

ЯРОСЛАВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
им. П.Г. ДЕМИДОВА

На правах рукописи

РУМЯНЦЕВ ДМИТРИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ

УДК 539.12.01

**ФОТОН-ФОТОННЫЕ И ФОТОН-НЕЙТРИННЫЕ
ПРОЦЕССЫ
В СИЛЬНО ЗАМАГНИЧЕННОЙ
ЭЛЕКТРОН-ПОЗИТРОННОЙ ПЛАЗМЕ**

Специальность: 01.04.02 – теоретическая физика

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук

Научный руководитель
доктор физ.-мат. наук
доцент каф. теор. физики
КУЗНЕЦОВ А.В.

Ярославль – 2005

Оглавление

Введение	3
Глава I. Нейтринное рождение лептонных пар во внешнем электромагнитном поле	16
1. Введение	16
2. Расчет дифференциальной вероятности на основе решений уравнения Дирака	20
3. Полная вероятность процесса	29
4. Средняя потеря энергии и импульса нейтрино	35
Глава II. Обобщенная амплитуда n-вершинного однопетлевого процесса в сильном магнитном поле	38
1. Введение.	38
2. Общий анализ n -вершинного однопетлевого процесса в сильном магнитном поле	40
3. Процессы с участием фотонов	43
4. Процесс $\gamma\gamma \rightarrow \nu\bar{\nu}$	50
4.1. Анализ процесса $\gamma\gamma \rightarrow \nu\bar{\nu}$ в вакууме	50
4.1.1. Стандартное электрослабое взаимодействие ..	50
4.1.2. Обобщение стандартной модели с нарушенной лево-правой симметрией	52
4.2. Учет влияния внешнего поля на процесс $\gamma\gamma \rightarrow \nu\bar{\nu}$.	54

4.3. Амплитуда и сечение процесса $\gamma\gamma \rightarrow \nu\bar{\nu}$ в модели с нарушенной лево - правой симметрией	56
4.4. Проявления процесса $\gamma\gamma \rightarrow \nu\bar{\nu}$ в астрофизике	57
4.5. Влияние замагниченной электрон-позитронной плазмы на процесс $\gamma\gamma \rightarrow \nu\bar{\nu}$ в модели с нарушенной лево - правой симметрией	61
5. Процесс $\gamma\gamma \rightarrow \nu\bar{\nu}\gamma$	64
Глава III. Расщепление фотона на два фотона в сильно замагниченной плазме.	73
1. Введение	73
2. Вычисление амплитуды	77
3. Дисперсионные свойства и кинематика расщепления фотона	89
4. Вероятность расщепления фотона в сильно замагниченной среде	96
Заключение	104
Приложение А	107
Приложение Б	109
Приложение В	112
Приложение Г	114
Литература	118

Введение

В настоящее время установленный факт активного влияния среды на квантовые процессы, протекающие в ней, является одним из стимулов постоянно возрастающего интереса к космомикрופизике – относительно недавно возникшей научной дисциплине, лежащей на пересечении физики элементарных частиц, астрофизики и космологии [1–3]. Одной из задач, решением которой занимается космомикрופизика, является изучение квантовых процессов в экстремальных физических условиях, а именно, в сильных электромагнитных полях и/или горячей плотной плазме. Такие условия могли существовать в ранней Вселенной и реализуются в различных астрофизических объектах, и должны оказывать существенное влияние на протекание квантовых процессов, открывая или значительно усиливая реакции, кинематически запрещенные или сильно подавленные в вакууме.

Изучение процессов с участием элементарных частиц в экстремальных условиях имеет свои особенности. Помимо высоких температур и больших плотностей материи в таких объектах необходимо также учитывать наличие интенсивного электромагнитного поля, которое может генерироваться внутри них. Отметим, что сильное электромагнитное поле может проявлять себя, как среда, которая существенно влияет как на дисперсионные свойства частиц, так и на их взаимодействие друг с другом. Наиболее сильно это проявляется, когда величина напряженности магнитного поля становится больше так называемого критического значения $B_e = m_e^2/e \simeq 4.41 \cdot 10^{13} \text{ Гс}$ ¹.

¹Мы используем естественную систему единиц $c = \hbar = 1$. $e > 0$ – элементарный заряд.

Такие поля могут генерироваться, в частности, в определенном классе звезд, так называемых магнитаров, к которым относятся, например, повторные источники мягких гамма-всплесков (SGR – soft gamma repeaters), интерпретируемых как нейтронные звезды с магнитными полями $\sim 4 \times 10^{14}$ Гс [4, 5]. Одним из таких объектов является источник SGR 1806-20, у которого в 1998 году впервые был измерен не только период, но также и скорость изменения периода со временем [6]. Оценка магнитного поля SGR 1806-20 дала величину 8×10^{14} Гс. Позднее были обнаружены еще несколько подобных объектов [7, 8]. Одним из характерных свойств SGR является их периодическая активность с выбросом энергии $\sim 10^{44}$ эрг, однако 27 декабря 2004 года от SGR 1806-20 наблюдался гигантский выброс энергии $\sim 10^{46}$ эрг, в основном в виде жестких гамма-квантов, почти на два порядка превышающий поток энергии от других известных SGR. Анализ “хвоста” спектра этого излучения, проведенный в недавней работе [9], позволил сделать оценку для полоидального магнитного поля $\sim 7 \times 10^{15}$ Гс. Отметим также, что к магнитарам относится и ряд так называемых аномальных рентгеновских пульсаров (AXP). В настоящее время уже известно около десятка SGR и AXP, у которых величина напряженности магнитного поля на несколько порядков превосходит критическое значение B_e . В литературе обсуждаются также возможные механизмы генерации астрофизических магнитных полей с напряженностью $B \gg B_e$ (до $10^{17} - 10^{18}$ Гс [10–13]). Отметим, что для нейтронных звезд существует верхняя граница возможных напряженностей магнитного поля ($\sim 10^{18}$ Гс). Она определяется равенством энергии магнитного поля и гравитационной энергии связи нейтронной звезды. Более сильные стационарные магнитные поля, по-видимому, не могут существовать в

нейтронных звездах.

