так. Действительно, при охлаждении от начальной температуры порядка  $7 \cdot 10^7$  К каждая частица (протон или электрон) теряет энергию порядка  $3/2kT \sim 10^{-8}$  эрг. При падении же частицы на черную дыру может выделяться энергия, составляющая заметную долю от энергии покоя частицы. Например, до 6% энергии покоя аккрецирующего вещества может быть переработано в излучение при дисковой аккреции на невращающуюся черную дыру (и еще больше для вращающейся дыры). Для одного протона выделяющаяся энергия составляет  $\sim 10^{-4}$  эрг. Сравнение потерь энергии на охлаждение и энерговыделения при падении на черную дыру показывает, что стоит доле охлаждающегося вещества упасть на черную дыру, как будет обеспечено достаточно энергии для подогрева всего остального вещества. Именно этот факт дает привлекательный шанс объяснить проблему потоков охлаждения за счет подогрева газа сверхмассивными черными дырами — охлаждающийся газ питает черную дыру, а она, в свою очередь, не позволяет окружающему газу охлаждаться. Можно ли проверить эту гипотезу наблюдениями? С одной стороны, среди ядер галактик, которые находятся в центрах потоков охлаждения, доля источников, демонстрирующих активность, заметно выше, чем для сверхмассивных дыр вне скоплений. Это работает в пользу нашей гипотезы. С другой стороны, черные дыры в центрах скоплений — не такие уж яркие источники, и их светимость на порядки величины ниже, чем светимость охлаждающегося газа. И кроме того, газ почти полностью прозрачен для излучения, и даже очень мощный источник не способен передать ему много энергии — излучение попросту проходит через газ, почти не задерживаясь. Это, казалось бы, сильный аргумент против нашей гипотезы. Но нет ли другого способа сообщить энергию газу?

На самом деле излучение — далеко не единственный механизм, с помощью которого черная дыра способна нагревать газ. Решающим фактором в выяснении этого вопроса стало сравнение наблюдений скоплений в радио- и рентгеновском диапазонах длин волн. На рис.6 показано изображение в рентгеновском диапазоне центральной области ярчайшего скопления галактик в созвездии Персея, полученное обсерваторией «Chandra». Яркая точка в середине изображения — это сверхмассивная черная дыра в центре гигантской галактики NGC1275, а все остальное свечение связано с горячим газом. Видно, что газ распределен очень неравномерно — вместо плавного повышения рентгеновской яркости к центру скопления на картинке видны асимметричные яркие и темные пятна. Особенно четко выделяются два темных пятна, окруженные более яркими кольцами, — сверху и снизу от сверхмассивной черной дыры. С правой стороны на рис.6 представлено

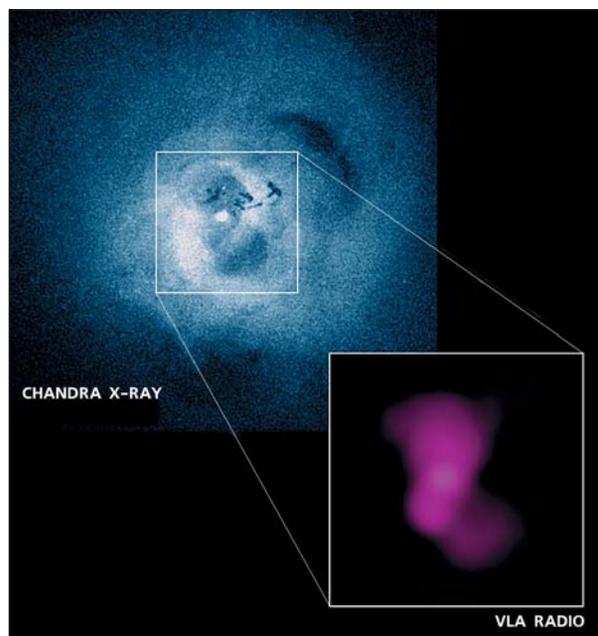


Рис.6. Рентгеновское изображение самой центральной области скопления [4] галактик в созвездии Персея, полученное спутником «Chandra». Видны темные пятна сверху и снизу от ядра. На врезке справа показана карта радиоизлучения этой области. Видно, что радиоизлучение идет именно из тех областей, где понижена яркость в рентгеновском диапазоне.

