

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Осокиной Елены Владимировны «Одновершинные нейтринные процессы в формализме матрицы плотности во внешнем магнитном поле», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 – теоретическая физика.

Диссертация посвящена изучению процессов взаимодействия нейтрино с невырожденной горячей электрон-позитронной плазмой в присутствии сильного магнитного поля. Рассматриваются как процессы рождения нейтрино плазмой, так и реакции рождения электрон-позитронной плазмы с помощью нейтрино. Полученные результаты используются для исследования нейтринного остывания файерболла в период гигантской вспышки источника мягких повторяющихся гамма-всплесков (SGR), а также эффективности рождения плазмы гипераккреционным диском керровской черной дыры.

Диссертация состоит из введения, трех глав, трех приложений, заключения, содержит 9 рисунков и список литературы из 104 наименований. Объем диссертации - 107 страниц. Результаты диссертации опубликованы в 2 статьях из списка ВАК. Работы докладывались на ряде международных конференций и на различных семинарах.

Во Введении дан обзор актуальных проблем нейтринной астрофизики, связанных с тематикой диссертации. Также сформулированы основные задачи, которые нашли своё решение в работе: 1) развитие техники матрицы плотности для заряженной частицы в магнитном поле, 2) вычисление нейтринных светимостей электрон-позитронной плазмы во внешнем магнитном поле, 3) приложении полученных результатов к описанию нейтринного остывания гигантской вспышки SGR и 4) исследование реакций рождения электрон-позитронной плазмы нейтрино в окрестности гипераккреционного диска керровской черной дыры.

В первой главе показано, как можно получить матрицу плотности заряженной частицы во внешнем постоянном однородном магнитном поле. Полученное выражение инвариантно относительно преобразования Лоренца вдоль вектора напряженности поля, что упрощает вычисление квадратов  $S$ -матричных элементов процессов. Если устремить поле к нулю и учесть, что дискретный спектр энергий переходит в непрерывный, матрица плотности в магнитном поле переходит в стандартное вакуумное выражение. В следующем параграфе главы с помощью матрицы плотности получены ковариантные выражения 4-импульса, уносимого нейтрино из единицы объема среды в единицу времени, для нескольких конкретных процессов.

Во второй главе диссертации рассмотрены все значимые процессы нейтринного излучения релятивистской электронейтральной электрон-позитронной плазмы. Полученные выражения нейтринных светимостей используются для оценки нейтринного охлаждения облака плазмы с сильным магнитным полем (магнитарная модель гигантской вспышки источника мягких повторяющихся гамма-всплесков (SGR)). Показано, что основной вклад в нейтринную светимость дают процессы аннигиляции

электрон-позитронной пары в пару нейтрино произвольного аромата и нейтринное синхротронное излучение электроном (позитроном). Последний процесс не учитывался ранее, поскольку полагалось, что в сильном магнитном поле его светимость экспоненциально подавлена. В работе показано, что светимость процесса нейтринного синхротронного излучения в несколько раз больше асимптотической светимости в процессе аннигиляции. Таким образом, магнитарная модель, в которой нейтринным охлаждением из объема облака плазмы пренебрегалось, нуждается в существенной модификации.

В третьей главе исследуются реакции рождения электрон-позитронной плазмы  $\nu_i + \bar{\nu}_i \rightarrow e^- + e^+$  и  $\nu_i(\bar{\nu}_i) \xrightarrow{B} \nu_i(\bar{\nu}_i) + e^+ + e^-$  в пределе  $\omega^2 \gg eB \gg m_e^2$ . Такие параметры энергий нейтрино и напряженности полей могут реализоваться в ряде астрофизических объектов, например, вблизи гипераккреционного диска керровской черной дыры. Данные объекты должны возникать при слиянии двух нейтронных звезд в тесной двойной системе, а также при неудавшемся взрыве сверхновой с массивным ядром. В них могут генерироваться сильные магнитные поля с напряженностями много больше критической. Как показывают результаты численного моделирования, внутренняя часть диска плотная и горячая, поэтому эффективно остывает с помощью нейтринного излучения. В свою очередь, нейтрино-антинейтринные пары, излучаемые из диска, рождают электрон-позитронную плазму, которая при определенных модельно зависимых условиях, может образовать джет – источник космологического гамма-всплеска. В работе показано, что полевой вклад в сечение процесса аннигиляции в рассматриваемом приближении осциллирует в магнитном поле и не превышает нескольких процентов от вакуумного сечения. Таким образом, полевая поправка к сечению процесса пренебрежимо мала. Для реакции рождения электрон-позитронной плазмы одиночным нейтрино рассчитанная в рассматриваемом приближении светимость сравнивается со светимостью в пределе скрещенного поля. Показано, что полученное в главе выражение для нейтринной светимости может существенно (в несколько раз) превышать светимость в пределе скрещенного поля и сильно зависит от распределения магнитного поля в окрестности диска.

В разделе "Заключение" кратко сформулированы полученные в диссертации результаты.

Отметим недостатки работы.

