

# Хроники черной дыры, записанные в молекулярных облаках

Е.М.Чуразов<sup>1</sup>, И.И.Хабибуллин<sup>1</sup>, Р.А.Сюняев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт космических исследований РАН (Москва, Россия)

Центральная зона нашей Галактики — это чрезвычайно интересная область, в которой «живут» самые экзотические объекты, свойства которых определяются совершенно разными разделами физики. Среди таких объектов — сверхмассивная черная дыра, известная как источник Стрелец А\*, и гигантские молекулярные облака, разбросанные по области в сотни световых лет. Оказывается, что облака и черная дыра могут многое рассказать друг о друге. Облака хранят информацию о вспышках рентгеновского излучения от черной дыры, случившихся сотни лет назад. В свою очередь, вспышки помогают прояснить внутреннее устройство молекулярных облаков.

**Ключевые слова:** центр Галактики, черные дыры, рентгеновское излучение, межзвездная среда.

Черные дыры Виталий Лазаревич Гинзбург называл «самыми важными объектами физики и астрофизики». Сегодня мы знаем о множестве черных дыр звездных масс в двойных системах, а также сверхмассивных черных дыр. Ближайшая к нам сверхмассивная черная дыра расположена в динамическом центре нашей Галактики.

## Насколько ярка черная дыра в центре Галактики?

Наша Галактика Млечный Путь — сравнительно обычная спиральная галактика, каких много во Вселенной. Солнечная система расположена на периферии звездного диска, на расстоянии примерно 8–8.5 кпк от центра Галактики. В ее центре, как и в других галактиках, находится сверхмассивная черная дыра, известная как радиисточник Стрелец А\* (рис.1). Массы таких черных дыр отслеживают характеристики самих галактик, например полные массы звезд в центральном «балдже» или типичный разброс скоростей звезд в нем. Подобные аргументы дают оценку массы нашей черной дыры по-



**Евгений Михайлович Чуразов**, член-корреспондент РАН, ведущий научный сотрудник отдела астрофизики высоких энергий Института космических исследований (ИКИ) РАН. Научные интересы — теоретическая астрофизика, рентгеновская астрономия, скопления галактик.



**Ильдар Инзилович Хабибуллин**, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник того же отдела. Занимается моделированием рентгеновского излучения астрофизических объектов, методиками и интерпретацией их наблюдений.



**Рашид Алиевич Сюняев**, академик, главный научный сотрудник того же отдела. Область научных интересов — теоретическая астрофизика, физические процессы во Вселенной и реликтовое излучение, рентгеновская астрономия.

© Чуразов Е.М., Хабибуллин И.И., Сюняев Р.А., 2017

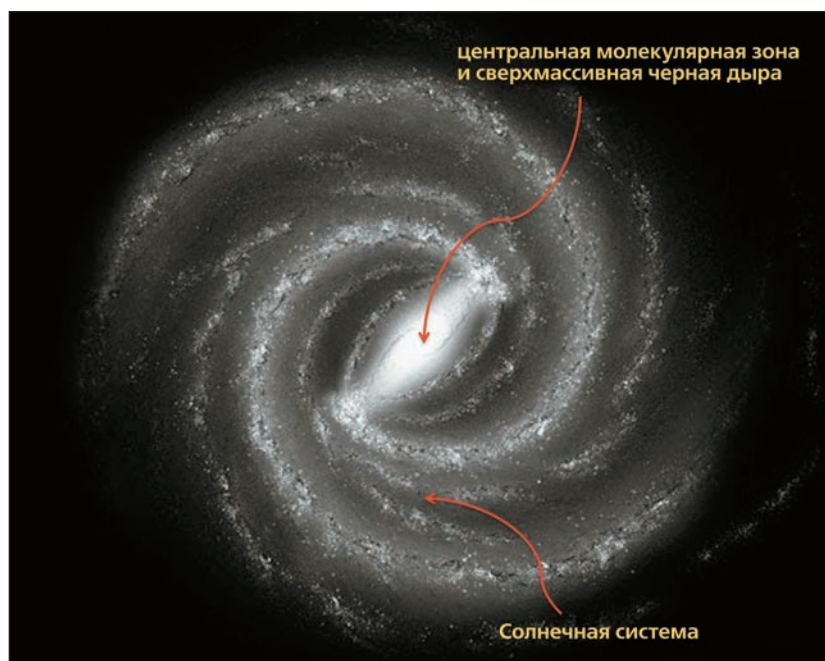


Рис.1. Схематическая картина нашей Галактики (вид из точки, расположенной над ней), на которой показано расположение Солнца и центра Галактики.

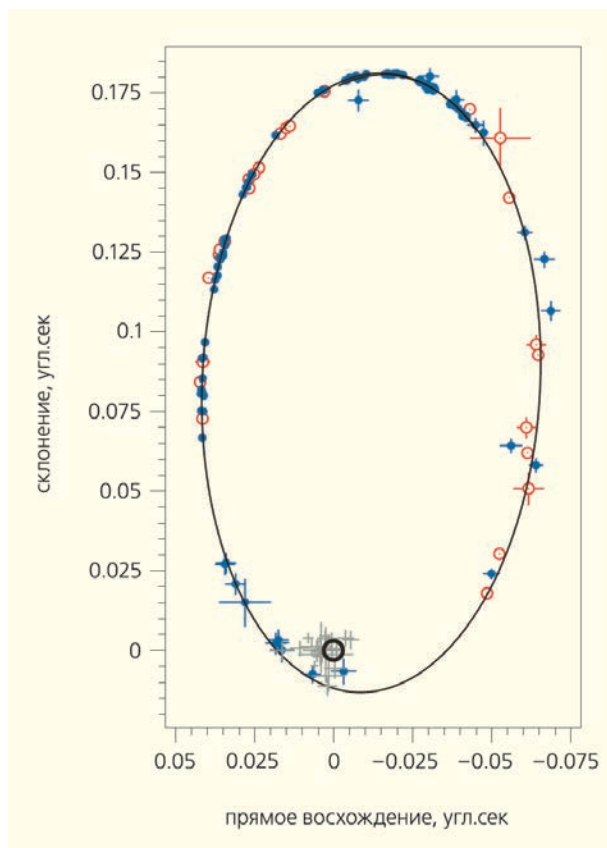


Рис.2. Наблюдаемая орбита звезды S2, делающей полный оборот вокруг сверхмассивной черной дыры за 16 лет [1]. Кружок показывает положение черной дыры.

