

Нейтринное остывание плазмы,
порождающей гигантскую
вспышку мягкого рентгеновского
повторителя

А.А. Гвоздев

ЯрГУ

2009

Введение

Мягкие рентгеновские повторители (Soft Gamma-ray Repeaters, SGR)
Аномальные рентгеновские пульсары (Anomalous X-ray Pulsars, AXP)
особый класс нейтронных звезд (30 AXP, 5 SGR в нашей Галактике и БМО)

Особенности

- Молодые ($t \sim 10^3 - 10^4$ лет) **одиочные** нейтронные звезды
- Излучают мягкий рентген в спокойном состоянии
- Большой период вращения ($P \sim (5 - 8)s$) Аномальное торможение периода ($\dot{P} \sim (10^{-10} - 10^{-12})s/s$) Радио-пульсары: типичные $P \sim 0.1s$; типичные $\dot{P} \approx 10^{-14} - 10^{-15} s/s$
- Оценка магнитного поля из магнито-дипольных потерь

$$B \approx 6.4 \cdot 10^{19} G \cdot [P(s)\dot{P}(s/s)]^{1/2} \simeq (10^{14} - 10^{15})G$$

Магнитары

Вспышечная активность SGR

Стандартные вспышки

Энерговыделение $\Delta E \approx (10^{38} - 10^{41}) \text{erg}$

Типичное время $\Delta t \approx 0.1 \text{s}$

Активность (10 - 100) в течение нескольких месяцев

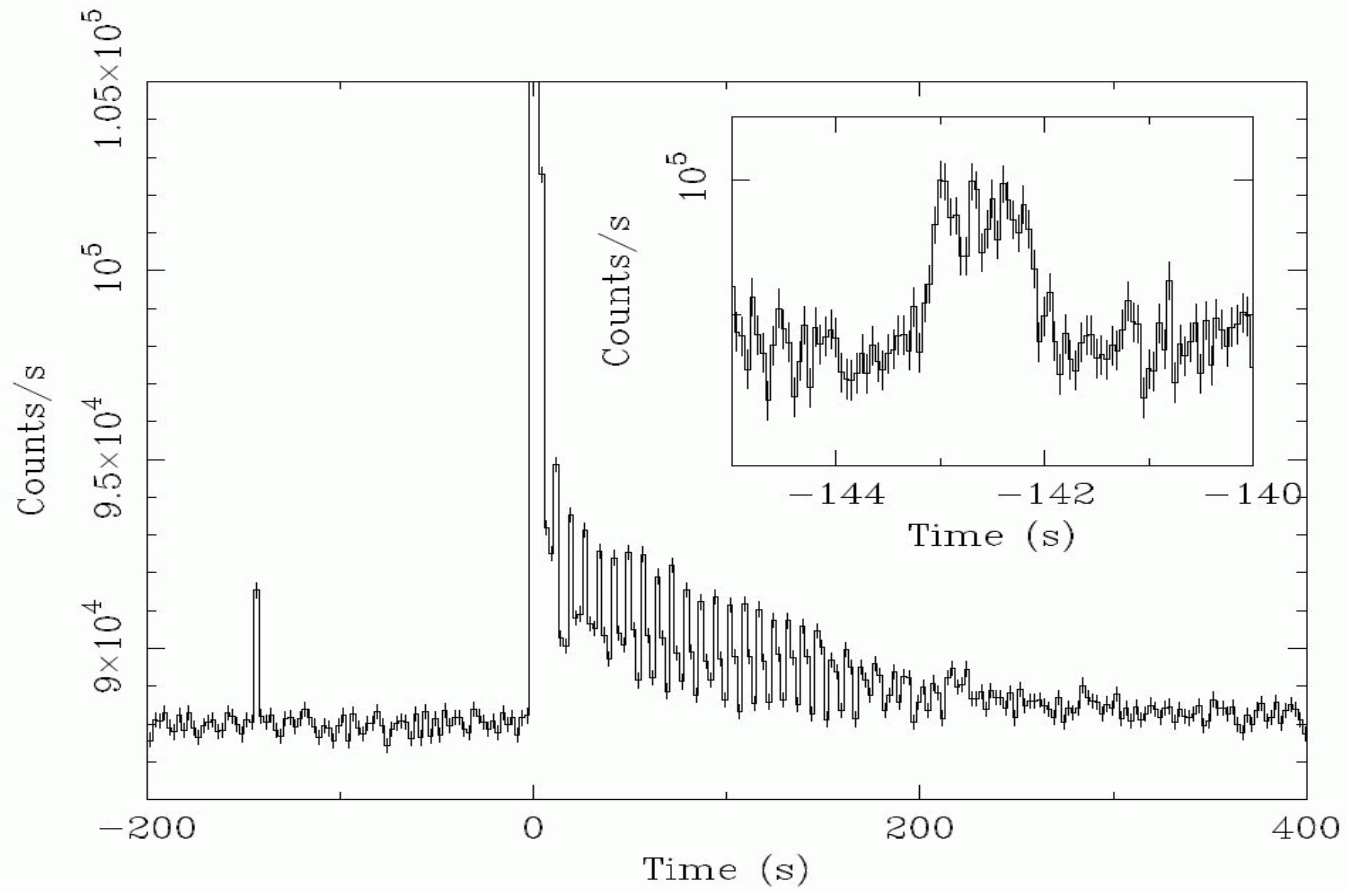
Гигантские вспышки

Энерговыделение $\Delta E \approx (10^{44} - 10^{46}) \text{erg}$

Типичное время $\Delta t \approx (200 - 400) \text{s}$

Активность по одному разу за все время наблюдений (с 1979 г.)

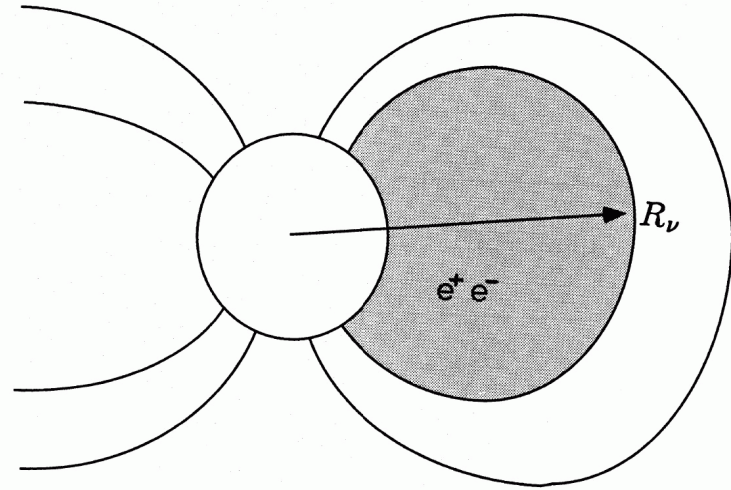
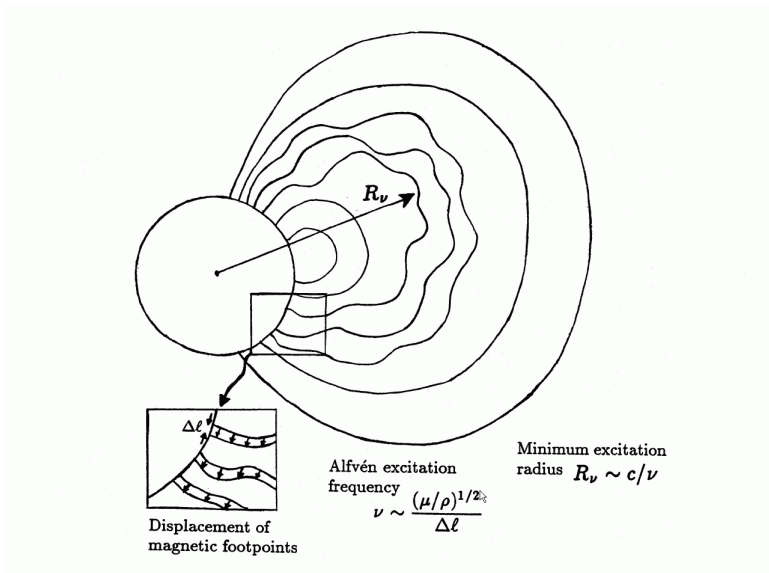
Гигантская вспышка SGR 1806-20, данные INTEGRAL



