

Резонансное рождение электрон-позитронных пар в полярной шапке магнитара

Дмитрий Румянцев

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

22 ноября 2011

Физика фундаментальных взаимодействий, Москва, ИТЭФ,
21-25 ноября 2011

В соавторстве с Н.С. Стусь

$$\text{Магнитары } B \sim 10^{14} - 10^{16} \text{ Гс} \gg B_e,$$
$$B_e = m^2/e \simeq 4.41 \times 10^{13} \text{ Гс.}$$

Стандартный механизм: рождение e^+e^- плазмы за два этапа
(Beloborodov A. M., Thompson S. 2007)

i) рождение жесткого γ кванта комптоновским механизмом,

$$\gamma e \rightarrow e\gamma, \omega' > 2m;$$

ii) набор “питч”-угла, $\omega'^2 \sin^2 \theta' > 4m^2$ и рождение e^+e^- пары,
 $\gamma \rightarrow e^+e^-$ (Клепиков Н. П. 1954).

Проблема: захват фотона магнитным полем при $\omega' > 2m$
(Шабад А.Е. 1988).

Решение: процесс $\gamma + e^- \rightarrow e^- + e^+e^-$!!!

Постановка задачи.

Рассматриваем небольшую окрестность полярной шапки магнитара, где $\vec{\mathcal{E}} \uparrow \downarrow \vec{B}$, $\vec{B} = B\vec{n}_z$ и $|\vec{\mathcal{E}}| \ll |\vec{B}|$.

Иерархия параметров

$$T^2 \ll m^2 \ll eB \ll E^2.$$

Все реальные фермионы находятся на основном уровне Ландау.

Процессы первого порядка $e \rightarrow e + all$ кинематически закрыты.

Обозначения:

$$\gamma + e^- \rightarrow e^- + e^+ + e^-$$

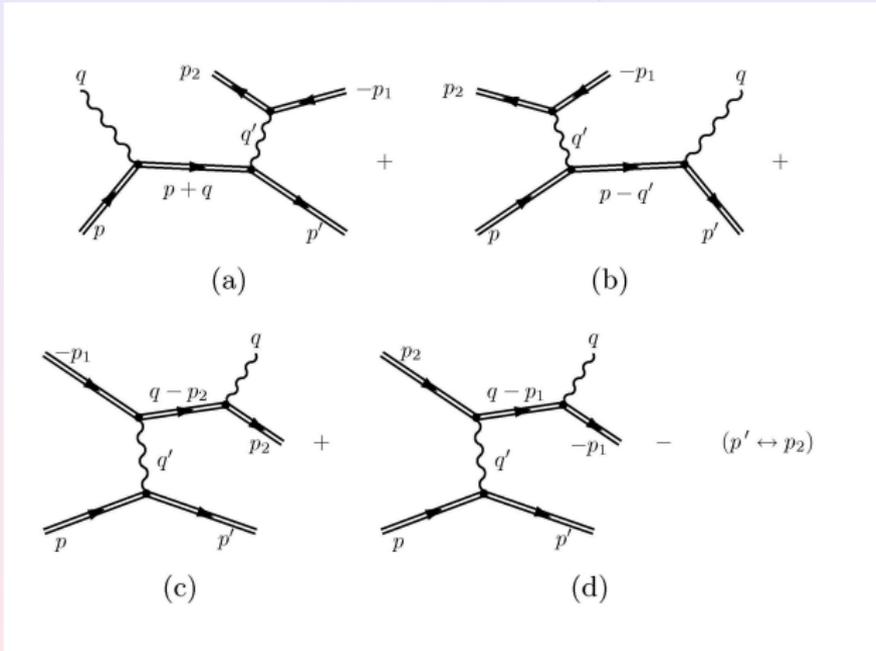
$$(q + p)_\mu = (p' + p_1 + p_2)_\mu, \quad \mu = 0, 2, 3,$$

q'^μ – виртуальный фотон.

$$(ab)_\perp = a_x b_x + a_y b_y, \quad (ab)_\parallel = a_0 b_0 - a_z b_z, \quad (a\varphi b) = a_y b_x - a_x b_y.$$

Диаграммы

Диаграммы Фейнмана для процесса $\gamma + e^- \rightarrow e^- + e^+ e^-$.



