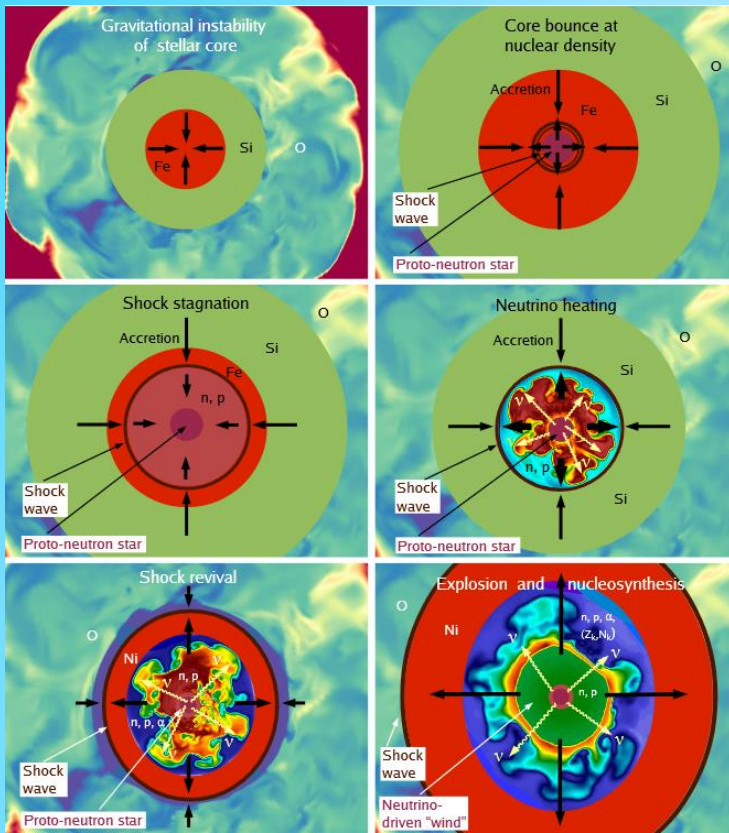




# СВЕРХНОВЫЕ



(magneto-)hydrodynamics of stellar plasma

relativistic gravity

(nuclear) EoS

neutrino physics

progenitor conditions

SN explosion models

neutrinos

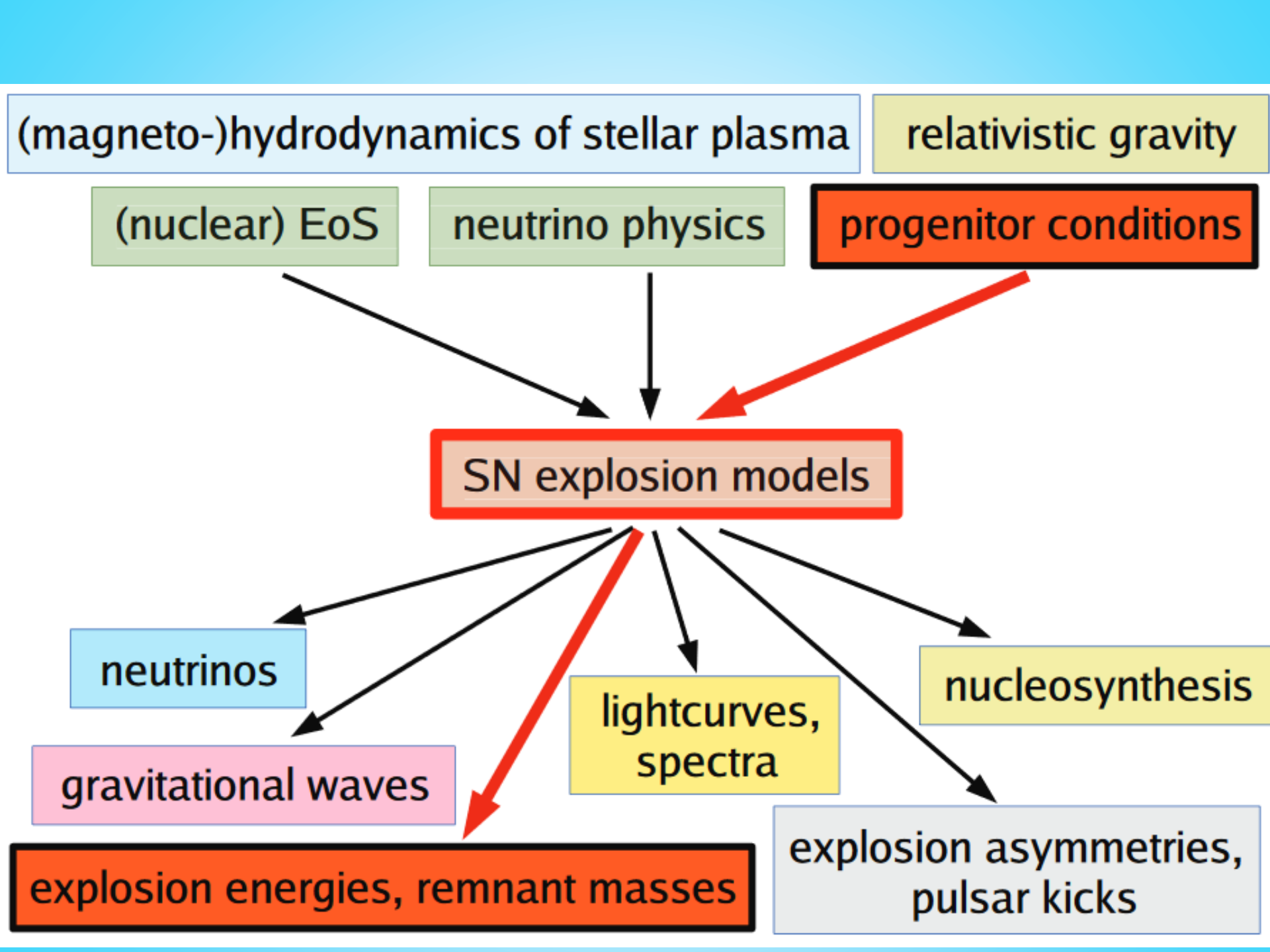
gravitational waves

explosion energies, remnant masses

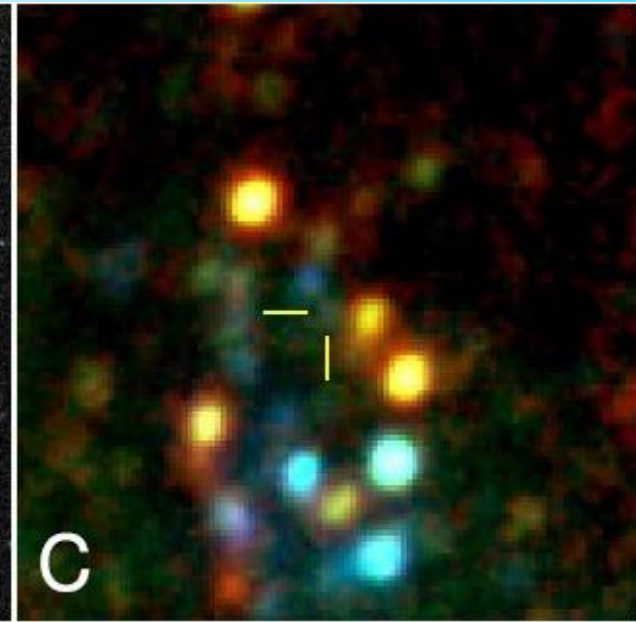
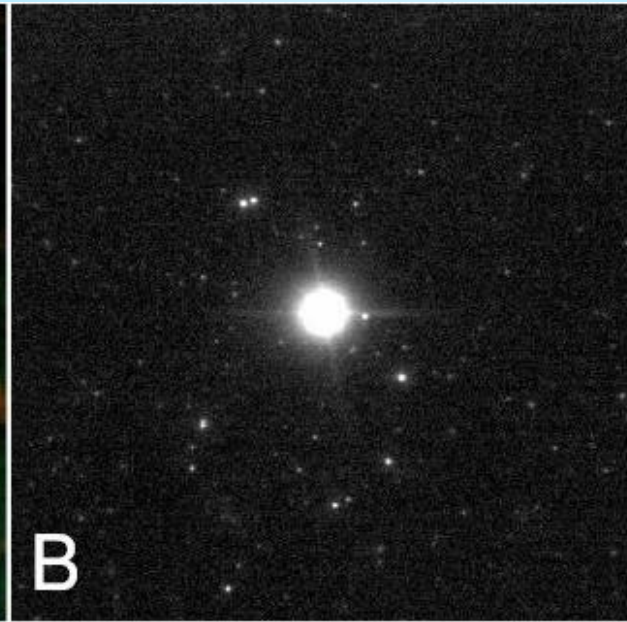
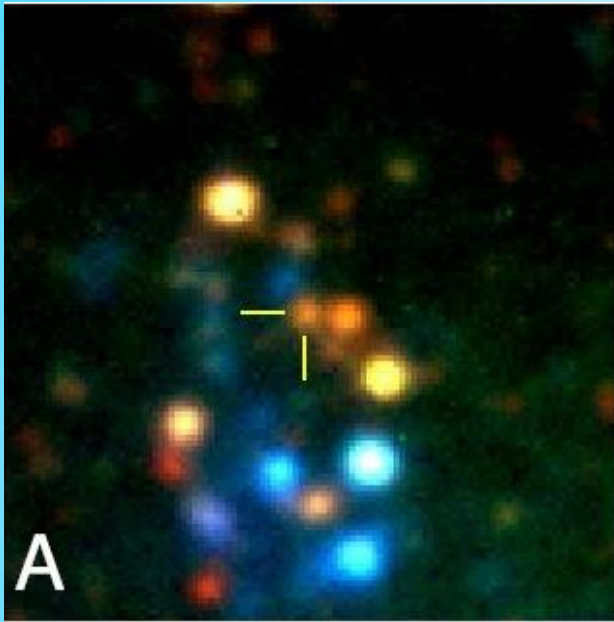
lightcurves,  
spectra

nucleosynthesis

explosion asymmetries,  
pulsar kicks



# СВЕРХНОВЫЕ

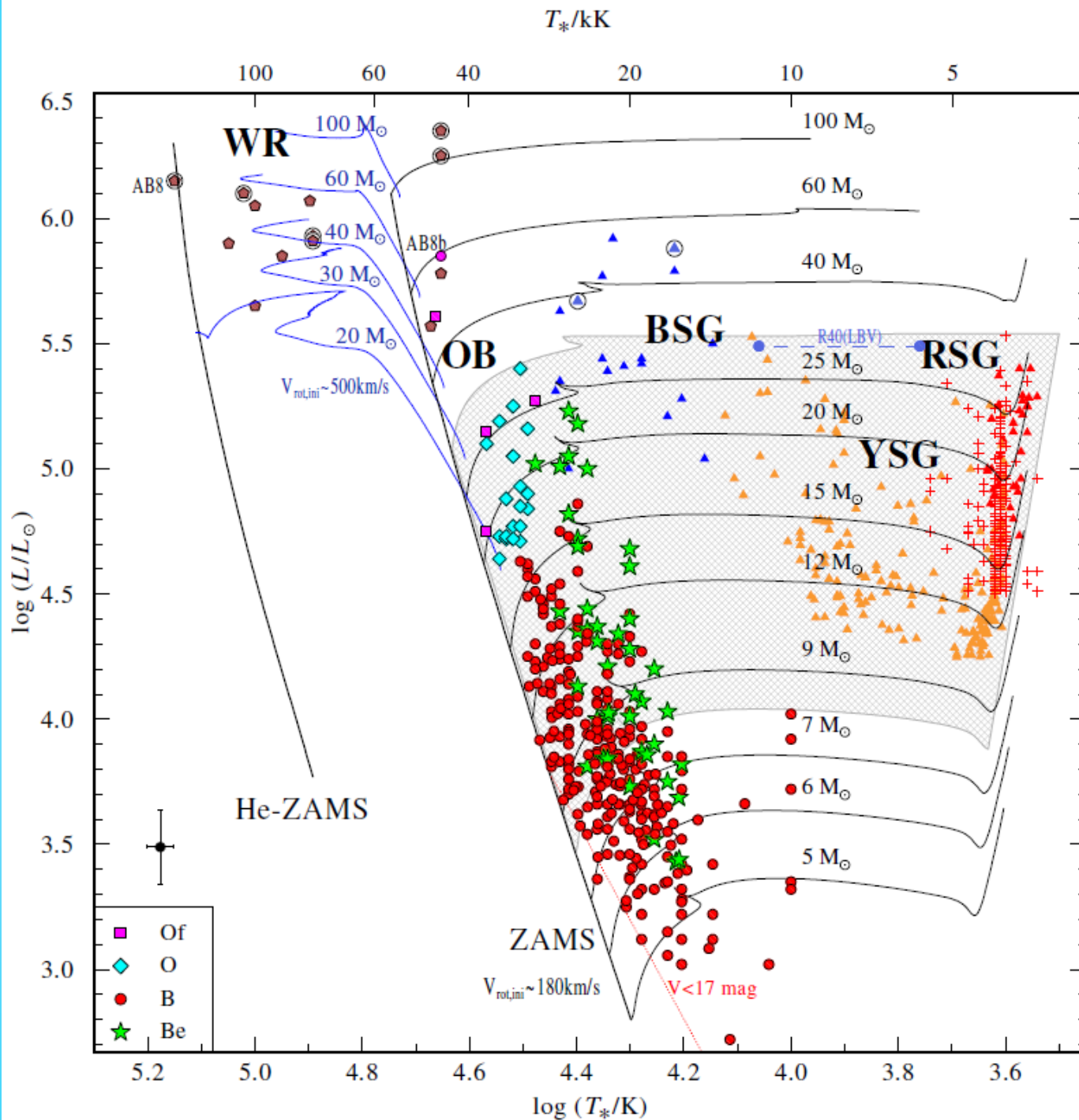


Жизнь массивной звезды заканчивается колоссальным взрывом – сверхновой. Также взрываться могут белые карлики, если они стали слишком тяжелыми.

На короткое время звезда становится ярче целой галактики!

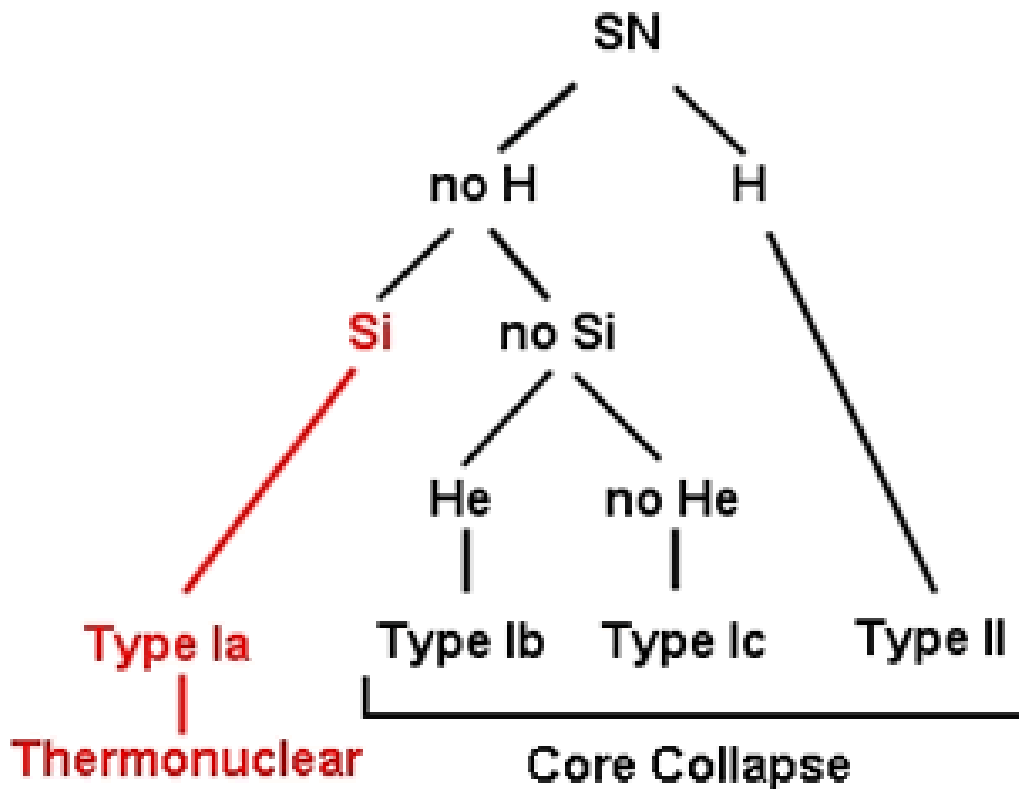
См. свежие публикации и обзоры в [http://xray.sai.msu.ru/~polar/sci\\_rev/sn.html](http://xray.sai.msu.ru/~polar/sci_rev/sn.html)





Ramachandran et al. (2019)

# 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

Коллапс  
ядра

**I**

Водорода нет

**II**

Водород есть

**Ia**

Есть  
кремний

**Ib**

Есть  
гелий

**Ic**

Нет  
гелия

**IIb**

Слабые линии  
водорода,  
исчезающие со  
временем

**IIн**

Эмиссион-  
ные линии  
водорода

По спектру

**IIР**

Плато  
(медленное  
падение  
блеска)

**IIЛ**

Линейная  
(быстрое  
падение  
блеска)

По кривой  
блеска

Термоядерный  
взрыв

# 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.

Сверхновая с неустойчивостью  
рождения пар (**PISN**).  
Термоядерный взрыв  
массивного кислородного ядра.  
Энергия взрыва  $\sim 10^{52}$  эрг.  
Формирование большого  
количества никеля.

