



ФИЗИЧЕСКИЙ
ФАКУЛЬТЕТ
МГУ ИМЕНИ
М.В. ЛОМОНОСОВА

teach-in
ЛЕКЦИИ УЧЕНЫХ МГУ

РЕНТГЕНОВСКАЯ АСТРОНОМИЯ: ТЕОРИЯ И НАБЛЮДЕНИЯ

СЕЙФИНА
ЕЛЕНА ВИКТОРОВНА

ФИЗФАК МГУ

КОНСПЕКТ ПОДГОТОВЛЕН
СТУДЕНТАМИ, НЕ ПРОХОДИЛ
ПРОФ. РЕДАКТУРУ И МОЖЕТ
СОДЕРЖАТЬ ОШИБКИ.
СЛЕДИТЕ ЗА ОБНОВЛЕНИЯМИ
НА [VK.COM/TEACHINMSU](https://vk.com/teachinmsu).

ЕСЛИ ВЫ ОБНАРУЖИЛИ
ОШИБКИ ИЛИ ОПЕЧАТКИ,
ТО СООБЩИТЕ ОБ ЭТОМ,
НАПИСАВ СООБЩЕСТВУ
[VK.COM/TEACHINMSU](https://vk.com/teachinmsu).



БЛАГОДАРИМ ЗА ПОДГОТОВКУ КОНСПЕКТА
СТУДЕНТКУ ФИЛОСОФСКОГО ФАКУЛЬТЕТА МГУ
ТУМАНОВУ ДАРЬЮ ПЕТРОВНУ



СОДЕРЖАНИЕ

Лекция 1. Вводная лекция	5
Рентгеновское небо	5
Программа курса "Рентгеновская астрономия: теория и наблюдения"	7
История открытия рентгеновской астрономии и рентгеновские инструменты	10
Образование черных дыр	13
Методы анализа данных в рентгеновской астрономии.....	14
Теоретические предсказания.....	18
Согласие наблюдений и теоретических предсказаний	20
Лекция 2. Обработка рентгеновских данных	25
Рентгеновские данные.....	25
Алгоритмы работы с программой XSPEC.....	27
Примеры использования XSPEC при выходе научных данных	35
Лекция 3. Рентгеновские орбитальные инструменты	37
Рентгеновский космический телескоп.....	37
Проект "Спектр-РГ"	39
Принципы детектирования рентгеновского космического излучения....	41
Гамма-астрономия.....	43
Значимые результаты	45
Лекция 4. Микроквезары в рентгеновском диапазоне	46
Квезары и микроквезары.....	46
Объект SS 433	48
Рентгеновская эпоха SS 433	51
Альтернативные модели SS 433	53
Модели в программе XSPEC.....	55
Лекция 5. Микроквезары в рентгеновском диапазоне. Часть 2	58
Микроквезары.....	58
История открытия и основные параметры GRS 1915+105	60
Подход на основе смены спектральных состояний	63
QPO у кандидатов черные дыры.....	67
Лекция 6. Двойная система с барионными джетами. Метод скалирования	71
Двойная система с барионными джетами 4U 1630-47 71	71
Железо и никель в джетах	72
Определение массы черной дыры методом скалирования	74
Оптическая толща	78
Объект Sw J1644+57	80

Лекция 7. Наблюдения ядра галактики M87	82
Теория шума	82
Сравнение массы черной дыры в M87, полученное разными методами	84
"Пузыри Ферми"	93
Лекция 8. Нейтронные звезды	95
История открытия и основные параметры нейтронных звезд.....	95
Классификации нейтронных звезд	102
Подход на основе спектрального и временного анализа нейтронных звезд	105
Сохранение эффекта стабильности спектрального индекса нейтронных звезд	107
Лекция 9. Нейтронные звезды. Часть 2. Чёрные дыры промежуточных масс	110
Нейтронные звезды - Z-источники: Sco X-1 и GX 340+0	110
4U 1705-44 источник с atoll и Z свойствами	117
Atoll-источник 4U 1700-37.....	119
Актуальные задачи, связанные с нейтронными звездами	122
Чёрные дыры промежуточных масс	126
ESO 243-49 HLX-1.....	128
M101 ULX-1.....	130
Лекция 10. Чёрные дыры промежуточных масс. Часть 2. Белые карлики в рентгеновском излучении	133
Событие приливного разрушения звезд	133
История открытия белых карликов	136
Физика, свойства и классификации белых карликов.....	139
Происхождение белых карликов	143
Рентгеновское излучение белых карликов	149
Лекция 11. Комptonизационные модели	153
Обобщенные модели комptonизации.....	153
Передача энергии в ограниченной среде.....	158
Приложение к наблюдениям и интерпретация в комptonизационных моделях	163
Лекция 12. Активные ядра галактик. Блазары	168
Классификации галактик.....	168
Разнообразие наблюдательных свойств активных ядер галактик	175
VL lас B 2200+420	178
Блазар 3C 454.3.....	179

Лекция 1. Обзор основных задач рентгеновской астрофизики

Рентгеновское небо

Курс "Рентгеновская астрономия: теория и наблюдения" написан в соавторстве с профессором МГУ имени М.В. Ломоносова Титарчуком Львом Григорьевичем. Курс поддержан Фондом развития теоретической физики и математики "Базис".

Космические объекты излучают в широком спектре волн. Картины звездного неба поражают, особенно "Млечный Путь". Любой абстракционист в этом отношении позавидует природе, даже реалисты - древние греки увидели в небе и орла, и лебедя, и дельфина, и лиру. Но всё это мы видим глазом, то есть в видимом диапазоне спектра. Что если бы нам на мгновение дали рентгеновское зрение? Что мы увидим на рентгеновском небе с Земли? Варианты ответов следующие: то же самое, ничего, что-то другое: красное, белое, черное. Оказывается, мы ничего не увидим. Это как "Чёрный квадрат" Малевича - ничего не видно. Оригинал "Черного квадрата" немного неровный, то ли холст потрескался, то ли краска свернулась, то ли ещё что-то произошло. В некотором смысле Малевич был прав (в сравнении с рентгеновским небом с Земли): в действительности мы сталкиваемся с рентгеном на Земле, например, в рентген кабинете фонаят приборы, северное сияние дает рентгеновское излучение; космическое рентгеновское излучение мы с Земли, конечно, не видим (даже Солнца), потому что атмосфера Земли поглощает практически всё рентгеновское космическое излучение, и оно не доходит до земной поверхности. С одной стороны, это хорошо, иначе мы бы все погибли или жили бы в трудных условиях, то есть от рождения ходили бы в скафандрах, жили бы под землей в убежищах и т.д. С другой стороны - мы не видим рентгеновское излучение, то есть виновница во всем атмосфера. Следовательно, нам необходимо выйти за атмосферу, взять с собой телескоп и посмотреть - что там (а вдруг там тоже "Черный квадрат")? За атмосферой рентгеновскому взору открывается красивая картина: мы видим некий **диффузионный фон, который вытянут вдоль плоскости Галактики, и ряд точечных источников.** Первоначально считалось, что диффузионный фон - это свечение некоего межзвездного газа. Но возникает множество вопросов и проблем - откуда берется энергия, где источник разогрева этого газа?

Чтобы найти объяснение, что такое **точечные источники**, была произведена попытка отождествить их с оптическими источниками, то есть наложить карту оптического неба на рентгеновское. Оказалось, что практически все эти точки являются черными дырами и нейтронными звездами. Детектируется, что звезды на поздних стадиях эволюции действительно способны излучать рентген. Отождествление производилось следующим образом: данные со спутника показывают отождествление черных дыр и нейтронных звезд в нашей Галактике по результатам обзора обсерватории ИНТЕГРАЛ, есть яркие, есть еле-еле заметные объекты, видно неровный фон. С разных спутников (где работают приборы с разным принципом детектирования излучения), получают примерно одинаковые изображения, которым уже можно

верить. На изображении области созвездия Орла показано излучение в очень жестком диапазоне [25-50 кэВ], время экспозиции 100 кс (достаточно большое). Показан микроквazar GRS1915+105 (координаты: $\alpha=19\ 12\ 51\ \delta=10^{\circ}51\ 34.4$) и двойная система, микроквazar SS 433, который светит в жестком диапазоне спектра.

О важности фона свидетельствуют и наши коллеги. У "рентгенщиков" есть микроволновой background. Мы говорим: главное, посмотреть источники излучения, что там происходит, черные дыры, нейтронные звезды, а другие специалисты занимаются фоном, причем всю жизнь, целые группы и институты (как в России, так и за рубежом). Фон важен, потому что на нем виден источник. Очень важно его грамотно учесть, поэтому фон необходимо изучать. О важности фона хорошо говорит следующий эксперимент: при демонстрации картины "Мона Лиза" - первое, на что мы обращаем внимание - сама Мона Лиза, а только потом смотрим на фон. На картине очень интересные детали фона: и дороги, и мостики, и люди, и овраги и т.д. Но мы на них не обращаем внимание, хотя Леонардо да Винчи выстроил интересную систему, которая соединяет две стороны фона. Кроме того, Леонардо да Винчи следовал неким канонам (которые сам изобретал): более дальние части фона - более синие, более близкие - в более теплых тонах. Правила построения фона может рассказать любой искусствовед, живописец и даже дизайнер. Предположим, что Мона Лиза - это рентгеновский объект, а мы хотим его изучить. Для этого нам необходимо отнаблюдать, что мы видим в телескоп: Мону Лизу и фон. Чтобы получить Мону Лизу, нужно вычесть фон, то есть необходимо правильно изучать фон и вычитать его.

Природа рентгеновского фона Галактики. Вытянутый вдоль плоскости диффузионный фон Галактики долгое время считался излучением некоего межгалактического газа. Российские ученые Института космических исследований РАН **Михаил Ревнивцев** и **Роман Кривонос** поставили вопрос: что, если это светит множество дискретных источников, которые в силу удаленности расположены очень близко на картинной плоскости и проецируются, как будто они сплошная среда (некий диффузионный газ), но им не являются, а являются скоплением источников? Ученые произвели эксперимент - обзоры неба с обсерваторией ИНТЕГРАЛ и RXTE "Природа рентгеновского фона Галактики и переменности излучения черных дыр и нейтронных звезд". Исследования показали, что фон - это множество дискретных источников. И теперь уже нет проблемы - откуда берется энергия - это звезды, а о них мы всё знаем. За эту работу ученые получили премии. Следовательно, рентгеновская астрономия хорошо оценивается и имеет древние корни.

Ученые Общества научных исследований им. Макса Планка решили раскрасить карту звездного неба: черные дыры одним цветом, нейтронные звезды - другим, белые карлики - третьим. Получилась очень красочная картина, рентгеновское небо не скучное, а очень красочное, заполненное массой объектов, причем новых объектов, которые не видны в других диапазонах. В этом заключается фокус рентгеновской астрономии - мы должны понять, что в ней много интересных задач, загадок и разгадок.

Программа курса "Рентгеновская астрономия: теория и наблюдения"
предполагает рассмотрение следующих тем:

1. Обзор основных задач рентгеновской астрофизики
2. Источники космического рентгеновского излучения
3. Инструменты в рентгеновской и гамма астрофизике
4. Образование черных дыр
 - Особенности излучения микроквазаров (на примере SS433)
 - Микроквазар GRS 1915. Квазипериодические осцилляции
5. Сверхкритический режим аккреции (именно нейтронные звезды достигают этот режим, в отличие от черных галактических дыр)
6. Условия запуска ветра. Вторичный объем масс
7. Классификация спектральных состояний черных дыр
8. Модель комптонизации
9. Классификация черных дыр. Черные дыры промежуточных масс
10. Методы поиска черных дыр промежуточной массы. Оценка массы черной дыры
11. Черные дыры в центрах Галактик
12. Аннигиляционные линии в спектрах черных дыр
13. Приливное разрушение звезд черными дырами
14. Метод скалирования. Блазары
15. Наиболее часто встречающиеся эмиссионные линии в рентгеновских спектрах. (Рентгеновский спектр состоит из континуума и линий. Линии дают вклад в общую освещенность меньше 1%, но по ним очень просто проводить диагностику состояний. Если видны линии, то сразу становится понятно - какая там температура, что есть область, из которой она идет, то есть там температура должна быть холоднее, чем, допустим, той области, где идет континуум. Сразу вырисовываются какие-то детали модели. Поэтому линии очень полезно знать, а в рентгеновском диапазоне набор линий очень специфичный, потому что светят достаточно редкие в оптике элементы в высоких состояниях с большими атомными номерами).
16. Особенности поведения слабозамагниченных нейтронных звезд при спектральных переходах. Классификация состояний черных дыр и нейтронных звезд.

17. Вспышки сверхновых: неустойчивости как механизм инициирования вспышек сверхновых.

18. Квазары. Пузыри Ферми.

Какие мы знаем типы черных дыр?

- **Черные дыры звездных масс** ($5 - 10 M_{\odot}$)
- **Сверхмассивные черные дыры** ($10^{5-6} M_{\odot}$) - это черные дыры центров Галактик

Между ними есть существенный промежуток, логично, что должны быть черные дыры промежуточных масс.

- **Черные дыры промежуточных масс** ($100 - 10^4 M_{\odot}$)
- **Первоначальные черные дыры**

Черные дыры звездных масс и сверхмассивные черные дыры - это кандидаты в черные дыры, но эти объекты, тем не менее, наблюдались. Черные дыры промежуточных масс и первоначальные черные дыры относятся к классу гипотетических черных дыр, но черные дыры промежуточных масс детектировались в наблюдениях. Когда измеряется масса, то по этому критерию можно сказать, что объекты попадают в данный класс. Первоначальные черные дыры - это те, которые образовались во время Большого взрыва.

Где образуется рентгеновское излучение в тесных двойных системах?

Лучше и раньше всех на этот вопрос ответили двое молодых советских ученых **Шакура Н.И. и Сюняев Р.А.** Смысл их теории заключается в следующем: мы видим двойную систему (звезды любят жить парами) - это пара звезд - голубой сверхгигант и черная дыра, они вращаются друг вокруг друга, эволюционируют. В ходе эволюции голубой сверхгигант расширяется под действием давления излучения до размеров полости Роша, вещество оказывается близким ко второму компоненту, оно начинает понемногу перетекать. Перетекая, оно не может сразу упасть на компактный объект, потому что оно обладает вращательным моментом, который появляется, потому что звезды вращались вокруг друг друга. Когда вещество падает - вращательный момент сохраняется. Ученые предложили модель дисковой аккреции - вещество закручивается в форме диска. При этом сразу образуются спиральные сегменты, которые трутся между собой. Это некое вязкое трение, кинематическое, динамическое, от которого возникает разогрев до такой температуры, что начинает светить рентген. Самый яркий рентген - во внутренней части диска - это основная область, где он формируется. Также рентген формируется, например, при отражении от поверхности голубого сверхгиганта, от области столкновения звездных ветров, от джетов. Но основной источник рентгена - это внутренние части аккреционного диска. Шакура Н.И. и Сюняев Р.А. получили государственные премии через 50 лет после написания своей работы в 1973 году.

Джеты противоречат всем законам физики, считается, что они - то лишнее вещество, которое натекло с вторичной компоненты на компактный объект и по какой-то причине вылетает в форме струйных выбросов. Люди очень полюбили джеты и даже создали им памятник - фонтан "Джет", Женева, Швейцария, высота струи 150 м. Фонтан работает постоянно, он выключается только в случае, когда дует очень сильный ветер, который направлен таким образом, что струя воды падает на жилые районы города. Тут мы знаем, почему выключается струя джета, в случае галактических источников – неизвестно по какой причине происходит "выключение" данного явления, выдвигаются только предположения. Джеты обнаруживают в квазарах, это огромные галактики, в таких масштабах также образуются джеты. Наблюдают джеты и в галактических источниках, то есть в черных дырах звездных масс (небольших), их назвали микроквazarы. Микроквazarов существует порядка 20, им будет посвящена отдельная лекция.

Некоторые черные дыры (обсерватории Chandra и RXTE) показывают переменное излучение, причем настолько частое, что пики происходят каждые 50 сек. **Есть ли другие черные дыры, которые тоже показывают подобные пульсации?**

Эти пики похожи на кардиограмму сердца, поэтому астрономы решили, что это удивительный объект, у которого как будто есть и бьётся сердце. Поэтому его первое время называли Хербит. Впоследствии обнаружилось, что пульсации есть почти у всех черных дыр, где для этого есть условия и где можно видеть эти пульсации (область, которая генерирует эту переменность, иногда закрывается). Причем, когда черная дыра вспыхивает - пульсация начинает учащаться, как будто объект волнуется и его сердце бьётся более часто. Соответственно, когда он выходит на более спокойное состояние, эти пульсации выходят на нормальный режим (необязательно в 50 сек.).

На полной шкале электромагнитных обозначено место рентгеновской области, радиоволны, инфракрасные видимые и ультрафиолетовые волны. Рентгеновский диапазон - небольшой, но очень информативный, потому что рентгеновские лучи практически не взаимодействуют с межзвездной средой, в отличие от оптического излучения, которое очень сильно поглощается и не доходит до нас. Например, от источника GRS 1915 до настоящего времени не обнаружено оптическое излучение, хотя это очень интересная черная дыра - микроквazar. А рентген дошел, потому что он перемещается без всяких препятствий.

Рентгеновский диапазон (определение):

- 0.1 - 100 кэВ (100 - 0.1 А)
- делится на три части: **жесткий, классический и мягкий**. Жесткий ближе к 100 кэВ, мягкий к 0.1 кэВ, промежуточный - классический.
- атмосфера Земли препятствует проникновению рентгеновского космического излучения к земной поверхности, поглощая рентгеновские кванты на высотах 30 - 100 км.

История открытия рентгеновской астрономии

Известно, что атмосфера поглощает излучение, исследователи предлагают выйти за неё и посмотреть, что там находится. Но путь выхода за атмосферу очень непростой: во-первых, это финансово обременительно, плюс необходимо иметь двигатель и ракету, скафандр, чтобы не погибли исследователи, или робота. Необходимо иметь оценочные представления - насколько это целесообразно (вдруг там опять "Черный квадрат"?).

Херберт Фридман, американский астрофизик и астроном, член Национальной академии наук США и Американского философского общества, удостоен Национальной научной медали, лауреат премии Вольфа. Ученый работал по заданию Пентагона, ему было поручено узнать, проводят ли в Советском Союзе испытания ядерной бомбы? Фридман предположил, что решить эту задачу можно с помощью детектора, перестроил счетчик Гейгера, немного модифицировав прибор таким образом, чтобы он ловил рентгеновское и гамма излучение (детектировал кванты высоких энергий). Идея состояла в следующем: если русские проводят испытания ядерной бомбы, то при взрыве происходит мощная вспышка излучения, в том числе гамма и рентгеновского. Если зафиксировать подобную вспышку, то это, скорее всего, будет испытание бомбы. В 1949 году Х. Фридман и его группа действительно обнаружили первое испытание советской ядерной бомбы. Поскольку Фридман был более астрономом, чем военным, то он хотел посмотреть не только на Землю – возможно, удастся увидеть рентгеновское излучение и от звезд? Счетчики Гейгера стали устанавливать на ракеты, желая уловить рентгеновское излучение, но подвела чувствительность приборов (недостаточное время экспозиции). Ракета летит по некоторой траектории, некоторое количество часов - этого недостаточно, необходимо ещё локализоваться, чтобы направить прибор на объект, что было сложно реализовать в то время.). В 1964 году Фридман и его сотрудники впервые обнаружили рентгеновское излучение Крабовидной туманности, что произошло в силу яркости источника.

Военная тайна астрофизики. История астрономии шла тайными шагами и загадками, прежде чем ученые вышли за атмосферу с рентгеновским телескопом. В 1964 году была принята Конвенция о запрете ядерных испытаний в трех средах. Было ясно, что страны могут её нарушать, и за этим необходимо следить. Тогда счетчики стали ставить на спутники. Пентагон запустил несколько военных спутников с целью контроля за потенциальными противниками и союзниками. При этом улучшалось время мониторинга, стало возможным посмотреть локализацию. Если ловить сигналы с разных точек (расположить на околоземной орбите несколько гамма-детекторов), или с одной точки на разных спутниках, то по временной задержке импульсов можно будет получить локализацию. Было определено, что Китай и Франция нарушают конвенцию, также было установлено, что нарушает ещё третья держава, которая была расположена в созвездии Большой медведицы. Возник вопрос: что это такое? Поскольку данные

были засекречены, долгое время думали об этой настораживающей и опасной информации. Когда данные рассекретили, то все оказалось намного проще - подключившиеся астрономы доказали, что светят звезды. С этого момента мы говорим о рентгеновской астрономии.

Рентгеновские инструменты

Спутники: сейчас в действии находится множество спутников: *Nicer* (0.2 - 12 кэВ), *RXTE* (2.5 - 250 кэВ), *Chandra* (0.1 - 10 кэВ), *Swift* (0.1 - 200 кэВ), *Suzaku* (0.1 - 200 кэВ). Это самая малая часть того, что есть на орбите Земли (на которой уже тесно), в том числе работает множество рентгеновских детекторов. Спутники можно разделить на две группы, которые различаются по принципу детектирования. У одних (трубообразных) должен быть длинный фокус, поэтому они более вытянутой формы. Коробкообразным спутникам важно нести тяжелую систему, которая вырезает кусок неба и таким образом фокусирует. Весь диапазон захватывает 0.1 - 200 кэВ, у каждого спутника свой диапазон и своя группа задач.

Рефракторы и рефлекторы. Как в рентгене можно детектировать рентгеновское излучение? Допустим, в оптике рефракторы и рефлекторы имеют задачу собрать как можно больше света, сфокусировать его и направить на заранее подготовленный детектор. Представим, что оптический фотон подлетает к линзе или к зеркалу, подчиняется закону геометрической оптики, преломляется или отражается под углом, направляется к детектору. Что сделает рентгеновский квант? Он подлетит к линзе и проигнорирует её - пролетит мимо, и, соответственно, мимо того детектора, который подготовлен. С квантом нельзя договориться с помощью законов оптического преломления. В рентгене должны быть условия комических обсерваторий, то есть мы должны выйти за атмосферу. Принципы детектирования рентгеновского космического излучения - это **зеркала косо́го падения, коллиматоры и кодирующие маски:**

- **Зеркала косо́го падения.** Чем под большим углом к нормали поверхности мы отражаем луч, тем больше энергию кванта можно отразить. Рентгеновский луч падает под очень малым углом и как бы скользит вдоль поверхности. Теоретически, для фокусировки достаточно было бы использовать одно параболическое зеркало, но оно обладало бы двумя недостатками: имело бы слишком большой фокус и было бы подвержено коме. Чем больше угол - тем больше энергия кванта. Постепенно, увеличивая угол, мы можем дойти до рентгеновских энергий квантов. Это было проверено в 1952 году немецким физиком **Гансом Вольтером**. Он предложил следующее: если отражать от параболоида рентгеновский луч под большим углом, то рентгеновский квант отражается, но это малоэффективно. Поэтому было поставлено второе зеркало (парабола), которое отражает второй раз и направляет луч в фокус там, где находится детектор. Единственный минус - что эта система работает только для слабых рентгеновских квантов, то есть там, где небольшая энергия. Для более жестких квантов это зеркало будет прозрачнее, то есть опять не сработает.

- **Пропорциональные счетчики и коллиматоры** установлены на орбитальных рентгеновских обсерваториях Rossi Timing Explorer (RXTE), PCA (3 - 20 кэВ), HEXTE. Какой материал лучше всего поглощает рентген? Из опыта рентген кабинетов известно, что это свинец и бериллий. Для изготовления коллиматора берется болванка большой плоскопараллельной пластины из свинца, в которой нарезается множество отверстий. Это делается для того, чтобы, направив эти отверстия на объект, мы видели только источник. В противном случае, поставив детектор, который точно регистрирует, и отнаблюдав, например, Крабовидную туманность (направив на неё нормаль пластины детектора) мы будем думать, что засняли её (как обычно делается в оптике). Но в действительности детектируется всё, что излучает Крабовидная туманность, а также всё, что излучает справа и слева от неё. Необходим коллиматор, чтобы предположить, что пройдут только те лучи, куда мы направим отверстия пластины. Такая картина была получена. Преимущество коллиматора: решена проблема ориентации на источник. Недостаток свинцовых, бериллиевых коллиматоров - их большой вес и низкое разрешение. Схема успешно внедрена на RXTE/PCA (1995 - 2012). Инструментальный шум ($T \sim -20K$), схема автосовпадений. Таким образом со спутника ловят более жесткие кванты, система и телескоп похожи на бочонок, в отличие от тех систем, которые предназначены для косоугольного падения, чтобы излучение лучше упало под косым углом, должна быть длиннофокусная система.
- **Кодирующие маски.** Принцип работы: кодирующие маски необходимы для в случае, когда изучается объект, но рядом располагаются другие источники излучения. Когда объект один, то алгоритм прост - на него направляется пластина с отверстиями, если рядом будет ещё один объект, то будет фиксироваться суммарное излучение, мы не сможем вытянуть физику этого объекта, получая физику суммарного. Кодирующая маска - это пластина, не пропускающая рентген, на которой набиты отверстия. Предполагается, что если светит красная звезда, то её излучение, пройдя через эту пластину, образует за ней некую тень - тенеграмму, которая будет соответствовать красной звезде. Синяя звезда даст другую тенеграмму. Полученные результаты отдаются математикам, которые решают задачу декодирования и восстанавливают исходное изображение, то есть решают обратные задачи астрофизики (даже, если они некорректные). Вместе с тем, математики высказали мнение, что иногда обратные задачи астрофизики слишком некорректные и не имеют решения. Тогда кодирующую матрицу (обычная бинарная матрица, состоящая из нулей и единиц) заменили на матрицу, которая в большинстве случаев имеет обратное решение. Пример работы реальной кодирующей маски, которая стоит на спутнике ИНТЕГРАЛ, показывает тенеграмму (40 - 100 кэВ) - то, что получилось после прохождения через кодирующую маску. Декодированное изображение области неба Крабовидной туманности - работа математиков, ясно виден объект в центре.

С помощью детекторов можно наблюдать:

- кандидаты в черные дыры;
- черные дыры звездной массы;
- сверхмассивные черные дыры (черные дыры в центрах Галактик);
- приливные разрушения звезд черными дырами;
- ультраяркие источники;
- остатки вспышек сверхновых;
- ядра комет;
- на Юпитере область рентгеновского излучения идет от полярных шапок, от Авроры.

Образование черных дыр

Что удерживает звезду в стабильном состоянии? Сила гравитации сжимает звезду к центру. Любое тело, которое обладает массой, обладает гравитацией. Допустим, шарообразная звезда имеет гравитацию, сила которой направлена в центр. В то же время известно, что в звездах происходит горение H, He, O₂, давление излучения распирает звезду. Эта сила направлена от центра наружу. В результате давление компенсируется, пока эти силы равны - звезда находится в стабильном состоянии. Если, например, водород выгорает, то начинается горение гелия, затем кислорода и т.д., давление излучения распирает звезду, но рано или поздно источник горения закончится, давление исчезнет, а гравитация вечная, её давление останется. Тогда начинается сжатие, схлопывание объекта, он становится более компактным. Сжатие могут остановить некоторые силы (в зависимости от массы объекта). Процесс остановки сжатия происходит следующим образом: при схлопывании звезды вещество как бы поджимается, конденсируется, электроны подошли очень близко друг к другу, при этом уже вступают в силу запреты квантовой механики, которые не позволяют звезде дальше сжиматься.

Варианты развития:

- Из теории известно, что если масса исходного объекта меньше порядка одной массы Солнца ($M_3 < 3 M_\odot$), то образуется **белый карлик** ($R \sim 10^{-2} M_\odot$).
- Если исходная масса звезды была больше, чем одна масса Солнца ($M_3 < 3 M_\odot$), то от остановки происходит выделение энергии, происходит взрыв, часть вещества звезды в форме оболочки слетает, и на месте взрыва остается **нейтронная звезда** - объект размером 10 - 20 км ($R \sim 10 - 20$ км).
- Если масса звезды будет гораздо больше ($M_3 > 3 M_\odot$), то образуется **черная дыра** ($R = R_g$), поверхность не образуется.

Основной механизм выделения энергии в черной дыре - аккреция на компактный объект. Аккреция - это падение. Примером может служить Саяно-Шушенская гидроэлектростанция, где потенциальная энергия гравитационного поля переводится в кинетическую энергию воды, а после этого переводит её в тепло, которое уже светится. То есть сама черная дыра не светится, а светится то - что падает, то - что вокруг нее вращается и заставляет выделять энергию. То же, что и в ГЭС, происходит и в системе звезд. Вещество в аккреционном диске нагревается до миллионов градусов. В двойной системе видимая оптическая звезда-компаньон имеет температуру всего 5 тыс. К, в рентгене она не видна. Зато то вещество, которое падает и заворачивается вокруг компактного объекта, разогревается до больших температур (порядка 100 миллионов К), его уже видно в рентгене. Черная дыра в центре не светит, известно, что черная дыра - это такой объект, в который всё падает и ничего не возвращается, в том числе и свет. Мы не видим черную дыру ни в каком диапазоне, но вещество, которое светится вокруг неё, делает её видимой благодаря аккреции

Кандидаты в черные дыры. До настоящего времени не найдена такая черная дыра, где доказаны все признаки черной дыры: большая масса, компактность и горизонт событий, где происходит остановка пространства-времени - сингулярность (горизонт, который никто не может определить). Поэтому мы говорим только о кандидатах в черные дыры. Примеры кандидатов самые разные: черная дыра Cyg X-1, не такая большая, как GRS 1915+105, LMS X-3. Из 20 хороших кандидатов 17 относятся к рентгеновским новым, 3 имеют массивных компаньонов.

Методы анализа данных в рентгеновской астрономии

Как можно анализировать данные в рентгеновской астрономии? Рентгеновский телескоп RXTE в ходе наблюдений получил кривую блеска, где отмечаются частые пики вспышек, какая-то часть кривой находится в длительном тихом состоянии. Возникает вопрос – по каким причинам возникает подобное явление? Было предложено посмотреть энергетический спектр в каждой точке и измерить временные свойства, так называемый **спектр мощности**.

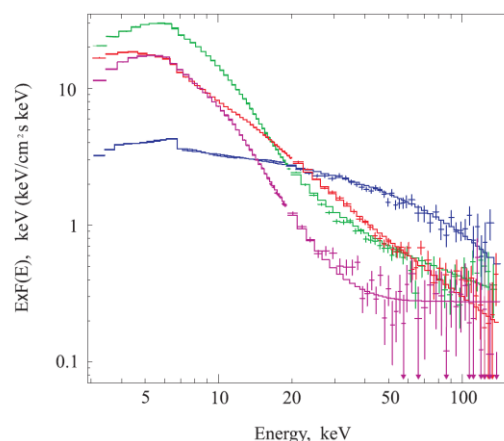


Рис. 1.1. Эволюция формы спектра GRS 1915+105 [3-150 кэВ]

4 основных состояния черной дыры показаны на рис. 1.1.:

- синий спектр - низкое/жесткое состояние
- красный спектр – промежуточное
- зеленый спектр - высокое/мягкое
- фиолетовый спектр - сверхмягкое

Спектр: по оси x - энергия (кэВ), по оси y - количество квантов, то есть распределение, гистограмма количества квантов в потоке излучения. В тихом состоянии (синий спектр) - почти горизонтальная линия, далее постепенно меняется наклон, во время вспышки (зеленый спектр) он поднимается. После окончания вспышки, когда все затухает, происходит обратное действие. Самое интересное, что в каждой вспышке происходит примерно одинаковый сценарий. Для других черных дыр - примерно такой же сценарий, то есть меняется видимый наклон спектра. Необходимо понять, какая модель может вписать такие свойства. Были предложены названия: низкое/жесткое состояние, промежуточное, высокое/мягкое и сверхмягкое состояния. Высокое состояние - это интенсивный поток, мягкое излучение. В синем спектре есть и мягкое и жесткое излучение, в зеленом спектре (максимум вспышки) очень много мягких фотонов и гораздо меньше жестких, которые по какой-то причине пропадают.

Анализ проводится с помощью программы Xspec, которая сама фитирует спектр. Задается модель, программа подбирает параметры модели, перебирая несколько сотен шагов. Программа общедоступна и находится по адресу <https://heasarc.gsfc.nasa.gov/xanadu/xspec/>

Основные процессы излучения в горячей плазме (механизмы рентгеновского излучения):

- **Тормозное излучение.**
- **Синхротронное (циклотронное) излучение.** Если есть магнитное поле, то электрон будет наливаться на линию магнитного поля и излучать циклотронное излучение.
- **Рентгеновское излучение в линиях** при свободно связанных переходах (6.4 кэВ (K_{α}), 6.97 кэВ (Fe XXVI), 6.7 кэВ (Fe XXV), важно главным образом для диагностики).
- **Комптоновское рассеяние** (тепловое, не тепловое). Спектр состоит из континуума (непрерывной части) и набора линий, континуум главным образом образуется за счет комптоновского рассеяния. Это хорошая модель, которая работает и объясняет уже 40 лет. Слабый фотон сталкивается с горячим электроном, они взаимодействуют, электрон отдает энергию фотону, который улетает уже более горячим - это процесс комптонизации, который очень хорошо работает в астрофизической плазме.

- В компактных источниках: **создание пар** → **аннигиляция**.

Как отличить черные дыры от нейтронных звезд?

Это проблема, которая очень популярна в астрофизике в целом, в частности и в рентгеновской области. В оптике она решается просто: диагностика по оптическим данным проводится путем определения массы по кривой лучевых скоростей. Большая масса (больше 3 масс Солнца) - чёрная дыра, масса меньше - нейтронная звезда. Известно, как определить массу в оптике: необходимо посмотреть кривую лучевых скоростей, движутся два объекта, работает эффект Доплера, смещается скорость. Для нахождения массы черной дыры необходимо из независимых данных знать два параметра (помимо кривой лучевых скоростей): $q = m_x/m_v$ и наклонение орбиты i , то есть как объект расположен, с полюса мы видим эту систему или с ребра. Очень часто эти факторы неизвестны, поэтому необходимо по-другому искать косвенные признаки, потому что масса не всегда является надежным параметром.

Как можно оценить массу черной дыры в центре нашей Галактики по динамике ближайших к ней звезд?

Существует много наблюдательных доказательств существования компактных объектов с крупными массами, которые не излучают свет. Эти объекты выдают себя по гравитационному притяжению, например, за счет других звезд или газовых облаков вокруг них. Звезды, теоретически, должны лететь по прямой линии, но траектории их движений изгибаются. Было сделано предположение, что, возможно, есть какая-то невидимая черная дыра в центре Галактики, которая является источником искривления траекторий звезд. Массу объекта Стрелец А мы знаем с потрясающей точностью. Благодаря закону Кеплера можно отследить орбиту движения звезд вокруг центра Галактики и по результатам измерений параметров этой орбиты измерить массу центрального тела. Таким образом была оценена масса черной дыры, которая не видна, но её масса составляет примерно 4 млн. масс Солнца.

Как отличить черные дыры от нейтронных звезд по рентгеновскому спектру?

Эти системы должны быть аккрецирующими. Ученые собрали наблюдения для определения того, что является их характерным признаком:

- Первое время считалось, что это - **быстрая переменность** (вспыхивает/гаснет). С накоплением наблюдений было обнаружено, что нейтронные звезды тоже показывают быструю переменность, следовательно, это не может быть характерным признаком черной дыры.
- **Переходы между мягким и жестким состоянием**: форма спектра меняется, выделяются 4 основных состояния. Но нейтронные звезды тоже показывают переходы между спектральным состоянием (немного другие, но сам факт перехода есть).

- **Электронная температура** в комптонизационных моделях для черных дыр обычно **выше 50 кэВ**, "жесткий хвост", для нейтронных звезд ниже, чем 30 кэВ. Но был обнаружен пример - известная нейтронная звезда Sco X-1, которая показывает "жесткий хвост" и температуру выше 50 кэВ.
- **Широкая асимметричная K_{α} -линия железа** (α – нейтральная, железо обычно описывают формулой Гаусса). Было обнаружено, что её красный конец каким-то образом ассиметричен. Сразу было принято решение, что это - гравитация, релятивизм и признак черной дыры, но через время стало понятно, что нейтронные звезды (и даже белые карлики) тоже показывают широкую ассиметричную линию. Оказалось, что это эффект ветра, так как линии железа образуются не в основании черной дыры, а в ветре. Ветер движется, обычно с какой-то скоростью расширения, если он движется по направлению к Земле, то это будет голубая область линии железа (красную мы не видим), получается некая асимметрия.
- **Рентгеновская светимость в низком/жестком состоянии** обычно выше для нейтронных звезд, чем для черных дыр. Был обнаружен контрпример: черная дыра GS 354-64.

Вышеперечисленные признаки оказываются ненадежными.

Смена спектральных состояний черных дыр

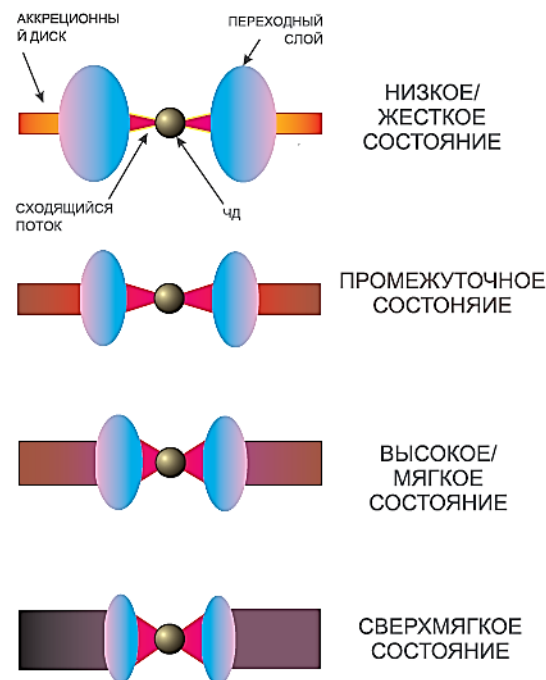


Рис.1.2. Предполагаемый сценарий переходов между спектральными состояниями в рентгеновских двойных системах с черными дырами

Переменность, временные свойства излучения сыграли очень хорошую роль. На рис. 1.2. в разрезе показана модель вспышки, которая идет сверху вниз. Элементы модели:

- аккреционный диск
- в центре - черная дыра
- сходящийся поток на черную дыру
- голубая область - переходный слой между диском и черной дырой

Переходный слой выполняет две функции: собирает и накапливает вещество, в нем происходит комптонизация излучения. В итоге в рентгене светит именно он. Модель такова: каждое тело, которое имеет ограниченные размеры, имеет собственные колебания. Собственные колебания тела - это некая частота. Если взять большой кусок холодца и толкнуть его, то он начнет вибрировать, если мы возьмем небольшой кусочек холодца, то он будет вибрировать быстро. Следовательно, частота колебаний говорит о размере - чем больше размер, тем меньше частота.

Аккреционный диск увеличивается, потому что на него подается больше массы. Считается, что вспышка происходит именно по этой причине. Голубые области - переходный слой, который наоборот - поджимается. То есть следует, что мы должны видеть квазипериодические осцилляции, собственные частоты, которые были сначала небольшими, а затем выросли. Именно это детектируется в наблюдениях, следовательно, эта модель правильная (по крайней мере, на данном этапе).

Мы можем получить различие жесткости наблюдаемых потоков (10 - 50 кэВ/3 - 10 кэВ). Черная дыра показывает более длительный, более вытянутый трек, а нейтронные звезды демонстрируют постоянный блеск, постоянную жесткость. Удивителен тот факт, что они сильно не меняют жесткость, хотя есть спектральный переход.

Теоретические предсказания

Теоретические предсказания для наблюдательной диагностики черных дыр

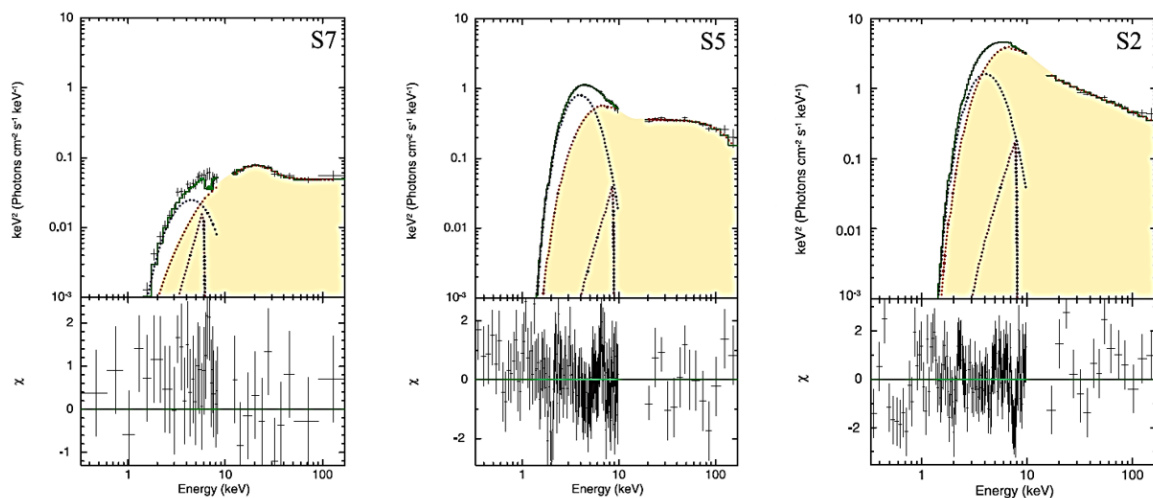
Изменение формы спектра при вспышке у черной дыры и нейтронной звезды различаются. Достаточно давно были сделаны теоретические предсказания: Титарчук Л.Г. и Занниас Т. решили задачу релятивистского кинетического уравнения при невысокой электронной температуре $T_e \leq 5$ кэВ (фикс.). Ученые наши гиперболу, по вертикальной оси - спектральный индекс (аналог наклона спектра), по оси x - скорость аккреции (темп аккреции, сколько падает вещества). У гиперболы имеется интересный постоянный отрезок, это постоянство при больших темпах аккреции (почти 10 масс Солнца) очень важно. Ученые решали задачу при постоянной температуре, а она во время вспышки меняется. Решение было выведено в аналитике, дальше в аналитике

продолжать было затруднительно, поэтому был использован метод Монте-Карло. Через год Лоран&Титарчук произвели расчеты и нашли, что спектральный индекс меняется: монотонно возрастает с темпом аккреции, затем насыщается. Если мы развели костер и подбрасываем туда дрова, то чем больше дров - тем ярче и светлее. Но для черной дыры это не так: мы подбрасываем дрова, но на каком-то моменте костер уже не разгорается, он выходит на насыщение. Это эффект сходящегося потока и эффект горизонта событий черной дыры - признак черной дыры. Данная работа была написана в 1999 году, уже тогда учитывалось изменение температуры в переходном слое, который иногда называется комптоновское облако.

Основная модель:

- диск Шакуры-Сюняева обычно описывается моделью многоцветного диска
- зона комптонизации излучения описывается моделями XSPEC "VMC", "COMPTB", "COMPTT".

Предположим, что в центре находится некий компактный объект, например, нейтронная звезда. Нейтронная звезда имеет твердую поверхность, в отличие от черной дыры. Твердая поверхность способна излучать и отражать, она перехватывает излучение и перенаправляет его в глаз наблюдателя. Эта модель была применима и для черных дыр: если поставить в центр черную дыру, то она будет сопровождаться сходящимся потоком, в котором происходит динамическая комптонизация. Эта модель основана на решении кинетического уравнения, которое впервые решил в аналитике Титарчук Л.Г.



Низкое/жесткое → Промежуточное → Высокое/мягкое
Рис.1.3. Эволюция спектральных составляющих черной дыры 4U 1630-47 по данным обсерватории ВерроSAX

На рис. 1.3. показано как меняется спектр во время вспышки: слева – начало вспышки, справа – максимум вспышки, видно, как меняется состав излучения. Если применить вышеизложенную модель, то процесс можно описать: синяя линия –

излучение, которое идет от диска; фиолетовая линия излучения формируется, скорее всего в ветре или в нижних частях диска, где холоднее; желтая область – от области комптонизации, от переходного слоя; нижняя панель показывает хорошую сходимость модели, теории и наблюдений.

Эволюция маломассивных нейтронных звезд

Допустим, что есть обычная нейтронная звезда, которая не имеет магнитного поля, с малой массой (не больше 1.4 массы Солнца). Этот небольшой класс слабозамагниченных нейтронных звезд подразделяется на два класса:

- **Atoll-источники** - $L_x \sim 0.01 - 0.1 L(\text{Edd})$, рентгеновские всплески I рода, большинство транзитны, отмечается смена спектральных состояний.
- **Z-источники** - $L_x \sim 0.1-1.0 L(\text{Edd})$, немного рентгеновских всплесков, показывают постоянную яркость.

Z-источники на диаграмме показывают букву Z, демонстрируя увеличение массы, при этом меняются состояния, которые уже названы не так, как в черных дырах, а именно: banana, island, horizontal branch, normal branch и flaring branch. Объект - Z-источник, прежде чем уйти на вспышку, должен пройти зигзаг. Отметим постоянство фотонного индекса рентгеновского спектра у источников с нейтронными звездами (4U 1728-34, GX3+1, 4U 1820-30), независимо от их спектрального состояния.

Согласие наблюдений и теоретических предсказаний

Если черные дыры показывают насыщение, то нейтронные звезды показывают постоянство спектрального индекса. Было обнаружено, что это выполняется всегда или почти всегда и является характерным спектральным признаком отличия черных дыр от нейтронных звезд. Что легко проверить по спектральному индексу: необходимо отнаблюдать время вспышки, построить графики с нормировкой, темпом аккреции по горизонтальной оси, по вертикальной - индекс наклона спектра. Если наклон спектра постоянный - это нейтронная звезда, если он меняется - это, скорее всего, черная дыра. Такой простой признак был получен на основе рентгеновских наблюдений за черными дырами и нейтронными звездами.

Sco X-1 внес путаницу и смятение, он расположен высоко над галактической плоскостью (+ 23°), источник очень яркий, его излучение не опускается меньше, чем 1000 К отсчетов в секунду и сжигает детекторы. Было показано, что нейтронные звезды демонстрируют постоянство индекса до некоторых температур. Наблюдаются системы, которые эволюционируют до состояния определенной светимости, но мы не рассматривали очень яркие системы, которые показывают Эддингтоновскую светимость. Важно ознакомиться с влиянием около Эддингтоновского режима на поведение фотонного индекса Γ (фаза снижения индекса Γ как функция T_e и M для Sco X-1 в около Эддингтоновском режиме).

Фаза постоянства индекса Γ обусловлена доминированием вклада энергосвечения зоны комптонизации переходного слоя над вкладом аккреционного диска в до Эддингтоновском режиме. Эддингтон демонстрирует другие свойства, которые характерны только для нейтронных звезд и не характерны для черных дыр. Это новый признак, который также работает.

В Эддингтоне необходимо пересчитывать сечение, так как необходимо сечение, которое зависит от температуры. Электронная температура становится больше, сечение будет меньше, иначе мы бы имели дело со сверх Эддингтоновскими светимостями, которые не существуют. По данным наблюдений источников (Sco X-1, GX 340+1, 4U 1820-30, GX 3+1, 4U 1728-34, 4U 1705-44, 4U 1700-37), объекты действительно показывают такую тенденцию - **снижение индекса при очень больших температурах.**

Черные дыры промежуточных масс

Черные дыры промежуточных масс - обычно внегалактические источники. В центрах Галактик расположены сверхмассивные черные дыры. Черные дыры промежуточных масс, как правило, расположены в рукавах Галактик и обладают меньшей массой. До настоящего времени их происхождение - загадка.

Основная задача - применение признаков черных дыр, найденных в Галактических источниках, к спектрам внегалактических источников и определение массы черных дыр в этих объектах.

Обычно наблюдаются ультраяркие рентгеновские источники, например, ULX-1. К ультраярким относятся рентгеновские источники с потоком, соответствующим изотропной светимости, превышающей Эддингтоновский предел для 10 масс Солнца. Для одной массы Солнца - это светимость 10^{38} , для 10 масс Солнца - 10^{39} . Если мы наблюдаем светимость 10^{39} и больше, то говорим, что это - ультраяркий источник. Но такого не может быть, потому что такая звезда должна была взорваться, разрушиться световым давлением. Этого не происходит, она существует, не взрывается и хорошо светит. Для решения этой проблемы были предложены два сценария:

- Черные дыры звездных масс ($< 100 M_{\odot}$), излучающие в Эддингтоновском или сверх Эддингтоновском режимах
- Черные дыры промежуточных масс ($> 100 M_{\odot}$), излучающие в суб-Эддингтоновском режиме

Критическая (Эддингтоновская светимость)

$$n_b = n_p$$

$$G \frac{(m_e + m_p)M}{R^2} = (\sigma_{\text{томс}}^b + \sigma_{\text{томс}}^p) \frac{L}{4\pi R^2}$$

$$4\pi G m_p M = \sigma_{\text{томс}}^B L$$

$$L = 4\pi G M m_p / \sigma_{\text{томс}} = 1.30 \cdot 10^{38} (M/M_{\text{солн}}) \text{ эрг/с}$$

$$L = 4\pi R^2 \sigma_B T^4$$

Приравниваем гравитацию и излучение. Когда уравнивается гравитация и излучение, то предельная светимость зависит от массы с коэффициентом $1.30 \cdot 10^{38}$. Если поставить массу больше, тогда светимость будет нормальной, Эддингтоновский режим будет выше, физики-теоретики считают, что не бывает черных дыр больших масс, наблюдения показывают обратное.

Галактический маломассивный транзиент ESO 243-47 HLX-1

Объект ESO 243-47 HLX-1 вспыхивает очень ярко, его назвали гиперяркий источник (рентгеновская светимость 0.2 - 10 кэВ), расположен очень далеко - 95 Мпс. Объект определен, как черная дыра промежуточной массы. Было детектировано насыщение индекса в объекте, следовательно, это действительно черная дыра. Что было понятно и по массе, важно отметить, что этот признак выполняется не только для галактических черных дыр малой массы, но и для сверхмассивных черных дыр очень большой массы.

Проект "Горизонт событий"

Прозвучало сенсационное открытие, что впервые зарегистрировано излучение от горизонта событий, зафиксирован прямой и линейный горизонт событий у черной дыры M87 в центре Галактики M87. Это первая и пока единственная черная дыра, которая была исследована очень тщательно. Причины невозможности таких наблюдений ранее - это гигантское расстояние, слабый сигнал и плохое разрешение. Недавно был проведен эксперимент: цель проекта состояла в объединении работы 8 наземных, синхронно работающих радиотелескопов, распределенных по всему миру и объединенных в единую сеть; радиотелескопы одновременно наблюдали, после чего они проводили множество различных процедур, в том числе время выставления, сличение, производился учет множества других факторов. За счет этого было получено колоссальное разрешение и прямое изображение черной дыры, обработка заняла 2 года. Россия не участвовала в проекте по причине того, что у нас мало мест, где можно расположить радиотелескоп, с такой чистотой (прозрачностью) воздуха, который должен быть одновременно сухим.

Метод скалирования

Метод скалирования - универсальный метод, который работает как для черных дыр звездной массы, так и для сверхмассивных черных дыр. Были получены оценки масс черных дыр, согласующиеся с оценками масс другими методами. Подход в оценке массы черной дыры и понимание физики черной дыры согласуется с самыми последними достижениями. Метод был разработан Титарчуком Л.Г. и Шапошниковым

Н., в 2008 году он получил признание и с тех пор победно шествует. Была произведена оценка массы черной дыры в Галактике М87. Фотоны индекса уходят в насыщение, обнаружены аналоги объектов, которые уходят в насыщение на том же уровне. Сканирование основано на аналогии всех физических принципов во время вспышки в системах с черными дырами, где должна быть примерно одна и та же физика потоков, и т.д. Масса черной дыры была оценена в 50 млн. масс Солнца.

Поиск аннигиляционных линий в рентгеновских спектрах галактических черных дыр

Самый простой способ - подлететь к черной дыре и произвести измерения, сфотографировать, но это невозможно в связи с их удаленностью, поэтому задачу решают теоретически. Предсказания теории: теория гравитации, разработанная ещё в прошлом столетии, предсказывает наличие горизонта событий у черной звезды звездных масс и описывает его возможные наблюдательные проявления, в том числе процесс аннигиляции электронов и позитронов с образованием γ -фотонов с энергией 511 кэВ (аннигиляционной линии). Если на горизонте событий падает много вещества, то возникает существенная плотность очень энергичных фотонов, они сталкиваются и порождают электронно-позитронный пар, который впоследствии аннигилирует. Казалось бы, плюс с минусом аннигилируют и всё исчезает, получается ноль. Оказывается, что это не так - должны наблюдаться аннигиляционные линии. Такие линии были обнаружены в центре Галактики и от черной дыры. Эксперимент 1990 года GRANAT/SIGMA, микроквазар 1E - показал, что такая аннигиляционная линия есть на стационарной частоте (она должна наблюдаться на энергии покоя электрона 511К), но через пять лет эксперимент OSSE не подтверждает эту линию, то ли она была переменная, то ли ошибочная. До настоящего времени такие аннигиляционные линии не были обнаружены. Возможно, мы не учитываем некие эффекты в горизонте событий, детектирование горизонта событий черной дыры - до сих пор нерешенный вопрос.

Возможна модель, когда на горизонте событий черной дыры образуется некий слой порядка 100 км. Если фотон образуется в этом слое, то он будет испытывать гравитационное красное смещение, которое будет каждый раз немного разное, будет происходить смещение линии. Если линия была 511 кэВ, то её частота из-за эффекта красного гравитационного смещения сместится к 20 кэВ. Её невозможно будет наблюдать на 511 кэВ, возможно – на 20 кэВ, причем очень "размазанную", потому что ширина слоя такова, что фотоны, которые образуются на дне этого слоя, будут смещаться больше (те, что выше - меньше). У них будет уже не дельта-функция, а достаточно широкая и размытая функция. Такая работа была проведена и опубликована, был сделан вывод о том, что аннигиляционные линии наблюдаются не там, где их искали.

Что такое "Пузыри Ферми"?

Выше и ниже плоскости нашей Галактики по некоторой причине образуются области - пузыри, которые светят в гамма диапазоне. Основания пузырей излучают в рентгеновском диапазоне, по-видимому, - это струи, после которых образуются Пузыри Ферми.

Что такое приливное разрушение звезд "дремлющими" черными дырами?

Представим черную дыру, которая расположена очень далеко от источников питания, от вещества. Она не видна (как и все черные дыры), видно только вещество, которое на них падает и разогревается.

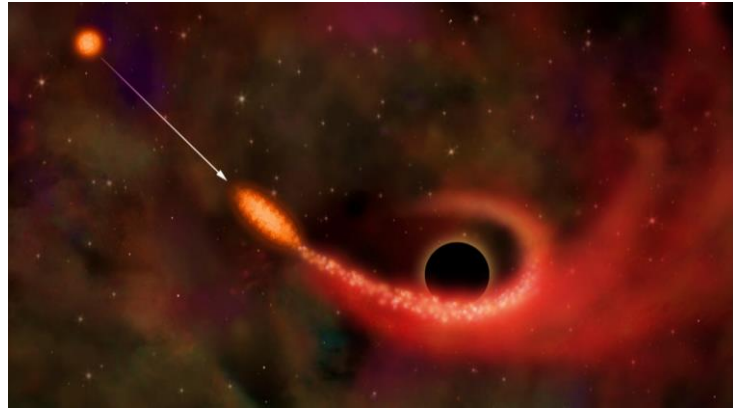


Рис.1.4. Принцип сценария приливного разрушения звезд черными дырами

Траектория летящей звезды проходит мимо черной дыры, дальнейшие варианты развития сценария:

- Черная дыра имеет такую гравитацию, что может захватить звезду (это зависит от прицельного параметра, на каком расстоянии будет пролетать звезда), при этом она её будет разрывать.
- Звезда может пролететь мимо.
- Звезда может изменить траекторию.

