Отзыв оффициального оппонента Шабада А.Е.

на диссертацию Д. М. Шленева

КОМПТОНОПОДОБНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ПРИСУТСТВИИ ВНЕШНЕЙ АКТИВНОЙ СРЕДЫ,

представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация посвящена вычислению в едином, универсальном, контексте ряда фундаментальных процессов, объединяемых автором под названием «комптоноподобные», при наличии сильного магнитного поля и электрон-позитронной плазмы. А именно, рассматриваются рассеяние фотона на электроне (собственно, эффект Комптона), рассеяние фотона на электроне с рождением пары нейтрино-антинейтрино, расщепление фотона на два.

Эти процессы играют ключевую роль в физике магнитосферы нейтронной звезды – пульсара и магнитара, и, в перспективе, в физике ультрапериферических столкновений тяжелых заряженных релятивистских частиц. Квинтэссенцией работы являются: универсальность описания процессов, специфический подход к рассмотрению резонансов и первый в литературе учет вклада атома позитрония в формировании спектра фотона и, соответственно, в модификацию правил отбора по поляризациям  при расщеплении фотона.

Во Введении автор указывает на значение изучаемых им процессов в исследовании магнитаров и пульсаров, на существование там величин магнитного поля и плотностей горячей плазмы, делающих адекватным применение развиваемой им методики, в частности для объяснения нейтринного охлаждения магнитаров, ввиду их проницаемости для нейтрино. Дается литературный обзор в соответствующей области с указанием на имеющиеся в существующих работах лакуны. Отмечен существенный вклад в данную область многолетней работы  школы Ярославского Государственного Университета, к которой принадлежит диссертант.

В Главе 1 автор приводит выражение (1.24) для пропагатора электрона в магнитном поле в вакууме, соответствующее суммированию цепочки диаграмм с массовым оператором. Это представление приближенно является диагональным в собственных функциях невозмущенной задачи о спектре электрона в магнитном поле и включает суммирование по соответствующим состояниям. Вопрос. Я могу допустить, что собственные функции в этом представлении берутся без радиационных поправок, хотя это и непоследовательно. Правда, так или иначе пропагатор выходит за пределы теории возмущений. Но вот вопрос. Скажите, Денис, разве у массового оператора только одно собственное значение? С как же спиновая степень свободы? Разве собственных значений  не два? Разве пропагатор не состоит из двух компонент? Разве не имеет место расщепление по спину, аналогичное двулучепреломлению фотона? Снимает ли радиационное взаимодействие вырождение по спину? Коммутирует ли оно с используемым Вами оператором, ассоциированным со спином? В дальнейшем в пропагаторе будет использоваться только мнимая часть  массового оператора, отвечающая за ширину уровней Ландау, в то время как реальная часть игнорируется ввиду ее малости, с чем можно согласиться. Далее выписывается  матричный элемент  (1.30) комптоноподобного процесса как древесная по виду диаграмма с участием пропагатора (1.24).  Матричный элемент  (1.30) имеет  полюса на  массовых оболочках электрона, нумеруемых квантовым числом Ландау, которые представляют из себя энергии уровней Ландау, смещенные в комплексную плоскость на ширину уровней.  Утверждается, однако, что эти полюса не достигаются , пока начальный и конечный электрон оккупируют более высокие состояния, чем  промежуточный электрон.

Вопрос.1. Откуда это видно? Сказано в начале пункта 3.1 При *l*’,> реальная часть знаменателя  в (1.30) не обращается в ноль, что указывает на невозможность реализации резонанса на виртуальном фермионе. Разве знаменатель содержит *l, l'* ? Случай *l=l'=0* из следующего параграфа в эти условия не попадает, но тоже трактуется как нерезонансный. И как можно различать ррезонансный и ерезонансный случаи, когда в процессе суммирования условия *l*’*, l* *> n* для одних членов ряда выполнены, а для других нет?

