

# О резонансном рождении аксионов в магнитосфере магнитара

Дмитрий Румянцев

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

26 ноября 2009

Физика фундаментальных взаимодействий, Москва, ИТЭФ,  
23-27 ноября 2009

В соавторстве с Н.В. Михеевым и Ю.Е. Школьниковой

Базируется на работе: "О резонансном рождении аксионов в магнитосфере магнитара" *Письма в ЖЭТФ Т.90. 2009.*

**Аксион – вероятный кандидат на роль холодной темной материи**

Масштаб нарушения симметрии Печчеи – Куинн

$$f_a \gtrsim 10^8 \text{ ГэВ (PDG 2008)}$$

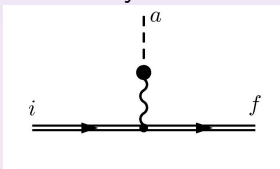
**Аксионы очень трудно детектировать**

В экстремальных условиях (магнитары) возможна эффективная генерация аксионов.  $B \sim 10^{14} - 10^{16} \text{ Гс} \gg B_e$ ,

$$B_e = m^2/e \simeq 4.41 \times 10^{13} \text{ Гс.}$$

$n \gg n_{GJ}$ ,  $n_{GJ}$  – концентрация заряда Голдрайха-Джулиана.

Диаграмма Фейнмана для процесса  $i \rightarrow f + a$ . Двойные линии означают, что влияние внешнего поля на начальное и конечное состояния учтено точно.



**Возможен резонанс!**

Вблизи резонанса – процесс комптоновского рассеяния реликтовых фотонов на электронах и позитронах магнитосферы магнитара (В.В. Скобелев ЖЭТФ Т.132. С.1121. 2007)

# Эффективный лагранжиан и амплитуда процесса $i \rightarrow f + a$

## Эффективный лагранжиан $\gamma a$ взаимодействия

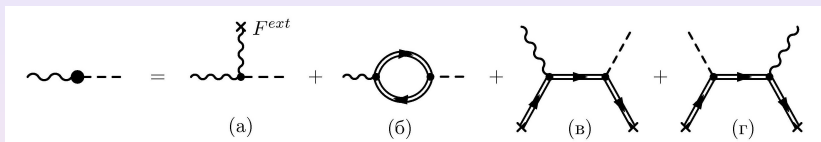
$$\begin{aligned}\mathcal{L}_{a\gamma}(x) &= g_{a\gamma} \tilde{F}^{\mu\nu} [\partial_\nu A_\mu(x)] a(x) + \\ &+ \frac{g_{af}}{2m_f} [\bar{\psi}_f(x) \gamma^\mu \gamma_5 \psi_f(x)] \partial_\mu a(x) + \\ &+ Q_f [\bar{\psi}_f(x) \gamma^\mu \psi_f(x)] A_\mu(x)\end{aligned}$$

Константы связи  $g_{a\gamma} = \alpha \xi / 2\pi f_a$ ,  $g_{af} = C_f m_f / f_a$ ,  $\xi, C_f \sim 1$   
Амплитуда

$$\mathcal{M}_{i \rightarrow f}^a = -\frac{\mathcal{M}_{if}^\gamma \mathcal{M}_{\gamma \rightarrow a}}{q'^2 - \mathcal{P}(\varepsilon)(q')}, \quad \mathcal{M}_{\gamma \rightarrow a} = i \bar{g}_{a\gamma}(\varepsilon \tilde{F} q')$$

$\tilde{F}^{\mu\nu}$  – дуальный тензор внешнего электромагнитного поля

# Эффективная константа $\gamma a$ взаимодействия



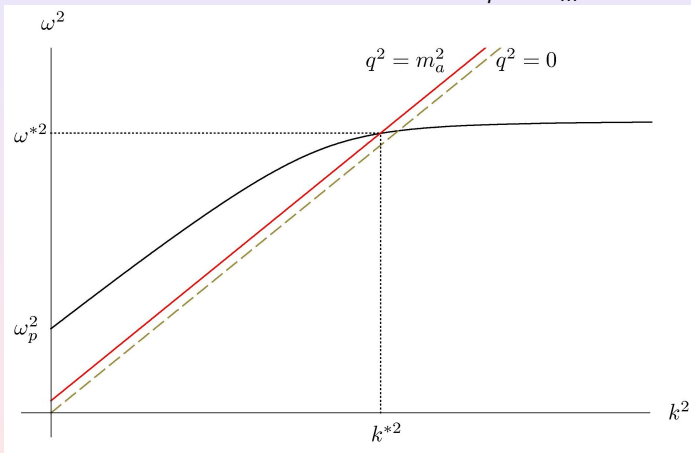
$$\bar{g}_{a\gamma} = g_{a\gamma} + \Delta g_{a\gamma}^B + \Delta g_{a\gamma}^{pl}$$

Л.А. Василевская, Н.В. Михеев, О.С. Овчинников ЯФ Т.62.  
С.1662. 1999 Н.В. Михеев, Е.Н. Нарынская Mod. Phys. Lett. A  
V.21. P.433. 2006

$g_{a\gamma}$  и  $\Delta g_{a\gamma}^{pl}$  не учтены в работе В.В. Скобелева

# Дисперсия фотона и аксиона

Условие возникновения резонанса  $\omega_p^2 = \frac{4\pi\alpha n}{m} \geq m_a^2$



