

На правах рукописи

Савочкин Александр Михайлович

АНИЗОТРОПИЯ РОЖДЕНИЯ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ НЕЙТРИНО
В ПЛОТНЫХ АСТРОФИЗИЧЕСКИХ СРЕДАХ

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 — 2007

Работа выполнена на кафедре теоретической физики физического факультета Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова.

Научный руководитель: Доктор физико-математических наук,
профессор А. И. Студеникин

Официальные оппоненты: Доктор физико-математических наук,
Ю. М. Лоскутов (кафедра физики высоких энергий
физического факультета МГУ)

Кандидат физико-математических наук,
Е. В. Арбузова (Международный университет
природы, общества и человека «Дубна»)

Ведущая организация: ОИЯИ, г. Дубна

Защита диссертации состоится “ _____ ” _____ 2007 года в _____ часов на заседании диссертационного совета К 501.001.17 МГУ им. М. В. Ломоносова по адресу: 119992, г. Москва, ГСП, Ленинские Горы, МГУ, физический факультет, ауд. _____.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке физического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова.

Автореферат разослан “ _____ ” _____ 2007 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета К 501.001.17,
доктор физико-математических наук

П. А. Поляков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Диссертация посвящена исследованию асимметрии некоторых квантовых эффектов, связанных с нейтрино в плотных астрофизических средах. В работе рассматривается два источника асимметрии. Первый – наличие выделенного направления в пространстве за счёт сильного магнитного поля. Второй – неизотропное движение материи (выделенное направление в этом случае – ротор плотности потока материи). Рассматривается влияние сильного магнитного поля на угловое распределение излучения антинейтрино при бета-распаде нейтрона в сверхплотном горячем веществе и квантовые состояния нейтрино в среде, с градиентом скорости. В диссертации используются решения уравнений для волновых функций частиц во внешних полях и средах. В результате получена асимметрия излучения антинейтрино при бета-распаде нейтрона в среде, близкой по плотности и составу к веществу нейтронной звезды, для различных значений напряжённости магнитного поля. Исследован вопрос о квантовых состояниях и распространении нейтрино в плотной среде с градиентом скорости. Показано, что движение нейтрино в плоскости перпендикулярной ротору скорости квантовано (финитно). Так же показано, что размер классически доступной области движения нейтрино для плотного вращающегося объекта, соответствующего по своим параметрам (плотность, угловая скорость вращения) нейтронной звезде, сравним с диаметром нейтронной звезды для нейтрино с энергией порядка 10 эВ. Используемая конфигурация среды может рассматриваться как модель внешних слоёв быстровращающейся нейтронной звезды. Обсуждается влияние возможной малой массы нейтрино на описанный эффект.

Актуальность темы диссертации

обусловлена важной ролью физики взаимодействия элементарных частиц во внешних полях и средах в астрофизике и космологии вообще, и, в частности, физики нейтрино в сверхплотных замагниченных средах применительно к физике нейтронных звёзд. Несмотря на сложности, связанные с наблюдениями этих объектов и интерпретацией полученных из наблюдений данных нейтронные звёзды рассматриваются как своеобразные лаборатории, в которых реализуются такие состояния вещества, которые невозможно получить в наземных условиях. Одной из проблем, связанных с пульсарами

(нейтронные звёзды проявляют себя в наблюдениях как пульсары) является их высокая скорость на фоне близлежащих звёзд. Несимметричность вылета нейтрино, рождающегося в бета-процессах внутри нейтронной звезды (или, возможно, во время взрыва сверхновой, предшествующего рождению нейтронной звезды) рассматривается современными исследователями как один из возможных механизмов объяснения данного феномена. Для того чтобы исследовать характер асимметрии и порядок её величины для различных значений напряжённости магнитного поля, в диссертации рассмотрен один из так называемых урка-процессов – бета-распад нейтрона в магнитном поле для условий, приближенных к тем, которые по современным представлениям реализуются в нейтронных звёздах.

