

Резонансные процессы в активной среде

Д.А. Румянцев*, Д.М. Шленев** А.А. Ярков***

Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова, Россия

В работе рассмотрены различные квантовые процессы с учетом резонансных эффектов. Данный обзор достаточно подробно охватывает резонанс на виртуальном электроне, который играет важную роль при построении спектров излучения, в комптоновском $e\gamma \rightarrow e\gamma$ и фотонейтринном $e\gamma \rightarrow e\nu\bar{\nu}$ процессе. Вместе с этим учёт резонанса на виртуальном фотоне оказывается существенным в моделях резонансного рождения e^+e^- пар в полярной шапке магнитара. Кроме этого показано, что резонансные эффекты усиливают процессы с участием аксионов, которые являются одним из кандидатов темной материи, что может служить эффективным механизмом их рождения. Вблизи резонанса коэффициент поглощения, вычисленный в рамках теории возмущения для процессов с двумя и более вершин, выражается через одновршинные процессы, которые содержат в себе неустранимые расходимости, что требует переопределения теории.

*E-mail: rda@uniyar.ac.ru

**E-mail: allen_caleb@rambler.com

***E-mail: a12l@mail.ru

1 Введение

Резонансные явления в нашей жизни встречаются повсеместно. Большинство этих явлений так или иначе связано с колебательными процессами. Так, резонанс в колебательном контуре дает возможность получать или передавать информацию на определенной частоте с минимально затраченной энергией. При этом, в классическом подходе резонанс – это резкое возрастание амплитуды колебаний при приближении частоты внешнего воздействия к собственной частоте системы. С другой стороны, в квантовом подходе в силу существования дискретных уровней энергии резонанс означает резкое увеличение вероятностей процессов, связанных с переходами между этими уровнями, таких как, например, поглощение фотона с энергией, равной разнице энергий между двумя состояниями электрона. Одним из условий, при которых учет квантовых эффектов при движении частиц становится необходимым, является присутствие сильных магнитных полей, чья индукция приближается к характерному значению, называемому критическим, $B_e = m^2/e \simeq 4.41 \times 10^{13}$ Гс¹. В природе такими экстремально большими магнитными полями, согласно современным моделям [1–3], обладают разновидности нейтронных звезд, называемые радиопульсарами (с магнитными полями порядка 10^{12} Гс) и магнитарами (до 10^{15} Гс) [4].

Кроме сильных магнитных полей в магнитосфере как радиопульсаров, так и магнитаров присутствует относительно горячая и плотная электрон-позитронная плазма [1]. Магнитное поле и плазма составляют две компоненты внешней активной среды, присутствие которой значительно изменяет характеристики протекающих в ней микропроцессов. Во-первых, активная среда может изменять закон дисперсии находящихся в ней частиц, что приводит к изменению кинематики процессов и вследствие чего могут открываться каналы реакций, которые запрещены или сильно подавлены в вакууме. Во-вторых, активная среда влияет на амплитуды процессов, в результате че-

¹В работе используется естественная система единиц: $\hbar = c = k = 1$, m – масса электрона, $e > 0$ – элементарный заряд.

го они могут приобретать резонансный характер. Именно эта составляющая влияния внешней активной среды рассматривается в данном обзоре. Вследствие резонанса вклад микропроцессов в макроскопические характеристики астрофизических процессов, такие как светимость и скорость изменения количества частиц, может многократно увеличиваться.

Радиопульсары – это быстровращающиеся одиночные нейтронные звезды, которые демонстрируют периодические пульсации в радиочастотном диапазоне электромагнитного спектра со стабильным периодом. Согласно современным моделям [5, 6], основным механизмом потери энергии вращения для радиопульсаров с периодами вращения $P < 2$ с является магнито-дипольное излучение. Исходя из этого, была получена оценка магнитных полей на поверхности радиопульсаров [7]: $B \sim 10^{10} - 10^{14}$ Гс для среднепериодических ($0.1 \text{ с} < P < 2 \text{ с}$) пульсаров и $B \sim 10^8 - 10^{14}$ Гс для короткопериодических ($P < 0.1 \text{ с}$). Около 110 из 1468 представленных в работе [7] объектов обладают магнитными полями порядка критического значения, достигая для одного из них максимального значения напряженности магнитного поля $B \simeq 7.56 \times 10^{14}$ Гс. Вблизи полярных шапок радиопульсаров сильное магнитное поле отклоняет и ускоряет заряженные частицы, что приводит к генерации электромагнитного излучения. Несмотря на достаточно долгие наблюдения радиопульсаров, их радиоизлучение остается загадочным явлением, один из возможных механизмов которого исследовался, например, в работе [8].

Другими объектами с полями масштаба критического значения являются рентгеновские пульсары – сильно замагниченные нейтронные звезды, находящиеся в тесной двойной системе с обычной звездой. Достаточно сильное магнитное поле $B \gtrsim 10^{12}$ Гс в этом случае существенно влияет на путь аккреционного потока. Вещество в виде плазмы, аккрецирующееся на нейтронную звезду, следует линиям магнитного поля и сосредотачивается в относительно малых областях на поверхности звезды, близких к магнитным полюсам (т.н. полярным шапкам). В данной горячей области $T \sim 10^9 - 10^{10}$ К кине-

тическая энергия выделяется преимущественно в виде рентгеновских лучей. В спектре этих объектов присутствуют циклотронные особенности, которые впервые были открыты в 1977 году [9], в области энергий от 10 кэВ до 100 кэВ приблизительно. Наличие данных циклотронных линий позволило прямо измерить значения магнитного поля $B \sim 10^{12}$ Гс [10].

Наконец, существуют так называемые магнитары – отдельный класс изолированных нейтронных звезд, значение магнитных полей которых достигает $10^{14} - 10^{15}$ Гс [2, 11–15]. Исторически сложилось, что магнитары подразделяют на источники мягких повторяющихся гамма-всплесков (SGR – Soft Gamma-Repeater) и аномальные рентгеновские пульсары (AXP – Anomalous X-ray pulsar) [16–22]. Первыми были открыты SGR при наблюдении повторяющихся интенсивных вспышек в жестком и мягком рентгеновском диапазоне [23]. В свою очередь, AXP были впервые замечены в области мягкого гамма-излучения (< 10 кэВ), и изначально предполагалось, что они принадлежат двойным аккрецирующим системам [24]. Для магнитаров характерны пульсации с достаточно большим периодом от 2 до 12 секунд, а также рентгеновское излучение в области 0.5–10 кэВ и 20–100 кэВ. При этом температура поверхности имеет порядок $T \sim 10^6$ К [25]. Помимо их основных характеристик, в магнитарах также проявляется вспышечная активность. Как для SGR, так и для AXP характерны короткие вспышки продолжительностью от 0.1 до 1 секунды, которые могут наблюдаться также в области низких энергий (~ 10 кэВ), однако пиковое значение находится в области высоких энергий (до 100 кэВ) [26]. Наиболее редкими явлениями, которые наблюдались только в SGR, являются гигантские вспышки [23, 27–29]. Данные явления наблюдались у источников, магнитные поля которых являются одними из самых больших (от 10^{14} Гс до 10^{15} Гс). В результате гигантских вспышек из SGR высвобождается огромное количество энергии, что приводит к наблюдаемому излучению в области очень высоких энергий до 2 МэВ. Некоторые спектральные модели гигантских вспышек предполагают температуры в области $2 - 3 \times 10^9$ К, однако в пиковом значении могут достигать и выше

$T \sim 10^{10}$ К [27]. Наиболее подробный обзор наблюдательных данных и физических процессов, происходящих в магнитарах, можно найти, например, в работе [30].

Как известно, в сильном магнитном поле поперечная составляющая импульса электрона квантуется. В таком случае энергия электрона определяется так называемым уровнем Ландау n и проекцией импульса вдоль магнитного поля p_z и в пренебрежении аномальным магнитным моментом электрона выражается следующим образом [31]:

$$E_n = \sqrt{m^2 + p_z^2 + 2eBn}. \quad (1)$$

При этом интерпретация состояния с $n = 0$ (т.н. основной уровень Ландау) имеет различную трактовку. Так, в классическом представлении этому состоянию будет соответствовать движение электрона вдоль силовой линии магнитного поля [Блохинцев?]. В квантовом подходе состоянию с $n = 0$, например, соответствует ненаблюдаемость поперечного движения электрона по отношению к направлению магнитного поля [32]. В частности для полей $B \gg B_e$ электроны будут преимущественно занимать основной уровень Ландау.

Учет влияния макроскопических коллективных состояний электронов (позитронов), например, плазмы температуры T и химическом потенциале μ приводит к модификации этого условия [33]: $eB \gg \mu^2, T^2, E^2$, где E – энергия электронов среды. Более строгое соотношение между параметрами, при выполнении которого можно говорить о пределе сильного поля, получается из условия того, что в этом случае плотность энергии магнитного поля во много раз превосходит плотность энергии электрон-позитронного газа [34]:

$$\frac{B^2}{8\pi} \gg \frac{\pi^2(n_{e^-} - n_{e^+})^2}{eB} + \frac{eBT^2}{12}, \quad (2)$$

где n_{e^-} и n_{e^+} – концентрации электронов и позитронов плазмы. Такие условия могут, в частности, реализовываться в моделях вспышечной активности источников мягких повторяющихся гамма-всплесков (SGR) [1, 35], которые,

как показывают недавние наблюдения, можно отождествить с магнитарами [16–21].

С другой стороны, даже в магнитарных полях условие (2), при котором магнитное поле является доминирующим параметром, перестает выполняться при высоких значениях плотности плазмы $\rho \gtrsim 10^8$ г/см³. Такая плотность может достигаться в границе между внешней и внутренней корой магнитара. В этом случае электроны (реальные и виртуальные), начинают эффективно заполнять следующие уровни Ландау, что приводит к возможности возникновения резонансов в реакциях. В результате резонанса виртуальные частицы выходят на массовую поверхность, т.е. становятся реальными с определенным законом дисперсии. Однако в этом состоянии они являются нестабильными и могут распадаться за время, обратно пропорциональное вероятности их перехода на низшие уровни Ландау. Эффективность реакций при этом заметно увеличивается, что может иметь наблюдаемые астрофизические следствия, такие как появление линий поглощения в спектре излучения рентгеновских пульсаров [36] или смещение спектра излучения магнитаров в области более низких энергии [15].

Резонанс на фотоне наблюдается аналогичным образом: во внешней активной среде его поляризационный оператор приобретает реальную часть, которую можно рассматривать как эффективную массу фотона. В кинематической области, в которой квадрат 4-импульса виртуального фотона равен реальной части его поляризационного оператора, виртуальный фотон становится реальным и нестабильным [37].

Настоящая статья организована следующим образом. В разделе 2 описывается влияние внешнего магнитного поля на движение электронов, обсуждаются различные методы представления решения уравнения Дирака во внешнем магнитном поле и получается выражение для пропагатора. В разделе 3 рассматривается распространение радиации в магнитном поле и представлен поляризационный оператор фотона. Раздел 4 посвящен различным двухвершинным процессам, в которых может реализовываться резонанс на вирту-

альном фермионе и/или фотоне. В разделе 5 описываются сингулярности в фазовых объемах одновершинных процессов и методы их устранения.

2 Движение электронов во внешнем магнитном поле

2.1 Волновые функции электронов во внешнем магнитном поле

Для полноты изложения в этом разделе обсудим влияние внешней активной среды на волновые функции электронов [32], которые являются решением уравнения Дирака в присутствии внешнего постоянного однородного магнитного поля, направленного вдоль оси z :

$$(i\partial_\mu\gamma^\mu - eA_\mu\gamma^\mu - m)\Psi_{p,n}^s(X) = 0, \quad (3)$$

где $A^\mu = (0, 0, xB, 0)$ – 4-вектор потенциала электромагнитного поля в калибровке Ландау, $X^\mu = (t, x, y, z)$. Решением этого уравнения является набор собственных функций любого оператора, который коммутирует с гамильтонианом Дирака во внешнем магнитном поле: $H = \gamma_0(\boldsymbol{\gamma}\mathbf{P}) + m\gamma_0 - eA_0$, где $\mathbf{P} = -i\nabla + e\mathbf{A}$. Существует несколько представлений решений уравнения Дирака, из них можно выделить два наиболее распространенных подхода, подробное описание которых имеется в работах [32, 38–42]. При первом из них, предложенным Джонсоном и Липпманом [43], решения выбираются как собственные функции оператора обобщенной спиральности, $T_0 = \frac{1}{m}(\boldsymbol{\Sigma}\mathbf{P})$, где $\boldsymbol{\Sigma} = -\gamma_0\boldsymbol{\gamma}\gamma_5$ – трехмерный оператор спина. При этом две верхние компоненты биспиноров соответствуют состояниям электрона с проекцией спина на направление магнитного поля, равной $1/2$ и $-1/2$.

Другой подход предложен Соколовым и Терновым [31]. Он состоит в выборе волновых функций как собственных функций ковариантного оператора μ_z , который строится следующим образом:

$$\mu_z = m\Sigma_z - i\gamma_0\gamma_5 [\boldsymbol{\Sigma} \times \mathbf{P}]_z. \quad (4)$$

Его можно получить непосредственно из введенного в [31] обобщенного

оператора спина, являющегося тензором третьего ранга, который можно записать в координатном представлении следующим образом:

$$F_{\mu\nu\lambda} = -\frac{i}{2} (P_\lambda \gamma_0 \sigma_{\mu\nu} + \gamma_0 \sigma_{\mu\nu} P_\lambda), \quad (5)$$

где $\sigma_{\mu\nu} = (\gamma_\mu \gamma_\nu - \gamma_\nu \gamma_\mu)/2$, и $P_\lambda = i\partial_\lambda + e A_\lambda = (i\partial_0 + e A_0, -i\nabla + e\mathbf{A})$ – оператор обобщенного 4-импульса. Заметим, что в работе [31] ковариантные билинейные формы были построены из матриц Дирака в обкладках биспиноров ψ^\dagger и ψ , тогда как в современной литературе (см., например [44]) билинейные формы строятся из матриц Дирака в обкладках биспиноров $\bar{\psi}$ и ψ . Из пространственных компонент $F_{\mu\nu 0}$ оператора (5) можно построить следующий векторный оператор:

$$\mu_i = -\frac{1}{2} \varepsilon_{ijk} F_{jk0}, \quad (6)$$

где ε_{ijk} – тензор Леви-Чивита. Построенный таким образом объект (6) имеет смысл оператора поляризации [31, 38]. Его можно представить в виде:

$$\boldsymbol{\mu} = m\boldsymbol{\Sigma} + i\gamma_0\gamma_5[\boldsymbol{\Sigma} \times \mathbf{P}]. \quad (7)$$

В нерелятивистском пределе оператор (7), отнесенный к квадрату массы электрона: $\boldsymbol{\mu}/m^2$, переходит в обычный оператор Паули для магнитного момента [45], который имеет явную физическую интерпретацию оператора спина.

Решения уравнения Дирака в представлении Джонсона и Липпмана широко используются в литературе (см., например, [46–51]). Однако эти функции обладают рядом недостатков, которые проявляются при расчете конкретных характеристик процессов с двумя и более вершинами. Так, лоренц-инвариантностью будет обладать только квадрат модуля амплитуды, просуммированный по всем поляризациям электрона, а не парциальные вклады в него. Более того, как было показано в работах [52, 53], в области резонанса использование функций Джонсона и Липпмана приводит к относительной

ошибке в расчетах физических величин порядка $O(B/B_e)$ в древесном приближении и $O[(B/B_e)^2]$ в следующих порядках разложения, что становится существенным при магнитных полях.

С другой стороны, использование функций, предложенных Соколовым и Терновым, правильно описывает сечение процессов вблизи резонанса, а также позволяет найти парциальные вклады в амплитуду каждого поляризационного состояния частиц в отдельности, которые будут иметь лоренц-инвариантную структуру. По этой причине далее в этом разделе приведем подробное их описание.

Уравнение для собственных функций оператора (4) имеет следующий вид:

$$\mu_z \Psi_{p,n}^s(X) = s M_n \Psi_{p,n}^s(X), \quad (8)$$

где квантовое число $s = \pm 1$ определяет поляризационные состояния электрона в постоянном однородном магнитном поле.

Как уже упоминалось во Введении, состояния электрона квантуются по энергетическим состояниям, которые называются уровнями Ландау:

$$E_n = \sqrt{p_z^2 + M_n^2}, \quad n = 0, 1, \dots \quad (9)$$

Здесь введено обозначение для эффективной массы электрона в магнитном поле $M_n = \sqrt{2\beta n + m^2}$, где $\beta = eB$. Каждое состояние является бесконечно вырожденным по p_z и дважды вырожденным по s , кроме состояния $n = 0$, где возможно лишь состояние с $s = -1$. Решения уравнения Дирака (3) могут быть представлены следующим образом:

$$\Psi_{p,n}^s(X) = \frac{e^{-i(E_n X_0 - p_y X_2 - p_z X_3)} U_n^s(\xi)}{\sqrt{4E_n M_n (E_n + M_n)(M_n + m)L_y L_z}}, \quad (10)$$

где

$$\xi(X_1) = \sqrt{\beta} \left(X_1 + \frac{p_y}{\beta} \right). \quad (11)$$

Для электрона биспиноры $U_n^s(\xi)$ имеют следующий вид:

$$U_n^-(\xi) = \begin{pmatrix} -i\sqrt{2\beta n} p_z V_{n-1}(\xi) \\ (E_n + M_n)(M_n + m)V_n(\xi) \\ -i\sqrt{2\beta n}(E_n + M_n)V_{n-1}(\xi) \\ -p_z(M_n + m)V_n(\xi) \end{pmatrix}, \quad (12)$$

$$U_n^+(\xi) = \begin{pmatrix} (E_n + M_n)(M_n + m)V_{n-1}(\xi) \\ -i\sqrt{2\beta n} p_z V_n(\xi) \\ p_z(M_n + m)V_{n-1}(\xi) \\ i\sqrt{2\beta n}(E_n + M_n)V_n(\xi) \end{pmatrix}. \quad (13)$$

Для позитрона биспиноры $U_n^s(\xi)$ имеют следующий вид:

$$U_n^-(\xi) = \begin{pmatrix} i\sqrt{2\beta n} p_z V_n(\xi) \\ (E_n + M_n)(M_n + m)V_{n-1}(\xi) \\ i\sqrt{2\beta n}(E_n + M_n)V_n(\xi) \\ -p_z(M_n + m)V_{n-1}(\xi) \end{pmatrix}, \quad (14)$$

$$U_n^+(\xi) = \begin{pmatrix} (E_n + M_n)(M_n + m)V_n(\xi) \\ i\sqrt{2\beta n} p_z V_{n-1}(\xi) \\ p_z(M_n + m)V_n(\xi) \\ -i\sqrt{2\beta n}(E_n + M_n)V_{n-1}(\xi) \end{pmatrix}, \quad (15)$$

$V_n(\xi)$ – нормированные функции гармонического осциллятора, которые следующим образом выражаются через полиномы Эрмита $H_n(\xi)$ [54]:

$$V_n(\xi) = \frac{\beta^{1/4} e^{-\xi^2/2}}{\sqrt{2^n n!} \sqrt{\pi}} H_n(\xi). \quad (16)$$

2.2 Пропагатор фермиона во внешнем магнитном поле

При рассмотрении любого взаимодействия в квантовой теории поля предполагается, что между начальными и конечными состояниями существует

обмен виртуальными частицами. "Виртуальность" частицы означает, что ее энергия и импульс не связаны релятивистским соотношением (9). Промежуточное состояние в формализме собственного времени Фока [55] описывается уравнением Дирака с δ -функцией в правой части:

$$(i\partial_\mu\gamma^\mu - eA_\mu\gamma^\mu - m)S(X, X') = \delta(X - X') . \quad (17)$$

Его решение $S(X, X')$ называется пропагатором. В этом разделе мы опишем представление пропагаторов фермионов во внешнем магнитном поле с учетом радиационных поправок к массовому оператору и покажем, как может реализовываться резонанс в квантовых процессах, содержащих фермионы в промежуточном состоянии.

Решения уравнения (17) имеют достаточно громоздкий вид. Пропагатор удобно рассматривать в виде разложения по уровням Ландау:

$$S(X, X') = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{s=\pm 1} S_n^s(X, X') . \quad (18)$$

С другой стороны, для построения пропагатора, удовлетворяющего уравнению (17), можно воспользоваться полевыми операторами:

$$\Psi(X) = \sum_{n,p_y,p_z,s} (a_{n,p}^s \Psi_{n,p,+}^s(X) + b_{n,p}^{\dagger s} \Psi_{n,p,-}^s(X)) , \quad (19)$$

где a – оператор уничтожения фермиона, b^\dagger – оператор рождения фермиона, Ψ_+ и Ψ_- соответствуют решениям уравнения Дирака с положительной и отрицательной энергией соответственно. Следует упомянуть, что влиянием плазмы на виртуальные состояния можно пренебречь [33]. Стандартным образом пропагатор вычисляется как разность хронологически упорядоченного и нормально упорядоченного произведения полевых операторов [32]:

$$S(X, X') = T(\Psi(X)\bar{\Psi}(X')) - \mathcal{N}(\Psi(X)\bar{\Psi}(X')) . \quad (20)$$

Подставляя в (20) точные решения уравнения Дирака (10) и вводя для удобства новое обозначение:

$$\phi_{p,n}^s(X_1) = \frac{U_n^s[\xi(X_1)]}{\sqrt{2M_n(E_n + M_n)(M_n + m)}} , \quad (21)$$

где U_n^s определяется формулой (12)–(15), можно представить вклад в разложение пропагатора от уровня Ландау n и поляризационного состояния s следующим образом:

$$S_n^s(X, X') = \int \frac{dp_0 dp_y dp_z}{(2\pi)^3} \times \quad (22)$$

$$\times \frac{e^{-ip_0(X_0 - X'_0) + ip_y(X_2 - X'_2) + ip_z(X_3 - X'_3)}}{p_0^2 - p_z^2 - M_n^2 - \mathcal{R}_\Sigma^s(p) + i\mathcal{I}_\Sigma^s(p)} \phi_{p,n}^s(X_1) \bar{\phi}_{p,n}^s(X'_1),$$

где $\mathcal{R}_\Sigma^s(p)$ и $\mathcal{I}_\Sigma^s(p)$ – реальная и мнимая части массового оператора фермиона. Для их получения требуется вычислить радиационные поправки к массе фермиона в замагниченной плазме. Реальная часть массового оператора $\mathcal{R}_\Sigma^s(p)$ определяет изменение закона дисперсии фермиона в присутствии замагниченной плазмы. В слабых магнитных полях, где выполняется $B \ll B_e$, но среду ещё можно рассматривать как поледоминирующую, она определяется отношением [56]:

$$\mathcal{R}_\Sigma^s(p) = \frac{4\alpha m}{3\pi} \kappa^2 \left[\ln \kappa^{-1} + C + \frac{1}{2} \ln 3 - \frac{33}{16} \right], \quad \kappa \ll 1, \quad (23)$$

где $C = 0.577\dots$ – постоянная Эйлера, динамический параметр κ вводится следующим образом:

$$\kappa = \frac{1}{mB_e} [-(F_{\mu\nu} p_\nu)^2]^{1/2}. \quad (24)$$

Для случая сильного магнитного поля, $B \gtrsim B_e$, без учета плазмы лидирующий вклад в сдвиг массы фермиона, находящегося на основном уровне Ландау, описывается квадратом логарифмической функции [57]:

$$\mathcal{R}_\Sigma^s(p) = \frac{\alpha}{4\pi} m \ln^2(2\beta/m^2). \quad (25)$$

Из (23) и (25) следует, что даже для достаточно больших значений магнитного поля вплоть до 10^{16} Гс эта поправка к массе фермиона имеет величину порядка постоянной тонкой структуры α [39, 40] и является несущественной.