изображение той же области, но в радиодиапазоне. Ядро галактики NGC1275 — очень мощный источник радиоизлучения, вокруг которого есть более слабое и протяженное гало. Именно это гало изображено на рис.6, а излучение самого ядра на рисунке специально подавлено. Как и во многих других галактиках, наблюдаемое радиоизлучение связано с синхротронным излучением высокоэнергичных электронов. Эти электроны делают «видимыми» потоки релятивистской плазмы, формирующиеся вблизи черной дыры и далее распространяющиеся на большие расстояния от нее. Иногда такие потоки имеют форму очень узких струй на расстояниях в сотни килопарсек, а в других случаях релятивистская плазма образует весьма аморфную структуру, подобную представленной на рис.6. Сравнение радио- и рентгеновского изображений показывает, что радиоизлучение идет из тех самых мест, которые на рентгеновском изображении выглядят темными пятнами. Учитывая, что наблюдаемое рентгеновское излучение связано с горячим (но не релятивистским) газом, можно сделать вывод, что такого газа меньше в тех областях, где присутствует релятивистская плазма. Тщательный анализ изображений подтверждает данный вывод — можно сказать, что

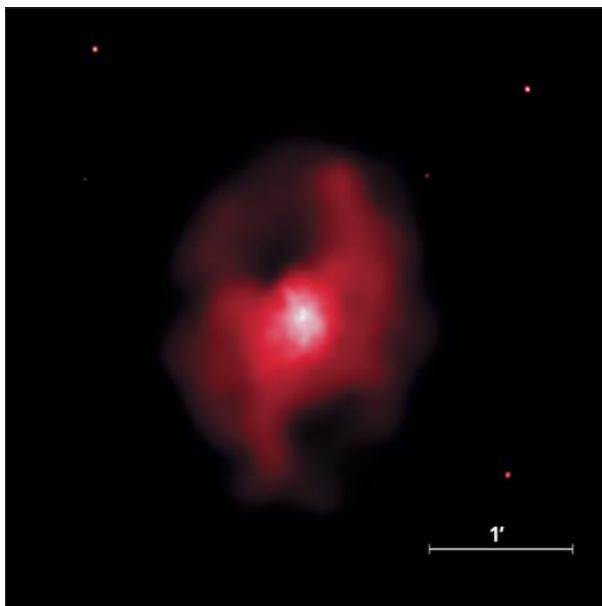


Рис.7. Рентгеновское изображение скопления MS 0735.6+7421 [5]. По обе стороны от ядра заметны темные пятна. Как и в случае скопления галактик в созвездии Персея, радиоизлучение (не показано на рисунке) «заполняет» эти пятна.

релятивистская плазма попросту расталкивает окружающий газ, надувая в нем огромные пузыри. Скопление в созвездии Персея не уникально — пузыри наблюдаются и во многих других скоплениях (см., например, рис.7: ситуация в указанном скоплении полностью аналогична предыдущей, и известен еще десяток [6] таких примеров).

Интересно, что на рентгеновском изображении скопления в Персее (рис.6) видны еще несколько темных пятен, в частности, пятно серповидной формы выше и правее центра, причем радиоизлучение из этой области тоже весьма мало. Оказывается, что и такие пятна можно связать с пузырями релятивистской плазмы — просто эти пузыри много старше, и самые энергичные электроны, генерирующие радиоизлучение, давно потеряли свою энергию, и радиоизлучение исчезло. Но электроны меньших энергий и протоны по-прежнему наполняют пузырь, не давая окружающему газу занять этот объем.

Легко оценить минимальное количество энергии, необходимое для надувания такого пузыря. Эта энергия складывается из внутренней энергии пузыря и работы по вытеснению окружающего газа, т.е.

$$E = \frac{\gamma}{\gamma - 1} PV,$$

где  $\gamma = 4/3$  — показатель адиабаты для релятивистской плазмы,  $P$  — давление окружающего газа, а  $V$  — объем пузыря. Все эти величины известны

благодаря данным рентгеновских наблюдений, и для скопления в созвездии Персея (рис.6) минимальная энергия в пузырях равна  $10^{50}$  эрг.

