

Нижнее ограничение на напряженность магнитного поля магнитара из анализа гигантских вспышек SGR

И.С. Огнев,

А.А. Гвоздев, Е.В. Осокина

ЯрГУ (Ярославль)

«Магнитоплазменные процессы в релятивистской астрофизике»

Таруса, 18-20 января 2012 года

Одиночные нейтронные звезды

1. Радиопульсары.

← Вращение

2. Компактные рентгеновские источники (CCO).

← Тепловая энергия

3. Великолепная семерка (XDINS).

4. Аномальные рентгеновские пульсары (AXP).

← Магнитное поле?

5. Источники мягких повторяющихся гамма-всплесков (SGR).

6. Транзиентные радиоисточники (RRATs).

← ???

7. Источники EGRET, Calvera.

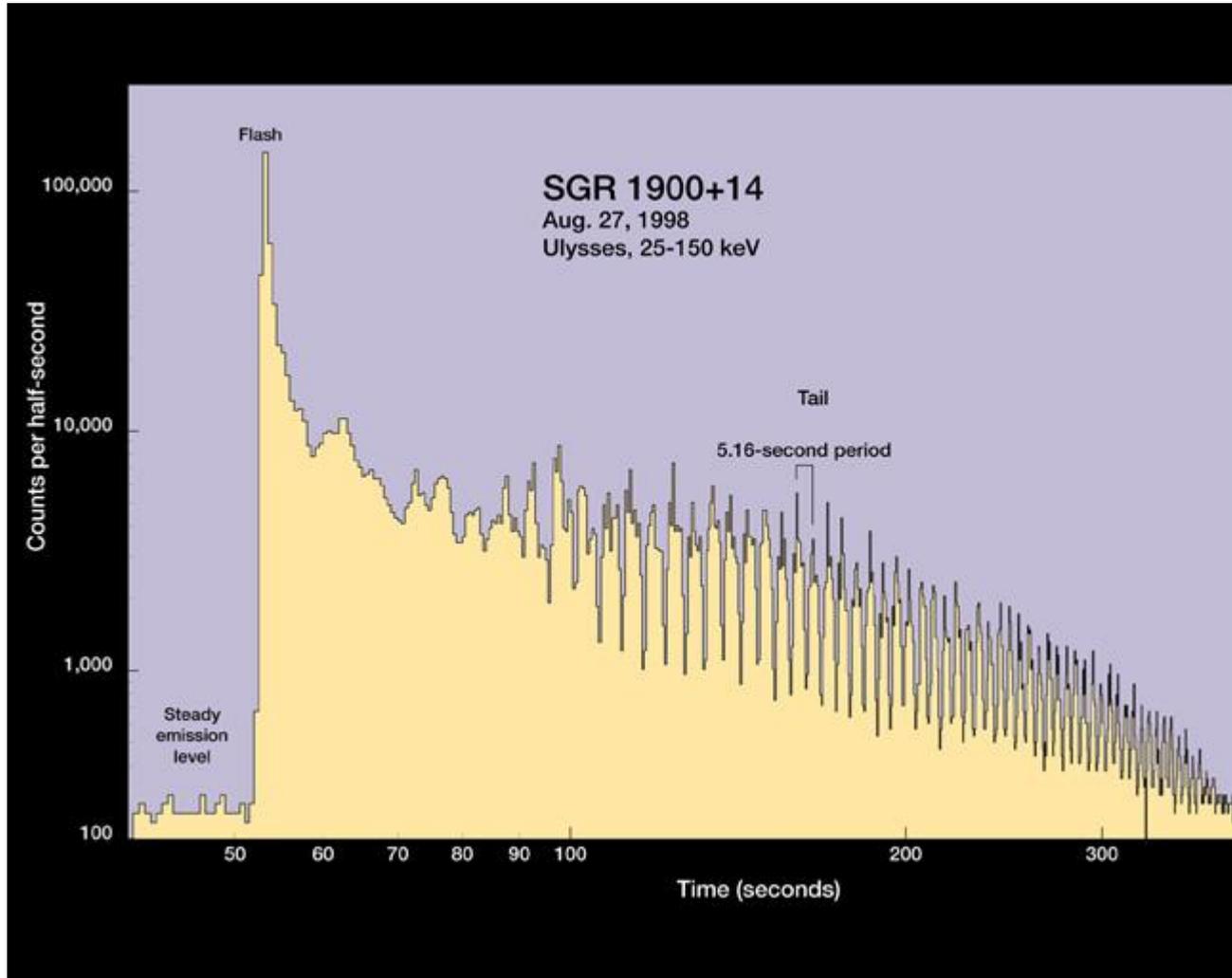
Отличительные особенности SGR и AXP

- ❑ Одиночные нейтронные звезды.
- ❑ Молодые – возраст: $\tau \sim 10^3 - 10^4$ лет.
- ❑ Аномально высокая температура поверхности и большие светимости в рентгеновском диапазоне $L \sim 10^{33} - 10^{36}$ эрг.
