

На правах рукописи

ХАБИБУЛЛИН Ильдар Инзилович

ВНЕГАЛАКТИЧЕСКИЕ ТРАНЗИЕНТНЫЕ ИСТОЧНИКИ
В ПЛАНИРУЕМОМ ОБЗОРЕ НЕБА ОБСЕРВАТОРИИ *СПЕКТР-РГ*
И АРХИВНЫХ ДАННЫХ *ROSAT* И *ХММ-NEWTON*.
МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
РЕЛЯТИВИСТСКИХ СТРУЙ

Специальность: 01.03.02 – Астрофизика и звёздная астрономия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва, 2015

Работа выполнена в
Федеральном государственном бюджетном учреждении науки
Институт космических исследований Российской академии наук

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук,
САЗОНОВ Сергей Юрьевич,
Институт космических исследований Российской академии наук

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор
ФАБРИКА Сергей Николаевич,
Специальная астрофизическая обсерватория Российской академии наук

доктор физико-математических наук, профессор
ШАКУРА Николай Иванович,
Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга МГУ

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук

Защита диссертации состоится **25 декабря 2015 года в 12 часов**
на заседании диссертационного совета Д 002.113.02
Института космических исследований Российской академии наук
по адресу: 117997, г. Москва, ул. Профсоюзная, 84/32,
Институт космических исследований Российской академии наук.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИКИ РАН
и на сайте <http://www.iki.rssi.ru/diss/2015/khabibullin.htm>.

Автореферат разослан 20 ноября 2015 года.

Учёный секретарь
диссертационного совета Д 002.113.02
кандидат физико-математических наук



А.Ю. Ткаченко

Общая характеристика работы

Актуальность и цели работы

Проект *Спектр-РГ* является важнейшим астрофизическим проектом российской научной космической программы ближайших лет и выполняется в сотрудничестве с институтами и производственными центрами Германии и Космическим центром им. Маршалла, США. Запуск обсерватории планируется на 2017 год. Помимо технических работ по изготовлению, тестированию и подготовке к полету отделом астрофизики высоких энергий ИКИ РАН ведется и подготовка к обработке научных данных проекта, первые 4 года которого будут посвящены проведению обзора всего неба в стандартном (телескоп *eROSITA*) и более жестком (*ART-XC*) рентгеновских диапазонах. Помимо большого количества постоянно существующих источников (таких как активные ядра галактик (АЯГ) и скопления галактик) в ходе обзора будет возможность регистрировать и редкие транзиентные события, для которых исключительно важен вопрос максимально полной, надежной, но при этом своевременной идентификации. Ввиду этого требуется разработка специальных методик, учитывающих отличительные черты различных классов транзиентных источников с применением различных методов диагностики, которые будут доступны в ходе проведения обзора.

Целью первой части работы является разработка методик и оценка перспектив обнаружения послесвечений космических гамма-всплесков и вспышек излучения в результате приливного разрушения звезд центральными сверхмассивными черными дырами (СМЧД) галактик в ходе обзора неба в стандартном рентгеновском диапазоне телескопом *eROSITA* обсерватории *Спектр-РГ* (далее *eRASS* от *eROSITA All-Sky Survey*). Несмотря на то, что темп детектирования рентгеновских послесвечений гамма-всплесков достаточно велик благодаря таким обсерваториям как *Swift*, позволяющим очень быстрое наведение рентгеновского телескопа в область локализации гамма-триггера, получаемые таким способом выборки смещены в сторону послесвечений от ярких в гамма-диапазоне всплесков. В ходе проведения обзора *eRASS* появится возможность находить послесвечения в результате “слепого” поиска, избавившись тем самым от эффектов селекции по яркости родительского гамма-всплеска. В частности, такой поиск позволяет находить послесвечения гамма-всплесков с проинтегрированным потоком мгновенного гамма излучения ниже порога детектирования современных гамма-мониторов, а также послесвечения вовсе без наблюдаемого гамма-всплеска, относительная частота которых важна для понимания структуры и геометрии излучения релятивистского джета.

Количество обнаруженных на данный момент вспышек излучения в результате приливного разрушения звезд СМЧД (далее TDE от *Tidal Disruption Events*) гораздо меньше – всего около двух десятков надежных кандидатов. Значительный вклад в эту выборку был внесен предыдущим обзором всего неба в мягком рентгеновском диапазоне, проведенном обсерваторией *ROSAT*. Характерное время спада яркости таких вспышек составляет около года, что сравнимо с промежутком между наблюдениями произвольной точки на небе в ходе двух последовательных снимков неба eRASS, что, вкупе с ожидаемым в случае TDE спектром излучения с пиком в мягком рентгеновском диапазоне, делает обзор eRASS очень хорошо подходящим для обнаружения большого количества таких вспышек. На основе имеющихся данных и теоретических оценках частоты таких событий в локальной Вселенной мы оцениваем ожидаемый для них темп детектирования, а также описываем статистические свойства выборки в смысле распределения по красному смещению, массе разрушающей СМЧД и др. Помимо исследования свойств популяции TDE, последующие наблюдения наиболее ярких из этих событий позволят проследить эволюцию аккреционного диска в широком диапазоне удельного темпа аккреции. Отдельный интерес представляет поиск событий с релятивистскими джекетами для определения условий и механизмов их запуска.

Проверка методики обнаружения и идентификации TDE в ходе eRASS была проведена на основе архивных данных обзора всего неба обсерватории *ROSAT* (RASS) в области перекрытия с полями наблюдений обсерватории *XMM-Newton*. Согласно простым оценкам, такой поиск мог дать около 10 кандидатов в TDE, которые были яркими в эпоху проведения RASS и значительно потускнели на момент случайного (или намеренного) попадания в поле наблюдения *XMM-Newton*, что сравнимо с размером выборки, обнаруженных в рентгеновском диапазоне TDE. Количество реально найденных кандидатов (от *двух* до *четырёх* с разной степенью достоверности идентификации с TDE) позволяет поставить ограничение на частоту TDE в локальной Вселенной. Для отдельных кандидатов получены оценки для массы СМЧД в простейшей модели явления. Побочным продуктом поиска TDE является обнаружение вспышек большой амплитуды от постоянно существующих источников, например, АЯГ, изучение механизмов переменности которых само по себе является важной задачей.

