

# Расщепление фотонов и рождение электрон-позитронных пар в магнитосфере магнитаров

Я.Н. Истомин, Д.Н. Собынин

# Основные параметры АХР и SGR

	$P$ , сек	$dP/dt$ , $10^{-11}$ сек/сек	$B$ , $10^{14}$ Гаусс	$dE/dt$ , $10^{33}$ эрг/сек	$\tau_c$ , $10^3$ лет	$T$ , кэВ	$\Gamma$	$d$ , кпк	$L_x$ (2–10) кэВ, $10^{35}$ эрг/сек
SGR 1900+14	5.168	~7.783	6.4	22	1.1	0.43	~1.98	12–15	1.8–2.8
SGR 1627-41	6.413	...	...	...	...	...	~2.95	11	~0.039
SGR 1806-20	7.555	54.9	21	51	0.22	0.65	1.36	15.1	4.4
SGR 0526-66	8.047	6.5	7.3	4.9	2.0	0.53	3.14	50	2.1
SGR 1801-23	...	...	...	...	...	...	...	...	...
XTE J1810-197	5.539	0.81	1.7	1.2	17	0.68	3.75	~5	~0.39
1E 1048.1-5937	6.452	~2.70	4.2	3.9	3.8	0.623	1.04	2.7	0.054
AX J1845-0258	6.971	...	...	...	...	2.0	1.0	<20	<0.24
1E 2259+586	6.978	0.048	0.59	0.056	230	0.411	4.10	3.0	0.18
CXOU J010043.1-721134	8.020	1.88	3.9	1.4	6.8	0.38	2.0	57	~0.78
4U 0142+61	8.688	0.196	1.3	0.12	70	0.395	3.62	>2.5	>0.53
CXO J164710.2-455216	10.610	<20	<10	<7	>0.8	0.61	...	~5	~0.02
1RXS J170849.0-400910	10.999	1.945	4.7	0.57	9.0	0.456	2.83	~8	~1.9
1E 1841-045	11.775	4.155	7.1	0.99	4.5	0.44	2.0	~6.7	~1.4

# Характеристики магнитаров

1. Сверхсильное магнитное поле на поверхности

$$B \simeq 10^{14} - 10^{15} \text{ Гаусс}$$

5. Энергия магнитного поля

$$W_B = \int \frac{B^2}{8\pi} dV = 10^{45} \left( \frac{B_0}{10^{14} \text{ Гаусс}} \right)^2 \left( \frac{R}{10 \text{ км}} \right)^3 \text{ эрг}$$