рядка 6–8 млн  $M_{\odot}$ . Но в случае нашей Галактики мы имеем гораздо более надежные измерения массы черной дыры, прежде всего по движению отдельных звезд вокруг нее (рис.2). Такие измерения стали возможными с развитием инфракрасной астрономии и длительного мониторинга непосредственной окрестности черной дыры. Сегодня орбиты нескольких звезд, пролетающих около нее на расстоянии меньше 1 Мпк, известны с хорошей точностью, и применение законов Кеплера (с учетом релятивистских поправок) дает массу черной дыры в 4 млн  $M_{\odot}$ .

При такой гигантской массе источника Стрелец A\* мог бы быть ярчайшим объектом на всем небе. Светит, конечно, не сама черная дыра, а вещество, падающее (аккрецирующее) на нее. Теория аккреции вещества на черные дыры предсказывает, что светимость объекта с мас-

сой 4 млн  $M_{\odot}$  может достигать  $10^{44}$  эрг/с — так называемой эддингтоновской светимости

$$L_{\text{Edd}} = \frac{4\pi G M m_p c}{\sigma_T} \approx 10^{38} \left( \frac{M}{M_{\odot}} \right) \text{ эрг/с,}$$

где  $G$  — гравитационная постоянная,  $m_p$  — масса протона,  $c$  — скорость света,  $\sigma_T$  — сечение томсоновского рассеяния. Ее величина линейно связана с массой  $M$  черной дыры. При большей светимости давление излучения способно отбросить вещество от черной дыры и ограничить темп аккреции. Именно гигантская светимость таких объектов с массами в миллиарды солнечных позволяет нам регистрировать излучения от них с космологических расстояний, когда возраст Вселенной не превышал 5% от сегодняшнего. Но ничего даже близко приближающегося к уровню эддингтоновской светимости мы не видели от источника Стрелец A\* в современную эпоху. Например, его рентгеновская светимость не превышает одной миллиардной от эддингтоновской. Современные обсерватории регистрируют вспышки от источника (примерно раз в день), но и во время вспышек светимость остается ничтожно малой — многие галактические черные дыры звездных масс в десятки и сотни раз ярче источника Стрелец A\*. Означает ли это, что черная дыра в центре Млечного Пути всегда была столь же тусклой? Конечно, нет. На ранних этапах образования Галактики, миллиарды лет назад, когда шел период интенсивного звездообразования, рост черной дыры почти наверняка сопровождался мощным излучением. Активность источника Стрелец A\* в более близкую

эпоху (миллионы лет назад) связывают и с так называемыми пузырями Ферми (рис.3) — огромными структурами, размером несколько килопарсеков, обнаруженными спутником имени Ферми (НАСА) в гамма-диапазоне. Однако в этом случае прямых свидетельств, что образование пузырей сопровождалось мощным излучением, нет. Например, в скоплениях галактик сверхмассивные черные дыры надувают пузыри релятивистской плазмы [3], оставаясь при этом слабыми источниками излучения.

Пузыри Ферми формировались миллионы лет назад. Можно ли найти свидетельства, что источник Стрелец А\* был ярким в еще более близкую к нам эпоху? Оказывается, да. И центральную роль в этом играют облака молекулярного газа, которые часто встречаются вблизи центра Галактики, в области, называемой Центральной молекулярной зоной (ЦМЗ), имеющей размер в несколько сотен парсеков.

### Молекулярный газ в центре Галактики

Молекулярные облака состоят из сравнительно плотного для межзвездной среды газа (плотность выше 100 частиц на кубический сантиметр) с температурой около 100 К или ниже. Основную массу облаков обеспечивают молекулы водорода  $H_2$ . Однако наблюдать молекулярный водород очень сложно — у такой симметричной молекулы отсутствуют разрешенные вращательные и вибрационно-вращательные переходы. Поэтому основным источником информации о молекулярных облаках служат линии других молекул, например, CO, SiO, CS и т.д. На сегодняшний день множество различных молекул, часто довольно сложных, были зарегистрированы в молекулярных облаках, в том числе расположенных в ЦМЗ. Разные молекулы характерны для газа с различными плотностями и температурами, что позволяет получать информацию о внутренней структуре облаков, а также пересчитывать поток излучения молекулярных линий в полную массу газа. Такой пересчет не всегда точен, но по порядку величины массу оценить можно. Итак, наблюдения молекулярных линий дают нам надежные карты распределения газа и оценку его массы, в том числе в ЦМЗ (рис.4, сверху). Самые массивные облака имеют массы до миллионов масс Солнца, хотя более типичны облака с массой порядка сотен тысяч солнечных.

Оказывается, что присутствие холодного газа в окрестно-

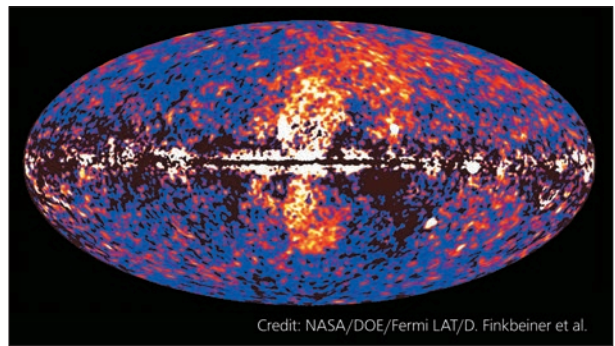


Рис.3. «Пузыри Ферми», обнаруженные обсерваторией имени Ферми в гамма-лучах (например, [2]). На карте, нарисованной в галактических координатах, сверхмассивная черная дыра находится в центре карты, а пузыри — это яркие области сверху и снизу от нее. Многие модели связывают формирование пузырей с активностью сверхмассивной черной дыры миллионы лет назад.