- ❑ Медленное вращение $P \sim 5 - 8$ сек
и быстрое торможение $\dot{P} \sim 10^{-10} - 10^{-13}$.
- ❑ Вспышечная активность: слабые вспышки у SGR и AXP,
промежуточные и гигантские у SGR.



Магнитар – одиночная нейтронная звезда с $B \sim 10^{14} - 10^{15}$ Гс.

Гигантские вспышки SGR



SGR 0526-66

(05.03.1979)

$D \approx 55$ кпк,

$E_{HS} \approx 1.6 \cdot 10^{44}$ эрг,

$E_{LT} \approx 3.6 \cdot 10^{44}$ эрг,

$t \approx 200$ сек;

SGR 1900+14

(27.08.1998)

$D \approx 15$ кпк,

$E_{HS} > 1.5 \cdot 10^{44}$ эрг,

$E_{LT} \approx 1.2 \cdot 10^{44}$ эрг,

$t \approx 400$ сек;

SGR 1806-20

(27.12.2004)

$D \approx 15$ кпк,

$E_{HS} \approx 2.3 \cdot 10^{46}$ эрг,

$E_{LT} \approx 1.3 \cdot 10^{44}$ эрг,

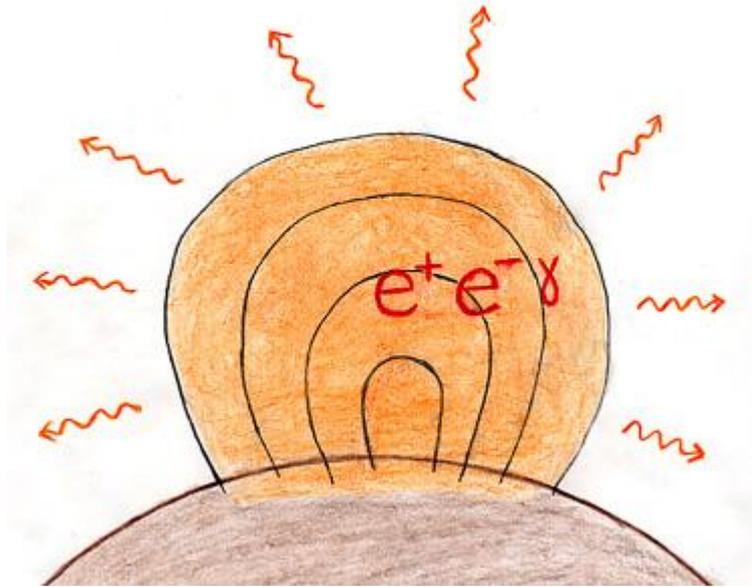
$t \approx 380$ сек;

SGR 1627-41 (18.06.1998) $E_{LT} \approx 3 \cdot 10^{42}$ эрг, $t \approx 0.6$ сек.