превышает энергию вращения

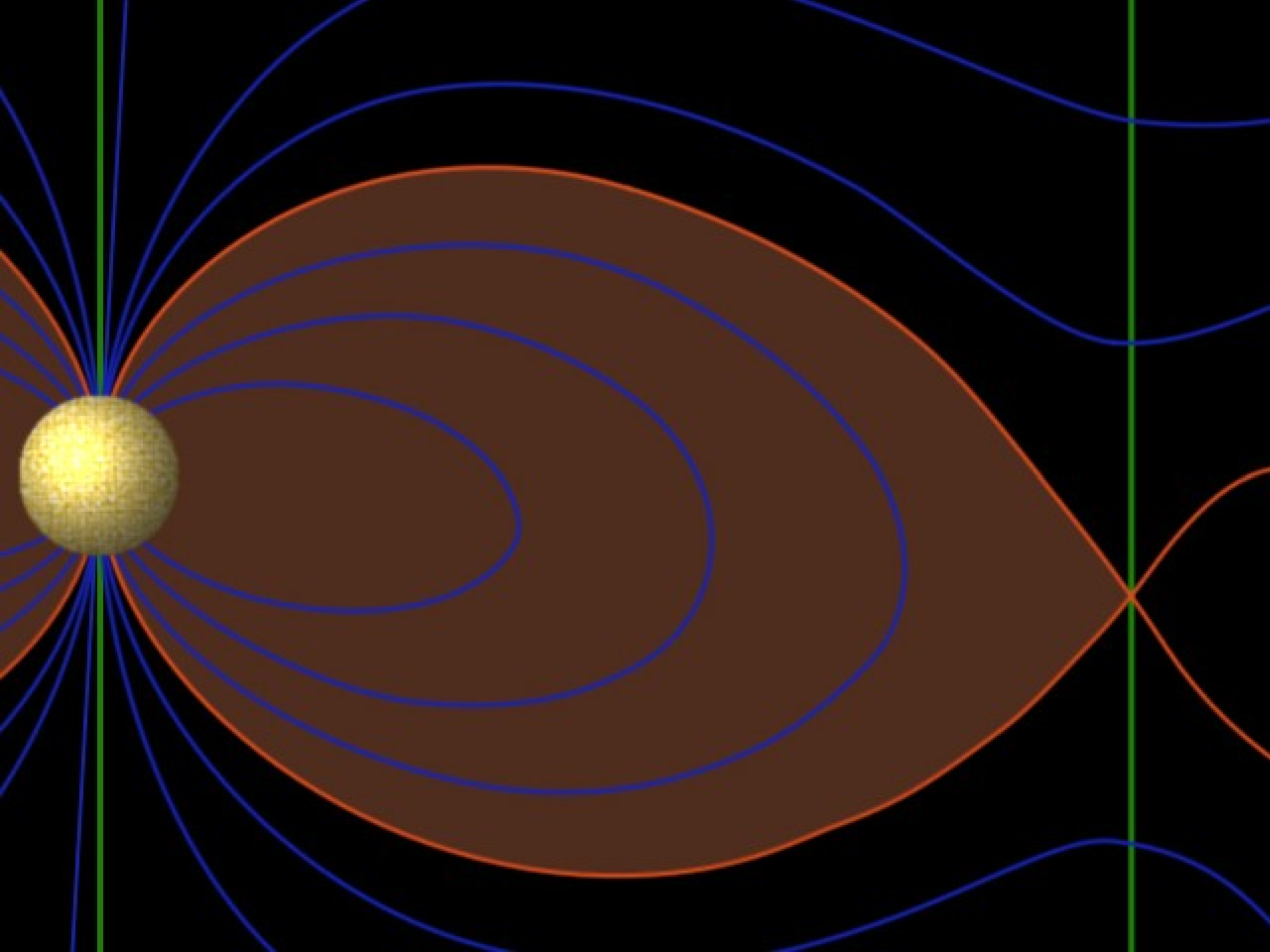
$$W_R = 2\pi^2 I P^{-2} = 2 \cdot 10^{44} \left( \frac{I}{10^{45} \text{ г см}^2} \right) \left( \frac{P}{10 \text{ сек}} \right)^{-2} \text{ эрг}$$