**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.

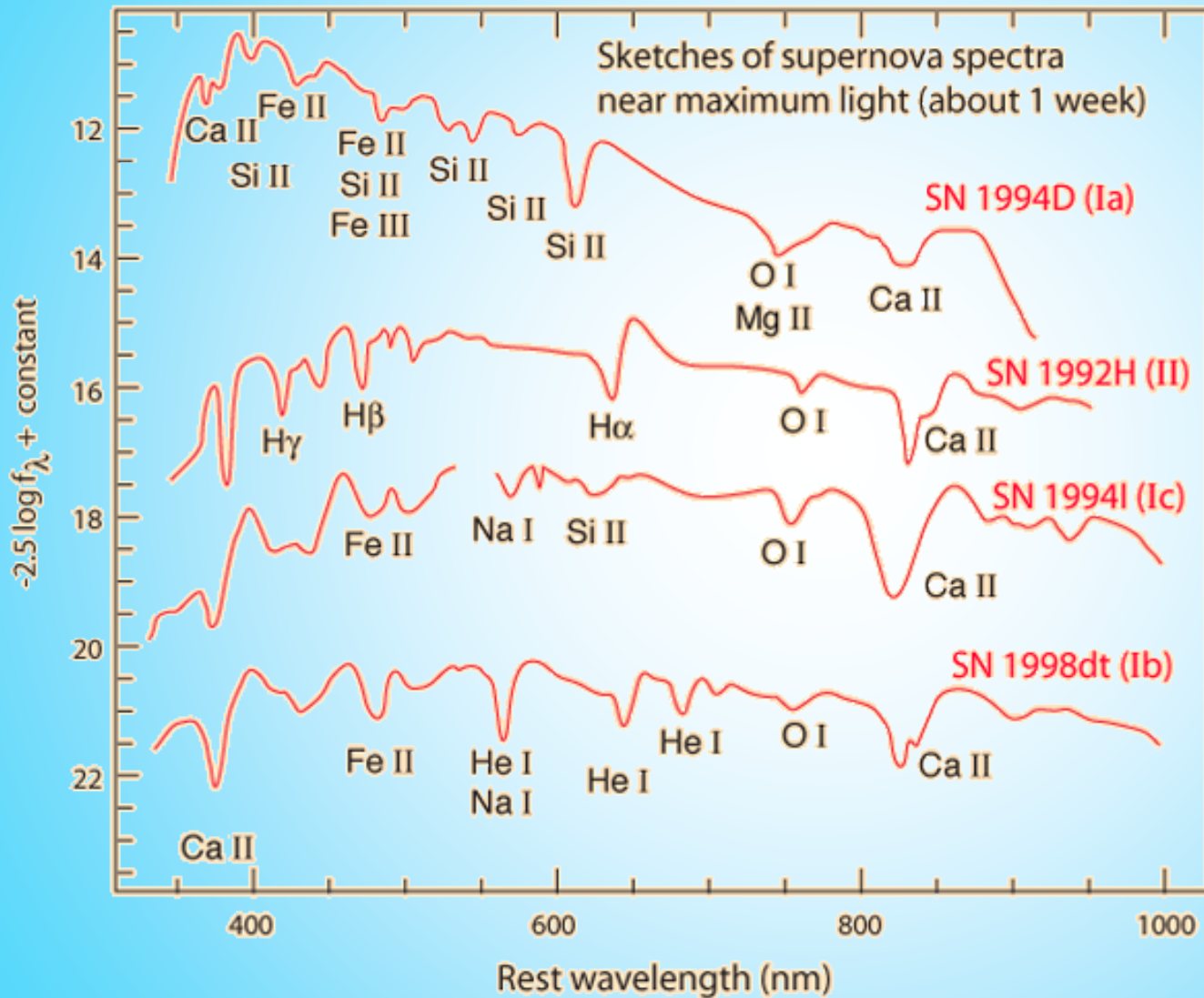
$$E_b \sim E_g \approx \frac{3}{5} \frac{GM_{ns}^2}{R_{ns}} \approx 3.6 \times 10^{53} \left( \frac{M_{ns}}{1.5 M_{\odot}} \right)^2 \left( \frac{R_{ns}}{10 \text{ km}} \right)^{-1} \text{ erg.}$$

## Дополнительные источники:

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

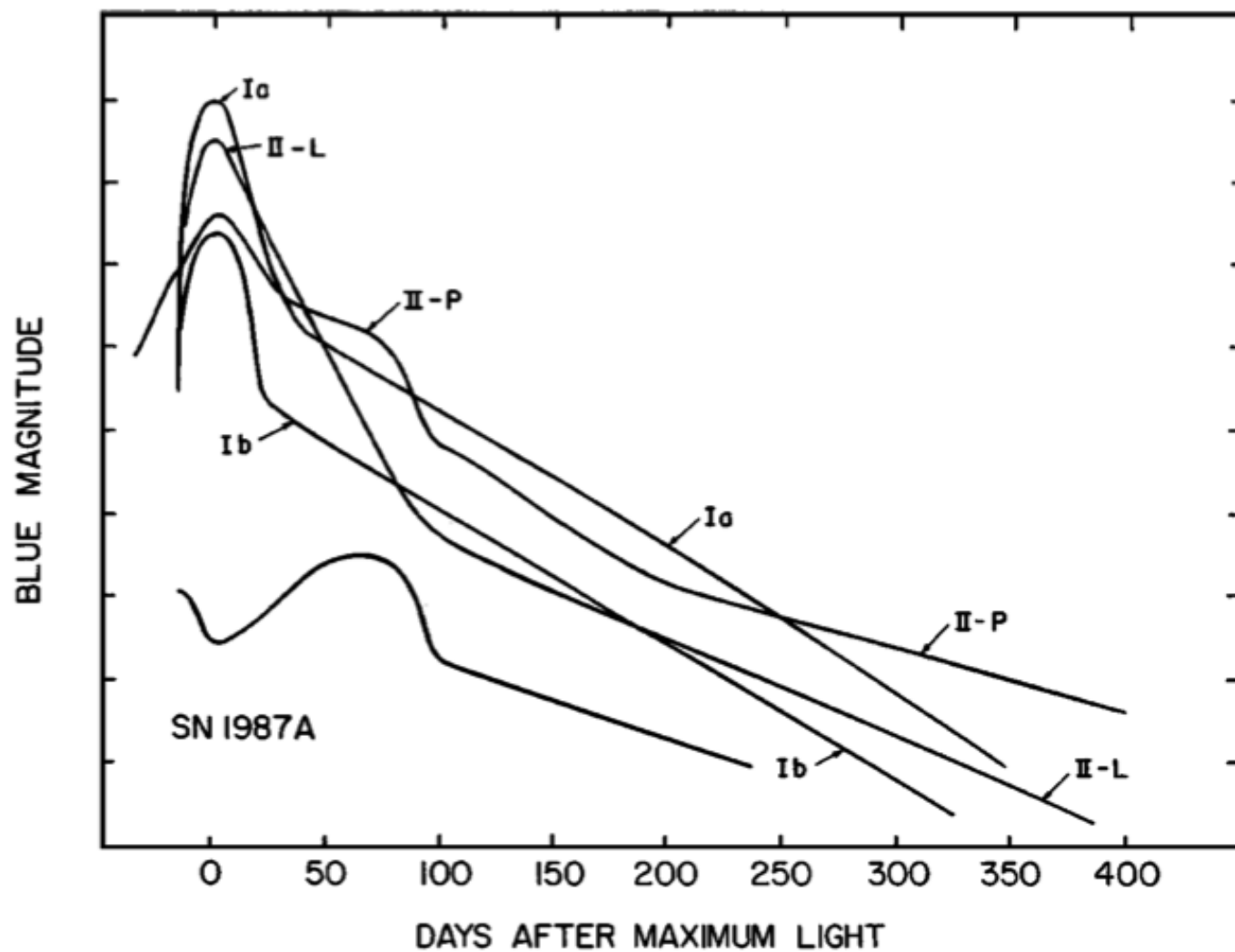


# ТИПИЧНЫЕ СПЕКТРЫ



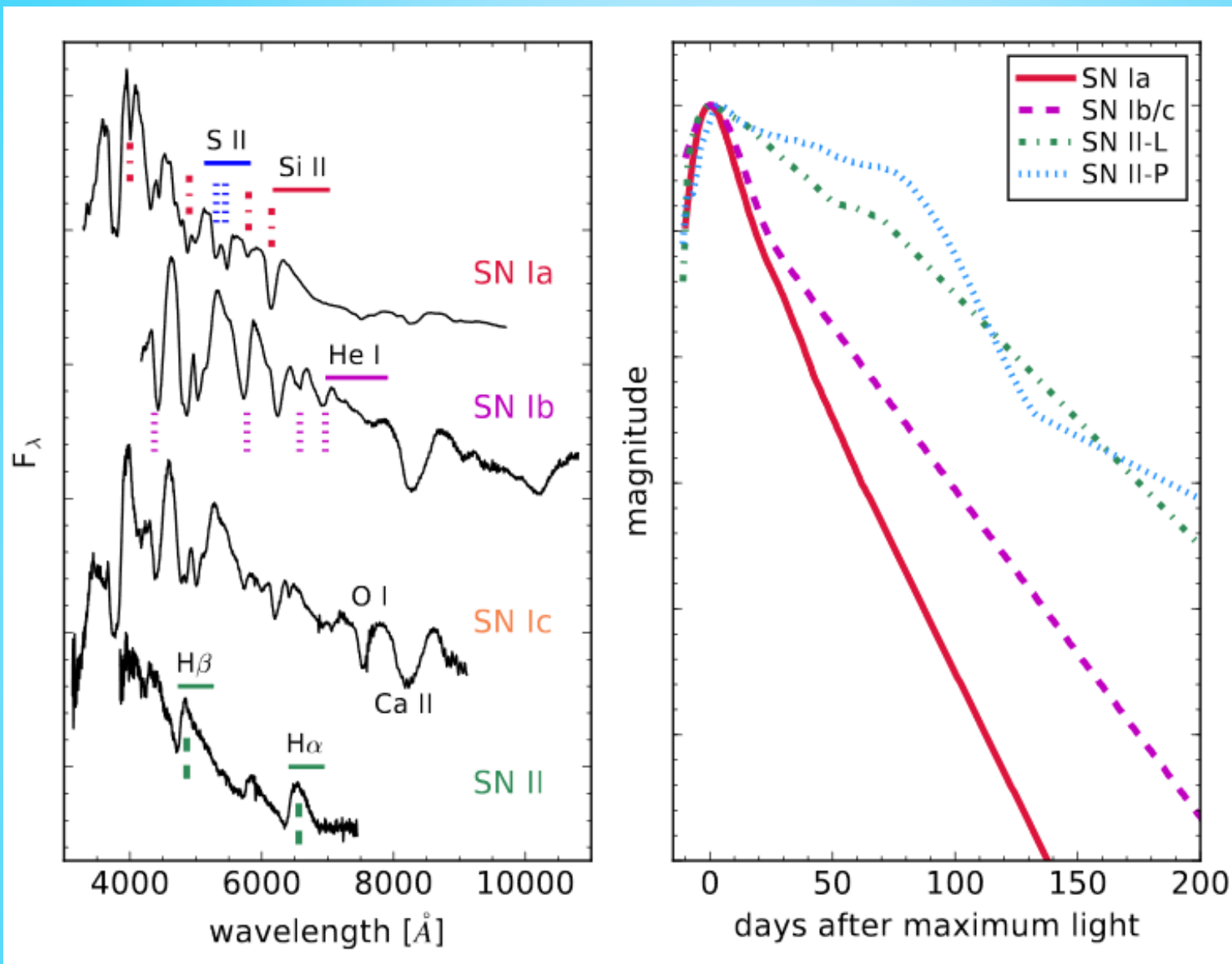
Sketches of spectra from Carroll & Ostlie, data attributed to Thomas Matheson of National Optical Astronomy Observatory.





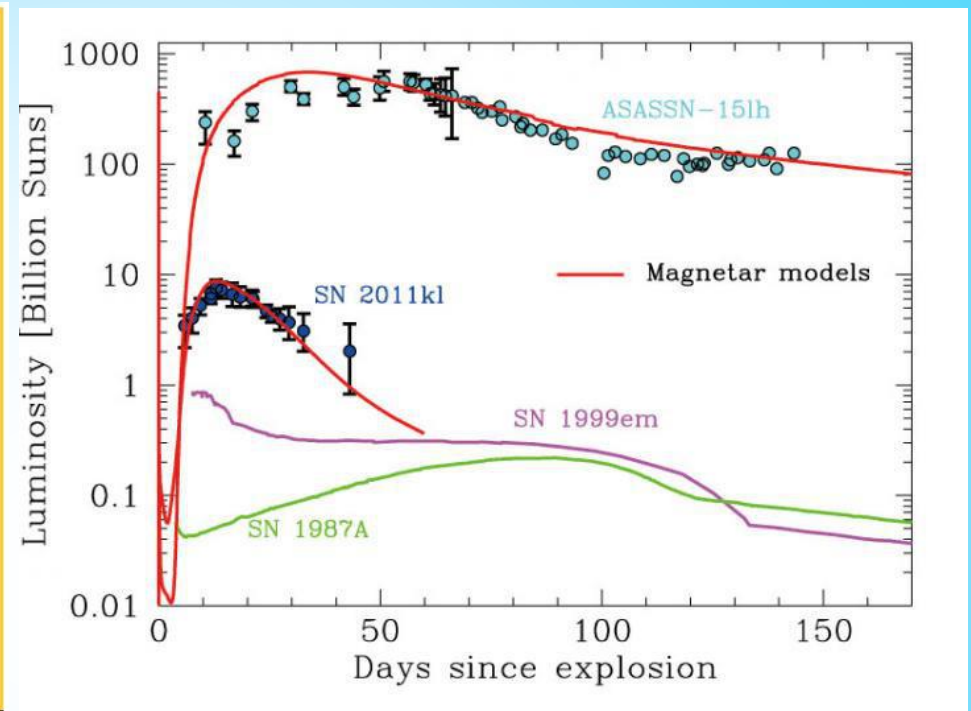
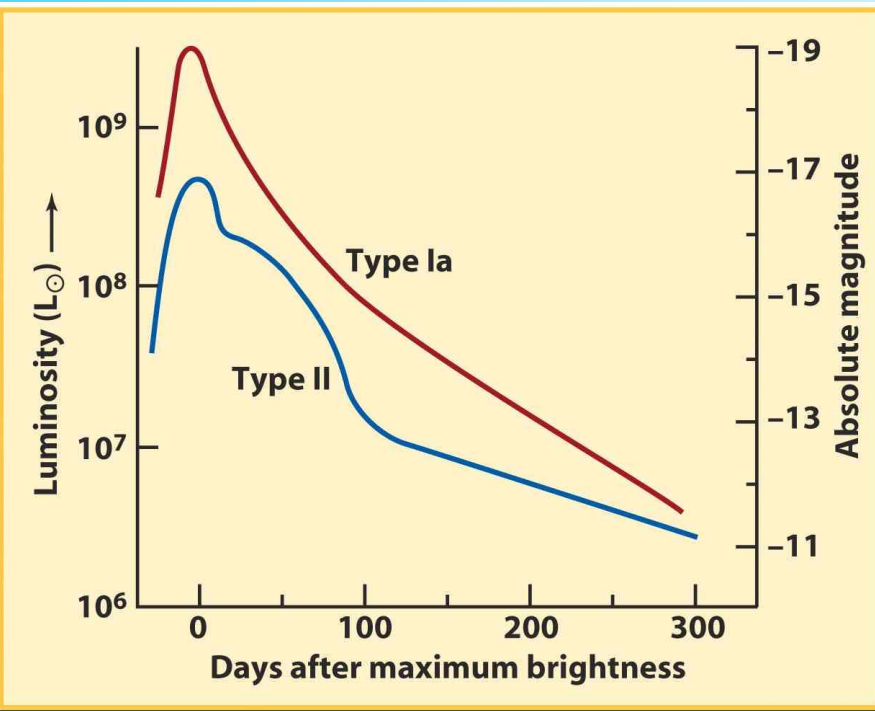
*Figure 3* Schematic light curves for SNe of Types Ia, Ib, II-L, II-P, and SN 1987A. The curve for SNe Ib includes SNe Ic as well, and represents an average. For SNe II-L, SNe 1979C and 1980K are used, but these might be unusually luminous.