Вопрос2. В магнитном поле однофотонное рождение пары есть реальный процесс. Не означает ли это, что в древесной диаграмме для комптон-эффекта промежуточный электрон должен быть реальным, разумеется при подходящем соотношении между *l* и *n* во всяком случае, до введения радиационных поправок?

В этом случае для участвующих  в (1.30) структурных функций выписаны (Приложение А) шестьдесят четыре (!) довольно длинных выражения для всевозможных комбинаций значений компонент спинов и вершин взаимодействия: скалярного, псевдоскалярного, векторного и аксиально-векторного -- получающихся в терминах обобщенных функций Лагерра при интегрировании в петле.

В пределе сильного поля в (1.30) можно ограничиться ситуацией, когда начальный и конечный электрон находятся оба в основном состоянии, что сделано в разделе (1.3.1). Для этого случая, упомянутые структурные функции значительно упрощаются, их остается «только» восемнадцать. В разделе 1.3.2 изучено нерезонансное рассеяние электрона, принадлежащего плазме, на внешнем фотоне вперед. Ответ записан как усреднение с функцией распределения от упрощающегося в этом случае матричного элемента, содержащего теперь двенадцать структурных функций.

Вопросы. 1.Почему нет функции распределения промежуточного электрона? А если бы я взял не принадлежащий плазме электрон и стал бы его рассеивать на не принадлежащем плазме фотоне в присутствии плазмы, не было бы никаких оснований усреднять с функциями распределения начальных частиц. И что же, ни температура, ни плотность не вошли бы в ответ?! Когда мы Пересом Рохасом вычисляли поляризационный оператор, появлялись ферми-распределения виртуальных электронов и позитронов. Так происходит в методе температурных функций Грина. Распределения не вводятся умозрительно, они возникают автоматически там, где им надо.

2. Почему в (1.61) слева **k**=0, в то же время справа присутствуют q3  и qperp?

3. Почему нет мнимой части в знаменателях, разве они не могут обращаться в нуль по ходу интегрирования и суммирования? В (160) она была!

Резонансное рассеяние вперед на электроне, находящемся в основном состоянии, рассмотрено в  разделе 1.3.3. Автором вводится специальное приближение узкого резонанса, позволяющее, как он утверждает, заменить интегрирование вблизи полюса на интегрирование с дельта-функцией. Этот прием факторизует матричный элемент двухвершинного процесса, сводя его к (взвешенному) произведению двух одновершинных матричных элементов. Ширина резонанса при этом оказывается в знаменателе и входит в ответ в качестве  параметра - на данном этапе эмпирического -  регуляризующего циклотронный резонанс. Вычислен набор шестнадцати величин, относящихся к разным типам взаимодействия.

В Главе 2 развитое построение реализуется более конкретно при рассмотрении двух важных для астрофизики процессов фото генерации нейтрино и собственно Комптон-эффекта фотон-электрон. При этом в обоих случаях ширина резонанса, остававшаяся неопределенной в предыдущей главе, выражается через  одно вершинный матричный элемент электрон-фотон-электрон. После его сокращения автор приходит своим оригинальным построением к известной в литературе нейтринной светимости при рассеянии фотона на электроне, Я не понял. Вы говорите, что совпадает с [29], но отличается от более поздней работы [76]. а в случае Комптон-эффекта к выражению для коэффициента поглощения фотона в одно вершиннойй реакции γe→e через ее квадрат матричного элемента. Приводится графически вычисленная зависимость сечения этого процесса от энергии, демонстрирующая резонансные пики. Мне кажется, что совпадение формулы (2.15) с тем, что можно было бы написать без Вашего приема, происходит потому, что заменяя полюс на дельта-функцию, Вы тем самым переходите от амплитуды к ее мнимой, абсорбтивной части, а это и есть сечение поглощения.