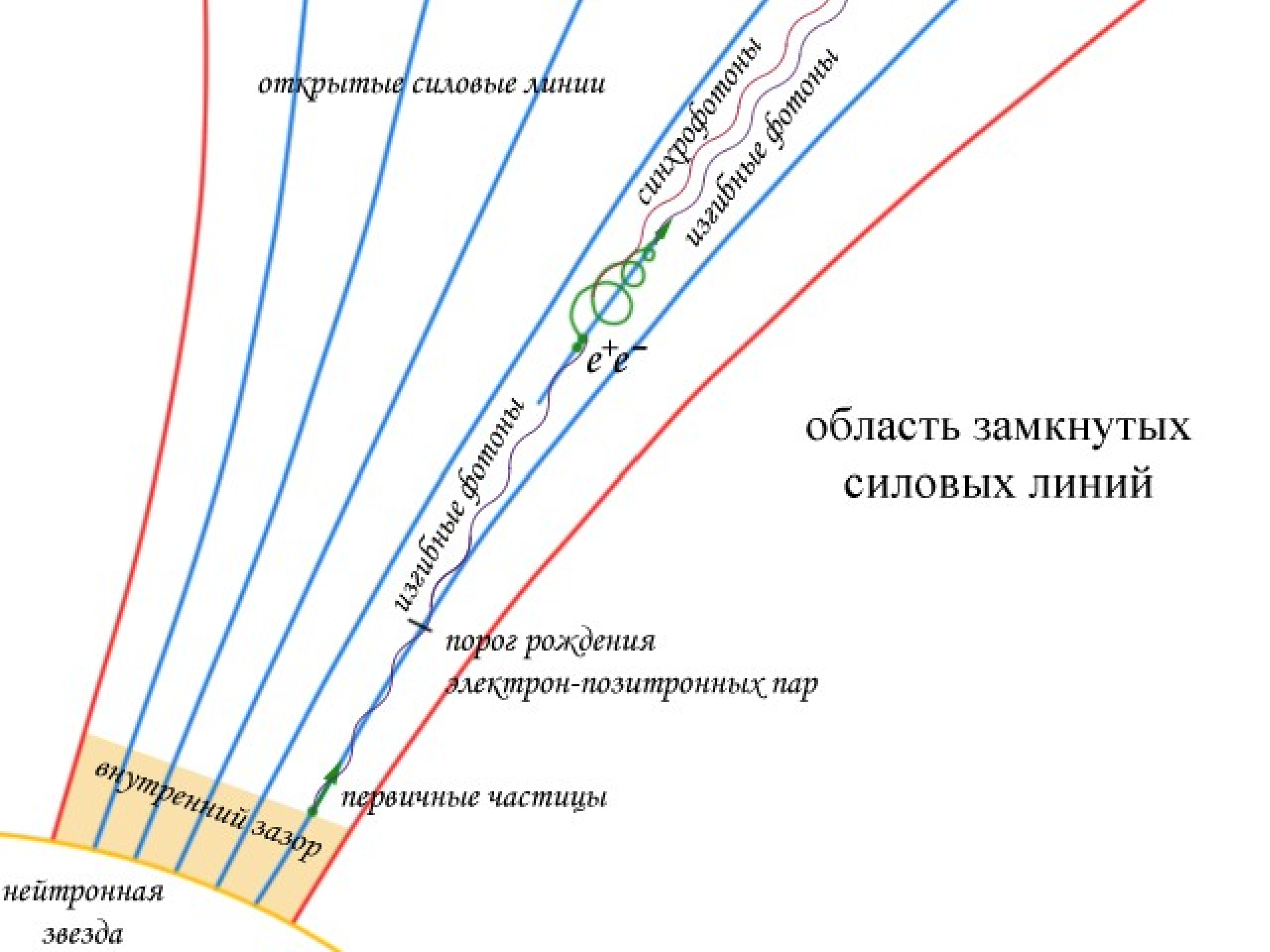
3. Светимость в рентгеновском диапазоне

$$L_x \simeq 10^{35-36} \text{ эрг/сек}$$

превышает энергетические потери за счёт замедления вращения

$$E_R = 4\pi^2 I P^{-3} \dot{P} \simeq 10^{32-33} \text{ эрг/сек}$$





открытые силовые линии

синхротроны  
изгибные фотоны

$e^+e^-$

область замкнутых  
силовых линий

изгибные фотоны

порог рождения  
электрон-позитронных пар

первичные частицы

внутренний зазор

нейтронная  
звезда

# Расщепление фотона в сверхсильном магнитном поле

В не слишком сильных полях и при малых энергиях фотона разрешены процессы распада (Адлер и др., 1970, Адлер, 1971)

$$\perp \rightarrow \parallel \parallel \quad \parallel \rightarrow \perp \parallel \quad \perp \rightarrow \perp \perp$$

Считалось, что расщепление могло бы являться фактором подавления радиоизлучения магнитаров (Хардинг, Баринг, Гонтье, 1997; Баринг, Хардинг, 2001)

В работе Усова (2002) показано, что распад фотонов с параллельной поляризацией **строго запрещён**  $\nu B \gg 1$   
Определяющим является процесс

$$\perp \rightarrow \parallel \parallel$$

если поле не слишком сильное

$$B \leq (10/\alpha)^{1/2} B_{\text{cr}} \sim 10^{15} \text{ G}$$

# Расщепление фотона в сверхсильном магнитном поле

Система уравнений, описывающих распад

$$\begin{cases} \dot{f}_{\perp}(k) = -\frac{1}{2}f_{\perp}(k) \int_0^k w(k-k', k') dk'; \\ \dot{f}_{\parallel}(k) = \int_0^{\infty} w(k, k') f_{\perp}(k+k') dk'. \end{cases}$$

