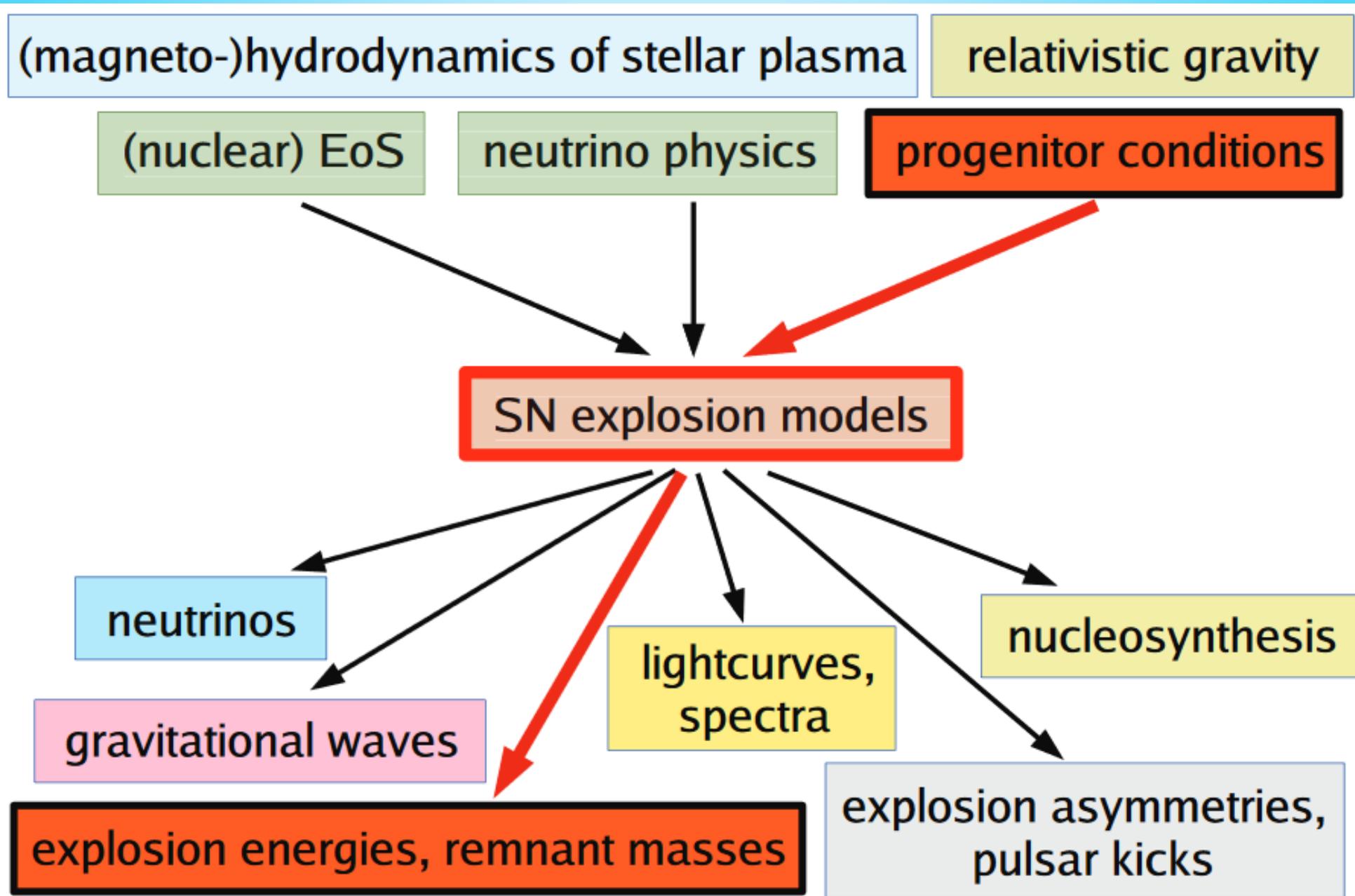
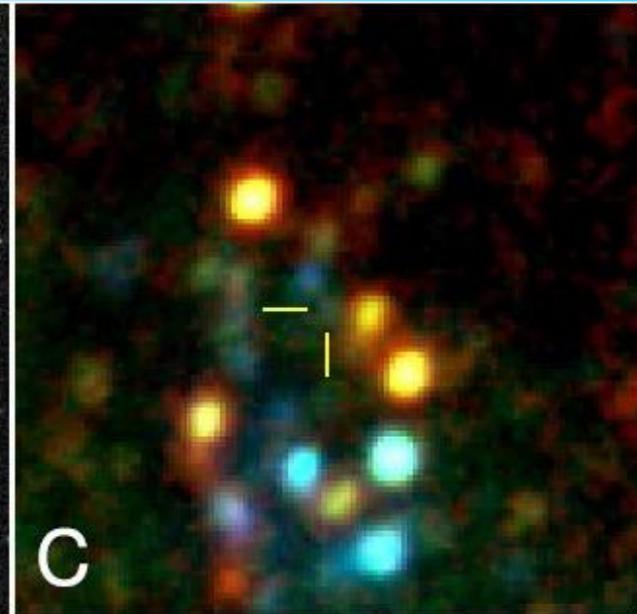
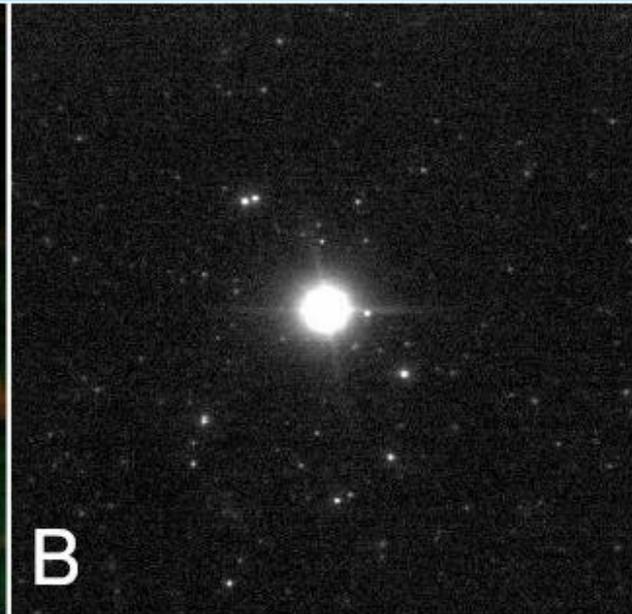
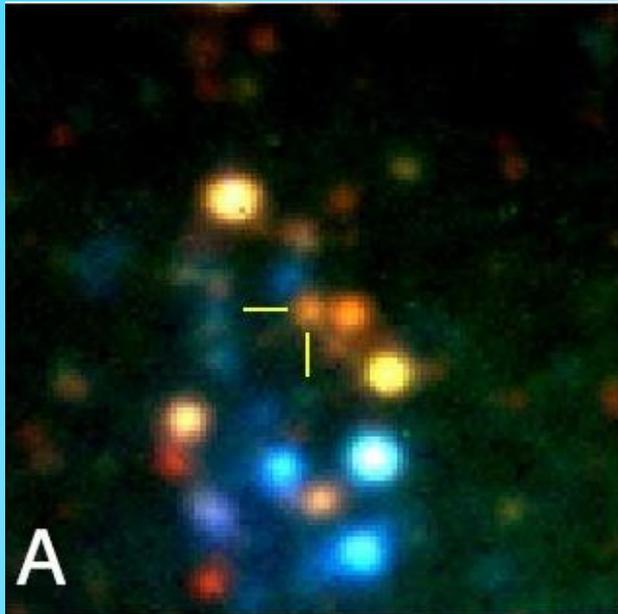


СВЕРХНОВЫЕ





СВЕРХНОВЫЕ

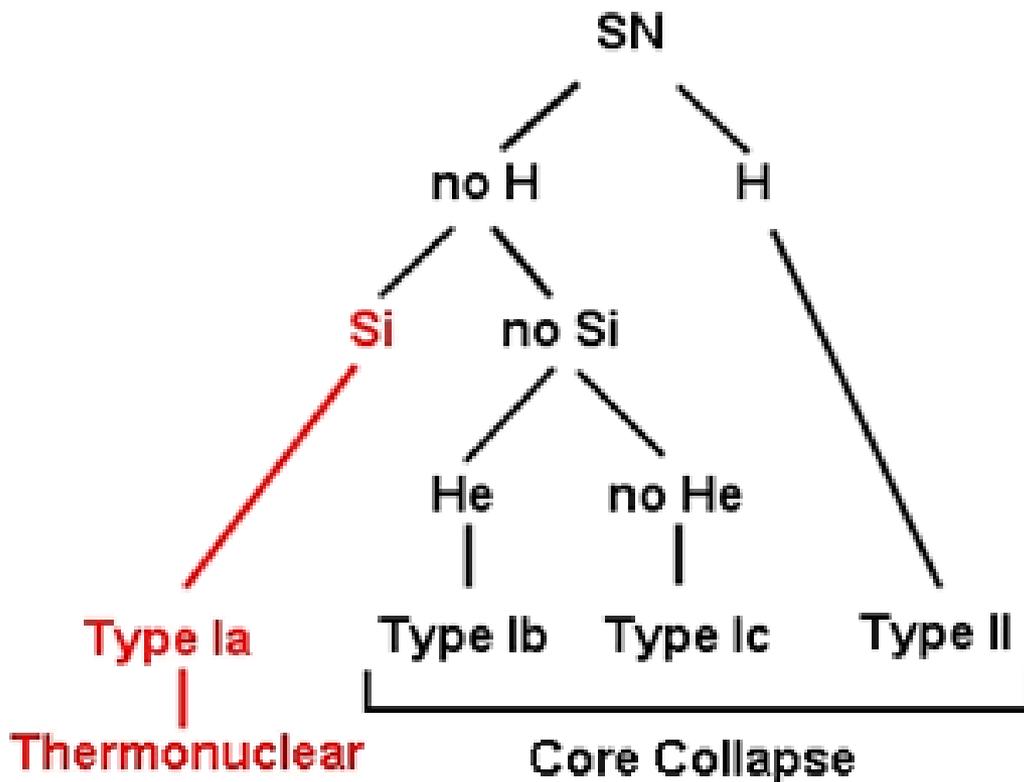


Жизнь массивной звезды заканчивается колоссальным взрывом – сверхновой. Также взрываться могут белые карлики, если они стали слишком тяжелыми.

На короткое время звезда становится ярче целой галактики!

См. свежие публикации и обзоры в http://xray.sai.msu.ru/~polar/sci_rev/sn.html

ТИПЫ СВЕРХНОВЫХ



Термоядерный взрыв (Ia) или коллапс ядра. Коллапс в основном происходит за счет нейтронизации вещества (захват электронов) и фотодиссоциации ядер железа (что ведет к падению температуры).

Сверхновые звёзды

I
Водорода нет

II
Водород есть

Коллапс
ядра

Ia
Есть
кремний

Ib **Ic**
Есть **Нет**
гелий **гелия**

IIf
Слабые линии
водорода,
исчезающие со
временем

IIн
Эмиссион-
ные линии
водорода

По спектру

Термоядерный
взрыв

IIIР
Плато
(медленное
падение
блеска)

IIIЛ
Линейная
(быстрое
падение
блеска)

По кривой
блеска

ЭНЕРГЕТИКА

Как уносится энергия:

Нейтрино

Кинетическая
энергия
вещества

Излучение

Ia – термоядерный взрыв.

Нейтринное излучение мало.

Полное энергосодержание $\sim 2 \times 10^{51}$ эрг.

Кинетическая энергия $\sim 10^{51}$ эрг.

Высвечивается энергия
радиоактивного распада никеля-56.

II – коллапс ядра.

Нейтрино уносят $\sim 10^{53}$ эрг.

Кинетическая энергия $\sim 10^{51}$ эрг.

Высвечивается $\sim 10^{49-50}$ эрг.

В начале излучается тепловая
энергия оболочки (до ~ 10 дней),
затем – распад никеля-56 и
кобальта-56.

Сверхновая с неустойчивостью
рождения пар (**PISN**).

Термоядерный взрыв
массивного кислородного ядра.

Энергия взрыва $\sim 10^{52}$ эрг.

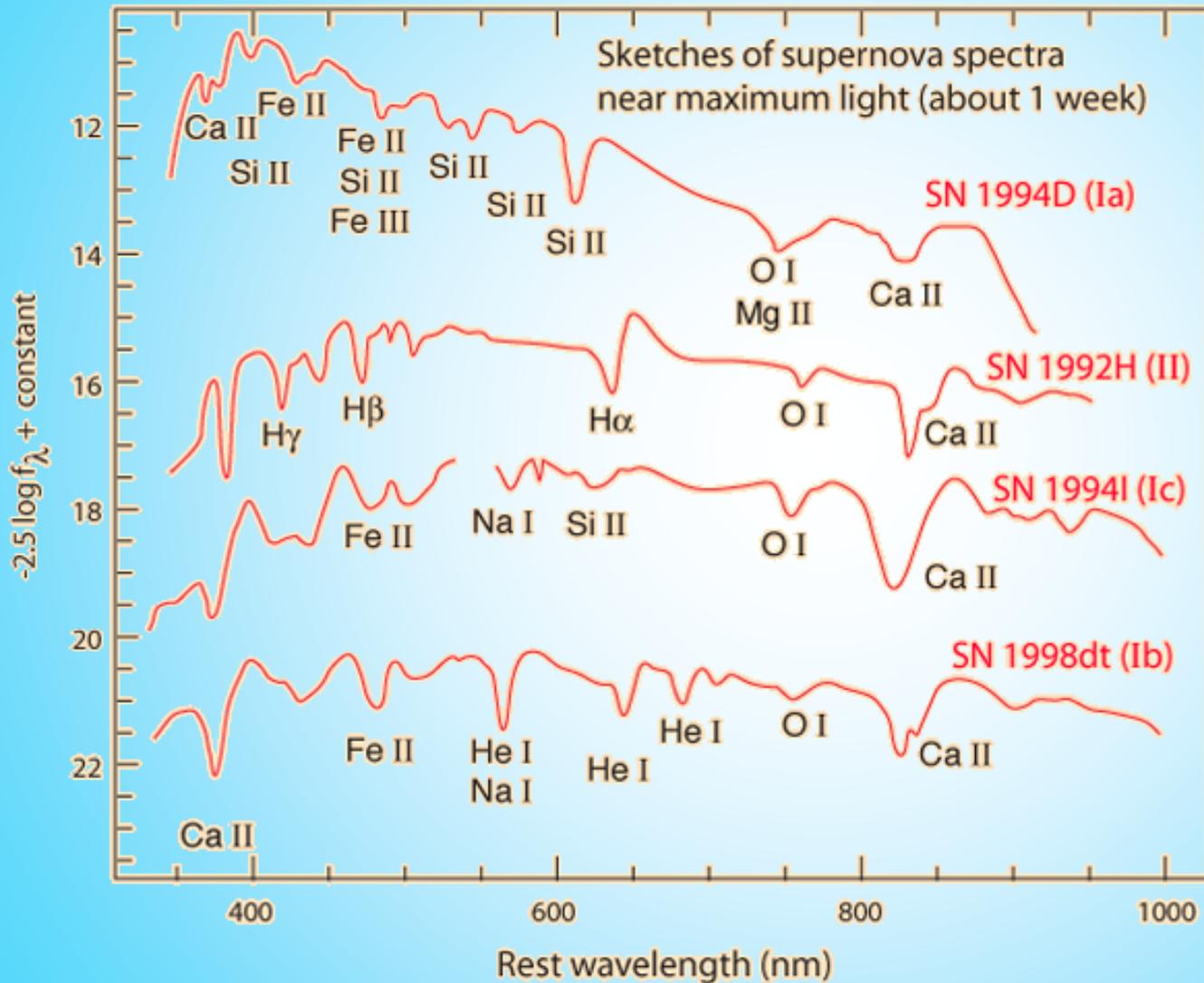
Формирование большого
количества никеля.

$$E_b \sim E_g \approx \frac{3}{5} \frac{GM_{\text{ns}}^2}{R_{\text{ns}}} \approx 3.6 \times 10^{53} \left(\frac{M_{\text{ns}}}{1.5 M_{\odot}} \right)^2 \left(\frac{R_{\text{ns}}}{10 \text{ km}} \right)^{-1} \text{ erg.}$$

Дополнительные источники:

- Вращение черной дыры;
- Вращение нейтронной звезды;
- Столкновение оболочек.

ТИПИЧНЫЕ СПЕКТРЫ



Sketches of spectra from Carroll & Ostlie, data attributed to Thomas Matheson of National Optical Astronomy Observatory.

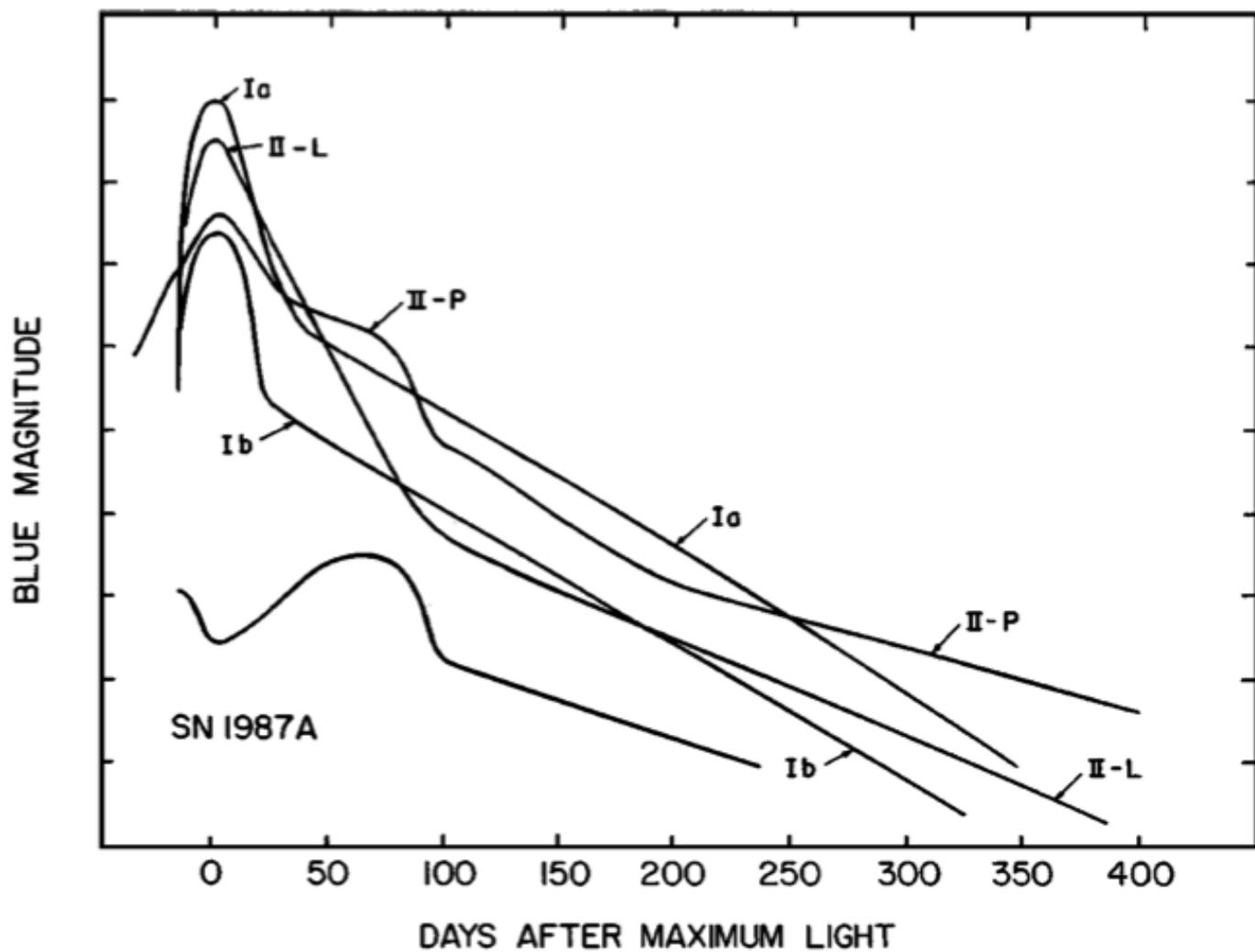
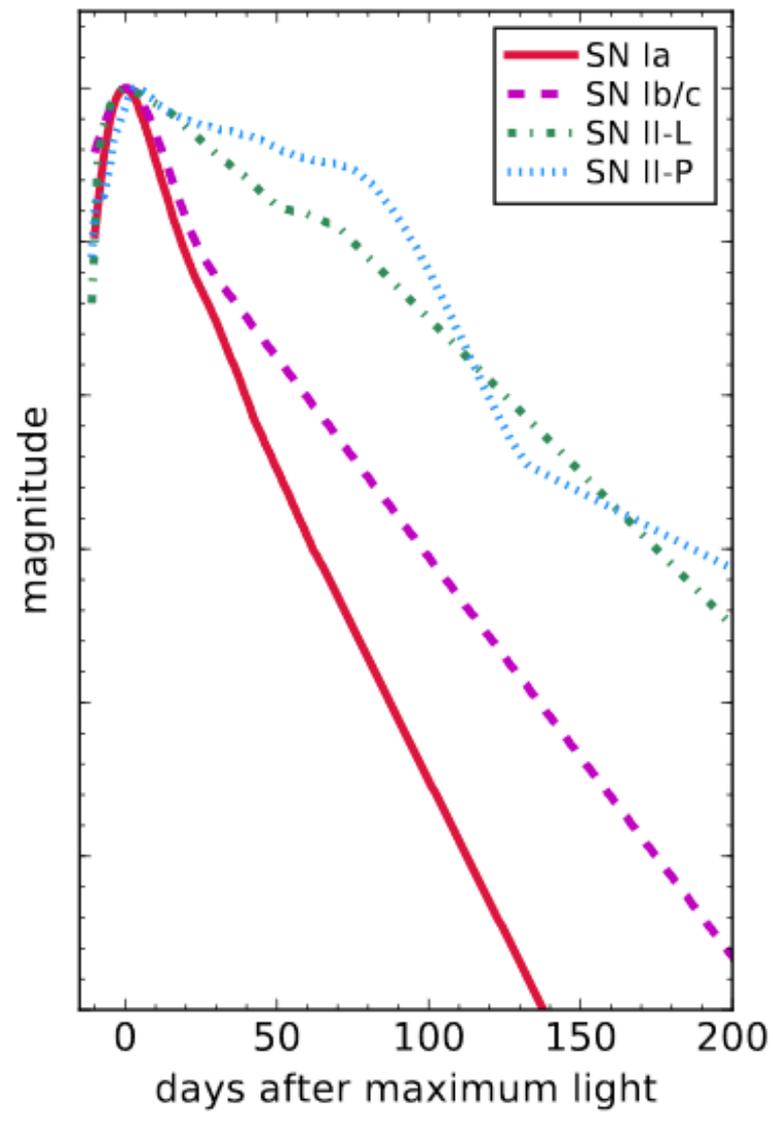
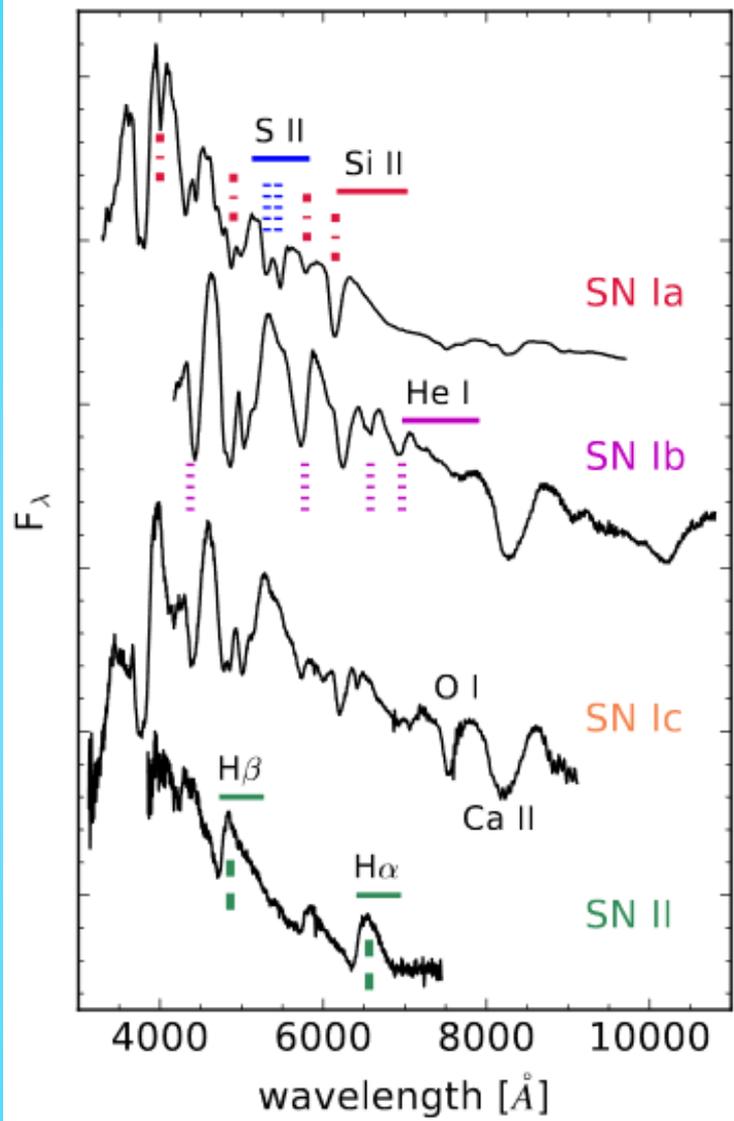