Теперь попытаемся оценить мощность источника, надувающего пузыри. Для этого нужно узнать время, за которое пузыри были надуты, или, другими словами, определить возраст пузыря. Прежде всего заметим, что чем больше мощность источника, тем быстрее должен расти размер пузыря. Кроме того, если изначально пузырь маленький, то расширение пузыря идет со сверхзвуковой скоростью, а по мере увеличения размера пузыря его радиус увеличивается все медленнее. Нечто похожее происходит, когда мы надуваем воздушные шары, — в первый момент шарик быстро раздувается, а затем темп его роста все более и более снижается. Теперь рассмотрим, что должно происходить с пузырем релятивистской плазмы в атмосфере окружающего газа. Плотность вещества внутри пузыря много меньше плотности окружающего газа, и на пузырь должна действовать архимедова сила, подобная той, которая действует на пузыри воздуха в воде. Под ее действием пузыри всплывают, и скорость всплытия определяется балансом силы Архимеда и сил сопротивления/трения, действующих на пузырь со стороны окружающей среды. Зная размер пузыря и параметры атмосферы, можно оценить скорость всплытия, которая увеличивается с размером пузыря. Например, для очень больших пузырей, размер которых сопоставим с высотой однородной атмосферы, скорость всплытия сравнима со скоростью звука в ней. Таким образом, верхний предел возраста пузырей получается простым делением размера пузыря на скорость всплытия. Только более «молодые» пузыри могут находиться вблизи черной дыры, тогда как «старые» пузыри постепенно всплывают и покидают самую центральную область скопления. Учитывая, что скорость расширения пузыря зависит от мощности источника, очевидно, что сильный источник сможет надуть большой пузырь, прежде чем пузырь будет унесен силой Архимеда. А при слабом источнике, наоборот, могут формироваться только небольшие по размеру пузыри.

Дальнейшая эволюция пузырей должна напоминать эволюцию горячего шара, образующегося в земной атмосфере после мощного (скажем, ядерного) взрыва: изначально почти сферический пузырь превращается в процессе подъема во что-то, напоминающее гриб или зонтик. Убедительное подтверждение такой картины было получено в радионаблюдениях массивной и близкой эллиптической галактики M87 (рис.8). Рисунок демонстрирует данные реальных наблюдений пузырей релятивистской плазмы в этой галактике — четко виден «гриб», связанный со старым пузырем, тогда как в центральной части продолжают формироваться более молодые пузыри. А на рис.9 приведены результаты численного моделирова-

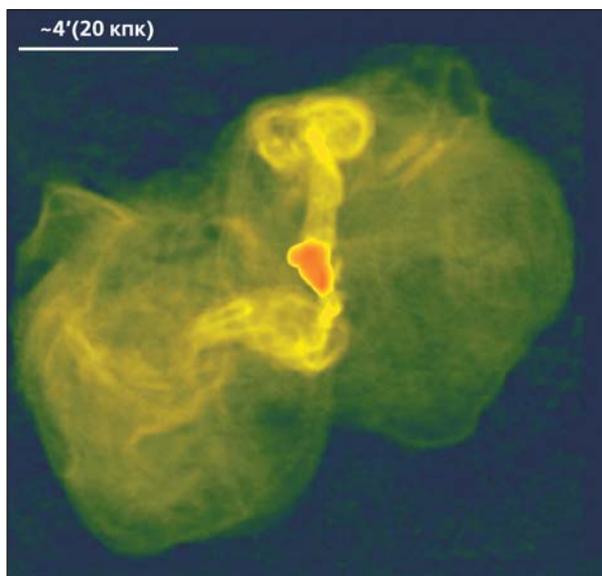
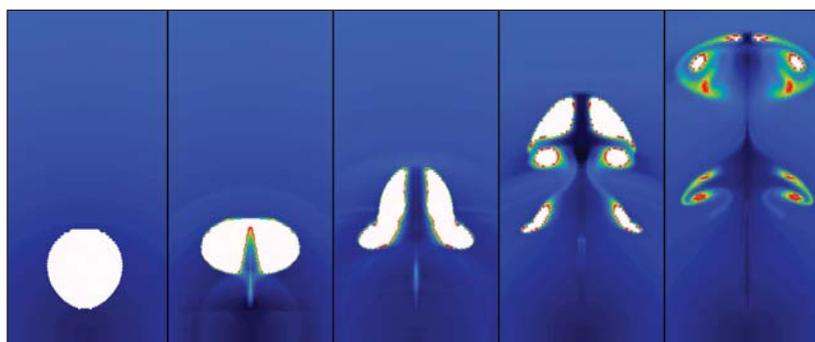