Целью второй части является детальное моделирование характеристик рентгеновского излучения барионных релятивистских джетов, на данный момент наблюдаемых лишь на примере уникальной Галактической системы SS 433, детальное исследование свойств которой важно также для понимания проявлений сверхкритической аккреции, которая, по-видимому, имеет место на начальной стадии как гамма-всплесков, так и TDE. Предсказание характеристик излучения барионного джета в зависимости от его физических параметров

необходимо как для интерпретации наблюдений существующих (*Chandra*/HETGS) и планируемых к запуску (*ASTRO-H*/SXS, 2016 г.) рентгеновских спектрометров высокого разрешения, так и для поиска барионных джетов в других Галактических системах, ультраярких рентгеновских источниках и различных внегалактических источниках, с похожими на SS 433 свойствами.

Научная новизна

Все результаты, представленные к защите, являются новыми.

Предложенные методики идентификации рентгеновских послесвечений космических гамма-всплесков и вспышек излучения в результате приливного разрушения звезд СМЧД в контексте обзора eRASS рассмотрены впервые (однако, стоит отметить, что методика поиска послесвечений схожа с использованной в ходе обзора всего неба обсерватории *ROSAT*). В работе впервые рассчитаны ожидаемые темпы детектирования таких событий в ходе eRASS в зависимости от предполагаемых свойств их популяции. Рассмотрена проблема конкуренции с источниками других типов, предложены способы их отсева.

Впервые проведен систематический поиск вспышек излучения в результате приливного разрушения звезд СМЧД в данных обзора всего неба обсерватории *ROSAT* путем кросс-корреляции с данными точечных наведений обсерватории *XMM-Newton*. Найдено от двух до четырех кандидатов с различной вероятностью ассоциации с TDE, что позволило поставить ограничение на частоту TDE в локальной Вселенной. На реальных данных проверены предложенные для eRASS методики отождествления и отсева конкурирующих источников.

Впервые выполнены расчеты переноса излучения в линиях стандартного рентгеновского диапазона в контексте излучения релятивистских барионных джетов на примере SS 433. Поставлены ограничения на величину уменьшения интенсивности линий в результате совместного действия резонансного и комптоновского рассеяния для широкого диапазона значений параметров джетов. Впервые получены предсказания тонкой структуры линий и близлежащего континуума имея ввиду ожидаемые характеристики микрокалориметра обсерватории *ASTRO-H*.

Научная и практическая ценность

Предложенные методики могут быть использованы для идентификации (в ходе проведения обзора всего неба eRASS) рентгеновских послесвечений гамма-всплесков и вспышек излучения в результате приливного разрушения звезд СМЧД. Полученные оценки ожидаемых темпов детектирования позволяют планировать требуемую обширность последующих наблюдений телескопами

наземной и орбитальной поддержки. Проведенные расчеты эффективности детектирования и отождествления (например, ввиду присутствия конкурирующих источников различных классов) в ходе eRASS, могут быть использованы для поисков транзиентов в обзорах, схожих по характеристикам с eRASS.

Получено ограничение на среднюю наблюдаемую частоту TDE в локальной Вселенной, которое может быть использовано для сравнения с теоретическими предсказаниями. Побочным продуктом систематического поиска TDE является выборка вспышек активных ядер галактик, дальнейшее исследование которых может помочь пролить свет на механизмы переменности этих источников.

Представленные результаты расчетов спектра излучения релятивистских барионных джетов в линиях стандартного рентгеновского диапазона могут быть использованы для интерпретации данных обсерваторий Chandra и, в скором будущем, обсерватории *ASTRO-H*.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Разработана методика обнаружения и идентификации послесвечений гамма-всплесков в ходе обзора всего неба телескопом *eROSITA* обсерватории Спектр-РГ, основанная на поиске источников со степенной формой спада яркости на масштабе одного дня.
2. Найдено, что ожидаемый темп детектирования для “слепого” поиска послесвечений длинных гамма-всплесков составляет 4–8 событий в год в зависимости от предполагаемой формы $\log N$ – $\log S$ распределения гамма-всплесков в области потоков ниже порога детектирования современных гамма-мониторов, а следовательно в конце обзора будет получена первая несмещенная в сторону гамма-ярких событий выборка рентгеновских послесвечений. Темп детектирования послесвечений с заранее известным приблизительным положением по зарегистрированному гамма-мониторами триггеру оценен на уровне нескольких десятков событий в год.
3. Разработана методика обнаружения и идентификации вспышек излучения в результате приливного разрушения звезд центральными сверхмассивными черными дырами (СМЧД) галактик, основанная на поиске источников с мягким спектром и очень большой амплитудой переменности на масштабе одного года, измеряемой путем сравнения яркости источника в последовательных полугодовых снимках неба в ходе обзора *eROSITA*.

4. Найдено, что уникальная выборка размером от нескольких сотен до нескольких тысяч кандидатов будет получена по окончании обзора, что позволит с большой точностью измерить частоту таких событий в локальной Вселенной (до $z \sim 0.15$), а также исследовать статистические свойства СМЧД их родительских галактик, т.к. показано, что эффективность детектирования слабо зависит от массы СМЧД в диапазоне от $\sim 10^6$ до $\sim 10^7 M_{\odot}$. Темп детектирования событий приливного разрушения с релятивистскими джетами в ходе обзора *eROSITA* ожидается (со значительной неопределенностью) на уровне одного детектирования в каждом из восьми снимков неба *eROSITA* с возможностью обнаружения вплоть до $z \sim 4$.
5. В результате проведенного систематического поиска событий приливного разрушения среди ярких источников, зарегистрированных в ходе обзора всего неба обсерватории *ROSAT* и оказавшихся в полях наблюдений обсерватории *XMM-Newton*, было найдено четыре источника с различной степенью вероятности ассоциации с такими событиями. Получена оценка средней частоты событий приливного разрушения в исследованном объеме Вселенной (до $z \sim 0.18$) на уровне $R \sim 3 \times 10^{-5}$ событий на галактику.
6. В результате детального Монте-Карло моделирования излучения в линиях стандартного рентгеновского диапазона барионных релятивистских джетов сверхкритического аккретора SS 433 было найдено, что рассеяние внутри джетов, вместе с нутационным движением и вкладом линий-сателлитов, приводит к заметному дополнительному уширению линий, а следовательно и к завышенным оценкам величины угла раскрытия джетов по ширине рентгеновских линий. Показано, что эффект уменьшения интенсивности линий за счет рассеяния внутри джета не превосходит 60%, а значит, объяснение таких аномалий как избыточная относительная яркость линий никеля только в терминах эффектов рассеяния затруднительно.
7. Получены предсказания для тонкой структуры линий в широком диапазоне параметров джета, имея ввиду характеристики рентгеновского микрокалориметра планируемой к запуску в 2016 году обсерватории *ASTRO-H*. Помимо этого, предсказано искажение формы непрерывного спектра вблизи ярких линий за счет вклада рассеянного излучения, который оказывается сравнимым (или даже больше) вклада рекомбинационной и двухфотонной компонент.

