

# **Взрыв маломассивной нейтронной звезды и полная энергия вспышек коллапсирующих сверхновых**

**Имшенник В.С.**  
**ИТЭФ им. А.И.Алиханова**

***Семинар "Нейтронная и ядерная астрофизика" им. Г.Т.Зацепина***

**Москва, ФИАН им. П. Н. Лебедева, 10 июня 2011**



# Минимальная масса нейтронной звезды

- Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М., “Статистическая физика”. М.-Л.: ГИИТЛ, 1951.

$$M_{\text{НЗmin}} \approx 0.18M_{\odot}$$

$$\checkmark m_i \varphi + \mu_i = \text{const}$$

✓ вырожденное нейтронное ядро  $M, R$

✓ оболочка из ядер железа  $M_{\text{env}}, R_{\text{env}}$

$$\checkmark M_{\text{env}} \ll M, R_{\text{env}} \gg R$$

- Зельдович Я.Б., Новиков И.Д., “Теория тяготения и эволюция звёзд”. Изд. Наука, 1971.  
Блинников С.И., Новиков И.Д., Переводчикова Т.В., Полнарев А.Г., ПАЖ, **10**, с.422, 1984.

$$M_{\text{НЗmin}} \approx 0.1M_{\odot}$$

- Аксенов А.Г., Блинников С.И., Имшенник В.С., АЖ, **72**, с.717, 1995.

$$M_{\text{НЗmin}} \approx 0.0955M_{\odot}$$
$$\rho_c = 1.45 \cdot 10^{14} \text{ г/см}^3$$

$$\checkmark \mu_\nu = 0$$

$$\checkmark T = 0$$

$$M_{\text{НЗmin}} \approx 0.0925M_{\odot} \text{ (с учетом ОТО)}$$
$$\rho_c = 1.55 \cdot 10^{14} \text{ г/см}^3$$

✓ баротропное УС катализированного вещества  
Baum G., Bethe H.A., Pethick C. J., Nucl. Phys. A, **175**, p.225, 1971.

- [ссылка]