Основные характеристики Гигантских вспышек SGR

SGR		0526-66 5.03.1979	1900+14 27.08.1998	1806-20 27.12.2004	1627-41 18.06.1998
Расстояние		55 кПк	15 кПк	15 кПк	5.8 кПк
PS	Энергия E_{PS}	----	$\simeq 10^{40} erg$	$1 \cdot 10^{42} erg$	----
	Время задержки Δt	----	0.2s	142s	----
	Длительность τ_{PS}	----	0.5s	1.0 s	----
HS	Светимость в пике	$3.6 \cdot 10^{44} erg/s$	$> 8.3 \cdot 10^{44} erg/s$	$3.5 \cdot 10^{47} erg/s$	----
	Энергия E_{HS}	$1.6 \cdot 10^{44} erg$	$> 1.5 \cdot 10^{44} erg$	$2.3 \cdot 10^{46} erg$	----
	Длительность τ_{HS}	0.25s	0.35 s	0.5 s	----
LT	Энергия E_{LT}	$3.6 \cdot 10^{44} erg$	$1.2 \cdot 10^{44} erg$	$1.3 \cdot 10^{44} erg$	$3 \cdot 10^{42} erg$
	Длительность τ_{LT}	200 s	400 s	380 s	0.6 s
QP O	Частоты	----	(20 – 155) Hz	(18 – 1840) Hz	----
	Тип, время задержки	----	Торсионные > 60s	Торсионные Радиальные (50 – 200) s	----

Магнитарная модель Гигантской вспышки SGR (Duncan, Thompson, 1995, 1996)



$$U_{e^+e^-} \approx E_A/R^3 = a\bar{T}^4 \quad a = 4\sigma_B/c$$

$$\bar{T} \approx 2m_e (E_A/10^{44} \text{ erg})^{1/4} (R/10 \text{ km})^{-3/4}$$

Горячая невырожденная плазма в сильном магнитном поле

Процессы нейтринного остывания

$$e^+ + e^- \rightarrow \nu_i + \tilde{\nu}_i \quad (1) \quad (i = e, \mu, \tau)$$

$$e^\pm \rightarrow e^\pm + \nu_i + \tilde{\nu}_i \quad (2)$$

$$\gamma_{pl} \rightarrow \nu_i + \tilde{\nu}_i$$

При $eB \gg T^2, m_e^2$ кроме (1), (2) в принципе важны:

$$\gamma \rightarrow \nu_i + \tilde{\nu}_i, \quad \gamma + \gamma \rightarrow \nu_i + \tilde{\nu}_i, \quad e^\pm + \gamma \rightarrow e^\pm + \nu_i + \tilde{\nu}_i$$

Предельные случаи

Относительно слабое магнитное поле

$T^2 \gg eB \gg m^2$ - плазма оккупирует много уровней Ландау.

$$Q_A^{(0)} = \frac{7\xi(5)}{12\pi} \sum_i (C_{Vi} + C_{Ai}) G_F^2 T^9$$

C_{Vi}, C_{Ai} - векторные и аксиальные константы лептонных токов

$$\sum_i (C_{Vi} + C_{Ai}) \approx 1.675$$

- Асимптотика сверхсильного магнитного поля

$eB \gg T^2 \gg m^2$, плазма оккупирует лишь уровень Ландау $n = 0$

$$Q_A^{(B)} = \frac{\xi(3)}{48} (C_{Vi} + C_{ai}) G_F^2 eB m^2 T^5, \quad Q_S^{(B)} = 0$$

Сильное магнитное поле

$$eB \gg T^2 \gg m^2$$

концентрация плазмы на уровнях Ландау $n \geq 0$ экспоненциально подавлена

$$\frac{Q_s}{Q_A^{(B)}} = \frac{2^{15/4}}{3\pi^{3/2}\xi(3)} \left(1 - \frac{9}{4E}\right) \left(\frac{eB}{T^2}\right)^{13/4} \left(\frac{T}{m_e}\right)^2 \cdot \exp\left(-\frac{\sqrt{2eB}}{T}\right)$$

где E – неперово число [А.Д. Каминкер, Д.Г. Яковлев, 1993]

Нейтринные светимости в процессах (1), (2) остаются большими даже в пределе сильного магнитного поля и подавлены лишь в асимптотике сверхсильного магнитного поля.

