

О Т З Ы В официального оппонента
на диссертацию на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук Горностаева Михаила Игоревича
на тему: “Моделирование переноса излучения и гидродинамических процессов в
высокотемпературной астрофизической плазме”
по специальности “1.3.1 – Физика космоса, астрономия”
 (“01.03.02 – Астрофизика и звездная астрономия”)

Диссертация Михаила Игоревича Горностаева посвящена:

1. моделированию процесса аккреции вещества на поверхность нейтронной звезды с сильным магнитным полем в широком диапазоне значений темпа аккреции,
2. исследованию свойств рентгеновского излучения, формирующегося при такой аккреции, в том числе — циклотронных особенностей в спектре,
3. моделированию методом Монте-Карло искажений в спектре микроволнового фонового (реликтового) излучения, возникающих при его комптоновском рассеянии на электронах горячего газа скоплений галактик.

Все это крайне важные, хотя и трудные астрофизические проблемы, решения которых необходимы для объяснения наблюдательных проявлений рентгеновских пульсаров и интерпретации измерений эффекта Сюняева-Зельдовича в направлении скоплений галактик. Востребованность решения этих проблем была ясна уже 30 лет назад, однако, открытия последних лет, прежде всего ультраярких рентгеновских пульсаров (телескопами с зеркалами косого падения NuSTAR, Chandra и XMM-Newton) и новых богатых скоплений галактик (микроволновыми наземными телескопами АСТ и SPT и космическим телескопом Planck), многократно обострили интерес к этим явлениям.

Диссертация четко структурирована и изложена ясным языком. Автор постарался максимально полно отразить все стороны и особенности каждой из решаемых проблем. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и обширного списка литературы. Во *Введении* определены цели работы, кратко, но достаточно полно описаны достигнутые ранее результаты, обоснована актуальность работы. Перечислены решенные автором задачи и положения, выносимые на защиту. В *первой главе* рассмотрены режимы останковки вещества при аккреции на замагниченную нейтронную звезду. Особое внимание уделено случаю низких темпов аккреции и формированию циклотронной линии в рамках модели аккреционной колонки с бесстолкновительной ударной волной. Рассмотрены конкретные источники (GX 304-1 и Сер X-4, а также GRO J1008-57), рассчитана зависимость высоты фронта ударной волны над поверхностью нейтронной звезды и выполнено сравнение с наблюдениями связанной с ней зависимости энергии циклотронной линии от рентгеновской светимости. В *второй и третьей главах* рассмотрен случай более высоких темпов аккреции, при которых течение в канале аккреционных колонок и ударная волна, в которой происходит торможение аккрецируемой плазмы, становятся радиационно-доминированными. Во *второй главе* эта задача рассчитана в приближении локального комптоновского равновесия в трехмерном случае (аккреционная колонка не считается аксиально-симметричной). В *третьей главе* задача решается самосогласованно с учетом

процессов тепловой и динамической комптонизации в предположении аксиальной симметрии. Наконец, в *четвертой главе* методом Монте-Карло рассчитаны искажения спектров микроволнового космического фонового излучения, возникающие при его комптонизации в горячем газе скоплений галактик (тепловой эффект Сюняева-Зельдовича). В *Заключении* суммируются результаты работы.

Диссертация основана на 6 работах, опубликованных в ведущих реферируемых астрофизических журналах (MNRAS и A&A), и 3 дополнительных работах, опубликованных в трудах конференций, в 5 работах М.И. Горностаев является первым автором. Результаты диссертации обсуждены на многих конференциях и семинарах. В частности, М.И. Горностаев выступал в отделе Астрофизики высоких энергий ИКИ РАН, где произвел очень хорошее впечатление четкостью ответов на самые разные вопросы по теме диссертации. Автореферат диссертации полностью соответствует тексту диссертации.

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

1. Заметная часть первой главы является обобщением результатов других авторов. При этом упоминаются, но не приводятся, более точные выражения, полученные М.И. Горностаевым в работе [17]. Мне кажется, что эти выражения следовало бы привести, чтобы подчеркнуть вклад автора.
2. Поверхностная глубина торможения плазмы $y_0 \sim 10 \text{ г см}^{-3}$, полученная автором в первой главе, соответствует не слишком большой томсоновской толщине $\tau_T \leq 4$. В этом случае диффузионное приращение для описания переноса излучения может не работать. М.И. Горностаев отмечает это в тексте диссертации. Не понятно, почему нельзя было провести расчеты методом Монте-Карло спектров излучения, формирующихся в таком плазменном слое, раз уж автор написал код и освоил этот метод в последней главе. Кстати, привести рисунки с реально формирующимся спектром (и сравнить его со спектром, предсказанным в приближении уравнения Компанейца) было бы полезно и при анализе циклотронных линий поглощения. Рис. 8, на котором приведена аппроксимация спектра излучения пульсара GRO J1008-57, соответствует случаю высокого темпа аккреции (светимость $\sim 1.4 \times 10^{38} \text{ эрг с}^{-1}$) с большой оптической толщиной аккреционной колонки (и, вероятно, радиационно-доминированной плазмой), поэтому примером здесь быть не может.
3. Понятие “глубины циклотронной линии” (рис. 2-3) требует отдельного объяснения. Может быть, здесь следовало бы использовать термин “эквивалентная ширина” линии, общепринятый в астрофизике.
4. Из сравнения рис. 9 и 10, а также 11а и 11б (глава 2) видим, что в случае незамкнутой аккреционной колонки (10 и 11б) ее высота z оказывается заметно меньшей (в 5-6 раз), чем в случае колонки заполненной (9 и 11а). При этом поперечная площадь незамкнутой колонки заметно меньше площади заполненной, темп аккреции одинаковый, скорость близка к скорости свободного падения, поэтому интуитивно кажется, что незамкнутая колонка должна быть наоборот выше? В случае самосогласованного решения (рис. 15, глава 3) толщина (радиус колонки) оказывается в