Гигантская вспышка SGR в модели магнитара

Thompson C. and Duncan R.C., MNRAS **275**, 255 (1995).

Thompson C. and Duncan R.C., Astrophys. J. **561**, 980 (2001).



Перезамыкание силовых линий магнитного поля приводят к рождению горячей электрон-позитронной плазмы, которая захватывается магнитным полем и излучает рентгеновские фотоны, наблюдаемые как гигантская вспышка SGR.

Размер излучающей области: $R_0 \lesssim R_{NS}$, температура: $T \sim 1$ МэВ.

Основной процесс нейтринного остывания: $e^+ + e^- \rightarrow \nu_i + \tilde{\nu}_i$, ($i = e, \mu, \tau$).

$$\tau_\nu^{(0)} \simeq \frac{44 \pi^3}{175 \zeta(5) C_+^2} \frac{1}{G_F^2 T^5} \simeq 22 \text{ sec} \left(\frac{1 \text{ MeV}}{T} \right)^5 \quad (\text{для слабого магнитного поля});$$

$$\tau_\nu^{(B)} \simeq \frac{8 \pi^3}{3 \zeta(3) C_+^2} \frac{1}{G_F^2 m^2 T^3} \simeq 760 \text{ sec} \left(\frac{1 \text{ MeV}}{T} \right)^3 \quad (\text{для сильного магнитного поля}).$$

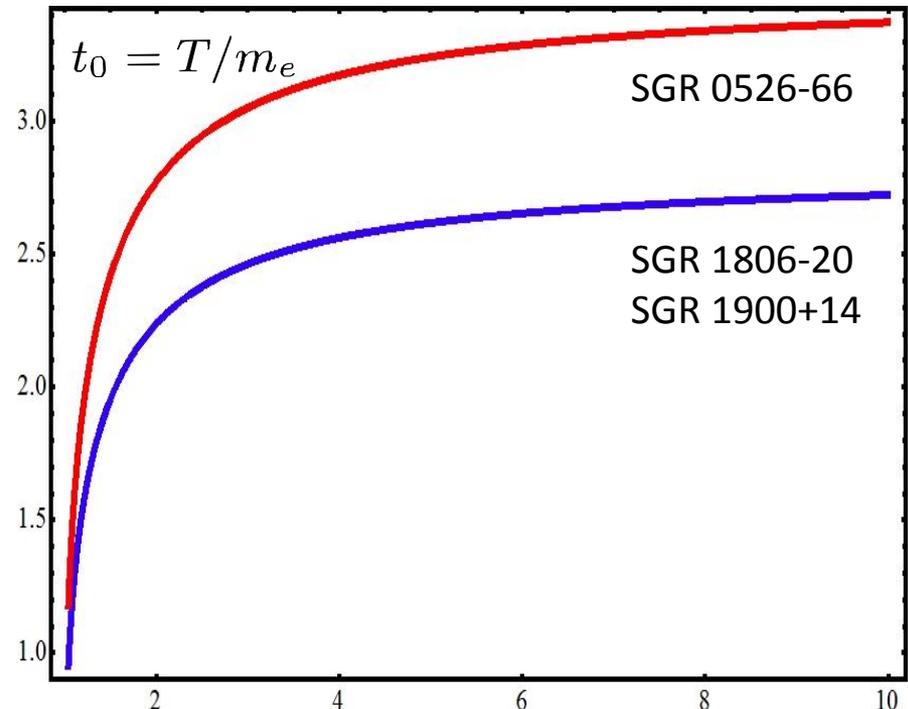
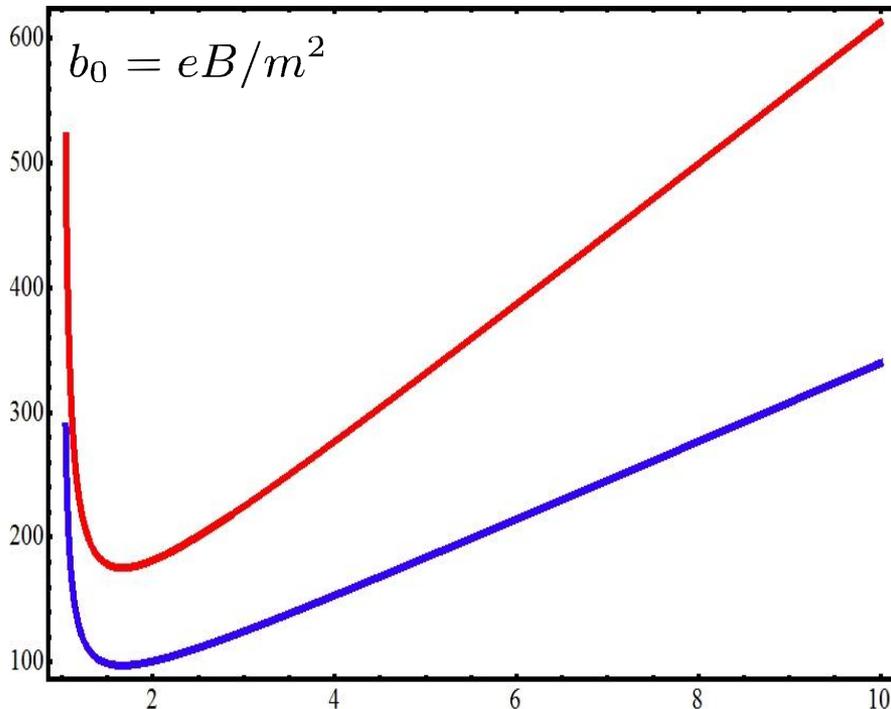
Можно ли пренебречь излучением нейтрино?

