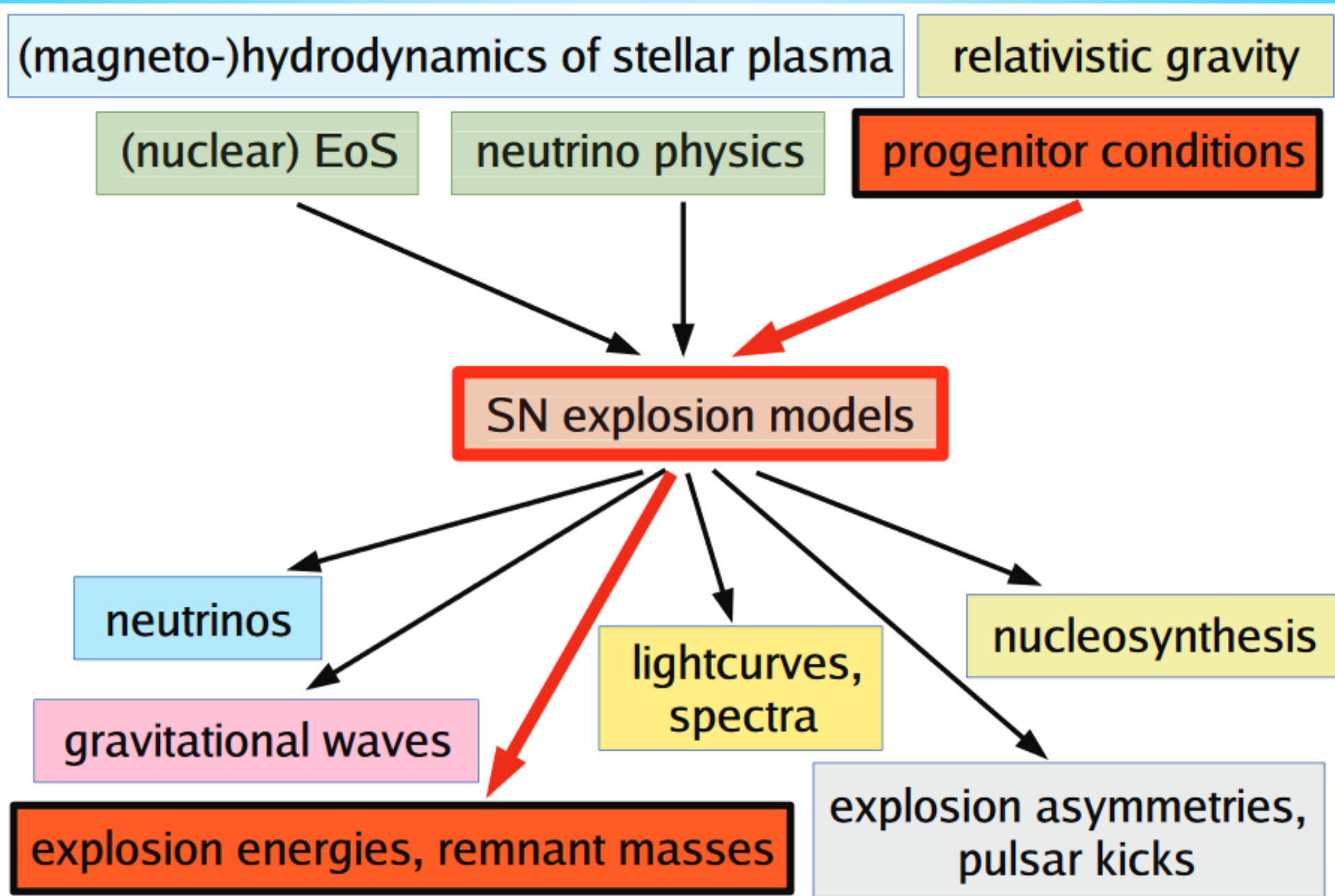
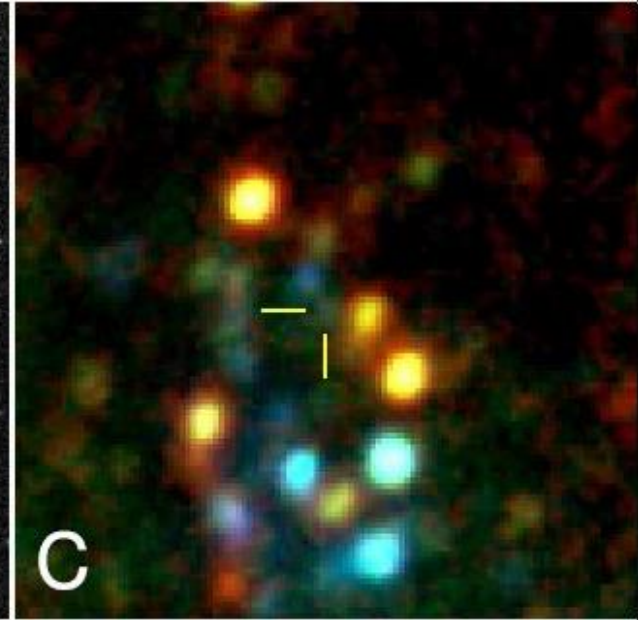
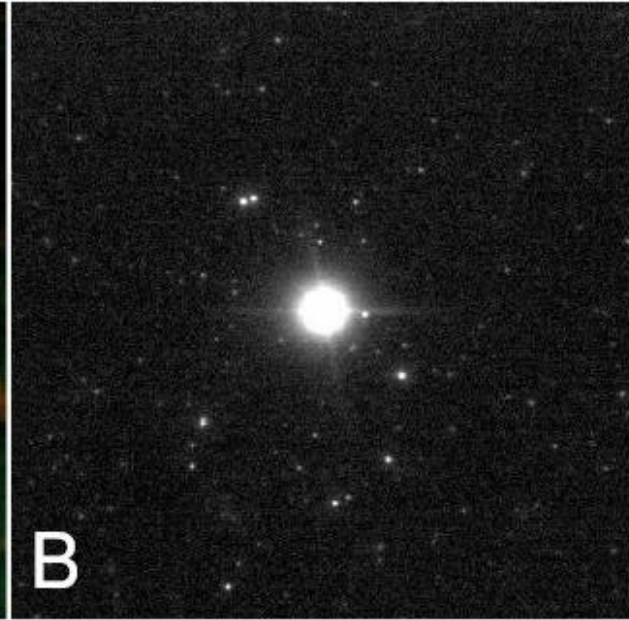
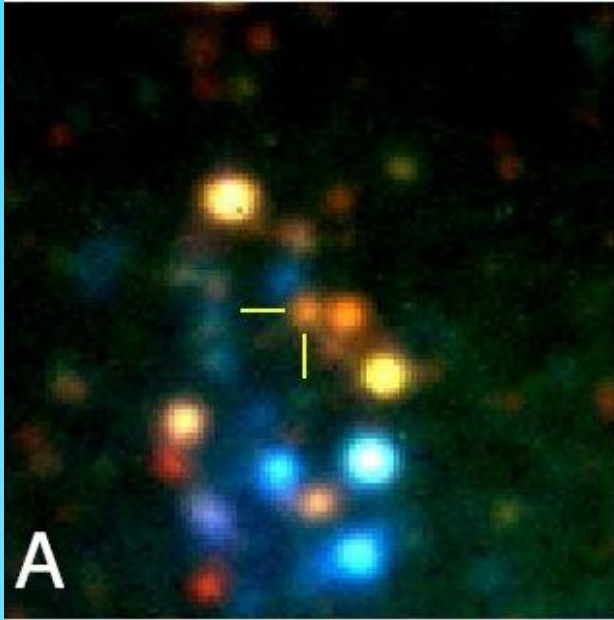


# СВЕРХНОВЫЕ





# СВЕРХНОВЫЕ

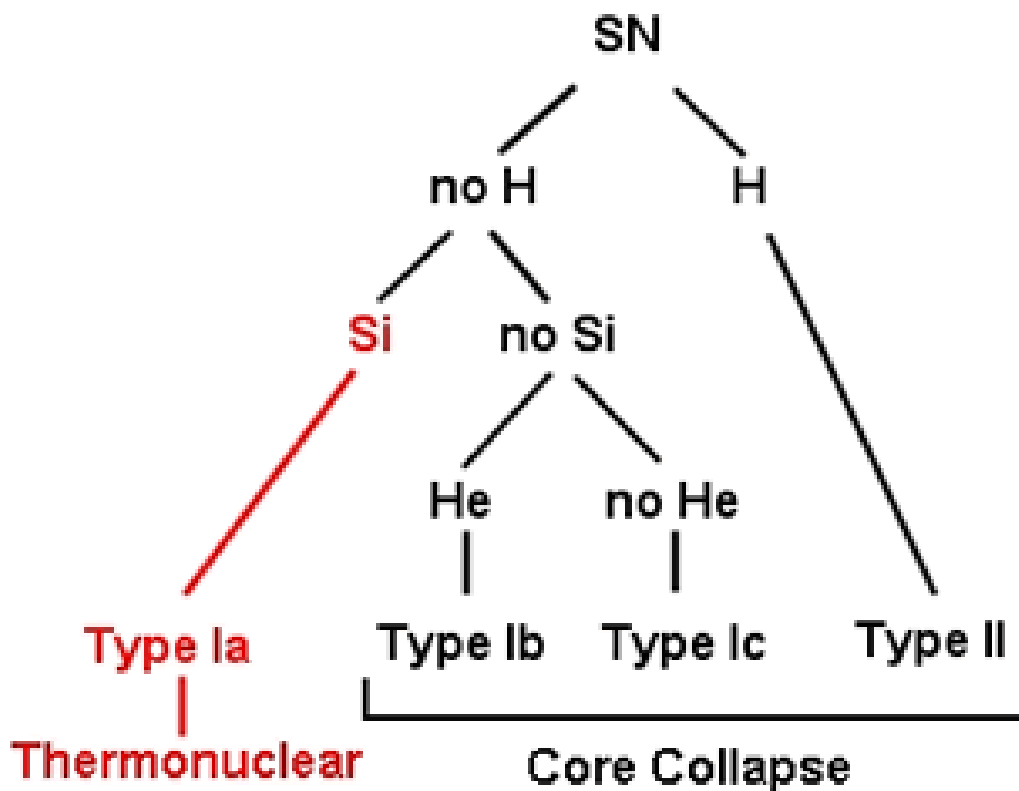


Жизнь массивной звезды заканчивается колоссальным взрывом – сверхновой. Также взрываться могут белые карлики, если они стали слишком тяжелыми.

На короткое время звезда становится ярче целой галактики!

См. свежие публикации и обзоры в [http://xray.sai.msu.ru/~polar/sci\\_rev/sn.html](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**

**IIb**  
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  $\sim 10$  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.

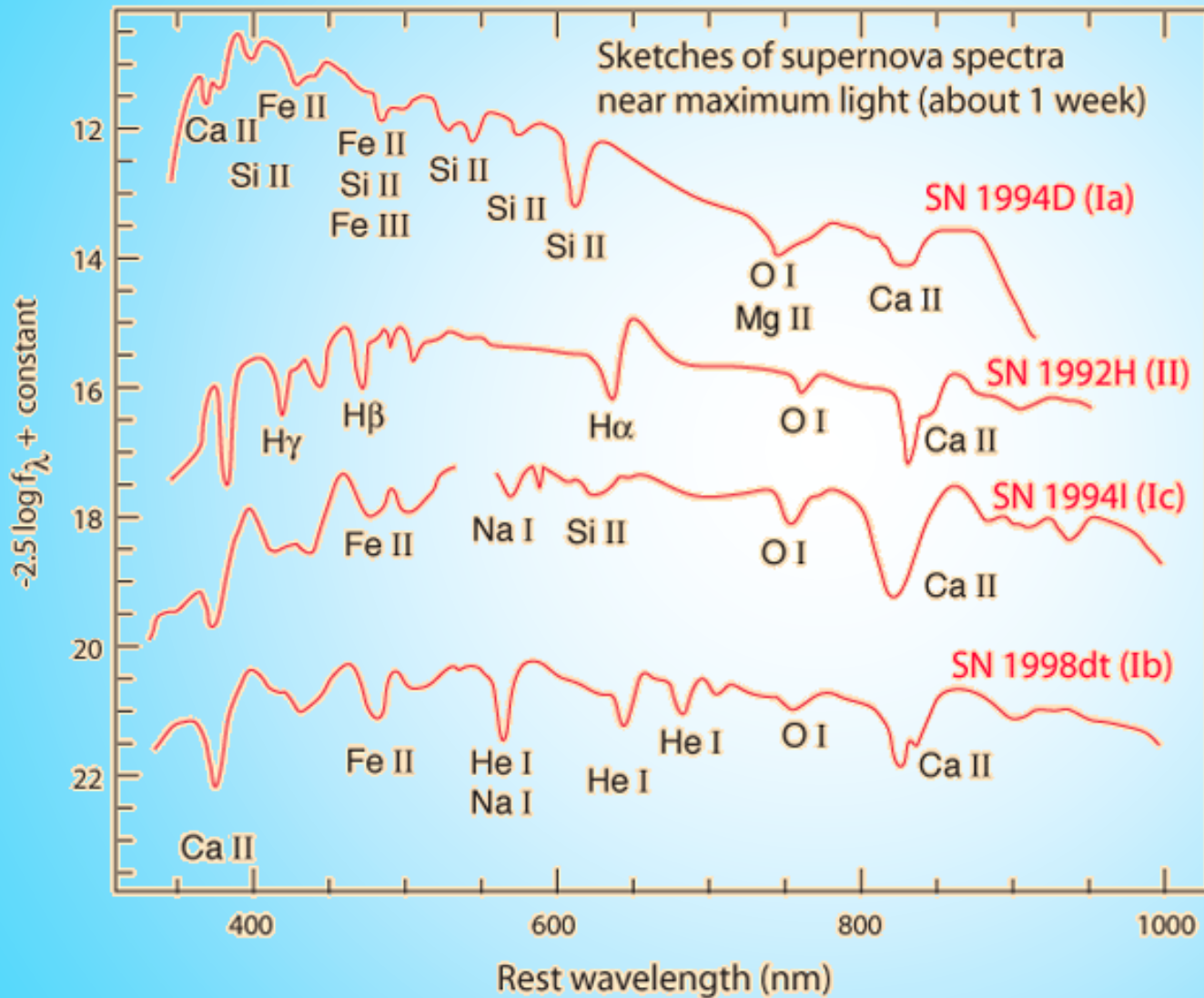
Формирование большого  
количества никеля.

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

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.

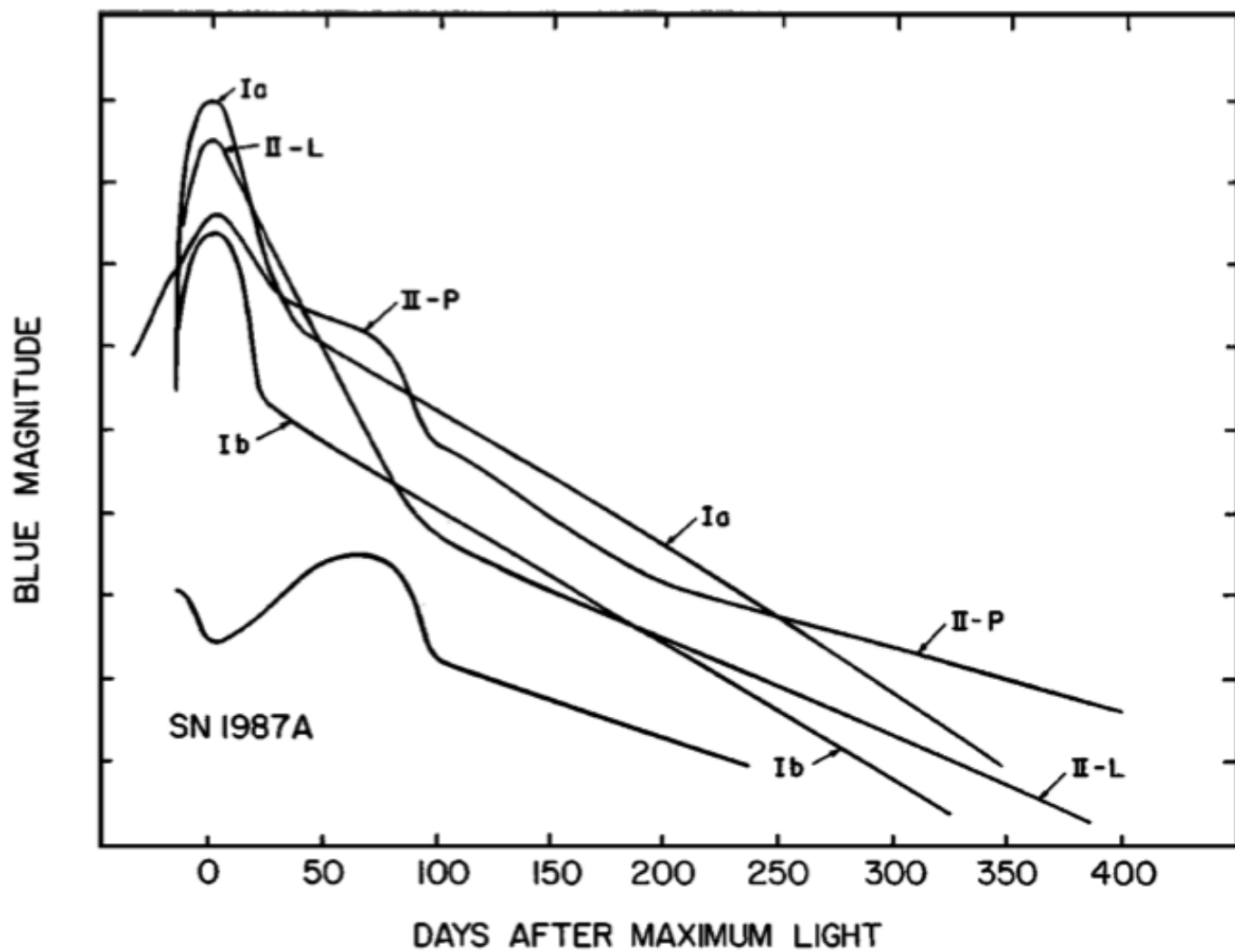
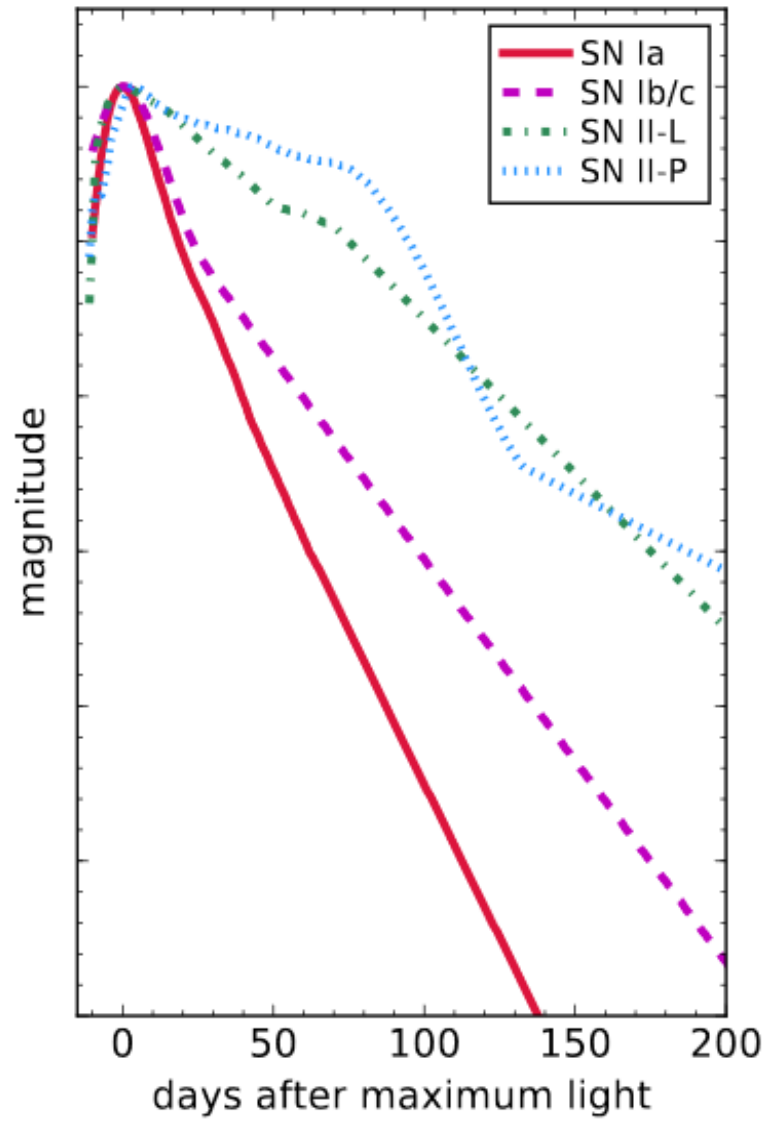
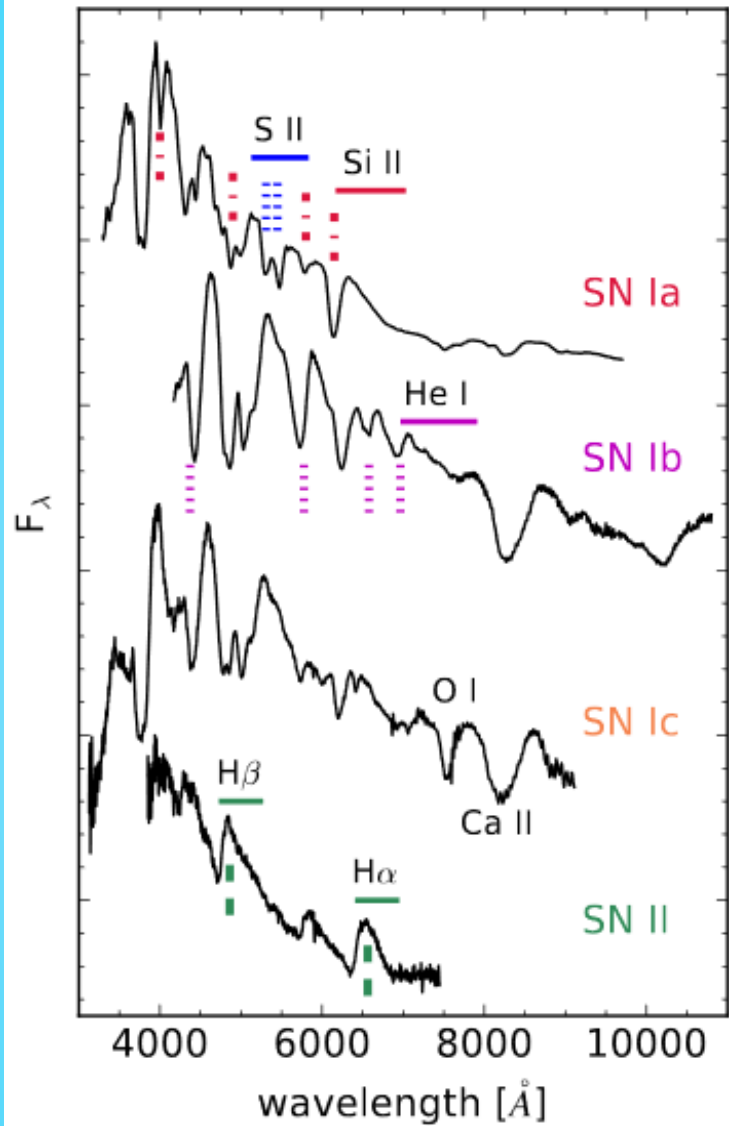


Figure 3 Schematic light curves for SNe of Types Ia, Ib, II-L, II-P, and SN 1987A. The curve for SNe Ib includes SNe Ic as well, and represents an average. For SNe II-L, SNe 1979C and 1980K are used, but these might be unusually luminous.