Проблема распространения нейтрино в плотной материи так же является актуальной на современном этапе развития нейтринной физики. В качестве важных астрофизических и космологических приложений подобных задач можно назвать описание ранней вселенной, взрывы сверхновых звёзд, тепловая эволюция нейтронных звёзд – всюду, где предполагается существование высоких плотностей. В случае низкоэнергетических нейтрино рождающегося в недрах нейтронной звезды (доля таких нейтрино в нейтронных звёздах на поздней стадии остывания может быть велика) эффекты взаимодействия с веществом перестают играть роль поправок, и начинают играть ключевую роль в распространении нейтрино. В ряде недавних исследований показано, что существенное влияние на движение нейтрино оказывает движение материи. Предсказан ряд интересных эффектов: рождение нейтрино–антинейтринных пар в среде с градиентом плотности, в среде с изменяющейся во времени плотностью, удержание нейтрино с достаточно малыми энергиями в плотной среде (что может влиять на поздние стадии остывания нейтронных звёзд) и т.д.

Цель работы настоящей диссертации является последовательное квантово–механическое исследование некоторых эффектов связанных с рождением и распространением нейтрино в плотных средах. При этом используются модели среды, близкие к современным представлениям о нейтронных звёздах.

Научная новизна работы состоит в том, что в ней: впервые применены Монте-Карло и метод точных решений для получения численных оценок асимметрии

вылета антинейтрино для бета-распада нейтрона в веществе вырожденного Ферми-газа состоящего из протонов, нейтронов и электронов (модель среды соответствующая современным представлениям о среде нейтронных звёзд) для различных значений напряжённости магнитного поля, лежащих в интервале $10^{15} - 10^{17}$ Гс. Взяты реалистичные значения концентраций компонент среды и температуры. Учтена поляризуемость среды магнитным полем. Показан резонансный характер зависимости асимметрии вылета от напряжённости поля.

В соответствии с последовательным квантово-механическим подходом основанным на «обобщённом уравнении Дирака» рассмотрена задача о волновых функциях и энергетическом спектре нейтрино в среде с градиентом скорости. Обсуждается влияние на поведение нейтрино возможной малой массы нейтрино. Применён метод конечных разностей для разработки алгоритма численного исследования распространения нейтрино в указанной конфигурации материи.

Найденные волновые функции нейтрино в среде используются для исследования эффекта «спинового света нейтрино» в условиях среды с градиентом скорости.

Практическая ценность

Полученные в данной работе результаты могут быть использованы при исследовании нейтринных процессов, протекающих в сильных магнитных полях и решении задач, связанных с движением нейтрино в плотных средах и в различных внешних полях в астрофизике и космологии. Результаты работы могут также быть использованы для описания структуры различных астрофизических объектов и механизма возникновения импульса отдачи пульсаров, наблюдаемые скорости движения которых достигают значений вплоть до 1000 км/с, при экспериментальном исследовании изученного в диссертации спинового света электрона в среде и при планировании новых экспериментов с космическими нейтрино.

Апробация диссертации.

Основные результаты, вошедшие в диссертацию, докладывались и обсуждались на следующих конференциях: 7th Russian Conference on Physics of Neutron Stars (St.Petersburg, 2005); XIII международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых “Ломоносов-2006” (Москва, 2006); Научная конференция

“Ломоносовские чтения” (Москва, 2007).

Публикации.

Основные результаты диссертации изложены в 5 опубликованных работах, список которых приводится в конце автореферата.

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, двух глав, заключения и списка цитированной литературы, который насчитывает 98 наименований. Общий объем 100 страниц, в работе содержится 9 рисунков.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Введение. Во введении кратко обсуждаются основные этапы развития физики нейтрино и её современное состояние, место нейтрино в современной физике элементарных частиц. Акцентируется внимание на важной роли нейтрино в астрофизике и космологии, особенно на роли нейтрино как переносчика энергии в физике звёзд и в частности, в физике нейтронных звёзд. Дается краткий обзор метода точных решений применительно к нейтрино в среде, известных эффектов, описываемых в рамках данного подхода.