Подлетая к черной дыре, звезда растягивается: более близкие к черной дыре части звезды притягиваются сильнее, чем дальние. Осколки звезды будут летать вокруг черной дыры, образуется аккреционный диск, происходит аккреция. Впервые приливное разрушение звезд предсказал **Мартин Рис (Martin John Rees)**, британский космолог и астрофизик. Он считал, что его невозможно наблюдать, но это явление зафиксировано уже при его жизни. Таким образом по следам теоретического предсказания было обнаружено событие приливного разрушения звезд черными дырами.

Лекция 2. Обработка рентгеновских данных

Рентгеновские данные

Сегодня лекция будет посвящена обработке рентгеновских данных, также мы познакомимся с некоторыми приемами работы в программе Xspec. На прошлой лекции мы установили, что для работы с данным необходимо подобрать такую модель, в которую вписывались бы все данные. В частности, мы должны вписать кривую блеска, определить, почему она имеет такую форму, временные характеристики, эволюцию спектра мощности, эволюцию формы спектра. Такая модель есть (рис. 1.2., стр.18), на ней показано, что вспышка происходит сверху вниз. Составляющие модели следующие:

- аккреционный диск Шакуры-Сюняева;
- компактный объект в центре диска - черная дыра или нейтронная звезда;
- переходный слой или комптоновское облако, в котором происходит основной процесс комптонизация излучения.

В процессе развития вспышки диск постепенно увеличивается, утолщается, потому что вспышка развивается таким образом, что темп аккреции увеличивается, увеличивается количество вещества, падающего на черную дыру, которая заворачивается в диск. Далее начинает поджиматься переходный слой. Если мы возьмем большой кусок холодца и потрогаем его вилкой, то он начнет колебаться. Большой кусок будет колебаться медленно, небольшой кусочек холодца - быстрее. В терминах математики любое ограниченное тело имеет собственные колебания, которые зависят от его размера, чем больше размер - тем медленнее колебания, чем меньше размер - тем быстрее колебания. Переходный слой уменьшается, следовательно, его колебания были меньше, а становятся больше. Важно, что именно такую эволюцию спектра мощности мы и наблюдаем, следовательно, в этих терминах данная модель пока вписывается в поставленные задачи.

Изменение формы вспышки во время спектра

Если во время вспышки рассмотреть, как эволюционирует форма спектра у нейтронной звезды и у черной дыры, то можно отметить, что в низком состоянии у черной дыры много как мягких фотонов, так и жестких. При переходе во вспышку мягких фотонов становится больше, а жестких - меньше. Такая эволюция прослеживается для всех черных дыр. У нейтронных звезд похожая ситуация: в низком состоянии спектра тоже есть низкочастотная часть и высокоэнергичная часть, а во время вспышки усиливается доля мягких фотонов. Программа Xspec позволяет фитировать, то есть подобрать модель (не только физическую, но и ту, которая фитирует форму спектра).

На рис. 1.3. (стр.19) показано разложение спектра на компоненты. Одно дело - общая форма спектра, мы понимаем, что она может быть составной. На среднем

спектре хорошо видно, что синяя часть - это спектр от диска, справа - красная часть, комптонизационный спектр, который показан желтой областью. Нижняя панель очень удобная - это термин Xspec, он показывает, насколько применяемая модель соответствует наблюдениям. Зеленая линия - это модель, черные точки - реальное наблюдение. Видно, насколько они отклоняются: вверх - положительное отклонение, вниз - отрицательное (где-то переизбыток, где-то - недостаток фотонов). В данном случае все три панели описывают спектр хорошо. Это видно не только глазом, но и путем отклонений, которые называются дельта χ .

Спектральные и временные свойства

Это очень значимые понятия, которые важно соединить, то есть в каждой точке спектра рассмотреть на спектральные и временные изменения. Очень полезно в каждой точке проанализировать и спектр мощности, и энергетический спектр. Для нейтронной звезды в основном эволюционирует шумовая компонента, таким образом, спектр мощности представляется переменным, в то же время мы видим сильную эволюцию энергетического спектра. У черной дыры GRS 1915+105 отмечается пик, который хорошо виден на фоне шума в форме линии, которую называют квазипериодической осцилляцией. Это собственная частота какого-то образования, например, переходного слоя, то есть мы можем оценить его размер.

Эволюция в радиодиапазоне

Объект GRS 1915+105 является источником радио, инфракрасного и рентгеновского излучения. Неизвестно, почему он вспыхивает и в рентгене, и в радио. Интересное наблюдение: когда происходит небольшая радио вспышка - одновременно происходит и всплеск в рентгене. После этого сразу идет нарастание радиодиапазона, далее рентген выходит на квазиплато (рис. 2.1.)

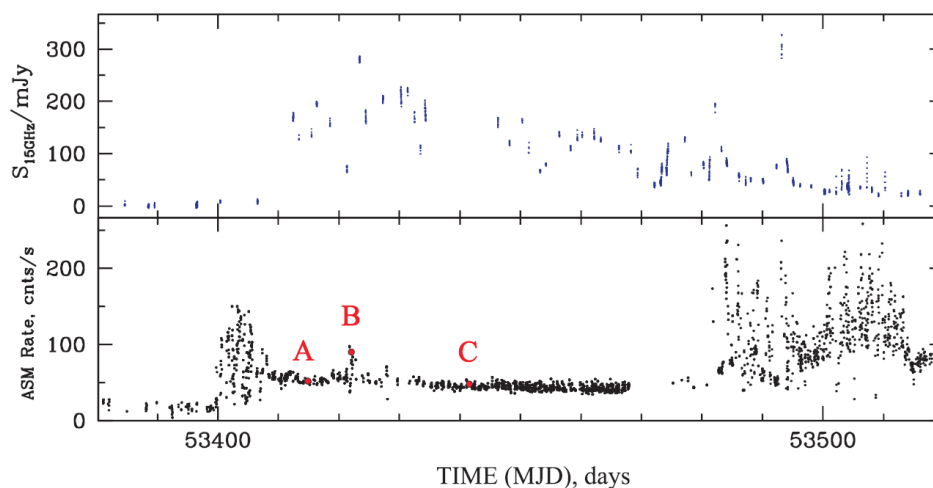


Рис.2.1. Верхняя панель: эволюция плотности радиопотока. Нижняя панель: фаза нарастания рентгеновской вспышки в GRS 1915+105 в 2005 г.

Произошел небольшой всплеск (точка В), который точно совпал с максимумом в радиодиапазоне. Хотя имеется теория, что радио формируется совсем в другой области (по сравнению с рентгеном), тем не менее, отмечается корреляция. Рассмотрим, что происходит в радиодиапазоне с точками А, В и С: в точке А мы видим квазипериодическую осцилляцию, в точке В в момент всплеска остался только шум, сразу после него квазипериодическая осцилляция восстановилась, но уже на гораздо меньшей частоте. Если частота меньше, следовательно, объект больше, то есть объект вспыхнул и расширился. Модель очень важна, важно понимание фитирования спектров (и мощности, и энергетических).

В проекции основной модели показан аккреционный диск Шакуры-Сюняева, обычно он фитируется моделью Multicolor disk. В центре диска расположен компактный объект, например, нейтронная звезда. Составная компонента - это переходный слой между диском и нейтронной звездой. Процесс комптонизации происходит именно в переходном слое, она описывается моделями XSPEC "BMC", "COMPTB", "COMPTT". Главное отличие нейтронная звезда от черной дыры в том, что она имеет твердую поверхность. Это обозначает, что она может излучать и отражать излучение соседних компонентов. Например, излучение переходного слоя может отражаться и перенаправляться в глаз наблюдателя. Если мы переместим в центр черную дыру, она сразу будет сопровождаться сходящимся потоком. У черной дыры нет твердой поверхности, поэтому вещество будет падать на неё беспрепятственно, у нейтронной звезды оно будет накапливаться и, скорее всего, не проникнет в её недра. Сходящийся поток на черную дыру имеет очень интересное свойство: его скорость становится очень большой, почти релятивистской. Это означает, что комптонизация может идти по второму каналу. Электроны уже имеют как тепловую, так и кинетическую энергию, причем кинетическая энергия будет намного больше, чем тепловая. Тогда при комптонизации фотоны будут подогриваться намного больше. В голубой области переходного слоя происходит только тепловая комптонизация, то есть скорость электрона небольшая, он имеет только тепловую составляющую. В данном случае у переходного слоя будет уже динамическая составляющая, и комптонизация будет называться динамической. Из этой области уже вполне возможно излучение жесткого рентгена. Обоснование этой модели предложил Титарчук Л.Г., который первым решил кинетическое уравнение аналитическим образом. Это рабочая модель, которая очень хорошо описывает рентгеновские спектры.

Алгоритмы работы с программой XSPEC

Программа XSPEC является общедоступной, её можно скачать на официальном сайте. Программа позволяет фитировать спектры, которые необходимо сначала получить. Самые популярные спутники, предоставляющие данные: Nicer (0.2 - 12 кэВ), RXTE (2.5 - 250 кэВ), Chandra (0.1 - 10 кэВ), Swift (0.1 - 200 кэВ), Suzaku (0.1 - 200 кэВ), ИНТЕГРАЛ (1 - 1 500 кэВ). Для каждого спутника обработка данных проводится с помощью специального программного обеспечения.

Рассмотрим на примере спутника ИНТЕГРАЛ, каким образом можно работать с данными в программе Xspec, которые собираются в Версуа, Швейцария, ISDC.

Алгоритм работы:

- Обработку данных рекомендуется проводить в оболочке Linux
- Скачиваем архивные данные гамма-рентгеновской обсерватории ИНТЕГРАЛ с сайта ISDC (www.isdc.unige.ch)
- Выбираем необходимый объект в соответствующем каталоге
- Выбираем интервал наблюдений
- Выбираем инструмент: IBIS, SPI, PicSit, OMC
- Скачиваем данные

На сайте есть выход на другие спутники, если нам необходимы другие данные, то их можно посмотреть. На сайте нам предлагается поисковая форма, в которую можно задать название объекта, можно ознакомиться с новостями, которые были получены по спутнику. В разделе **Data Analysis** можно скачать soft, который настроен на спутник и позволяет обрабатывать сырые данные. В разделе **Data Archiv** необходимо заполнить запрашиваемую информацию, после чего предлагается возможность построить изображение (в определенном диапазоне), кривую блеска и спектр. При обработке спектра очень важно получить респонс-матрицу (.rnf), кроме полученного в ходе обработки файла спектра (.pha),

Когда запустили спутник ИНТЕГРАЛ, был объявлен набор заявок. Например, наша группа заявила о наблюдениях объекта SS 433, заявка выиграла конкурс. Заявитель является "хозяином" наблюдений в течении года, через год открывается свободный доступ к данным. Первые наблюдения группы были произведены в 2003 году (спутник был запущен в 2002), с тех пор накопилось много архивных данных. Если исследователю недостаточно данных, то он может подать новую заявку. В марте 2021 года будет произведен набор заявок на будущий этап наблюдения.

Важно знать, из чего состоит спутник, какие используются инструменты. Рекомендуемая документация: "IBIS observer's manual", "SPI observer's manual", "JEM-X observer's manual", "OMS observer's manual", "INTEGRAL AO Tools: Software User manual". Данные всех спутников можно посмотреть на сайте NASA <http://heasarc.gsfc.nasa.gov> в разделе "архив".

Каждая новая версия программы XSPEC отличается добавлением новых моделей. Эта программа также имеет медицинскую версию и может помогать не только в астрономии, но и в медицине. Для работы с данными нам также необходима программа **Ds9**, которая проводит простую проверку объектов поля зрения. Это важно, например, если мы строим спектр, но не знаем, какое излучение. Мы понимаем, что

есть космический фон, есть один центральный объект, других объектов нет. Мы получаем спектр именно этого объекта. Может быть ситуация, когда имеется два объекта, поэтому если мы хотим получить спектр центрального объекта, а второй объект исключить, то нам необходимо ввести радиус поля зрения (чтобы ограничить, вырезать и получить спектр только одного объекта). Далее мы должны посмотреть **кривую блеска**: общий вид, переменность, ошибки измерений (значимость сигнала). Если мы изучаем некий всплеск, то после него излучение постепенно затухает. Важно видеть, как это происходит: сначала объект был яркий, потом менее яркий, в конце концов он исчезает. Видно, что кривая блеска постепенно снижается, следовательно, всё идет по плану и можно вести обработку данных дальше.

Для проведения **спектрального анализа** необходимо скачать программу LHEASOFT, которая содержит программы: XSPEC, POWERSPEC и fv. Программа fv - это удобное чтение fits-файлов. Когда мы получаем наблюдения - это fits-файлы, многомерные файлы, которые содержат информацию о спектре, о кривой блеска, об изображении. После обработки данных мы также имеем многомерные файлы. В программе можно построить график, есть опция сохранения данных в txt-формате

Содержание XSPEC. На сайте программы большой раздел с инструкциями, нам необходимы разделы XSPEC Commands и XSPEC Models.

Основные команды XSPEC

- **xspec** - запуск XSPEC, до этого необходимо сделать оболочку Linux, скачать программу, настроить линки так, чтобы после запуска видеть диагностику (что мы приглашены к диалогу);
- **data** - загрузка данных;
- **back** - загрузка фона для источника. Если объект слабый, то фон может быть очень сильным и влиять на спектр, он может иметь свой собственный спектр. Некоторые программы обработки содержат следующую опцию: при создании спектра иногда требуется подгрузка бэкграунда, который делается автоматически, в этом случае второй раз подгружать фон не нужно;
- **cpd/xw** - загрузка плоттера, то есть вывод на экран для того, чтобы посмотреть на то, что мы получили: каунты, - насколько результат является спектром (это индивидуальная оценка исследователя);
- **plo** - вывод на экран;

В XSPEC практикуется краткая запись:

- **resp <name>.rtf** – сокращенно response, подгружаем респонс-матрицу. Например, мы загрузили данные и видим надпись energy channel, требуется выстроить энергию, именно это делает респонс-матрица, которая конвертирует номер канала в энергию (по горизонтальной оси);

- **art<name>.arf** - подгружаем arf-матрицу, art файл переводит единицы по оси у (сейчас нормализованные каунты). **Каунт** - сколько отсчетов посчитал конкретный энергетический канал. Чему равна энергия мы не знаем. Arf-матрица - это конвертация нормализованных отсчетов в фотоны или эрги, в единицу времени, в единицу площади, в единицу частоты;
- **ing** - 3. 10. -**** - игнорируем те участки спектра, которые не подлежат адекватному фитированию и восприятию респонс-матрицы. Каждый спутник сдает свою респонс-матрицу и сообщает, что она работает хорошо в таком-то диапазоне (это связано с устройством детектора). А спектр мы получаем более широкий. Следовательно, мы должны удалить спектр от $-\infty$ до 3 кэВ и от 10 кэВ до $+\infty$ (точки у цифр в краткой записи указывают, что это энергия в кэВ, иначе это воспринимается программой как номер канала);
- **setplo en** - подгрузка плоттера в энергетических единицах, для получения физического спектра (командой **setplo energy** можно подгрузить энергию, **setplo channel** – каналы);
- **setplo reb/ setplot rebin** - в спектре может быть неприемлемая часть с большим количеством точек (с очень большими ошибками), так как шум превышает сигнал. В этом случае можно перебинить (перегруппировать) спектр. Например, **setplo reb 3 3** означает, что после третьей точки третьего канала мы перебиниваем по три точки;
- **plo ldata del** - спектр в отсчет/с + отключения;

Ввод модели. Мы нашли данные, настроили XSPEC, настроили плоттер, перебинили спектр, теперь нам необходимо ввести ту модель, которой мы будем описывать наблюдательный спектр. Как выбрать модель - это интуиция исследователя, который фитирует. Во-первых, он может посмотреть - какой вид у спектра, на что он похож. Второе - он знает объект и предполагает, какие могут быть реальные физические процессы. Допустим, мы выбрали модель **brem** - тормозное излучение.

- **mo brem** - ввод модели тормозного излучения, после нажатия enter XSPEC предложит ввести входные параметры, которые программа будет фитировать. Можно проигнорировать этот шаг дважды нажав enter, можно ввести начальные значения;

Список основных моделей XSPEC очень обширный, необходимо ориентироваться в том, как работает модель и насколько она приемлема для описания нашего наблюдательного спектра.

XSPEC: bbody model. На рис. 2.2. показано, что blackbody model очень простая и имеет два параметра. В модели предлагается цветовая температура.

A blackbody spectrum.

$$A(E) = \frac{K \times 8.0525 E^2 dE}{(kT)^4 \left[\exp\left(\frac{E}{kT}\right) - 1 \right]}$$

where

par1= kT temperature keV

norm= K $\frac{L_{39}}{D_{10}^2}$, where L_{39} is the source luminosity in units of 10^{39} ergs⁻¹,
 D_{10} is the distance to the source in units of 10 kpc

Рис.2.2. Страница программы XSPEC о модели bbody

В астрономии известны:

- **яркостная температура** (brightness temperature): $I_\nu(T_b) = B_\nu(T_b) \rightarrow T_b$
Яркостная температура - это температура черного тела, имеющего ту же самую яркость на некой частоте, обычно используется в радио и называется Закон Рэлея-Джинса.
- **цветовая температура** (color temperature), где форма спектра очень важна, по ней уникальным образом определяется температура. Например, имеется наблюдательный спектр, и мы хотим выбрать модель, которую будем аппроксимировать. XSPEC покажет - подходит ли выбранная модель. Цветовая температура - это уникальный случай, когда рассматривается только форма спектра. Для нас важна не общая интегральная светимость потока, интенсивность, а форма спектра. Мы измерили поток из наблюдения, но при этом хотим получить интенсивность. Для этого необходимо знать: расстояние до источника и его размер. Мы этого не знаем, но можем измерить цветовую температуру по форме спектра. Например, XSPEC показывает чернотельное излучение и видно, что оно плохо описывает спектр, потому что имеется очень большой выброс. Таким образом, сразу отмечается, что это не есть чернотельное излучение, и необходимо найти другую модель, чтобы описать наблюдательный спектр. Очень важно понимать, что каждая уникальная форма спектра соответствует своей температуре (независимо от расстояния до источника, от размеров, от того, что там происходит), что излучение происходит из оптически тонкой среды. Тогда это действительно будет чернотельный спектр.
- **эффективную температуру** (effective temperature). Имеется поток, измеренный в наблюдениях, приравниваем его к σT_{eff}^4 . Поток известен, σ - это постоянная Стефана — Больцмана.

Эффективная и яркостная температуры зависят от величины интенсивности источника, цветовая температура зависит только от формы спектра. Эта информация важна для дальнейшего фитирования. Например, получен реальный спектр нейтронной звезды, возникают вопросы: какой моделью фитировать и какую температуру определить? Мы знаем, что есть яркостная и цветовая температуры, но XSPEC может показать, что лучше всего описывать электронной температурой по модели комптонизации (которые в XSPEC называются "VMC", "COMPTB", "COMPTT". В программе работает модель "COMPTT", которая была предложена Титарчуком Л.Г., она состоит в том, что происходит комптонизация мягких фотонов в облаке горячих электронов. Мягкий, то есть слабый фотон встречается с нагретым электроном, они обмениваются энергией. Фотон, приобретая энергию, становится более теплым и улетает - это процесс комптонизации. Также в модели учитываются оптические тонкие или толстые режимы. Модель построена на аналитическом решении кинетического уравнения.

Рассмотрим пример, когда выбирается не совсем верная модель: модель тормозного излучения в применении к SS 433. Был рассмотрен спектр в активном и спокойном состояниях, применена модель тормозного излучения. Были получены данные о том, что в спокойном состоянии температура составляет 15 кэВ, во вспышечном состоянии - 20 кэВ, но не узнали физику объекта. Через несколько лет к этим же спектрам со спутника RXTE применили комптонизационную модель "VMC" и получили изменение температур, было определено, что светит диск (температура порядка 1 К), что происходит эволюция, она выдает информацию об излучении комптоновского облака.

Фитирование спектра с учетом систематики в XSPEC. Имеем спектр, применили модель, далее запускается программа фитирования:

- **syst 0.01** - учет систематической ошибки 1%, каждый прибор, каждый телескоп имеет свою систематическую ошибку, это хорошо известно из практической астрономии. Рекомендуется применять ошибку систематики 1% или 0.5%;
- **fit 100** - это ключевая команда, которая запускает фитирование спектра, но до введения этой команды рекомендуется ввести команду систематики (syst 0.01). Цифра 100 обозначает, что фитирование предлагается выполнить в 100 шагов, можно поставить fit 200, можно меньше;
- **вывод на экран в разных единицах:** plo u, plo eu, plo euu, plo euef, при использовании графика снизу выводится панель, которая показывает, где проблемы. На графике глазом мы не можем увидеть отклонения, панель показывает нестыковки модели и наблюдений.
- **plot ?** - если мы не знаем, что нам вывести, то нам предлагают возможности, которые имеет XSPEC;

- **help** - команда позволяет получить ответ на вопрос, например, help, пробел, модель и вопрос;

Измерение модельного потока и подписи на графиках XSPEC:

- **flux 3 20** - измерение потока в интервале 3-20 кэВ (например, для дальнейшего построения зависимости фотон-индекса от потока);
- **ipplot** - команда для представления результатов, с её помощью можно подписать оси, написать названия, поменять цвет каждой компоненты спектра данных (например, командой **co 1 on 6**, номер цвета 1 на 6 компоненту модели);
- **lx** - подпись по оси x;
- **cpd/ps** - печать, **cpd/cps** - цветная печать;

Добавление компонентов модели. Например, мы фитируем данные, следующую модель мы добавляем, чтобы описать "жесткий хвост", жесткую часть спектра, тогда это будет компонента N2 (для её добавления мы используем команду **addcomp**).

- **addcomp** - необходимо ввести add, N2, добавляемая компоненту
- **add 2 gaus** - добавление компоненты N2 с названием "gaus";
- **add 3 bmc** - добавить третью компоненту;

После ввода этой команды XSPEC предложит ввести параметры новой модели и повторить процесс фитирования командой **fit 100** или **fit 200**.

Модель можно комбинировать, например, невозможно описать спектр в рамках одной модели. В этом случае комбинация: модель плюс вторая модель (рис. 2.3.), при этом важно понимать, что эти модели могут быть аддитивными. $Phabs*(powerlaw + bbody)$ - это аддитивная компонента.

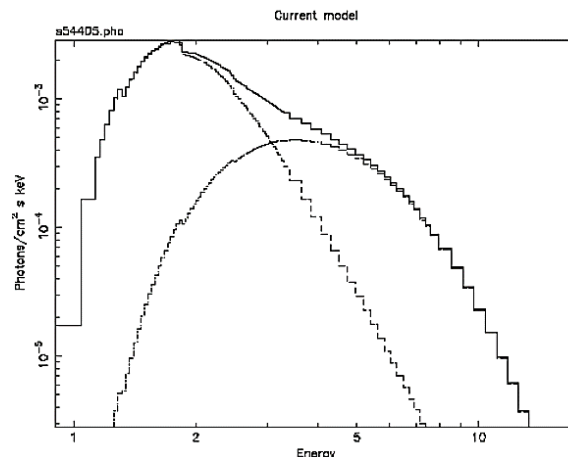


Рис.2.3. Комбинированная модель XSPEC: $phabs*(powerlaw + bbody)$

Имеются мультипликативные компоненты, которые предполагают, что их необходимо на умножить на некий компонент. Например, **phabs** - это межзвездное поглощение, этот параметр умножается.

Результаты XSPEC выдаются в виде, показанном на рис. 2.4. Показана каждая компонента и лучшие величины, внизу обозначен chi-square и reduced chi-square.

```
-----  
Model: phabs[1]( powerlaw[2] + bbody[3] )  
Model Fit Model Component Parameter Unit Value  
par par comp  
1 1 1 phabs nH 10^22 4.000 frozen  
2 2 2 powerlaw PhoIndex 6.401 +/- 0.3873  
3 3 2 powerlaw norm 1.086 +/- 0.3032  
4 4 3 bbody kT keV 1.199 +/- 0.8082E-01  
5 5 3 bbody norm 2.6530E-04 +/- 0.3371E-04  
-----  
Chi-Squared = 37.21207 using 31 PHA bins.  
Reduced chi-squared = 1.378225 for 27 degrees of freedom  
Null hypothesis probability = 9.118E-02
```

Рис.2.4. Результаты объекта 1E 1048 в программе XSPEC

Удаление компонентов модельного спектра:

- **delcomp 3** - удаление компонента 3 модели;

Процедура "замораживания-размораживания" параметров. Например, мы понимаем, что температура в диске не может быть больше 1 кэВ, а в процессе фитирования XSPEC выдает больше 6 кэВ. Это будет не физический результат, он не имеет ценности, поэтому этот параметр можно сразу заморозить.

- **freez 5** - замораживание (фиксация) параметра 5;
- **tha 5** - размораживание (высвобождение) параметра 5;

Аддитивные и мультипликативные модели XSPEC. Пример, `wabs*(bmc + bb + ga)*highcut`. Отмечаем, что спектр, скорее всего, приближен к действительности, есть `bmc` часть, то есть комптонизационный спектр, есть спектр от диска и линия. Мы можем умножить на межзвездное поглощение, для "жесткого хвоста" можно добавить команду `highcut`. Чем меньше параметров у модели, тем точнее результат. Если параметров много (константа кросс-нормировки, межзвездное поглощение, сумма `reghav`, `zgauss`, `zpowerlw`), то такой моделью можно описать практически всё, но при этом получить нефизический результат, хотя с точки зрения статистики он будет очень хорошим.

Запись в ASCII-файл используется для переноса результатов XSPEC в плоттер, графопостроитель:

- **wd <name>** - добавление компоненты;

Добавление и удаление данных:

- **data 2 <name>** - добавление второго сета данных. Например, спутник RXTE проводит наблюдения с помощью двух детекторов, эти данные разные, их

необходимо вводить отдельно. Для вторых данных также будет необходимо вводить респонс-матрицу и arf -матрицу, игнорирование и т.д.;

- **data 2 none** - удаление второго сета данных;
- **data none** - удаление всех данных. Эта команда удобна, когда необходимо провести фитирование спектра объекта во всех состояниях. Фитировать целесообразно в одной модели (для сравнения данных). Если мы профитируем одно состояние в одной модели, а второе состояние - в другой, то они уже будут несравнимы. Мы фитируем один спектр, удаляем все данные, модель остается, подгружаем в неё вторые данные и фитируем их. Это будет более достоверный вариант, потому что будет показана эволюцию примерно в одной и той же модели.

Критерий приемлемости модели - критерий χ^2 . Математический критерий отклонения от модели называется χ^2 reduced. χ^2 - считается квадрат отклонений, делится на количество степеней свободы. Если он стремится к 1, то есть теорема, которая утверждает, что в этом случае модель хорошо описывает данные. Например, в рассмотренном ранее случае фитирования `powerlaw + bbody` в строке результатов XSPEC показан `Reduced chi-squared = 1.378225`, это не очень хороший результат. На эту строку необходимо смотреть для ориентации. Лучше, когда это значение строго равно 1, в этом случае все будет действительно хорошо и на плоттере, и на экране, и с результатами `bestfit` параметра.

Примеры использования XSPEC при дальнейшем выходе научных данных

Эволюция Сейфертовских галактик. Спектры источников были профитированы в XSPEC, получены зависимости, например, фотонного индекса от светимости. В Сейфертовской галактике фотонный индекс не поднимается выше значения 2. Это интересный факт, который нельзя получить глазом, он сразу говорит о физике, а главное - о температуре, которая имеет место во внутренней части галактического диска.

Эддингтоновская светимость - это случай, когда гравитация уравнивается световым давлением. Формула: слева - гравитация, справа - световое давление. Приравняем $m_e + m_p$, пренебрежем массой электрона по сравнению с массой протона и сечением протонов. При этом сокращается R^2 . Во второй строке есть неизвестная L , то есть светимость. Этот параметр - масса центрального объекта.

$$G \frac{(m_e + m_p)M}{R^2} = (\sigma_{\text{томс}}^{\text{B}} + \sigma_{\text{томс}}^{\text{P}}) \frac{L}{4\pi R^2}$$
$$4\pi G m_p M = \sigma_{\text{томс}}^{\text{B}} L$$

После расчетов показатель светимости (при которой гравитация уравнивается световым давлением) равен $1.30 \cdot 10^{38}$ для одной массы Солнца, для 10 масс Солнца - 10^{39} .

После XSPEC можно получить, например, **поведение жесткости наблюдаемых потоков**: полученный спектр делится жесткую и мягкую часть, получаем жесткость. Для черной дыры демонстрируется более расширенный трек, нейтронные звезды показывают плоские треки. По трекам сразу можно увидеть отличие черных дыр от нейтронных звезд.

Возможно посмотреть, как меняется фотонный индекс, который более четко отслеживает форму спектра. Для черных дыр фотонный индекс определяется как функция темпа аккреции, при нарастании темпа он монотонно возрастает, выходя на плато.

Обычно нейтронные звезды показывают некую эволюцию формы спектра. Они могут выходить на Эддингтоновский режим, светить на пределе, когда гравитация сопоставима с давлением излучения. В объекте (нейтронная звезда 4U 1705-44) мы получаем сверх Эддингтоновскую светимость, но теоретики утверждают, что это невозможно, по причине того, что при этих условиях светимость больше, чем гравитация. При этом объект должен разорваться светимостью, давлением излучения. Но исследователи наблюдают эту звезду, это фокус сверх Эддингтона. Этот режим показал, что индекс является постоянным для нейтронных звезд, которые ещё не достигают Эддингтоновского режима, в котором они показывают падение индекса. Это новый признак: по поведению спектра во время вспышки в объекте мы можем сразу сказать, что там нейтронная звезда.

Главные спектральные признаки отличия черных дыр от нейтронных звезд:

- черные дыры показывают монотонное нарастание индекса и выход на квазиплато;
- нейтронные звезды показывают постоянство индекса.

Фотонный индекс равен спектральному индексу плюс единица: $\Gamma = \alpha + 1$
Исторически сложилось, что одна группа исследователей использовала фотонный индекс гамма, другая группа - спектральный индекс альфа, при сопоставлении было обнаружено отличие в единицу.

Рассмотренные нами сегодня данные были получены на базе фитирования в XSPEC.

Лекция 3. Рентгеновские орбитальные инструменты

Рентгеновский космический телескоп

Оптические и радио данные можно получить и из космоса, и с поверхности Земли, рентгеновские данные - только из космоса. Для этого необходимо подняться на орбиту, полет может быть пилотируемый или беспилотный, но обязательно с космическим рентгеновским телескопом.

На прошлой лекции мы рассмотрели обработку данных - важнейшую составляющую работы астрономов, которая занимает очень большой объем времени. Примером многолетней обработки данных является проект "**Горизонт событий**", в котором были объединены усилия 8 наземных радиотелескопов, распределенных по поверхности Земли таким образом, что диаметр телескопа - это радиус Земли. Было получено очень высокое разрешение одного прямого изображения черной дыры, обработка которого заняла 2 года. Рекордсменом по цене проекта является **Большой андронный коллайдер** (CERN, Женева), "кольцо" длиной 27 км, в ходе экспериментов на нем достигаются энергии ~ 10 ТэВ. Реальна ли опасность экспериментов на Большом андронном коллайдере? Есть умозрительная идея о том, что на нем могут образовываться крошечные черные дыры с массами, близкими к массе бозона Хиггса. Это работает, если у нашей Вселенной имеются дополнительные измерения, подтверждений этой теории пока не было. Андронный коллайдер захватывает и может воспроизвести часть спектра космических лучей. Зельдович Я.Б., "отец" астрофизики говорил, что Вселенная - это коллайдер, который уже создан, для работы которого не нужны средства.

Космические лучи - одновременно и объект, и инструмент изучения

- Новый канал информации. Мы выходим за атмосферу и смотрим рентген и гамма излучение, это дает информацию, которая приходит из самых дальних областей.
- Вопрос о происхождении и эволюции.
- Открытие новых частиц. Естественные ускорители.

На 90% космические лучи состоят из протонов, на 10% - из альфа частиц, остальное - более тяжелые ядра, электроны и т.д. Первичные космические лучи практически не достигают поверхности Земли (1%), вторичные частицы - на 70% мюоны, на 30% - электроны и позитроны.

Происхождение: галактические космические лучи в основном связаны с остатками сверхновых. Рентгеновское излучение остатка сверхновой SN 1006 говорит о наличии электронов с энергиями 100-200 ТэВ. В спектре электромагнитного излучения слева от рентгена находится область гамма излучения, справа - ультрафиолет, далее области оптики, инфракрасного и радиоизлучения. Земной шар окутан атмосферой, которая экранирует космическое излучение. Для того, чтобы имитировать атмосферу

Земли и поглотить все рентгеновское космическое излучение достаточно слоя свинца толщиной 50 см.

Бесконтактные методы наблюдения - не новинка, при этом мы не можем повлиять на постановку эксперимента. Каждая обсерватория имеет свой рабочий диапазон, нацелена на свою конкретную рабочую задачу и класс объектов.

Принципы детектирования рентгеновского космического излучения:

- Зеркала косоугольного падения
- Пропорциональные счетчики (газоразрядные трубки, сцинтилляторы)
- Кодированные маски
- Полупроводниковые детекторы + коллиматоры

Зеркала косоугольного падения

Каждый из спутников (Спектр-РГ, Nicer, RXTE, Chandra, Swift, Suzaku) имеет свой диапазон. Российский проект с германским участием Спектр-РГ - это обсерватория, которая состоит из двух телескопов, в том числе российского телескопа с зеркалами косоугольного падения ART-XC.

Чем под большим углом к нормали отражать квант, тем больше энергии его можно отразить. Постепенно, увеличивая угол, мы можем дойти до рентгеновских энергий квантов. Это хорошо иллюстрирует пример: мы смотрим в прозрачную воду озера, если смотреть вертикально, то можно увидеть дно, если мы смотрим под углом, то видим зеркальную поверхность. Ганс Вольтер предложил собирать только те лучи, которые приходят под большим углом. Ученым были предложены три оптические системы, которые состоят из двух поверхностей второго порядка и называются телескопами Вольтера I, II и III типа:

- параболаид + гиперболаид
- параболаид + гиперболаид с внешним отражением
- параболаид с внешним отражением + эллипсоид

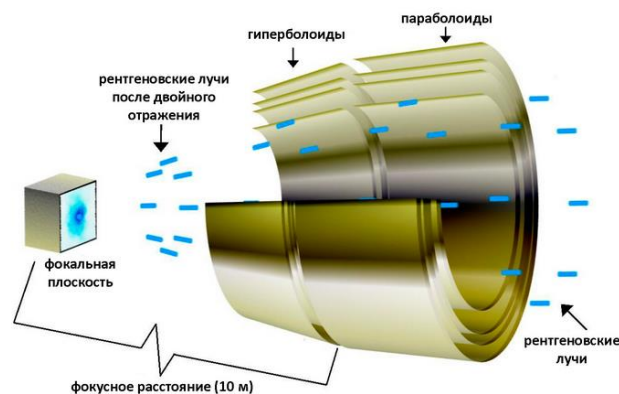


Рис. 3.1. Схема рентгеновского телескопа Chandra в разрезе (Вольтера I рода)

Наибольшее распространение получили системы I типа. Телескопы EXOSAT, ROSAT, XMM-Newton, Swift XRT работают по принципу оптики косоугольного падения. Каждая из этих систем имеет свои достоинства (например, очень хорошее угловое разрешение) и недостатки:

- ограничение по энергии квантов (до 15 кэВ, но ART-XC на СПЕКТР-РГ работает до 30 кэВ);
- большое фокусное расстояние;
- низкая эффективность (площадь, статистика);
- старение, аберрации.

Проект "Спектр-РГ"

Проект имеет высокие цели, он нацелен на решение фундаментальных вопросов космологии - свойств и эволюции Вселенной, природы темной энергии и темной материи, возникновения и роста сверхмассивных черных дыр, на поиск наиболее редких объектов.

Основные характеристики миссии:

- Дата запуска - 13.07.2019
- Космодром - Байконур
- Средства выведения - РН "Протон", РБ ДМЗ
- Рабочая орбита - район либрационной точки L2
- Срок активного существования - 6,5 лет
- Масса запущенного космического аппарата - 2 712,5 кг

Обсерватория включает два уникальных рентгеновских телескопа, работающих по принципу рентгеновской оптики косоугольного падения: немецкого eROSITA, работающего в мягком рентгеновском излучении, первого российского телескопа с зеркалами косоугольного падения ART-XC, работающего в жестком рентгеновском излучении. Телескопы установлены на космической платформе "Навигатор" (Россия), адаптированной под задачи проекта.

Задачи миссии

- Обзор всей небесной сферы в рентгеновском диапазоне энергией 0.3-11 кэВ с высокой чувствительностью, угловым и энергетическим разрешением
- Детальные исследования отобранных в ходе обзора астрофизических объектов в режиме трехосной стабилизации в диапазоне до 30 кэВ (сначала в мягком диапазоне, потом более подробно - в жестком).

Программа полета

- 3 месяца после запуска - перелет в окрестность точки L2, юстировка, калибровка и тестирование телескопов, пробные астрофизические наблюдения;

- 4 года - проведение обзора всего неба в диапазоне 0,3–11 кэВ;
- 2,5 года - наблюдения в выбранных источниках и участках в режиме трехосной стабилизации, в том числе в более жестком энергетическом диапазоне до 30 кэВ.

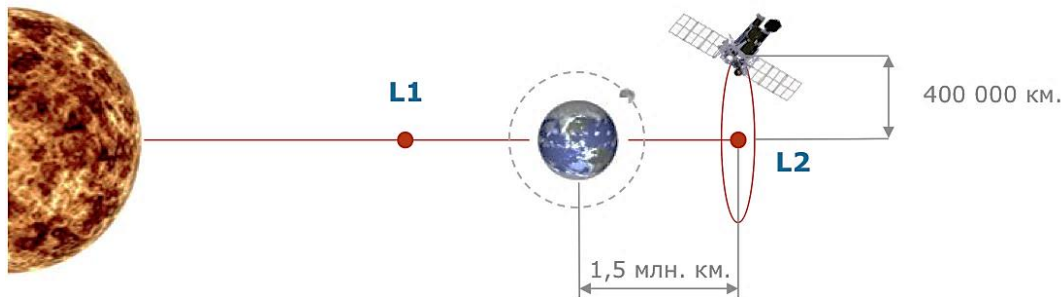


Рис. 3.2. Орбита космического аппарата Спектр-РГ вокруг точки либрации L2

Обсерватория обращается с периодом 6 мес. вокруг точки Лагранжа L2 системы Солнце-Земля. Орбита Спектр-РГ перпендикулярна прямой, соединяющей эту точку и Солнце, она составляет ~ 40 тыс. км. Таким образом, аппарат является спутником Солнца, обычно обсерватории являются спутником Земли. Низкие орбиты плохи тем, что тело Земли закрывает участок, который мы хотим посмотреть (что происходит достаточно часто).

Российские учреждения, участвующие в международной кооперации:

- Государственная корпорация по космической деятельности "Роскосмос";
- АО "Научно-производственное объединение им. С. А. Лавочкина";
- Институт космических исследований Российской академии наук;
- Российский федеральный ядерный центр - Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики.

Сравнение Спектра-РГ и других рентгеновских обсерваторий

- По угловое разрешение телескопа **Chandra** меньше угловой секунды, ничто не может конкурировать по этому параметру. Имелась задача: горизонт событий наблюдает две черные дыры, одну в центре нашей Галактики, другую далеко (M87). С учетом расстояния до второй черной дыры было необходимо разрешить деталь меньше секунды: при измерении массы ядра, был обнаружен трубный выброс, в котором образовались узлы. Самый яркий узел (ярче, чем само ядро) находился возле ядра, было невозможно их разрешить. Chandra разделила.
- **ART-XC** начинает работать там, где перестают работать и Chandra, и XMM-Newton. Chandra эффективна до 7-8 кэВ, XMM-Newton - до 10 кэВ, ART-XC

работает до 30 кэВ, при этом на 10 кэВ у него почти вдвое больше эффективная площадь, чем у XMM-Newton.

- Обзоры неба в жестком рентгене осуществлялись и ранее, например, аппаратами RXTE, INTEGRAL и Swift, ART-XC превосходит предшественников по чувствительности (ни у одного не было 7 модулей). Кроме того, он быстрее осуществляет обзор, для построения карты галактического центра Млечного Пути у ART-XS ушло порядка 3 недель, NuSTAR потребовался бы 1 год.

Из истории рентгеновской астрономии:

- **Херберт Фридман**, американский астрофизик и астроном, член Национальной академии наук США и Американского философского общества, работал в 40-е года XX века.
- **Р. Джаккони**, один из лауреатов Нобелевской премии по физике в 2002 году за "пионерский вклад" в астрофизику, который привел к открытию космических источников рентгеновского излучения".
- 1962 год - запуск ракеты "Найроби".
- 1970 год - в Кении запущен первый рентгеновский телескоп SAS1 "Uhuru" (в пер. с суахили "свобода"), который нашел первое доказательство существования черных дыр. В названии "Спектр-РГ", РГ расшифровывается как рентген и гамма, но телескоп работает только в рентгене.
- Рентгеновский телескоп "Chandra" назван в честь американского астрофизика индийского происхождения Субраманьяна Чандрасекара, введен на орбиту командой Space Shuttle при помощи шаттла "Колумбия" в 1999 году.
- Космическая обсерватория "Хаббл" имеет телескоп высотой с 4-х этажный дом. Высота орбиты 500-600 км, рефлектор имеет диаметр зеркала 2,4 м, диапазон оптического телескопа - далекий УФ (0,115 мкм), ближнее ИК (1,1 мкм). Хаббл захватывает достаточно большое поле зрения и получает хорошее изображение.
- Космический телескоп "Кеплер" (NASA) запущен с мыса Канаверал, Флорида, в 2009 году. Задача - поиск похожих на Землю планет, орбиты которых находятся в обитаемых зонах около других звезд. Работал недолго.

В рентгене видно яркую точку в центральной части нашей Галактики, там находится сверхмассивная черная дыра в центре Млечного Пути с массой около 2 миллионов солнечных масс. В оптике мы видим черную точку. Мы понимаем, что там находится что-то массивное именно по искривлению траекторий звезд, которое происходит под действием мощного гравитационного поля.

Принципы детектирования рентгеновского космического излучения

Космические детекторы, работающие по принципу зеркал косо падения:

- Спутник **ВерроSAX** работал недолго, имел 4 детектора с отличным разрешением (у каждого в своей области), при сложении результатов получался широкополосный спектр с высоким разрешением везде (от 0.1 до 200 кэВ). Им были отсняты все известные кандидаты в черные дыры (кроме слишком яркого Sco X-1).
- В обсерватории **Swift** работают зеркала косо падения, небольшой телескоп имеет оптическую линзу размером с камеру фотоаппарата, он осуществляет одновременные рентгеновские и УФ-оптические наблюдения, между которыми не нужно проводить синхронизацию по времени, учет орбит и расстояний. Раннюю фазу аккреционной вспышки почти никто не может зафиксировать. 3 июня 2013 года отмечено начало оптической вспышки RTT 150, 8 июня 2013 года Swift зафиксировала начало светимости Aql X-1 в рентгеновском диапазоне. Это очень важно для проверки моделей.

Пропорциональные счетчики и коллиматоры

- Орбитальные рентгеновские обсерватории: Rossi Timing Explorer (RXTE), PCA (3-20 кэВ), HEXTE (20-200 кэВ) - в более мягком и жестком диапазоне.
- Преимущество коллиматора - решена проблема ориентации на источник. Недостатки свинцовых, бериллиевых коллиматоров - большой вес и низкое разрешение.
- Схема успешно внедрена на RXTE/PCA (1995 - 2012)
- Инструментальный шум понижается за счет температуры ($T \sim -20\text{K}$)
- Схема автосовпадений для устранения паразитного шума.
- Техника перенаведения (HEXTE/ RXTE). Чем более разнообразны принципы детектирования, тем более верный будет получен результат.

Кодирующие маски

- Кодирующая маска - это тонкий лист, поглощающий рентген, в котором набиты отверстия. Поток квантов, приходящий от рентгеновского источника, кодируется маской и создает уникальную тень на детекторе - тенеграмму (от красной и синей звезды).
- Полученные результаты отдаются математикам, которые решают задачу декодирования и восстанавливают исходное изображение, происходит решение обратной задачи.

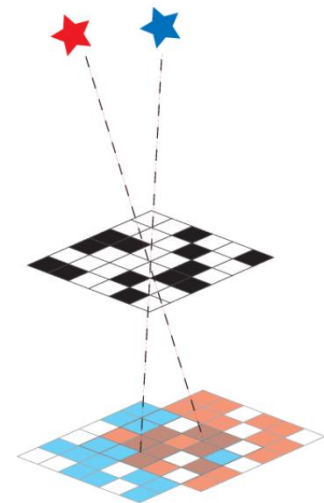


Рис. 3.3. Принцип построения изображений при помощи кодирующей апертуры

Впервые модуляционный принцип построения изображений высокого разрешения был применен на спутнике SAS-3. Рентгеновские телескопы, работающие по принципу кодирующей апертуры: на челноке Челленджер (миссия Spacelab), ТТМ на орбитальной станции "Мир", АРТ-П и Сигма на обсерватории "Гранат", WFS обсерватории ВерроSAX. Обсерватория Swift имеет жесткий детектор ВАТ (эффективная площадь 1,5 тыс. кв.см), обсерватория ИНТЕГРАЛ телескоп IBIS (1 тыс.кв. км). Самый большой телескоп гамма-диапазона (рабочий диапазон энергий до 8 мЭв) - SPI обсерватории ИНТЕГРАЛ.

Полупроводниковые детекторы

Ранее мы рассматривали пропорциональные счетчики, сейчас уже используют CD-матрицы. Полупроводниковые счетчики, сигнал которых образует пары - электрон-дырка в слое полупроводника по чувствительности превосходят сцинтилляторы. Лучшие из них - кристаллы германия, активированные литием. Ge (Li) - измеряют энергию частицы с точностью 0, 1, но имеют ограниченный размер и требуют глубокого охлаждения.

Стиповые детекторы получили широкое распространение в последние годы, это разновидность полупроводниковых счетчиков в виде узких полос кремния на твердой подложке. Их взаимно-перпендикулярные слои позволяют измерять координаты частиц с точностью до десятка микрон.

ПЗС матрица. Каждый светочувствительный элемент, пиксель - потенциальная яма для электронов. В течение заданного интервала времени каждый пиксель постепенно заполняется электронами пропорционально попавшему на него свету. Это делают Ge (Li). Телескопы измеряют скорость счета фотонов и частиц за какой-то период, накапливают и в итоге получают количество отсчетов в секунду (быстрее или медленнее). По окончании этого времени электрические заряды, накопленные каждым пикселем, по очереди передаются на "выход" прибора и измеряются. Электроны, возникшие здесь под действием света, притянутся к затвору и будут накапливаться на границе окисел-кремний непосредственно под затвором, то есть сваливаются в другую потенциальную яму.

Гамма-астрономия

- Гамма-всплески проходят по всему небу, до настоящего времени неизвестно - что это такое, поэтому важно наблюдать как можно больше. У телескопа **Fermi GRO** низкая орбита Земли, он большой площади, диапазон от 20 МэВ до 300 ГэВ. Gamma-ray Burst Monitor работает от 8 кэВ до 30 МэВ, имеет очень хорошую чувствительность.
- Гамма-рентгеновский телескоп **MAGIC** (Major Atmospheric Gamma-ray Imaging Cherenkov Telescope) стоит на Земле, он расположен на высоте 2 200 м над

уровнем моря, диаметр 17 м, измеряет излучения от ливней субатомных частиц, которые происходят после космических бурь. Диапазон: 50 ГэВ - 30 ТэВ.

- Отечественные аппараты: на модуле космической станции "МИР" - **КВАНТ** (1987-2001), астрофизическая обсерватория "**Гранат**" (1989-1999), действующая обсерватория гамма-лучей **ИНТЕГРАЛ** (ЕКА/РКА), запущен в 2002 году, работает в настоящее время.

Название **ИНТЕГРАЛ** расшифровывается как International Gamma-Ray Astrophysics Laboratory/INTEGRAL. Высота орбиты 9000 -153 000 км, масса около 3,5 тонны. Детекторы обсерватории работают по принципу кодирующей апертуры: гамма-телескоп IBIS (Франция-Италия, 18-100 кэВ), германиевый спектрометр SPI (Франция-Германия, 100 кэВ-10 МэВ, может ловить космические частицы), вспомогательные мониторы для изучения объектов в рентгеновском - JEM-X (Дания, 3-10 кэВ) и оптическом диапазоне OMC (Испания, 500 мкм -V).

М. Ревнивцев и Р. Кривонос провели эксперимент - обзоры неба с обсерваторией ИНТЕГРАЛ "Природа рентгеновского фона Галактики и переменности излучения черных дыр и нейтронных звезд" и определили, что фон - это множество дискретных источников, а не газ. Поэтому мы говорим о распределении звезд, а не газа.

Слоуновский цифровой обзор неба осуществляет российский **робот-телескоп МАСТЕР** (Мобильная Астрономическая Система Телескопов-Роботов).

Проект Лагеос-1 и Лагеос-2. Это пассивные спутники, которые отражают лазерный луч, посылаемый с Земли. Благодаря этому положение спутников вычисляется с высокой точностью. Каждый спутник представляет собой сплошной латунный шар диаметром 60 см и массой около 400 кг (LAGEOS-1 - 406,965 кг, LAGEOS-2 - 405,38 кг). Ввиду отсутствия внутренних полостей и высокой плотности латуни отношение массы к площади поперечного сечения спутников LAGEOS значительно больше, чем у типичных космических аппаратов, торможение атмосферой сказывается на их орбите гораздо слабее. Мы всегда знаем их положение и можем по ним калиброваться. Так как спутники испытывают слабые сопротивления атмосферы, то могут летать ещё очень долго.

Астрофизические базы данных:

- SIMBAD Astronomical Database - <http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/>
- VizieR Servis - <https://vizier.u-strasbg.fr/viz-bin/VizieR/>
- Canadian Astronomy Data Centre (CADC) - <https://www.cadcwww.dao.nrc.ca/>

Библиографические центры:

- The NASA Astrophysics Data System - <http://adswww.harvard.edu/>
- CDS (База данных в Страсбурге) - <http://cdsweb.u-strasbg.fr/CDS.html>
- архивы препринтов: <https://arxiv.org/> и <https://ru.arXiv.org/>

Резюме:

- для многих видов наблюдений детекторы необходимо выводить в космос;
- наблюдения идут во всех диапазонах спектра, рентгеновские космические наблюдения важны;
- карты черных звезд очень индивидуальны, их необходимо изучать по-разному;
- вспышку возможно рассматривать с помощью разных телескопов.

Значимые результаты

- Если есть двойная система с черной дырой, то соседняя звезда рано или поздно будет съедена, вещество при этом перетекает и дает нам излучение, если рядом с черной дырой ничего не находится, то мы её никогда не увидим. Мартин Рис, профессор Кембриджского университета, Королевский астроном предположил, что если мимо черной дыры будет пролетать звезда, то имеется вариант развития событий, когда звезда подлетит, но не будет целиком разрушена. У нее останется ядро, а верхние слои будут сорваны, произойдет вспышка, осколки звезды будут летать вокруг черной дыры, образуя диск, который может светиться порядка 2 лет, но это будет уже стохастический процесс, а он со временем затухает. Если мы наблюдаем такой закон затухания, тогда это именно разрушение звезды черной дырой. Также было сделано предположение, что в центре может находиться нейтронная звезда. Оказалось, что нейтронные звезды остывают определенным образом, далее был предложен закон.
- Эмиссионные линии в рентгеновских спектрах хорошо известны, иногда они в поглощении, иногда в излучении, по ним наиболее удобно проводить диагностику. Телескоп Chandra строит хорошие изображения и дает хороший спектр. Мы знаем, что есть мягкое и жесткое состояние, когда черная дыра находится в спокойном состоянии, то её спектр имеет горизонтальный наклон в определенной системе координат, когда она переходит во вспышку, то у неё появляется много мягких фотонов. Если аппроксимировать касательную, то можно сказать, что спектр имеет другой наклон (мягкое состояние). У Sco X-1 линия замкнута, оказываются черные дыры ходят по "кругу". Во вспышку линия идет по одному пути, со вспышки - по-другому, потому что диск и переходный слой по-разному наполняются и по-разному светят, что говорит уже о модели. Если взять другие координаты, то получается гистерезис, этот эффект назван Эффектом гистерезиса.
- **Миссия MAXI.** На обсерватории RXTE работал детектор монитора всего неба ASM, который наблюдал объекты независимо от наличия вспышки (около 70% неба в каждый момент времени). Данные с монитора показывали характерные признаки предстоящей вспышки, что позволяло вовремя подать заявку на наблюдение объекта. Когда ASM перестал работать, стали использовать монитор рентгеновского изображения всего неба MAXI. Работа монитора бесплатна, с условием указывать ссылку на сайт с данными.

Лекция 4. Микроквезары в рентгеновском диапазоне

Квезары и микроквезары

Мы подошли к астрофизике объектов, к моделям, к обсуждению альтернативных моделей. Сегодня мы рассмотрим микроквезары - это целый класс объектов, которые стабильно возникают в двойной системе.

Рентгеновские двойные звезды – это тесные двойные системы, в которых остаток первой звезды (черной дыры или нейтронной звезды) гравитационно связан с со второй обычной звездой, которая ещё не проэволюционировала до поздней стадии. Объекты вращаются вокруг общего центра масс. В процессе эволюции под действием давления излучения нормальная компонента понемногу расширяется.

Полость Роша: мы считаем два тела материальными точками (то есть пренебрегаем размером), с учетом их вращения мы можем построить поверхности равного потенциала. Их много, но есть критическая полость, принадлежащая каждой компоненте. Если звезда заполняет всю полость Роша, то из точки Лагранжа (L1) вещество с большой вероятностью будет перетекать на вторичный компонент. Если вещество вращалось, то оно не может сразу упасть в центр массы, а будет закручиваться вокруг объекта (рис. 4.1.). В процессе перетекающее вещество образует аккреционный диск. За счет вязкости оно падает на центральный объект, из-за трения внутренняя часть между спиральными слоями разогревается до таких температур, что начинает светить в рентгене.

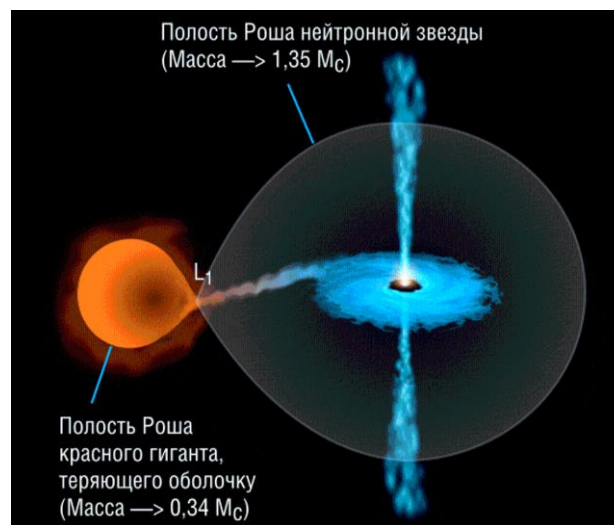


Рис. 4.1. Полости Роша для двойной системы

Аккреция сопровождается спорадическими струйными выбросами перпендикулярно плоскости диска в обе стороны - **джетами**. Это наблюдательный факт, отток вещества зафиксирован по ключевым скоростям (по эффекту Доплера), но объяснения явлению нет.

Джеты - это признак микроквара, его "визитная карточка", но они были открыты не в микрокварах, а в аналоге квазара SMBH in AGNs.

Кваразы – это очень далекие галактики, в центре которых, возможно, находится сверхмассивная черная дыра и аккреционный диск. При наблюдении были видны мощные джеты. В квазарах иногда наблюдаются явления одного джета (одностороннего), возможно, мы просто не видим вторую часть, так как присутствует эффект прожектора.

Микрокваразы SCO X-1, SS 433, GRS 1915+105 расположены ближе, чем квааразы. Джеты показывают двойные системы не только с черными дырами, но и с нейтронными звездами и белыми карликами, SCO X-1 - первый микроквараз, показавший джеты, в центре SCO X-1 нейтронная звезда.