Резонанс на виртуальном фермионе будет наблюдаться, когда в знаменателе пропагатора (22) реальная часть обращается в ноль. Тогда виртуальная

частица становится реальной, то есть приобретает определенный закон дисперсии (9). Анализ кинематики показывает, что это возможно только тогда, когда виртуальный фермион занимает один из высших уровней Ландау, $n > 0$. Частица при этом является нестабильной, и время ее жизни, в нерезонансной области предполагающееся бесконечно большим, определяется мнимой частью массового оператора, $\mathcal{I}_\Sigma^s(p)$, учет которой становится необходимым. Она может быть получена с помощью оптической теоремы и представлена в следующем виде [58, 59]:

$$\mathcal{I}_\Sigma^s(p) = -\frac{1}{2} p_0 \Gamma_n^s, \quad (26)$$

где Γ_n^s – полная ширина изменения состояния фермиона, находящегося в поляризационном состоянии s и занимающего n -й уровень Ландау. Введенный таким образом пропагатор с учетом конечной ширины изменения состояния фермиона позволяет корректно рассчитывать сечения квантовых процессов в резонансной области.

3 Распространение фотона в замагниченной плазме

Распространение фотона в активной среде удобнее всего описывать в терминах собственных функций (задающих возможные его поляризационные состояния) и собственных значений (определяющих дисперсионные свойства) поляризационного оператора фотона $\mathcal{P}_{\alpha\beta}$, явный вид которого может быть получен из результатов работ [60–63]. Для дальнейшего анализа получим его разложение по базису, построенному на 4-векторе импульса фотона, $q_\mu = (\omega, \mathbf{q})$, и безразмерном тензоре электромагнитного поля, $\varphi_{\alpha\beta} = F_{\alpha\beta}/B$.

В системе отсчета, в которой имеется только магнитное поле, конструкции: $\Lambda_{\alpha\beta} = (\varphi\varphi)_{\alpha\beta} = \text{diag}(0, 1, 1, 0)$ и $\tilde{\Lambda}_{\alpha\beta} = (\tilde{\varphi}\tilde{\varphi})_{\alpha\beta} = \text{diag}(1, 0, 0, -1)$, где $\tilde{\varphi}_{\mu\nu} = \varepsilon_{\mu\nu\rho\sigma}\varphi^{\rho\sigma}/2$, позволяют разбить четырехмерное пространство-время на подпространства Евклида $\{1, 2\}$ и Минковского $\{0, 3\}$, обозначенные символами \perp и \parallel , соответственно. Тогда для произвольных векторов имеем:

$$p_\perp^\mu = (0, p_1, p_2, 0), \quad p_\parallel^\mu = (p_0, 0, 0, p_3), \quad (pq)_\perp = (p\Lambda q) = p_1q_1 + p_2q_2, \quad (pq)_\parallel = (p\tilde{\Lambda}q) = p_0q_0 - p_3q_3.$$

В качестве векторов, на которых мы построим базис для разложения поляризационного оператора фотона, выберем собственные векторы поляризационного оператора в постоянном однородном магнитном поле [62]:

$$\begin{aligned} b_\mu^{(1)} &= (\varphi q)_\mu, & b_\mu^{(2)} &= (\tilde{\varphi} q)_\mu, \\ b_\mu^{(3)} &= q^2 (\Lambda q)_\mu - q_\mu q_\perp^2, & b_\mu^{(4)} &= q_\mu. \end{aligned} \quad (27)$$

Этот базис не является нормированным, модули векторов имеют следующие значения:

$$\begin{aligned} (b^{(1)}b^{*(1)}) &= -q_\perp^2, & (b^{(2)}b^{*(2)}) &= -q_\parallel^2, \\ (b^{(3)}b^{*(3)}) &= -q^2 q_\parallel^2 q_\perp^2, & (b^{(4)}b^{*(4)}) &= q^2. \end{aligned} \quad (28)$$

В замагниченной плазме $\mathcal{P}_{\alpha\beta}$ уже не будет диагональным в базисе из векторов (27), поэтому его удобно разложить по собственным векторам $r_\alpha^{(\lambda)}$ в замагниченной плазме с соответствующими собственными значениями $\mathcal{P}^{(\lambda)}$ [60, 64–66]:

$$\mathcal{P}_{\alpha\beta} = \sum_{\lambda=1}^3 \mathcal{P}^{(\lambda)} \frac{r_\alpha^{(\lambda)} (r_\beta^{(\lambda)})^*}{(r^{(\lambda)})^2}, \quad r_\beta^{(\lambda)} = \sum_{i=1}^3 A_i^{(\lambda)} b_\beta^{(i)}, \quad (29)$$

где $A_i^{(\lambda)}$ – некоторые комплексные коэффициенты.

Нахождение вида разложения (29) для случая замагниченной плазмы с произвольными характеристиками сопряжено со значительными вычислительными сложностями, поэтому эта задача решалась для случаев, когда один из параметров доминирует над другими. Так, в случае магнитодоминирующей среды (см. Введение), используя результаты работ [60, 64–67], в кинематической области вдали от циклотронных резонансов, $q_\parallel^2 \ll (m + \sqrt{m^2 + 2\beta})^2$, можно получить следующее разложение:

$$\begin{aligned} \mathcal{P}_{\alpha\beta} &\simeq -\frac{2\alpha}{\pi} \beta \mathcal{D} \frac{(\tilde{\varphi} q)_\alpha (\tilde{\varphi} q)_\beta}{q_\parallel^2} + \frac{\alpha}{3\pi} (\varphi q)_\alpha (\varphi q)_\beta + \frac{i\alpha}{\pi} \Delta N [\varphi_{\alpha\beta} (qu) + (q\varphi)_\alpha u_\beta - \\ &-(q\varphi)_\beta u_\alpha] + \frac{\alpha}{3\pi} \mathcal{V} (q^2 g_{\alpha\beta} - q_\alpha q_\beta) + O\left(\frac{1}{\beta}\right), \end{aligned} \quad (30)$$

где

$$\mathcal{D} = -\mathcal{J}(q_{\parallel}) - H \left(\frac{q_{\parallel}^2}{4m^2} \right), \quad (31)$$

$$\mathcal{J}(q_{\parallel}) = 2q_{\parallel}^2 m^2 \int_{-\infty}^{\infty} \frac{dp_z}{E} \frac{f_{-}(p) + f_{+}(p)}{q_{\parallel}^4 - 4(pq)_{\parallel}^2}, \quad (32)$$

$$f_{\pm}(p) = \frac{1}{1 + \exp [((pu)_{\parallel} \pm \mu)/T]}, \quad (33)$$

$$(pu)_{\parallel} = Eu_0 - p_z u_z, \quad E = \sqrt{p_z^2 + m^2}.$$

Здесь u^{μ} – 4-вектор скорости плазмы, верхний знак соответствует электронной компоненте плазмы, нижний – позитронной.

$$H(z) = \frac{1}{\sqrt{z(1-z)}} \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{z}{1-z}} - 1, \quad 0 \leq z \leq 1,$$

$$\Delta N = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{dp_z}{E} (pu)_{\parallel} [f_{-}(p) - f_{+}(p)] = \frac{(2\pi)^2}{\beta} (n_e - n_{e+}),$$

$$\mathcal{V} = \ln(B/B_e) - 1.792 + \frac{3}{2} \int_0^1 dx (1-x^2) \ln \left[1 - \frac{q^2}{4m^2} (1-x^2) \right]. \quad (34)$$

В разложении собственных векторов $r_{\alpha}^{(\lambda)}$ по обратным степеням поля для получения самосогласованных результатов оказывается необходимым учесть следующий порядок малости по $1/\beta$:

$$\begin{aligned} r_{\alpha}^{(1,3)} = & \left[\mp \sqrt{q_{\perp}^4 + (6\Delta N \omega)^2 \frac{q_{\perp}^2}{q_{\parallel}^2}} - q_{\perp}^2 \right] b_{\alpha}^{(1)} - i \frac{6\Delta N \omega}{q_{\parallel}^2} b_{\alpha}^{(3)} + \\ & + i \frac{\Delta N k_z q_{\perp}^2}{2\beta \mathcal{D} q_{\parallel}^2} \left[\pm \sqrt{q_{\perp}^4 + (6\Delta N \omega)^2 \frac{q_{\perp}^2}{q_{\parallel}^2}} + q_{\perp}^2 \right] b_{\alpha}^{(2)} + O\left(\frac{1}{\beta^2}\right), \end{aligned} \quad (35)$$

$$r_\alpha^{(2)} = b_\alpha^{(2)} - i \frac{\Delta N k_z}{2\beta \mathcal{D}} b_\alpha^{(1)} + O\left(\frac{1}{\beta^2}\right). \quad (36)$$

Коэффициенты $A_i^{(\lambda)}$ в разложении (29) с точностью до членов $O(1/\beta^2)$ имеют вид:

$$\begin{aligned} A_1^{(1,3)} &= \mp \sqrt{q_\perp^4 + (6\Delta N \omega)^2 \frac{q_\perp^2}{q_\parallel^2}} - q_\perp^2, \\ A_2^{(1,3)} &= i \frac{\Delta N k_z q_\perp^2}{2\beta \mathcal{D} q_\parallel^2} \left[\pm \sqrt{q_\perp^4 + (6\Delta N \omega)^2 \frac{q_\perp^2}{q_\parallel^2}} + q_\perp^2 \right], \\ A_3^{(1,3)} &= -i \frac{6\Delta N \omega}{q_\parallel^2}, \quad A_1^{(2)} = -i \frac{\Delta N k_z}{2\beta \mathcal{D}}, \\ A_2^{(2)} &= 1, \quad A_3^{(2)} = 0. \end{aligned} \quad (37)$$

Соответствующие собственные значения в приближениях $O(1/\beta^2)$ для $\mathcal{P}^{(1,3)}$ и $O(1/\beta)$ для $\mathcal{P}^{(2)}$ запишутся следующим образом:

$$\mathcal{P}^{(1,3)} = \frac{\alpha}{3\pi} q^2 \mathcal{V} + \frac{\alpha}{6\pi} \left[\mp \sqrt{q_\perp^4 + (6\Delta N \omega)^2 \frac{q_\perp^2}{q_\parallel^2}} - q_\perp^2 \right] + O\left(\frac{1}{\beta}\right), \quad (38)$$

$$\mathcal{P}^{(2)} = \frac{\alpha}{3\pi} q^2 \mathcal{V} + \frac{2\alpha}{\pi} \beta \mathcal{D} + O\left(\frac{1}{\beta}\right). \quad (39)$$

Следует отметить, что полученные собственные векторы (35)–(36) не являются единичными, и для описания поляризационных состояний фотона удобнее использовать нормированные векторы:

$$\varepsilon_\alpha^{(1)}(q) = \frac{r_\alpha^{(1)}}{\sqrt{|(r^{(1)} r^{*(1)})|}} = \frac{(q\varphi)_\alpha}{\sqrt{q_\perp^2}}, \quad \varepsilon_\alpha^{(2)}(q) = \frac{r_\alpha^{(2)}}{\sqrt{|(r^{(2)} r^{*(2)})|}} = \frac{(q\tilde{\varphi})_\alpha}{\sqrt{q_\parallel^2}}. \quad (40)$$

Здесь символы 1 и 2 соответствуют \parallel и \perp – поляризациям в чистом магнитном поле [68], X - и O - модам работы [69], и E - и O - модам в замагниченной плазме [2].

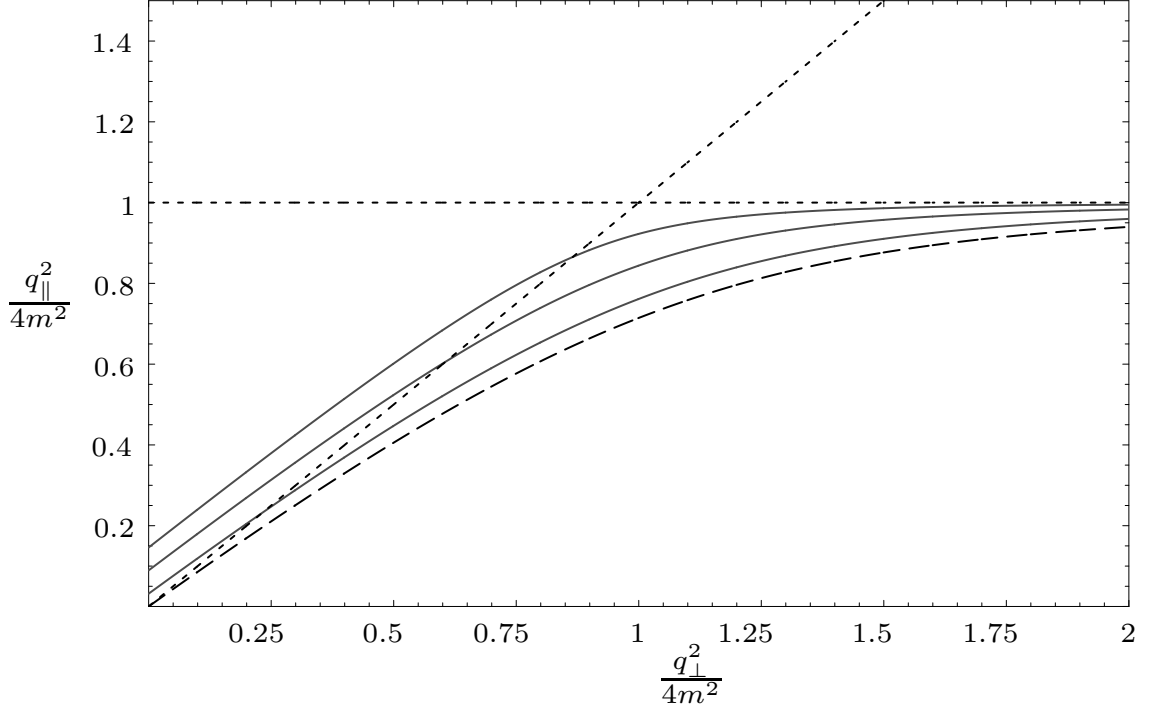


Рис. 1: Законы дисперсии фотона моды 2 в сильном магнитном поле $B/B_e = 200$ и нейтральной плазме ($\mu = 0$) для различных значений температуры: $T = 1$ МэВ (верхняя кривая), $T = 0.5$ МэВ (средняя кривая), $T = 0.25$ МэВ (нижняя кривая). Дисперсия фотона без плазмы обозначена штриховой линией. Диагональная штриховая линия соответствует вакуумному закону дисперсии, $q^2 = 0$. Угол между импульсом фотона и направлением магнитного поля равен $\pi/2$.

Нетрудно увидеть, что полученные таким образом собственные векторы и собственные значения поляризационного оператора в плазме с точностью до членов порядка $O(1/\beta^2)$ и $O(\alpha^2)$ совпадают с соответствующими величинами в замагниченном вакууме². Такой вывод находится в согласии с результатами работы [60] и, для предельного случая $\omega \ll m$ и после необходимых преобразований: выбора продольной составляющей $\varepsilon_\alpha^{(2)}$ и перехода в систему координат, в которой вектор импульса фотона направлен вдоль оси z , работы [70].

Закон дисперсии фотона моды 1 в приближении $O(1/\beta^2)$ практически не отличается от вакуумного, $q^2 \simeq 0$. Действительно, из закона дисперсии для

²Под термином «замагниченный вакуум» понимается магнитное поле без плазмы.

этой моды:

$$q^2 - \mathcal{P}^{(1)} = 0 \quad (41)$$

и формулы (38) следует, что

$$q_{\parallel}^2 = \left(1 - \frac{\alpha}{3\pi} \frac{1}{1 - \frac{\alpha}{3\pi} \mathcal{V}}\right) q_{\perp}^2 \simeq q_{\perp}^2 \left(1 - \frac{\alpha}{3\pi}\right), \quad (42)$$

так что $q^2 \simeq 0$, оставаясь при этом отрицательным. Кроме того, из формулы (38) следует, что в кинематической области $q_{\parallel}^2 \ll (m + \sqrt{m^2 + 2\beta})^2$ собственное значение поляризационного оператора моды 1 не имеет мнимой части ³

С другой стороны, дисперсионные свойства фотона моды 2 претерпевают существенные изменения даже по сравнению с замагниченным вакуумом и, следовательно, будут оказывать дополнительное влияние на кинематику процессов с участием фотонов этой моды. На рис. 1 представлены законы дисперсии фотона моды 2 в замагниченной зарядово-симметричной ($\mu = 0$) плазме для различных значений температур, полученные как решения уравнения

$$q^2 - \mathcal{P}^{(2)} = 0. \quad (43)$$

Как нетрудно видеть, в противоположность чистому магнитному полю, в плазме существует область с $q^2 > 0$ ниже первого циклотронного резонанса, определяемого условием $q_{\parallel}^2 = 4m^2$.

Этот факт связан с появлением плазменной частоты в представлении реальных электронов и позитронов среды, которая может быть определена из уравнения

$$\omega_{pl}^2 - \mathcal{P}^{(2)}(\omega_{pl}, \mathbf{k} \rightarrow 0) = 0. \quad (44)$$

Для случая сильно замагниченной зарядово-симметричной нерелятивистской плазмы можно получить приближенное решение этого уравнения. В результате мы получим классическое выражение $\omega_{pl}^2 \simeq 2(4\pi\alpha n_e)/m$ (множитель 2

³Строго говоря, мнимая часть является сильно подавленной по сравнению с реальной частью, так что такой фотон будет квазистабильным [71]

возникает из-за равенства концентраций электронов и позитронов), где

$$n_e \simeq \beta \sqrt{\frac{mT}{(2\pi)^3}} e^{-m/T}. \quad (45)$$

Таким образом, ω_{pl} для зарядово-симметричной плазмы экспоненциально подавлено. С другой стороны, для зарядово-несимметричной плазмы подавление отсутствует и $\omega_{pl}^2 \simeq (2\alpha\beta/\pi)v_F$.

Тем не менее, даже для зарядово-симметричной плазмы при температуре $T = 50$ кэВ и индукции магнитного поля $B = 200B_e$ мы получаем такую оценку для плазменной частоты: $\omega_{pl} \simeq 3$ кэВ, что уже может повлиять на кинематику различных процессов с участием фотона. Например, наличие плазменной частоты приводит к возникновению порога для каналов рассеяния фотона моды 2 на электронах и позитронах плазмы, $\gamma_2 e \rightarrow \gamma_1 e$, $\gamma_2 e \rightarrow \gamma_2 e$, который отсутствует в чистом магнитном поле. А для одной из основных реакций, в которых рождаются поляризованные фотоны, – процесса расщепления фотона на два фотона, $\gamma \rightarrow \gamma\gamma$, оно приводит к возникновению новых правил отбора по поляризациям: в области ниже порога рождения e^+e^- -пар, $q_{\parallel}^2 = 4m^2$, и в области, где $q^2 > 0$, каналы, в которых рождаются фотоны моды 2, $\gamma_2 \rightarrow \gamma_2\gamma_2$, $\gamma_1 \rightarrow \gamma_2\gamma_2$ и $\gamma_1 \rightarrow \gamma_1\gamma_2$, кинематически закрыты и становится открытым новый канал $\gamma_2 \rightarrow \gamma_1\gamma_1$, запрещенный в магнитном поле в отсутствие плазмы.

Пропагатор фотона определяется решением следующего волнового уравнения:

$$(g_{\alpha\rho} \partial_{\mu}^2 - \partial_{\alpha} \partial_{\rho}) G^{\rho}_{\beta}(x) + \int d^4x' \mathcal{P}_{\alpha\rho}^{(\lambda)}(x - x') G^{\rho}_{\beta}(x) = g_{\alpha\beta} \delta^4(x),$$

где $\delta^4(x) = \delta(t)\delta(x)\delta(y)\delta(z)$.

В координатном пространстве пропагатор фотона можно представить следующим образом:

$$G_{\mu\nu}(x) = \int \frac{d^4q}{(2\pi)^4} G_{\mu\nu}(q) e^{-iqx}, \quad (46)$$

где

$$G_{\mu\nu}(q) = \sum_{\lambda=1}^3 \frac{b_{\mu}^{(\lambda)} b_{\nu}^{(\lambda)}}{(b^{(\lambda)})^2} \cdot \frac{1}{q^2 - \mathcal{P}^{(\lambda)}(q)} \quad (47)$$

– фурье-образ пропагатора.

4 Резонанс на виртуальном электро́не

4.1 Резонанс в комптоновском рассеянии

Интерес к изучению комптоновского рассеяния $\gamma e \rightarrow \gamma e$ в сильном магнитном поле первоначально был вызван неожиданным открытием циклотронных спектральных линий у двойных рентгеновских пульсаров [36, 72, 73], которые изначально интерпретировались либо как циклотронное поглощение, либо как циклотронное излучение [36]. Дальнейшее повышение разрешения детекторов по энергии позволило уверенно заключить, что циклотронные особенности связаны именно с резонансным поглощением фотона [74]. При этом под циклотронным резонансом обычно понимается резкое увеличение сечения рассеяния по сравнению с классическим томсоновским сечением $\sigma_T = 8\pi\alpha^2/(3m^2)$. В одной из первых работ по этой тематике [75] выражение для сечения комптоновского рассеяния в магнитном поле без плазмы было получено в нерелятивистском пределе, и для фотона, распространяющегося вдоль магнитного поля, в сечении был обнаружен резонансный пик при энергии:

$$\omega_B \simeq \frac{\beta}{m}. \quad (48)$$

Кроме того, в работе [75] также было показано, что сечение рассеяния фотона на электро́не значительно зависит как от поляризационного состояния фотона, так и от угла между направлением импульса начального фотона и направлением магнитного поля. В последовавшей за ней статье [76] исследовалось изменение энергии фотона в комптоновском процессе, кратное циклотронной частоте ω_B (48). В следующих работах [77, 78] были получены

результаты для полного сечения рассеяния фотона на электроне с использованием формализма работы [75], которые будут справедливыми только для относительно слабого магнитного поля $B < 10^{12}$ Гс. Однако при значениях магнитного поля $B > 10^{12}$ Гс, как было показано в работах [79, 80], учет релятивистских эффектов в сечении комптоновского рассеяния становится существенным.