$w(k_1, k_2)$  — вероятность расщепления в единицу времени фотона с  $\perp$ -поляризацией и с энергией  $k_1 + k_2$  на два фотона с  $\parallel$ -поляризацией и с энергиями  $k_1$  и  $k_2$

Полная вероятность расщепления фотона

$$W(k) = \frac{1}{2} \int_0^k w(k-k', k') dk'$$

# Расщепление фотона в сверхсильном магнитном поле

При достижении порога рождения пар

$$f_{\perp}(k, 1) = f_{\perp}(k, 0) \exp\left(-3.57 \times 10^{-3} \frac{4\alpha^3 \rho_0}{\pi^2 k^2}\right)$$

Все фотоны с  $\perp$ -поляризацией распадутся до достижения порога рождения пар  $\parallel$ -поляризованными фотонами, если

$$k \lesssim 10^5$$

$\Rightarrow$  расщепление всегда существенно

$$\rho \gtrsim 10^{19}$$

$$\gamma \simeq 10^7 \quad k \simeq 10^4$$

При достижении порогового угла все фотоны будут обладать  $\parallel$ -поляризацией



# Расщепление фотона в сверхсильном магнитном поле

Вероятность расщепления возрастает с приближением к порогу рождения пар  $\zeta = 1$

У порога дифференциальная вероятность практически постоянна (Байер, Мильштейн, Шайсултанов, 1996), что неверно при

$$\zeta \ll 1$$

Но  $W(k, \zeta) \propto \zeta^6$



можно её считать постоянной и при малых  $\zeta$

Равновероятный распад

$$w(k_1, k_2) = w(k_1 + k_2)$$

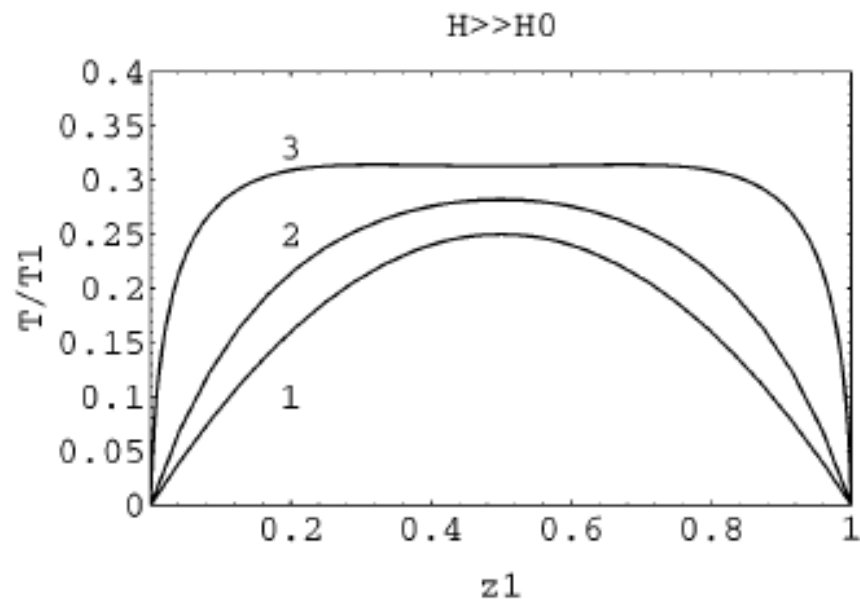


FIG. 3. The dependence of the amplitude  $T$  on the final photon energy for  $H \gg H_0$  for different energies of the initial photon:  $\omega/m = 0.1$  (1),  $\omega/m = 1.5$  (2), and  $\omega/m = 1.99$  (3).