сти источника Стрелец А\* может помочь нам узнать, насколько мощным было рентгеновское излучение сверхмассивной черной дыры в прошлом. Сами молекулярные облака, состоящие из холодного газа, не служат источниками рентгеновского излучения. Тем не менее наблюдения телескопа АРТ-П на советско-французской орбитальной обсерватории «Гранат» в 90-х годах прошлого века показали, что карты диффузного жесткого (с энергией выше 10 кэВ) рентгеновского излучения напоминают карты распределения молекулярного газа (рис.5, слева). Через несколько лет этот вывод подтвердила японская обсерватория ASCA, которая обнаружила линию на энергии 6.4 кэВ, излучаемую теми же облаками (рис.5, справа). Рентгеновское излучение от молекулярных облаков было также зарегистрировано обсерваториями INTEGRAL [9], Chandra и XMM-Newton (например, [10–11]).

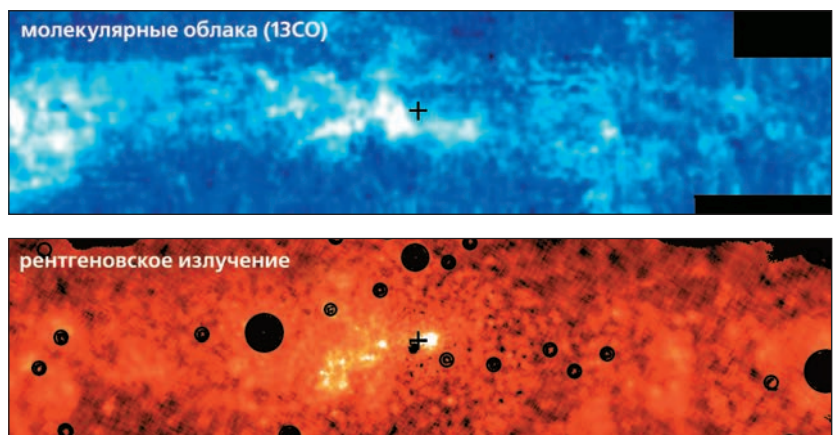


Рис.4. Распределение молекулярных облаков в ЦМЗ по линии молекулы CS (вверху) [4]. Нижняя карта показывает распределение поверхностной яркости рентгеновского излучения, отраженного молекулярными облаками [5].



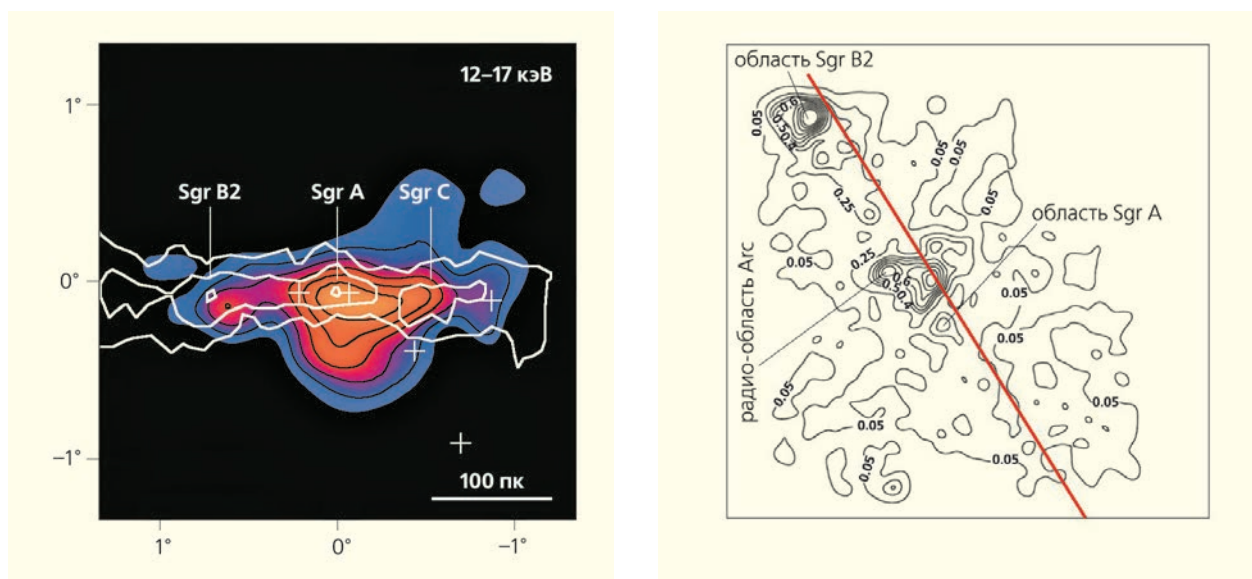


Рис.5. Карта рентгеновского излучения, полученная телескопом АРТ-П (слева). Контурами показано распределение молекулярных облаков [6, 7]. Распределение яркости во флуоресцентной линии нейтрального железа на энергии 6.4 кэВ — по данным обсерватории АСКА (справа) [8]. Галактическая плоскость на этом рисунке показана красной линией.

