

ПОЧТИ БЕЗМАССОВЫЕ ПСЕВДОСКАЛЯРНЫЕ ЧАСТИЦЫ И ПОЛЯРИЗАЦИЯ СВЕТА ЗВЕЗД

О.В.Васильев, В.В.Зильберг

Существование почти безмассовых псевдоскалярных частиц может приводить к поляризации света звезд. На основе имеющихся поляриметрических данных получены ограничения на эффективную константу связи.

Во многих работах (см., например, обзор ¹ и имеющиеся там ссылки) обсуждалось возможное существование безмассовых или очень легких псевдоскалярных голдстоуновских частиц. Их эффективное взаимодействие с электромагнитным полем имеет вид ² :

$$L = \frac{1}{M} (\mathbf{E} \cdot \mathbf{V})A,$$

где A – псевдоскалярное, \mathbf{E} – электрическое, \mathbf{V} – магнитное поля. Сильные ограничения на константу связи M вытекают из рассмотрения потерь энергии звездами. Самым надежным из них считается "солнечное" ³: $M > 3 \cdot 10^8$ ГэВ для $m < 1$ кэВ. Результаты лабораторных экспериментов слабее; так, полученные ограничения ⁴ на константу связи ариона ¹ с некоторыми фермионами могут соответствовать $M > 10^6$ ГэВ. Предложены лабораторные эксперименты ⁵ по поиску псевдоскаляров, основанные на конверсии фотон-псевдоскаляр в магнитном поле, с чувствительностью к M на уровне $10^8 \dots 10^{11}$ ГэВ. Амплитуда перехода $\gamma - A$ равна

$$V = i \frac{|\mathbf{B}_\perp|}{M},$$

где \mathbf{B}_\perp – компонента вектора \mathbf{B} , перпендикулярная направлению распространения света. Как видно из (1), в этом процессе участвует лишь поляризация света, параллельная \mathbf{B}_\perp .

Прямые наблюдения ^{6,7} показывают, что в межзвездной среде свет звезд поляризуется. В то же время есть доказательства существования крупномасштабного галактического магнитного поля с $F \approx 3 \cdot 10^{-6}$ Гс ^{7,8}. Рассмотрим осцилляции $\gamma - A$ в межзвездной среде:

$$i \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} a_\gamma \\ a_A \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_\gamma & V \\ V^* & V_A \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_\gamma \\ a_A \end{pmatrix}.$$

Здесь a_γ – амплитуда состояния фотона с поляризацией, параллельной \mathbf{B}_\perp , a_A – амплитуда псевдоскалярного состояния, V_γ соответствует рассеянию фотона вперед в межзвездной среде. $V_A \approx \frac{m^2}{2\omega}$, где m – масса псевдоскаляра, ω – энергия фотона. Если рассеяние света средой не выделяет какую-либо поляризацию, то при начальных условиях $a_\gamma(0) = 1, a_A(0) = 0$ степень линейной поляризации света на расстоянии l от звезды будет равна

$$P = \frac{1 - |a_\gamma(l)|^2}{1 + |a_\gamma(l)|^2} \approx \frac{1}{8} \left[\frac{V_B}{W} \sin(Wl) \right]^2,$$

$$W = \frac{1}{2} \sqrt{(V_\gamma - V_A)^2 + V_B^2}, \quad V_B = 2 \frac{B_\perp}{M}.$$

Рассмотрим вначале случай $m = 0$ (арийон). Основной вклад в рассеяние вперед дают ⁹ атомы водорода и свободные электроны:

$$V_\gamma = V_H + V_e; \quad V_H = -\frac{2\pi e^2}{m_e} \frac{n_H \omega}{\omega_0^2 - \omega^2}, \quad V_e = \frac{2\pi e^2}{m_e} \frac{n_e}{\omega}.$$

Здесь n_H и n_e — концентрации атомов водорода и электронов, ω — энергия фотона, $\omega_0 = 13,6$ эВ. Заметим, что V_H и V_e имеют разные знаки. Следовательно, существует такая частота ω_{max} , при которой $V_\gamma = 0$ и осцилляции могут происходить с максимальной амплитудой. Например, для среднегалактических значений $n_H = 1 \text{ см}^{-3}$ и $n_e = 0,03 \text{ см}^{-3}$, $\omega_{max} = 2,3$ эВ (видимый свет).