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



Спектры вблизи максимума. Усредненные кривые блеска.

# КРИВАЯ БЛЕСКА СВЕРХНОВОЙ



Bersten et al.

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

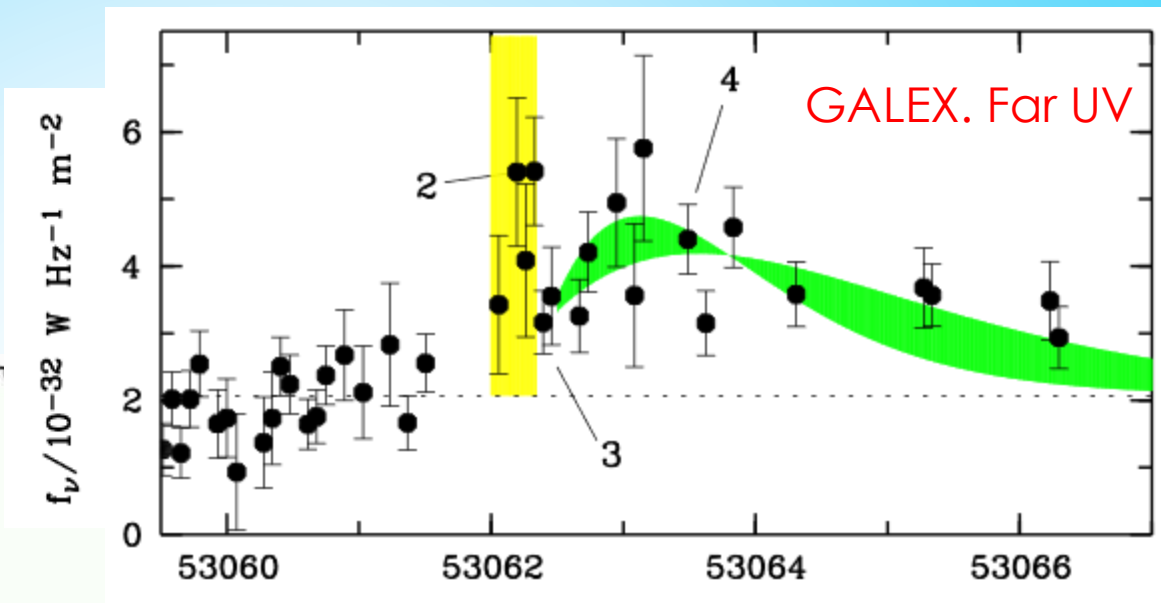
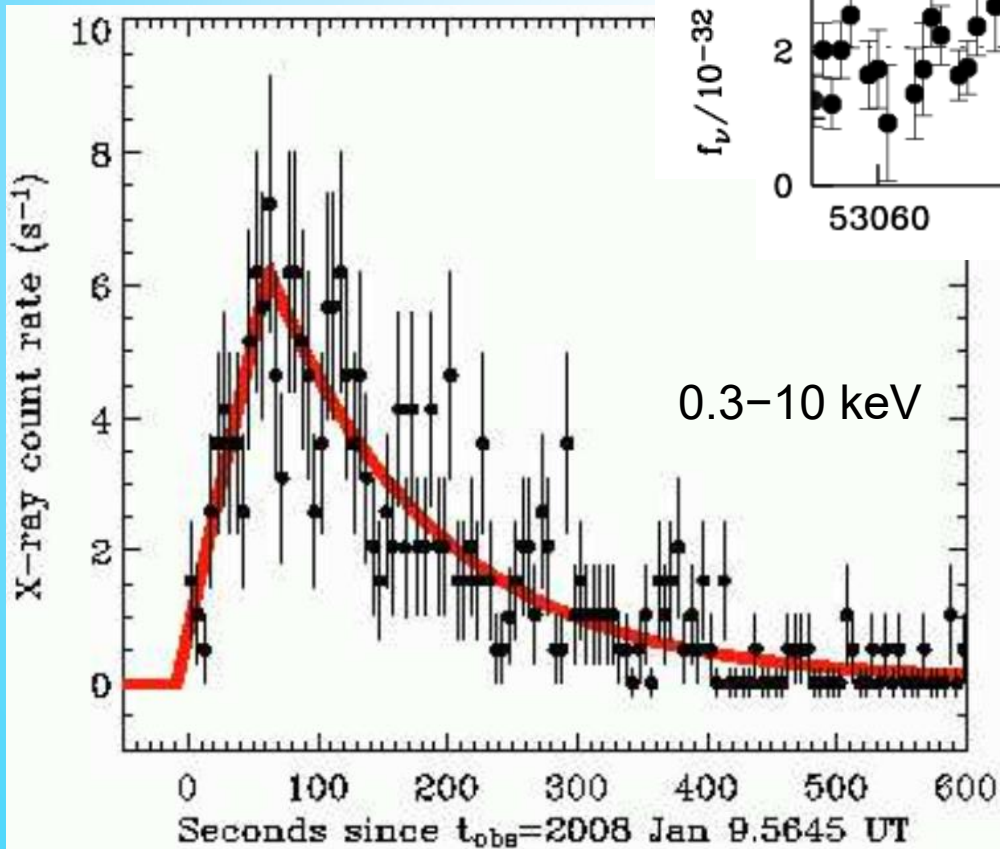
В течение сотен дней после коллапса сверхновая видна в основном за счет распада радиоактивных элементов.

На ранних стадиях также могут быть дополнительные источники энергии.

# ВЫХОД УДАРНОЙ ВОЛНЫ И ПРЕКУРСОР

Выход ударной волны  
SN 2008d  
lb/c

Нетепловое излучение:  
КОМПТОНИЗАЦИЯ

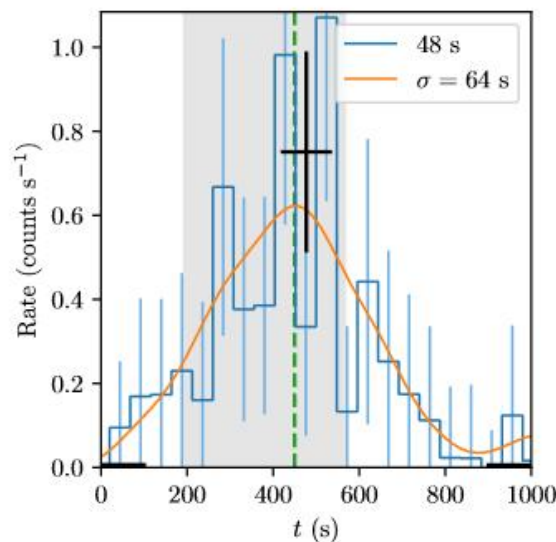
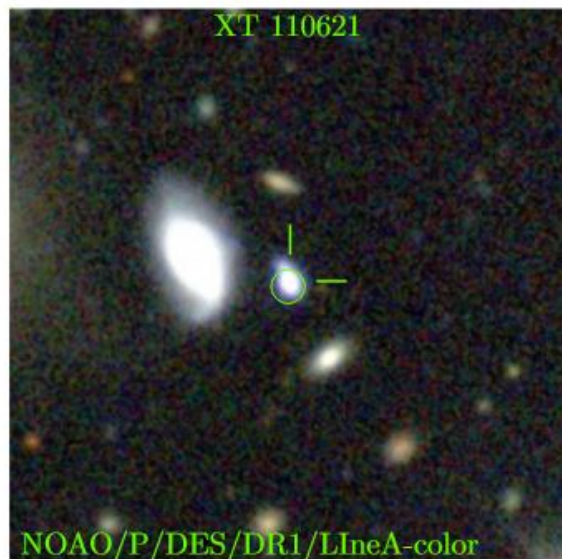


0803.3596

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

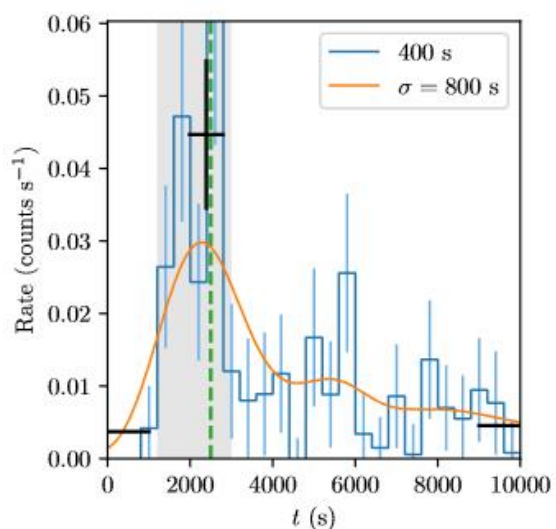
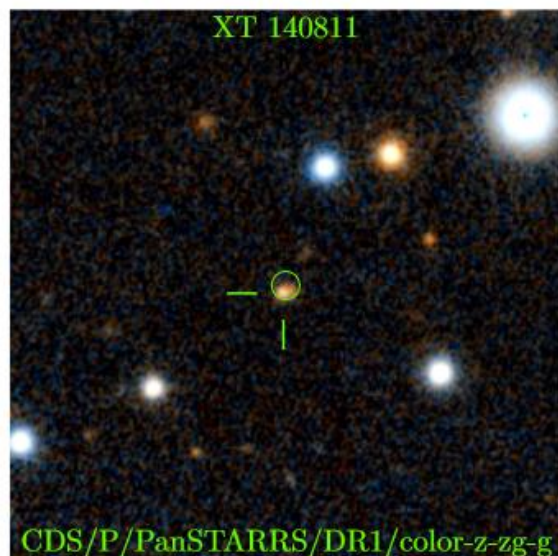


# КАНДИДАТЫ В ПРЕКУРСОРЫ



ХММ-Newton архив  
12 кандидатов  
(из них 9 с галактиками)

Типичные масштабы  
для красных сверхгигантов:  
 $10^{48}$  эрг  
1000 сек  
0.03 кэВ