В представленных выше работах предполагалось, что начальный и конечные электроны находятся на основном уровне Ландау, что является справедливым для предела сильного магнитного поля и/или низких температур $T \ll m$ (см. Введение). В этом случае резонансный пик (48) смещается в область более низких энергий фотона, а кроме него возникает бесконечный ряд резонансных пиков, соответствующих разным уровням Ландау n виртуального электрона. Эти пики реализуются при энергиях фотона:

$$\omega_n(\theta) = \frac{\sqrt{m^2 + 2\beta n \sin^2 \theta} - m}{\sin^2 \theta}, \quad (49)$$

где θ – угол между импульсом начального фотона и направлением магнитного поля.

С другой стороны, в результате комптоновского процесса могут возбуждаться высшие уровни Ландау начального электрона, что, в свою очередь, может выступать механизмом рождения фотонов малых энергий для магнитных полей $B \lesssim B_e$ [81, 82]. В таком случае для произвольных уровней Ландау ℓ начального электрона резонансные пики будут наблюдаться на энергиях:

$$\omega_{n\ell}(\theta) = \frac{\sqrt{M_\ell^2 - \sin^2 \theta (M_\ell^2 - M_n^2)} - M_\ell}{\sin^2 \theta}, \quad (50)$$

где $M_\ell = \sqrt{m^2 + 2\beta\ell}$, $M_n = \sqrt{m^2 + 2\beta n}$ и т.п.

В рассмотренных выше работах сечение комптоновского рассеяния становится бесконечным при энергиях фотона, соответствующих циклотронным резонансам (49) вследствие предположения о большом времени жизни виртуальных частиц. По этой причине их результаты справедливы только для об-

ластей энергий фотона вдали от резонансов и могут быть применены, например, для моделирования излучения замагниченной холодной плазмы вблизи поверхности нейтронных звезд [83] или же для относительно слабых магнитных полей $B \lesssim 10^{10}$ Гс [84].

С другой стороны, учет резонансов в комптоновском процессе является необходимым при моделировании спектров излучения сильно замагниченных нейтронных звезд [70, 85–91]. Вблизи поверхности нейтронной звезды, где формируется излучение, резонансный обратный комптоновский процесс рассеяния фотонов малых энергий на высокоэнергетических электронах является доминирующим процессом, который приводит к охлаждению плазмы внутренней магнитосферы и образованию высокоэнергетического хвоста в спектре излучения [92–95].

Вблизи циклотронных резонансов для расчета сечения комптоновского рассеяния требуется учесть полную ширину изменения состояния электрона. В нерелятивистском пределе [75] присутствует лишь одна резонансная частота (49) и сечение рассеяния не зависит от поляризационного состояния электрона (или его спинового состояния), поэтому ввести полную ширину относительно просто [96]. Однако в сильных магнитных полях $B \gtrsim B_e$ и при высоких энергиях частиц требуется учитывать релятивистские поправки, что приводит к тому, что выражение для сечения становится очень громоздким, поскольку оно имеет бесконечное число резонансов (50), содержащихся в сумме по всем промежуточным виртуальным состояниям.

Изначально для учета конечных резонансных пиков использовались усредненные по спину ширины распада промежуточного состояния [49, 97]. Как было указано в работе [53], такой подход не является точным, поскольку усреднение по спину некорректно учитывает спиновую зависимость времени распада виртуального электрона, что приводит к неверному значению сечения комптоновского рассеяния в точке резонанса. Этот недостаток был устранен в работе [69], где представлено сечение рассеяния процесса $\gamma e \rightarrow \gamma e$ с учетом ширины распада виртуальных промежуточных состояний, которая

зависит от поляризационного состояния электрона. Однако полное сечение комптоновского рассеяния, полученное таким методом, представляет собой громоздкое выражение, что, например, затрудняет его использование в моделях переноса излучения.

В ряде случаев выражение сечения рассеяния можно упростить для получения аналитического решения различных задач. Так, в работе [49] была использована аппроксимация сечения рассеяния с учетом резонанса в ультррелятивистском пределе для случая относительно сильного магнитного поля $B > 0.1B_e$. В точке циклотронного резонанса виртуальный электрон становится реальным и распадается на масштабе комптоновского времени, поэтому вероятность комптоновского рассеяния сводится к вероятности однократного процесса поглощения фотона электроном $\gamma e \rightarrow e$. В работе [47] исследовался вопрос аппроксимации комптоновского сечения с помощью однократного процесса поглощения фотона электроном для магнитных полей $B \sim 0.1B_e$. При этом различие между однократным процессом поглощения и комптоновским рассеянием становится существенным на высших циклотронных резонансах из-за нерезонансного вклада. Еще один подход рассмотрен в работе [98], он заключается в том, что пропагатор виртуального электрона можно заменить на дельта-функцию, когда основной вклад в сечение рассеяния будут давать области вблизи резонансов (приближение узкого пика).

Далее рассмотрим получение сечения рассеяния комптоновского процесса в случае узкого резонансного пика. Лагранжиан взаимодействия электрона с фотоном может быть представлен в виде:

$$\mathcal{L}(X) = -e[\bar{\Psi}(X)\gamma^\mu A_\mu^{(\lambda)}(X)\Psi(X)], \quad (51)$$

где $\Psi(X)$ – волновая функция электрона (19), $A_\mu^{(\lambda)}(X)$ – волновая функция фотона в виде плосковолновых решений:

$$A_\mu^{(\lambda)}(X) = \frac{e^{-i(qX)}}{\sqrt{2q_0V}} \varepsilon_\mu^{(\lambda)}(q), \quad (52)$$

$V = L_x L_y L_z$ – нормировочный объем и $\lambda = 1, 2$ – мода фотона.

S -матричный элемент рассеяния фотона поляризации λ на электроне с рождением электрона и фотона поляризации λ' , с учетом лагранжиана (51) может быть представлен в виде:

$$\begin{aligned} \mathcal{S}_{\gamma^{(\lambda)}e \rightarrow \gamma^{(\lambda')}e'}^{s's} &= -e^2 \int d^4X d^4Y A_\mu^{(\lambda)}(X) A_{\mu'}^{(\lambda')}(Y) \left[\bar{\Psi}_{p',\ell'}^{s'}(Y) \gamma_{\mu'} S_n^{s''}(Y, X) \gamma_\mu \Psi_{p,\ell}^s(X) \right] + \\ &+ (A_\mu^{(\lambda)}, \gamma_\mu \leftrightarrow A_{\mu'}^{(\lambda')}, \gamma_{\mu'}). \end{aligned} \quad (53)$$

Если в области резонанса выполняется условие $E_n'' \Gamma_n^{s''} \ll |(p+q)_\parallel^2 - M_n^2|$, где $E_n'' = E_n + \omega$ – энергия виртуального электрона, то можно использовать приближение узкого резонансного пика. Здесь $\Gamma_n^{s''}$ – полная ширина изменения состояния электрона за счет процесса рассеяния фотона на электроне, которую можно выразить через ширину поглощения электрона в процессе $e_n \rightarrow e_{\ell'} \gamma$ [99]:

$$\Gamma_n^{s''} \simeq \Gamma_{e_n \rightarrow e_{\ell'} \gamma}^{(abs) s''} \left[1 + e^{-(E_n'' - \mu)/T} \right], \quad (54)$$

$$\begin{aligned} \Gamma_{e_n \rightarrow e_{\ell'} \gamma}^{(abs) s''} &= \sum_{\ell'=0}^{n-1} \sum_{s'=\pm 1} \sum_{\lambda'} \int \frac{dp'_y dp'_z L_y L_z}{(2\pi)^2} [1 - f_e(E'_{\ell'})] \times \\ &\times \frac{d^3 q' V}{(2\pi)^3} (1 + f_\gamma(\omega')) \frac{|\mathcal{S}_{e_n \rightarrow e_{\ell'} \gamma^{(\lambda')}}^{s's''}|^2}{\tau}, \end{aligned} \quad (55)$$

где $f_e(E'_{\ell'}) = (1 + \exp[E'_{\ell'}/T])^{-1}$ – равновесная функция распределения электронов с температурой T и нулевым химическим потенциалом, $f_\gamma(\omega') = (\exp[\omega'/T] - 1)^{-1}$ – равновесная функция распределения фотонов. В приближении узкого резонансного пика квадрат знаменателя пропагатора (22) может быть заменен на δ -функцию:

$$\left| \frac{1}{(p+q)_\parallel^2 - M_n^2 - i E_n'' \Gamma_n^{s''}/2} \right|^2 \simeq \frac{2\pi}{E_n'' \Gamma_n^{s''}} \delta((p+q)_\parallel^2 - M_n^2). \quad (56)$$

С учетом этого квадрат S -матричного элемента, определяющий вероятность процесса и необходимый при расчетах вычисляемых величин, таких

как сечение рассеяния, может быть представлен в факторизованном виде:

$$\sum_{s,s'=\pm 1} \frac{|\mathcal{S}_{\gamma^{(\lambda)}e_\ell \rightarrow \gamma^{(\lambda')}e_{\ell'}}^{s's}|^2}{\tau} = \sum_{s,s',s''=\pm 1} \sum_{n=0}^{\infty} \int \frac{dp_y'' dp_z''}{(2\pi)^2 \Gamma_n^{s''}} \frac{|\mathcal{S}_{\gamma^{(\lambda)}e_\ell \rightarrow e_n}^{s''s}|^2}{\tau} \frac{|\mathcal{S}_{e_n \rightarrow \gamma^{(\lambda')}e_{\ell'}}^{s's''}|^2}{\tau} \quad (57)$$

где

$$\begin{aligned} \mathcal{S}_{\gamma^{(\lambda)}e_\ell \rightarrow e_n}^{s''s} &= \frac{i(2\pi)^3 \delta_{0,y,z}^{(3)}(p+q-p'')}{\sqrt{2q_0 V 2E_\ell L_y L_z 2E_n'' L_y L_z}} \mathcal{M}_{\gamma^{(\lambda)}e_\ell \rightarrow e_n}^{s''s}, \\ \mathcal{S}_{e_n \rightarrow \gamma^{(\lambda')}e_{\ell'}} &= \mathcal{S}_{\gamma^{(\lambda)}e_\ell \rightarrow e_n}(q \rightarrow q', E_\ell \rightarrow E_{\ell'}) \end{aligned} \quad (58)$$

– S -матричные элементы подпроцессов: поглощения фотона, $e\gamma \rightarrow e$, и рождения фотона, $e \rightarrow e\gamma$. Выражения в явном виде для амплитуд одновершинных процессов $\mathcal{M}_{\gamma^{(\lambda)}e_\ell \rightarrow e_n}^{s''s}$ и $\mathcal{M}_{e_n \rightarrow \gamma^{(\lambda')}e_{\ell'}}^{s's''}$ представлены в работе [98].

Для астрофизических приложений полученных результатов удобно вместо сечения использовать коэффициент поглощения фотона – вероятность перехода фотона в другое состояние за счет тех или иных процессов, который для комптоновского процесса был определен, например, в работе [100]:

$$\begin{aligned} W_{\gamma e \rightarrow \gamma e} &= \sum_{\ell, \ell'=0}^{\infty} \int \frac{dp_y dp_z L_y L_z}{(2\pi)^2} f_e(E_\ell) \frac{dp'_y dp'_z L_y L_z}{(2\pi)^2} \times \\ &\times [1 - f_e(E_{\ell'})] \frac{d^3 q' V}{(2\pi)^3} [1 + f_\gamma(\omega')] \sum_{s,s'=\pm 1} \frac{|\mathcal{S}_{\gamma^{(\lambda)}e_\ell \rightarrow \gamma^{(\lambda')}e_{\ell'}}^{s's}|^2}{\tau}. \end{aligned} \quad (59)$$

С помощью коэффициента поглощения удобно, например, вычислять длину свободного пробега $\ell_\lambda = W_{\gamma^{(\lambda)}e \rightarrow \gamma e}^{-1}$, а дифференциальный коэффициент поглощения входит в уравнение Больцмана.

Интегрируя выражение (59), суммируя по поляризационным состояниям конечного электрона и фотона и проводя несложное интегрирование, получим:

$$W_{\gamma^{(1)}e \rightarrow \gamma e} = \frac{\alpha\beta}{2\omega} \sum_{\ell=0}^{\infty} \sum_{n=n_0}^{\infty} \sum_{\epsilon=\pm 1} \frac{f_e(E_\ell^\epsilon)[1 - f_e(E_\ell^\epsilon + \omega)]}{\sqrt{(M_n^2 - M_\ell^2 - q_\parallel^2)^2 - 4q_\parallel^2 M_\ell^2}} \times \quad (60)$$

$$\times \left\{ [2\beta(n + \ell) - q_\parallel^2](\mathcal{I}_{n,\ell-1}^2 + \mathcal{I}_{n-1,\ell}^2) - 8\beta\sqrt{\ell n}\mathcal{I}_{n,\ell-1}\mathcal{I}_{n-1,\ell} \right\},$$

$$W_{\gamma^{(2)}e \rightarrow \gamma e} = \frac{\alpha\beta}{2\omega} \sum_{\ell=0}^{\infty} \sum_{n=n_0}^{\infty} \sum_{\epsilon=\pm 1} \frac{f_e(E_\ell^\epsilon)[1 - f_e(E_\ell^\epsilon + \omega)]}{\sqrt{(M_n^2 - M_\ell^2 - q_\parallel^2)^2 - 4q_\parallel^2 M_\ell^2}} \times \quad (61)$$

$$\times \left\{ \left[\frac{(2\beta(n - \ell))^2}{q_\parallel^2} - 2\beta(n + \ell) - 4m^2 \right] (\mathcal{I}_{n,\ell}^2 + \mathcal{I}_{n-1,\ell-1}^2) - \right.$$

$$\left. - 8\beta\sqrt{\ell n}\mathcal{I}_{n,\ell}\mathcal{I}_{n-1,\ell-1} \right\},$$

где

$$E_\ell^\epsilon = \frac{1}{2q_\parallel^2} \left[\omega (M_n^2 - M_\ell^2 - q_\parallel^2) + \epsilon k_z \sqrt{(M_n^2 - M_\ell^2 - q_\parallel^2)^2 - 4q_\parallel^2 M_\ell^2} \right],$$

для $n \geq \ell$ [69]

$$\mathcal{I}_{n,\ell}(x) = \sqrt{\frac{\ell!}{n!}} e^{-x/2} x^{(n-\ell)/2} L_\ell^{n-\ell}(x),$$

$$\mathcal{I}_{\ell,n}(x) = (-1)^{n-\ell} \mathcal{I}_{n,\ell}(x), \quad (62)$$

и $L_n^k(x)$ – обобщенные полиномы Лагерра [54]. Функции (62) соответствуют функциям $\Lambda_{\ell,n}(x)$ в работах [53, 101] Далее в работе будет использовано обозначение $\mathcal{I}_{n,\ell} \equiv \mathcal{I}_{n,\ell}\left(\frac{q_\perp^2}{2\beta}\right)$.

В (60) и (61) суммирование по n ограничено согласно закону сохранения энергии и импульса следующим образом:

$$n_0 = \ell + \left\lceil \frac{q_\parallel^2 + 2M_\ell\sqrt{q_\parallel^2}}{2\beta} \right\rceil, \quad (63)$$

где $[x]$ – целая часть числа x .

С дифференциальным сечением рассеяния коэффициент поглощения связан следующим образом [102]

$$d\sigma_{\gamma^{(\lambda)}e \rightarrow \gamma e} = \frac{dW_{\gamma^{(\lambda)}e \rightarrow \gamma e}}{j}, \quad (64)$$

где $j = |(pq)_\parallel|/(E\omega V)$ – плотность потока падающих частиц в продольном по отношению к магнитному полю подпространстве. В работах [47, 69, 103] исследовался процесс комптоновского рассеяния в замагниченной плазме при ненулевых температурах и магнитных полях, характерных для магнитосфер радиопульсаров и магнитаров $10^{12} - 10^{15}$ Гс. В данных работах рассчитано сечение рассеяния при условии, что начальный и конечный электроны находятся на основном уровне Ландау. При расчетах учитывался резонанс на виртуальном электроны с конечной шириной, полученной с использованием корректных решений уравнения Дирака (10).

В данных работах сечение интегрируется по импульсам начального электрона в системе покоя плазмы с нормированной функцией распределения $\bar{f}_{n,s}(E_n)$:

$$\sigma_\lambda^* = \int_{-\infty}^{\infty} \bar{f}_{n,s}(E_n) d\sigma_{\gamma^{(\lambda)}e \rightarrow \gamma e}, \quad (65)$$

где

$$d\sigma_{\gamma^{(\lambda)}e \rightarrow \gamma e} = \frac{dW_{\gamma^{(\lambda)}e \rightarrow \gamma e}}{j}, \quad (66)$$

$j = |(pq)_\parallel|/(E\omega V)$ – плотность потока падающих частиц в продольном по отношению к магнитному полю подпространстве. Исходя из нормировки функции распределения:

$$\sum_{n,s} \int_{-\infty}^{\infty} dp_z \bar{f}_{n,s}(E_n) = 1, \quad (67)$$

представим ее в виде:

$$\bar{f}_{n,s}(p_z) = \frac{\beta}{(2\pi)^2 n_e} \frac{1}{e^{E_n/T} + 1}, \quad (68)$$

где

$$n_e = \frac{\beta}{(2\pi)^2} \sum_{\ell=0}^{\infty} (2 - \delta_{\ell,0}) \int_{-\infty}^{\infty} dp_z f_e(E_\ell) \quad (69)$$

– концентрация электронов во внешнем магнитном поле.

С учетом (65) – (69) дифференциальное сечение рассеяния, просуммированное по поляризациям конечного фотона, может быть выражено через дифференциальный коэффициент поглощения:

$$d\sigma_{\lambda}^* = \frac{E\omega}{(pq)_{\parallel}} \frac{1}{n_e} dW_{\gamma^{(\lambda)}e \rightarrow \gamma e}. \quad (70)$$

Следует отметить, что дифференциальный коэффициент поглощения, будучи проинтегрирован по импульсам начального электрона, в нерелятивистском пределе переходит в известное классическое соотношение [45]:

$$W_{\gamma^{(\lambda)}e \rightarrow \gamma e} = \frac{1}{\ell_{\lambda}} = n_e \sigma_{\gamma^{(\lambda)}e \rightarrow \gamma e}. \quad (71)$$

Сравнительный анализ усредненного по поляризациям начального фотона сечения рассеяния, вычисленного как в приближении узкого резонансного пика, так и с учетом конечной ширины изменения состояния электрона [47, 104], представлен на рисунке 2. В относительно недавних работах [69, 104] вычислялись парциальные сечения рассеяния для начального фотона моды 1 и моды 2 с учетом конечной ширины процесса. В то время, как расчеты в дельта-функциональном приближении находятся в хорошем согласии с результатами [47, 104] в области резонансных пиков, сечение рассеяния, вычисленное в работе [69], существенно расходится с указанными работами, а также с более ранней статьей того же автора [105]. Таким образом, применение приближения узкого пика (56) правомочно в области полей $B \gtrsim 10^{12}$ Гс, характерной для магнитаров и радиопульсаров. Кроме того, полученные в этом приближении коэффициенты поглощения фотона (60) и (61) представляют собой конечные суммы вместо многомерных интегралов при учете конечной ширины процесса, что является гораздо более удобным в приложениях, например, к решению задачи переноса излучения.

Можно дополнительно учесть, что при температуре $T \simeq 50$ кэВ начинают возбуждаться высшие уровни Ландау начальных электронов, что приводит к существенному увеличению сечения рассеяния. Узкие пики, соответствующие

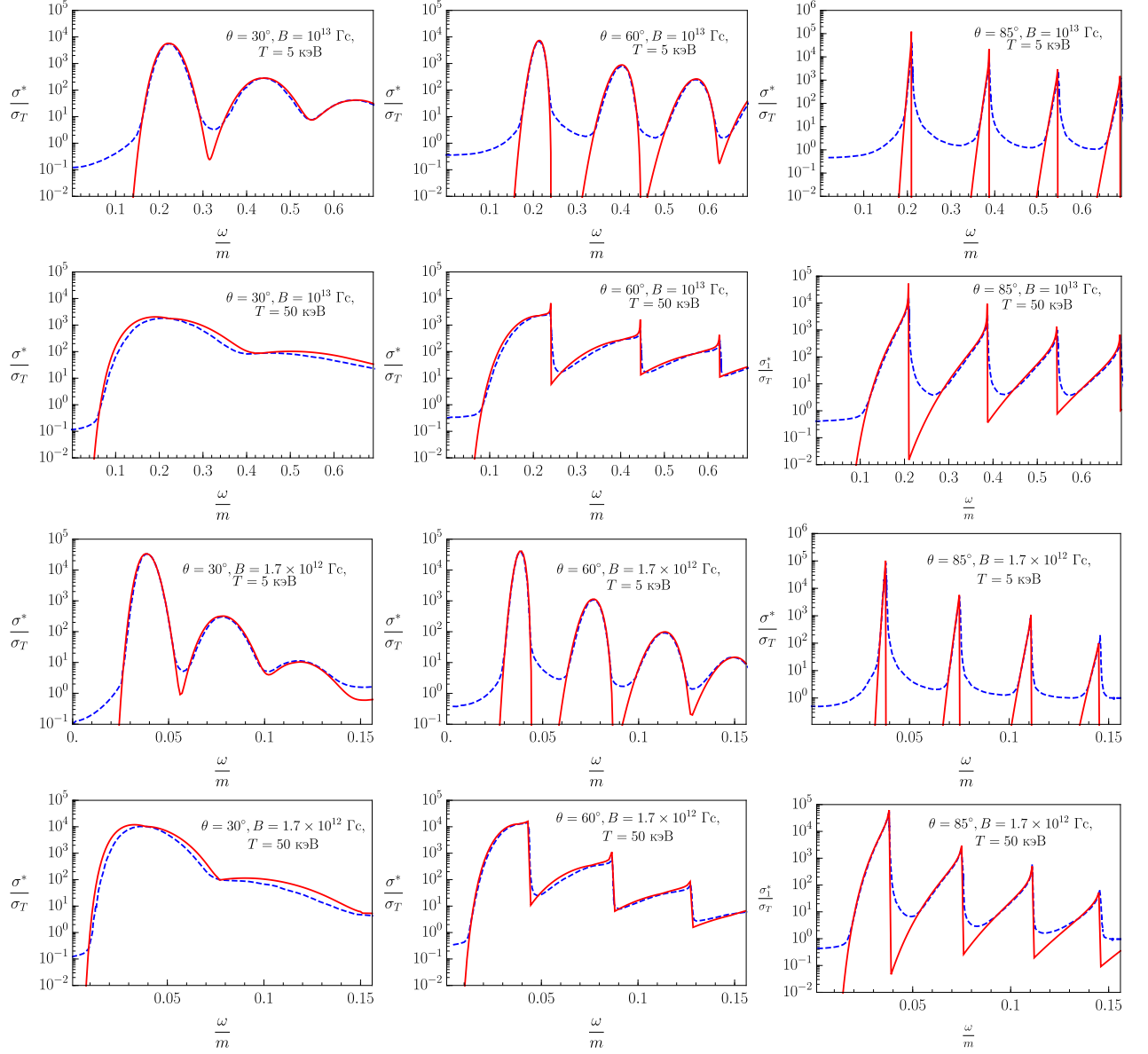


Рис. 2: Сечения (в единицах σ_T), усредненного по поляризациям начального фотона, $e\gamma^{(2)} \rightarrow e\gamma$, полученном в работе [47] (пунктирная линия) и δ -функциональном приближении (сплошная линия) для различных углов θ между импульсом фотона и направлением магнитного поля. Все начальные и конечные электроны находятся на основном уровне Ландау.