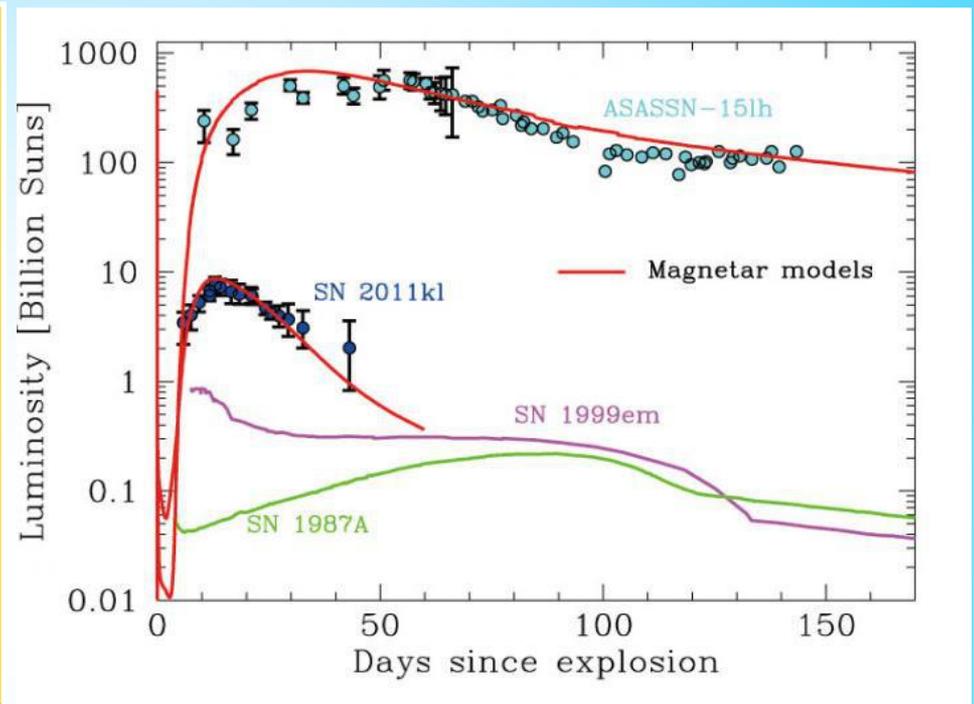
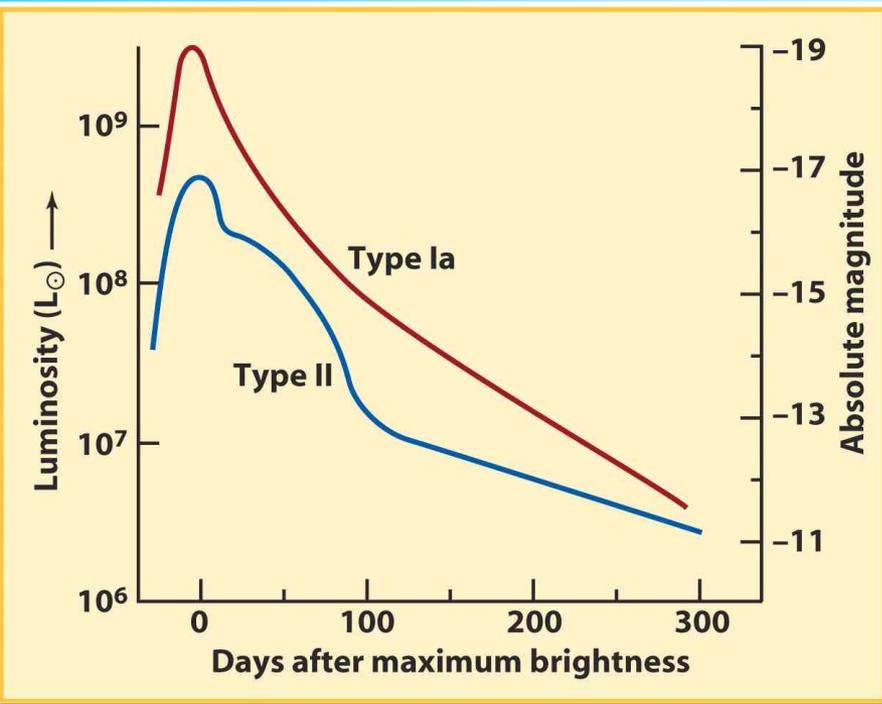
Figure 3 Schematic light curves for SNe of Types Ia, Ib, II-L, II-P, and SN 1987A. The curve for SNe Ib includes SNe Ic as well, and represents an average. For SNe II-L, SNe 1979C and 1980K are used, but these might be unusually luminous.

Figure Credit: Wheeler, J. C., & Harkness, R. P. 1990, RPPh, 53, 1467



1806.07267

КРИВАЯ БЛЕСКА СВЕРХНОВОЙ



Bersten et al.

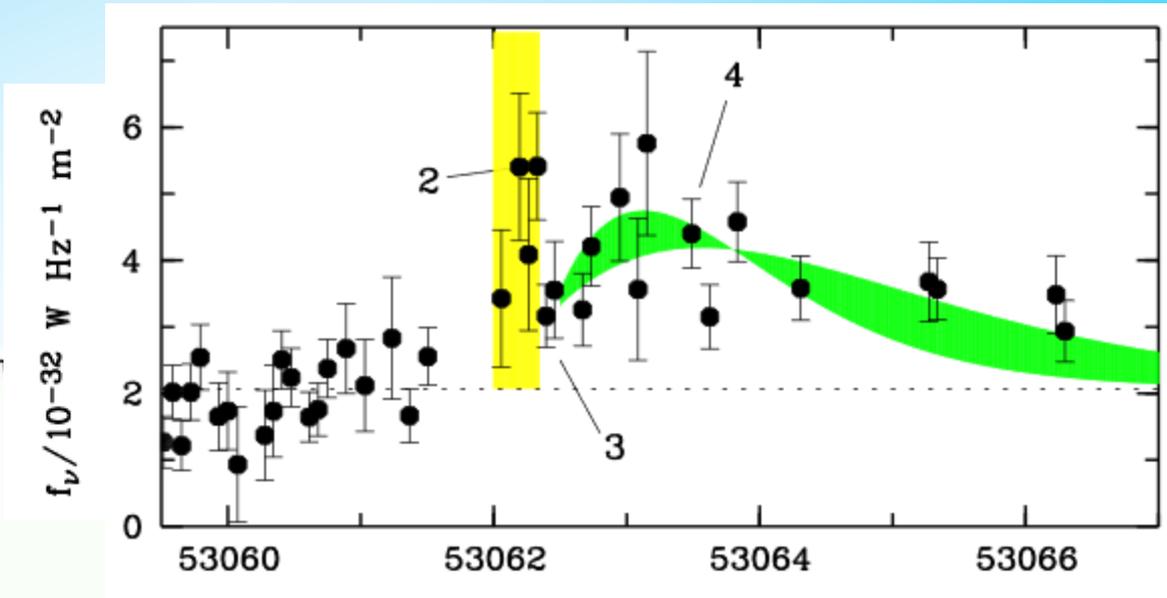
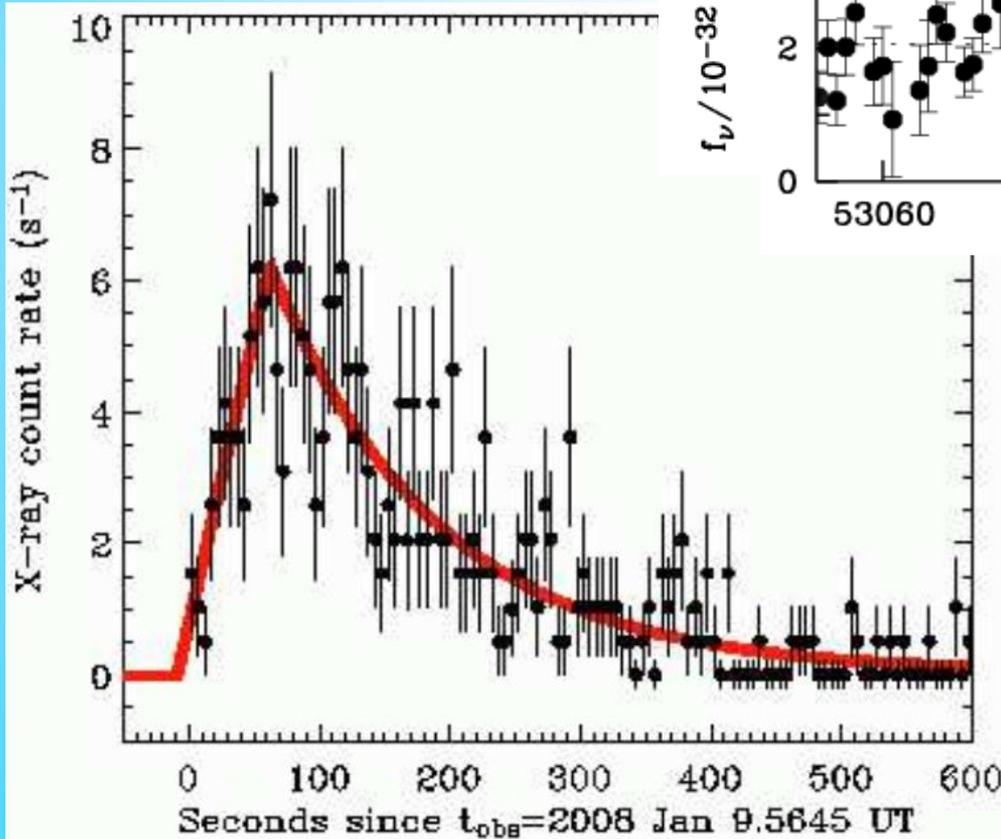
<http://pics-about-space.com>

В течение сотен дней после коллапса сверхновая видна в основном за счет распада радиоактивных элементов.

На ранних стадиях также могут быть дополнительные источники энергии.

ВЫХОД УДАРНОЙ ВОЛНЫ И ПРЕКУРСОР

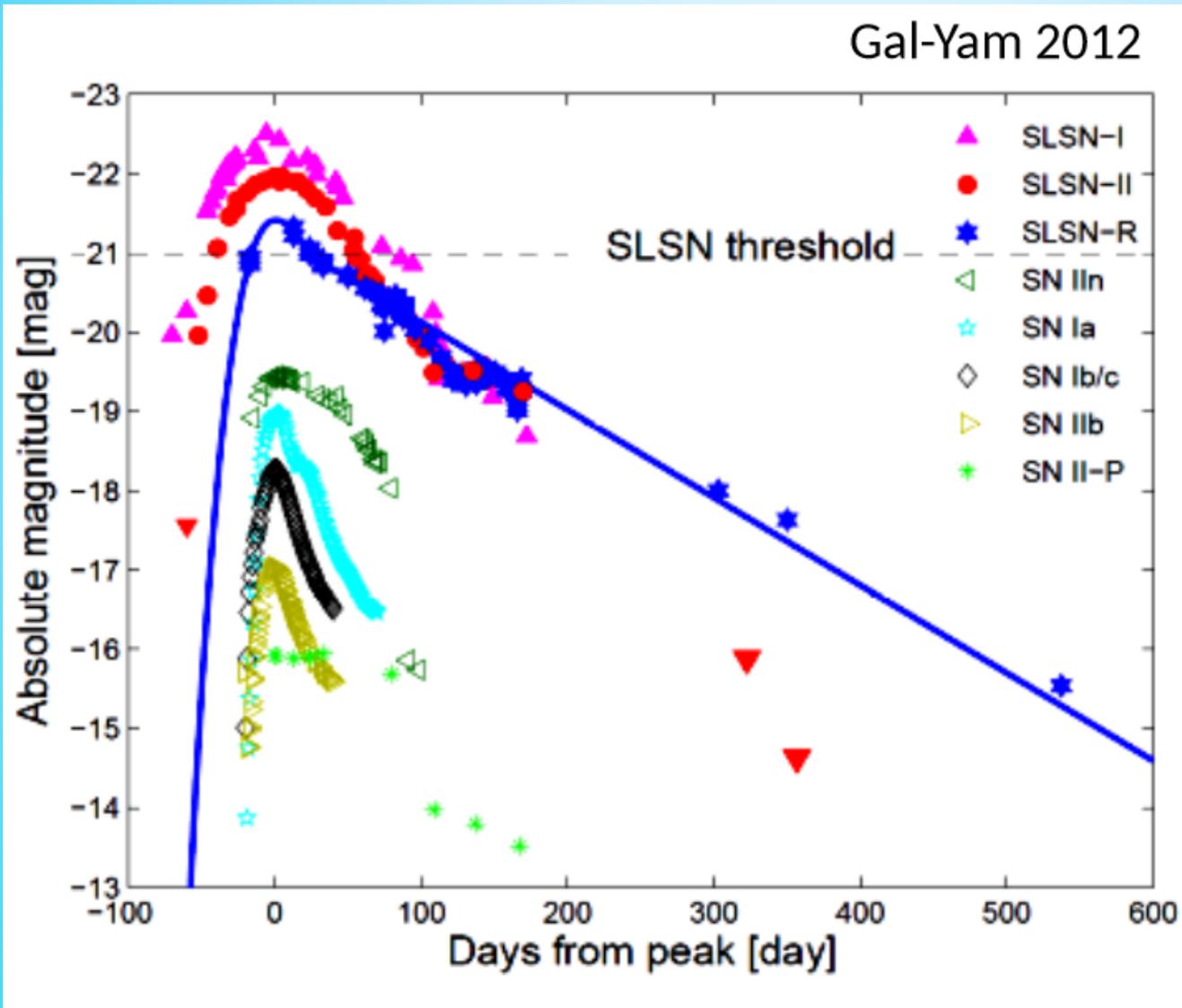
Выход ударной волны
Рентгеновские данные.



0803.3596

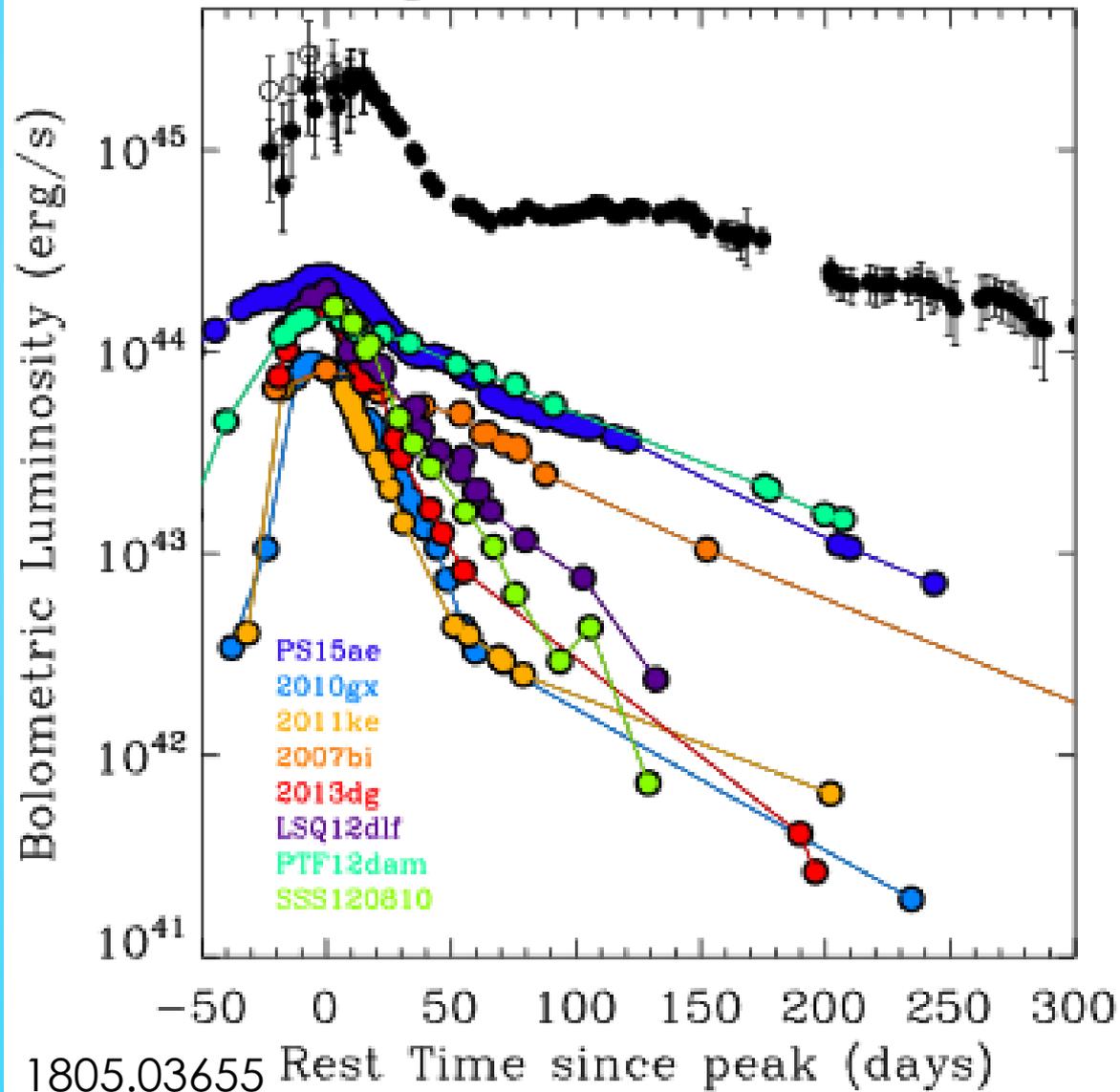
Желтым показана область
прекурсора выхода
ударной волны.
Сама сверхновая
была обнаружена
через 2 недели.

СВЕРХНОВЫЕ С БОЛЬШОЙ СВЕТИМОСТЬЮ



См. обзор в
arXiv: [1812.01428](https://arxiv.org/abs/1812.01428)
и arXiv: [1803.01875](https://arxiv.org/abs/1803.01875)