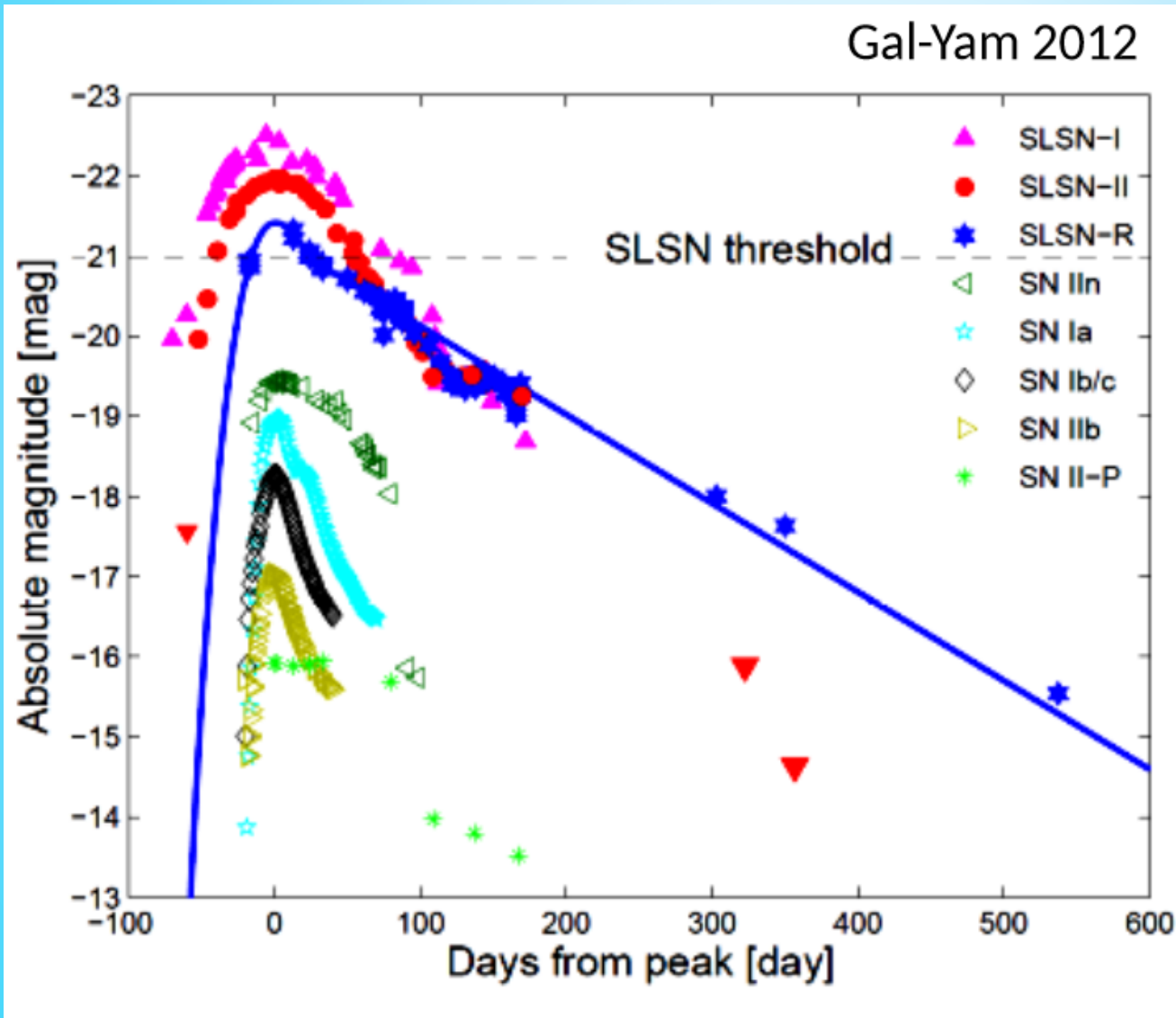


Для голубых сверхгигантов:  
 $10^{46.5}$  эрг  
100 сек  
0.3 кэВ

Для WR:  
 $10^{45}$  эрг  
10 сек  
3 кэВ

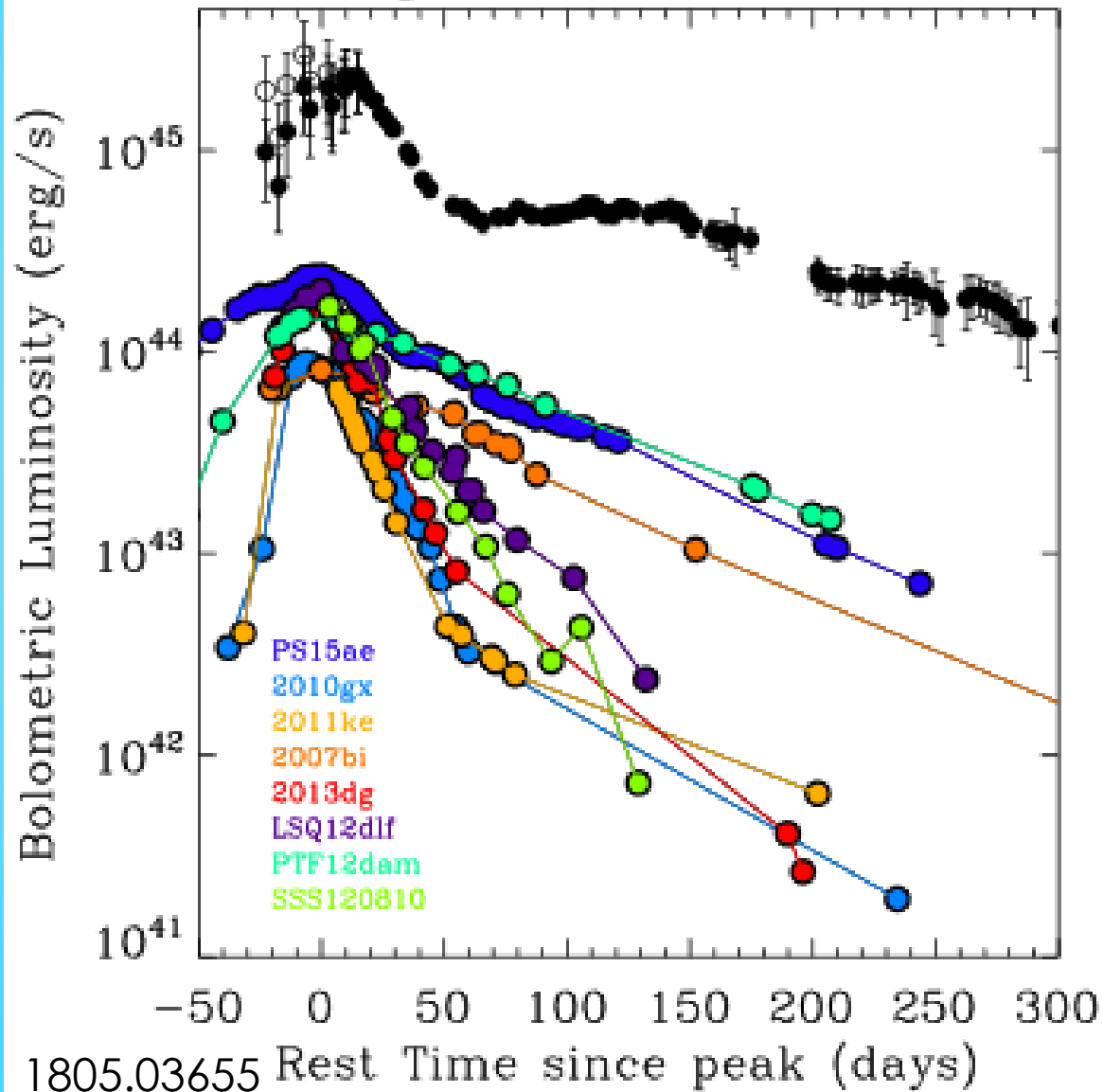
2004.09519

# 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



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

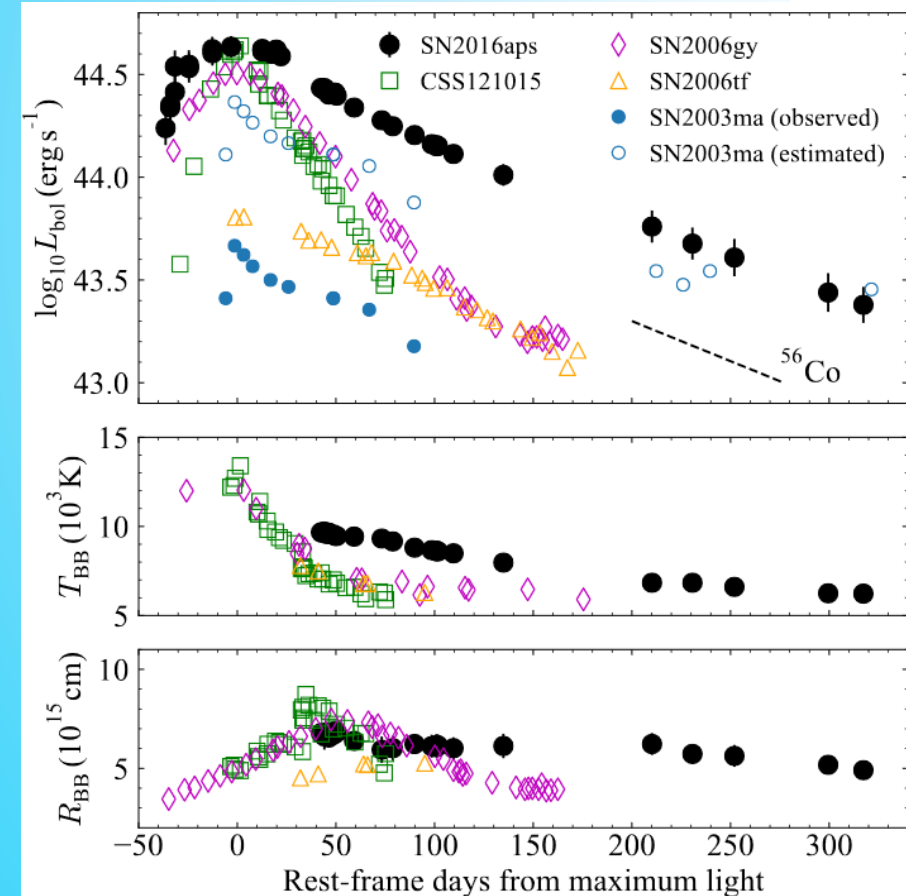
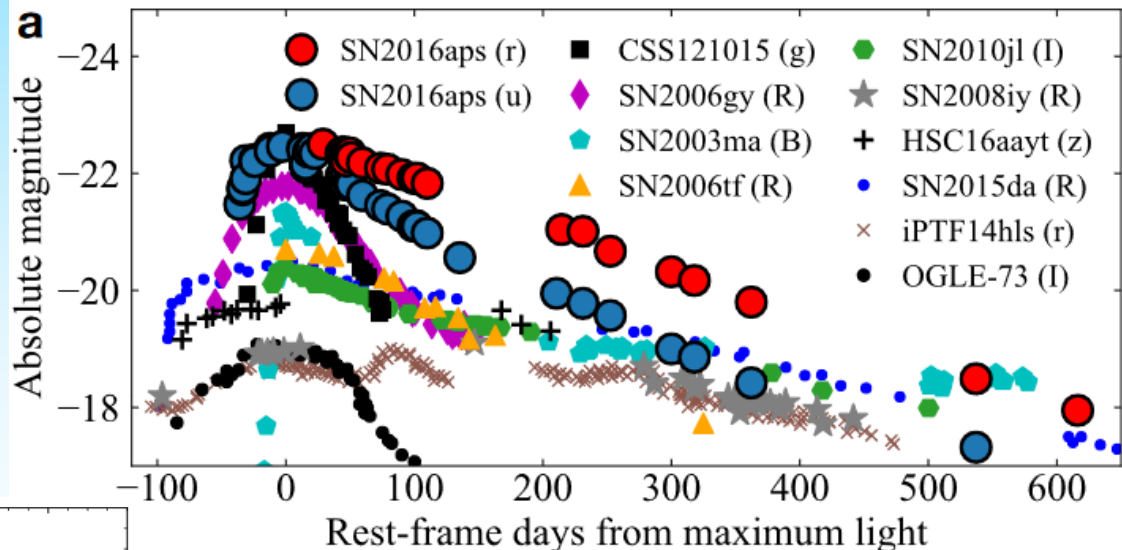
1507.03010

# НОВЫЙ РЕКОРД

SN2016aps

Излучено  $>5 \cdot 10^{51}$  erg

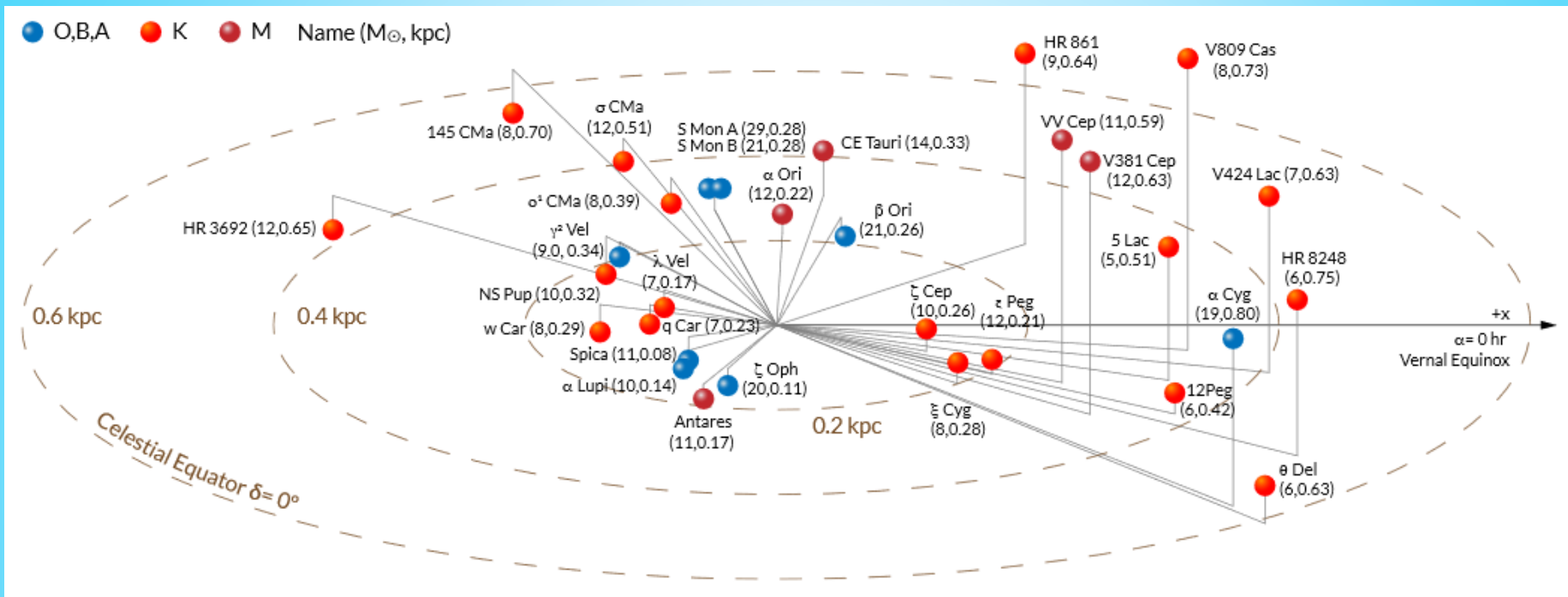
Очень медленный спад блеска  
при очень высокой светимости



2004.05840

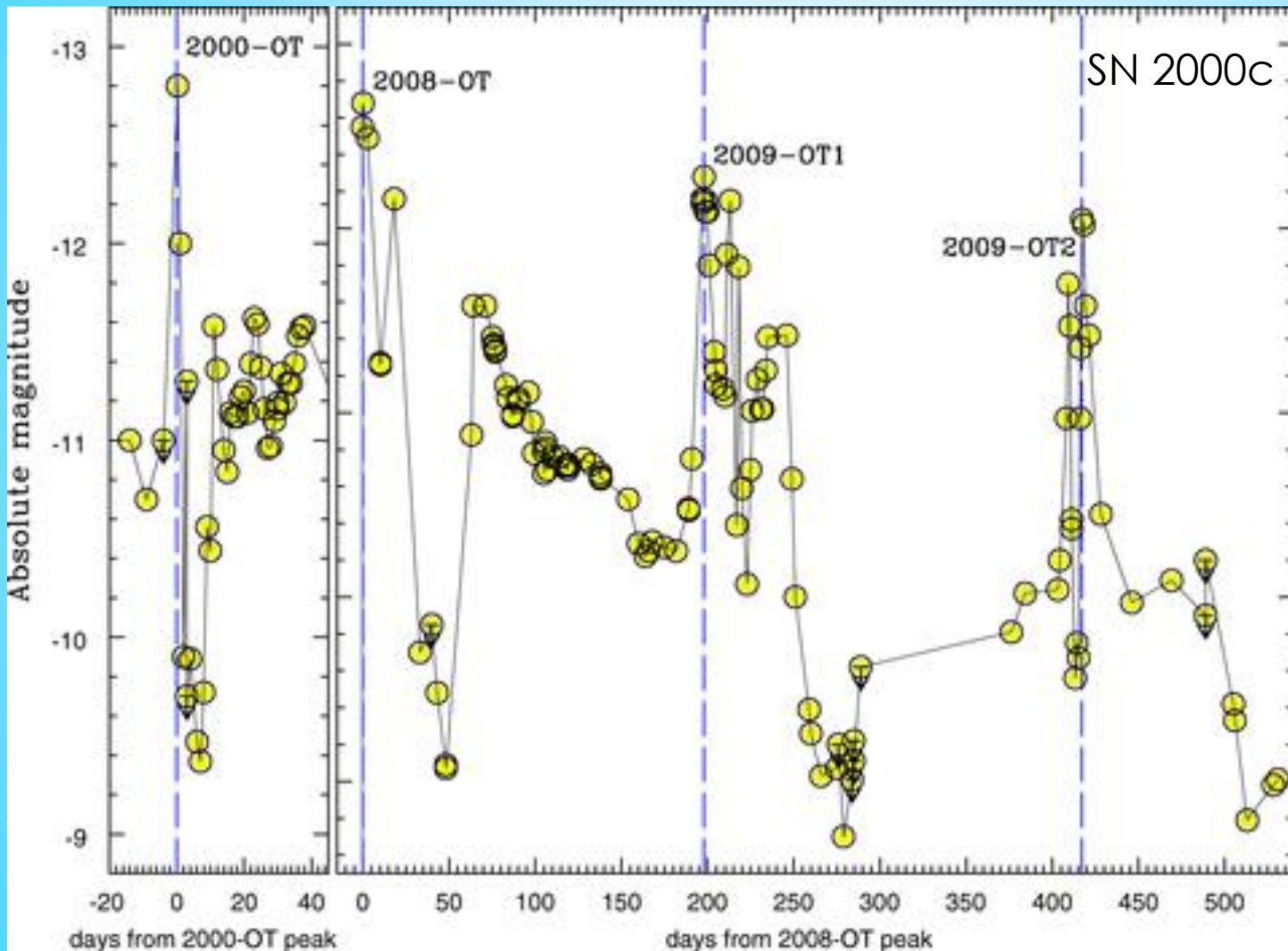


# КТО ВЗОРВЕТСЯ НЕВДАЛЕКЕ?



Как известно, из относительно близких звезд ближе всего к моменту взрыва Бетельгейзе. Эта звезда может взорваться в ближайшие  $\sim 100\,000$  лет.