Микрокваразы разделяются по типам:

- если масса донора (который "кормит" нейтронную звезду или черную дыру) большая - это **массивная двойная система/HMXB** (High-Mass X-Ray Binary);
- если масса донора небольшая (порядка 1 массы Солнца) - это **маломассивная двойная система/LMXB** (Low-Mass X-Ray Binary).

По сценарию образования нейтронные звезды отличаются от черных дыр малой массой (не больше 1,4 массы Солнца). Черная дыра образуется, если масса исходного компактного объекта при образовании была больше 3 масс Солнца. Компактный объект - это звезда на поздней стадии эволюции.

В двойной системе, состоящей из голубого сверхгиганта и черной дыры происходит перетекание вещества. Чем инициируется перетекание, почему частицы начинают лететь в сторону черной дыры - до настоящего времени неизвестно. Кроме образования аккреционного диска может быть второй вариант - ветровая аккреция. В SS 433 доминирует дисковая аккреция, было показано, что это самый эффективный механизм, при котором происходит преобразование энергии в рентгеновское излучение, которое идет и от внешней части диска (более мягкое, потому что менее разогретое), и от внутренней (где он будет более жестким). Существуют модели, которые показывают, что ещё внутри существует переходный слой. Наблюдается явление джетов. Плюс **ветер** - это явление, которое возникает, когда компаньон очень мощный, лишнее вещество отлетает от черной звезды, во все стороны идет симметричный отток. Вещество выгоняется сильным световым давлением. Скорость ветра в данной среде больше скорости звука (порядка 1-2 тыс. км в час).

В массивной двойной системе звезда-компаньон В-класса с температурой 5 000 К в рентгене не светит (рентгеновские температуры измеряются в миллионах). Когда происходит взаимное вращение двойных звезд, а плоскость вращения попадает на луч зрения, то один компонент закрывает другой. В оптике светят обе компоненты, в

рентгене - одна звезда не светит, являясь экраном. Если звезда находится спереди, то целиком закрывает рентгеновский объект. Зная скорость перемещения по орбите и её радиус, мы можем примерно посчитать размер экрана.

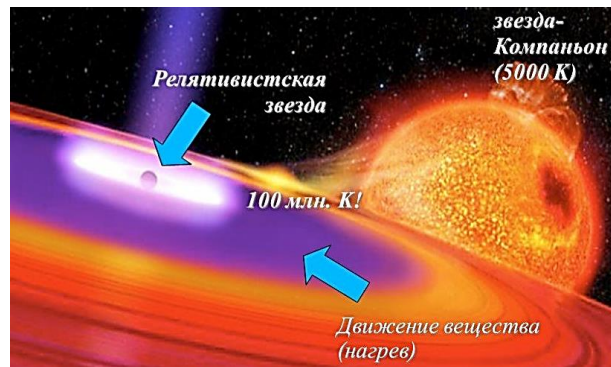


Рис. 4.2. Движение вещества (нагрев)

Наблюдательные свойства микроквазаров:

- переменность во всех диапазонах, в том числе и в рентгеновском;
- в рентгене - компактный источник близок к Эддингтоновскому режиму, (нейтронные звезды со сверх Эддингтоновской светимостью);
- в радио - протяженные парные источники - джеты с радиоизлучающими сгустками с синхротронным механизмом и релятивистскими скоростями выбросов. Начальная часть струи джета характеризуется рентгеновским излучением, далее идет оптическое, далее радио.

Объект SS 433

SS 433 - это голубой сверхгигант, заполнивший полость Роша, открыт спутником UHURU в 1976 году, историческое название объекта V 1343 Aql, 4U 1908+05. В 1997 году **С. Стефенсон и Н. Сандулак**, работая в оптике, решили собрать каталог всех объектов, у которых в спектре видна яркая линия H_{α} . Stephenson and Sanduleak - сокращенно SS, отсюда название объекта. Объект интересен не только в оптике, он дает излучение и в рентгене, и в радио, и в инфракрасном диапазоне, были попытки найти его в гамма диапазоне, которое оказалось слабым.

У объекта SS 433 сильные линии излучения водорода (H_{α} , H_{β}) и нейтрального гелия (HeII). Были открыты подвижные эмиссионные линии в оптическом спектре (благодаря эффекту Доплера, сдвиг частоты приводит к изменению положений линий в спектре движущихся объектов). Подвижные эмиссии в спектре SS 433 и период их перемещения были открыты группой американских астрофизиков под руководством **Б. Маргона** в 1979 году. Длина волны H_{α} равна 6 563, если линия находится в этом спектре, то все в порядке, но справа и слева были обнаружены пики, которые не находили идентификацию. Далее был зафиксирован стационарный эффект:

эмиссионные линии синхронно смещались относительно стационарной эмиссии H_α (рис. 4.3.)

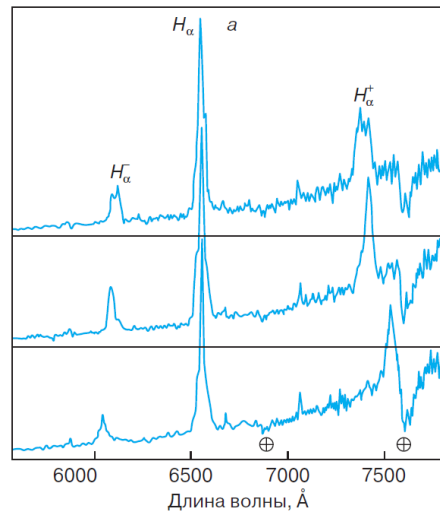


Рис. 4.3. Три последовательных спектра SS 433 вблизи линии H_α с интервалом в 1 сутки

Более длительные наблюдения Б. Маргона привели к предположению, что смещающиеся линии - это одни и те же линии, которые принадлежат джету. Они в противофазе по причине того, что вырываются перпендикулярно диску. Диск прецессирует, а джеты отслеживают прецессию. Оставаясь четко перпендикулярными, каким-то образом они тоже прецессируют (описывают поверхность конуса). Учитывая влияние поперечного эффекта Доплера, в целом можно говорить о симметрии джетов.

Открытие орбитального периода в 13.1 день и затмений в оптике

Открытие сделано А.М. Черепашуком, астрофизиком, академиком РАН, заведующий кафедрой астрофизики и звездной астрономии физического факультета МГУ. В 1980 году ученый выполнил фотометрические наблюдения SS 433 и определил, что это **затменная переменная двойная система** (то есть та, в которой наблюдается периодическое изменение блеска вследствие затмений одной звезды другой). Кривая блеска SS 433 показала затмения: аккреционного диска - фаза 0,0 и звезды диском - фаза 0,5 (рис. 4.4.). Фаза определяется местоположением объекта: спереди - фаза 0, после прохождения половины периода - фаза 0,5, когда объект возвращается в исходную - фаза 1.

В SS 433 массивная звезда находится спереди и закрывает компактный объект, получается почти нулевое затмение (первичное), оно глубокое. Вторичное затмение - когда звезда находится сзади, а компактный объект впереди, за счет аккреции он очень хорошо виден в оптике. На кривой блеска четко виден главный минимум и вторичный минимум, период равен 13.1 дням, есть затменность, есть переменность. Яркий аккреционный диск прецессирует с периодом 162 дня. Орбитальный период четкий и составляет 13 дней, прецессионный период - непостоянный (вероятно, это происходит

по причине того, что аккреционный диск - это огромное газовое образование). Орбитальные затмения всегда происходят по плану, поэтому существуют эфемериды, если мы знаем юлианскую дату, то можем сказать, какая фаза затмения.

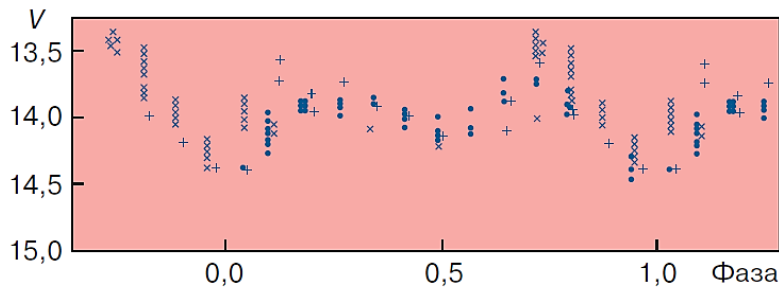


Рис. 4.4. Орбитальная кривая блеска SS 433

Исследователи, которые занимаются оптикой, не любят активное состояние, потому что тогда нельзя определить массу, лучевую скорость и т.д. В рентгене активное состояние необходимо, именно в нем можно применить метод скалирования. Происходит вспышка, джеты эволюционируют, но в рентгене этого не видно, потому что они очень короткие, определить процесс можно только по линиям. В радио - по изображениям. Изображения узлов в радио показывают перемещение, скорость которого почти световая ($1/4$ скорости света), поэтому эти объекты называют релятивистские струи.

В радиодиапазоне остаток вспышки сверхновой выглядит как закручивающаяся улитка, долгое время считали, что в её центре находится нейтронная звезда. Объект расположен на расстоянии 5 кпс. Сценарий образования объекта: когда происходит коллапс, в зависимости от массы объекта, от того, сколько оболочки будет сброшено, происходит либо схлопывание до нейтронной звезды (остаток образуется через канал вспышки сверхновой), либо по другому каналу происходит вспышка сверхновой и образуется черная дыра. До настоящего времени остается вопрос: является SS 433 черной дырой или нейтронной звездой? Объект SS 433 светит в рентгеновском диапазоне 25-50 кэВ. Координаты четко совпадают с оптическими ($\alpha = 19\ 11\ 49$, $\beta = 04^\circ\ 58'\ 57.6$).

Базовые параметры SS 433:

- в двойной системе звезда вращается вокруг диска, релятивистские джеты вырываются в противоположных направлениях из центрального источника и дают линии, которые смещаются по спектру (рис. 4.5.). Было доказано, что это действительно микроквазар.
- луч зрения почти в орбитальной плоскости, наклонность орбиты измеряется от наклона нормали к орбите, поэтому необходим угол 90 градусов. У SS 433 этот угол $78,7$, он дает хорошее, почти полное затмение, в этом большой плюс.

- определено, что SS 433 - голубая звезда A7 класса гигантов
- масса компактного объекта - $4,3 \pm 0,8$ масс Солнца
- масса второй компоненты - $12,3 \pm 3,3$ масс Солнца
- орбитальный период - 13 дней
- период прецессии - 162 дня
- не яркий в оптике - $V=14$ m

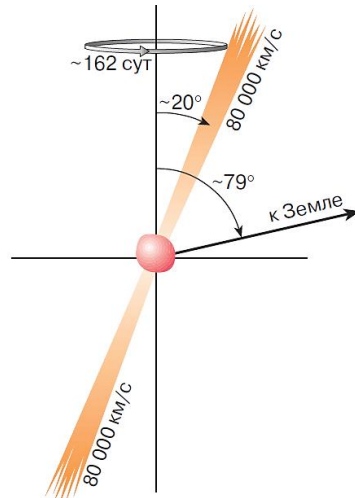


Рис. 4.5. Кинематическая модель SS 433, построенная на основе анализа кривых лучевых скоростей подвижных эмиссионных линий в его спектре

Рентгеновская эпоха SS 433

Спутники, которые наблюдали объект: HAKUCO, TENMA, GINGA, ASCA. Профессор Токийского технологического института **Нобуюки Кавай (Nobuyuki Kawai)** в молодости первым измерил затмение в рентгене. Было получено слабое и мелкое затмение в виде длинного "корыта", после которого наблюдалось опускание на минимум, а потом подъем на максимум. Теоретически, излучение должно выходить на максимум, потом должен быть вторичный минимум. Но в рентгеновском диапазоне после затмения излучение падало, причиной этого считали аппаратуру. Через много лет на спутнике ИНТЕГРАЛ данные подтвердились.

Спектры с GINGA показали большую линию железа $\sim 6-7$ кэВ. Исследователи долго думали, почему определяется такая мощная и широкая линия. Причина оказалась в плохом разрешении. Спутник ASCA дал ответ на вопрос, какие могут быть механизмы, которые дают излучение в 6-7 кэВ. Это может быть нейтральное железо от F1 до F12, но мы его не разрешаем, даже с помощью ASCA. Водородо/гелию подобные F26 отделяются хорошо, уже можно проводить диагностику, плюс никель и другие элементы.

Chandra подтвердила, что есть элементы: Fe, Ni, S, Si, Ar, Ca. Они красно-сине смещенные. Переменность красно-сине смещенных подвижных спектральных линий на

временах порядка периода прецессии обусловлена релятивистским эффектом прожектора. Самая начальная часть джетов - это рентген, температура там не такая высокая и эти элементы есть. Все определяется энергией возбуждения полуионизации, когда ионизуется на верхний уровень (не выше 7-10 кэВ).

Модель Роша хорошо описывается формулами, по которым построено множество точек для модели. На компьютерной модели SS 433 (рис. 4.6.) показана нормальная звезда, аккреционный диск и внутренний джет. Диск был аппроксимирован трехосным эллипсоидом, высечен внутри. Наблюдения показали, что есть две составляющие линии излучения джета - толстая и тонкая. Там, где излучение идет от разных наблюдений, она будет немного уширена, тонкая часть дает дельта-линию.

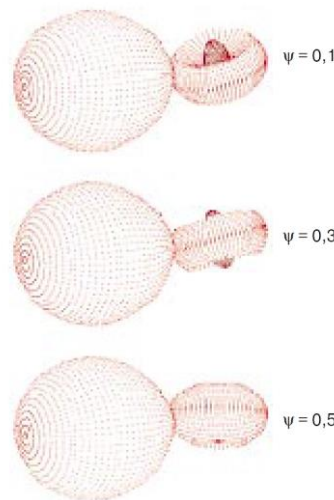


Рис. 4.6. Компьютерная модель SS 433 как тесной двойной системы с прецессирующим аккреционным диском

Отношение масс: $q = m_x/m_y$, масса компактного объекта в отношении к массе нормальной компоненты. В оптике $q > 3$, в рентгене $q < 0,2$, следовательно, объект один, а отношение масс разное. Противоречие между оптическими и рентгеновскими результатами массы компактного объекта в массах солнца: оптика > 30 (черная дыра), рентген < 2 масс Солнца (нейтронная звезда). Это уже критично.

- **Возможные причины противоречия:** неверная обработка наблюдений (неверное отождествление, переменность опорного источника, неполадки в аппаратуре), неверное моделирование.
- **Пути разрешения противоречия:** иной диапазон, иной принцип детектирования и пересмотр модели.

Для разрешения противоречия возможно предложить следующую модель: новый принцип детектирования - кодирующую матрицу (ИНТЕГРАЛ, IBIS/ISGRI). На GINGA стоят пропорциональные счетчики, газоразрядные трубки.

Спектральное разрешение у ИНТЕГРАЛА в данном диапазоне не очень высокое, но он пронаблюдал очень многое, в том числе моменты главного затмения, когда закрывается рентгеновский источник, прослеживается прецессия. Было заказано наблюдение для определения наличия прецессионной переменности в жестком рентгене. ИНТЕГРАЛ наблюдает не только один объект, а все поле. Работа длилась три дня, были получены точки. В связи со слабостью сигнала произведено объединение по 20 точкам (вместо 10, отношение сигнал к шуму), произведен обмен данными с группой Д Ханникян (D. Hannikainen). Точки синхронно наблюдались в оптике в V-диапзоне. Можно сделать вывод, что в оптике и в рентгене профиль затмения примерно одинаковый, нет сильного распределения температуры или светимости по радиусу (что нонсенс, потому что в оптике он должен быть шире).

Рентгеновская кривая блеска SS 433 при наложении всех имеющихся наблюдений показала особую точку вспышки, которая отслеживалась в разных фазах (в рентгене отслеживается позиционная переменность). Рентгеновский источник закрывается экраном от и до звезды. Вопрос: откуда появилась вспышка? На вопрос до настоящего времени не получен ответ, при наблюдении разных затмений во многих циклах этот эффект не воспроизвелся.

Полная кривая в ИНТЕГРАЛЕ, два периода (фразировка от 0 до 1 в терминах прецессии), показаны все наблюдения вне затмения (у затмений другая физика). Прецессионная переменность в жестком рентгене обусловлена тем, что жесткий рентген идет от внутренней части диска, который наклоняется (к нам - полностью раскрываясь, сбоку - полностью закрываясь). Толстый диск закрывает самую яркую часть, которая находится в центре. Когда диск постепенно открывается, то становится видна очень яркая точка.

Кривая блеска объекта SS 433 была смоделирована на компьютере при помощи модели Роша. Было построено затмение, получено $q \sim 0,4$ (согласуется с оптическим моделированием кривой светимости). Это очень небольшое значение, то есть это моделирование ничего не решает, объект очень интересный - оптика с рентгеном не согласуются.

Определение массы компактного источника из рентгеновских наблюдений с использованием функции масс (оптического компонента). Небесная механика будет читаться на 5 курсе Черепашуком А.М. Для определения массы мы должны знать: отношение масс, наклонность орбиты и другие параметры. По этим рентгеновским данным мы получаем массу: $m_x = 11-6$ масс Солнца, $m_v = 27-15$ масс Солнца, очень большой радиус $R_v = 40-30$ радиусов Солнца. Следовательно, это черная дыра.

Альтернативные модели SS 433:

- **Модель горячего пятна.** Имеется два компонента, один заполнил полость Роша, начинается перетекание вещества, струя подходит к аккреционному

диску, который находится в стадии образования. Она бьет в диск и образуется яркое пятно, именно пятно и его перемещение по диску (прецессирование и пр.) будет видно в рентгене. Модель просуществовала недолгое время.

- **Модель с общей оболочкой и подвижными пятнами от прецессирующих джетов.** Поскольку SS 433 - очень массивная система с большим вторичным компонентом, который дает много оттекающего вещества, то компактный объект не может его "съесть", он отбрасывает вещество в форме струй (ветра). В небесной механике есть точки Лагранжа, точки либрации: L1 и L2. Точка L2 лежит на прямой, соединяющей два тела, и находится за телом с меньшей массой. В точке L1 вещество может вытекать достаточно просто, потому что оно неустойчивое, в точке L2 вещество тоже свободно вытекает и образует внешнее орбитальное кольцо. В итоге в оптике определяется "каша", особенно в случае, когда мы смотрим диск с ребра. Поэтому эту модель назвали "Система общей оболочки". В рентгене мы видим, что если джеты вырываются, то они прорывают оболочку и выходят наружу в некой точке. Момент выхода будет ярким, и мы его видим. Пятна, образующиеся в процессе прецессии, будут перемещаться по оболочке. Модель также просуществовала недолго, так как оболочка образуется когда параметр $B > 10$ (корень из отношения моментов). Для SS 433 мы знаем скорость первого и второго ветра: когда они сталкиваются, то получаются, что они динамически почти равны, и общая оболочка не может образоваться.
- **Модель столкновения звездных ветров.** От компактного источника оттекает ветер (для SS 433 скорость ветра составляет порядка 2 тыс. км/с.), первичная компонента тоже дает ветер (за счет испарения, за счет ухода частиц). Когда ветра направлены друг к другу, то они в какой-то момент сталкиваются, в месте столкновения образуется граница, которая физически нагревается. Скорость ветра сверхзвуковая, образуется фронт ударной волны. Когда сталкиваются два фронта ударных волн, то образуется стоячая ударная волна. В лобовой точке столкновения веществ происходит свечение в рентгене. Рентгеновский источник намного ближе к нормальной звезде, при расчетах q получаются нормальные значения. Эта модель хорошо снимает противоречия по главному параметру отношения масс компонентов.
- **Альтернативная модель рентгеновского излучения,** формирующегося в двойной системе с черной дырой, которая очень популярна на Западе, предполагает наличие области - "короны", от которой идет излучение, которое отражается и т.д. Эта модель вызывает сомнения, потому что необходимо объяснить стабильность и устойчивость этого явления, почему "корона" держится над черной дырой. Российские исследователи называют "коронай" ту часть, которая образуется в переходном слое между диском и веществом, падающем на черную дыру.

Общая модель. Мягкое излучение от аккреционного диска (диск обычно светит в оптике и немного в рентгене), в центре расположена нейтронная звезда, образуется переходный слой, где происходит взаимодействие мягких фотонов (1 кэВ) с жесткими электронами. Горячие электроны появляются вследствие ударной волны. После комптонизации фотоны уже более жесткие и формируется некий спектр излучения. Это происходит и в случае нейтронной звезды с твердой поверхностью, когда есть поверхность, есть отражение, есть излучение. У черных дыр нет поверхности, но есть сходящийся поток, проявляется релятивистский эффект, поскольку скорость вещества очень большая. Черная дыра позволяет падение до и под горизонт событий. До горизонта почти свободное падение вещества, следовательно, большая кинетическая энергия, идет динамическая комптонизация. В модели учитываются гауссовы линии и гауссиана, которая аппроксимируется.

Модели в программе XSPEC

Спектры фиторуются в программе XSPEC, строятся комбинированные модели. Мы уже познакомились с моделями `blackbody`, `COMPTT` и другими. **В модели теплового тормозного излучения (`brems`)** два параметра (рис. 4.7.), они были применены к реальным спектрам объекта SS 433.

For `brems`:

<code>par1</code>	plasma temperature in keV
<code>norm</code>	$\frac{3.02 \times 10^{-15}}{4\pi D^2} \int n_e n_i dV$, where D is the distance to the source (cm) and n_e, n_i are the electron and ion densities (cm^{-3})

Рис. 4.7. Страница программы XSPEC о модели `brems`

Если брать критерий χ^2 , то модель хорошо описывает, но она не дает ответов на вопрос: что происходит в рентгене? Были получены данные, что в спокойном состоянии температура равна 10 кэВ, во вспышечном состоянии - 20 кэВ, но мы не знаем, что произошло с объектом.

Существует модель, где от тормозного излучения также можно проводить комптонизацию - **Self-Comptonization of a bremsstrahlung**.

Модель ВМС (Bulk Motion Comptonization) имеет 4 параметра, это тот минимум, который необходим для фитирования, а также для ответа на вопрос: что произошло с объектом? Вещество течет по радиусу к центру диска, мягкие фотоны впрыскиваются в область переходного слоя, где они комптонизируются посредством Грин функции. В результате работы модели: имеем спектр SS 433, делаем аддитивную модель ВМС плюс две гауссианы (красный джет и синий джет), добавляем `blackbody` модель (для объяснения 8 спектров), получаем результат XSPEC, который показывает,

как изменяется спектральный индекс, температура, степень комптонизации вещества (сколько энергии оно получило при взаимодействии холодных фотонов и горячих электронов).

В радиодиапазоне видно начало вспышки в SS 433, до этого в рентгене также отмечалась небольшая вспышка, то есть рентген предвосхищает вспышку в радиодиапазоне. Интересно, что максимум в радио всегда антикоррелирует с рентгеном, хотя они формируются в очень разных областях.

Из 4-х спектральных состояния черных дыр (низкое/жесткое состояние, промежуточное, высокое/мягкое и сверхмягкое состояния) SS 433 показывает всего два. В основном он находится в промежуточном состоянии, иногда выходя в низкое. Комптонизация сильнее всего в низком состоянии.

Полезно нанести **фотонный индекс** как функцию нормировки. Нормировка пропорциональна темпу аккреции - чем больше темп аккреции, тем больше должен быть фотонный индекс (согласно наклону вещества). В SS 433 отмечено насыщение индекса, когда вещество поступает, а компактный объект его не принимает, индекс не возрастает. Это самое оригинальное и простое доказательство того, что в SS 433 - находится черная дыра.

С помощью рентгена в модели можно посчитать и массу объекта. Насыщение позволяет оценить массу очень хитрым способом. Лоран&Титарчук определили, что спектральный индекс меняется, монотонно возрастая с темпом аккреции, затем насыщается. Это насыщение мы видим в SS 433 по всем состояниям от начала вспышки и до её конца. Общий спектральный индекс - это по сути обратное число. Y - комптонизационный параметр, который является произведением количества рассеяния (взаимодействия электрона и фотона) на эффективность (количество переданной энергии).

$$\alpha \sim 1/Y \sim 1/(N_{sc} * \eta)$$

для $\tau > 1$:

$$N_{sc} \sim \tau^2 \text{ (тепловая комптонизация)}$$

$$\tau \text{ (динамическая комптонизация)}$$

$$\eta \sim 4 kT_e / m_e c^2 \text{ (тепловая комптонизация)}$$

$$1/\tau, \text{ при } \tau > 1 \text{ (динамическая комптонизация)}$$

Предполагается, что при развитии вспышки в каждой черной дыре процессы одинаковы: происходит увеличение темпа аккреции, падает больше массы вещества, индекс нарастает и насыщается. Но индекс насыщается на разные уровни в разных черных дырах (SS 433 - 2,4, GRS 1915+105 - 3). Чтобы при сравнении двух источников можно было сказать, что у них одинаковая физика, необходимо выбрать объекты с

одинаковым уровнем насыщения. Выбираем объект, у которого известны: масса, расстояние до него от Земли и наклонность. Параметры второго объекта: масса неизвестна, известны расстояние и наклонность. В этом случае мы можем определить массу второго объекта. Осуществим этот алгоритм для SS 433 (масса неизвестна, расстояние 5 мпс, наклонность почти 90) и GX 339-4 (с насыщением на том же уровне). После скалирования получаем массу SS 433 больше 2 масс Солнца.

Заключение:

- На наличие черной дыры в микроквазаре SS 433 указывают: переменность и насыщение фотонного индекса, масса компактного источника больше 2 масс Солнца.
- Переменность рентгеновского излучения согласуется со сменой спектральных состояний черной дыры.

Лекция 5. Микроквазары в рентгеновском диапазоне. Часть 2

Микроквазары

Как объекты микроквазары - разные. Небо в рентгеновских лучах представляет собой диффузионный фон и некоторые точечные источники, которые в основном являются черными дырами и нейтронными звездами. Их яркими представителями являются микроквазары.

Черные дыра подразделяются на несколько классов. Типы черных дыр были сформированы следующим образом: физики определили, что плотные стадии материи могут существовать и они обладают некими свойствами, но о том, что эти стадии существуют на Земле и можно их найти - речи не шло. Астрономы решили поискать подобное явление среди своих объектов в космосе, нашли и осуществили классификацию:

- Черные дыры звездных масс (5-10 масс Солнца)
- Сверхмассивные черные дыры (10^{5-6} масс Солнца) - о черные дыры центров Галактик
- Черные дыры промежуточных масс (100- 10^4 масс Солнца)
- Первоначальные черные дыры

Черные дыры промежуточных масс и первоначальные черные дыры относятся к классу гипотетических черных дыр, но понемногу начинают переходить в класс реальных. Первоначальные дыры, которые образовались во время Большого взрыва, скорее всего, существовали. Поскольку они далеко, то излучение до нас только дошло, и мы имеем возможность их зафиксировать.

Наблюдательные признаки черных дыр с точки зрения теории:

- компактные размеры и большая масса;
- рентгеновское излучение, которое появляется в ходе аккреции вещества;
- джеты (релятивистские выбросы) - косвенный признак;
- наличие горизонта событий. Проектом "Горизонт событий" зафиксирован прямой и линейный горизонт событий у черной дыры M87 в центре Галактики M87. Это самый сильный признак наличия черной дыры в системе.

Объекты, обладающие подобными свойствами, были найдены среди звезд на поздних стадиях эволюции:

- **в нашей Галактике** - рентгеновские двойные системы с компактными источниками, в том числе микроквазары;

- в других Галактиках - активные ядра галактик, сверхмассивные черные дыры, ультраяркие источники, приливные разрушения звезд черными дырами и др.

Микроквазар GRS

Микроквазар GRS 1915+105 - двойная система с компактным объектом (порядка 30 масс Солнца) и нормальной звездой (слабый донор). У SS 433 нормальная компонента - массивная звезда, черная дыра имеет небольшую массу (>3 масс Солнца).

Сравнительный анализ микроквазаров GRS 1915+105 и SS 433

GRS 1915+105	SS 433
<ul style="list-style-type: none"> • джеты действуют постоянно со скоростью 1/4 скорости света ($v=0,25 c$) 	<ul style="list-style-type: none"> • джеты возникают спорадически, скорость почти равна скорости света ($v=0,94 c$)
<ul style="list-style-type: none"> • расположен ближе (5 кп) 	<ul style="list-style-type: none"> • расположен дальше (12 кп)
<ul style="list-style-type: none"> • менее яркий в рентгене $L_x \sim 10^{36}$ эрг/с, нет жесткого излучения, находится на пределе детектирования 	<ul style="list-style-type: none"> • более яркий в рентгене $L_x > 10^{39}$ эрг/с, "жесткий хвост", критический режим
<ul style="list-style-type: none"> • в спектре наблюдается широкая асимметричная линия K_α-линия железа 	<ul style="list-style-type: none"> • в спектре наблюдается широкая асимметричная линия K_α-линия железа
<ul style="list-style-type: none"> • невысокая переменность в рентгене, в основном орбитальная (13^d) и прецессионная [164^d] 	<ul style="list-style-type: none"> • высокая переменность в рентгене от 10^{-5} до 10^5 с по частоте в спектре мощности

Предельная светимость для 10 масс Солнца составляет 10^{39} эрг/с. В этом случае объект работает на Эддингтоновском режиме, то есть критически. Звезда держится в равновесии, потому что любое тело, обладая гравитацией, сжимается внутрь. Звезда горит, горение вызывает излучение, которое давит, распирая звезду наружу. Гравитации внутрь и излучение наружу компенсируются. Когда гравитация равна давлению излучения - возникает стабильный режим, который называется критическим режимом.

В среде вокруг черных дыр создаются хорошие условия для излучения линий железа в рентгеновском диапазоне (по причине энергии перехода водородоподобного железа порядка 7,6). Оно будет не полностью ионизовано, полная ионизация составляет 10 кэВ, при температуре выше мы ничего не увидим. Температура ниже образуется на внешней части ветровой оболочки и внешней части диска.

Отличия массивных и маломассивных двойных систем

НМХВ (High-Mass X-Ray Binary)	ЛМХВ (Low-Mass X-Ray Binary)
<ul style="list-style-type: none">• если масса донора большая - это массивная двойная система	<ul style="list-style-type: none">• если масса донора небольшая (порядка 1 массы Солнца) - это маломассивная двойная система
<ul style="list-style-type: none">• яркие молодые звезды типа О и В (SS 433)	<ul style="list-style-type: none">• старые звезды и звезды поздних классов К и М (GRS 1915+105)
<ul style="list-style-type: none">• + ветровая аккреция	<ul style="list-style-type: none">• перенос массы через полость Роша, далее дисковая аккреция
<ul style="list-style-type: none">• возникает рентгеновский пульсар, то есть нейтронная звезда	<ul style="list-style-type: none">• часто является переходной системой

История открытия GRS 1915+105

- Объект был открыт в 1992 году обсерваторией GRANAT, GRS 1915+105 классифицирован как яркий транзиент.
- Исследователями **Ф. Мирабель и Л. Родригес (F. Mirabell, L. Rodrigues)** были открыты джеты, радионаблюдения показали скорость 0,94 с.
- Зафиксировано, что объект расположен на расстоянии 12 кпс. В данном направлении в созвездии Орла очень сильное поглощение, поэтому в оптике GRS 1915+105 не виден. Изучать объект инструментами, которые есть в оптике (кривой блеска, анализ скоростей) - невозможно. То, что в данном случае есть инфракрасное излучение - не парадокс, это свойство межзвездной пыли, графитовые пылинки (кристаллы) имеют такое строение, что пропускают инфракрасное излучение, но не пропускают оптику. По инфракрасному излучению были определены: вращательное уширение, оценки массы и расстояния.
- Рентгеновское излучение - очень сильное, есть инфракрасный аналог.
- Обсерватории Chandra и RXTE показали, что пики рентгеновского излучения в GRS 1915+105 происходят каждые 50 с. Когда он переходит во вспышку - пики становятся чаще, когда выходит из нее - меньше, потом спектр застывает до совсем небольших пиков.

Звезда-компаньон в GRS 1915+105

- 2000 год: исследователь **Йохан Грайнер и др. (Greiner J.)**, Астрофизический институт в Потсдаме и Европейская южная обсерватория в Чили.
- На приборе ISAAC (8,2-м телескоп VLT/ANTU обсерватории Параналь) получена серия спектров объекта GRS 1915+105 в диапазоне 1-2,5 мкм, обнаружены характерные полосы оксида углерода и линии металлов.

- Инфракрасное излучение дало оценку массы компаньона ($1,2 \pm 0,2$ масс Солнца)
- Звезда-донор в этой системе - обычный красный гигант класса K, M.

Основные параметры GRS 1915+105:

- расстояние по радиоданным - $D=12,5$ кпс
- наклонность - $60-70^\circ$, что обуславливает хорошую видимость
- функция массы $f(K, M) \sim 9,5$ масс Солнца, возможная масса $M_x = 14 \pm 4,4$ масс Солнца, масса черной дыры - $M_v = 0,81 \pm 0,53$ масс Солнца (по разным данным получены разные оценки, но параметры говорят в пользу черной дыры)
- орбитальный период 33,5 дня

В радиоизображении показано, как расходятся джеты после начала вспышки, один джет более яркий. По перепаду их яркости Ф. Мирабелль и Л. Родригес оценили наклонность.

В рентгеновском излучении видно, что GRS 1915+105 - объект с колоссальной переменностью, у него есть периоды затишья и периоды очень частой переменности. Они коррелируют с суммарными данными в радиодиапазоне, когда пик в радио, обычно регистрируется минимум в рентгене. Радио-данные представлены Г. Пули (G. Pooley), радиотелескоп Telesco, рентген - RXTE.

Цветовые диаграммы в классификации

Из спектра вырезаются две области: с более мягким излучением (E_1, E_2) и с более жестким (E_3, E_4), далее составляется отношение $\Delta (E_2 - E_1) / (E_4 - E_3)$. Это называется коэффициент жесткости. Он полезен, например, когда имеется спектр, потом объект проэволюционировал, прошел вспышку, и спектр поменялся (стал жестче или мягче). Имея обширный массив данных объекта, исследователь принимает решение о том, стоит ли им заниматься. Для этого строится цветовая диаграмма (что проще спектрального и временного анализа). Если на ней видны изменения формы, то это обозначает, что объект, скорее всего, будет показывать спектральные переходы; что это, вероятно, черная дыра или компактная звезда, то есть компактный объект.

Объект GRS 1915+105 обладает многообразием шаблонов поведения, которые повторяются с периодичностью, треки каждый раз повторяют правильную форму, похожую на буквы греческого алфавита. 12 типов классов типов переменности были названы буквами греческого алфавита. Наблюдения со спутника RXTE были подтверждены спутником SWIFT, с помощью ИНТЕГРАЛА нашли 13 класс. Лучше всего рассматривать спектр мощности, где можно отождествить частоту с пиком (квазипериодическая осцилляция на фоне континуума, весь континуум - это красный, белый шум).

12 классов (3-20 кэВ) были свернуты в три основных спектральных состояния:

- **A (IS)** - промежуточное состояние
- **B (HSS)** - высокое/мягкое состояние
- **C (LHS)** - низкое/жесткое состояние
- обычно происходит по следующей цепочке: **LHS** → **HSS** → **IS**

Сделаны предположения о зависимости от радио-состояния и частот **КПО/QPO** (Quasi-periodic oscillation – периодические модуляции рентгеновского потока некой частоты излучения).

Подход на основе смены спектральных состояний

- Первым шагом рассматривается, как меняется спектр во время вспышки, далее необходимо выбрать правильную модель. Обычно выбирают опробованную модель, которую часто используют для черных дыр и нейтронных звезд.
- Следующим шагом оценивается наличие корреляции с радиоизлучением (рентген и радиоизлучение образуются в разных частях системы), эволюция спектральных состояний и эффект насыщения. Объект GRS 1915+105 хорош для проверки эффекта насыщения. Если есть участок насыщения фотонного индекса, то это обозначает, что это - черная дыра.
- Выберем для описания модель XSPEC "VMC", добавим компоненту линии. Обычно линии описывают Гауссом, потому что они симметричные, есть модель *Laor*, которая была специально разработана для черных дыр, она имеет асимметрию, которая вызвана влиянием черной дыры. Поскольку GRS 1915+105 - черная дыра с очень сильной гравитацией (порядок - 10-30 масс Солнца), данную модель возможно применить.

На рис. 5.1. показано, что наблюдатель видит черную дыру в центре системы, она окружена аккреционным диском, материя которого вращается спиральным образом по кругу, переходит в переходный слой. После переходного слоя на черную дыру происходит сходящийся поток вещества, в котором достигаются релятивистские скорости, поэтому работает динамическая комптонизация. Мы будем видеть:

- мягкое чернотельное излучение диска (VMC 1)
- более жесткое комптонизированное излучение от переходного слоя (VMC 2)
- излучение от области динамической комптонизации

В процессе вспышки вырастает одна или другая компонента, рассматривается их соотношение. Пока мы используем модель VMC, вращение не учитывается. Учитывается поглощение межзвездной среды (поглощается водород), так как

рентгеновское излучение поглощается в мягкой части до 1 кэВ. Поскольку рассматривается спектр в мягкой области, поглощение необходимо учитывать.

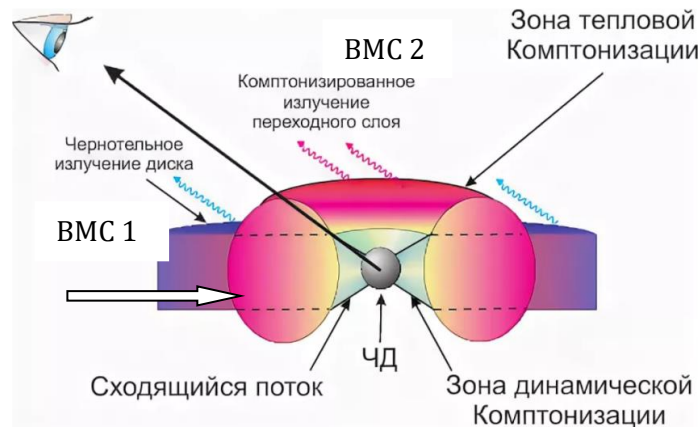


Рис. 5.1. Схематическое представление зон тепловой и динамической комптонизации, используемое для спектрального анализа в модели для источника GRS 1915+105

Параметры модели ВМС:

- спектральный индекс (α)
- температура фотонов диска (kT)
- освещенность или параметр комптонизации ($\log A$)
- нормировка спектра (A_{bmc})

Эволюция формы спектра GRS 1915+105 при смене спектральных состояний

GRS 1915+105 показывает все 4 спектральных состояния черных дыр, плюс дополнительное состояние покоя - quiescent state. Даже низкое/жесткое состояние (LHS) - уже активное состояние. Вероятно, вспышка управляется темпом перетекания массы (чем больше масса, тем более активен объект). Диск понемногу приближается к черной дыре в процессе вспышки. На рис. 5.2. показана эволюция спектра GRS 1915+105 при смене спектральных состояний: низкого/жесткого (панель S1/LHS), промежуточного (панель S2/IS), высокого/мягкого (панель S3/HSS) и сверхмягкого (панель S4/VSS). Показано изменение вклада тепловой компоненты.

- На панели S1 хорошо видна линия, на S2 линия пропадает (в действительности она есть, но тонет в возросшем континууме). Панель S1 показывает более жесткий спектр (горизонтальный в данных координатах).
- Спектр на панели S2 можно описывать моделью broken power law.
- Спектр на панели S3 можно описывать моделью ВМС.
- На панели S4 спектр в очень редком - очень мягком состоянии VSS/very soft state, оно наблюдается не во всех объектах (также существует мнение, что его

нет). Это спектральное состояние очень высокое (почти достигает HSS) и очень мягкое, жесткой части практически нет, так как диск очень сильно распухает и экранирует все жесткие части, происходит эффект затмения.

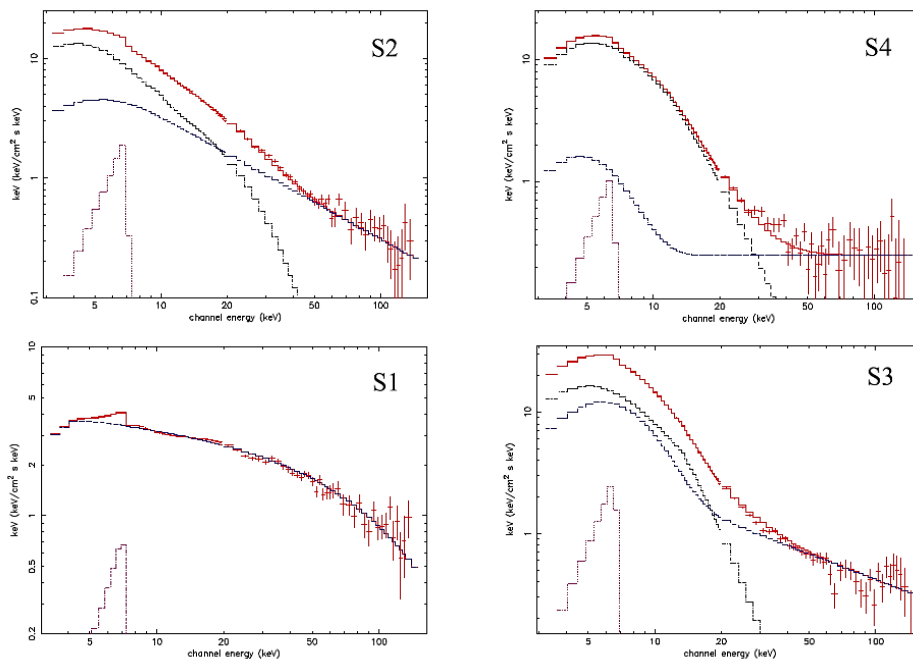


Рис. 5.2. Эволюция формы спектра GRS 1915+105 при смене спектральных состояний

При использовании модели необходимо хорошо уметь владеть вариациями параметров, с помощью одного и того же набора компонентов модели необходимо описать все состояния. Нельзя сравнивать разные состояния в разных моделях.

Классификации канонических спектральных состояний черных дыр

Кривые блеска для разбора двух объектов (черных дыр) будут немного разные, но общая тенденция - примерно одинаковая, во время рентгеновских вспышек объектов происходит одинаковая смена спектральных состояний. МакКлинтон (J.E. McClintock) первым создал классификацию спектральных состояний и дал им названия:

- состояние низкой светимости с жестким спектром (**low-hard state, LHS**)
- промежуточное состояние (**intermediate state, IS**)
- состояние высокой светимости с мягким спектром (**high-soft state, HSS**)
- состояние с очень мягким спектром (**very soft state, VSS**)

Допустим, произошла вспышка, в состоянии high-soft будет очень сильный вклад диска, в состоянии low-hard - диск слабый, работает только переходный слой.

Нагрев и охлаждение

Когда создается модель, необходимо понять: от чего идет нагрев, от чего - охлаждение. При оценке излучения от диска обычно описывается чернотельное излучение (blackbody), но с неким распределением (профиль температур по диску). Их очень много и получается огибающая, но необходимо учитывать, что где-то есть распределение температур. В черной дыре или нейтронной звезде излучение диска распределено следующим образом: более близкая часть - рентген, далее ультрафиолет, далее оптика.

Процесс тепловой комптонизации

Поскольку вещество канализируется, оно по спирали подходит все ближе к черной дыре и попадает в область комптонизации, там оно сталкивается с горячими электронами. После взаимодействия холодного, слабого фотона диска и жесткого электрона - фотон приобретает энергию и становится более горячим, а электрон энергию теряет (охлаждается). Отчего происходит нагрев, откуда берутся жесткие электроны? Протоны, сталкиваясь с электронами, приобретают энергию, потом отдают её электронам. Этот процесс - бесконечный, таким образом постепенно происходит нагрев. Можно посчитать энергию, которую получает электрон в релятивистском потоке. Скорость в потоке очень большая, энергия доходит до 200 кэВ. Можно посчитать длину, на которой действует этот процесс. Нагрев происходит в зависимости от светимости:

$$L_{\text{acc}} = \dot{M} c^2 \quad (\dot{M} - \text{скорость аккреции})$$

Для охлаждения происходит обратная комптонизация. Имея: нагрев, охлаждение и параметр температуры, далее приравняв их, мы можем определить температуру, она составляет 10^8 - 10^9 К, это 10-100 кэВ, то есть рентгеновский диапазон.

Откуда появляются "жесткие хвосты"?

Есть теории, в которых говорится, что диск в разных состояниях подходит на разное расстояние к черной дыре, и этим все объясняется (без переходного слоя). Не ясно, как в таком случае объясняется комптонизация, изменение формы спектра. Тем не менее, идея, что диск подходит ближе к черной дыре в момент, когда имеется максимум вспышки - долгоживущая и хорошая идея. Остается вопрос: откуда возникает откуда возникает "жесткий хвост" в мягком состоянии? Если рассматривать приближение только внутренней границы диска (который смыкается), то без переходного слоя - это невозможно.

Гравитационный радиус или радиус Шварцшильда:

$$r_s = 2Gm/c^2$$

С точки зрения теории диск расширяется до $3 r_s$ (по причине того, что есть условие устойчивости, последняя устойчивая орбита). Когда состояние жесткое, то диск отходит на расстояние $10-15 r_s$

Расчеты с учетом гидродинамики и энергетических балансов (Chakrabarty&Titarchuk) показали область, в которой происходит комптонизация - переходный слой, действительно, имеет место быть.

Состояние низкой светимости с жестким спектром (low-hard state, LHS):

- фотонный индекс $\Gamma < 1,5$ (характеризует наклон спектра)
- наблюдаются квазипериодические осцилляции

Промежуточное состояние (intermediate state, IS):

- фотонный индекс порядка 2
- характеризуется сильным ВВ компонентом и power law до 150 кэВ
- наблюдаются квазипериодические осцилляции

Состояние высокой светимости с мягким спектром (high-soft state, HSS):

- фотонный индекс может достигать 3
- характеризуется мягкой составляющей (soft - мягкий спектр), появляется большая светимость (higt)
- "жесткий хвост" (наблюдательный факт)
- исчезают квазипериодические осцилляции (это является признаком, по которому определяется, что скоро произойдет вспышка)

Состояние с очень мягким спектром (very soft state, VSS):

- характеризуется высокой светимостью
- квазипериодические осцилляции отсутствуют

Эволюция спектра мощности объекта GRS 1915+105, который пошел на вспышку (почти вспыхнул), по данным наблюдений в радиодиапазоне не отмечалась. Был рассмотрен фотонный индекс Γ степенной составляющей спектра как функция нормировки. Нормировка пропорциональна темпу аккреции, мы смотрим, как изменяется фотонный индекс Γ (наклон спектра) с возрастанием темпа аккреции. Был показан участок насыщения. В середине вспышки отмечается монотонное возрастание фотонного индекса. Вспышка микроквазара GRS 1915+105 идет два года (это немного, для Галактики необходимо 20 лет), потом в течение 10 лет может ничего не происходить. Вспышки происходили в 1997-1998 гг., в 2005-2006 гг. Вспышка 2005-2006 гг. также показала монотонное нарастание и насыщение в максимуме вспышки фотонного индекса. Что является достоверной проверкой признака черной дыры.

Суммарные данные наблюдений показали, что объект входит во вспышку по одному треку, насыщается, а обратно идет по другому треку (рис. 5.3). Это называется

эффект гистерезиса. Возвращение по другому треку происходит по следующим причинам: когда начинается вспышка, через точку Лагранжа поступает вещество, но диск ещё слабый, он недостаточно насытился; после вспышки диск имеет ещё много массы, он хорошо светит, поэтому ситуация со светимостью будет иная (выше или ниже).

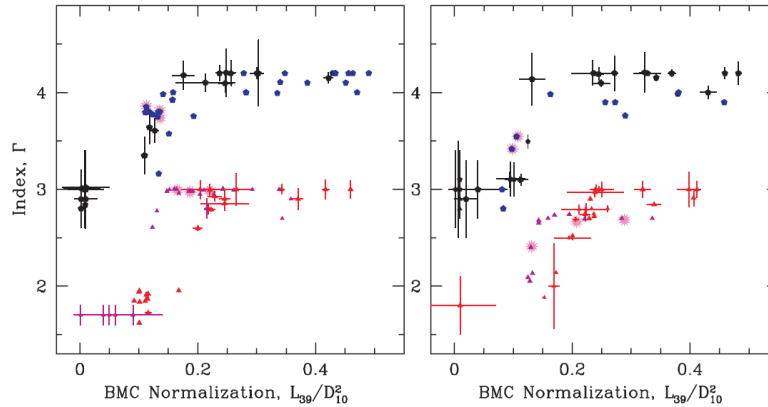


Рис. 5.3. Фаза нарастания (слева) и фаза спада (справа) рентгеновских вспышек в GRS 1915+105

Насыщение фотонного индекса

Насыщение индекса - признак наличия черной дыры в источнике, он позволяет оценить массу хитрым способом. С одной стороны, индекс - это наклон спектра, с другой - величина обратно пропорциональная параметру комптонизация Υ

$$\alpha \sim 1/\Upsilon \sim 1/(N_{sc} * \eta)$$

- N_{sc} - количество взаимодействий (столкновений) при рассеянии
- η - эффективность каждого рассеяния, сколько получает фотон приращения энергии
- τ - оптическое излучение

В случае максимума вспышки насыщение происходит, когда $\tau > 1$. Необходимо посмотреть каждый из сомножителей: N_{sc} пропорциональна τ , η пропорциональна $1/\tau$. При перемножении получается константа (и насыщение).

QPO у кандидатов черные дыры

В момент состояния высокой светимости с мягким спектром (HSS) пропадают все частоты QPO. По наблюдениям эволюции мощности потока GRS 1915+105 отмечается небольшая рентгеновская вспышка и длинное квазиплато с небольшой вспышкой (точка В на рис. 5.4.). Оценено, что происходит до, после и во время вспышки: в точке А до вспышки видно хорошее QPO; в точке В все пропадает, остается только шум; в точке С квазипериодическая осцилляция восстановилась, но уже на другой частоте. То, что частота была немного больше, а стала меньше - означает, что

объект был меньше, а стал больше. В системе произошла вспышка, объект взорвался и расширился.

Обнаружены изменения в спектре мощности и энергетическом спектре во время небольших радио/рентгеновских вспышек, которые показывают, что произошло с объектом: момент радио/рентгеновской вспышки сопровождается исчезновением QPO особенностей в спектре мощности, при этом энергетический спектр становится мягче, чем он был до и после вспышки.

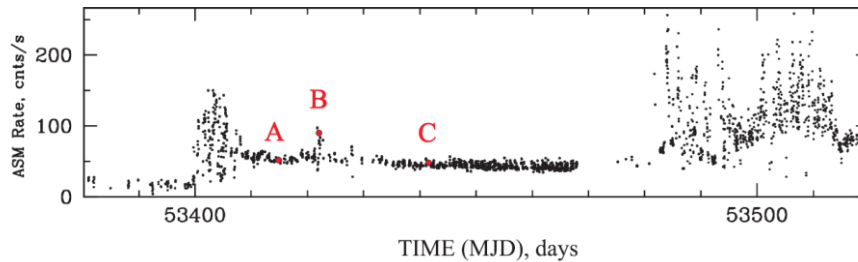


Рис. 5.4. Фаза нарастания рентгеновской вспышки в GRS 1915+105

Насыщение можно посмотреть в терминах фотонного индекса, можно в терминах QPO. Существует три типа QPO: A, B, и C. Только тип C показывает насыщение, потому что они формируются в совершенно разных областях, а различаются чисто феноменологически, по описанию. Вращающиеся нейтронные звезды имеют небольшой размер поверхности, поэтому мы будем иметь две килогерцовые частоты (от и к нам). Черные дыры обычно их не показывают, потому что у них отсутствует поверхность, но черная дыра XTEJ 1550 показала 184 гц, такое большое значение редкость.

Для того, чтобы посмотреть насыщение в терминах QPO, по горизонтальной оси откладывается не темп аккреции, а частота QPO. Для этого программой измеряется центроид. У GRS 1915+105 наблюдается монотонный рост, но нет насыщения в терминах QPO, так как в мягком состоянии оно отсутствует.

- Низкие частоты QPO видны в low-hard state и intermediate state и сильно коррелируют со спектральными характеристиками источника.
- QPO связаны с нетепловой частью спектра, исчезают в soft state - это типичный признак для черных дыр.
- Обычно QPO показывают 2 или 3 гармоники, иногда под-гармоники.
- Существует ряд моделей: coronal oscillation (Titarchuk & Osherovich), precession (Stella & Vertri) и др., но ни одна из них не объясняет все разнообразие квазипериодических осцилляций.

Природа QPO

Основная гармоника более сильная, под-гармоники более слабые. Если мы строим, например, диаграмму зависимости, то необходимо брать одно и то же: либо

центральный пик - основную гармонику, либо под-гармонику. Моделирование в рамках сценария усеченного внутри диска предполагает, что внешний диск обеспечивает возмущающую силу, внутренний переходный слой выступает в качестве осциллирующей системы. Таким подходом можно объяснить переменности в GRS 1915+105 (не внешним затмением и пр.), это более естественное объяснение. Осцилляции описываются Лоренцианами с ненулевой шириной на фоне широкополосного шума (broad-band). Такая система имеет резонанс на частоте $V_{1/2}$, то есть показывает под-гармоники.

В GRS 1915+105 обнаружена интересная компонента (зеленая компонента на рис. 5.5.). Порядка 100-200 спектров хорошо описываются моделями ВМС и пр., 8 наблюдений спектров имеют плохой χ^2 , который является критерием принятия модели. Если $\chi^2 = 1$, то модель принимается, если он больше предельной величины, то модель не используется. Причину величины χ^2 объясняет нижняя панель на рис. 5.4., где показывается отклонение модели от наблюдения - это характерный "горб" с максимумом на энергиях 15-40 кэВ. Было предложено использовать модель blackbody, когда добавили зеленую компоненту (левая нижняя панель с компонентой, правая - без), то была показана хорошая сходимость, отклонения концентрируются к нулевой центральной линии. Левая нижняя панель- $\chi^2 = 1,43$, правая- $\chi^2 = 1,06$.

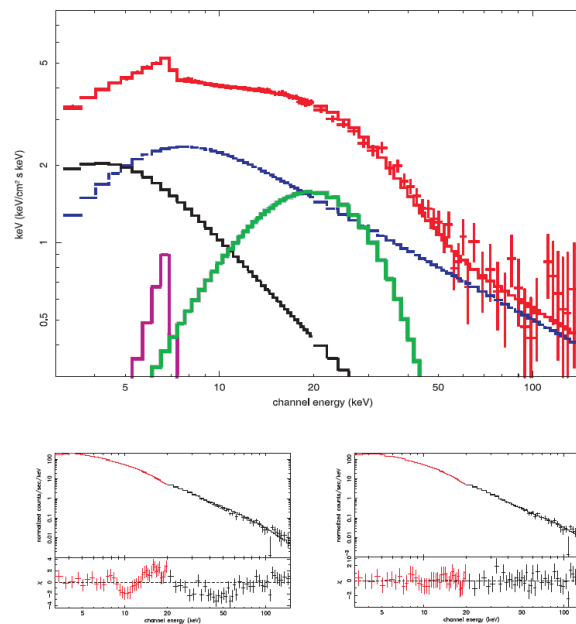


Рис. 5.5. Спектр GRS 1915+105 во время финальной фазы вспышки при переходе источника из промежуточного состояния в низкое/жесткое (верхняя панель) и в нормализованных отсчетах (нижние панели)

В рентгеновском телескопе RXTE два детектора, один работает на энергиях 3-20 кэВ, потом 20 кэВ и т.д., сшивка происходит именно здесь. Было сделано предположение, что спектр шит неправильно, проблема с кросс-нормировкой. Тогда

использовали телескоп *BeppoSAX*, у которого 4 детектора, которые сшиваются на разных энергиях, на энергии 20-30 кэВ сшивки нет, но телескоп показал то же явление.