В активной среде фотон нестабилен

$$\mathcal{P}(\varepsilon) = \Re - i\Im$$

$$\Im = \omega' \left( e^{\omega'/T} - 1 \right) \Gamma_{cr},$$

$$\Gamma_{cr} = \sum_{i,f} \int |\mathcal{M}_{if}^\gamma|^2 d\Phi_{if},$$

(Weldon, *Phys Rev D* 1983)

$d\Phi_{if}$  – элемент фазового объема состояний  $i$  и  $f$  для процесса  
 $i \rightarrow f + \gamma$

Аксионная светимость за счет всевозможных реакций с участием частиц плазмы

$$Q = \int \frac{d\Phi' |\mathcal{M}_{\gamma \rightarrow a}|^2}{e^{\omega'/T} - 1} \frac{\Im}{(q'^2 - \Re)^2 + \Im^2}.$$

$$d\Phi' = \frac{d^3 k'}{(2\pi)^3 2\omega'} - \text{фазовый объем аксиона.}$$

В окрестности резонанса

$$\frac{\Im}{(q'^2 - \Re)^2 + \Im^2} \simeq \pi \delta(q'^2 - \Re).$$

В резонансном случае  $Q$  **однозначно** выражается через  $Q_{\gamma \rightarrow a}$



- Слабо замагниченная плотная плазма,  $m_a^2 \ll eB \ll T^2, \mu^2$

$$Q = \frac{\bar{g}_{a\gamma}^2 (eB)^2}{48\pi^2 \alpha} \frac{(k^*)^3}{e^{k^*/T} - 1}, \quad \omega^2(\vec{k}^*) = m_a^2 + k^{*2}$$

(Михеев и др. *Phys. Rev. D* V.58. P.055008. 1998)

- Сильно замагниченная плазма  $eB \gg m^2, \mu^2 \gg T^2$ 
  - Масса аксиона – наименьший параметр задачи,  $\omega_p, T \gg m_a \sim 10^{-5}$  эВ

$$Q \simeq \frac{g_{a\gamma}^2 (eB)^2}{16\pi^2 \alpha} \omega_p^3 \frac{(1+\eta)^{3/2}}{\eta^{5/2}} \left( \exp \left[ \frac{\omega_p}{T} \sqrt{1 + \frac{1}{\eta}} \right] - 1 \right)^{-1}.$$

- $\omega_p \gg T \sim m_a$

$$Q \simeq \frac{g_{a\gamma}^2 (eB)^2}{16\pi^2 \alpha} T m_a^2 e^{-\omega_p/T}.$$

$$\frac{dN}{dt dV} = \int \frac{d\Phi'}{\omega'} \frac{|\mathcal{M}_{\gamma \rightarrow a}|^2}{e^{\omega'/T} - 1} \frac{\Im}{(q'^2 - \Re)^2 + \Im^2},$$



$$\begin{aligned} \frac{dN}{dt dV} &\simeq \frac{g_{a\gamma}^2 (eB)^2}{16\pi^2 \alpha} \omega_p^2 \frac{1 + \eta}{\eta^2} \times \\ &\times \left( \exp \left[ \frac{\omega_p}{T} \sqrt{1 + \frac{1}{\eta}} \right] - 1 \right)^{-1}, \quad \omega_p, T \gg m_a, \end{aligned}$$



$$\frac{dN}{dt dV} \simeq \frac{g_{a\gamma}^2 (eB)^2}{16\pi^2 \alpha} \frac{T m_a^2}{\omega_p} e^{-\omega_p/T}, \quad \omega_p \gg T \sim m_a.$$

# Число аксионов, рождаемых реликтовым излучением

Параметры  $T \sim m_a \sim 10^{-3}$  эВ,  $B = 100B_e$

Резонас возможен при  $n_{min} \sim 10^{15}$  см<sup>-3</sup>

$$\frac{dN}{dVdt} \sim 10^{10} \frac{1}{\text{см}^3 \text{ сек}}$$

Для магнитосферы магнитара  $V \sim 10^{19}$  см<sup>3</sup>,

$$\frac{dN}{dt} \sim 10^{29} \frac{1}{\text{сек}}$$

Для числа магнитаров в Галактике  $\sim 10^6$ , что за  $\sim 10^9$  лет они произведут  $\sim 10^{51}$  аксионов. Концентрация аксионов в Галактике должна быть

$$n_a \sim 10^{-21} \text{ см}^{-3} \ll n_b \sim 10^{-7} \text{ см}^{-3}$$

- Рассмотрен процесс рождения аксионов в реакции общего вида:  $i \rightarrow f + a$ . Показано, что вычисление аксионной светимости за счет такого процесса сводится, в случае резонанса, к вычислению светимости за счет перехода фотон  $\rightarrow$  аксион.
- Найдено количество аксионов, рождаемых в магнитосфере магнитара равновесным реликтовым излучением.
- Показано, что даже при концентрации плазмы  $n \sim 10^{15} \text{ см}^{-3}$  данный механизм **не эффективен** для производства холодной скрытой массы в противовес утверждению в работе (В.В. Скобелев ЖЭТФ 2007).