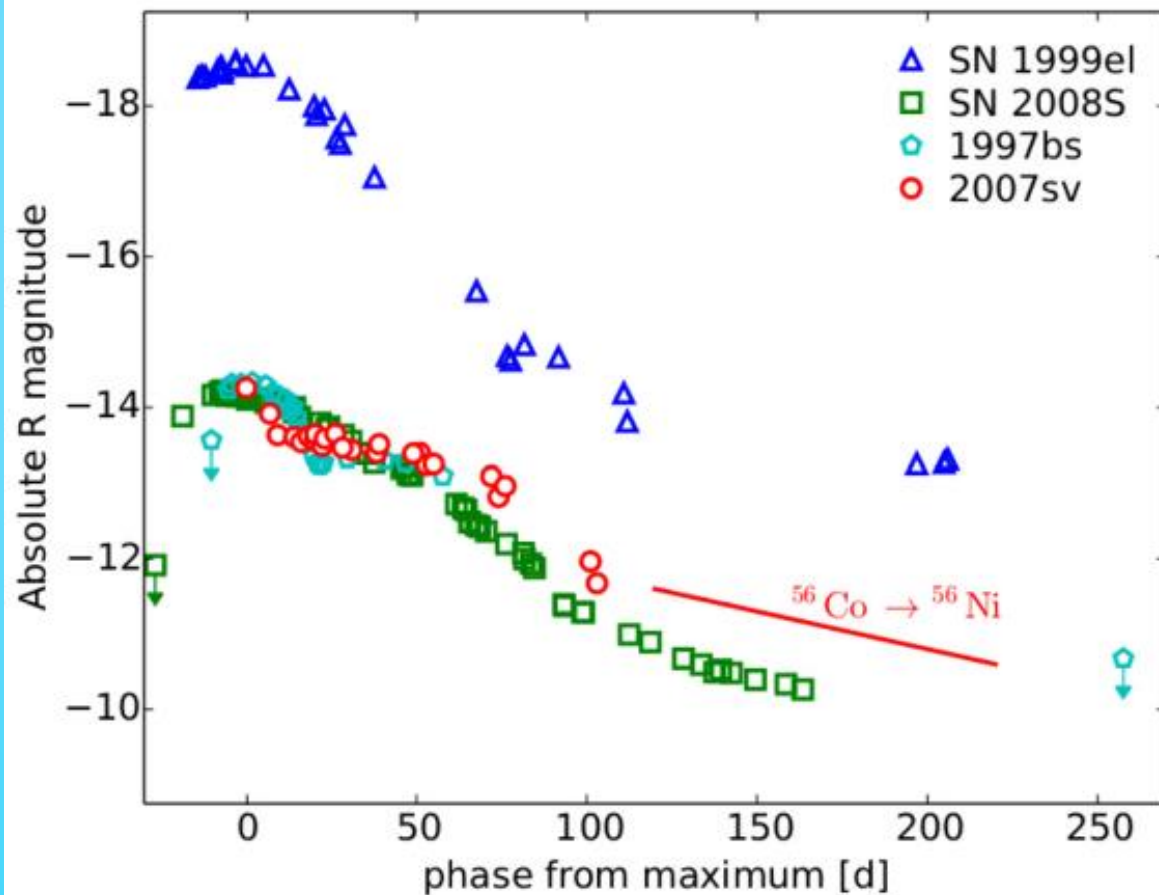
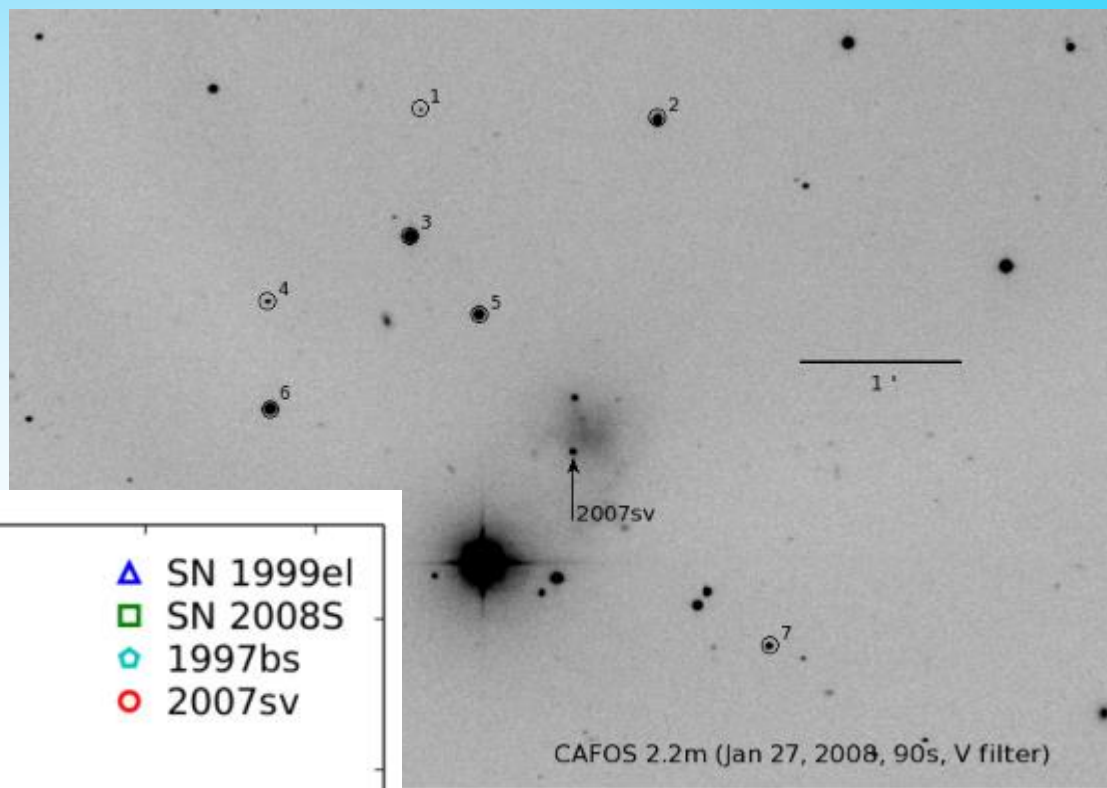
# ПОДДЕЛЬНЫЕ СВЕРХНОВЫЕ



[http://etacar.umn.edu/stellar\\_eruptions/supernova\\_impостor.html](http://etacar.umn.edu/stellar_eruptions/supernova_impостor.html)

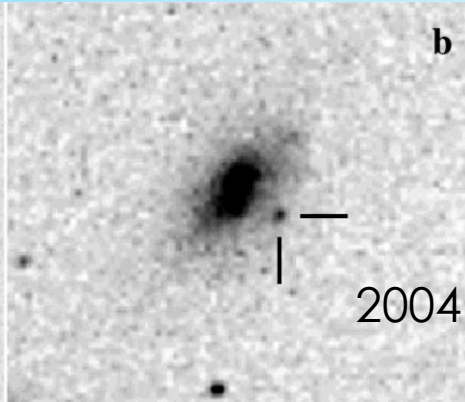
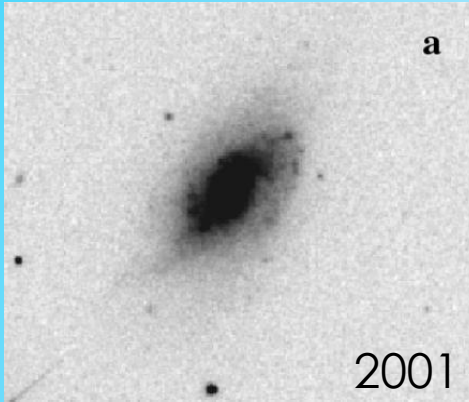
# SN 2007SV

Пример impostor

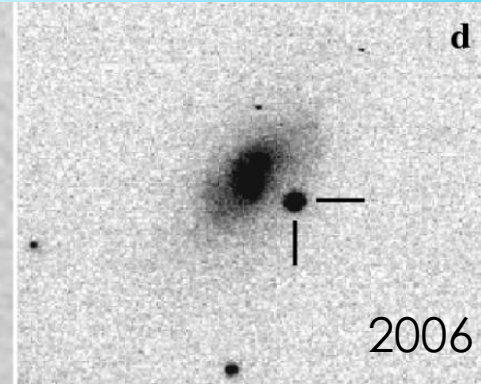
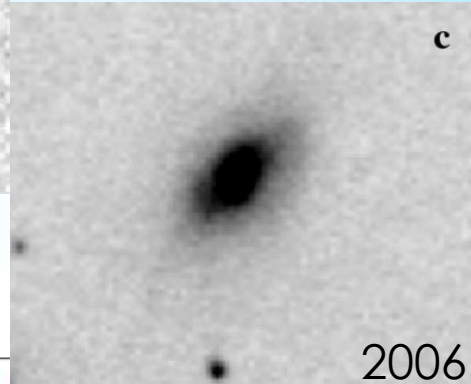


Tartaglia et al.  
MNRAS 447,117 (2015)

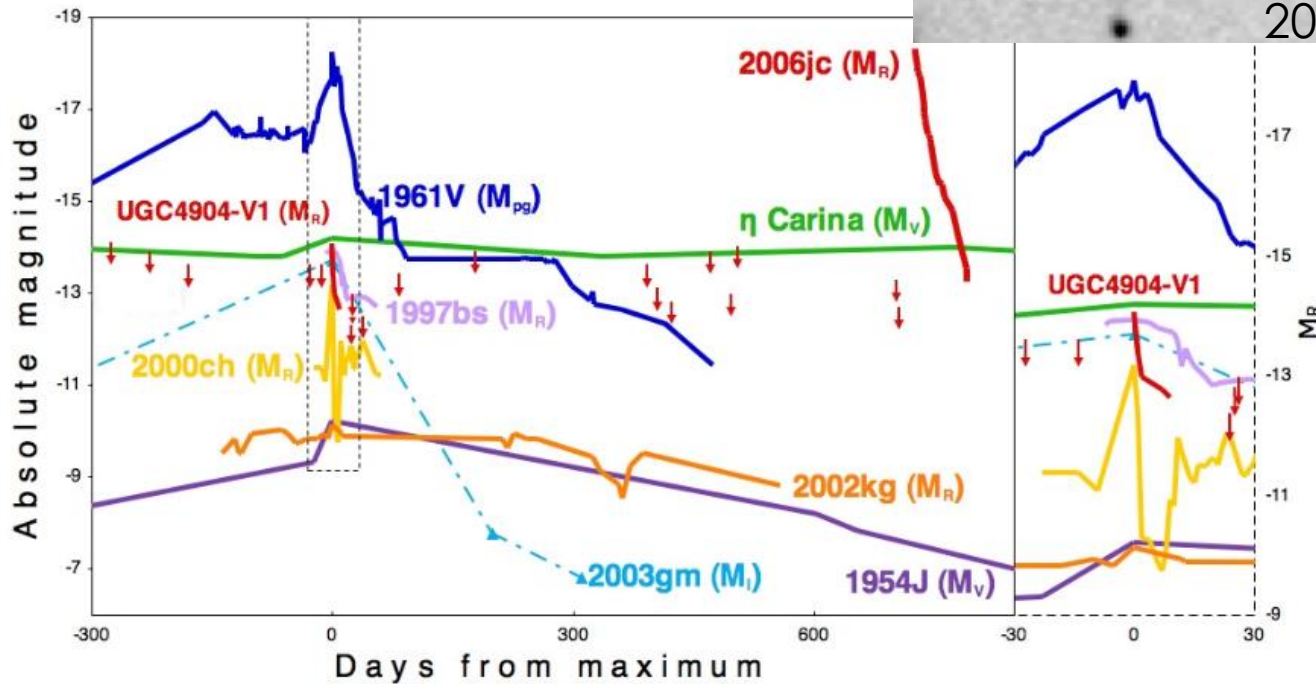
# SN 2006JC



Мощная вспышка  
за 2 года до сверхновой  
UGC4904V1 и SN2006jc



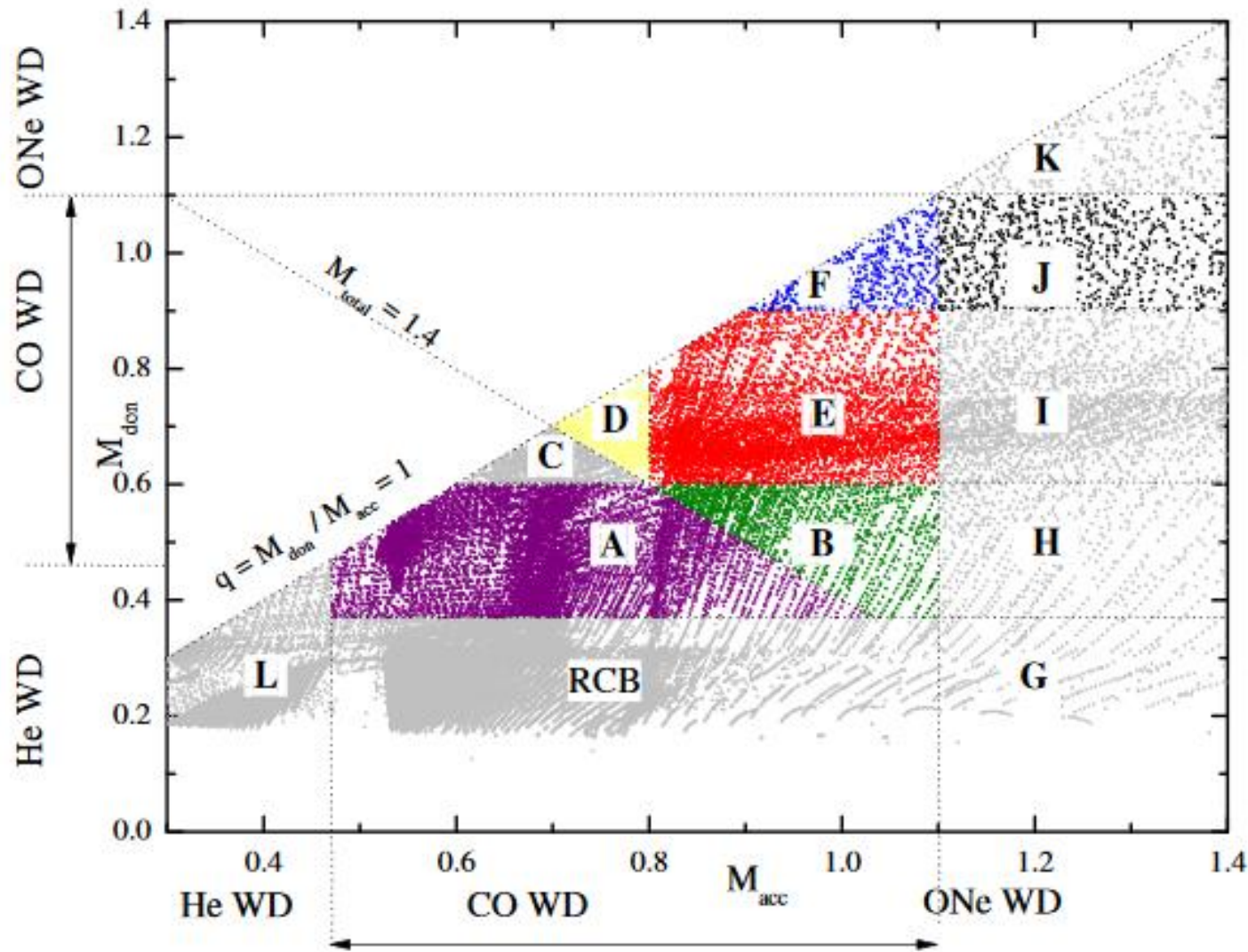
Пример impostor



astro-ph/0703663



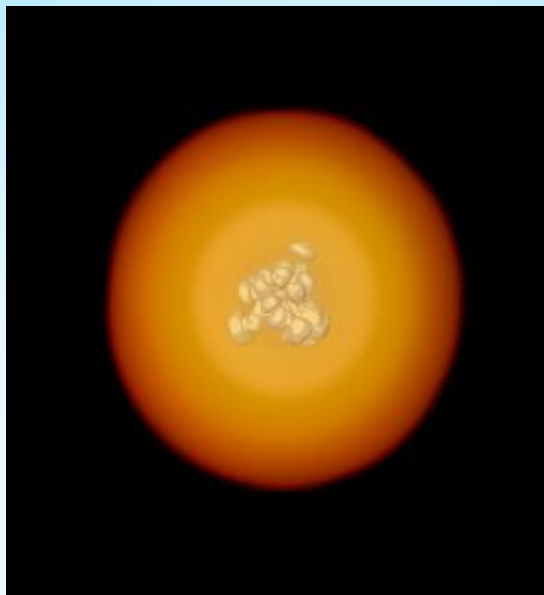
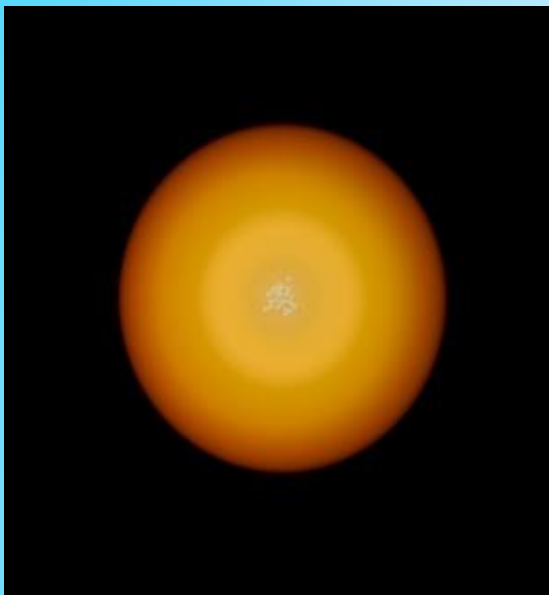
# СЛИЯНИЯ WD И SNIA