# Расщепление фотона в сверхсильном магнитном поле

Система уравнений для случая равновероятного расщепления

$$\begin{cases} \dot{f}_{\perp}(k) = -\frac{k}{2}w(k)f_{\perp}(k); \\ \dot{f}_{\parallel}(k) = \int_k^{\infty} w(k')f_{\perp}(k')dk'. \end{cases}$$

Функция распределения  $\parallel$ -поляризованных фотонов

$$f_{\parallel}(k, 1) \approx f_{\parallel}(k, \infty) = f_{\parallel}(k, 0) + 2 \int_k^{\infty} f_{\perp}(k', 0) \frac{dk'}{k'}.$$

В случае равновероятного расщепления  $\perp$ -поляризованных фотонов асимптотическое выражение для функции распределения  $\parallel$ -поляризованных фотонов не зависит от конкретного вида  $w(k)$ . ции

# Функции распределения частиц

С учетом условий  $\gamma \gg 1$  и  $\operatorname{div} \mathbf{B} = 0$

$$\mathbf{b} \nabla F_1' = Q',$$

где  $F_1' = F_1/B$  и  $Q' = Q/B$  — функция распределения первого поколения частиц и источник частиц, отнесенные к величине магнитного поля

$$\left( \frac{\partial}{\partial z} + \frac{3r}{2z} \frac{\partial}{\partial r} \right) F_1^{(w)} = \frac{N_0}{B_0} \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{\alpha}{\pi} \frac{a}{\gamma_0^2 \Lambda} \varphi \left( \frac{4\gamma \rho a}{3\gamma_0^3 \Lambda} \right), \quad B \ll 1.$$

$$\gamma < \gamma_{\max}^{(w)} = 3\gamma_0^3 \Lambda / 4a\rho$$

$$F_1^{(w)}(\gamma) = \frac{N_0}{B_0} \frac{3^{11/6}}{10\pi} \Gamma\left(\frac{2}{3}\right) \alpha \left(\frac{a_0}{\Lambda}\right)^{1/3} R^{-1/3} R_s^{2/3} \gamma^{-2/3} \left[ \left(\frac{z}{R_s}\right)^{5/3} - 1 \right],$$

$$B \ll 1, \quad \gamma < \gamma_{\max}^{(w)} = 3\gamma_0^3 \Lambda / 4a\rho.$$

# Функции распределения частиц

В случае сильного магнитного поля

$$\left( \frac{\partial}{\partial z} + \frac{3r}{2z} \frac{\partial}{\partial r} \right) F_1^{(s)} = \frac{N_0}{B_0} \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{\alpha}{\pi \gamma_0^2} g\left(\frac{4\gamma\rho}{3\gamma_0^3}\right), \quad B \gtrsim 1.$$

$$F_1^{(s)}(\gamma) = \frac{N_0}{B_0} \frac{3^{17/6}}{8\pi} \Gamma\left(\frac{2}{3}\right) \alpha R^{-1/3} R_s^{2/3} \gamma^{-2/3} \left[ \left(\frac{z}{R_s}\right)^{2/3} - 1 \right],$$

$$B \gtrsim 1, \quad \gamma < \gamma_{\max}^{(s)} = 3\gamma_0^3/4\rho.$$

И в случае слабого, и в случае сильного поля

$$F_1^{(s)}(\gamma) \propto \gamma^{-2/3}$$

Отношение функций распределения

$$\frac{F_1^{(w)}(\gamma)}{F_1^{(s)}(\gamma)} = \frac{2}{3} \left(\frac{a_0}{\Lambda}\right)^{1/3} \simeq 1.$$

## Плотности частиц

$$N_1^{(w)} = \frac{N_0}{B_0} \frac{3^{17/6}}{10\pi} \Gamma\left(\frac{2}{3}\right) \alpha \left(\frac{a_0}{\Lambda}\right)^{1/3} R^{-1/3} R_s^{2/3} \gamma_{\max}^{(w) 1/3} \left[1 - \left(\frac{\gamma_{\min}}{\gamma_{\max}^{(w)}}\right)^{1/3}\right] \left[\left(\frac{z}{R_s}\right)^{5/3} - 1\right],$$