Рис.8. Карта радиоизлучения галактики М87 на длине волны 90 см [7]. Для удобства оригинальный рисунок повернут на  $90^\circ$ . Четко виден «гриб» релятивистской плазмы, поднимающийся от ядра.

ния эволюции пузырей в этой галактике. Оно показывает, что можно довольно точно воспроизвести основные параметры «гриба» в М87 и, например, оценить возраст различных пузырей в М87. Аналогичную модель можно применять и к другим скоплениям.

Теперь, зная динамику эволюции и возраст пузырей, можно оценить и мощность источника, их надувающего, — для скопления в созвездии Персея эта мощность, оказывается, составляет почти  $10^{45}$  эрг/с. Иными словами, порядок величины близок к темпу потери энергии охлаждающегося газа. Подобные выводы были получены и для нескольких других скоплений — «механическая» мощность потоков релятивистской плазмы от центральных черных дыр сравнима по порядку величины с потерями газа на охлаждение и намного выше, чем наблюдаемая светимость этих черных дыр.

Рис.9. Простой гидродинамический расчет эволюции пузырей релятивистской плазмы в атмосфере горячего газа галактики М87 [8]. Видно, как исходно сферический пузырь превращается в процессе подъема в гриб или зонтик. Последовательность картинок соответствует моментам времени 0, 8, 20, 40 и 60 млн лет с момента начала подъема пузыря.



## Саморегулирующийся нагрев

Теперь, когда мы убедились, что черная дыра поставляет значительное количество энергии в окружающий газ, мы должны удостовериться, что эта энергия идет на нагрев газа. Вопрос далеко не однозначный, поскольку мы не знаем в деталях, как пузыри релятивистской плазмы взаимодействуют с газом скопления. Например, мы не знаем, какова эффективная вязкость и теплопроводность в газе скоплений. Нам также неизвестно, происходит ли перемешивание релятивистской плазмы и окружающего газа на микроскопических масштабах. Кроме того, в процессе надувания пузыря могут образовываться ударные и звуковые волны, которые способны приводить как к эффективному нагреву газа (сильные ударные волны), так и к выносу энергии из центральной зоны скоплений (звуковые волны в среде с низкой вязкостью и теплопроводностью). Различные варианты и модели взаимодействия релятивистской плазмы и газа являются сейчас предметом интенсивного обсуждения в литературе. Мы же ограничимся рассмотрением простой задачи о всплывании практически невесомого пузырька. Невесомость пузырька означает, что сумма сил, действующих на пузырек, равна нулю, и что пузырек не несет кинетической энергии. В этом случае легко показать, что пузырек должен потерять большую часть запасенной в нем энергии (внутренняя энергия плюс работа над окружающим газом, см. выше) при подъеме на расстояние, превышающее высоту однородной атмосферы. Эта энергия идет на создание движений газа вокруг пузырька. При большой вязкости эти движения сразу преобразуются в нагрев газа. При очень малой вязкости поднимающийся пузырек создает позади себя турбулентный след и возбуждает внутренние волны (подобные волнам в море) в окружающем газе. Энергия, переданная турбулентным движениям и волнам, в конечном итоге тоже переходит в тепло. Итак, хотя детали всего процесса зависят во многом от вязкости газа, конечный вывод остается неизменным — всплывающие пузыри нагревают окружающий газ весьма эффективно.

