

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Ярославский государственный университет им. П. Г. Демидова  
Научно-образовательный центр  
*“Квантовые процессы в астрофизической среде”*

А. В. Кузнецов, Н. В. Михеев

Электрослабые процессы  
во внешней активной среде

Ярославль 2010

УДК 52: 539.12

ББК В 315

К89

Рецензенты:

Отдел теоретической физики Государственного научного центра РФ  
“Институт физики высоких энергий”, г. Протвино Московской обл.;  
д-р физ.-мат. наук В. Б. Семикоз

**Кузнецов, А. В.** Электрослабые процессы во внешней активной  
**К89** среде: монография / А. В. Кузнецов, Н. В. Михеев; Яросл. гос. ун-т  
им. П. Г. Демидова. – Ярославль: ЯрГУ, 2010. – 336 с.

ISBN 978-5-8397-0785-6

Содержание монографии относится к актуальному научному направлению, находящемуся на стыке квантовой теории поля, физики элементарных частиц, физики плазмы, физики сверхсильных магнитных полей и астрофизики. Представлено систематическое изложение методов расчетов электрослабых процессов, как древесных, так и петлевых, во внешней активной среде – сверхсильном электромагнитном поле и горячей плотной плазме.

Книга может быть полезна студентам и аспирантам, специализирующимся в области теоретической физики и изучившим основы квантовой теории поля и стандартной модели электрослабых взаимодействий, а также специалистам в области квантовой теории поля и физики элементарных частиц, интересующимся проблемами физики квантовых явлений во внешней активной среде.

Работа выполнена в рамках реализации аналитической ведомственной целевой программы Министерства образования и науки РФ “Развитие научного потенциала высшей школы (2009–2010 годы)” (проект № 2.1.1/510) и Федеральной целевой программы “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России” на 2009–2013 годы (Госконтракт № П2323).

Рис. 54. Табл. 2. Библиогр.: 318 назв.

УДК 52: 539.12

ББК В 315

ISBN 978-5-8397-0785-6

© Ярославский  
государственный  
университет, 2010

# Оглавление

<b>Предисловие</b>	<b>9</b>
<b>Введение</b>	<b>11</b>
Обозначения . . . . .	26
<b>1 Точные решения волновых уравнений во внешнем поле</b>	<b>28</b>
1.1. Решение уравнения Дирака во внешнем магнитном поле . . .	28
1.2. Решение для основного уровня Ландау . . . . .	30
1.3. Скрещенное поле . . . . .	31
<b>2 Пропагаторы заряженных частиц в активной среде</b>	<b>32</b>
2.1. Пропагаторы заряженных частиц в магнитном поле . . . . .	34
2.1.1. Пропагаторы в формализме собственного времени Фока	34
2.1.2. Замечание о неинвариантной фазе . . . . .	36
2.1.3. Пропагаторы в разложении по слабому полю . . . . .	37
2.1.4. Пропагаторы в разложении по уровням Ландау . . . .	38
2.1.5. Пропагатор электрона в сильном поле . . . . .	44
2.2. Пропагаторы заряженных частиц в скрещенном поле . . . . .	45
2.3. Вывод пропагатора электрона в магнитном поле из решений уравнения Дирака . . . . .	46
<b>3 Дисперсия частиц во внешней активной среде</b>	<b>52</b>
3.1. Дисперсия в среде: основные определения . . . . .	52
3.2. Поляризационный оператор фотона во внешнем магнитном поле	55
3.3. Обобщённая двухточечная петлевая амплитуда $j \rightarrow f \bar{f} \rightarrow j'$ во внешнем электромагнитном поле . . . . .	61
3.3.1. Магнитное поле . . . . .	61
3.3.2. Скрещенное поле . . . . .	66
3.4. Поляризационный оператор фотона в плазме . . . . .	69
3.5. Массовый оператор электрона в сильном магнитном поле . . .	75