В условиях ранней Вселенной на стадии электрослабого фазового перехода в принципе, могли бы возникать сверхсильные, так называемые “первичные” магнитные поля с напряженностью порядка 10^{24} Гс [14] и даже более $\sim 10^{33}$ Гс [15]. Существование таких полей на ранней стадии Вселенной объяснило бы, например, наличие крупномасштабных (~ 100 килопарсек) магнитных полей с напряженностью $\sim 10^{-21}$ Гс на современной стадии. Причина возникновения первичных полей и динамика их развития в расширяющейся Вселенной также является предметом интенсивного исследования в настоящее время, см. например, обзор [16] и цитированные там работы.

При анализе конкретных процессов в магнитном поле важны соотношения между тремя основными физическими параметрами. Один из них — это величина eB , характеризующая интенсивность поля, другим важным параметром является масштаб энергий E начальной частицы или частиц. Наконец, третьим параметром является масса заряженного фермиона. В нейтрино-электронных процессах это, очевидно масса электрона. Нейтрино-фотонные процессы идут через фермионную петлю, где, в принципе, присутствуют все фундаментальные заряженные фермионы. Однако основную роль здесь также играет электрон, как частица с максимальным удельным зарядом e/m_e , наиболее чувствительная к воздействию внешнего поля. В большинстве случаев нас будут интересовать магнитные поля, превышающие критическое значение $B_e = m_e^2/e$. Однако в ряде астрофизических объектов возможна ситуация, когда это условие не выполняется. Поэтому целесообразно рассматривать два предельных случая, в которых расчеты квантовых процессов во внешнем

поле значительно упрощаются.

- *Предел относительно слабого поля.*

Так называют предельный случай, когда энергия частицы является максимальным физическим параметром, $E^2 \gg eB$. Это условие можно переписать в релятивистски инвариантной форме. Отметим, что релятивистская инвариантность понимается здесь в узком смысле, относительно лоренц-преобразований вдоль поля (если мы говорим о присутствии только магнитного поля без электрического). Наличие двух ковариантов, тензора поля $F_{\mu\nu}$ и 4-импульса частицы $p^\mu = (E, \mathbf{p})$, позволяет, наряду с полевым инвариантом

$$e^2 F_{\mu\nu} F^{\nu\mu} \equiv e^2 (FF) = -2e^2 B^2, \quad (0.1)$$

построить динамический инвариант

$$e^2 p_\mu F^{\mu\nu} F_{\nu\rho} p^\rho \equiv e^2 (pFFp) = e^2 B^2 E^2 \sin^2 \theta, \quad (0.2)$$

где θ – угол между импульсом частицы \mathbf{p} и направлением поля \mathbf{B} . Инвариант (0.2) чаще всего используется в безразмерном виде

$$\chi^2 = \frac{e^2 (pFFp)}{m_e^6}. \quad (0.3)$$

Таким образом, условие “слабости” поля принимает вид

$$[e^2 (FF)]^{3/2} \ll e^2 (pFFp). \quad (0.4)$$

Легко видеть, что условие (0.4) автоматически выполняется в случае скрещенного поля, в котором полевой инвариант строго равен нулю, $(FF) = 0$. Это позволяет производить вычисления в пределе (0.4), используя приближение скрещенного поля. Отметим, что

этот предел обладает достаточной общностью. Действительно, если при движении релятивистской частицы в относительно слабом магнитном поле $B < B_e$ динамический параметр χ достаточно велик, то в системе покоя этой частицы поле может оказаться заметно выше критического и будет очень близко к скрещенному полю. Даже в сильном магнитном поле $B \gg B_e$, но при условии, что $\chi \gg B/B_e$, результат, полученный в скрещенном поле, будет правильно описывать лидирующий вклад в вероятность процесса в чисто магнитном поле. Таким образом, расчет в скрещенном поле представляет самостоятельный интерес. Техника вычислений в скрещенном поле была детально разработана А.И. Никишовым и В.И. Ритусом, см. например [17].

- *Предел сильного поля.*

В этом пределе интенсивность поля B является максимальным физическим параметром, $eB \gg E^2$, или в инвариантной форме

$$[e^2(F F)]^{3/2} \gg e^2(p F F p). \quad (0.5)$$

В этом случае электроны находятся только на основном уровне Ландау. Поскольку для таких электронов движение в поперечном к полю направлении становится ненаблюдаемым, это также упрощает вычисления. Значительный вклад в развитие техники вычислений в сильном поле сделали В.В. Скобелев и Ю.М. Лоскутов, построившие так называемую “двумерную электродинамику” [18, 19], см. также, например, [20] и цитированные там работы. В работах Н.В. Михеева с сотрудниками была развита ковариантная техника вычислений, позволяющая единообразно исследовать как случай сильного поля,

так и более общий, когда условие (0.5) не выполняется, см. например [21, 22].

По-видимому, первыми исследованиями нейтрино - электронных процессов во внешнем электромагнитном поле были работы, посвященные “синхротронному” излучению нейтринных пар $e \rightarrow e\nu\bar{\nu}$ [23] и нейтринному рождению электрон - позитронных пар $\nu \rightarrow \nu e^- e^+$ [24]. Анализ проводился в ситуации относительно слабого магнитного поля, когда энергия начальной частицы является доминирующим параметром, $E^2 \gg eB$, что, как уже отмечалось, соответствует приближению скрещенного поля. Позднее указанные процессы исследовались в том же приближении в работах [17, 25–32]. В работах [28, 29] процесс $\nu \rightarrow \nu e^- e^+$ также исследовался при произвольных значениях магнитного поля и, в частности, в пределе сильного поля $eB \gg E_\nu^2$, когда электрон и позитрон могут рождаться только в состояниях, соответствующих основному уровню Ландау.

Среди квантовых процессов, свойства которых существенно, а иногда принципиально меняются под воздействием сильного внешнего магнитного поля, особый интерес представляют петлевые процессы, где в конечном и начальном состояниях присутствуют только электрически нейтральные частицы, такие, как нейтрино и фотоны. Воздействие внешнего поля на такие процессы обусловлено, во-первых, чувствительностью заряженных виртуальных фермионов к влиянию поля, при этом, как уже отмечалось, основную роль здесь играет электрон – частица с максимальным удельным зарядом e/m_e . Во-вторых, сильное магнитное поле существенно меняет дисперсионные свойства фотонов, а значит, и их кинематику.