В главе 2 изучается расщепление фотона на два в сильном магнитном поле при наличии плазмы или же с учетом образования связанного

состояния виртуальных электрона и позитрона – атома позитрония. Целью автора является показать, что в обоих этих случаях закон дисперсии фотона модифицируется таким образом, чтобы стала разрешенной реакция превращения фотона поляризационной моды 2 (экстраординарная волна) в два фотона моды 1 (обыкновенная волна). Открытие этого, до сих пор запрещенного, канала было бы способно радикально воздействовать на существующие представления о формировании электрон-позитронной плазмы в пульсаре, а также существование обратной реакции слияния двух фотонов в один позволило бы предсказать выход одного фотона при ультрапериферических столкновениях ядер. Первое замечание по этому поводу. Известный скептицизм по отношению к этим результатам восходит к тому обстоятельству, что вычисленная автором дисперсионная кривая фотона моды 2 попадает во внутренность светового конуса q02 - **q**2 > 0 не только при неисчезающем импульсе фотона **q,** что допустимо**,** но и тогда, когда он равен нулю. А это означает, что энергия покоя фотона, т.е. его масса, отлична от нуля, q0(0)> 0. Между тем, калибровочная инвариантность — при некоторых, правда, оговорках – требует абсолютного равенства нулю этой величины как в вакууме, так и в среде. Действительно, См. также отдельный файл, дублирующий нижеприводимый вывод. Продифференцируем условие поперечности поляризационного оператора *Пαβ(q)qβ=0* по *qλ*: *Пαλ(q)+ qβ ∂Пαβ(q)/∂q=0*

и положим *qλ=0.* Отвлекаясь от требующей отдельного исследования возможности того, что производная *∂Пαβ(q)/∂q* сингулярна в нуле (не видно для этого причин, либо надо их найти), заключаем, что *Пαβ(0)=0,* тем самым, все собственные значения поляризационного оператора тоже обращаются в нуль в этом пределе.Это значит, что точка q0= **q=** 0 является точкой спектра, то есть, в каждой моде всегда существует дисперсионная кривая, проходящая через начало координат -- фотон по определению. (Есть и другие, например, позитроний, имеющий массу). Я утверждаю, таким образом, что при одинаковых внешних параметрах независимо от того, существует или не существует массивная ветвь, безмассовая должна в любом случае существовать.

*Ответ: нижняя ветвь дисперсии проходит через 0.*

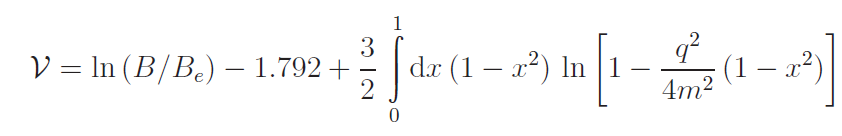
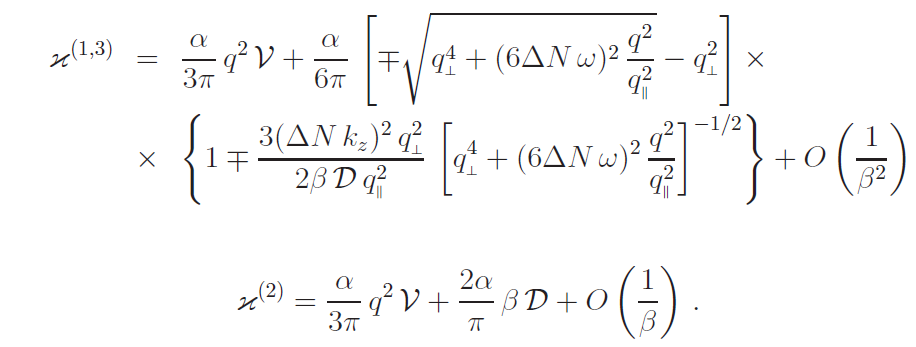
Второе замечание по этому поводу. Упомянутая реакция, насколько я помню, является в вакууме дважды запрещенной, т. е. не только кинематически, но — согласно Адлеру -- и по СР. В зарядово несимметричной плазме можно сослаться на нарушение этой симметрии. Ну а без плазмы? Ведь образование позитрония не отменяет СР.