$$b(z) = b_0 (1+z)^\beta, \quad t(z) = t_0 (1+z)^\gamma, \quad z = r/R_0, \quad \gamma = -1/2, \quad \beta = -3.$$

$$b_0 \simeq 4.6 \frac{E_{44} \tau_{100}^{2/3}}{R_{10}^3} \frac{\eta^{5/3}}{(\eta-1)^{2/3}}, \quad t_0 \simeq 3.1 \tau_{100}^{-1/3} \left(\frac{\eta-1}{\eta} \right)^{1/3} \quad \text{– параметры среды.}$$

$$E_{LT}^{(max)} \simeq 10^{44} \text{ erg} \frac{B_{15} R_{10}^3}{\tau_{100}^{2/3}}.$$

Существует максимальная энергия, способная излучиться в фотонах в гигантской вспышке SGR!



$$\eta = (E_{LT} + E_\nu)/E_{LT}$$

Основные процессы остывания плазмы

- 1) $e^+ + e^- \rightarrow \nu_i + \tilde{\nu}_i$, ($i = e, \mu, \tau$) – аннигиляция;
- 2) $e^\mp \rightarrow e^\mp + \nu_i + \tilde{\nu}_i$ – синхротронное рождение;
- 3) $\gamma \rightarrow \nu_i + \tilde{\nu}_i$ – распад плазмона;
- 4) $\gamma + \gamma \rightarrow \nu_i + \tilde{\nu}_i$ – слияние фотонов;
- 5) $e^\mp + \gamma \rightarrow e^\mp + \nu_i + \tilde{\nu}_i$ – фотонейтринное излучение.

$$e^+ + e^- \rightarrow \nu_i + \tilde{\nu}_i$$

$$Q_A = \frac{\zeta(3) C_+^2}{48\pi^3} G_F^2 m^2 eB T^5.$$

- Асимптотическое выражение для светимости нейтрино в процессе аннигиляции становится применимым лишь при $B \approx 10^{16}$ Гс.

$$e^\mp \rightarrow e^\mp + \nu_i + \tilde{\nu}_i$$

$$Q_S^{(B)} = \frac{1 - 9/4e}{2^{1/4} 9 \pi^{9/2}} C_+^2 G_F^2 (eB)^{17/4} T^{1/2} e^{-\sqrt{2eB}/T}.$$

- Процесс синхротронного рождения вносит существенный вклад в охлаждение плазмы.