Список публикаций по теме диссертации:

Результаты работы полностью содержатся в статьях, опубликованных в реферируемых журналах:

1. *X-ray line formation in the spectrum of SS 433*
Khabibullin I., Sazonov S., 2012, *Astronomy Letters*, 38, 443
(*Формирование рентгеновских линий в спектре SS 433*,
Хабибуллин И., Сазонов С., 2012,
Письма в *Астрономический Журнал*, 38, 503)
2. *SRG/eROSITA prospects for the detection of GRB afterglows*
Khabibullin I., Sazonov S., Sunyaev R., 2012,
MNRAS, 426, 1819
3. *SRG/eROSITA prospects for the detection of stellar tidal disruption flares*
Khabibullin I., Sazonov S., Sunyaev R., 2014,
MNRAS, 437, 327
4. *Stellar tidal disruption candidates found by cross-correlating the ROSAT Bright Source Catalogue and XMM-Newton observations*
Khabibullin I., Sazonov S., 2014, *MNRAS*, 444, 1041

Апробация работы

Результаты работы докладывались на семинарах ИКИ РАН 2011-2015 г.; международных конференциях *First eROSITA/SRG International Conference*, Гармиш-Партенкирхен, Германия, 2011 г.; *40th COSPAR Scientific Assembly*, Майсор, Индия, 2012 г.; *Second eROSITA/SRG international conference*, Казань, 2012 г.; *Cosmology and relativistic astrophysics, Zeldovich-100*, ИКИ РАН, Москва, 2014 г.; всероссийских конференциях “*Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра*”, ИКИ РАН, Москва, 2011-2014 г.; Всероссийской астрономической конференции “*Многоликая Вселенная*” (ВАК-2013), Санкт-Петербург, 2013 г.; Конференциях молодых ученых “*Фундаментальные и прикладные космические исследования*”, ИКИ РАН, Москва, 2012-2015 г.

Объем диссертации

Диссертация состоит из шести глав и имеет объем 150 страниц, содержит 24 рисунка и 16 таблиц. Главы 2, 3, 4, 5 имеют отдельные *Списки литературы*, вместе содержащие 253 публикации.

Содержание работы

В первой главе (Введение) описан научный контекст диссертационной работы, в связи с чем обосновывается ее актуальность, а также формулируются основные задачи, решение которых является целью диссертационной работы.

Во второй главе рассматривается задача обнаружения рентгеновских послесвечений космических гамма-всплесков в ходе обзора всего неба телескопом *eROSITA* (*eRASS*) обсерватории *Спектр-ПГ*, которая, в свою очередь, может быть разделена на две подзадачи: 1) обнаружение и идентификация послесвечений без какой-либо априорной информации о самом гамма-всплеске (т.н. “слепой” поиск) и 2) поиск послесвечений гамма-всплесков, уже зарегистрированных каким-либо монитором неба. Для первой подзадачи предложена методика, основанная на поиске источников с характерной (степенной) формой спада яркости на масштабе одного дня (Джерелс и др. 2008), которая может быть выявлена при помощи сравнения последовательных измерений потока от источника с интервалом 4 часа в ходе одного сеанса наблюдений, состоящего из шести $\simeq 40$ -секундных проходов источника через поле зрения *eROSITA* (см. Рисунок 1). Для восстановления параметров степенного закона требуется как минимум три измерения потока выше порогового уровня, который был найден при помощи Монте-Карло моделирования наблюдения рентгеновского послесвечения с некоторыми шаблонными спектральными и временными характеристиками из условия возможности определения наклона кривой спада яркости с заданной точностью ввиду статистической неопределенности измерений потока. Показано, что пороговый уровень соответствует потоку $F_e \approx 2 \times 10^{-13}$ эрг/с/см² в диапазоне 0.5–2 кэВ, а для получения консервативных оценок может быть использовано значение $F_e = 3 \times 10^{-13}$ эрг/с/см². Ожидаемый темп детектирования послесвечений по предложенной методике был консервативно оценен аналитически, используя лог-нормальную аппроксимацию распределения рентгеновских послесвечений по яркости спустя 12 часов после гамма-всплеска по данным обсерватории *Swift* из работы Бергер и др. (2005), и оказался на уровне $\gtrsim 3.4$ событий в год.

Для второй подзадачи требуется лишь одно статистически значимое детектирование излучения послесвечения, поэтому соответствующий предельный поток определяется из условия маловероятности случайной флуктуации фона на таком уровне внутри области локализации гамма-всплеска и требуемой точностью измерения яркости послесвечения. Показано, что для вероятности флуктуации фона меньше одного процента и точности измерения потока $\sim 50\%$, предельный поток равен $F_d \simeq 1 \times 10^{-13}$ эрг/с/см² в диапазоне 0.5–2 кэВ. При помощи аналогичных аналитических расчетов найдено, что темп детектирования для этой задачи, ожидается на уровне $\gtrsim 15$ событий в год при условии,

что на момент проведения eRASS будет существовать гамма-монитор (или их набор) постоянно эффективно покрывающий всю небесную сферу с достаточной чувствительностью (соответствующей проинтегрированному потоку мгновенного гамма-излучения на уровне $\sim 10^{-8}$ эрг/см² в диапазоне 15-150 кэВ) и точностью локализации (~ 10 минут дуги), что схоже с характеристиками *Swift*/BAT, эффективное поле зрения которого составляет $\approx 1/10$ неба.