3.5.1.	Дважды логарифмическая асимптотика . . . . .	75
3.5.2.	Однологарифмическая асимптотика массового оператора	79
3.5.3.	Вклад высших уровней Ландау . . . . .	79
3.5.4.	Многопетлевой вклад в массовый оператор электрона .	81
3.6.	Собственно-энергетический оператор нейтрино в плазме . . .	82
3.6.1.	Определение оператора $\Sigma(p)$ в замагниченной плазме .	83
3.6.2.	Дополнительная энергия нейтрино в горячей плотной плазме . . . . .	85
3.6.3.	О “радиационном распаде” нейтрино в плазме . . . . .	90
3.6.4.	О слабом вкладе в дисперсию электрона в плазме . . .	96
3.7.	Собственно-энергетический оператор нейтрино во внешнем магнитном поле . . . . .	100
3.7.1.	Определение оператора $\Sigma(p)$ в магнитном поле . . . . .	100
3.7.2.	Вклад низших уровней Ландау в оператор $\Sigma(p)$ . . . .	105
3.7.3.	Вычисление оператора $\Sigma(p)$ в “слабом” поле . . . . .	110
3.7.4.	Случай умеренно сильного поля . . . . .	114
3.7.5.	Оператор нейтрино $\Sigma(p)$ в скрещенном поле . . . . .	120
3.7.6.	Магнитный момент нейтрино . . . . .	123
3.8.	Собственно-энергетический оператор нейтрино в замагниченной плазме . . . . .	124
3.8.1.	Рассеяние нейтрино на замагниченной плазме . . . . .	125
3.8.2.	Матрица плотности плазменного электрона с фиксированным номером уровня Ландау . . . . .	128
3.8.3.	Дополнительная энергия нейтрино в замагниченной плазме . . . . .	131
3.8.4.	Дополнительная энергия нейтрино в предельных случаях . . . . .	134
3.8.5.	Магнитный момент нейтрино в замагниченной плазме .	136
3.9.	Дисперсионные свойства электрона в аксионной среде . . . . .	143

## 4 Электромагнитные взаимодействия

<b>во внешней активной среде</b>		<b>148</b>
4.1.	Распад фотона на $e^-e^+$ пару в сильном магнитном поле . . . .	148
4.1.1.	Прямой расчёт на основе решений уравнения Дирака .	148
4.1.2.	Расчёт на основе мнимой части петлевой диаграммы .	152
4.2.	Процесс $\gamma \rightarrow e^-e^+$ в скрещенном поле . . . . .	153
4.2.1.	Прямой расчёт на основе решений уравнения Дирака .	153
4.2.2.	Расчёт на основе мнимой части петлевой диаграммы .	158