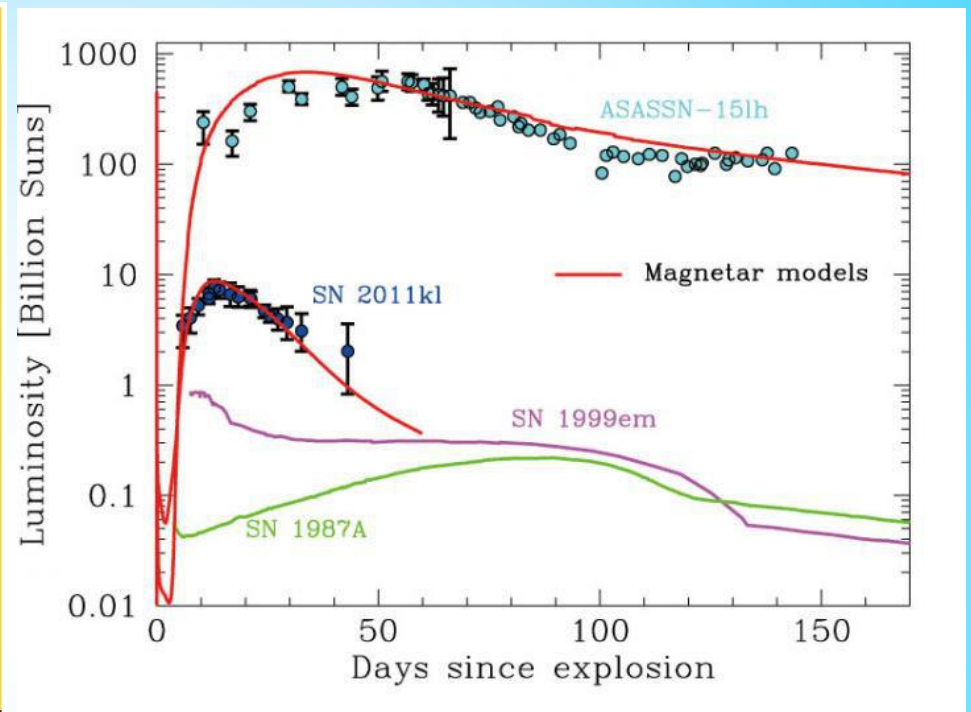
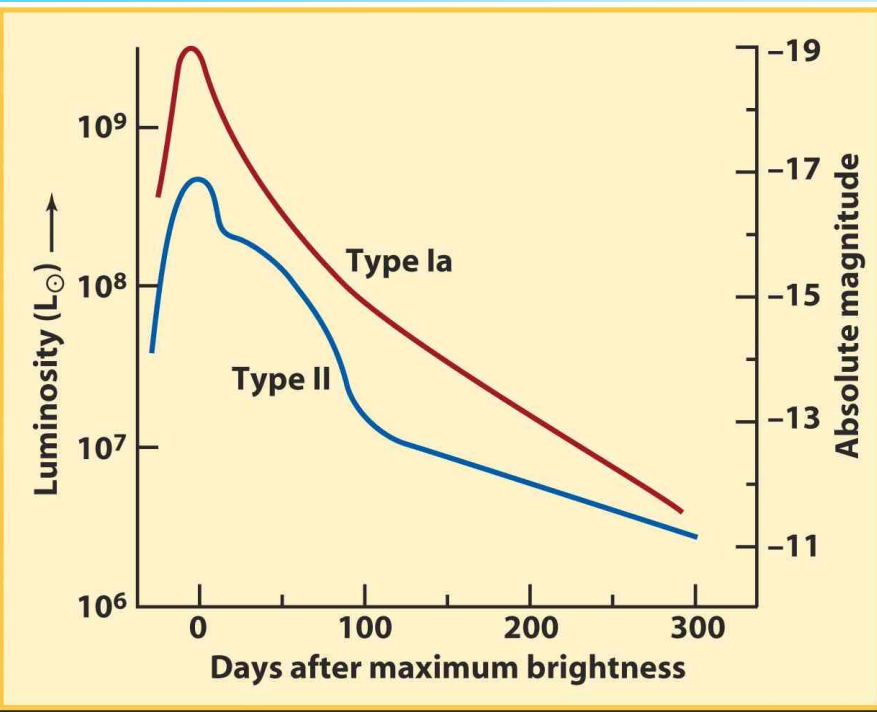
Figure Credit: Wheeler, J. C., & Harkness, R. P. 1990, RPPh, 53, 1467





1806.07267

# КРИВАЯ БЛЕСКА СВЕРХНОВОЙ



Bersten et al.

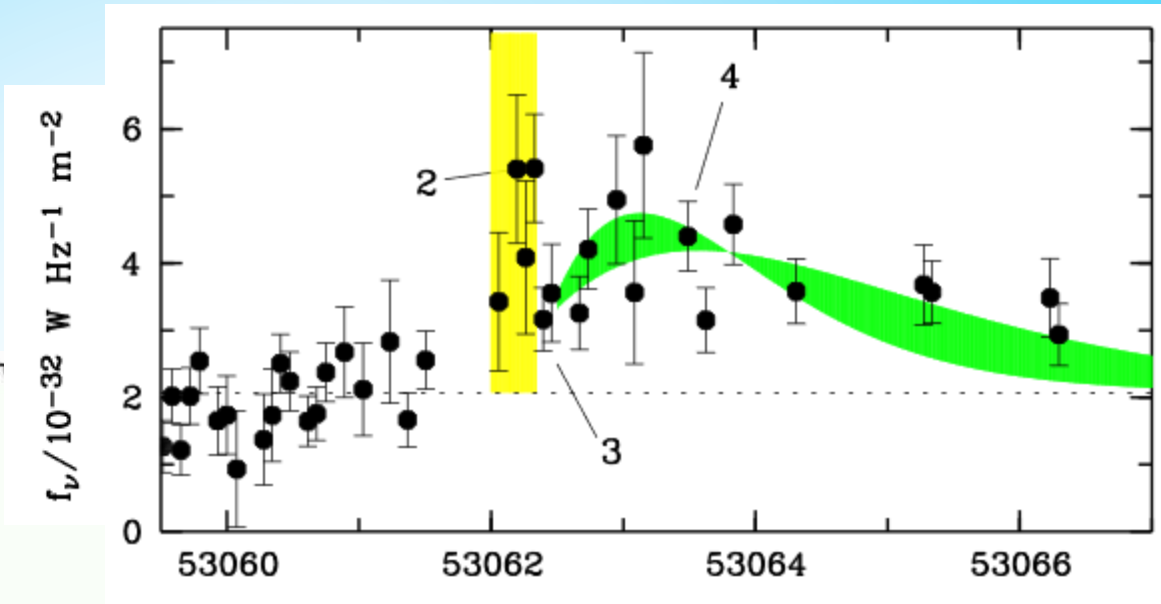
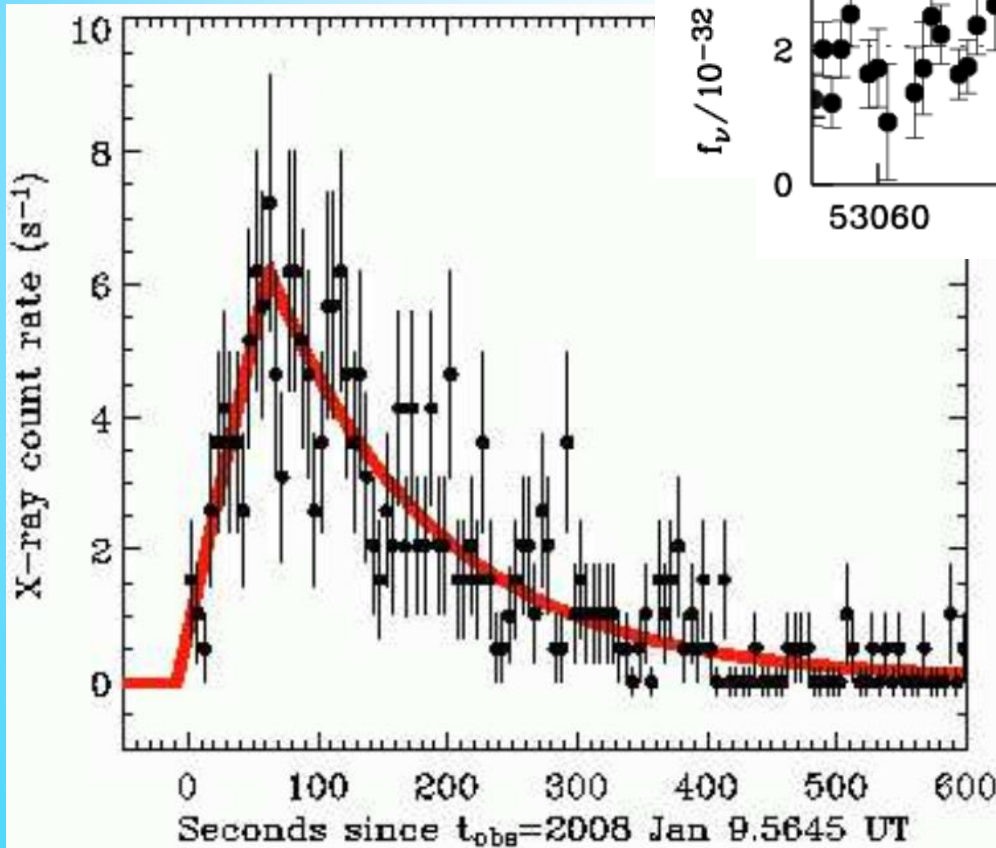
<http://pics-about-space.com>

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

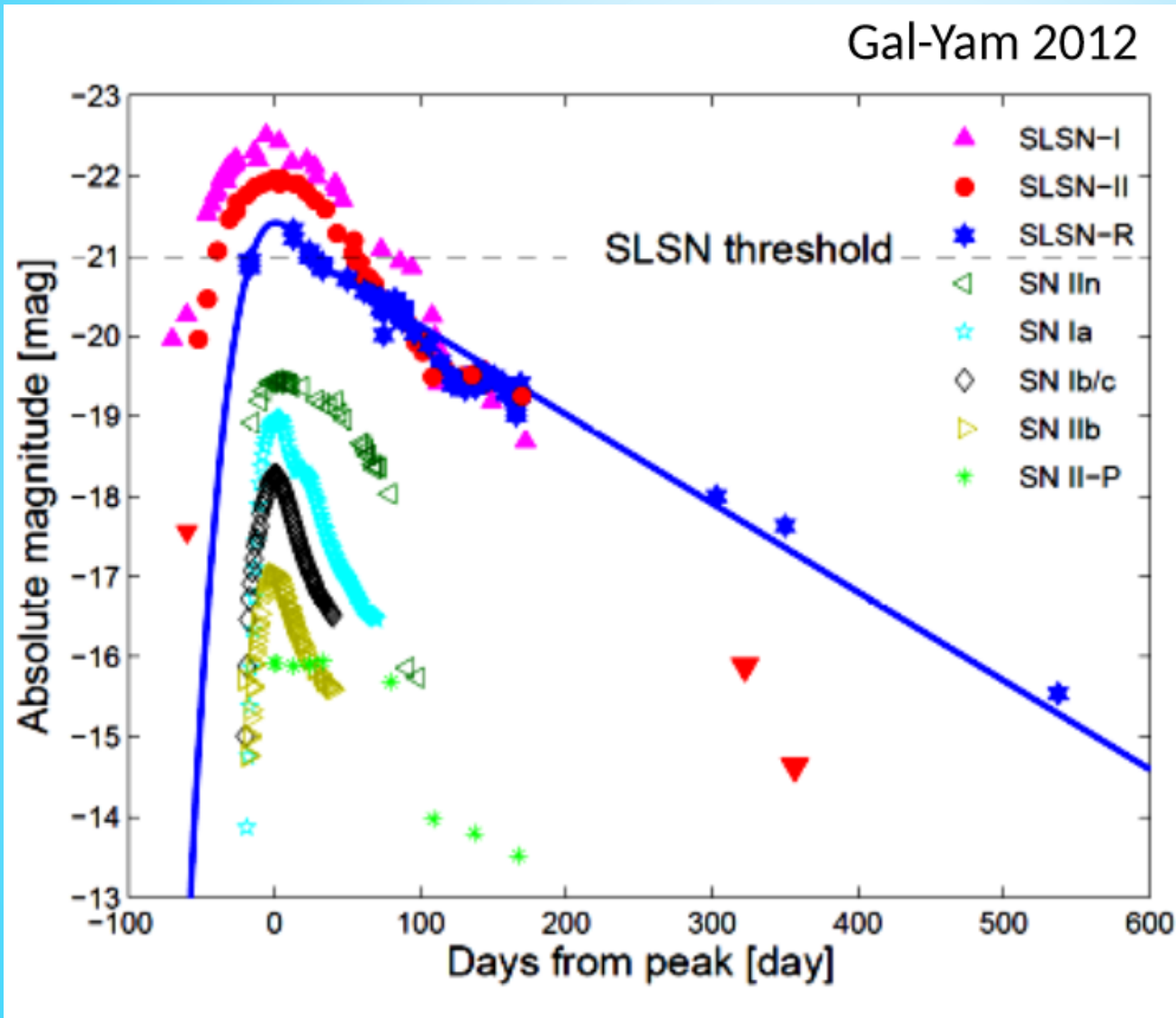
Выход ударной волны  
Рентгеновские данные.



0803.3596

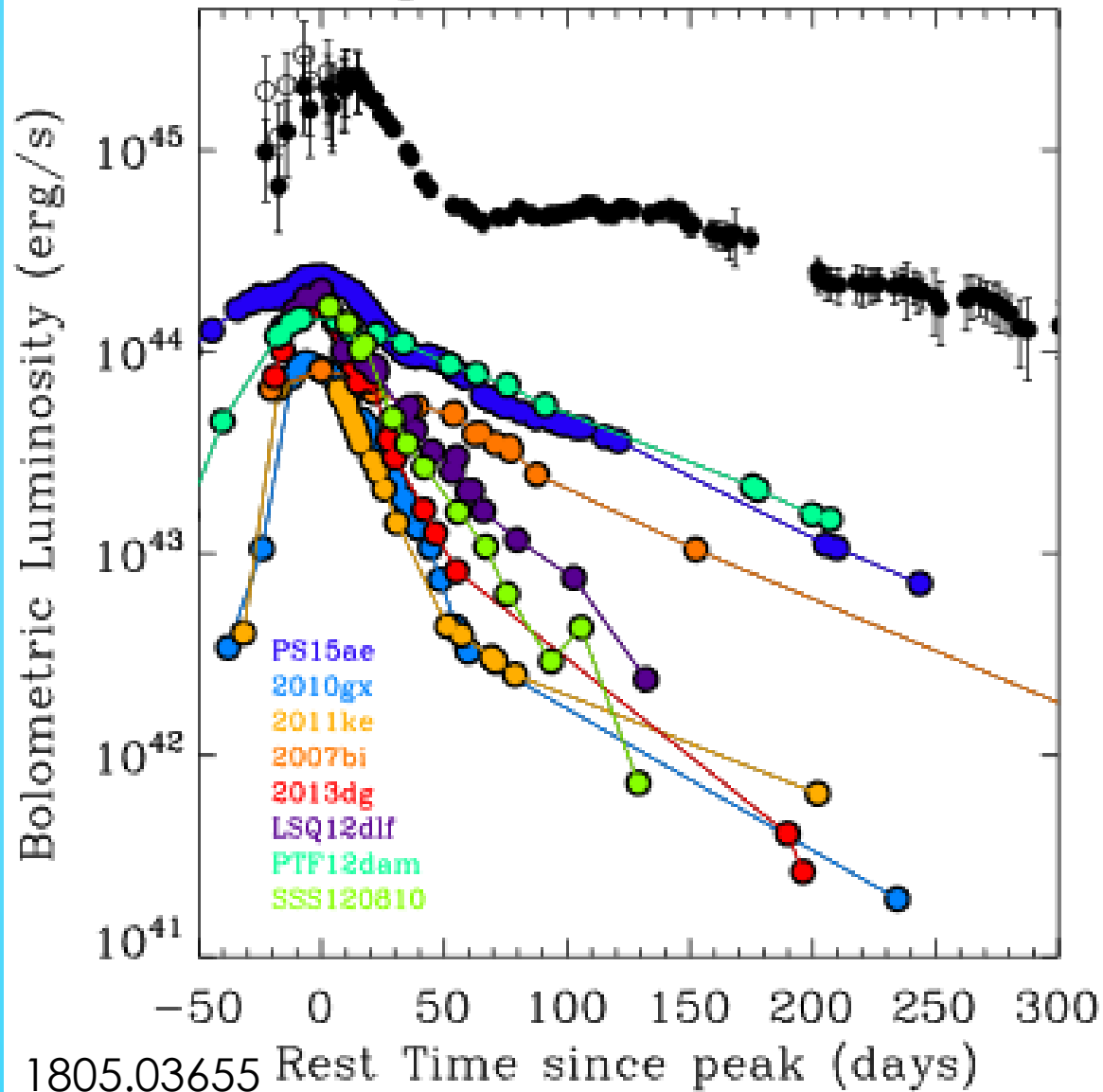
Желтым показана область  
прекурсора выхода  
ударной волны.  
Сама сверхновая  
была обнаружена  
через 2 недели.