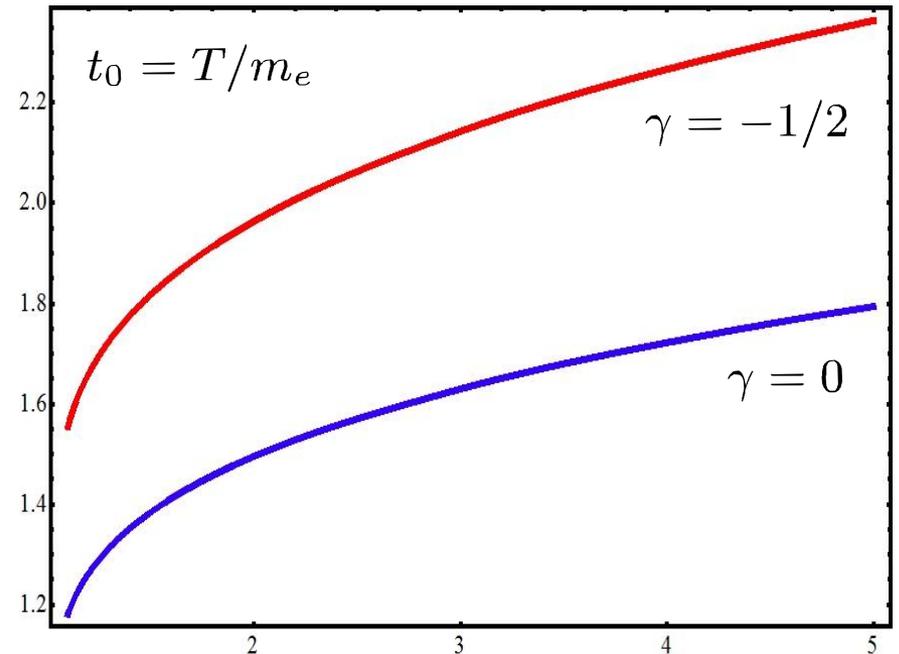
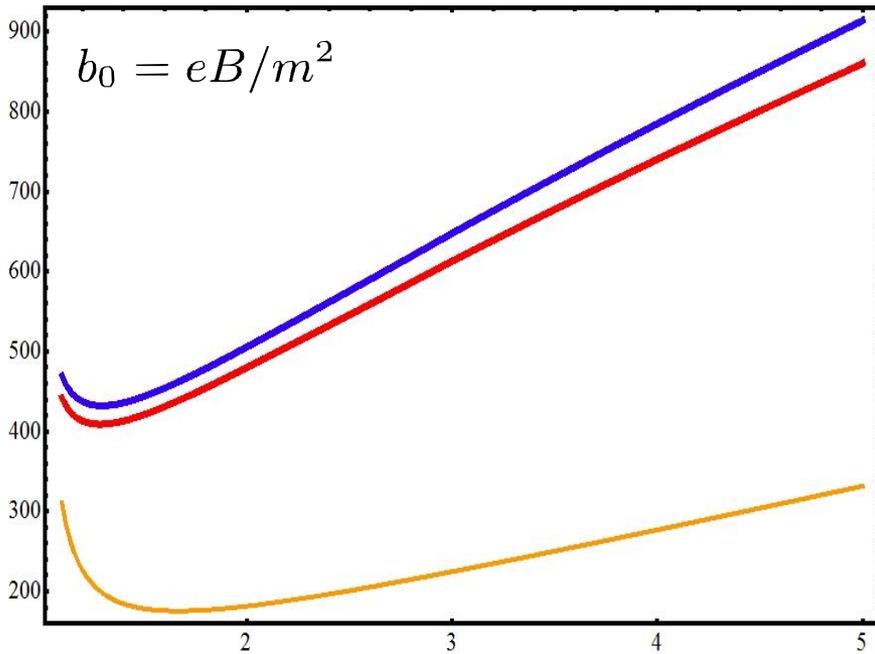
SGR 0526-66