Еще одно предположение состоит в том, что это модель *reflection*. Если гамма $\Gamma < 2$, то эта модель работает эффективно, если $\Gamma > 2$ - модель не работает (в более мягком состоянии). *Reflection*: есть наклон спектра, более жесткие фотоны должны каким-то образом переместиться в менее жесткую часть, при отражении теряется часть энергии. Если спектр будет в жестком состоянии (более горизонтальный), фотоны переместятся, их будет много, они дадут некий "горб".

Спектр парной аннигиляции с гравитационным красным смещением

Вокруг черной дыры есть некоторая область, где происходит следующее: аннигиляционные линии 511 кэВ (тонкая линия, дельта-функция) пытаются выйти из черной дыры наружу, часть поглощается, часть вернется обратно. Линии выходят из очень сильной гравитационной потенциальной ямы и будут испытывать гравитационное красное смещение. Линия будет видна на 20 кэВ, она будет размытая, потому что, если фотон формируется на глубине, то он будет испытывать большее красное смещение, если на поверхности - он менее ему подвержен. Должно быть условие: если произведение фотонов больше, чем квадрат их энергий, тогда образуется пары позитрон-электрон. Рано или поздно они аннигилируют, плюс с минусом аннигилируют, получается ноль. Оказывается - нет, они аннигилируют с излучением гамма фотонов. Энергии 511 кэВ - это энергии покоя электрона, исследователи искали линии именно на этих энергиях, но с их пор ничего не обнаружено. Оказалось, что необходимо искать на 20 кэВ, в этом случае будет обнаружена линия, 8 наблюдений спектров - это именно этот случай. Если новое наблюдение работает, то оно будет работать на других объектах, подобные наблюдения подтверждены на SS 433 и ещё двух объектах.

Основные выводы:

- Объект GRS 1915+105 показывает все 4 спектральных состояния.
- Спектры аппроксимируются моделью ВМС для всех спектральных состояний.
- Объект GRS 1915+105 демонстрирует насыщение спектрального индекса, то есть содержит черную дыру

Спектральные признаки аккрецирующих черных звезд интересно изучить в сравнении с нейтронными звездами. Признаки будут контрастными. Например, для черных дыр было предсказание, что индекс должен насыщаться, поэтому поиск был нацелен на проверку этой идеи. Для нейтронных звезд таких предсказаний нет. Первая идея - посмотреть, как ведет себя фотонный индекс для нейтронных звезд.

Лекция 6. Двойная система с барионными джетами. Метод скалирования

Двойная система с барионными джетами 4U 1630-47

Было сделано открытие, что джеты содержат барионы. В данной лекции мы исследуем объект 4U 1630-47 - это черная дыра, которая известна наличием барионных джетов. Средства массовой информации подхватили эту информацию и сделали вывод, что если присутствуют барионы, то это ядерная физика, а в джетах идут ядерные реакции. Сегодня мы попробуем подтвердить либо развенчать миф о барионных джетах. Признаком черных дыр является насыщение фотонного индекса. **Основная задача** - исследование наблюдательной зависимости спектрального индекса от темпа аккреции в рентгеновских спектрах для источника с вероятной черной дырой, а также обоснование наличия черных дыр (насыщение индекса) и измерение массы черной дыры методом масштабирования (скалирования) для объекта 4U 1630-47.

Основные параметры 4U 1630-47:

- расстояние - $D < 11$ кпс
- нет оптического излучения
- есть инфракрасное излучение
- компаньон В (звезды класса В имеют эмиссионные линии металла в поглощении)
- периодичность вспышек $P \sim 600$ дней.

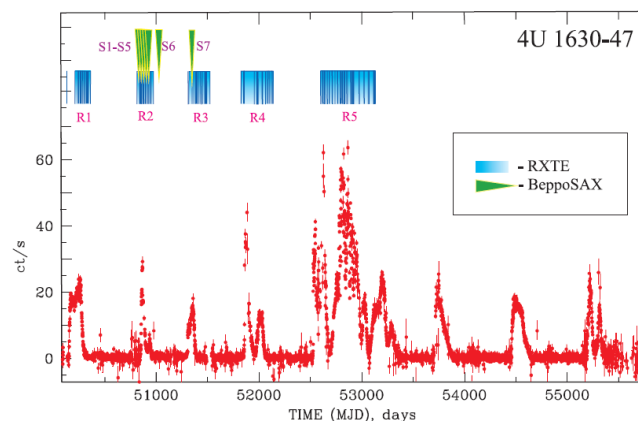


Рис. 6.1. Рентгеновская кривая блеска объекта 4U 1630-47

Обычно вспышки происходят спорадически, рентгеновская кривая блеска 4U 1630-47 показывает частоту вспышек: периодичность, потом сбой, далее опять периодичность. Центральный сбой периодичности вспышек вызывает большой вопрос (возможно, предыдущий цикл наложился на последующий). Некоторые исследователи считают, что в этой системе есть третье тело, которое вызывает периодичность вспышек, а также вызвало данный сбой. Обсерваторией RXTE произведено 425 наблюдений, BeppoSAX - 7 наблюдений.

Спектральный анализ

По данным RXTE выбраны самые характерные спектры для разных состояний 4U 1630-47. Сверхмягкое состояние объект не показывает. Практически всё излучение образовано за счет комптонизационного компонента, вклад которого показан желтой площадью (рис. 1.3., стр 19). Модельная спектральная компонента указана фиолетовой линией (модели Laor), её аппроксимировали, потому что она здесь асимметричная. Нижняя панель (данные ВерроSAX) показывает хорошую сходимость модели и наблюдений.

Объект 4U 1630-47 показывает в разных вспышках разный уровень насыщения индекса (рис. 6.2.). Возникают вопросы: возможно ли такое явление, может это другой объект? Ответ на них можно найти в теории: насыщение индекса на разных уровнях определяется разной электронной температурой плазмы, причем обратным образом - чем больше температура, тем ниже уровень насыщения (Titarchuk&Laurent)

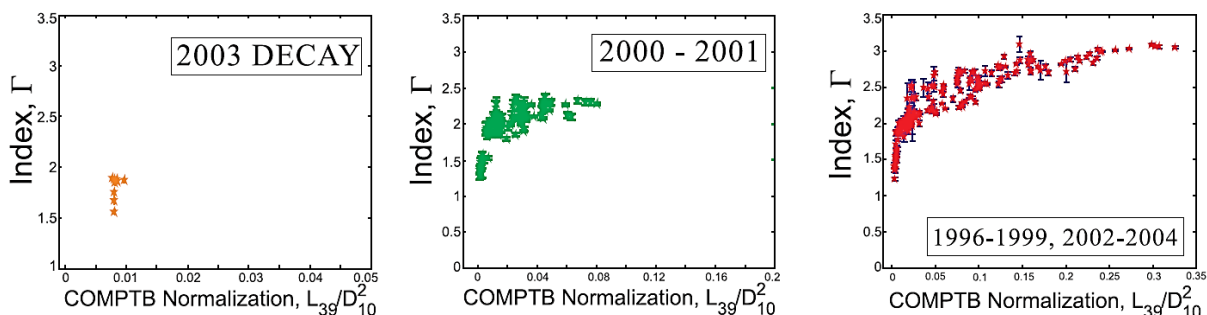


Рис.6.2. Корреляции индекса Γ как функции нормировки COMTB компоненты

"Кулинарные пристрастия" черных дыр

Черные дыры звездных масс "питаются" веществом, которое исходит от звезды-компаньона. Это происходит именно в двойных системах, сверхмассивные черные дыры могут питаться чем-то другим. Часть поступающего от компаньона вещества отбрасывается черными дырами, оно испускается в виде двух мощных струй частиц - джетов. Возможно, это уже переработанное черными дырами вещество, это можно определить, изучая состав джетов.

Железо и никель в джетах

Исследователь **M. Diaz Trigo** провела наблюдения за джетами, были обнаружены признаки высоко ионизированных ядер двух тяжелых химических элементов - железа и никеля. При анализе рентгеновских данных, представленных исследователем, были обнаружены признаки ядер железа (линия железа 6 и 7 кэВ), которые характерны обоим джетам, имеющим противоположные направления. Подтверждено наличие никеля в одном из джетов (линия более энергична - порядка 8 кэВ). В первом сете наблюдений не было джетов и радиоизлучения. Наличие повышенного радио излучения является индикатором наличия джета. Если вращение <

0,7 (параметр Керра), то его можно не учитывать, но черная дыра сама ничего не излучает (ни свет, ни рентген, ни синхротрон), обычно синхротроны излучаются от джета. Радиоизлучение бывает из центральной части системы (микроокрестности), если объект активный, то его обычно в пространство выбрасывает джет. Во втором сете наблюдения появились водородо и гелио подобные линии железа. Они смещены, была определена их скорость, которая почти достигала скорости света.

Исследователи (**M. Diaz Trigo et al**) заявили, что это - первый раз, когда тяжелые ядра были обнаружены в джетах типичной черной дыры звездной массы. Существует только одна аналогичная двойная система, железо и никель были определены и в SS 433. Этот объект очень трудно наблюдать, поскольку он характеризуется необычно высоким темпом аккреции, который не позволяет сравнивать свойства объекта с характеристиками более типичных черных дыр, препятствует наличие непрозрачной оболочки.

Подвижные эмиссионные линии в рентгеновских спектрах подвижно передвигаются по спектру (рис. 4.3., стр. 49), длина волны H_{α} . Наблюдения ASCA показывают линии и железа, и никеля (есть красная компонента, есть синяя компонента - линии, которые принадлежат к джету, и направлены от и к нам). Результаты наблюдений телескопа Chandra показали те же результаты, но более высокого качества и с большим количеством элементов: Fe, Ni, S, Si, Ar, Ca.

Fe XXV F^{25} : распределение подуровней в гелие-подобном ионе железа

- основная линия - 6,7 кэВ
- три запрещенные линии: 6, 685 кэВ, запрещение по кантовому магнитному числу, квадрупольному моменту), 6, 668 кэВ и 6, 666 кэВ (отличия в третьем знаке)
- порог ионизации - 18,1 кэВ, если температура будет выше порога, то линии ионизации не будет, будет видна только линия железа (определяется температурой плазмы)

В объектах в рентгеновском спектре часто видны линии железа (по причине того, что железо более обильное, обильнее никеля).

Fe XXVI F^{26} : водородоподобный ион железа

- основные линии наиболее четко видны: 6,97 кэВ и 6, 95 кэВ. Правила квантования разрешают наличие на одном уровне электронов с двумя разными спинами, из-за этого получаются разные линии и разные вероятности.
- порог ионизации - 9,3 кэВ

При температуре выше 18,1 кэВ будут видны основные серии и водородо и гелио подобных линий.

Барионы - от греч. *baris*/тяжёлый - элементарные частицы группы барионов, квантовое число $L = 3/2$ (спин $1/2$), состоят из трех кварков. К основным барионам относятся: протон, нейтрон, лямбда-барионы, сигма-барионы, кси-барионы и их античастицы

Пороговая энергия E_{cutoff} . На одном из типичных спектров объекта 4U 1630-47 показано, что если продолжить линию спектра дальше, то можно найти E_{cutoff} , которая составляет ~ 300 кэВ. Спектр с завалом на высоких частотах (завал - англ. *cutoff* – обрезание). С нарастанием вспышки меняются спектральные состояния, спектральный индекс (наклон спектра) постепенно возрастает. Возрастает ли завал монотонно, как меняется энергия верхнего завала? При нарастании вспышки E_{cutoff} сначала убывает, потом становится почти постоянной, а потом возрастает, причем для каждой вспышки на своем фотонном индексе. Отмечается немонотонность верхней границы.

Место **QPO** (квазипериодические осцилляции) показано на рис. 6.3. Квазипериодическая осцилляция - резонанс, резонансная частота - это собственные частоты колебания тела, которое имеет ограниченные размеры.

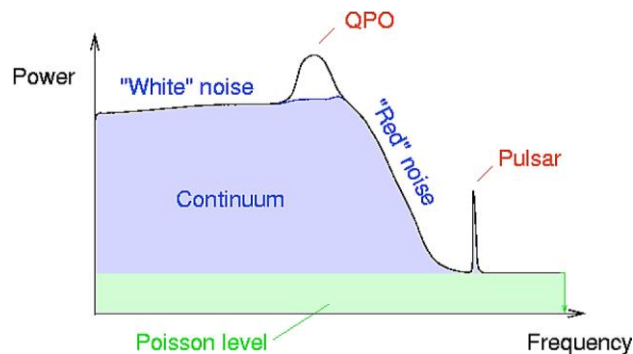


Рис.6.3. Континуум (спектр мощности), белый и красный шум, частоты QPO

Если взять некоторые точки на кривой блеска, то можно показать, как меняется спектр мощности: меняется белый и красный шум, а также частота осцилляции. Спектр мощности показывает геометрическую перестройку, меняется размер переходного слоя. Частота QPO обратно пропорциональна размеру этой области. Происходит расширение, вспышка, но в её момент QPO пропадают. Точно не зная природу каждой компоненты, мы можем посмотреть, что происходят сильные изменения.

Определение массы черной дыры методом масштабирования (скалирования)

Условия метода скалирования

Процесс скалирования - это обычно парный процесс, для его реализации необходимы две звезды. Два объекта (*reference* - опорный объект, у которого известны и масса, и другие параметры, *target* - объект, у которого мы хотим определить одну неизвестную - массу) должны показывать:

- вспышки одной природы (усиление дисковой аккреции)
- насыщение спектрального или фотонного индекса

Спектры двух объектов должны быть:

1. Профитированы в рамках одинаковых комптонизационных спектральных моделей. Входной и выходной параметры в любой комптонизационной модели - это спектральный или фотонный индекс, различие между ними - аддитивная единица, $\alpha = \gamma + 1$, индекс строится в зависимости от нормировки, которая пропорциональна темпу аккреции.
2. Характеризоваться одинаковыми уровнями насыщения индекса.
3. Иметь примерно одинаковые углы наклонной части корреляции Таким образом мы гарантируем, что процессы, протекающие в двух объектах, примерно одинаковые.

Необходимо свести до минимума различия в этих компонентах, чтобы в дальнейшем провести скалирование.

На рис.6.5. показано скалирование фотонного индекса Γ для объектов: 4U 1630-47(синие точки), GRO J 1655-40, XTE J 1550-564, H 1743-322 (красные точки)

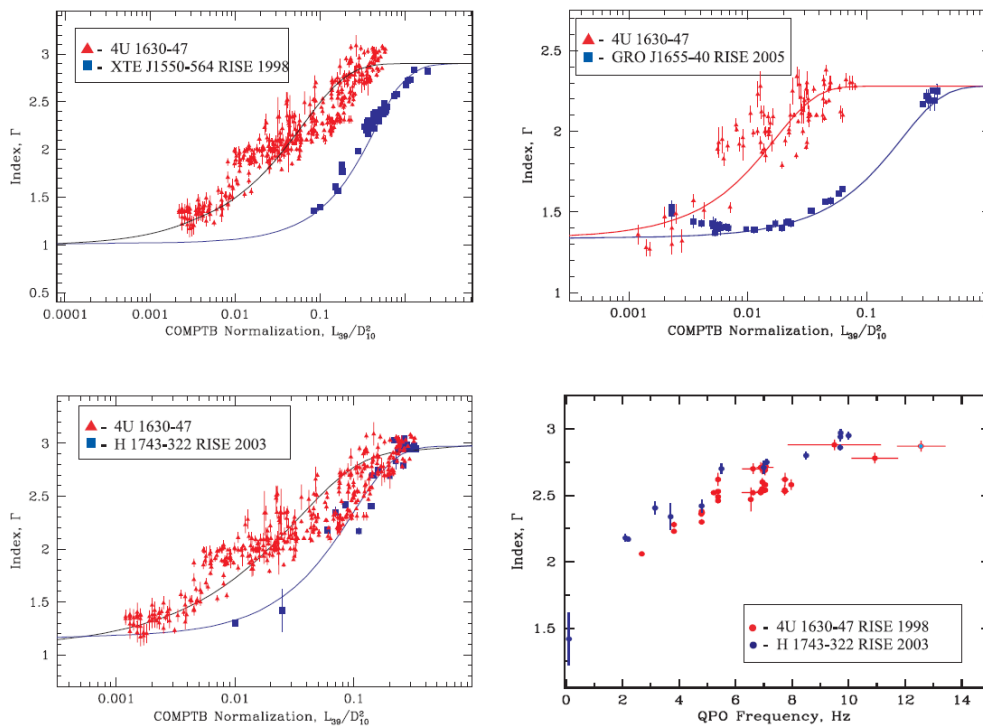


Рис.6.5. Скалирование фотонного индекса Γ для 4U 1630-47(синие точки) и опорных объектов: GRO J 1655-40, XTE J 1550-564, H 1743-322 (красные точки)

На нижней правой панели по горизонтальной оси отложена частота QPO.

Эмпирическое подобие корреляции

Условия самоподобия корреляционных кривых метода скалирования:

- получены в рамках одинаковых комптонизационных спектральных моделей (через осцилляцию);
- характеризуются одинаковыми уровнями насыщения индекса (через нормировку);
- имеют примерно одинаковые углы наклонной части корреляций.

Через нормировку (наиболее распространенный способ):

- для **reference** объекта даны: масса - M_r , расстояние - d_r и нормировка - N_r
- для **target** объекта даны расстояние - d_t и нормировка - N_t ,
- необходимо найти массу - M_t
- N_t и N_r мы определяем из графика, где по горизонтальной оси - нормировка, по вертикальной - индекс гамма. Самая удобная точка - это точка перегиба, после которой наблюдается постоянное насыщение. Необходимо посмотреть её абсциссу.
- нормировка пропорциональна потоку, который определяется светимостью L делить на квадрат расстояния - d_r^2
- Отношение светимости: $L \propto \eta(\dot{m})\dot{m}$

$$s_N \frac{N_t}{N_r} = \frac{F_t}{F_r} = \frac{L_t}{d_t^2} \frac{L_r}{d_r^2}$$

$$L_{\text{Edd}} \frac{4\pi c G M m_p}{\sigma_T}$$

$$M_t = s_\mu M_r \left(\frac{d_r^2}{d_t^2} \right)^2 fg$$

$$M_t = M_r (N_t/N_r) (d_t/d_r)^2 fg$$

Поскольку мы имеем дело с дисками, необходимо учитывать его ориентацию в пространстве: если диск будет расположен с полюса, то он будет более ярким, если с ребра - менее ярким. Поэтому вводится геометрический фактор fg , который равен отношению косинусов углов, под которыми мы видим (пока мы считаем его равным единице), вместо углов берем наклонность системы: угол нормали плоскости диска и лучом зрения.

Очень часто объекты не показывают квазипериодические осцилляции, в этом случае мы не можем определить массу. Есть простой выход через нормировку (мягкую светимость в рентгене) определить массу. Если есть квазипериодические осцилляции,

то они показывают эволюцию и насыщение. Бывают случаи, когда они показывают только эволюцию, тогда тоже работает способ через нормировку.

Через частоту QPO:

- для **reference** объекта даны: масса - M_r , частота QPO - ν_r (по горизонтальной оси отложена частота QPO, которая определяется по точке перегиба)
- для **target** объекта дана частота QPO ν_t
- необходимо найти массу - M_t
- $S_N \frac{\nu_r}{\nu_t} = \frac{M_t}{M_r}$
- ответ: $M_t = M_r(\nu_t/\nu_r)$

Если будут одинаковые частоты (треки, индекс Γ и частота QPO наложатся один на другой), то массы тоже будут одинаковыми. Мы не знаем ни расстояния до опорного источника, ни до искомого, но данным методом можем оценить массу. Если мы из, например, инфракрасных наблюдений знаем массу, то можем найти расстояние.

Измерение темпа аккреции в комптонизационных моделях ВМС и СОМРТВ

- Входящий спектр описывается как свертка входного чернотельного излучения диска с комптонизационной функцией Грина
- Параметр нормировки N_{bmc} определяется как мягкий рентгеновский поток диска (являющийся источником мягких фотонов в процессе комптонизации), пропорциональный как массе черной дыры M , так и темпу аккреции \dot{M} .

$$M_{bmc} = \left(\frac{L}{10^{39} \text{ ergs}^{-1}} \right) \left(\frac{10 \text{ kpc}}{d} \right)^2$$

- L_{39} - светимость источника в единицах 10^{39} эрг/с и d_{10} - расстояние до источника в единицах 10 кпс

Определение нормировки в комптонизационных моделях ВМС и СОМРТВ

$$L_{bol} = \int_0^{\infty} E \times A(E) dE, \quad (A1)$$

where $A(E)$ is the photon flux density of blackbody radiation

Распределение по энергии - Эддингтоновское, умножить на энергию и проинтегрировать по энергии, то получаем L болометрическое. Если поставить функцию Планка ($A1$ в $A2$), затем сделать подстановку, то получим интеграл (через z), который берется в квадратурах.

$$A(E) = 8.052 \times K \times \frac{E^2}{(kT)^4} \times \left(\exp \frac{E}{kT} - 1\right)^{-1}, \quad (A2)$$

and $K = N_{COMPTB} N_{BMC}$ is the normalization of the seed blackbody photon spectrum, defined in the same way as the XSPEC bbody model.

Thus, one can calculate the emergent luminosity of the source as an integral

$$L_{bol} = 8.052 \times K \int_0^\infty \frac{z^3 dz}{e^z - 1} = 8.052 \times K \times \frac{\pi^4}{15}. \quad (A3)$$

$$N_{BMC}, N_{COMPTB} = \left(\frac{L}{10^{39} \text{erg/s}}\right) \left(\frac{10 \text{ kpc}}{D}\right)^2. \quad (A4)$$

Формула:

$$L = \frac{GM_{bh}M}{R_{T*}}$$

следует из **теории дисковой аккреции Шакуры — Сюняева** 1973 года. Именно благодаря этой формуле, мы продвинулись по методу скалирования, особенно в той части, где скалирование используется метод скалирования через нормировку.

Поток от диска L , где $R_* = r_* R_s$ - эффективный радиус, на котором имеет место основное энерговыделение в диске, $R_s = 2GM/c^2$ - радиус Шварцшильда

Выводы:

- Метод скалирования - универсальный метод, который применяется более 10 лет, он работает как для черных дыр звездной массы, так и для сверхмассивных черных дыр и черных дыр промежуточной массы.
- Методом скалирования получены оценки массы черных дыр, согласующиеся с оценками их масс другими методами.

Оптическая толща (толщина)

τ - безразмерная величина, характеризующая степень непрозрачности среды для проходящего сквозь неё излучения. Непрозрачность среды обусловлена, в первую очередь, рассеянием, во вторую - поглощением. Она часто используется в гидрометеорологии.

- для оптически однородного слоя с геометрической толщиной l определяется соотношением: $\tau = \epsilon l$, где ϵ - объемный показатель среды
- $\tau \sim \sigma T^* n^* R$
- для оптически неоднородной среды принимает вид - $T = \int \epsilon dl$

- в общем случае τ есть функция частоты излучения, которая широко используется для описания процессов поглощения и рассеяния в теории переноса излучения.
- при прохождении через слой среды с оптической толщиной τ интенсивность света уменьшается в e раз: $I = I_0 e^{-\tau}$
- $\tau_\nu \gg 1$ - оптически толстый случай
- $\tau_\nu \ll 1$ - оптически тонкий случай

Задача о возможности высоких протонных температур в переходном слое

Переходный слой предполагается геометрически толстым. В этом случае протонные температуры могут быть порядка 100 МэВ. Почему электронные температуры обычно существенно меньше предполагаемых протонных температур? По наблюдениям температуры электронов и протонов составляют порядка 10, максимум 100 кэВ. Решение: это двухтемпературная плазма, температура электронов одна, протонов - другая, они не взаимодействуют, не выравниваются.

Как определить температуру электронов и протонов из наблюдений?

- Электронная температура на спектре объекта - кроме немонотонности пороговая энергия E_{cutoff} показывает, какова температура электронов.
- Температура протонов - измеряется по спектрам мощности, потому что протоны имеют большую массу и частота QPO (образована частотой дрожания протонов), от неё можно определить температуру:

$$f_{\text{qpo}} = v_p/R; \text{ обычно } f_{\text{qpo}} \sim 1-10 \text{ Гц}, R \sim 10^8 \text{ см},$$

$$\text{тогда скорость протонов } v_p \sim 10^8 \text{ см/с}$$

$$\text{Так как } v_p^2 = kT_p/m_p, \text{ отсюда температура протонов } T_p = v_p^2 * m_p/k \sim 10^8 \text{ К} = >$$

$$kT_p \sim 10 \text{ кэВ}$$

В наблюдениях следует, что температуры примерно одного порядка. Наблюдения первичны, а теория вторична, но следует примирить теорию и наблюдения.

Оценка оптической толщи, времен аккреции и обмена энергией между протонами и электронами

$$\tau \sim \sigma_T * n * R \sim 6, \text{ где } \sigma_T = 6.65 * 10^{25} \text{ см}^2; n \sim 10^{17} \text{ см}^{-3} \text{ и } R \sim 10^8$$

- Оценка времени аккреции с данного радиуса R (Галактики черной дыры):

$$T_{\text{аккр}} \sim R/V \sim 10^8/10^8 \sim 1 \text{ сек}$$

- Оценка времен передачи энергии от протонов электронам (формула - Зельдович и Райзер "Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений)

$$T_{e-i} \sim 3.15 \cdot 10^8 A \cdot T[\text{эВ}]^{3/2} / (N \cdot Z^2 \ln \Lambda) [\text{сек}] \sim 4 \cdot 10^{-5} \text{ сек}$$

где A - атомный вес ионов, N - их число в см^3 (10^{17} см^{-3})

Следовательно, $T_{\text{аккр}} \sim \sigma_T \cdot n \cdot R \sim 6$

Электроны и протоны успевают обменяться энергией прежде, чем аккрецируют (влетят с внешнего радиуса диска на внутренний), они подлетают в переходный слой уже с одной температурой. В оптически толстом диске электронные и протонные температуры очень близки (с точностью до различия и масс при равенстве скоростей). Плазма успевает термализоваться, температуру 100 МэВ мы не видим. Плазменная температура меняется в диапазоне от 1 кэВ до 50-80 кэВ.

Приливное разрушение звезд черными дырами

Гамма-рентгеновские вспышки обусловлены приливным разрушением звезды черными дырами. Открытие приливных разрушений стало одним из самых ярких достижений в астрономии. Звезду, пролетающую в пространстве, при небольшом прицельном параметре захватывает черная дыра. При этом разрушается вещество звезды. Во второй фазе, подлетая к черной дыре, звезда вытягивается, приобретая эллиптическую форму: более близкие к черной дыре части звезды будут притягиваться больше, дальние - меньше. Звезда разрывается, часть остатков поглощается, их гравитационная потенциальная энергия переходит в тепловую (до 10^5 К), её обломки начинают кружиться вокруг черной дыры, образуется временный аккреционный диск. Поэтому объект светится, таким образом, мы можем наблюдать черную дыру, которую до этого никаким способом определить было нельзя. Впервые приливное разрушение звезд предсказал М. Рис, британский космолог и астрофизик, который считал, что его невозможно наблюдать, потому что это очень редкое явление. М. Рис предложил идею, что кривая блеска будет убывать по определенному закону.

Объект Sw J1644+57

На кривой блеска объекта Sw J1644+57, в котором произошло приливное разрушение звезд черными дырами, наблюдался всплеск (по данным спутника Swift, нацеленного на гамма-всплески). Спутник работает следующим образом: появляется яркая вспышка (в гамма и рентген и других диапазонах), фиксируется гамма всплеск, который должен погаснуть через два дня. Стоит критерий: если объект два дня светит, то он исключается из списка гамма-всплесков, а наблюдение прекращается. В случае с объектом Sw J1644+57 наблюдение было продолжено по просьбе исследователей, которые предположили, что происходит приливное разрушение. Наблюдение объекта осуществлялось ещё в течение двух лет.

- Изменение жесткости рентгеновского излучения при затухании вспышки в Sw J1644+57 показывает его эволюцию, что позволяет предположить, что это черная дыра (данные Swift).
- По данным Suzaku мягкое и жесткое состояния спектра объекта сильно различаются.
- Комбинированный спектр (RXTE - более высокие частоты и Suzaku - низкие частоты) позволяет определить индекс Γ как функцию нормировки для проведения скалирования.
- Спектры Sw J1644+57 в максимуме вспышки по данным Suzaku и Swift дают больше точек для определения наличия участка насыщения (без которого не будет работать скалирование). Наблюдения показали монотонный рост и насыщение индекса.
- Пара для проведения скалирования не была подобрана, потому что уровень насыщения (примерно 1,7) неизвестен ни для одного звездного объекта. Тогда для скалирования был взят объект, у которых не совпадали уровни, но было возможно в процессе скалирования определить верхний и нижний предел массы. Оценка массы центрального источника в Sw J1644+57 была определена как $M_{\text{BH}} \sim 7 \times 10^6$ масс Солнца, что говорит о том, что это - сверхмассивная черная дыра, а также подтверждает предположения М. Риса о том, что сверхмассивные черные дыры могут участвовать в приливных разрушениях звезд.

Лекция 7. Наблюдения ядра галактики M87

Сегодня лекция посвящена очень серьезной теме - наблюдениям ядра галактики M87, а также "Пузырям Ферми". Но сначала мы посвятим немного времени шуму.

Теория шума

Шум - это хаотичные колебания звуковых волн разного происхождения, которые характеризуются сложной временной и спектральной структурами. Цвета шума – это система терминов, приписывающая некоторым видам шумовых сигналов определённые цвета, исходя из аналогии между спектром сигнала произвольной природы и спектрами различных цветов видимого света. Эта абстракция широко используется в отраслях техники, имеющих дело с шумом (акустика, электроника, физика и т.д.). В астрономии используется та же терминология. На рис. 6.3. стр. 74 показано, что красный и белый шум различаются наклоном, который может служить отличительной чертой: белый шум находится на горизонтальной линии, красный шум - на наклонной.

- основные цвета шума: белый, розовый, серый, синий, фиолетовый, красный
- менее распространенные названия для видов шума: оранжевый, черный, зеленый
- **Белый шум** - плоский спектр мощности (ось логарифмической частоты). Примером белого шума являются: шум водопада, бурление воды из крана, шум мотора работающей стиральной машины, вентилятора и других бытовых приборов.
- **Розовый шум** - спектральная плотность мощности падает на 10 дБ/декада (-3дБ/октаву, определяется $\sim 1/f$ (плотность обратно пропорциональна частоте). Примером розового шума является звук пролетающего вертолета.
- **Коричневый (красный) шум**, синоним броуновского шума - подобен розовому шуму, но с различным спектральным составом и различными отношениями ($\sim 1/f^2$). Характерен для большинства морей и океанов.
- **Синий шум** - спектральная плотность увеличивается на 3 дБ/октаву, это сигнал, спектральная плотность которого увеличивается с ростом частоты. На слух синий шум воспринимается более резким, нежели белый. Иногда в спектрах черных дыр и нейтронных звезд мы видим такую площадку, где может быть синий шум.
- **Фиолетовый шум** - спектральная плотность увеличивается на 6 дБ/октаву, его спектральная плотность пропорциональна квадрату частоты ($\sim f^2$). Фиолетовый шум получается, если продифференцировать белый шум по времени.

- Серый шум - спектр серого шума получается, если сложить спектры броуновского и фиолетового шумов. Спектр серого шума содержит большой "провал" на средних частотах, но человеческий слух субъективно воспринимает серый шум как равномерный по спектральной плотности.

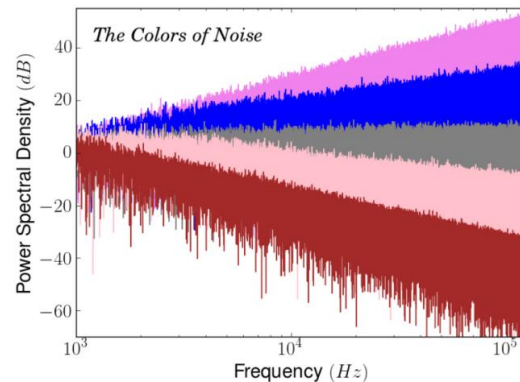


Рис.7.1. Смоделированные спектральные плотности мощности как функция частоты для различных цветов шума

На рис. 7.1. показано, что цвета шума определяются зависимостью от частоты, различаются наклоном.

Пуассоновский шум

Шум, обусловленный квантовой природой света, называется фотонным (дробовым, Пуассоновским) шумом и описывается распределением Пуассона (зеленая область на рис. 6.3. стр. 74). Удаление Пуассоновского шума в программе rowspec производится командой: `rowspec <filename> norm = -2` После этого действия пропадает шум и можно анализировать истинные колебания, QPO.

Интерпретация шума в спектрах мощности черных дыр и нейтронных звезд

Эволюции спектра мощности для нейтронной звезды 4U 1820-30 показывает в спокойном состоянии (низком/жестком) белый и розовый шум. Происхождение низкочастотного шума (Low-frequency noise, LFN, < 1 Гц) в спектрах мощности галактических черных дыр остается неизвестным, несмотря на многочисленные попытки его моделирования. В частности, неизвестна и область аккреционного диска, ответственная за него.

Исследования, интерпретирующие шум, различают:

- шум, обусловленный распространением электромагнитных сигналов в межзвездной среде;
- шум, вызываемый близкими пролетами тел вблизи пульсара;
- белый шум, связанный с резким увеличением толщины диска в сверхкритической области (TL).

В работе Титарчука Л. Г. моделирование в рамках усеченного внутри диска предполагает, что внешний диск обеспечивает возмущающуюся силу, а внутренний переходный слой выступает в качестве осциллирующей системы, которая производит и белый шум, и красный шум, и квазипериодические осцилляции.

Если сложить синусоидальные колебания близкой частоты, то происходит увеличение амплитуды в каждом максимуме синусоиды. Получается синусоида более мощной амплитуды. Если сложить два колебания, которые далеки по фазе, то складываются далекие по фазе синусоиды - получается белый шум. Когда мы складываем QPO, очень далекие по частоте, то получаем шумовую компоненту.

Сравнение массы черной дыры в M87, полученное разными методами

До настоящего времени детектирование горизонта событий черной дыры было нерешенным вопросом. В 2019 году научное сообщество всколыхнул проект "Горизонт событий", который выбрал для наблюдений в радиодиапазоне две черные дыры и через два года выдал результаты для. Это стимулировало исследователей провести оценку массы черной дыры в объекте M87 с помощью метода скалирования на основе рентгеновских данных.

Возможность существования черных дыр следует из общей теории относительности Альберта Эйнштейна. Эти объекты были впервые теоретически описаны более 100 лет назад. С тех пор получено множество косвенных доказательств того, что черные дыры действительно распространены во Вселенной. Для того, чтобы доказать, что объект является черной дырой - необходимо зафиксировать горизонт событий. Фотография горизонта событий M87 проекта "Горизонт событий" является самым прямым из всех косвенных доказательств существования черных дыр во Вселенной.

Черные дыры - это конечный результат эволюции звезд, масса которых выше солнечной в три или больше раз. После использования всех резервов ядерного горючего и прекращения реакций звезда "умирает" - превращается в черную дыру. Черная дыра, согласно общей теории относительности Альберта Эйнштейна, влечет искривление пространства-времени.

Проект "Горизонт событий" (Event Horizon Telescope, EHT)

В проекте "Горизонт событий" впервые зарегистрировано излучение от горизонта событий, то есть был зафиксирован прямой и линейный горизонт событий у черной дыры M87 в центре Галактики M87. Это первая и пока единственная черная дыра, которая была исследована очень тщательно. Причины невозможности таких наблюдений и получения фотографий ранее: гигантское расстояние, слабый сигнал и плохое разрешение. Именно поэтому проектом была выбрана очень мощная черная дыра. Проект был построен следующим образом: 8 наземных, синхронно работающих радиотелескопов, распределенных по всему миру, были объединены для наблюдений в

единую сеть. В результате в апреле 2017 года было получено прямое изображение тени черной дыры (рис. 7.2.), а результаты представлены в 2019 году. Презентация изображения прошла на пресс-конференции Национального научного фонда США.

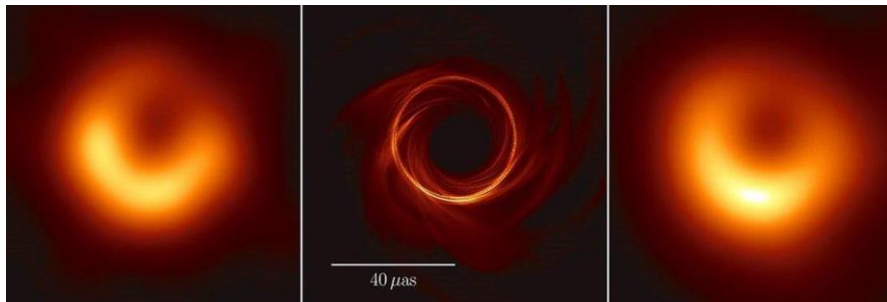


Рис.7.2. Слева - истинное изображение тени черной дыры M87, в центре - компьютерная модель, справа - компьютерная модель с наложенной маской с учетом разрешения телескопов

Объекты, выбранные для наблюдений в проекте: черные дыры Стрелец A* в центре нашей Галактики и объект в центре эллиптической Галактики M87. Для того, чтобы наблюдать тень черной дыры, она должна быть либо достаточно близкой, либо достаточно массивной. Причины, по которым были выбраны именно эти объекты:

- Стрелец A* - ближайшая к нам черная дыра.
- Центр Девы A, M87 в 20 раз дальше и в 1 000 раз больше.
- Другие подходящие черные дыры для наблюдений пока неизвестны.

Параметры M87 (Messier 87, NGC 4486, Virgo A 3C 274)

- M87 открыл французский астроном Шарль Мессье в 1781 году
- сверхгигантская эллиптическая галактика
- расположена в Скоплении Девы, в созвездии Девы на границе с созвездием Волосы Вероники
- расстояние ~ 16,4 млн пс
- находится в 53 млн световых лет от Земли
- масса черной дыры в центре M87 ~ 5 млрд масс Солнца
- M87 – блазар.

Блазар - это вид квазара, джет которого направлен в сторону Земли.

Распределение энергии в спектре блазара 3C 454.3 показывает свет близкого окружения черной дыры в виде двух "горбов". На нижней оси находится логарифм частоты. Рентгеновское излучение находится, согласно шкале электромагнитных волн (рис. 7.3.), между ультрафиолетовым излучением (10^8 Гц) и гамма-излучением (10^{20} Гц) и составляет ~ 10^{18} . На спектре блазара показано 10^9 - минимальное излучение от черной дыры, именно поэтому там наблюдается черное пятно, так как излучения

объекта на этих частотах нет. Рентген показывает большие значения в 10^{18} , поэтому в рентгене больше шансов оценить массу черной дыры.

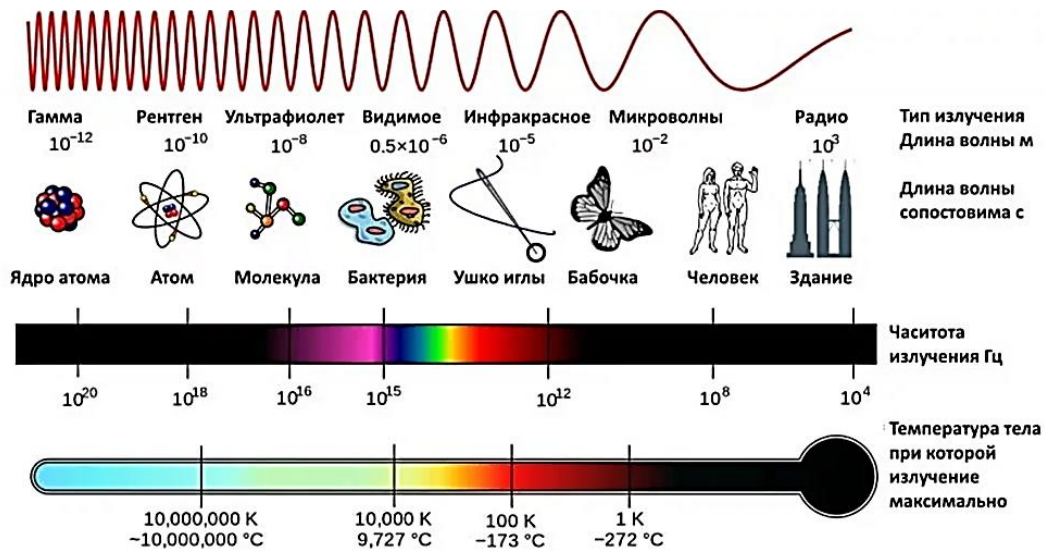


Рис.7.3. Шкала электромагнитных волн

Джет (выброс) из M87

В 1918 году американский астроном Гербер Кертис обнаружил "любопытный прямой луч, видимо, связанный с ядром тонкой линией материи". Джет действительно связан с ядром, поскольку вспышки ядра отражаются на струйном выбросе, который становится ярче.

Объект M87 известен джетом, который демонстрирует постоянство. Есть детали: узлы джета становятся ярче, они немного "дышат", но каждый из узлов "стоит" на месте. Джет объекта M87 показан обсерваторией Chandra в рентген, радио и оптических наблюдениях. Узлы джета имеют имена: knot 1, knot 2, HST 1 (узел может находиться в очень ярком состоянии, иногда он практически отсутствует)

Происхождение темного пятна объясняется тем, что мы видим Галактику с полюса, то есть диск практически полностью раскрыт. Общая теория относительности Эйнштейна предсказывает, что тень черной дыры должна выглядеть как темный круг, окруженный полумесяцем из яркого света. Не все ученые были согласны с подобным предсказанием, но наблюдения проекта "Горизонт событий" смогли указать на неправоту скептиков - предсказание Эйнштейна полностью подтвердилось.

Оценки массы черной дыры в M87

Оценки, которые были произведены ранее: газодинамические, звездной динамики и изображения проекта "Горизонт событий". Коэффициенты разные, но оценка везде одинаковая - 10^9 масс Солнца. Рентгеновские данные M87, полученные со спутника RXTE, содержат два сета с рядом наблюдений:

- 1998 год в спокойном состоянии черной дыры
- 2010 год - во время вспышки (которая необходима для применения метода скалирования).

Метод	М (M_{\odot})	Ссылки
Gas dynamics	$(3,45 \pm 0,5) \times 10^9$	Walsh et al. (2013); Akiyama et al.(2019)
Stellar dynamics	$(6,14 \pm 0,6) \times 10^9$	Gebhardt et al. (2011); Akiyama et al.(2019)
ЭНТ image	$(6,5 \pm 0,7) \times 10^9$	Akiyama et al.(2019)

Разница между сетями наблюдений составила 12 лет. Черная дыра большой массы на таких масштабах будет показывать переменность, на меньших её можно заметить.

Для анализа также были использованы рентгеновские данные M87, полученные со спутников Suzaku, ASCA, BeppoSAX и Chandra. Осуществлен поиск изменений в спектральных состояниях, чтобы заработал метод скалирования. Рентгеновская кривая блеска показывает распределение наблюдений в 1996-2012 гг. (рис. 7.5.). Монитор GCN предназначен для обнаружения и определения координат гамма-всплесков, мониторинг проводился по всем черным дырам, объект M87 был в списке, его наблюдали каждый день. Он вспыхивал достаточно часто, видна глобальная переменность, вспышки были мощные (они находятся ближе к правой части кривой блеска). На горизонтальной оси отложены средние юлианские даты. Сеты наблюдений RXTE: R1 (в спокойном состоянии) и R2 (в состоянии вспышки). Остальные спутники осуществляли наблюдения в спокойном состоянии.

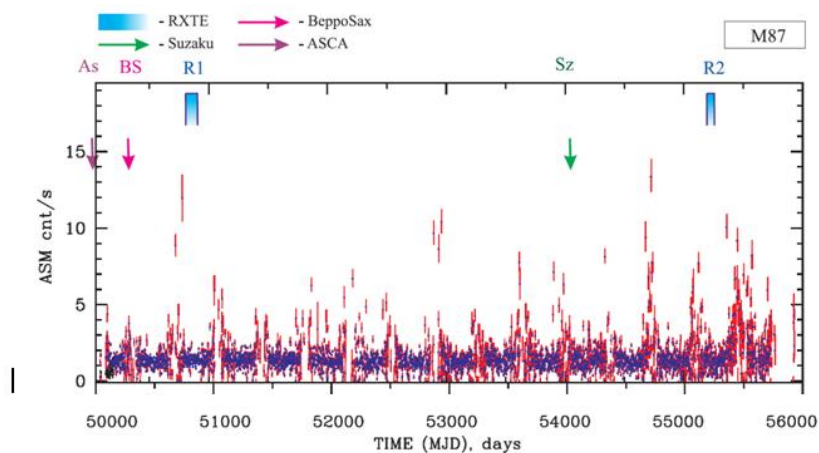


Рис.7.4. Рентгеновская кривая блеска: распределение наблюдений M87 в 1996-2012гг.

В определенные даты центральная черная дыра спокойна, а узел HST-1 джета доминирует в рентгеновском спектре M87, в этом случае сложно выделить ядро, информации о черной дыре нет. Данные наблюдений этих дат не использовались.

Данные спутника Suzaki, который отличается очень хорошим разрешением по энергии, показывает рентгеновский спектр, на котором видны линии Fe L/NE, Mg, Si, Si/S, S, Ar, Ca, Fe-K. Возникает вопрос: действительно это спектр M87?

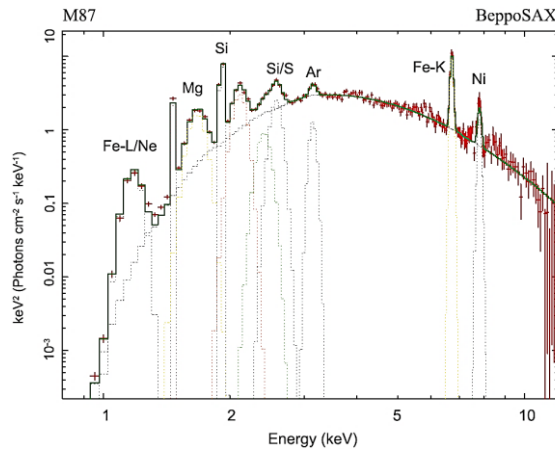


Рис.7.5. Оптимальный спектр BeppoSAX для M87 в состоянии IS – HSS с использованием модели $tbabs * bmc + N * gauss$

Если видна линия Fe-K, то это обозначает, что температура ниже 20 кэВ. Но этого не может быть, потому если черная дыра излучает в аккреции, то с такой яркой светимостью все должно быть заионизованно, то есть линии не должно быть. Возникло сомнение, что эти линии идут от черной дыры, было сделано предположение, что они идут от некоего окружения (переходного слоя или обтекающей атмосферы), где уже холоднее. Чтобы проверить эту идею, было необходимо профитировать, посмотреть на других спутниках.

Имеется черная дыра со сходящимся потоком, было произведено её описание комптонизированным спектром и гауссовой линией. Гауссовы линии могут образоваться только в среде, где холодно, они идут из широкой области гало.

Комптонизационная модель

- От диска идет чернотельный спектр, который описывается функцией Планка
- В переходном слое делается свертка: есть функция Планка (распределение количества фотонов по частоте), сворачиваем, то есть почленно умножаем, учитывая частоту, на ломанную:

$$G(x, x_0) \sim \begin{cases} x^{-\alpha} & , x > 0 \\ x^{\alpha+3} & , x < 0 \end{cases}$$

где частота $x = hv/kTe$

Форма ломанной получена следующим образом: в наблюдаемых спектрах посмотрели наклоны и смоделировали чернотельную функцию Планка. Только эта ломанная дала тот спектр, который получается на выходе в наблюдениях.

X MM-Newton: разделение спектра ядра и гало

Спектры, которые идут из области гало, были получены путем вырезания колец, радиус этих колец: для ядра - 0.0-0.25; для других областей - 0.25-0.5, 10-12. Линии были получены при исключении центральной черной дыры. Таким образом было доказано, что линии образуются в холодной обтекающей оболочке, в гало, а не от черной дыры.

На рентгеновском спектре M87, полученным по данным Suzaki, показана модель: $wabs*(bmc*highcut*+mekal)$. В этой модели присутствуют разные компоненты:

- **wabs** - поглощение, которое работает на частотах меньше 1К;
- **bmc** - комптонизационный спектр;
- **highcut** - введен потому, что есть такой механизм, который не позволяет фотонам греться до более высоких температур (так называемый завал);
- **mekal** - строит химический состав оболочки (такой же, как на Земле, поскольку программа адаптирована к земным элементам).

Центр Галактики M87 в рентгеновском и радио диапазоне

Наблюдения M87 проекта "Горизонт событий" были сделаны 14 апреля 2017 года, 14 апреля 2017 года со спутника Chandra были проведены наблюдения в рентгене. У Chandra больше поле зрения, на изображении видна черная дыра с хорошим разрешением, джет с узлами и даже какие-то волокна вещества. "Горизонт событий" снимал только центральную часть черной дыры, которая должна была дать лучшее разрешение (в радиодиапазоне).

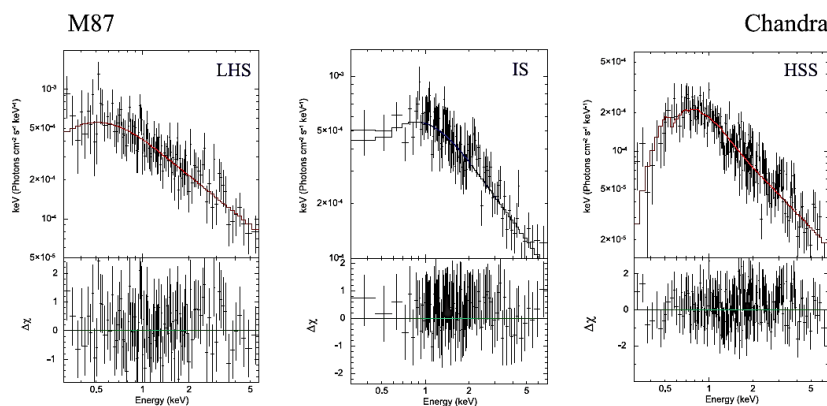


Рис. 7.6. Три типичных спектра M 87 для состояний LHS, IS, HSS

Три спектра для разных состояний M 87 репрезентативны, они очень "мохнатые", это явление наблюдается в силу того, что сигнал идет с очень далекого расстояния (хотя ядро Галактики очень яркое). Видна эволюция спектра (рис. 7.6.), слева показано состояние LHS (низкое/жесткое состояние), в центре - IS (промежуточное состояние), справа - HSS (высокое/мягкое состояние). Данные показаны черными крестиками, а спектральная модель (tbabs * VMC) представлена в виде цветной линии. Нижняя панель показывает хорошее согласие модели. Модель простая: межзвездное поглощение, то есть только комптонизационная модель, только ядро. Узел HST 1 описывался степенным законом, то есть его было можно выделить по спектру. Для того, чтобы сделать диаграмму эволюции спектра состояний (зависимости фотонного индекса от темпа аккреции), необходимо набрать как можно больше спектров. Самое главное - получить насыщение.

Расчет массы черной дыры по спектру мощности

- Получен QPO на частоте $\mu = 5 \times 10^{-7}$ Гц
- $V_{\text{qpo}} = v_p/R$, обычно $v_p \sim 10^8$ см/с
- R (cc size) $\sim 2 \times 10^{15}$ см $\times [v/10^8 \text{ см/с}]/[v/5 \times 10^{-7} \text{ 1с}^{-1}]$

Если радиус считать **радиусом Шварцшильда (гравитационным радиусом)**, то можно определить массу центрального объекта.

Немецкий астроном Карл Шварцшильд (Karl Schwarzschild) в последние годы своей жизни, используя уравнения общей теории относительности Эйнштейна, рассчитал гравитационное поле вокруг массы основного объекта.

Масса черной дыры	Шварцшильдовский радиус (радиус горизонта событий)
1 масса Земли	0,8 см
1 масса Юпитера	2,8 м
1 масса Солнца	3 км
2 массы Солнца	6 км
3 массы Солнца	9 км
5 масс Солнца	15 км
10 масс Солнца	30 км
50 масс Солнца	150 км
100 масс Солнца	300 км
103 масс Солнца	3.103 км
106 масс Солнца	10 световых секунд
109 масс Солнца	2,8 свет. часов
1012 масс Солнца	117 свет. дней
1015 масс Солнца	320 свет. лет

Рис. 7.7. Радиусы черных дыр Шварцшильда, обладающие разными массами

- $r_s = 2Gm/c^2$
- $m=10^8$ масс Солнца

По частотному временному анализу масса получается меньше, чем та, которую показал "Горизонт событий" (10^9) и все предыдущие методы.

После нанесения всех точек по данным спутников, отмечается насыщение (красные точки, данные RXTE), что означает наличие черной дыры во время вспышки. Данные RXTE наблюдаются и в низком состоянии, и в высоком. Данные наблюдений остальных спутников (ASCA, Suzaku, BeppoSAX, Swift, кроме Chandra) легли на вектор монотонного роста.

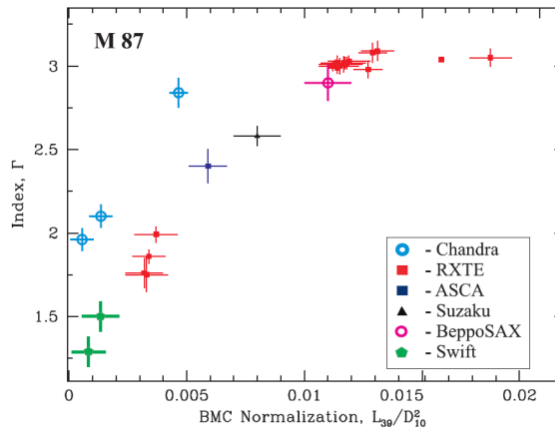


Рис.7.8. Корреляция фотонного индекса как функция темпа аккреции по данным спутников Chandra, RXTE, ASCA, Suzaku, BeppoSAX, Swift

Данные спутника Chandra отнесены влево, что говорит о том, что остальные спутники снимали и само ядро, и область вокруг него (с линиями, с джетом и пр.). Chandra фиксировала только те области, которые относятся к черной дыре, им доверия больше. Если мысленно провести первый трек по точкам спутников (кроме Chandra), а второй - по точкам Chandra, то будет видна их параллельность. Следовательно, необходимо свести первый трек налево, так как очень важно выбрать правильную точку перегиба, которая необходима для метода скалирования.

Пунктирной линией на рис. 7.9. показана коррекция фотонного индекса в M87 как функция темпа аккреции с учетом данных Chandra. Остальные линии - объекты для скалирования: XTE J1550-564, 4U 1630-472 и H 1743-322. Их достаточное количество, так как уровень насыщения находится в значении 3.

Наличие большого количества объектов для применения метода необязательно хорошо, так как скалирование - это парный процесс, каждый раз необходимо организовывать пару (искомый объект и опорный объект), разные пары могут показать разные значения массы. XTE J1550-564, 4U 1630-472 - это черные дыры звездной массы, у них одна физика, у сверхмассивной черной звезды - другая.

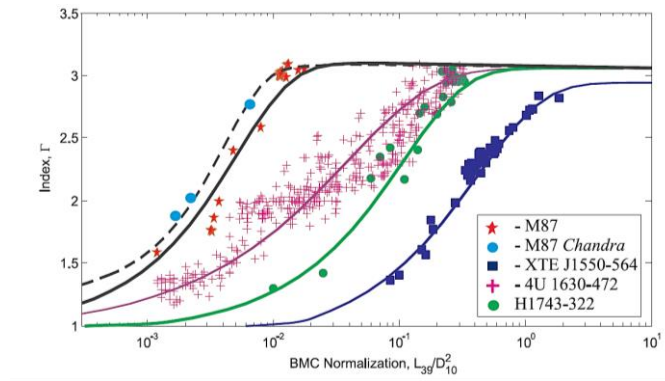


Рис.7.9. Корреляция фотонного индекса в M87 как функция темпа аккреции с учетом данных Chandra, объектов XTE J1550-564, 4U 1630-472, H 1743-322

Условия для метода комптонизации:

- наличие двух объектов, которые вспыхивают, вспышки должны иметь примерно одну и ту же природу;
- объекты необходимо профитировать в одинаковых комптонизационных спектральных моделях (через осцилляцию);
- насыщение уровня должно быть в верхней части одинаковым, наклонные части корреляций должны иметь примерно одинаковые углы.