# 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)

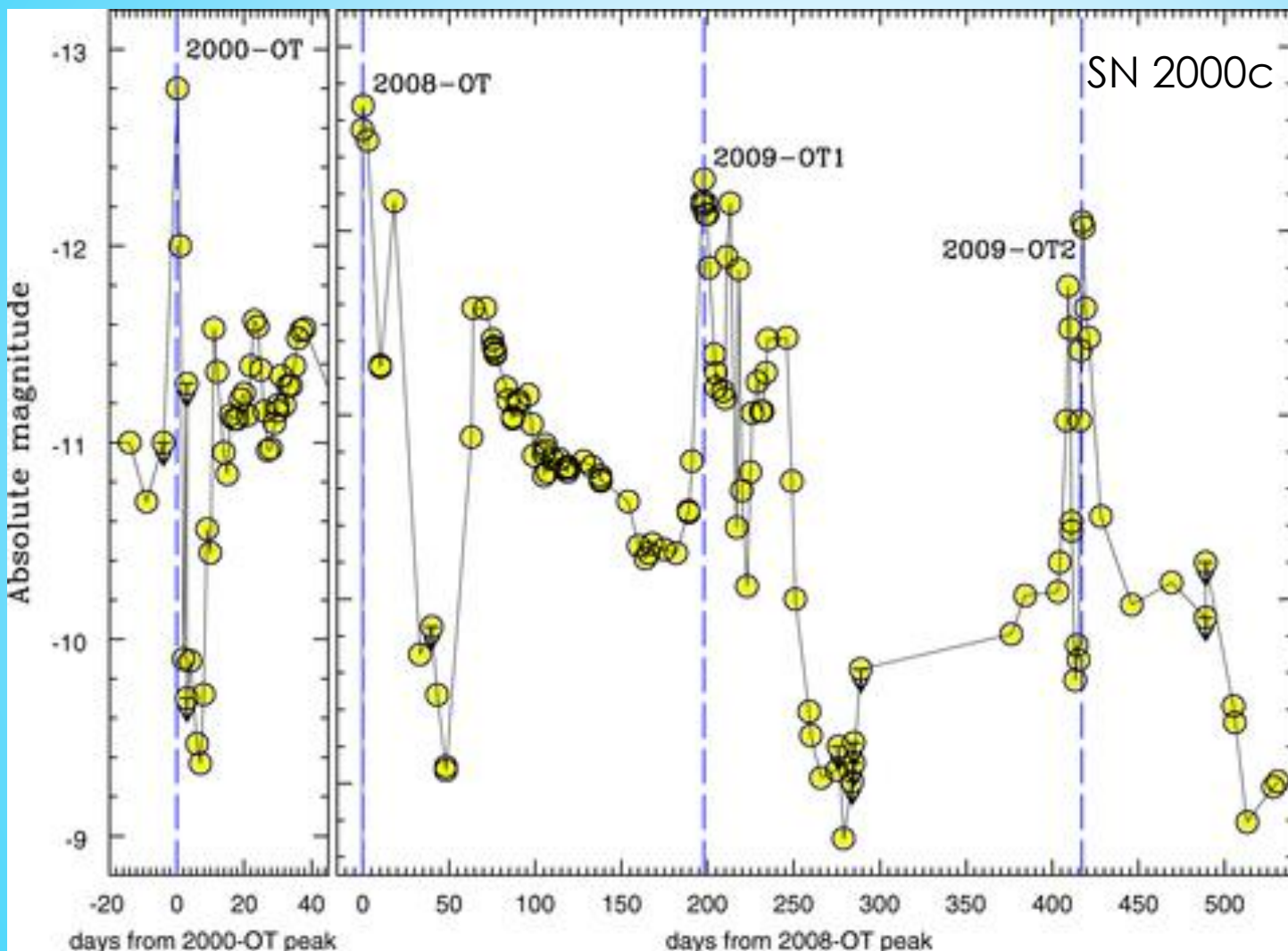
# ОСОБЫЙ СЛУЧАЙ: ASASSN-15LH



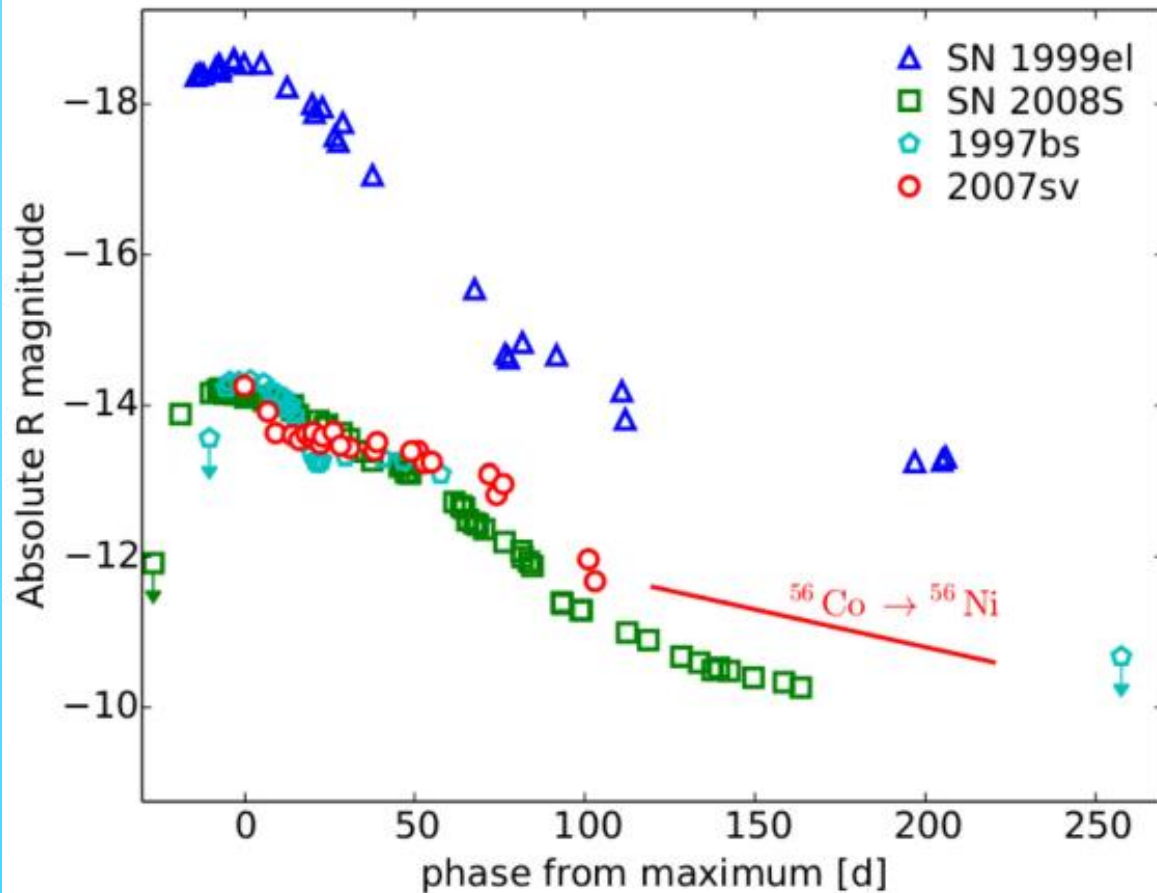
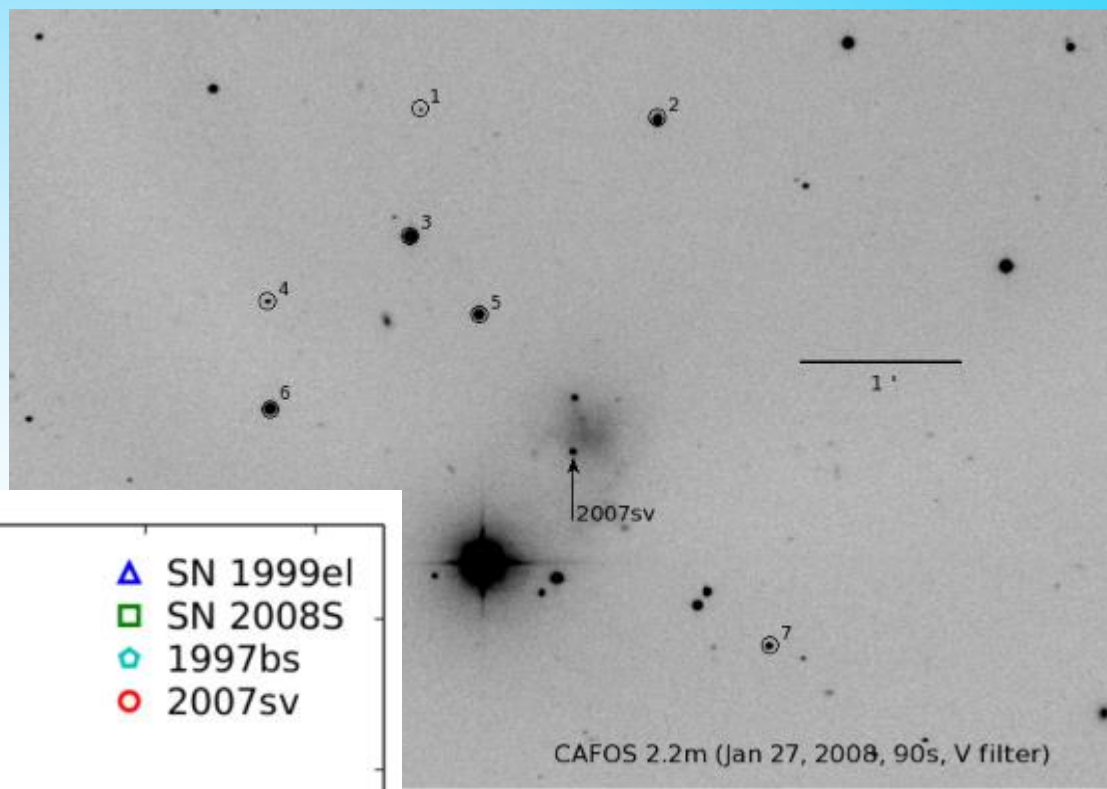
$$L_{\text{peak}} \sim 2 \times 10^{45} \text{ erg/s}$$
$$E_{\text{rad}} \sim 2 \times 10^{52} \text{ erg}$$

1507.03010

# ПОДДЕЛЬНЫЕ СВЕРХНОВЫЕ

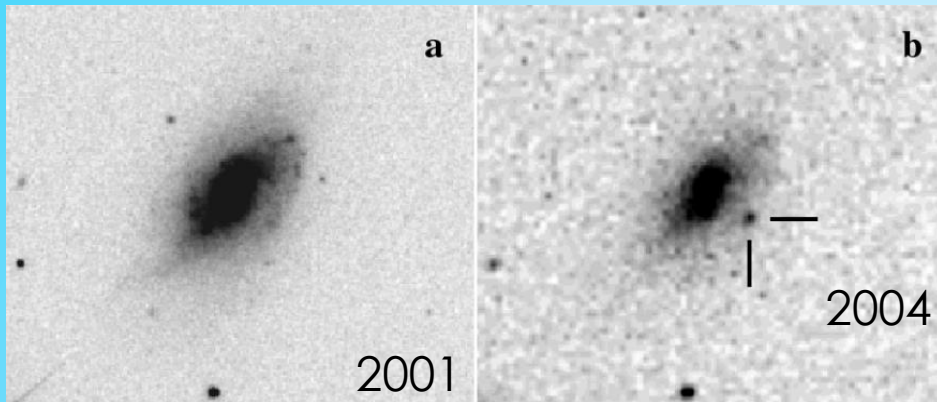


# SN 2007SV

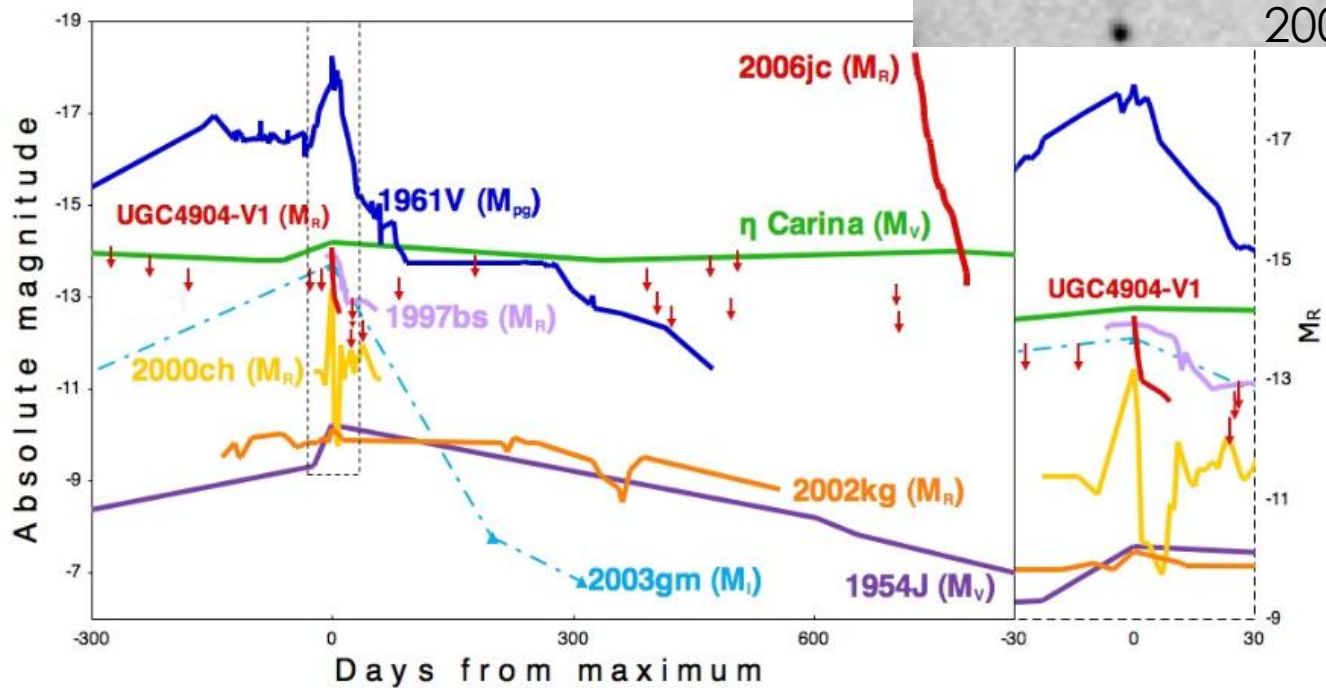
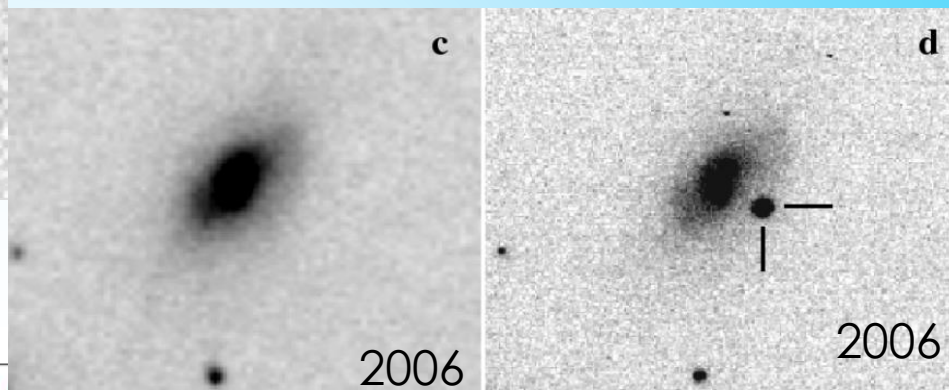


Tartaglia et al.  
MNRAS447,117 (2015)

# SN 2006JC



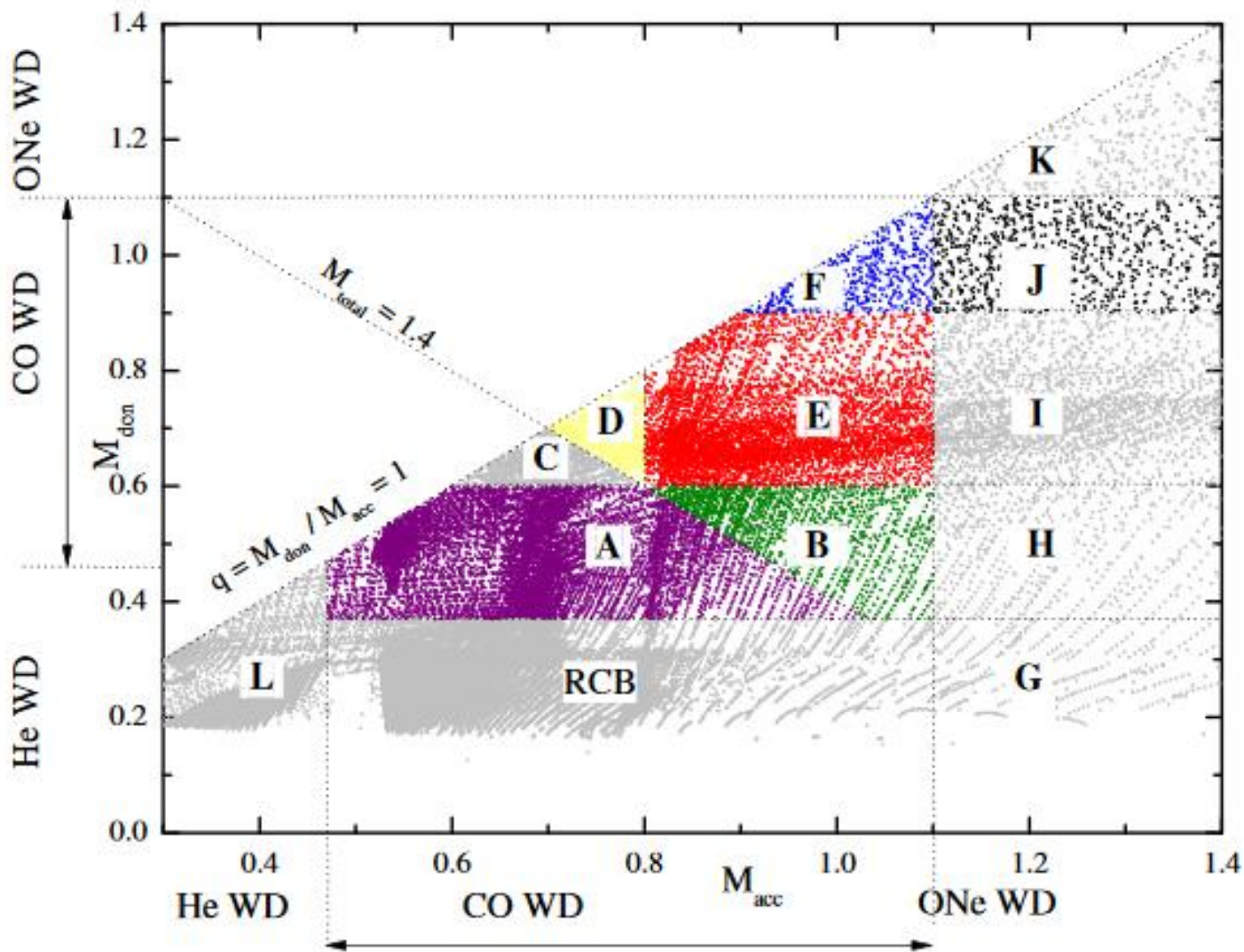
UGC4904V1 и SN2006jc



0703663



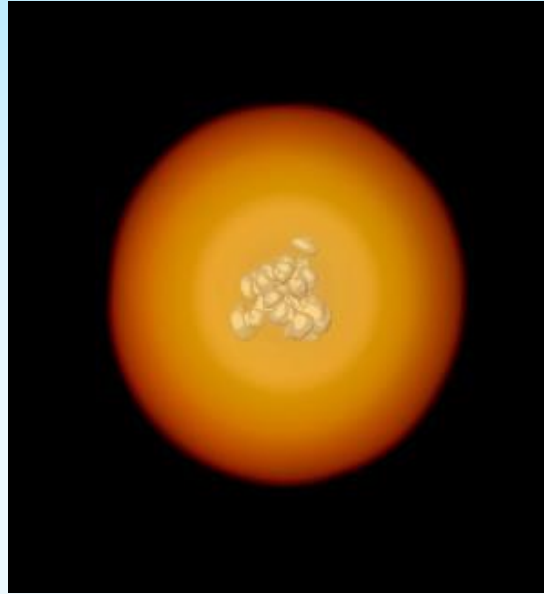
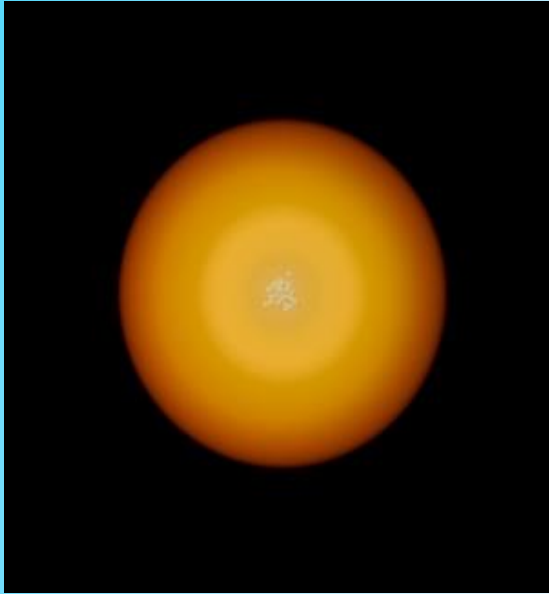
# СЛИЯНИЯ WD И SNIa



A, B, D, E, F, J – SNIa

G, H, I - AIC

# ВЗРЫВ SN IA



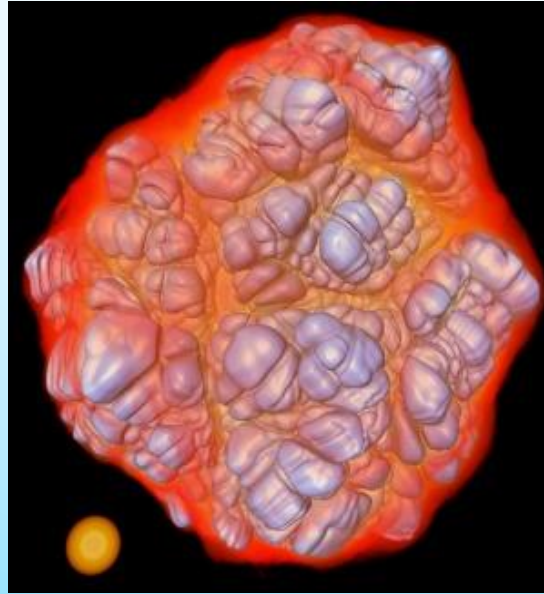
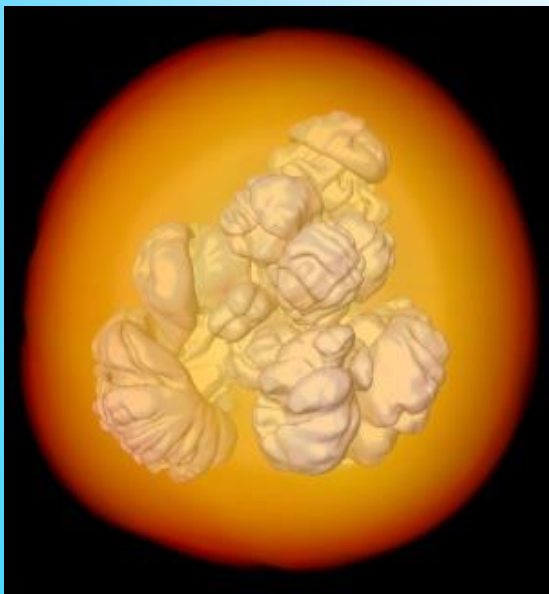
Достигнув критической массы, CO белые карлики взрываются (термоядерное горение углерода и кислорода).

Это термоядерный взрыв, полностью разрушающий объект.

Наблюдения именно таких сверхновых привели к открытию темной энергии.

Они также очень важны для синтеза многих тяжелых элементов.

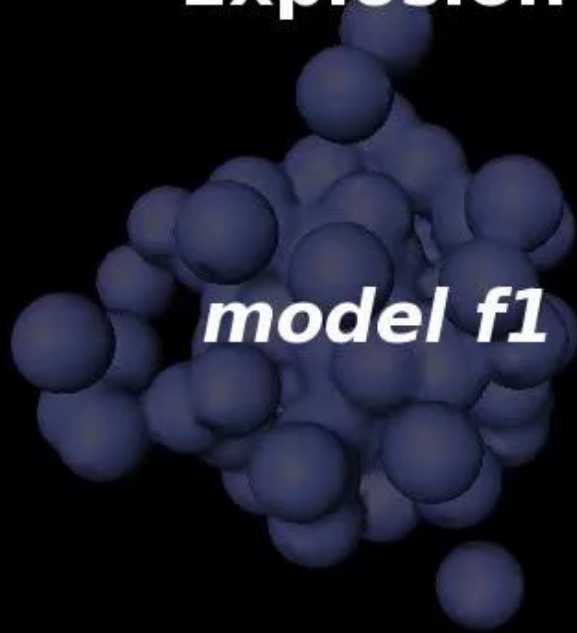
См. обзор в arXiv: 1805.07268.



(Roepeke et al.)

# ВЗРЫВ СВЕРХНОВОЙ ТИПА IA

## Thermonuclear Supernova Explosion



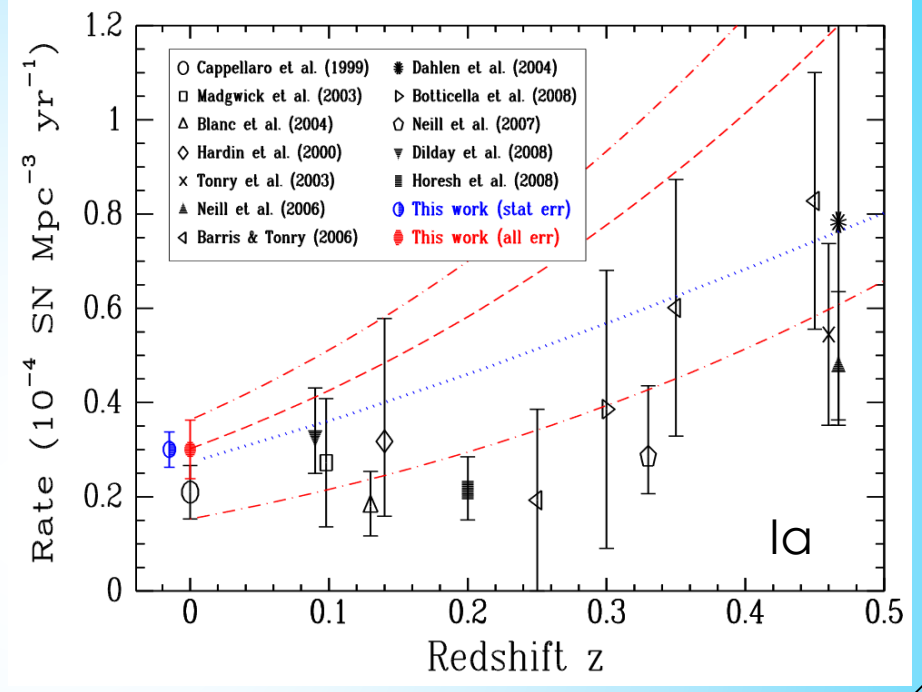
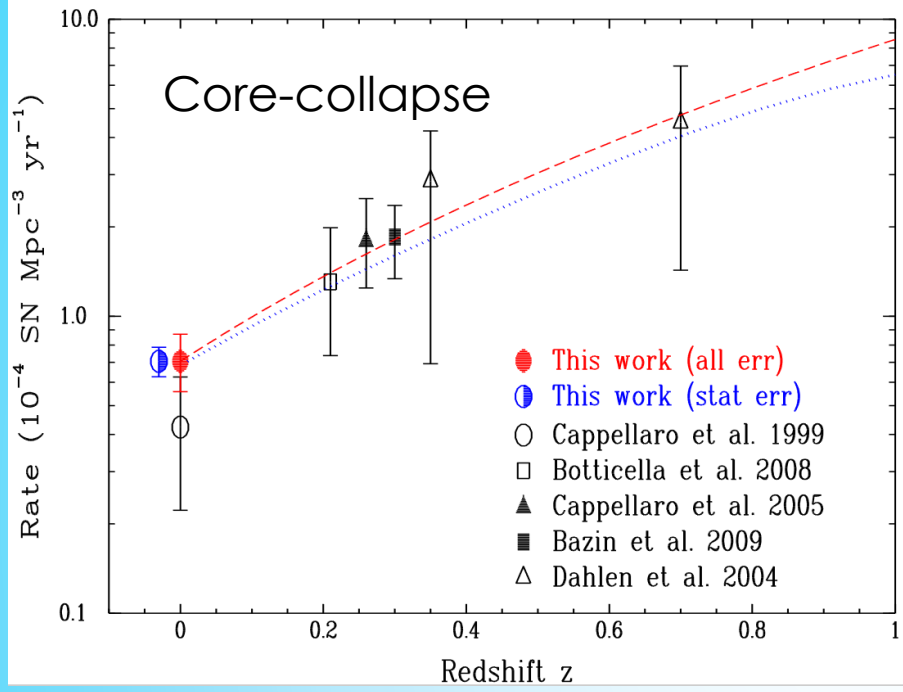
(c) Friedrich Röpke, MPA, 2004