Все эти факты можно объяснить, предположив, что холодное вещество облаков облучается мощным внешним потоком рентгеновских фотонов. Жесткое излучение тогда связано с рассеянием на электронах в молекулах водорода, а линия 6.4 кэВ возникает при ионизации внутренних

оболочек атомов железа и последующего флуоресцентного излучения. При этом рассеянное излучение пропорционально интенсивности падающего излучения и плотности рассеивающего газа. С этой гипотезой есть одна проблема — на современных рентгеновских картах ЦМЗ мы не видим достаточно ярких источников, способных обеспечить требующийся поток. Эта проблема была решена предположением, что таким источником оказывается именно сверхмассивная черная дыра, причем вспышка рентгеновского излучения произошла более 100 лет назад, задолго до появления рентгеновской астрономии. Тот факт, что сам источник уже погас, но мы продолжаем наблюдать его излучение, рассеянное молекулярными облаками, связан исключительно с конечной скоростью распространения света.

На рис.6 схематично показана природа возникновения запаздывания рассеянного сигнала. Рентгеновские фотоны, распространяющиеся непосредственно в сторону Земли, могли бы быть зарегистрированы более 100 лет назад (если бы в ту пору существовали рентгеновские спутники). Те же фотоны, которые сначала летели в сторону облака, а после рассеяния летят в сторону Земли, достигнут наблюдателя с задержкой, связанной с более длинной траекторией. Массивные облака отстоят от источника Стрелец А\* на 30–50 пк, поэтому и время запаздывания составляет порядка 100 лет. Можно попытаться сделать более точную оценку — все облака, имеющие одинаковое запаздывание, расположены вдоль поверхности эллипсоида (например, [13]). Действительно, из школьного курса геометрии мы помним, что эллипс — это геометри-

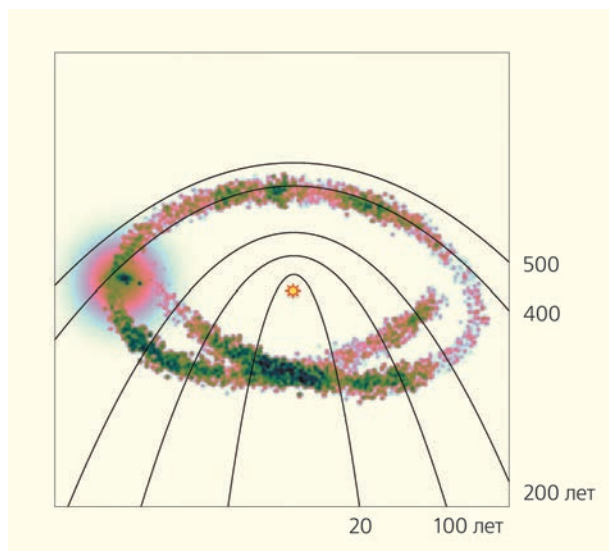


Рис.6. Геометрическое место точек, рассеяние в которых приводит к одинаковому запаздыванию по сравнению с самой вспышкой. Время, прошедшее с момента вспышки, указано около каждой кривой. Для иллюстрации показана модель распределения газа, использованная в работе [5]. Данная модель основана на предположении, что значительная часть молекулярного газа движется по единой (сложной) орбите в потенциале Галактики [12].

ческое место точек, для которых сумма расстояний до двух заданных точек (фокусов) одинакова. В нашем случае в одном фокусе эллипса находится источник Стрелец А\*, а в другом — наблюдатель. И конечно, сумма расстояний больше, чем расстояние между фокусами, на фиксированную величину. Следовательно, в каждый конкретный момент времени мы должны видеть все облака, которые пересекает эллипсоид. С течением времени эллипсоид должен эволюционировать (запаздывание увеличивается), и область, «освещаемая» вспышкой, расширяется и отодвигается на большие расстояния (рис.6). При этом часть облаков становится невидимой, а другие, наоборот, яркими, так как «эллипсоид» проходит через них. Подобная эволюция проиллюстрирована на рис.7, где показаны результаты моделирования распространения освещающего фронта через ЦМ3. Заметим, что фронт может распространяться со скоростью, превышающей скорость света. Никакого нарушения специальной теории относительности при этом не происходит, как и в стандартной задаче про скорость движения солнечного зайчика на стене. Такие «сверхсветовые» движения действительно наблюдаются, лишней раз подтверждая гипотезу, что мы фактически наблюдаем отражение излучения источника Стрелец А\* в «зеркале» молекулярного газа. Заметим, что быстрые изменения на масштабах нескольких лет (рис.8) сразу накладывают жесткое ограничение на продолжительность вспышки. В дальнейшем мы будем предполагать, что вспышка была одна и короткая (короче, чем несколько лет).

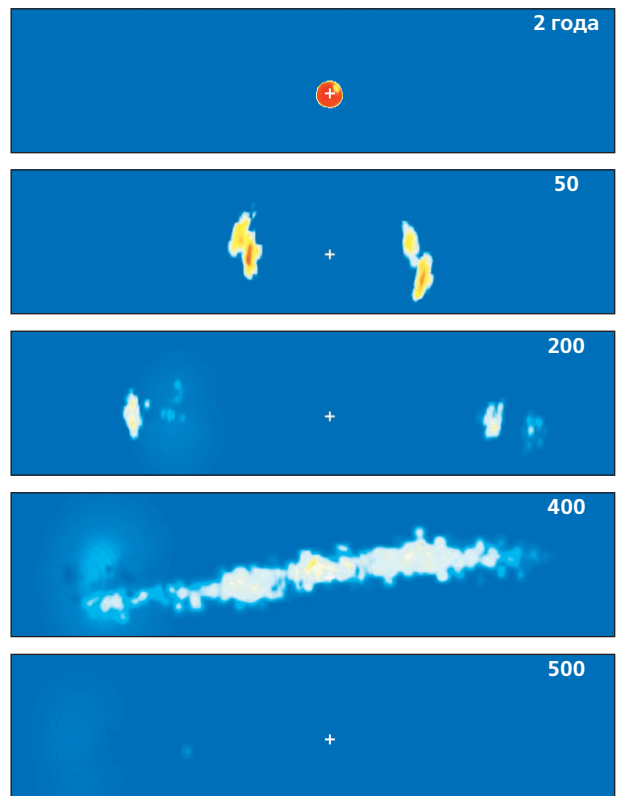


Рис.7. Моделирование распространения вспышки по молекулярному газу (геометрия задачи показана на рис.6). Числа на отдельных панелях показывают время, прошедшее с момента вспышки. С течением времени одни облака «гаснут», тогда как другие становятся яркими. Через примерно 500 лет после вспышки свет покидает ЦМ3.