Амплитуда процесса $\gamma + e^- \rightarrow e^- + e^+e^-$

$$\begin{aligned}
 \mathcal{M} \simeq & -i \frac{2\sqrt{2}e^3 m^2}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{dq'_x}{q'^2 - \mathcal{R} + i\mathcal{I}} \exp \left[-\frac{2q'^2_{\perp} + q'^2_{\parallel}}{4eB} \right] \\
 & \exp \left[-i \frac{q_x(p_y + p'_y) - q'_x(p_y + p'_y + p_{1y} - p_{2y})}{2eB} \right] \exp \left[-\frac{i(q\varphi q')}{2eB} \right] \\
 & \frac{1}{n!} \left(\frac{(qq')_{\perp} - i(q\varphi q')}{2eB} \right)^n \frac{(pq')_{\parallel} [(pq)_{\parallel} + (p'q)_{\parallel}]}{\sqrt{q'^2_{\parallel} q'^2_{\parallel} [(pp')_{\parallel} + m^2]}} \\
 & \frac{1}{q'^2_{\parallel} + 2(pq)_{\parallel} - 2eBn + i(E + \omega)\Gamma_n} \Bigg|_{\substack{q'^{\alpha}_{\parallel} = p^{\alpha}_{1\parallel} + p^{\alpha}_{2\parallel} \\ q'_y = p_{1y} + p_{2y}}} - (p' \leftrightarrow p_2).
 \end{aligned}$$

Возможны резонансы!

- Поглощение электрона, Γ_n . Основной вклад $e_1 \rightarrow \gamma + e_0$.

$$(E + \omega)\Gamma_1 \simeq \alpha eB(1 - e^{-1}).$$

- Поглощение фотона

$$\mathcal{I} \simeq -\frac{4m^2 \alpha eB e^{-q_{\perp}^2/2eB}}{\sqrt{q_{\parallel}^2(q_{\parallel}^2 - 4m^2)}}.$$

Коэффициент поглощения электрона в равновесном фотонном газе температуры T

$$W = \int \frac{\delta^3(\dots)|\mathcal{M}|^2}{2^5(2\pi)^6 \omega E E' E_1 E_2} \frac{d^3q}{e^{\omega/T} - 1} dp'_y dp'_z dp_{1y} dp_{1z} dp_{2y} dp_{2z}.$$

В окрестности резонансов

$$\frac{1}{(q_{\parallel}^2 + 2(pq)_{\parallel} - 2eB)^2 + (E + \omega)^2 \Gamma_1^2} \simeq \\ \simeq \frac{\pi}{(E + \omega) \Gamma_1} \delta(q_{\parallel}^2 + 2(pq)_{\parallel} - 2eB).$$