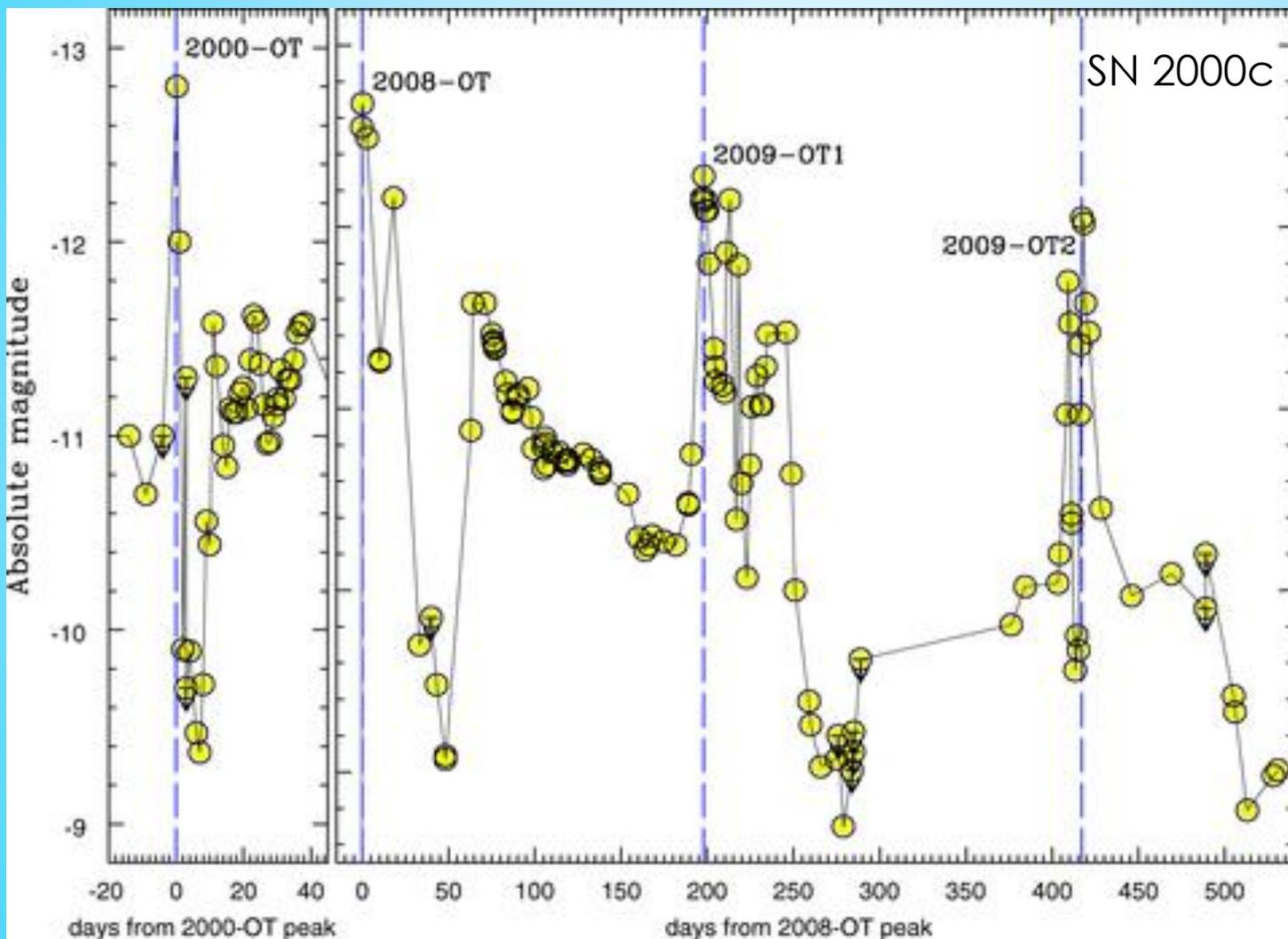
ОСОБЫЙ СЛУЧАЙ: ASASSN-15LH



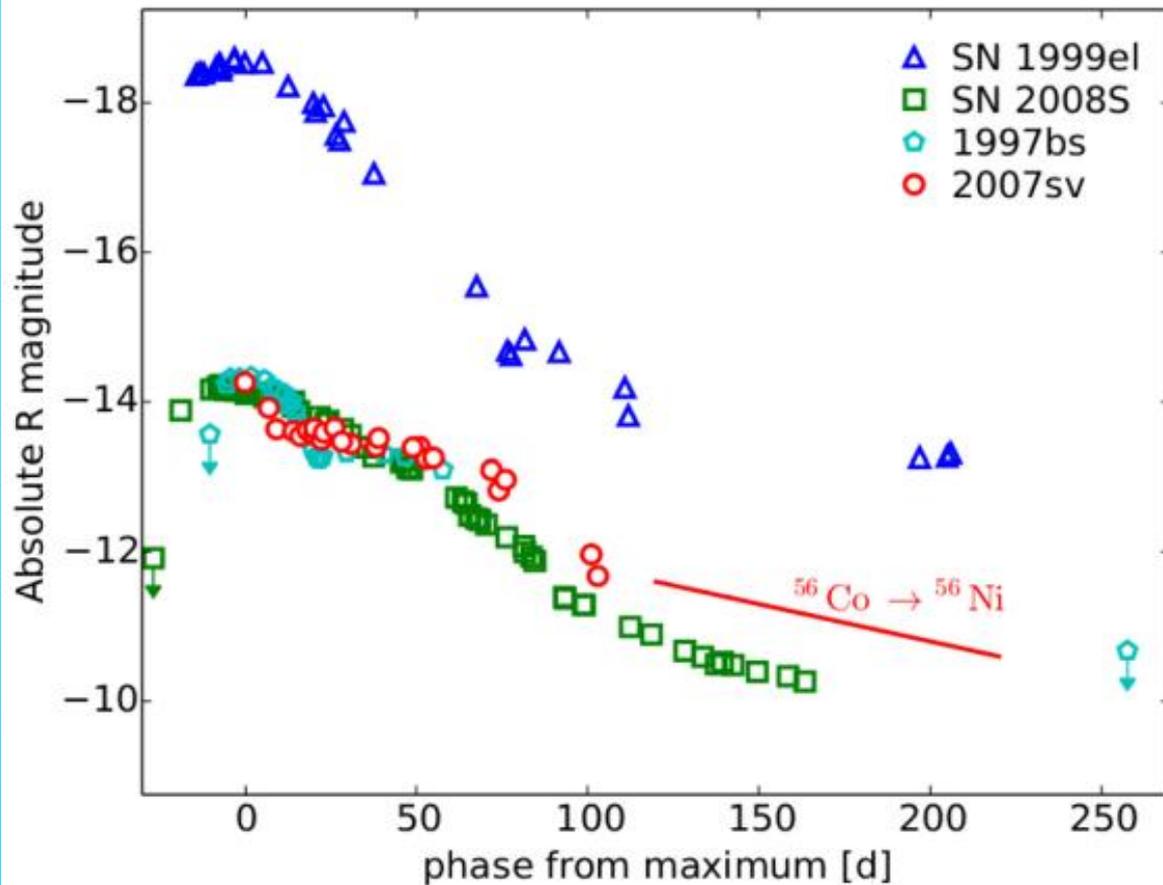
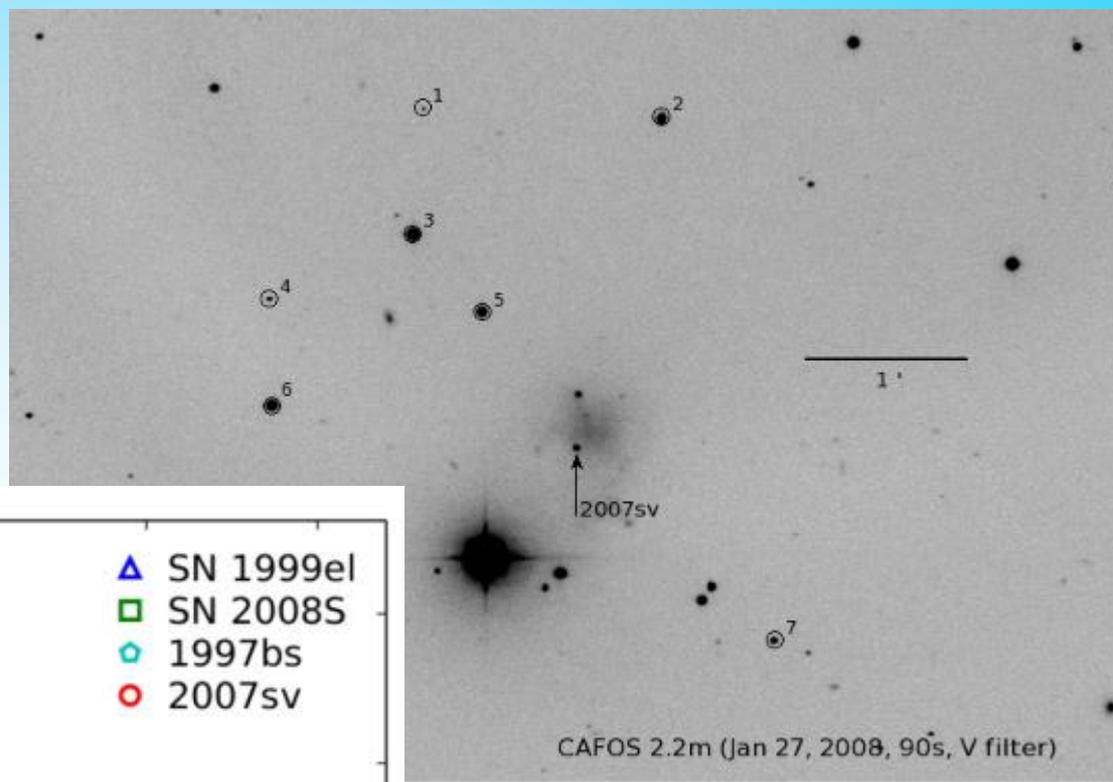
$$L_{\text{peak}} \sim 2 \times 10^{45} \text{ erg/s}$$
$$E_{\text{rad}} \sim 2 \times 10^{52} \text{ erg}$$

1507.03010

ПОДДЕЛЬНЫЕ СВЕРХНОВЫЕ

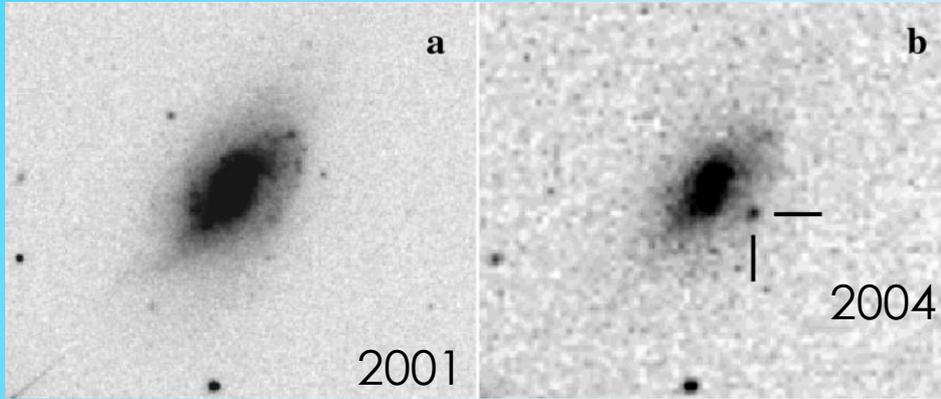


SN 2007SV

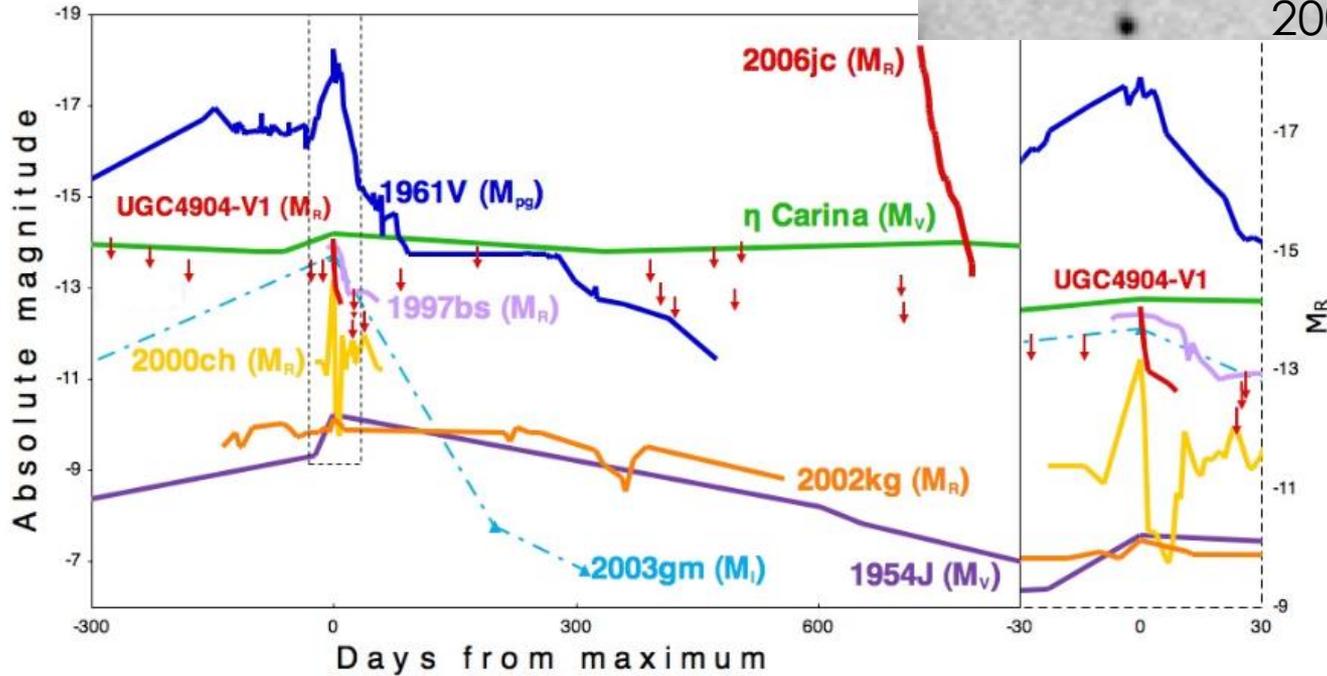
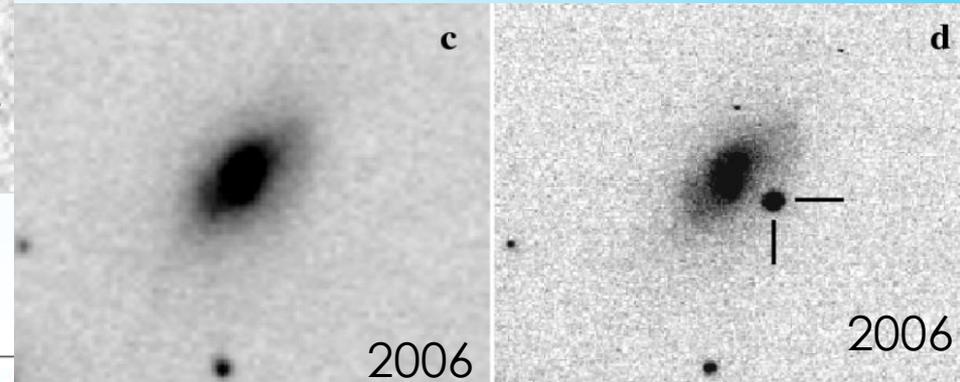


Tartaglia et al.
MNRAS447,117 (2015)

SN 2006JC

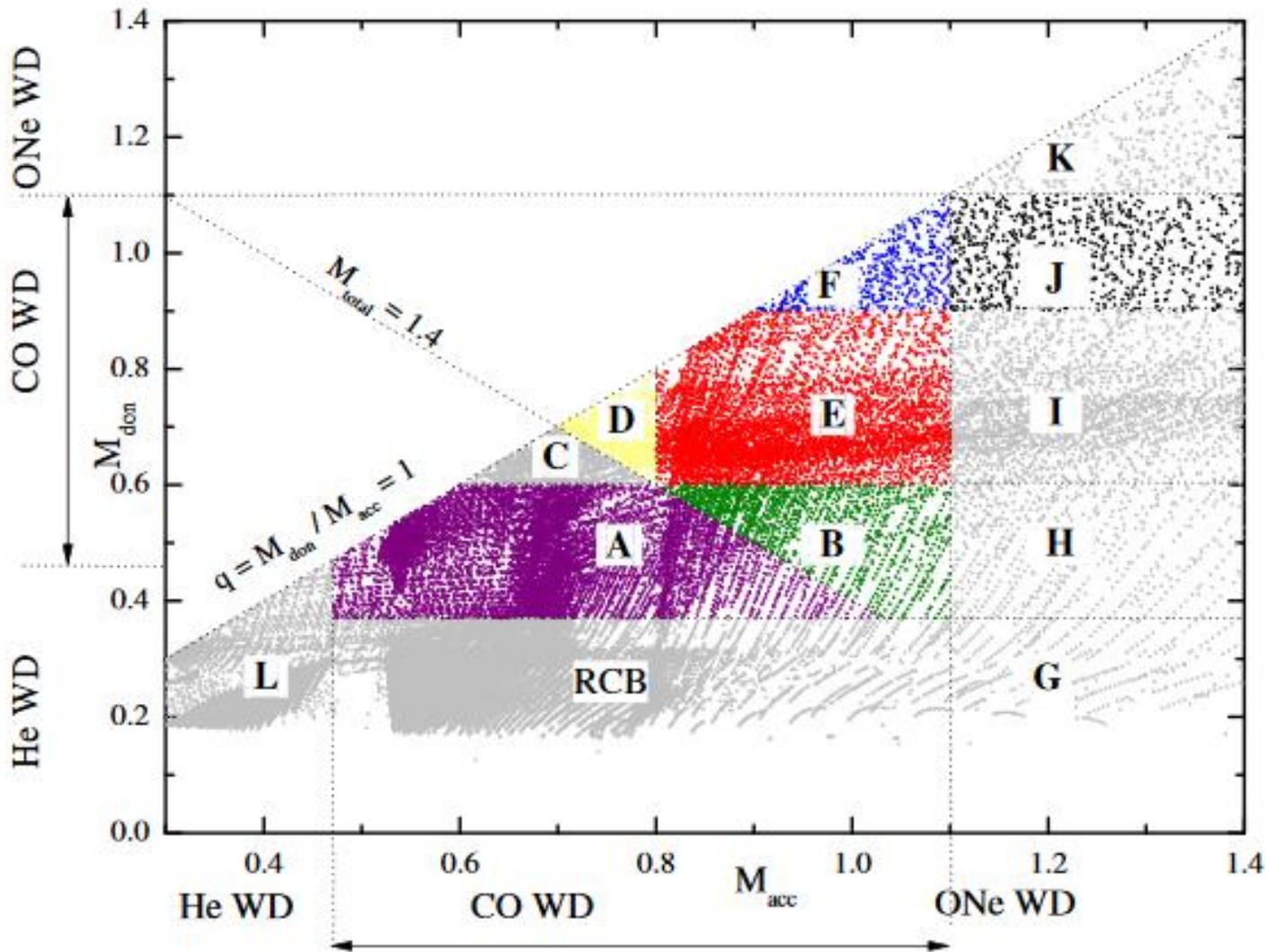


UGC4904V1 и SN2006jc



0703663

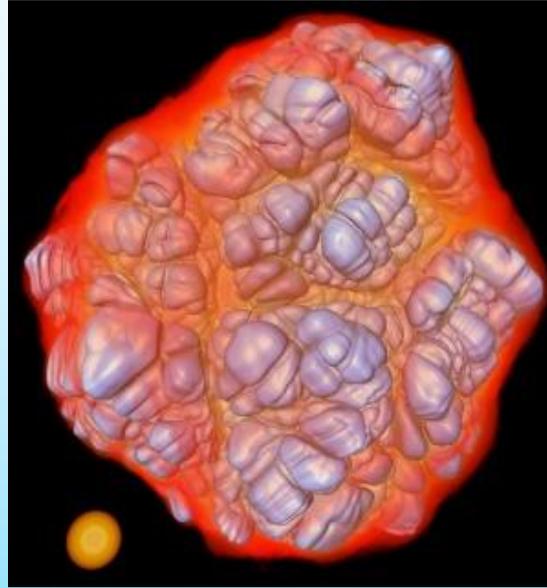
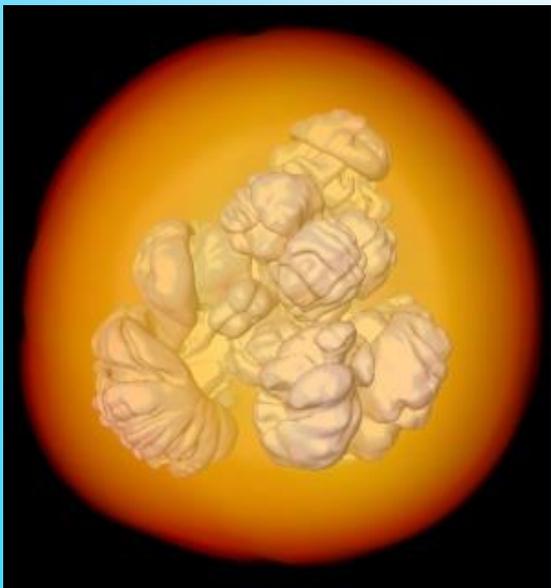
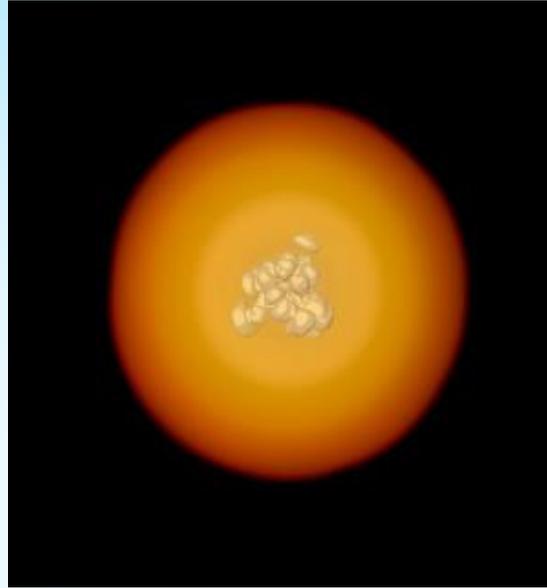
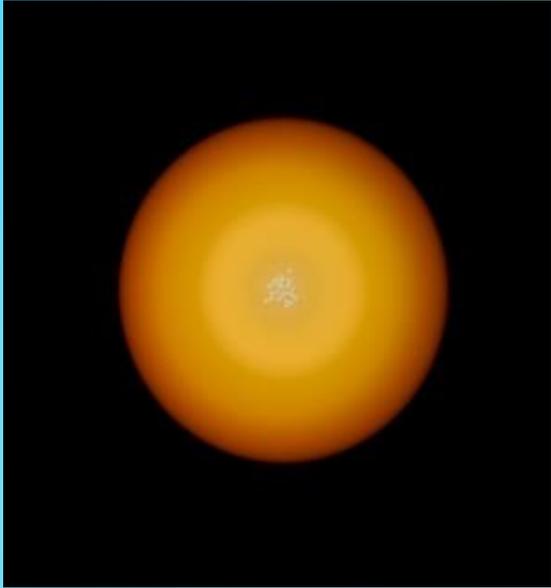
СЛИЯНИЯ WD И SNIa



A, B, D, E, F, J – SNIa

G, H, I - AIC

ВЗРЫВ SN IA



Достигнув критической массы, CO белые карлики взрываются (термоядерное горение углерода и кислорода).

Это термоядерный взрыв, полностью разрушающий объект.

Наблюдения именно таких сверхновых привели к открытию темной энергии.

Они также очень важны для синтеза многих тяжелых элементов.

См. обзор в arXiv: 1805.07268.

(Roepeke et al.)

ВЗРЫВ СВЕРХНОВОЙ ТИПА IA

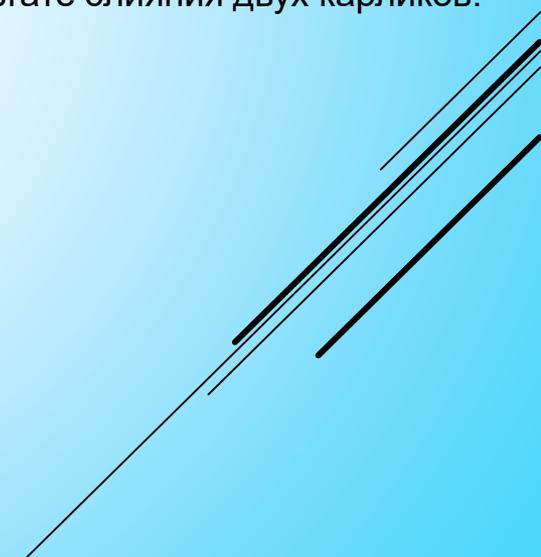
Thermonuclear Supernova Explosion



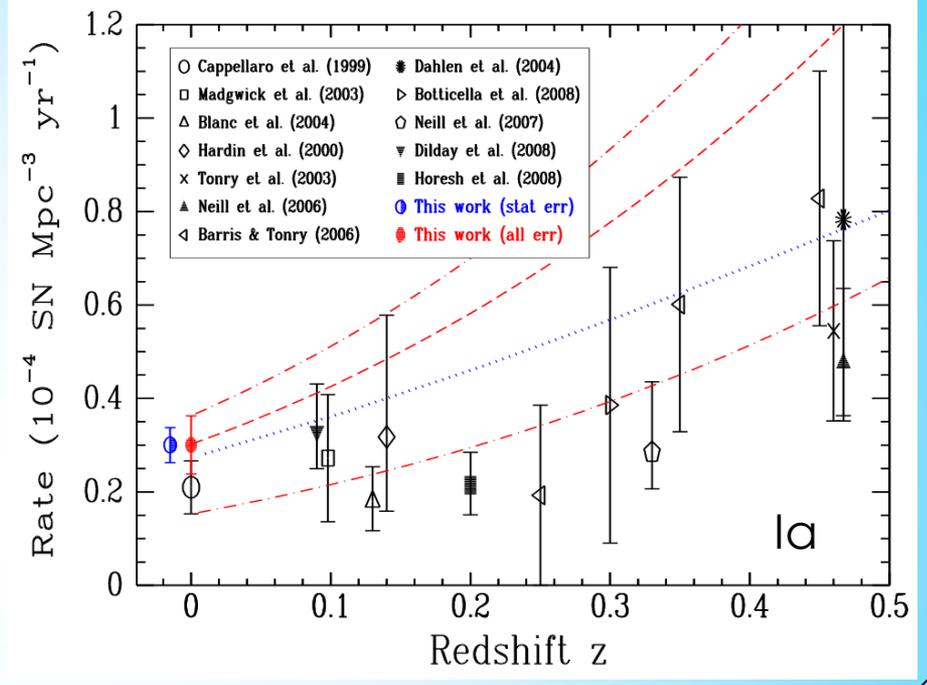
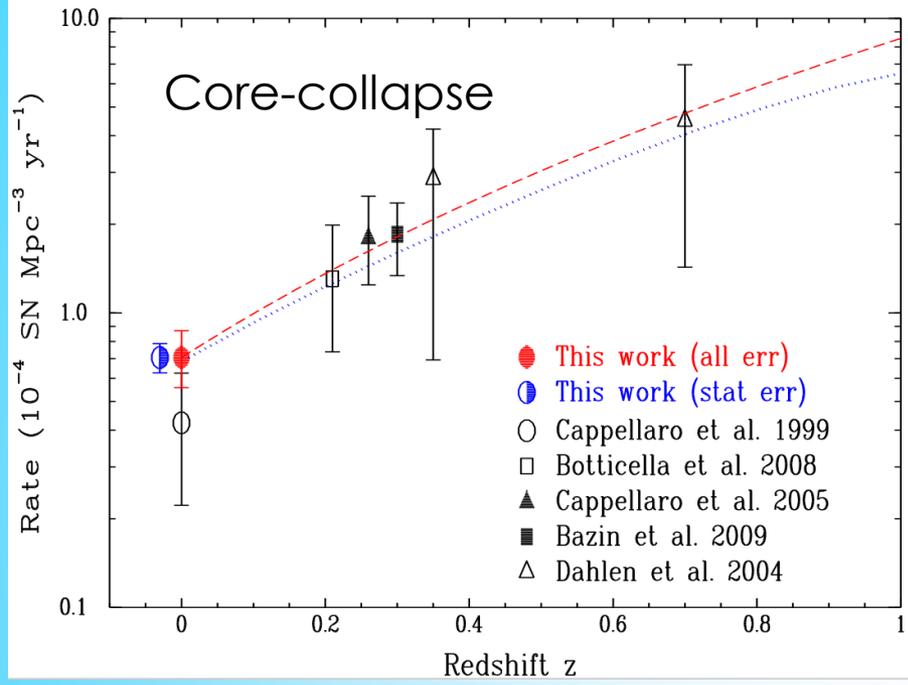
(c) Friedrich Röpke, MPA, 2004

Взрыв происходит, если в белом карлике начинается неустойчивое термоядерное горение углерода.

Масса белого карлика может достичь предела или в результате аккреции, или в результате слияния двух карликов.