$$E_{LT} = 3.6 \cdot 10^{44} \text{ erg}, \quad \tau_{LT} = 200 \text{ s.}$$

$$b(z) = b_0 (1 + z)^\beta, \quad t(z) = t_0 (1 + z)^\gamma, \quad z = r/R_0.$$

$$\beta = -3, \quad R_0 = 10 \text{ km.}$$

$$B_0^{(min)} \simeq 2 R_{10}^{-3} \times 10^{16} \text{ G}, \quad B_{MD}^{(max)} \simeq 2 \tilde{R}_{10}^{-2} \times 10^{15} \text{ G.}$$



$$\eta = (E_{LT} + E_\nu)/E_{LT}$$

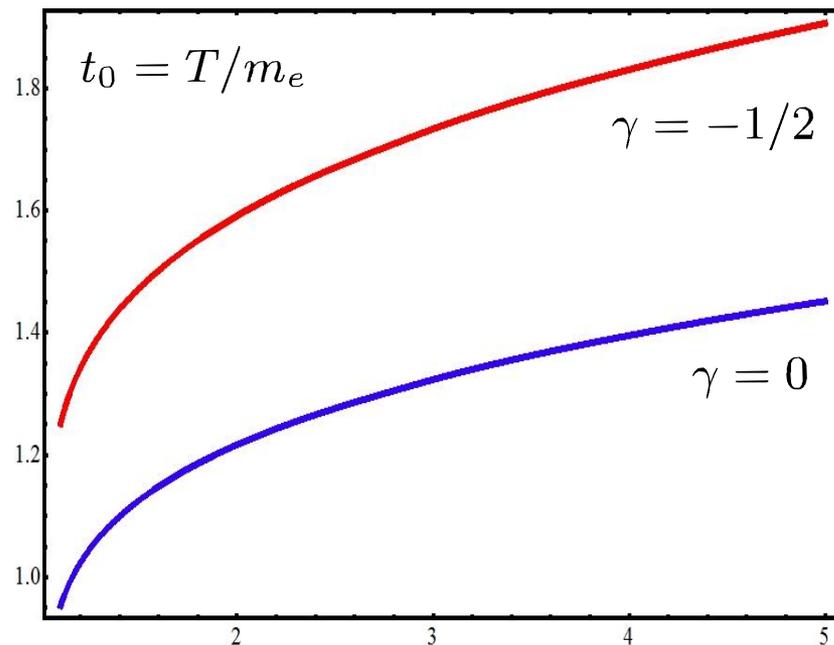
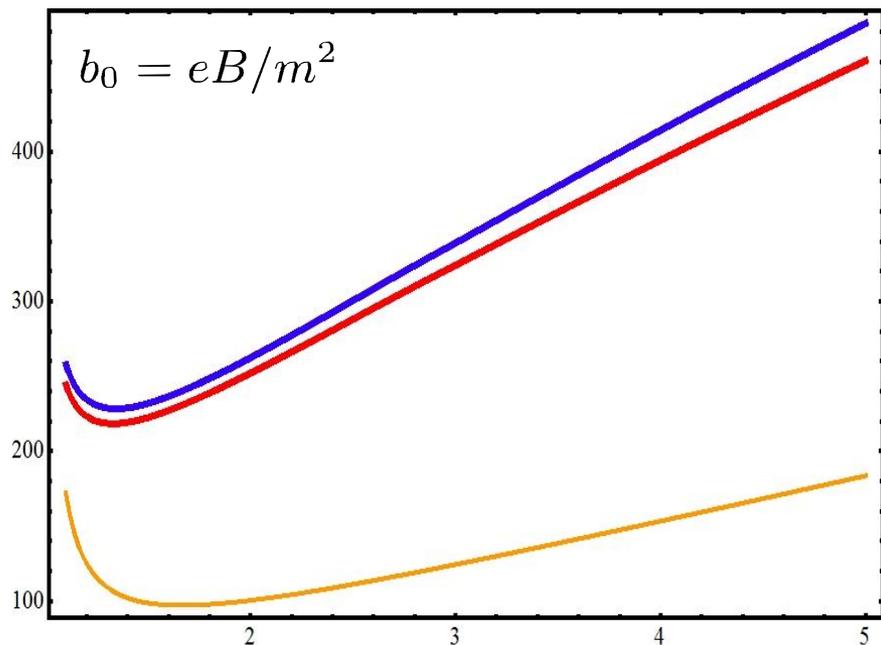
SGR 1806-20 и SGR 1900+14