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



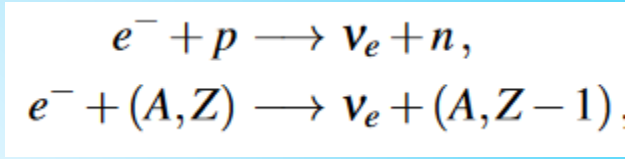
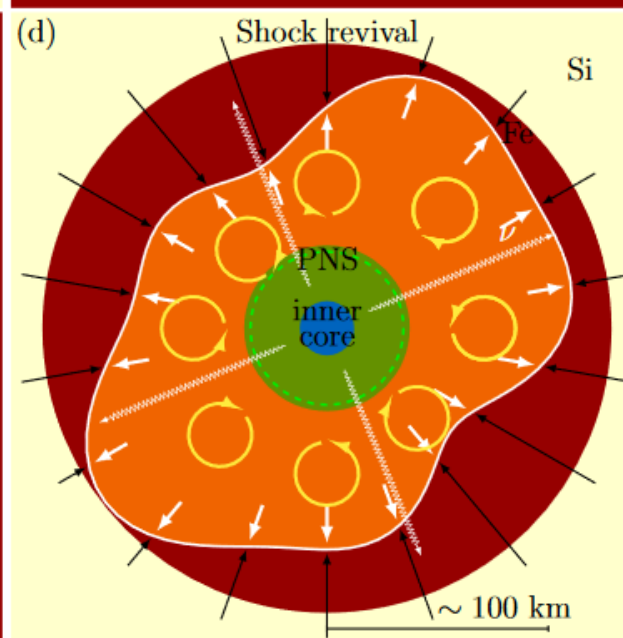
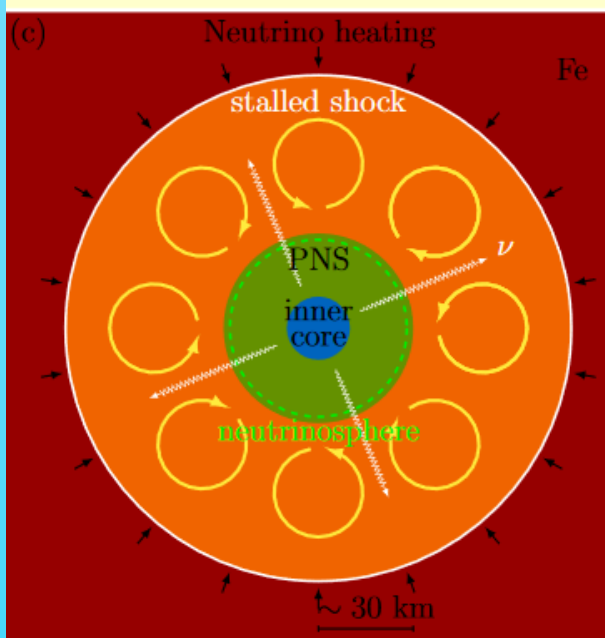
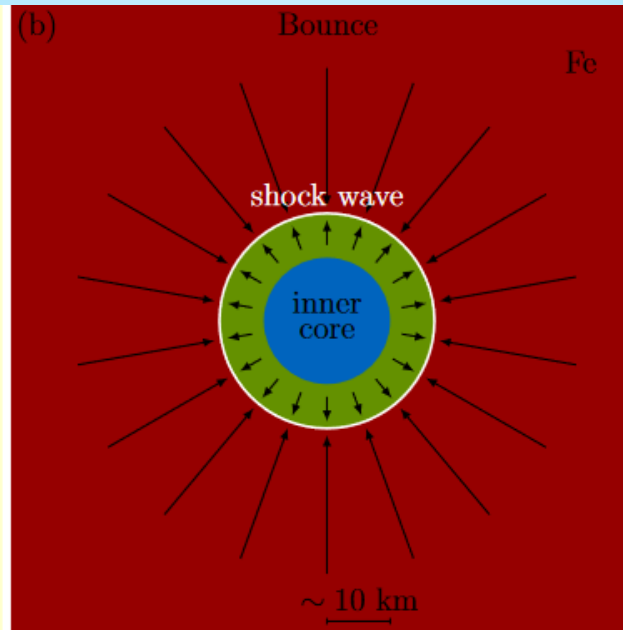
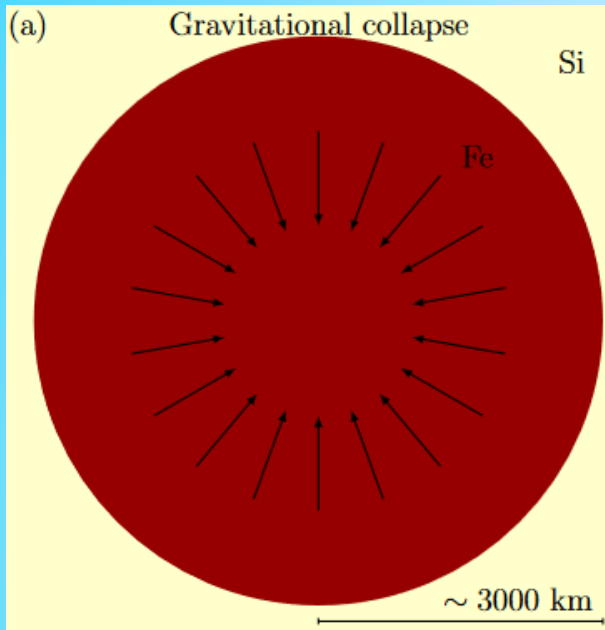
Milky Way rate (per century) arXiv: 1006.4613

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

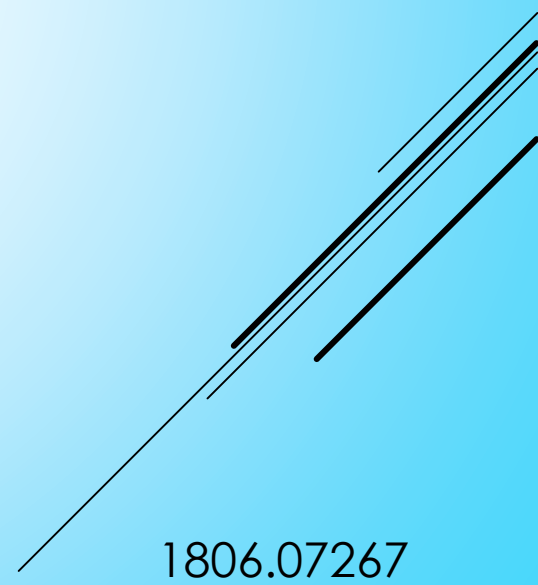
1104.0300

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

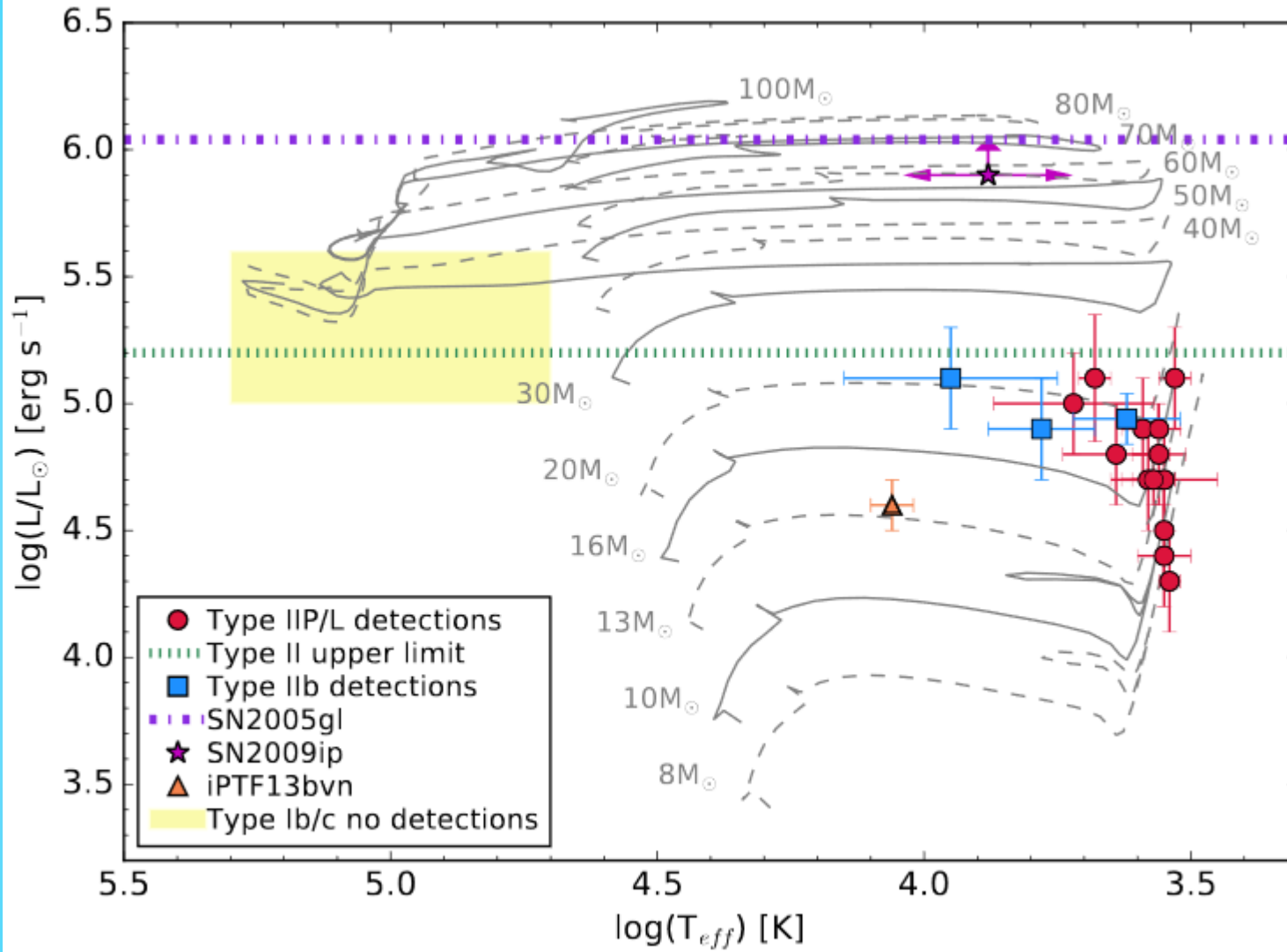
# КОЛЛАПС ЯДРА



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

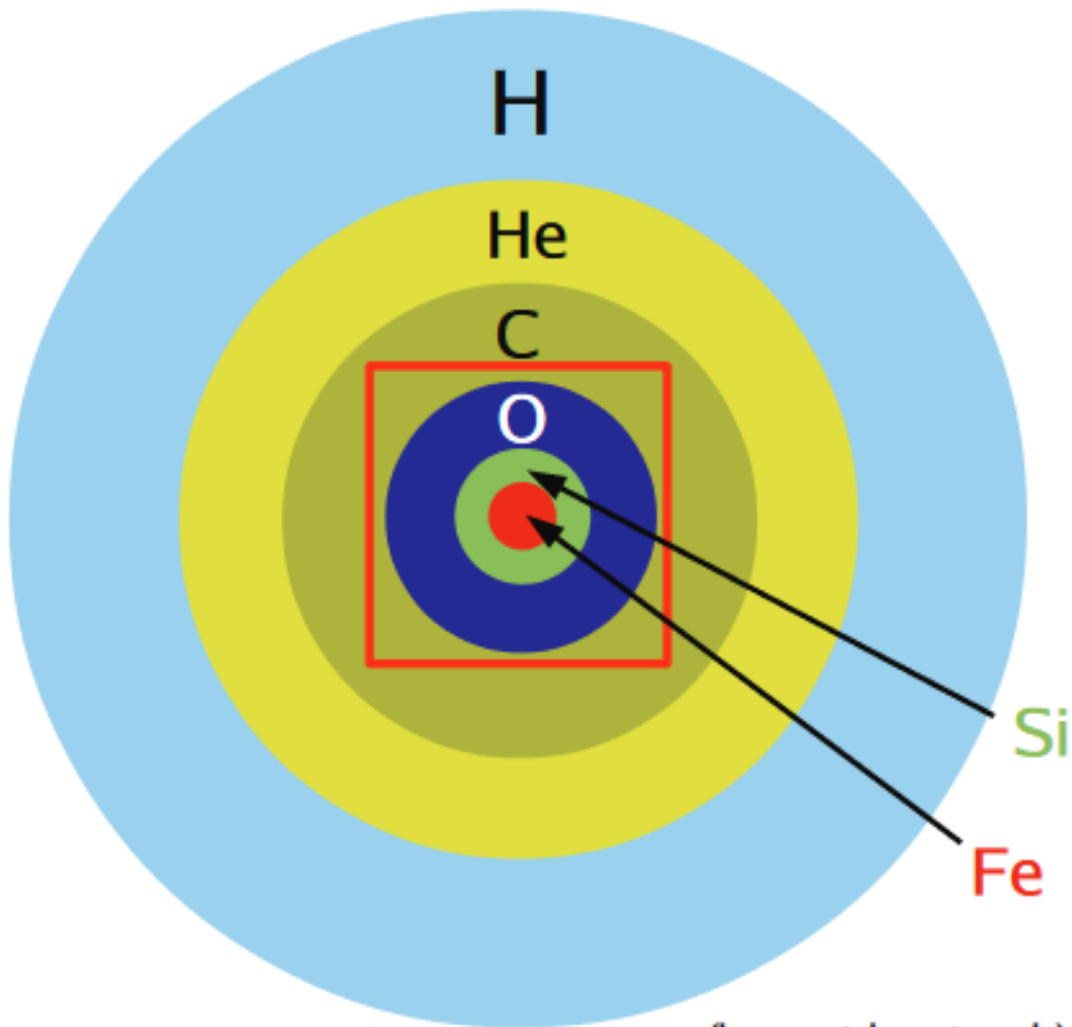


# ЗВЕЗДЫ-ПРАРОДИТЕЛИ



# СТРУКТУРА ЗВЕЗДЫ ПЕРЕД КОЛЛАПСОМ

Onion-shell structure of pre-collapse star



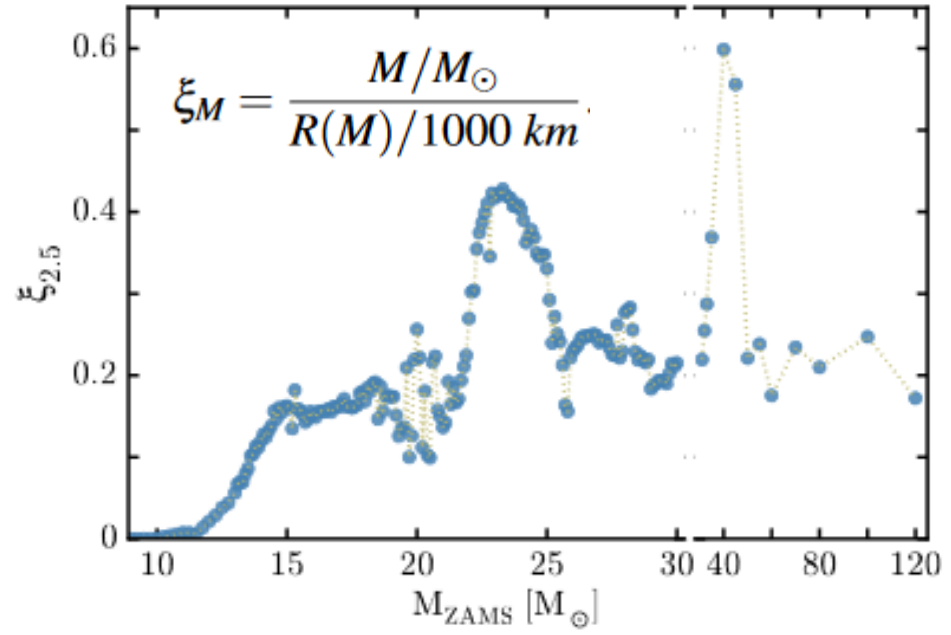
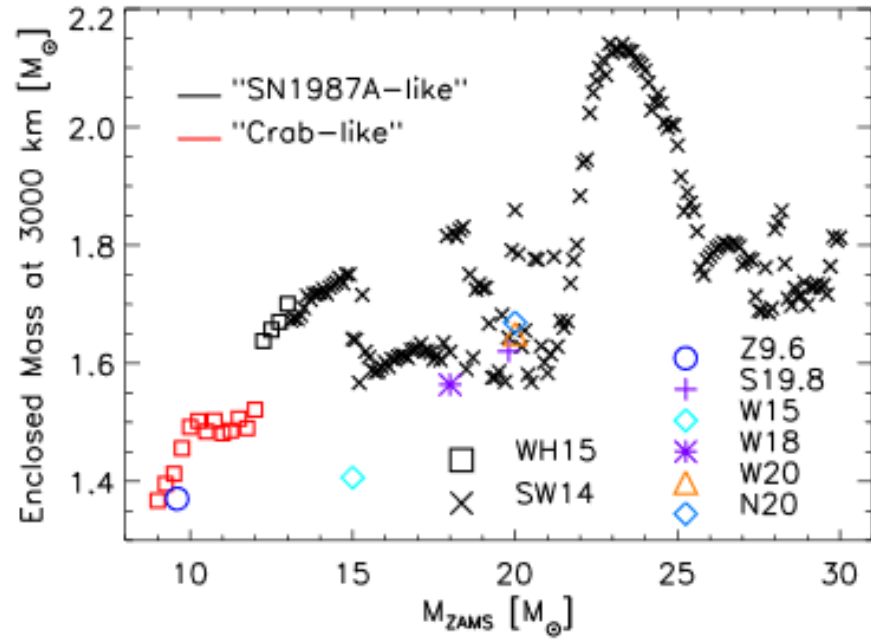
Радиус железного ядра  
~3000 км.

Центральная плотность  
~ $10^9$  г/см<sup>3</sup>

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

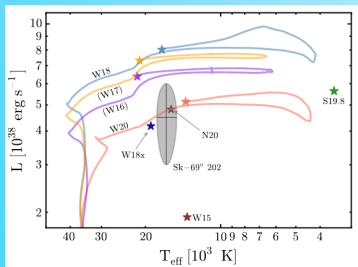
1211.1378

# 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.

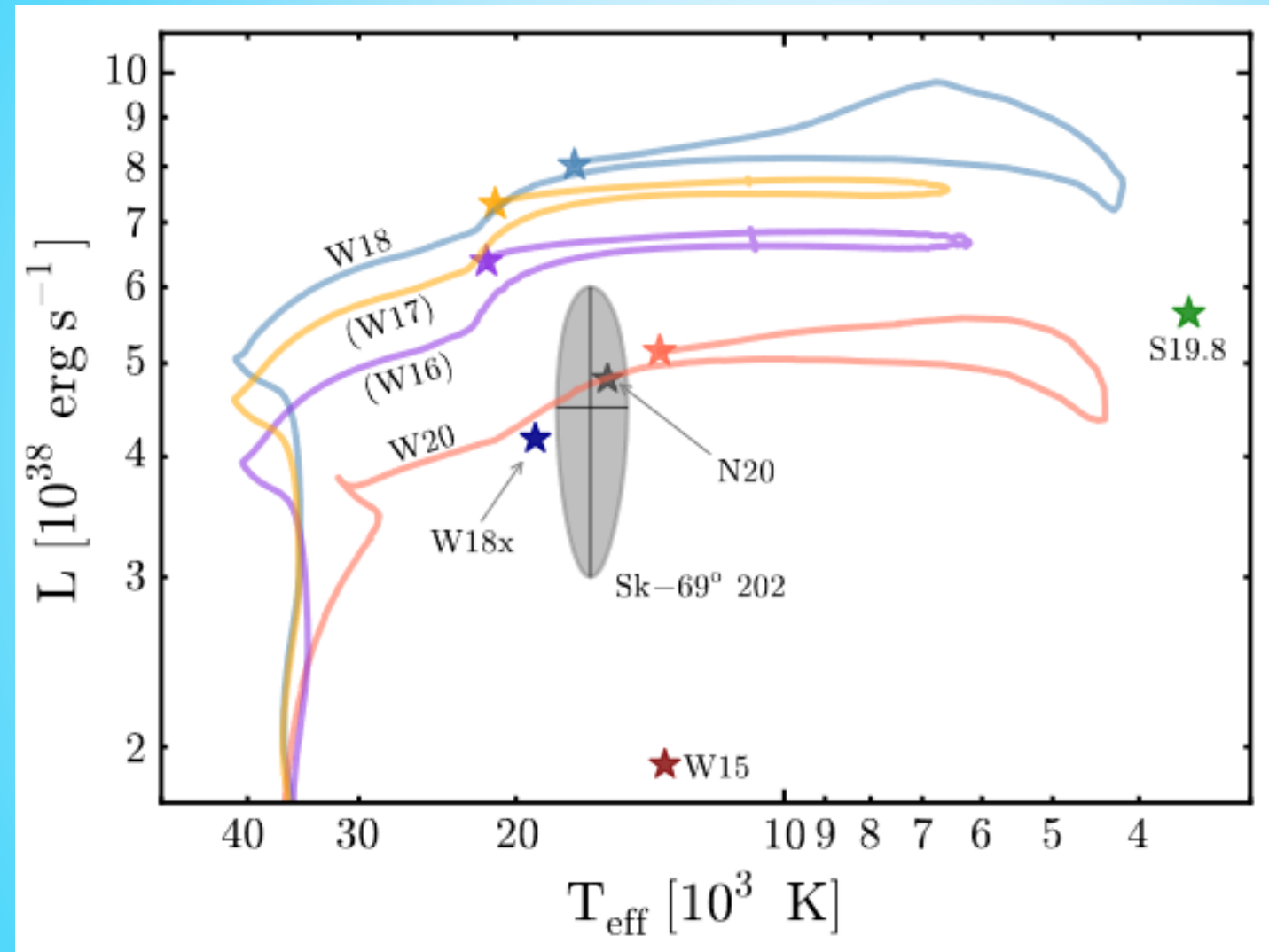


1510.04643

1806.07267

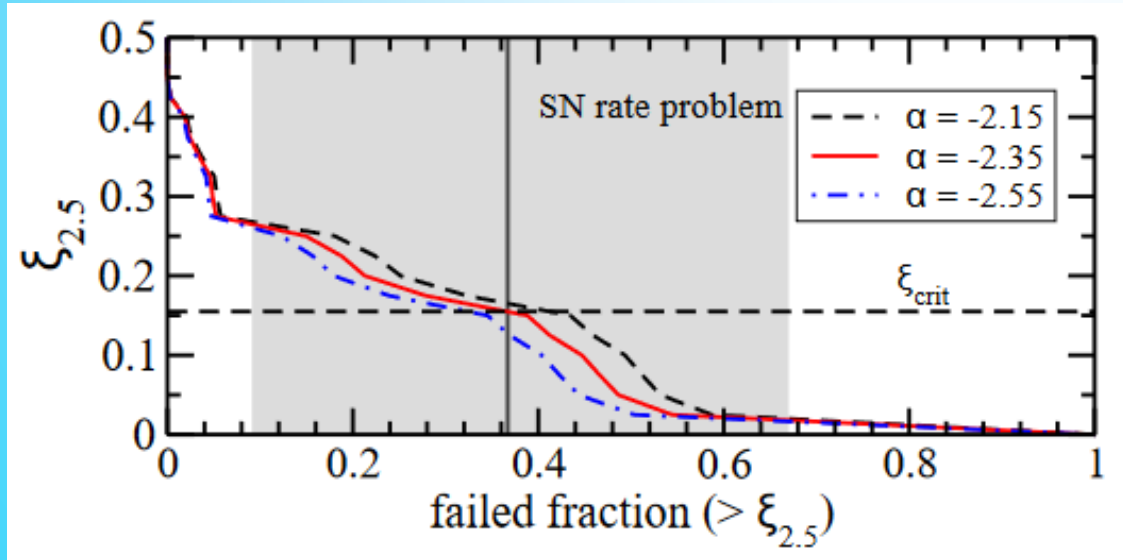
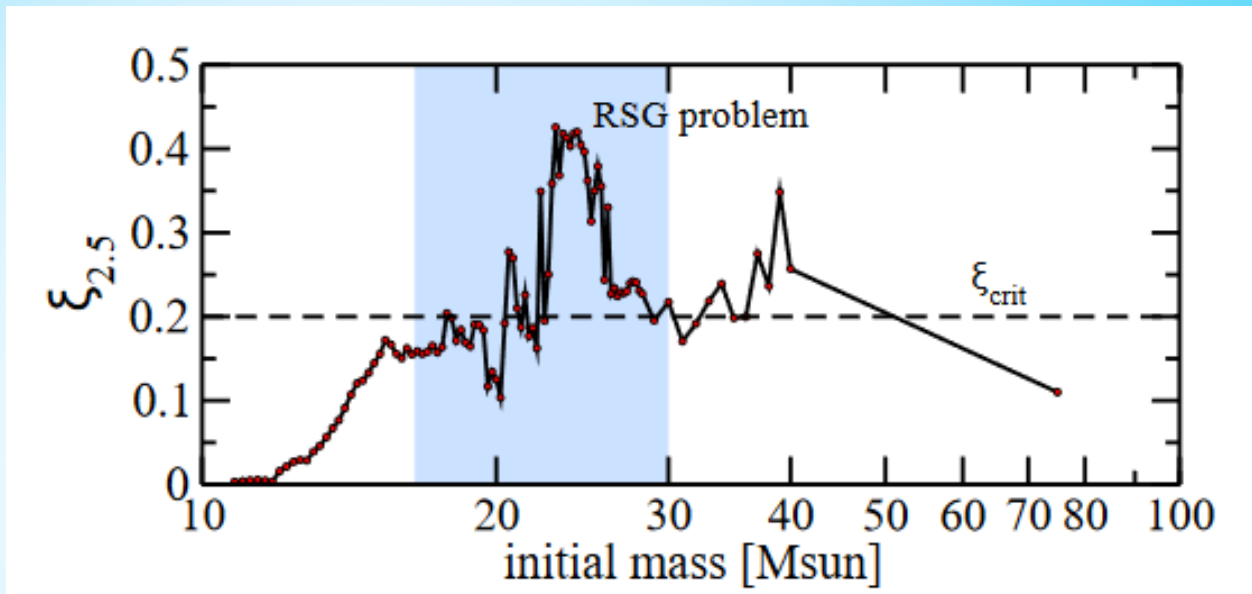