Глава 2. Асимметрия нейтринного излучения при бета-распаде нейтрона в сверхплотном веществе и сильном магнитном поле. Данная глава посвящена исследованию одного из урка-процессов в сильном магнитном поле и сверхплотном веществе, по своим параметрам (плотность, состав, температура) соответствующем представлениям о материи нейтронной звезде после её рождения в результате взрыва сверхновой. На примере этого процесса исследуется возникновение асимметрии излучения антинейтрино при включении в рассмотрение магнитного поля.

Последовательно учтена как поляризация исходных нейтронов среды, так и изменение энергии квантовых состояний результирующих протонов и электронов магнитным полем. В качестве модели вещества нейтронной звезды выбран замагниченный ферми-газ, состоящий из смеси протонов, нейтронов и электронов. Все компоненты среды считаются вырожденными. Предполагается также, что компоненты среды находятся в бета-равновесии. Это означает, что в среде идут процессы бета-распада и обратного бета-распада нейтронов, которые уравнивают друг друга, и

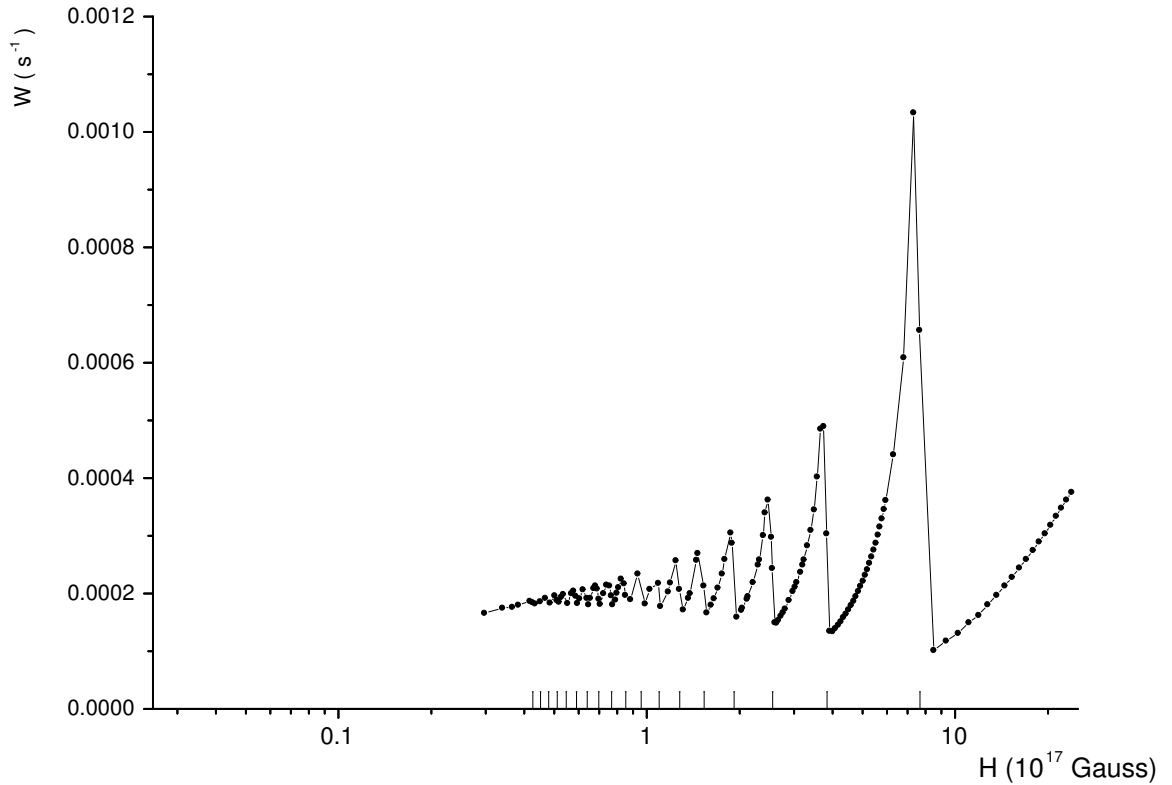


Рис. 1: Зависимость вероятности распада нейтрона от напряжённости магнитного поля. Штрихи над осью абсцисс соответствуют значениям магнитного поля $B = E_f m / en$, $n = 0, 1, 2..$ при которых энергия Ферми равна энергии возбуждения n -го уровня Ландау.

