

**ИНСТИТУТ КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК**

На правах рукописи

Огнев Игорь Сергеевич

**ПРОЦЕССЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НЕЙТРИНО
С НУКЛОНАМИ ЗАМАГНИЧЕННОЙ СРЕДЫ
ОБОЛОЧКИ СВЕРХНОВОЙ**

Специальность: 01.04.02 – теоретическая физика

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2006

Работа выполнена на кафедре теоретической физики
Ярославского государственного университета им. П.Г. Демидова

Научный руководитель:
кандидат физико-математических наук,
доцент А.А. Гвоздев (ЯрГУ, Ярославль)

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук Я.Н. Истомин (ФИРАН, Москва)

доктор физико-математических наук С.И. Блинников (ИТЭФ, Москва)

Ведущая организация:

Санкт-Петербургский Физико-Технический Институт им. А.Ф. Иоффе

Защита состоится " _____ " _____ 2006 г. в _____ часов на заседании
диссертационного совета Д 002.113.03 Института космических исследований
РАН по адресу: 117997, Москва, ул. Профсоюзная, 84/32.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИКИ РАН г. Москва.

Автореферат разослан " _____ " _____ 2006 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 002.113.03

Т.М. Буринская

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

Как известно, нейтринные процессы, несмотря на их слабость, могут оказывать существенное влияние на эволюцию различных астрофизических объектов. Обычно нейтрино выступают в роли основного источника остывания таких систем, так как их плотная и горячая среда является непрозрачной для фотонного излучения. Однако, до того, как нейтрино покидают такой объект, унося энергию, некоторые из них успевают провзаимодействовать с веществом его наружных областей. В частности, одним из наиболее известных эффектов такого взаимодействия является дополнительное нагревание или охлаждение соответствующих внешних частей объекта. Другим возможным его проявлением служит передача среде макроскопического импульса. А именно, вследствие распространения наружу, нейтрино обладают его избыточной радиальной составляющей, часть из которого может передаваться веществу.

С другой стороны, известно, что такие объекты, как сверхновые, не только излучают мощный нейтринный поток, но и могут обладать достаточно сильным магнитным полем. Его присутствие не только изменяет сечения процессов взаимодействия нейтрино с веществом, но и может привести к качественно новому динамическому эффекту. А именно, нарушение пространственной четности в нейтринных процессах приводит к передаче веществу избыточного макроскопического импульса вдоль направления магнитного поля. Следовательно, при прохождении нейтринного потока через замагниченную оболочку такого объекта, ей может передаваться нескомпенсированный гравитационным притяжением импульс. В частности, в случае тороидальной конфигурации магнитного поля, этот эффект приводит к дополнительной раскрутке или торможению оболочки, причем влияние этот эффекта на дальнейшую динамику объекта может быть достаточно сильным.

Таким образом, правильный учет взаимодействия нейтрино с плотной и горячей нуклонной средой в присутствии сильного магнитного поля является одной из важных задач современной астрофизики, необходимой для самосогласованного описания эволюции таких объектов, как, например, сверхновые с коллапсом центральной части.

Цель диссертационной работы состоит в изучении возможных эффектов, вызванных взаимодействием нейтринного потока с сильно замагниченной средой оболочки сверхновой.

Научная новизна результатов. Следующие результаты, представленные в диссертации, являются новыми:

- Вычислен квадрат S -матричного элемента прямых URCA-процессов в пределе сильного магнитного поля, когда электрон-позитронная плазма занимает основной уровень Ландау. Получено выражение для коэффициента абсорбции нейтрино в этих реакциях для случая больцмановского распределения протонов. При дополнительном предположении ультрарелятивизма электрон-позитронной плазмы вычислены энергия-импульс, передаваемый в этих процессах от нейтрино единичному объему среды в единицу времени и скорости реакций.

- Исследованы процессы рассеяния нейтрино на нуклонах с учетом взаимодействия аномального магнитного момента нуклона с магнитным полем. В пренебрежении отдачей нуклонов, получены общие выражения для скоростей процессов и энергии-импульса, передаваемого единичному объему среды в единицу времени.

- Исследовано квазиравновесие нейтринного потока с веществом оболочки сверхновой. Показано, что на стадии основного нейтринного остывания сверхновой температура среды и относительные концентрации нуклонов определяются прямыми URCA-процессами. При типичных для сверхновой нейтринных параметрах получены соответствующие квазиравновесные параметры среды, в том числе и в присутствии сильного магнитного поля.