Для более точного предсказания ожидаемых темпов детектирования с учетом неравномерности по небесной сфере получаемой в ходе обзора экспозиции (сеанс наблюдений для источников вблизи полюсов эклиптики состоит из более чем 6 проходов через поле зрения телескопа), а также вклада послесвечений гамма-всплесков с проинтегрированным потоком гамма-излучения ниже эффективного порога детектирования *Swift*/BAT, проводится Монте-Карло моделирование наблюдения “неба послесвечений” *длинных* гамма-всплесков. В результате, найдено, что консервативная оценка ожидаемого темпа детектирования составляет от 4.4 до 5.0 событий в год для первой подзадачи (т.е. для “слепого” поиска) в зависимости от модели функции распределения в области малых проинтегрированных потоков, что согласуется с полученной ранее аналитической оценкой. Для предельного потока на уровне $F_e = 2 \times 10^{-13}$ эрг/с/см² ожидается от 6.8 до 7.6 событий в год. Показано, что ожидаемый темп детектирования для второй подзадачи оказывается на уровне от 19.5 до 55.6 событий в год, что согласуется с найденной ранее аналитической оценкой и демонстрирует гораздо большую чувствительность к форме функции распределения в области малых потоков в случае этой подзадачи. Показано, что помимо послесвечений длинных гамма-всплесков, в результате “слепого поиска” в ходе eRASS будет обнаружено небольшое число (~ 1 события в год) послесвечений гамма-всплесков других типов, таких как короткие гамма-всплески и рентгеновские вспышки.

Отмечено, что особенностью итоговой выборки послесвечений, полученной в результате “слепого” поиска, будет ее несмещенность в сторону гамма-ярких событий, в том числе, с учетом существующих ограничений (например, Накар & Пиран (2003)), показано, что количество зарегистрированных рентгеновских послесвечений без наблюдаемого гамма-всплеска может быть сравнимо с количеством найденных послесвечений длинных гамма-всплесков. Рассмотрены вопросы конкуренции с другими классами переменных источников (в первую очередь, АЯГ и звезды с высоким уровнем корональной активности), для которых кривая блеска, полученная в ходе eRASS, может удовлетворять критериям идентификации послесвечений при “слепом” поиске, и предложены способы их отсева, основанные на различии временных (в случае АЯГ) и спектральных (в случае звездных вспышек) свойств таких источников с послесвечениями гамма-всплесков, а также кросс-корреляции с обзорами в радио, ИК и оптическом спектральных диапазонах.

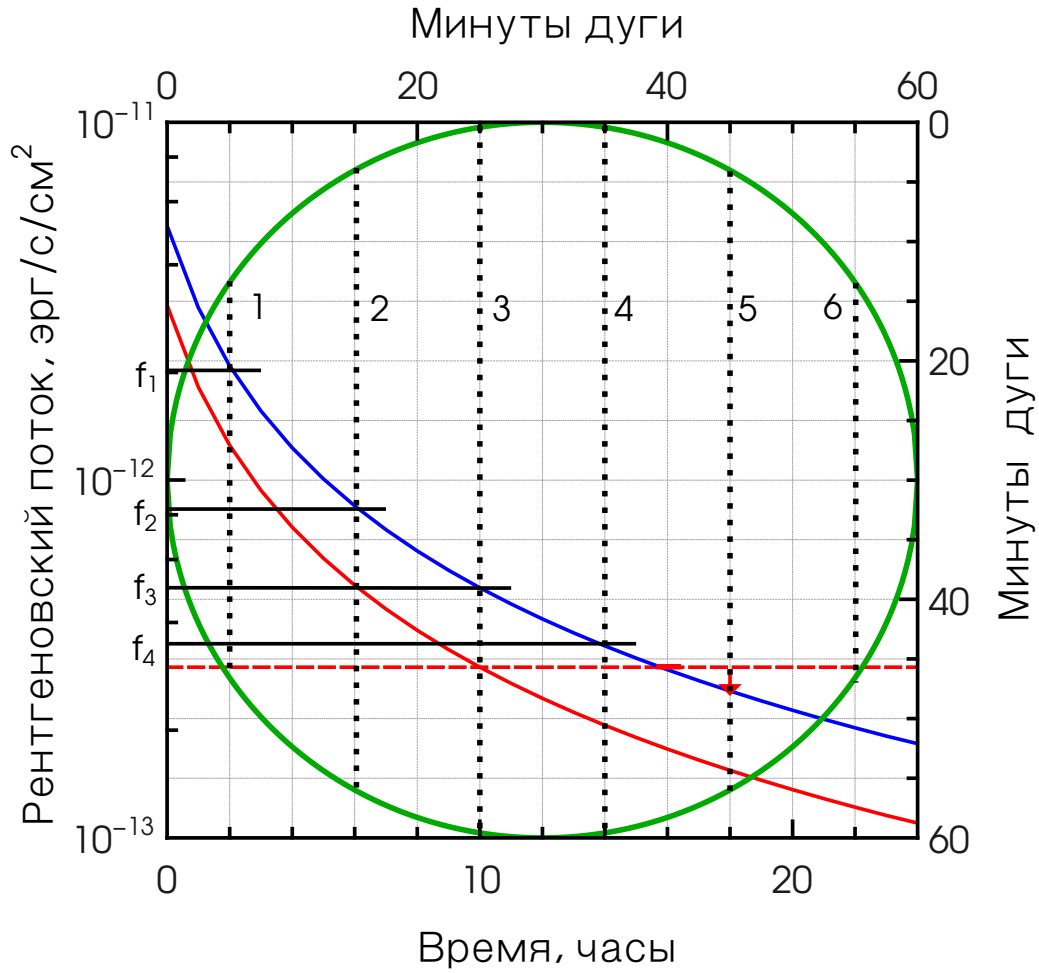


Рис. 1: Иллюстрация типичного наблюдения рентгеновского послесвечения гамма-всплеска телескопом *eROSITA*, в ходе которого источник 6 раз проходит (черные вертикальные линии в системе координат, заданной правой и верхней осями) через поле зрения телескопа, показанное зеленой окружностью диаметром 1 градус дуги. В результате, кривая блеска послесвечения (синяя и красная кривые для разных значений начальной яркости, в системе координат левой и нижней осей) строится по измерениям яркости послесвечения с промежутком 4 часа до того момента, пока яркость не упадет ниже порога детектирования (горизонтальная красная штриховая линия), либо же пока источник не перестанет попадать в поле зрения.