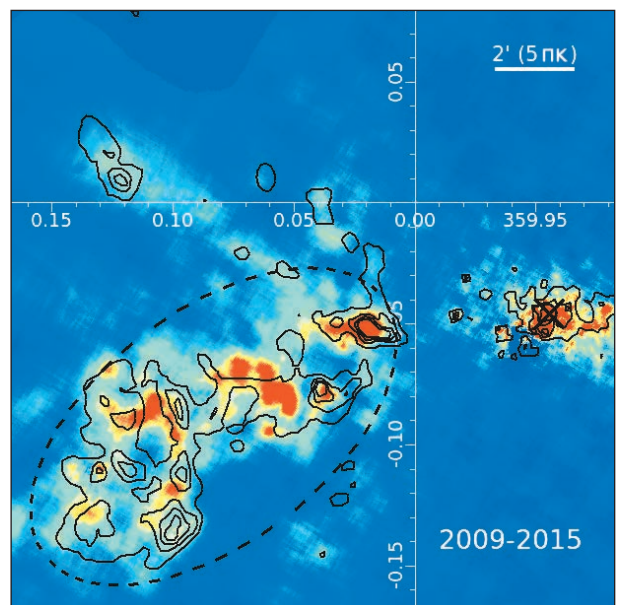
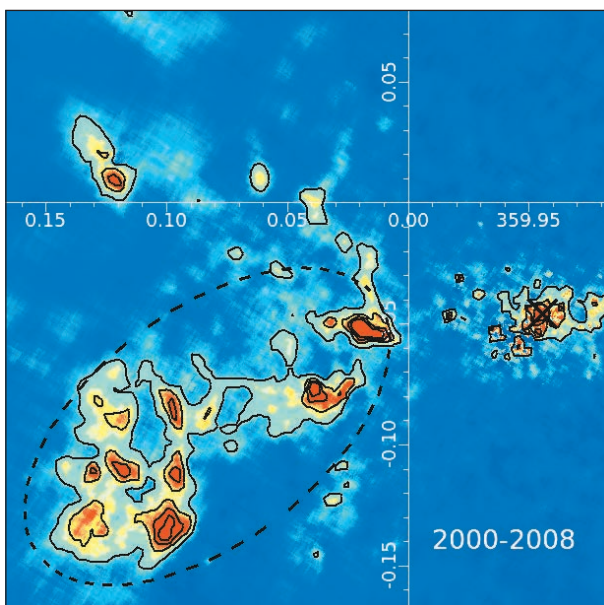


Рис.8. Рентгеновские изображения участка ЦМЗ, полученные обсерваторией Chandra в 2000–2008 и 2009–2015 гг. Видно, как заметно меняется морфология и яркость отдельных участков. Такие быстрые изменения говорят о кажущемся «сверхсветовом» характере переменности, что является важным предсказанием модели отражения.

## Реконструкция 3D-картины молекулярных облаков

Казалось бы, зная положение облаков, мы можем сразу рассчитать время, которое прошло с момента вспышки, используя простую геометрию задачи, показанную на рис.б. К сожалению, мы хорошо знаем лишь положение молекулярных облаков в проекции на небесную сферу, в то время как взаимное расположение источника Стрелец А\* и облаков вдоль луча зрения известно очень плохо. Проблему можно устранить, если измерить скорость перемещения фронта вдоль луча зрения. Эта скорость может быть точно предсказана, и она зависит исключительно от времени, прошедшего с момента вспышки, и от расстояния от источника до облака. Вблизи источника скорость составляет половину скорости света, а на больших проекционных расстояниях неограниченно возрастает. Чтобы определить ее из данных наблюдений, достаточно предположить, что на масштабах заметно меньших, чем размер облака, флуктуации плотности имеют изотропную структуру. Другими словами, характерные размеры неоднородностей плотности одинаковы вдоль луча зрения и в направлении, перпендикулярном ему.

При таких предположениях изменения рентгеновского потока в данном месте молекулярного облака со временем должны соответствовать (в статистическом смысле) изменениям рентгеновского потока на индивидуальных изображениях. Фактически, со временем фронт «сканирует»

облако вдоль луча зрения. Единственный неизвестный параметр в этой задаче — коэффициент пересчета времени между отдельными наблюдениями в расстояние, что и является скоростью движения фронта вдоль луча зрения. Анализ существующих данных для наиболее яркого облака показал, что эта скорость составляет 70% от скорости света. Данное значение сразу показывает, что, с учетом положения облака на небе относительно источника Стрелец А\*, время, прошедшее с момента вспышки, составляет 110 лет. Следовательно, для отдельных наблюдений мы можем восстановить положение эллипсоида и определить плотность молекулярного газа вдоль его поверхности. Повторяя эту процедуру для всех наблюдений, мы восстановим трехмерное распределение плотности газа (рис.9).