ТЕМП СВЕРХНОВЫХ



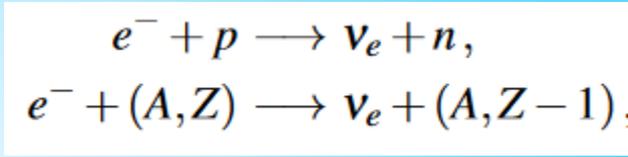
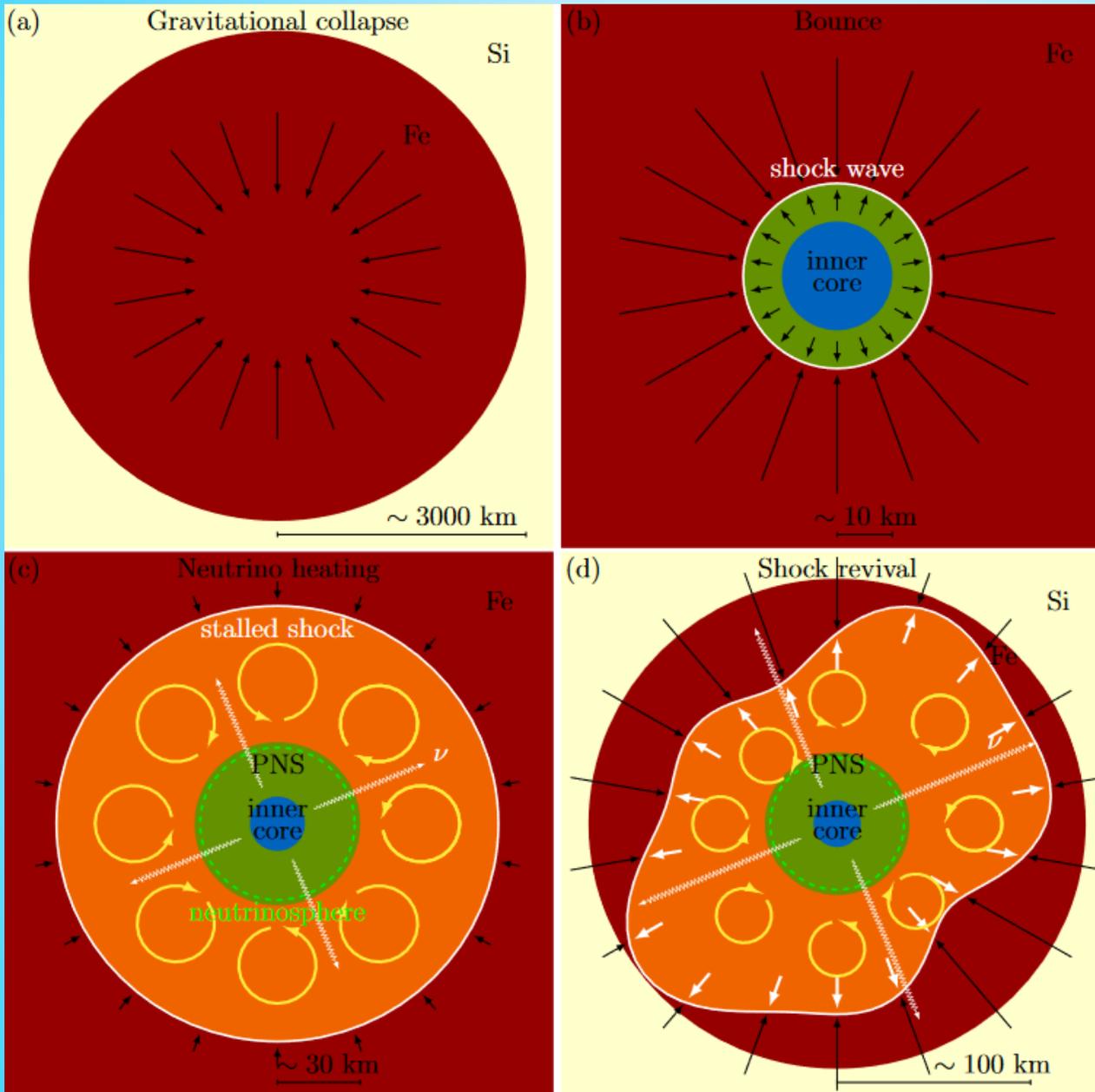
Milky Way rate (per century) [arXiv: 1006.4613](https://arxiv.org/abs/1006.4613)

SN Ia	SN Ibc	SN II	CC SNe	Total SNe
0.54 ± 0.12	0.76 ± 0.16	1.54 ± 0.32	2.30 ± 0.48	2.84 ± 0.60

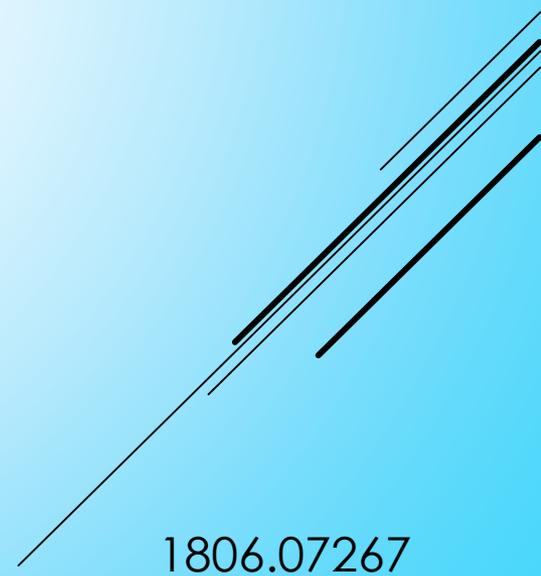
1104.0300

Type	Rate [SNU M]			
	Ia	Ib/c	II	All
E-S0	0.06 ± 0.02	< 0.02	< 0.02	0.06 ± 0.02
S0/a-Sb	0.11 ± 0.04	0.10 ± 0.06	0.42 ± 0.14	0.62 ± 0.15
Sbc-Sd	0.17 ± 0.10	0.50 ± 0.25	1.85 ± 0.61	2.52 ± 0.64

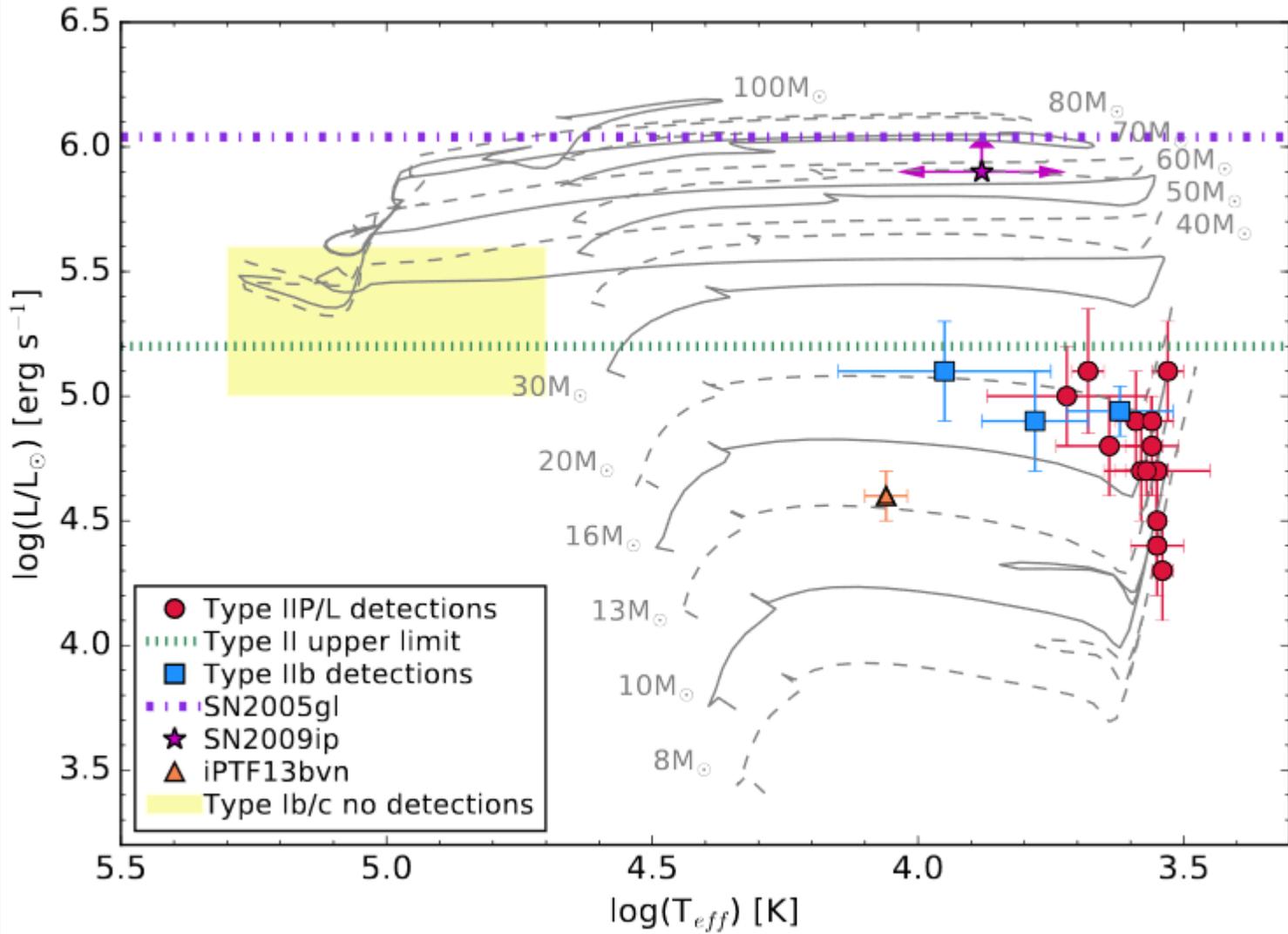
КОЛЛАПС ЯДРА



Коллапс начинается из-за захвата электронов и/или фотодиссоциации ядер железа.

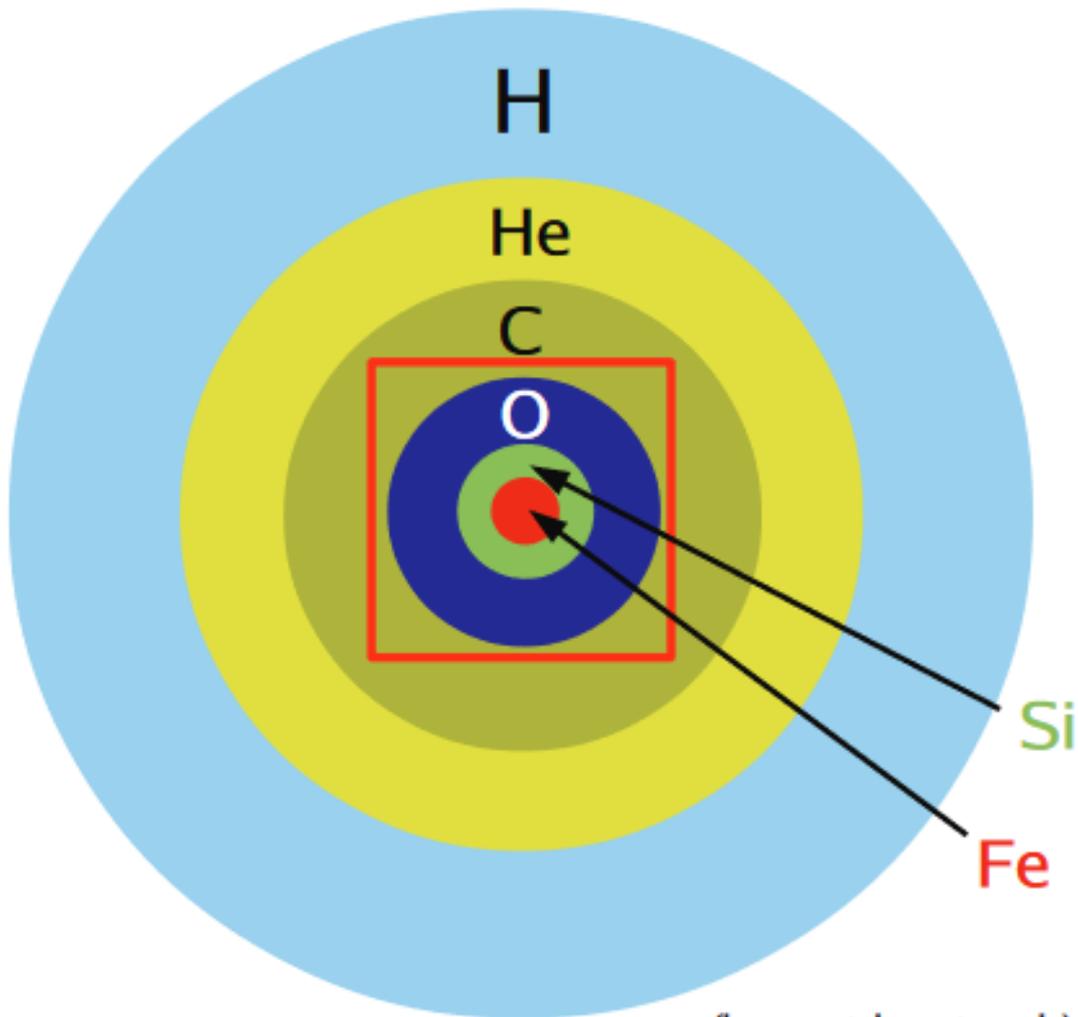


ЗВЕЗДЫ-ПРАРОДИТЕЛИ



СТРУКТУРА ЗВЕЗДЫ ПЕРЕД КОЛЛАПСОМ

Onion-shell structure of pre-collapse star



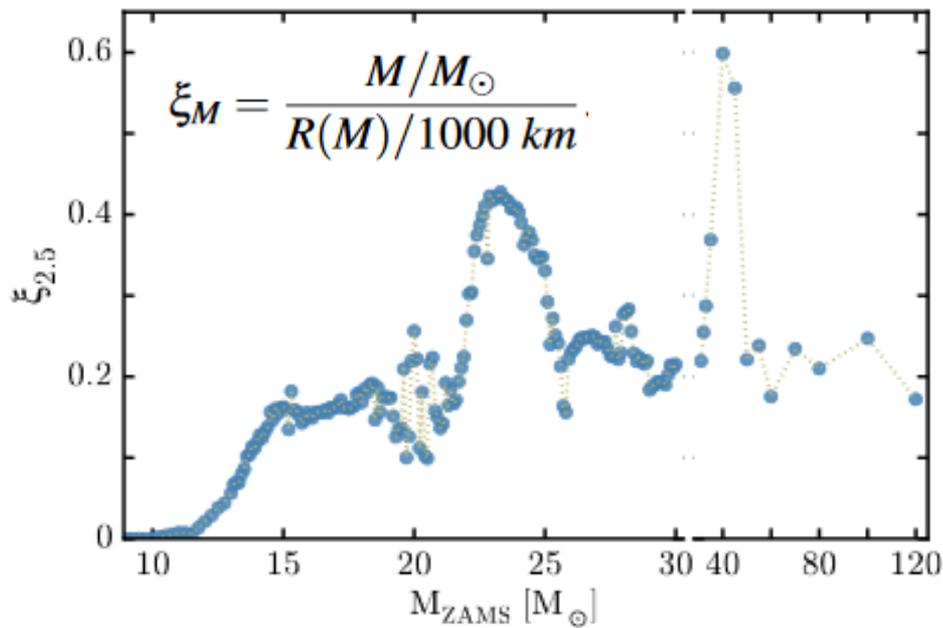
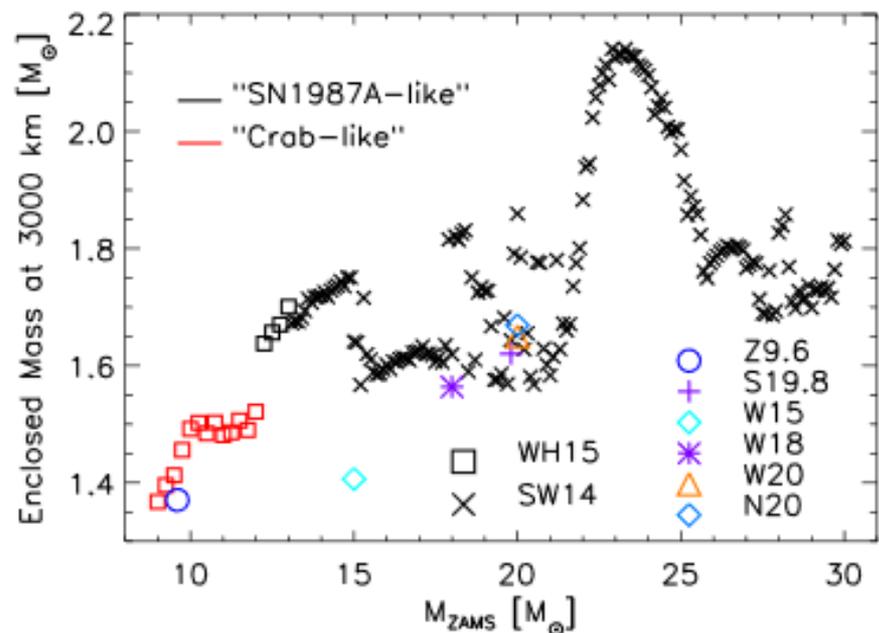
Радиус железного ядра
~3000 км.

Центральная плотность
~ 10^9 г/см³

Энергия взрыва ~ 10^{51} эрг
определяется энергией
связи Si-оболочки.

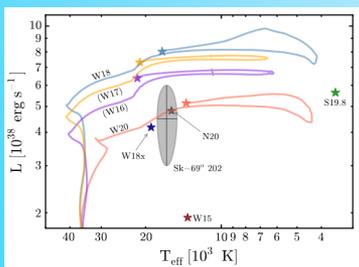
1211.1378

НЕЙТРОННЫЕ ЗВЕЗДЫ ИЛИ ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ?



Наблюдения показывают дефицит прародителей с массами около 20 масс Солнца.

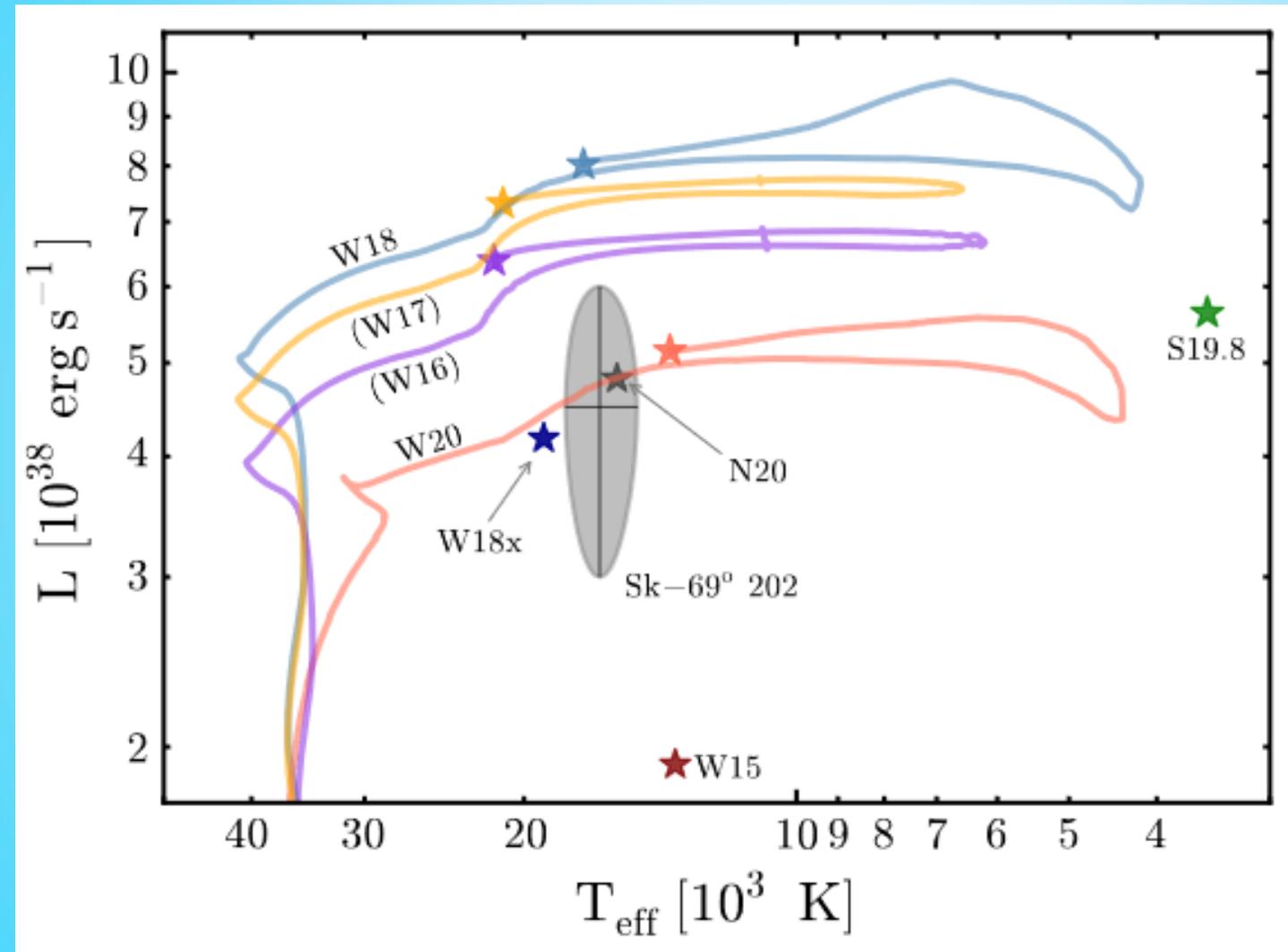
Примерно в полусотне случаев есть данные по прародителям. В половине случаев – верхние пределы.