В параграфе 3.2 выписаны со ссылкой на имеющиеся источники поправки к трем собственным векторам поляризационного оператора в асимптотически сильном магнитном поле за счет наличия холодной зарядово-не-симметричной плазмы, которые определяют поляризации собственных мод.Вопросы к формулам (3.3). Что есть бэта? Обратная температура или отношение магн. поля к критическому? Полагаю, что второе, но объяснения нигде не нашел. Температура равна нулю, так?

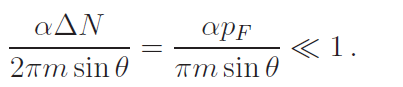
*Ответ: бэта – произведение эл. заряда на индукцию маг. поля. Обозначение было введено 1 гл. Температура зарядово несимметричной холодной плазмы была положена 0.*

В пределе отсутствия плазмы должно быть А\_{i}^{(\lambda)} =\delta\_{i,\lambda}. Это не выполнено для А\_{3}^{1,3}. Судя по формуле (3.13), Вы считаете, что каппа3 в пределе сильного поля быстро убывает. Я же знаю, что оба: каппа-один и каппа-три – одинаково растут с полем, как lnβ. Кстати, у Вас логарифмический рост не представлен. Вопросы к формулам (3.11 – 3.13). Почему каппа-три исчезает при сильном поле без плазмы, между тем, как оно должно расти лорарифмически, равно как и каппа-один? Догадываюсь, что Вы положили *q2=0* без предупреждения. Это странно, учитывая, что Вы обсуждаете закон дисперсии. Что касается (3.10) для каппа-два, эта формула известна? В ней тоже *q2=0* ? Уточните, пожалуйста.

*Ответ: с.з. в замагниченной плазме были получены нами в след. виде:*



*Мы считаем выполненным в холодной почти вырожд. заряд. несимм. плазме условие:*



Вследствие нарушения Лоренц-инвариантности из-за наличия плазмы законы дисперсии, написанные в ее отсутствие в терминах релятивистских инвариантов, начинают зависеть еще от одного параметра – угла между импульсом фотона и магнитным полем. Дисперсионные кривые для моды 2 представлены на рисунках 3.1 и 3.2 для разных углов и химических потенциалов при сильно закритических, магнитарных, значениях магнитного поля, порядка 1015 гаусс.К рисунку 3,1

1.(Об этом уже писал выше) Не верю в то, что дисперсионная кривая не проходит через начало координат. (На этом графике q\_3=0) Энергия покоя фотона q\_0 при q\_3=q\_{perp}=0 должна быть равна нулю вследствие калибровочной инвариантности. Причина, думаю, в том, что дисперсионные кривые, определяемые в области циклотронного резонанса, продолжены в область начала коорлинат, далекую от него. Результат продолжения, думаю, некорректен.

*Ответ: нижняя дисп. кривая проходит через 0. Кривые строились не аналитически, а получены численно, аппроксимация не проводилась в рамках графика.*

2. По поводу ф-лы (3,15). Нижний порог точно никуда не смещен. Согласно формуле (3.15), для трех кривых, различающихся значениями углов, т.е. значениями k\_z, должны бы быть три порога, а их два (?). Здесь нестыковка с нашими с Пересом результатами. У нас пороги плазмой не сдвигаются и определяются только уровнями Ландау в магнитном поле. (В принципе, плазма может влиять на энергию связи, в частности на уровень электрона в магнитном поле, но это более далекоидущее приближение.) Высшие пороги – это рождение пар на возбужденных уровнях. Хорошо бы привести значения порогов, когда возбуждена на первый уровень одна из родившихся частиц и обе.

К рисунку 3,2

1. Правильно ли будет сказать, что здесь видно действие запрета Паули (также и на рис. 3,1)? Фотон может родить пару, только попадающую вовне границы Ферми. Поэтому при большем химпотенциале для пары с меньшими квантовыми числами не найдется свободного места внутри сферы Ферми. Непонятно только, почему при меньшем мю имеется отклонение только от первого порога, а не от всех.
2. Смещенный минимум энергии. Это что же, сверхтекучесть в поперечном направлении?! Это к вопросу о недоверии к поведению дисперсионных кривых около нуля.