$$B \ll 1, \quad \gamma_{\min} < \gamma < \gamma_{\max}^{(w)};$$

$$N_1^{(s)} = \frac{N_0}{B_0} \frac{3^{23/6}}{8\pi} \Gamma\left(\frac{2}{3}\right) \alpha R^{-1/3} R_s^{2/3} \gamma_{\max}^{(s) 1/3} \left[1 - \left(\frac{\gamma_{\min}}{\gamma_{\max}^{(s)}}\right)^{1/3}\right] \left[\left(\frac{z}{R_s}\right)^{2/3} - 1\right],$$

$$B \gtrsim 1, \quad \gamma_{\min} < \gamma < \gamma_{\max}^{(s)}.$$

Минимальный лоренц-фактор частиц

$$\gamma_{\min} = 1/\chi_{\max} \simeq 100.$$

При выполнении условия  $\gamma_{\min} \ll \gamma_{\max}$  и  $(z - R_s)/R_s \ll 1$

$$\frac{F_1^{(w)}(\gamma)}{F_1^{(s)}(\gamma)} = \frac{2}{3} \left(\frac{a_0}{\Lambda}\right)^{1/3} \frac{B_0^{(w)}}{B_0^{(s)}},$$

$$\frac{N_1^{(w)}}{N_1^{(s)}} = \frac{2}{3} \frac{B_0^{(w)}}{B_0^{(s)}},$$

# Выход на стационарное значение

При  $\chi \sim \chi_{\max} = z_0/\rho_0$  интенсивность рождения плазмы резко падает

Из энергетических соображений

$$E_1^{(s)} < N_0 \gamma_0 / 2B_0$$

Нормированная плотность энергии

$$E_1^{(s)} = \frac{N_0}{B_0} \frac{3^{23/6}}{32\pi} \Gamma\left(\frac{2}{3}\right) \alpha R^{-1/3} R_s^{2/3} \gamma_{\max}^{(s) 4/3} \left[ 1 - \left( \frac{\gamma_{\min}}{\gamma_{\max}^{(s)}} \right)^{4/3} \right] \left[ \left( \frac{z}{R_s} \right)^{2/3} - 1 \right]$$

⇓

$$\frac{\gamma_{\max}^{(s)}}{\gamma_{\min}} \left[ \left( \frac{z}{R_s} \right)^{2/3} - 1 \right] < \frac{1}{2\alpha}, \quad \gamma_{\min} = \frac{\rho}{R_s} \simeq 100.$$

Для характерных энергий первичных частиц и частиц первого поколения

$$\gamma_0 \simeq 10^{7-8} \quad \gamma_{\max}^{(s)} \simeq 10^{3-4}$$

рождение заканчивается на высотах

$$z_c - R_s \simeq 10R_s.$$

# Множественность

$$\lambda = N_1^\pm / N_{GJ}$$

$$\lambda_{\max}^{(s)} = 2i_0 \frac{\gamma_0}{\gamma_{\max}^{(s)}} \lesssim 10^{3-4}$$