- В условиях квазиравновесия с нейтринным потоком вычислен импульс, передаваемый среде при взаимодействии с нейтрино. Показано, что на часть оболочки сверхновой, заполненной сильным магнитным полем, в поперечном радиальном направлении действует нескомпенсированная сила, способная существенно влиять на динамику сверхновой. В частности, за время основного нейтринного излучения такая сила способна существенно изменить распределения угловых скоростей в оболочке сверхновой, что может привести к подавлению генерации магнитного поля в одном из полушарий сверхновой и ее одностороннему взрыву.

Основные положения выносимые на защиту:

1. Теоретический анализ прямых URCA-процессов в присутствии сильного магнитного поля. Расчет энергии-импульса, передаваемого в этих реакциях от нейтрино среде и скоростей процессов.
2. Теоретический анализ процессов рассеяния нейтрино на нуклонах в при-

существовании магнитного поля. Расчет скоростей этих реакций и энергии-импульса, передаваемого среде.

3. Теоретический расчет импульса, передаваемого оболочке сверхновой в присутствии сильного магнитного поля при прохождении через нее основного нейтринного потока.

Практическая ценность работы состоит в том, что правильный учет взаимодействия нейтрино с плотной и горячей нуклонной средой, в том числе, в присутствии сильного магнитного поля, является необходимым для самосогласованного описания эволюции астрофизических объектов, излучающих мощный нейтринный поток, таких, например, как сверхновые с коллапсом центральной части.

Полученные результаты имеют достаточно общий характер и могут быть использованы не только для сверхновых, но и для других астрофизических объектов, в которых важным является взаимодействие нейтрино с горячей нуклонной средой. В частности, выражение для коэффициента абсорбции нейтрино в прямых URCA-процессах позволяет получать скорости этих реакций и передаваемую в них энергию-импульс для произвольной функции распределения нейтрино, что может быть использовано для описания систем, в которых сферическая симметрия распространения нейтрино сильно нарушена.

Кроме того, рассматриваемый эффект передачи импульса от нейтринного потока замагниченной среде является качественно новым, может приводить к сильному влиянию на динамику и дальнейшую эволюцию объектов, в которых распространение нейтрино происходит в присутствии сильного магнитного поля.

Апробация результатов. Основные результаты диссертации докладывались лично автором на следующих Российских и международных конференциях, школах и семинарах:

- Научные конференции Отделения ядерной физики РАН “Физика фундаментальных взаимодействий” (Москва, 1998, 2000, 2002, 2004, 2005)
- 2, 3, 5, 6 и 8 Московские Международные Физические Школы (Москва, 1999, 2000, 2002, 2003, 2005)
- Международные конференции “The Universe of Gamow: Original Ideas in Astrophysics and Cosmology” (Одесса, Украина, 1999, 2004)

- Международный симпозиум “Сильные магнитные поля в нейтринной астрофизике” (Ярославль, 1999)
- 11 и 12 Международные семинары “Кварки” (Пушкин, 2000; Новгород, 2002)
- Международная конференция “Joint European and National Astronomy Meeting” (Москва, 2000)
- Международная конференции “Физика нейтронных звезд” (Санкт-Петербург, 2001, 2005)
- Всероссийская астрономическая конференция (Санкт-Петербург, 2001)
- Всероссийские конференции “Астрофизика Высоких Энергий Сегодня и Завтра” (Москва 2001, 2002, 2003, 2005)

Автор докладывал результаты исследований на научных семинарах в Физическом институте им. Лебедева РАН (Москва), отделе теоретической астрофизики Физико-технического института РАН им. А.Ф. Иоффе (Санкт-Петербург), на кафедре теоретической физики Ярославского государственного университета им. П.Г. Демидова.

Публикации.

Основные результаты диссертации опубликованы в 7 печатных работах, в числе которых 4 статьи - в ведущих рецензируемых российских и международных журналах, 2 статьи в материалах международных научных конференций и 1 статья в тематическом сборнике научных работ. Список работ приведен в конце автореферата.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и приложения. Список цитируемой литературы включает 107 наименований. Общий объем диссертации составляет 115 страницы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** делается краткий исторический обзор рассматриваемой тематики и смежных вопросов. Затронуты основные проблемы, существующие на настоящее время в этой области астрофизики, делается обзор литературы. Сформулирована цель работы и кратко изложено содержание глав диссертации.

Первая глава посвящена исследованию прямых URCA-процессов в присутствии сильного магнитного поля, когда электрон-позитронная плазма находится на основном уровне Ландау. Получены общие аналитические выражения для коэффициентов абсорбции нейтрино в этих реакциях, их скоростей и передаваемой среде энергии и импульса.

В первом параграфе дается краткий исторический обзор исследования прямых и модифицированных URCA-процессов и их роли в эволюции различных астрофизических объектов.