энергиям $\omega_{n\ell} = (M_n - M_\ell)/\sin \theta$, хорошо известны в литературе (см., например, [106–108]), но при этом вносят малый вклад в интегральные величины. Подробнее об устранении этих пиков, обусловленных свойствами фазового объема, см. раздел 5.

Рассмотрим теперь ситуацию сверхсильного магнитного поля, $B \sim 10^{15} - 10^{16}$ Гс и высоких температур $T = 1$ МэВ, которые характерны для гигантских вспышек SGR (источников мягких повторяющихся гамма-всплесков). Исследование комптоновского процесса в магнитных полях указанного масштаба было проведено, например, в работе [100]. Однако, полученные в этом исследовании результаты будут справедливыми только для области энергий фотонов вдали от резонансов. Поэтому представляет самостоятельный интерес вычислить коэффициент поглощения фотона в пределе сильного поля с учетом возможного резонанса на виртуальном электроне с конечной шириной резонансного пика и сравнить с нерезонансным пределом [100] и дельта-функциональным приближением [98]. Поскольку в пределе сильного магнитного поля начальный и конечный электроны будут преимущественно занимать основной уровень Ландау, а виртуальный электрон – первый уровень Ландау, то коэффициент поглощения фотона с учетом конечной ширины резонансного пика примет достаточно простой для вычисления вид. Поскольку в сильном магнитном поле энергии фотона, на которых наблюдается резонанс, выше, чем порог рождения e^+e^- пары $q_{\parallel}^2 = 4m^2$ для фотона моды 2, то целесообразно рассмотреть только каналы рассеяния $e\gamma^{(1)} \rightarrow e\gamma^{(1)}$ и $e\gamma^{(1)} \rightarrow e\gamma^{(2)}$. Следует отметить, что для фотона моды 1 порог рождения e^+e^- пары $q_{\parallel}^2 = (M_1 + m)^2$ заведомо выше рассматриваемой области резонанса $q_{\parallel}^2 = (M_1 - m)^2$.

Как показывает численный анализ, в случае сильно замагниченной, горячей, зарядово-симметричной плазмы полная ширина поглощения электрона для первого уровня Ландау Γ_1 мало отличается от соответствующего выражения в сильном магнитном поле и ультрарелятивистских электронов [32]:

$$E_1''\Gamma_1 = \alpha\beta(1 - e^{-1}) \simeq 0.623\alpha\beta, \quad (72)$$

где $E_n'' = E + \omega$ – энергия виртуального электрона.

Парциальные коэффициенты поглощения фотона для каналов $e\gamma^{(1)} \rightarrow e\gamma^{(1)}$ и $e\gamma^{(1)} \rightarrow e\gamma^{(2)}$ с учетом конечной ширины поглощения электрона в

случае, когда начальный фотон распространяется поперек магнитного поля, можно представить следующим образом **в общем случае**:

$$\begin{aligned}
W_{e\gamma^{(1)} \rightarrow e\gamma^{(1)}} &= \frac{\beta\alpha^2 m^2}{\pi} \int dQ_0 dk'_z \frac{k'_z{}^2 \omega}{(-Q_{\parallel}^2)^2 \varkappa} \exp \left[-\frac{q_{\perp}^2 + q_{\perp}'^2}{2\beta} \right] \times \\
&\times \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{\sigma=\pm 1} \frac{1}{[(n-1)!]^2} \left(\frac{\sqrt{q_{\perp}^2} \sqrt{q_{\perp}'^2}}{2\beta} \right)^{2(n-1)} \left\{ \frac{1}{((p_{\sigma} + q)_{\parallel}^2 - M_n^2)^2 + (E_n'' \Gamma_n)^2} + \right. \\
&+ \frac{1}{((p_{\sigma} - q')_{\parallel}^2 - M_n^2)^2 + (E_n'' \Gamma_n)^2} - \\
&- 2 \sum_{n'=1}^{\infty} \frac{(n-1)!}{(n'-1)!} \left(\frac{\sqrt{q_{\perp}^2} \sqrt{q_{\perp}'^2}}{2\beta} \right)^{n'+n} J_{n+n'} \left(\frac{\sqrt{q_{\perp}^2} \sqrt{q_{\perp}'^2}}{\beta} \right) \times \\
&\times \frac{[(p_{\sigma} + q)_{\parallel}^2 - M_n^2][(p_{\sigma} - q')_{\parallel}^2 - M_{n'}^2] + E_n'' \Gamma_n E_{n'}'' \Gamma_{n'}}{[((p_{\sigma} - q')_{\parallel}^2 - M_n^2)^2 + (E_n'' \Gamma_n)^2][((p_{\sigma} + q)_{\parallel}^2 - M_{n'}^2)^2 + (E_{n'}'' \Gamma_{n'})^2]} \Big\} \times \\
&\times f_e(E_{\sigma}) [1 - f_e(E_{\sigma} + Q_0)] [1 + f_{\gamma}(\omega')] ,
\end{aligned} \tag{73}$$

$$\begin{aligned}
W_{e\gamma^{(1)} \rightarrow e\gamma^{(2)}} &= \frac{\beta\alpha^2 m^2}{\pi} \int dQ_0 dk'_z \frac{q_{\perp}'^2 \omega}{(-Q_{\parallel}^2)^2 \varkappa} \exp \left[-\frac{q_{\perp}^2 + q_{\perp}'^2}{2\beta} \right] \times \\
&\times \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{\sigma=\pm 1} \frac{1}{[(n-1)!]^2} \left(\frac{\sqrt{q_{\perp}^2} \sqrt{q_{\perp}'^2}}{2\beta} \right)^{2(n-1)} \frac{Q_0}{\omega} \left\{ \frac{1}{((p_{\sigma} + q)_{\parallel}^2 - M_n^2)^2 + (E_n'' \Gamma_n)^2} + \right. \\
&+ \frac{Q_0 \omega}{q_{\parallel}'^2} \frac{1}{((p_{\sigma} - q')_{\parallel}^2 - M_n^2)^2 + (E_n'' \Gamma_n)^2} - \\
&- 2 \sum_{n'=1}^{\infty} \frac{(n-1)!}{(n'-1)!} \left(\frac{\sqrt{q_{\perp}^2} \sqrt{q_{\perp}'^2}}{2\beta} \right)^{n'+n} J_{n+n'} \left(\frac{\sqrt{q_{\perp}^2} \sqrt{q_{\perp}'^2}}{\beta} \right) \times \\
&\times \frac{[(p_{\sigma} + q)_{\parallel}^2 - M_n^2][(p_{\sigma} - q')_{\parallel}^2 - M_{n'}^2] + E_n'' \Gamma_n E_{n'}'' \Gamma_{n'}}{[((p_{\sigma} - q')_{\parallel}^2 - M_n^2)^2 + (E_n'' \Gamma_n)^2][((p_{\sigma} + q)_{\parallel}^2 - M_{n'}^2)^2 + (E_{n'}'' \Gamma_{n'})^2]} \times \\
&\times \frac{Q_0(\omega - Q_0)}{q_{\perp}'^2} \Big\} f_e(E_{\sigma}) [1 - f_e(E_{\sigma} + Q_0)] [1 + f_{\gamma}(\omega')] ,
\end{aligned} \tag{74}$$

$$\begin{aligned}
W_{e\gamma^{(1)} \rightarrow e\gamma^{(1)}} &= \frac{\beta\alpha^2 m^2}{\pi} \int dQ_0 dk'_z \frac{k'_z{}^2 \omega}{(-Q_\parallel^2)^2 \varkappa} \exp \left[-\frac{q_\perp^2 + q_\perp'^2}{2\beta} \right] \times \\
&\times \sum_{\sigma=\pm 1} \left\{ \frac{1}{((p_\sigma + q)_\parallel^2 - M_1^2)^2 + (E_1'' \Gamma_1)^2} + \frac{1}{((p_\sigma - q')_\parallel^2 - M_1^2)^2 + (E_1'' \Gamma_1)^2} - \right. \\
&- 2 \frac{q_\perp^2 q_\perp'^2}{4\beta^2} J_2 \left(\frac{\sqrt{q_\perp^2} \sqrt{q_\perp'^2}}{\beta} \right) \times \\
&\times \frac{[(p_\sigma + q)_\parallel^2 - M_1^2][(p_\sigma - q')_\parallel^2 - M_1^2] + (E_1'' \Gamma_1)^2}{[((p_\sigma - q')_\parallel^2 - M_1^2)^2 + (E_1'' \Gamma_1)^2][((p_\sigma + q)_\parallel^2 - M_1^2)^2 + (E_1'' \Gamma_1)^2]} \Big\} \times \\
&\times f_e(E_\sigma) [1 - f_e(E_\sigma + Q_0)] [1 + f_\gamma(\omega')] ,
\end{aligned} \tag{75}$$

$$\begin{aligned}
W_{e\gamma^{(1)} \rightarrow e\gamma^{(2)}} &= \frac{\beta\alpha^2 m^2}{\pi} \int dQ_0 dk'_z \frac{q_\perp'^2 \omega}{(-Q_\parallel^2)^2 \varkappa} \exp \left[-\frac{q_\perp^2 + q_\perp'^2}{2\beta} \right] \times \\
&\times \sum_{\sigma=\pm 1} \frac{Q_0}{\omega} \left\{ \frac{1}{((p_\sigma + q)_\parallel^2 - M_1^2)^2 + (E_1'' \Gamma_1)^2} + \frac{Q_0 \omega}{q_\parallel'^2} \frac{1}{((p_\sigma - q')_\parallel^2 - M_1^2)^2 + (E_1'' \Gamma_1)^2} - \right. \\
&- 2 \frac{q_\perp^2 q_\perp'^2}{4\beta^2} J_2 \left(\frac{\sqrt{q_\perp^2} \sqrt{q_\perp'^2}}{\beta} \right) \times \\
&\times \frac{[(p_\sigma + q)_\parallel^2 - M_1^2][(p_\sigma - q')_\parallel^2 - M_1^2] + (E_1'' \Gamma_1)^2}{[((p_\sigma - q')_\parallel^2 - M_1^2)^2 + (E_1'' \Gamma_1)^2][((p_\sigma + q)_\parallel^2 - M_1^2)^2 + (E_1'' \Gamma_1)^2]} \times \\
&\times \frac{Q_0(\omega - Q_0)}{q_\perp'^2} \Big\} f_e(E_\sigma) [1 - f_e(E_\sigma + Q_0)] [1 + f_\gamma(\omega')] ,
\end{aligned} \tag{76}$$

где $J_n(x)$ – функция Бесселя целого индекса, $\varkappa = \sqrt{1 - 4m^2/Q_\parallel^2}$, $E_\sigma = \sqrt{p_{z\sigma}^2 + m^2}$, $p_{z\sigma}$ – корни уравнения $Q_0 + E_\sigma - E'_\sigma = 0$:

$$p_{z\sigma} = -\frac{Q_z}{2} + \sigma Q_0 \varkappa , \tag{77}$$

$p_{\sigma\parallel}^\alpha = (E_\sigma, p_{z\sigma})$. Поперечная составляющая импульса конечного фотона определяется из уравнения дисперсии:

$$q_\parallel'^2 = q_\perp'^2 + \mathcal{P}^{(\lambda)}(q'). \tag{78}$$

Имеет смысл провести сравнительный анализ результатов работы [100] с резонансным случаем (73) и (74) для зарядово-симметричной плазмы и поперечного направления распространения импульса фотона по отношению к внешнему магнитному полю для различных значений величины магнитного поля, температуры и энергии начального фотона.

На рис. 3–4 показан коэффициент поглощения $W_{1 \rightarrow 1}$ рассеяния при температуре $T = 1$ МэВ и величине магнитного поля $B = 200B_e$ и $B = 20B_e$ соответственно. Как видно из рис. 3–4, коэффициент поглощения для канала $\gamma^{(1)}e \rightarrow \gamma^{(1)}e$ согласуется с соответствующими результатами для предела сильного поля и отсутствия резонанса, полученными в работе [100] вплоть до энергий начального фотона $\omega \simeq 3$ МэВ для поля $B = 200B_e$ и $\omega \simeq 0.3$ МэВ для поля $B = 20B_e$. Отсюда вытекает ограничение на применимость результатов работы [100] по энергиям начального фотона. Аналогичная ситуация наблюдается и для канала $\gamma^{(1)}e \rightarrow \gamma^{(2)}e$ (см. рис. 5–6). На рис. 4 и 6 наиболее ярко видно завышение коэффициента поглощения даже при относительно малых энергиях начального фотона. Этот факт связан с тем, что в пределе сильного магнитного поля разложение амплитуды комптоновского процесса по обратным степеням поля уже не будет правомочным.

Следует отметить что при относительно малых температурах $T \lesssim 50$ кэВ с тем же магнитным полем δ -аппроксимация работает хуже из-за уменьшения области резонанса. В целом δ -функциональное приближение достаточно хорошо будет описывать лишь первый резонансный пик.

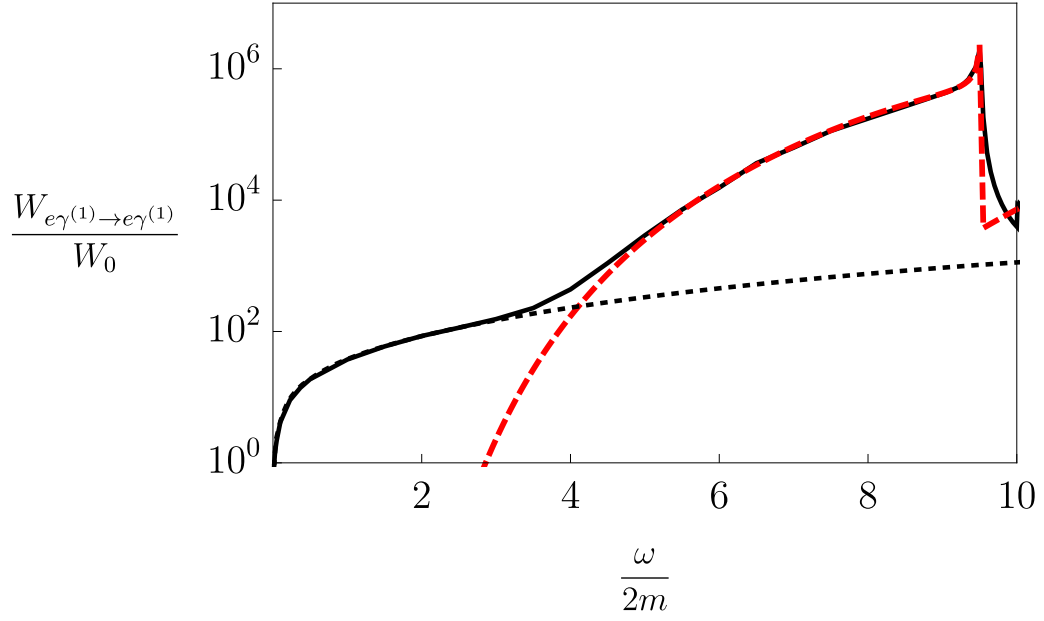


Рис. 3: Зависимость коэффициента поглощения от энергии начального фотона для канала $e\gamma^{(1)} \rightarrow e\gamma^{(1)}$ при поле $B = 200B_e$ и температуре $T=1$ МэВ: сплошная линия – коэффициент поглощения с учетом резонанса; штриховая линия – без учета резонанса; пунктирная линия – дельта-функциональное приближение. Здесь $W_0 = (\alpha/\pi)^3 m \simeq 3.25 \cdot 10^2 \text{ см}^{-1}$.

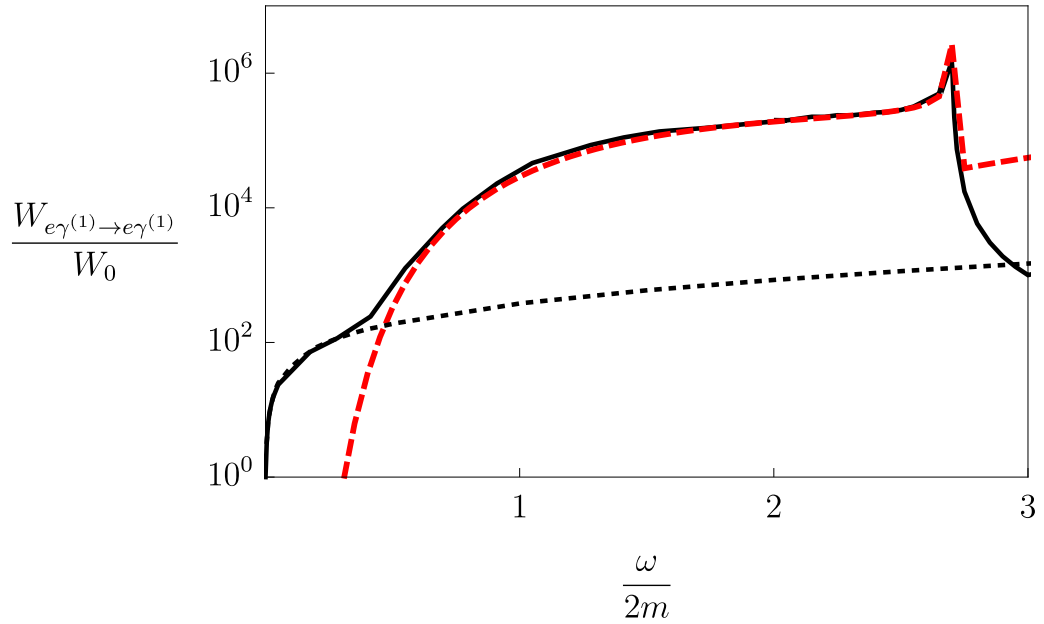


Рис. 4: Зависимость коэффициента поглощения от энергии начального фотона для канала $e\gamma^{(1)} \rightarrow e\gamma^{(1)}$ при поле $B = 20B_e$ и температуре $T=1$ МэВ. Обозначение для линий то же, что и для рис. 3.

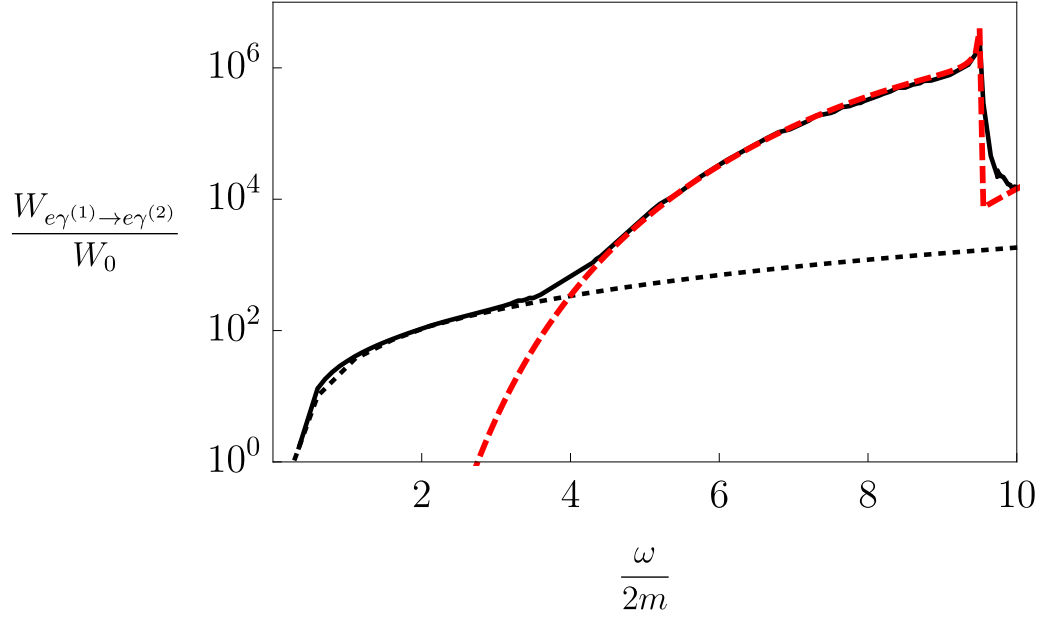


Рис. 5: Зависимость коэффициента поглощения от энергии начального фотона для канала $e\gamma^{(1)} \rightarrow e\gamma^{(2)}$ при поле $B = 200B_e$ и температуре $T=1$ МэВ. Обозначение для линий то же, что и для рис. 3.

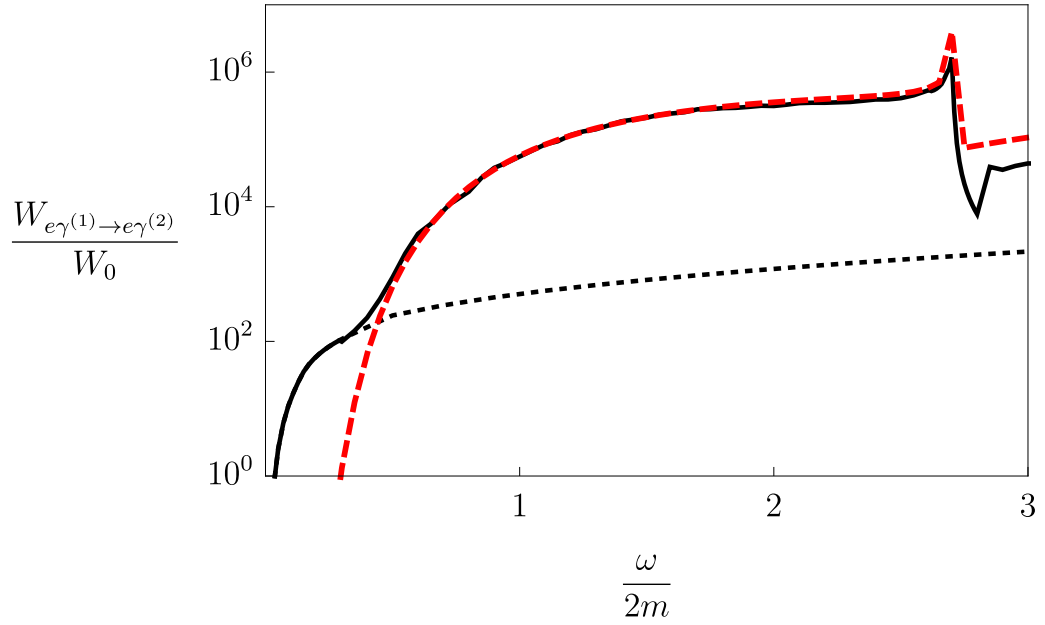


Рис. 6: Зависимость коэффициента поглощения от энергии начального фотона для канала $e\gamma^{(1)} \rightarrow e\gamma^{(2)}$ при поле $B = 20B_e$ и температуре $T=1$ МэВ. Обозначение для линий то же, что и для рис. 3.

