

О Т З Ы В

официального оппонента на диссертацию Е.В. Сейфиной
“Спектральные признаки черных дыр и нейтронных звезд в аккрецирующих
рентгеновских двойных системах”, представленную в Совет по защите докторских
и кандидатских диссертаций Д501.001.86 при МГУ им. М.В. Ломоносова на
соискание ученой степени доктора физико-математических наук
по специальности “01.03.02 — Астрофизика и звездная астрономия”

Диссертация Елены Викторовны Сейфиной посвящена исследованию свойств рентгеновского излучения аккрецирующих черных дыр и нейтронных звезд со слабым магнитным полем в галактических двойных системах. Также исследовано поведение нескольких внегалактических ультраярких источников, в которых, как считается, может идти аккреция на черные дыры промежуточных масс ($10^3 - 10^5 M_{\odot}$). Выполнена объемная, трудоемкая работа, основанная на архивных данных орбитальных обсерваторий RXTE, ВерроSAX, SWIFT, Chandra, Suzaku. Исследовано множество разнообразных рентгеновских систем. Главной целью работы было выявление таких свойств этих систем, которые позволяли бы надежно отождествлять природу их компактного объекта, определять другие их важнейшие характеристики.

Похоже, что Е.В. Сейфиной это действительно удалось — в результате сравнительного анализа поведения источников разных типов были выявлены эмпирические закономерности, отличающиеся для систем с черными дырами и нейтронными звездами и позволяющие их отождествлять. В случае систем с черной дырой эти закономерности позволили Е.В. Сейфиной разработать метод оценки массы компактного объекта. Сравнение с массами черных дыр в некоторых системах, измеренными методом оптической доплеровской спектроскопии, показало очень хорошее согласие. Даже в случае ультраярких источников полученные оценки массы попали в ожидаемый диапазон значений $(2 - 7) \times 10^4 M_{\odot}$.

Диссертация четко структурирована, изложена ясным языком и связана единой целью. Она состоит из введения, семи глав, заключения, трех приложений и обширного списка литературы. Во введении определены цели работы и обоснована ее актуальность. В первых двух главах представлены результаты исследования двух галактических двойных систем, содержащих аккрецирующую черную дыру звездной массы, GRS 1915+105 и 4U 1630-47, на основе наблюдений разработан метод определения массы компактного объекта в таких системах. В третьей главе этот метод применен к ультраярким источникам в близких галактиках, ULX-1/M101 и HLX-1/ESO 243-49. В четвертой главе исследовано поведение рентгеновского барстера 4U 1728-34 (в шаровом скоплении Terzan 2), показано, что фотонный индекс жесткого излучения источника не зависит от его интенсивности и спектрального состояния. В пятой главе указанная зависимость проверяется для двух других подобных систем (GX 3+1, 4U 1820-30), делается вывод о возможности использования данной зависимости для отделения двойных систем со слабомагнитными ней-

тронными звездами от систем с черными дырами. В шестой и седьмой главах исследуются особенности поведения систем с высокими (вплоть до эддингтоновских) темпами аккреции вещества на нейтронные звезды (GX 340+0, Sco X-1, 4U 1700-37 и 4U 1705-44), проводится сравнение с барстерами и другими источниками доэддингтоновской светимости. В заключении подведены итоги работы, сформулированы выводы и основные положения, выносимые на защиту. В приложениях описаны сокращения и термины, принятая классификация спектральных состояний аккрецирующих черных дыр и нейтронных звезд, параметризация нормировки в используемых спектральных моделях.

Диссертация основана на 11 работах, опубликованных в ведущих реферируемых астрофизических журналах, и 10 дополнительных работах, опубликованных в трудах конференций, в большинстве из них Е.В. Сейфина является первым автором. Результаты диссертации обсуждены на многих конференциях и семинарах. Автореферат диссертации полностью соответствует тексту диссертации.

В целом диссертация Е.В. Сейфиной производит хорошее впечатление. Это объемная, достаточно тщательно выверенная работа. В то же время не могу не отметить некоторые ее недостатки. В частности:

1. излишне большое число упоминаний разнообразных теоретических моделей, в создании которых автор не принимал участия. Большинство из них далеко не так бесспорны, как полученные Е.В. Сейфиной экспериментальные результаты. При этом для анализа спектров излучения конкретных источников, даже одной природы, зачастую ею используются разные модели. Это могло бы сделать сравнение и обобщение результатов затруднительным, спасает только то, что в конечном счете все эти модели приводят к спектрам жесткого излучения одного вида — степенного с экспоненциальным завалом на высоких энергиях.
2. небрежность в изложении некоторых основных результатов. Например (самое главное), в тексте говорится о зависимости наклона спектра от темпа аккреции, а на соответствующих рисунках приведена зависимость от нормировки спектра. При дальнейших "раскопках" выясняется, что это не нормировка, а светимость низкочастотных фотонов, участвующих в комптонизации. Поскольку в комптонизации участвуют фотоны, испущенные вблизи внутреннего края диска, их светимость $L = 2 \times 2\pi R_{in} \Delta R_{in} \sigma T_{in}^4$ зависит не только от темпа аккреции \dot{M} , но и от внутреннего радиуса диска R_{in} , который связан с его температурой T_{in} зависимостью

$$R_{in} = \left(\frac{3}{8\pi} \frac{GM\dot{M}}{\sigma T_{in}^4} \right)^{1/3},$$