# МОДЕЛИ ПРЕДСВЕРХНОВЫХ



1510.04643

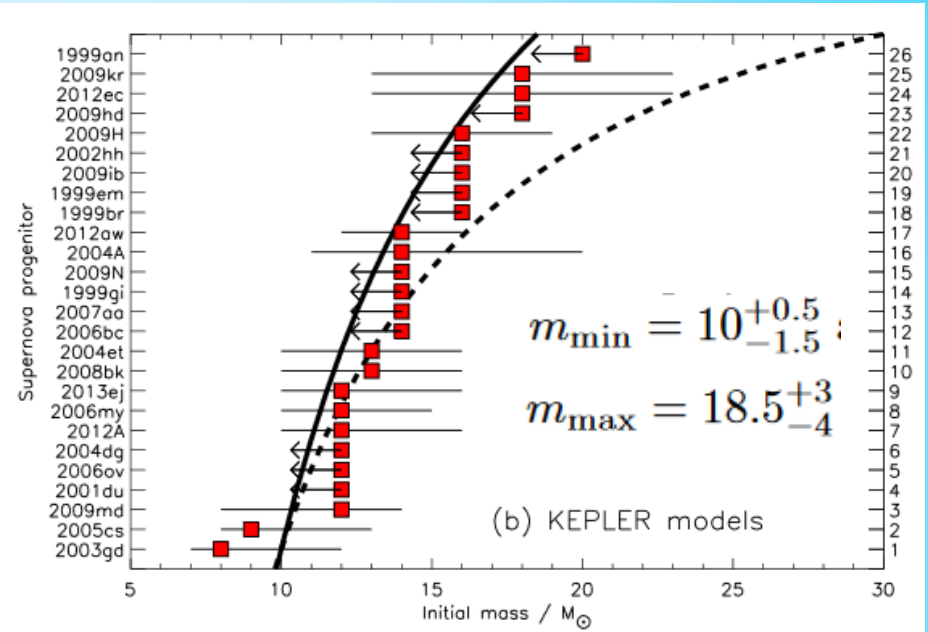
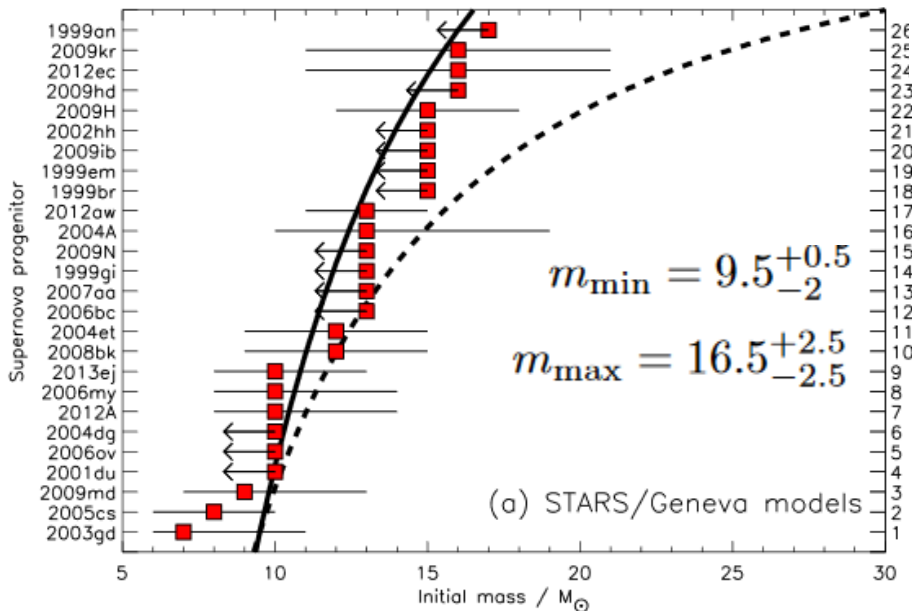
# ПРОБЛЕМА НЕХВАТКИ КРАСНЫХ СВЕРХГИГАНТОВ



# ПРЕДЕЛЬНАЯ МАССА?

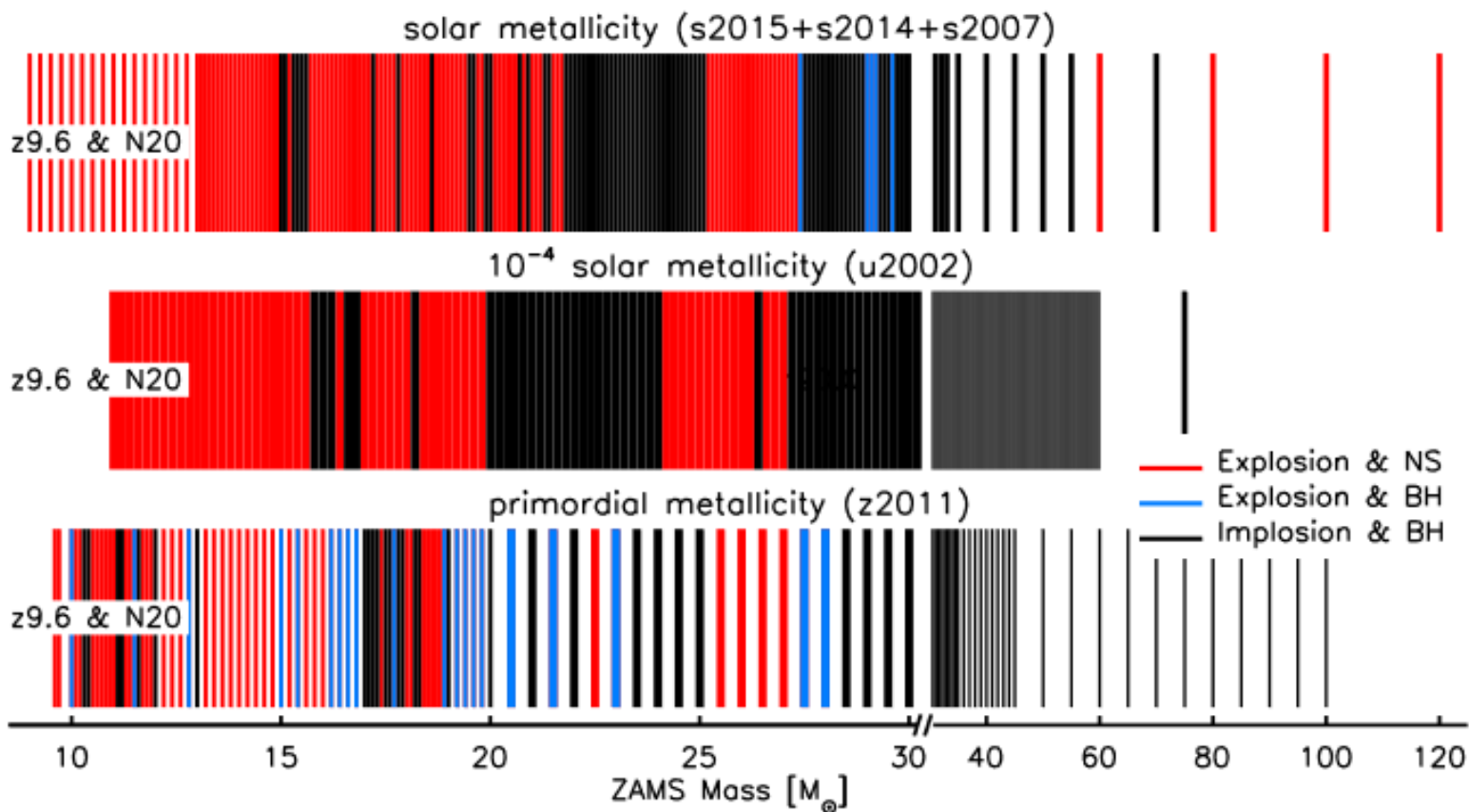
Данные по прародителям позволяют оценить интервал масс, в котором происходят вспышки.

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



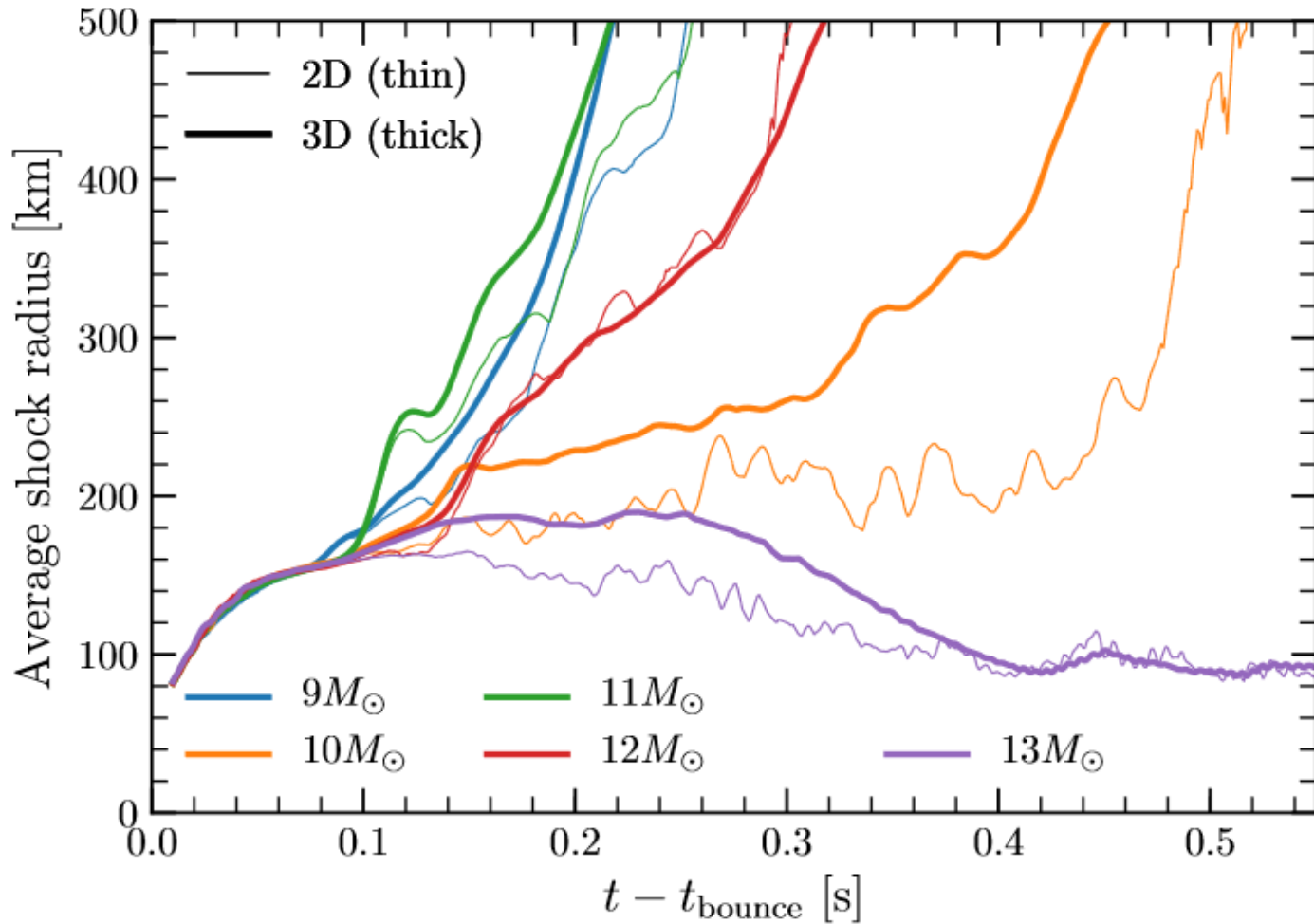
Пунктирная линия – Солпитевская функция.