Третья глава посвящена изучению перспектив обнаружения событий приливного разрушения звезд центральными СМЧД неактивных галактик (TDE) в ходе обзора eRASS. Детально описана методика идентификации, основанная на поиске источников с “мягким” спектром (см. ниже) и очень большой (> 10) амплитудой переменности на масштабе одного года, измеряемой путем сравнения яркости источника в последовательных полугодовых снимках неба (см. Рисунок 2). Для описания степени “мягкости” спектра кандидатов предложено использовать отношение зарегистрированных темпов счета в диапазонах 0.4–1 и 1–2 кэВ, сформулирован спектральный критерий, использование которого позволяет отбросить источники с “жестким” спектром, типичным для АЯГ, с вероятностью $\approx 50\%$ при регистрации 40 отсчетов от источника, сохраняя при этом подавляющее большинство “мягких” источников, таких как TDE, для которых, согласно стандартной модели, ожидается близкий к чернотельному спектр с температурой $\kappa T_{bb} \sim 0.05$ кэВ, зависящей от массы СМЧД как $\propto M_{BH}^{-1/4}$ (Шакура & Сюняев, 1973).

После расчета К-поправки, связанной с космологическим “покраснением” спектра и его сверткой со спектральной функцией отклика *eROSITA*, определяется предельное красное смещение, на котором может быть зарегистрировано TDE в предположении, что болометрическая светимость в максимуме вспышки определяется Эддингтоновским пределом СМЧД (Альмер, 1999). Показано, что для СМЧД в диапазоне масс от 10^6 до $10^7 M_{\odot}$ предельное красное смещение примерно равно $z_{lim} \simeq 0.15$ и лишь слабо зависит от M_{BH} в результате взаимной компенсации увеличения максимальной болометрической светимости уменьшением ее доли, попадающей в область чувствительности *eROSITA*, по мере роста M_{BH} в этом диапазоне. Принимая во внимание форму функции масс СМЧД в локальной Вселенной (например, Грин & Хо, 2007) и предполагая отсутствие зависимости частоты TDE от массы СМЧД, это означает, что ожидается примерно одинаковый вклад СМЧД различных масс (в диапазоне $10^6 - 10^7 M_{\odot}$) в полный темп детектирования TDE в ходе eRASS.

Используя существующие оценки частоты TDE в локальной Вселенной по данным предыдущих рентгеновских обзоров (например, Эскей и др., 2008), найдено, что ожидаемый полный темп детектирования TDE составляет около тысячи событий в год, таким образом, показывается, что уникальная выборка размером порядка нескольких тысяч TDE будет получена по окончании обзора eRASS с наибольшим вкладом событий на красном смещении близком к предельному $z_{lim} \simeq 0.15$. Описаны статистические свойства ожидаемой выборки в зависимости от массы СМЧД, в частности, приводятся оценки для количества событий, регистрируемых на сверхкритической стадии, стадии спада, а также на стадии первоначального нарастания темпа аккреции вещества разрушенной звезды. Показано, что для подавляющего большинства событий

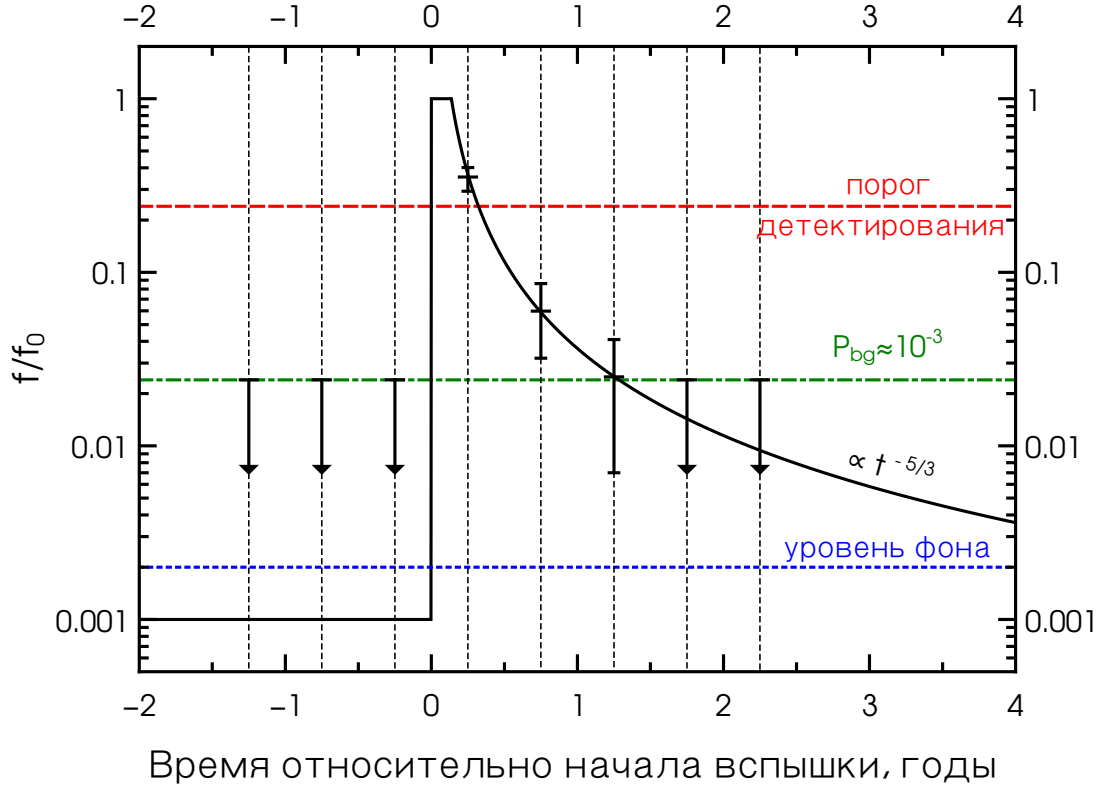


Рис. 2: Схематическое изображение кривой блеска (нормированной на яркость в пике f_0) кандидата в TDE, которая будет получена в ходе eRASS в результате нескольких сканирований источника с интервалом 6 месяцев (в моменты времени, отмеченные вертикальными прямыми). Средний уровень фона показан синей пунктирной линией. Зеленой штрих-пунктирной линией отмечен уровень, соответствующий темпу счета, который может быть результатом флуктуации фона с вероятностью $P_{bg} \simeq 10^{-3}$. В момент вспышки яркость источника кандидата должна как минимум в 10 раз превысить этот уровень, т.е. быть выше уровня, отмеченного красной штриховой линией.