$$E_{LT} = 1.3 [1.2] \cdot 10^{44} \text{ erg}, \quad \tau_{LT} = 380 [400] \text{ s.}$$

$$\beta = -3, \quad R_0 = 10 \text{ km.}$$

$$\text{SGR 1806-20: } B_0^{(min)} \simeq R_{10}^{-3} \times 10^{16} \text{ G}, \quad B_{MD}^{(max)} \simeq (2 - 6) \tilde{R}_{10}^{-2} \times 10^{15} \text{ G.}$$

$$\text{SGR 1900+14: } B_0^{(min)} \simeq R_{10}^{-3} \times 10^{16} \text{ G}, \quad B_{MD}^{(max)} \simeq (2 - 3) \tilde{R}_{10}^{-2} \times 10^{15} \text{ G.}$$



$$\eta = (E_{LT} + E_\nu)/E_{LT}$$

Выводы

- По всей видимости, магнитное поле магнитаров не может быть дипольным, так как это противоречило бы их магнито-дипольным потерям.
- Для объяснения энергетики гигантских вспышек SGR в рамках магнитарной модели требуются магнитные поля $B \gtrsim 10^{16}$ Гс, что существенно больше, чем предполагается у этих объектов, либо размер этих звезд должен быть больше стандартного $R \gtrsim 15$ км.
- Возможно, гигантские вспышки SGR имеют другую природу, например, вызваны спонтанным распадом нестабильных ядер в коре нейтронной звезды.

Некоторые свойства XDINSs

V. Suleimanov et al., Astron. Astrophys. **522**, A111 (2010).

V. Hambaryan et al., Astron. Astrophys. **534**, A74 (2011).

RBS 1223 (1RXS J130848.6+212708)

- 1) Магнитное поле $B \approx 8 \cdot 10^{13}$ Гс.
- 2) Нет сильной тороидальной компоненты (не более ≈ 50 %).
- 3) Большой размер нейтронной звезды $R \approx 16$ км.