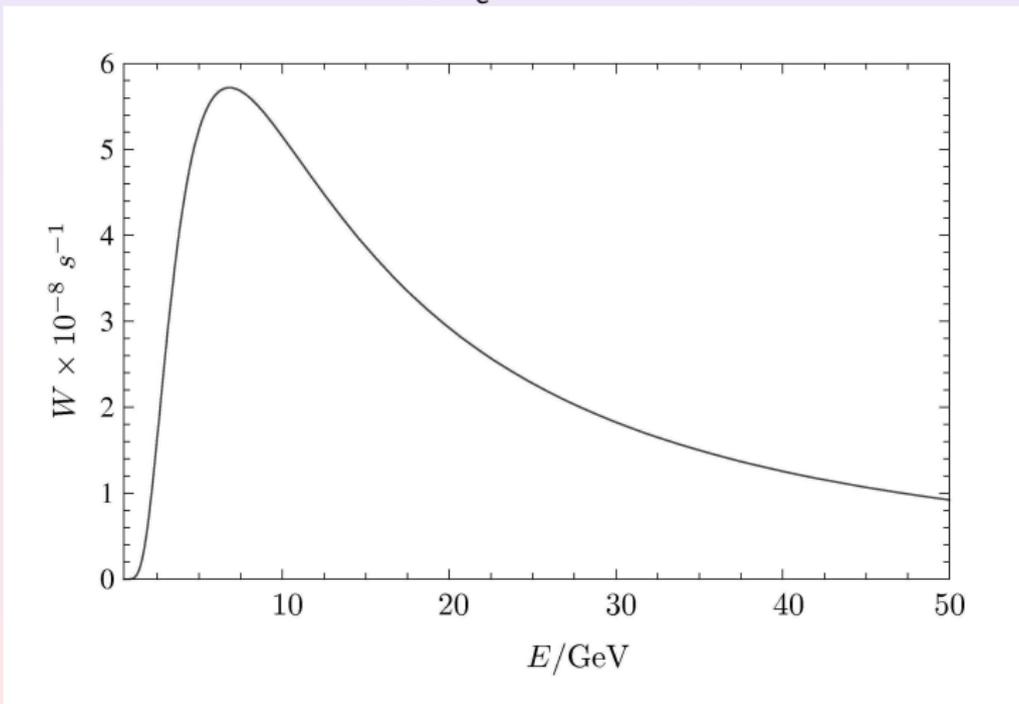
$$\frac{1}{(q'^2 - \mathcal{R})^2 + \mathcal{I}^2} \simeq \frac{\pi}{\mathcal{I}} \delta(q'^2 - \mathcal{R}).$$

Итог:

$$W \simeq \frac{\alpha}{2} T \frac{B}{B_e} \left(\frac{m}{E}\right)^2 \ln \left(1 - e^{-\frac{eB}{2ET}}\right)^{-1}.$$

Коэффициент поглощения электрона

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



- поглощение фотона электроном с рождением электрона на первом уровне Ландау, $e_0 + \gamma \rightarrow e_1$, $W_{\gamma+e_0 \rightarrow e_1}$;
- переход электрона с первого уровня на нулевой с испусканием жесткого γ -кванта, $e_1 \rightarrow e_0 + \gamma$,
 $\Gamma_{e_1 \rightarrow e_0 + \gamma} / \Gamma_{e_1 \rightarrow all} \simeq 1$;
- рождение $e^+ e^-$ пары жестким фотоном, $\gamma \rightarrow e^+ e^-$,
 $\Gamma_{\gamma \rightarrow e^+ e^-} / \Gamma_{\gamma \rightarrow all} \simeq 1/2$.

Итог

$$W_{\gamma+e \rightarrow e+e^+e^-} \simeq W_{\gamma+e_0 \rightarrow e_1} / 2,$$

$$W_{\gamma+e_0 \rightarrow e_1} \simeq \alpha T \frac{B}{B_e} \left(\frac{m}{E} \right)^2 \ln \left(1 - e^{-\frac{eB}{2ET}} \right)^{-1}.$$

Длина свободного пробега электрона на начальной стадии ускорения $\ell \simeq 57$ см. $\ll h \simeq 10^4$ см. – величина зазора.
Изменение числа электронов в потоке при $E \sim 10^7$ м

$$N \simeq N_0 \exp \left[- \int_0^h dx W \right] \simeq 0.99 N_0,$$

где N_0 – начальное число электронов в потоке.

- Рассмотрен резонансный комтоноподобный механизм рождения электрон-позитронных пар вблизи полярной шапки магнитосферы магнитара.
- Выяснено, что основной вклад в амплитуду процесса дают области циклотронных резонансов.
- Установлено, что наиболее эффективное рождение пар будет иметь место на начальной стадии ускорения электронов во внутреннем зазоре.
- Показано, что рассмотренный механизм может быть достаточно эффективным для производства e^+e^- плазмы.