# 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).

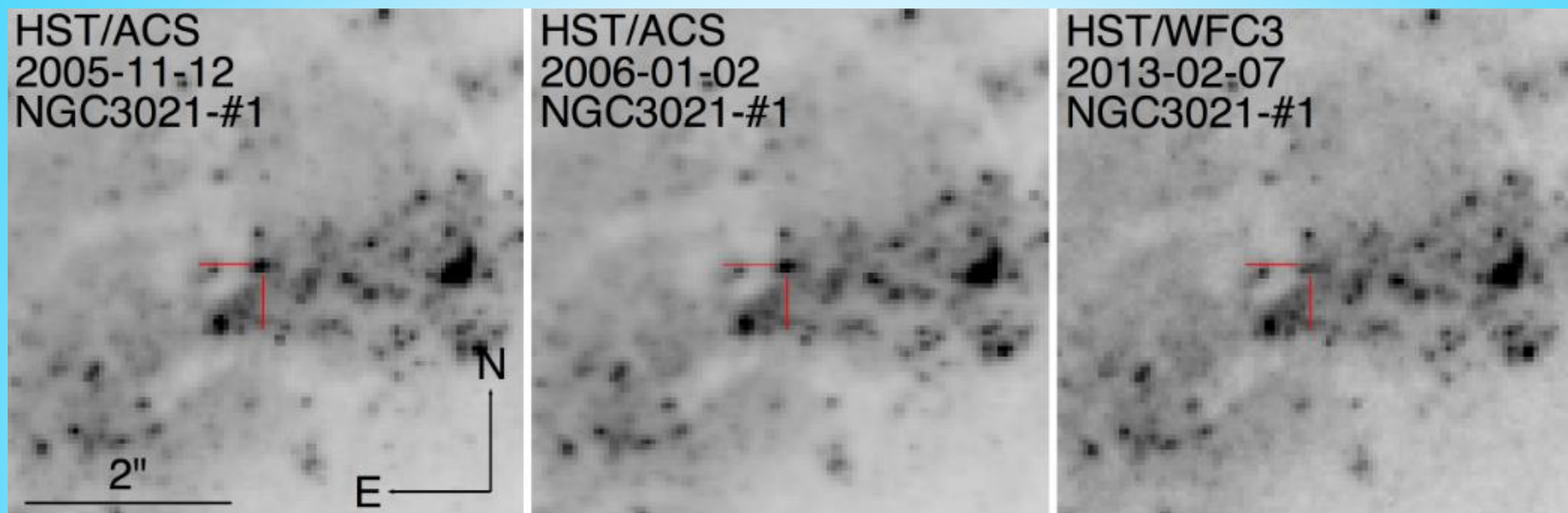
# ПРИМЕР НЕДАВНИХ РАСЧЕТОВ



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

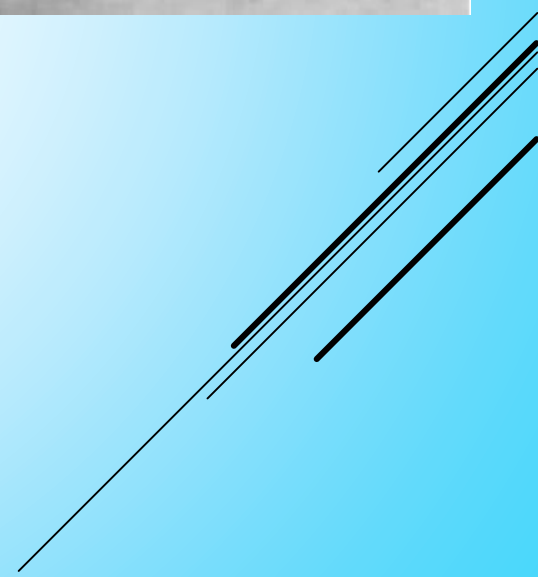
1902.00547

# ИСЧЕЗНОВЕНИЕ ЖЕЛТОГО СВЕРХГИГАНТА

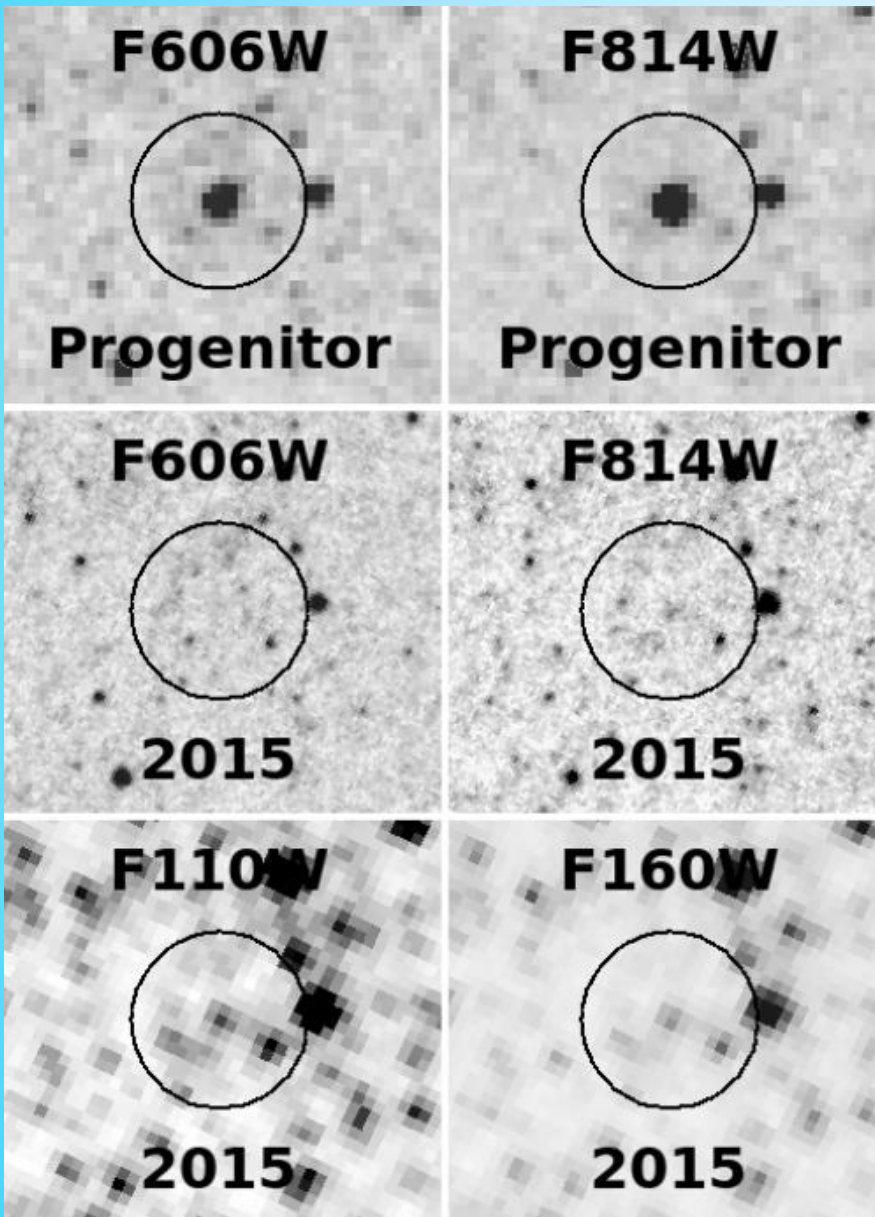


1507.05823

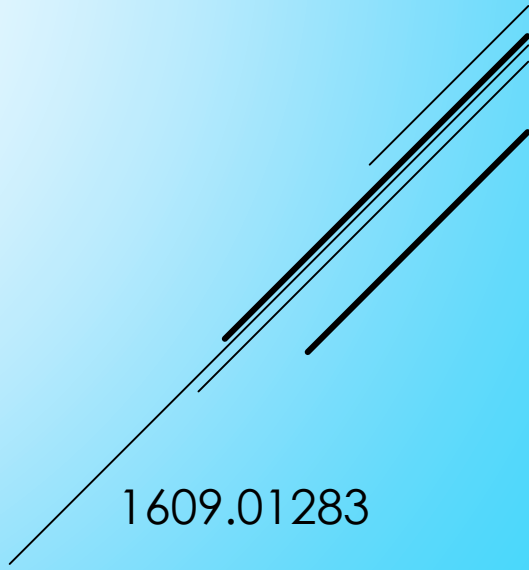
Масса 25-30 масс Солнца

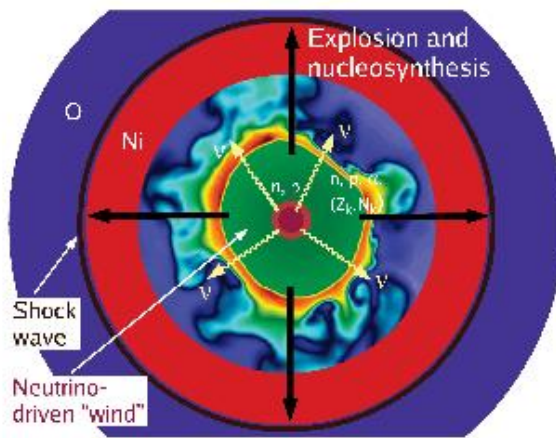
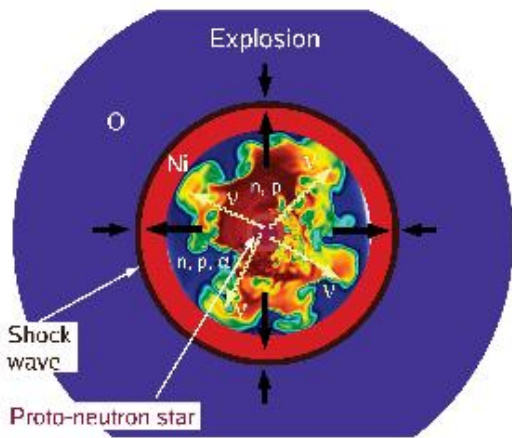
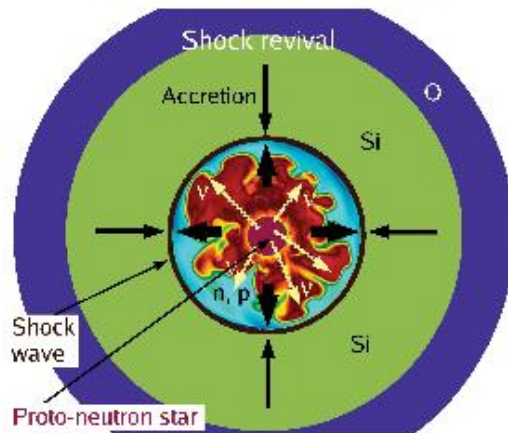
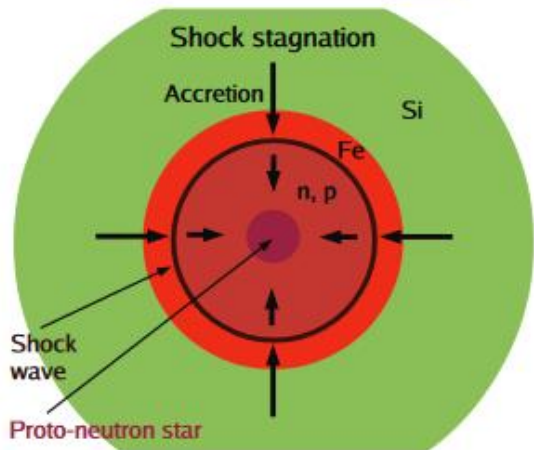
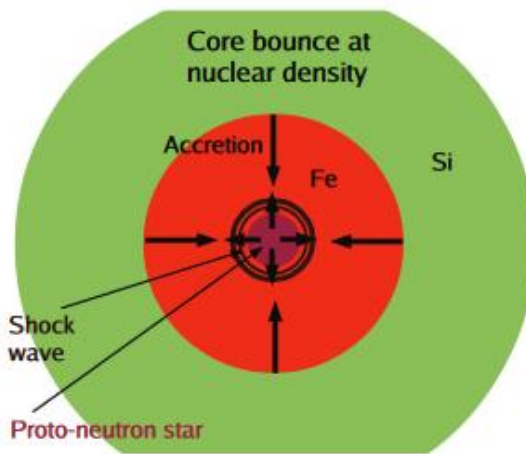
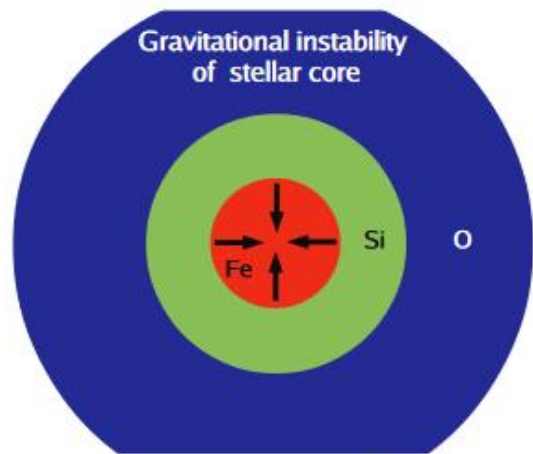


# ИСЧЕЗНОВЕНИЕ КРАСНОГО СВЕРХГИГАНТА



25 масс Солнца.

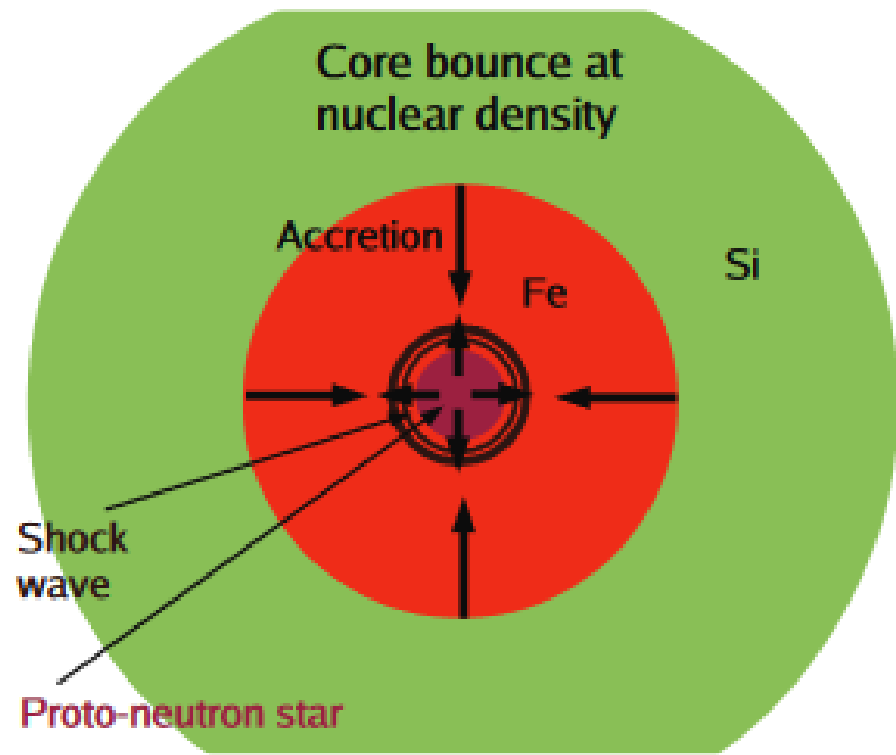
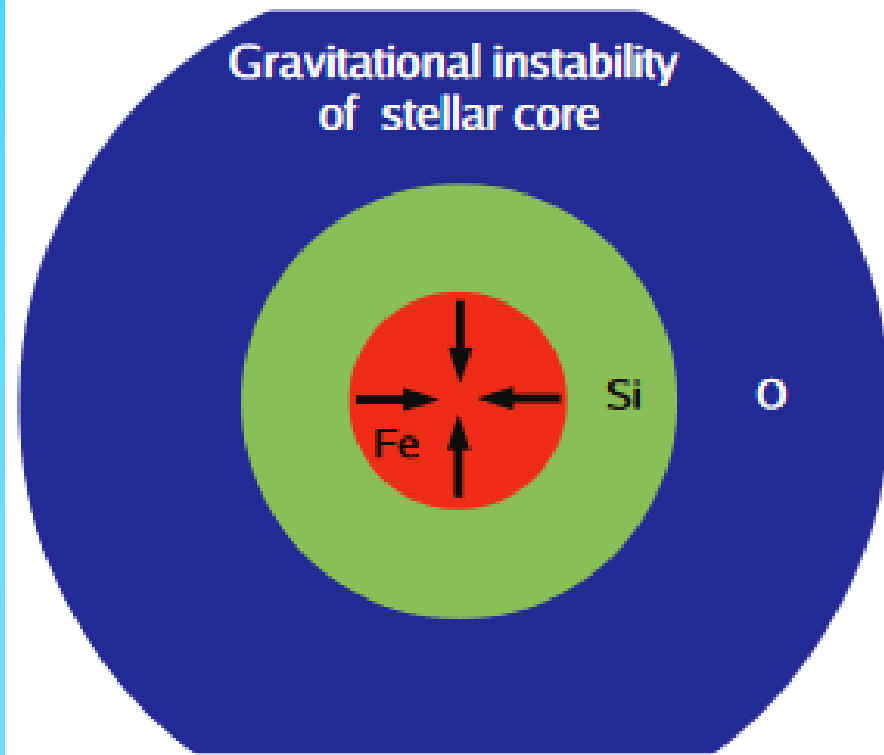




ОСНОВНЫЕ СТАДИИ  
СВЕРХНОВОЙ С КОЛЛАПСОМ.

1211.1378



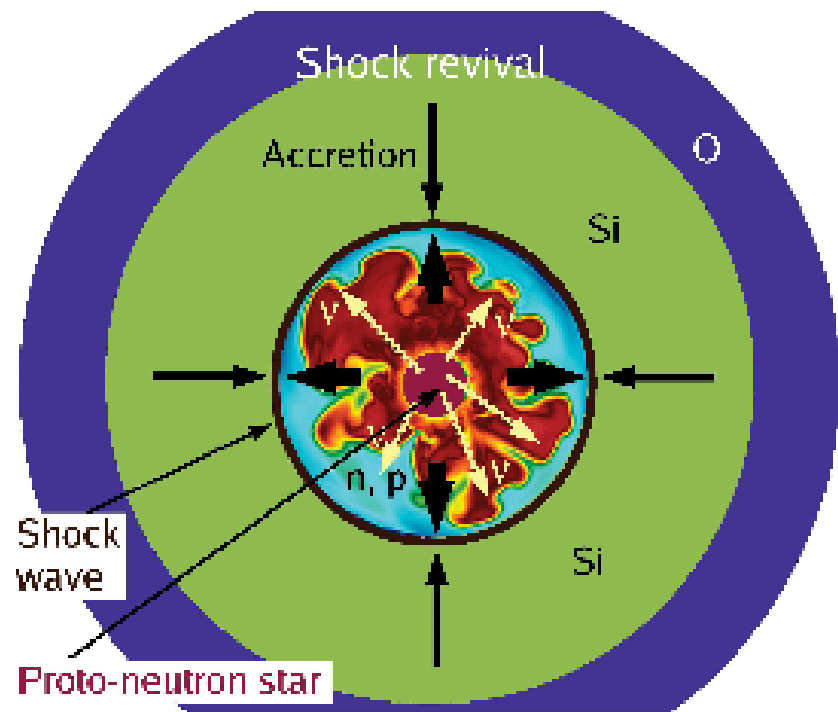
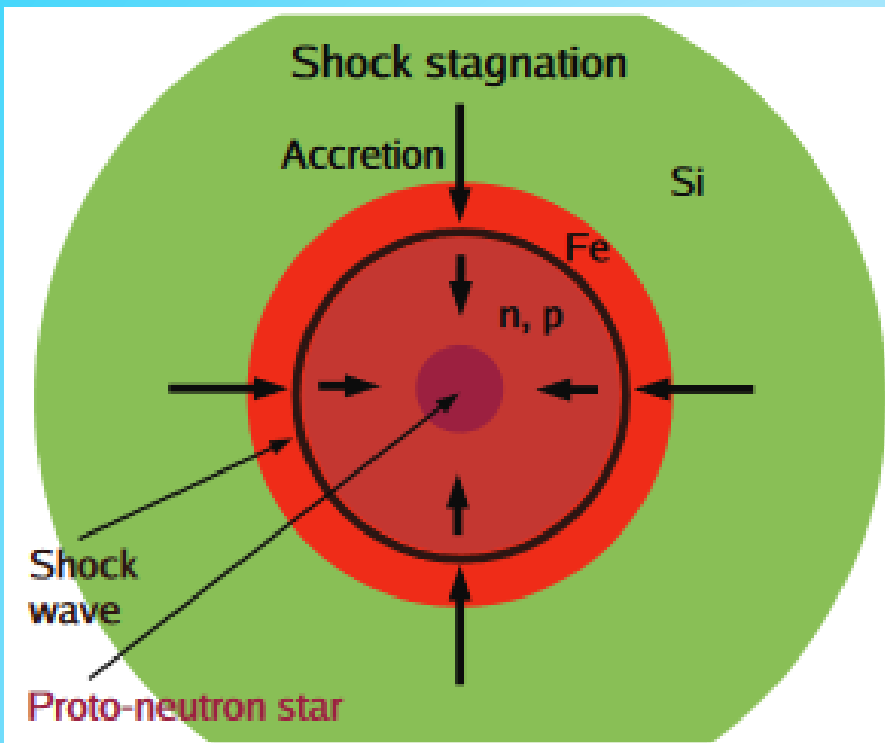


Коллапс начинается после потери устойчивости ядра звезды ( $\gamma < 4/3$ ).

При плотности выше  $\sim 10^{12}$  г/см<sup>3</sup> нейтрино захвачены.

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

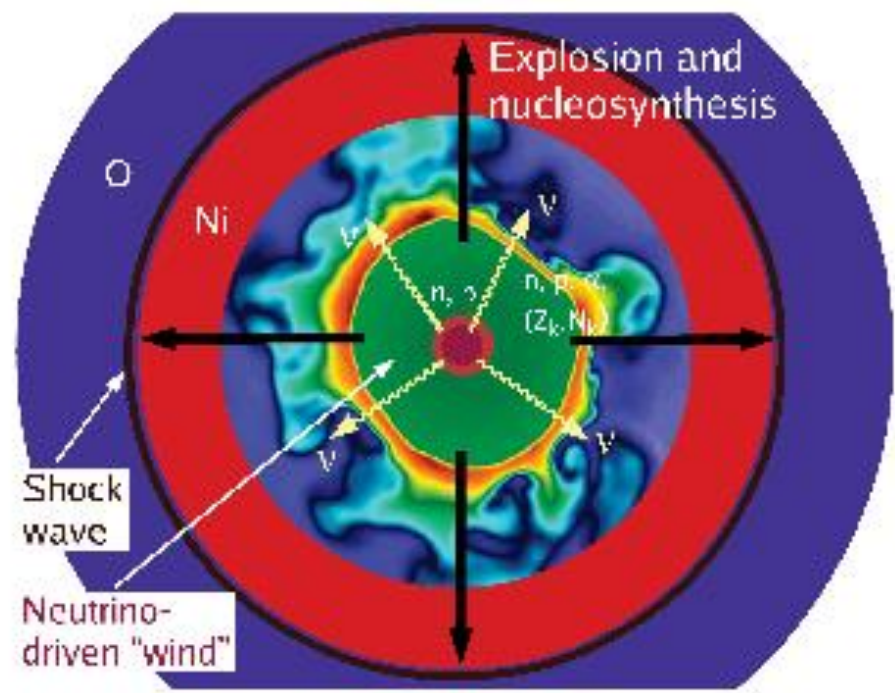
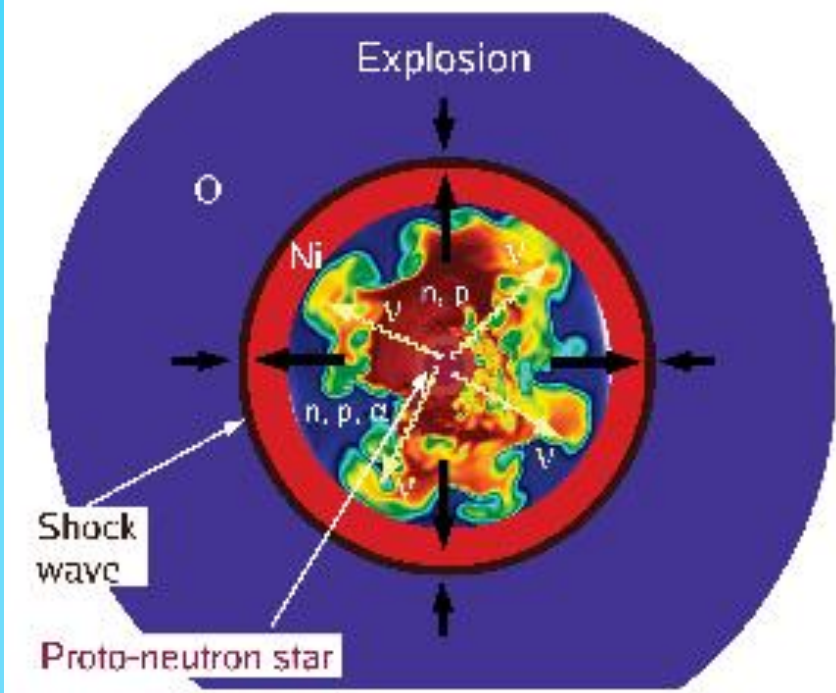
$$t_{\text{ff}} \sim \frac{1}{\sqrt{G\rho}} \sim \frac{0.004}{\sqrt{\rho_{12}}} \text{ s}$$



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.



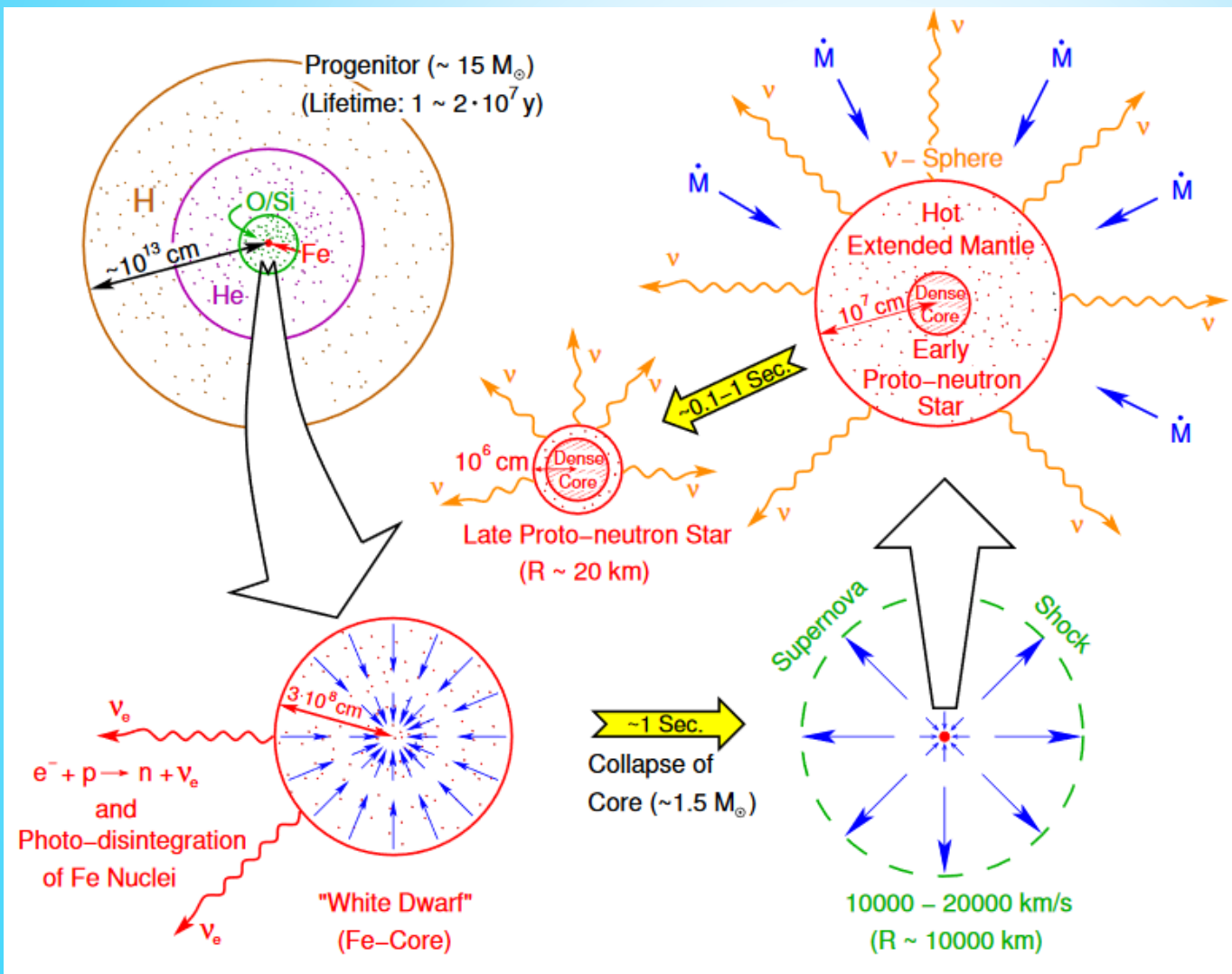
Волна останавливается на расстоянии  $\sim 100-200$  км от центра.