Исследование двухвершинных петлевых процессов такого типа, к которым относятся поляризационный оператор фотона во внешнем поле, распады $\gamma \rightarrow \nu\bar{\nu}$, $\nu \rightarrow \nu\gamma$ и т.д., имеет длительную историю. Поляризационный оператор фотона во внешнем магнитном поле исследовался в начале 70-х в работах [18, 33–35], см. также [36]. Фотон-нейтринные процессы $\nu \rightarrow \nu\gamma$, $\gamma \rightarrow \nu\bar{\nu}$ изучались в случаях как сильных, так и относительно слабых полей, а также в общем случае в работах [21, 37–48].

Одним из наиболее интенсивно обсуждаемых трехвершинных процессов является превращение фотонной пары в пару нейтрино - антинейтрино, $\gamma\gamma \rightarrow \nu\bar{\nu}$. История исследований этого процесса насчитывает уже более 40 лет [49–64]. Согласно теореме Гелл-Манна [49], в случае безмассовых нейтрино, реальных фотонов, и в локальном пределе слабого взаимодействия через векторные и аксиальные заряженные токи амплитуда процесса строго равна нулю. При любом отклонении от условий теоремы Гелл-Манна возникает ненулевая амплитуда: в случае массивных нейтрино [50, 51], при учете нелокальности слабого взаимодействия через W - бозон [52–54], если один из фотонов [55] или оба фотона [56–58] находятся вне массовой поверхности. Еще одно отклонение от теоремы Гелл-Манна, при котором процесс $\gamma\gamma \rightarrow \nu\bar{\nu}$ также возможен, реализуется, когда в эффективном лагранжиане нейтрино - лептонного взаимодействия нейтрино меняет киральность. При записи лагранжиана в форме нейтральных токов к этому приводит связь скалярных и псевдоскалярных токов. Наконец, воздействие внешнего магнитного поля также может катализировать данный процесс, если величина поля имеет масштаб критического значения $B_e = m_e^2/e$.

Как в вакууме, так и в сильном магнитном поле у процесса $\gamma\gamma \rightarrow \nu\bar{\nu}$

имеется конкурирующий канал с дополнительным фотоном, $\gamma\gamma \rightarrow \nu\bar{\nu}\gamma$, несмотря на лишний фактор α [20, 65–74]. Дело в том, что в вакууме, в случае стандартного нейтрино-электронного взаимодействия трехфотонный процесс не имеет сильного подавления, как двухфотонный. В сильном магнитном поле трехфотонный процесс имеет дополнительное усиление.

Еще один трехвершинный петлевой процесс, в течение многих лет находящийся в поле внимания теоретиков – расщепление фотона на два фотона в магнитном поле и плазме, $\gamma \rightarrow \gamma\gamma$, который в вакууме запрещен теоремой Фарри. В магнитном поле этот процесс рассматривался целым рядом авторов (см., например, обзор [75], где можно найти подробный список ранних статей), среди относительно недавних работ укажем [76–84]. В частности, в работах [79, 80, 85, 86] было показано, что учет дисперсионных свойств фотонов в сильном магнитном поле существенно меняет кинематику процесса, и, как следствие, соотношение вероятностей различных поляризационных каналов. Распространение фотонов в электрон-позитронной плазме без учета влияния внешнего поля изучалось в работах [87, 88]. Влияние замагниченной плазмы на процесс расщепления фотона также изучалось в целом ряде работ [89–93]. Однако в этих работах совместный анализ влияния замагниченной плазмы как на дисперсионные свойства фотонов, так и на изменение амплитуды расщепления фотона не проводился.

Отметим, что при решении ряда принципиальных задач о взаимодействии частиц с электромагнитным полем большое значение приобрел метод, в котором влияние внешнего поля учитывается не посредством теории возмущений, а на основе точных решений уравнения Дирака во

внешнем электромагнитном поле. В квантовой релятивистской теории число случаев, когда уравнение Дирака решается в аналитическом виде, невелико: задача о движении электрона в кулоновском поле (атом водорода), в однородном магнитном поле, в поле плоской электромагнитной волны и в некоторых случаях комбинации однородных электрического и магнитного полей. Расчет конкретных физических явлений предполагает использование диаграммной техники Фейнмана со следующим обобщением: в начальном и конечном состояниях заряженный фермион находится во внешнем поле и описывается решением уравнения Дирака в этом поле, внутренние линии заряженных фермионов соответствуют пропагаторам, построенным на основе этих решений. Данный метод полезен тем, что с его помощью можно анализировать процессы в полях большой напряженности, когда учет влияния поля по теории возмущений уже невозможен. В силу устойчивости вакуума в сверхсильном магнитном поле можно рассматривать процессы в полях с напряженностью, значительно превышающей критическое значение B_c .

Описанный выше метод оказался эффективным при исследовании ряда процессов, идущих в сильных электромагнитных полях и имеющих прикладное значение, таких, как β -распад в поле интенсивного лазерного излучения, квантовые эффекты при прохождении ультрарелятивистских заряженных частиц через монокристаллы, и другие.

Вместе с тем, нельзя не учитывать влияние на квантовые процессы такой компоненты внешней активной среды, как горячая и плотная плазма, присутствие которой в астрофизических объектах является типичной ситуацией. В сочетании с внешним магнитным полем плазма может существенно изменить условия протекания реакций с участием фотонов и

нейтрино. А именно, возможно кинематическое изменение каналов реакций (открытие новых или закрытие существующих). С другой стороны, электрон-позитронная плазма может как усиливать, так и подавлять амплитуды процессов. Такое двойственное действие плазмы будет обусловлено, в первую очередь, соотношением между параметрами плазмы (температурой T и химическим потенциалом μ), величиной магнитного поля и характерными импульсами частиц, участвующих в реакции. В обсуждаемых астрофизических объектах (SGR, AXP) $T \lesssim 1$ МэВ, $\mu \simeq 0$, т.е. реализуются такие условия, когда среди всех физических параметров, характеризующих электрон-позитронную плазму, полевой параметр является доминирующим. Упрощенно можно охарактеризовать данные условия следующим соотношением: $eB \gg \mu^2, T^2$.