4.2 Фотонейтринный процесс

Перейдем теперь к рассмотрению другого класса процессов, в которых может реализовываться резонанс на виртуальном электро-не. Одним из таких процессов является фоторождение пары нейтрино-антинейтрино на электро-не, $e\gamma \rightarrow e\nu\bar{\nu}$, называемое фотонейтринным процессом. Наряду с другими реакциями, в которых нейтринная пара находится в конечном состоянии, интерес к нему вызван тем, что данный процесс может играть определяющую роль в остывании нейтронных звезд. Это связано с тем, что в нейтронных звездах замагниченная плазма прозрачна для нейтрино при значениях параметров (плотности и температуры), которые дают все существующие модели внутреннего строения.

Фотонейтринный процесс был впервые рассмотрен в работах [109, 110], в которых было вычислено сечение рассеяния в нерелятивистском приближении. Нейтринная светимость, т.е. энергия, уносимая нейтринной парой из единичного объема за единицу времени, за счет него была вычислена в работах [111–117]. В частности, в [115, 116] были получены таблицы с большим количеством данных для фотонейтринной излучательной способности и аналитические аппроксимации для них. При этом вклад реакции в процесс нейтринного остывания нейтронной звезды полагался пренебрежимо малым, как отмечают авторы обзора [118], поскольку в холодной и плотной плазме распад плазмона, $\gamma \rightarrow \nu\bar{\nu}$, является намного более эффективным каналом по уносу энергии за счет нейтринных пар.

На следующем этапе фотонейтринный процесс изучался с учетом влияния внешней активной среды на дисперсионные и поляризационные свойства фотона [119–121]. Хотя в этих работах были получены уточнения к нейтринной светимости процесса, общий вывод о том, что фотонейтринный процесс является поправкой более высокого порядка к распаду плазмона, остался неизменным.

Наконец, в [122, 123] был рассмотрен резонанс в фотонейтринном процессе.

Как было показано в этих работах, даже в магнитарных полях условие (2), при котором магнитное поле является доминирующим параметром среды, перестает выполняться при высоких значениях плотности плазмы $\rho \gtrsim 10^8$ г/см³. Такая плотность может достигаться в границе между внешней и внутренней корой магнитара. В результате у электронов (позитронов) плазмы начинают возбуждаться высшие уровни Ландау, что приводит к возможности резонанса в этой реакции. Это может увеличивать нейтринную светимость (количество энергии, уносимое нейтринными парами из единицы объема вещества за единицу времени) за счет фотонейтринного процесса в 2-4 раза, чего, однако, недостаточно для того, чтобы он мог конкурировать по эффективности с распадом плазмона.

4.3 Резонансный механизм рождения e^+e^- пар в полярной шапке магнитара

Другим процессом, в котором могут иметь место резонансы на виртуальном фотоне и электроне является реакция $\gamma e \rightarrow ee^+e^-$, что особенно важно для актуальной в настоящее время проблемы генерации электрон-позитронной плазмы в магнитосфере нейтронных звезд и описания особенностей радиоизлучения некоторых магнитаров [1–3, 124, 125].

В модели магнитосферы магнитара рождение e^+e^- -пар происходит в два этапа [128]. Ускоренная вдоль магнитного поля заряженная частица (электрон или позитрон) резонансно конвертирует мягкий рентгеновский фотон в жесткий, который впоследствии, как предполагается, после набора угла между импульсом фотона и направлением магнитного поля (так называемый питч-угол), должен распадаться на электрон-позитронную пару. Однако в действительности этого не происходит, так как в сильном магнитном поле существенными становятся дисперсионные свойства фотона (см. раздел 3 и рис. 7). Такой фотон, рожденный в реакции $e\gamma \rightarrow e\gamma$ с энергией и импульсом, удовлетворяющими соотношению $\omega^2 - k_z^2 < 4m^2$ (магнитное поле направлено по оси z), в процессе распространения в магнитном поле будет все время

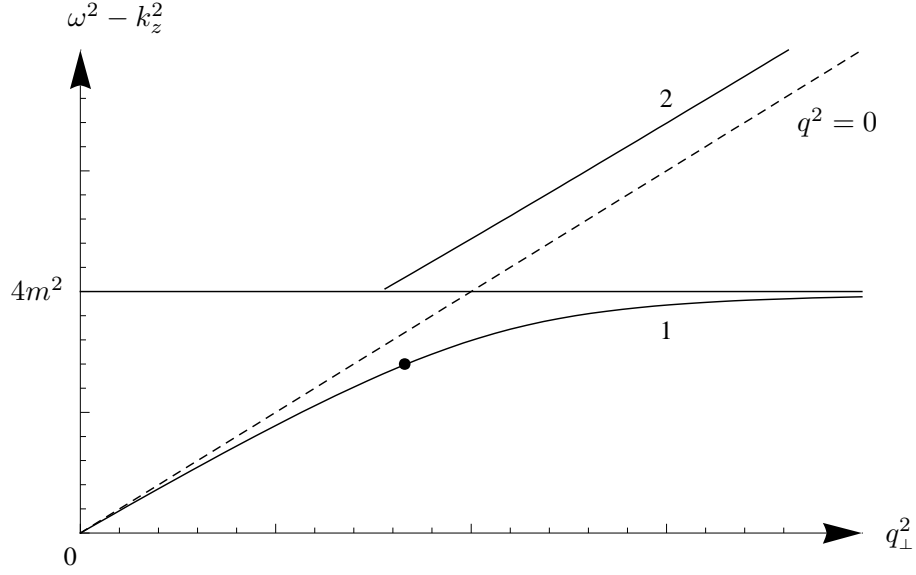


Рис. 7: Закон дисперсии фотона в сильном магнитном поле. Точкой на дисперсионной кривой показано положение фотона, рождающегося в реакции $e\gamma \rightarrow e\gamma$. Цифры 1 и 2 обозначают дисперсионные кривые в областях ниже и выше порога рождения e^+e^- -пар.

оставаться на дисперсионной ветви 1 и не сможет преодолеть зазор между ветвями 1 и 2 с рождением e^+e^- -пары, если величина магнитного поля $B \gtrsim 0.1B_e$ [129–131], что заведомо выполняется в магнитарах. При достаточно больших q_\perp^2 такой фотон может лишь перейти на асимптотически больших расстояниях в позитроний – связанное состояние e^+e^- -пары.

В связи с этим представляет интерес рассмотреть альтернативный механизм рождения e^+e^- -пар в магнитосфере магнитара. В качестве такого механизма может выступать комптоноподобный процесс $\gamma e \rightarrow ee^+e^-$, где под e в дальнейшем понимается электрон или позитрон. Основное преимущество такой реакции по сравнению с принятой моделью состоит в том, что рождение пары происходит практически мгновенно в точке взаимодействия начальных фотона и электрона (в действительности этот масштаб имеет порядок комптоновской длины волны электрона). При таком подходе эффект захвата фотона полем становится несущественным. Вместе с тем, с помощью реакции $\gamma e \rightarrow ee^+e^-$ возможно за короткое время заполнить ограниченную область достаточно плотной e^+e^- -плазмой, как, например, в процессе гигантской вспышки источника мягких повторяющихся гамма всплесков (SGR).

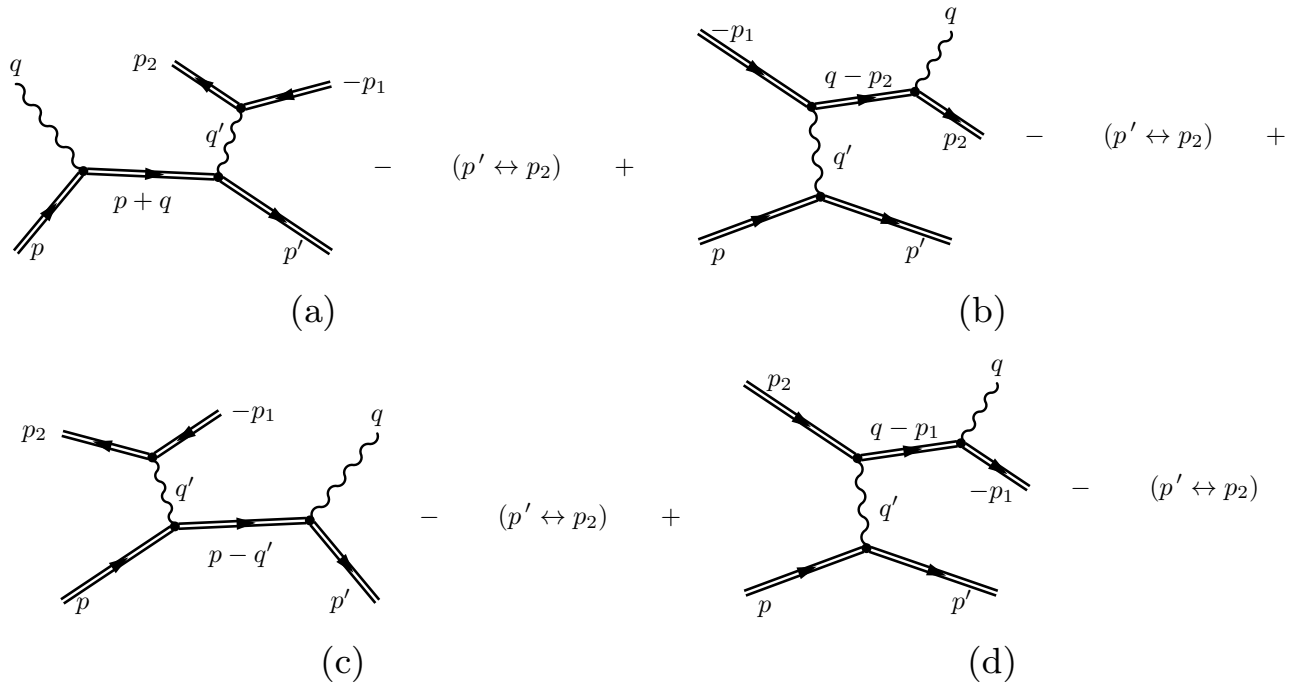


Рис. 8: Диаграммы Фейнмана для процесса $\gamma + e^- \rightarrow e^- + e^+e^-$. Двойные линии означают, что влияние внешнего поля на начальное и конечное состояния учтено точно.

Процесс рождения электрон-позитронных пар в реакции $\gamma e \rightarrow ee^+e^-$ описывается восемью диаграммами Фейнмана (см. рис. 8). Нетрудно видеть, что резонанс на виртуальном электроне имеет место только в s -канальных диаграммах (рис. 8 *a* и соответствующая диаграмма с перестановкой $p' \leftrightarrow p_2$). Тем не менее, даже с учетом резонанса поставленная задача будет иметь достаточно громоздкий вид, поскольку заряженные фермионы могут занимать произвольные уровни Ландау. Однако в приложении к магнитарам данную проблему можно значительно упростить. Действительно, рассмотрим ситуацию, когда электрон, ускоренный в электрическом зазоре полярной шапки магнитара, сталкивается с гамма-квантом из равновесной термальной бани, образованной излучением рентгеновских фотонов с поверхности нейтронной звезды. В такой постановке задачи мы будем иметь следующую иерархию параметров: $T^2 \ll m^2 \ll \beta \ll E^2$. Кроме того, электрон, до ускорения находившийся на основном уровне Ландау ($\ell = 0$), двигаясь вдоль силовой линии магнитного поля, остается все время на основном уровне. (Мы рассматриваем

небольшую окрестность полярной шапки, где электрическое, \mathcal{E} , и магнитное \mathbf{B} поля коллинеарны и при этом $|\mathcal{E}| \ll |\mathbf{B}|$ [128].) Не нарушая общности будем считать, что рассеянный электрон и электрон и позитрон пары также будут находиться на основном уровне Ландау с $\ell' = n_1 = n_2 = 0$. Действительно, как было показано в главе 4.1, полученный результат для коэффициента поглощения электрона не будет зависеть от состояния конечных частиц, а будет определяться только начальными состояниями электрона и фотона.

В окрестности полярной шапки магнитара начальный и рассеянный электрон (позитрон), а также электрон и позитрон пары будут преимущественно занимать основной уровень Ландау. С учетом этого замечания S – матричный элемент процесса $\gamma e \rightarrow ee^+e^-$ может быть записан в виде:

$$\begin{aligned} \mathcal{S}_{\gamma e \rightarrow ee^+e^-} &= (ie)^3 \int d^4X d^4Y d^4Z A_\alpha(X) \times \\ &\times \{ \bar{\Psi}_{p',0}^-(Y) \gamma_\beta S(X, Y) \gamma^\alpha \Psi_{p,0}^-(X) \bar{\Psi}_{p_2,0}^-(Z) \gamma_\mu \Psi_{p_1,0}^+(Z) - \\ &- \bar{\Psi}_{p_2,0}^-(Y) \gamma_\beta S(X, Y) \gamma^\alpha \Psi_{p,0}^-(X) \bar{\Psi}_{p',0}^-(Z) \gamma_\mu \Psi_{p_1,0}^+(Z) \} G_{\beta\mu}(Z - Y), \end{aligned} \quad (79)$$

входящие в который волновые функции и пропагаторы электронов и фотонов были введены в разделах 2 и 3 соответственно.

Определяя стандартным путем коэффициент поглощения электрона в равновесном фотонном газе, имеющем температуру T , получим выразить через S

$$W = \int \frac{|\mathcal{S}_{\gamma e \rightarrow ee^+e^-}|^2}{\tau} \frac{V d^3q}{(2\pi)^3} f_\gamma(\omega) \frac{L_x L_y dp'_y dp'_z}{(2\pi)^2} \frac{L_x L_y dp_{1y} dp_{1z}}{(2\pi)^2} \frac{L_x L_y dp_{2y} dp_{2z}}{(2\pi)^2}. \quad (80)$$

Как уже отмечалось в разделе 4.1, основной вклад в амплитуду будут давать области резонанса, так что мы можем использовать дельта-функциональное приближение. Лидирующий вклад от уровней Ландау виртуального электрона будет определяться только уровнем с $n = 1$, вклады высших уровней оказываются подавлены температурой. После интегрирования выражения (80), с учетом дельта-функционального приближения для пропагатора фотона и

электрона, получим:

$$W \simeq \frac{\alpha\beta T}{2E^2} \ln \left(1 - e^{-\frac{\beta}{2ET}} \right)^{-1}. \quad (81)$$

Вероятность рождения e^+e^- -пар в единицу времени как функция энергии начального электрона представлена на рис. 9.

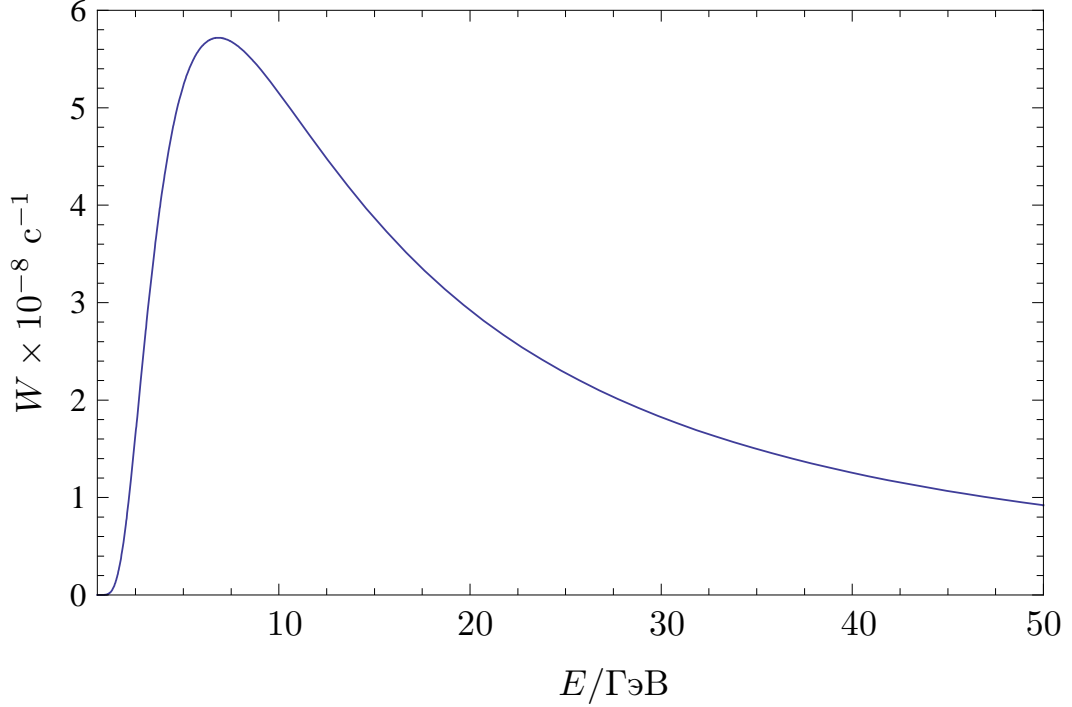


Рис. 9: Зависимость вероятности рождения электрон-позитронных пар в единицу времени от энергии начального электрона при $B = 100B_e$ и $T = 1$ кэВ.

Оценивая минимальную длину свободного пробега электрона с энергией $E \sim 10^4 m$ при величинах магнитного поля и температуры таких же, как на рис. 9, получим $\ell \simeq 57$ см, что оказывается много меньше величины зазора (~ 100) м. Вместе с тем изменение числа электронов в потоке за счет рождения пар может быть выражено через оптическую толщину τ следующим образом:

$$N = N_0 \exp [-\tau] \simeq N_0 \exp \left[- \int_0^h dx W \right], \quad (82)$$

где h – ширина электрического зазора, N_0 – начальное число электронов в потоке.

Оценивая отношение N/N_0 при $h \sim 10^4$ см, $E \sim 10^7 m$, получим $N/N_0 \simeq 0.99$. Таким образом, рассматриваемый процесс дает возможность увеличивать количество e^+e^- -плазмы в области полярной шапки. Однако детальный количественный анализ развития каскада e^+e^- -пар требует решения кинетического уравнения, что выходит за рамки настоящего обзора.

Наконец, необходимо сделать еще одно замечание. Резонансы на виртуальных электроне и фотоне соответствуют тому факту, что указанные частицы становятся реальными. Таким образом, рассматриваемый процесс схематично можно представить в виде совокупности трех подпроцессов:

- поглощение фотона электроном с рождением электрона на первом уровне Ландау, $e_0 + \gamma \rightarrow e_1$;
- переход электрона с первого уровня на нулевой с испусканием жесткого γ -кванта, $e_1 \rightarrow e_0 + \gamma$;
- рождение e^+e^- -пары жестким фотоном, $\gamma \rightarrow e^+e^-$.

Парциальные вклады (branching fractions) последних двух реакций приближенно равны 1 и 1/2 соответственно (множитель 1/2 возникает от того, что в процессе $\gamma \rightarrow e^+e^-$ участвует фотон только одной поляризации из двух возможных). Поэтому коэффициент поглощения электрона в процессе $\gamma e \rightarrow ee^+e^-$ может быть легко получен из вероятности перехода $\gamma + e_0 \rightarrow e_1$, как $W = W_{\gamma+e_0 \rightarrow e_1}/2$. При этом вероятность $W_{\gamma+e_0 \rightarrow e_1}$ может быть получена из результатов работы [132] и согласуется с (81).

4.4 Резонансное рождение аксионов в магнитосфере магнитара

И, наконец, обзор резонансных процессов был бы неполным без упоминания об аксионах (и ALP – аксионоподобных частицах), гипотетических частицах, предложенных Печчеи и Куинн [135] для решения проблемы сохранения CP инвариантности сильных взаимодействий, являющихся, кроме того, наиболее вероятными кандидатами на роль холодной темной материи

Вселенной. Их подробное обсуждение выходит далеко за рамки выбранной здесь темы (однако интересующийся читатель легко найдет качественные обзоры, например, [141, 142]), тем не менее мы коснемся некоторых работ, в которых исследовалось влияние резонанса на процессы с участием аксионов.

Поскольку масштаб нарушения симметрии Печчеи-Куинн, f_a , оказывается велик, аксионы очень слабо взаимодействуют с веществом (константа взаимодействия $f_a^{-1} \lesssim 10^{-8} \text{ ГэВ}^{-1}$ [151]). В этой связи возникают определенные трудности на пути экспериментального обнаружения аксиона. Как уже неоднократно отмечалось ранее, влияние внешней активной среды на реакции с участием элементарных частиц и, в частности, аксионов, в зависимости от значений параметров среды (температуры T , химического потенциала μ или индукции магнитного поля B), может как катализировать эти реакции, так и оказывать дополнительное (к f_a^{-1}) их подавление.

Поляризованные фотоны могут вступать в реакции с псевдоскалярными частицами, такими как аксионы [143]. В результате возможен такой процесс, как конверсия аксион-фотон [144]. Это взаимодействие в замагниченной плазме может быть резонансно усилено двумя механизмами: присутствием замагниченной плазмы и четырехфотонным взаимодействием Эйлера-Гейзенберга, который становится существенным в пределе малых энергий [145]. Первый резонанс наблюдается в случае, когда плазменная частота приблизительно равна массе аксиона, $\omega_{pl} \simeq m_a$ [146]. Он может приводить к радиоизлучению, когда поток аксионов падает на нейтронную звезду [147]. Если в рамках первого механизма резонанс может наблюдаться как для релятивистских, так и для нерелятивистских аксионов, то резонанс, связанный с четырехфотонным взаимодействием, реализуется только для релятивистских аксионов.

С другой стороны, резонанс на виртуальном фотоне в реакциях общего вида $i \rightarrow f + a$, где в начальном (i) и конечном (f) состояниях могут присутствовать заряженные компоненты среды, исследовался в достаточно ограниченном списке работ [117, 148, 149]. Среди основных механизмов рождения

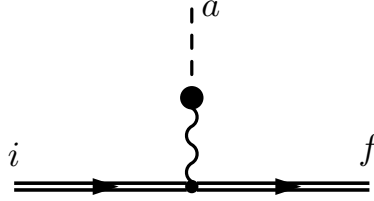


Рис. 10: Диаграммы Фейнмана для процесса общего вида $i \rightarrow f + a$. Двойные линии означают, что влияние внешнего поля на начальное и конечное состояния учтено точно.