$$M_{\text{НЗmin}} \approx 0.086M_{\odot}$$

✓ вырожденное нейтронное ядро

✓ оболочка из ядер железа

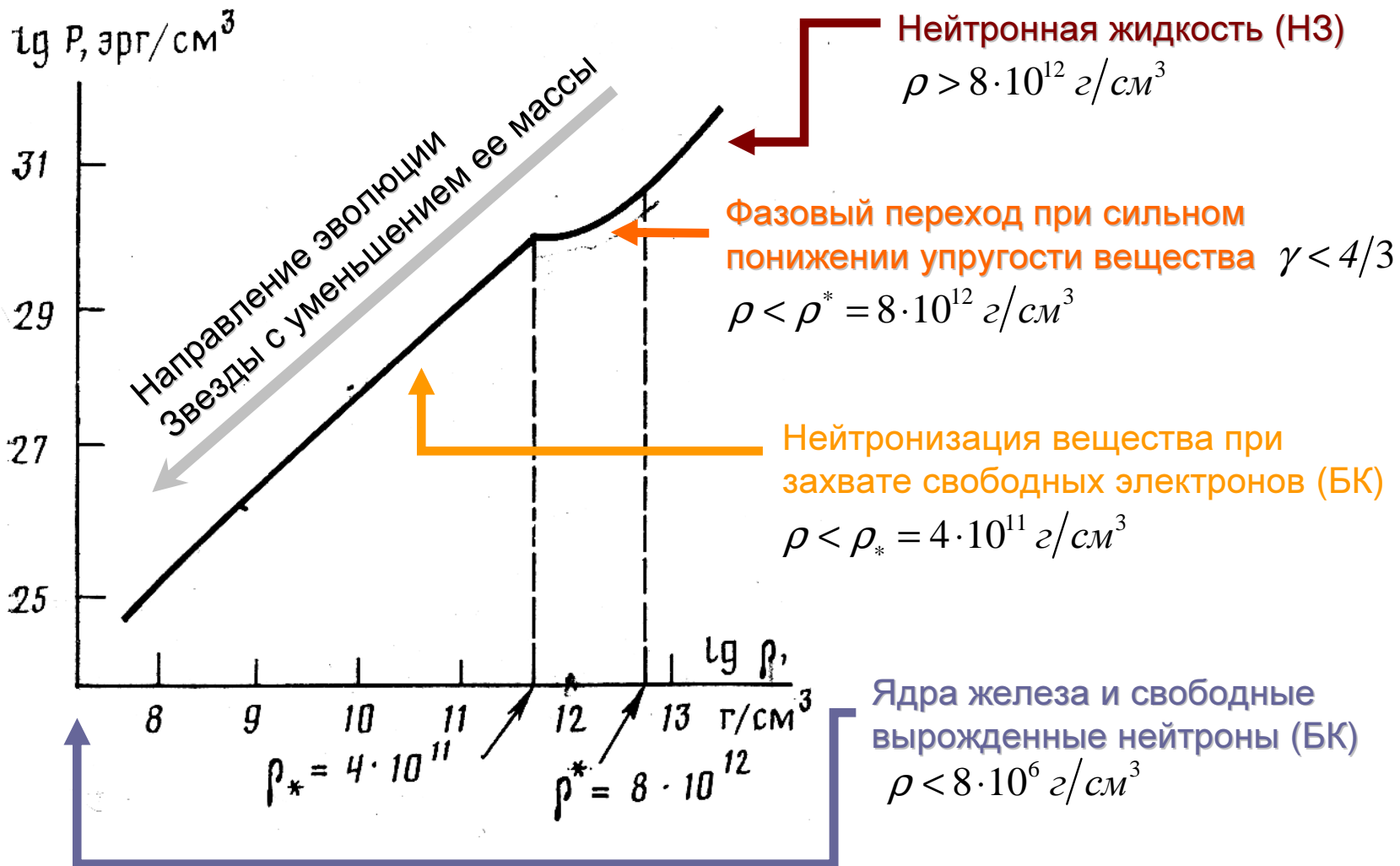
✓ кинетическое равновесие нейтронного излучения



# Уравнение состояния катализированного вещества

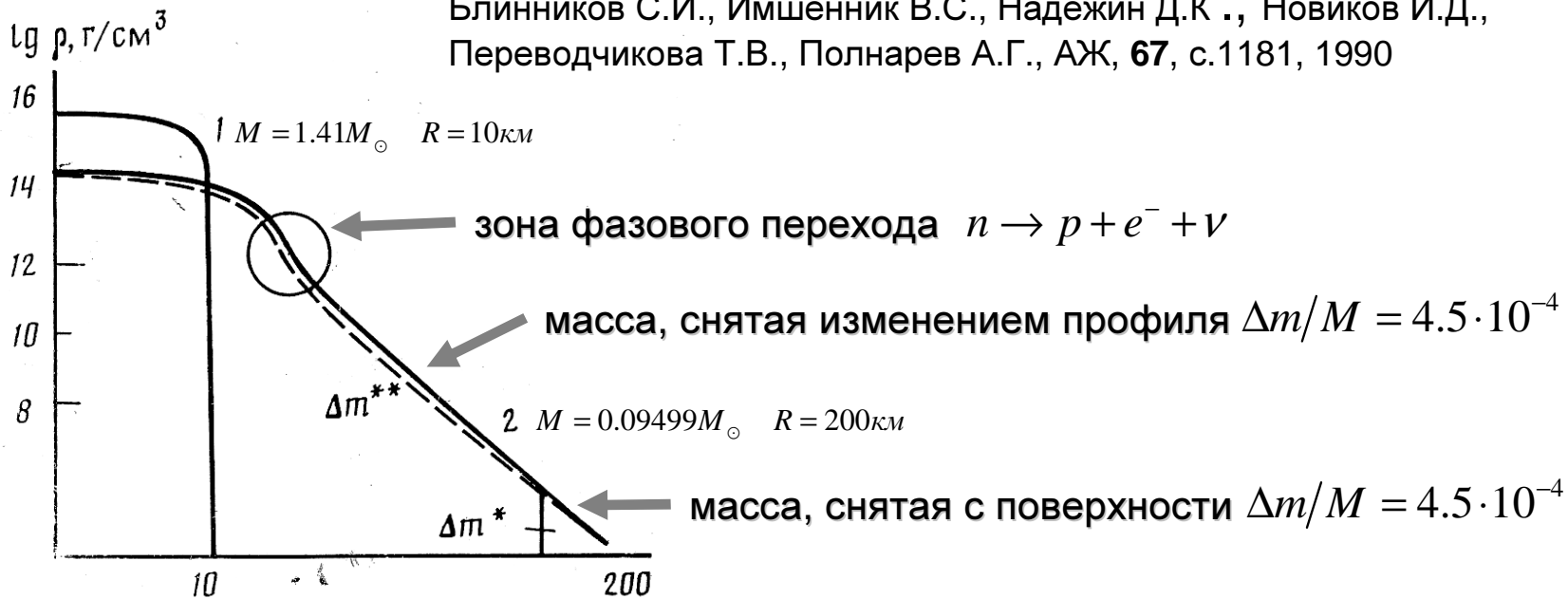
$$P = P_0(\rho) + \rho RT + \frac{1}{3} a T^4$$