Конечно, пока удастся получить 3D-картину только в ограниченном объеме, «просканированном» фронтом за 15 лет наблюдений. В принципе всю ЦМЗ можно просканировать за следующие 400–500 лет. Это задача для будущих поколений. Но уже теперь мы можем, кроме возраста вспышки, оценить и полный поток энергии, излученный сверхмассивной черной дырой, если предположим, что плотность рассеивающего газа известна из наблюдений молекулярных линий. Подобные рассуждения приводят к сравнительно небольшому (для сверхмассивной черной дыры) значению энергии — порядка  $10^{47}$ – $10^{48}$  эрг. Подобную энергию сверхмассивная черная дыра, излучающая на эддингтоновском пределе, могла

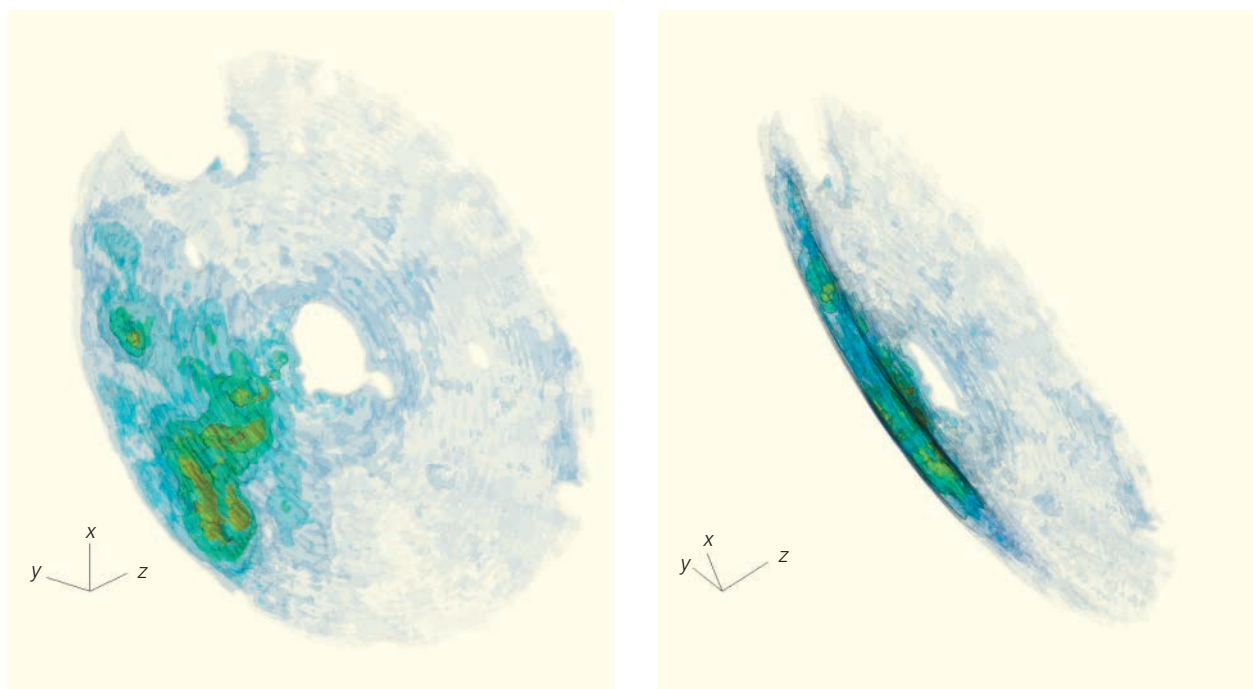


Рис.9. Восстановленное трехмерное распределение молекулярного газа на основе рентгеновских наблюдений [14]. Показаны две разные проекции.



бы излучить за несколько часов. Полная масса вещества, «проглоченная» черной дырой во время вспышки, сравнима с массой планеты. Событие такого масштаба не выглядит чем-то совершенно необыкновенным.

### Тонкая структура молекулярных облаков

Еще более привлекательна возможность исследовать внутреннее устройство молекулярных облаков, используя рентгеновское излучение сверхмассивной черной дыры в качестве своеобразной подсветки [15]. Структура молекулярных облаков очень сложна — в сверххолодном газе присутствуют сверхзвуковые турбулентные движения, которые создают многочисленные сильные ударные волны. Такие волны сжимают газ, пересекаясь, формируя сложную картину из плотных и более разреженных областей. При этом увеличение температуры при сжатии газа компенсируется возрастающими потерями энергии газа за счет излучения. В численных расчетах обычно считается, что уравнение состояния газа изотермическое, т.е. давление зависит только от плотности газа. В самых плотных и компактных областях начинает играть роль самогравитация газа, и динамика газа определяется уже не турбулентностью, а тяготением. В этих областях начинается коллапс газа в еще более плотные «ядра», где в конечном итоге и формируются звезды.

Удивительно, что в ЦМЗ, несмотря на огромные массы молекулярного газа, темп звездообразования не очень велик. В пересчете на единицу массы молекулярного газа эффективность звездообразования в ЦМЗ на порядок ниже, чем в других облаках. Именно попытки понять, какие условия необходимы для эффективного звездообразования, подогревают интерес к проблеме тонкой структуры молекулярных облаков. Возможно, уровень турбулентности в ЦМЗ настолько высок, что турбулентность не помогает созданию плотных областей, а, наоборот, препятствует их возникновению. Важнейшей характеристикой, которая позволила бы провести детальное сравнение численных расчетов и наблюдений, могла бы стать функция распределения плотности в объеме облака. С наблюдательной точки зрения, серьезным препятствием оказывается то, что обычно (например, при наблюдении молекулярных линий) мы видим проекцию всего облака на небесную сферу, т.е. измеряем не распределение плотности в объеме облака, а распределение колонки вещества в пересчете на единицу площади. Наряду с этим условия возбуждения молекул отличаются в разных местах облака, что делает пересчет из потока в плотность сильно неоднозначным. В результате для облака со сложной структурой восстановить функцию распределения плотности очень сложно.