аксиона можно выделить комптоноподобный процесс $\gamma e \rightarrow ea$ [117], в котором аксион связывается с электронами и участвует в рождении фотона или в магнитотормозном излучении. Другим основным механизмом является также эффект Примакова [150] – аксион вступает во взаимодействие с виртуальным фотоном и рождает реальный. Оба процесса вместе исследовались, например, в работе [151] с учетом экранирования зарядов в плазме.

В работе [140] было показано, что жесткое рентгеновское излучение в диапазоне 2 – 8 кэВ от близлежащих нейтронных звезд, которое не удалось связать с другими процессами, может быть объяснено следующим механизмом: аксионы рождаются термически внутри ядра нейтронной звезды, вследствие того, что они слабо взаимодействуют с веществом, они покидают звезду и далее превращаются в рентгеновское излучение в магнитном поле звезды.

В таких условиях представляет интерес рассмотреть процесс рождения аксионов в реакции общего вида $i \rightarrow f + a$ (диаграмма на рис. 10), где в начальном (i) и конечном (f) состояниях могут присутствовать заряженные компоненты среды. На рис. 10 зачерненный кружок обозначает эффективную вершину γa взаимодействия (диаграммы на рис. 11). Нетрудно видеть, что из-за наличия виртуального фотона рассматриваемый процесс может иметь резонансный характер. Похожая ситуация для области, близкой к резонансу, была рассмотрена в работе [148] на примере комптоновского рассеяния реликтовых фотонов на электронах и позитронах магнитосферы магнитара. Однако, как будет показано ниже, результаты, полученные в [148], являются неточными **что именно не учтено?**.

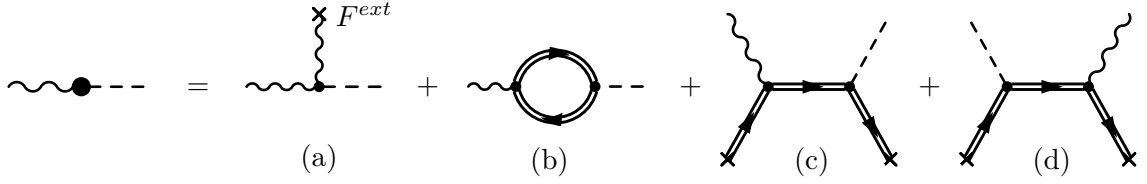


Рис. 11: Диаграммы Фейнмана для эффективной вершины γa взаимодействия.

В существующих аксионных моделях и в присутствии внешнего магнитного поля процесс $i \rightarrow f + a$ можно описать эффективным лагранжианом вида [151]:

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{a\gamma}(x) = & g_{a\gamma} \tilde{F}^{\mu\nu} [\partial_\nu A_\mu(x)] a(x) + \\ & + \frac{g_{af}}{2m_f} [\bar{\psi}_f(x) \gamma^\mu \gamma_5 \psi_f(x)] \partial_\mu a(x) - e_f [\bar{\psi}_f(x) \gamma^\mu \psi_f(x)] A_\mu(x). \end{aligned} \quad (83)$$

Напомним, что A_μ – четырехмерный потенциал квантованного электромагнитного поля, $\tilde{F}^{\mu\nu}$ – дуальный тензор внешнего поля, $\psi_f(x)$ и $a(x)$ – квантованные фермионное и аксионное поля, $g_{a\gamma} = \alpha\zeta/2\pi f_a$, ζ – модельно зависящий параметр порядка единицы, $g_{af} = C_f m_f / f_a$ – безразмерная Юкавская константа связи аксионов с фермионами с модельно зависящим фактором C_f , e_f – электрический заряд фермиона (для электрона $e_f = -e$).

Исходя из лагранжиана (83) амплитуда процесса $i \rightarrow f + a$ может быть представлена в следующем виде

$$\mathcal{M}_{i \rightarrow f}^a = - \frac{\mathcal{M}_{if}^\gamma \mathcal{M}_{\gamma \rightarrow a}}{q'^2 - \kappa^{(\varepsilon)}(q')}, \quad (84)$$

где \mathcal{M}_{if}^γ – амплитуда процесса $i \rightarrow f + \gamma$ с излучением фотона в конечном состоянии,

$$\mathcal{M}_{\gamma \rightarrow a} = i \bar{g}_{a\gamma} (\varepsilon \tilde{F} q') \quad (85)$$

– амплитуда перехода фотон \rightarrow аксион, $q'^\mu = (\omega', \mathbf{k}')$ – четырехмерный импульс аксиона, $\kappa^{(\varepsilon)}(q')$ – собственное значение поляризационного оператора фотона, которому соответствует вектор поляризации ε_α . Эффективную константу аксион-фотонного взаимодействия, $\bar{g}_{a\gamma}$, можно представить в виде трех слагаемых: $\bar{g}_{a\gamma} = g_{a\gamma} + \Delta g_{a\gamma}^B + \Delta g_{a\gamma}^{pl}$. Первое слагаемое соответствует

взаимодействию аксиона с электромагнитным полем, обусловленному аномалией Адлера (диаграмма (а) на рис. 11), второе обусловлено взаимодействием аксиона с фотоном через электронную петлю (диаграмма (b) на рис. 11), а третье – рассеянием вперед на электронах и позитронах плазмы (диаграммы (с) и (d) на рис.2). Подробный расчет $\Delta g_{a\gamma}^B$ и $\Delta g_{a\gamma}^{pl}$ был сделан ранее в работах [152] и [153] соответственно. Здесь мы отметим только, что для корректного вычисления величины $\Delta g_{a\gamma}^B$ в ней необходимо произвести вычитание, соответствующее аномалии Адлера [152]. Этот факт, в частности, не был учтен в работе [148], что является одной из причин ошибочности полученных там результатов.

Далее представим $\varkappa^{(\varepsilon)}(q')$ в виде $\varkappa^{(\varepsilon)} = \Re - i\Im$, где $\Re = Re(\varkappa)$ реальная, а $\Im = Im(\varkappa)$ мнимая части поляризационного оператора. Последняя обусловлена процессами поглощения и излучения фотонов в плазме и, согласно [99], следующим образом выражается через полную ширину рождения фотона, Γ_{cr} :

$$\Im = \omega' \left(e^{\omega'/T} - 1 \right) \Gamma_{cr}, \quad \Gamma_{cr} = \sum_{i,f} \int |\mathcal{M}_{if}^\gamma|^2 d\Phi_{if}, \quad (86)$$

где $d\Phi_{if}$ – элемент фазового объема состояний i и f для процесса $i \rightarrow f + \gamma$ с учетом соответствующих функций распределения, и сумма берется по всем возможным начальным и конечным состояниям.

Представляет самостоятельный интерес оценка количества аксионов, рождаемых в магнитосфере магнитара в единице объема за единицу времени с помощью рассмотренного выше резонансного механизма, поскольку аксион является одним из основных кандидатов в составляющие холодной темной материи:

$$\frac{dN}{dt dV} = \frac{g_{a\gamma}^2(\beta)^2}{32\pi^2\alpha} \int_{-1}^1 \frac{dx}{e^{\omega/T} - 1} \frac{k Z_\varepsilon(\varepsilon \tilde{\varphi} q)^2}{\omega \left| 1 - \frac{d\omega^2}{dk^2} \right|} \Big|_{k=k^*}, \quad (87)$$

$$\begin{aligned} \frac{dN}{dt dV} &\simeq \frac{g_{a\gamma}^2(\beta)^2}{16\pi^2\alpha} \omega_p^2 \frac{1+\xi}{\xi^2} \times \\ &\times \left(\exp \left[\frac{\omega_p}{T} \sqrt{1 + \frac{1}{\xi}} \right] - 1 \right)^{-1}, \quad \omega_p, T \gg m_a, \end{aligned} \quad (88)$$

$$\frac{dN}{dt dV} \simeq \frac{g_{a\gamma}^2(\beta)^2}{16\pi^2\alpha} \frac{T m_a^2}{\omega_p} e^{-\omega_p/T}, \quad \omega_p \gg T \sim m_a. \quad (89)$$

В частности, для числа аксионов, рождаемых реликтовым излучением ($T \sim m_a \sim 10^{-3}$ эВ), при минимальной концентрации плазмы ($\sim 10^{15} \text{ см}^{-3}$), при которой все еще реализуется резонансный механизм ($\omega_p \gtrsim m_a$) и величине магнитного поля $B = 100 B_e$, получаем из (87) следующую максимальную оценку $dN/(dV dt) \sim 10^{10}$ штук в см^{-3} за секунду. Таким образом, в объеме магнитосферы магнитара ($\sim 10^{19} \text{ см}^3$), заполненной сильным магнитным полем, рождается за секунду 10^{29} аксионов. Оценивая в самом оптимистичном варианте число магнитаров в Галактике $\sim 10^6$, получаем, что за $\sim 10^9$ лет они произведут $\sim 10^{51}$ аксионов, и, следовательно, концентрация аксионов в Галактике должна быть $n_a \sim 10^{-21} \text{ см}^{-3}$. Это число можно сравнить, например, с концентрацией барионов $n_b \sim 10^{-7} \text{ см}^{-3} \gg n_a$. Следовательно, данный механизм не дает возможность генерации аксионной составляющей «холодной скрытой массы».

5 Затухание фотона в замагниченной плазме

Как было показано на нескольких примерах в разделе 4, в двух- и трехвершинных процессах сингулярность в амплитудах возникает в пропагаторах виртуальных частиц, которая устраняется введением конечной ширины резонансного пика, определяемой мнимой частью знаменателя пропагатора виртуальной частицы. С другой стороны, для одновршинных реакций, таких как однофотонное рождение электрон-позитронной пары $\gamma \rightarrow e^+ e^-$ или

поглощение фотона $e^\pm\gamma \rightarrow e^\pm$, которые кинематически запрещены или подавлены в вакууме, но становятся возможными в присутствии активной среды, при определенных энергиях участвующих частиц тоже возникают расходимости в вероятностях процессов, связанные со свойствами фазового объема (см., например, [60, 107, 155–157]). В отличие от двухвершинных процессов, ввести ширину резонансного пика на основе мнимой части знаменателя пропагатора невозможно в виду его отсутствия для одновершинного процесса. При расчетах физических величин все резонансные бесконечные пики усреднялись [108], что позволило получить конечные результаты, однако такой подход не устраняет сингулярности, поэтому требуется переформулировать модель в других терминах.

Чтобы устранить эти сингулярности, в работе [60] было предложено рассматривать фотон как затухающую электромагнитную волну, то есть исследовать временную зависимость волновой функции фотона. При ее учете возникает мнимая часть поляризационного оператора фотона, которая определяет коэффициент затухания электромагнитной волны, что приводит к конечной ширине резонансного пика.

Изначально классическая задача о диссипации электромагнитной волны в бесстолкновительной плазме рассматривалась в работе [158], что в последствии получило название затухание Ландау. Если в классической задаче затухание связано либо с передачей энергии электромагнитного поля частицам, движущимся в фазе с волной, либо с ларморовым вращением частиц, то в квантовой электродинамике затухание электромагнитной волны определяется процессами поглощения и рождения фотонов. Особенностью рассмотренных выше классических и квантовых процессов является их обратимость.

Для поиска временной зависимости волновой функции фотона в работе [60] предлагалось решать уравнение дисперсии на втором римановом листе. Однако, как было отмечено в работе [159], такой метод имеет ряд недостатков. Во-первых, решения с комплексными энергиями фотона находятся на нефизических римановых листах, количество которых, вообще говоря, бесконечно.

Это приводит к возникновению бесконечного числа решений уравнения дисперсии как с положительными, так и с отрицательными значениями мнимой части энергии. Во-вторых, в данном методе в околопороговой области предполагался экспоненциальный характер затухания электромагнитной волны, что согласно выводам авторов [159], не так. Поэтому в работе [159] для исследования временного затухания электромагнитной волны во внешнем магнитном поле был рассмотрен метод, который заключается в нахождении запаздывающего решения уравнения электромагнитного поля в присутствии внешнего источника с учетом поляризации вакуума во внешнем магнитном поле. С другой стороны, в работе [159] неэкспоненциальное затухание фотона рассматривалось в приближении сильного магнитного поля, когда все электроны и позитроны занимают основной уровень Ландау, однако в случае замагниченной плазмы таких исследований не проводилось, поскольку для астрофизических приложений наличие замагниченной среды является наиболее характерным фактором.

В данной главе рассматривается затухание фотона в сильно замагниченной плазме, $\beta \gg T^2$, с нулевым химическим потенциалом, $\mu = 0$, посредством изменения его состояния за счет процессов $\gamma e^\pm \rightarrow e^\pm$, $\gamma \rightarrow e^+ e^-$. Будет использоваться метод, применяемый в теории поля при конечных температурах и в физике плазмы [160], развитый на случай сильного магнитного поля в [159] и адаптированный к ситуации сильно замагниченной плазмы.

5.1 Распространение фотона в замагниченной плазме

Для описания эволюции электромагнитной волны $\mathcal{A}_\alpha(x)$ во времени воспользуемся методикой, которая была предложена еще в классической задаче [158] и развита в работе [159] для квантовой электродинамики с учетом только магнитного поля без плазмы. Данная методика заключается в определении реакции системы ($\mathcal{A}_\alpha(x)$ и замагниченной плазмы) на внешний источник [161], создающий начальное состояние, который адиабатически включается при $t = -\infty$ и в момент времени $t = 0$ выключается. При $t > 0$ элек-

ромагнитная волна в плазме будет эволюционировать самостоятельно. Для простоты будем рассматривать эволюцию монохроматической волны, поэтому функцию источника, удовлетворяющую вышесказанным условиям, удобно выбрать следующим образом:

$$\mathcal{J}_\alpha(x) = j_\alpha e^{i\mathbf{k}\mathbf{x}} e^{\varepsilon t} \theta(-t), \quad \varepsilon \rightarrow 0^+, \quad (90)$$

где $j_\alpha = (0, \mathbf{j})$, $\mathbf{j} \cdot \mathbf{k} = 0$ – закон сохранения тока. Вообще говоря, в замагниченной плазме из-за наличия анизотропии решение задачи о распространении фотона под произвольным углом к магнитному полю представляет значительные трудности. Поэтому в качестве упрощения рассмотрим частный случай, когда фотоны распространяются поперек магнитного поля так, что $k_z = 0$. Зависимость $\mathcal{A}_\alpha(x)$ от времени определяется уравнением:

$$(g_{\alpha\beta} \partial_\mu^2 - \partial_\alpha \partial_\beta) \mathcal{A}_\beta(x) + \int d^4x' \mathcal{P}_{\alpha\beta}(x - x') \mathcal{A}_\beta(x') = \mathcal{J}_\alpha(x), \quad (91)$$

где $\mathcal{P}_{\alpha\beta}(x - x')$ – поляризационный оператор фотона в магнитном поле и плазме (см. главу 3).

Запаздывающее решение уравнения (91) можно представить в следующем виде:

$$\mathcal{A}_\alpha(x) = \int d^4x' G_{\alpha\beta}^R(x - x') \mathcal{J}_\beta(x'), \quad (92)$$

где $G_{\alpha\beta}^R(x - x')$ – запаздывающая функция Грина (см., например [162]).

Следуя работе [159], аналогично процессу затухания в магнитном поле, воспользуемся следующим соотношением между запаздывающей $G_{\alpha\beta}^R(x - x')$ и причинной $G_{\alpha\beta}^C(x - x')$ функциями Грина:

$$G_{\alpha\beta}^R(x - x') = 2\text{Re} [G_{\alpha\beta}^C(x - x')] \theta(t - t'). \quad (93)$$

Разложение функции Грина по собственным векторам $r_\alpha^{(\lambda)}$ поляризационного оператора в замагниченной плазме выглядит следующим образом:

$$G_{\alpha\beta}^C(x) = \int \frac{d^4q}{(2\pi)^4} G_{\alpha\beta}^C(q) e^{-iqx}, \quad (94)$$

$$G_{\alpha\beta}^C(q) = \sum_{\lambda=1}^3 \frac{r_{\alpha}^{(\lambda)} r_{\beta}^{(\lambda)}}{(r^{(\lambda)})^2} \cdot \frac{1}{q^2 - \mathcal{P}^{(\lambda)}(q)}. \quad (95)$$

В силу линейного характера уравнения (91), решение для двух возможных поляризаций (см. главу 3) можно представить в виде:

$$\mathcal{A}_{\alpha}(x) = \mathcal{A}_{\alpha}^{(1)}(x) + \mathcal{A}_{\alpha}^{(2)}(x), \quad (96)$$

где

$$\mathcal{A}_{\alpha}^{(\lambda)}(x) = V_{\alpha}^{(\lambda)}(0, \mathbf{x}) \operatorname{Re} F^{(\lambda)}(t), \quad (97)$$

$$V_{\alpha}^{(\lambda)}(0, \mathbf{x}) = 2 e^{i \mathbf{k} \mathbf{x}} \varepsilon_{\alpha}^{(\lambda)} (\varepsilon^{(\lambda)} j). \quad (98)$$

Как следует из (97), характер распространения фотона в сильно замагниченной плазме будет полностью определяться функцией $F^{(\lambda)}(t)$, которая имеет следующий вид Фурье-интеграла:

$$F^{(\lambda)}(t) = \int_C \frac{dq_0}{2\pi i} \frac{e^{-iq_0 t}}{(q_0 - i\varepsilon)(q_0^2 - \mathbf{k}^2 - \mathcal{P}^{(\lambda)}(q))}. \quad (99)$$

Контур интегрирования C определяется согласно аналитическим свойствам подынтегрального выражения. В частности, в точке $q_0 = \omega$ подынтегральное выражение (99) имеет полюс, который соответствует уравнению дисперсии:

$$\omega^2 - \mathbf{k}^2 - \mathcal{P}^{(\lambda)}(q) = 0. \quad (100)$$

С другой стороны, как было показано в работе [159], собственные значения поляризационного оператора как в магнитном поле, так и в замагниченной плазме помимо полюсов $q_{\parallel}^2 = (M_n \pm M_{\ell})^2$, отмеченных в разделе 4.1, также имеют разрезы, которые связаны с распадом фотона на e^+e^- -пару и переходом электрона на другие уровни Ландау, т. е. соответствуют областям

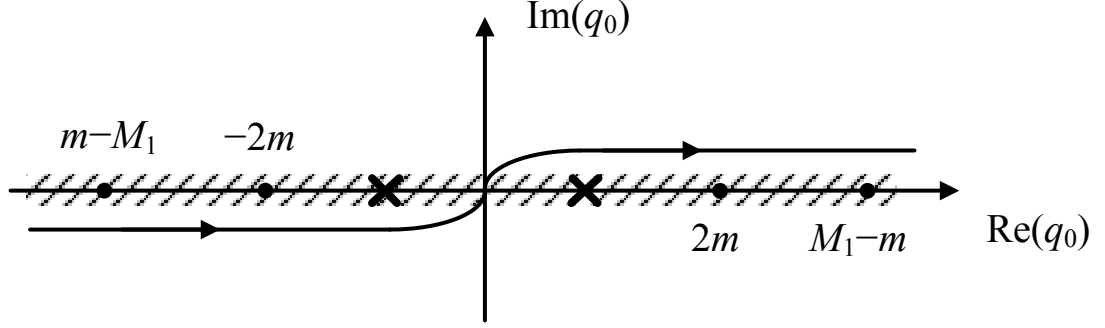


Рис. 12: Контур интегрирования по q_0 в (99) для мод $\lambda = 1, 2$. Штрихами показана область неустойчивости фотона. Крестиком обозначен полюс, соответствующий $q_0 = \omega$ – вещественному собственному значению поляризационного оператора, точками обозначены полюса для моды 2.

неустойчивости фотона, поэтому с учетом этих особенностей контур интегрирования может быть определен, как показано на рис. 12.

Следует отметить, что в сильно замагниченной плазме в кинематической области $q_0 < 2m$ мнимая часть поляризационного оператора для обеих мод пренебрежимо мала по сравнению с реальной частью (влияние резонансов отсутствует), поэтому для удобства контур интегрирования как для фотона моды 1, так и для фотона моды 2 можно преобразовать согласно рис. 13. Таким образом, интеграл (99) можно представить в виде двух слагаемых

$$F^{(\lambda)}(t) = F_{pole}^{(\lambda)}(t) + F_{cut}^{(\lambda)}(t), \quad (101)$$

первое из которых определяется вычетом в точке $q_0 = \omega$, являющейся решением уравнения дисперсии $q^2 - \mathcal{P}^{(\lambda)}(q) = 0$ в кинематической области, где собственное значение поляризационного оператора фотона $\mathcal{P}^{(\lambda)}(q)$ вещественно.

Второе слагаемое определяет зависимость потенциалов $\mathcal{A}_\alpha^{(\lambda)}(x)$ от времени в области $q_0 > 2m$ и имеет вид фурье-интеграла:

$$F_{cut}^{(\lambda)}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{dq_0}{2\pi} F_{cut}^{(\lambda)}(q_0) e^{-iq_0 t}, \quad (102)$$

$$F_{cut}^{(\lambda)}(q_0) \simeq \frac{2\theta(q_0 - 2m) \operatorname{Im}\mathcal{P}^{(\lambda)}(q_0 + i\varepsilon)}{q_0 ([q_0^2 - \mathbf{k}^2 - \operatorname{Re}\mathcal{P}^{(\lambda)}(q_0)]^2 + [\operatorname{Im}\mathcal{P}^{(\lambda)}(q_0 + i\varepsilon)]^2)}. \quad (103)$$

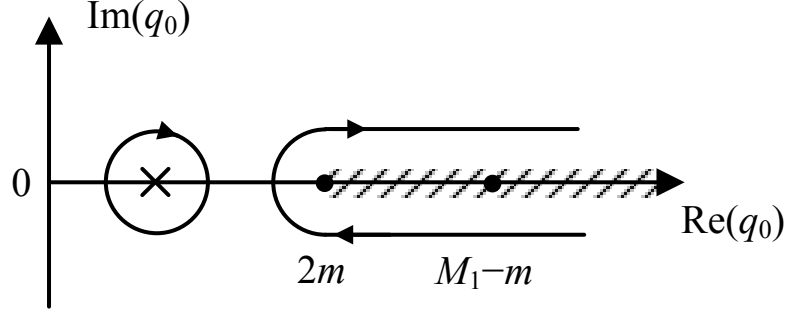


Рис. 13: Контур интегрирования по q_0 в (102) для мод $\lambda = 1, 2$. Штриховой линией показана область, где мнимая часть поляризационного оператора двух возможных мод $\lambda = 1, 2$ существенна. Остальные обозначения аналогичны рис. 12.