будет получена кривая блеска, состоящая как минимум из двух значимых измерений, а для более чем трети событий – не меньше чем из трех значимых измерений, что позволит ограничить значения параметров степенной модели спада яркости и на количественном уровне сравнить их с теоретическими предсказаниями без необходимости привлечения дополнительных наблюдений.

Отдельно рассмотрены перспективы обнаружения TDE в первом снимке неба обзора eRASS при помощи архивных данных обзора всего неба обсерватории *ROSAT*, а также перспективы использования значительно большей глубины обзора, достигаемой в полюсах эклиптики. Получена оценка (со значительной неопределенностью) темпа детектирования TDE с релятивистскими джетами, выборка наблюдаемых кандидатов в которые на данный момент насчитывает лишь три события, на уровне одного события в каждом из восьми снимков eRASS с возможностью детектирования вплоть до $z \sim 4$, т.е. до расстояний, на масштабе которых может проявиться космологическая эволюция СМЧД и окружающего их звездного населения галактик.

В четвертой главе представлены результаты систематического поиска вспышек излучения в результате приливного разрушения звезд СМЧД в центрах неактивных галактик среди источников каталога, составленного на основе данных обзора всего неба обсерватории *ROSAT* (RASS), оказавшихся (случайно или преднамеренно) в полях наблюдений обсерватории *XMM-Newton*, проходивших спустя 10–20 лет после проведения обзора RASS. Источники проверялись на более чем десятикратное уменьшение потока в данных *XMM-Newton* по сравнению с данными *ROSAT*. После краткого описания характеристик обзоров *ROSAT* и *XMM-Newton*, сформулированы критерии отбора с учетом типичного уровня фона и влияния “загрязняющего” излучения близлежащих источников. Рассмотрены возможности отсева конкурирующих нетранзиентных источников, таких как АЯГ, катаклизмические переменные и коронально-активные звезды, при помощи кросс-корреляции с обзорами в оптическом и ИК диапазонах (например, SDSS и 2MASS).

В результате индивидуального рассмотрения каждого из кандидатов, выделено четыре кандидата, чьи свойства в целом совместимы с предсказываемыми в случае ассоциации с TDE, и для которых с разной степенью надежности можно исключить ассоциацию с источником конкурирующего типа. Это источники 1RXS J114727.1+494302, 1RXS J130547.2+641252 и 1RXS J235424.5-102053, хотя последний из них может быть ложным источником, связанным с протяженным излучением близлежащего скопления галактик. Для источника 1RXS J112312.7+012858 ассоциация с TDE также возможна, но его идентификацию как АЯГ нельзя достоверно исключить. На основе такой выборки получена оценка на среднюю частоту TDE в исследованном объеме Вселенной, и она оказывается на уровне $R \sim 3 \times 10^{-5}$ событий в год на галактику, что согласует-

ся со значениями, найденными в предыдущих работах, основанных на данных обзора RASS (Данли и др., 2002). При этом отмечено, что чувствительность, достигаемая в точечных наблюдениях *XMM-Newton*, значительно превосходит чувствительность обзоров, использованных в предыдущих работах (например, Данли и др., 2002; Эскей и др., 2008), следовательно полученная выборка соответствует в среднем более далеким галактикам вплоть до красного смещения $z \sim 0.18$ (для некоторых характерных значений параметров вспышки). Отдельно исследован случай кандидата 1RXS J114727.1+494302 (также известного как RBS 1032), для которого помимо данных RASS доступны также данные точечных наблюдений обсерватории *ROSAT* спустя 2.1 и 3.6 года после проведения RASS (Гхош и др., 2006). Показано, что кривая блеска этого источника может быть описана ожидаемым в случае TDE степенным законом (см. Рисунок 3), находимые при этом значения его параметров позволяют поставить ограничение на массу центральной СМЧД ($M_{BH} \gtrsim 5 \times 10^6 - 10^7 M_{\odot}$) в рамках стандартной модели TDE (см. также Мэксим и др. (2014)).

Побочным продуктом поиска TDE является небольшая выборка вспышек большой амплитуды от известных АЯГ, дальнейшее детальное исследование которых может быть полезно для прояснения механизмов переменности АЯГ, а следовательно и физики аккреции вещества на СМЧД.

Пятая глава посвящена моделированию рентгеновского излучения барионных релятивистских джетов на примере уникальной галактической системы SS 433 (Фабрика, 2004), направленному на детальное предсказание характеристик излучения в линиях стандартного рентгеновского диапазона для широкого диапазона параметров джета. Описана модель джета, отличающаяся от стандартной (Котани и др., 1996) учетом в уравнении теплового баланса потерь энергии на излучение, рассчитываемых в корональном приближении для горячей оптически тонкой плазмы. Показано, что можно выделить два режима остывания джета, соответствующие преобладанию остывания за счет адиабатического расширения (квазиадиабатический джет) и остыванию за счет потерь энергии на излучение (квазицилиндрический джет) (см. также Коваль & Шакура, 1989), характеризующиеся различными зависимостями наблюдаемых свойств джета от его параметров. При помощи аналитических оценок поперечной оптической толщины джета по резонансному рассеянию, учитывающих наличие градиента скорости внутри джета, описаны ожидаемые особенности переноса излучения в линиях в зависимости от величины угла раскрытия джета. Представлена схема детального расчета спектра излучения джетов методом Монте-Карло с характеристиками излучательной способности и непрозрачности плазмы, получаемыми на основе профилей плотности и температуры джета в предположении ионизационного баланса в корональном приближении при помощи базы данных AtomDB (Смит и др., 2001).