1. Одним из серьёзных недостатков работы является отсутствие в ряде случаев надлежащих ссылок на ранее опубликованные работы других авторов и, соответственно, сравнений полученных в диссертации результатов с результатами ранее опубликованных работ других авторов. Это, в частности, приводит читателя к искаженному представлению об истории исследований по конкретным вопросам, вошедших в диссертацию. Проведение указанных сравнений позволило бы получить дополнительное подтверждение достоверности полученных в диссертации результатов. Данное замечание касается, в первую очередь, истории изучения магнитотормозного излучения электроном пар нейтрино-антинейтрино. Как следствие указанного выше, в работе отсутствует сравнение полученных и используемых в диссертации выражений для квадрата матричного элемента указанного процесса с аналогичными результатами, полученными в 60-80-х годах двадцатого века группами ученых из МГУ, ФИАНа и ИЯФ Сибирского отделения АН СССР.

2. Аналогичное замечание касается и части диссертации, посвященной исследованию вкладов урка-процессов в уносимый нейтрино импульс. В диссертации отсут-

ствуется указание на посвященную данному вопросу работу "Асимметрия нейтринного излучения при бета-распаде нейтрино в сверхплотном веществе и сильном магнитном поле" (В.Л.Кауц, А.М.Савочкин, А.И.Студеникин, Ядерная физика, 2006, том 69, с. 1488-1495), в которой проведено исследование углового распределения импульса, уносимого антинейтрино, с учетом действия сильного магнитного поля и эффектов плотности среды при остывании нейтронных звезд.

3. Значительная часть диссертации посвящена обсуждению характеристик нейтринных процессов, протекающих в условиях сверхсильных магнитных полей с напряженностью порядка  $10^{15-16}$  Гаусс. Однако в тексте отсутствует обсуждение или упоминание о механизмах возникновения столь сильных магнитных полей, и поэтому осталось без мотивированного обоснования необходимость рассматривать столь сильные магнитные поля при протекании нейтринных процессов в конкретных астрофизических условиях, рассматриваемых автором.

4. В качестве недостатка диссертации укажем на отсутствие обсуждения эффектов смешивания и осцилляций нейтрино, а также и возможного влияния ненулевого магнитного момента нейтрино в процессах формирования нейтринного излучения в плотных замагниченных средах. Последний из указанных эффектов в настоящее время активно обсуждается в литературе, и при наличии сверхсильных магнитных полей (напряженности порядка  $10^{15-16}$  Гаусс), которые рассматриваются в диссертации, может давать значимые вклады в процесс нейтринного остывания.

5. Восприятие содержания и результатов диссертации затруднено имеющейся непоследовательностью в формулировках постановки задач и изложении материала. Так, например, на стр. 23-24 находим следующее утверждение:

"В этом разделе покажем, как работает формализм матрицы плотности на следующих примерах: процесс нейтринного синхротронного излучения (1.3), процесс аннигиляции электрона и позитрона в пару нейтрино (1.1), а также  $u\bar{u}$ -процесс (1.5)".

Однако, в выводах к данному разделу на стр. 29 содержится следующее: "Эффективность этой техники продемонстрирована при получении ковариантного выражения 4-вектора  $P$  для процессов аннигиляции электрона и позитрона в пару нейтрино, нейтринного синхротронного излучения электроном (позитроном)".

Подобная небрежность изложения встречается и в тексте автореферата. Так, например, на стр. 4 в разделе "Основные результаты, выносимые на защиту" указано: "Данной техникой получены ковариантные выражения для 4-импульса в процессах аннигиляции электрона и позитрона в нейтрино-антинейтринную пару, нейтринного синхротронного излучения электроном (позитроном) и  $u\bar{u}$ -реакциях". В то же время, на странице 9 раздела "Содержание работы" приводится формула (5) для уносимого из единицы объема импульса лишь для одного из перечисленных в разделе "Основные результаты, выносимые на защиту" процессов, и при этом даже без указания - для какого из трех перечисленных процессов.

6. Текст диссертации содержит немалое количество неточных формулировок. Например, таких как: "с поверхности излучается только мягкий рентген"; "В Разделе 2.2 вычисляется нейтринная светимость в процессе нейтринного синхротрона" (стр. 30).

7. В тексте имеются орфографические ошибки и пропущенные знаки препинания, что также затрудняет чтение и восприятие материала. В текстах диссертации и автореферата имеются рассогласования, например, одновременно присутствуют два

термина: "гипераккреционный" и "гипер-аккреционный".

Несмотря на отмеченные недостатки, всё же можно сделать вывод, что соискатель ученой степени проделал большую работу по развитию теории нейтринных процессов в специфических условиях горячей среды и сильных магнитных полей астрофизических объектов. Автореферат соответствует содержанию диссертации.

Диссертационная работа выполнена на достаточно высоком научном уровне, представляет собой законченную научно-квалификационную работу и удовлетворяет критериям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор, Осокина Елена Владимировна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 – "Теоретическая физика".

Официальный оппонент:  
профессор кафедры теоретической  
физики МГУ имени М.В. Ломоносова,  
доктор физ.-мат. наук

А.И. Студеникин

Декан физического факультета  
профессор



Н.Н. Сысоев

Студеникин Александр Иванович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры теоретической физики физического факультета федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова» (МГУ имени М.В. Ломоносова).

Адрес: МГУ имени М.В. Ломоносова 119991, Россия, г. Москва, Ленинские горы, д.1, стр. 2, Физический Факультет  
тел.: 8 (495) 939-16-17  
e-mail: studenik@srd.sinp.msu.ru