Во втором параграфе обсуждаются физические предположения о составе и характеристиках среды, в которой рассматриваются прямые URCA-процессы. Отдельно обсуждается вопрос о функции распределения нейтрино, которые, вследствие распространения наружу, не находятся в термодинамическом равновесии с остальным веществом.

Третий параграф посвящен вычислению квадрата S -матричного элемента URCA-процессов в присутствии сильного магнитного поля, когда электрон-позитронная плазма находится на основном уровне Ландау. В предположении, что протонный газ описывается бoльцмановской функцией распределения, получено ковариантное выражение квадрата S -матричного элемента прямых URCA-процессов.

В четвертом параграфе получены общие аналитические выражение коэффициентов абсорбции нейтрино, которые позволяют достаточно просто вычислять различные интегральные характеристики прямых URCA-процессов для произвольной функции распределения нейтрино. Для сравнения приводятся результаты расчета аналогичных величин в случае немагнитной среды. В наиболее интересном для астрофизических приложений пределе ультрарелятивистской электрон-позитронной плазмы получены скорости этих процессов. В этом же пределе для случая сферически-симметричного распространения нейтрино наружу вычислены энергия и импульс, передаваемые в прямых URCA-процессах единичному объему среды в единицу времени.

Вторая глава посвящена изучению процессов рассеяния нейтрино на свободных нуклонах в присутствии магнитного поля.

В первом параграфе дан обзор работ, в которых изучались рассматриваемые процессы. Обсуждается влияние этих реакций на распространение нейтрино в различных астрофизических объектах.

Во втором параграфе вычисляется квадрат S -матричного элемента процессов рассеяния нейтрино на нуклонах в присутствии магнитного поля. Ре-

зультат приводится как в ковариантной форме, так и в системе покоя нуклонной среды.

В третьем параграфе получены общие выражения скоростей реакций рассеяния нейтрино на нуклонах. Для случая сферически-симметричной функции распределения нейтрино вычислены энергия и импульс, передаваемые в этих процессах единичному объему среды в единицу времени.

В **третьей главе** исследуются динамические эффекты, возникающие за счет взаимодействия распространяющегося наружу нейтринного потока с замагниченной средой оболочки сверхновой с коллапсом центральной части.

В первом параграфе проводится краткий обзор предположений, при которых были получены общие аналитических выражения переданных среде энергии и импульса в интересующих нас процессах. Анализируется возможность их применения к реальным астрофизическим объектам типа сверхновых с коллапсом центральной части.

Во втором параграфе изучается вопрос о виде функции распределения нейтрино в случае, когда их распространение наружу мало отличается от сферически-симметричного. Основываясь на результатах работ, где такая задача решалась численно, мы получили типичные для сверхновых с коллапсом центральной части параметры, необходимые для описания нейтринного потока. Показано также, что во времена основного нейтринного остывания температура среды в оболочке сверхновой и относительные концентрации нуклонов определяются, в основном, параметрами потока электронных нейтрино. В условиях квазиравновесия вещества оболочки сверхновой с нейтринным потоком получены типичные параметры среды.

Третий параграф посвящен расчету влияния взаимодействия нейтрино с замагниченным веществом оболочки сверхновой на ее динамику. Получены выражения для плотности силы, действующей на замагниченное вещество оболочки сверхновой, возникающей вследствие взаимодействия с нейтринным потоком. Показано, что проекция этой силы на радиальное направление много меньше гравитационной силы и влияние ее на динамику сверхновой незначительно. С другой стороны, составляющая этой силы в поперечном к радиальному направлению является нескомпенсированной и составляет

$$\mathfrak{S}_{\perp}^{(urca)} \simeq 7 \cdot 10^{19} \text{ дин/см}^3 \left(\frac{B_{\perp}}{10^{16} \text{ Гс}} \right) \left(\frac{\rho}{10^{12} \text{ г/см}^3} \right),$$

$$\mathfrak{S}_{\perp}^{(sc)} \simeq 6 \cdot 10^{19} \text{ дин/см}^3 \left(\frac{B_{\perp}}{10^{16} \text{ Гс}} \right) \left(\frac{\rho}{10^{12} \text{ г/см}^3} \right),$$

где B_{\perp} - напряженность магнитного поля в перпендикулярном к радиальному направлению, ρ - плотность вещества. Полученные выражения позволяют сделать вывод, что при магнитных полях напряженности $B \sim 10^{16}$ Гс рассматриваемый эффект может существенно влиять на динамику оболочки сверхновой. В случае, когда магнитное поле такой напряженности генерируется по магниторотационному механизму, время существенного изменения распределения угловых скоростей в оболочке за счет нейтринной силы составляет

$$\tau \sim 4 \text{ сек} \left(\frac{B_0}{10^{13} \text{ Гс}} \right)^{-1/2},$$

где B_0 - напряженность начального полоидального магнитного поля. Так как это время сравнимо с временем основного нейтринного излучения сверхновой, то рассматриваемый эффект способен существенно влиять на ее динамику и генерацию в ней вторичного магнитного поля.