Осталось выяснить, как черная дыра «узнает», сколько энергии нужно поставлять в окружающий газ, чтобы предотвратить его охлаждение, но и не перегревать газ. Действительно, слишком низкий темп нагрева не сможет остановить охлаждение газа, и мы вернемся к той же проблеме потоков охлаждения, которую пытались решить. С другой стороны, слишком высокий темп нагрева приведет к повышению температуры и оттоку газа. И мы создадим себе новую проблему — «потоки нагрева» вместо «потоков охлаждения». Нам необходим механизм, обеспечивающий саморегулировку мощности черной дыры, — своего рода обратная связь по параметрам «температура» и «плотность». Интуитивно понятно, как такой механизм может осуществляться в природе — охлаждение или нагрев окружающего газа должны влиять на темп падения вещества на черную дыру и, соответственно, на то, сколько энергии она выделяет. Наиболее простая модель [9] базируется на классическом решении задачи о сферически симметричной аккреции вещества на компактный объект, найденном сэром Херманном Бонди в 1952 г. В этом решении темп аккреции определяется плотностью вещества и температурой газа — чем выше плотность и меньше температура, тем выше и темп аккреции. Именно такое поведение и необходимо, чтобы избежать переохлаждения или перегрева газа — изменения температуры и плотности приведут к «подстройке» активности черной дыры к нужному уровню, чтобы обеспечить примерный баланс нагрева и охлаждения газа на больших временных интервалах. Можно показать, что в простых случаях система из черной дыры и охлаждающегося газа в потенциальной яме скопления будет устойчивой и сама будет находить «правильные» параметры газа — его плотность и температуру.

В качестве очевидного недостатка такой простой модели можно отметить, что аккреция Бонди полностью игнорирует угловой момент вещества, падающего на черную дыру. В реальности даже небольшой угловой момент должен приводить к радикальному изменению характера течения и формированию аккреционного диска вместо сферически симметричного потока. Тем не менее можно надеяться, что эти изменения затрагивают лишь самую внутреннюю часть потока, а общий темп аккреции более или менее описывается формулой Бонди.

Заметим, что альтернативой рассмотренного выше сценария квазистационарной и саморегулирующейся аккреции служит гипотеза о редких, но очень мощных эпизодах активности черных дыр. Подобные эпизоды могут возникать, например, при слиянии двух богатых газом галактик, когда большое количество вещества неожиданно поступает в центральную область одной или обеих галактик и начинает падать на черную дыру.

Огромное количество выделяющейся при этом энергии способно «разбросать» газ вокруг черной дыры или вообще полностью выбросить его из отдельной галактики или небольшого скопления. Слияние галактик может также сопровождаться слиянием и самих черных дыр, что делает всю картину еще более сложной и интересной. Какой из режимов активности черных дыр играет доминирующую роль — вопрос, который сейчас активно обсуждается.

## Некоторые итоги

Таким образом, исследования последних нескольких лет привели к кардинальному пересмотру концепции потоков охлаждения. Вместо ускоряющегося охлаждения потока газа к центру скопления и звездообразования из остывшего газа мы имеем более сложную систему, в которой остывающий газ питает черную дыру, а она, в ответ, снабжает газ энергией и не дает ему охлаждаться. Главным каналом поставки энергии служат пузыри релятивистской плазмы, надуваемые черной дырой. Взаимное влияние черной дыры и газа позволяют им подстроиться друг к другу так, чтобы сохранялось примерное равновесие между нагревом и остыванием газа. В таком состоянии вся система может существовать десятки миллиардов лет без радикальных изменений основных характеристик. В этом смысле картина напоминает работающий холодильник (охлаждающийся газ в скоплении), в который положили работающий же кипятильник (черную дыру), причем их мощности подобрали одинаковыми. Хотя подобная ситуация кажется, на первый взгляд, противоестественной, бытовые кондиционеры реализуют ее в обычных комнатах — понижение или повышение температуры, регистрируемое датчиками кондиционера, приводит к увеличению или уменьшению мощности нагрева, и температура выравнивается.