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

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

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

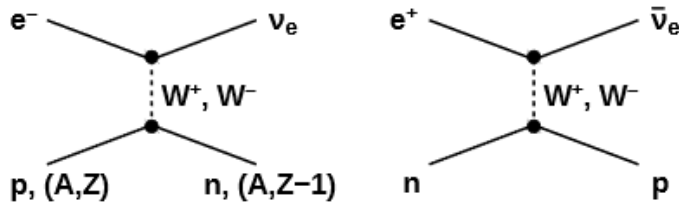
# СТАДИИ СВЕРХНОВОЙ И НЕЙТРИНО



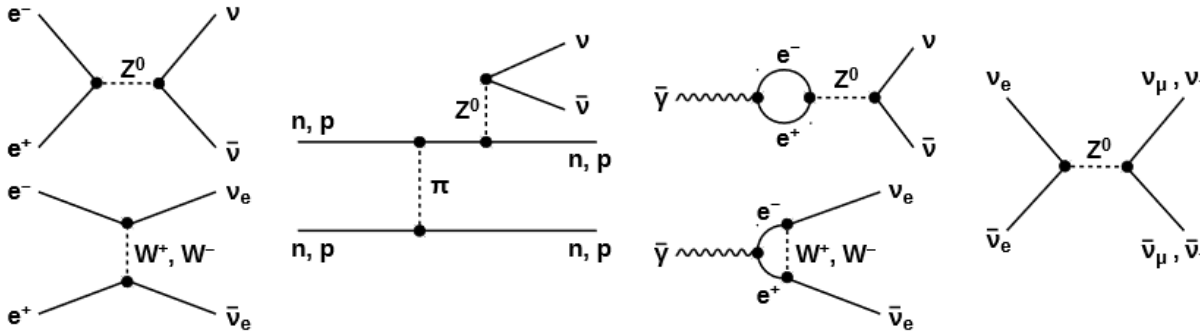
# Neutrino Reactions in Supernovae

## НЕЙТРИННЫЕ ПРОЦЕССЫ

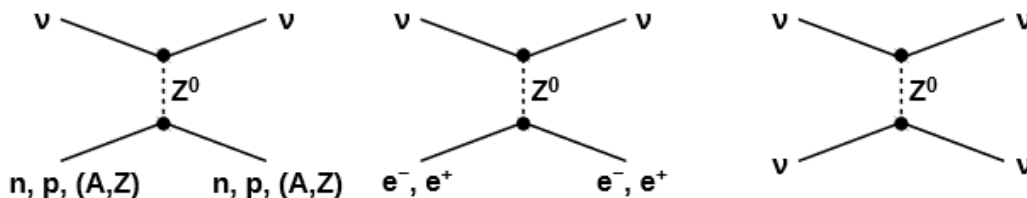
### CC $\beta$ -processes



### 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:

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

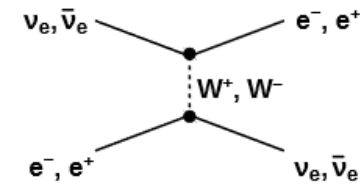
Thermal pair processes:

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

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



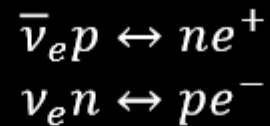
1211.1378

1702.08713

# ЭЛЕКТРОННЫЕ И ... ПРОЧИЕ

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

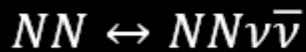
Thermal Equilibrium



Free streaming

Neutrino sphere

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



Scattering Atmosphere



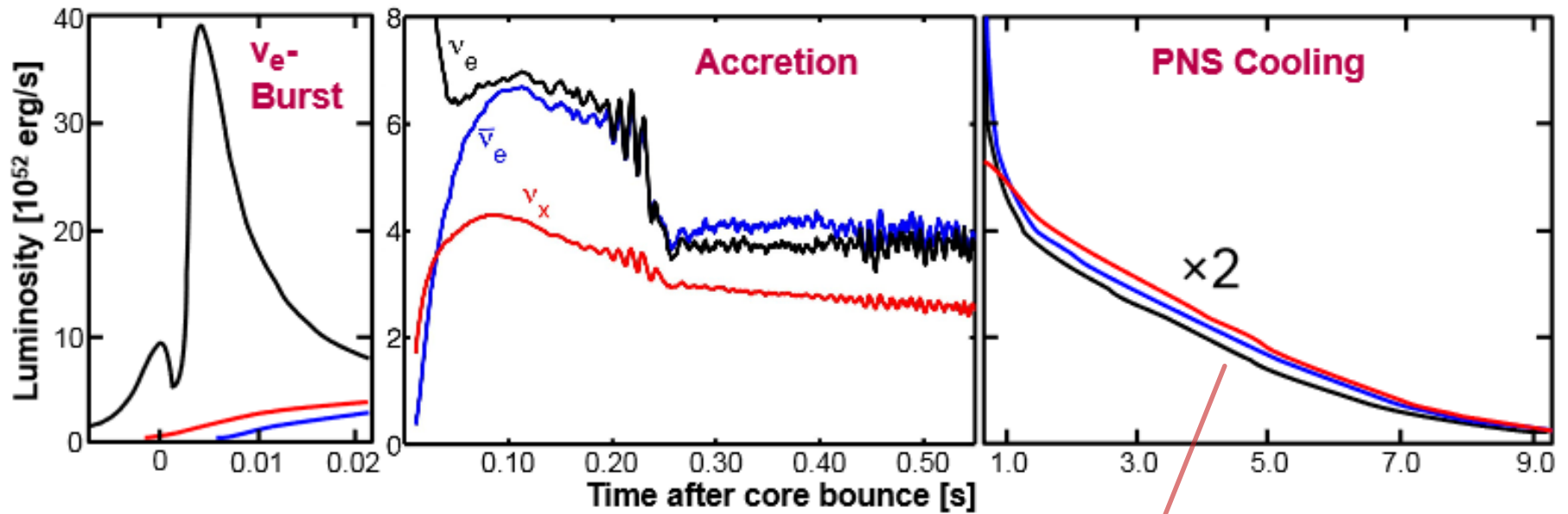
Diffusion

Free streaming

Energy sphere

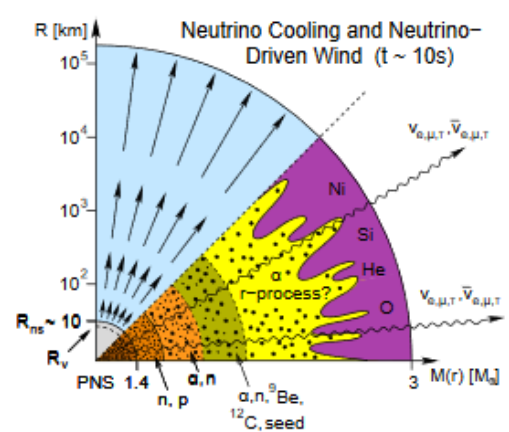
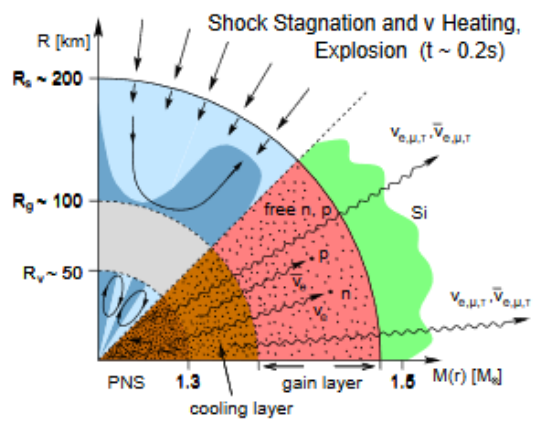
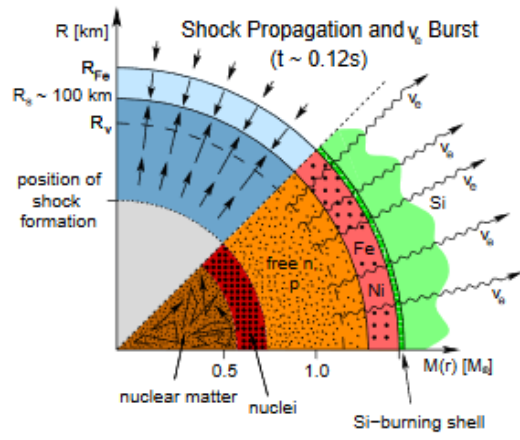
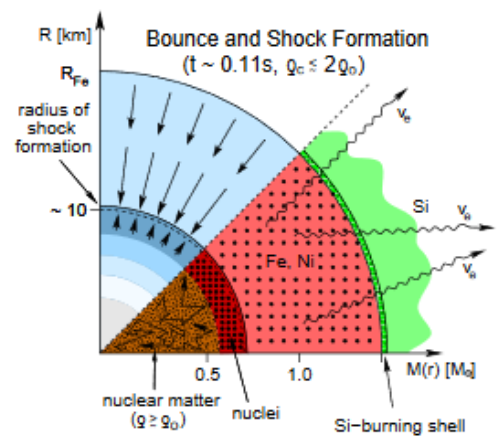
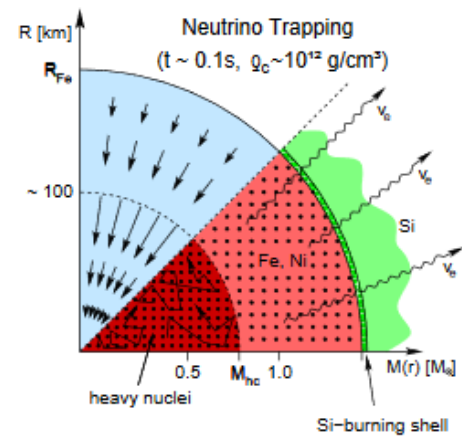
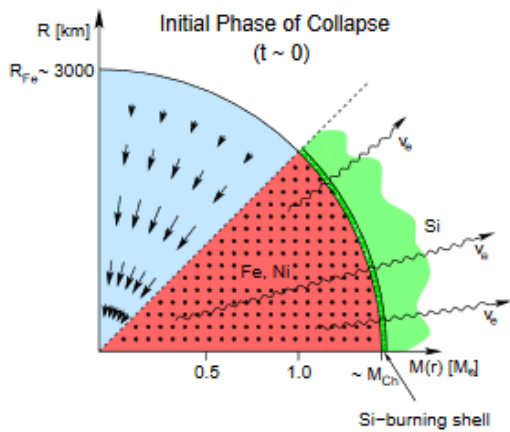
Transport sphere

# 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  $\sim 10$  МэВ.

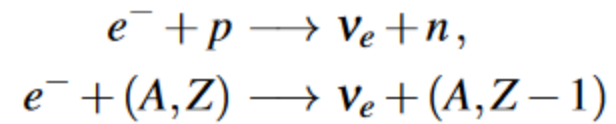
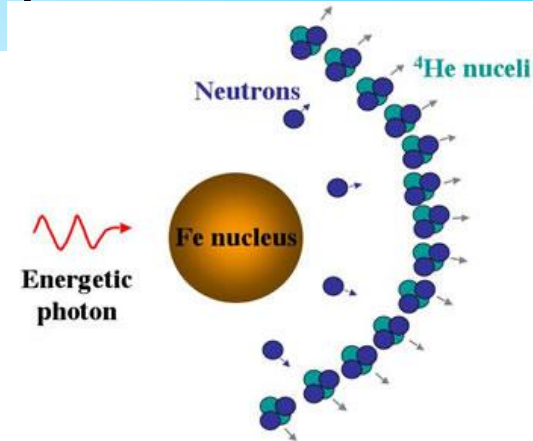
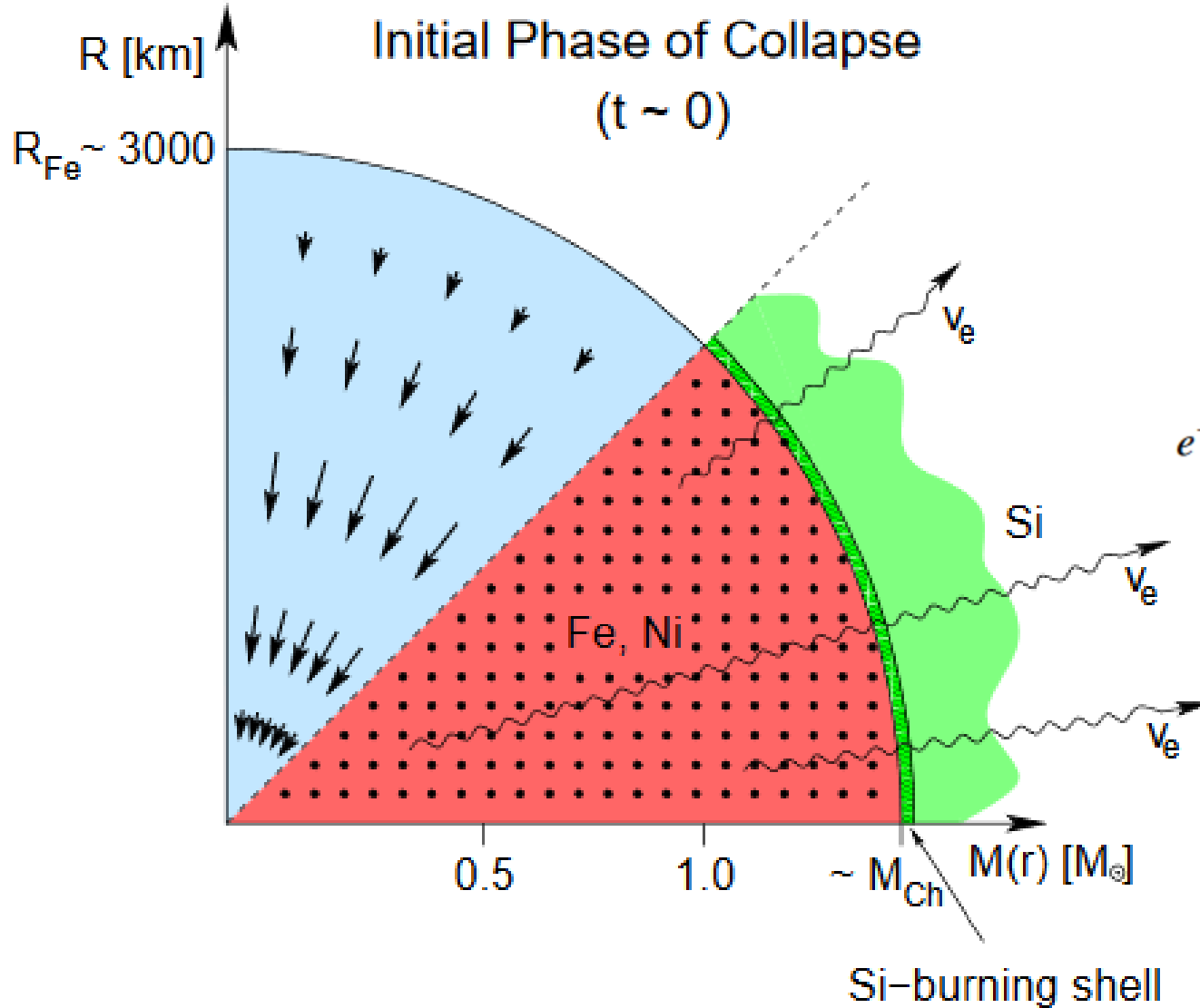


## Основные стадии:

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.

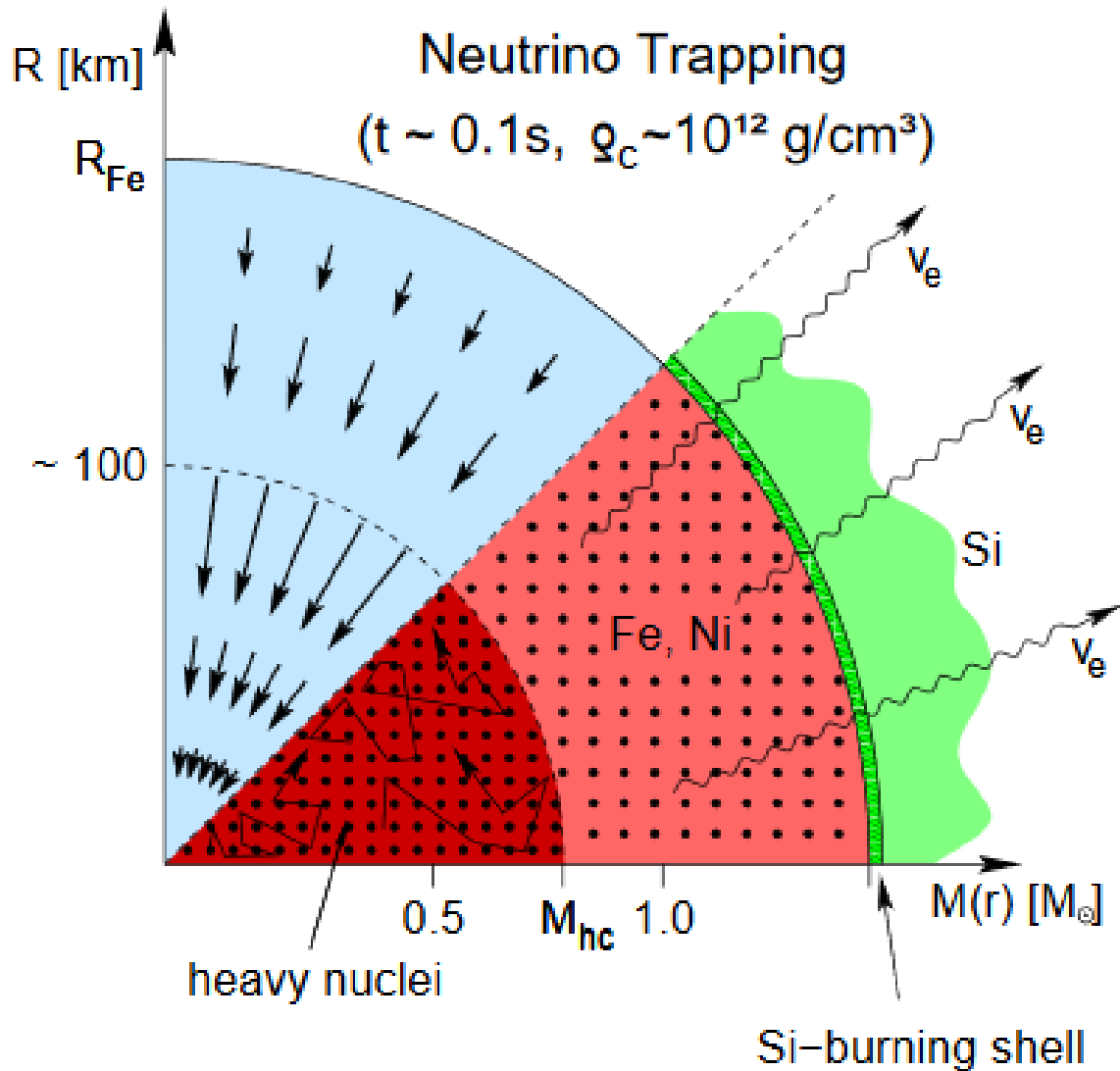


# НАЧАЛЬНАЯ ФАЗА КОЛЛАПСА



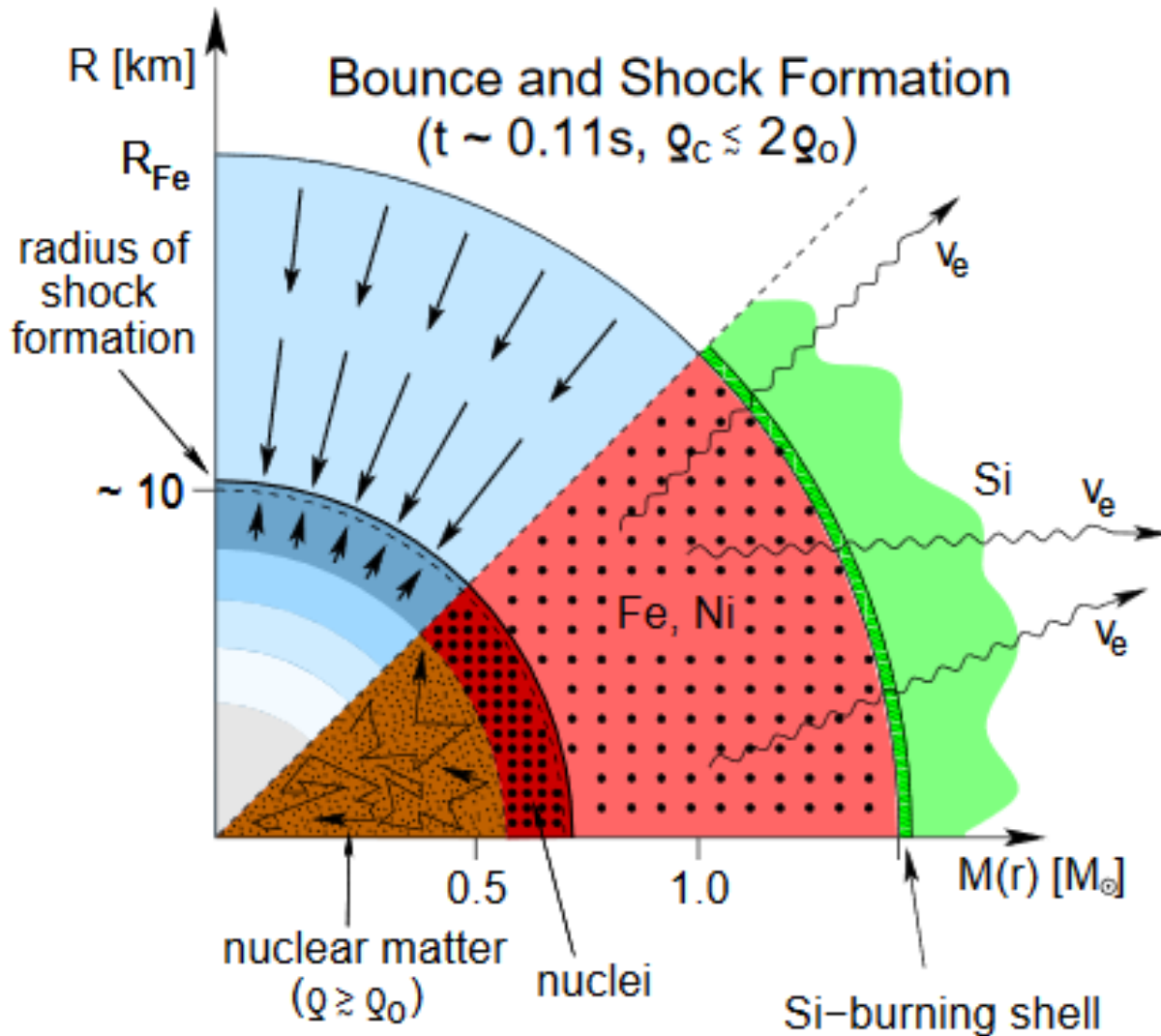
Коллапс  
начинается,  
когда  $\gamma < 4/3$ .