В параграфе 3.4 получены дисперсионные кривые в сильном магнитном поле с учетом резонанса на атоме позитрония (без плазмы) на основе имеющихся в литературе формул. Этот резонанс состоит в том, что рожденная одним фотоном пара электрон-позитрон может связаться в атом позитрония, при этом возникает полюс поляризационного тензора при энергии, отличающейся от энергии порога рождения не связанной между собой пары. Почему сказано после, (3.19), что резонанс остается возле *4m2* ? Из (3.18) получается, что энергия связи покоящегося, \rho =0, позитрония бeсконечна. Так не может быть. Влияние этого полюса на свойства дисперсионной кривой моды 2 представлено но рисунке 3.3. Видно, что данный резонанс на атоме позитрония, подобно хорошо изученному резонансу на границе непрерывного спектра пары, вызывает резкое выполаживание дисперсионной кривой при достаточно больших поперечных магнитному полю импульсах фотона. Впервые указано, что на резонансных кривых имеются области, где q2 >0, и это наблюдение снимает кинематический запрет реакции расщепления фотона моды 2 в два фотона моды 1. Остается запрет по СР, который преодолевается введением нарушающей эту симметрию зарядово неинвариантной плазмы.

По поводу рисунка 3.3.

1. Как я могу с ним соглашаться, если имеются со мной противоречия, начиная уже с резонанса на границе непрерывного спектра. Главное противоречие — это отсутствие расталкивания спектров возле квазипересечения спектральных кривых позитрония (связанного или на границе непрерывного спектра – все равно) с биссектрисой прямого угла, q2 =0. Из-за этого Вы заработали сверхсветовую групповую скорость фотона, которая появляется там, где дисперсионные кривые идут **круче,** чем пунктирная биссектриса.

*Ответ: Здесь повторены рез-ты [105] Аникин Р. А., Михеев Н. В. Процесс nu → nu gamma в сильном магнитном поле с учётом вклада позитрония в дисперсию фотона // Журн. эксперим. и теор. физ. 2012. Т. 142, № 3. С. 463–472.Кривые не идут круче, чем биссектриса. Масштаб графика по осям разный, биссектриса должна проходить почти вертикально, с очень малым углом отн. оси ординат.*

С одним я согласен. Действительно, возможно выполнение неравенства q2 >0 на отщепившейся ветви дисперсионной кривой выше точки резонанса. Это имеет место и **до учета** позитрония. Кажется, сей факт не принимался во внимание, когда люди говорили о кинематическом запрете реакции гамма-2 в два гамма-1. Правда, распадается при этом не фотон, а, скорее, позитроний: ее→γγ, который с фотоном образует смешанное состояние – поляритон.

2. Правильно ли я понимаю, что спектр несвязанной пары в плазме - верхняя сплошная кривая - уже не есть горизонтальная прямая, т.е. плазма ликвидирует вырождение уровней Ландау по положению центров орбиты? Но, ведь в данном параграфе плазмы нет?! В таком случае я самую верхнюю сплошную кривую не понимаю

*Ответ: асимптотика, на которую ложится верхняя дисп. кривая – это горизонтальная прямая.*

1. Имеются две спектральные кривые: нижняя сплошная, учитывающая связанное состояние пары (позитроний), и верхняя пунктирная, учитывающая границу непрерывного спектра позитрония. Хотя я с ними не согласен, в любом случае нужно бы приводить результирующую, совокупную кривую решения уравнерий дисперсии, индуцированные порогами, не аддитивны.