В следствие вышеизложенного в методе были использованы другие объекты - сверхмассивные черные дыры:

- ESO 243-49 HLX-1 насыщение на значении 3, зеленая линия (рис. 7.10.)
- M 101 ULX-1, насыщение на значении 2,8, синяя линия
- M87 – черная линия

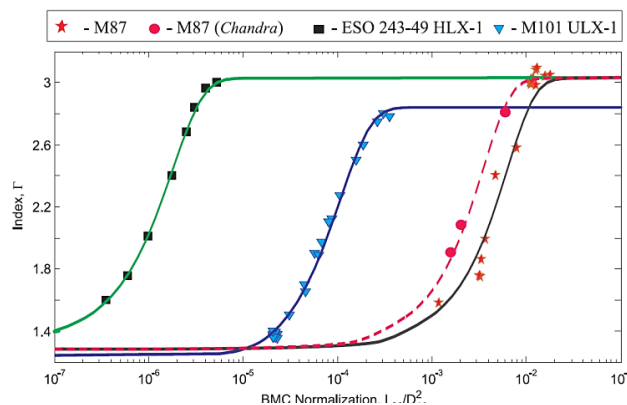


Рис.7.10. Корреляция фотонного индекса в M87 с использованием ESO 243-49 учетом данных Chandra, объектов HLX-1 и M 101 ULX-1

Корреляция фотонного индекса на данные Chandra - красный пунктир.

Способ скалирования через частоту QPO (по частоте) в данном случае не используется, так как для использования метода необходимо, чтобы QPO эволюционировало.

Способ скалирования через нормировку:

$$M_t = M_r(N_t/N_r)(d_t/d_r)^2 fg$$

Геометрический фактор fg - отношение косинусов, если бы излучение было сферически симметричное, то косинусы были бы не нужны, но мы имеем дисковое излучение Галактики, у черных дыр звездных масс дисковая аккреция. Необходимо учитывать, что с полюса эти объекты будут светиться ярче, под углом - слабее.

- **ESO 243-49 HLX-1:** $M_r = 7 \times 10^4$ масс Солнца; $D = 95$ Мpc; $N_r = 4 \times 10^{-6}$
- **M 87:** $M_t = ?$ масс Солнца; $D = 19$ Мpc; $N_t = 0,1$

$$M_t \sim 6 \times 10^7 \text{ масс Солнца}$$

При скалировании M87 с объектом H 1743-322 - черной дыры с хорошим определением расстояния были получены те же значения массы. Полученная таким образом масса черной дыры M87 (с учетом данных Chandra) - гораздо меньше, чем значения, полученные другими способами: газодинамикой, кинематикой, по размеру горизонта событий (проект "Горизонт событий").

Закключение:

- Проанализированы данные M87, полученные со спутников RXTE, ASCA, Suzaku, ВерроSAX.
- Рентгеновский спектр M87 хорошо описывается в модели комптонизации плюс линии (Gauss/mekal).
- Обнаружено насыщение индекса в M87.
- Временной анализ указывает на размер СС $L \sim 5 \times 10^{15}$ см и, соответственно, массу черной дыры в M87 порядка 10^8 масс Солнца. Временной анализ показывает масштаб переменности, который определяется массой центрального объекта (чем больше объект, тем медленнее будет показана переменность).
- Получены оценки массы черной дыры методом скалирования $> 6 \times 10^7$ масс Солнца, что дает близкий результат по временному анализу.

"Пузыри Ферми"

Выше и ниже плоскости нашей Галактики над ними выступает пара гигантских "Пузырей Ферми" - областей, которые излучают в гамма и рентгеновском диапазоне. Масса в центре составляет: $M_{\text{smbh}} \sim 4.3 \cdot 10^6$ масс Солнца.

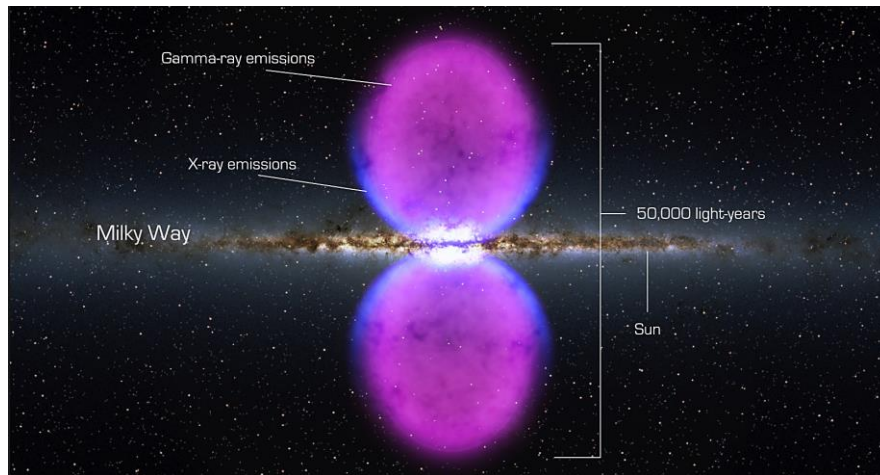


Рис.7.11. Модель "Пузырей Ферми" с областями рентгеновского и гамма излучения

Ядро нашей Галактики может терять вещество и энергию через пару "трубопроводов" - структур, уходящих в огромные пузыри Ферми, которые раздуваются по её сторонам. Эти каналы были обнаружены в рентгене, по доплеровским линиям было обнаружено течение вещества. Наблюдения XMM-Newton позволили напрямую связать пузыри Ферми с ядром Млечного Пути. Они также показали, что пузыри несимметричны: верхний имеет более круглую форму, нижний - более вытянутый.

Лекция 8. Нейтронные звезды

История открытия и основные параметры нейтронных звезд

Представим, что мы забыли все, что знали о нейтронных звездах, о черных дырах и белых карликах. Какие ассоциации возникают, когда мы слышим словосочетание "белый карлик"? Какие существуют повседневные, обыденные представления об этих объектах? К понятиям "черная дыра" и "белый карлик" можно подобрать несколько ненаучных вариантов ответа, к понятию "нейтронная звезда" - затруднительно. Нейтронные звезды - это удивительные и непредсказуемые объекты с поразительной историей предсказания, открытия и дальнейшего изучения.

Образование нейтронных звезд

Нейтронная звезда – это поздний этап эволюции. Мы видим Вселенную во всей красе, наблюдая жизнь звезд, этапы эволюции и момент предсмертной агонии. Смерть звезды - это всегда грандиозное и яркое событие. Чем крупнее и массивнее звезда, тем масштабнее катаклизм.

Что удерживает звезду в стабильном состоянии? Любое тело, которое обладает массой, - обладает гравитацией. Сила гравитации сжимает звезду к её центру, горение дает давление и распирает звезду от центра. Горят: H, He, O₂, и т.д. до Fe, которое обрезает эту цепочку. Объект начинает сжиматься, он схлопывается под действием гравитации, коллапсирует. Дальнейших вариантов развития несколько (в зависимости от массы объекта). Сжатие могут остановить некоторые силы, когда сильно сжимается вещество, электроны сближаются, а запреты квантовой механики не позволяют двум электронам быть на одной орбите. Постоянно увеличивающиеся силы гравитации приводят к трансформации звездного вещества в тепловую энергию. Этот процесс приводит к колоссальному выбросу - взрыву Сверхновой, сбросу оболочки звезды, на месте взрыва остается новый космический объект - нейтронная звезда.

Образование компактных объектов в том случае, когда победила гравитация:

- если масса исходного объекта меньше порядка одной массы Солнца ($M_3 < 3 M_\odot$) - образуется **белый карлик**
- если исходная масса звезды больше, чем две массы Солнца ($M_3 < 3M_\odot$), через канал вспышки Сверхновой образуется **нейтронная звезда**
- если масса звезды будет гораздо больше ($M_3 > 3M_\odot$), то когда она взрывается, может быть два варианта: образуется **черная дыра** или **нейтронная звезда**

Размер и масса нейтронной звезды

Нейтронные звезды являются финальным этапом жизни массивных звезд и компактными объектами.

- Обычная нейтронная звезда имеет массу 1,5 - 2 массы Солнца и радиус 10-20 км. Если сопоставить размер нейтронной звезды с размером города Лондон, то звезда займет приблизительно 1/5 его площади.
- Вещество нейтронной звезды обладает невероятной плотностью - порядка 2,8 000 000 000 тонн на м³, это примерно, как гора Эверест в объеме спичечного коробка. При такой плотности вещества протоны атомов вжимаются в электроны и образуют нейтроны.

Вращение нейтронной звезды

Чтобы такой плотный объект не схлопнулся в черную дыру, ему необходима противодействующая гравитационная сила. В данном случае - это центробежная сила, поскольку **скорость вращения** нейтронной звезды составляет порядка 1 тыс. оборотов в секунду.

Отмечены случаи "**антисбоев**" нейтронной звезды. Группа астрономов под руководством **В. Каспи (V. Kaspi)** из Университета Макгилла (Канада) впервые обнаружили нейтронную звезду, внезапно резко замедлившую скорость своего вращения (по данным Swift). Ученые установили это следующим образом: сигнал (кривая блеска) шел с одним периодом в пике (большим), в дальнейшем период изменился на больший. Чтобы правильно оценить находку исследователей, достаточно вспомнить, что в норме нейтронные звезды быстро вращаются, для того чтобы затормозить или ускорить вращение, необходим некий механизм. Затормозить - проще, так как есть потеря вещества, атомное излучение, ещё какие-то расходы. Чтобы представить, сколько выделяется энергии при торможении, можно привести в пример чайную ложку вещества нейтронной звезды, которая будет иметь массу в миллиарды тонн.

"Глитчи"

Периодически с нейтронными звездами что-то происходит, из-за чего они резко ускоряются. Такое событие астрономы называют "глитчем" (от англ. glitch - сбой). Если обычно скорость вращения нейтронной звезды очень плавно падает из-за торможения, вызываемого выбросами ею излучения и частиц высоких энергий, то во время глитча она, напротив, быстро возрастает.

Строение нейтронных звезд

Нейтронная звезда носит такое название именно потому, что она в основном состоит из сверхтекучих нейтронов. Сверхтекучесть гелия: при низких температурах гелий способен проникать в очень узкие щели, по аналогии этот механизм был перенесен на сверхтекучие электроны. Из чего состоит ядро нейтронной звезды до сих пор не ясно, вероятно, оно состоит из кварк-глюонной плазмы.

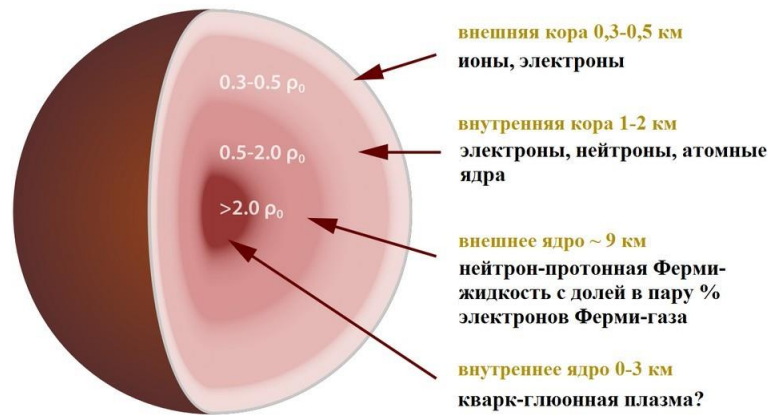


Рис.8.1. Модель строения нейтронной звезды

История открытия нейтронных звезд

Элементарная частица нейтрон была открыта в 1932 году английским физиком **Джеймсом Чедвиком**. Ученый проводил опыты, бомбардировал парафин частицами, которые при этом облучались альфа-частицами. В 1935 году ученого за это открытие наградили нобелевской премией.

Нейтронные звезды были предсказаны в 30-е годы:

- **звезды-ядра** - 1932 год, первая версия о существовании звезд с огромной плотностью с подачи российского ученого **Л.Д. Ландау**. Они были названы "звезды-ядра".
- **нейтронные звезды и сверхновые** - 1933 год, немецкий астроном **В. Бааде** и американский астроном **Ф. Цвикке** выдвинули идею, что звезды должны быть с необычным строением, более того, была обоснована теория, согласно которой на месте вспышки Сверхновой обязательно остается нейтронная звезда.

Открытие нейтронных звезд в 60-е годы:

- При помощи рентгеновского телескопа в 60-е годы был обнаружен пульсирующий сигнал, приходящий из далекого космоса. Поскольку сигнал был очень похож на сигнал искусственного происхождения, то предполагалось, что он испущен разумной инопланетной расой (эта информация была засекречена). Впоследствии было установлено, что источником этих сигналов является быстро вращающаяся нейтронная звезда, из полюсов которой исходят радиоизлучение и заряженные частицы. Так как ось звезды слегка наклонена по отношению к Земле, то наблюдается строго переменный периодичный сигнал. Источник такого сигнала был назван пульсаром.
- В 1967 году **Джоселин Белл**, аспирантка **Э. Хьюиша** открыла объекты, излучающие регулярные импульсы радиоволн. Это явление было объяснено

узкой направленностью радиолуча от быстро вращающегося объекта - своеобразного "космического радиомаяка". Но любая обычная звезда разрушилась бы при столь высокой скорости вращения. На роль таких маяков были пригодны только нейтронные звёзды. **Пульсар PSR B1919+21** считается первой открытой нейтронной звездой. Нейтронные звезды открыли не в рентгеновском, а в радиодиапазоне, так как его можно наблюдать с Земли, атмосфера которой поглощает весь рентген. Для рентгеновских наблюдений необходимы ракета, космодром и знание, куда смотреть.

Наблюдения в рентгеновском диапазоне:

- Открытие первой нейтронной звезды **Sco-1**, спутник Uhuru.
- Американский физик **Р. Джаккони**, один из лауреатов Нобелевской премии по физике в 2002 году за "пионерский вклад" в астрофизику, который привел к открытию космических источников рентгеновского излучения. Был руководителем проектов по запуску ракет.
- 1962 год - запуск ракеты "**Найроби**".
- 1970 год - первый рентгеновский телескоп **SAS1 "Uhuru"**, который нашел первое доказательство существования черных дыр, запущен в Кении. Работа длилась три года, телескоп отнаблюдал 339 объектов, сделав **первый полный обзор неба**.
- **Р. Джаккони, Г. Гурски** и их коллеги обнаружили несколько рентгеновских источников, одним из которых был объект, получивший название Sco-1.
 - **Sco** - обозначение созвездия Скорпион, где находится источник излучения;
 - **X** - указывает на то, что это рентгеновский источник, во многих странах рентгеновские лучи называют X-лучами/x-гау, так их обозначал Вильгельм Рентген - немецкий физик, открывший рентген;
 - цифра **1** говорит о том, что это первый рентгеновский источник, обнаруженный в этом созвездии.

Классификации нейтронных звезд

Взаимодействие нейтронных звезд с окружающим веществом определяют два основных параметра и, как следствие, их наблюдаемые проявления:

- Период (скорость) вращения нейтронных звезд
- Величина магнитного поля нейтронных звезд

Со временем звезда расходует свою вращательную энергию, её вращение замедляется, магнитное поле также ослабевает. По этой причине нейтронная звезда за время своей жизни может менять свой тип. В зависимости от этих параметров нейтронные звезды делятся на следующие типы:

- **Радиопульсары (эжекторы)** - объекты, которые имеют малый период вращения, при этом сила поля у них остается достаточно большой. Заряженные частицы, совершая движение вдоль силовых полей, в местах обрыва (на "радиусе светового цилиндра") покидают оболочку звезды. Магнитное поле "вморожено" в поверхность звезды, обычно оно вращается синхронно с ней. На определенном радиусе ($R_1 = c/\omega$) скорость вращения поля может почти достигать скорости света. За этим полем ничего не может существовать, так как ничто не может двигаться быстрее скорости света. Происходит обрыв магнитной силовой линии, частица, которая шла по ней, - улетает на бесконечность (к Земле). Небесное тело данного типа эжектирует (выбрасывает), периодически наполняя Вселенную радиоимпульсами, фиксируемыми в радиочастотном диапазоне. Примером является первый пульсар PSR B1919+21, который был зафиксирован Д. Белл.
- **Нейтронная звезда-пропеллер** - скорость вращения уже недостаточна для эжекции частиц, поэтому такая звезда не может быть радиопульсаром, но она всё ещё велика, материя, окружающая звезду (которая была захвачена магнитным полем), не может на неё упасть.
- **Магнетар** - нейтронная звезда с исключительно сильным магнитным полем (более 10^{14} Гс). Магнитное поле звезды таково, что с расстояния сотен земных радиусов из человека был бы вытянут весь гемоглобин, его кровь стала бы бесцветной. К настоящему времени известно более двух десятков магнетаров в нашей Галактике.
- **Рентгеновский пульсар (аккретор)** - скорость вращения снижена до такой величины, что веществу ничто не препятствует падать на звезду. Плазма при падении движется по линиям магнитного поля, в районе полюсов нейтронной звезды она ударяется о твердую поверхность, при этом она разогревается до миллионов градусов. При этой температуре вещество светится в рентгеновском диапазоне. Всего около 100 метров - это размер области, в которой имеет место столкновение с поверхностью звезды падающего вещества. В связи с тем, что звезда вращается, это поле периодически пропадает из поля зрения наблюдателя.
- **Георататор** - в этих нейтронных звездах скорость вращения мала. Она не препятствует аккреции. Следует заметить, что в этом типе нейтронных звезд размеры магнитосферы являются такими, что плазма магнитным полем останавливается раньше, чем она захватывается гравитацией.

Часто нейтронные звезды встречаются в их родных местах обитания - останках взрывов сверхновых звезд, представляющих собой разлетающийся по сторонам звездный газ, называемый планетарные туманности. В качестве яркого примера можно привести Крабовидную туманность, наблюдая которую, можно увидеть звездный газ, продолжающий разлетаться во все стороны, в центре находится небольшая нейтронная звезда. Бывают также случаи существования одиночных нейтронных звезд, нейтронных звезд, вращающихся друг вокруг друга или вокруг белого карлика, и т.д.

При помощи телескопа NuSTAR астрономы в жестком рентгеновском диапазоне получили изображение "Руки Бога" - планетарной туманности, которая постоянно расширяется. Она образовалась в результате гибели звезды PSR B1509-58, превратившейся в пульсар - нейтронную звезду, вращающуюся с частотой семь оборотов в секунду и испускающую излучение в широком диапазоне.



Рис.8.2. Изображение планетарной туманности "Рука Бога", полученное в рентгеновском диапазоне телескопом NuSTAR

В отличие от черных дыр, нейтронные звезды надежно обнаружены. Они очень горячие и очень плотные. Если нейтронная звезда находится в паре с другим объектом, то она может поглощать вещество компаньона. Это тот же процесс, который происходит в случае с черными дырами, где вещество светит за счет аккреции. Одиночные нейтронные звезды светят за счет своей температуры, которая на их поверхности достигает 600 тыс. К (диапазон рентгена), что в десять тысяч раз больше температуры поверхности Солнца. Рано или поздно температура падает за счет остывания, тогда звезды становятся не видны. Для рентгеновского наблюдения лучше подходят парные звезды.

Нейтронные звезды представляют собой мощные гравитационные линзы. Все массивные объекты имеют способность изгибать проходящие мимо них лучи света. Черные дыры тоже обладают свойством линзирования, но нейтронные звезды превосходят в этом умении почти все остальные объекты. В среднем гравитационное поле нейтронной звезды в 200 миллиардов раз сильнее, чем земное притяжение.

Свет, который исходит с той стороны звезды, которая отвернута от нас, - огибает ее и становится видимым нам. В некоторых случаях гравитационное поле нейтронной звезды может быть таким сильным, что излученный ею свет не может покинуть звезду, в этом случае она становится видимой (аналог черной дыры).

Магнетары

У магнетаров магнитные поля самые сильные среди всех известных нам объектов во Вселенной, они в триллионы раз сильнее полей на Солнце или на Земле. Если поместить магнетар на расстояние, на котором Луна находится от Земли, а самим остаться на Земле, то наша кредитная карточка размагнитится. Крошечная нейтронная звезда диаметром от 10 до 20 километров может за одну минуту произвести больше энергии, чем Солнце за четверть миллиона лет. Одним из интересных свойств магнетаров является то, что некоторые, из происходящих в них взрывов - столь мощны, что влияют на аппаратуру и могут нейтрализовать детекторы на спутниках. Такие явления называются гигантскими вспышками. Гигантская вспышка оказывает существенное воздействие на нашу атмосферу, в частности на ионосферу, которая претерпевает существенные изменения.

Сверхновая и пульсар

Связь сверхновой и пульсара, развитая в продолжение теории В. Бааде и Ф. Цвикке состоит в следующем: ударная волна сверхновой в массивной тесной двойной системе может провзаимодействовать с магнитосферой нейтронной звезды, создав магнитосферный хвост. Пересоединение в хвосте может привести к появлению всплеска (Егоров, Постнов). Таким образом, радиовсплеск всегда должен сопровождаться вспышкой сверхновой.

Слияния нейтронных звезд

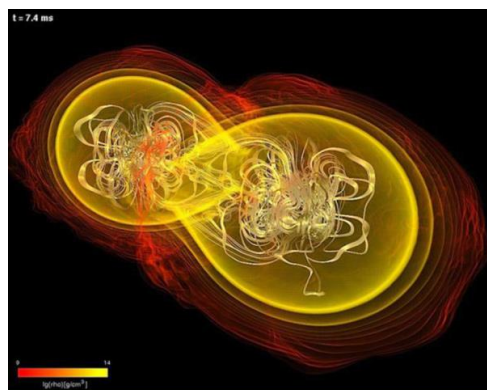


Рис. 8.3. Модель слияния нейтронных звезд

Придумано несколько сценариев, в которых в результате слияния нейтронных звезд возникает радиоисточник (Липунов, Панченко; Hansen, Lyutikov; Постнов, Пширков).

Нейтронные звезды в Солнечной системе и нашей Галактике

Приближающийся в настоящее время к нашей планете объект, ошибочно называют планета **Нибиру**. Существует масса легенд о её происхождении, в том числе те, которые утверждают, что её орбита ранее находился между орбитами Марса и Юпитера, что в далеком прошлом она была разрушена тяготением массивного объекта. Нибиру оказалась потухшей нейтронной звездой, вещество которой выгорело в процессе эволюции обычной звезды.

По предположениям астрономов в нашей Галактике находится около 1 миллиарда нейтронных звезд. Цифра 100 миллионов основывается на стандартной модели развития Галактики и происходит из представления о примерном количестве взрывов сверхновых, которые случились за все время жизни нашей Галактики. Только относительно молодые нейтронные звезды легко детектировать. Большинство нейтронных звезд медленно вращается, они холодные и не поглощают вещество из звезд-компаньонов, что делает их наблюдение затруднительным.

Почему одни нейтронные звезды одной массы становятся магнетарами, а другие - нет?

Крупные звезды разрушаются, образуя нейтронные звезды, но мы до настоящего времени не знаем, почему некоторые нейтронные звезды превращаются в обычные радиопульсары, а некоторые из них становятся магнетарами. В то же время с некоторыми нейтронными звездами вообще ничего не происходит, у них нет пульсаций - это еще одна интересная проблема, которая осталась без ответа в рамках классификации нейтронных звезд.

Классификация нейтронных звезд в маломассивных рентгеновских двойных системах

Признаки нейтронных звезд:

- Яркий признак наблюдательного отличия черных дыр от нейтронных звезд - **килогерцовые квазипериодические осцилляции (QPO)**, которые обнаружены в спектре мощности. Считается, что это излучение, которое идет от поверхности вращающейся нейтронной звезды. Излучение имеет две килогерцовые частоты: от и к нам. Если звезда переходит во вспышку, то частоты будут перемещаться, но дельта между ними будет сохраняться. Иногда говорят, что они возникают от вращающегося кеплеровского диска. Чем больше частота, тем меньше размер, по частоте излучения мы можем сказать, что это небольшие нейтронные звезды.
- **Вспышки первого рода** - на поверхности нейтронной звезды горят водород и гелий, при неоднородном распределении водорода и гелия (температура их горения разная) - происходит очень яркая вспышка, которая может быть только

на нейтронной звезде. На черной дыре это явление невозможно, потому что она не имеет поверхности.

Классификация atoll- и Z-источников на основе спектральных и временных свойств

Класс слабозамагниченных нейтронных звезд подразделяется на два класса:

- **Atoll-источники** - $L_x \sim 0.01-0.1 L$ (Edd), работают при очень низкой светимости, обычно показывают рентгеновские вспышки первого рода, большинство транзиентны (резкий переход в активное состояние, вспышка, угасание), отмечается смена спектральных состояний. К Atoll-источникам обычно подсоединяются рентгеновские двухсекундные пульсары.
- **Z-источники** - $L_x \sim 0.1-1.0 L$ (Edd), очень яркие (достигают Эддингтона), немного рентгеновских всплесков, показывают постоянную яркость, не все спутники могут их наблюдать (существует опасность для приборов).

Названия "Atoll-источники" и "Z-источники" происходят от форм треков на рентгеновских диаграммах (рис. 8.4.).

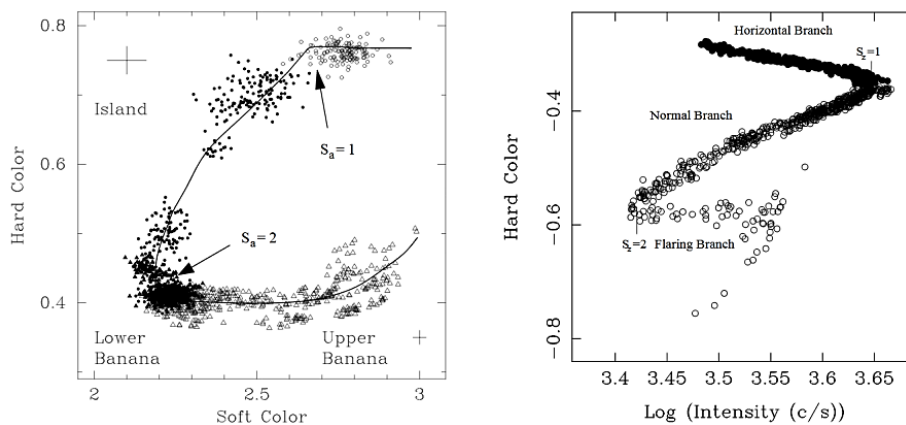


Рис.8.4. Типичные цветовые диаграммы для Atoll-источников (левая панель) и Z-источников (правая панель)

- low luminosity atoll source - источник с низкой светимостью
- high luminosity atoll source - источник с высокой светимостью
- high luminosity Z-source - Z-источник высокой яркости
- high inclination source - источник с большой наклонностью орбиты

Смена состояний слабозамагниченных нейтронных звезд

Для транзиентных систем с нейтронными дырами можно выделить 4 основных состояния:

- спокойное;

- состояние низкой светимости с жестким спектром;
- промежуточное состояние;
- состояние высокой светимости с мягким спектром.

Классификация на основе спектральных и временных свойств

Выделяют более детальную классификацию для спектральных состояний:

- для **atoll-источников**: Island (IS), Extreme Island (EIS), Left Lower Banana (LLB), Lower Banana (LB) и Upper Banana (UB) - рис. 8.3. - левая панель, каждый изгиб трека меняет свойства, спектр мощности и т.д.
- для **Z-источников** характерны последовательные переходы между тремя состояниями: Horizontal Branch (HB), Normal Branch (NB) и Flaring Branch (FB) - рис. 8.3. - правая панель. Когда объект выходит на вспышку, он должен пройти данные этапы, пройти зигзаг (далее в обратном состоянии).

Эволюция спектра мощности для atoll- и Z-источников

Эволюция спектра мощности более информативна для выявления характерных черт, QPO и шумовых компонентов. На рис. 8.5. показана очень характерная эволюция для Z-источника (левая панель): вспышка идет сверху вниз, хорошо видны квазипериодические осцилляции, отмечены белый шум и красный шум.

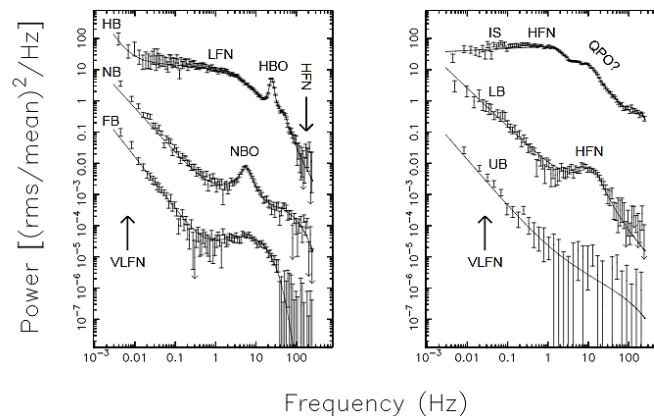


Рис.8.5. Типичные диаграммы для Z-источников (левая панель) и Atoll-источников (правая панель), спектры мощности (внизу)

Z-источники делятся ещё на два подкласса:

- Cygnus X-2 like
- Scorpius X-2 like

Энергетический спектр для atoll-источников:

- **Мягкая компонента** (<0,1 кэВ) - область, где работает межзвездное поглощение) – излучение идет от диска, обычно описывается чернотельным излучением (функцией Планка).

- **Степенная компонента (5-20 кэВ)** - тепловая комптонизация, если происходит многократное взаимодействие рассеяния фотонов на электронах, то в итоге суммарная будет похожа на степенную компоненту, поэтому можно говорить, что комптонизация ею оценивается (в первом приближении), это результат многократных актов рассеяния.
- **Мягкое и жесткое состояния:** в жестком состоянии отсечка смещается в сторону более высоких энергий (до > 200 кэВ).
- **Линия излучения (флуоресценции) железа** ($\sim 6,4$ кэВ - $6,7$ кэВ)
- Свидетельства наличия **компоненты отражения** - поскольку у нейтронных звезд есть поверхность, то от неё будет отражение.

Связь аккреционного диска и джетов

Рентгеновское излучение образуется в диске, джеты дают радиоизлучение. Исследования показали, что во время вспышки объект демонстрирует линейную положительную корреляцию радио - и рентгеновского излучения *atoll* и *Z*-источников, а также аккрецирующих миллисекундных пульсаров. Также существует мнение, что есть антикорреляция в максимуме вспышки.

Подход на основе спектрального и временного анализа нейтронных звезд на примере 4U 1728-34 105

Для черных дыр существовали теоретические предсказания, было показано, как из наблюдений определить черную дыру. В частности, исследование зависимости фотонного индекса от темпа аккреции на основе рентгеновских спектров для источника с надежно идентифицированной нейтронной звездой. Для нейтронных звезд подобных предсказаний нет, но провести анализ возможно.

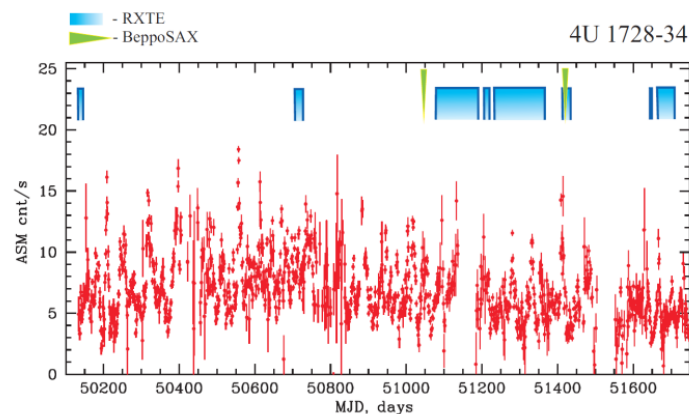


Рис.8.6. Рентгеновская кривая блеска за период наблюдений 4U 1728-34 с 1996 по 2006 гг.

4U 1728-34 - 100% подтвержденная нейтронная звезда (*atoll*-источник), так как в ней обнаружены кГц QPO в спектре мощности - вращение поверхности нейтронной

звезды/Кеплеровского вращения внутренних частей аккреционного диска. Рентгеновская кривая блеска 4U 1728-34, 287 наблюдений RXTE с 1996 по 2006 гг., показана на рис. 8.6. Синие прямоугольники показывают данные RXTE наблюдений, зеленые треугольники показывают данные ВерроSAX, использованные для анализа.

- вспышка сверхмассивной черной дыры проходит в течение 20 лет и больше
- у черной дыры звездной массы время вспышки составляет - 2 года
- нейтронная звезда может вспыхнуть и погаснуть за 2 дня.

Фотонный индекс как функция аккреции в нейтронной звезде 4U 1728-34

Изменения формы спектра при смене состояний (высокого/мягкого и низкого/жесткого) 4U 1728-34 показывают, что форма спектра сильно эволюционирует во время вспышки. Фотонный индекс как функция аккреции в 4U 1728-34 находится на значении 2. Черные дыры показывают переменность фотонного индекса, нейтронные звезды - постоянство. Эволюция спектральных параметров во время фаз активности 4U 1728-34 показывает, что фотонный индекс постоянный. В максимум вспышки электронная температура падает.

Фотонный индекс Γ показывает стабильность на уровне $\Gamma_{\text{ср}} \sim 2$ в 4U 1728-34, независимо от температуры плазмы и темпа аккреции. Первые работы на эту тему были сделаны Зельдович Я.Б. и Шакура Н.И. в 1969 году, но рассматриваемый случай был не обнаружен, так как он частный.

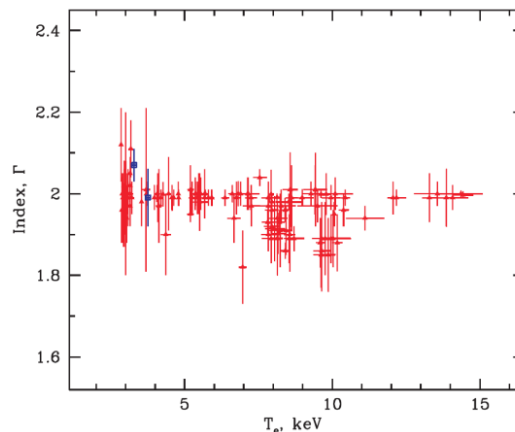


Рис.8.7. Зависимость фотонного индекса Γ от температуры плазмы T_e

Реакция электронной температуры на изменение степени комптонизации неоднозначна. При сравнении 4U 1728-34 и нескольких нейтронных звезд показано, что она у 4U 1728-34 - не монотонна, у GX 3+1 - монотонна.

Во время вспышки отмечены изменения в энергетическом спектре и спектре мощности - шумовая компонента с отсутствием деталей (до и после вспышки спектр показывал выделенный слой QPO).

Между черными дырами и нейтронными звездами отмечается генетическая связь, исследователи пытаются найти их различия, а объекты показывают подобие. Спектр 4U 1728-34 в состоянии *Vanapa* показывает "завал" на более низких энергиях, который характерен для черных дыр. В более жестком состоянии в начале вспышек (состояние *Island*) - завал больше 100 кэВ, так же, как и у черных дыр.

Основные выводы по нейтронной звезде 4U 1728-34

- Спектральный индекс α не изменяется и остается постоянным ~ 1 ($\Gamma = \alpha + 1 = 2$) независимо от темпа аккреции.
- Распределение излучения диска и зоны комптонизации с температурами фотонов 0,7 кэВ и 1,3 кэВ, соответственно.
- Описание HS-LS эволюции в терминах изменения kT_e (2,5 - 15 кэВ).

Повторяется ли эффект стабильности спектрального индекса в других нейтронных звездах?

Основная задача - проверка найденной стабильности спектрального индекса (независимо от темпа аккреции) для источников с надежно идентифицированными нейтронными звездами, достигающих режима повышенной светимости (для *atoll*-источников). Для проверки взят **GS 3+1** - яркий *atoll*-источник, который показывает вспышки первого рода.

Спектральная модель для нейтронной звезды показывает (в разрезе): нейтронную звезду в центре, наличие поверхности звезды, переходный слой и диск (рис. 8.8.). Построим модель: $wabs*(bbody + compTB + compTB + gauss)$. Две комптонизационные компоненты используются для переходного слоя и поверхности звезды. Все аддитивные компоненты модели (в скобках) умножаются на мультипликативный компонент - межзвездное поглощение.

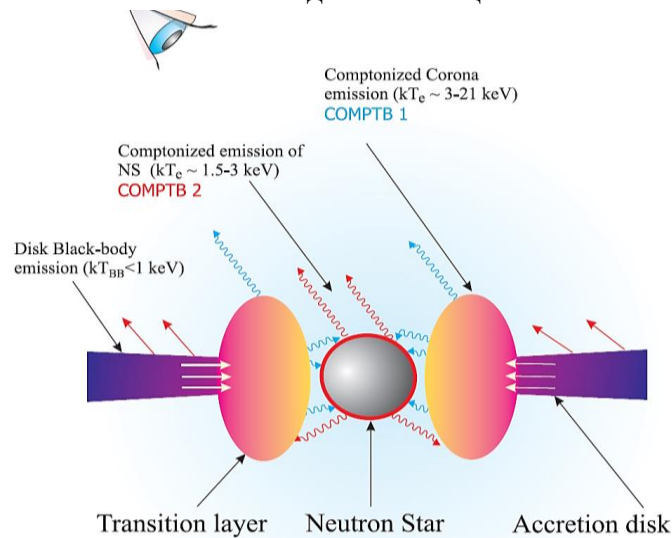


Рис.8.8. Спектральная модель для нейтронной звезды

Рентгеновские кривые блеска GS 3+1 и 4U 1728-34. Рентгеновская кривая блеска GS 3+1 показывает очень медленную динамику уровня светимости, важно обратить внимание на то, что он буквально за несколько минут успевает пройти два состояния. Спектральный индекс при этом остается одинаковым, подтверждается его постоянство. На рентгеновской кривой блеска 4U 1728-34 отмечается высокая частота светимости объекта.

Моделирование спектра GS 3+1 (0,4 - 150 кэВ) показывают модели bbody, COMPTB и линию железа, которая описывается Гауссом. Отклонение от модели в пределах нормы, по критерию χ^2 порядка 1,08. Особенности интервалов низкой и высокой светимости 4U 1820-30: бывают моменты, когда объект "молчит", наблюдаются моменты очень активных состояний.

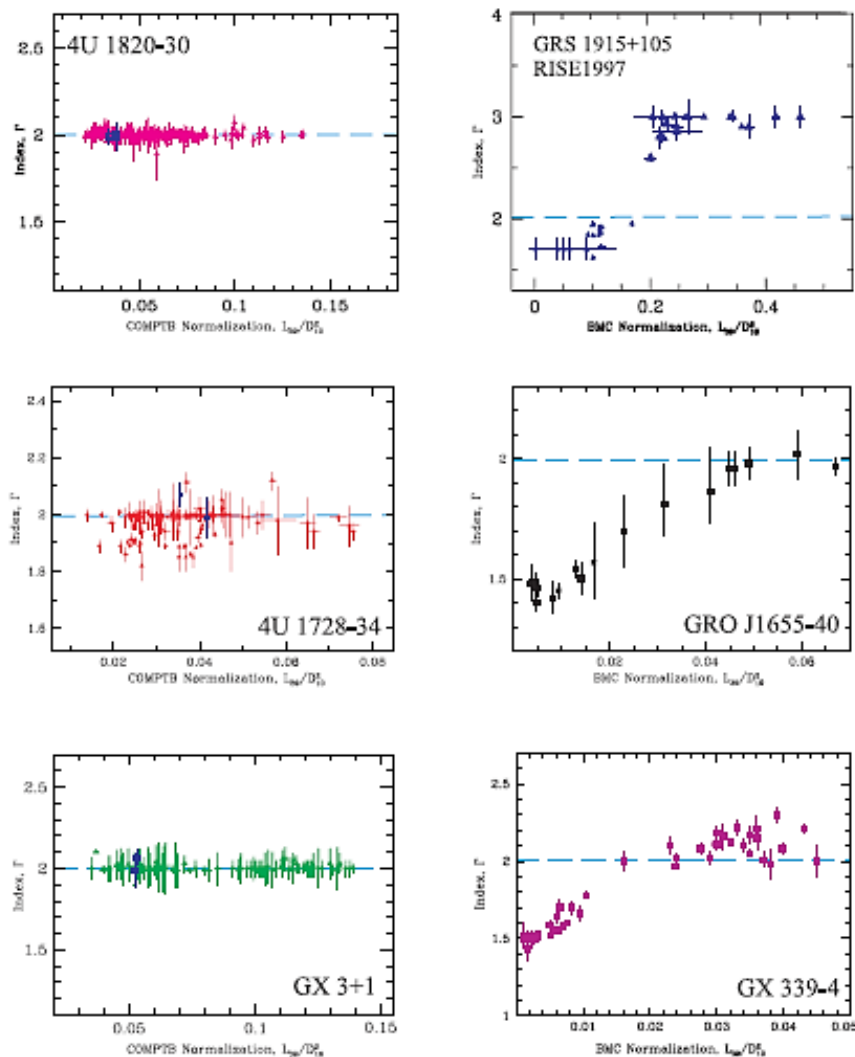


Рис.8.9. Примеры поведения фотонного индекса Γ как функции скорости аккреции для РДС с нейтронными звездами - Atoll-источниками (левая колонка) в сопоставлении с РДС с черными дырами (правая колонка)

Наблюдательное обнаружение постоянства фотонного индекса у нейтронных звезд - Atoll-источников 4U 1820-30, 4U 1728-34, GX 3+1 (левая колонка) в сравнении с переменностью спектрального индекса у для черных дыр GRS 1915+105, GRO J1655-40, GX 339-4 (правая колонка) показано на рис. 8.9.

Черные дыры демонстрируют монотонное нарастание, затем - фазу насыщения у всех сравниваемых объектов, но на разных уровнях. Нейтронные звезды показывают постоянство – следовательно, признак работает.

Для анализа удобно использовать температуру, так как мы не можем сравнивать темп аккреции, который завязан на расстояние. Если черная дыра или нейтронная звезда будут от нас очень далеко, то она будет казаться слабее, а сравнивать необходимо подобное с подобным, то есть выстраивать их на одном расстоянии. Сравнение объектов 4U 1728-34, GX 3+1 по данному параметру показывает, что оба объекта имеют монотонный трек, мягкая светимость диска возрастает. Наблюдения объекта GX 3+ показывают изменение температуры: $2,6 \rightarrow 2,3 \rightarrow 4,6$ кэВ.

Основные выводы по нейтронной звезде GX 3+1

- Спектральный индекс α не изменяется и остается постоянным ~ 1 ($\Gamma = \alpha + 1 = 2$) независимо от темпа аккреции.
- Распределение излучения диска и зоны комптонизации с температурами фотонов 0,7 кэВ и 1,3 кэВ, соответственно.
- Описание UB-LB эволюции в терминах изменения KT_e (2,3 - 4,5 кэВ).

Основные результаты по нейтронным звездам

- Обнаружение эффекта постоянства индекса в спектрах нейтронных звезд (Atoll-источники: 4U 1820-30, 4U 1728-34, GX 3+1)

С момента зарождения Вселенной прошло более миллиарда лет, в течение которых происходит:

- звездная эволюция
- осуществляется изменение состава космического пространства
- одни космические объекты исчезают, а на их месте появляются другие

Эти процессы происходят постоянно, однако из-за огромных временных промежутков мы в состоянии наблюдать только один единственный кадр колоссальной и увлекательной мультисессии. Сегодня мы зафиксировали кадр из жизни нейтронных звезд.

Лекция 9. Нейтронные звезды. Часть 2. Чёрные дыры промежуточных масс

Сегодня мы начнем лекцию с истории заблуждений. Существовало мнение, что к Земле приближается некий объект, который является потухшей нейтронной звездой. Нейтронная звезда обладает массой, равной хотя бы одной массе Солнца. В связи с тем, что из космоса приближается объект, который должен разорвать нашу планету, канал ОРТ дал информацию о строительстве ковчега для эвакуации 250 тыс. человек за 100 световых лет на новую, землеподобную планету.

Оценим, насколько повлияет нейтронная звезда-странница на динамику движения тел Солнечной системы. Влияние на динамику тел звезда стала бы оказывать с пояса за Плутоном, начиная с расстояния, на котором сила притяжения к ней достигла бы 1% от силы притяжения к Солнцу. Что достигается, когда от возмущаемого тела до звезды примерно в 12 раз дальше, чем до Солнца. Это может произойти только в том случае, если нейтронная звезда летит в нашу сторону.

Тривиальные расчеты, которые сделаны для наиболее типичной нейтронной звезды: масса - 1,5 солнечной массы, радиус - 10 км, скорость движения - 200 км/сек. Вероятно, она должна быть "не местной". 7 местных нейтронных звезд, родительские взрывы которых разогнали за последние несколько миллионов лет из нашего уголка Галактики почти весь межзвездный газ, - ученым известны и признаны безопасными, они не движутся в сторону Солнца. Но вероятность такого события имеет место быть: каждые 500 - 1 000 млн. лет (в одном случае из 3-х миллионов) нейтронная звезда с такими параметрами гравитационно близко подходит к какой-то звезде. Однажды ею может стать и Солнце. За время геологической жизни Земли (4,5 млрд. лет) это явление происходило уже порядка 10 тыс. раз, возможно, они меняли климат на нашей планете. Солнечная система прожила половину своей жизни, можно посчитать, какой шанс встретиться с нейтронной звездой она имеет за всё время (прошлое и будущее). Этот шанс равен ~ 0,07%.

Нейтронные звезды - Z-источники

Нейтронные звезды - atoll- и Z-источники прежде всего различаются светимостью, исторически - формой трека на цветовой диаграмме:

- **Atoll-источники** - $L_x \sim 0.01-0.1 L$ (Edd), работают при очень низкой светимости
- **Z-источники** - $L_x \sim 0.1-1.0 L$ (Edd), очень яркие (достигают Эддингтона)

Для Z-источников характерны последовательные переходы между тремя состояниями:

- Horizontal Branch (HB)
- Normal Branch (NB)
- Flaring Branch (FB)

Переходы между состояниями отличаются уровнем средней светимости, спектральными и временными характеристиками. Это фазы, которые проходит нейтронная звезда, которая относится к классу Z-источников, когда она идет на вспышку.

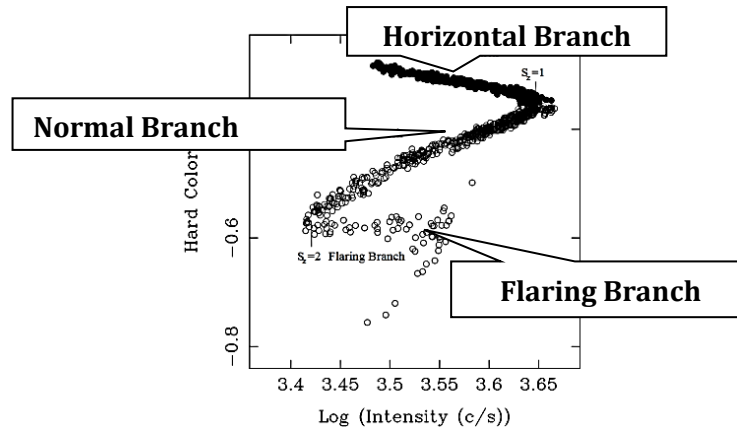


Рис.9.1. Рентгеновская диаграмма Z-источников с фазами Horizontal Branch, Normal Branch и Flaring Branch

Очень важны временные свойства, на рис. 8.4. (стр. 103) показана очень характерная эволюция для Z-источника (левая панель): вспышка идет сверху вниз, на частоте ~ 10 Гц хорошо видны квазипериодические осцилляции, которые снижаются и расширяются на Normal Branch, после чего вырождаются.

Z-источники делятся ещё на два подкласса:

- **Cygnus X-2 like** (лебедеподобные) - стандартные Z-источники, показывающие линию трека Z
- **Scorpius X-2 like** (скорпионоподобные) - показывают иную форму трека

Свойства меняются в зависимости от того, под каким углом мы смотрим на аккреционный диск. Если для atoll-источников, которые являются слабыми по рентгеновской светимости, это не важно, то для Z-источников - это критично, они показывают совершенно другие треки и свойства.

Энергетические спектры нейтронных звезд при нарастании темпов аккреции показывают постоянство спектрального индекса, спектры черных дыр демонстрируют переменность индекса, который растет и насыщается. Этот параметр следует из наблюдений (рис. 8.7. стр. 108), постоянство спектрального индекса было показано для нейтронных звезд - atoll-источников. Яркие Z-источники достигают Эддингтоновского предела, чего никогда не случится с черными дырами.

Микроквазар Sco X-1

Основные параметры:

- расположен высоко над галактической плоскостью: $+23^\circ$

- на близком расстоянии: $D = 2,8 \pm 0,3$ кпс
- очень яркий
- наклонность: $i = 15 - 44^\circ$, объект незатменный
- имеет компаньона - звезду класса M
- масса компактного объекта: $M_x = 1,4$ массы Солнца
- масса нормальной звезды: $M_v = 0,4$ массы Солнца
- яркий радиоисточник со струйными выбросами
- период вращения: $P_{orb} = 3$ часа (0,787 дня)

Sco X-1 показывает постоянство, не падая ниже среднего уровня светимости, при возникновении вспышки он отталкивается от него. При планировании наблюдений обсерватории ВерроSAX объект был включен в список исследуемых, но при проведении наблюдений детекторы сразу выключили, потому что возникла угроза их сжечь. Единственный телескоп, который смог наблюдать Sco X-1, - это RXTE.

Так как Sco X-1 находится близко, он показывает много информации в радиодиапазоне. Скорость джетов объекта - 0,45 скорости света, самую медленную скорость показывают джеты SS 433 - 0,25 скорости света, джеты объекта GRS 1915+105 - значение 0,99.

На цветовой диаграмме излучения Sco X-1 показаны три цикла, каждая новая вспышка немного смещается. Типичный спектр формируется путем нарезки на 4 диапазона, составляется отношение, производится комбинация. Для Sco X-1 значения по оси x: 4-9 кэВ/2-4 кэВ, по оси y: 20-40 кэВ/9-20 кэВ. Важно, чтобы диапазоны не пересекались. На диаграмме жесткости по оси x (правая панель) - суммарная интенсивность. Смещение трека является наблюдательным фактом.

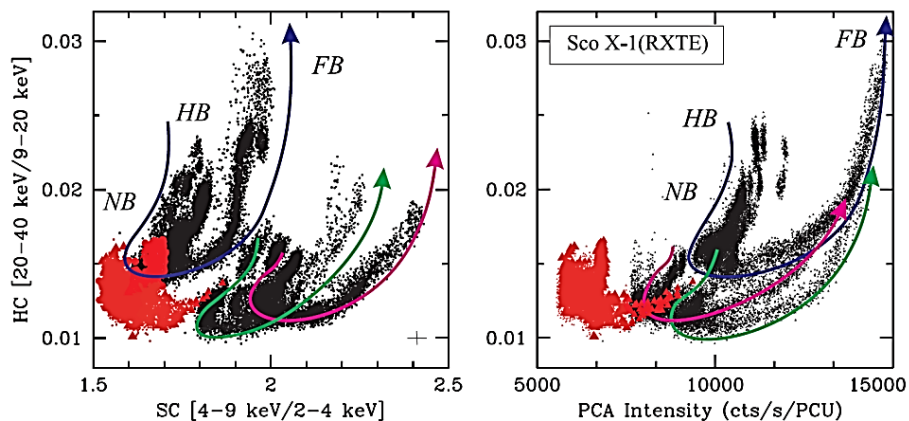


Рис.9.2. Цветовые диаграммы (слева) и диаграммы жесткости излучения (справа) по наблюдениям Sco X-1

Каноническая форма треков на рентгеновских диаграммах для Z-источников соотносится с буквой Z, у Sco X-1 происходит трансформация: horizontal branch становится почти вертикальной, normal branch остается на месте, но становится

существенно короче, flaring branch - вырастает под углом. Исследователи серьезно занимаются связью между рентгеновским и радиодиапазоном. Хотя многие считают эту связь невозможной, тем не менее, в некоторых фазах такое взаимодействие происходит. По данным исследований джет при видоизменении показывает линии normal branch, flaring branch.

Моделирование спектра для Sco X-1

- Модель для нейтронных звезд: $wabs*(bbody + compTB + compTB + gauss)$
- Модель для Sco X-1: $wabs*(compTB1 + compTB2 + gauss)$

Из модели для Sco X-1 исключено чернотельное излучение, так как источник очень яркий и излучение тонет в излучении переходного слоя и нейтронной звезды. В данном случае возможно в первом приближении без этой компоненты описать форму спектра и остальные параметры, при этом будет хороший χ^2 .

Sco X-1 во время вспышек показывает незначительные изменения энергетического спектра, временные спектры мощности меняются очень сильно: отмечаются мощные QPO, шумовая компонента меняет форму. Таким образом, временная эволюция показывает изменение компонентов, соотношение, то есть говорит о геометрии системы, когда приближается к Эддингтоновскому режиму аккреции.

Открытие фазы повышенной спектральной жесткости в Эддингтоновском режиме

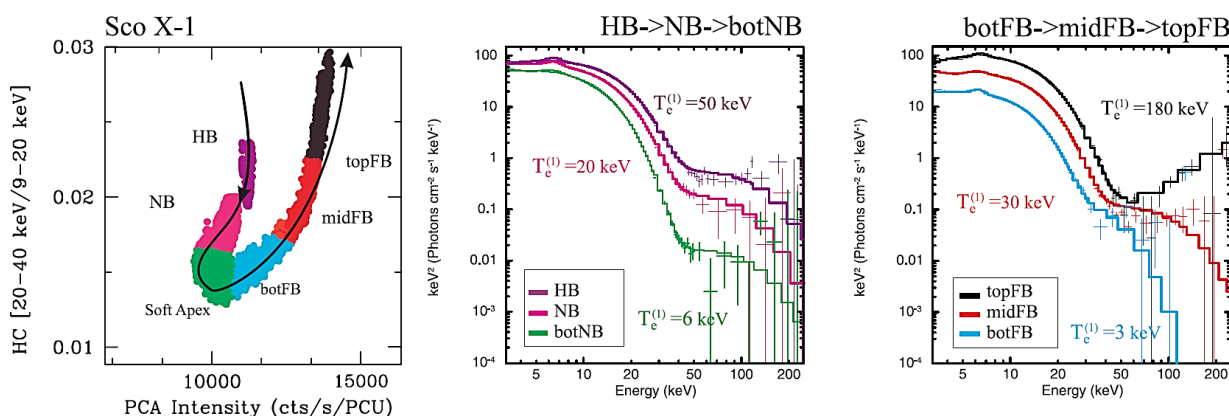


Рис.9.3. Диаграмма жесткости Sco X-1 (левая панель) 3 характерных спектра для разных участков Z ветви (центральная и правая панели)

На диаграмме жесткости Sco X-1 стрелкой указано направление эволюции HB → NB → bottom FP (левая ветвь) и bottom FP → top FB (правая ветвь).

- На центральной панели - три характерных спектра для разных участков левой ветви, спектр ведет себя стандартно, становится более мягким (аналогично черной дыре). На правой панели - спектры для правой ветви.

- На правой панели видно, что после сильной мягкой части спектра появляется "жесткий хвост".

На рис. 9.4. показано, что вспышка идет сверху вниз, синей стрелкой обозначено излучение комптоновского облака (COMPTB 1), красной - от нейтронной звезды (COMPTB 2). Профитировав COMPTB 2, получаем небольшие значения температуры (T_{e2} - 3-4 кэВ) и постоянный фотонный индекс ($\Gamma_2 = 2$).