Если эта картина правильна, то ее следствия могут выходить далеко за рамки проблемы потоков охлаждения. Прежде всего, подобное взаимное влияние черной дыры и охлаждающегося газа может быть тем механизмом, который регулирует рост черных дыр в формирующихся эллиптических галактиках. Простые оценки [10] показывают, что таким образом можно, например, объяснить наблюдаемую связь масс эллиптических галактик и масс сверхмассивных черных дыр. Другой интересный аспект этой картины — вывод о существовании режима аккреции на черную дыру, при котором механическая энергия потоков релятивистской плазмы значительно превышает наблюдаемую светимость черных дыр. Потоки охлаждения, потери энергии которых мы надежно измеряем по рентгеновскому излучению, фактически являются мерой механической энергии черных

дыр. По-видимому, это наиболее простой способ измерения механической энергии аккрецирующих черных дыр.

В заключение остается только отметить, что интенсивные наблюдения скоплений галактик

и потоков охлаждения в радио-, оптическом и рентгеновском диапазоне продолжают, и можно ожидать еще немало сюрпризов и неожиданных поворотов в этой динамично развивающейся области астрономии и астрофизики. ■

**Работа выполнена в рамках программы Отделения физических наук РАН «Протяженные объекты во Вселенной» и при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 05-02-16540).**

## Литература

1. Churazov E., Forman W., Jones C., Böhringer H. // *Astrophysical Journal*. 2003. V.590. P.225—237.
2. Fabian A. // *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*. 1994. V.32. P.277—318.
3. Peterson J.R., Paerels F.B.S., Kaastra J.S. et al. // *Astronomy and Astrophysics*. 2001. V.365. P.L104—L109.
4. Fabian A.C., Sanders J.S., Ettori S. et al. // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2000. V.318. P.L65—L68.
5. McNamara B.R., Nulsen P.E.J., Wise M.W. et al. // *Nature*. 2005. V.433. P.45—47.
6. Birzan L., Rafferty D.A., McNamara B.R. et al. // *Astrophysical Journal*. 2004. V.607. P.800—809.
7. Owen F.N., Eilek J.A., Kassim N.E. // *Astrophysical Journal*. 2000. V.543. P.611—619.
8. Churazov E., Brüggel M., Kaiser C.R. et al. // *Astrophysical Journal*. 2001. V.554. P.261—273.
9. Churazov E., Sunyaev R., Forman W., Böhringer H. // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2002. V.332. P.729—734.
10. Churazov E., Sazonov S., Sunyaev R. et al. // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2005. V.363. P.L91—L95.

По мнению японских геологов, источником многочисленных сейсмических толчков, обрушивающихся на японскую столицу, является расположенная под Токийским заливом небольшая плита (площадью в 10 тыс. км<sup>2</sup> и толщиной 25 км). Она представляет собой «сандвич», состоящий из участков Филиппинской, Тихоокеанской и Евразийской плит. Обнаружена эта микроплита на основе анализа данных по 150 тыс. сейсмических толчков малой магнитуды, отмеченных в 1979—2004 гг.

*Sciences et Avenir*. 2005. №701. P.20 (Франция).

Английские археологи нашли останки двух женщин, находившихся на службе в армии Древнего Рима, которая окку-

пировала Британские острова в III в. Рядом с останками, обнаруженными на кладбище Брухэм, лежали ножи от мечей, скелеты лошадей. Вспомогательное подразделение римского легиона, в котором служили эти воительницы, было сформировано из жителей дунайских провинций Центральной и Восточной Европы, а, согласно греческой мифологии, эти земли были родиной амазонок.

*La Recherche*. 2005. №384. P.18 (Франция).

Французский микроспутник «Parasol», выведенный на орбиту 18 декабря 2004 г., передал свои первые снимки Африки и Европы 7 января 2005 г. Задача, поставленная перед ним Национальным центром

космических исследований, состоит в изучении роли аэрозолей и их взаимодействия с облаками в климатических процессах. «Parasol» способен делать обзорные снимки Земли и ее атмосферы каждые 20 с через спектральные или поляризационные фильтры. Будучи переведен на орбиту высотой 705 км, он станет работать в связке со спутниками НАСА «Aqua» и «Aura» — двумя другими звеньями франко-американской программы «A-train». К 2008 г. международная космическая обсерватория, нацеленная на исследование климата, будет располагать шестью спутниками, имеющими собственные программы наблюдений.

*Sciences et Avenir*. 2005. №697. P.37 (Франция).