К рассмотрению влияния вырожденной плазмы совокупно с магнитным полем автор обращается в параграфе 3.4. В этом параграфе позитроний не рассматривается, а влияние плазмы учитывается с помощью функции распределения начальных и конечных фотонов, в котором учтены их полученные спектры. Что такое стимулирующее излучение, упомянутое после (3.21)? Основной расчет приведен в Приложении Б, где плазмосодержащая часть амплитуды расщепления фотона рассматривается как двойной Комптон-эффект на распределенных по Ферми электронах плазмы с выходом конечного электрона в тот же термостат. Вероятности расщепления фотона в замагниченной вырожденной плазме представлены графически на Рис. 3.4 и 3.5.

Вопросы.

* 1. Что за порог виден на Рис. 3.4?

1. А где же амплитуды с участием продольных Лэнгмюровских волн?
2. Правда ли, что Приложение Б есть вычисление поляризационнного оператора третьего ранга в плазме и магнитном поле при любом соотношении между энергией и импульсом трех фотонов?
3. Думаю, что представление в виде суммы типа (Б1) может быть верно только в режиме поправки: Либо магнитное поле доминирует над плотностью и температурой, либо наоборот.
4. Откуда формулы (Б.3)? Где по-отдельности вклады диаграмм на рис. Б.1 и Б.2? Формула (Б.3) очень меня смущает. Она имеет ковариантный вид тензора третьего ранга, образованного векторами и тензорами, связанными с полем и импульсами фотонов. Но должны быть еще структуры, связанные с вектором 4-скорости среды. Даже без магнитного поля общее число структур у трехфотонной амплитуды в плазме, если мне не изменяет память, четырнадцать. См. V. de la Incera, E.Ferrer and A.E.Shabad, *Covariant decomposition and polarization selection rules for interaction among photons in a moving medium,* Fortsch. der Physik **32**, 261 (1984) . А в магнитном поле и плазме еще больше.

*Ответ:материал приложения Б основан на работах*

*[99] Chistyakov M. V., Rumyantsev D. A., Stus’ N. S. Photon splitting and Compton scattering in strongly magnetized hot plasma // Phys. Rev. 2012. Vol. D86. P. 043007.*

*[112] Chistyakov M. V., Rumyantsev D. A., Shlenev D. M. Photon splitting in a strongly magnetized, charge-asymmetric plasma // EPJ Web Conf. 2016. Vol. 125. P. 04017 (1–11).*

*[178] Румянцев Д. А., Чистяков М. В. Влияние сильно замагниченной плазмы на процесс расщепления фотона // ЖЭТФ. 2005. Т. 128, № 4. С. 740-751.*

В разделе 3.5 рассмотрено кинематическое влияние , т.е. такое, которое осуществляется только благодаря модификации начальных и конечных состояний трех фотонов, на вероятности расщепления фотона. Коэффициент поглощения фотона за счет вновь открывшегося процесса изображен графически на рисунке.

Что в формуле (3.27) от позитрония? Нет ни расположения порога, ни квадрата его волновой функции, дающей константу его связи с фотоном. Не входят функции *u* и *λ* из (3.18).

*Ответ:влияние позитрония заключено в законе дисперсии. Его влияние на амплитуду процесса в данной работе не учитывалось.*

Досадным упущением диссертанта является то, что он представил лишь интуитивное объяснение играющего важную роль в контексте глав 1 и 2 приема, сводящегося к эффективной замене полюса в его окрестности на дельта-функцию при переходе от соотношения (1.77) к (1.79), а также от (2.3) к (2.4). Очевидно, что такой переход возможен лишь при выполнении не указанных автором специальных условий, и не понятно, удовлетворяет ли им весовая функция, с которой происходит интегрирование в упомянутых формулах. Следствием отсутствия формального вывода стало, -  легко, впрочем, устранимое -  несоблюдение правильной размерности при указанном переходе.

Считаю, что указанный мною выше  огрех с лихвой компенсируется общими достоинствами работы

Вопрос. Часто в работе говорится о релятивистской инвариантности. Но таковая может иметь место только до усреднениями с функциями распределения, поскольку плазма выделяет систему отсчета. Выражения в плазме могут записываться в лоренц-инвариантном виде только при участии 4-скорости среды.