- 1.5 раза больше толщины колонки на рис. 11а. И это согласуется с заметно более медленным торможением плазмы в этом случае (меньшей высотой уровня $Q = 0.1$).
5. Согласно рис. 18 наиболее жесткий спектр формируется вблизи основания аккреционной колонки (при малых z). Но на рис. 15-16 в области малых z находится наиболее холодная плазма. Поскольку в радиационно-доминированной плазме температура излучения должна быть близкой к температуре плазмы, это странно. Вообще, образование такой холодной, но высокой прослойки (в случае рис. 15а и 15в высота температурного перехода достигает почти половины высоты колонки) требует объяснения. Поддерживать ее должно давление излучения, но тогда и температура должна быть высокой.
 6. В обосновании важности численных расчетов искажений спектра реликтового излучения в горячем газе скоплений галактик методом Монте-Карло (глава 4) автор сравнивает их с классическим решением этой задачи через уравнение Компанейца (1956). Действительно, диффузионное (по оси частот фотонов) уравнение Компанейца формально неприменимо к данной задаче, т.к. оптическая толща облака горячей плазмы в скоплениях очень мала (даже в самых богатых скоплениях она не превышает 10^{-2}), соответственно мало число рассеяний, испытываемых фотонами в облаке такой плазмы. Тем не менее, было неоднократно показано, что оценки, получаемые с использованием уравнения Компанейца, дают очень точное значение величины эффекта. В частности, в статье Сюняева [Письма в Астрономический журнал, 6, 387 (1980)] было выведено точное кинетическое уравнение переноса излучения в условиях действия комптонизации (в нерелятивистском пределе) и проведено сравнение его решения с решением уравнения Компанейца. В релятивистском случае аналогичное уравнение было выведено в статье Сазонова, Сюняева [Astrophys. J., 393, 793 (2000)]. Правда, получить аналитическое решение в этом случае уже не удастся, но численно решать его (взять численно пару интегралов) намного проще, чем моделировать проблему методом Монте-Карло. Поэтому особого смысла использовать расчеты методом Монте-Карло для эффекта Сюняева-Зельдовича в случае однородного облака плазмы нет.
 7. Большинство результатов 4 главы рассчитаны в предположении оптической (томсоновской) толщии газа $\tau_T \sim 0.01 - 0.1$, почти на порядок величины превышающей реальные значения толщии горячего газа в скоплениях галактик. И какое отношение к эффекту Сюняева-Зельдовича имеют расчеты с точечным или равномерно распределенным по объему облака источником излучения?
 8. Не имеют отношения к этому эффекту и распределения интенсивности излучения по углу вылета (рис. 28-29). Реликтовое излучение изотропно, поэтому при облучении сферического облака, выходящее излучение тоже изотропно. Вот если бы облако было не сферически-симметричным, анизотропия могла бы возникнуть. Дело в том, что "отрицательные" особенности в эффекте Сюняева-Зельдовича возникают в спектре реликтового излучения, идущего с обратной от наблюдателя стороны облака, тогда как "положительные" особенности возникают в однократно-рассеянном излучении, приходящем сбоку. В этом смысле утверждение автора, что SZ-эффект линеен по оптической толще является не совсем точным. Т.е. он линеен, но по разному для толщии вдоль луча зрения и для средней толщии.

9. Расчеты методом Монте-Карло эффекта Сюняева-Зельдовича имели бы смысл для реалистичных неоднородных распределений плотности и, особенно, температуры горячего газа в скоплениях галактик (β -модель, модель Наварро-Френка-Вайта и др., см., например, Гребенев, Сюняев, Письма в Астрономический журнал, т. 45, с. 835 (2019)). Другими методами рассчитать эффект в этом случае не удастся, а именно модели с такими распределениями следует с сравнивать с реальными наблюдениями. Удивительно, что автор диссертации такие расчеты не провел.
10. Наконец, нельзя не отметить использование М.И. Горностаевым некоторых американизмов или просто неточностей в обозначении научных терминов. Что стоит, например, “дисторция интенсивности излучения” вместо “искажение ...”. Или, что такое “спектральная интенсивность”. Есть понятие “спектральный поток”.

Высказанные замечания, конечно, ни в коей мере не затрагивают справедливости основных выводов диссертации и не умаляют значимости проведенного исследования. Данная диссертация отвечает всем требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В. Ломоносова для работ такого рода. Содержание диссертации соответствует паспорту специальности “1.3.1 — Физика космоса, астрономия” (“01.03.02 — Астрофизика и звездная астрономия”) (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в МГУ им. М.В. Ломоносова. Диссертация оформлена полностью в соответствии с положениями № 5–6 Положения о диссертационном совете МГУ им. М.В. Ломоносова.

Считаю, что соискатель М.И. Горностаев заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности “1.3.1 — Физика космоса, астрономия” (“01.03.02 — Астрофизика и звездная астрономия”).

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук*,
заведующий лабораторией Рентгеновской и гамма-астрономии отдела Астрофизики высоких энергий ФГБУН Институт космических исследований Российской академии наук (117997, г. Москва, Профсоюзная ул., д. 84/32, ИКИ РАН),

тел.:

e-mail: grebenev@iki.rssi.ru

С.А.Гребенев

16 мая 2022 г.

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

Заместитель директора ИКИ РАН,
доктор физико-математических наук

А.А. Лутовинов

16 мая 2022 г.

(* диссертация защищена по специальности 01.03.02 “Астрофизика и радиоастрономия”)