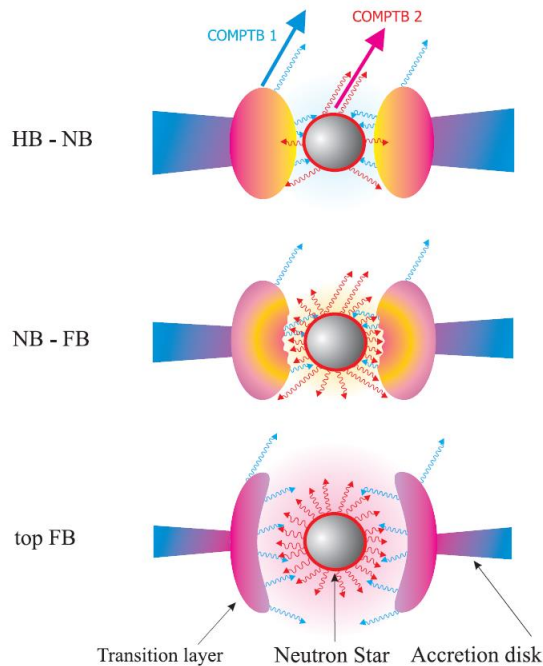


Рис.9.4. Предполагаемая геометрия в Sco X-1 во время изменений спектральных состояний

Во время вспышки переходный слой отодвигается от центрального объекта, так как давление излучения нейтронной звезды очень сильное, при этом переходный слой не охлаждается. Когда он близко - фотонов много, они подлетают, забирают энергию у электронов и уносят, электроны охлаждаются. Когда переходный слой отодвигается значительно, то все меньшее количество фотонов от поверхности нейтронной звезды охлаждает энергию электронов, они остаются горячими. COMPTB 1: T_{e2} - 3-120 кэВ, фотонный индекс падает - $\Gamma_1 = 1,4-2$. Именно из-за вышеописанного процесса образуется "жесткий хвост", эта радиационно-доминированная фаза (top FB) была впервые открыта в Sco X-1. Это связано с достижением объекта Эддингтоновской светимости.

По светимости мы понимаем, что объект излучает на сверх Эддингтоне, по идее, такого не может быть, потому то существует предельная светимость, если давление излучения будет больше, чем предельное (которое может скомпенсировать гравитацию), то объект должен взорваться.

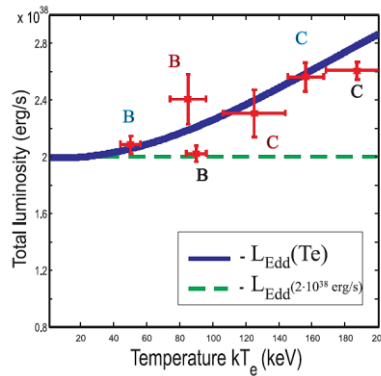


Рис.9.5. Зависимость полной светимости от температуры kT_e

На диаграмме зависимости полной светимости от температуры kT_e зеленым пунктиром отложена Эддингтоновская светимость (10^{38} для одной массы Солнца). Обычно светимость считается, если электронная температура низкая (~ 3 кэВ), у ScoX-1 в переходном слое температура порядка 100 кэВ. Температура влияет на Эддингтоновскую светимость через параметр повышения температуры. Должно измениться свечение взаимодействий. В итоге, для более высокой температуры критическая светимость будет выше. Синяя линия на графике зависимости светимости от температуры kT_e показывает, что теоретическая зависимость проходит через все наблюдательные точки. Красные точки - излучение ScoX-1, который излучает в до Эддингтоне. Фотонный индекс показывает постоянство, а при большой светимости он падает до 1,4. Снижение при приближении к Эддингтону - характерное поведение фотонного индекса для Z-источников.

$$L = 4\pi GMm_p / \sigma_{\text{томс}} = 1.30 \cdot 10^{38} (M/M_{\text{солн}}) \text{ эрг/с}$$

Вместо $\sigma_{\text{томс}}$ будет другое свечение, значение которого меньше, следовательно, поменяется коэффициент светимости.

GX 340+0 - уникальный "диппинговый" Z-источник

В Sco X-1 была обнаружена радиационно-доминированная фаза, но насколько стабилен этот эффект? Для ответа на этот вопрос предлагается рассмотреть объект GX 340+0, который показывает снижение рентгеновского блеска в максимуме вспышки. Планируется определить - есть ли в нем постоянство и падение светимости при достижении Эддингтоновского режима.

На кривой блеска GX 340+0 точками А, В и С отмечены моменты, относящиеся к разным фазам Z-трека.

- Из наблюдений можно предположить, что светимость падает, потому что снижается блеск (верхняя панель рис. 9.6.).
- Спектр мощности показывает, что объект пошел на вспышку (в синей точке В, панель В1).

- Энергетический спектр (правая колонка) показывает, что происходит затмение или завершение вспышки.

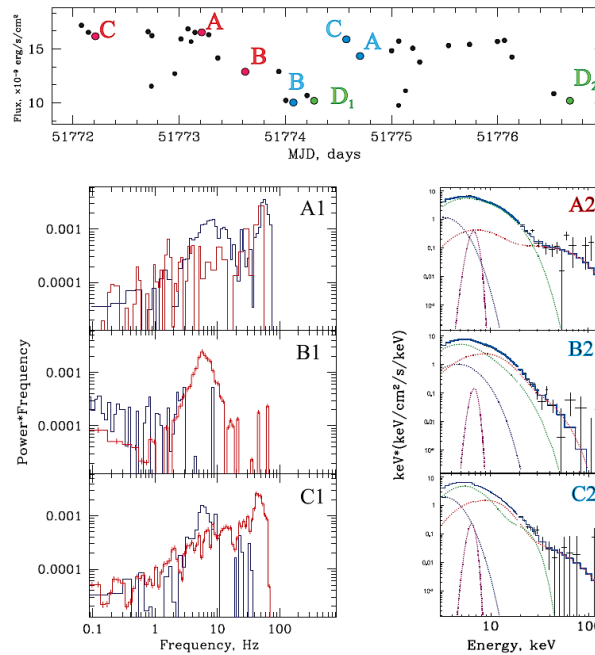


Рис.9.6. Рентгеновская кривая блеска GX 340+0 (верхняя панель), спектры мощности для интервала 15-30 кэВ (левая колонка) в соответствии с энергетическими спектрами для точек A, B и C рентгеновской кривой блеска

Временные свойства первичны, когда это было учтено, то стали понятны причины данного явления. В источнике GX 340+0 было обнаружено постоянства фотонного индекса Γ и от переходного слоя, и от нейтронной звезды независимо от спектрального состояния.

Геометрический эффект в основе "дипов" во время вспышек

Вспышка объекта GX 340+0 она идет снизу-вверх: по мере того, как объект переходит от состояния NB, через NB к FB, комптоновское облако раздувается настолько, что начинает влиять на видимость центральной области (рис. 9.7.).

- **В состоянии NB** диск ещё не закрывает нейтронную звезду (минимальный эффект экранировки), которая является яркой и излучает в рентгене.
- **В состоянии NB** (процесс вспышки, раздувается диск и переходный слой) мы смотрим на объект практически в плоскости диска (ослабление эффекта экранировки).
- **В состоянии FB** - диск закрывает/экранирует самую яркую часть звезды, диском закрыто даже то, что было открыто до вспышки. Что обуславливает резкое снижение (дипы) светимости, падение блеска.

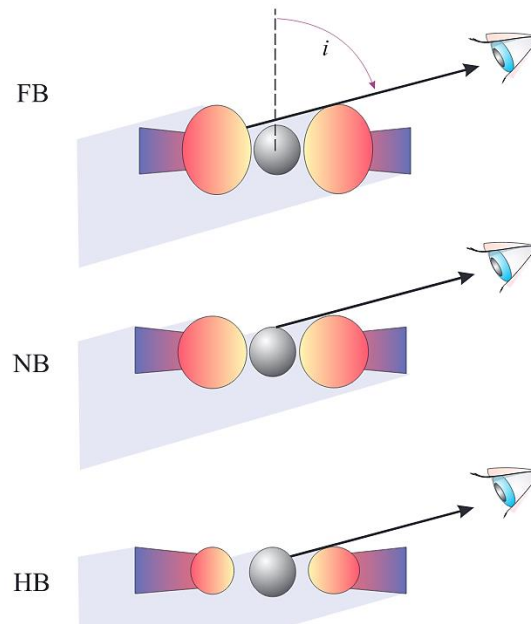


Рис.9.7. Предполагаемая геометрия GX 340+0 во время смены спектральных состояний

В наблюдении atoll-источников (GX 340+0, 4U 1820-30 и GX 3+1) не было отмечено снижение индекса, детектировалось только его постоянство. Фаза постоянства индекса Γ обусловлена доминированием вклада энерговыделения зоны комптонизации переходного слоя над вкладом аккреционного диска в до Эддингтоновском режиме. Вероятно, Sco X-1 - единственный уникальный объект, который показывает снижение индекса во время фазы Эддингтоновской светимости. Источник GX 340+0 доходит до температуры 20 кэВ, остальные atoll-источники тоже не достигают высоких температур, возможно, дело именно в том, что они не достигают необходимой температуры.

4U 1705-44 источник с atoll и Z свойствами

Основная задача

- Исследование поведения индекса в зависимости от темпа аккреции, проверка найденной стабильности для источников с надежно идентифицированными нейтронными звездами, достигающими режима повышенной светимости (для atoll-источников). Для проверки взят 4U 1705-44 - гибридный atoll/Z-источник.
- Применение наблюдательных признаков нейтронной звезды/черной дыры для идентификации природы компактных объектов.

Основные параметры 4U 1705-44

- расположен на расстоянии: $D = 7,4 \pm 0,35$ кпс
- относится к классу Galactic ridge

- радиоизлучение отсутствует
- наклонность: $i = 30 - 40^\circ$, объект незатменный
- открыт в рентгеновских лучах со спутника EXOSAT
- показывает всплески первого рода
- характерная аperiodическая переменность
- значительный "жесткий хвост" в спектре - сочетание atoll и Z свойств, "жесткий хвост" считался свойством черных дыр, пока не открыли Sco X-1 и 4U 1705-44

Объект является atoll-источником по той причине, что мы являемся заложниками своих определений: если отмечаются вспышки первого рода, то это обязательно, во-первых, нейтронная звезда, во-вторых - atoll-источник.

Цветовые диаграммы и диаграммы жесткости наблюдений 4U 1705-44: эмпирическое описание указывает на эволюцию состояний, но не дает физической интерпретации.

Зависимость коэффициентов жесткости от диапазона энергии показана на рис. 9.8. Если на первой панели видно, что диаграмма похожа на atoll-источник, то на средней и правой панели она постепенно трансформируется в Z (Z-источник). Вероятно, в этом особенность atoll-источников, которые в конце концов излучают более жесткие фотоны, изменяясь в сторону Z-источников.

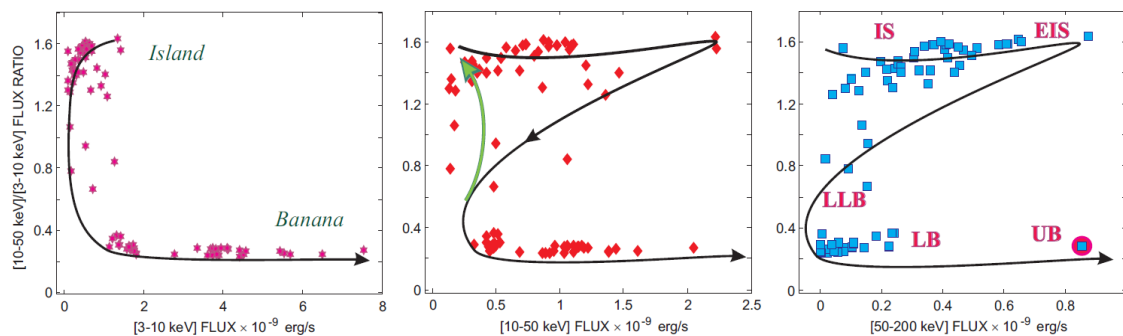


Рис.9.8. Слева-направо: отношение потоков в интервалах $[10-50 \text{ кэВ}/3-10 \text{ кэВ}]$ как функция потока в диапазонах $[3-10 \text{ кэВ}]$, $[10-50 \text{ кэВ}]$ и $[50-200 \text{ кэВ}]$

На левой панели показано, что объект пошел на вспышку, направление развития которой показано черной стрелкой (увеличение темпа аккреции), обратно объект возвращается по тому же треку. На средней панели отмечено, что объект развивается по треку Z, а обратно возвращается другим образом (зеленая стрелка). Это некий аналог эффекта гистерезиса для черных дыр.

Эволюция спектра мощности 4U 1705-44: вспышка развивается, происходит эволюция шумовых компонент, нет ярких квазипериодических осцилляций. Спектральная эволюция объекта по данным наблюдений RXTE показывает типичное развитие вспышки для нейтронных звезд на трех панелях в состояниях island (IS), lower

left banana (LBB) и lower banana (LB) - рис. 9.9. Диаграмма В состоянии upper banana (UB) - очень нетипичная. Желтой областью обозначена компонента, которая отвечает за комптонизацию. Наклон этой области (спектральный индекс) на первой и второй панели почти горизонтален, в состоянии LB происходит его укручение.

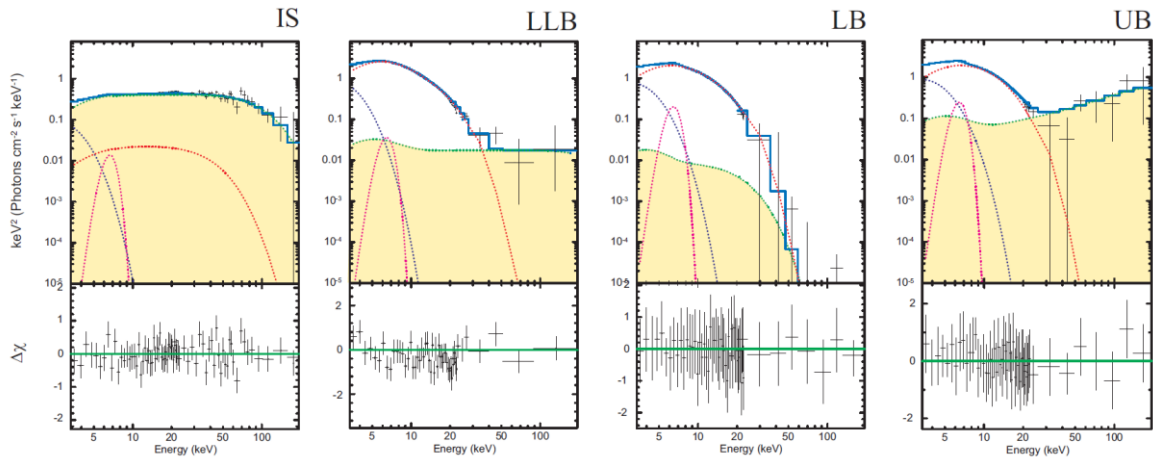


Рис. 9.9. Характерные диаграммы в единицах EF_e для разных состояний атолл-трека для 4U 1705-44

В состоянии UB - Эддингтоновской фазе, где достигается предельная светимость, происходит резкое возрастание фотонного индекса, что аналогично тому, что наблюдалось в объекте Sco X-1. Следовательно, Sco X-1 - не единственный объект, который показывает фазу радиационного доминирования в спектре. Если бы таких объектов было открыто много, то можно было бы констатировать, что это система.

- Зависимость индекса Γ от электронной температуры T_e : было произведено спектральное разделение нейтронной звезды и диска, показана фаза снижения фотонного индекса при достижении высокой температуры (выше 80 кэВ).
- Зависимость индекса Γ от температуры "затравочных фотонов диска T_s . Как доказать, что в фазе, когда происходит достижение Эддингтоновской светимости - происходит расширение (отодвигается переходный слой)? Когда снижется индекс в радиационно-доминированной фазе, то снижается температура фотонов диска, что говорит о стадии расширения.

Объект 4U 1700-37

Основные параметры

- динамические оценки массы компактного объекта: $M_x \sim 2,1, - 2,3, \sim 2,6$ массы Солнца
- нет пульсаций рентгеновского излучения, по которым сразу было бы понятно, что объект - нейтронная звезда
- нет циклотронных линий, которые показали бы, что объект - нейтронная звезда

- значительное жесткое излучение, которое может говорить, что объект - черная дыра

Объект 4U 1700-37 может быть, как черной дырой, так и небольшой нейтронной звездой. В данном случае удобно применить рассмотренные ранее закономерности. **Основная задача** - применение наблюдательных признаков аккрецирующих черных дыр и нейтронных звезд в приложении к вопросу о природе компактного объекта 4U 1700-37.

Аппроксимация двухкомпонентной моделью:

- для левого спектра применена модель $\text{phabs}^*(\text{bbody} + \text{CompTB} + \text{gauss})$, $\chi^2 = 12,3$, на нижней панели видны отклонения на энергиях больше 100 кэВ (рис. 9.10)
- для правого спектра $\text{phabs}^*(\text{bbody} + \text{CompTB1} + \text{CompTB2} + \text{gauss})$, $\chi^2 = 1,12$, после добавления второй компоненты спектр хорошо описывается.

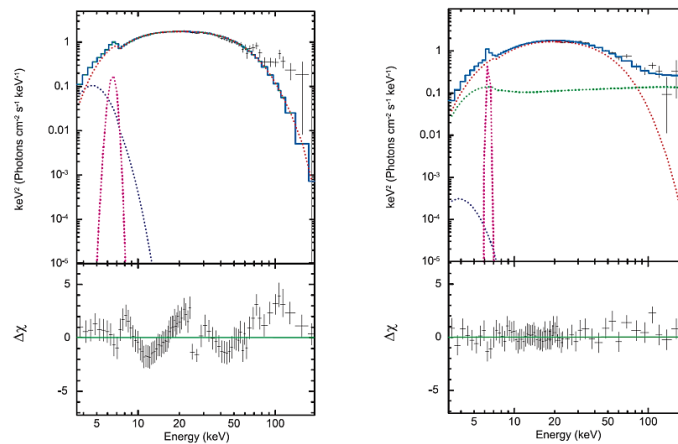


Рис. 9.10. Спектры 4U 1700-37 по данным *Suzaku* (слева) и *BeppoSAX* (справа) с применением разных моделей

Кривая блеска 4U 1700-37 в рентгене показывает переменность (признак черных дыр), в которой индекс демонстрирует монотонный рост, и последующее насыщение при больших темпах аккреции. Нейтронные звезды при низких температурах показывают постоянство индекса с последующим его снижением.

Зависимость фотонного индекса Γ от температуры T_s и T_e в около Эддингтоновском режиме показывает: снижение индекса с ростом электронной температуры и снижение температуры фотонов диска на фазе радиационного доминирования, следовательно, объект 4U 1700-37 - нейтронная звезда, которая достигает стадии около Эддингтоновского режима.

Основные результаты и новизна:

- Обнаружен эффект постоянства индекса в спектрах нейтронных звезд - atoll- и Z-источников: 4U 1728-34, GX 3+1, 4U 1820-30, GX 340+0 и др.

- Обнаружена новая, радиационно-доминированная фаза снижения индекса во время "высокого состояния" $L_{\text{edd}} \text{ atoll-}$ и Z -источников: Sco X-1, 4U 1705-44, 4U 1700-37.
- На основании полученных данных сформулированы фундаментальные спектральные признаки нейтронных звезд и черных дыр в аккрецирующих рентгеновских двойных системах.
- С помощью разработанных критериев идентифицирована природа компактного объекта 4U 1700-37, показано, что он является нейтронной звездой.

Теоретическое обоснование полученных результатов

1. Зависимость спектрального индекса α от электронной температуры T_e для нейтронных звезд. Теория лучистого переноса.

Соотношение между количеством энергии на единицу площади поверхности короны Q_{cor} , плотностью излучения $\varepsilon(T)$ и T_e :

$$\frac{Q_{\text{cor}}}{\tau_0} = 20,2\tau_0\varepsilon(T)T_e$$

рассмотрим среднюю величину плотности энергии $\langle \varepsilon(T) \rangle$:

$$\langle \varepsilon(T) \rangle = \frac{1}{\tau_0} \int_0^{\tau_0} \varepsilon(\tau) d\tau = \frac{Q_{\text{tot}}}{c} (2 + \tau_0)$$

используя два уравнения, получаем:

$$\frac{kT_e\tau_0(2 + \tau_0)}{m_e c^2} = \frac{0,25}{1 + Q_{\text{disk}}/Q_{\text{cor}}}$$

спектральный индекс α определяется как:

$$\alpha = -\frac{3}{2} + \sqrt{\frac{9}{4} + \frac{1 + \beta}{\theta}}$$

где безразмерная температура $\theta \equiv kT_e/m_e c^2$ и $\beta_{\text{diff}} = 1/\tau_0 (2 + \tau_0)$
используя четыре уравнения, получим:

$$\alpha_{\text{diff}} \approx -\frac{3}{2} + \sqrt{\frac{9}{4} + \frac{Q_{\text{disk}}/Q_{\text{cor}}}{0,25}}$$

Постоянство индекса диска $\alpha = 1$, $\Gamma = \alpha + 1 = 2$

Постоянство спектрального индекса около 1 - спектральный признак нейтронных звезд. Если мы предположим, что Q_{disc} намного меньше, чем Q_{cor} , то этим членом можно пренебречь, не включая его в спектральное моделирование. В системе с

нейтронной звездой основное энерговыделение происходит в переходном слое (короне), излучение диска им забивается. Наблюдательная переменность α определяется только переменностью $\alpha \approx 1 + 0 (Q_{\text{disc}}/Q_{\text{cor}})$.

Актуальные задачи, связанные с нейтронными звездами

- Объединение atoll- и Z-источников. Разделение слабомагнитических нейтронных звезд в маломассивных двойных системах на atoll- и Z-источники носит условный характер. Оно обусловлено тем, что объекты работают на разных рентгеновских светимостях, возможно, разница проявлений зависит от энергетики объекта.
- Аккреция на Кеплеровский диск (по Shakura&Sunyaev).
- Задача о подстройке Кеплеровского движения вещества в диске к суб Кеплеровскому вращению центрального объекта.
- Вертикальные колебания диска (ответственны за квазипериодические осцилляции и шумовые компоненты спектра мощности).
- Условие запуска ветра.
- Формирование эмиссионных линий в оттекающем спектре. Случаи сходящегося и расходящегося потоков.

Унифицированная модель atoll- и Z-источников

Унифицированная модель впервые была предложена в работе M. J. Church, A. Gibiec and M. Balucin'ska-Church. Исследователи предложили объединение atoll- и Z-источников по диаграмме и по свойствам.

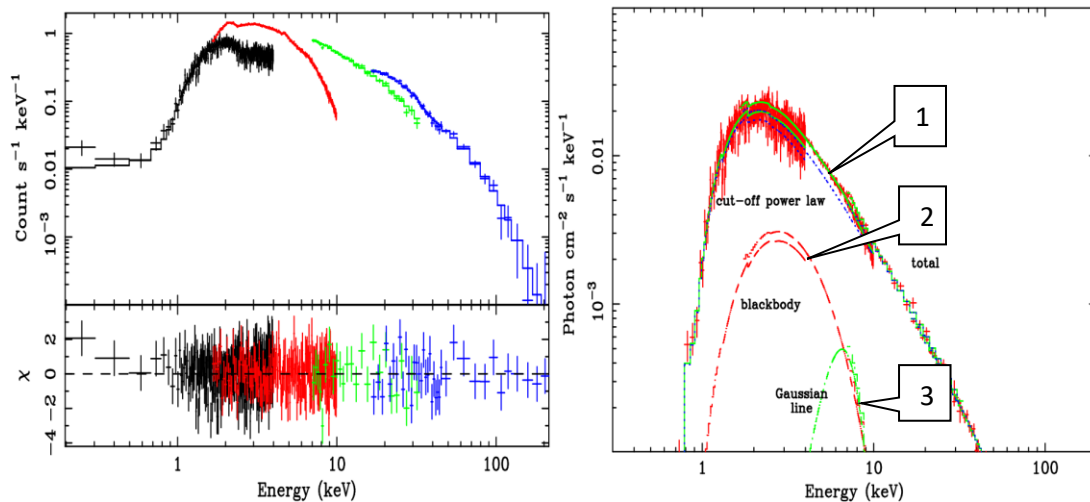


Рис. 9.11. Слева: развернутые данные, справа: свернутые данные с пороговой энергией (1), чернотельным излучением (2) и гауссовой линией Fe (3)

Для наблюдений спутниками ВерроSAX были выбрано 8 источников. На рис. 9.11. показано, что спектры не стыкуются, что происходит в следствие того, что по оси

у отложены не физические единицы, а count. Респонс-матрицы переводят count в фотоны, эрги и т.д. С помощью респонс-матрицы получены спектры правой панели, осуществлено фитирование.

Первая идея - создание унифицированной модели посредством объединения источников по светимости (в терминах T_e/T_{bb} и L_{tot}). Atoll- и Z-источники эволюционируют по гиперболе. С нарастанием рентгеновской светимости температуры нейтронных звезд T_e/T_{bb} стремятся к 1.

Аккреция на Кеплеровский диск (по Shakura&Sunyaev)

Шакура Н.И. и Сюняев Р.А. в 1973 году предложили модель дисковой аккреции - вещество закручивается в форме диска вокруг компактного объекта. При приближении вещества к центральному объекту, оно разогревается и должно излучать рентген. Рентгеновое излучение отмечается, следовательно, вещество падает. Необходимо отвести угловой момент вращения падающего вещества, который соответствует Кеплеровскому. Когда спираль начинает накручиваться на центральный объект за счет его сильной гравитации, то при этом образуются спиральные сегменты, которые трутся между собой. Это вязкое трение, от которого возникает разогрев до такой температуры, что начинает светить рентген.

Новое в сравнении с моделью дисковой аккреции Шакуры-Сюняева: введение переходного слоя - области, ограниченной между поверхностью нейтронной звезды (или последней устойчивой орбитой в случае черной дыры) и "внешним" радиусом диска, где Кеплеровский диск гладко подстраивается к внутреннему до Кеплеровскому диску.

Постановка задачи: в Кеплеровском диске вещество вращается с угловой скоростью:

$$\omega_k = \left(\frac{GM}{R^3}\right)^{1/2}$$

где M - масса центрального компактного объекта. Радиальный перенос углового момента в диске осуществляется посредством сил вязкого трения между радиальными слоями аккреционного диска

$$\dot{M} = \frac{d}{dr}(\omega R^2) = 2\pi \frac{d}{dr}(W_{r\phi} R^2)$$

где \dot{M} - темп аккреции

$$W_{r\phi} = -2\eta R \frac{d\omega}{dr}$$

- компонента тензора вязких напряжений.

Когда мы вводим переходный слой, появляется дополнительный "помощник", который отводит угловой момент. В работе Шакуры Н.И. и Сюняева Р.А. показано, что такой вариант возможен, но авторы не учитывали пограничные условия.

Задача о подстройке Кеплеровского движения вещества в диске к суб Кеплеровскому вращению центральных объектов

Чтобы вещество упало на компактный объект, его скорость должна упасть за счет вязкого трения и граничных условий (слева направо на рис. 9.1.). Между аккреционным диском и переходным слоем должна быть гладкая сшивка

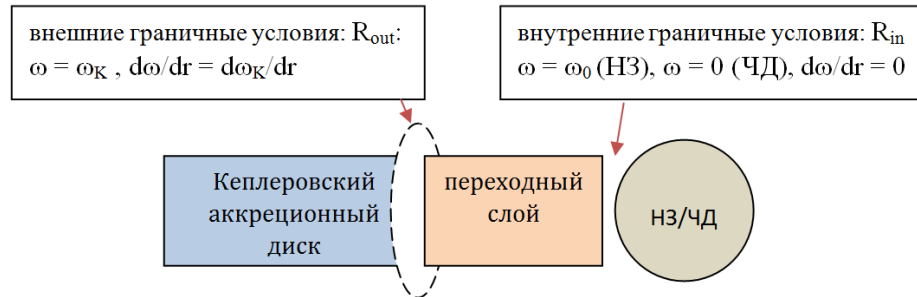


Рис. 9.12. Внутренние и внешние граничные условия переходного слоя

Отличия граничных условий для черной дыры и нейтронной звезды: размеры радиуса компактного объекта, угловой момент для черной дыры можно положить равным 0.

Решение задачи о подстройке с учетом гравитационного условия $W_{r\phi} = 0$ (случай черной дыры): скорость при падении вещества будет нарастать и падать, если бы скорость была бы Кеплеровой, то вещество никогда бы не упало на компактный объект.

Решение уравнения (1): $\dot{M} = \frac{d}{dr}(\omega R^2) = 2\pi \frac{d}{dr}(W_{r\phi} R^2)$ для геометрически толстого аккреционного диска

- перепишем уравнение, используя параметр γ :

$$\frac{d}{dr}(\omega R^2) = - \frac{d}{dR} \left(\gamma^{-1} R^3 \frac{d\omega}{dR} \right)$$

- ранее в модели Шакуры-Сюняева был введен параметр α
- a_s - скорость звука, предположим, что $V_r \approx a_s$ и $N \approx R$ в переходном слое, тогда $\alpha \propto \gamma^{-1}$
- α - турбулентное число Рейнольдса - уравнение (2):

$$\gamma \frac{d}{dR}(\omega R^2) = - \frac{d}{dR} \left(R^3 \frac{d\omega}{dR} \right)$$

- общее решение ищется в виде уравнения (3):

$$\omega(R) = \tilde{\omega} + \omega_4 = C_1 R^{-2} + C_2 R^{-\gamma}$$

- константы C_1 и C_2 определяются из граничных условий, подставляем их в уравнение (3), $\omega(R)$ в уравнение (2), решаем уравнение (2) графически.

Показано, что решение в этом случае есть, происходит подстройка, скорость вещества падает, происходит мощное рентгеновское излучение и дальнейшее падение вещества в черную дыру или накопление в переходном слое для нейтронной звезды.

Вертикальные колебания диска

Вертикальные колебания более устойчивые, потому что небольшое вертикальное смещение газового слоя от положения равновесия приводит к возникновению восстанавливающей силы $f_{gr} \approx f - m_p GMh/R^2$ и силы светового давления $[f_r] \approx (4/3)\ell[GMH_d]/R^3$

- где $\ell = L/L_{edd}$
- тогда колебания газового слоя $m_p \ddot{h} = f_{gr} - [f_r]$

Рассмотренный подход является первым, на настоящее время данная задача модифицирована, с её помощью определяются как физические, так и временные свойства черных дыр и нейтронных звезд.

Условие запуска ветра

В некоторых дисках ветер присутствует, в некоторых нет. В микроквазаре SS 433 настолько сильный ветер, что не видно центральный объект, особенно в оптике, где видна только поверхность. Существует термин для этого явления - "шуба". Какой механизм запускает ветер? Сила гравитации центрального объекта удерживает вещество диска, давление излучения диска выталкивает ветер. Когда лучистое давление будет больше, чем сила гравитации (что будет выполняться на некотором радиусе) - на периферии происходит отток ветра (например, сферически симметричный).

Статья, которая была посвящена этой проблеме (The Eddington luminosity limit in the disk and mass outflow in the wind, Титарчук Л.Г., Шапошников Н., Арефьев В., 2007 г.), описывает её в аппендиксе. Авторами описывается, как оттекает ветер, почему он есть, а также другие аспекты данного явления.

Критический режим аккреции $\dot{M} = \dot{M}_{cr}$

Критическая \dot{M}_d^{cr} запуска ветра на данном радиусе диска R определяется равенством радиационного давления и гравитационной силы в кольце между R и $R+dR$, а именно:

$$\frac{\sigma(R)Q_d^{cr}(R)}{c} = m_p \left(\frac{H}{R}\right) \frac{GM}{R^3}$$

где

$$Q_d^{cr}(R) = \frac{3}{8\pi} \frac{GM\dot{M}_d^{cr}(R)}{R^3} [1 - (R_*/R)^{1/2}]$$

- светимость диска на см^2 в кольцевом пространстве между R and $dR + dR$ (модель Шакуры-Сюняева), R_* - центральный радиус объекта, то есть 3 радиуса Шварцшильда для ВН и радиус NS для NS ; $\sigma(R)$ - эффективное сечение плазмы, которое равно сечению Томсона для электронов σ_T , если плазма диска полностью ионизирована, в противном случае $\sigma(R) > \sigma_T$, H - геометрическая половина толщины диска, M - масса центрального объекта, масса черной дыры или масса нейтронной звезды.

из уравнений получаем, что:

$$\dot{M}_d^{gr}(R) = \frac{8\pi}{3} R \left(\frac{H}{R}\right) \frac{m_p c}{\sigma(R)} \frac{1}{[1 - (R_*/R)^{1/2}]}$$

Формирование эмиссионных линий в оттекающем ветре: ветер оттекает сферически симметрично, наблюдается только тот ветер, который оттекает по направлению к нам. В исследованиях отмечается асимметрия профиля эмиссионных линий.

Случаи сходящегося и расходящегося ветрового потока

Сходящийся ветер появляется в случае, когда имеется ветровая аккреция. До настоящего времени существует идея, которая говорит о том, что асимметрия эмиссионных линий определяется наличием черной дыры или нейтронной звезды, что когда линия становится релятивистской - появляется асимметрия. Вопрос о релятивистском происхождении асимметрии был снят:

- линии от белого карлика, черной дыры и нейтронной звезды показали, что если ветер будет расходящийся, то асимметрия будет одинаковой всегда;
- для черной дыры (особенно для этого объекта, так как имеется горизонт событий) и нейтронной звезды ещё можно отметить некий релятивистский эффект, в белом карлике гравитации нет.

Эмиссионные линии у источников одинаковые, то есть асимметрию линию возможно объяснить расходящимся или сходящимся ветром. В случае сходящегося ветра будет наблюдаться более сильная составляющая.

Чёрные дыры промежуточных масс

В классификации черные дыры промежуточных масс попадают в промежуток между черными дырами звездных масс и сверхмассивными черными дырами. Идея об их существовании описана в статье Колберта и Мушотского после консультаций с Титарчуком Л.Г.

- Черные дыры звездных масс ($5-10 M_\odot$)
- Сверхмассивные черные дыры ($10^{5-6} M_\odot$) - черные дыры центров Галактик
- Черные дыры промежуточных масс ($100-10^4 M_\odot$)
- Первоначальные черные дыры

Чёрные дыры промежуточных масс заполняют пробелы:

- объяснения существования очень ярких квазаров при высоких красных смещениях ($z \sim 6$);
- наличия существенного интервала между черными дырами звездных масс и сверхмассивными черными дырами.

Идеи образования черных дыр:

- Столкновение массивных звёзд в плотных звёздных скоплениях и коллапс в результате столкновения.
- Слияние чёрных дыр звездной массы и других объектов путём аккреции.
- Образование в ядрах квазизвезд в ранней Вселенной.

Наблюдения чёрных дыр промежуточных масс

Первой чёрной дырой промежуточных масс был ESO 243-49 (HLX-1/Hyper-Luminous X-ray Source - гиперсвещающийся источник рентгеновского излучения. Гиперяркие объекты - это объекты, которые светят выше, чем Эддингтон для 10 масс Солнца. Далее среди ультраярких объектов был определен ряд чёрных дыр промежуточных масс. Их признаками являются их светимость в рентгене больше, чем 10^{41} и приливные разрушения звезд (tidal disruption event).

Метод реверберационного картирования

Основная идея метода - измерить запаздывание сигнала между broad line region и континуумом. Broad line region формируется в более близкой области, narrow line - в дальнем облаке. Это позволяет оценить размер диска, следовательно, и массу центрального ядра.

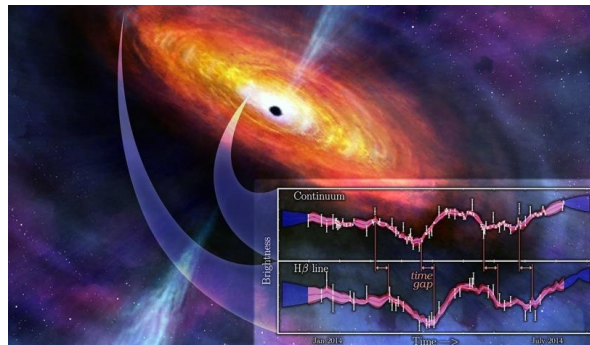


Рис. 9.13. Принцип метода реверберационного картирования

Основная задача:

- Применение признаков черных дыр, найденных в галактических источниках, к спектрам внегалактических источников.
- Определение массы черных дыр в этих источниках.

Для рассмотрения выбраны объекты: M101 ULX-1 и ESO 243-49 HLX-1K. К ультраярким рентгеновским источникам (ULX) относят рентгеновские источники с потоком, соответствующим изотропной светимости, превышающей Эддингтоновский предел для 10 масс Солнца. Их природа до сих пор остается неясной. Возможны два сценария:

- черные дыры звездных масс < 100 масс Солнца, излучающие в Эддингтоновском или сверх Эддингтоновском режимах;
- чёрные дыры промежуточных масс > 100 масс Солнца, излучающие в суб Эддингтоновском режиме.

Вспышки ESO 243-49 HLX-1: сравнение с галактическими маломассивными транзиентами

В "рукавах" Галактики ESO 243-49 расположены ультраяркие источники, которые различаются нумерацией.

Основные параметры:

- расположен на расстоянии: $D \sim 95$ Мпс
- $10^3 < M_{\text{BH}} < 10^5$ масс Солнца
- сильная рентгеновская светимость 0,2 - кэВ, $L_x = 1,1 \times 10^{42}$ эрг/сек
- долгопериодическая переменность сопровождается сменой спектральных состояний
- Галактика видна с ребра

Существовала проблема доказательства, что источник HLX-1 не является проекцией на картинную плоскость, что он может случайным образом проецироваться на эту Галактику. Необходимо было доказать его принадлежность к ней, чтобы приписать ему расстояние. Одним из методов определения расстояния до Галактики является определение по цефеидам (метод был использован в данном случае). Спектроскоп VLT детектировал линии излучения $\text{H}\alpha$ с красным смещением, согласующимся с Галактикой, что явилось доказательством принадлежности объекта HLX-1 Галактике ESO 243-49.

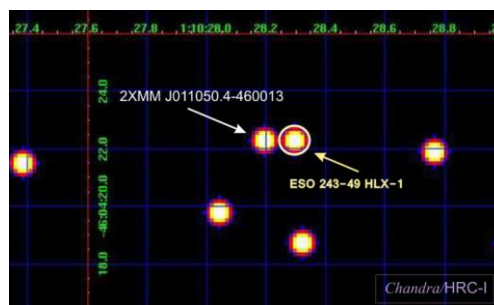


Рис. 9.14. Изображение участка неба в окрестности ESO 243-49 с отмеченным положением ультраяркого источника ESO 243-49 HLX-1

При детектировании объекта ESO 243-49 HLX-1 обсерваторией Chandra (рис. 9.14.) рядом находился второй источник, возможно, яркая светимость объекта связана с наличием этого очень яркого объекта. Были предприняты попытки вырезать излучение второго источник с помощью специальной обработки наблюдений.

Наблюдается значительная рентгеновская переменность ESO 243-49 HLX-1: ~ 50 раз. Объект вспыхивает с периодом примерно 380 дней, вспышка длится около полугода. Характерный профиль вспышки на кривой блеска показывает быстрое нарастание и экспоненциальный спад (аналогично галактическим маломассивным транзиентам).

Переходы в спектральных состояниях в ESO 243-49 HLX-1:

- Наблюдаются переходы между состояниями: высокой светимости с мягким спектром (high-soft state, HSS), промежуточным состоянием (intermediate state, IS) и состоянием низкой светимости с жестким спектром (low-hard state, LHS).
- Температура изменяется по закону $L_{\text{disk}} \sim T^4$ (модель Шакуры-Сюняева), согласуется с геометрически тонким оптически толстым диском.
- Масса черной дыры по оценкам "фундаментальной плоскости" $\sim 10^3 < M_{\text{ВН}} < 10^5$ масс Солнца.

Эволюция формы спектра ESO 243-49 HLX-1

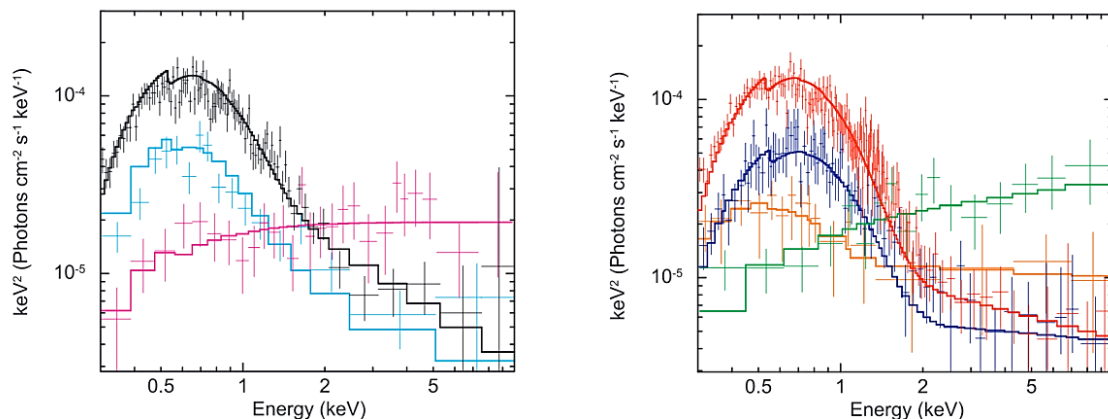


Рис. 9.15. Семь спектров ESO 243-49 HLX-1 в единицах $E F_e$ в разных спектральных состояниях.

По данным XRT/Swift показаны спектральные состояния ESO 243-49 HLX-1, характеризующиеся разными коэффициентами жесткости:

- **левая панель:** черный и голубой спектры - высокое/мягкое состояние, розовый спектр - низкое/жесткое
- **правая панель:** синий, оранжевый спектр - промежуточное состояние, красный спектр - высокое/мягкое состояние, зеленый - низкое/жесткое

Если при использовании метода скалирования будет отмечено насыщение индекса, то можно подтвердить предположение, что объект является черной дырой

Проведена аппроксимация спектра ESO 243-49 HLX-1 в комптонизационной модели, она показала согласование модели и наблюдений, а также классические состояния черных дыр. Отмечена фаза насыщения фотонного индекса.

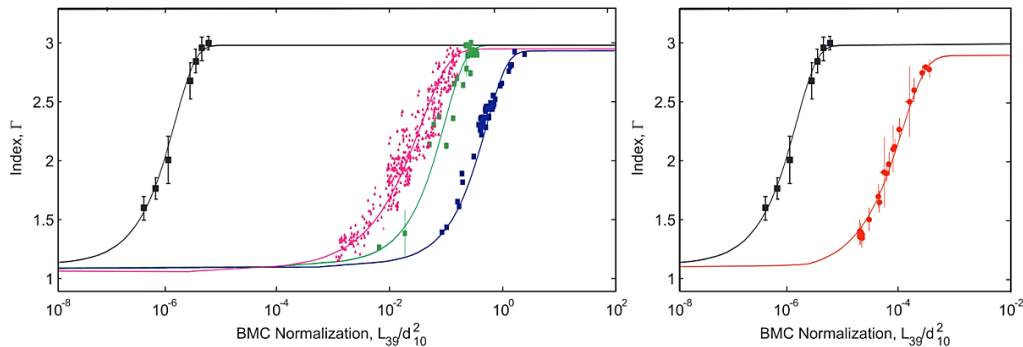


Рис. 9.16. Скалирование фотонного индекса Γ как функция нормировки N_{BMC} для ESO 243-49 с корреляцией для 4 источников

Проведена оценка масс исследуемых источников: для ESO 243–49 HLX, M101 ULX-1 - черных дыр промежуточной массы и XTE J1550-564, H 1743-322, 4U 1630-472 черных дыр звездной массы. В результате применения метода скалирования к объекту была получена масса $M_{\text{BH}} \sim 7 \times 10^4$ масс Солнца, следовательно, M101 ULX-1 - черная дыра промежуточной массы. Сопоставление радио и рентгеновского излучения методом фундаментальной плоскости дает подобную оценку массы объекта. Если известна светимость источника в радио диапазоне, то с помощью этого метода можно приблизительно определить массу черной дыры.

M101 ULX-1

M101 ULX-1 расположен в "рукаве" спиральной Галактики Водоворот (NGC 5457 = M 101) в созвездии Большая Медведица.

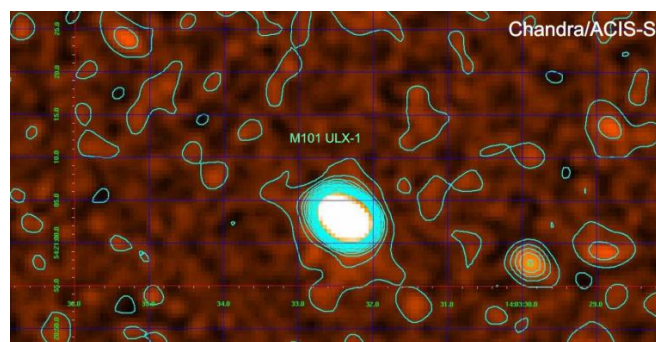


Рис. 9.17. Сглаженное рентгеновское изображение участка неба с объектом M101 ULX-1, полученное обсерваторией Chandra

Основные параметры:

- расположен на расстоянии: $D = 6,4 \pm 0,5$ Мпс, $7,2 \pm 0,4$ Мпс
- $M_{\text{ВН}} \sim 5 - 1\,000$ масс Солнца
- обладает очень мягким рентгеновским спектром $T_s < 100$ эВ, что указывает на большую массу

Диаграмма жесткости M101 ULX-1 показывает насыщение индекса, объект эволюционирует от низкого/жесткого состояния до высокого/мягкого.

Рентгеновские спектры (0,3 - 7 кэВ) также показывают смену состояний M101 ULX-1 - плавное монотонное нарастание и фазу насыщения индекса, таким образом объект возможно идентифицировать, как черную дыру.

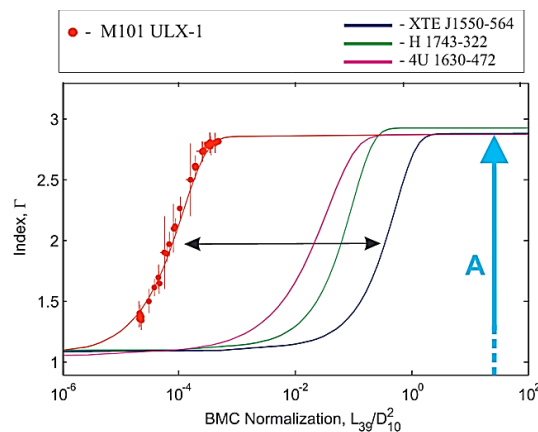


Рис. 9.18. Скалирование фотонного индекса Γ как функция нормировки N_{BMC} для M101 ULX-1 с корреляцией для 3 источников

Произведено скалирование объекта M101 ULX-1 с объектами звездной массы XTE J1550-564, H 1743-322, 4U 1630-472, так как индекс насыщения у M101 ULX-1 находится на значении 3. В результате скалирования получена масса источника: $M_{\text{ВН}} \sim 30 - 40$ тыс. масс Солнца.

Из вышеизложенного можно сделать вывод, что черные дыры промежуточной массы возникают естественным образом. В настоящее время существует сценарий их происхождения: при столкновении двух Галактик происходит слияние их ядер, особенно это касается ядер карликовых Галактик. Именно в этом случае может образоваться объект массой в 10^4 масс Солнца.

Три типа эволюции двойной системы "звезда ГП-ИМВН"

Российский учёный-астрофизик **Тутуков А.В.** предложил три типа эволюции двойной системы, которые зависят от начального расстояния звезды от черной дыры промежуточной массы:

1. **Разрушение звезды** (для маломассивных звезд главной последовательности).

2. **HLX** (для массивных звезд главной последовательности, которые в начальный момент находятся дальше от черной дыры промежуточной массы, чем при первом типе эволюции) - массивная звезда в ходе эволюционного расширения заполняет свою полость Роша, после чего наступает интенсивный обмен веществом. На этой фазе эволюции система звезда - черная дыра может проявлять себя, как HLX, когда её рентгеновская светимость в течение длительного времени составляет 10^{41} эрг/сек.
3. **~ HLX** (для массивных звезд главной последовательности, находящихся в начальный момент ещё дальше от черной дыры промежуточной массы, чем при втором типе эволюции, а также для проэволюционировавших к начальному моменту массивных звезд) - консервативный обмен массой при интенсивном звездном ветре приводит к тому, что звезда удаляется от черной дыры промежуточной массы, не заполняя свою полость Роша.

Происхождение черных дыр промежуточной массы:

- Очень массивные черные дыры звездных масс на ранних стадиях эволюции галактик при малых z массы звезд могут достигать 100 - 1 000 масс Солнца. Из них формируются черные дыры с массами 100 - 200 масс Солнца, далее их масса может увеличиваться за счет аккреции вещества.
- Черные дыры промежуточной массы могут быть продуктами слияния звездных черных дыр, которые в результате приливного торможения в звездном поле шаровых скоплений либо карликовых Галактик концентрируются к центральным областям этих звездных систем.
- Сверхмассивные черные дыры и черные дыры промежуточной массы являются изначальными (primordial) объектами, формирующимися на ранних стадиях эволюции Вселенной.

Лекция 10. Чёрные дыры промежуточных масс. Часть 2. Белые карлики в рентгеновском излучении

Событие приливного разрушения звезд (tidal disruption event)

Различают два типа реалистичных черных дыр: черные дыры звездных масс (5-10 масс Солнца) и сверхмассивные черные дыры (10^{5-6} масс Солнца), а также черные дыры промежуточных масс ($100-10^4$ масс Солнца) и первоначальные черные дыры. В ходе курса был изучен ряд объектов, которые принадлежали к первым двум типам, а также к типу черных дыр промежуточных масс (в основном ультраяркие рентгеновские источники). Сегодня будет рассмотрена связь приливного разрушения звезд черными дырами и черных дыр промежуточных масс.

Проблема обнаружения черных дыр промежуточных масс

- По поводу существования черных дыр звездных масс, образующихся при смерти массивных звезд, есть согласие ученых: существуют убедительные доказательства, исследователи их наблюдают.
- Нет никаких сомнений в существовании сверхмассивных черных дыр, располагающихся в центрах многих Галактик, которые также детектируются.
- Черные дыры промежуточных масс вызывают споры: кандидаты в эти объекты обнаруживались в карликовых Галактиках, шаровых скоплениях, гипермощных рентгеновских источниках. Подтвердить наличие в них черной дыры промежуточной массы сложно из-за отсутствия общепринятого и достоверного метода определения их массы.

Приливное разрушение звезды сверхмассивной черной дырой и последующее падение обломков разрушенной звезды на черную дыру предлагает прямой способ изучения внутренних областей Галактик, в остальное время находящихся в спокойном состоянии. Изолированные черные дыры, которые находятся далеко от источников и материи, - не видны, потому что наблюдаются только в момент аккреции, которая возникает при взаимодействии черной дыры с другими космическими явлениями. Черная дыра может полностью разрушить звезду, если она будет пролетать слишком близко, в этом случае её обломки будут долго орбитировать в форме диска вокруг неё.

3XMM J2155022.4-055108

Астрономы при помощи трех космических телескопов (Hubble, рентгеновские телескопы XMM-Newton и Chandra) обнаружили объект - один из лучших кандидатов в черные дыры промежуточной массы на сегодняшний день. Детектировать объект удалось во время события приливного разрушения небольшой звезды, которое привело к вспышке рентгеновского излучения. В апреле 2020 года группа астрономов во главе с **Датченгом Лином** (D. Lin et al) опубликовала результаты наблюдений за рентгеновским источником 3XMM J2155022.4-055108, который находится в массивном

звездном скоплении на окраине крупной линзовидной Галактики Gal.1 ($D = 247$ Мпс). Статья расширила перечень объектов, в которых встречаются черные дыры промежуточных масс.

Источник был замечен в 2006 году из-за всплеска мягкого рентгеновского излучения, который продолжался около 10 лет. Это явление можно объяснить приливным разрушением звезды черной дырой, однако также рассматривалась версия остывающей нейтронной звезды, расположенной в Млечном Пути. Благодаря Хаббл удалось исключить эту версию, объект действительно находится в звездном скоплении, которое может быть ядром разрушенной Галактики.

Группа исследователей (D. Lin et al) наблюдала объект не так часто, при этом было обнаружено постепенное угасание кривой блеска источника, что характерно для стохастического процесса и приливного разрушения (рис. 10.1. синие квадраты Chandra, красные треугольники XMM-Newton, зеленый крест Swift).

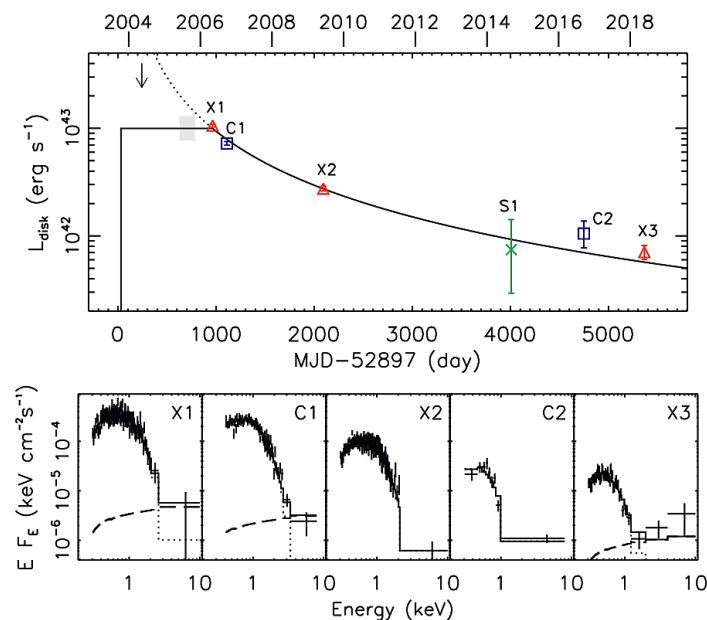


Рис. 10.1. Верхняя панель: долгосрочная болометрическая кривая светимости диска, нижняя панель: рентгеновские спектры по годам

По каждому рентгеновскому спектру (нижние панели на рис. 10.1.) была произведена оценка температуры, которая определяется аппроксимацией модели, например, чернотельного излучения (bbody). Также проверялось предположение о медленном остывании поверхности нейтронной звезды. Данные не совпали, поэтому версия о нейтронной звезде массой 1,4 масс Солнца была не была принята.

Е. Coughlin и **С. Nixon** в 2019 представили модель для эволюции частично разрушенной приливом звезды во время TDE, в которой звездное ядро испытывает изначальное приливное сближение, и продолжает оказывать гравитационное влияние

на расширяющийся поток обломков, сорванных приливом со звезды. Исследователями было сделано предположение, что скорость аккреции на черную дыру на поздней стадии TDE либо уменьшается как $t^{-5/3}$, если звезда полностью разрушена, либо как $t^{-9/4}$, если остается ядро звезды. Предыдущие исследования не обнаружили этот эффект из-за предположения о том, что обломки разрушенной звезды летают по Кеплеровским орбитам, которые не применимы в случае, если остается ядро звезды, создающее зависящий от времени гравитационный потенциал.

В формулу модели чернотельного излучения XSPEC bbody входит цветовая температура kT , которая определяется формой спектра (рис. 10.2.).

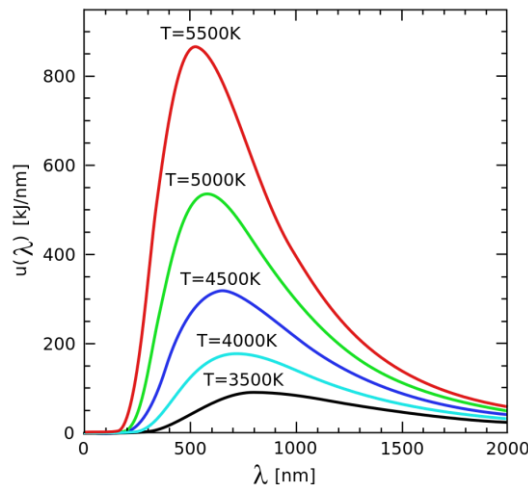


Рис. 10.2. Спектры чернотельного излучения при различных температурах

Зависимость цветовой температуры диска от массы черной дыры:

- в примере спектр черной дыры промежуточной массы показывает максимум температуры во вспышке на уровне 0,5 кэВ;
- спектр черной дыры звездной массы показывает максимум температуры на уровне 6 кэВ;
- спектр нейтронной звезды показывает максимум температуры на уровне 20 кэВ.