1510.04643

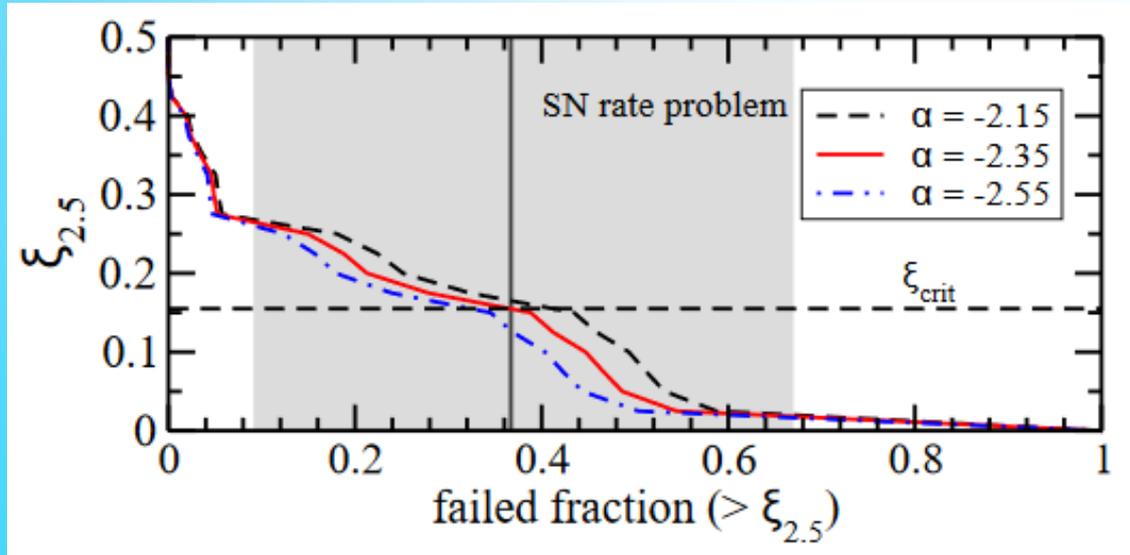
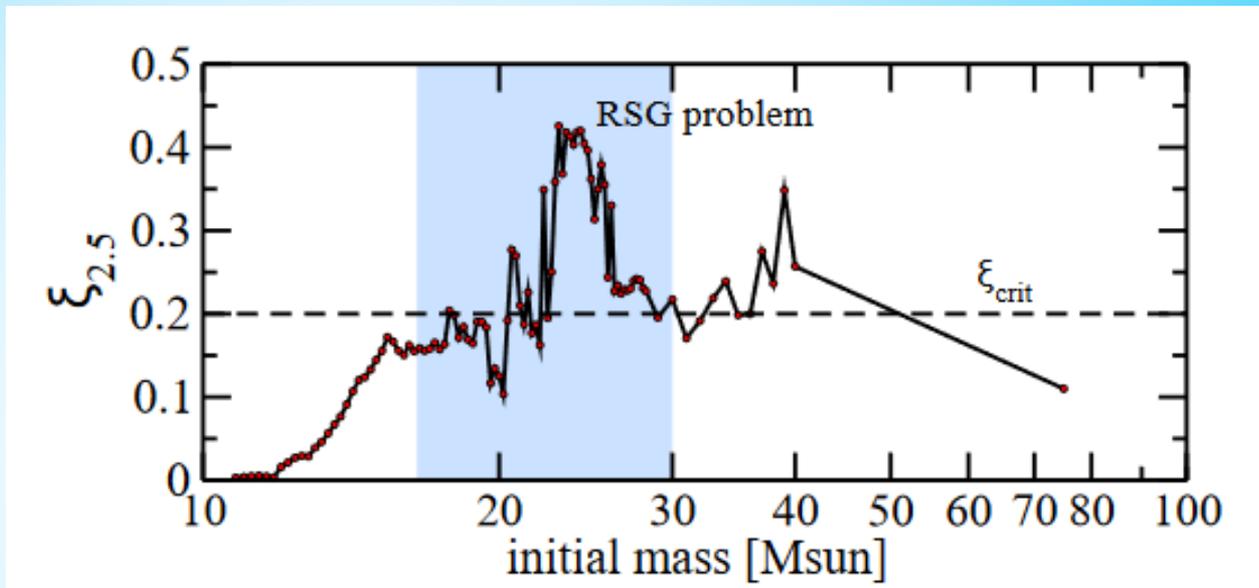
1806.07267

МОДЕЛИ ПРЕДСВЕРХНОВЫХ



1510.04643

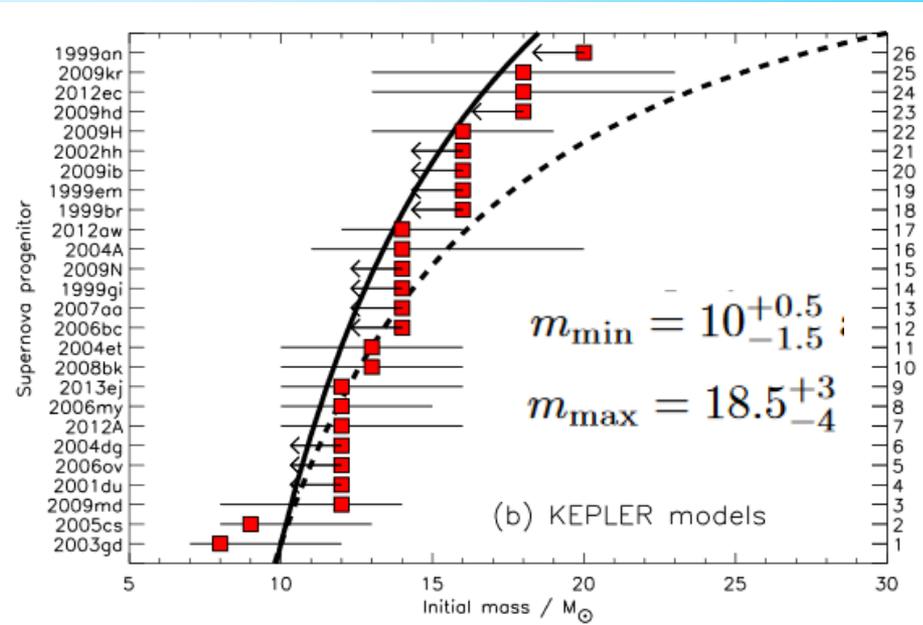
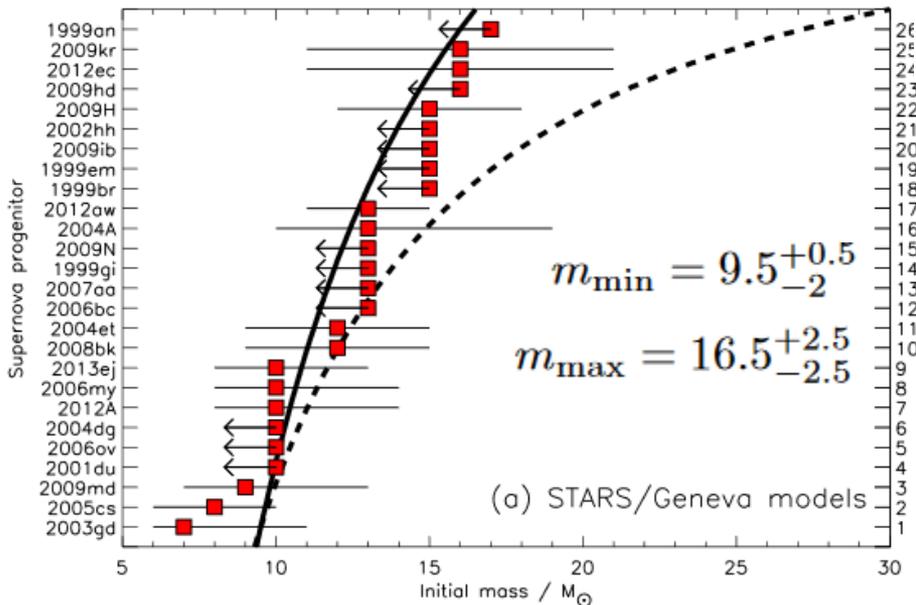
ПРОБЛЕМА НЕХВАТКИ КРАСНЫХ СВЕРХГИГАНТОВ



ПРЕДЕЛЬНАЯ МАССА?

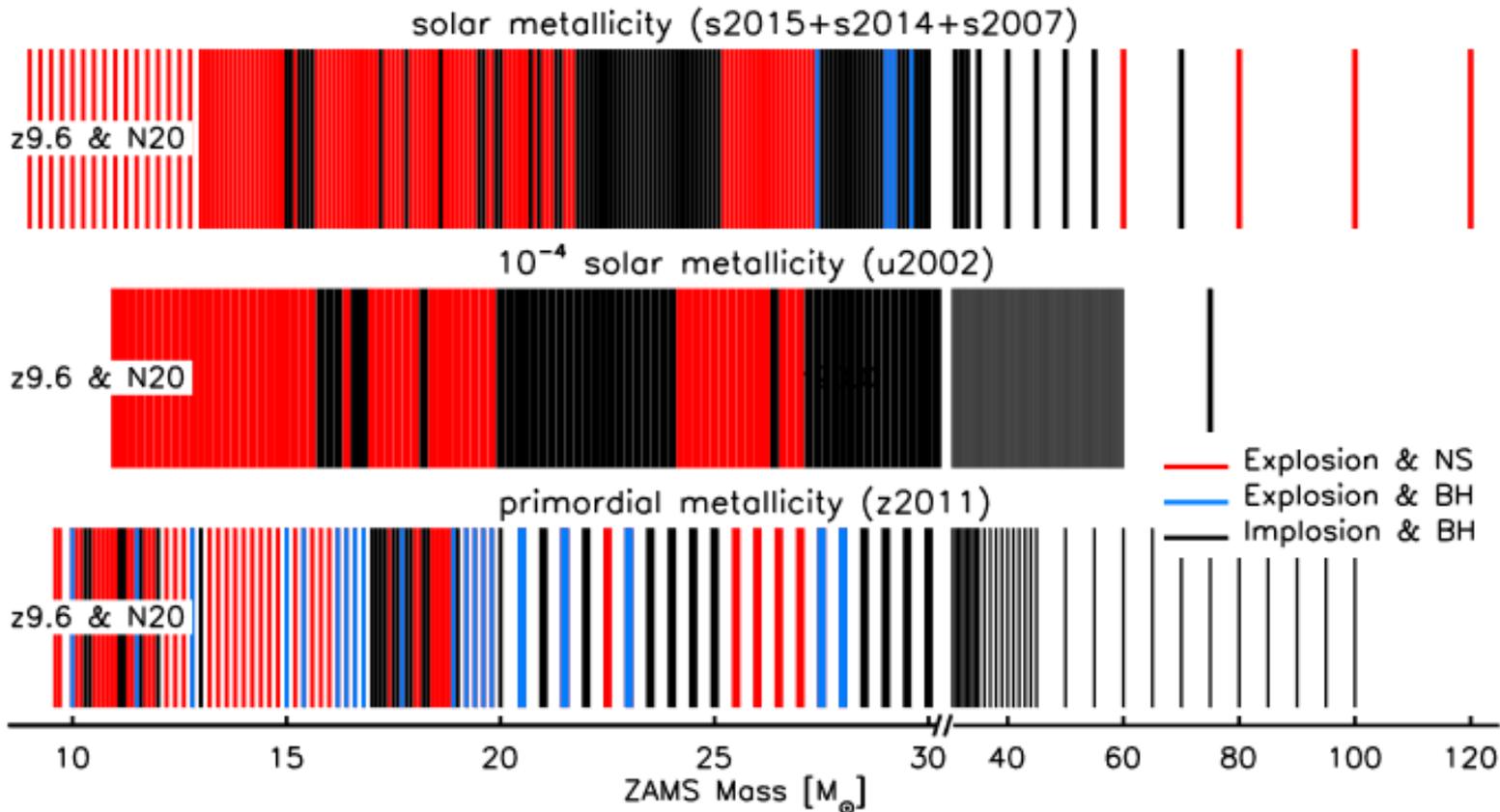
Данные по прародителям позволяют оценить интервал масс, в котором происходят вспышки.

Вспышки могут давать и более массивные звезды, но их гораздо меньше.



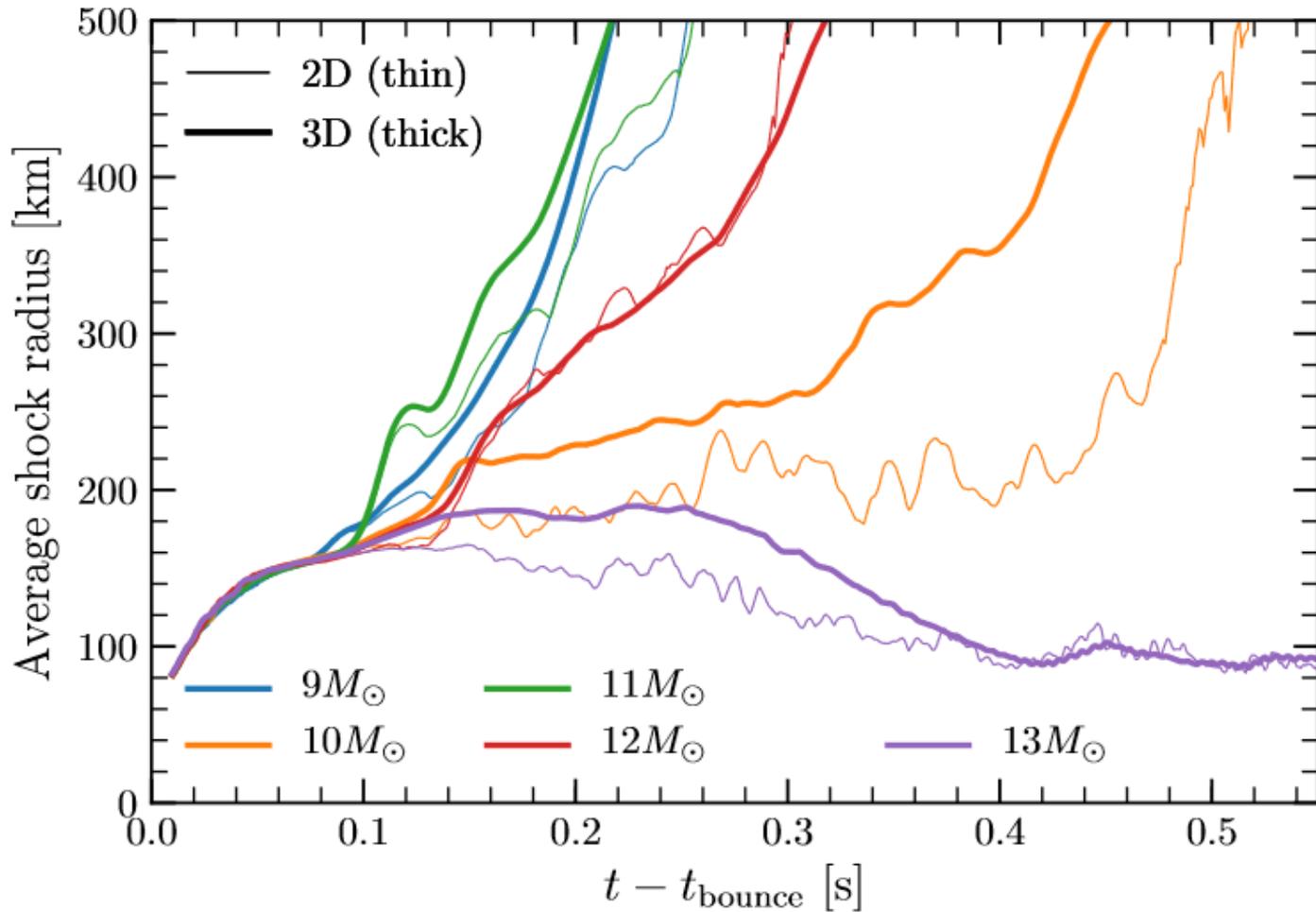
Пунктирная линия – Солпитеровская функция.

КТО КАК ВЗРЫВАЕТСЯ И ЧТО ДАЕТ?



Не стоит принимать этот результат, как окончательную истину. Кроме того, тут не отмечен случай взрыва с полным разлетом (термоядерный взрыв кислородного ядра массивных звезд).

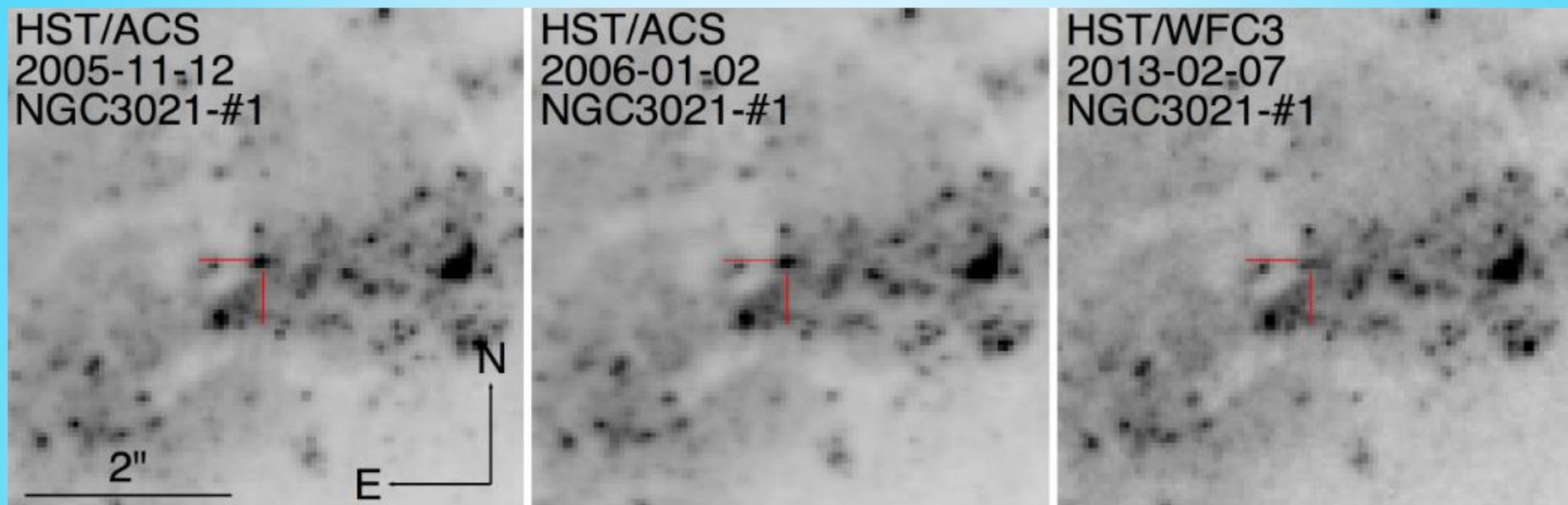
ПРИМЕР НЕДАВНИХ РАСЧЕТОВ



9, 10, 11 и 12 масс Солнца взрываются,
а 13 масс Солнца – нет.

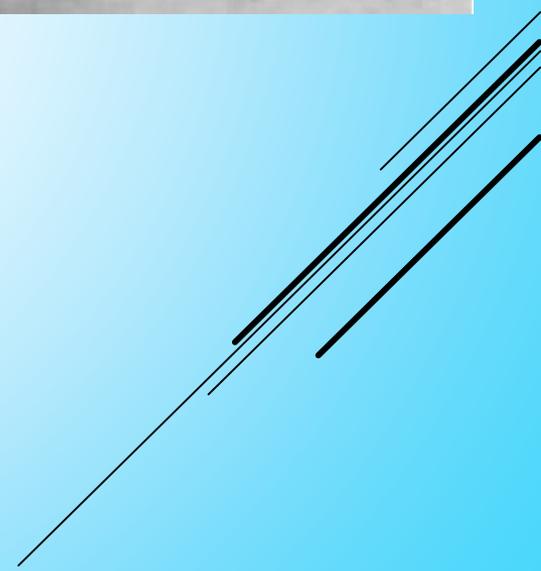
1902.00547

ИСЧЕЗНОВЕНИЕ ЖЕЛТОГО СВЕРХГИГАНТА

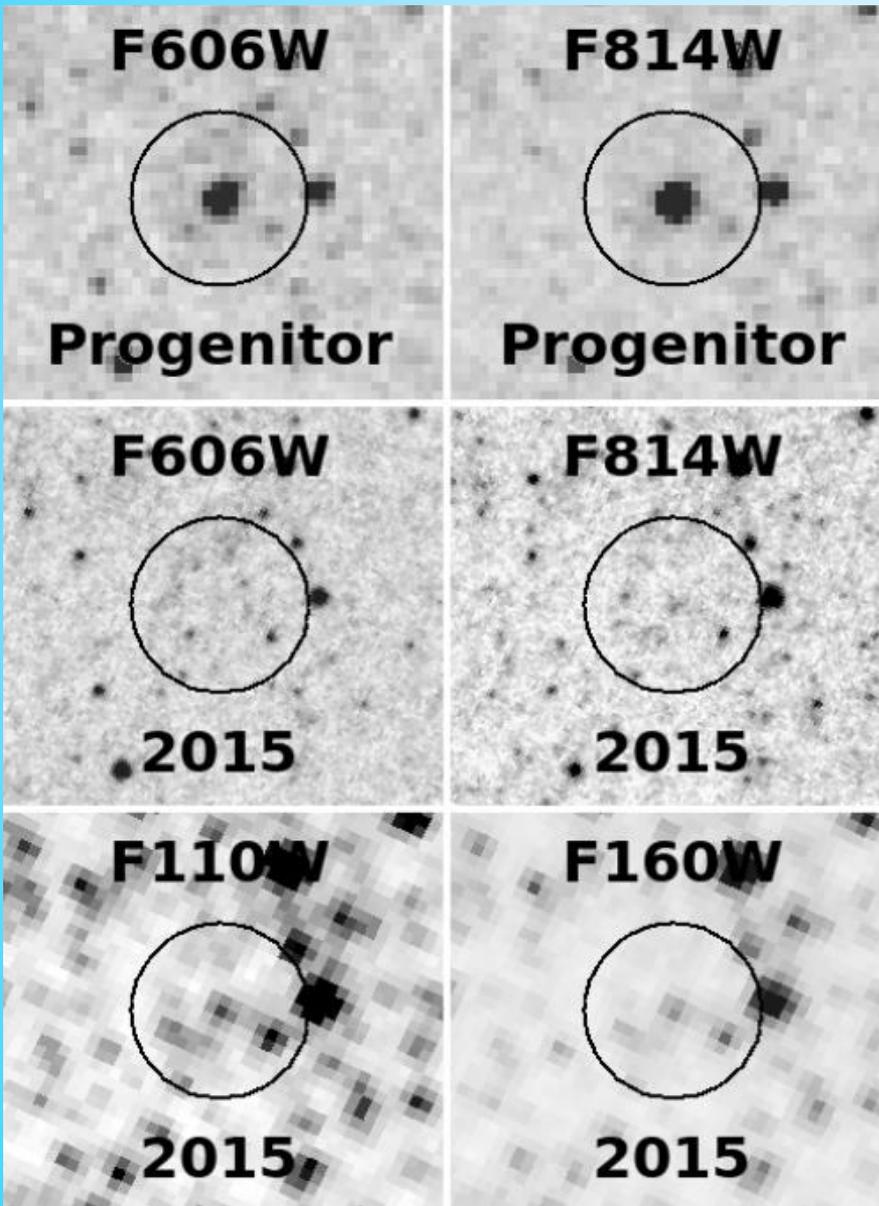


1507.05823

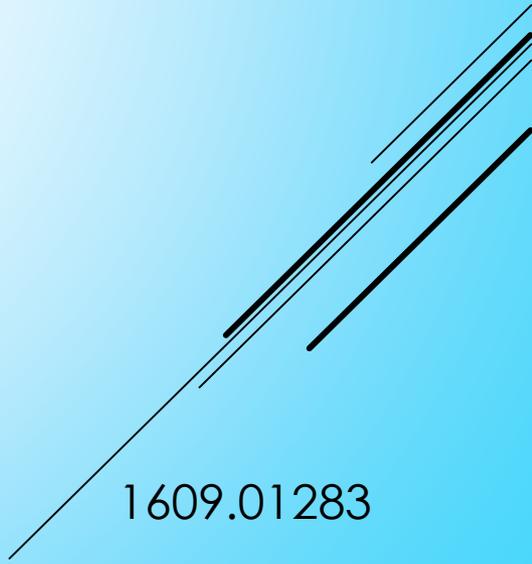
Масса 25-30 масс Солнца

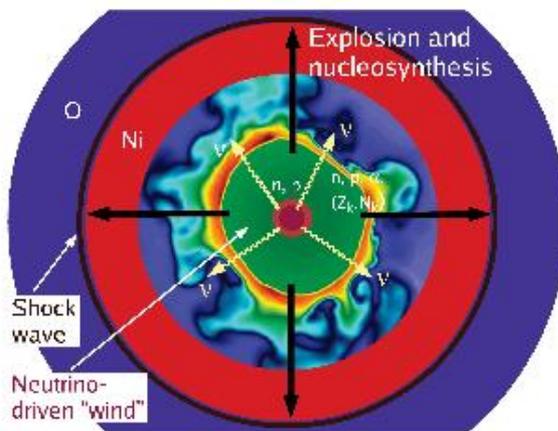
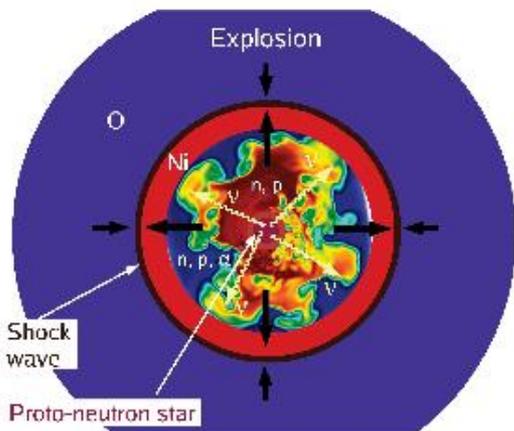
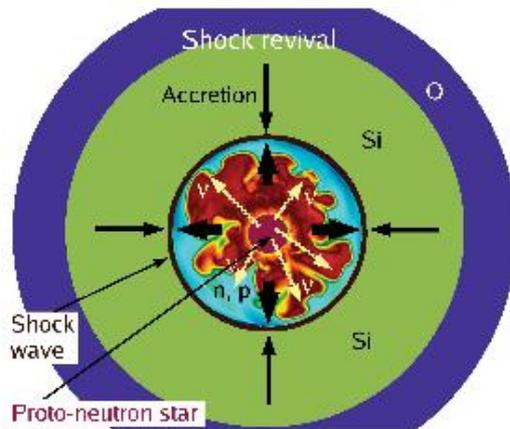
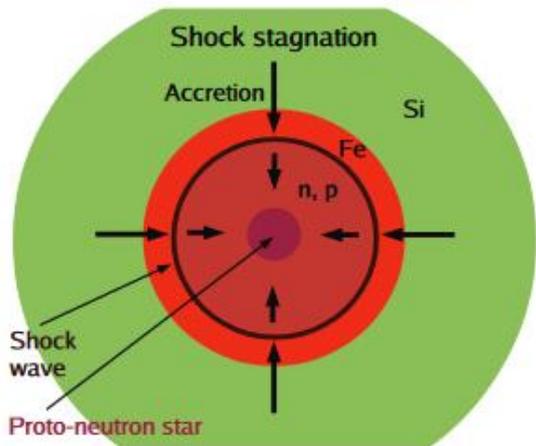
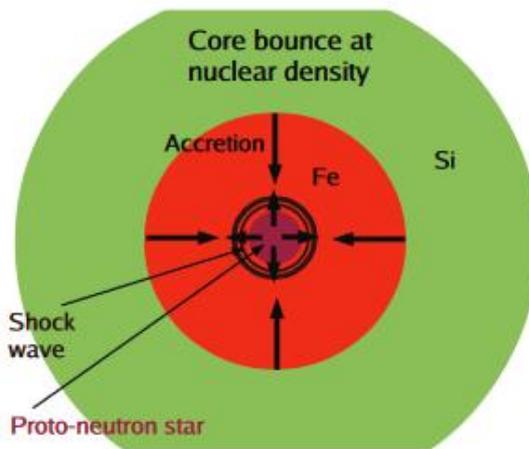
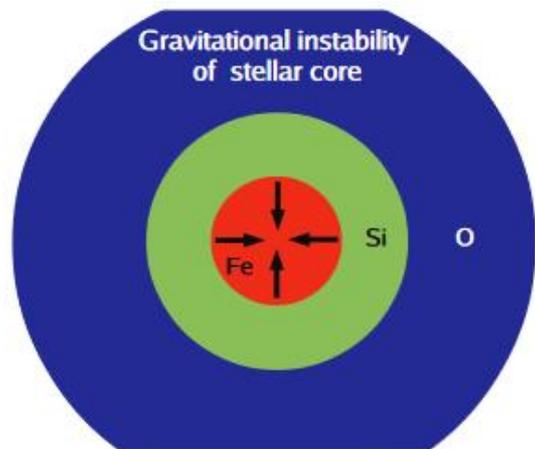


ИСЧЕЗНОВЕНИЕ КРАСНОГО СВЕРХГИГАНТА



25 масс Солнца.