Оценка минимального магнитного поля из потерь на нейтринное излучение

Обозначения:

τ_{LT} - время фотонного излучения на стадии LT

E_{LT} - энергия, излученная в гамма-квантах на стадии LT

ηE_{LT} - полное энерговоыделение при образовании плазмы

$x \equiv r/R_0$ - безразмерная локальная координата плазмы

$t(x) = t_0 (1 + x)^\beta$ - градиент температуры плазмы

$b(x) = b_0 (1 + x)^\gamma$ - градиент магнитного поля

$$Q_A(t(x), b(x)) + Q_S(t(x), b(x))$$

локальные нейтринные светимости из единицы объема в реакциях (1),(2)

экстраполяционные формулы

[A.D. Kaminker, O.Yu. Yakovlev, P.Amsterdamski, P. Haensel (1992)

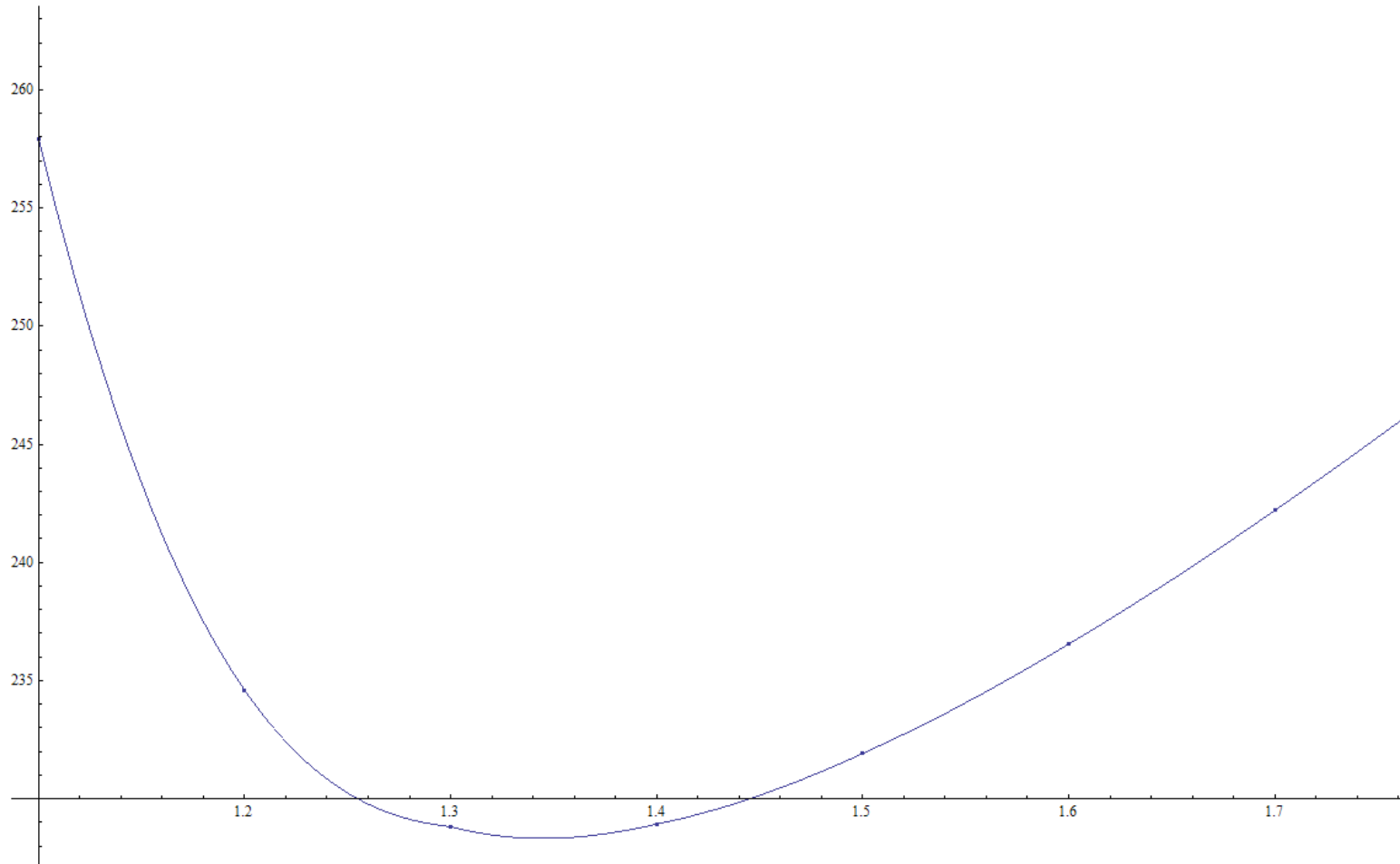
А.Д. Каминкер, Д.Г. Яковлев (1993)]

$$\eta E_{LT} = 2\pi R_0^3 \int_0^1 dx x^2 [U_{e^+,e^-}(t(x), b(x)) + U_\gamma(t(x), b(x))]$$