В настоящее время поляризацию света в межзвездной среде объясняют рассеянием на несферических пылинках, ориентированных в галактическом магнитном поле⁷. Пылинки поляризуют свет параллельно направлению магнитного поля, а псевдоскаляры, наоборот, перпендикулярно. В простейшем случае одновременного воздействия результат по модулю равен разности эффектов и направлен в сторону большего из них. Согласовать наблюдаемую поляризацию света звезд с независимыми данными о направлении магнитного поля^{6, 7}, видимо, проще с помощью пылинок. Но для полноты следует заметить, что наше рассмотрение применимо и к скалярному полю φ с эффективным взаимодействием

$$L_s = \frac{1}{M_s} (\mathbf{E} \cdot \mathbf{E} - \mathbf{B} \cdot \mathbf{B}) \varphi,$$

при котором осцилляции $\gamma - \varphi$ поляризуют свет параллельно направлению магнитного поля. Интересующие нас значения M_s не могут быть полностью исключены полученными ранее сильными ограничениями⁹ на константу связи φ с электронами и u -, d -кварками.

Полная картина поляризации с включением пылинок и (псевдо) скаляров сложна и зависит от многих параметров, определенных с большими ошибками. Приведем лишь ограничение, полученное из анализа данных по ближним звездам⁶. Их свет — в пределах ошибок — не поляризован. Примем, что (псевдо) скалярная поляризация не превышает ошибок измерений. Считая, что $B = 3 \cdot 10^{-6}$ Гс, $n_H = 0,1 \text{ см}^{-3}$ ^{7, 8}, для $n_e/n_H \leq 10\%$ (среднегалактическая величина — 3%), получим:

$$V_B < 6 \cdot 10^{-3} \text{ пс}^{-1}, \quad M, M_s > 10^{10} \text{ ГэВ}.$$

В предположительно худшем случае ($n_e = 0,03 \text{ см}^{-3}$) $M, M_s > 2 \cdot 10^9$ ГэВ.

Вышеприведенные рассуждения справедливы для $qL \ll 1$ (ср. *Van Bibber*⁵), где $q = m^2/2\omega$ — переданный магнитному полю импульс, m — масса (псевдо) скаляра, ω — энергия фотона, L — характерная длина неоднородности поля; в нашем случае $L \approx 10^2$ пс^{7, 8} и $m < 10^{-12}$ эВ.

В заключение заметим, что галактическое магнитное поле может привести к заметным эффектам и в других случаях. В частности, существование магнитного момента нейтрино^{10, 11} приводило бы к осцилляциям нейтрино из наблюдаемых левых в стерильные правые. При магнитном моменте $\mu = 10^{-10} \mu_B$ (такая величина привлекается в¹⁰ для объяснения результатов опыта Дэвиса) длина осцилляций была бы равна $l = 2\pi(\mu B)^{-1} \approx 20$ пс. Это же относится и к случаю существования электрического дипольного момента нейтрино¹².

Авторы глубоко благодарны А.А.Ансельму, Д.А.Варшаловичу, А.З.Долгинову, Н.Г.Козмирову, В.А.Кузьмину, И.И.Ткачеву и Н.Г.Уральцеву за информативные и стимулирующие обсуждения.

Литература

1. Ансельм А.А., Уральцев Н.Г. В кн.: Физика элементарных частиц. Материалы XX зимней школы. Л.: ЛИЯФ, 1985, с.3.
2. Kaplan M. Nucl. Phys., B, 1985, 260, 215; Srednicky M. Nucl. Phys. B, 1985, 260, 689.
3. Raffelt G.G. Phys. Rev., D, 1986, 33, 897.

4. Александров Е.Б., Ансельм А.А., Павлов Ю.В., Умарходжаев Р.М. ЖЭТФ, 1983, 85, 1899; Ансельм А.А., Неронов Ю.И. ЖЭТФ, 1985, 88, 1946; Воробьев П.В., Гитарц Я.И. Препринт ИЯФ 87-138, Новосибирск, 1987.
5. Ансельм А.А. Ядерная физика, 1985, 42, 1480; Van Bibber L. et al. Phys. Rev. Lett., 1987, 59, 759; Maiani L., Petronzio R., Zavvatini E. CERN-TH. 4411/86; Anselm A.A. Fermilab PUB 87/45-T; Moskowitiz B.E. Nucl. Instr. and Meth., 1988, A264, 98.
6. Serkowski K., Mathewson D.S., Ford V.L. Astrophys. J., 1975, 196, 261.
7. Спитцер Л. мл. Физические процессы в межзвездной среде. М.: Мир, 1981.
8. Паркер Е. Космические магнитные поля. М.: Мир, 1982, т. 2.
9. Кузьмин В.А., Ткачев И.И., Шапошников М.Е. Письма в ЖЭТФ, 1982, 36, 49.
10. Волошин М.Б., Высоцкий М.И., Окунь Л.Б. ЖЭТФ, 1986, 91, 754.
11. Kuyldjev A. V. Nucl. Phys. B, 1984, 243, 387.
12. Окунь Л.Б. Ядерная физика, 1986, 44, 847.

Институт ядерных исследований
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
7 июня 1988 г.