# ЗАХВАТ НЕЙТРИНО



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

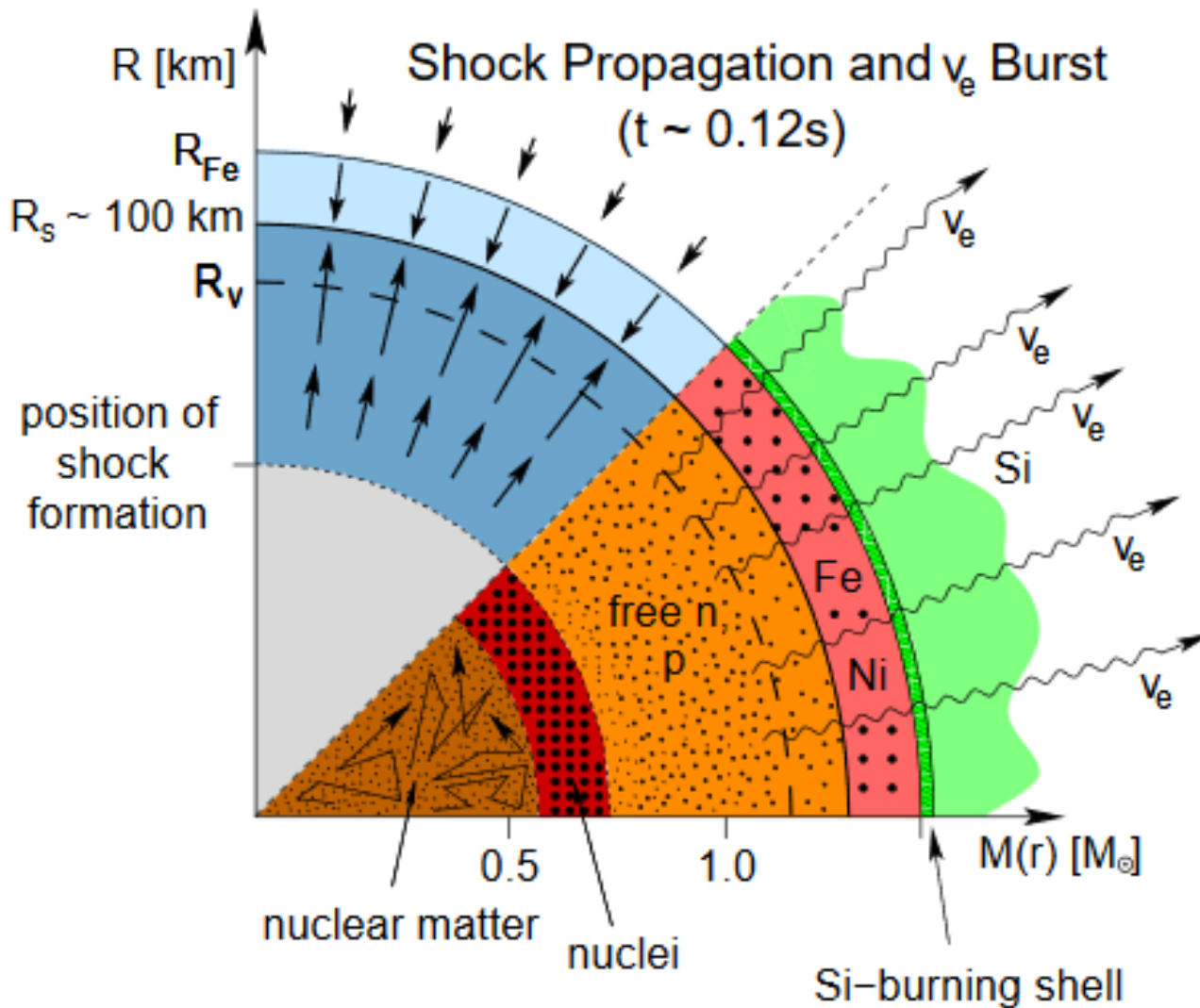
# ОТСКОК И ФОРМИРОВАНИЕ УДАРНОЙ ВОЛНЫ



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

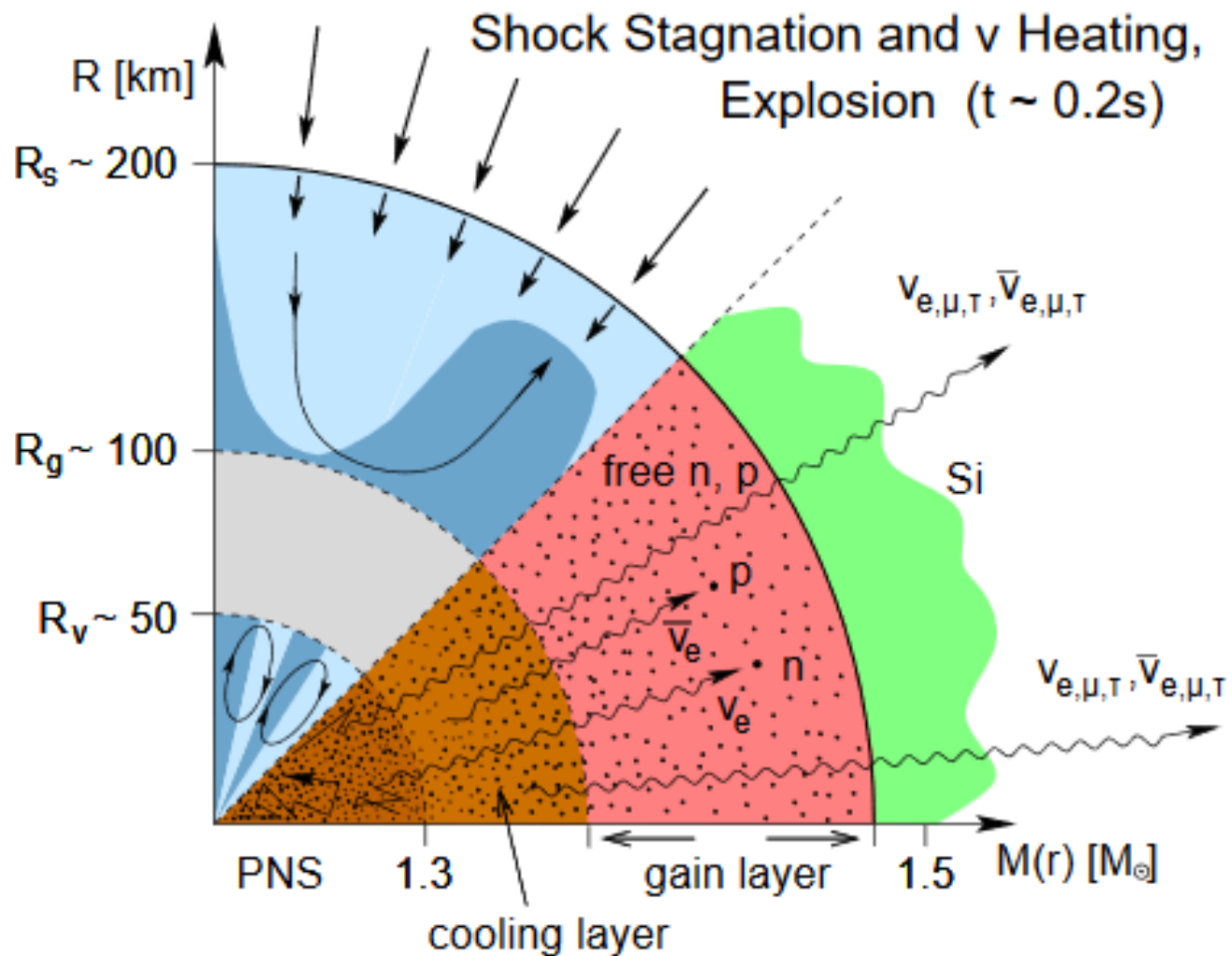
$$t_{\text{ff}} \sim \frac{1}{\sqrt{G\rho}} \sim \frac{0.004}{\sqrt{\rho_{12}}} \text{ s}$$

# ДВИЖЕНИЕ УДАРНОЙ ВОЛНЫ И НЕЙТРИННЫЙ ВСПЛЕСК



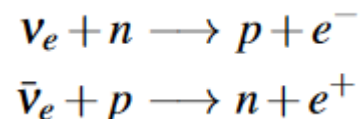
Когда ударная волна достигает области с низкой плотностью происходит нейтринный всплеск, т.к. ранее нейтрино были захвачены.

# ЗАМЕДЛЕНИЕ УДАРНОЙ ВОЛНЫ И НЕЙТРИННЫЙ НАГРЕВ

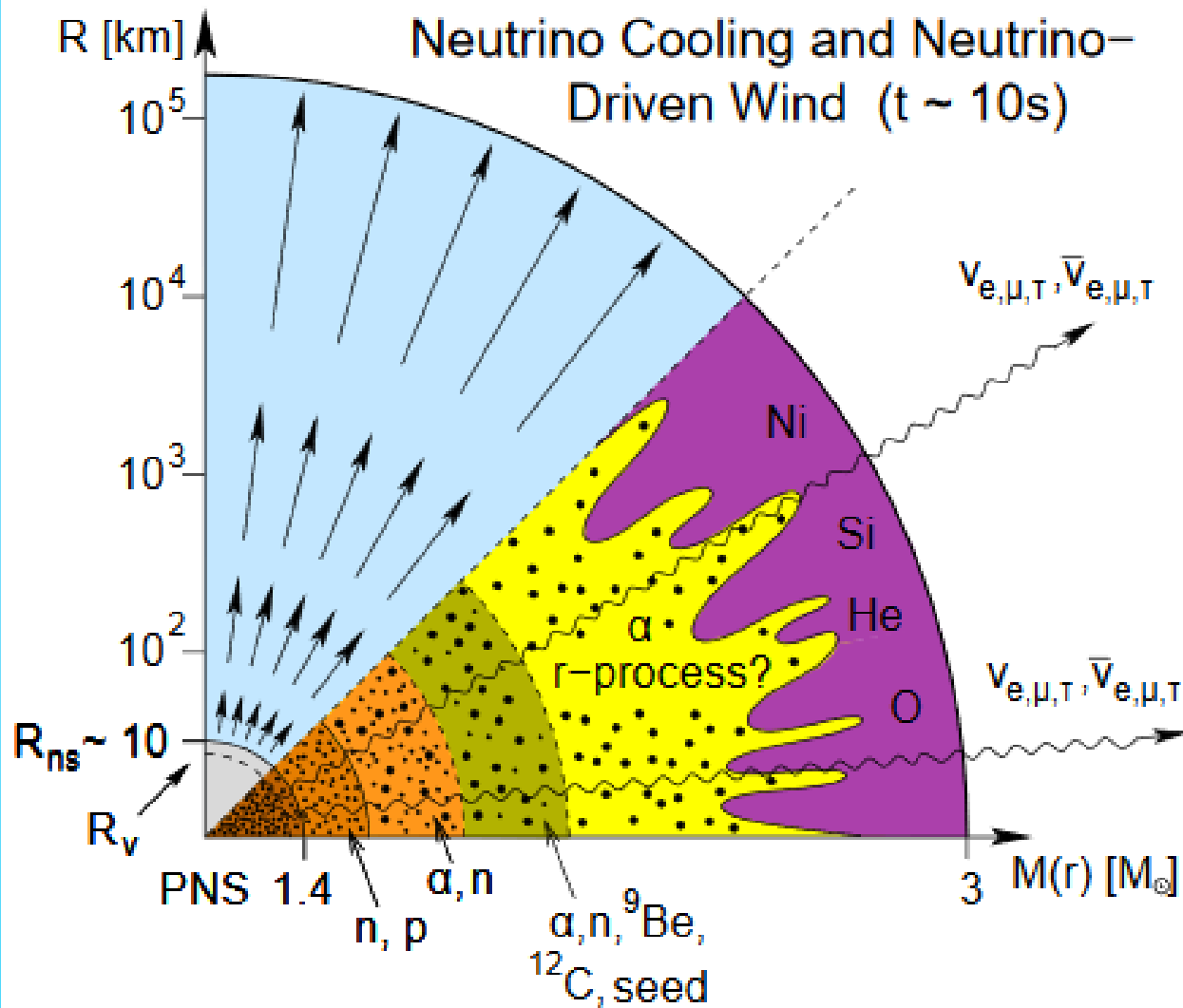


Из-за диссоциации ядер железа ударная волна замедляется. 8.8 МэВ на нуклон, т.е.  $1.7 \cdot 10^{51}$  эрг для 0.1 массы Солнца.

Нейтрино могут передать свою энергию волне.



# НЕЙТРИННОЕ ОХЛАЖДЕНИЕ И НЕЙТРИННЫЙ ВЕТЕР



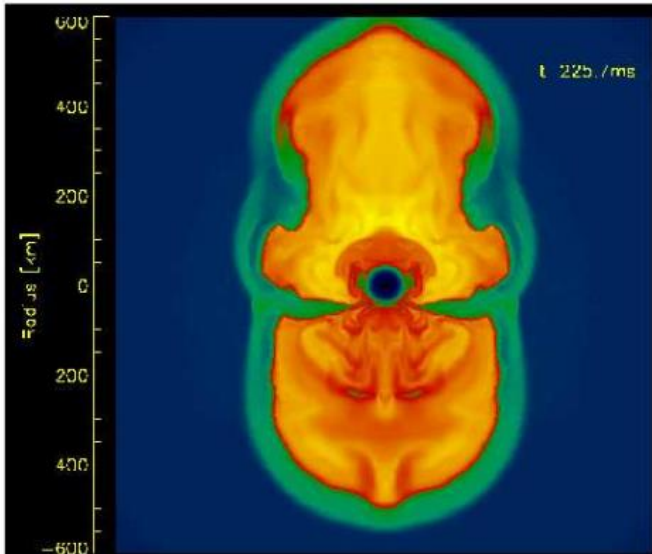
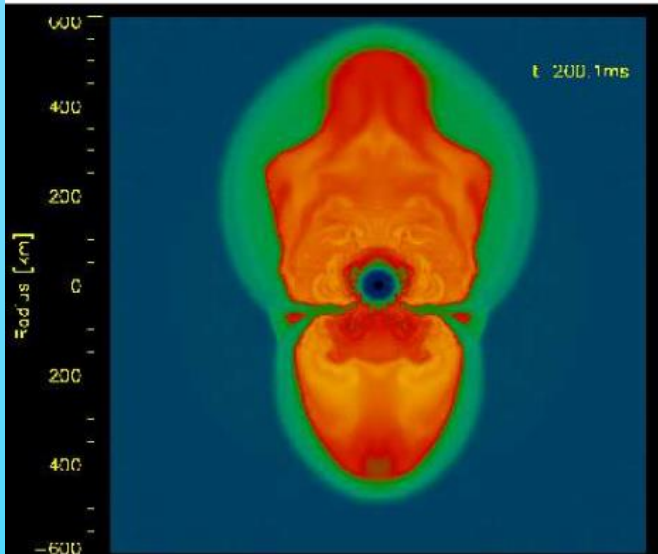
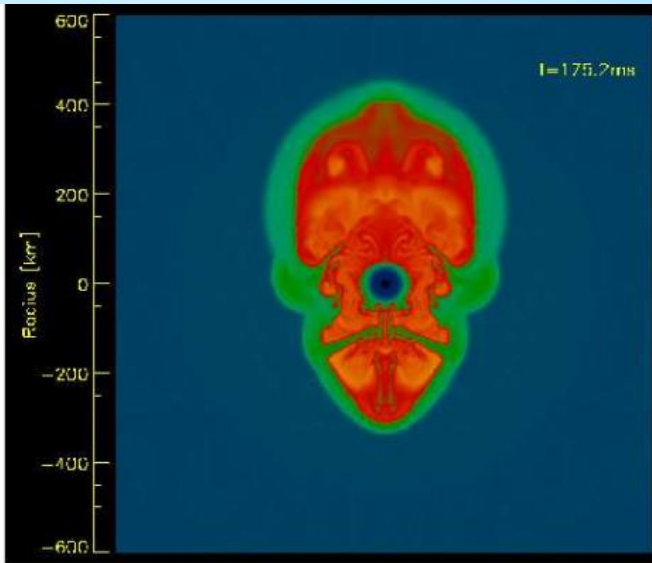
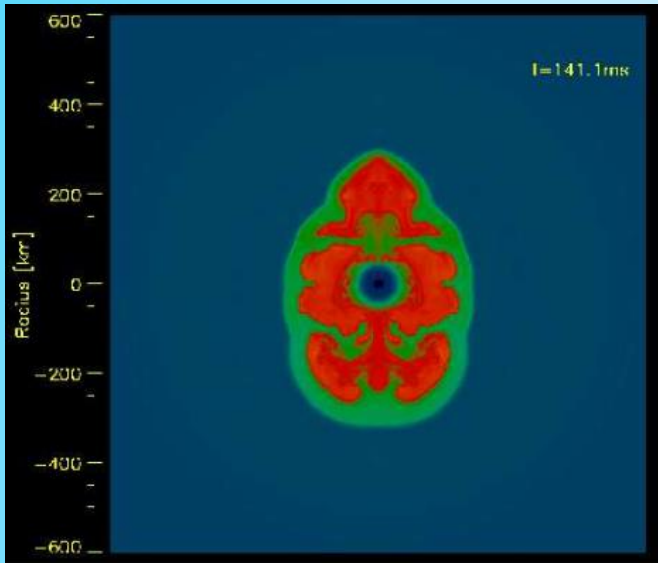
$$t_E \sim \frac{3R_{\text{ns}}^2}{\pi^2 c \lambda_0} \frac{E_{\text{th}}^0}{2E_{\nu}^0} \sim 10 \text{ s},$$

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

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

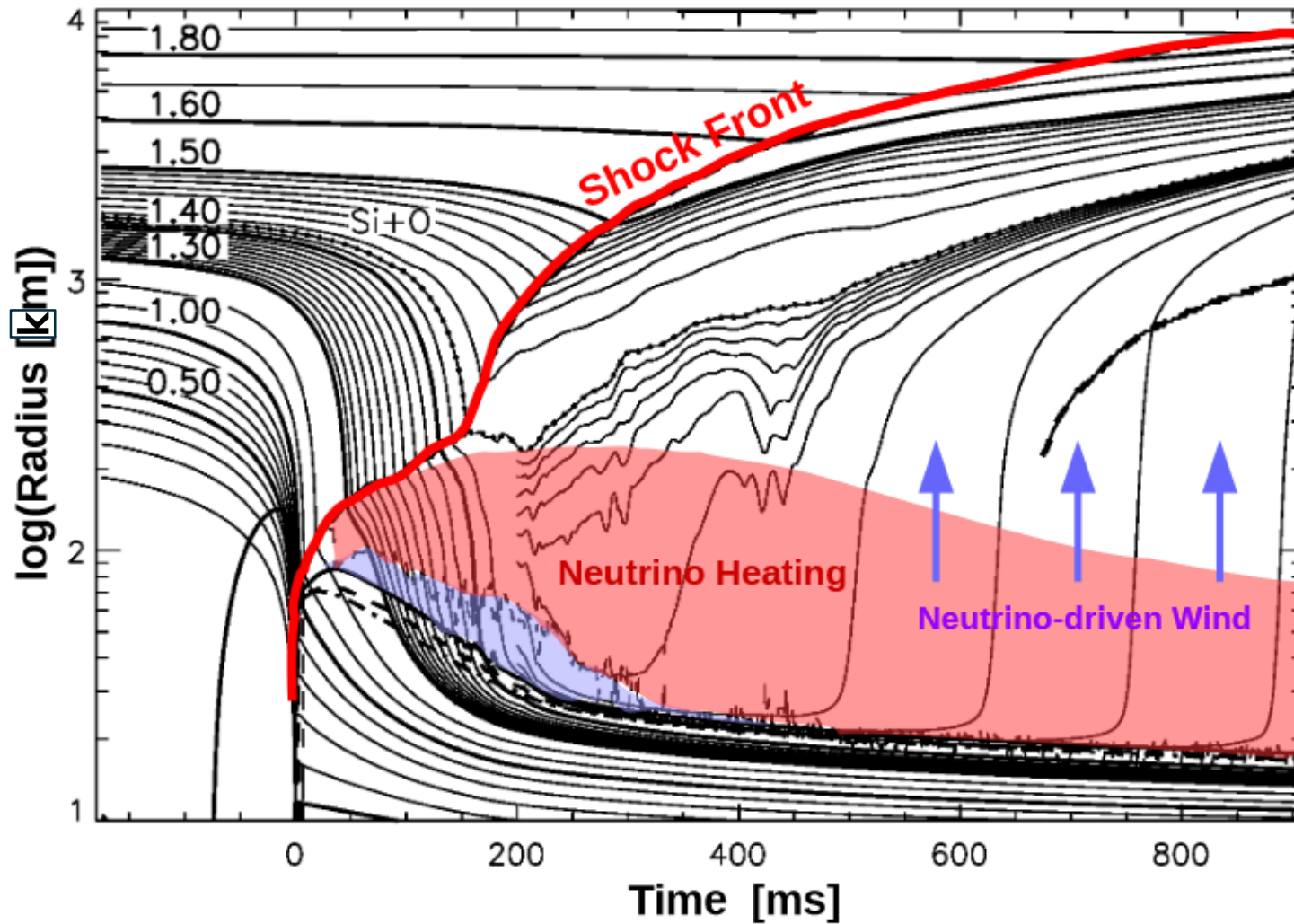
$$\left( \frac{M_{\text{ns}}}{1.5 M_{\odot}} \right)^{-1} \left( \frac{R_{\text{ns}}}{10 \text{ km}} \right)^3$$

# ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ НЕУСТОЙЧИВОСТИ. SASI



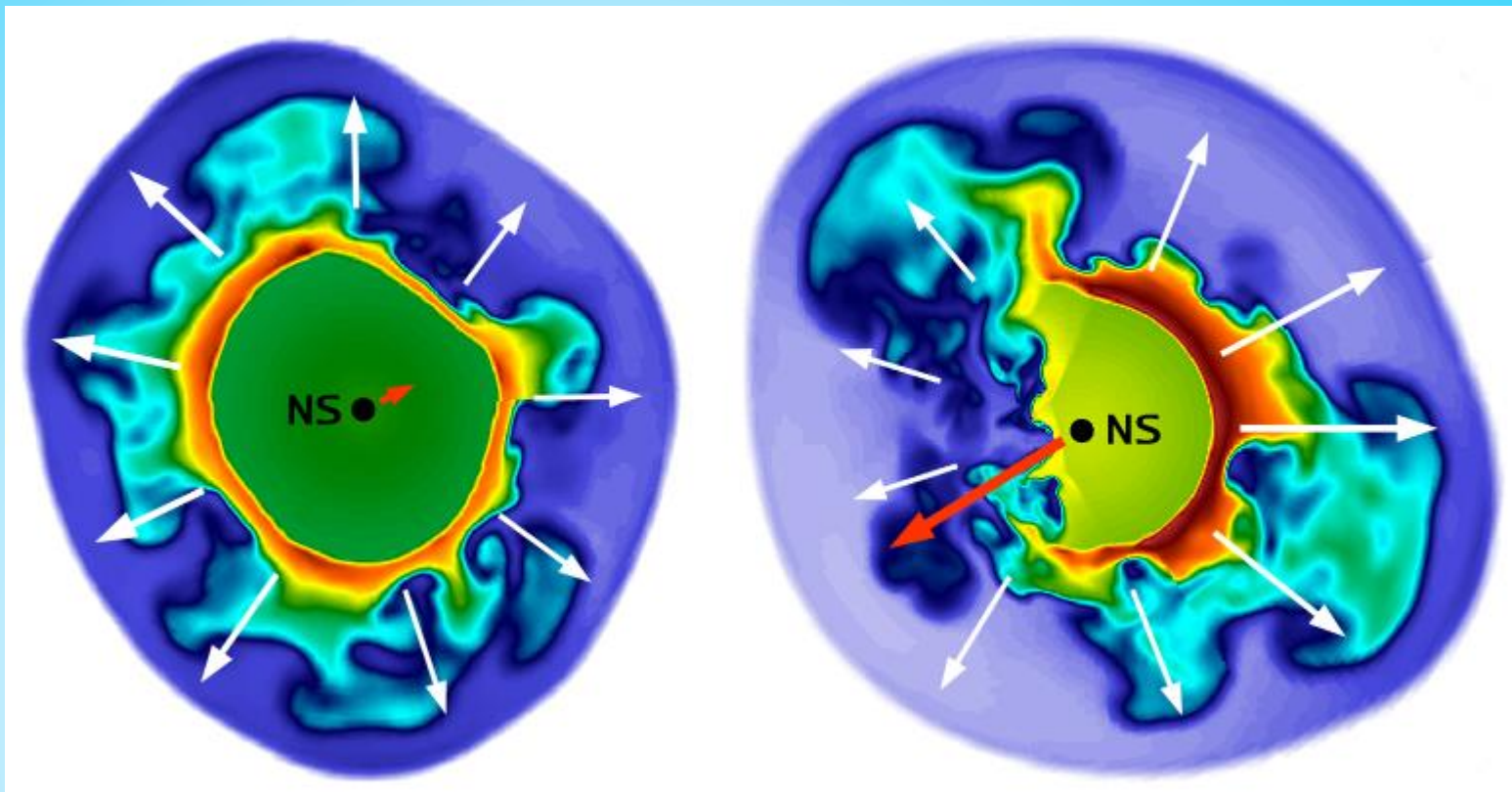
Standing  
Accretion  
Shock  
Instability

# ВЗРЫВ ЗВЕЗДЫ 15 МАСС СОЛНЦА





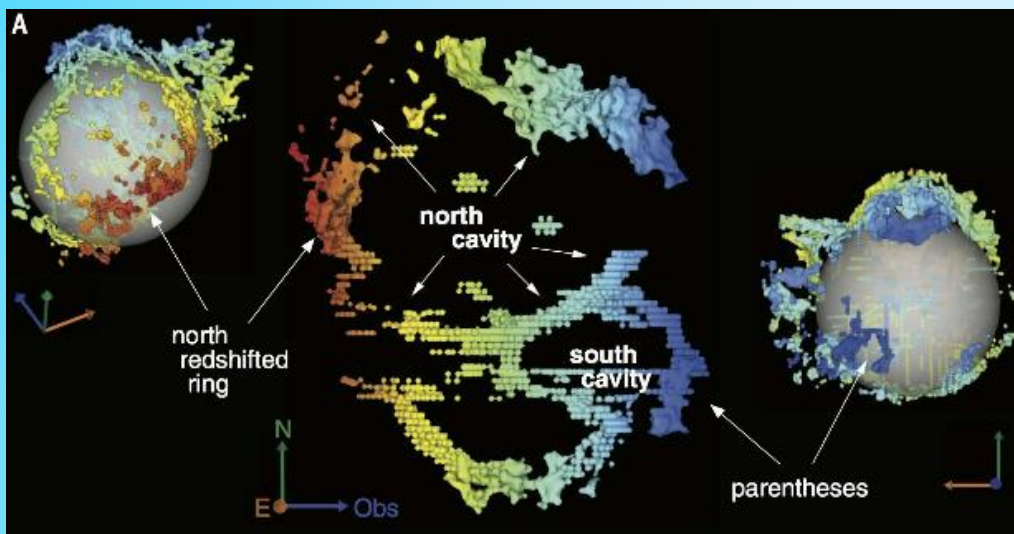
KIK



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

1702.08825

# ПОМОГУТ ОСТАТКИ СВЕРХНОВЫХ?



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