Существует последовательный метод учета влияния плазмы на квантовые процессы, основанный на использовании техники функций Грина (см., например, обзор [94]). При этом непосредственное построение функций Грина для конкретной макроскопической системы может производиться двумя способами. Первый способ, называемый еще формализмом реального времени, является наиболее универсальным и состоит в том, что строится временная функция Грина с использованием диаграммной техники Келдыша [95], причем получаемые при этом уравнения для гриновских функций аналогичны по своему смыслу кинетическим уравнениям. Второй способ, известный, как представление мнимого времени, позволяет построить температурные функции Грина на основе диаграммной техники, применяемой в квантовой теории поля [96, 97]. Способ учета влияния плазмы, используемый в настоящей диссертации, наиболее близок по своей основе формализму реального времени. Суть его состоит в

том, что рассматриваются когерентные рассеяния нейтральных частиц (фотонов, нейтрино и т.п.) на реальных электронах и позитронах среды без изменения их состояния (рассеяние “вперед”). Этот способ эквивалентен методу функций Грина, но значительно упрощает вычисления.

Настоящая диссертация посвящена исследованию фотон-нейтринных процессов во внешних электромагнитных полях и плазме. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, четырех приложений и списка литературы.

В первой главе рассматривается, в рамках стандартной модели, процесс нейтринного рождения лептонной пары ($\nu \rightarrow \nu \ell_1 \bar{\ell}_2$) во внешнем электромагнитном поле. Приводится подробный расчет выражения для вероятности процесса, удобного для численного анализа. Вычисляются средняя потеря энергии и импульса нейтрино за счет рассматриваемого процесса и асимметрия вылета нейтрино.

Вторая глава посвящена общему анализу амплитуды n -вершинного однопетлевого процесса в сильном магнитном поле и приложению полученных результатов к вычислению амплитуд фотон-нейтринных процессов $\gamma\gamma \rightarrow \nu\bar{\nu}$ (в рамках модели с нарушенной лево - правой симметрией) и $\gamma\gamma \rightarrow \nu\bar{\nu}\gamma$ (в рамках стандартной модели).

В третьей главе исследуется процесс расщепления фотона $\gamma \rightarrow \gamma\gamma$ в сильно замагниченной плазме, анализируется кинематика процесса и определяются правила отбора по поляризациям. Для разрешенных каналов расщепления вычисляются соответствующие вероятности с учетом дисперсии и перенормировки волновых функций фотонов.

Основные обозначения, используемые в диссертации

Используется 4-метрика с сигнатурой $(+ - - -)$, а также естественная система единиц $\hbar = 1, c = 1, k_B = 1$.

Элементарный заряд: $e = |e|$, заряд фермиона: e_f .

Тензор внешнего поля: $F_{\alpha\beta}$, дуальный тензор: $\tilde{F}_{\alpha\beta} = \frac{1}{2}\varepsilon_{\alpha\beta\mu\nu}F^{\mu\nu}$.

Обезразмеренный тензор магнитного поля: $\varphi_{\alpha\beta} = F_{\alpha\beta}/B$, дуальный обезразмеренный тензор: $\tilde{\varphi}_{\alpha\beta} = \frac{1}{2}\varepsilon_{\alpha\beta\mu\nu}\varphi^{\mu\nu}$.

У 4-векторов и тензоров, стоящих внутри круглых скобок, тензорные индексы полагаются свернутыми последовательно, например:

$$(pFFp) = p^\alpha F_{\alpha\beta} F^{\beta\delta} p_\delta; \quad (FFp)_\alpha = F_{\alpha\beta} F^{\beta\delta} p_\delta; \quad (FF) = F_{\alpha\beta} F^{\beta\alpha}.$$

Безразмерные тензоры $\Lambda_{\alpha\beta} = (\varphi\varphi)_{\alpha\beta}$, $\tilde{\Lambda}_{\alpha\beta} = (\tilde{\varphi}\tilde{\varphi})_{\alpha\beta}$ связаны соотношением $\tilde{\Lambda}_{\alpha\beta} - \Lambda_{\alpha\beta} = g_{\alpha\beta}$.

В системе отсчета, где имеется только магнитное поле \mathbf{B} , направленное вдоль третьей оси, 4-векторы с индексами \perp и \parallel относятся к подпространствам Евклида $\{1, 2\}$ и Минковского $\{0, 3\}$ соответственно. При этом

$$\Lambda_{\alpha\beta} = \text{diag}(0, 1, 1, 0), \quad \tilde{\Lambda}_{\alpha\beta} = \text{diag}(1, 0, 0, -1).$$

Для произвольных векторов p_μ, q_μ имеем:

$$p_\perp^\mu = (0, p_1, p_2, 0), \quad p_\parallel^\mu = (p_0, 0, 0, p_3),$$

$$(pq)_\perp = (p\Lambda q) = p_1q_1 + p_2q_2, \quad (pq)_\parallel = (p\tilde{\Lambda}q) = p_0q_0 - p_3q_3.$$

Остальные обозначения те же, что приняты в книге [98].

Список литературы

- [1] Raffelt G.G. Stars as Laboratories for Fundamental Physics. Chicago: University of Chicago Press, 1996. 664 p.
- [2] Хлопов М.Ю. Основы космомикрoфизики. М.: Едиториал УРСС, 2004. 368 с.
- [3] Кладдор-Клайнгротхаус Г.В., Цюбер К. Астрофизика элементарных частиц. М.: Редакция журнала “Успехи физических наук”, 2000. 496 с.
- [4] Kouveliotou C., Strohmayer T., Hurley K. et al. Discovery of a magnetar associated with the Soft Gamma Repeater SGR 1900+14 // Astrophys. J. 1999. V. 510. No. 2. P. L115-L118.
- [5] Hurley K., Cline T., Mazets E. et al. A giant, periodic flare from the soft gamma repeater SGR1900+14 // Nature 1999. V. 397. P. 41-43.
- [6] Kouveliotou C., Dieters S., Strohmayer T. et al. An X-ray pulsar with a superstrong magnetic field in the soft γ -ray repeater SGR1806 - 20 // Nature. 1998. V. 393. P.235-237.
- [7] Kouveliotou C., Strohmayer T., Hurley K. et al. Discovery of a magnetar associated with the soft gamma repeater SGR 1900+14 Astrophys. J. Lett. 1999. V. 510. P. L115-L118.
- [8] Kouveliotou C., Tennant A., Woods P.M. et al. Multiwavelength observations of the soft gamma repeater SGR 1900+14 during its 2001 april activation Astrophys. J. Lett. 2001. V. 558. P. L47-L50.