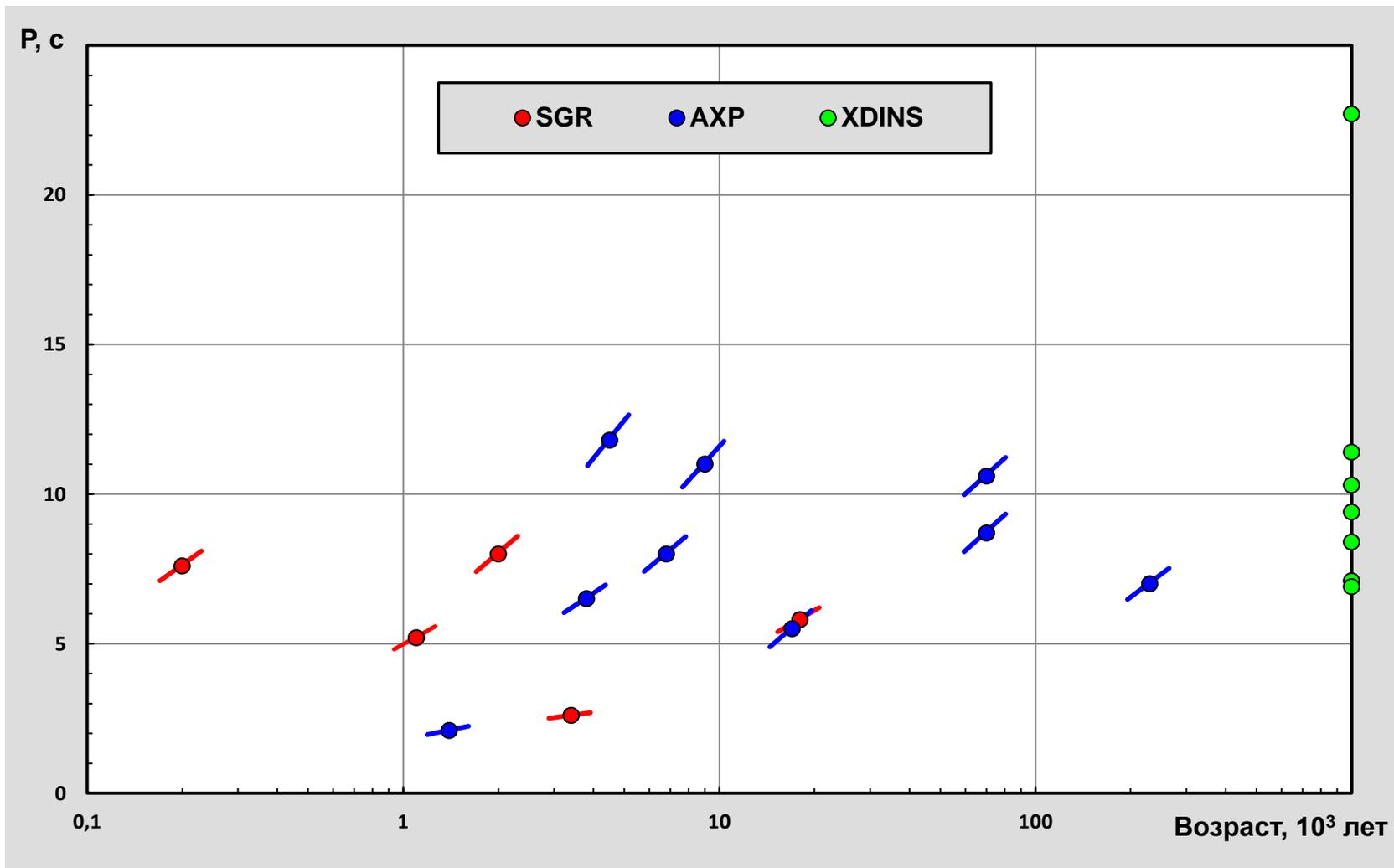
Truemper et al., Nuclear Phys. B Proc. Suppl. **132**, 560 (2004).

RXJ1856.5–3754

- 1) Магнитное поле $B > 10^{13}$ Гс.
- 2) Большой размер нейтронной звезды $R \approx 14$ км.

**Возможно, XDINSs имеют почти дипольное магнитное поле и
большие размеры $R \approx 15$ км!**

Эволюция периода SGR, AXP и XDINSs



Спекулятивные выводы

- Если SGR, AXP и XDINSs являются магнитарами, то они, возможно, представляют из себя последовательные этапы эволюции одного типа нейтронных звезд.
- Отличительной чертой этого типа нейтронных звезд может быть их большой размер $R \gtrsim 15$ км.
- Эволюция таких объектов может начинаться с SGR, проходить через стадию AXP, и заканчиваться на стадии XDINSs.