A, B, D, E, F, J – SNIa

G, H, I - AIC

# ВЗРЫВ SN IA



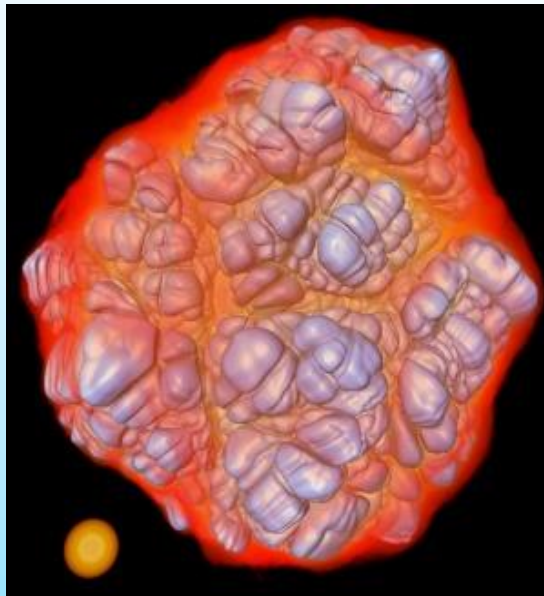
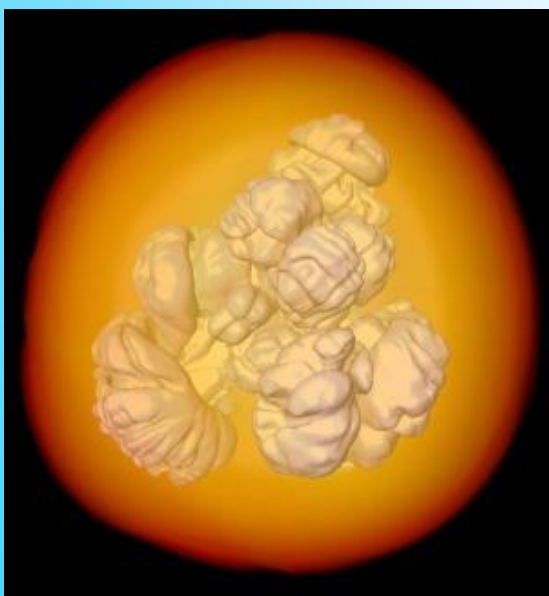
Достигнув критической массы, СО белые карлики взрываются (термоядерное горение углерода и кислорода).

Это термоядерный взрыв, полностью разрушающий объект.

Наблюдения именно таких сверхновых привели к открытию темной энергии.

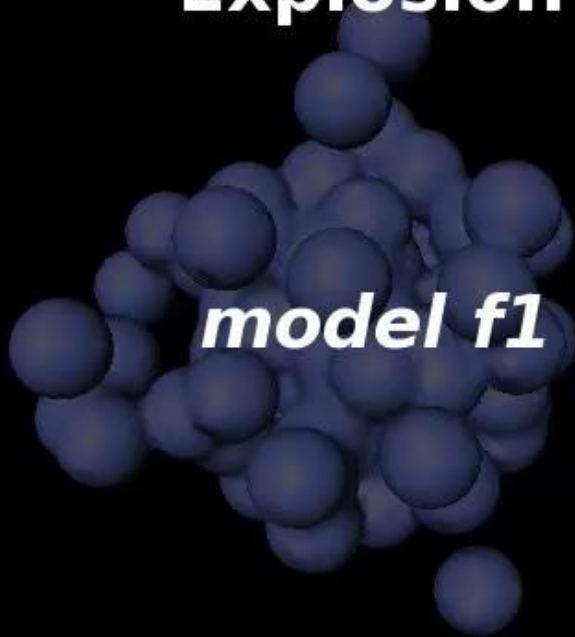
Они также очень важны для синтеза многих тяжелых элементов.

См. обзор в arXiv: 1805.07268.



# ВЗРЫВ СВЕРХНОВОЙ ТИПА IA

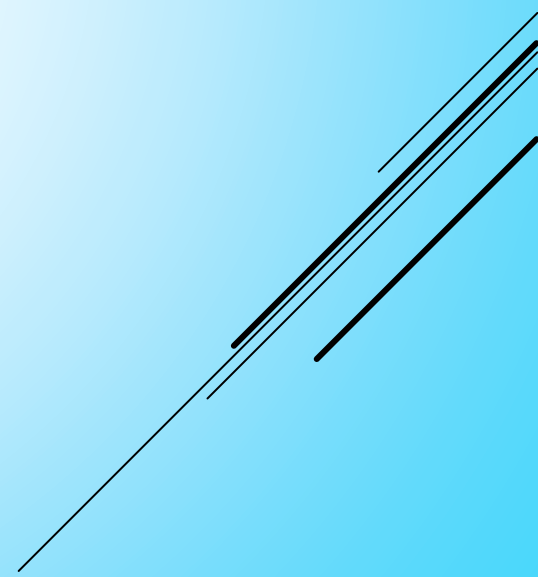
## Thermonuclear Supernova Explosion



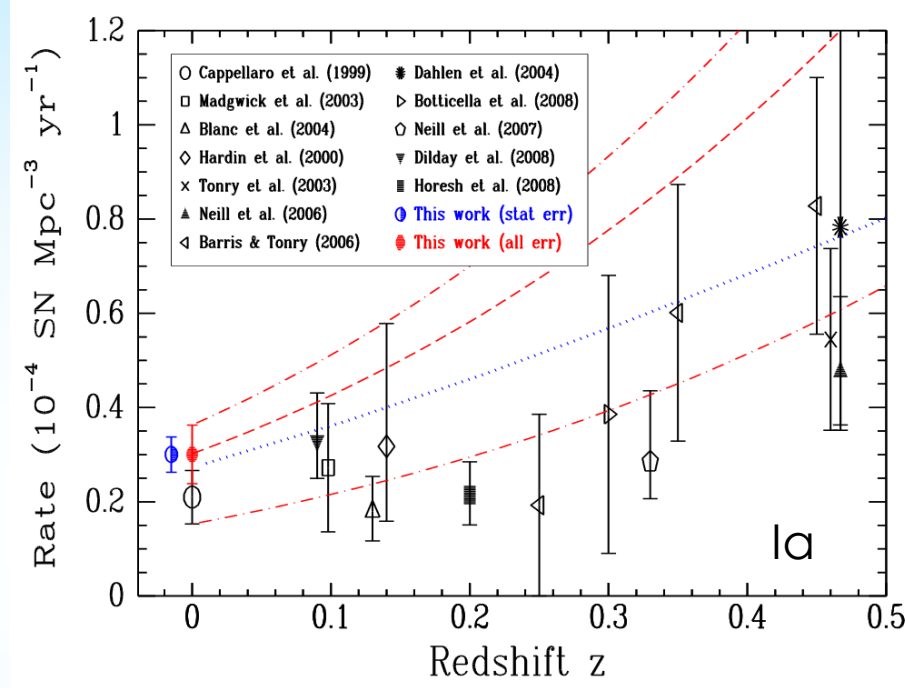
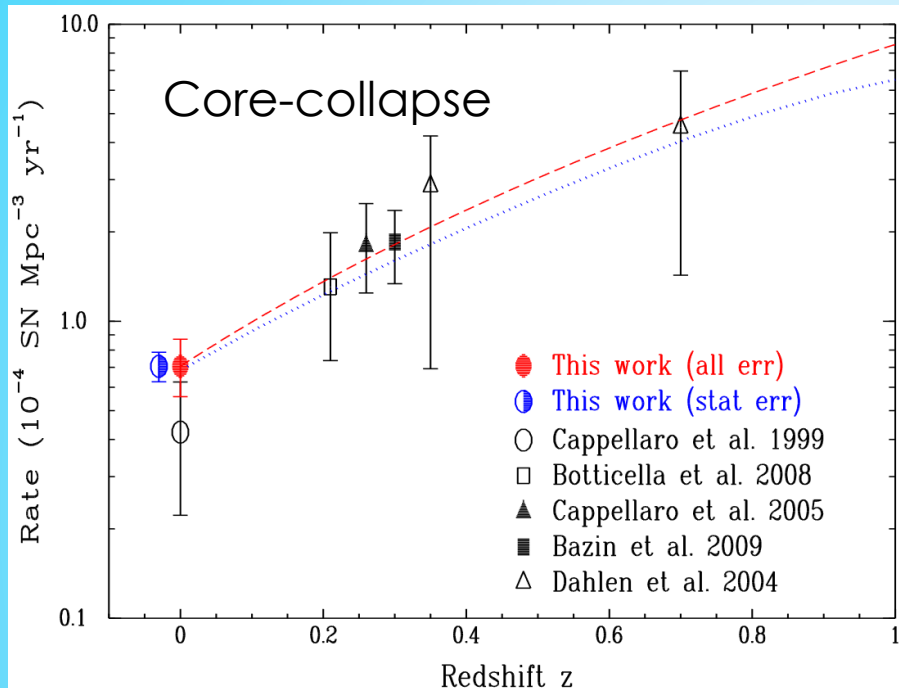
(c) Friedrich Röpke, MPA, 2004

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       |
|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| $0.54 \pm 0.12$ | $0.76 \pm 0.16$ | $1.54 \pm 0.32$ | $2.30 \pm 0.48$ | $2.84 \pm 0.60$ |

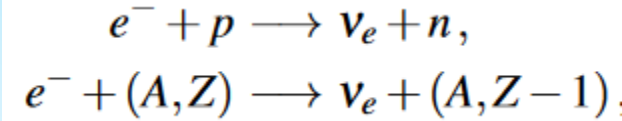
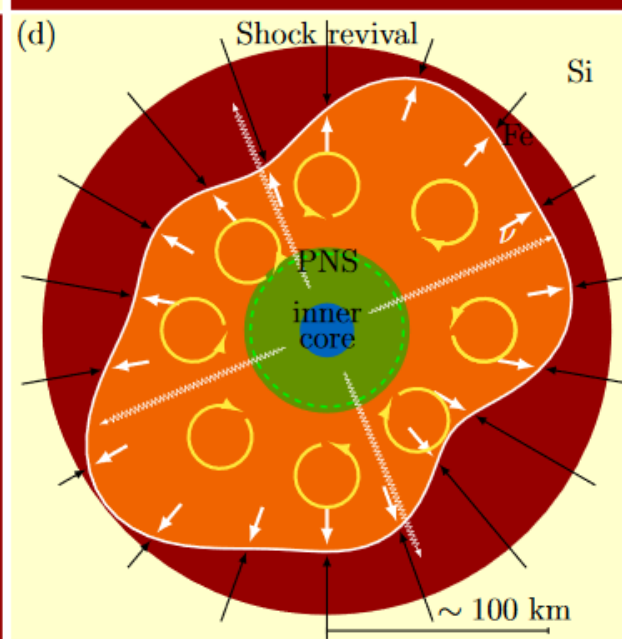
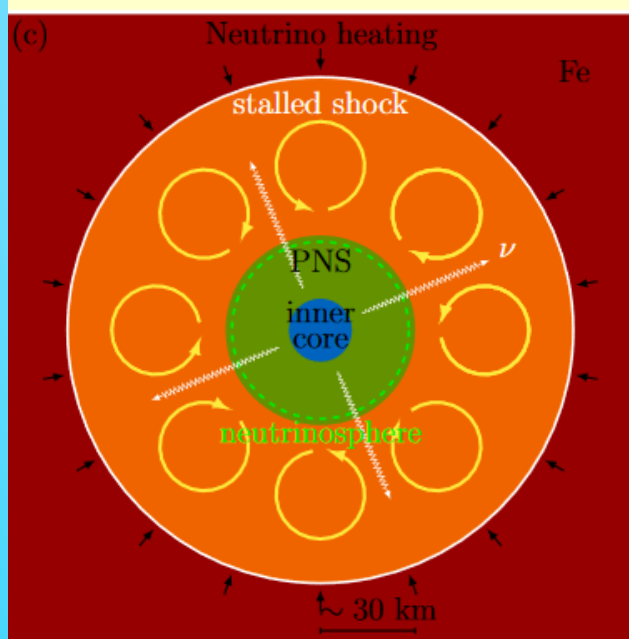
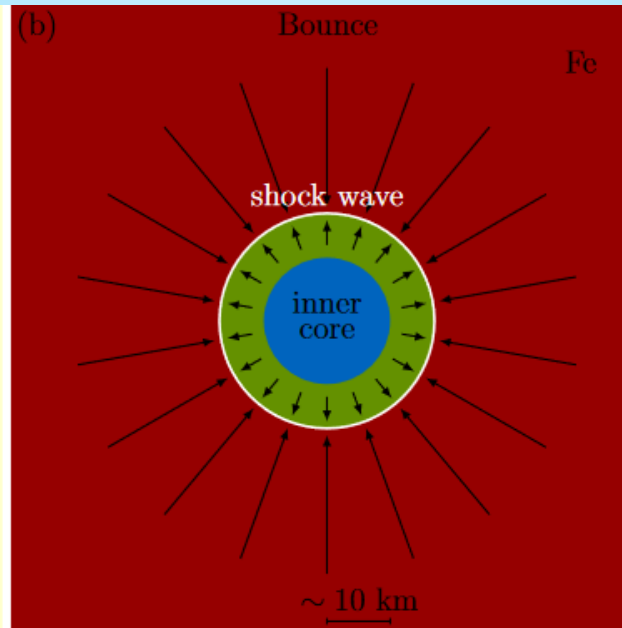
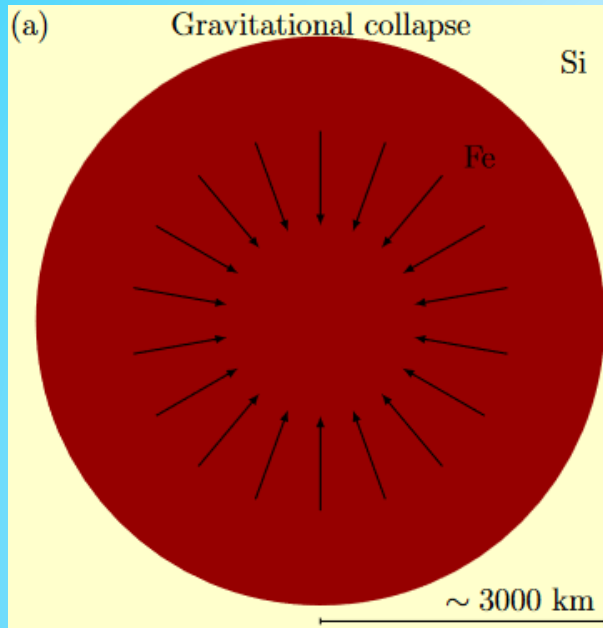
| Type    | Rate [SNUM]     |                 |                 |                 |
|---------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
|         | Ia              | Ib/c            | II              | All             |
| E-S0    | $0.06 \pm 0.02$ | $< 0.02$        | $< 0.02$        | $0.06 \pm 0.02$ |
| 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  | $0.17 \pm 0.10$ | $0.50 \pm 0.25$ | $1.85 \pm 0.61$ | $2.52 \pm 0.64$ |