Мнимая часть поляризационного оператора может быть получена из коэффициента поглощения фотона, который имеет следующий вид:

$$W_{abs}^{(\lambda)} = W_{\gamma^{(\lambda)} \rightarrow e^+ e^-} + W_{\gamma^{(\lambda)} e^\pm \rightarrow e^\pm}, \quad (104)$$

где $W_{\gamma^{(\lambda)} \rightarrow e^+ e^-}$ – коэффициент поглощения фотона в процессе однофотонного рождения электрон-позитронной пары, $W_{\gamma^{(\lambda)} e^\pm \rightarrow e^\pm}$ – коэффициент поглощения фотона в процессе поглощения фотона электроном.

С учетом процессов излучения фотонов мнимая часть поляризационного оператора может быть представлена в следующей форме (см., например, [60, 98, 99]):

$$\text{Im} \mathcal{P}^{(\lambda)} = -2q_0 [1 - \exp(-q_0/T)] W_{abs}^{(\lambda)}. \quad (105)$$

Реальная часть поляризационного оператора может быть восстановлена по его мнимой части с помощью дисперсионного соотношения с одним вычитанием:

$$\text{Re} \mathcal{P}^{(\lambda)}(t) = \int_0^\infty \frac{\text{Im}(\mathcal{P}^{(\lambda)}(t')) dt'}{t' - t - i0} - \text{Re} \mathcal{P}^{(\lambda)}(0), \quad t = q_0^2. \quad (106)$$

Следует отметить, что в поставленной задаче рассматриваются процессы только до второго циклотронного резонанса, $q_0 = M_1 - m$, поэтому те же процессы с другими уровнями Ландау вклада не дают. Выражения (102)-(104) с учетом (106) решают задачу о нахождении временной зависимости волновой функции фотона в присутствии сильно замагниченной плазмы.

В работе [60] предполагался экспоненциальный характер затухания с декрементом затухания, равным мнимой части энергии фотона, полученным из решения уравнения дисперсии на втором римановом листе. Рассмотрение аналитических свойств Фурье-образа $F_{cut}^{(\lambda)}(q_0)$ показывает, что характер временного затухания волновой функции в общем случае является неэкспоненциальным. Тем не менее на протяжении некоторого характерного отрезка времени ($\sim [W_{abs}^{(\lambda)}]^{-1}$) зависимость волновой функции от времени можно приближенно описать как экспоненциально затухающие гармонические колебания:

$$\mathcal{A}_{\mu}^{(\lambda)}(t) \sim e^{-\gamma_{\text{eff}}^{(\lambda)} t/2} \cos(\omega^{(\lambda)} t + \phi_0). \quad (107)$$

Здесь $\omega^{(\lambda)}$ и $\gamma_{\text{eff}}^{(\lambda)}$ – эффективная частота и коэффициент поглощения фотона моды λ соответственно, которые должны быть найдены с использованием (102)–(104) для каждого значения импульса \mathbf{k} , что определяет эффективный закон дисперсии фотона в области его неустойчивости.

5.2 Численный анализ

Для астрофизических приложений полезно вычислить величину γ_{eff} , которая определяет интенсивность поглощения γ -квантов в замагниченной плазме за счет процессов $\gamma \rightarrow e^+e^-$ и $\gamma e^{\pm} \rightarrow e^{\pm}$. На рисунках 14 и 15 представлен коэффициент поглощения фотона в зависимости от эффективной частоты, определенный исходя из результатов [60], [107] и [71]. Анализ показывает, что учет неэкспоненциального характера затухания приводит к конечному выражению для коэффициента поглощения фотона в окрестности резонансов $q_0 = (\sqrt{m^2 + 2\beta} - m)$ как для фотона моды 2, так и для фотона моды 1. Исходя из рис. 15 можно сделать вывод, что фотон моды 1 является квазистабильным в областях $q_0 < 7$ МэВ и $q_0 > (\sqrt{m^2 + 2\beta} - m) \simeq 9.5$ МэВ. С другой стороны, фотон неустойчив в области, близкой в окрестности резонанса $q_0 = (\sqrt{m^2 + 2\beta} - m)$. Фотон моды 2 можно считать квазиустойчивым в области $q_0 < 4m$ и $q_0 > (\sqrt{m^2 + 2\beta} - m)$. Коэффициент затухания фотона,

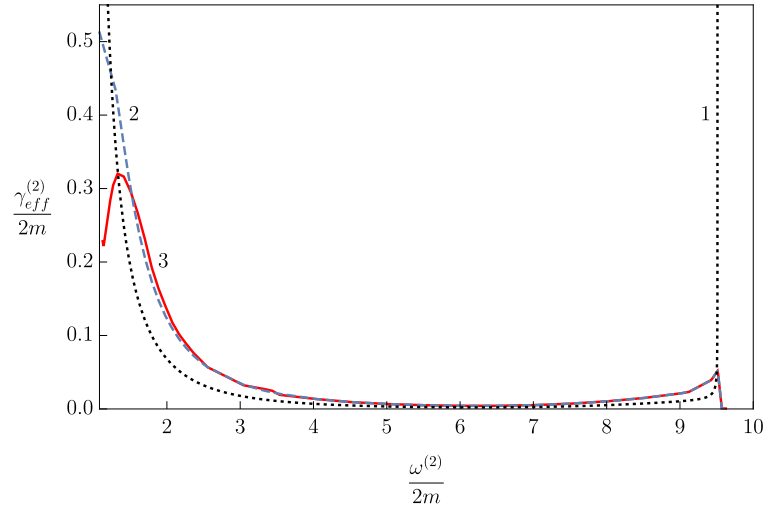


Рис. 14: Зависимость ширины распада фотона моды 2 от частоты в припороговых областях при $B = 200B_e$, $T = 1$ МэВ и $\mu = 0$. Линия 1 - коэффициент поглощения фотона $W_{abs}^{(1)}$, вычисленный в древесном приближении и содержащий корневые особенности; линия 2 - ширина распада, полученная из комплексного решения дисперсионного уравнения на втором римановом листе [60]; линия 3 соответствует ширине затухания $\gamma^{(1)}$, вычисленной на основе приближения (107).

полученный из результатов работы [60], является завышенным в околопороговой области по сравнению с результатами, полученными с помощью аппроксимации (107). Однако существует область энергий фотона ($2.5 \lesssim q_0 \lesssim 8.5$ МэВ для фотона моды 2 и $q_0 \lesssim 8.7$ МэВ для фотона моды 1), где коэффициенты поглощения, полученные из результатов работы [60] и с помощью аппроксимации (107) совпадают.

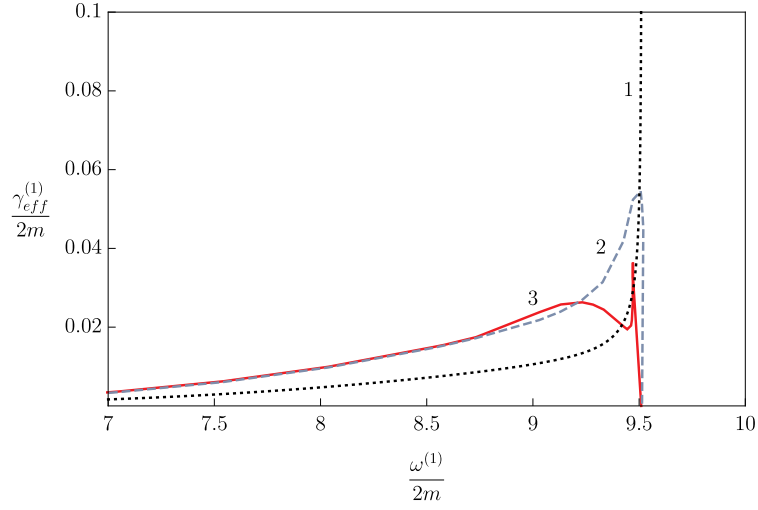


Рис. 15: Зависимость ширины распада фотона моды 1 от частоты в припороговых областях при $B = 200B_e$, $T = 1$ МэВ и $\mu = 0$. Линия 1 - коэффициент поглощения фотона $W_{abs}^{(1)}$, вычисленный в древесном приближении и содержащий корневые особенности; линия 2 - ширина распада, полученная из комплексного решения дисперсионного уравнения на втором римановом листе [60]; линия 3 соответствует ширине затухания $\gamma^{(1)}$, вычисленной на основе приближения (107).

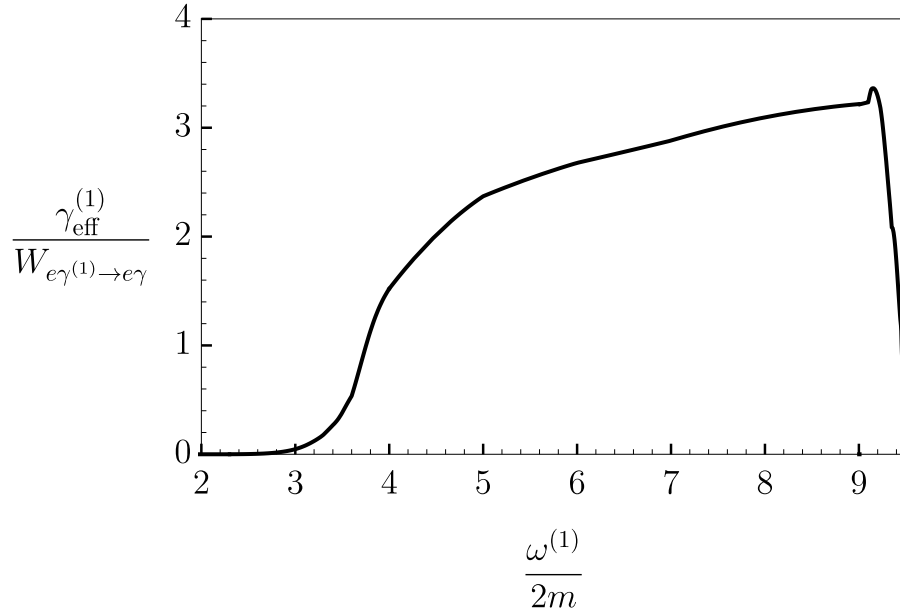


Рис. 16: Отношение коэффициента затухания фотона $\gamma_{eff}^{(1)}$ к коэффициенту поглощения фотона в процессе $e\gamma^{(1)} \rightarrow e\gamma$ при $B = 200B_e$ и $T = 1$ МэВ

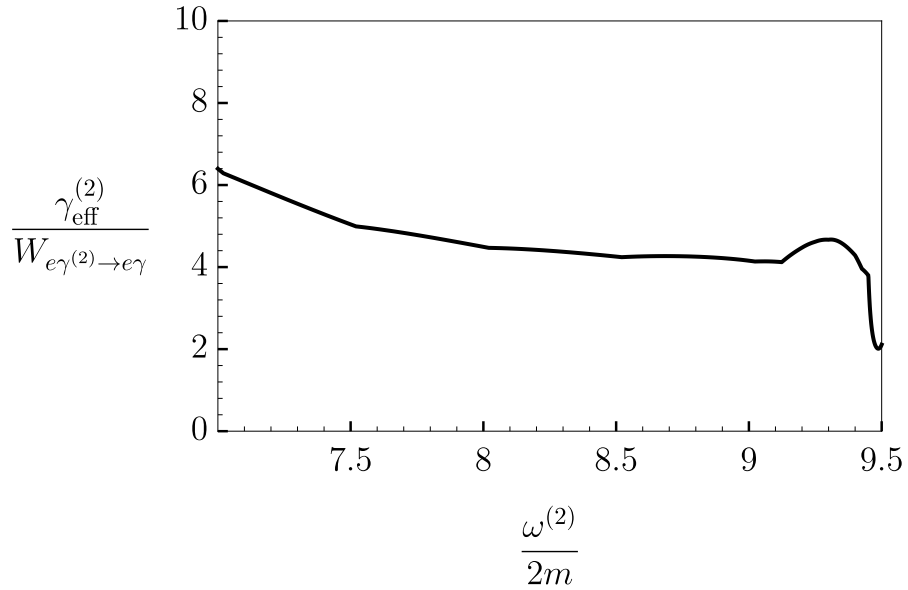


Рис. 17: Отношение коэффициента затухания фотона $\gamma_{\text{eff}}^{(2)}$ к коэффициенту поглощения фотона в процессе $e\gamma^{(2)} \rightarrow e\gamma$ при $B = 200B_e$ и $T = 1$ МэВ

На основе полученных результатов представляет интерес рассмотреть задачу о возможности формирования комптоновского процесса при условии затухания фотона. Для этого удобно вычислить отношение коэффициента затухания фотона к коэффициенту поглощения фотона $e\gamma^{(1)} \rightarrow e\gamma$ (см. рис. 16), полученному в главе 4 и определяющему время формирования процесса. Как видно из рисунка 16, комптоновский процесс, несмотря на малый фактор α , успевает формироваться при энергиях фотона $\omega \lesssim 3$ МэВ. Для фотона моды 2 комптоновский процесс формируется только в области энергий фотона $\omega \lesssim 1$ МэВ. В области энергий $\omega > 3$ МэВ для моды 1 и $\omega > 1$ МэВ для моды 2 фотоны будут эффективно затухать и комптоновский процесс, по-видимому, не успевает сформироваться. Для моды 2 (см. рис. 17) даже с учетом области квазистабильности (вдали от порогов), комптоновский процесс будет формироваться только при энергиях фотона $\omega < 1$ МэВ.

Таким образом, коэффициенты поглощения фотона в комптоновском процессе для двух возможных каналов рассеяния $e\gamma^{(1)} \rightarrow e\gamma^{(1)}$ и $e\gamma^{(1)} \rightarrow e\gamma^{(2)}$, несмотря на резонансный характер, целесообразно рассматривать лишь вдали от циклотронных резонансов, поэтому для анализа комптоновского про-

цесса при высоких температурах $T \simeq 1$ МэВ и магнитных полях $B = 200B_e$ достаточно использовать разложение по обратным степеням напряженности магнитного поля [100]. Каналы рассеяния $e\gamma^{(2)} \rightarrow e\gamma^{(1)}$ и $e\gamma^{(2)} \rightarrow e\gamma^{(2)}$ в области резонанса рассматривать нецелесообразно, так как комптоновский процесс не успевает сформироваться для энергий фотона $\omega \gtrsim 2m$.

6 Заключение

Список литературы

- [1] Thompson C., Duncan R. C. The soft gamma repeaters as very strongly magnetized neutron stars - I. Radiative mechanism for outbursts // Mon. Not. Roy. Astron. Soc. 1995. Vol. 275. P. 255–300.
- [2] Thompson C., Duncan R. C. The soft gamma repeaters as very strongly magnetized neutron stars. II. Quiescent neutrino, X-Ray, and Alfven wave emission // Astrophys. J. 1996. Vol. 473. P. 322–342.
- [3] Thompson C., Lyutikov M., Kulkarni S. R. Electrodynamics of magnetars: implications for the persistent x-ray emission and spindown of the soft gamma repeaters and anomalous x-ray pulsars // Astrophys. J. 2002. Vol. 574, no. 1. P. 332–355.
- [4] Group M. P. McGill Online Magnetar Catalog. 2020. <https://www.physics.mcgill.ca/~pulsar/magnetar/main.html> [Дата доступа:19.06.2025].
- [5] Gunn J. E., Ostriker J. P. Magnetic Dipole Radiation from Pulsars // Nature. 1969. Vol. 221, no. 5179. P. 454–456.
- [6] Pacini F. The Nature of Pulsar Radiation // Nature. 1970. Vol. 226, no. 5246. P. 622–624.
- [7] Kim V., Umirbayeva A., Aimuratov Y. Estimates of the Surface Magnetic Field Strength of Radio Pulsars // Universe. 2023. Vol. 9(7), no. 334.
- [8] Philippov A., Timokhin A., Spitkovsky A. Origin of Pulsar Radio Emission // Physical Review Letters. 2020. Vol. 124, no. 24. P. 245101.
- [9] Trümper J., Pietsch W., Reppin C. et al. Evidence for Strong Cyclotron Emission in the Hard X-Ray Spectrum of Her X-1 // Astrophys. J. L. 1978. Vol. 219. P. 105–110.

- [10] Staubert, R., Trümper, J., Kendziorra, E. et al. Cyclotron lines in highly magnetized neutron stars // *Astronomy & Astrophysics*. 2019. Vol. 622, no. A61.
- [11] Mitrofanov I. G., Pavlov G. G. Magnetic field strongly reduces critical luminosity of neutron stars and degenerate dwarfs // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 1982. Vol. 200, no. 4. P. 1033–1037.
- [12] Duncan R. C., Thompson C. Formation of very strongly magnetized neutron stars - Implications for gamma-ray bursts // *Astrophys. J.* 1992. Vol. 392, no. 1. P. L9–L13.
- [13] Thompson C., Duncan R. C. The soft gamma repeaters as very strongly magnetized neutron stars - I. Radiative mechanism for outbursts // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 1995. Vol. 275. P. 255–300.
- [14] Lai D. Matter in strong magnetic fields // *Rev. Mod. Phys.* 2001. Vol. 73. P. 629–662.
- [15] Thompson C., Lyutikov M., Kulkarni S. R. Electrodynamics of magnetars: implications for the persistent x-ray emission and spindown of the soft gamma repeaters and anomalous x-ray pulsars // *Astrophys. J.* 2002. Vol. 574, no. 1. P. 332–355.
- [16] Kouveliotou C. et al. An X-ray pulsar with a superstrong magnetic field in the soft gamma-ray repeater SGR 1806-20. // *Nature*. 1998. Vol. 393. P. 235–237.
- [17] Kouveliotou C., Strohmayer T., Hurley K. et al. Discovery of a magnetar associated with the soft gamma repeater SGR 1900+14 // *Astrophys. J.* 1999. Vol. 510. P. L115–118.
- [18] Gavriil F. P., Kaspi V. M., Woods P. M. Magnetar - like x-ray bursts from an anomalous x-ray pulsar // *Nature*. 2002. Vol. 419. P. 142–144.

- [19] Ibrahim A. I., Safi-Harb S., Swank J. H. et al. Discovery of cyclotron resonance features in the soft gamma repeater SGR 1806-20 // *Astrophys. J.* 2002. Vol. 574. P. L51–L55.
- [20] Ibrahim A. I., Swank J. H., Parke W. New evidence for proton cyclotron resonance in a magnetar strength field from SGR 1806-20 // *Astrophys. J.* 2003. Vol. 584. P. L17–L22.
- [21] Olausen S. A., Kaspi V. M. The McGill magnetar catalog // *Astrophys. J. Suppl.* 2014. Vol. 212, no. 1. P. 6.
- [22] van Paradijs J., Taam R. E., van den Heuvel E. P. J. On the nature of the ‘anomalous’ 6-s X-ray pulsars // *Astronomy & Astrophysics.* 1995. Vol. 299. P. 41–44.
- [23] Mazets E. P., Golenetskij S. V., Guryan Y. A. Soft gamma-ray bursts from the source B1900+14 // *Pis’ma Astron. Zh.* 1979. Vol. 5. P. 641–643.
- [24] Mereghetti S., Stella L. The Very Low Mass X-Ray Binary Pulsars: A New Class of Sources? // *Astrophys. J. L.* 1995. Vol. 442. P. 17–20.
- [25] Yakovlev D. G., Pethick C. J. Neutron Star Cooling // *Annu. Rev. Astron. & Astrophys.* 2004. Vol. 42, no. 1. P. 169–210.
- [26] Younes G., Baring M. G., Kouveliotou C. et al. Broadband X-ray burst spectroscopy of the fast-radio-burst-emitting Galactic magnetar // *Nature Astronomy.* 2021. Vol. 5. P. 408–413.
- [27] Hurley K., Kouveliotou C., Woods P. et al. Reactivation and Precise Interplanetary Network Localization of the Soft Gamma Repeater SGR 1900+14 // *Astrophys. J. L.* 1999. Vol. 510, no. 2. P. 107–109.
- [28] Hurley K., Cline T., Mazets E. et al. A giant periodic flare from the soft γ -ray repeater SGR1900+14 // *Nature.* 1999. Vol. 397, no. 6714. P. 41–43.

- [29] Hurley K., Boggs S. E., Smith D. M. et al. An exceptionally bright flare from SGR 1806-20 and the origins of short-duration γ -ray bursts // *Nature*. 2005. Vol. 434, no. 7037. P. 1098–1103.
- [30] Kaspi V. M., Beloborodov A. M. Magnetars // *Annu. Rev. Astron. & Astrophys.* 2017. Vol. 55, no. 1. P. 261–301.
- [31] Соколов . ., Тернов . . Синхротронное излучение. М.: Наука, 1966. 228 с.
- [32] Kuznetsov A., Mikheev N. Electroweak processes in external active media. 2013. Vol. 252. P. pp 1–271.
- [33] Борисов . ., Вшивцев . ., Жуковский . ., Эминов . . Фотоны и лептоны во внешних полях при конечных температуре и плотности // *УФН*. 1997. Т. 167, № 3. С. 241–267.
- [34] Кузнецов . ., Михеев . . Взаимодействие нейтрино с сильно замагниченной электрон-позитронной плазмой // *ЖЭТФ*. 2000. Т. 118, № 4. С. 863–876.
- [35] Бисноватый-Коган . ., Чечеткин . . Неравновесные оболочки нейтронных звезд, их роль в поддержании рентгеновского излучения и нуклеосинтезе // *Усп. физ. наук*. 1979. Т. 127, № 2. С. 263–296.
- [36] Trümper J., Pietsch W., Reppin C. et al. Evidence for strong cyclotron line emission in the hard X-ray spectrum of Hercules X-1 // *Astrophys. J.* 1978. Vol. 219. P. L105–L110.
- [37] Rumyantsev D. A. Resonant electron-positron pairs production in magnetar polar cap // *Quarks'2012. Proc. of 17-th Int. Seminar «Quarks'2012»*, Yaroslavl, Russia, 2012. Ed. by V.A. Khlebnikov, e.a. Inst. Nucl. Res., Moscow. Vol. 2. 2013. P. 222–228.
- [38] Melrose D. B., Parle A. J. Quantum electrodynamics in strong magnetic fields. I Electron States // *Aust. J. Phys.* 1983. Vol. 36. P. 755–774.