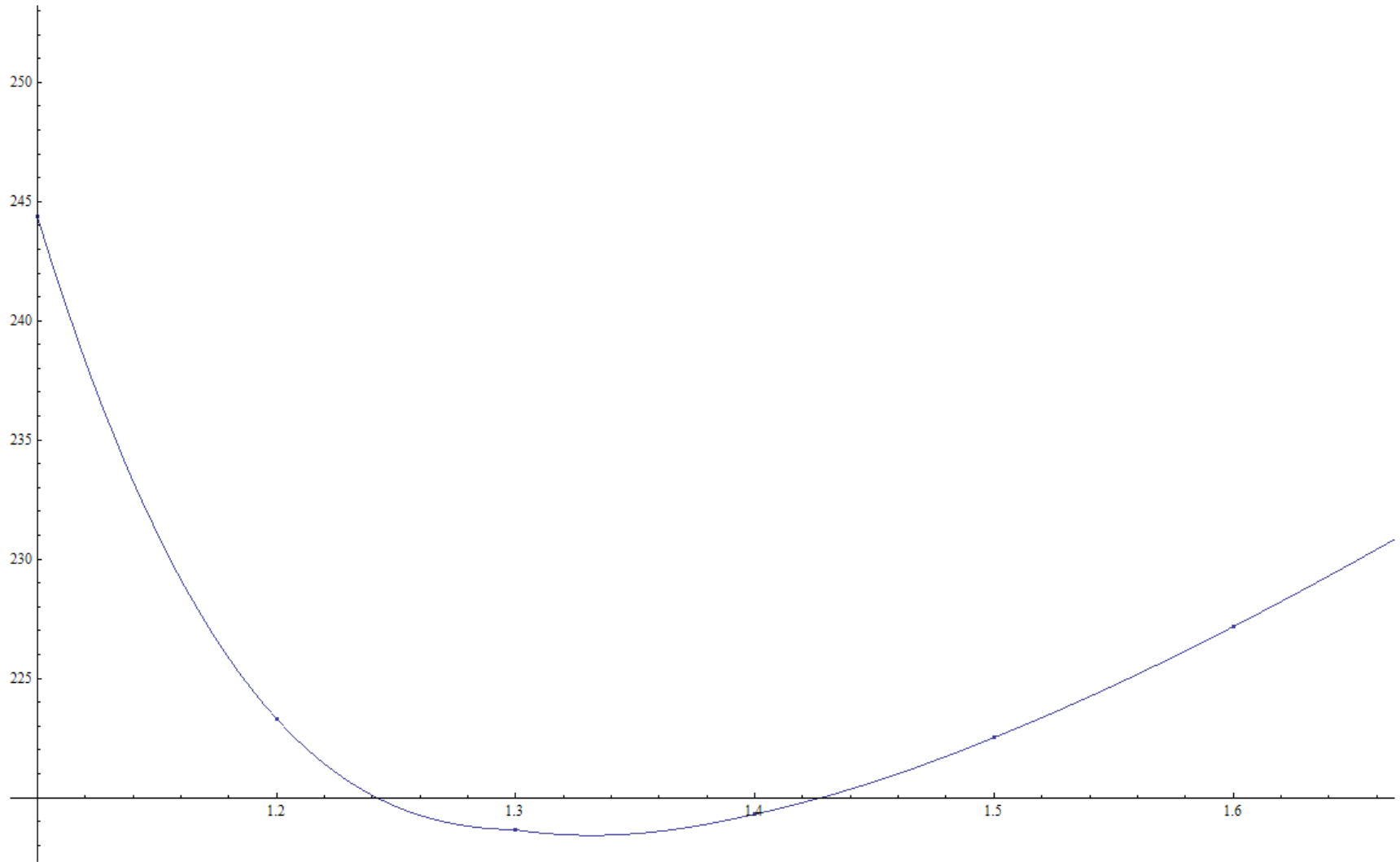
$$E_{LT} = \eta E_{LT} - 2\pi R_0^3 \int_0^1 dx x^2 [U_{e^+,e^-}(t(x), b(x)) + U_\gamma(t(x), b(x))] \tau_{LT}$$

При заданных наблюдательных данных E_{LT} , τ_{LT} , параметре R_0 , степенях градиентов β , γ можно вычислить t_0 , b_0 как функции от эффективности энерговоыделения η