количество протонов, нейтронов и электронов остается постоянным. Это накладывает определённое соотношение на концентрации частиц. Кроме того, считается, что среда в целом электронейтральна. (Из этого условия следует равенство концентраций протонов и электронов).

Бета-распад нейтрона в магнитном поле описывается с использованием эффективного 4-фермионный лагранжиана, на основе которого находится матричный элемент и дифференциальную вероятность процесса в вакууме. Для нахождения полной вероятности используется метод Монте-Карло. При интегрировании и суммировании по квантовым числам образующихся частиц,

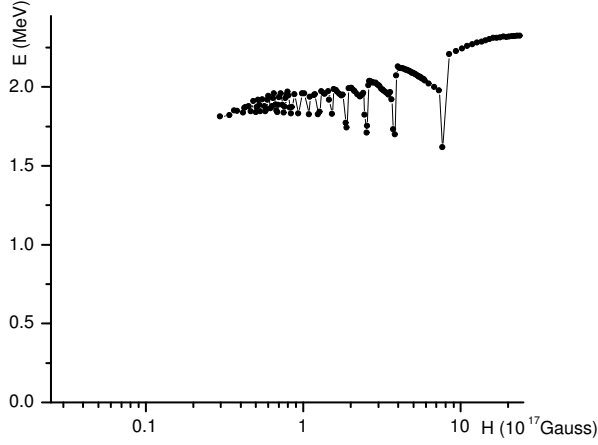


Рис. 2: Зависимость средней энергии нейтрино от напряжённости магнитного поля

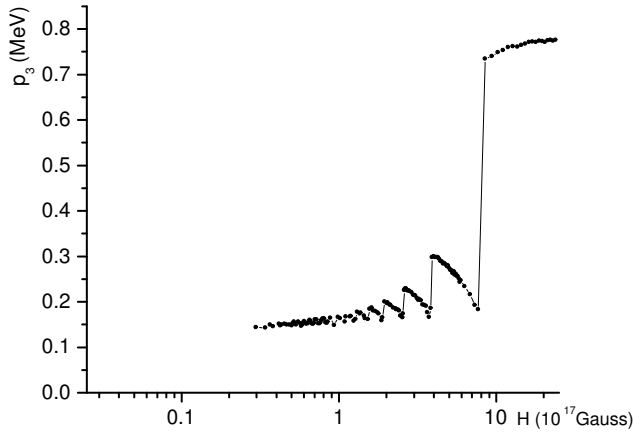


Рис. 3: Зависимость средней проекции импульса нейтрино на направление магнитного поля от напряжённости поля

учитываются функции распределения образующихся протонов и электронов f_p, f_e :

$$\begin{aligned}
W_1(\theta_n, E_n) &= \frac{eB}{2^8(2\pi)^3} \sum_{\Omega} |M|^2 (1 - f_e)(1 - f_p) = \\
&= \frac{eB}{2^8(2\pi)^3} \int \sum_{n', n} |M|^2 \delta(p_n \cos \theta_n - k_3 - p_3 - \varkappa \cos \theta_\nu) \\
&\quad \times \delta \left(E_n + \Delta - \sqrt{m_e^2 + k_3^2} + 2\gamma n - \frac{p_3^2}{2m_p} - \frac{\gamma n'}{m_p} - \varkappa \right) \\
&\quad \times (1 - f_e)(1 - f_p) \varkappa^2 \sin \theta_\nu dk_3 dp_3 d\varkappa d\theta_\nu .
\end{aligned} \tag{1}$$

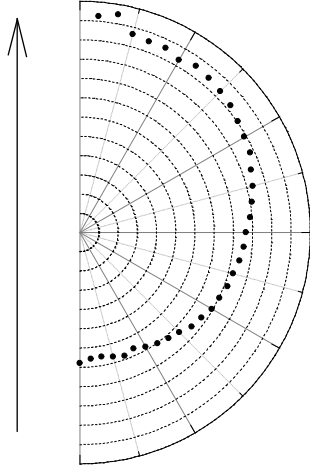


Рис. 4: Полученное угловое распределение антинейтрино для напряжённости магнитного поля $H = 1.7 \cdot 10^{16}$. Стрелкой показано направление магнитного поля.