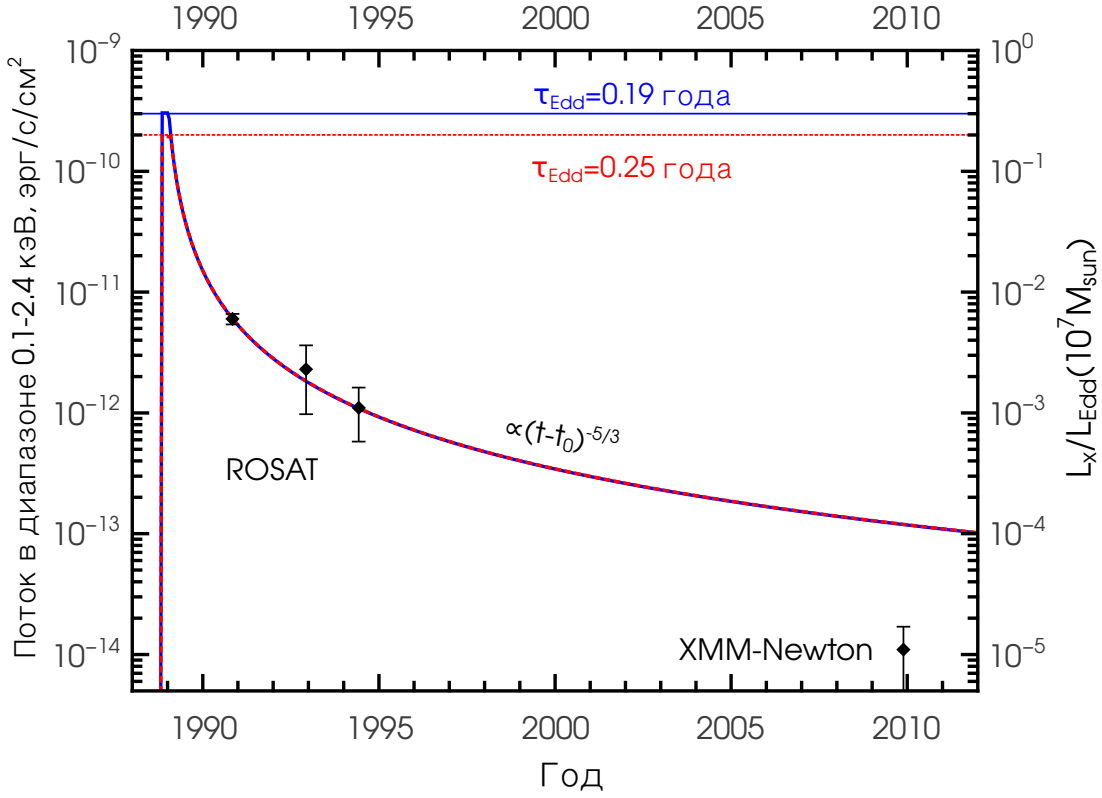


Рис. 3: Аппроксимация рентгеновской кривой блеска RBS 1032, полученной на основе наблюдений источника в ходе RASS и двух последующих точечных наведений, степенным законом спадаения яркости, т.е. $f \propto \left(\frac{t-t_0}{\tau_{Edd}}\right)^{-5/3}$, где t_0 обозначает момент вспышки, для двух значений характерного времени спадаения $\tau_{Edd} = 0.19$ (толстая синяя кривая) и 0.25 (толстая красная кривая) года. Соответствующие потоки и светимости (правая ось, фотометрическое расстояние до источника предполагалось равным $d_L = 114$ Мпк) показаны сплошной синей и штриховой красной прямыми. Помимо этого, показано маргинальное детектирование источника в ходе наблюдений *XMM-Newton* в конце 2009 года, по которому и было обнаружено уменьшение потока от источника на несколько порядков в течении 20 лет.

Набор линий, для которых проводилось моделирование, сформирован из наиболее ярких линий, наблюдаемых в спектре SS 433, соответствующих переходам в водородо- и гелиеподобных ионах кремния, серы, аргона, кальция, железа и никеля (Маршалл и др., 2002). При этом, для наиболее точного предсказания характеристик триплетных линий гелиеподобных кремния и серы в расчет добавлен эффект возбуждения электронов с верхнего уровня запрещенного перехода на верхний уровень интеркомбинационного перехода посредством электронных столкновений в плазме с плотностью выше критической (см., например, Порке и др., 2010). Построена сетка параметров, на которой полная рентгеновская светимость джетов приблизительно постоянна и равна $L_x \sim 10^{36}$ эрг/с, что соответствует наблюдаемой рентгеновской светимости SS 433 (Фабрика, 2004), для которой рассчитаны ожидаемые светимости и эквивалентные ширины линий без учета эффектов рассеяния.

Результаты моделирования представлены в виде предсказываемых характеристик линий, свернутых с модельными спектральными функциями отклика спектрометров высокого разрешения обсерваторий *Chandra* и *ASTRO-H*. В частности, приводятся центроиды и ширины линий, а также отношение интенсивностей компонентов триплетов и доля фотонов, покинувших линию в результате комптоновского рассеяния на горячем электроны. Дана интерпретация полученных результатов на основе описанного ранее аналитического рассмотрения. Показано, что эффект уменьшения интенсивности линий за счет рассеяния внутри джета оказывается весьма заметным, так что точная диагностика параметров плазмы джетов по отношениям интенсивностей линий оказывается невозможна без учета эффектов рассеяния, т.к. вносимый сдвиг может приводить к значительным систематическим ошибкам. Показано, что рассеяние внутри джетов, вместе с нутационным движением и вкладом спутников, приводят к заметному дополнительному уширению линий, что может приводить к завышенным оценкам величины угла раскрытия джета по ширине рентгеновский линий. Продемонстрировано существование и описана форма широких крыльев рассеянного излучения вблизи наиболее ярких линий. Величина вносимого такими крыльями искажения оказывается сравнимой (или даже большей) вклада рекомбинационной и двухфотонной компонент (см. Рисунок 4). Отмечено, что тонкая структура линий очень чувствительна к эффектам рассеяния (особенно в случае дублетов и триплетов), что делает ее исследование мощным инструментом диагностики параметров джетов - плотности излучающей области (а следовательно и ее размера), а также величины угла раскрытия, в связи с чем обсуждены перспективы рентгеновских спектрометров нового поколения (в первую очередь, обсерватории *ASTRO-H*).

В *Заключении* кратко сформулированы выносимые на защиту положения диссертационной работы.