В заключении сформулированы основные результаты диссертации.

В приложении даны некоторые свойства проекционных операторов Π_{\pm} , упрощающих получение ковариантных выражений для квадратов S -матричных элементов рассматриваемых процессов.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ В ДИССЕРТАЦИИ

1. Исследованы прямые URCA-процессы в плотном и горячем нуклонном веществе в присутствии сильного магнитного поля. В предположении, что e^{\pm} -плазма оккупирует лишь основной уровень Ландау, а протонный газ - много, получено выражение для квадрата S -матричного элемента URCA-процессов. Отметим, что данный результат был получен независимо несколькими группами, однако, лишь в настоящей работе была разработана техника, позволяющая делать такие вычисления ковариантно. Детали техники подробно изложены в приложении. В предположении, что протонный газ является бoльцмановским, которое хорошо выполняется в условиях оболочки сверхновой, получены выражения для коэффициентов абсорбции нейтрино и антинейтрино в прямых URCA-процессах. Для случая ультрарелятивистской плазмы приводятся общие выражения скоростей реакций и величины энергии-импульса, передаваемого от нейтрино единичному объему среды в единицу времени.

2. В аналогичных условиях исследованы процессы рассеяния нейтрино на свободных нуклонах. В предположении, что протоны заполняют много уровней Ландау и с учетом взаимодействия аномального магнитного момента нуклона с магнитным полем получено ковариантное выражение для квадрата S -матричного элемента этих реакций. В пренебрежении отдачей нуклонов, получены общие выражения для скоростей процессов и энергии-импульса, передаваемого единичному объему среды в единицу времени.
3. Исследовано квазиравновесие нейтринного потока с веществом оболочки сверхновой. Показано, что на стадии основного нейтринного остывания сверхновой температура среды и относительные концентрации нуклонов определяются прямыми URCA-процессами. При типичных для сверхновой нейтринных параметрах получены соответствующие квазиравновесные параметры среды, в том числе и в присутствии сильного магнитного поля.
4. В условиях квазиравновесия с нейтринным потоком вычислен импульс, передаваемый среде при взаимодействии с нейтрино. Показано, что на часть оболочки сверхновой, заполненной сильным магнитным полем, в поперечном радиальном направлении действует нескомпенсированная сила, способная существенно влиять на динамику сверхновой. В частности, за время основного нейтринного излучения такая сила способна существенно изменить распределения угловых скоростей в оболочке сверхновой, что может привести к подавлению генерации магнитного поля в одном из полушарий сверхновой и ее одностороннему взрыву.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Гвоздев А.А., Огнев И.С. О возможном усилении магнитного поля процессами переизлучения нейтрино в оболочке сверхновой // Письма в журн. эксперим. и теор. физ. 1999. Т. 69, N 5, С. 337-342.
2. Гвоздев А.А., Огнев И.С. Влияние процессов переизлучения нейтрино в магнитном поле на динамику оболочки протозвезды // Ядерная физика 1999. Т 62, N 12, С. 2276-2279.

3. Ognev I.S., Gvozdev A.A. Kick asymmetry along a strong magnetic field in the process of neutrino scattering on nucleons // *Odessa Astronomical Publications* 1999. V 12, P. 224-226.
4. Гвоздев А.А., Огнев И.С. Процессы взаимодействия нейтрино с нуклонами в среде с сильным магнитным полем // *Сборник Актуальные проблемы физики. Выпуск 2: Сборник научных трудов молодых ученых, аспирантов и студентов Яросл. гос. ун-т. Ярославль. 1999. С. 24-31.*
5. Gvozdev A.A., Ognev I.S. Neutrino-nucleon reemission processes in a strong magnetic field // In proceedings of the international workshop "Strong Magnetic Fields in Neutrino Astrophysics" edited by A. V. Kuznetsov, N. V. Mikheev, A. Ya. Parkhomenko Yaroslavl, 2000. P. 127-134.
6. Gvozdev A.A., Ognev I.S. Kick torsion of magnetized medium by neutrinos // *Surveys in High Energy Physics* 2001. V 15. P. 371-379.
7. Гвоздев А.А., Огнев И.С. Процессы взаимодействия нейтрино с нуклонами оболочки коллапсирующей звезды с сильным магнитным полем // *ЖЭТФ* 2002. Т. 121. С. 1219.