

# 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 резонанса на виртуальном фермионе.

---

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

\*\*E-mail: ultrasickdoom@gmail.com

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

# 1 Введение

Нейтронные звёзды, обладая набором экстремальных характеристик, являются природными физическими лабораториями и одними из самых интересных объектов, известных в науке. Особое внимание учёных привлекают радиопульсары и магнитары, обладающие магнитными полями колоссальной напряжённости, к которой очень сложно приблизиться в земных условиях. У магнитного поля имеется характерное значение, называемое критическим,  $B_e = m^2/e \simeq 4.41 \times 10^{13} \text{ Гс}$ <sup>1</sup>, при приближении к которому становится необходимым учитывать квантовые эффекты при движении в нём частиц. В радиопульсарах с магнитными полями порядка  $10^{12} \text{ Гс}$  и магнитарах – до  $10^{16} \text{ Гс}$  [1–3] такие условия выполняются.

Кроме сильных магнитных полей, в магнитосфере как радиопульсаров, так и магнитаров, присутствует достаточно плотная электрон-позитронная плазма. 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 реакции и каналы реакций, которые запрещены в вакууме. Во-вторых, активная среда влияет на амплитуды процессов, в результате чего 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.

В сильном магнитном поле поперечная составляющая импульса фермиона квантуется. В таком случае энергия фермиона определяется так называемым

---

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

уровнем Ландау  $n$  и проекцией импульса вдоль магнитного поля  $p_z$ :

$$E_n = \sqrt{1 + p_z^2 + 2\beta n}, \quad (1)$$

где введено обозначение  $\beta = |e_f|B$ ,  $e_f$  - заряд фермиона. Состояние с  $n = 0$ , в котором фермион движется вдоль силовой линии магнитного поля, называется основным уровнем Ландау.

Можно выделить несколько ситуаций в иерархии параметров среды: магнитного поля, температуры  $T$ , химического потенциала  $\mu$  и энергии фермионов и фотонов, участвующих в реакциях. Предел сильного поля, когда фермионы будут занимать основной уровень Ландау, осуществляется при выполнении условия [4]:

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

где  $n_{e^-}$  и  $n_{e^+}$  - концентрации электронов и позитронов плазмы.

При значениях плотности плазмы  $\rho \geq 10^8$  г/см<sup>3</sup> условие 2 перестаёт выполняться и начинают возбуждаться высшие уровни Ландау виртуальных фермионов, в результате чего они становятся нестабильными.

## 2 Представление решений уравнения Дирака во внешнем магнитном поле.

Для определения волновых функций фермионов в присутствии внешнего магнитного поля, которые являются решением уравнения Дирака, существует несколько возможных подходов (см., например [5–13]). При этом, волновые функции, введенные Джонсоном и Липпманом [5] являются одним из наиболее широко используемых (см. например [14–19]). Эти волновые функции определены как собственные состояния обобщенного оператора импульса. Однако такой подход, будучи примененным к описанию волновых функций фермиона, не обладает необходимыми свойствами, например, симметрией между электронными и позитронными состояниями [20]. Кроме того, использование

данных волновых функций, как было отмечено в работах [21, 22], оказывается в некоторых случаях некорректным, особенно вблизи циклотронных резонансов, так как требуется правильное описание конечной ширины распада промежуточного состояния с учетом зависимости от спина. С другой стороны, волновые функции, используемые Соколовым и Терновым [9] обладают необходимыми свойствами и корректно описывают сечение, полученное исходя из этих функций, вблизи циклотронных резонансов. Данные функции являются собственными функциями оператора магнитного момента  $\hat{\mu}_z$ . Следует отметить, что физические величины, усредненные по спину, совпадают при любом из этих методов описания волновых функций. Более подробный анализ и сравнение этих подходов можно найти, например, в работе [22].

### **3 Представление пропагаторов с учетом мнимой части.**

### **4 Резонансные двухвершинные процессы**

#### **4.1 Резонанс на виртуальном фотоне.**

#### **4.2 Резонанс на виртуальном электро-не (фермионе).**

#### **4.3 Резонанс на виртуальном электро-не и виртуальном фотоне.**

### **5 Сингулярности в фазовых объемах однов-ершинных процессов и методы их устранения.**

### **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] Румянцев Д. А., Чистяков М. В. Влияние фотон-нейтринных процессов на остывание магнитара // ЖЭТФ. 2008. Т. 134, № 4. С. 627–636.
- [5] Johnson M. H., Lippmann B. A. Motion in a constant magnetic field // Physical Review. 1949. Vol. 76, no. 6. P. 828–832.
- [6] Ахиезер А. И., Берестецкий В. Б. Квантовая электродинамика. Москва: Физматгиз, 1959. 656 с.
- [7] Соколов А. А., Тернов И. М. Синхротронное излучение. М.: Наука, 1966. 228 с.
- [8] Melrose D. B., Parle A. J. Quantum electrodynamics in strong magnetic fields. I Electron States // Aust. J. Phys. 1983. Vol. 36. P. 755–774.
- [9] Соколов А. А., Тернов И. М. Релятивистский электрон. Москва: Наука, 1983. 304 с.
- [10] Kuznetsov A. V., Mikheev N. V. Electroweak processes in external electromagnetic fields. New York: Springer-Verlag, 2003. 120 p.

- [11] 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.
- [12] 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).
- [13] Kuznetsov A., Mikheev N. Electroweak processes in external active media. 2013. Vol. 252. P. pp 1–271.
- [14] Canuto V. Quantum processes in strong magnetic fields // *Ann. N. Y. Acad. Sci.* 1975. Vol. 257, no. 1. P. 108–126.
- [15] Harding A. K., Daugherty J. K. Cyclotron Resonant Scattering and Absorption // *Astrophys. J.* 1991. Vol. 374. P. 687–699.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] Melrose D. B. Quantum kinetic theory for unmagnetized and magnetized plasmas // *Rev. Mod. Plasma Phys.* 2020. Vol. 4, no. 8.
- [20] Melrose D. B., Parle A. J. Quantum electrodynamics in strong magnetic fields. I Electron States // *Aust. J. Phys.* 1983. Vol. 36. P. 755–774.
- [21] Graziani C. Strong-Field Cyclotron Scattering. I. Scattering Amplitudes and Natural Line Width // *Astrophys. J.* 1993. Vol. 412. P. 351–362.

- [22] 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.