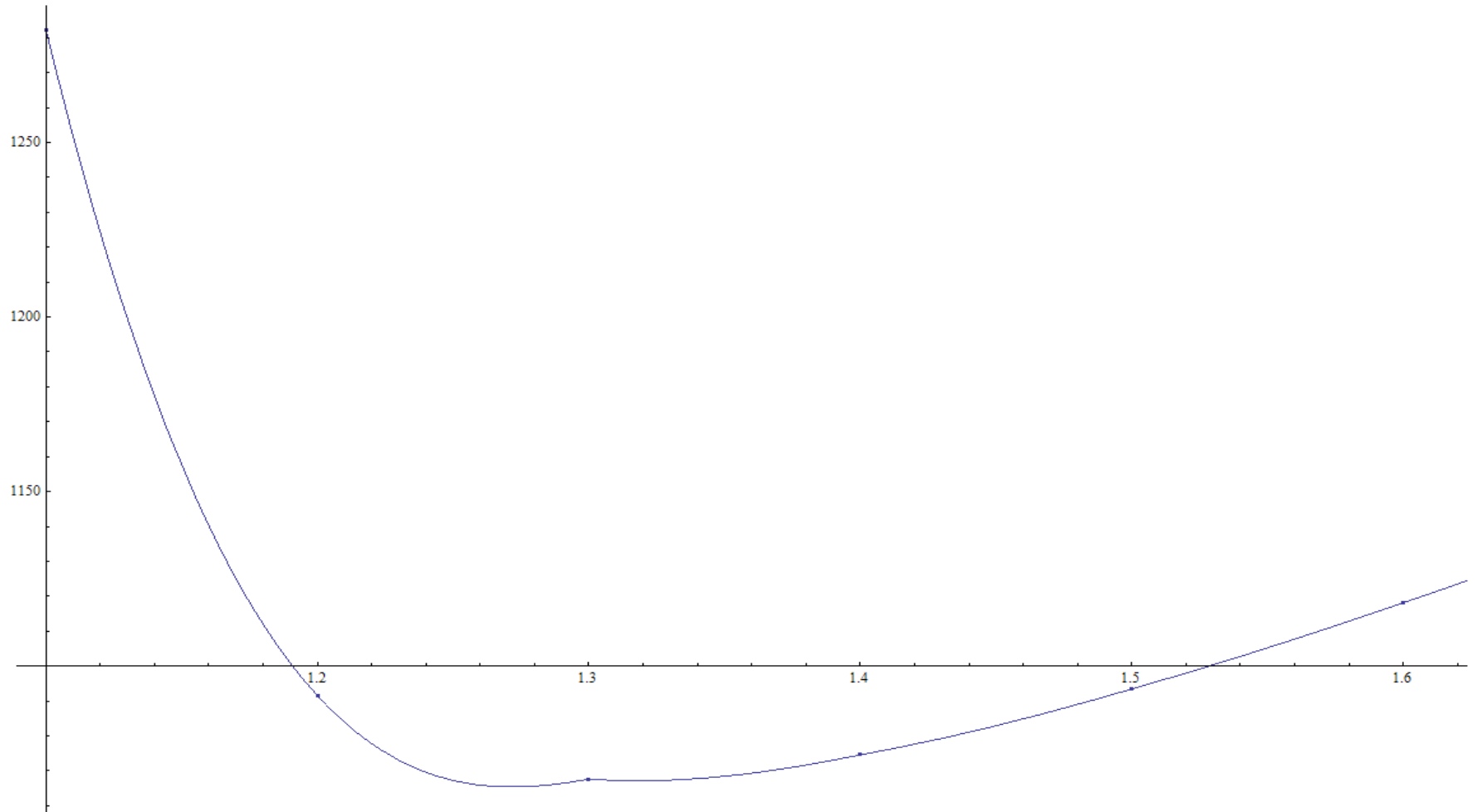
SGR 1806-20 $E_{LT} \simeq 1.3 \cdot 10^{44} \text{erg}$, $\tau_{LT} \simeq 380 \text{s}$ $\beta = 0, \gamma = -3, R_0 = 10 \text{km}$