С помощью (1) возможно нахождение различных средних величин – средней энергии нейтрино, уносимой из нейтронной звезды в результате единичного акта бета-распада,

$$\langle \varkappa \rangle = \frac{\int g(E_n) f_n(E_n) \sum_{\Omega} \varkappa |M|^2 (1 - f_e)(1 - f_p) dE_n}{\int W_1(\theta_n, E_n) g(E_n) f_n(E_n) dE_n d\theta_n}. \quad (2)$$

средней проекции импульса антинейтрино на какую-либо ось, и.т.д.

$$\langle \varkappa_3 \rangle = \frac{\int g(E_n) f_n(E_n) \sum_{\Omega} \varkappa_3 |M|^2 (1 - f_e)(1 - f_p) dE_n}{\int W_1(\theta_n, E_n) g(E_n) f_n(E_n) dE_n d\theta_n}. \quad (3)$$

При помощи приведенных выражений можно рассчитать вклад реакции распада нейтрона в процесс остывания среды, а так же вклад реакции в импульс, который приобретает нейтронная звезда.

Результаты исследования приведены на графиках —.

Результаты показывают, что влияние магнитного поля на вероятность распада, асимметрию, энергию антинейтрино носит резонансный характер, как и в случае, когда материя отсутствует. Как видно из приведенных рисунков резонансы соответствуют таким значениям поля, при которых энергия Ферми равняется энергии возбуждения целого числа уровней Ландау. Отметим, что в нашем случае роль так называемого

критического поля (соответствует самому самому большому значению поля, при котором возникает резонанс) играет величина $B_{cr} = E_F m/e$, тогда как в случае распада нейтрона вне среды $B_{cr} = m^2/e$.

В достаточно сильных полях ($> 10^{16}$ Гс) в этой модели вещества возникает существенная асимметрия, когда средняя проекция импульса антинейтрино на поле становится сравнимо с полной энергией при излучении антинейтрино.

Для количественной оценки асимметрии использовано отношение средней проекции импульса антинейтрино на направление магнитного поля [МэВ] к средней энергии, уносимой антинейтрино – коэффициент асимметрии. В сверхсильных полях, когда B стремится к B_{cr} значение коэффициента асимметрии может достигать 0.3 – 0.4.

Глава 3. Квантовые состояния нейтрино в среде с градиентом скорости.

В данной главе рассмотрено решение модифицированного уравнения Дирака для нейтрино в неоднородно движущейся среде с градиентом скорости:

$$\left[i\gamma_\mu \partial^\mu - \frac{1}{2}\gamma_\mu (1 + \gamma_5) f^\mu - m \right] \Psi(x) = 0, \quad (4)$$

где $\frac{1}{2}\gamma_\mu (1 + \gamma_5) f^\mu$ – вклад взаимодействия нейтрино с материей.

Получено решение уравнения в случае неполяризованной среды, движущейся вдоль оси x с градиентом скорости вдоль оси y : $f_\mu = \tilde{G}_F n(1, \Omega x_2, 0, 0)$. Здесь n обозначает плотность числа частиц, \tilde{G}_F – введено для удобства: $\tilde{G}_F = \frac{G_F}{\sqrt{2}} (1 + \sin^2 \Theta_W)$. Важность этой конфигурации заключается в том, что она может служить моделью внешних слоёв быстровращающегося плотного астрофизического объекта, такого, как нейтронная звезда. Показано, что решения для активного (левого) нейтрино имеют вид:

$$\Psi_\nu^L = \frac{e^{-iEt + ik_1 x_1 + ik_3 x_3}}{L\sqrt{(k_0 - k_3 + \tilde{G}_F \zeta)^2 + 2\omega n}} \begin{pmatrix} \sqrt{2\omega n} u_{n-1}(\eta) \\ (k_0 - k_3 + \tilde{G}_F \zeta) u_n(\eta) \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (5)$$

Спектр энергии «активного» (т.е. взаимодействующего) нейтрино

$$E_n = \sqrt{k_3^2 + 2\omega n} + \tilde{G}_F \zeta. \quad (6)$$

Таким образом, показано, что поперечное (перпендикулярное к ротору скорости) движение «активных» квантовано. Эти решения имеют много общего с решениями для заряженной частицы в магнитном поле (уровни Ландау).