$$E = E_0(\rho) + \frac{3}{2} RT + \frac{a T^4}{\rho}$$

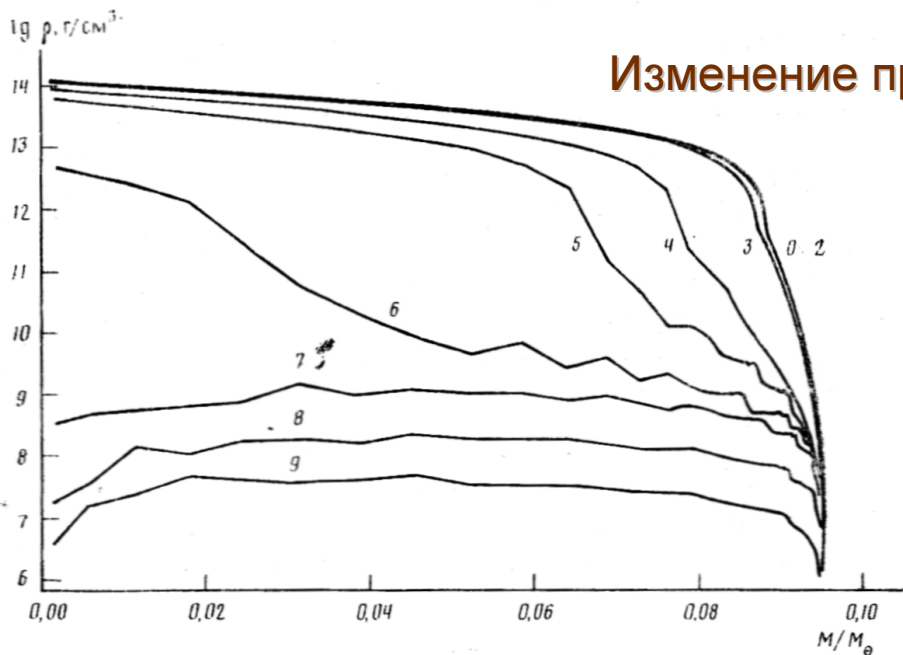


# Распределение плотности нейтронной звезды

Блинников С.И., Имшенник В.С., Надежин Д.К., Новиков И.Д.,  
Переводчикова Т.В., Полнарев А.Г., АЖ, 67, с.1181, 1990