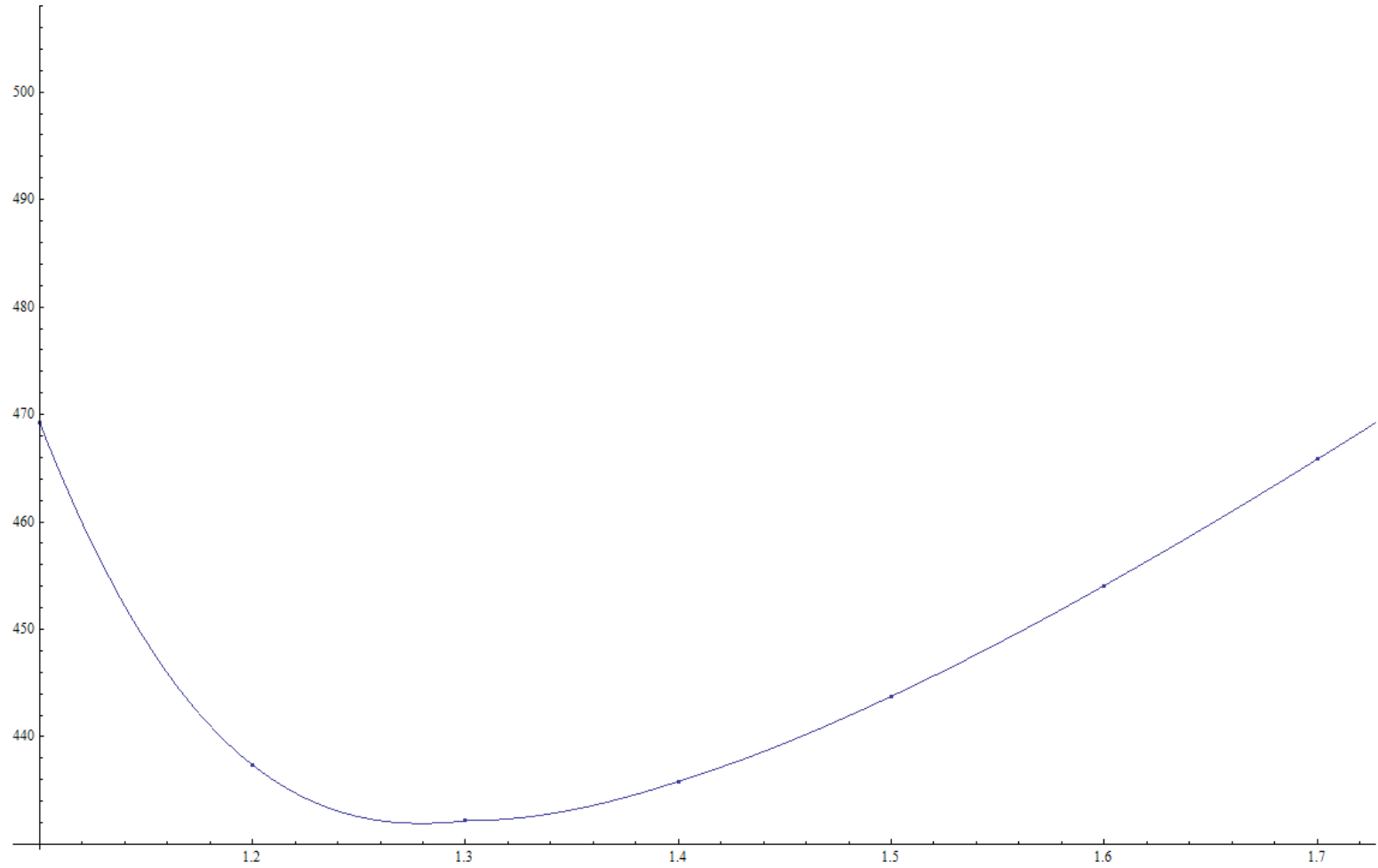
SGR 1806-20 $E_{LT} = 1.3 \cdot 10^{44} \text{erg}$ $\tau_{LT} \simeq 380 \text{s}$ $\beta = -0.5, \gamma = -3, R_0 = 10 \text{km}$