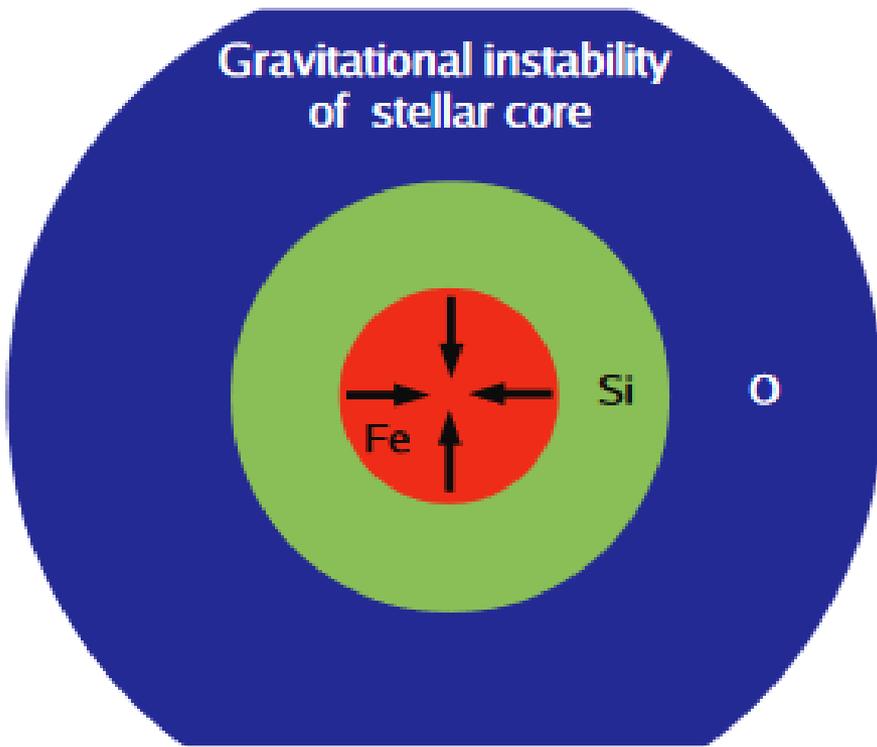




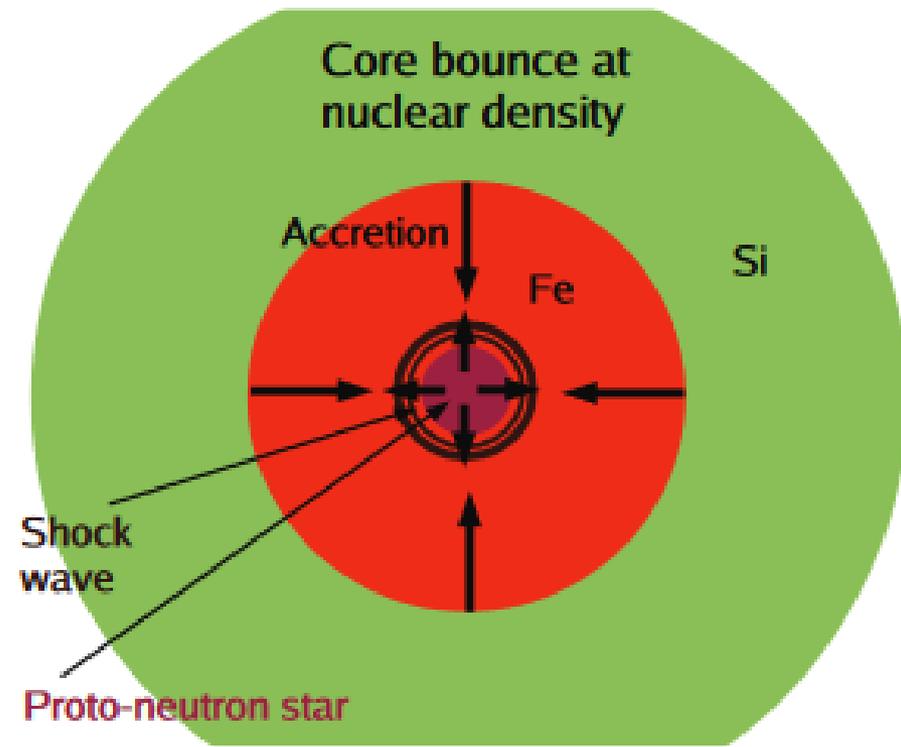
Основные стадии
сверхновой с коллапсом.

1211.1378

Gravitational instability of stellar core



Core bounce at nuclear density

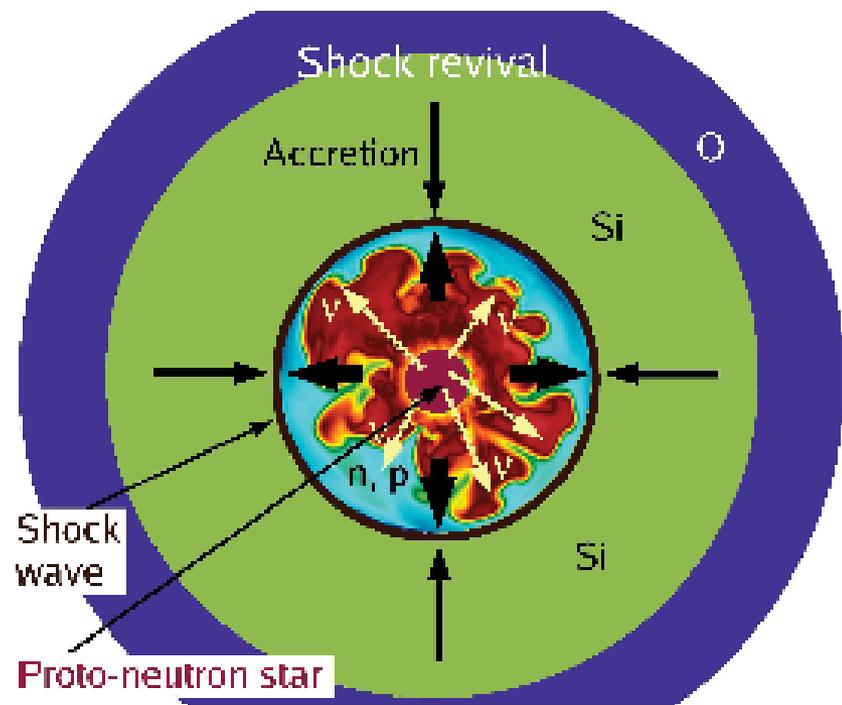
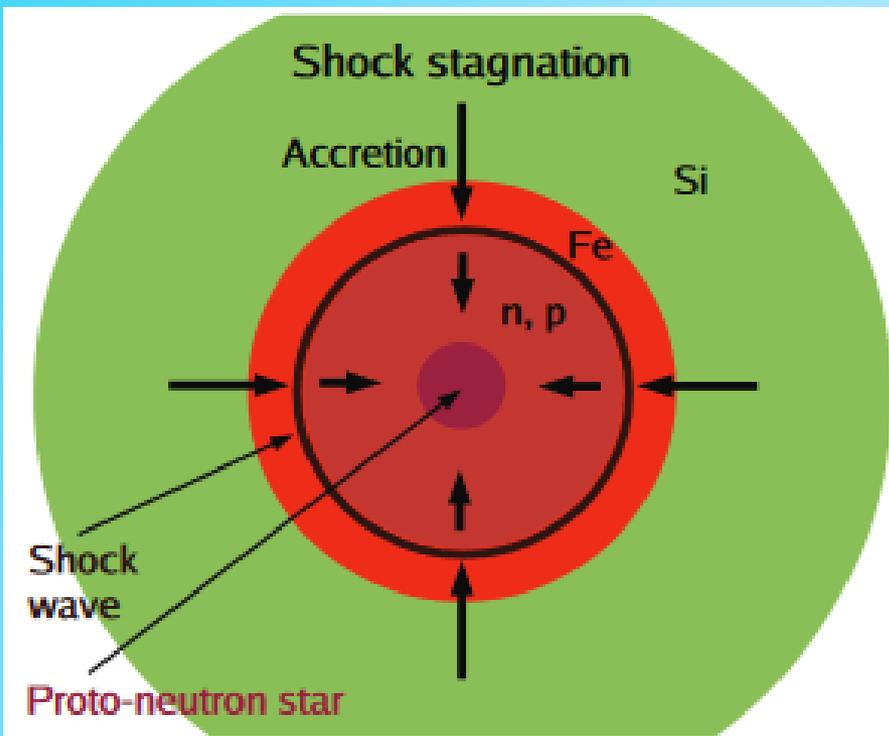


Коллапс начинается после потери устойчивости ядра звезды ($\gamma < 4/3$).

При плотности выше $\sim 10^{12}$ г/см³ нейтрино захвачены.

Сжатие продолжается до достижения плотности порядка ядерной. Возникает ударная волна, распространяющаяся наружу.

$$t_{\text{ff}} \sim \frac{1}{\sqrt{G\rho}} \sim \frac{0.004}{\sqrt{\rho_{12}}} \text{ s}$$

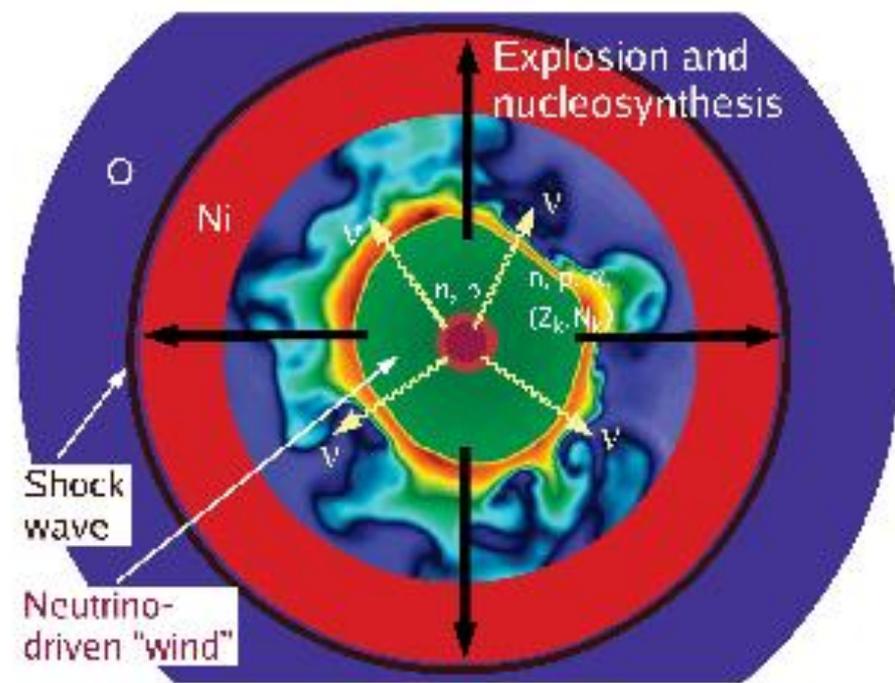
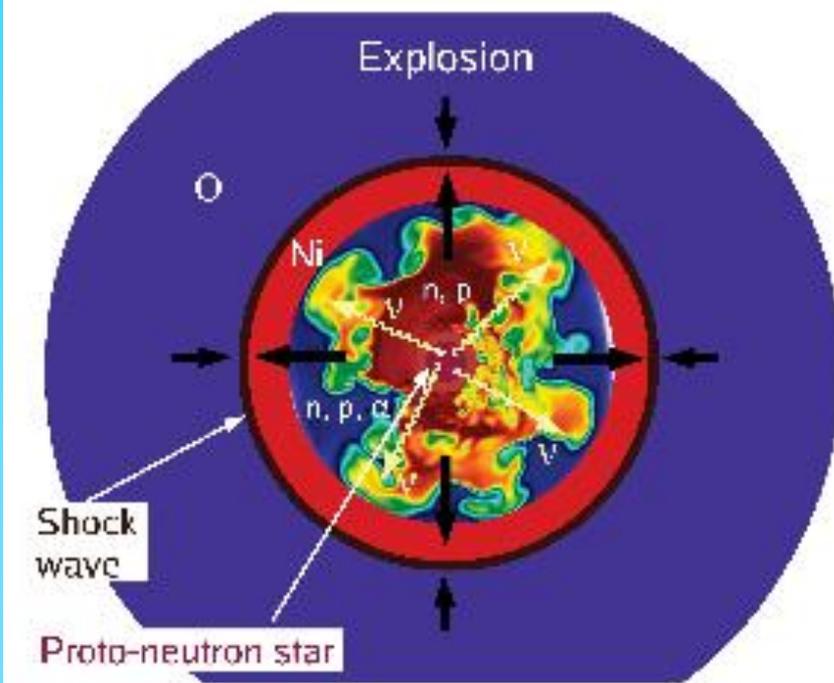


Энергии ударной волны не хватает для разлета звезды. Это происходит из-за того, что проходя по внешним частям железного ядра, волна расходует энергию на диссоциацию ядер железа.

Вещество, прошедшее волну, начинает двигаться к центру через 1-2 мсек после возникновения ударной волны (т.е., после «отскока»).

Необходим механизм для передачи дополнительной энергии ударной волне.





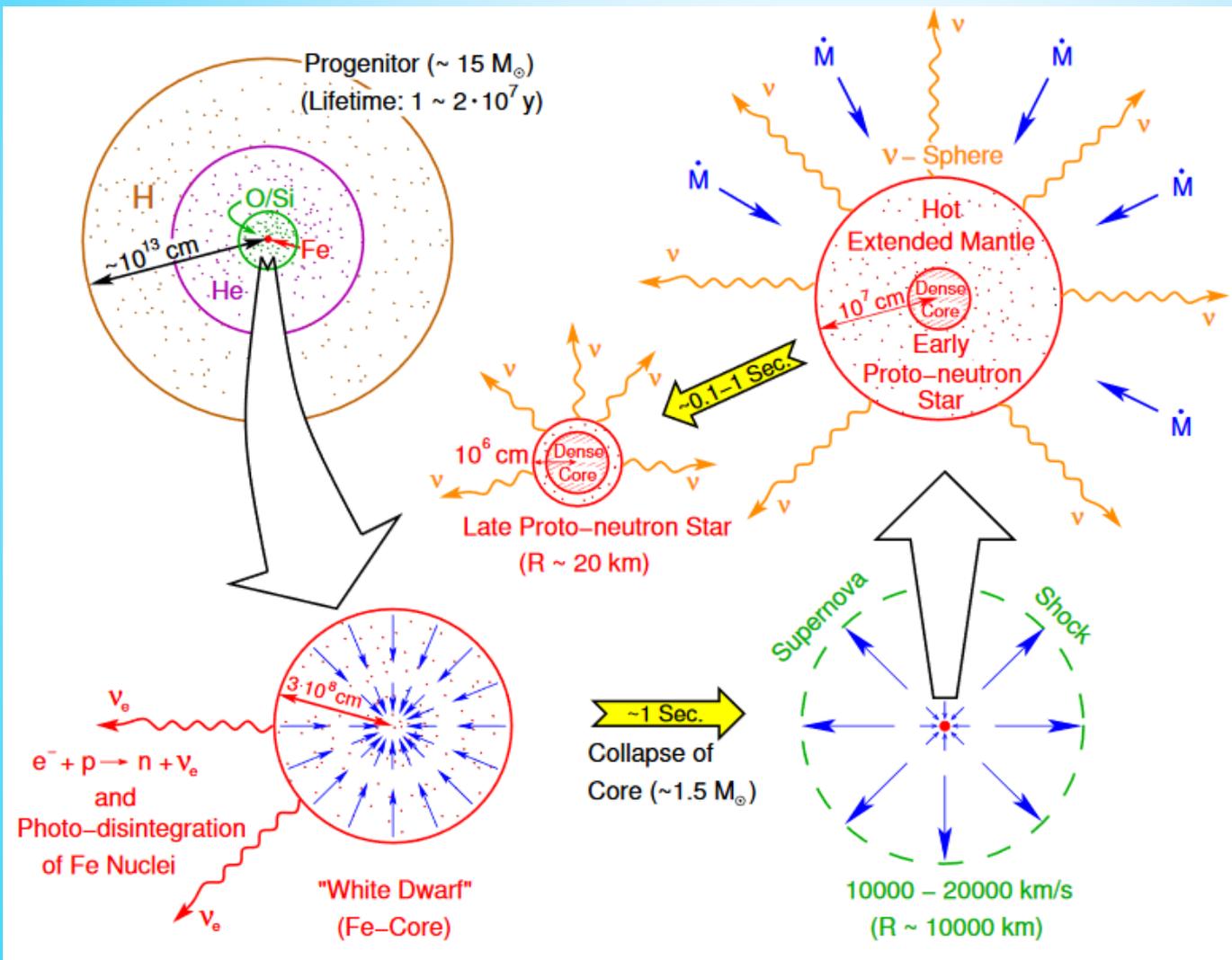
Волна останавливается на расстоянии $\sim 100-200$ км от центра.

Если энергия передана ударной волне, то происходит разлет внешних частей звезды.

В разлетающемся веществе возможен синтез тяжелых элементов. Он протекает по нескольким разным каналам.

$$R_{\text{diss}} = \frac{GMm_u}{8.8\text{MeV}} \gtrsim 160 \left(\frac{M}{M_{\odot}} \right) \text{ km,}$$

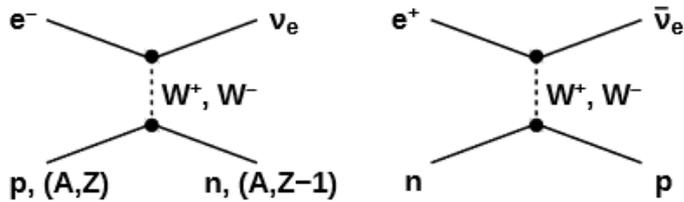
СТАДИИ СВЕРХНОВОЙ И НЕЙТРИНО



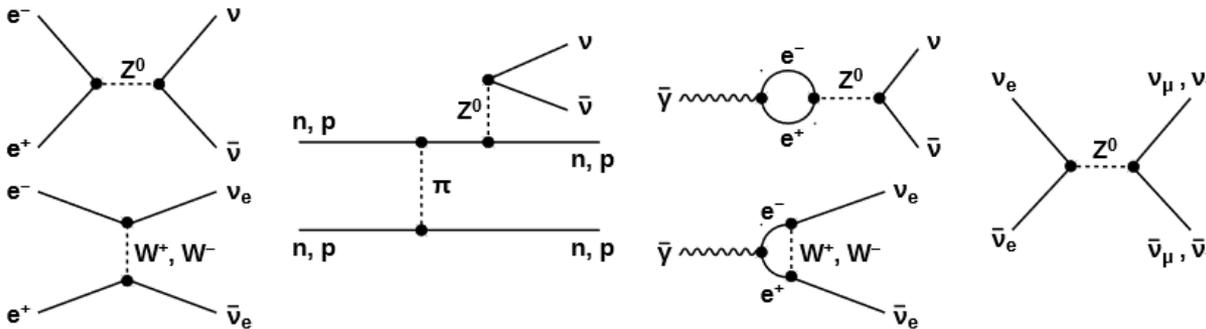
Neutrino Reactions in Supernovae

НЕЙТРИННЫЕ ПРОЦЕССЫ

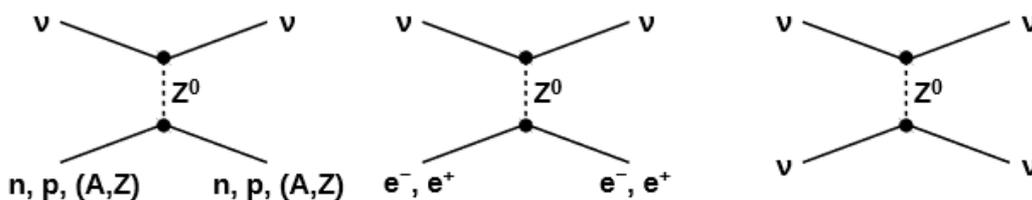
CC β -processes



Neutrino-pair ("thermal") processes



NC scattering processes ($\nu = \nu_e, \bar{\nu}_e, \nu_\mu, \bar{\nu}_\mu, \nu_\tau, \bar{\nu}_\tau$)



Beta processes:

- $e^- + p \rightleftharpoons n + \nu_e$
- $e^+ + n \rightleftharpoons p + \bar{\nu}_e$
- $e^- + A \rightleftharpoons \nu_e + A^*$

Neutrino scattering:

- $\nu + n, p \rightleftharpoons \nu + n, p$
- $\nu + A \rightleftharpoons \nu + A$
- $\nu + e^\pm \rightleftharpoons \nu + e^\pm$

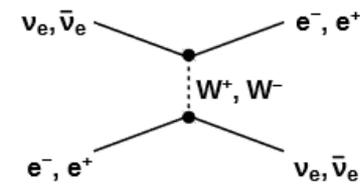
Thermal pair processes:

- $N + N \rightleftharpoons N + N + \nu + \bar{\nu}$
- $e^+ + e^- \rightleftharpoons \nu + \bar{\nu}$

Neutrino-neutrino reactions:

- $\nu_x + \nu_e, \bar{\nu}_e \rightleftharpoons \nu_x + \nu_e, \bar{\nu}_e$
($\nu_x = \nu_\mu, \bar{\nu}_\mu, \nu_\tau, \text{ or } \bar{\nu}_\tau$)
- $\nu_e + \bar{\nu}_e \rightleftharpoons \nu_{\mu,\tau} + \bar{\nu}_{\mu,\tau}$

CC scattering process



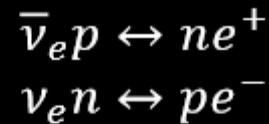
1211.1378

1702.08713

ЭЛЕКТРОННЫЕ И ... ПРОЧИЕ

Electron flavor (ν_e and $\bar{\nu}_e$)