## Изменение профиля плотности со временем



$$t_1 = 9.70 \cdot 10^{-2} c$$

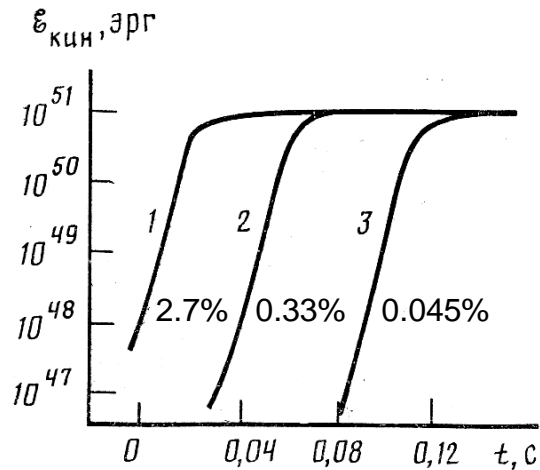
$$t_6 = 1.11 \cdot 10^{-1} c$$

$$t_7 = 1.20 \cdot 10^{-1} c$$

$$t_9 = 1.44 \cdot 10^{-1} c$$



# Кинетическая энергия взрыва



$$E_{kin} = 8.8 \cdot 10^{50} \text{ эрг} \approx 10^{51} \text{ эрг}$$

$$\epsilon_{kin} = 4.7 \text{ МэВ/нуклон}$$

## ДОПОЛНЕНИЯ

- учет конечных времен бета-процессов снижает полное энергосвечение, характер взрыва сохраняется.

Sumiyoshi K., Yamada S., Suzuki H., Hillebrandt W., *Astron. Astrophys.*, **334**, p.159, 1997.  
Colpi M., Shapiro S.L., Teukolsky S.A., *Astrophys. J.*, **339**, p.318, 1989;  
**369**, p.422, 1991;  
**414**, p.717, 1993.

- ограничение скорости обмена масс в двойной системе нейтронных звезд.

Имшенник В.С., *ПАЖ*, **18**, с.489, 1992.

- неоднородная модель маломассивной нейтронной звезды (с учетом конечной температуры и собственного вращения)



# Полная энергия взрыва коллапсирующих сверхновых

$$M \geq 10M_{\odot}, E_{CH\ kin} = (0.5 - 2.0) \cdot 10^{51} \text{ эрг} \text{ (90\% сверхновых)}$$

Nadyozhin D.K., Imshennik V.S., Int. J. Mod. Phys. A, **20**, p.6597, 2005.

## Гидродинамическая теория разлета оболочек сверхновых

$$\frac{\partial r}{\partial t} = u$$

$$\frac{\partial r^3}{\partial t} = \frac{3}{4\pi\rho}$$

$$\frac{\partial E}{\partial t} + P \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{\rho} \right) = \frac{16\pi^2 a c}{3} \frac{\partial}{\partial m} \left( \frac{r^4}{\kappa} \frac{\partial T^4}{\partial m} \right) + \varepsilon(m, t)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -4\pi r^2 \frac{\partial P}{\partial m} - \frac{Gm}{r^2} + \frac{\omega_0^2 r_0^4}{r^3}$$

- $\kappa = \kappa(\rho, T, X_i)$  - непрозрачность вещества ( $l_{Ross} = 1/\kappa\rho$ )
- $\omega_0$  - частота твердотельного вращения
- $X_i$  - весовая концентрация
- уравнение состояния идеального газа с учетом ионизации
- $\varepsilon(m, t)$  - доп. энерговыделения (радиативный нагрев)





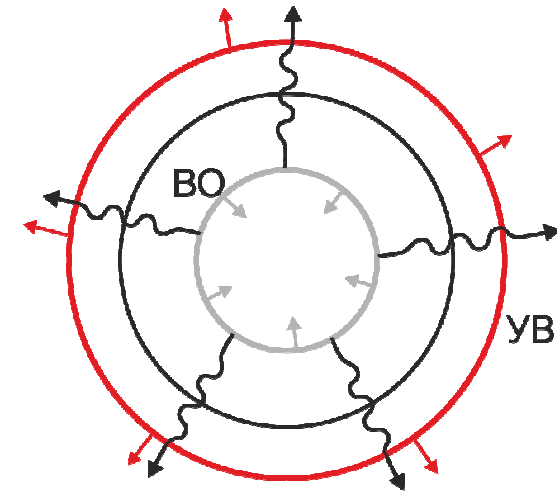
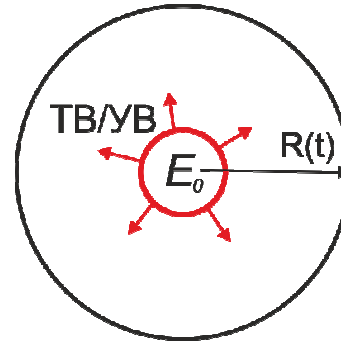
# Протяженные оболочки предсверхновых красные сверхгиганты