На основе найденных решений предложен новый механизм удержания низкоэнергетичных нейтрино в быстровращающихся плотных астрофизических объектах, хотя и не полного, а только в направлениях, перпендикулярных ротору скорости вещества. Так же, в качестве примера применения полученных волновых функций рассмотрен процесс так называемого спинового света нейтрино в исследуемой конфигурации движения материи. Обсуждается роль массы в разрушении описанных состояний в ходе квантово–механической эволюции, приведены результаты численного моделирования.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

Основные результаты диссертации можно кратко сформулировать следующим образом.

Проведено рассмотрение бета-распада нейтрона в плотном замагниченном веществе. При этом учтены функции распределения протонов, нейтронов и электронов. Впервые получены численные оценки асимметрии вылета антинейтрино для указанного процесса в веществе вырожденного Ферми-газа состоящего из протонов, нейтронов и электронов находящихся в бета–равновесии (модель среды соответствующая современным представлениям о веществе нейтронных звёзд) для различных значений напряжённости магнитного поля, лежащих в интервале $10^{15} - 10^{17}$ Гс. Учтена поляризуемость среды магнитным полем. Показан резонансный характер зависимости асимметрии вылета от напряжённости поля.

На основе последовательного квантового подхода решена задача о нейтрино в среде с градиентом скорости. Найден спектр и волновые функции квантовых состояний нейтрино в случае пренебрежимо малой массы. Обсуждается роль возможной малой

массы нейтрино, которая приводит к разрушению дискретных квантовых состояний финитного движения нейтрино за счёт перехода нейтрино в «стерильное» состояние.

Представлены результаты численного исследования этого процесса. Результат может быть применён в физике нейтронных звёзд на позднем этапе остывания, когда, как предполагается, доля низкоэнергетических нейтрино в веществе нейтронной звезды велика.

На основе найденных квантовых состояний нейтрино в веществе предсказан новый эффект удержания нейтрино в плоскости перпендикулярной ротору скорости вещества.

Исследован эффект «спинового света нейтрино» в условиях среды с градиентом скорости. Найдены спектрально-угловые распределения фотонов в некоторых частных случаях.

ПУБЛИКАЦИИ

Kauts V.L., Savochkin A.M., Studenikin A.I. Asymmetry of antineutrino emission from neutron beta-decay in magnetized superdense matter/ Abstracts of the 7th Russian conference on Physics of Neutron Stars. Ioffe Physico-Technical Institute, St.Petersburg, 27-29 June 2005, стр. 73

Кауц В.Л., Савочкин А.М., Студеникин А. И. Асимметрия нейтринного излучения антинейтрино при бета-распаде нейтрона в сверхплотном веществе и сильном магнитном поле. // Ядерная физика — 2006. — том 69, №9. — С. 1488-1495.

Савочкин А.М., Асимметрия излучения антинейтрино в одном URCA-процессе в условиях нейтронной звезды // Ломоносов-2006. Секция Физика / Сб. тезисов докладов. — Т. 2. — М.: Физ. ф-т МГУ, 2006. — Апрель. — С. 75-76.

Григорьев А.В., Савочкин А.М., Студеникин А. И. Квантовое состояние нейтрино в среде с градиентом скорости // *Изв. ВУЗов. Серия Физика.* — 2007. — № 9.

Савочкин А.М. Студеникин А.И., Квантовые состояния нейтрино в неоднородно движущейся среде. // Ломоносовские чтения-2007. Секция Физика / Сб. тезисов докладов. — Т. 2. — М.: Физ. ф-т МГУ, 2007. — Апрель. — С. 106-109.