- [9] Israel G.L., Belloni T., Stella L. et al. Discovery of rapid X-ray oscillations in the tail of the SGR 1806-20 hyperflare. Preprint astro-ph/0505255.
- [10] Бисноватый-Коган Г.С. Взрыв вращающейся звезды как механизм сверхновой // Астрон. журн. 1970. Т. 47. С. 813.
- [11] Duncan R.C., Thompson C. Formation of very strongly magnetized neutron stars: implications for gamma-ray bursts // Astrophys. J. 1992. V. 392. No. 1. P. L9-L13.
- [12] Bocquet P., Bonazzola S., Gourgoulhon E., Novak J. Rotating neutron star models with magnetic field // Astron. Astrophys. 1995. V. 301. No. 9. P. 757-775.
- [13] Cardall C.Y., Prakash M., Lattimer J.M. Effects of strong magnetic fields on neutron star structure // Astrophys. J. 2001. V. 554. No. 1. P. 322-339.
- [14] Vachaspati T. Magnetic fields from cosmological phase transitions // Phys. Lett. 1991. V. B265. No. 3,4. P. 258-261.
- [15] Ambjørn J., Olesen P. Electroweak magnetism, W -condensation and anti-screening // In: Proc. of 4th Hellenic School on Elementary Particle Physics, Corfu, 1992 (preprint hep-ph/9304220).
- [16] Grasso D., Rubinstein H.R. Magnetic fields in the early Universe // Phys. Rep. 2001. V. 348. No. 3. P. 163-266.

- [17] В. И. Ритус, в сб. *Квантовая электродинамика явлений в интенсивном поле*, Труды ФИАН СССР, **111** (Наука, Москва, 1979), с. 5; А. И. Никишов, там же, с. 152.
- [18] Скобелев В.В. Поляризационный оператор фотона в сверхсильном магнитном поле // Изв. вузов. Физика. 1975. № 10. С. 142-143.
- [19] Loskutov Yu.M., Skobelev V.V. Nonlinear electrodynamics in a superstrong magnetic field // Phys. Lett. 1976. V. A56. No. 3. P. 151-152.
- [20] Скобелев В.В. Фотогенерация нейтрино и аксионов на при стимулирующем влиянии сильного магнитного поля // ЖЭТФ. 2001. Т. 120. № 4. С. 786-796.
- [21] Gvozdev A.A., Mikheev N.V., Vassilevskaya L.A. The radiative decay of a massive neutrino in the external electromagnetic fields // Phys. Rev. 1996. V. D54. No. 9. P. 5674-5685.
- [22] Mikheev N.V., Parkhomenko A.Ya., Vassilevskaya L.A. Axion in an external electromagnetic field // Phys. Rev. 1999. V. D60. No. 3. P. 035001 (1-11).
- [23] Байер В.Н., Катков В.М. Рождение пары нейтрино при движении электрона в магнитном поле // ДАН СССР. 1966. Т. 171. № 2. С. 313-316.
- [24] Чобан Э.А., Иванов А.Н. Рождение лептонных пар высокоэнергетическими нейтрино в поле сильной электромагнитной волны // ЖЭТФ. 1969. Т. 56. № 1. С. 194-200.

- [25] Борисов А.В., Жуковский В.Ч., Лысов Б.А. Рождение электрон - позитронной пары нейтрино в магнитном поле // Изв. вузов. Физика. 1983. № 8. С. 30-34.
- [26] Книжников М.Ю., Татаринцев А.В. Рождение электрон - позитронной пары нейтрино в постоянном внешнем поле // Вестн. МГУ. Физ., астрофиз. 1984. Т. 25. № 3. С. 26-30.
- [27] Borisov A.V., Ternov A.I., Zhukovsky V.Ch. Electron-positron pair production by a neutrino in an external electromagnetic field // Phys. Lett. 1993. V. B318. No. 3. P. 489-491.
- [28] Kuznetsov A.V., Mikheev N.V. Neutrino energy and momentum loss through the process $\nu \rightarrow \nu e^- e^+$ in a strong magnetic field // Phys. Lett. 1997. V. B394. No. 1,2. P. 123-126.
- [29] Кузнецов А.В., Михеев Н.В. Нейтринное рождение электрон-позитронных пар в магнитном поле // ЯФ. 1997. Т. 60. № 11. С. 2038-2047.
- [30] Борисов А.В., Заморин Н.Б. Рождение электрон - позитронной пары в распаде массивного нейтрино в постоянном внешнем поле // ЯФ. 1999. Т. 62. № 9. С. 1647-1656.
- [31] Kuznetsov A.V., Mikheev N.V., Rumyantsev D.A. Lepton pair production by high-energy neutrino in an external electromagnetic field // Mod. Phys. Lett. 2000. V. A15. No. 8. P. 573-578.
- [32] Кузнецов А.В., Михеев Н.В., Румянцев Д.А. Нейтринное рождение лептонных пар во внешнем электромагнитном поле // ЯФ. 2002. Т. 65. № 2. С. 303-306.

- [33] Баталин И.А., Шабад А.Е. Функция Грина фотона в постоянном однородном электромагнитном поле общего вида. // ЖЭТФ. 1971. Т. 60. № 3. С. 894-900.
- [34] Tsai W.-Y. Vacuum polarization in homogeneous magnetic fields // Phys. Rev. 1974. V. D10. No. 8. P. 2699-2702.
- [35] Shabad A.E. Photon dispersion in a strong magnetic field // Ann. Phys. (N.Y.). 1975. V. 90. No. 1. P. 166-195.
- [36] Шабад А.Е. Поляризация вакуума и квантового релятивистского газа во внешнем поле // Тр. ФИАН СССР “Поляризационные эффекты во внешних калибровочных полях”. М.: Наука, 1988. Т. 192. С. 5-152.
- [37] Гальцов Д.В., Никитина Н.С. Фотонейтринные процессы в сильном поле // ЖЭТФ. 1972. Т. 62. № 6. С. 2008-2012.
- [38] Скобелев В.В. О реакциях $\gamma \rightarrow \nu\bar{\nu}$ и $\nu \rightarrow \gamma\nu$ в сильном магнитном поле // ЖЭТФ. 1976. Т. 71. № 4. С. 1263-1267.
- [39] DeRaad Jr. L.L., Milton K.A., Hari Dass N.D. Photon decay into neutrinos in a strong magnetic field // Phys. Rev. 1976. V. D14. No. 12. P. 3326-3334.
- [40] Gvozdev A.A., Mikheev N.V., Vassilevskaya L.A. The magnetic catalysis of the radiative decay of a massive neutrino in the standard model with lepton mixing // Phys. Lett. 1992. V. B289. No. 1,2. P. 103-108.