SNUM – rate per  $10^{10} M_{\odot}$  stellar mass

1104.0300



# КОЛЛАПС ЯДРА

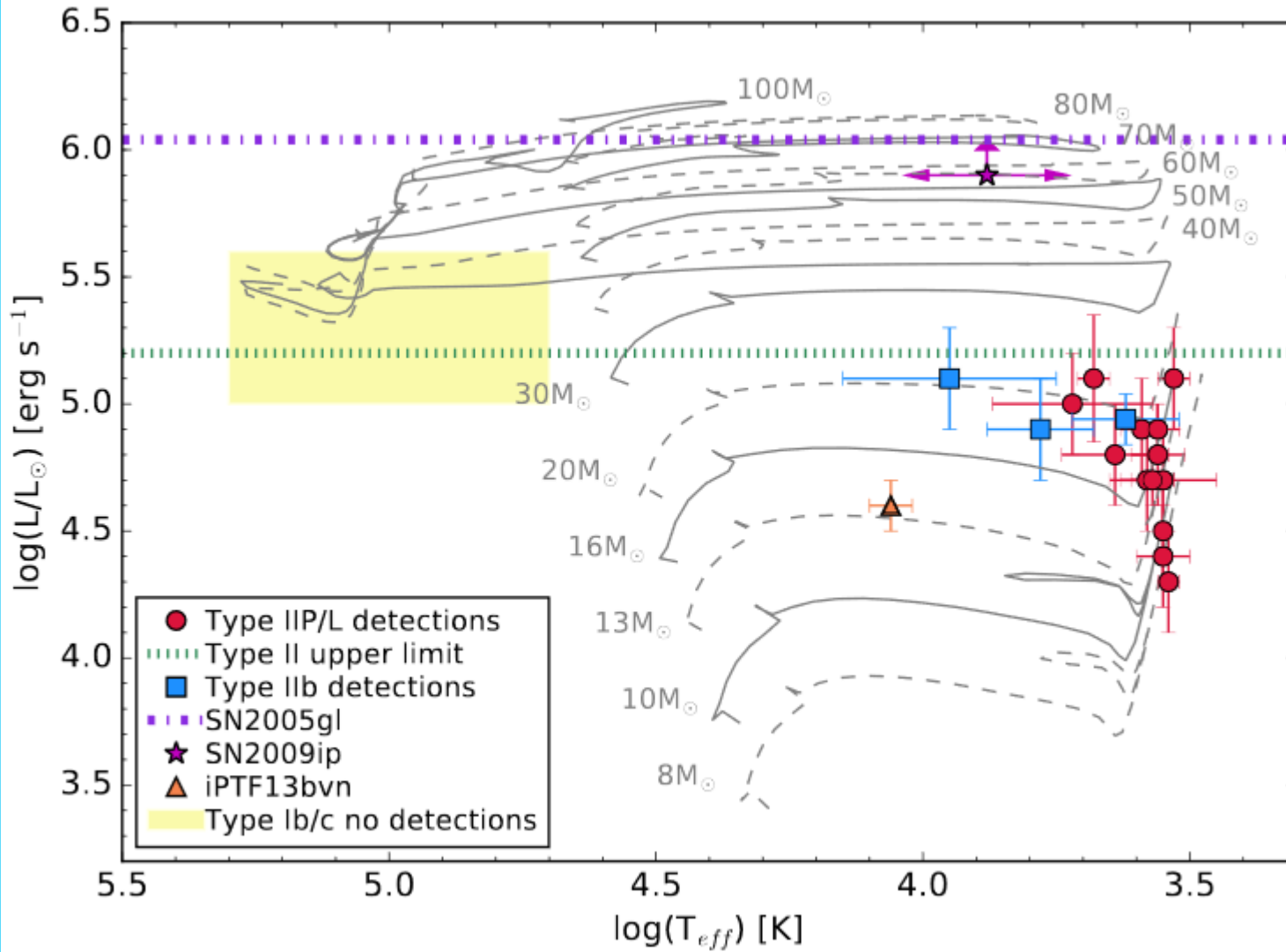


Коллапс начинается из-за захвата электронов и/или фотодиссоциации ядер железа.

$$E_{\text{bind}} \sim \frac{GM_{\text{PNS}}^2}{R_{\text{PNS}}} \sim 10^{53} \left( \frac{M_{\text{PNS}}}{1M_{\odot}} \right)^2 \left( \frac{30 \text{ km}}{R_{\text{PNS}}} \right) \text{ erg}$$

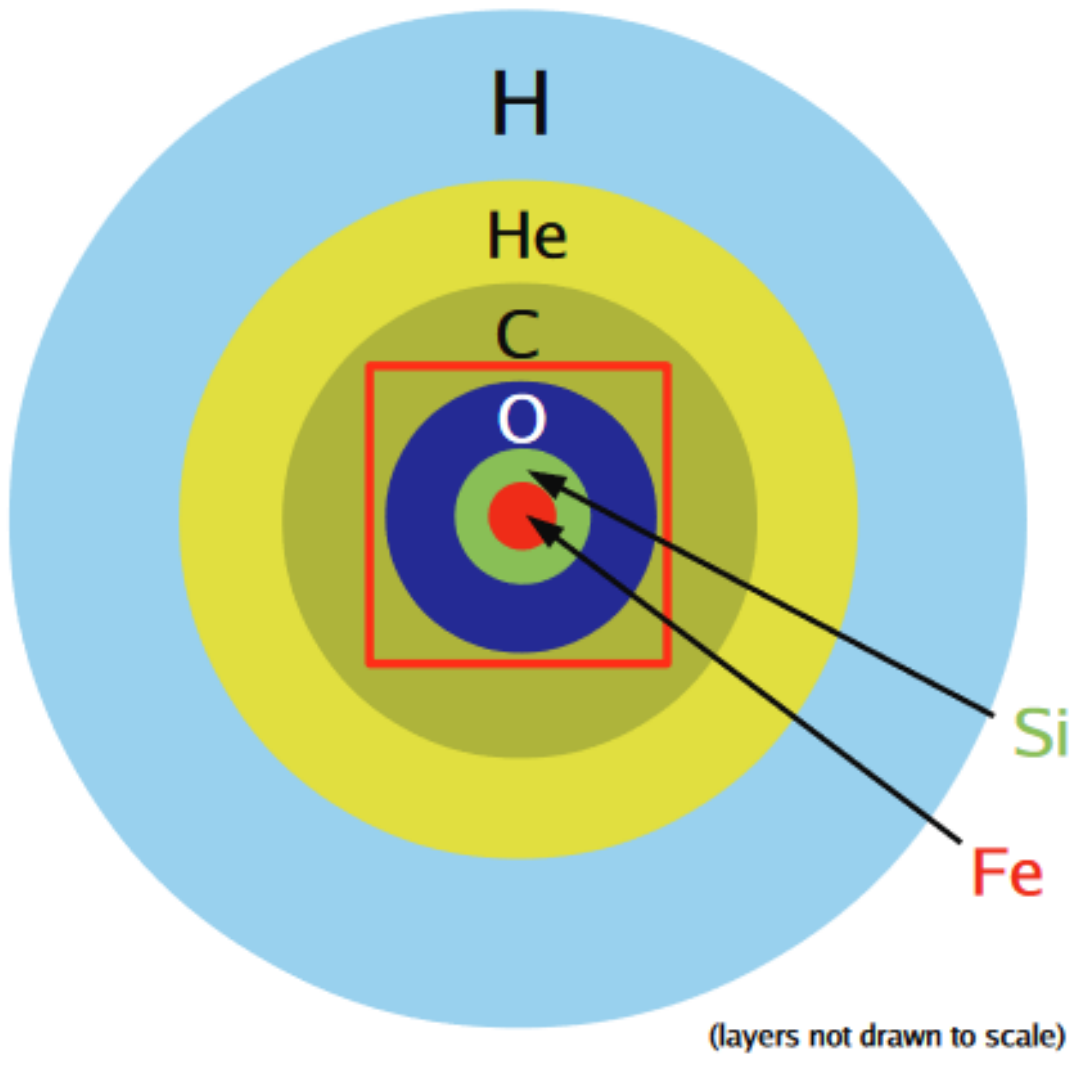
1806.07267

# ЗВЕЗДЫ-ПРАРОДИТЕЛИ



# СТРУКТУРА ЗВЕЗДЫ ПЕРЕД КОЛЛАПСОМ

Onion-shell structure of pre-collapse star



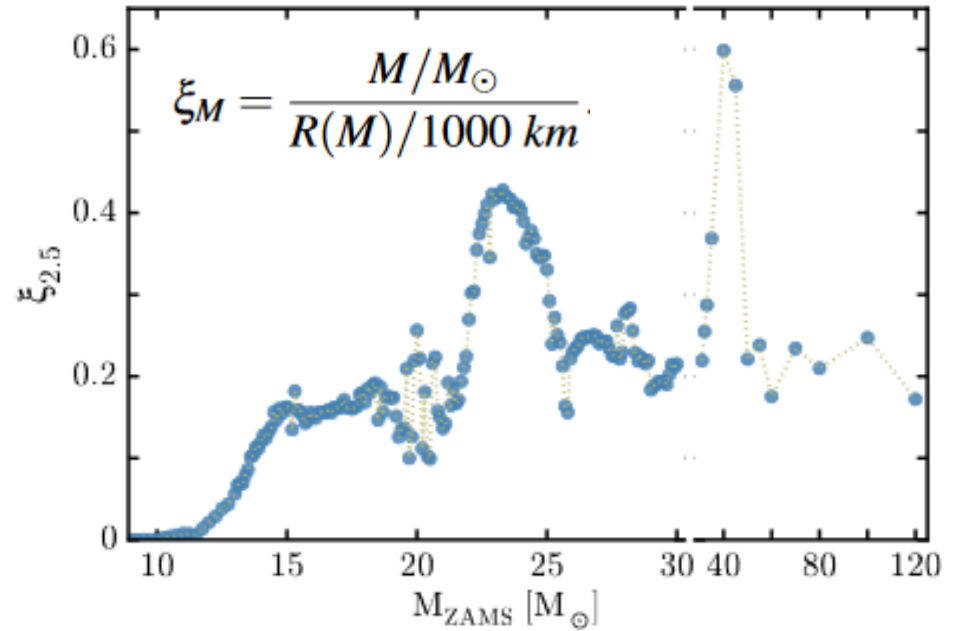
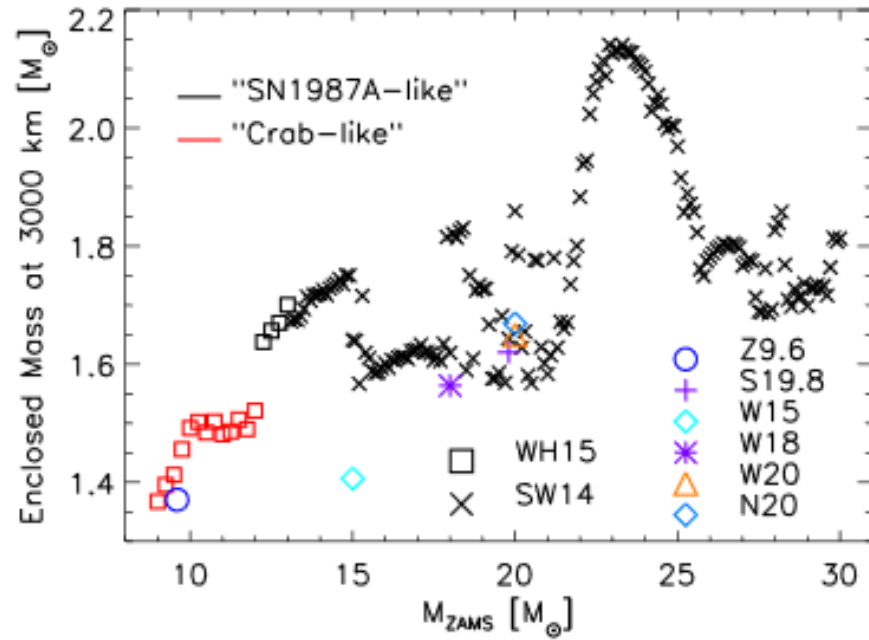
Радиус железного ядра  
~3000 км.