4.3.	Затухание фотона в результате рождения $e^-e^+$ пары в сильном магнитном поле . . . . .	159
4.4.	Процесс расщепления фотона $\gamma \rightarrow \gamma\gamma$ в сильном магнитном поле . . . . .	168
4.4.1.	Исторический экскурс . . . . .	168
4.4.2.	Кинематика расщепления фотона $\gamma \rightarrow \gamma\gamma$ . . . . .	169
4.4.3.	Амплитуда процесса $\gamma \rightarrow \gamma\gamma$ в сильном магнитном поле . . . . .	171
4.4.4.	Вероятность расщепления фотона . . . . .	173
4.5.	Электромагнитное взаимодействие дираковского нейтрино, обладающего магнитным моментом . . . . .	179
4.5.1.	Магнитный момент дираковского нейтрино – астрофизические проявления . . . . .	179
4.5.2.	Взаимодействие нейтрино с астрофизической средой . . . . .	182
4.5.3.	Вероятность рождения правых нейтрино . . . . .	184
4.5.4.	Вклады компонент плазмы в процессы рассеяния нейтрино . . . . .	188
4.5.5.	Ограничения на магнитный момент нейтрино . . . . .	191
<b>5</b>	<b>Нейтрино-электронные взаимодействия во внешней активной среде</b>	<b>198</b>
5.1.	Процесс $\nu_e \rightarrow e^-W^+$ в сильном магнитном поле . . . . .	198
5.2.	Процесс $\nu \rightarrow \nu e^-e^+$ в сильном магнитном поле . . . . .	203
5.2.1.	Лагранжиан взаимодействия . . . . .	203
5.2.2.	Расчёт дифференциальной вероятности на основе решений уравнения Дирака . . . . .	204
5.2.3.	Вычисление вероятности распада $\nu \rightarrow \nu e^-e^+$ на основе мнимой части петлевой диаграммы . . . . .	206
5.2.4.	Полная вероятность процесса . . . . .	208
5.3.	Процесс $\nu \rightarrow \nu e^-e^+$ в скрещенном поле . . . . .	210
5.3.1.	Исторический экскурс . . . . .	210
5.3.2.	Расчёт дифференциальной вероятности на основе решений уравнения Дирака . . . . .	212
5.3.3.	Полная вероятность процесса . . . . .	218
5.4.	Возможные астрофизические проявления процесса $\nu \rightarrow \nu e^-e^+$ во внешнем магнитном поле . . . . .	222
5.4.1.	Средняя потеря энергии и импульса нейтрино . . . . .	222
5.4.2.	Условие применимости результата, полученного в поле, в присутствии плазмы . . . . .	223
5.4.3.	Возможные астрофизические следствия . . . . .	226

5.5. Нейтрино в сильно замагниченной электрон-позитронной плазме . . . . .	227
5.5.1. Что мы понимаем под сильно замагниченной $e^- e^+$ -плазмой . . . . .	228
5.5.2. Нейтрино-электронные процессы в сильно замагниченной плазме. Кинематический анализ . . . .	229
5.5.3. Вероятность процесса $\nu \rightarrow \nu e^- e^+$ . . . . .	232
5.5.4. Полная вероятность взаимодействия нейтрино с замагниченной электрон-позитронной плазмой . . . .	237
5.5.5. Средние потери энергии и импульса нейтрино . . . . .	240
5.5.6. Интегральное действие нейтрино на замагниченную плазму . . . . .	243
5.5.7. Нейтрино-электронные процессы с учётом вклада возбуждённых уровней Ландау . . . . .	249
<b>6 Нейтрино-фотонные взаимодействия во внешней активной среде</b>	<b>255</b>
6.1. Взаимодействие $\nu\nu\gamma$ во внешней активной среде . . . . .	255
6.1.1. Эффективный лагранжиан $\nu\nu\gamma$ -взаимодействия . . . .	255
6.1.2. Излучение фотона безмассовым нейтрино $\nu \rightarrow \nu\gamma$ . . .	259
6.1.3. Нейтринный распад фотона $\gamma \rightarrow \nu\bar{\nu}$ . . . . .	263
6.2. Комптоноподобное взаимодействие нейтрино с фотонами . . .	268
6.2.1. Амплитуда процесса $\gamma\gamma \rightarrow \nu\bar{\nu}$ в вакууме . . . . .	268
6.2.2. Рассеяние нейтрино в кулоновском поле ядра . . . . .	275
6.2.3. Влияние внешнего поля на процесс $\gamma\gamma \rightarrow \nu\bar{\nu}$ . . . . .	277
6.2.4. Амплитуда и сечение процесса $\gamma\gamma \rightarrow \nu\bar{\nu}$ в модели с нарушенной лево-правой симметрией . . . . .	280
6.2.5. Проявления процесса $\gamma\gamma \rightarrow \nu\bar{\nu}$ в астрофизике . . . . .	282
6.3. Фоторождение нейтрино на ядрах в сильном магнитном поле	284
<b>7 Процессы с участием слабо взаимодействующих псевдоскалярных частиц во внешней активной среде</b>	<b>291</b>
<b>Заключение</b>	<b>303</b>
<b>Литература</b>	<b>305</b>
<b>Предметный указатель</b>	<b>333</b>