- [41] Василевская Л.А., Гвоздев А.А., Михеев Н.В. Распад массивного нейтрино $\nu_i \rightarrow \nu_j \gamma$ в скрещенном поле // Ядер. физ. 1994. Т. 57. № 1. С. 124-127.
- [42] Скобелев В.В. Распад массивного нейтрино в сильном магнитном поле // ЖЭТФ. 1995. Т. 108. № 1. С. 3-13.
- [43] Zhukovsky V.Ch., Eminov P.A., Grigoruk A.E. Radiative decay of a massive neutrino in the Weinberg - Salam model with mixing in a constant uniform magnetic field // Mod. Phys. Lett. 1996. V. A11. No. 39-40. P. 3119-3126.
- [44] D'Olivo J.C., Nieves J.F., Pal P.B. Cherenkov radiation by massless neutrinos // Phys. Lett. 1996. V. B365. No. 1-4. P. 178-184.
- [45] Ioannisian A.N., Raffelt G.G. Cherenkov radiation by massless neutrinos in a magnetic field // Phys. Rev. 1997. V. D55. No. 11. P. 7038-7043.
- [46] Gvozdev A.A., Mikheev N.V., Vassilevskaya L.A. Resonance neutrino bremsstrahlung $\nu \rightarrow \nu \gamma$ in a strong magnetic field // Phys. Lett. 1997. V. B410. No. 2-4. P. 211-215.
- [47] Kuznetsov A.V., Mikheev N.V., Vassilevskaya L.A. Photon splitting $\gamma \rightarrow \nu \bar{\nu}$ in an external magnetic field // Phys. Lett. 1998. V. B427. No. 1,2. P. 105-108.
- [48] Василевская Л.А., Кузнецов А.В., Михеев Н.В. Индуцированное магнитным полем нейтрино-фотонное $\nu \nu \gamma$ -взаимодействие // ЯФ. 1999. Т. 62. № 4. С. 715-722.

- [49] Gell-Mann M. The reaction $\gamma\gamma \rightarrow \nu\bar{\nu}$ // Phys. Rev. Lett. 1961. V. 6. No. 2. P. 70-71.
- [50] Crewther R.J., Finjord J., Minkowski P. The annihilation process $\nu\bar{\nu} \rightarrow \gamma\gamma$ with massive neutrino in cosmology // Nucl. Phys. 1982. V. B207. No. 2. P. 269-287.
- [51] Dodelson S., Feinberg G. Neutrino - two-photon vertex // Phys. Rev. 1991. V. D43. No. 3. P. 913-920.
- [52] Levine M.J. The process $\gamma + \gamma \rightarrow \nu + \bar{\nu}$ // Nuovo Cim. 1967. V. A48. No. 1. P. 67-71.
- [53] Dicus D.A. Stellar energy-loss rates in a convergent theory of weak and electromagnetic interactions // Phys. Rev. 1972. V. D6. No. 4. P. 941-949.
- [54] Dicus D.A., Repko W.W. Photon neutrino scattering // Phys. Rev. 1993. V. D48. No. 11. P. 5106-5108.
- [55] Rosenberg L. Electromagnetic interactions of neutrinos // Phys. Rev. 1963. V. 129. No. 6. P. 2786-2788.
- [56] Cung V.K., Yoshimura M. Electromagnetic interaction of neutrinos in gauge theories of weak interactions // Nuovo Cim. 1975. V. A29. No. 4. P. 557-564.
- [57] Kuznetsov A.V., Mikheev N.V. Compton-like interaction of massive neutrinos with virtual photons // Phys. Lett. 1993. V. B299. No. 3-4. P. 367-369.

- [58] Кузнецов А.В., Михеев Н.В. Амплитуда процесса $\nu_i \gamma^* \rightarrow \nu_j \gamma^*$ с виртуальными фотонами и тормозное излучение при рассеянии нейтрино в кулоновском поле ядра // ЯФ. 1993. Т. 56. № 6. С. 108-114.
- [59] Liu J. Low-energy neutrino-two-photon interactions // Phys. Rev. 1991. V. D44. No. 9. P. 2879-2891.
- [60] Shaisultanov R. Photon - neutrino interactions in magnetic fields // Phys. Rev. Lett. 1998. V. 80. No. 8. P. 1586-1587.
- [61] Chyi T.K., Hwang C.-W., Kao W.F. et al. Neutrino - photon scattering and its crossed processes in a background magnetic field // Phys. Lett. 1999. V. B466. No. 2-4. P. 274-280.
- [62] Chyi T.K., Hwang C.-W., Kao W.F. et al. The weak-field expansion for processes in a homogeneous background magnetic field // Phys. Rev. 2000. V. D62. No. 10. P. 105014 (1-13).
- [63] Dicus D.A., Repko W.W. Neutrino - photon scattering in a magnetic field // Phys. Lett. 2000. V. B482. No. 1-3. P. 141-144.
- [64] Лоскутов Ю.М., Скобелев В.В. Двухфотонное рождение нейтрино в сильном внешнем поле // Вестн. МГУ: физ., астрофиз. 1981. Т. 22. № 4. С. 10-13.
- [65] Нгуен Ван Хьеу, Шабалин Е.П. О роли процесса $\gamma + \gamma \rightarrow \gamma + \nu + \bar{\nu}$ в нейтринном излучении звезд // ЖЭТФ. 1963. Т. 44. № 3. С. 1003-1007.