Эти трудности можно обойти, если использовать рентгеновскую «подсветку» излучением черной дыры. Действительно, для короткой (порядка года) вспышки рентгеновского излучения очень узкий слой высвечивается в каждый момент времени, как это показано на рис.б. Для самого яркого на сегодня облака в ЦМЗ толщина слоя будет всего 0.2 пк! Таким образом, рентгеновские наблюдения могут напрямую дать функцию распределения плотности на масштабах меньше парсека. Более того, эффективность рассеяния практически не зависит от ионизационного состояния или деталей молекулярной химии, давая возможность прямых измерений плотности. Единственным ограничением может стать большая оптическая толщина самых плотных областей, сделав их невидимыми. К счастью, с учетом проникающей способности рентгеновских лучей это происходит только в экстремально плотных областях. Первые эксперименты, основанные на этом подходе, показали неплохое согласие рентгеновских наблюдений с результатами численных расчетов. В частности, функция распределения плотности имеет форму, похожую на предсказания для сверхзвуковой турбулентности. Хотя существующих данных пока недостаточно для однозначного вывода, это внушает надежду, что рентгеновские наблюдения смогут помочь решить вопрос о тонкой структуре молекулярных облаков. Без вспышки от источника Стрелец А\* сделать такой анализ было бы невозможно.

### Что могут дать новые обсерватории?

В заключение коротко остановимся на перспективах дальнейших исследований отраженного излучения будущими рентгеновскими обсерваториями. Важное предсказание описанного выше сценария — сильная поляризация рентгеновского излучения, возникающая при рассеянии фотонов на электронах (комptonовское рассеяние). В настоящее время в НАСА и ЕКА разрабатываются несколько обсерваторий, способных измерять поляризацию рентгеновских фотонов по направлению вылета фотоэлектрона в веществе детектора. Чувствительность этих обсерваторий позволит надежно измерять поляризацию от ярких облаков в ЦМЗ. Плоскость поляризации должна быть перпендикулярна линии, соединяющей источник и облако. Следовательно, наблюдения нескольких облаков позволят напрямую локализовать первичный источник рентгеновских фотонов и подтвердить, что это действительно Стрелец А\*. С другой стороны, при комptonовском рассеянии степень поляризации определяется углом рассеяния, который зависит исключительно от взаимного расположения облака и источника вдоль луча зрения. Следовательно, измерив степень поляризации, мы получим независимый метод восстанов-



Рис.10. Общий вид телескопа eРозита обсерватории Спектр-Рентген-Гамма. Высокая чувствительность и большое поля зрения позволят вести поиск переменных источников во время обзора всего неба (снимок печатается с разрешения Института внеатмосферной физики общества Макса Планка — МПЕ).

ления 3D-распределения молекулярного газа. Подобные исследования уже включены в программы этих проектов.

Другим важнейшим этапом станет запуск в космос криогенных рентгеновских болометров, способных измерять энергию фотонов с точностью

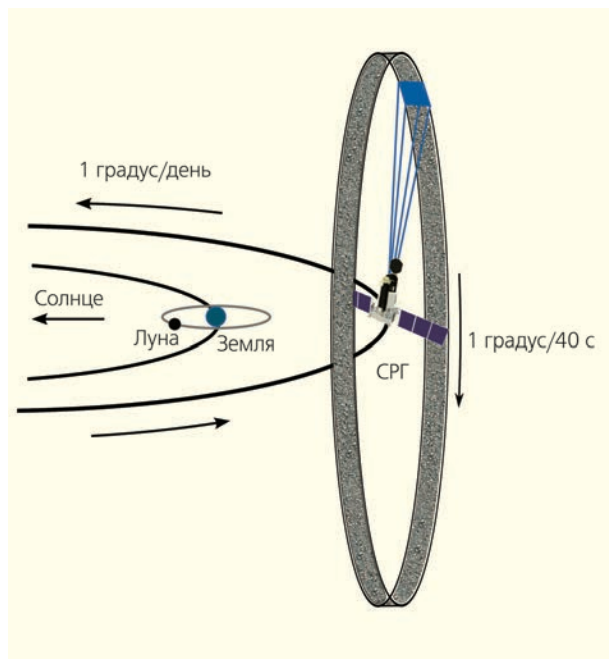


Рис.11. Сканирование неба обсерваторией СРГ во время обзора. Ось вращения направлена на Солнце, в то время как оси телескопов перпендикулярны направлению на Солнце.

в несколько электронвольт. Подобные детекторы уже доказали свою эффективность на японском спутнике Hitomi, который, к сожалению, разрушился, проработав на орбите только один месяц. Нет сомнений, что в ближайшие десятилетия обсерватории типа Athena (ЕКА) или Lynx (НАСА) смогут измерить энергию флуоресцентной линии железа с точностью, которая позволит по эффекту Доплера определить скорость движения газа, рассеивающего рентгеновское излучение источника Стрелец А\*. Таким образом, кроме 3D-карты плотности в нашем распоряжении будут и измерения скорости газа с точностью в несколько километров в секунду. Это даст возможность связать рентгеновские и молекулярные данные, используя информацию о скорости движения газа, а также проверить, на-

ходятся ли молекулярные облака на круговых орбитах в гравитационном потенциале центра Галактики.

Кроме того, важнейший вклад в исследование мощных вспышек от сверхмассивных черных дыр в других галактиках должна внести российско-германская обсерватория «Спектр-Рентген-Гамма» (СРГ). Если описанный выше сценарий универсален, можно ожидать, что время от времени (скажем, раз в сто или тысячу лет) «тусклые» сверхмассивные черные дыры в ядрах обычных галактик на время (порядка года) становятся в миллионы раз ярче. В этом случае обсерватория СРГ, которая в течение четырех лет должна провести восемь обзоров всего неба в рентгеновских лучах (рис.10, 11), сможет обнаружить такие вспыхивающие сверхмассивные черные дыры и ответить на вопрос, насколько «обычно» ведет себя источник Стрелец А\* по сравнению с ядрами других галактик.