- большинство СНII имеют протяженную структуру ( $R_0 \geq 10^3 R_\odot$ )

- $M_0, R_0, E_0$  - начальные интегральные параметры

- болометрическая светимость СН:

$$L(t) = - \frac{16\pi^2 a c r^4}{3 \kappa} \frac{\partial T^4}{\partial m} \Big|_{m=M_{ph}(t)}$$



$L(t)$ , эрг/с



## болометрическая кривая светимости

Грасберг Э.К., Имшенник В.С., Надежин Д.К.,  
Astrophys. Space Sci., **10**, с.3, 1971.

фотометрические кривые светимости: U, B, V, R, I

$$V: \lambda_0 = 5500 \text{ \AA}, \quad \Delta\lambda = 800 \text{ \AA}$$

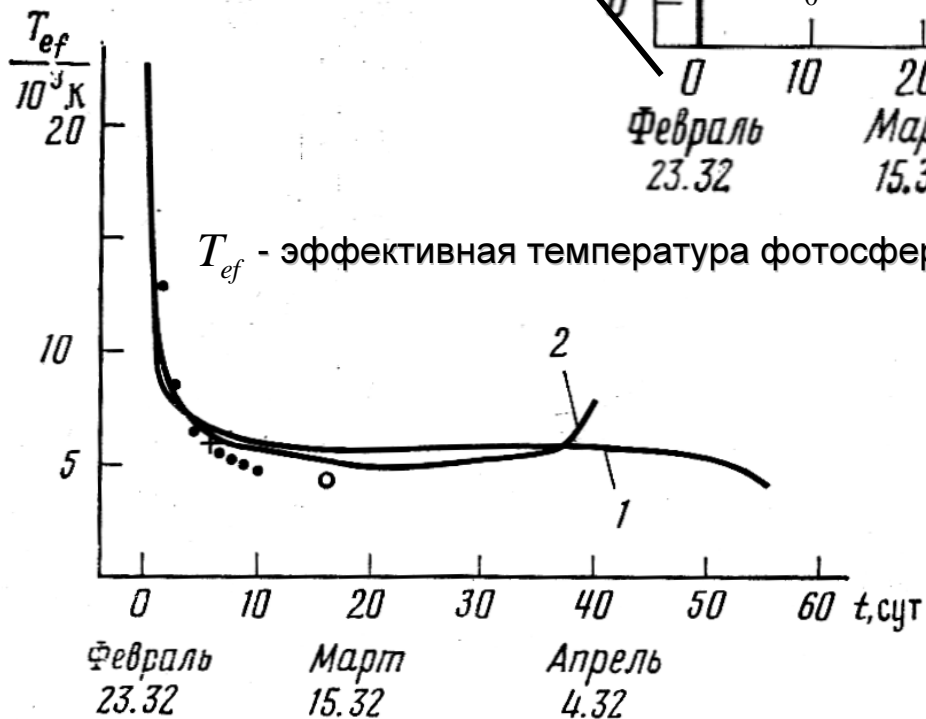
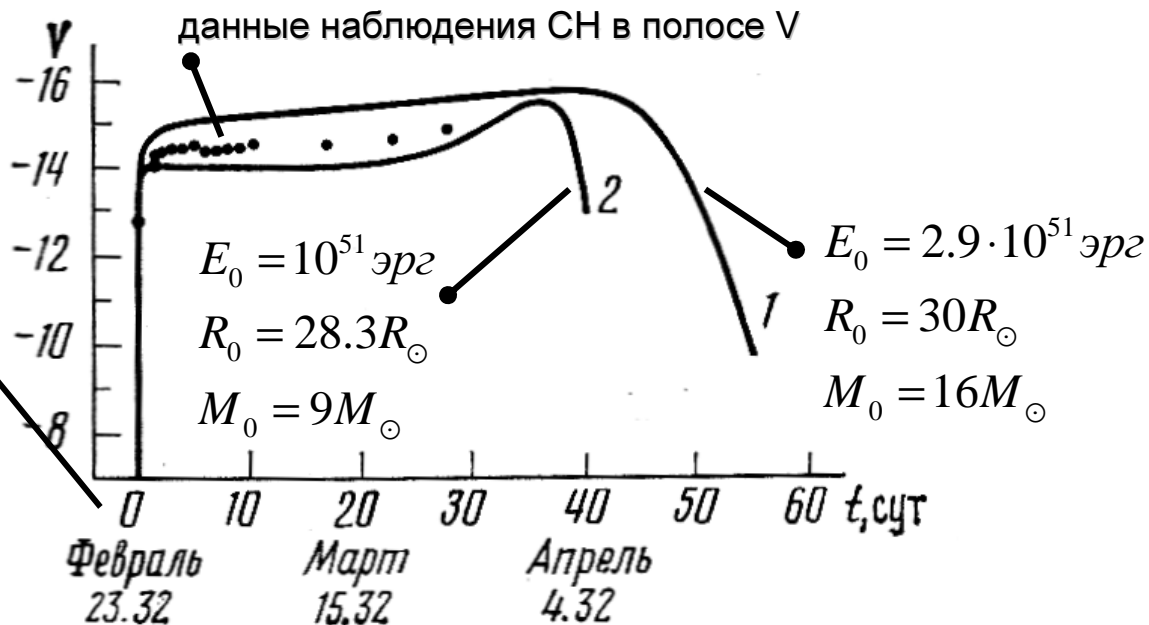
$$\left[ V = 1.48 - 2.51 \lg(F_{\lambda_0} \Delta\lambda) \right]$$