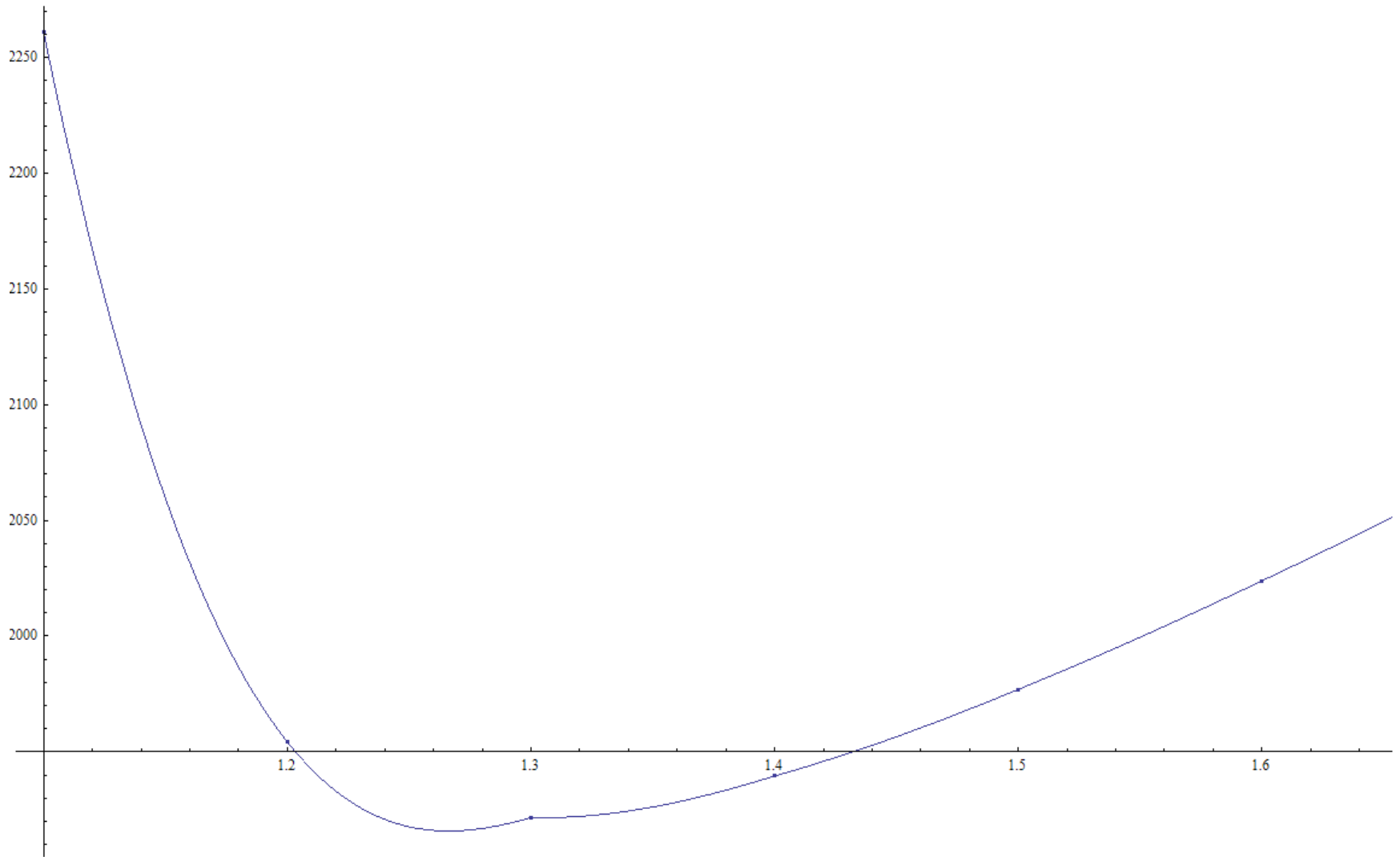
SGR 1806-20 $E_{LT} = 1.3 \cdot 10^{44} \text{erg}$ $\tau_{LT} \simeq 380 \text{s}$ $\beta = 0, \gamma = -3, R_0 = 5 \text{km}$



SGR 0526-66 $E_{LT} \simeq 3.6 \cdot 10^{44} \text{erg}$ $\tau_{LT} \simeq 200 \text{s}$ $\beta = 0, \gamma = -3, R_0 = 10 \text{km}$



SGR 0526-66 $E_{LT} \simeq 3.6 \cdot 10^{44} \text{erg}$ $\tau_{LT} \simeq 200 \text{s}$ $\beta = 0, \gamma = -3, R_0 = 5 \text{km}$



Заключение

- В рамках магнитарной модели Гигантской вспышки SGR вычислены потери энергии плазмы на нейтринное излучение
- Получено нижнее ограничение на напряженность магнитного поля, согласующееся с энергетикой нейтринного и гамма-излучения плазмы в период Гигантской вспышки
- Показано, что в широкой области параметров напряженности магнитного поля на порядок больше напряженностей, обычно обсуждаемых у магнитаров
- Таким образом, магнитарная модель Гигантской вспышки SGR в том виде, в каком она сформулирована в работах [Duncan, Thompson, 1995, 1996] не согласуется с наблюдательными данными по энергетике гамма-излучения