Температура диска $T_d \sim M^{-1/4}$. Таким образом, чем больше масса объекта, тем меньше температура.

С помощью данного метода D. Lin et all определили массу черной дыры. Полученные данные указывают на то, что черная дыра с массой 5×10^4 масс Солнца разорвала звезду главной последовательности с 0,3 масс Солнца и радиусом 0,41, после чего вокруг звезды образовался аккреционный диск из вещества разрушенной звезды (рис. 10.3.). Масса объекта соответствует параметрам черной дыры промежуточной массы. Это открытие позволяет астрономам подтвердить, что 3XMM J2155022.4-055108 в настоящее время является самым надежным кандидатом в черные дыры промежуточной массы

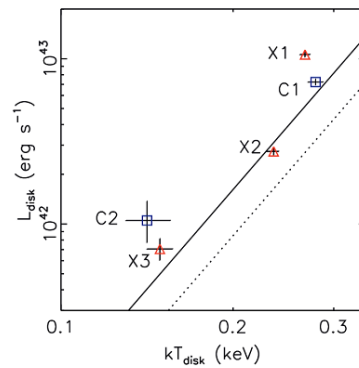


Рис. 10.3. Зависимость светимости диска от видимой максимальной температуры 3ХММ J2155022.4-055108

Белые карлики в рентгеновском диапазоне

Что такое белый карлик - звезда или фантом? Одна из увлекательнейших тем в истории астрономии: впервые были открыты небесные тела, обладающие свойствами, весьма далекими от тех, с которыми мы имеем дело в земных условиях. Как и нейтронные звезды, белые карлики были предсказаны, предсказание сделал Фридрих Бессель, который так и не узнал при жизни, что был прав.

Белые карлики — проэволюционировавшие звёзды с массой, не превышающей предел Чандрасекара (максимальная масса, при которой звезда может существовать как белый карлик), лишённые собственных источников термоядерной энергии. Белые карлики также известны как "вырожденные звезды", они состоят из вырожденных электронов, которые больше не производят энергию. Вместо этого они излучают накопленную тепловую энергию в виде слабой светимости, но очень медленно.

История открытия

- В годы, когда Пруссия проиграла войну Наполеону, немецкий математик и астроном **Фридрих Вильгельм Бессель** построил обсерваторию. Наполеон, объезжая покоренные территории, обнаружил строительство, что его крайне удивило, так как он наложил контрибуцию на Пруссию, которая при этом нашла средства и силы на развитие науки. При этом важно отметить значительную роль самого Ф. Бесселя. В 1844 году, директор Кенигсбергской обсерватории Ф.Бессель, анализируя данные наблюдений, которые велись с 1755 года, обнаружил, что Сириус (ярчайшая звезда неба) и Прокцион периодически (хотя и весьма слабо) отклоняются от прямолинейной траектории движения по небесной сфере. Движение Сириуса петлеобразное, это обозначает, что ему что-то препятствует. Ученый пришел к выводу, что у него должен быть близкий спутник большой массы, который искажает прямолинейное движение. Сообщение было встречено скептически, поскольку слабый спутник оставался ненаблюдаемым в оптике, а его масса должна была быть достаточно велика - сравнимой с массой Сириуса и Прокциона, соответственно.

- В 1862 году **Элвин Грэхэм Кларк**, известный строитель телескопов, юстируя 18-дюймовый рефрактор (самый большой на то время телескоп Dearborn Telescope), обнаружил в непосредственной близости от Сириуса тусклую звезду (в виде пятна). Это был спутник Сириуса - Сириус В, предсказанный Ф. Бесселем.
- В 1896 году сбылось второе предсказание Ф. Бесселя - американский астроном **Д. М. Шеберле** открыл Процион В.
- Первым открытым белым карликом стала звезда **40 Эридана В** в тройной системе системы 40 Эридана, которую ещё в 1785 году Вильям Гершель включил в каталог двойных звёзд.
- В 1910 году **Генри Норрис Расселл** обратил внимание на аномально низкую светимость 40 Эридана В при её высокой цветовой температуре (следовательно, маленький радиус), что и послужило впоследствии выделению подобных звёзд в отдельный класс белых карликов.

Спектр Сириуса В

- В 1915 году американский астроном **Уолтер Сидней Адамс** измерил спектр Сириуса В. Из измерений следовало, что его температура не ниже, чем у Сириуса А (по современным данным температура поверхности Сириуса В составляет 25 тыс. К°, Сириуса А - 10 тыс. К°), что с учётом его в 10 тыс. раз более низкой светимости, чем у Сириуса А, указывает на очень малый радиус и, соответственно, высокую плотность - 106 г/см³ (плотность Сириуса ~ 0,25 г/см³, плотность Солнца ~ 1,4 г/см³). Почти все ученые, которые исследовали белые карлики, имеют на Луне кратеры, названные в их честь.
- В 1917 году **Адриан ван Маанен** открыл ещё один белый карлик - звезду ван Маанена в созвездии Рыб.
- В 1922 году **Виллем Якоб Лейтен** предложил называть такие звёзды "белыми карликами".

Сравнительные характеристики	Солнце	Земля	Сириус Б
Масса (M _☉)	1,0	3 × 10 ⁴	0,94
Радиус (R _☉)	1,0	0,009	0,008
Светимость	1,0	0,0	
Средняя плотность (г/см ³)	1,41	5,5	2,8 × 10 ⁶
Плотность ядра (г/см ³)	160	9,6	3,3 × 10 ⁷
Температура поверхности (К°)	5 770	287	27 000

Температура ядра (К°)	$1,6 \times 10^7$	4 200	$2,2 \times 10^7$
-----------------------	-------------------	-------	-------------------

- Белые карлики представляют собой компактные звёзды с массами, сравнимыми или больше массы Солнца, но с радиусами в 100 раз меньше и болометрическими светимостями в 10 тыс. раз меньшими солнечной.
- Средняя плотность вещества белых карликов в пределах их фотосфер 10^5 — 10^9 г/см³, что почти в миллион раз выше плотности звёзд главной последовательности.
- По распространённости белые карлики составляют по разным оценкам 3—10 % звёздного населения нашей Галактики.

Парадокс плотности

В начале XX века **Герцшпрунгом и Расселлом** была открыта закономерность в отношении спектрального класса (то есть температуры) и светимости звёзд - диаграмма Герцшпрунга — Расселла (Г—Р диаграмма). Это эмпирическая зависимость, по оси x расположена эффективная температура, по оси y - светимость.

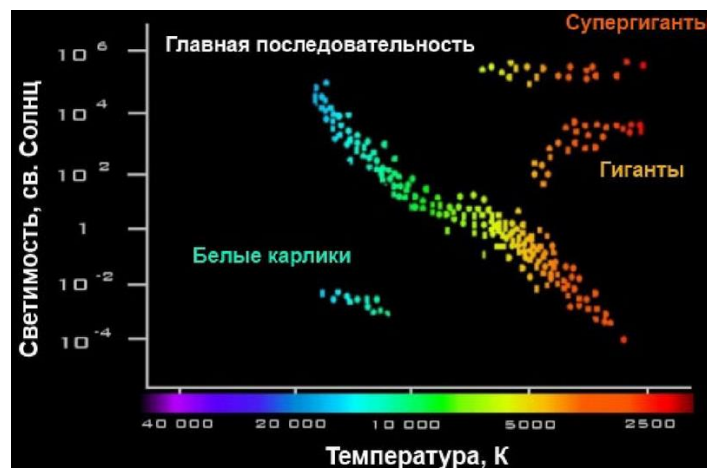


Рис. 10.4. диаграмма Герцшпрунга-Расселла

Высокая плотность белых карликов оставалась необъяснимой в рамках классической физики и астрономии и нашла объяснение лишь в рамках квантовой механики после появления статистики Ферми-Дирака.

В 1928 году **Френкель** указал, что для белых карликов должен существовать верхний предел массы, то есть эти звёзды с массой выше определённого предела неустойчивы и должны коллапсировать. К этому же выводу независимо пришёл в 1930 году **Э. Стоунер**, который дал правильную оценку предельной массы. Более точно её вычислил в 1931 году **Чандрасекар** в работе "Максимальная масса идеального белого карлика" (предел Чандрасекара) и независимо от него в 1932 году **Л.Д. Ландау**.

В 1926 году **Фаулер** в статье "О плотной материи" показал, что в отличие от звёзд главной последовательности, для которых уравнение состояния основывается на модели идеального газа (стандартная модель Эддингтона), для белых карликов плотность и давление вещества определяются свойствами вырожденного электронного газа (ферми-газа). Идеальный газ не подходит, потому что там не будет выполняться условие высокой цветовой температуры и большой плотности, наблюдательные факты могут быть совместимы только с вырожденным электронным газом.

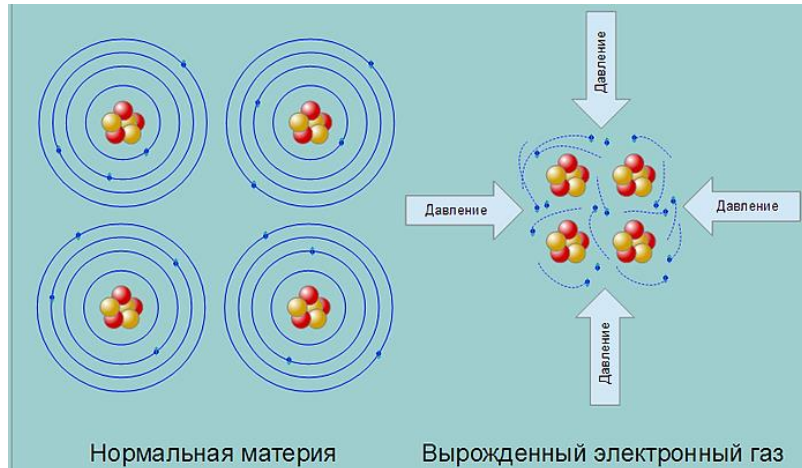


Рис. 10.5. Модель вырожденного электронного газа

Почти все белые карлики имеют одинаковую массу, которая не превышает 1,4 массы Солнца - предел известный как "предел Чандрасекара".

Физика и свойства белых карликов

Массы белых карликов составляют порядка солнечной, но размеры составляют лишь сотую (и даже меньше) часть солнечного радиуса, то есть плотность вещества в белых карликах чрезвычайно высока и составляет $\rho \sim 10^5 - 10^9$ г/см³. При таких плотностях электронные оболочки атомов разрушаются, и вещество представляет собой электронно-ядерную плазму, причём её электронная составляющая представляет собой вырожденный электронный газ.

Давление вырожденного газа подчиняется зависимости $P = K\rho^{5/3}$, где ρ - его плотность, то есть в отличие от уравнения Клайпейрона (уравнения состояния идеального газа), для вырожденного электронного газа температура в уравнение не входит - его давление от неё не зависит, следовательно, строение белых карликов от температуры не зависит. Для белых карликов, в отличие от звезд главной последовательности, не существует зависимость масса-светимость. При росте плотности вещества из-за запрета Паули (два электрона не могут иметь одно квантовое состояние, то есть одинаковую энергию и спин), энергия и скорость электронов возрастают настолько, что начинают действовать эффекты теории относительности - вырожденный электронный газ становится релятивистским.

Зависимость давления релятивистского вырожденного электронного газа от плотности уже другая: $P = K\rho^{4/3}$

- тогда средняя плотность белого карлика: $\rho \sim M/R^3$
- где M - масса, R - радиус, тогда давление: $P \sim M^{4/3}/R^4$
- сила давления, противодействующая гравитации и равная перепаду давления по глубине:

$$\frac{P}{R} \sim \frac{M^{4/3}}{R^5}$$

- гравитационные силы, противодействующие давлению:

$$\frac{\rho GM}{R^2} \sim \frac{M^2}{R^5}$$

Хотя перепад давления и гравитационные силы одинаково зависят от радиуса, но по-разному зависят от массы $\sim M^{4/3}$ и M^2 , соответственно.

- Следствием такого соотношения зависимостей является существование некоторого значения массы звезды, при котором гравитационные силы уравниваются силами давления, при увеличении массы белого карлика его радиус уменьшается.
- Другим следствием является то, что если масса больше некоторого предела (предел Чандрасекара), то звезда коллапсирует.

Таким образом для белых карликов существует верхний предел массы. Важно отметить, что для наблюдаемых белых карликов существует и аналогичный нижний предел: поскольку скорость эволюции звёзд пропорциональна их массе, то мы можем наблюдать маломассивные белые карлики как остатки лишь тех звёзд, которые успели проэволюционировать за время от начального периода звездообразования Вселенной до наших дней. Нижние пределы ещё скрыты в недрах красных гигантов, ещё не было взрыва. У белых карликов очень небольшой интервал, где они могут существовать между верхним и нижним пределами (белые карлики - это объекты $< 1,4$ массы Солнца, то что выше - нейтронные звезды, далее идут черные дыры).

Белые карлики с возрастом охлаждаются медленнее. Пример: белый карлик с массой 0,59 раз больше, чем масса Солнца с гелиевой атмосферой и температурой поверхности 8 тыс. К, для его охлаждения потребуется около 1,5 млрд. лет. В итоге белый карлик превратится в черный карлик.

Особенности спектров и спектральная классификация белых карликов

Спектры белых карликов сильно отличаются от спектров звёзд главной последовательности и гигантов. Главная их особенность - небольшое число сильно уширенных линий поглощения, а некоторые белые карлики (спектральный класс DC)

вообще не содержат заметных линий поглощения. Это объясняется очень сильным уширением линий: только самые сильные линии поглощения, уширяясь, имеют достаточную глубину, чтобы остаться заметными, слабые из-за малой глубины, практически сливаются с непрерывным спектром. На рис. 10.6. показаны спектры белых карликов в шаровом скоплении NGC 6397, типичный спектр белого карлика спектрального класса DA для сравнения показан сверху (красный), "арки" - широкие линии поглощения.

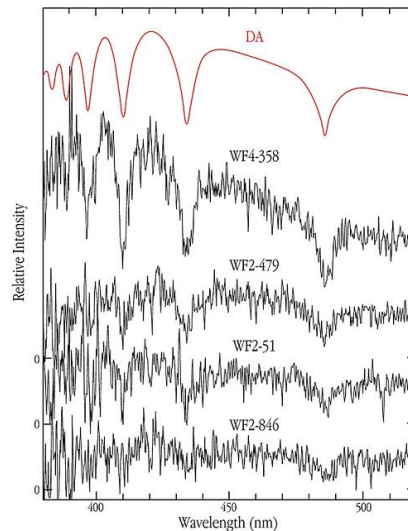


Рис. 10.6. Спектры белых карликов в шаровом скоплении NGC 6397

1. Из-за высокой плотности белых карликов ускорение свободного падения на их поверхности составляет $\sim 10^8$ см/с² (или ~ 1000 км/с² в терминах смещения линий), что приводит к малым протяжённым их фотосферам (именно фотосфера светит в рентгене), огромным плотностям и давлениям в них, уширению линий поглощения.
2. Следствием сильного гравитационного поля на поверхности является гравитационное красное смещение линий в спектрах белых карликов, эквивалентное скоростям в несколько десятков км/с. У черных дыр звездной массы аннигиляционная линия, которая образуется на горизонте событий (где сильная гравитация), когда выходит из потенциального коллапса - испытывает красное гравитационное смещение.
3. У некоторых белых карликов, обладающих сильными магнитными полями, наблюдаются сильная поляризация излучения и расщепление спектральных линий вследствие эффекта Зеемана.

Белые карлики очень хороший плацдарм, несмотря на небольшой интервал и их малочисленность, для изучения.

Классификация белых карликов

Белые карлики выделяются в отдельный спектральный класс D (от англ. Dwarf - карлик).

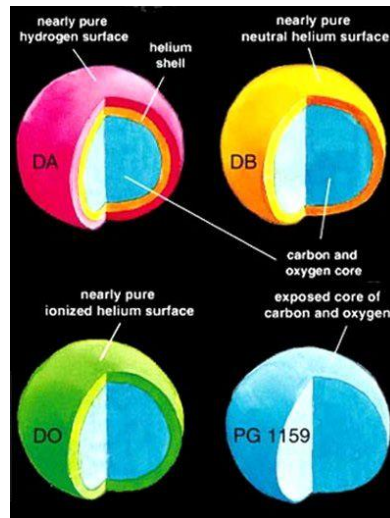


Рис. 10.7. Внутреннее строение белых карликов разных спектральных классов

Классификация предложена 1983 году Эдвардом Сионом, спектральный класс записывается в следующем формате D [подкласс] [особенности спектра] [температурный индекс]:

- DA - в спектре присутствуют линии **бальмеровской серии водорода**, линии гелия не наблюдаются
- DB - в спектре присутствуют линии **гелия He I**, линии водорода или металлов отсутствуют
- DC - непрерывный спектр **без линий поглощения**
- DO - в спектре присутствуют **сильные линии гелия He II**, также могут присутствовать **линии He I и H**
- DZ - только **линии металлов**, линии H или He отсутствуют
- DQ - линии **углерода**, в том числе молекулярного C₂ и спектральные особенности:
 - P - наблюдается поляризация света в магнитном поле
 - H - поляризация при наличии магнитного поля не наблюдается
 - V - звёзды типа ZZ Кита или другие переменные белые карлики
 - X - пекулярные или не классифицируемые спектры

Эволюция белых карликов

Белые карлики начинают свою эволюцию как обнажившиеся вырожденные ядра красных гигантов, сбросивших свою оболочку, то есть в качестве центральных звёзд молодых планетарных туманностей. Температуры фотосфер ядер молодых планетарных туманностей чрезвычайно высоки, например, температура центральной

звезды туманности NGC 7293 составляет от 90 тыс. К° (ближе к ультрафиолету и рентгену, оценка по линиям поглощения) до 130 тыс. К° (оценка по рентгеновскому спектру). При таких температурах большая часть спектра приходится на жёсткое ультрафиолетовое и мягкое рентгеновское излучение.

Мира (о Сет, Омикрон Кита)

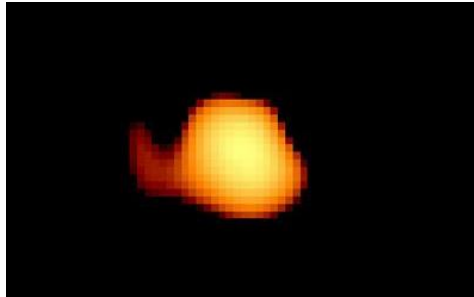


Рис. 10.8. Ультрафиолетовый снимок Мира, полученный телескопом "Хаббл"

Мира - двойная звезда в созвездии Кита, состоящая из красного гиганта Мира А и белого карлика Мира В. Виден аккреционный "хвост", направленный от основного компонента - красного гиганта к компаньону - белому карлику. Когда говорят о полости Роша, следует помнить, что это - модель, теоретическое предсказание. Мира - очень сильное доказательство теоретической модели.

Происхождение белых карликов

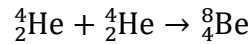
Решение Фаулера объяснило внутреннее строение белых карликов, но не прояснило механизм их происхождения. В объяснении генезиса белых карликов ключевую роль сыграли две идеи:

- мысль астронома **Эрнста Эпика**, академика Эстонской академии наук о том, что красные гиганты образуются из звёзд главной последовательности в результате выгорания ядерного горючего;
- предположение советского астронома **Василия Фесенкова** о том, что звёзды главной последовательности должны терять массу, такая потеря массы должна оказывать существенное влияние на эволюцию звёзд. Эти предположения полностью подтвердились.

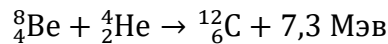
Тройная гелиевая реакция и изотермические ядра красных гигантов

В процессе эволюции звёзд главной последовательности происходит "выгорание" водорода - нуклеосинтез с образованием гелия. Такое выгорание приводит к прекращению энерговыделения в центральных частях звезды, сжатию и, соответственно, к повышению температуры и плотности в её ядре. Рост температуры и плотности в звёздном ядре ведёт к условиям, в которых активируется новый источник термоядерной энергии: выгорание гелия (тройная гелиевая реакция или тройной альфа-

процесс), характерный для красных гигантов и сверхгигантов. При температурах порядка 10^8 К° кинетическая энергия ядер гелия становится достаточно высокой для преодоления кулоновского барьера: два ядра гелия (^4He , альфа-частицы) могут сливаться с образованием нестабильного изотопа бериллия ^8Be :



Поскольку он нестабильный, то будет распадаться, большая часть ^8Be распадется на две альфа-частицы, но при столкновении ^8Be с высокоэнергетической альфа-частицей может образоваться стабильное ядро углерода ^{12}C :



Зависимость энерговыделения от температуры в тройной гелиевой реакции чрезвычайно высока, для диапазона температур $T \sim 2 \cdot 10^8$ К° энерговыделение $\epsilon_{3\alpha}$:

$$\epsilon_{3\alpha} = 108 \rho^2 Y^3 * \left(\frac{T}{10^8} \right)^{30}$$

где Y - парциальная концентрация гелия в ядре (в рассматриваемом случае "выгорания" водорода) близка к единице.

Механизм нейтринного охлаждения

При высокой температуре и давлении возможно рассеяние фотонов на электронах (комptonизация) с образованием нейтрино-антинейтринных пар, которые свободно уносят энергию из ядра, звезда для них прозрачна. Скорость такого объёмного нейтринного охлаждения, в отличие от классического поверхностного фотонного охлаждения, не лимитирована процессами передачи энергии из недр звезды к её фотосфере. В результате реакции нуклеосинтеза в ядре звезды достигается новое равновесие, характеризующееся одинаковой температурой ядра - образуется изотермическое ядро. Движущая сила белых карликов - это тройная гелиевая реакция и механизм нейтринного охлаждения, то есть нагрев - охлаждение.

Белые карлики - ядра красных гигантов

По своим свойствам ядро красного гиганта является белым карликом, когда происходит сброс оболочки звезды, действительно образуется белый карлик. В случае красных гигантов с относительно небольшой массой (порядка солнечной) - изотермические ядра состоят в основном из гелия; в случае более массивных звёзд - из углерода и более тяжёлых элементов. В любом случае плотность такого изотермического ядра настолько высока, что расстояния между электронами образующей ядро плазмы становятся соизмеримыми с их длиной волны Де Бройля $\lambda = h/mv$, то есть выполняются условия вырождения электронного газа. Расчёты показывают, что плотность изотермических ядер соответствует плотности белых карликов, то есть ядрами красных гигантов являются белые карлики.

Потеря массы красными гигантами и сброс ими оболочки

- Ядерные реакции в красных гигантах происходят не только в ядре: по мере выгорания водорода в ядре, нуклеосинтез гелия распространяется на ещё богатые водородом области звезды, образуя сферический слой, слоевой источник на границе бедных и богатых водородом областей.
- Аналогичная ситуация возникает и с тройной гелиевой реакцией: по мере выгорания гелия в ядре, она также сосредотачивается в сферическом слое на границе между бедными и богатыми гелием областями.
- Светимость звёзд с такими «двухслойными» областями нуклеосинтеза значительно возрастает, достигая порядка нескольких тысяч светимостей Солнца (излучение имеет силу давления), звезда при этом раздувается, увеличивая свой диаметр до размеров земной орбиты.
- Зона нуклеосинтеза гелия поднимается к поверхности звезды: доля массы внутри этой зоны составляет $\sim 70\%$ массы звезды. Раздувание сопровождается достаточно интенсивным истечением вещества с поверхности звезды, такие объекты наблюдаются как протопланетарные туманности.

Механизм образования планетарных туманностей

В 1956 г. **И. С. Шкловский** предложил механизм образования планетарных туманностей через сброс оболочек красных гигантов, при этом обнажение изотермических вырожденных ядер таких звёзд приводит к рождению белых карликов. Точные механизмы потери массы и дальнейшего сброса оболочки для таких звёзд пока неясны, но можно предположить следующие факторы, которые могут внести свой вклад в потерю оболочки:

- Из-за крайне высокой светимости существенным становится световое давление потока излучения звезды на её внешние слои, происходит раздувание, оболочка расширяется и в конце концов сбрасывается. По расчётным данным этот процесс может привести к потере оболочки за несколько тысяч лет.
- Вследствие ионизации водорода в областях, лежащих ниже фотосферы, может развиться сильная конвективная неустойчивость, которая является причиной взрыва. Аналогичную природу имеет солнечная активность. В случае красных гигантов мощность конвективных потоков должна значительно превосходить солнечную.
- В протяжённых звёздных оболочках могут развиваться неустойчивости, приводящие к сильным колебательным процессам, сопровождающимся изменением теплового режима звезды. Наблюдаются волны плотности выброшенной звездой материи, которые могут быть следствиями таких

колебаний. В протопланетарной туманности HD 44179 наблюдался асимметричный выброс газопылевой материи красным гигантом.

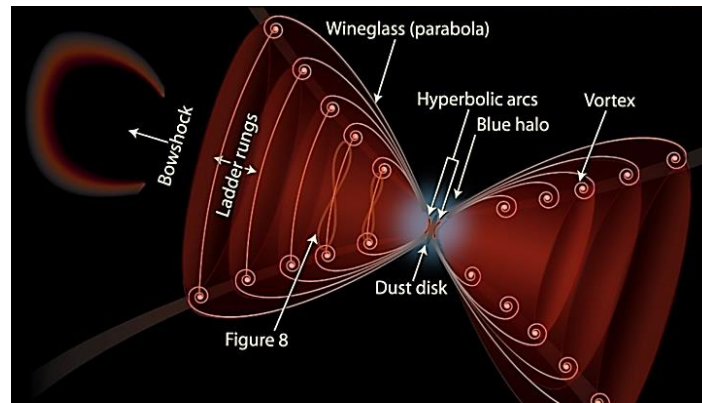


Рис. 10.9. Модель протопланетарной туманности: выброс газопылевой материи красным гигантом - параболы, гиперболические дуги, вихри, голубое гало, ступени газовых выбросов

Потеря оболочки

У красных гигантов с "двуслойным" термоядерным источником, перешедших на поздней стадии своей эволюции на асимптотическую ветвь гигантов, наблюдаются термические пульсации, сопровождающиеся "переключением" водородного и гелиевого термоядерных источников и интенсивной потерей массы. Есть и горение водорода, и горение гелия, далее будет рассмотрено разделение на водородные и гелиевые белые карлики, данное разделение происходит от данного механизма переключений. В настоящее время предложенный Шкловским сценарий конца эволюции красных гигантов является общепринятым и подкреплён многочисленными наблюдательными данными.

Спектроскопические исследования показали, что большая часть светимости звезды белого карлика происходит из её атмосферы, которая может состоять из водорода или гелия. Хотя оба элемента обычно присутствуют в атмосфере белых карликов, один из них всегда преобладает (по меньшей мере в тысячу раз) по сравнению со всеми другими элементами в звездной атмосфере. Большинство исследователей сходятся во мнении, что это результат процесса, в котором гравитация разделяет элементы в атмосфере, когда самые массивные молекулы накапливаются на поверхности звезды или вблизи нее, а более легкие элементы укладываются на этот слой в порядке их массы. В случае атмосфер, богатых водородом, общая масса водородного компонента может составлять до 1/10 000 от общей массы звезды

За счет чего светят белые карлики?

Поскольку белые карлики лишены собственных термоядерных источников энергии, то они излучают за счёт запасов своего тепла. Мощность излучения абсолютно

чёрного тела, приходящаяся на единицу площади поверхности, пропорциональна четвёртой степени температуры тела: $J = \sigma T^4$, где j - мощность на единицу площади излучающей поверхности, а σ Вт/(м²·К⁴) - постоянная Стефана-Больцмана. В отсутствие аккреции источником светимости белых карликов является запас тепловой энергии ионов в их недрах, поэтому их светимость зависит от возраста.

Остывание белых карликов

Количественную теорию остывания белых карликов построил в конце 1940-х годов профессор **Самуил Каплан**. В уравнение состояния вырожденного электронного газа температура не входит, то есть радиус белого карлика и излучающая площадь остаются неизменными:

- для белых карликов не существует зависимость масса - светимость, но существует зависимость возраст - светимость, зависящая только от температуры, но не от площади излучающей поверхности, чем старше белый карлик, тем он холоднее;
- сверхгорячие и яркие молодые белые карлики должны достаточно быстро остывать, так как поток излучения и, соответственно, темп остывания, пропорционален четвёртой степени температуры.

Черные карлики

В пределе, после десятков миллиардов лет остывания любой белый карлик должен превратиться в Чёрный карлик (не излучающий видимый свет). Хотя пока таких объектов во Вселенной не наблюдается, так как для остывания белого карлика до температуры 5К° по некоторым подсчетам потребуется минимум 10¹⁵ млрд. лет. Предсказывают, что Солнце, которое имеет 1 масс Солнца (меньше, чем предел Чандрасекара равный 1,4 массы Солнца), ожидает судьба белого карлика - превращение в черного карлика.

Время, прошедшее со времени образования первых звезд во Вселенной, по современным представлениям составляет около 13 миллиардов лет, но некоторые белые карлики уже охладели до температур ниже 4 тыс. К°. Например, белые карлики WD 0346+246 и SDSS J110217, 48+411315.4 с температурами 3 700 К° - 3 800 К° и спектральным классом M0 на расстоянии около 100 световых лет от Солнца, что наряду с малыми размерами, делает их обнаружение весьма сложной задачей.

Особенности белых карликов

- **Некоторые белые карлики богаты металлами.** Тот факт, что спектры некоторых белых карликов показывают сильные металлические линии, стал неожиданностью для астрономов, поскольку эти тяжелые элементы должны притягиваться к ядру звезды вскоре после его формирования, а они находятся на её поверхности.

- **Некоторые белые карлики "принимают" планеты.** Несмотря на скептицизм и споры в вопросе о том, как планеты могут образовываться вокруг белых карликов, обнаружено множество белых карликов, которые вращаются вокруг одной из планет (например, система NN Serpentis). Существует представление, что планеты, вращающиеся вокруг белого карлика, - это остатки планет, которые были уничтожены его созданием, что также может произойти, когда наше Солнце вздувается во время фазы красного гиганта.
- **Белые карлики могут взорваться несколько раз, но при этом выжить.** Хотя некоторые процессы могут уничтожить звезду белого карлика при взрыве сверхновой, многие белые карлики выживают при повторных, но менее катастрофических термоядерных взрывах аккрецированного водородного материала на их поверхностях. При условии, что ядро звезды остается нетронутым, белый карлик может пережить столько взрывов на своей поверхности, сколько потребуется, чтобы истощить источник падающего материала своего компаньона.

Типы белых карликов

Все известные белые карлики делятся на две группы в зависимости от своего спектра:

- **"Водородные"** - белые карлики спектрального класса DA, в спектрах отсутствуют линии гелия, составляют ~ 80% популяции.
- **"Гелиевые"** - белые карлики спектрального класса DB, основные линии в спектрах приходятся на гелий, 20% популяции.

Причина такого состава атмосфер белых карликов долгое время оставалась неясной. На поздней стадии эволюции у красных гигантов с массами до десяти солнечных в результате "выгорания" гелиевого ядра образуется вырожденное ядро, состоящее преимущественно из углерода и более тяжёлых элементов, окружённое невырожденным гелиевым слоевым источником, в котором идёт тройная гелиевая реакция. В свою очередь, над ним располагается слоевой водородный источник, в котором идут термоядерные реакции цикла Бете превращения водорода в гелий, окружённый водородной оболочкой. Таким образом, внешний водородный слоевой источник является производителем гелия для гелиевого слоевого источника.

Горение гелия в слоевом источнике подвержено тепловой неустойчивости вследствие чрезвычайно высокой зависимости от температуры, это усугубляется большей скоростью преобразования водорода в гелий по сравнению со скоростью выгорания гелия. Результатом становится накопление гелия, его сжатие до начала вырождения, резкое повышение скорости тройной гелиевой реакции и развитие слоевой гелиевой вспышки. Этот механизм скопирован (за неимением лучшего) и приписан вспышкам первого рода. За крайне короткое время (приблизительно 30 лет) светимость гелиевого источника увеличивается настолько, что горение гелия переходит

в конвективный режим, слой расширяется, выталкивая наружу водородный слоевой источник, что ведёт к его охлаждению и прекращению горения водорода. После выгорания избытка гелия в процессе вспышки - светимость гелиевого слоя падает, внешние водородные слои красного гиганта сжимаются, происходит новый поджог водородного слоевого источника.

Идея И. Эбена для гелиевого и водородного белого карлика

Ико Ибен предположил, что пульсирующий красный гигант может сбросить оболочку, образовав планетарную туманность, - как в фазе гелиевой вспышки, так и в спокойной фазе с активным слоевым водородным источником. Поскольку поверхность отрыва оболочки зависит от фазы, то:

- при сбросе оболочки во время гелиевой вспышки обнажается **гелиевый белый карлик** спектрального класса DB
- при сбросе оболочки гигантом с активным слоевым водородным источником - **водородный карлик** класса DA

Длительность гелиевой вспышки составляет около 20% от длительности цикла пульсации (вспыхивает короче), что и объясняет соотношение водородных и гелиевых карликов DA:DB - 80:20.

Рентгеновское излучение белых карликов

Температура поверхности молодых белых карликов - изотропных ядер звёзд после сброса оболочек очень высока (более $2 \cdot 10^5$ K°), однако она достаточно быстро падает за счёт нейтринного охлаждения и излучения с его поверхности. Очень молодые белые карлики наблюдаются в рентгеновском диапазоне (например, наблюдения белого карлика HZ 43 спутником ROSAT).

В рентгеновском диапазоне светимость белых карликов превышает светимость звезд главной последовательности. Иллюстрацией могут служить снимки Сириуса, сделанные рентгеновским телескопом Chandra, на них белый карлик Сириус Б выглядит ярче, чем Сириус А спектрального класса A1, который в оптическом диапазоне в ~ 10 тыс. раз ярче Сириуса Б (рис. 10.10.).

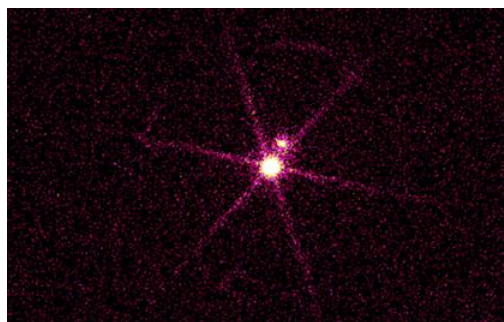


Рис. 10.10. Снимки Сириуса, сделанные рентгеновским телескопом Chandra

Диапазон температур поверхности белых карликов составляет: наиболее горячих белых карликов $7 \cdot 10^4$ K°, наиболее холодных $\sim 5 \cdot 10^3$ K° (Звезда ван Маанена, WD 0346+246 с SDSS J110217 спектрального класса M0).

Особенностью излучения белых карликов в рентгеновском диапазоне является тот факт, что основным источником рентгеновского излучения для них является фотосфера, то есть самая узкая часть, в отличие от звезд главной последовательности, которые излучают в рентгене за счет короны (например, Солнце, корона которого имеет температуру 1,5 млн. K°).

На рис. 10.11. в рентгеновском диапазоне показано изображение остатков сверхновой SN 1572 типа Ia, наблюдавшейся Тихо Браге в 1572 году (слева). Справа фотография в оптическом диапазоне, на ней отмечен бывший компаньон взорвавшегося белого карлика. Изображения получены с помощью обсерваторий Хаббл и Chandra.

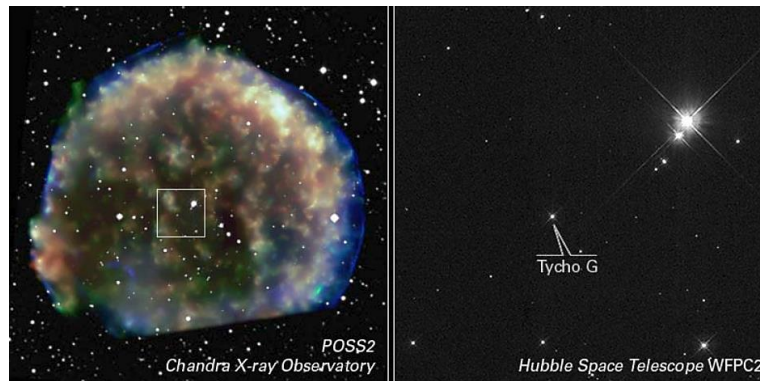


Рис.10.11. Слева: изображение в рентгеновском диапазоне остатков сверхновой SN 1572, справа: фотография в оптическом диапазоне

Аккреция на белые карлики в двойных системах

Если рассматривается двойная система, то и у белого карлика, и нейтронной звезды, и черной дыры есть компаньон, который его будет "кормить". При эволюции звезд различных масс в двойных системах - темпы эволюции компонентов неодинаковы. При этом более массивный компонент может проэволюционировать в белый карлик, менее массивный к этому времени может оставаться на главной последовательности.

Перетекание вещества в двойной системе с белого карлика: при сходе в процессе эволюции менее массивного компонента с главной последовательности и его переходе на ветвь красных гигантов размер эволюционирующей звезды начинает расти до тех пор, пока она не заполняет свою полость Роша. Полости Роша компонентов двойной системы соприкасаются в точке Лагранжа L_1 . На этой стадии эволюции менее массивного компонента через точку L_1 начинается переток материи с красного гиганта

в полость Роша белого карлика и дальнейшая аккреция богатой водородом материи на его поверхность, что приводит к ряду астрономических феноменов (рис. 10.12.)

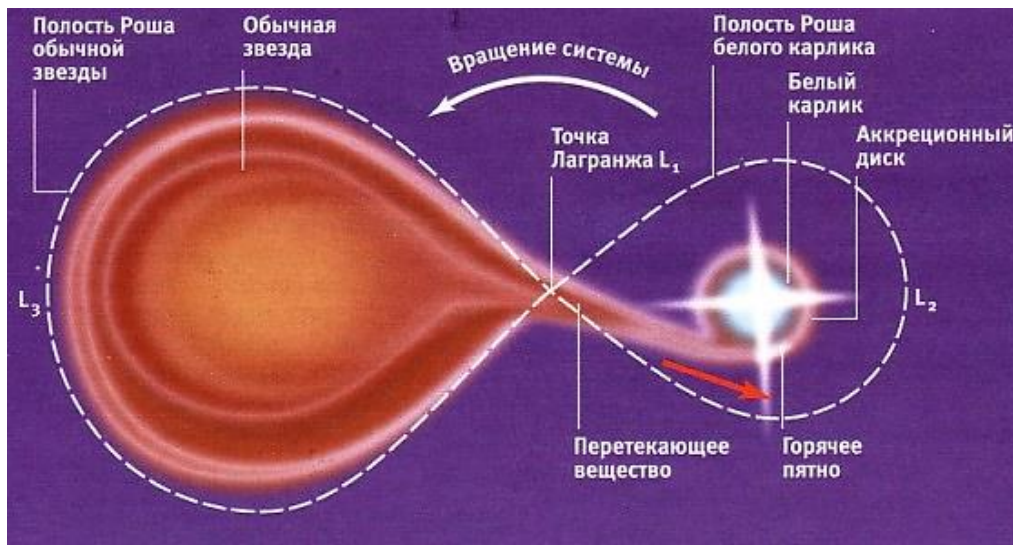


Рис.10.12. Модель Роша

Особенности белых карликов в двойных системах

- Нестационарная аккреция на белые карлики в случае, если компаньоном является массивный красный карлик, приводит к возникновению карликовых новых (звёзд типа U Gem/UG) и новоподобных катастрофических переменных звёзд. Красный карлик - звезда главной последовательности с меньшей массой и температурой K и M класса.
- Аккреция на белые карлики, обладающие сильным магнитным полем, направляется в район магнитных полюсов белого карлика, и циклотронный механизм излучения аккрецирующей плазмы в околополярных областях магнитного поля карлика вызывает сильную поляризацию излучения в видимой области (поляры и промежуточные поляры).
- Аккреция на белые карлики богатого водородом вещества приводит к его накоплению на поверхности (состоящей преимущественно из гелия) и разогреву до температур реакции синтеза гелия, что приводит в случае развития тепловой неустойчивости к взрыву, наблюдаемому как вспышка новой звезды.
- Достаточно длительная и интенсивная аккреция на массивный белый карлик приводит к превышению его массой предела Чандрасекара (объект схлопывается, потому что у сил гравитации и давления вырожденного релятивистского газа разная зависимость от массы, существует только одна масса, при которой есть равновесие) и термоядерному взрыву, наблюдаемому как вспышка сверхновой типа Ia.

Белые карлики - самые загадочные объекты

- очень интересно выглядит процесс вырождения ядра звезды, в результате которого звездное вещество не разлетается в космосе, а наоборот - сжимается до невообразимых размеров;
- при отсутствии термоядерных реакций белые карлики остаются достаточно горячими космическими объектами;
- белые карлики, имея высокую цветовую температуру, обладают низкой светимостью.

Катаклизмические переменные

Катаклизмические переменные - это тесные двойные системы, состоящие из белого карлика и провозэволюционировавшей звезды, чаще всего красного карлика.

Рассмотрим вопрос о нерелятивистском происхождении асимметрии красного крыла линий железа в катаклизмических переменных, источниках с нейтронными звездами и черными дырами. При сравнении спектров белого карлика GK Per, нейтронной звезды Ser X-1 и черной дыры GX 339-4 наблюдается, что линия железа ассиметричная. Есть большая группа исследователей-теоретиков, которые утверждают, что это связано с действием гравитации, особенно в черных дырах. Линия формируется в окрестностях горизонта событий, где такой сильный потенциальный колодец, что наблюдается красное смещение, и линия железа будет искажена. Практики утверждают, что линия железа не формируется на горизонте событий, а образуется далеко от него - в ветре (где меньшие температуры).

Для доказательства того, что работает негравитационный эффект, необходимо сравнить массу объектов: белого карлика (небольшая масса), нейтронной звезды (средние значения) и черной дыры (большая масса). Если при этом получен один и тот же эффект с точки зрения асимметрии линии железа, то это станет обозначением того, что она не зависит от гравитации, а зависит от свойств ветра и температурного режима её формирования. Ветер оттекает сферически симметрично, наблюдается только тот ветер, который оттекает по направлению к нам (сдвиг в синюю сторону), а также асимметрия профиля эмиссионных линий. Сходящийся и расходящийся ветер будет давать разные эффекты в случае, когда экранируется какая-нибудь часть. Таким образом, вопрос о релятивистском происхождении асимметрии эмиссионной линии железа в спектрах был снят. Титарчук Л.Г., Laurent и Шапошников Н. написали статью, в которой рассмотрели асимметрию линий железа в спектрах: белого карлика (GK Per), нейтронной звезды (Ser X-1) и черной дыры (GX 339-4). Таким образом, белые карлики помогли доказать, что асимметрия линии железа в черной дыре обусловлена не гравитацией.

Лекция 10. Комptonизационные модели

Обобщенные модели комptonизации

Имя британского физика, математика и механика Джеймса Клерка Максвелла связано со многими открытиями, в частности с распределением Максвелла, которое имеет прямое отношение к комptonизации. Комptonизация - это обмен энергией при рассеянии фотонов на электронах. **Комptonизация** - изменение частоты фотонов в результате многократных комptonовских рассеяний на тепловых (то есть с распределением Максвелла по энергиям) электронах.

- **Тепловое распределение** - Максвелловское распределение электронов по областям:

для теплового распределения нерелятивистского электрона плотность фазового пространства $f_e(E)$, где $E = p^2/2m$

$$F_e(E) = n_e(2\pi kT)^{-2/3} e^{-E/kT}$$

- **Нетепловое распределение** - степенное распределение электронов по скоростям.

Механизм обмена энергией между плазмой и излучением в компактных рентгеновских источниках

Основные источники излучения в рентгеновском небе - это нейтронные звезды и черные дыры, а также диффузионный газ. Комptonизация - важнейший механизм обмена энергией между плазмой и излучением в ранней Вселенной и в компактных рентгеновских источниках. Комptonизация в тепловой плазме может приводить к характерным степенным спектрам рентгеновского излучения, наблюдаемым в таких объектах, как квазары, ядра галактик и Cyg X-1 (рис. 11.1). Отрезок спектра, "хвост", который длится на спектре до 10^4 кэВ, обусловлен комptonизацией. Комptonизация играла важную роль в ранней Вселенной.

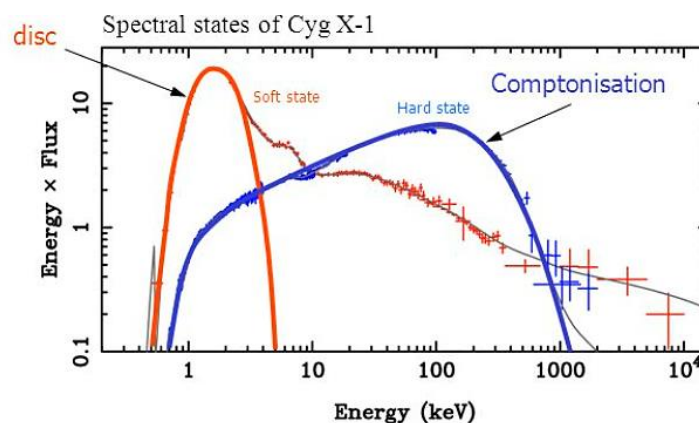


Рис.11.1. Спектр рентгеновского излучения Cyg X-1

Изменение энергии и импульса фотона в результате однократного рассеяния

Два типа рассеяния:

- рассеяние фотона на покоящемся электроне
- рассеяние фотона на движущемся электроне

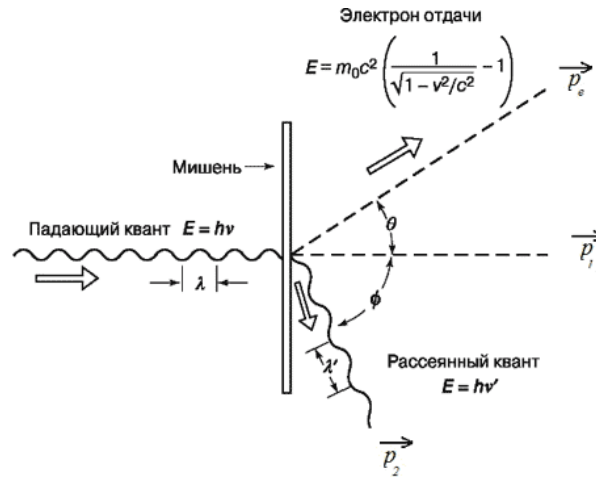


Рис.11.2. Эффект Комптона

Фотон имеет импульс $P_{\gamma i} = h\nu/c$, после рассеяния фотон обладает новой энергией $E_1 = h\nu_1$. Электрон приобретает энергию:

$$E_{1e} = \sqrt{P_e^2 c^2 + m_e^2 c^4}$$

неупругое рассеяние, $E \neq E_1$

Закон сохранения энергии и закон сохранения момента движения (импульса):

$$\vec{p}_1 + \vec{p}_2 = \vec{p}_1' + \vec{p}_2'$$

$$E_1 = \frac{e}{1 + \frac{c}{mc^2} (1 - \cos\theta)}$$

1. Закон сохранения энергии: $E + E_e = E_1 + E_e'$

$$h\nu + m_e c^2 = h\nu_1 + \sqrt{m_e^2 c^4 + p_e^2 c^2} \quad (*)$$

Элементы релятивистской динамики, энергия фотона после рассеяния:

$$\gamma = (1 - v^2/c^2)^{-1/2}$$

- энергия: $E = mc^2/(1 - v^2/c^2)^{1/2} \rightarrow (E/mc^2)^2 = \gamma^2$
- импульс: $P = mv^2/(1 - v^2/c^2)^{1/2} \rightarrow (p/mc^2)^2 = (v/c)^2 \gamma^2$

$$(1/mc^2)^2 [E^2 - (pc)^2] = (1 - (v/c)^2)/(1 - (v/c)^2) = 1$$

$$E^2 - (pc)^2 = (mc^2)^2 \rightarrow E = \sqrt{m_e^2 c^4 + p_e^2 c^2}$$

2. Закон сохранения момента движения: $\vec{p} = \vec{p}_1 + \vec{p}_e$

по теореме косинусов: $P_e^2 = (E/c)^2 + (E_1/2)^2 - 2EE_1 \cos \theta / c^2 (**)$

$$h\nu + m_e c^2 = h\nu_1 + \sqrt{m_e^2 c^4 + p_e^2 c^2} (*)$$

$$h^2 (\nu - \nu_1)^2 + (m_e c^2)^2 + 2h(\nu - \nu_1) m_e c^2 = m_e^2 c^4 + (**)$$

Энергия фотона после взаимодействия выражается через энергию фотона до взаимодействия, угол рассеяния и массу электрона в случае, если электрон покоится:

$$E_1 = \frac{e}{1 + \frac{c}{m_e c^2} (1 - \cos \theta)}$$

Если электрон будет двигаться, то у него появится импульс:

$$\frac{\nu^1}{\nu} = \frac{1 - \mu\nu/c}{1 - \frac{\mu^1\nu}{c} + \frac{h\nu}{\gamma m_e c^2} (1 - \cos \alpha)}$$

$$\mu = \Omega \cdot \nu / \nu \mu^1 = \Omega^1 \cdot \nu / \nu$$

Если $\nu = 0$, то частота (энергия) фотона изменяется из-за эффекта отдачи:

$$\frac{\nu^1}{\nu} = \frac{1}{1 + (h\nu/m_e c^2)(1 - \cos \alpha)}$$

Рассмотренное работает в случае, когда происходит рассеяние одного фотона на одном электроне, необходимо описать взаимодействия множества фотонов с электронами или, например, одного фотона с облаком электронов.

Средняя энергия обмена при рассеянии определяется соотношением между энергиями фотонов и электронов. Это важно, если электрон будет слабым, а фотон сильный, то они пролетят мимо:

Для теплового распределения электронов с kT_e и нерелятивистских фотонов с $h\nu$:

$$\frac{\langle \Delta \nu \rangle}{\nu} = \frac{4kT_e - h\nu}{m_e c^2}$$

$$\frac{\langle \Delta \nu \rangle}{\nu} = \frac{4kT_e}{m_e c^2}$$

если $h\nu \ll 4kT_e$

Сечение Комптоновского рассеяния

Полное сечение дается формулой Клейна-Нишины (которая учитывает и температуру плазмы, и энергию фотона, и прочие параметры), она используется для общего случая:

$$\sigma = \frac{2\pi r_0^2}{x} \times \left[\left(1 - \frac{4}{x} - \frac{8}{x^2}\right) \ln(1+x) + \frac{1}{2} + \frac{1}{8} - \frac{1}{2(1+x)^2} \right]$$

в нерелятивистском случае ($x \ll 1$):

$$\sigma = \frac{8\pi}{3} r_0^2 (1-x) = \sigma_T (1-x)$$

в ультрарелятивистском случае ($x \gg 1$):

$$\sigma = 2\pi r_0^2 x^{-1} \left(\ln x + \frac{1}{2} \right)$$

где $x = hv/kT_e$

Что может случиться с частицей (электроном) в фазовом пространстве?

Людвиг Больцман предложил рассмотреть, что происходит с частицами.

В фазовом пространстве частица (электрон) характеризуется:

- координатами (x, y, z)
- импульсом (P_x, P_y, P_z)

С частицей могут случиться изменения по:

- времени t
- координате x
- импульсу P

Если предположить, что пространство бесконечно, то d/dx - исключается, остается только измерение по t и P .

Закон сохранения - уравнение Больцмана, которое детализирует - за счет чего меняется плотность фотонов: рассеяние, поглощение, "приход/уход".

$$dn/dt = \text{приход/уход}$$

$$p + \omega \rightleftharpoons p_1 + \omega_1$$

τ - безразмерная величина, характеризующая степень непрозрачности среды для проходящего сквозь неё излучения. Непрозрачность среды обусловлена, в первую очередь, рассеянием, во вторую - поглощением.

Уравнение Компанейца

В Советском Союзе решили испытать ядерную бомбу. Это была необходимость,

так как американцы уже сбросили ядерную бомбу на Хиросиму и Нагасаки. Уже все было готово, но встал вопрос о последствиях испытания бомбы (ещё более мощной, чем американская). Возник вопрос про разогрев атмосферы вследствие мощного взрыва, гамма-рентгеновской вспышки. Возможно ли, что атмосфера разогреется до такой степени, что уйдет от поверхности? Большой состав ученых, в их числе и **Александр Соломонович Компанец**, с помощью уравнения Больцмана для бесконечной среды оценили, что атмосфера греется очень медленно, следовательно, угроза не реализуется. Через много лет, когда материалы были рассекречены, ученые опубликовали свое исследование в виде научной статьи в 1957 году. Теперь это уравнение называется уравнением Компанейца.

Рассмотрим изменение плотности фотонов в фазовом пространстве $n(\omega)$ из-за рассеяния на электронах:

предположим, что $n(\omega)$ является изотропной,

пусть $f_e(p)$ - фазовая плотность электронов с моментом p ,

тогда уравнение Больцмана для $n(\omega)$:

$$\frac{dn(\omega)}{dt} = c \int d^3p \int \frac{d\sigma}{d\Omega} d\Omega [f_e(p_1)n(\omega_1)(1 + n(\omega)) - f_e(p)n(\omega)(1 + n(\omega_1))]$$

приход: $f_e(p_1)n(\omega_1)(1 + n(\omega))$

уход: $f_e(p)n(\omega)(1 + n(\omega_1))$

Уравнение Фоккера-Планка

Уравнение Компанейца является частным случаем - уравнением для фотонов, рассеивающихся на нерелятивистских электронах с тепловым рассеянием, **Адриан Фоккер** и **Макс Планк** написали более общее уравнение. Когда электроны нерелятивистские, относительная передача энергии при одном рассеянии является небольшой. В частности, уравнение Больцмана может быть разложено в ряд до второго порядка по этой малой величине, давая приближение, называемое уравнением Фоккера-Планка. Макс Планк в юности выбирал между музыкой и физикой, он считал, что к этому времени в физике уже были достигнуты все вершины, все разгадано, в итоге М. Планк стал отцом квантовой механики.

Для нерелятивистских электронов с "тепловым" распределением, плотность в фазовом пространстве f_e , где $E = p^2/2m$, дается формулой:

$$f_e(E) = n_e(2\pi kT)^{-3/2} e^{-E/kT}$$

где n_e - пространственная плотность электрона

определим безразмерную передачу энергии фотонам:

$$\Delta \equiv \frac{h(\omega_1 - \omega)}{kT}$$

теперь рассмотрим ситуацию, когда передаваемая энергия мала, разложим $f_e(E)$ и $n(\omega_1)$ для этого случая. Например, для $n(\omega_1)$ это разложение до второго порядка имело вид:

$$n(\omega_1) = n\omega + (\omega_1 - \omega) \frac{dn(\omega)}{d\omega} + \frac{1}{2} (\omega_1 - \omega)^2 \frac{d^2n(\omega)}{d\omega^2} + \frac{dn(\omega)}{dt} + \dots$$

далее, полагая $x = \frac{h\omega}{kT}$ - подставляем

$$c \int d^3p \int \frac{d\sigma}{d\Omega} d\Omega [f_e(p_1)n(\omega_1)(1 + n(\omega)) - f_e(p)n(\omega)(1 + n(\omega_1))]$$

Повторные рассеяния на нерелятивистских электронах

Получено уравнение Компанейца до второго порядка по Δ :

$$c^{-1} \frac{dp}{dt} = [n' + n(1 + n)] \iint d^3p \frac{d\sigma}{d\Omega} d\Omega f_e \Delta + \left[\frac{1}{2} n'' + n'(1 + n) + \frac{1}{2} n \right] \iint d^3p \frac{d\sigma}{d\Omega} d\Omega f_e \Delta^2$$

$n' \equiv dn/dx$

Слева - производная по времени, при однократном рассеянии необходима первая часть суммы.

$$F_e(E) = n_e (2\pi kT)^{-2/3} e^{-E/kT}$$

учтем, что электрон отдает энергию фотону, приращение его энергии отрицательное:

$$\frac{\Delta e'}{e'} \equiv \frac{e'_1 - e'}{e'} = - \frac{e'}{mc^2}$$

$$df_e(E)/dE = (-E/kT) n_e (2\pi kT)^{-2/3} e^{-E/kT} = (1/kT) f_e(E)$$

$$d^2 f_e(E)/dE^2 = (1/kT)^2 f_e(E)$$

$$f_e(E) \approx 1 + \Delta + 1/2 \Delta^2$$

Передача энергии при многократных рассеяниях в ограниченной тепловой среде

Когда мы переходим к космическим объектам, то необходимо понимать, что имеются конечные размеры, которые важно учитывать при рассмотрении Галактик, звезд и других объектов. Перейдем от случая бесконечной среды к случаю ограниченной среды - "облака"..