- [39] Соколов . ., Тернов . . Релятивистский электрон. Москва: Наука, 1983. 304 с.
- [40] Kuznetsov A. V., Mikheev N. V. Electroweak processes in external electromagnetic fields. New York: Springer-Verlag, 2003. 120 p.
- [41] Bhattacharya K., Pal P. B. Inverse beta decay of arbitrarily polarized neutrons in a magnetic field // Pramana J. Phys. 2004. Vol. 62. P. 1041–1058.
- [42] Balantsev I. A., Popov Yu. V., Studenikin A. I. On the problem of relativistic particles motion in strong magnetic field and dense matter // J. Phys. 2011. Vol. A44. P. 255301 (1–13).
- [43] Johnson M. H., Lippmann B. A. Motion in a constant magnetic field // Physical Review. 1949. Vol. 76, no. 6. P. 828–832.
- [44] Пескин ., Шредер . Введение в квантовую теорию поля. Ижевск: РХД, 2001. 784 с.
- [45] Ландау . ., Лифшиц . . Квантовая механика. Нерелятивистская теория. Москва: Наука, 1989. 768 с.
- [46] Canuto V. Quantum processes in strong magnetic fields // Ann. N. Y. Acad. Sci. 1975. Vol. 257, no. 1. P. 108–126.
- [47] Harding A. K., Daugherty J. K. Cyclotron Resonant Scattering and Absorption // Astrophys. J. 1991. Vol. 374. P. 687–699.
- [48] Suh I.-S., Mathews G. J. Weak reaction freeze-out constraints on primordial magnetic fields // Phys. rev. D. 1999. Vol. 59, no. 12. P. 123002.
- [49] Gonthier P. L., Harding A. K., Baring M. G. et al. Compton Scattering in Ultrastrong Magnetic Fields: Numerical and Analytical Behavior in the Relativistic Regime // Astrophys. J. 2000. Vol. 540, no. 2. P. 907–922.

- [50] Jones P. B. Electron-positron bremsstrahlung and pair creation in very high magnetic fields // Mon. Not. Roy. Astron. Soc. 2010. Vol. 409, no. 4. P. 1719–1727.
- [51] Melrose D. B. Quantum kinetic theory for unmagnetized and magnetized plasmas // Rev. Mod. Plasma Phys. 2020. Vol. 4, no. 8.
- [52] Graziani C. Strong-Field Cyclotron Scattering. I. Scattering Amplitudes and Natural Line Width // Astrophys. J. 1993. Vol. 412. P. 351–362.
- [53] Gonthier P. L., Baring M. G., Eiles M. T. et al. Compton scattering in strong magnetic fields: Spin-dependent influences at the cyclotron resonance // Phys. Rev. 2014. Vol. D90, no. 4. P. 043014.
- [54] Градштейн . ., Рыжик . . Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений. Москва: Гос. изд-во физ.-мат. лит., 1963. 1108 с.
- [55] Schwinger J. On Gauge Invariance and Vacuum Polarization // Phys. Rev. 1951. — Jun. Vol. 82. P. 664–679.
- [56] Ритус . . Радиационные эффекты и их усиление в интенсивном электромагнитном поле // ЖЭТФ. 1969. Т. 57, № 6. С. 2176–2188.
- [57] Jancovici B. Radiative Correction to the Ground-State Energy of an Electron in an Intense Magnetic Field // Phys. Rev. 1969. Vol. 187. P. 2275–2276.
- [58] Weldon H. A. Covariant calculations at finite temperature: The relativistic plasma // Phys. Rev. 1982. Vol. D26. P. 1394–1433.
- [59] Жуковский . ., Мидодашвили . ., Эминов . . Мнимая часть массового оператора электрона в постоянном поле при конечной температуре и плотности // ЖЭТФ. 1994. Т. 106, № 4. С. 929–935.

- [60] Шабад . . Поляризация вакуума и квантового релятивистского газа во внешнем поле // Тр. ФИАН СССР “Поляризационные эффекты во внешних калибровочных полях”. 1988. Т. 192. С. 5–152.
- [61] Tsai W. Y. Vacuum polarization in homogeneous magnetic fields // Phys. Rev. 1974. Vol. D10, no. 8. P. 2699–2702.
- [62] Баталин . ., Шабад А. Е. Функция Грина фотона в постоянном однородном электромагнитном поле общего вида // ЖЭТФ. 1971. Т. 60, № 3. С. 894–900.
- [63] Скобелев . . Поляризационный оператор фотона в сверхсильном магнитном поле // Изв. вузов. Физика. 1975. № 10. С. 142–143.
- [64] Перес Рохас . Поляризационный оператор электрон-позитронного газа в постоянном внешнем магнитном поле // ЖЭТФ. 1979. Т. 76, № 1. С. 3–17.
- [65] Peres Rojas H., Shabad A. E. Absorption and dispersion of electromagnetic eigenwaves of electron-positron plasma in a strong magnetic field // Ann. Phys. (N.Y.). 1982. Vol. 138. P. 1–35.
- [66] Михеев . ., Румянцев . ., Чистяков . . Фоторождение нейтрино на электро-не в плотной замагниченной среде // ЖЭТФ. 2014. Т. 146, № 2. С. 289–296.
- [67] Peres Rojas H., Shabad A. E. Polarization of relativistic electron and positron gas in a strong magnetic field. Propagation of electromagnetic waves // Ann. Phys. (N.Y.). 1979. Vol. 121, no. 2. P. 432–464.
- [68] Adler S. L. Photon splitting and photon dispersion in a strong magnetic field. // Annals of Physics. 1971. Vol. 67. P. 599–647.

- [69] Mushtukov A. A., Nagirner D. I., Poutanen J. Compton scattering S-matrix and cross section in strong magnetic field // Phys. Rev. 2016. Vol. D93, no. 10. P. 105003.
- [70] Potekhin A. Y., Lai D., Chabrier G., Ho W. C. G. Electromagnetic Polarization in Partially Ionized Plasmas with Strong Magnetic Fields and Neutron Star Atmosphere Models // Astrophys. J. 2004. Vol. 612, no. 2. P. 1034–1043.
- [71] Yarkov A. A., Rumyantsev D. A. Photon Damping in a Strongly Magnetized Plasma // Physics of Atomic Nuclei. 2022. Vol. 85, no. 9. P. 1566–1569.
- [72] Makishima K., Mihara T., Ishida M., et al. Discovery of a prominent cyclotron absorption feature from the transient X-ray pulsar X0331 + 53 // Astrophys. J. Lett. 1990. Vol. 365. P. L59–L62.
- [73] Grove J. E., Strickman M. S., Johnson W. N., et al. The soft gamma-ray spectrum of A0535+26: Detection of an absorption feature at 110 keV by OSSE // Astrophys. J. Lett. 1995. Vol. 438. P. L25–L28.
- [74] Mihara T., Makishima K., Ohashi T. et al. New observations of the cyclotron absorption feature in Hercules X–1 // Nature. 1990. Vol. 346. P. 250–252.
- [75] Canuto V., Lodenquai J., Ruderman M. Thomson Scattering in a Strong Magnetic Field // Phys. Rev. D. 1971. Vol. 3. P. 2303–2308.
- [76] Гнедин . ., Сюняев . . Рассеяние излучения на тепловых электронах в магнитном поле // Журн. эксперим. и теор. физ. 1973. Т. 65, № 1. С. 102.
- [77] Borner G., Mészáros P. Classical calculation of Thomson cross-sections in the presence of a strong magnetic field // Plasma Phys. 1979. Vol. 21, no. 4. P. 357.

- [78] Ventura J. Scattering of light in a strongly magnetized plasma // Phys. Rev. 1979. Vol. D19. P. 1684–1695.
- [79] Herold H. Compton and Thomson scattering in strong magnetic fields // Phys. Rev. 1979. Vol. D19. P. 2868.
- [80] Melrose D. B., Parle A. J. Quantum Electrodynamics in Strong Magnetic Fields III. Electron-photon interactions // Aust. J. Phys. 1983. Vol. 36. P. 799.
- [81] Daugherty J. K., Harding A. K. Compton Scattering in Strong Magnetic Fields // Astrophys. J. 1986. Vol. 309. P. 362.
- [82] Bussard R. W., Alexander S. B., Meszaros P. One- and two-photon Compton scattering in strong magnetic fields // Phys. Rev. D. 1986. Vol. 34. P. 440–451.
- [83] Özel F. Surface Emission Properties of Strongly Magnetic Neutron Stars // The Astrophysical Journal. 2001. Vol. 563, no. 1. P. 276.
- [84] Zavlin V. E., Pavlov G. G., Shibano Y. A. Model neutron star atmospheres with low magnetic fields. I. Atmospheres in radiative equilibrium. // A&A. 1996. Vol. 315. P. 141–152.
- [85] Alexander S. G., Meszaros P. Cyclotron Harmonics in Accreting Pulsars and Gamma-Ray Bursters: Effect of Two-Photon Processes // Astrophys. J. 1991. Vol. 372. P. 565.
- [86] Araya R. A., Harding A. K. Cyclotron Line Features from Near-critical Magnetic Fields: The Effect of Optical Depth and Plasma Geometry // Astrophys. J. 1999. Vol. 517, no. 1. P. 334–354.
- [87] Ho W. C. G., Lai D. Atmospheres and spectra of strongly magnetized neutron stars // MNRAS. 2001. Vol. 327, no. 4. P. 1081–1096.

- [88] Lyutikov M., Gavril F. P. Resonant cyclotron scattering and Comptonization in neutron star magnetospheres // MNRAS. 2006. Vol. 368, no. 2. P. 690–706.
- [89] Schönherr G., Wilms J., Kretschmar P. et al. A model for cyclotron resonance scattering features // A&A. 2007. Vol. 472, no. 2. P. 353–365.
- [90] Nishimura O. Formation Mechanism for Broad and Shallow Profiles of Cyclotron Lines in Accreting X-Ray Pulsars // Astrophys. J. 2008. Vol. 672, no. 2. P. 1127–1136.
- [91] Suleimanov V., Potekhin A. Y., Werner K. Models of magnetized neutron star atmospheres: thin atmospheres and partially ionized hydrogen atmospheres with vacuum polarization // A&A. 2009. Vol. 500, no. 2. P. 891–899.
- [92] Fernández R., Thompson C. Resonant Cyclotron Scattering in Three Dimensions and the Quiescent Nonthermal X-ray Emission of Magnetars // Astrophys. J. 2007. Vol. 660, no. 1. P. 615–640.
- [93] Nobili L., Turolla R., Zane S. X-ray spectra from magnetar candidates – II. Resonant cross-sections for electron–photon scattering in the relativistic regime // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 2008. Vol. 389, no. 2. P. 989–1000.
- [94] Wadiasingh Z., Baring M. G., Gonthier P. L., Harding A. K. Resonant Inverse Compton Scattering Spectra from Highly-magnetized Neutron Stars // Astrophys. J. 2018. Vol. 854, no. 2. P. 98.
- [95] Beloborodov A. M. On the Mechanism of Hard X-Ray Emission from Magnetars // Astrophys. J. 2013. Vol. 762, no. 1. P. 13.
- [96] Daugherty J. K., Harding A. K. Comptonization of Thermal Photons by Relativistic Electron Beams // Astrophys. J. 1989. Vol. 336. P. 861.

- [97] Фомин . ., Холодов . . Резонансное комптоновское рассеяние во внешнем магнитном поле // ЖЭТФ. 2000. Т. 117, № 2. С. 319–325.
- [98] Румянцев . ., Шленев . ., Ярков . . Резонансы в комптоноподобных процессах рассеяния во внешней замагниченной среде // ЖЭТФ. 2017. Т. 152, № 3. С. 483–494.
- [99] Weldon H. A. Simple rules for discontinuities in finite temperature Field Theory // Phys. Rev. 1983. Vol. D28. P. 2007–2037.
- [100] Chistyakov M. V., Rumyantsev D. A. Compton effect in strongly magnetized plasma // Int. J. Mod. Phys. 2009. Vol. A24. P. 3995–4008.
- [101] Daugherty J. K., Harding A. K. Compton scattering in strong magnetic fields // Astrophys. J. 1986. Vol. 309. P. 362–371.
- [102] Ландау . ., Лифшиц . ., Питаевский . Квантовая электродинамика. 4 изд. Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2002. Т. 4. 720 с.
- [103] Schwarm F. W., Schönherr G., Falkner S. et al. Cyclotron resonant scattering feature simulations. I. Thermally averaged cyclotron scattering cross sections, mean free photon-path tables, and electron momentum sampling // A&A. 2017. Vol. 597. P. A3.
- [104] Schwarm F.-W. Monte Carlo Simulation of Cyclotron Lines in Strong Magnetic Fields - Theory and Application: Ph. D. thesis / Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg. 2017.
- [105] Mushtukov A. A., Suleimanov V. F., Tsygankov S. S., Poutanen J. The critical accretion luminosity for magnetized neutron stars // Mon. Not. Roy. Astron. Soc. 2015. Vol. 447, no. 2. P. 1847–1856.
- [106] Pavlov G. G., Bezchastnov V. G., Meszaros P., Alexander S. G. Radiative widths and splitting of cyclotron lines in superstrong magnetic fields // Astrophys. J. 1991. Vol. 380. P. 541–549.

- [107] Клепиков . . Излучение фотонов и электрон-позитронных пар в магнитном поле // ЖЭТФ. 1954. Т. 26, № 1. С. 19–34.
- [108] Baier V. N., Katkov V. M. Pair creation by a photon in a strong magnetic field // Phys. Rev. 2007. Vol. D75, no. 7. P. 073009.
- [109] Ritus V. I. Photoproduction of Neutrinos on Electrons and Neutrino Radiation from Stars // JETP. 1961. Vol. 41, no. 4. P. 1285–1293.
- [110] Chiu H.-Y., Stabler R. C. Emission of photoneutrinos and pair annihilation neutrinos from stars // Phys. Rev. 1961. Vol. 122. P. 1317–1322.
- [111] Beaudet G., Petrosian V., Salpeter E. E. Energy losses due to neutrino processes // Astrophys. J. 1967. Vol. 150. P. 979–999.
- [112] Dicus D. Stellar energy-loss rates in a convergent theory of a weak and electromagnetic interaction // Phys. Rev. 1972. Vol. D6. P. 941–949.
- [113] Munakata H., Kohyama Y., Itoh N. Neutrino energy loss in stellar interiors // Astrophys. J. 1985. Vol. 296. P. 197–203.
- [114] Schinder P. J., Schramm D. N., Wiita P. J. et al. Neutrino emission by the pair, plasma, and photo processes in the Weinberg-Salam model // Astrophys. J. 1987. Vol. 313. P. 531–542.
- [115] Itoh N., Adachi T., Nakagawa M. et al. Neutrino energy loss in stellar interiors. III. Pair, photo-, plasma, and bremsstrahlung processes // Astrophys. J. 1989. Vol. 339. P. 354–364.
- [116] Itoh N., Hayashi H., Nishikawa A., Kohyama Y. Neutrino energy loss in stellar interiors. VII. Pair, photo-, plasma, bremsstrahlung, and recombination neutrino processes // Astrophys. J. Suppl. 1996. Vol. 102. P. 411–424.
- [117] Скобелев . . Комптоновский механизм генерации нейтрино и аксионов на эффективно-двумерном замагниченном ферми-газе // ЖЭТФ. 2000. Т. 117, № 6. С. 1059–1066.

- [118] Yakovlev D. G., Kaminker A. D., Gnedin O. Y., Haensel P. Neutrino emission from neutron stars // *Phys. Rep.* 2001. Vol. 354. P. 1–155.
- [119] Румянцев . ., Чистяков . . Влияние фотон-нейтринных процессов на остывание магнитара // *ЖЭТФ*. 2008. Т. 134, № 4. С. 627–636.
- [120] Борисов . ., Керимов . ., Сизин . . Слабый и электромагнитный механизмы фоторождения нейтринных пар в сильно замагниченном электронном газе // *Ядерная физика*. 2012. Т. 75, № 11. С. 1379–1386.
- [121] Михеев . ., Румянцев . ., Чистяков . . Фоторождение нейтрино на электроде в плотной замагниченной среде // *ЖЭТФ*. 2014. Т. 146, № 2. С. 289–296.
- [122] Chistyakov M. V., Kuznetsov A. V., Mikheev N. V. et al. Neutrino photoproduction on electron in dense magnetized medium // *Quarks'2014. Proc. of 18-th Int. Sem. «Quarks'2014», Suzdal, Russia, 2014. Ed. by P. S. Satunin, e.a. Inst. Nucl. Res., Moscow. 2015. P. 322–329.*
- [123] Kuznetsov A., Rumyantsev D., Shlenev D. Neutrino photoproduction on the electron in dense magnetized medium // *EPJ Web Conf.* 2017. Vol. 158. P. 05008.
- [124] Малофеев . ., Малов . ., Теплых . ., др. . Радиоизлучение от двух аномальных рентгеновских пульсаров // *Астрон. ж.* 2005. Т. 82, № 3. С. 273–280.
- [125] Malofeev V. M., Malov O. I., Teplykh D. A. et al. Radio emission from two anomalous X-ray pulsars // *Astronomy Reports*. 2005. Vol. 49, no. 3. P. 242–249.
- [126] Ruderman M. A., Sutherland P. G. Theory of pulsars - Polar caps, sparks, and coherent microwave radiation // *Astrophys. J.* 1975. Vol. 196. P. 51–72.

- [127] Erber T. High-energy electromagnetic conversion processes in intense magnetic fields // *Rev. Mod. Phys.* 1966. Vol. 38. P. 626–659.
- [128] Beloborodov A. M., Thompson C. Corona of magnetars // *Astrophys. J.* 2007. Vol. 657, no. 2. P. 967–993.
- [129] Shabad A. E. Photon dispersion in a strong magnetic field // *Ann. Phys.* (N.Y.). 1975. Vol. 90, no. 1. P. 166–195.
- [130] Shabad A. E., Usov V. V. Gamma-quanta capture by magnetic field and pair creation suppression in pulsars // *Nature*. 1982. Vol. 295. P. 215–217.
- [131] Усов . ., Шабад . . Светопозитроний в магнитосфере пульсара // *Письма в ЖЭТФ*. 1985. Т. 42, № 1. С. 17–20.
- [132] Latal H. G. Cyclotron radiation in strong magnetic fields // *Astrophys. J.* 1986. Vol. 309. P. 372–382.
- [133] Weinberg S. The U(1) problem // *Phys. Rev. D*. 1975. Vol. 11. P. 3583–3593.
- [134] Dine M., Fischler W., Srednicki M. A simple solution to the strong CP problem with a harmless axion // *Physics Letters B*. 1981. Vol. 104, no. 3. P. 199–202.
- [135] Peccei R. D., Quinn H. R. Constraints imposed by CP conservation in the presence of instantons // *Phys. Rev.* 1977. Vol. D16. P. 1791–1797.
- [136] Weinberg S. A new light boson? // *Phys. Rev. Lett.* 1978. Vol. 40, no. 4. P. 223–226.
- [137] Wilczek F. Problem of strong P and T invariance in the presence of instantons // *Phys. Rev. Lett.* 1978. Vol. 40, no. 5. P. 279–282.
- [138] Dine M., Fischler W. The not-so-harmless axion // *Physics Letters B*. 1983. Vol. 120, no. 1-3. P. 137–141.

- [139] Preskill J., Wise M. B., Wilczek F. Cosmology of the invisible axion // Physics Letters B. 1983. Vol. 120, no. 1-3. P. 127–132.
- [140] Buschmann M., Co R. T., Dessert C., Safdi B. R. Axion Emission Can Explain a New Hard X-Ray Excess from Nearby Isolated Neutron Stars // Phys. Rev. Lett. 2021. Vol. 126, no. 2. P. 021102.
- [141] Kim J. E., Carosi G. Axions and the strong CP problem // Reviews of Modern Physics. 2010. Vol. 82, no. 1. P. 557–601.
- [142] Marsh D. J. Axion cosmology // Physics Reports. 2016. Vol. 643. P. 1–79.
- [143] Sikivie P. Experimental Tests of the “Invisible” Axion // Phys. Rev. Lett. 1983. Vol. 51, no. 16. P. 1415–1417.
- [144] Raffelt G., Stodolsky L. Mixing of the photon with low-mass particles // Phys. Rev. D. 1988. Vol. 37. P. 1237–1249.
- [145] Lai D., Heyl J. Probing axions with radiation from magnetic stars // Physical Review D. 2006. Vol. 74, no. 12.
- [146] Yanagida T., Yoshimura M. Resonant axion-photon conversion in the early universe // Physics Letters B. 1988. Vol. 202, no. 3. P. 301–306.
- [147] Pshirkov M. S., Popov S. B. Conversion of dark matter axions to photons in magnetospheres of neutron stars // Journal of Experimental and Theoretical Physics. 2009. Vol. 108, no. 3. P. 384–388.
- [148] Скобелев . . Резонансный механизм фоторождения аксионов на замагниченном электронном газе // ЖЭТФ. 2007. Т. 132, № 5. С. 1121–1126.
- [149] Михеев . ., Румянцев . ., Школьников . . О резонансном рождении аксионов в магнитосфере магнитара // Письма в журн. эксперим. и теор. физ. 2009. Т. 90, № 9. С. 668–671.

- [150] Primakoff H. Photo-Production of Neutral Mesons in Nuclear Electric Fields and the Mean Life of the Neutral Meson // Phys. Rev. 1951. Vol. 81, no. 5. P. 899–899.
- [151] Raffelt G. G. Stars as laboratories for fundamental physics. Chicago: University of Chicago Press, 1996. 664 p.
- [152] Василевская . ., Михеев . ., Овчинников . ., Пархоменко . . Индуцированное взаимодействие аксиона с электронами во внешнем магнитном поле // Ядерная физика. 1999. Т. 62, № 9. С. 1662–1667.
- [153] Mikheev N. V., Narynskaya E. N. Field-induced interaction of a pseudoscalar particle with photon in a magnetized e^-e^+ plasma // Mod. Phys. Lett. 2006. Vol. A21. P. 433–444.
- [154] Mikheev N. V., Raffelt G., Vassilevskaya L. A. Axion emission by magnetic field induced conversion of longitudinal plasmons // Phys. Rev. 1998. Vol. D58. P. 055008 (1–5).
- [155] Sturrock C. A. A model of pulsars // Astrophys. J. 1971. Vol. 164. P. 529–556.
- [156] Tadamaru E. On the energy spectrum of relativistic electrons in the crab nebula // Astrophys. J. 1973. Vol. 183. P. 625–635.
- [157] Daugherty J. K. Pair production in superstrong magnetic fields // Astrophys. J. 1983. Vol. 273. P. 761–773.
- [158] Ландау . . О колебаниях электронной плазмы // ЖЭТФ. 1946. Vol. 16, no. 574.
- [159] Михеев . ., Чистяков . . Затухание фотона в результате рождения электрон-позитронной пары в сильном магнитном поле // Письма в ЖЭТФ. 2001. Т. 73, № 12. С. 726–730.

- [160] Boyanovsky D., de Vega H. J., Lee D.-S. et al. Fermion damping in a fermion-scalar plasma // Phys. Rev. D. 1999. Vol. 59, no. 10, 105001.
- [161] Киржниц . . Общие свойства электромагнитных функций отклика // Усп. физ. наук. 1987. Vol. 152, no. 7. P. 399–422.
- [162] Ландау . ., Лифшиц . ., Питаевский . . Теоретическая физика: ч. 2. Статистическая физика. Теория конденсированного состояния. ФИЗМАТЛИТ, 2001. Т. IX. 496 с.
- [163] 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. Vol. 476. P. 246.