а также от предполагаемой ширины ΔR_{in} области, фотоны из которой попадают в облако высокотемпературной плазмы. Даже в предельном предположении, что все фотоны внешнего диска попадают в высокотемпературное облако,

$$L = 4\pi\sigma T_{in}^4 R_{in}^2 \simeq \frac{3}{2} \frac{GM\dot{M}}{R_{in}},$$

т.е. светимость низкочастотных фотонов зависит наряду с \dot{M} от R_{in} . Приложение С, специально посвященное этому вопросу, скорее запутывает его, вместо того, чтобы прояснять. В частности, странно выглядит утверждение С.1 этого приложения, что светимость чернотельного излучения равна интегралу по энергии от потока фотонов, как будто от размеров излучающей области она не зависит.

3. механическое использование некоторых результатов аппроксимации спектров излучения. Например, серьезно обсуждается сложное поведение энергии высокочастотного завала в спектрах с большими фотонными индексами. Однако ясно, что в таких быстро спадающих спектрах выявить экспоненциальный завал на фоне крутого степенного закона очень сложно — на высоких энергиях экспериментальные точки имеют низкую значимость. Значения, которые выдает программа для энергии завала, — случайные или определяются начальными установками программы.
4. использование при аппроксимации спектров излучения нейтронных звезд (особенно при высоких темпах аккреции) второй модели комптонизации (CompTB) для описания мягкой компоненты спектра. Полученные параметры модели $\tau \geq 10$ и $kT_e \leq 5$ кэВ предполагают достаточно большую плотность плазмы, при которой крайне важными становятся тормозные процессы излучения и поглощения. Одна комптонизация, без учета этих процессов, не способна сформировать чернотельный спектр излучения, а приводит к виновскому спектру, сильно отличающемуся от него в мягкой области спектра. Согласно современным представлениям, данная компонента излучения формируется в слое растекания вещества по поверхности нейтронной звезды (Иногамов, Сюняев, 1999). В зависимости от темпа аккреции возможны случаи как сильно разреженной радиационно-доминированной плазмы в слое растекания, так и более плотной плазмы, в которой мог бы формироваться чернотельный спектр.
5. практически полное отсутствие ссылок на публикации российских авторов и в российских изданиях. При том, что некоторые из источников, исследуемых в диссертации, были открыты и впервые изучены именно российскими авторами по данным обсерватории ГРАНАТ. Большой вклад в исследование черных дыр и нейтронных звезд был внесен российскими авторами по данным обсерваторий МИР-КВАНТ и ИНТЕГРАЛ. Даже в тех редких случаях, когда Е.В. Сейфина упоминает российские журналы, она приводит ссылки на их английский перевод (Astronomy Letters, Astronomy Reports).

Мне также кажется возможным, что эволюция и насыщение фотонного индекса в системах с аккрецирующими черными дырами, экспериментально выявленные в работе, связаны не с присутствием сходящегося потока аккрецирующего вещества вблизи черной дыры, в котором происходит компрессионная (bulk motion) комптонизация, а как раз с изменением радиуса горячей внутренней зоны диска. Насыщение происходит в момент, когда внутренняя зона схлопывается. После этого жесткое

излучение формируется в оптически тонкой короне над диском, толщина которой слабо зависит от темпа аккреции. Поэтому наблюдается крутой степенной спектр со стабильным фотонным индексом (см. например, Гребенев и др. *Adv. Space Res.*, 1997, 19, n.1, 15-23).

Данные замечания, конечно, ни в коей мере не затрагивают справедливости основных выводов диссертации.

В целом же, суммируя, можно сказать, что представленная диссертация является большой цельной экспериментальной работой, в ходе которой найдены важные ранее неизвестные закономерности, которые были использованы Е.В. Сейфиной для отождествления природы компактного объекта рентгеновских двойных систем и определения его ключевого параметра — массы. Именно такой, связанной единой целью и предлагающей новый метод анализа, по моему мнению, и должна быть докторская диссертация.

Считаю, что данная диссертационная работа отвечает всем требованиям, предъявляемым ВАК к докторским диссертациям, а ее автор, Е.В. Сейфина, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности “01.03.02 — Астрофизика и звездная астрономия”.

Заведующий лабораторией
Рентгеновской и гамма-астрономии отдела
Астрофизики высоких энергий ИКИ РАН,
доктор физико-математических наук

С.А.Гребенев

26 сентября 2016 г.

Подпись доктора физико-математических наук С.А.Гребенева заверяю

Ученый секретарь ИКИ РАН,
доктор физико-математических наук

А.В.Захаров