# Компактные оболочки предсверхновых голубые сверхгиганты

первый и ближайший представитель: SN1987A в БМО 23.02.1987

отсчет времени производится от момента регистрации второго нейтринного сигнала 23.32UT



Многочисленные гидродинамические расчеты дали полную энергию взрыва  $E_0$  в интервале:  $(1-3) \cdot 10^{51}$  эрг.

Грасберг Э.К., Имшенник В.С.,  
Надежин Д.К., Утробин В.П.,  
ПАЖ, 13, с.547, 1987.





## Сверхновая SN2006gy (СНII)

Особенно впечатляет недавнее открытие и рассмотрение путем гидродинамических расчетов необычайно яркой сверхновой SN2006gy (СНII): максимум болометрической кривой блеска достиг значения  $2 \cdot 10^{44}$  эрг/с (вместо  $10^{43}$  эрг/с у обычных СНII), т.е. в 20 раз (!) выше. Найденное энерговыделение составило при этом  $2.9 \cdot 10^{51}$  эрг !

Woosley S.F., Blinnikov S.I., Heger A., Nature, **450**, p.430, 2007.

Единица полной энергии вспышки коллапсирующих сверхновых названа *Bethe* =  $10^{51}$  эрг (в честь великого астрофизика Ганса Бете!).



# Заключение

- Твердо установленная (но не измеренная в наблюдениях) наименьшая масса НЗ:  $M_{\text{НЗ min}} \approx 0.1M_{\odot}$
- Энергия взрывного разрушения НЗ в составе двойной системы НЗ (по данным расчетов):  $E_{\text{НЗ}}^* \approx 10^{51} \text{ эрг}$  ( $\varepsilon^* = 4.7 \text{ МэВ/нуклон}$ )
- Энергия (кинетическая) вспышек коллапсирующих сверхновых СНII (более тысячи объектов):  $E_{\text{CH kin}} = (0.5 - 2.0) \cdot 10^{51} \text{ эрг}$
- Ротационный сценарий взрыва коллапсирующих сверхновых выдвигает гипотезу о равенстве этих величин  $E_{\text{НЗ}}^* \approx E_{\text{CH kin}}$  (?)