Параметр комтонизации u показывает, каковы условия, при которых процесс рассеяния значительно изменяет полную энергию фотона. Ограничимся рассмотрением ситуаций, при которых применим Томсоновский предел: $\gamma < E/mc^2$

В ограниченной среде можно определить параметр комптонизации y , для оценки того, насколько велико изменение его энергии при прохождении энергии:

$y \equiv$ [средняя энергия, передаваемая при одном рассеянии] \times (количество происходящих рассеяний)

спектральный индекс $\alpha \sim 1/y$

- $x = hv/kT_e$
- $y = 4 \int \frac{kT_e(t)}{m_e c^2} \sigma_T N_e c dt$ - комптонизационный параметр

Уравнение Компанейца переписываем через параметр y , n - эффект отдачи (Комптон-эффект), n^2 - индуцированное рассеяние, dn/dx - эффект Доплера:

$$\frac{dn}{dy} = \frac{1}{x^2} \frac{d}{dx} x^4 \left(n + n^2 + \frac{dn}{dx} \right)$$

$hv, kT_e \ll m_e c^2$

В ограниченной плазменной среде существуют и влияют на формирование спектров процессы двух типов:

- диффузия фотонов по пространству
- диффузия протонов по времени

Фотоны получают и теряют энергию при свободном блуждании в облаке плазмы. Комптонизационный параметр y получает энергию фотонов, получаемую за счет эффекта Доплера при блуждании вдоль случайной траектории за время t .

Граничное условие (наложенное "руками"):

- фотоны не входят в облако плазмы
- для $\tau_0 \gg 1$ среднее число рассеяний $\sim \tau_0^2$, комптонизационный параметр:

$$y \sim 4 \frac{kT_e}{m_e c^2} \tau_0^2$$

Теория переноса излучения

Фотоны, которые подвергаются более, чем одному рассеянию ($N > 1$), независимо от τ облака плазмы, обычно создают диффузионное поле излучения и могут быть описаны в диффузионном (Фоккера-Планка) приближении.

Рассмотрим случай $\tau \gg 1$:

Транспортное сечение Комптоновского рассеяния, усредненное по Максвелловскому распределению:

$$\sigma_{tr} = \frac{\sigma_T}{\lambda_{tr}(v, \Theta)} - \int \left(1 - \frac{v}{v'} \cos \Theta\right) d\sigma_e(v - v')$$

Формула получена Поздняковым Л.А., Соболев И.М. и Сюняевым Р.А.

- $v - v'$ - частота фотонов до и после рассеяния
- Θ - угол рассеяния фотона
- σ_t - Томсоновское сечение и безразмерная температура плазмы

$$\Theta = \frac{kT_e}{m_e c^2}$$

Основные уравнения

В диффузионном (Фоккера-Планка) приближении ($\tau \gg 1$) задача излучения может быть сведена к решению дифференциального уравнения:

$$L_v n + L_t^d n = - \frac{B_0(x, \tau) \lambda_{tr}^{-1}(x\Theta)}{x^3} \quad (1)$$

с соответствующими граничными условиями:

$$L_v = \frac{\Theta \lambda_{tr}^{-1}(x\Theta)}{x^3} \frac{d}{dx} \left[\eta(x\Theta, \Theta) \left(\frac{d}{dx} + E \right) \right]$$

пространственные операторы L_t^d для сферической и плоской геометрий

перепишем (1), используя безразмерные переменные:

- $\tau = \tau_T$ и $x = hv/kT_e$
- $n(x, \tau) = I_v c^2 / 2v^3$ - число заполнения фотонов
- $B_0(x, \tau)$ - исходное распределение источников

Первый член в (1) описывает дисперсию и смещение фотонов из-за эффектов Допплера и отдачи на электронах, второй член - связан с пространственной диффузией.

$$\Phi(x, \tau) = \frac{B_0(x, \tau) \lambda_{tr}^{-1}(x\Theta)}{x^3} = \psi(x) \Gamma(\tau)$$

то есть факториальна по x и τ , решение (1) может быть представлено следующей конволюцией:

$$n(x, \tau) = \int_0^\infty N(x, \tau) R(x, \tau) du$$

$N(x, \tau)$ - решение, зависящее от времени для пространства энергий $x > 0$:

$$\frac{dN}{du} = L, N$$

с начальным условием $N(x,0) = \psi(x)$

$R(\tau, u)$ - решение, зависящее от времени в пространстве энергий $0 \leq \tau \leq 2 \tau_0$ и в τ_0 для сферического облака плазмы:

$$\frac{dR}{du} = L_{\tau}^d R$$

с начальным условием $R(\tau,0) = r(\tau)$

если $r(\tau)$ равно первой собственной функции L_{τ}^d , то $R(\tau, u) = R_1(\tau) \exp(-\beta u)$

Основное решение:

$$n(x, \tau) = n_1(x, \tau) = R_1(\tau) \int_0^{\infty} N(x, u) e^{-\beta u} du = R_1(\tau) N_1(x)$$

Смысл конволюций: процесс получения фотонами энергии и процесс свободного блуждания фотонов через облако плазмы должны рассматриваться независимо друг от друга.

Комптонизационное уравнение сводится к решению стационарного уравнения комптонизации: $L_1 N_1 - \beta N_1 = -\psi(x)$

Статья Сюняева Р.А. и Титарчука Л.Г. "**Комптонизация рентгеновского излучения в облаке плазмы. Типичные спектры**" была издана в 1980 году. Эта работа в 2019 году номинировалась на Нобелевскую премию.

Сохранение числа фотонов

Комптоновское рассеяние сохраняет число фотонов и лишь перераспределяет их по спектру. Поэтому комптонизация в газе с заданной T_e не может сформировать планковский спектр излучения даже за бесконечное время. Сюняев и Титарчук решили стационарное уравнение Компанейца ($\tau \gg 1$)

$$\frac{1}{x^2} \frac{d}{dx} x^4 \left(\frac{dn}{dx} + n \right) = \gamma n - \frac{\gamma f(x)}{x^3}$$

- где $\frac{dn}{dx}$ эффект Доплера
- n - комптон-эффект
- γn - пространственная диффузия фотонов

Коэффициент зависит от геометрии (учитывает сферическую модель аккреции):

$$\gamma = \frac{\pi^2}{3(\tau + 2/3)^2 kT_e}$$

решение при $x_0 \ll x \ll 1$:

$$F_\nu(x) = Cx^{-\alpha}$$
$$\alpha = -\frac{3}{2} + \sqrt{\frac{4}{9} + \gamma}$$

- решение при $x \gg 1$: $F_\nu(x) = Dx^3e^{-x}$ - спектр Вина
- решение при $x \ll 1$: - насыщение в спектре Вина

Если $\tau \leq 1$ и/или $kT_e \leq m_e c^2$, то необходимы численные расчеты методом Монте-Карло.

В статье Позднякова Л.А., Соболев И.М. и Сюняева Р.А. "Comptonization and the shaping of X-ray source spectra: Monte-Carlo calculation" 1983 года:

- дано детальное описание комптоновского рассеяния в тепловой плазме;
- приведены асимптотические формулы, описывающие среднюю длину пробега фотона и силу давления света в максвелловской плазме с учетом релятивистских и квантовых поправок;
- описан двойной комптон-эффект, рассматривается связь между количеством рассеяний, испытанных фотоном в плазме, и его частотой;
- обсуждается угловое распределение и поляризация фотонов, выходящих из аккреционных дисков конечной оптической толщины по томсоновскому рассеянию;
- описана комптонизация излучения в ультрарелятивистской плазме.

Результаты:

- комптонизация низкочастотного излучения облака слаборелятивистской плазмы в зависимости от τ , на рис. 11.3. показан спектр с $\tau = 0,001$;

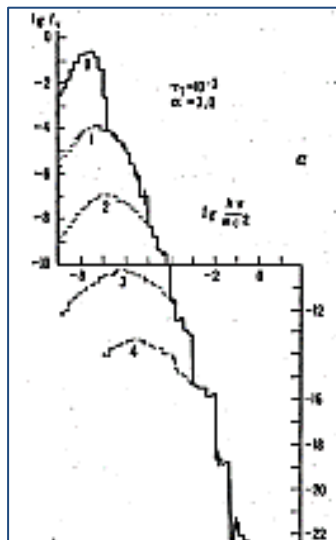


Рис. 11.3. Формирование степенного спектра излучения при рассеянии низкочастотных фотонов на тепловых электронах в облаке плазмы

- Случай немаксвелловского распределения: роль многократного рассеяния в облаке ультрарелятивистских электронов со степенным распределением по энергиям $\gamma^{-\beta} \exp(-\gamma_0/\gamma)$ и разными τ по Томсоновскому рассеянию.

Приложение к наблюдениям и возможная интерпретация в тепловых комптонизационных моделях

Модель XSPEC VMC учитывает многократное рассеивание, имеет 4 параметра:

1. Температура тепловых фотонов диска, которые попадают в область переходного слоя.
2. Спектральный индекс.
3. Параметр А показывает, насколько комптонизируется плазма при данных параметрах температуры и спектрального индекса.
4. Нормировка.

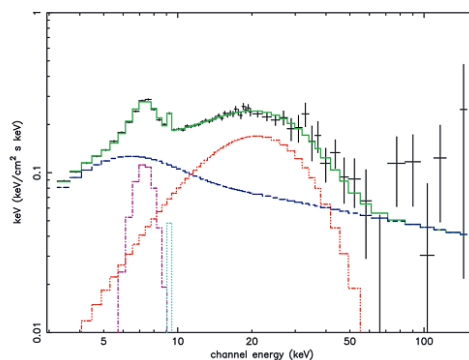


Рис. 11.4. Пример использования модели VMC для фитирования спектра SS 433

Свойства комптонизационных моделей

Изменение профиля линии нейтрального железа при однократном рассеянии. Линия - это фотон, который испускается нейтральным железом. Результаты расчета спектра фотонов монохроматической линии $\nu \approx 6,4$ кэВ $\ll m_e c^2$, испытавших одно рассеяние на тепловых электронах. При низких температурах электронов T_e фотоны из-за эффекта отдачи сдвигаются в сторону низких частот, отдавая свою энергию электронам.

Для $kT_e = 1$ эВ становится заметным влияние эффекта Доплера на профиль линии. При дальнейшем повышении kT_e эффект Доплера уширяет линию, но её "центр тяжести" по-прежнему смещается в сторону низких частот. Только правое крыло линии после рассеяния становится мощнее левого, то есть электроны в среднем передают свою энергию излучению, при этом охлаждаясь. На рис. 11.5. показано изменение профиля рентгеновской линии железа $h\nu_0 \approx 6,4$ кэВ после одного рассеяния фотонов на тепловых электронах с заданной температурой. По вертикальной оси - число фотонов в единичном интервале энергий, по горизонтальной - энергия фотонов (кэВ). Ступенчатость кривых обусловлена методом расчёта Монте-Карло.

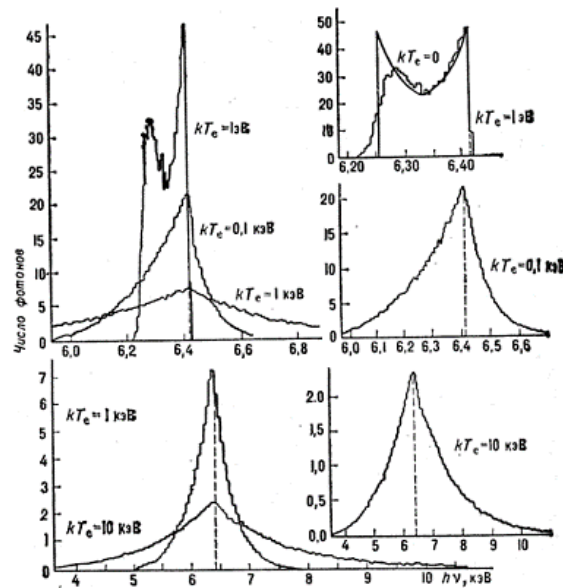


Рис. 11.5. Профиль рентгеновской линии железа после одного рассеяния фотонов на тепловых электронах с заданной температурой

- Изменение формы линии железа после рассеяния на максвелловских электронах происходит в зависимости от энергии kT_e : 1 эВ, 0.1 кэВ и 1 кэВ. При самом небольшом значении 1 эВ - происходит самое сильное видоизменение линии. Для наблюдения подобного эффекта необходимо хорошее разрешение.
- Изменение формы линии железа по τ : профиль линии железа 6,4 кэВ, идущей из облака плазмы с $kT_e=0$ кэВ и разными оптическими глубинами τ показывает различную форму линии.
- Слабо релятивистская и релятивистская плазма: профиль линии железа 6,4 кэВ после однократного рассеяния при kT_e от 0.1 МэВ до 5 МэВ - показывает наибольшее изменение при $kT_e = 0.1$ МэВ.

Предельные случаи рассеяния вперед и назад: симметричная двугорбая кривая, соответствующая $kT_e = 0$, отражает свойства рэлеевской индикатрисы рассеяния (вероятность рассеяния максимальна для рассеяния вперед и назад). При рассеянии вперед изменение частоты минимально, а при рассеянии назад - максимально.

Формирование степенного спектра излучения при рассеянии низкочастотных фотонов

Изменение частоты фотонов с $h\nu \ll m_e c^2$ при рассеянии на тепловых электронах с $kT_e \ll m_e c^2$ очень мало, но многократное повторение рассеяний и малого обмена энергией между электронами и фотонами приводит к значительным эффектам. Формирование степенного спектра излучения при рассеянии низкочастотных фотонов с

$h\nu_0=10^{-8}m_e c^2$ на тепловых электронах с $kT_e = 0,5 m_e c^2$ ($m_e c^2 = 250$ кэВ). На рис. 11.3. показаны вклады отдельных рассеяний (прерывистые линии, цифры рядом с ними - число рассеяний) в облаке плазмы. Наклон спектра тем меньше, чем больше оптическая толщина облака.

В результате $m_e c^2 / h\nu_0$ рассеяний на холодных электронах фотон может потерять (передать электронам) значительную часть своей энергии. Достаточно примерно $m_e c^2 / 4kT_e$ рассеяний низкочастотного фотона на горячих ($kT_e \gg m_e c^2$) электронах, чтобы его энергия стала порядка kT_e . При этом электроны охлаждаются.

Комптонизация в компактных источниках рентгеновского излучения

В компактных рентгеновских источниках спектр излучения обычно формируется в облаке высокотемпературной плазмы сравнительно малой оптической толщи по томсоновскому рассеянию $\tau \sim 1-10$.

Источниками низкочастотных фотонов в облаке плазмы могут быть:

- излучение более плотных облаков;
- собственное тормозное излучение;
- циклотронное излучение электронов в сильном магнитном поле;
- двойной комптон-эффект;
- излучение внешних источников.

Результирующий спектр является степенным, потому что фотоны диффундируют в облаке. В среднем они испытывают в нём примерно $\bar{U} \sim \tau^2$ рассеяний, но существует конечная вероятность испытать намного большее число рассеяний U , чем среднее (\bar{u}), и сильно изменить свою энергию вследствие комптонизации. Механизм увеличения энергии фотонов напоминает статистический механизм ускорения космических лучей, предложенный Ферми. И в том и в другом случае формируется степенной спектр (в одном случае - излучения, в другом - космических лучей).

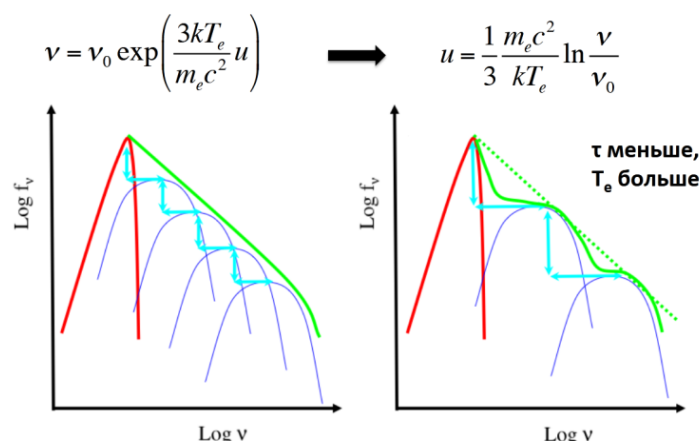


Рис. 11.6. Профиль рентгеновской линии железа после одного рассеяния

В результате многократных рассеяний низкочастотных фотонов на тепловых электронах формируется степенной спектр, то есть интенсивность излучения $I_\nu \sim \nu^{-\alpha}$, где α - спектральный индекс. Спектр, формирующийся в результате индивидуального рассеяния, имеет характерный экспоненциальный завал (уменьшение интенсивности), но результирующий спектр - сумма всех рассеяний - оказывается степенным. На рис. 11.6. показан исходный спектр (красный), после каждого последующего рассеяния (синяя линия), отмечен результирующий спектр - степенная функция (зеленая линия). Лишь тысячная доля фотонов испытывает одно рассеяние в облаке, миллионная - два, миллиардная - три.

- энергия фотонов увеличивается за счёт эффекта Доплера до тех пор, пока $h\nu < 4kT_e$, при $h\nu > 4kT_e$, доминирует эффект отдачи;
- совместное действие двух эффектов формирует виновский завал спектра $I_\nu \sim \nu^3 \exp(-h\nu/4kT_e)$;
- в области $h\nu_0 > h\nu > kT_e$ (где ν_0 - характерная частота низкочастотных фотонов источника) спектр излучения, выходящего из источника, является степенным с $\alpha = -3/2 + \sqrt{9/4 + \delta}$, где $\delta = \pi^2 m_e c^2 / [3kT_e(\tau_T + 3/2)^2]$

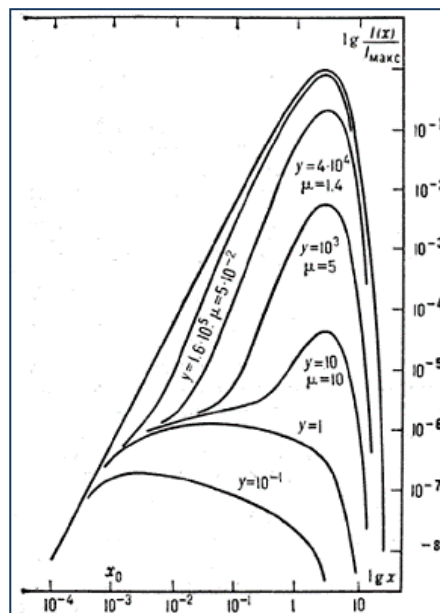


Рис. 11.7. Формирование планковского спектра при совместном действии тормозных комptonовских процессов

Теоретический спектр, формирующийся в результате комптонизации (рис. 11.8.): сплошная кривая построена в соответствии с теорией комптонизации для $\delta = 2$, $\alpha = 0,57$, $kT_e = 26,5$ кэВ, она прекрасно согласуется с наблюдаемым жёстким спектром рентгеновского излучения от источника Syg X-1 (рис. 11.1.) - известного кандидата в чёрные дыры. Сравнение данных наблюдений с теорией позволило определить

температуру электронов $kT_e = 26,5$ кэВ в зоне аккреционного диска, где формируется рентгеновское излучение, и оптическую толщину диска относительно томсоновского рассеяния $\tau_T = 4$. Новые наблюдения источника *Syg X-1* позволяют с помощью фитирования получить изменение температуры в процессе вспышки.

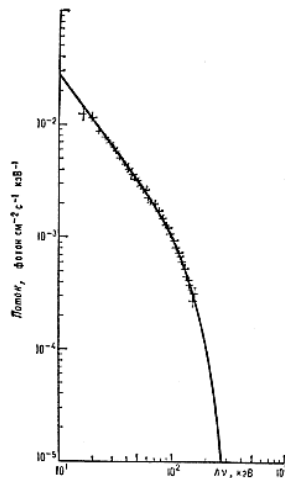


Рис. 11.8. Спектр излучения Syg X-1, экспериментальные точки получены при балонных наблюдениях

Линейная поляризация жесткого рентгеновского излучения: поверхностная плотность вещества в диске оказалась 10 г/см^2 . Комptonизация излучения в аккреционных дисках сопровождается характерной линейной поляризацией жесткого рентгеновского излучения. Степень поляризации зависит лишь от τ_T и угла наклона диска.

Применение модели ВМС для аппроксимации рентгеновских спектров черных дыр позволило установить спектральные признаки черных дыр и нейтронных звезд. Для черных дыр звездной массы, сверхмассивных черных дыр, черных дыр промежуточной массы была описана форма спектра в одной комptonизационной модели. С помощью комptonизационной модели можно описать форму спектра от атомного взрыва - до взрыва сверхновых.

Лекция 12. Активные ядра галактик. Блазары

Классификации галактик

Сегодня лекция посвящена активным ядрам галактик и блазарам. Сначала будут рассмотрены активные ядра, чтобы понять, какие у них особенности в рентгеновском диапазоне, как они вписываются в контекст курса.

Активные ядра галактик - ядра, в которых происходят процессы, сопровождающиеся выделением большого количества энергии, не объясняющиеся активностью находящихся в них отдельных звёзд и газовой-пылевой комплексов. Активность больше связана с центральным источником. Части, прилежащие к активным областям, тоже подвергаются некой активизацией.

Классификация галактик по Хаббл

В честь американского астронома **Эдвина Хаббла** были названы телескоп и лунный кратер. Ученый изучал и классифицировал галактики, в итоге он создал классификацию, разложив их в следующем порядке:

- эллиптические галактики
- линзовидные галактики
- спиральные галактики
- спиральные галактики с барами (перемычками)

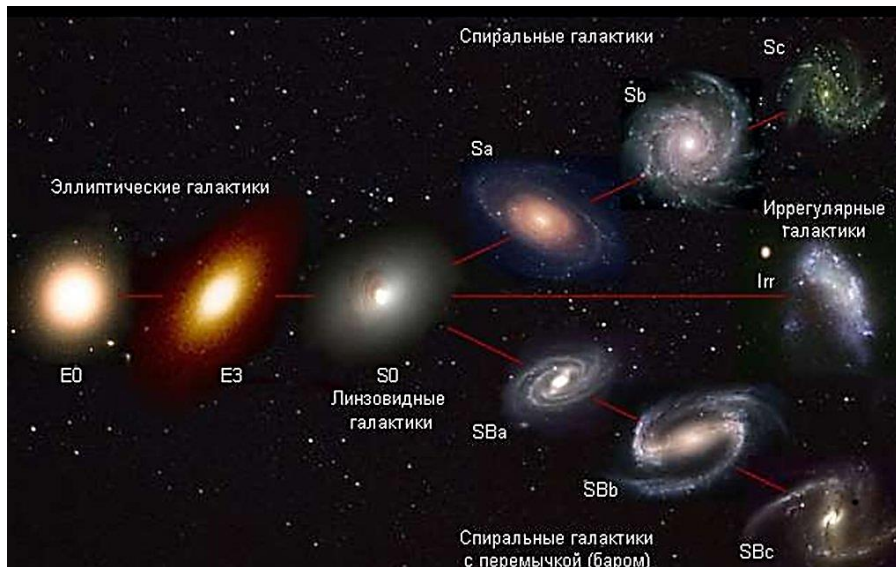


Рис. 12.1. Классификация галактик Э. Хаббла

В своей морфологической классификации (учитывающей форму галактик) Хаббл придал галактикам эволюционный статус. От простой формы они видоизменялись к более сложной эллиптической, далее в процессе развития у

галактики появляются спиральные рукава, затем балджи. Когда ученые получили возможность измерять массу галактик - были обнаружены несоответствия изменений в галактиках, а также причин вращения галактик на некоторых этапах эволюции. Было определено, что каждая галактика стартует со своего собственного начального состояния, которые не связаны. Таким образом, классификация Э. Хаббла является условной. В настоящее время предложено множество классификаций галактик. Вместе тем, названия галактик "эллиптическая", "линзовидная" активно используются. Эллиптическими называют галактики ранних классов; спиральные, с баром и обычные спиральные галактики - поздними.

Морфологическая классификация Хаббла по форме не учитывает характера поведения галактик. Они бывают относительно спокойными, например, как наша галактика, а бывают чрезвычайно изменчивыми. Галактики также различаются по виду распределения энергии в спектральных диапазонах.

Активное ядрообразование

Активное ядрообразование - одно из проявлений активности ядерных областей (которое не учитывал Хаббл). Из очень небольшой области в центре галактики "выплескивается" поток энергии, сравнимый с излучением ста миллионов или ста миллиардов таких звезд, как Солнце. Излучение переменное, без четкого периода, на различных временах: часы, месяцы, годы. Отмечается необычно высокая мощность излучения в самых различных интервалах длин волн - от радио до гамма-лучей. Часто наблюдается выброс мощных струй плазмы и релятивистских электронов. Эксперимент проекта "Горизонт событий" (Event Horizon Telescope, ЕНТ) показал, что центральная часть галактики М87 является черной дырой.

Джеты - это струйный выброс материи, который расширяется, распределяясь по пространству, по вакууму. Джеты имеют струйную форму и выдерживают её размеры на значительных масштабах. В радиодиапазоне струи проявляются сильнее. Телескоп Хаббл практически не показывает джеты (только в оптическом излучении), при этом они отчетливо видны в рентгеновском диапазоне телескопа Chandra (при более прицельном снимке), радиотелескоп VLA также показывает отчетливое изображение.

Ядро Галактики имеет массу порядка $\sim 10^7 \div 10^8$ масс Солнца (черные дыры звездной массы имеют массу 5-10 масс Солнца). Оно окружено газовыми облаками, распространяющимися на расстояние до 150 пк от центра. Размер самого ядра меньше 10 пк, его центральной части ("ядрышка") ~ 10 -4 пк. Когда были накоплены наблюдения, повысилась точность - была определена степень компактности центральной части ядра, которая ранее позволяла предположить, что источник в центре - черная дыра. Процессы, протекающие в ядрах, не могут быть объяснены свойствами только сконцентрированных в них звезд и газа. 1% нормальных галактик имеет активные ядра. Нестационарность ядер проявляется в генерации мощного рентгеновского, ультрафиолетового, инфракрасного и радиоизлучения в выбросах облаков радиоизлучающей плазмы, в ускорении газовых облаков и т.д.

Четыре основных типа галактик с нестационарными ядрами:

- **Сейфертовские галактики** – характерно наличие широких эмиссионных линий в оптическом спектре.
- **Радиогалактики** - обладают мощным радиоизлучением, сравнимым с их оптическим излучением, а часто превышающим его.
- **Лацертиды** получили свое название от объекта BL Lac, в каталоге переменных звезд характеризуются оптической переменностью с большой амплитудой (до 4-5m), переменным радиоизлучением и заметной поляризацией излучения. Ранее отмечалось отсутствие эмиссионных линий, с накоплением наблюдений они были обнаружены. Галактики имеют вид звездоподобных объектов, окруженных туманным облаком.
- **Квазары** - точечные источники излучения (как и лацертиды). У близких квазаров обнаружены слабые туманные оболочки, спектры которых позволяют считать квазары ядрами далёких галактик.

Излучение ядра составляет значительную часть излучения галактик:

- в широком интервале длин волн излучение ядра является нетепловым и избыточным по сравнению с нормальными галактиками в ультрафиолетовой, инфракрасной, радио и рентгеновской областях;
- излучение ядра, как правило, переменное;
- в спектре ядра присутствуют широкие эмиссионные линии.

Данная классификация более физическая, она учитывает информацию о спектре галактик. В радиодиапазоне детектируется квазар 3C 175 ($z = 0,768$), на изображении объект виден как точка с выбросами.

Квазары, радиогалактики и сейфертовские галактики - очень массивные объекты:

		$L_g (M/M_\odot)$	$L_g (L, \text{эрг/сек})$
Квазары:	• 3C 273	8,7	47,3
	• 3C 48	8,95	46,65
Радиогалактики:	• 3C 120	8,4	45,0
	• 3C 390,3	8,95	45,02
Сейфертовские галактики I типа	• NGC 1275	7,0	44,7
	• NGC 4151	7,7	44,72
	• NGC 3227	6,9	43,0
	• Маркарян 205	8,2	45,0
Сейфертовские галактики II типа	• Маркарян 1	7,7	43,5
	• NGC 1068	9,1	44,3

Сейфертовские галактики

В 1943 году американский астроном **Карл Сейферт** обнаружил галактики с необычными свойствами. В спектрах этих галактик присутствовали яркие и очень широкие эмиссионные линии. Дисперсия скорости движения, обеспечивающего столь значительное расширение линий, составляла тысячи, а порой десятки тысяч км/сек. Эти галактики имели очень яркое и компактное ядро. К. Сейферт обнаружил 12 галактик с подобными свойствами.

По виду спектра Сейфертовские галактики делят на два класса:

- **Сейфертовские галактики I типа** - разрешенные спектральные линии имеют ширины, соответствующие доплеровским скоростям в несколько тыс. км/с, тогда как запрещенные линии уже, их ширины соответствуют скоростям источников в несколько сотен тыс. км/с. Яркие в рентгене.
- **Сейфертовские галактики II типа** - имеют как разрешенные, так и запрещенные линии одинаковой ширины, отвечающие скоростям движения до тысячи км/с. Слабые в рентгене.

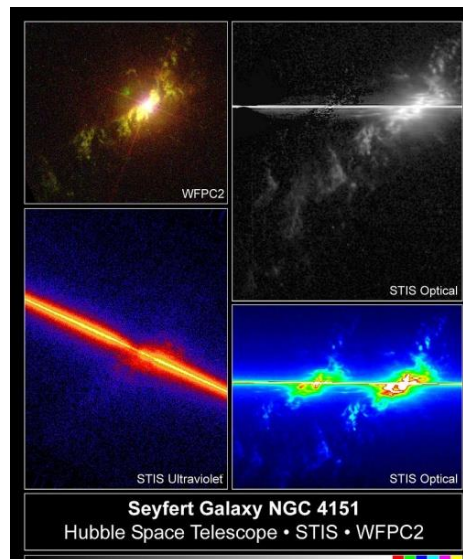


Рис. 12.2. Выбросы газа из ядра Сейфертовской галактики NGC 4151

Выбросы газа из ядра NGC 4151 в оптическом диапазоне и ультрафиолете показаны на рис. 12.2.

Радиогалактики

- Высокая светимость радиогалактик в радиодиапазоне 10^{42} - 10^{44} эрг/с (при том, что они очень далеко расположены).
- Радиоизлучение связано с выбросом потоков релятивистских электронов из ядра.

- В основном эллиптические галактики.
- **Broad Line Radio Galaxies** с широкими эмиссионными линиями как у Сейфертовских галактик I типа).
- **Narrow Line Radio Galaxies** с узкими эмиссионными линиями как у Сейфертовских галактик второго II типа).

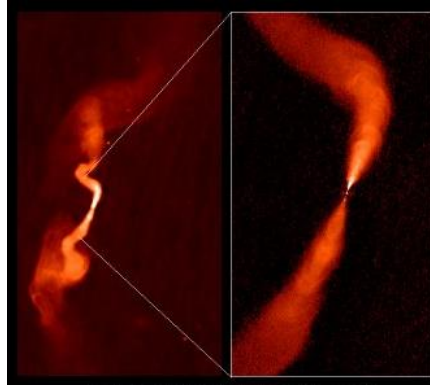


Рис. 12.3. Двойная радиогалактика 3C31

Двойная радиогалактика 3C 31 (NGC 383) показана на рис. 12.3, виден изгиб струи вещества вследствие течения, многократное изгибание вещества (слева). Это явление труднообъяснимо, возможно, это результат прецессии. Если источник не является стационарным, а переменным (вращается, диск прецессирует), то перпендикулярно плоскости диска выбрасывается струя вещества. Следовательно, в процессе прецессии струя будет навиваться на конус, потому что вещество выбрасывается каждый раз под определенным углом с разным временем выброса. В проекции на картинную плоскость образуется подобное изображение. В зависимости от угла расположения к земному наблюдателю она будет различной.

Квazarы

Квazarы - квазизвездные объекты (сокращенно – QSO, от англ. quasi-stellar звездообразные), это самые мощные и долговременные источники излучения во Вселенной.

- Высокая светимость 10^{42} - 10^{44} эрг/с, в основном в оптическом и рентгеновском излучении.
- Широкие и узкие эмиссионные линии в оптическом спектра.
- Родительская галактика чаще всего эллиптическая, реже встречается спиральная.
- Активная фаза порядка 100 млн. лет.

Блазары

Блазары - экстремальные представители активных ядер галактик, существует более 3 тыс. блазаров.

- Характеризуются непрерывным спектром во всех диапазонах от гаммы до радио.
- Родительские галактики блазаров чаще всего гигантские эллиптические.

На основе спектров блазары разделяют на два подкласса:

1. BL Lacertae

- оптический спектр BL Lacs без особенностей, относительно других AGN, например, квазаров.
- сильная оптическая поляризация ($> 3\%$ до 60 - 70% во время вспышек)
- быстрая переменность по светимости во всех диапазонах спектра (порядка суток).

Эффекты:

- Чем больше масса черной дыры, тем дольше будет время переменности, в данном случае масса составляет 10^8 масс Солнца, при суточной переменности. Причиной может являться эффект прожектора: джет может состоять из кластеров, которые способны менять свою светимость из-за направления, а поскольку скорости релятивистские, все излучение будет вплеснуто в направлении движения релятивистского облака. Если представить, что облако излучает в покоящейся системе координат изотропно во все стороны, то если оно будет двигаться вперед с небольшой скоростью - ничего не изменится. Если с очень большой (близкой к скорости света), то постепенно излучение схлопывается вперед - это релятивистский эффект прожектора. Если вещество будет двигаться со скоростью света, то оно сконцентрируется в луч. Когда луч попадает в наше поле зрения, то мы видим только его, если он отходит - мы больше ничего не видим вообще.
- Необходимо учесть размер ядра, в центре квазаров находится черная дыра с компактными размерами, взаимодействующее с ней вещество также будет компактным, самые близкие к черной дыре области будут самыми яркими, отсюда время переменности может быть незначительным.

2. FSRQ (flat spectrum radio quasars)

- оптический спектр с эмиссионными линиями
- наблюдается не только быстрая (порядка суток), но и сильная амплитудная переменность (около 10% и до 50% от полной светимости)

Лацертиды

Лацертиды - немногочисленная группа галактик с активными ядрами. BL Lacertae наблюдался в 1929 году немецким астрономом Куно Хофмейстером в

созвездия Ящерицы (Lacertae), первоначально объект был отнесен к переменным звездам (z BL Lac $\sim 0,07$).

- У лацертид оптические спектры, как правило, являются непрерывными, поэтому обнаружение красного смещения весьма затруднено. Блеск лацертид изменяется в широких пределах.
- Излучение лацертид сильно поляризовано (до 30 - 40 %), что указывает на присутствие магнитного поля.
- Лацертиды окружены туманными оболочками (подобно квазарам).
- Характерное время переменности составляет недели и месяцы.

Гипотезы относительно природы активности ядер

Активность ядер нельзя объяснить только активностью отдельных элементов или звезд в газопылевом диске, для объяснения существовало несколько гипотез, в настоящее время доминирует одна:

- Ядра – это диски ультрагорячей замагниченной плазмы вокруг сверхмассивных черных дыр ($< 10^6$ масс Солнца).
- Активное ядро = сверхмассивная черная дыра + потоки падающего на нее газа.
- Источник энергии - гравитационное поле, преобразующее потенциальную энергию падающего газа в кинетическую и тепловую (как и в черных дырах звездной массы).

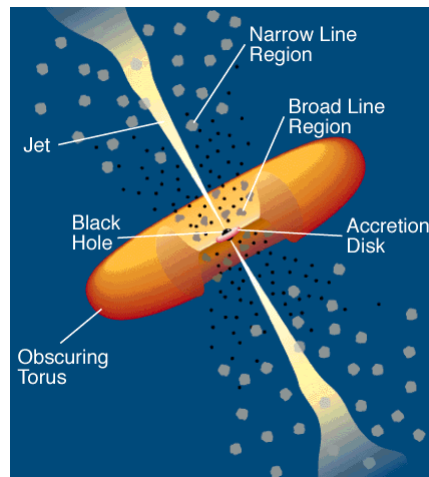
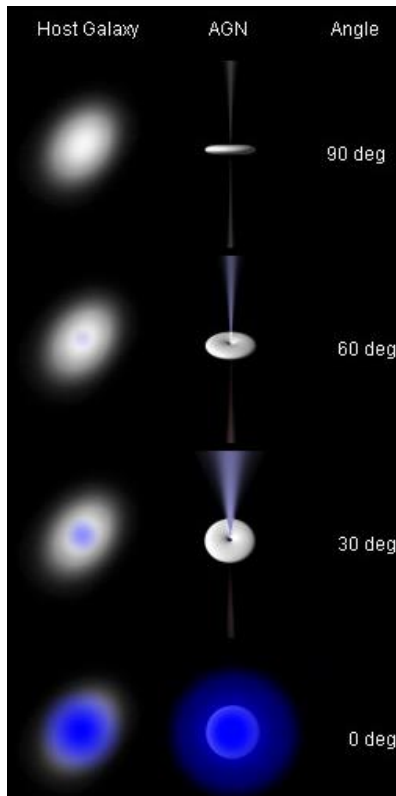


Рис. 12.4. Анатомия активного галактического ядра

На модели активного галактического ядра в центре находится черная дыра, она окружена газопылевым диском, показаны вырывающиеся jet - джеты, которые окружены некоторой оболочкой, отмечены Broad Line Region - область излучения широких линий, Narrow Line Region - область излучения узких линий (рис. 12.4.). Узкие

линии, возможно, формируются небольшой области около черной дыры, но они будут потеряны при прохождении через дальнейшую плотную среду - корону над диском, в которой остаются только широкие эмиссионные линии. При объяснении различных свойств необходимо учесть эффект ориентации: черная дыра, аккреционный диск и джеты могут быть по-разному расположены к земному наблюдателю.

Разнообразие наблюдательных свойств активных ядер галактик



→ при видимости диска с ребра под углом 90 градусов от джета, он закрывает самую яркую часть черной дыры, объект видится более тусклым;

→ при 60 градусах диск открывается, видно его внутреннюю часть, джет смещается в направлении земного наблюдателя;

→ при 30 градусах происходит существенное раскрытие диска и увеличение видимости джета - Сейфертовская галактика;

→ полностью раскрытый источник - блазар.

Рис. 12.5. Модель наблюдаемых свойств диска и джета при различных углах зрения

Модель, которая объясняет практически все случаи, показывает газопылевой диск вокруг черной дыры, снизу обозначены случаи, когда активные ядра галактик не испускают джет, справа - все варианты с наличием джета (рис. 12.6.):

- Сейфертовские галактики I типа - наблюдатель смотрит практически с полюса, под углом, при котором наилучшим образом видна центральная часть источника. Объект в рентгене яркий.
- Сейфертовские галактики II типа - луч зрения проходит через тело диска, самая яркая часть источника не видна. Объект в рентгене слабый или не виден.
- Самые яркие среди галактик, которые содержат явления струйных выбросов (джеты), показаны в верхней части схемы - это блазары.

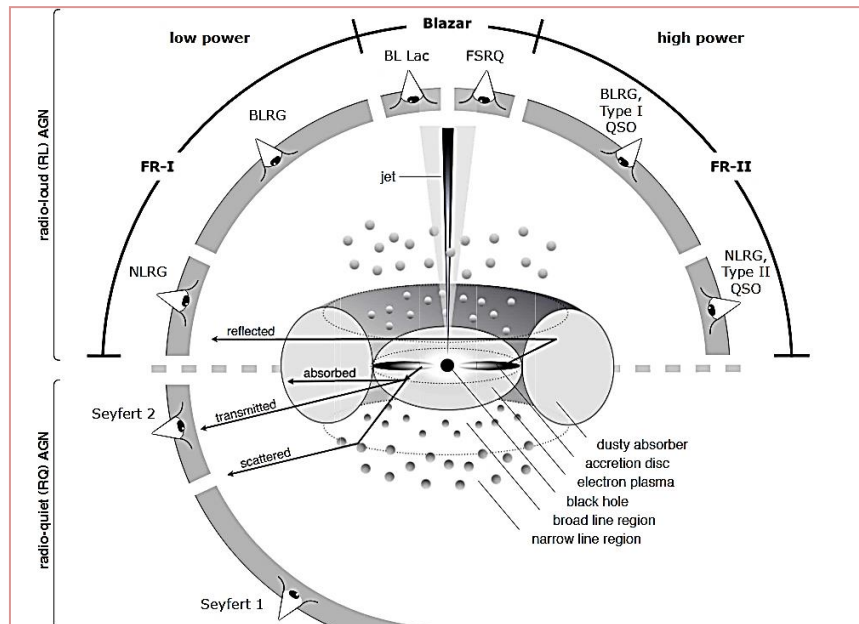


Рис. 12.6. Схематическое изображение феномена активных ядер галактик в единой схеме

Левая часть схемы отражает низкую мощность, правая - высокую. В верхней половине схемы отражена классификация радиогалактик Фанарова-Райли, в верхней левой части - галактики I типа (FR-I), в правой - II типа (FR-II).

- галактики I типа (FR-I): Broad Line Radio Galaxies (BLRG), Narrow Line Radio Galaxies (NLRG)
- галактики II типа (FR-II): квазары с широкими линиями, квазары с узкими линиями.

Вспышки как способ исследования объектов

Во время вспышек объекты показывают самые характерные свойства, исследователям предоставляется возможность измерить их массу методом скалирования.

Переменность галактик, в том числе и Сейфертовских, в рентгеновском диапазоне ранее считалась характеризующейся спектральным индексом, современные работы показали зависимость от переменности источника (Шан-Шан Венг, 2020). В Сейфертовских галактиках I типа корреляция между Γ и L_x/L_{Edd} при аппроксимации модели моделью power-law для всех галактик показывает изменение среднего индекса Γ от 1,5 до 2,5. Вспышка видна за счет активности ядра галактики, объект меняет свое спектральное состояние.

Насыщение индекса в Сейфертовских галактиках на примере объекта NGC 4051 NLRG (скалирование с объектами Cygnus X-1 и GRO J1655-40 - черными дырами звездной массы) дало оценку массы $M_{\text{BH}} = 6 \cdot 10^5$ масс Солнца (нижний предел). В

настоящее время известно, что множество галактик эволюционируют, во время вспышек показывая насыщение индекса. Таким образом, насыщение индекса показывают не только черные дыры звездной массы, но и сверхмассивные черные дыры. Таким образом, признак насыщения является универсальным вне зависимости от массы объекта, хотя отождествление невозможно, не представляется возможным определить насколько одинаковая природа у черных дыр.

Модель "джет в джете"

Излучающая газообразная среда в релятивистском джете разделена на множество элементов, которые двигаются в хаотичном направлении с релятивистскими скоростями относительно средней системы джета. Каждый элемент является источником излучения в направлении его движения. Только небольшая часть элементов излучает в направлении наблюдателя, в результате релятивистских эффектов яркость излучения источника растет. Эта модель объясняет большую видимую светимость и быструю переменность блазаров. Обычно рассматривают две модели "джет в джете", модели похожи, но отличаются в деталях, которые становятся важны в случае экстремальных объектов:

1. Предполагается, что внутри джета происходит перезамыкание магнитных силовых линий внутри среды джета. Каждое замыкание создает спаренные релятивистские элементы, движущиеся в противоположных направлениях вдоль магнитного поля. Продолжительность времени импульсов в наблюдаемой кривой блеска определяется размерами уплотнений в джете. Роль релятивистского эффекта - обеспечить увеличение светимости.
2. Модель турбулентности: предполагается, что нестабильность среды внутри джета приводит к релятивистским беспорядочным движениям внутри элементов. В результате продолжительность вспышек определяется размерами этих элементов.

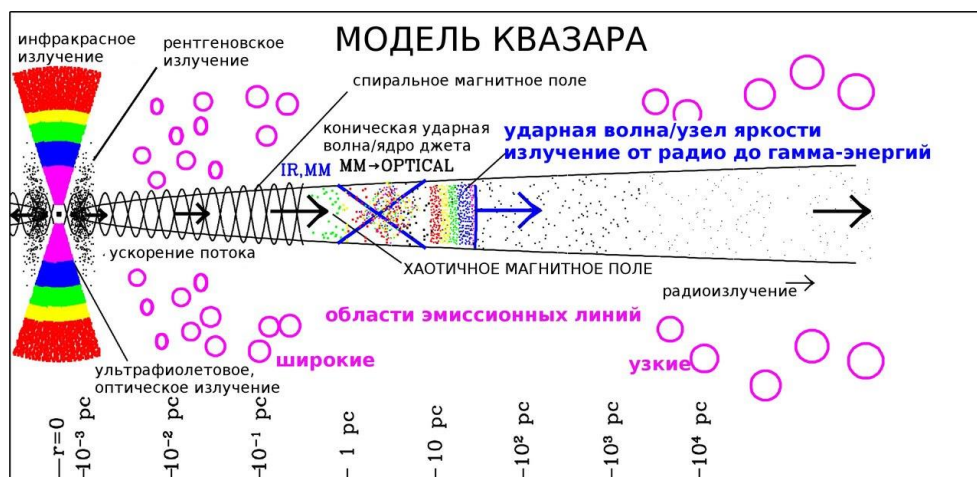


Рис. 12.7. Схема ультрарелятивистского джета в активных ядрах галактик

На рис. 12.7. показана схема ультрарелятивистского джета в активных ядрах галактик, иллюстрирующая приблизительное расположение мест его ускорения и образование излучения. Шкала расстояний дана в логарифмическом масштабе. Концентрированность джета характеризуется гидродинамической фокусировкой: джет прорывается через мощную среду, образуя канал, устойчивые границы которого держат джет. Если бы не было магнитного поля, то джет рассеялся бы с высокой скоростью.

BL lac B 2200+420

При исследовании блазара BL lac B 2200+420 были использованы данные телескопов *BeppoSAX*, *RXTE*, *Chandra*, *Swift* и *Suzaku*. Диаграмма жесткости рентгеновского спектра показывает эволюцию LH и HS состояний. Изменения формы спектра до вспышки, во время вспышки и после неё показывает примерно то же самое, что показывают черные дыры звездной массы, особенно в максимуме вспышки (тепловое излучение, которое исходит от диска).

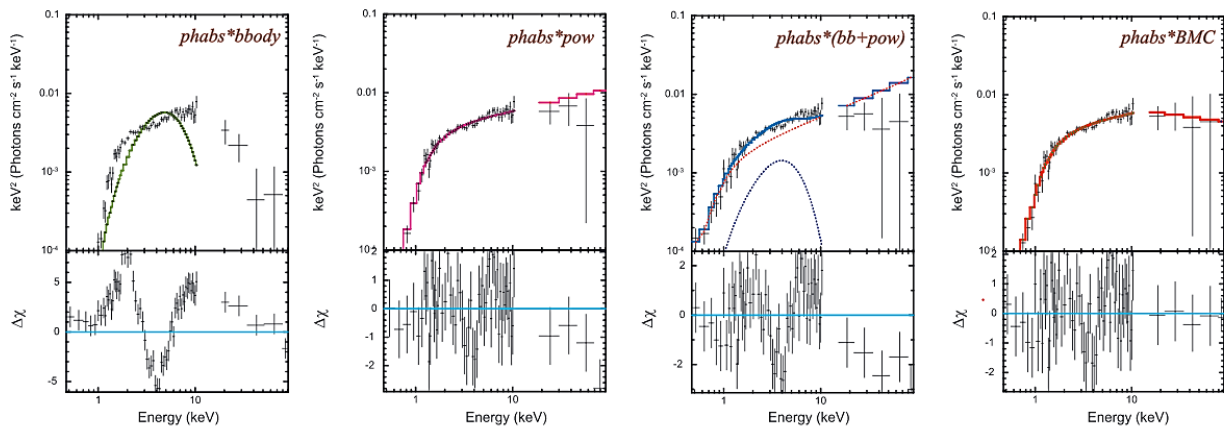


Рис. 12.8. Спектры BL Lac, наблюдаемые с помощью *BeppoSAX*

Произведен подбор моделей:

- **phabs*bbbody** (зеленая линия) - спектр демонстрирует плохую аппроксимацию
- **phabs*powerlaw** (фиолетовая линия) - добавлено межзвездное поглощение, модель описывает достаточно хорошо, но черные кресты показывают, что реальный спектр объекта имеют "завал"
- **phabs*(bbbody + powerlaw)** (голубая линия) - левая часть спектра моделью описывается хорошо, на правой осталась проблема предыдущей модели
- **phabs*BMC** (красная линия) - модель дала лучшее описание.

При применении модели **phabs*BMC** ко всем наблюдениям объекта и сопоставлении с радионаблюдениями была обнаружена корреляция (известно, что только в квазарах можно обнаружить корреляцию радио с рентгеном).

Антикорреляция радио/рентгеновского излучения объекта во время активных состояний: два рентгеновский диапазона (230 GHz и 345 GHz) показывают, что BL lac идет на вспышку, по этим датам рассмотрены рентгеновские данные спутника Swift, которые демонстрируют снижение активности источника. Таким образом, во время очень мощной вспышки детектируется максимум в рентгене и минимум в радиодиапазоне.

- Жесткость спектра BL lac в разных диапазонах (3-10, 10-20 и 20-30 кэВ) демонстрирует, что излучение постепенно падает вместе с ростом индекса, на значении 0,3 - 2,5 кэВ - возрастает. Именно блазары могут давать подобные эффекты.
- По данным всех 4-х спутников обнаружена длинная фаза насыщения индекса в спектре BL lac, следовательно, в центре активного ядра галактики - блазаре находится источник мощного излучения - черная дыра.

Оценка массы черной дыры в BL lac методом скалирования в сравнении с черными дырами звездной массы (GX 339-4 и 4U 1543-47), индекс 2,3 (рис.12.9). Получена масса объекта 3×10^7 масс Солнца, что согласуется с оценками массы, определенной другими методами.

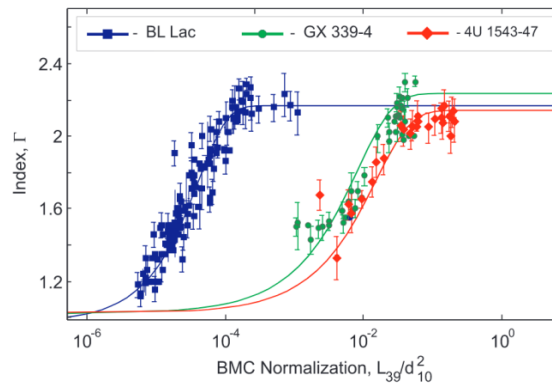


Рис. 12.9. Скалирование с нормализацией ВМС для BL Lac

Блазар 3C 454.3

Блазар 3C 454.3 расположен вдали от плоскости Галактики в созвездии Пегас, он является одним из наиболее ярких источников гамма-излучения и объектом с наибольшей светимостью, когда-либо наблюдавшейся.

Основные параметры

- расположен на расстоянии 7,7 млрд. световых лет (2,4 млрд. пс)
- масса: $M = (0,5 - 1,5) \times 10^9$ масс Солнца
- видимая звездная величина в спокойном состоянии: 16,6
- периодически испытывает вспышки

Наиболее мощная вспышка 3C 454.3 произошла в 2014 году, сильная вспышка в гамма диапазоне была зафиксирована в 2007 году, спустя два года после рекордной вспышки в оптическом диапазоне. Рекордный всплеск коррелирует с радио и рентгеновскими данными. Отмечено запаздывание сигнала в разных диапазонах спектра источника.

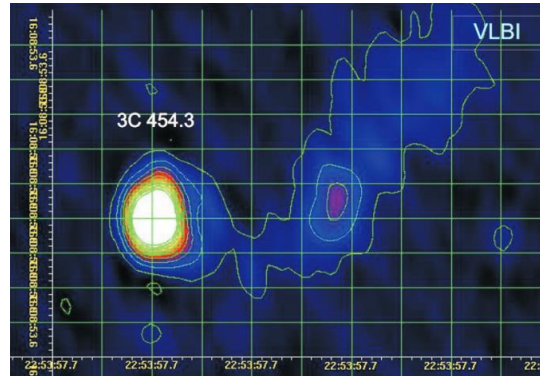


Рис. 12.10. Адаптивно сглаженное VLBI-изображение радиоизлучения поля 3C 454.3

Модель, когда вспышка детектируется последовательно в гамма \rightarrow рентген \rightarrow радио диапазонах - вписывается в модель постепенно охлаждающейся струи. Можно было бы предположить, что это струя джета, но более предпочтительно объяснение активностью переходного слоя диска, так как проведенный учет влияния джета (по данным Chandra в рентгене) показал, что джет очень слабый и расположен на 20° от луча зрения. Изображение в радиоизлучении показывает активный джет (рис. 12.10.).

- Стыковка спектров по данным Swift (диапазон 0,2 - 5 кэВ) и RXTE (диапазон 3 - 15 кэВ) показала схожую динамику в низком/жестком состоянии (LHS, до вспышки или в начале вспышки).
- Рентгеновский спектр Swift с применением модели $\text{trphabs}^*\text{VMC}$ продемонстрировал наилучшую аппроксимацию промежуточного состояния (IS), полученные параметры: $\Gamma = 1,63 \pm 0,1$ и $T_s = 280 \pm 20$ эВ.
- Данные спутника Suzaku: характерные спектры 3C 454.3 для низкого/жесткого состояния (LHS) и для промежуточного состояния (IS). Эволюция рентгеновского спектра достаточно медленная.
- Chandra позволяет вырезать узкую область для оценки < 1 сек. дуги, что позволяет исключить влияние джета, использована модель $\text{trphabs}^*\text{VMC}$, показаны два характерных EF (E) спектра 3C 454.3.

Переменность 3C 454.3 во время вспышки: источник может вспыхивать с периодом в 5-10 лет, за период 1996-1997 год отмечалась ярко выраженная переменность, что, скорее всего, явилось причиной фрагментации джета.

По итогам всех данных в 3C 454.3 отмечается насыщение индекса Γ , он монотонно нарастает и показывает насыщение при больших темпах аккреции (черная дыра). Красные и синие квадраты показывают RXTE и Swift наблюдений (соответственно), синие треугольники и зеленые точки соответствуют данным Suzaku и Chandra (рис. 12.11.).

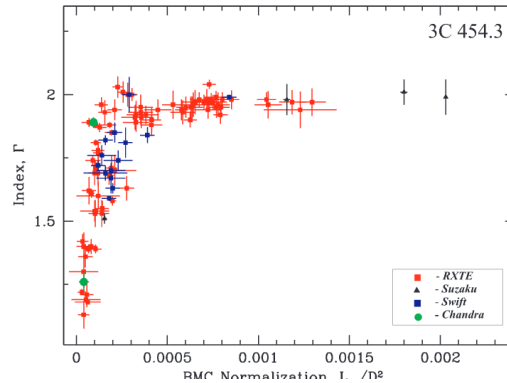


Рис. 12.11. Корреляция фотонного индекса Γ с ВМС нормировкой

Корреляция фотонного индекса $\Gamma = \alpha + 1$ с нормировкой ВМС, $N_{\text{ВМС}}$ пропорциональна темпу аккреции в единицах $L_{39} = D^2_{10}$

Определение массы черной дыры методом скалирования в 3C 454.3 осуществлялось в сравнении с активными ядрами галактики (NGC 7479, NGC 4051) и с черными дырами звездной массы (GRO J11655-40, Syg X-1). Получено значение массы объекта $M = 3,4 \times 10^9$ масс Солнца, что обозначает, что 3C 454.3 - сверхмассивная черная дыра.



ФИЗИЧЕСКИЙ
ФАКУЛЬТЕТ
МГУ ИМЕНИ
М.В. ЛОМОНОСОВА

teach-in
ЛЕКЦИИ УЧЕНЫХ МГУ