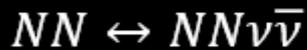
Thermal Equilibrium



Free streaming

Neutrino sphere

Other flavors ($\nu_\mu, \bar{\nu}_\mu, \nu_\tau, \bar{\nu}_\tau$)



Scattering Atmosphere



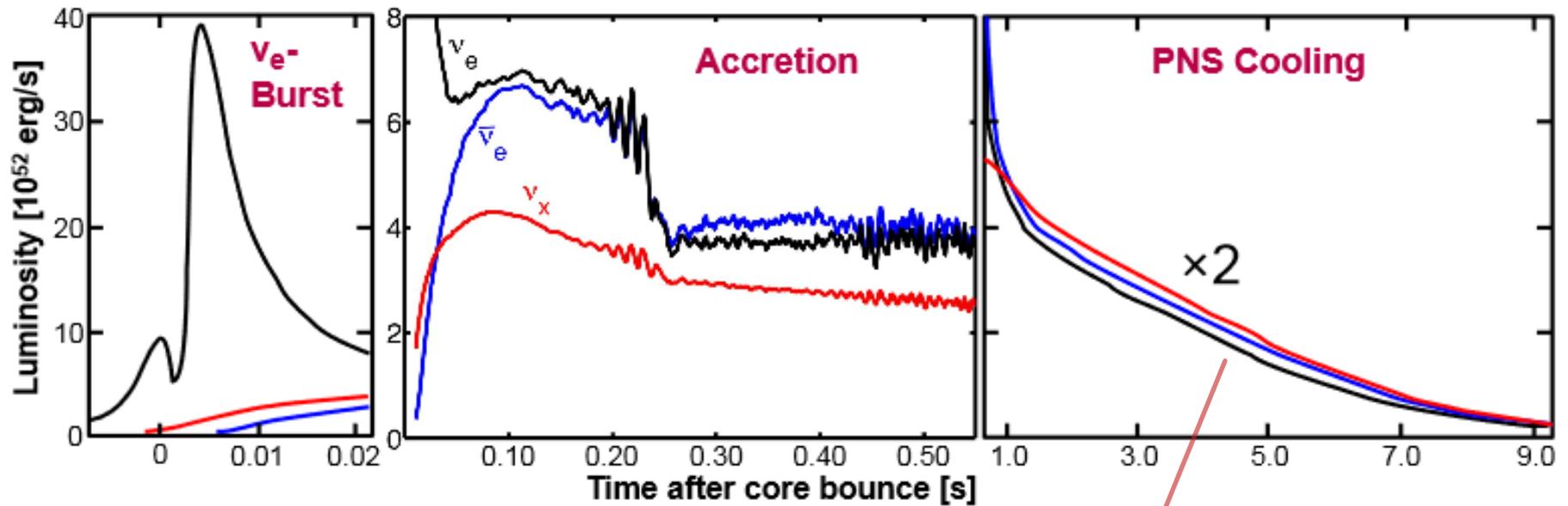
Diffusion

Free streaming

Energy sphere

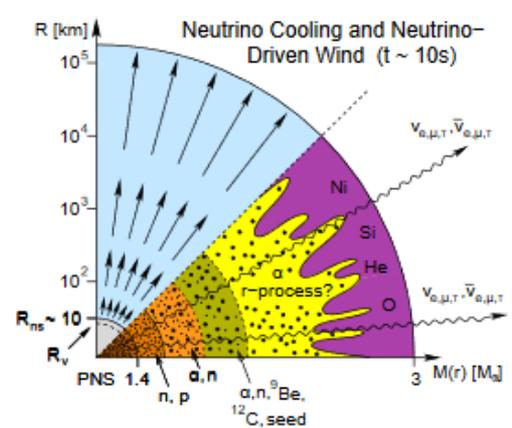
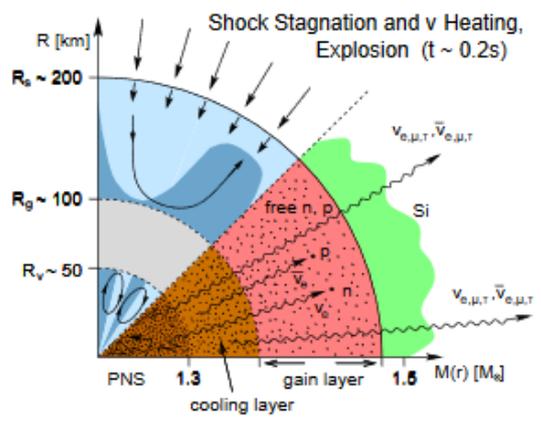
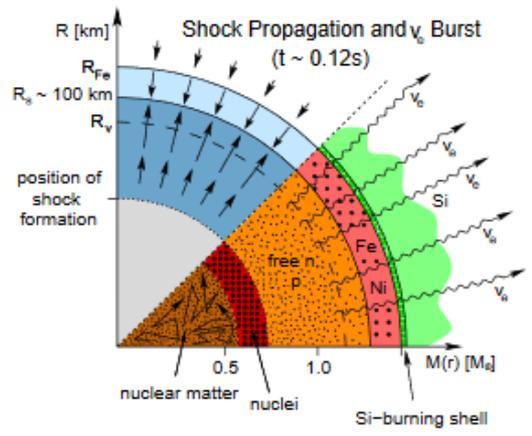
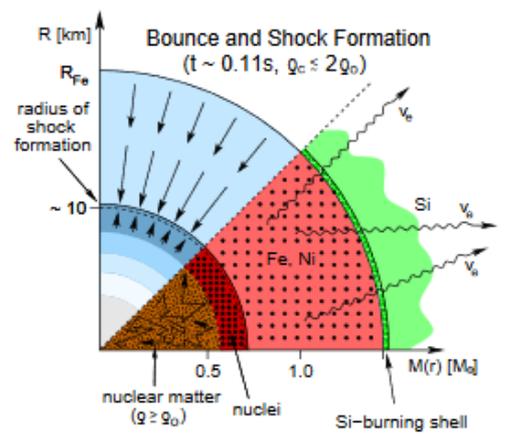
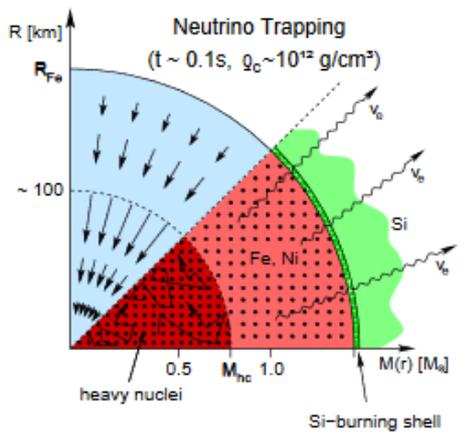
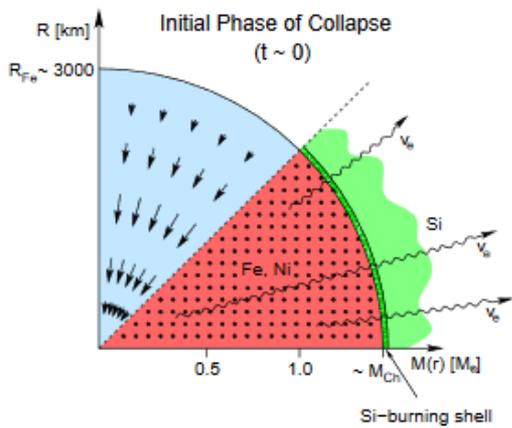
Transport sphere

НЕЙТРИННАЯ СВЕТИМОСТЬ



$$L_{\nu}^{\text{tot}} \equiv \sum_{i=e,\mu,\tau} L_{\nu_i} + L_{\bar{\nu}_i} \sim \frac{E_b}{t_E} \sim \text{several } 10^{52} \text{ erg s}^{-1}.$$

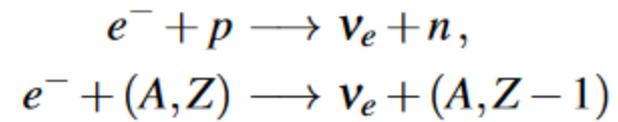
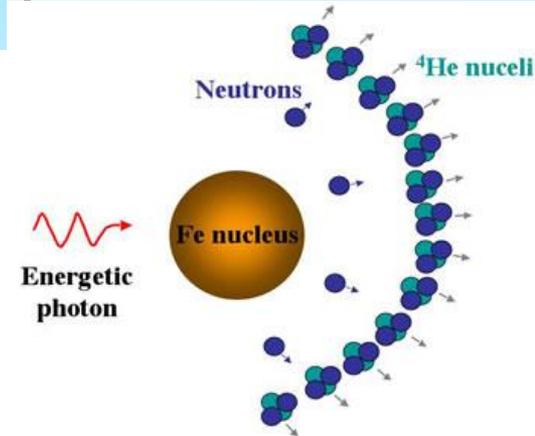
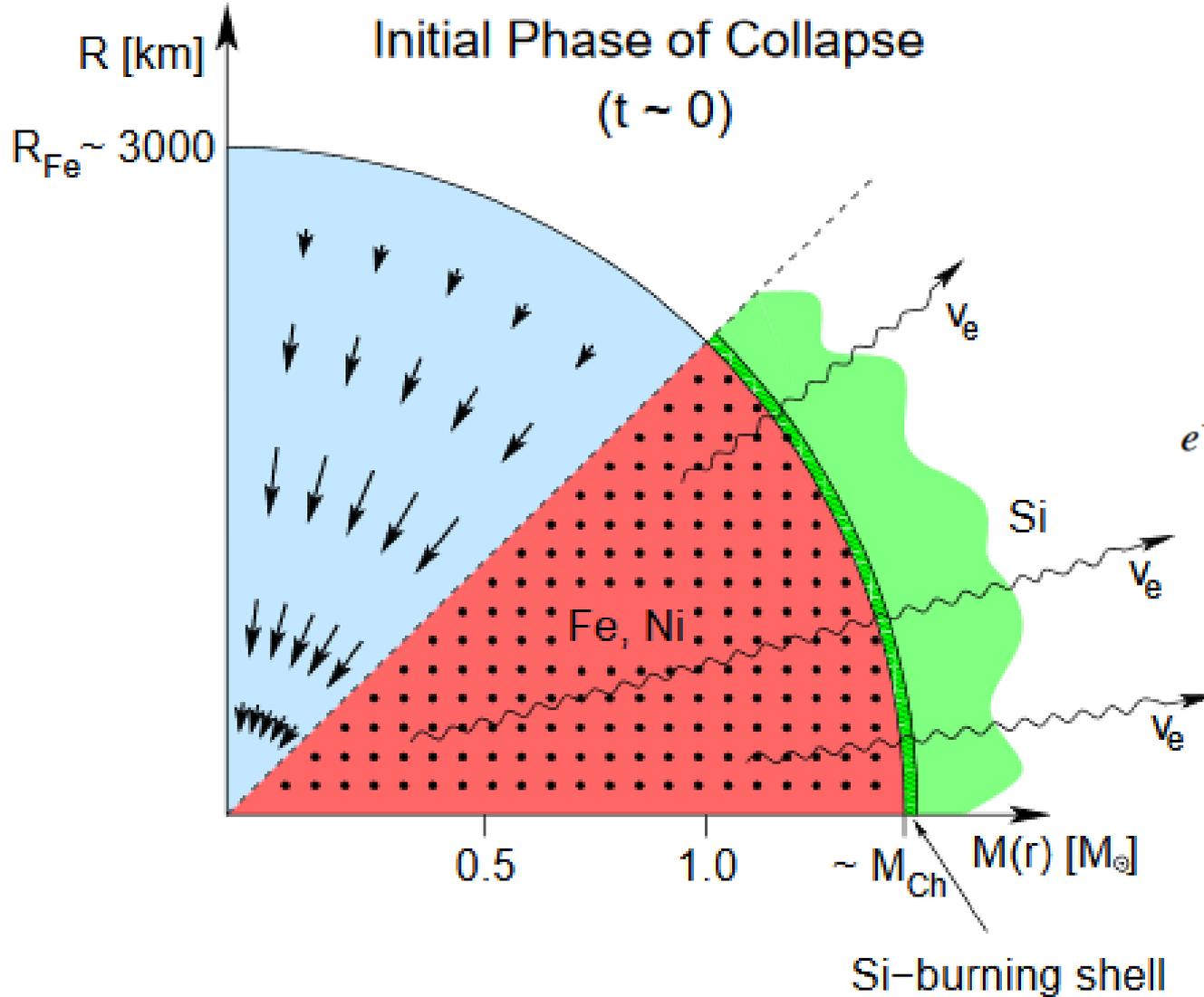
Типичная энергия нейтрино ~ 10 МэВ.



Основные стадии:

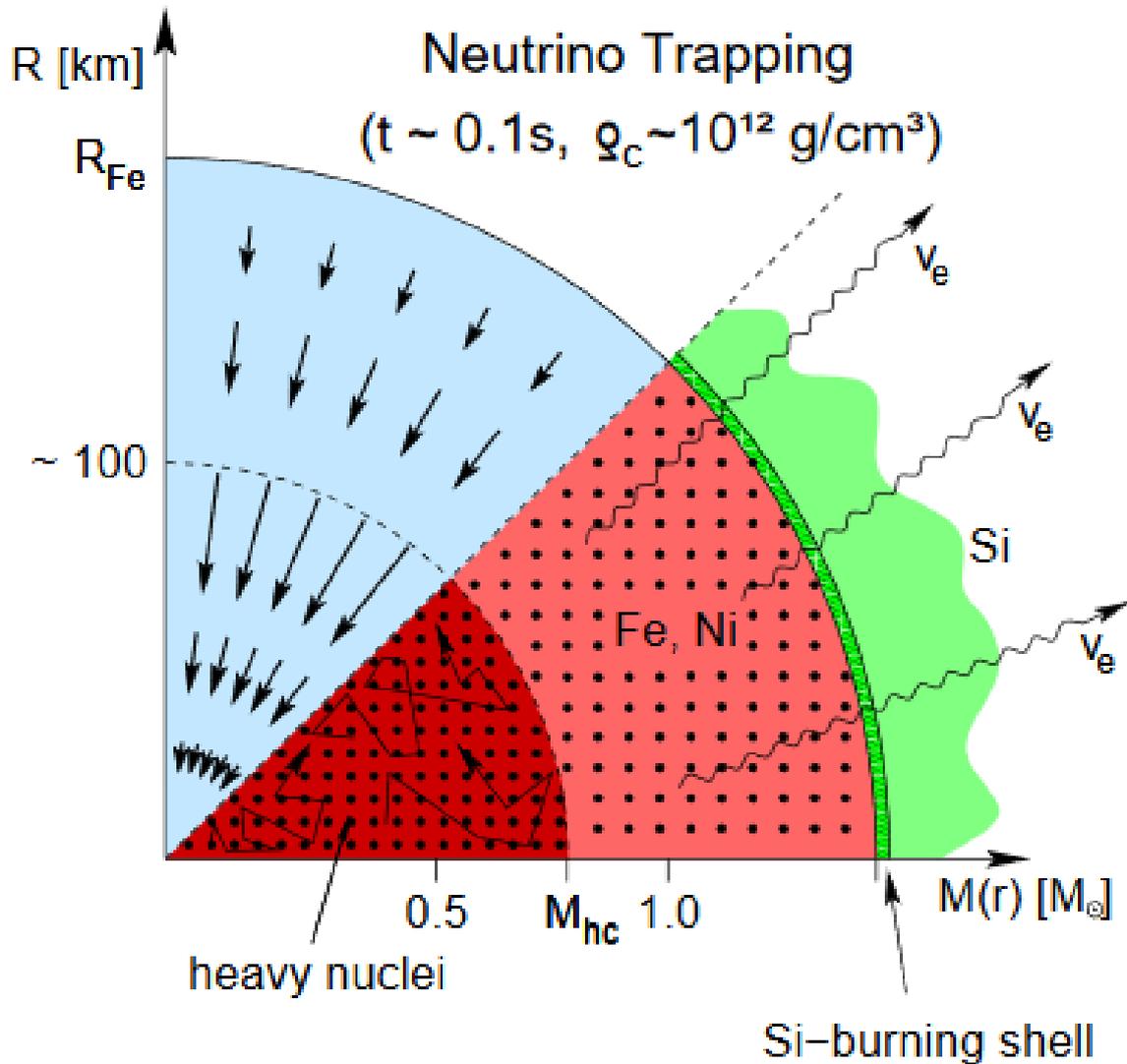
1. Начальная фаза коллапса;
2. Захват нейтрино;
3. Отскок и формирование ударной волны;
4. Движение ударной волны и нейтринный всплеск;
5. Замедление ударной волны и нейтринный нагрев;
6. Нейтринной охлаждение и нейтринный ветер.

НАЧАЛЬНАЯ ФАЗА КОЛЛАПСА



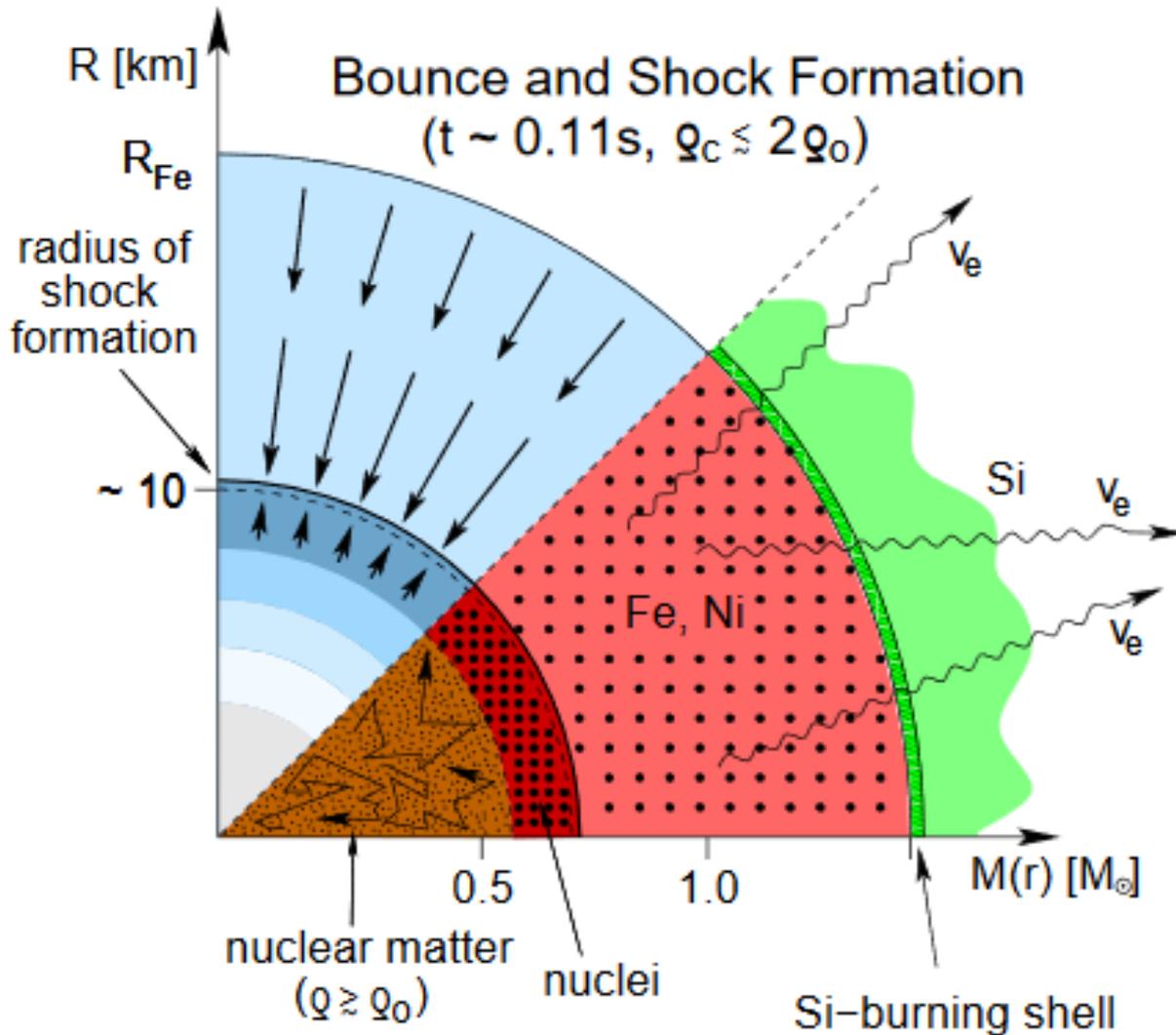
КОЛЛАПС
НАЧИНАЕТСЯ,
КОГДА $\gamma < 4/3$.

ЗАХВАТ НЕЙТРИНО



$$M_{\text{hc}} \lesssim M_{\text{Ch}} = 1.457 (2Y_e)^2 M_{\odot}$$

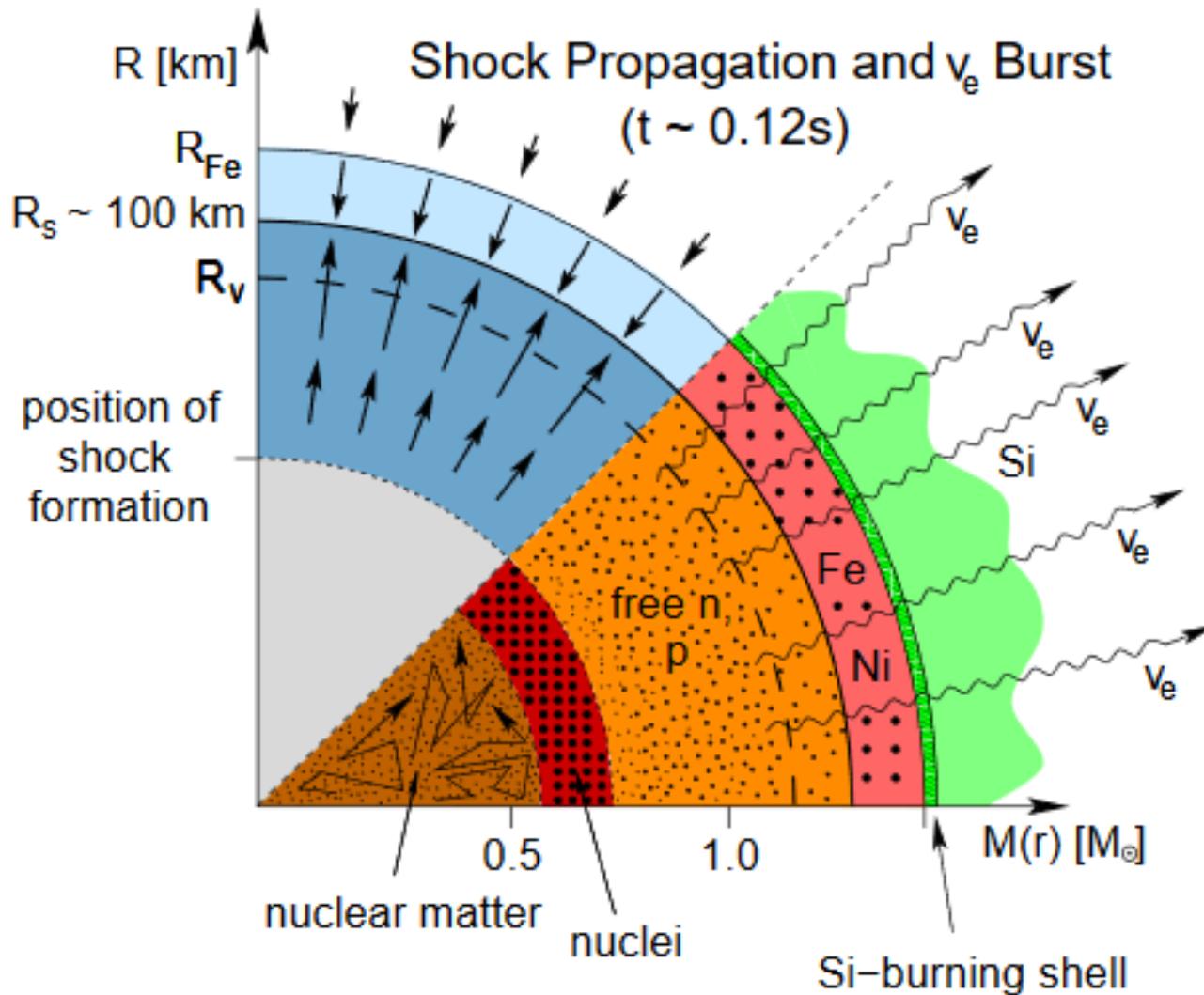
ОТСКОК И ФОРМИРОВАНИЕ УДАРНОЙ ВОЛНЫ



Коллапс после захвата нейтрино перед отскоком идет на масштабе свободного падения до достижения ядерной плотности.