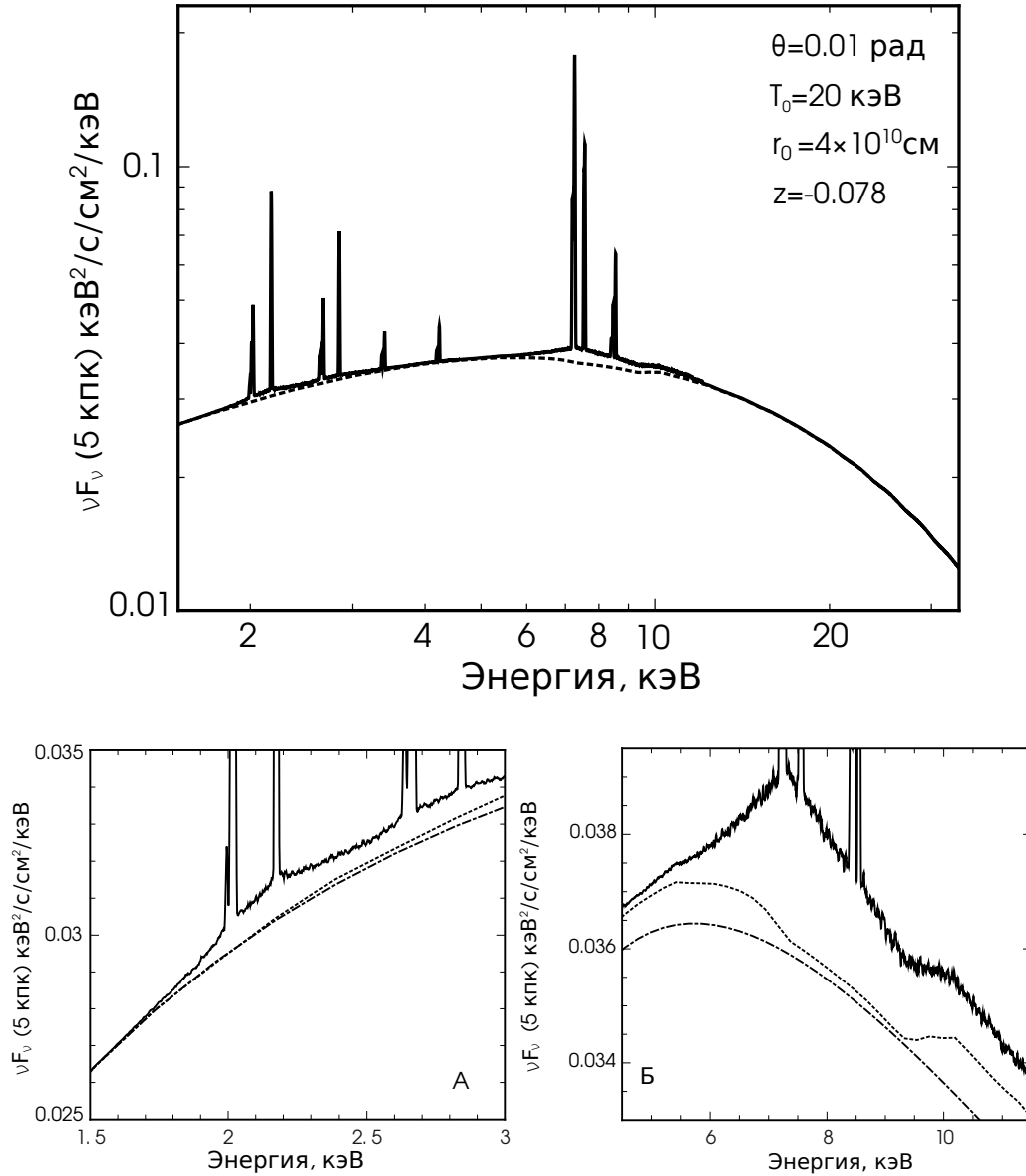


Рис. 4: Широкополосный смоделированный синтетический спектр (сплошной линией) приближающегося ($z=-0.078$) джета (с указанными на рисунке параметрами) на расстоянии 5 кпк. Расчет непрерывного излучения (штриховая линия) произведен при помощи ATOMDB (модель NoLine). Включены (с учетом рассеяния внутри джета, но без учета вклада сателлитов) яркие линии, соответствующие переходам в водородо- и гелиеподобных ионах кремния, серы, аргона, кальция, железа и никеля. Также показаны увеличенные фрагменты широкополосного спектра в мягкой (А) и жесткой (Б) областях спектра. Штрих-пунктирной линией показан вклад тормозного излучения. Разница тормозного и NoLine-континуума обусловлена наличием рекомбинационной и двухфотонной компонент.

Список литературы

- Альмер (Ulmer, A.) 1999, ApJ, 514, 180
- Бергер и др. (Berger, E., Kulkarni, S. R., Fox, D. B., et al.) 2005, ApJ, 634, 501
- Грин & Хо (Greene J. E., Ho L. C.), 2007, ApJ, 667, 131
- Гхош и др. (Ghosh K. K., Suleymanov V., Bikmaev I., Shimansky S., Sakhibullin N.), 2006, MNRAS, 371, 1587
- Данли и др. (Donley, J. L., Brandt, W. N., Eracleous, M., & Boller, T.), 2002, ApJ, 124, 1308
- Джерелс и др. (Gehrels N., et al.), 2008, ApJ, 689, 1161
- Коваль & Шакура (Koval E. V., Shakura N. I.), 1989, ESASP, 296, 479
- Котани и др. (Kotani, T., Kawai, N., Matsuoka, M., & Brinkmann, W.), 1996, PASJ, 48, 619
- Маршалл и др. (Marshall, H. L., Canizares, C. R. & Schulz, N. S.), 2002, ApJ, 564, 941
- Мэксим и др. (Maksym W. P., Lin D., Irwin J. A.), 2014, ApJ, 792, L29
- Накар & Пиран (Nakar, E., Piran, T.), 2003, NewA., 8, 141
- Порке и др. (Porquet, D., Dubau, J., Grosso, N.), 2010, SSR., 157, 103
- Смит и др. (Smith, R. K., Brickhouse, N. S., Liedahl, D. A., Raymond, J. C.), 2001, ApJ, 556, L91
- Фабрика (Fabrika S.), 2004, ASPRv, 12, 1
- Шакура & Сюняев (Shakura, N. I., & Sunyaev, R. A.), 1973, A&A, 24, 337
- Эскей и др. (Esquej, P., Saxton, R. D., Komossa, S., et al.), 2008, A&A, 489, 543