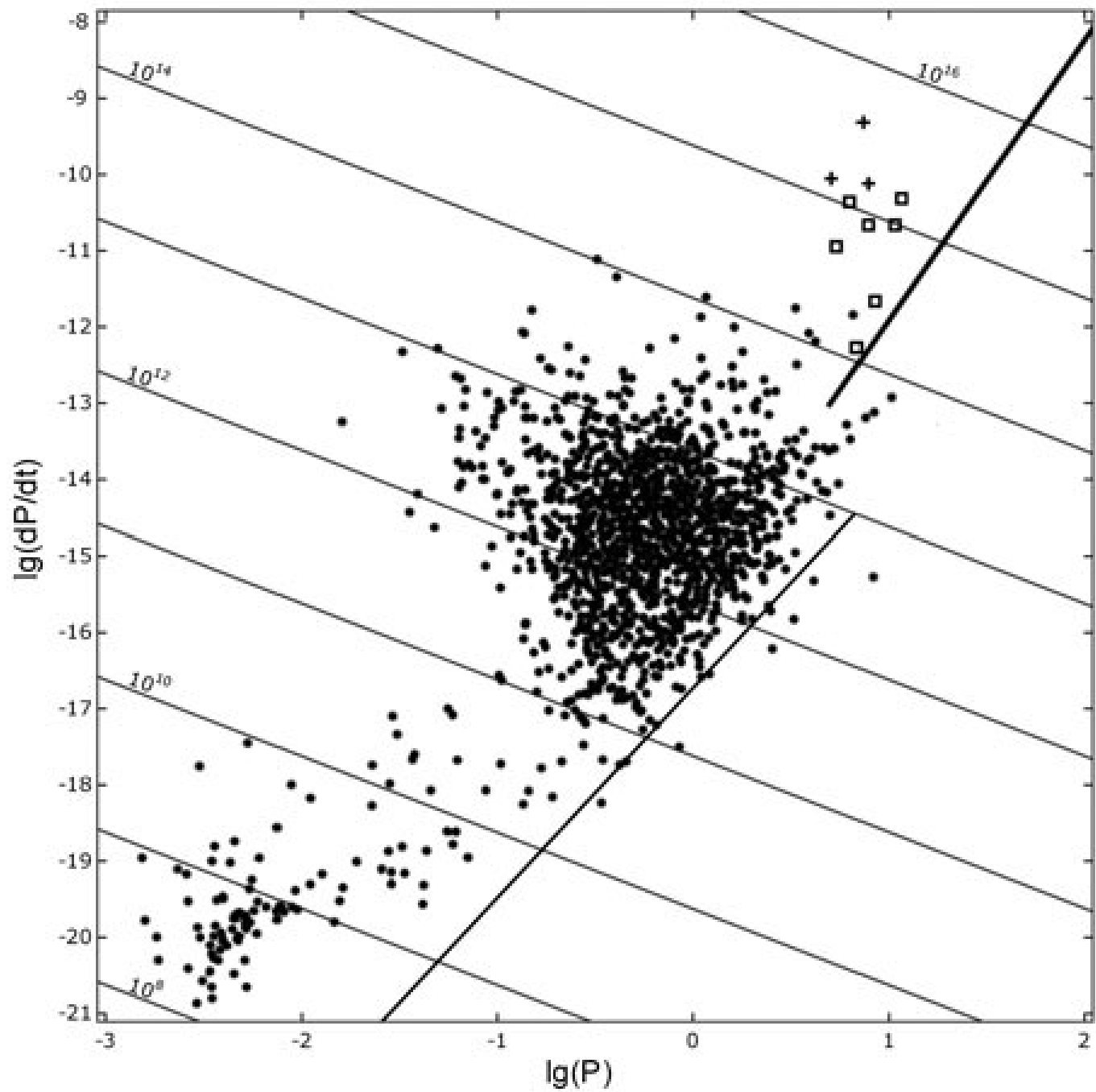
Условие эффективной генерации плазмы

$$B_0 \gtrsim \left( \frac{P}{1 \text{ сек}} \right)^{7/3} \left( \frac{R_s}{10 \text{ км}} \right)^{-3} \frac{10^{12}}{|\cos \theta| (1 - i_0)} \text{ Гаусс}$$

«Линия погасания» на диаграмме  $\dot{P}$ .

$$\lg \dot{P}_{-15} = \frac{11}{3} \lg P - 0.54$$

$$j_{\parallel} \ll j_{GJ} = c\rho_{GJ} \quad \cos \theta \simeq 1.$$





# Выводы

Генерация электрон-позитронной плазмы не может быть подавлена за счёт расщепления фотонов

Расщепление  $\perp$ -поляризованных фотонов приводит к полной поляризации гамма-квантов

В магнитосфере магнитаров отсутствует второе поколение частиц, рождаемых синхротронными фотонами

Плотность плазмы у магнитаров превышает плотность плазмы в магнитосфере обычных радиопульсаров

Эффективная генерация подавляется только в результате сужения диапазона энергий частиц первого поколения

Такое сужение объясняется медленным вращением магнитаров

Данные соображения позволяют построить «линию погасания» на диаграмме «период— производная периода» для магнитаров

Вероятность запуска каскада рождения плазмы у магнитаров меньше, чем у обычных пульсаров, за счёт геометрии полярной шапки

**СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ**

Всероссийская конференция «Физика нейтронных звёзд» — 2008  
Санкт-Петербург, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе  
26 июня 2008 г.