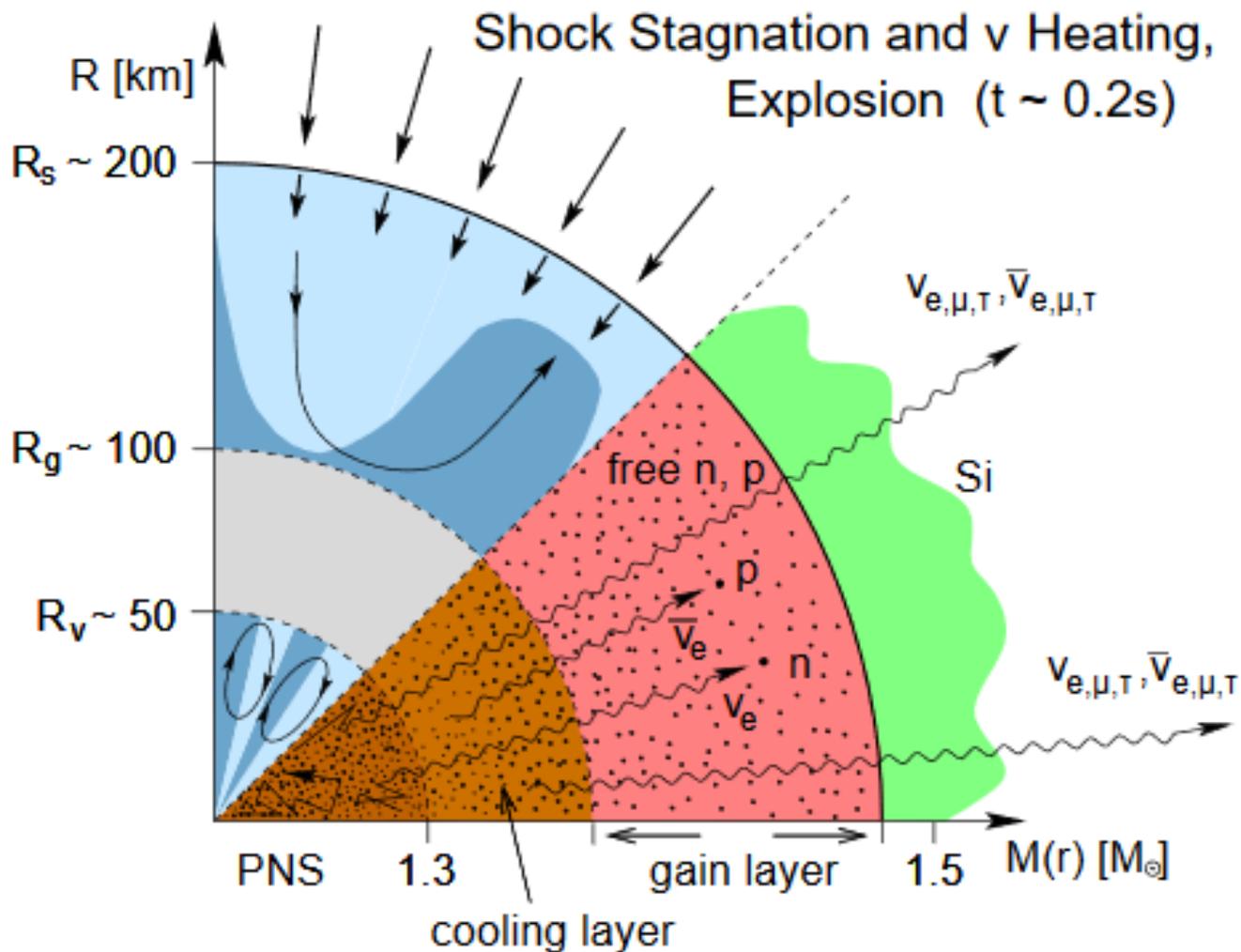
$$t_{\text{ff}} \sim \frac{1}{\sqrt{G\rho}} \sim \frac{0.004}{\sqrt{\rho_{12}}} \text{ s}$$

ДВИЖЕНИЕ УДАРНОЙ ВОЛНЫ И НЕЙТРИННЫЙ ВСПЛЕСК



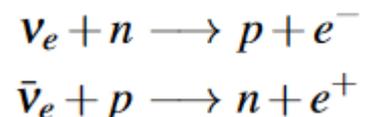
Когда ударная волна достигает области с низкой плотностью происходит нейтринный всплеск, т.к. ранее нейтрино были захвачены.

ЗАМЕДЛЕНИЕ УДАРНОЙ ВОЛНЫ И НЕЙТРИННЫЙ НАГРЕВ

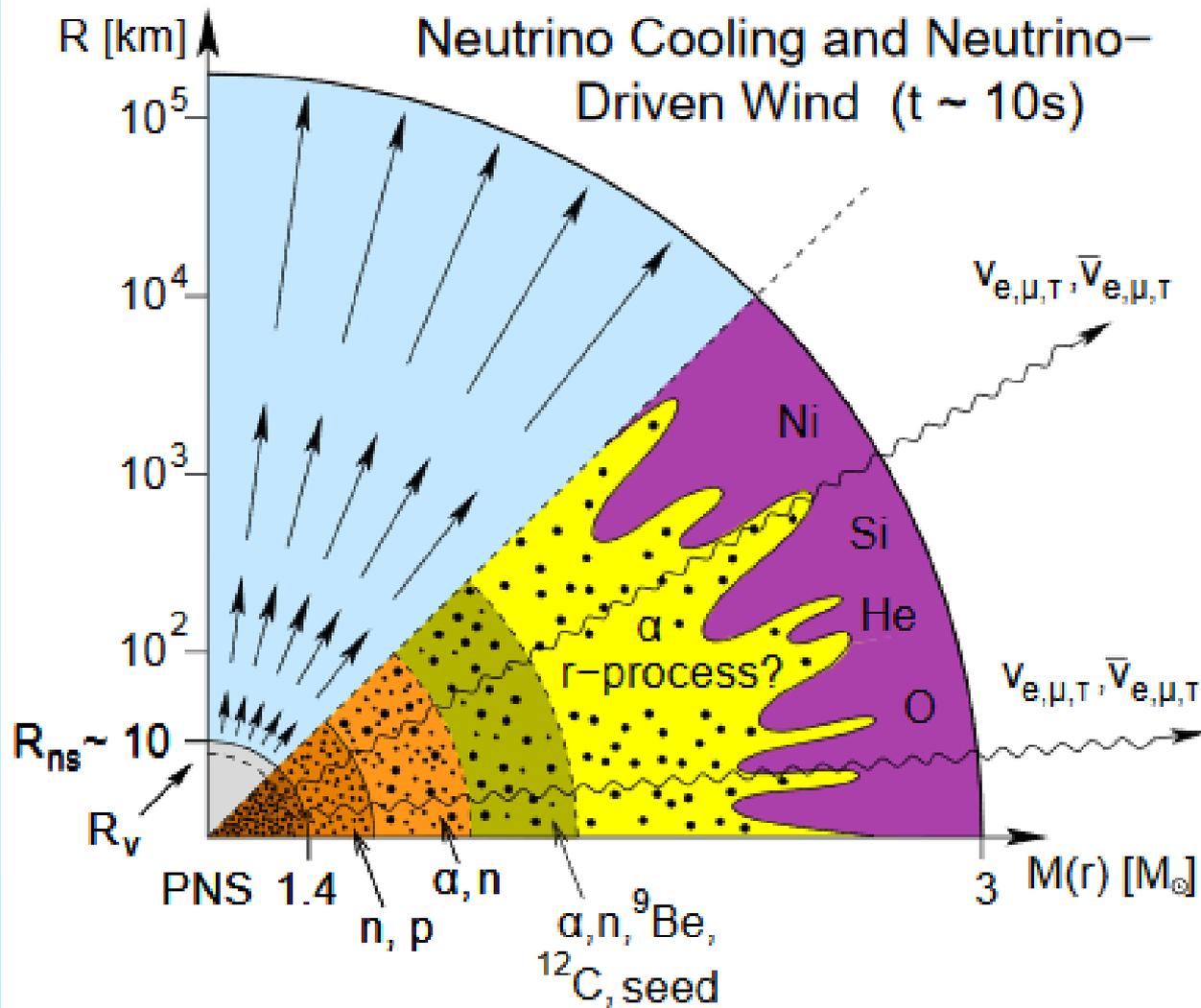


Из-за диссоциации ядер железа ударная волна замедляется. 8.8 МэВ на нуклон, т.е. $1.7 \cdot 10^{51}$ эрг для 0.1 массы Солнца.

Нейтрино могут передать свою энергию волне.



НЕЙТРИННОЕ ОХЛАЖДЕНИЕ И НЕЙТРИННЫЙ ВЕТЕР



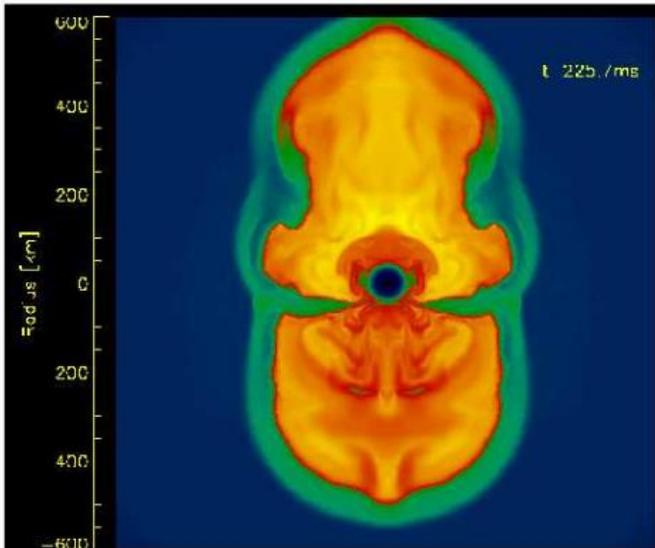
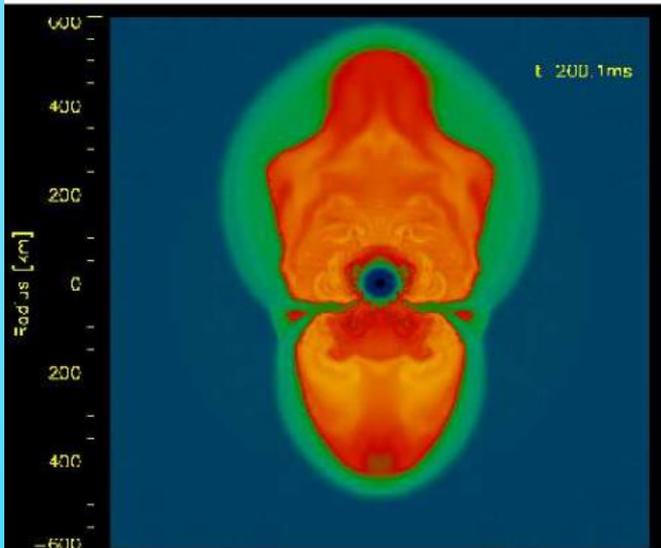
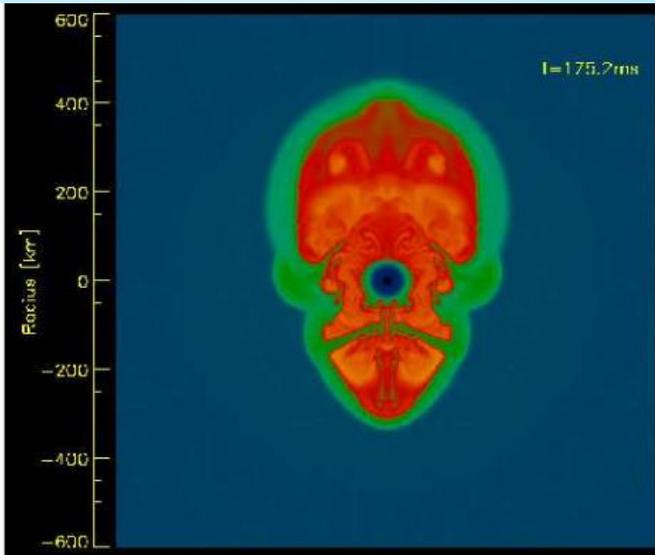
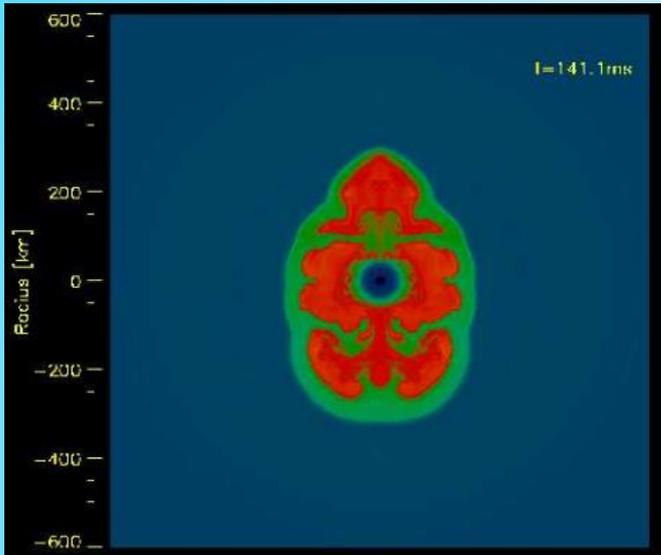
$$t_E \sim \frac{3R_{\text{ns}}^2}{\pi^2 c \lambda_0} \frac{E_{\text{th}}^0}{2E_{\nu}^0} \sim 10 \text{ s},$$

$$\lambda_0 = \frac{1}{n_b \langle \sigma_{\nu} \rangle} \sim$$

$$10 \text{ cm} \left(\frac{E}{100 \text{ MeV}} \right)^{-2}$$

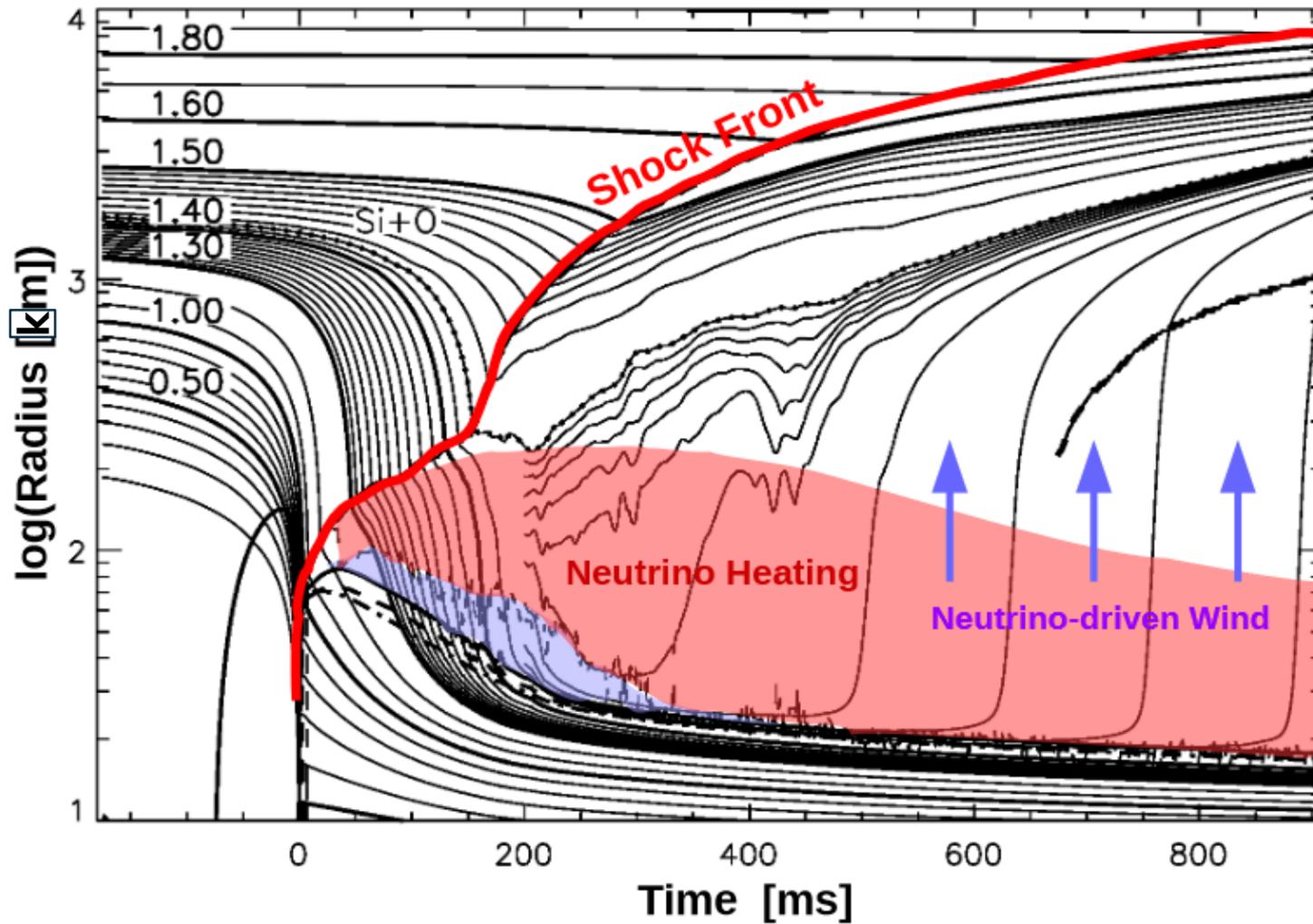
$$\left(\frac{M_{\text{ns}}}{1.5 M_{\odot}} \right)^{-1} \left(\frac{R_{\text{ns}}}{10 \text{ km}} \right)^3$$

ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ НЕУСТОЙЧИВОСТИ. SASI

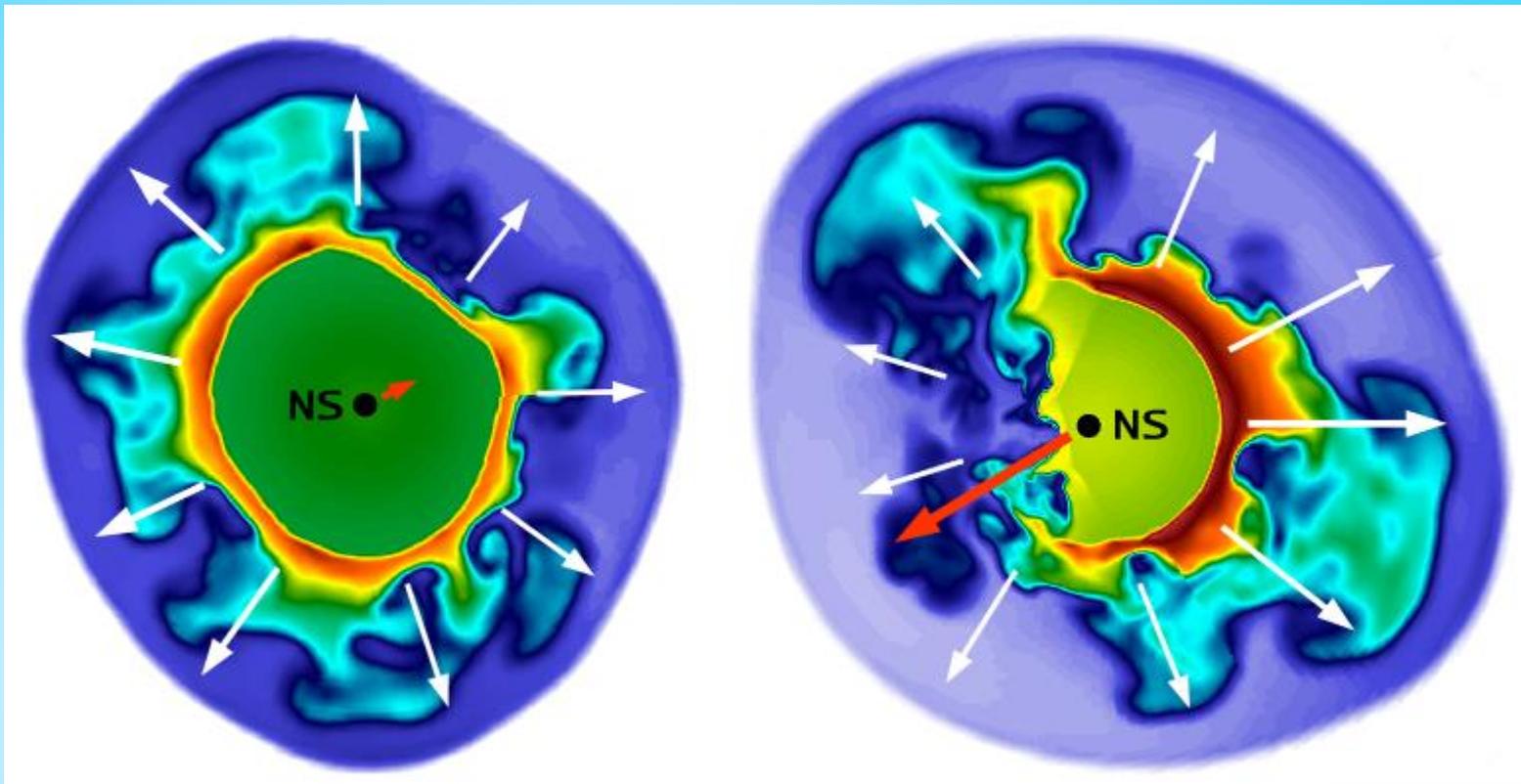


Standing
Accretion
Shock
Instability

ВЗРЫВ ЗВЕЗДЫ 15 МАСС СОЛНЦА



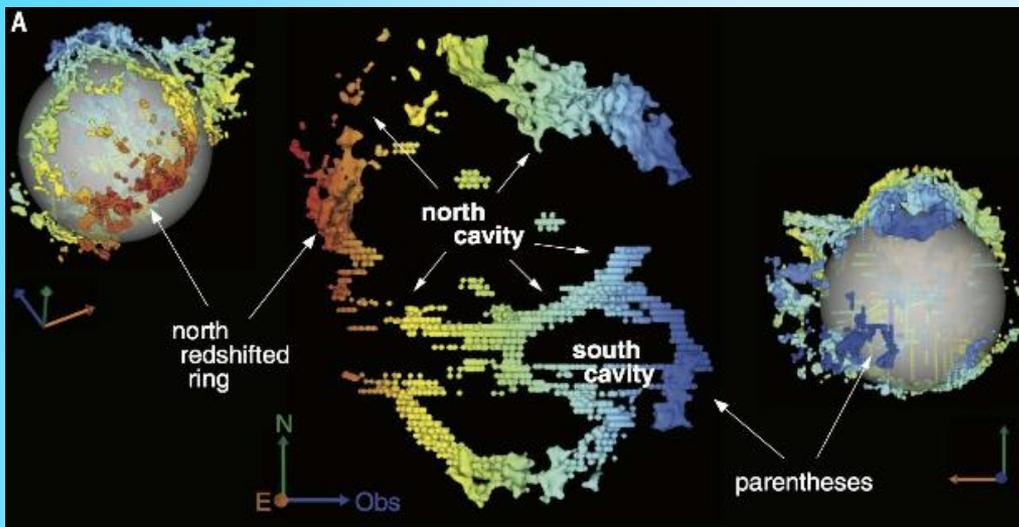
KIK



$$v_{\text{ns}} \approx \frac{2G\Delta m}{r_i v_s} \approx 540 \frac{\text{km}}{\text{s}} \left(\frac{\Delta m}{10^{-3} M_{\odot}} \right) \left(\frac{r_i}{100 \text{ km}} \right)^{-1} \left(\frac{v_s}{5000 \text{ km/s}} \right)^{-1}$$

1702.08825

ПОМОГУТ ОСТАТКИ СВЕРХНОВЫХ?



Данные по составу остатка и его кинематике могут помочь восстановить динамику взрыва, а значит – определить механизм.