- [66] Лоскутов Ю.М., Скобелев В.В. Эффективный лагранжиан $A^3(\nu\bar{\nu})$ - взаимодействия и процесс $\gamma\gamma \rightarrow \gamma(\nu\bar{\nu})$ в двумерном приближении квантовой электродинамики // ТМФ. 1987. Т. 70. № 2. С. 303-308.
- [67] Dicus D.A., Repko W.W. Photon - neutrino interactions // Phys. Rev. Lett. 1997. V. 79. No. 4. P. 569-571.
- [68] Harris M., Wang J., Teplitz V.L. Astrophysical effects of $\nu\gamma \rightarrow \nu\gamma\gamma$ and its crossed processes. Preprint astro-ph/9707113.
- [69] Abada A., Matias J., Pittau R. Five-leg photon-neutrino interactions // In: Proc. XXIX ICHEP (Vancouver). Preprint hep-ph/9809418.
- [70] Abada A., Matias J., Pittau R. Inelastic photon-neutrino interactions using an effective Lagrangian // Phys. Rev. 1999. V. D59. No. 1. P. 013008 (1-7).
- [71] Abada A., Matias J., Pittau R. Direct computation of inelastic photon-neutrino processes in the Standard Model // Nucl. Phys. 1999. V. B543. No. 1-2. P. 255-268.
- [72] Abada A., Matias J., Pittau R. Low-energy photon-neutrino inelastic processes beyond the Standard Model // Phys. Lett. 1999. V. B450. No. 1-3. P. 173-181.
- [73] Dicus D.A., Kao C., Repko W.W. $\gamma\nu \rightarrow \gamma\gamma\nu$ and crossed processes at energies below m_W // Phys. Rev. 1999. V. D59. No. 1. P. 013005 (1-6).
- [74] Кузнецов А.В., Михеев Н.В. Фоторождение нейтрино на ядрах в сильном магнитном поле // Письма в ЖЭТФ. 2002. Т. 75. № 9. С. 531-534.

- [75] Папанян В.О., Ритус В.И. Трехфотонное взаимодействие в интенсивном поле // Тр. ФИАН СССР “Проблемы квантовой электродинамики интенсивного поля”. М.: Наука, 1986. Т. 168. С. 120-140.
- [76] Adler S.L., Schubert C. Photon splitting in a strong magnetic field: recalculation and comparison with previous calculations // Phys. Rev. Lett. 1996. V. 77. No. 9. P. 1695-1698.
- [77] Baier V.N., Milstein A.I., Shaisultanov R.Zh. Photon splitting in a very strong magnetic field // Phys. Rev. Lett. 1996. V. 77. No. 9. P. 1691-1694.
- [78] Байер В.Н., Мильштейн А.И., Шайсултанов Р.Ж. Расщепление фотона в сверхсильном магнитном поле // ЖЭТФ. 1997. Т. 111. № 1. С. 52-62.
- [79] Chistyakov M.V., Kuznetsov A.V., Mikheev N.V. Photon splitting above the pair creation threshold in a strong magnetic field // Phys. Lett. 1998. V. B434. No. 1. P. 67-73.
- [80] Кузнецов А.В., Михеев Н.В., Чистяков М.В. Расщепление фотона на два фотона в сильном магнитном поле // ЯФ. 1999. Т. 62. № 9. С. 1638-1646.
- [81] Baring M.G. Magnetic photon splitting: The S-matrix formulation in the Landau representation // Phys. Rev. 2000. V. D62. P. 016003 (1-16).
- [82] Weise J.I., Baring M.G., Melrose D.B. Photon splitting in strong magnetic fields: S-matrix calculations // Phys. Rev. 1998. V. D57. P. 5526-5538; Erratum // Phys. Rev. 1999. V. D60. P. 099901 (1-2).

- [83] Wilke C., Wunner G. Photon splitting in strong magnetic fields: asymptotic approximation formulas versus accurate numerical results // Phys. Rev. 1997. V. D55. P. 997-1000.
- [84] Weise J.I. Photon splitting in the electromagnetic vacuum // Phys. Rev. 2004. V. D69. P. 105017 (1-16).
- [85] Chistyakov M.V., Kuznetsov A.V., Mikheev N.V. The transitions $\gamma\gamma \rightarrow \nu\bar{\nu}$ and $\gamma \rightarrow \gamma\gamma$ in a strong magnetic field // In: Proceedings of the Ringberg Euroconference “New Trends in Neutrino Physics”, Ringberg Castle, Tegernsee, Germany, 1998. Edited by B. Kniehl, G. Raffelt and N. Schmitz. World Scientific Publishing Co., 1999. P. 245-254.
- [86] Chistyakov M.V., Kuznetsov A.V., Mikheev N.V. Photon splitting in a strong magnetic field // In: Proceedings of the 10th International Seminar “Quarks-98”, Suzdal, Russia, 1998. Edited by F.L. Bezrukov et al. Inst. Nucl. Res., Moscow, 1999. V. 1. P. 299-308.
- [87] Melrose D.B. A relativistic quantum theory for processes in collisionless plasmas // Plasma Phys. 1974. V. 16. P. 845-864.
- [88] Де Ля Инсера В., Феррер Э., Шабад А.Е. Однопетлевые вычисления расщепления фотона в релятивистской квантовой плазме методом функций Грина // Тр. ФИАН СССР. М.: Наука, 1986. Т. 169. С. 183-198.
- [89] Adler S.L. Photon splitting and photon dispersion in a strong magnetic field // Ann. Phys. (N.Y.). 1971. V. 67. No. 2. P. 599-647.
- [90] Bulik T. Photon splitting in strongly magnetized plasma // Acta Astronomica. 1998. V. 48. P. 695-710.

- [91] Elmfors P., Skagerstam B. Thermally induced photon splitting // Phys. Lett. 1998. V. B427. No 1-2. P. 197-205.
- [92] Gies H. QED effective action at finite temperature: Two-loop dominance // Phys. Rev. 2000. V. D61. P. 085021 (1-18).
- [93] Martinez Resco J. M., Valle Basagoiti M. A. Matter-induced vertices for photon splitting in a weakly magnetized plasma // Phys. Rev. 2001. V. D64. P. 016006 (1-6).
- [94] Борисов А.В., Вшивцев А.С., Жуковский В.Ч., Эминов П.А. Фотоны и лептоны во внешних полях при конечных температуре и плотности // УФН. 1997. Т. 167. № 3. С. 241-267.
- [95] Лифшиц Е.М., Питаевский Л.П. Физическая кинетика. М.: Наука, 1979. 528 с.
- [96] Фрадкин Е.С. Метод функций Грина в теории квантованных полей и квантовой статистике // Тр. ФИАН СССР. М.: Наука, 1965. Т. 29. С. 7-138.
- [97] Лифшиц Е.М., Питаевский Л.П. Статистическая физика, ч.2. М.: Наука, 1978. 448 с.
- [98] Берестецкий В.Б., Лифшиц Е.М., Питаевский Л.П. Квантовая электродинамика. М.: Наука, 1989. 728 с.
- [99] Имшенник В.С., Надежин Д.К. Сверхновая 1987А в Большом Магеллановом Облаке: наблюдения и теория // УФН. 1988. Т. 156. № 4. С. 561-651.