Итак, воспользовавшись соседством сверхмассивной черной дыры с молекулярными облаками, мы можем одновременно исследовать историю вспышек черной дыры и внутреннюю структуру облаков. Подобные исследования были бы невозможными без этого необычного «симбиоза». Новые обсерватории открывают поистине уникальные возможности диагностики газа в центре Галактики — от поляризации до скоростей движения облучаемого вещества — и смогут дать много важной информации о физических процессах в этой интереснейшей области Млечного Пути, а также в центрах других галактик.

Один из авторов в свои аспирантские и эмэнэ-совские годы любил ходить на семинары в Госу-



дарственном астрономическом институте имени П.К.Штернберга, которые вели тогда В.Л.Гинзбург, Я.Б.Зельдович и И.С.Шкловский. Запомнился особый интерес Виталия Лазаревича к необычному радиоисточнику Стрелец А\*, расположенному в центре нашей Галактики. Это сейчас мы знаем, что данный источник с удивительным радиоспектром окружает черную дыру с массой в 4 миллиона Солнц. Очевидно, что статья, предлагаемая сегодня вниманию читателям «Природы», была бы интересна для В.Л.: тут и мощнейшая рентгеновская вспышка, происшедшая лет 100 назад, и ее эхо (зайчик) во флуоресцентной линии железа, бегущее на наших глазах с релятивистской скоро-

стью по гигантским облакам молекулярного газа, окружающим центр нашей Галактики — радиоисточник Стрелец А\*.

Говоря про отражение рентгеновского излучения от молекулярных облаков, мы хотим еще раз вспомнить о важнейшем вкладе в эти исследования профессора РАН, лауреата Премии Президента РФ для молодых ученых Михаила Геннадьевича Ревнивцева (1974–2016). С помощью обсерватории ИНТЕГРАЛ он первым обнаружил, что отраженное излучение простирается вплоть до энергий в 200 кэВ, а восстановленный широкополосный рентгеновский спектр похож на спектры, излучаемые активными ядрами галактик. ■

## Литература / References

1. Gillessen S., Eisenbauer F., Fritz T.K. et al. The distance to the Galactic Center. Advancing the physics of cosmic distances. 2013; 289: 29–35.
2. Dobler G., Finkbeiner D.P., Cholis I. et al. The Fermi Haze: A Gamma-ray counterpart to the microwave haze. *Astrophys. J.* 2010; 717: 825–842.
3. Churazov E., Forman W., Jones C., Böhringer H. Asymmetric, arc minute scale structures around NGC 1275. *Astronomy and Astrophysics.* 2000; 356: 788–794.
4. Tsuboi M., Handa T., Ukita N. Dense molecular clouds in the Galactic Center Region. I. Observations and data. *Astrophys. J. Supplement Series.* 1999; 120: 1–39.
5. Churazov E., Khabibullin I., Ponti G., Sunyaev R. Polarization and long-term variability of Sgr A\* X-ray echo. *MNRAS.* 2017; 468: 165–179.
6. Sunyaev R.A., Markevitch M., Pavlinsky M. The center of the Galaxy in the recent past — A view from GRANAT. *Astrophys. J.* 1993; 407: 606–610.
7. Markevitch M., Sunyaev R.A., Pavlinsky M. Two sources of diffuse X-ray emission from the Galactic Centre. *Nature.* 1993; 364: 40–42.
8. Koyama K., Maeda Y., Sonobe T. et al. ASCA view of our Galactic Center: remains of past activities in X-rays? *Publications of the Astronomical Society of Japan.* 1996; 48: 249–255.
9. Revnivtsev M.G., Churazov E.M., Sazonov S.Y. et al. Hard X-ray view of the past activity of Sgr A\* in a natural Compton mirror. *Astronomy and Astrophysics.* 2004; 425: L49–L52.
10. Ponti G., Terrier R., Goldwurm A., Belanger G., Trap G. Discovery of a superluminal Fe K echo at the Galactic Center: The glorious past of Sgr A\* preserved by molecular clouds. *Astrophys. J.* 2010; 714: 732–747.
11. Clavel M., Terrier R., Goldwurm A. et al. Echoes of multiple outbursts of Sagittarius A\* revealed by Chandra. *Astronomy and Astrophysics.* 2013; 558: A32, 1–15.
12. Kruijssen J.M.D., Dale J.E., Longmore S.N. The dynamical evolution of molecular clouds near the Galactic Centre-I. Orbital structure and evolutionary timeline. *MNRAS.* 2015; 447: 1059–1079.
13. Couderc P. Les auréoles lumineuses des Novæ. *Annales d'Astrophysique.* 1939; 2: 271–302.
14. Churazov E., Khabibullin I., Sunyaev R., Ponti G. Not that long time ago in the nearest galaxy: 3D slice of molecular gas revealed by a 110 yr old flare of Sgr A\*. *MNRAS.* 2017; 465: 45–53.
15. Churazov E., Khabibullin I., Sunyaev R., Ponti G. Can Sgr A\* flares reveal the molecular gas density PDF? *MNRAS.* 2017; 471: 3293–3304.

## Chronicles of supermassive black hole, written in molecular clouds

E.M.Churazov<sup>1</sup>, I.I.Khabibullin<sup>1</sup>, R.A.Sunyaev<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Space Research Institute, RAS (Moscow, Russia)

Central region of our Galaxy is an exceptionally interesting place that harbors a number of the most exotic objects, which properties are governed by entirely different branches of physics. Among them there are a supermassive black hole, known as Sgr A\*, and giant molecular clouds scattered over few hundred light-years region. It turns out that the molecular clouds and the black hole can tell us a lot about each other. The clouds keep record of powerful X-ray flares from the black hole that happened hundreds years ago. The same flares help us to understand the inner structure of the molecular clouds.

**Keywords:** Galactic Center, black holes, X-rays, interstellar medium.