- [100] Nadyozhin D.K. Five year anniversary of Supernova 1987A in the Large Magellanic Cloud // In: Particles and Cosmology, Proc. Baksan Int. School, ed. by V.A. Matveev et al. Singapore: World Sci., 1992. P. 153-190.
- [101] Боровков М.Ю., Кузнецов А.В., Михеев Н.В. Однопетлевая амплитуда перехода $j \rightarrow f \bar{f} \rightarrow j'$ во внешнем электромагнитном поле // ЯФ. 1999. Т. 62. № 9. С. 1714-1722.
- [102] Кузнецов А.В., Михеев Н.В., Румянцев Д.А. Процесс $\gamma\gamma \rightarrow \nu\bar{\nu}$ в сильном магнитном поле // ЯФ. 2003. Т. 66. № 2. С. 319-327.
- [103] Кузнецов А.В., Михеев Н.В., Румянцев Д.А. Обобщенная амплитуда n -вершинного однопетлевого процесса в сильном магнитном поле // ЯФ. 2004. Т. 67. № 2. С. 324-331.
- [104] Кузнецов А.В., Михеев Н.В., Румянцев Д.А. Превращение фотонной пары в нейтрино в сильном магнитном поле // Актуальные проблемы физики. Выпуск 3: Сборник научных трудов молодых ученых, аспирантов и студентов. Ярославль. Яросл. гос. ун-т. 2001. С.31-36.
- [105] Кузнецов А.В., Михеев Н.В., Румянцев Д.А. Процесс $\gamma\gamma \rightarrow \nu\bar{\nu}$ в сильно замагниченной электрон-позитронной плазме // Актуальные проблемы физики. Выпуск 4: Сборник научных трудов молодых ученых, аспирантов и студентов. Ярославль. Яросл. гос. ун-т. 2003. С.28-34.
- [106] Кузнецов А.В., Михеев Н.В., Румянцев Д.А. Обобщенная амплитуда n -вершинного однопетлевого процесса в сильном магнитном

поле // Исследования по теории элементарных частиц и твердого тела. Выпуск 4: Сборник трудов, посвященный 30-летию кафедры теоретической физики ЯрГУ. Ярославль. Яросл. гос. ун-т. 2003. С.47-54.

- [107] Kuznetsov A.V., Mikheev N.V., Rumyantsev D.A. General amplitude of the n -vertex one-loop process in a strong magnetic field. // In: Proceedings of the 12th International Seminar “Quarks’2002”, edited by V.A. Matveev, V.A. Rubakov, S.M. Sibiryakov and A.N. Tavkhelidze. Moscow: Institute for Nuclear Research of Russian Academy of Sciences, 2004, P. 192-201.
- [108] Понтекорво Б.М. Универсальное взаимодействие Ферми и астрофизика // ЖЭТФ. 1959. Т. 36. № 5. С. 1615-1616.
- [109] Ландау Л.Д. О моменте системы из двух фотонов // ДАН СССР. 1948. Т. 60. С. 207.
- [110] Yang C.N. Selection rules for the dematerialization of a particle into two photons // Phys. Rev. 1950. V. 77. No. 2. P. 242-245.
- [111] Bég M.A.B., Budny R.V., Mohapatra R.N., Sirlin A. Manifest left-right symmetry and its experimental consequences // Phys. Rev. Lett. 1977. V. 38. No. 22. P. 1252-1255.
- [112] Eidelman S., Hayes K.G., Olive K.A. et al. (*Particle Data Group*). Review of Particle Physics // Phys. Lett. 2004. V. B592. No. 1-4. P. 1-1109.
- [113] Barbieri R., Mohapatra R.N. Limits on right-handed interactions from SN 1987A observations // Phys. Rev. 1989. V. D39. No. 4. P. 1229-1232.

- [114] Chistyakov M.V., Mikheev N.V. Photon - neutrino interactions in strong magnetic field // Mod. Phys. Lett. 2002. V. A17. No. 39. P. 2553-2562.
- [115] Gies H., Shaisultanov R.Zh. Axial vector current in an electromagnetic field and low-energy neutrino-photon interactions. // Phys. Rev. 2000. V. D62. No. 7. P. 073003.
- [116] Harding A.C., Baring M.G., Gonthier P.L. Photon splitting cascades in gamma-ray pulsars and the spectrum of PSR1509-58 // Astrophys. J. 1997. V.476. P.246-260.
- [117] Baring M.G., Harding A.C. Radio-quiet pulsars with ultrastrong magnetic fields // Astrophys. J. Lett. 1998. V.507. P.L55-L58.
- [118] Bialynicka-Birula Z., Bialynicki-Birula I. Nonlinear effects in quantum electrodynamics. Photon propagation and photon splitting in an external field // Phys. Rev. 1970. V. D2. No. 10. P. 2341-2345.
- [119] Папанян В.О., Ритус В.И. Поляризация вакуума и расщепление фотонов в интенсивном поле // ЖЭТФ. 1971. Т. 61. № 6. С. 2231-2241.
- [120] Румянцев Д.А., Чистяков М.В. Расщепление фотона в сильно замагниченной плазме // Лептоны: Юбилейный сборник статей, посвященный 80-летию Э.М. Липманова. Ярославль. Яросл. гос. ун-т. 2004. С.171-179.
- [121] Kuznetsov A.V., Mikheev N.V. Electroweak processes in external electromagnetic fields. New York: Springer-Verlag, 2003.

- [122] Mikheev N.V., Parkhomenko A.Ya., Vassilevskaya L.A. Magnetic-field influence on radiative axion decay into photons of the same polarization // ЯФ. 2000. Т. 63 № 6. С. 1122-1125.
- [123] Schwinger J. On gauge invariance and vacuum polarization // Phys. Rev. 1951. V. 82. No. 5. P. 664-679.
- [124] Tsai W., Erber T. The propagation of photons in homogeneous magnetic fields: index of refraction. // Phys.Rev. 1975. V. D12. P. 1132-1137.
- [125] Melrose D.B., Stoneham R.J. Vacuum polarization and photon propagation in a magnetic field. // Nuovo Cim. 1976. V. A32. P.435-447.
- [126] Светозарова Г.И. Цытович В.Н. О пространственной дисперсии релятивистской плазмы в магнитном поле // Изв. вузов. Радиофизика. 1962. Т.5. № 4. С. 658-670.
- [127] Ахиезер А.И., Берестецкий В.Б. Квантовая электродинамика. М.: Наука, 1981. 432 с.