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

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

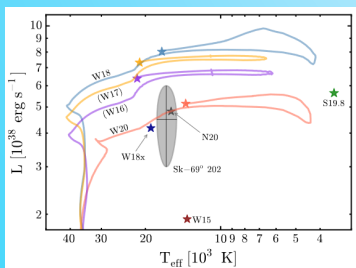
1211.1378

# 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.

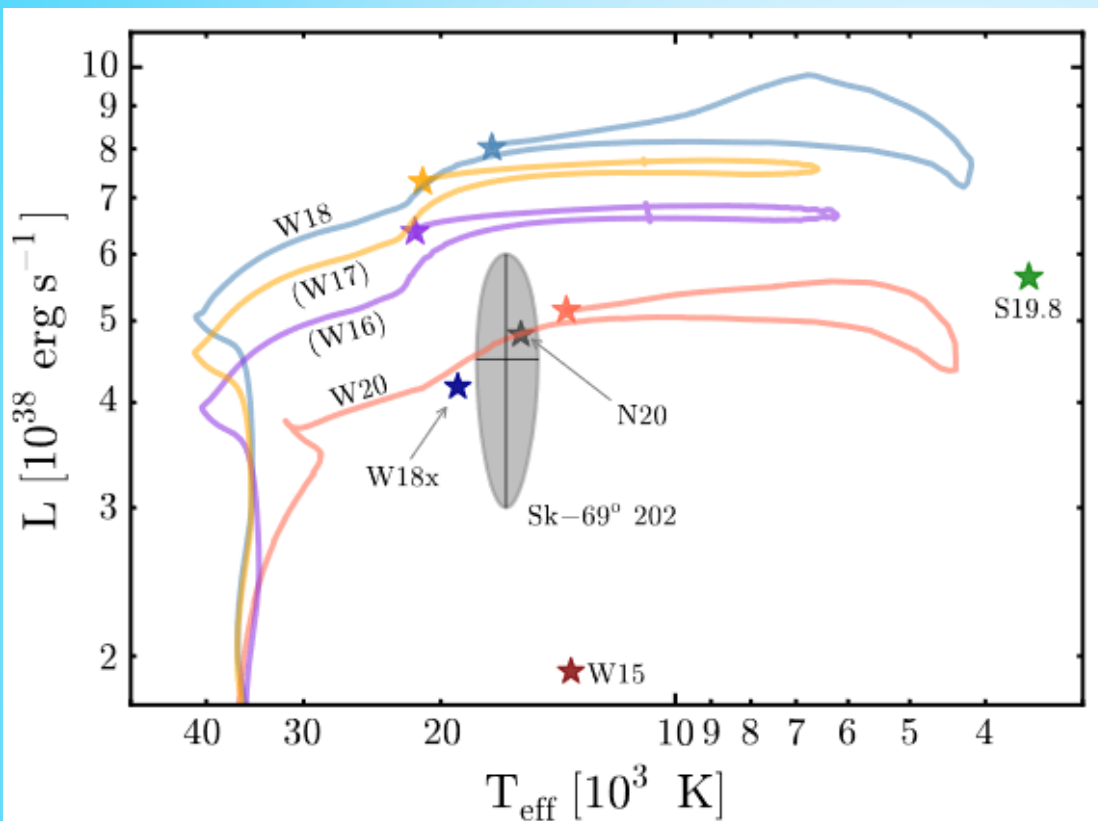


1510.04643

1806.07267



# МОДЕЛИ ПРЕДСВЕРХНОВЫХ

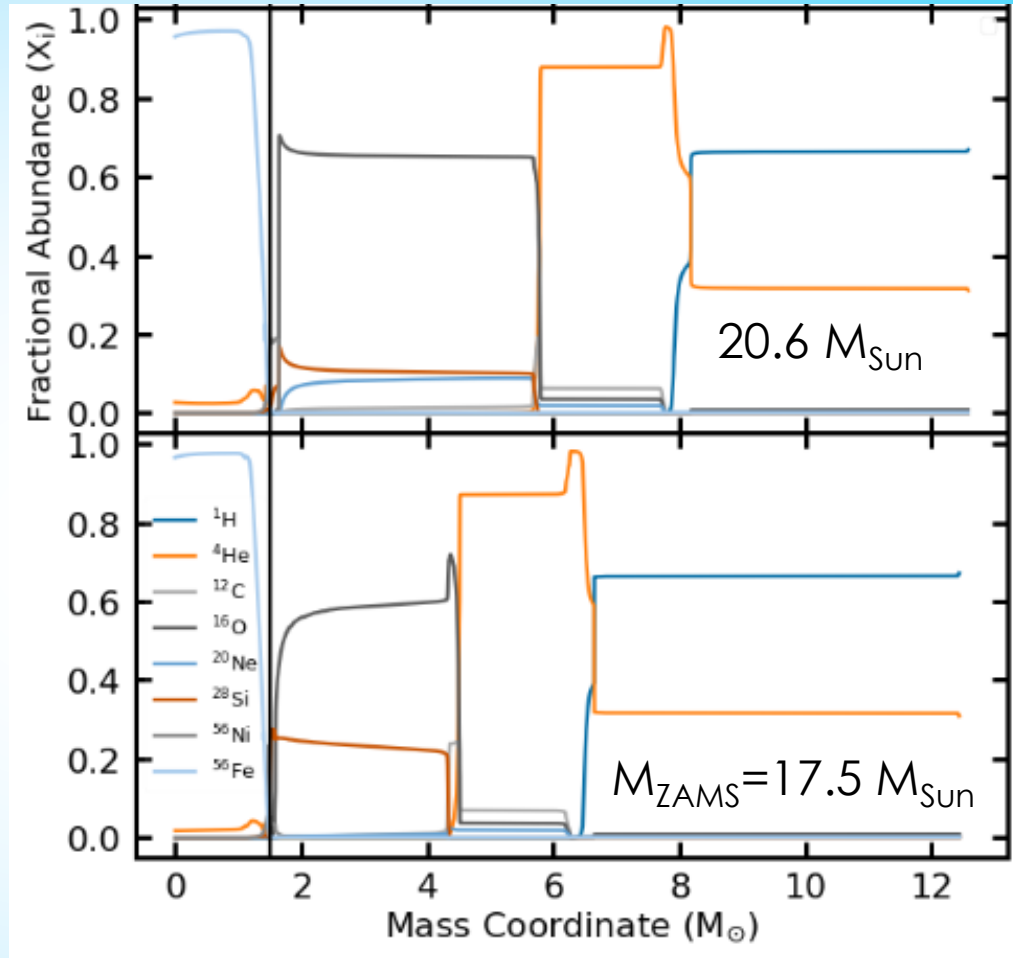
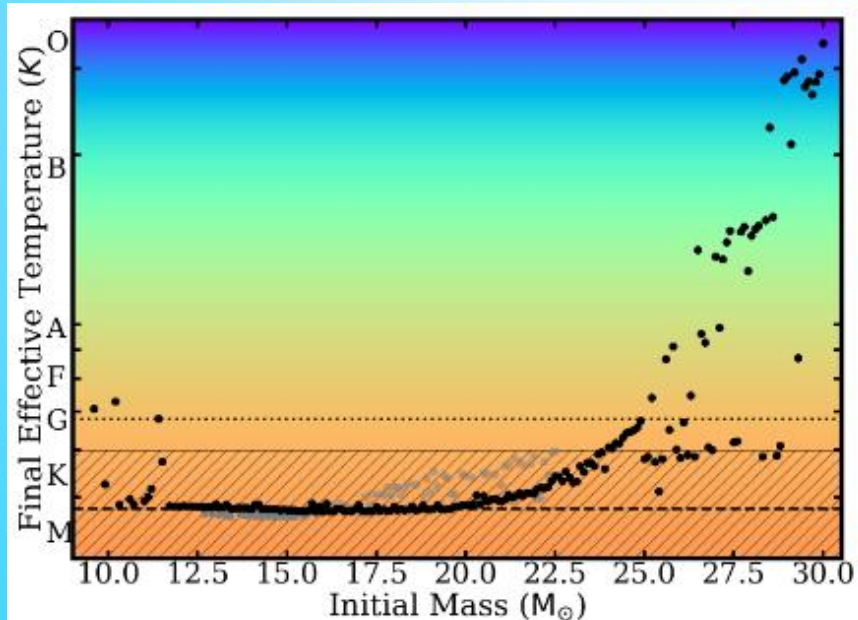
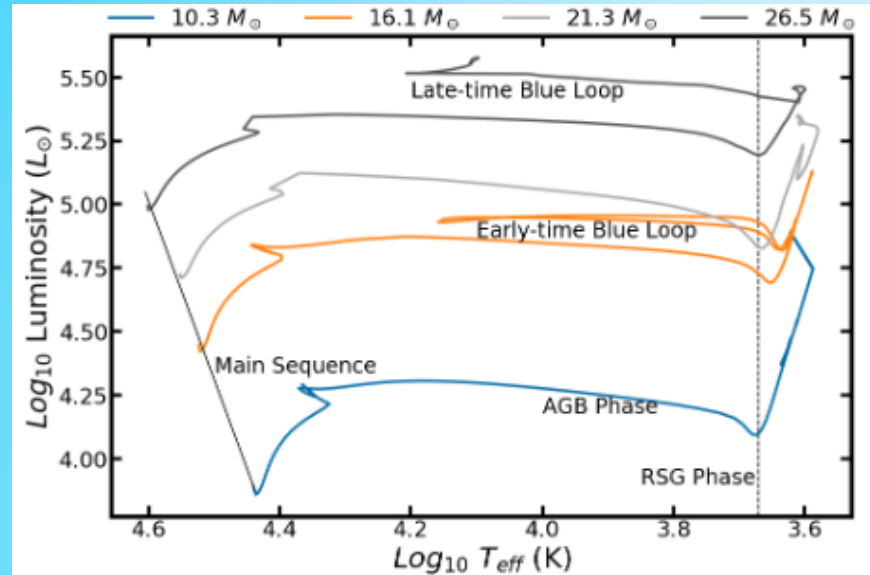


Расчеты  
прародителей  
для SN1987A.

1510.04643

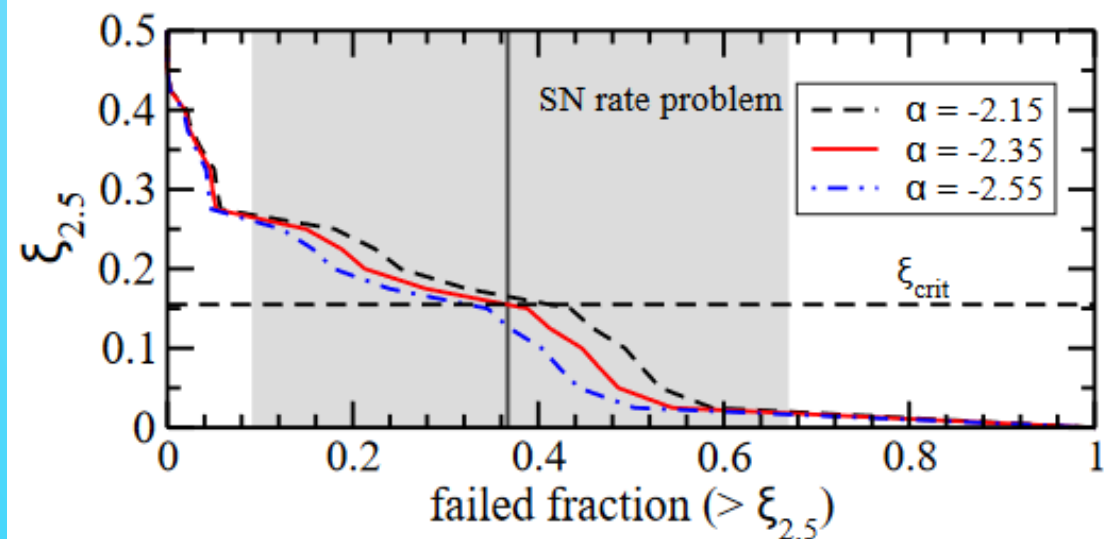
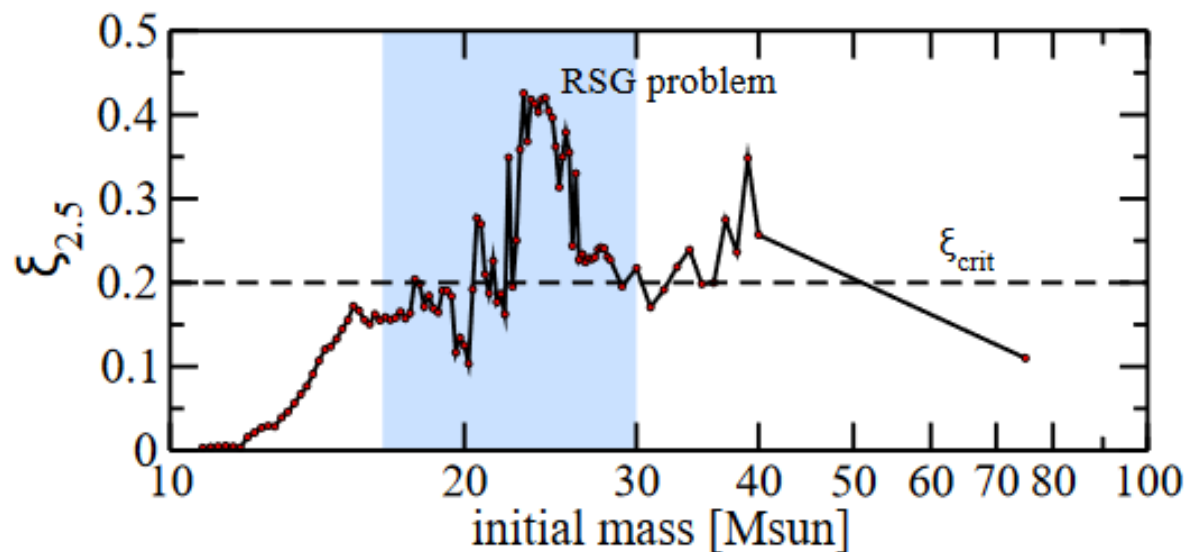
| model | $M_{\text{preSN}}/M_{\odot}$ | $M_{\text{He}}/M_{\odot}$ | $M_{\text{CO}}/M_{\odot}$ | $L/10^{38} \text{ erg s}^{-1}$ | $T_{\text{eff}}$ | $\zeta_{2.5}$ | $Z/Z_{\odot}$ | Rotation |
|-------|------------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------------------------|------------------|---------------|---------------|----------|
| W18   | 16.93                        | 7.39                      | 3.06                      | 8.04                           | 18000            | 0.10          | 1/3           | Yes      |
| N20   | 16.3                         | 6                         | 3.76                      | 5.0                            | 15500            | 0.12          | low           | No       |
| S19.8 | 15.85                        | 6.09                      | 4.49                      | 5.65                           | 3520             | 0.13          | 1             | No       |
| W15   | 15                           | 4.15                      | 2.02                      | 2.0                            | 15300            | -             | 1/4           | No       |
| W20   | 19.38                        | 5.78                      | 2.32                      | 5.16                           | 13800            | 0.059         | 1/3           | No       |
| W16   | 15.37                        | 6.55                      | 2.57                      | 6.35                           | 21700            | 0.11          | 1/3           | Yes      |
| W17   | 16.27                        | 7.04                      | 2.82                      | 7.31                           | 20900            | 0.11          | 1/3           | Yes      |
| W18x  | 17.56                        | 5.12                      | 2.12                      | 4.11                           | 19000            | 0.10          | 1/3           | Yes      |
| S18   | 14.82                        | 5.39                      | 3.87                      | 4.83                           | 3520             | 0.19          | 1             | No       |

# СТРУКТУРА ПРЕДСВЕРХНОВОЙ



2103.07980

# ПРОБЛЕМА НЕХВАТКИ КРАСНЫХ СВЕРХГИГАНТОВ

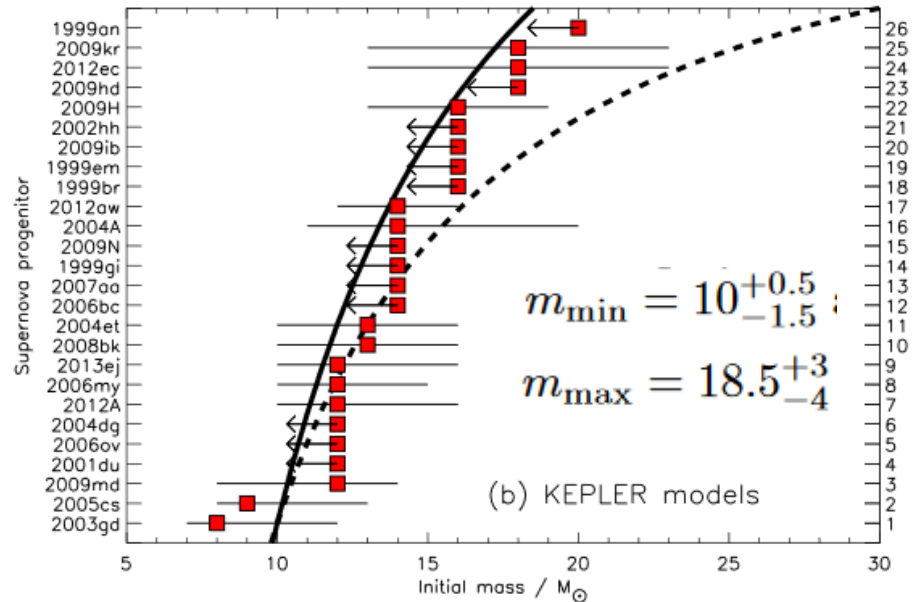
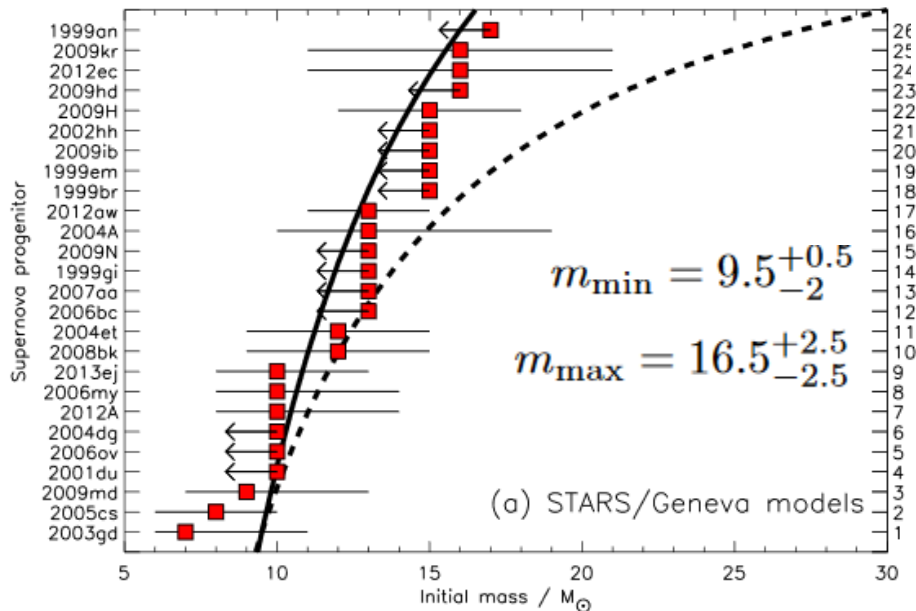


1409.0006

# ПРЕДЕЛЬНАЯ МАССА?

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

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



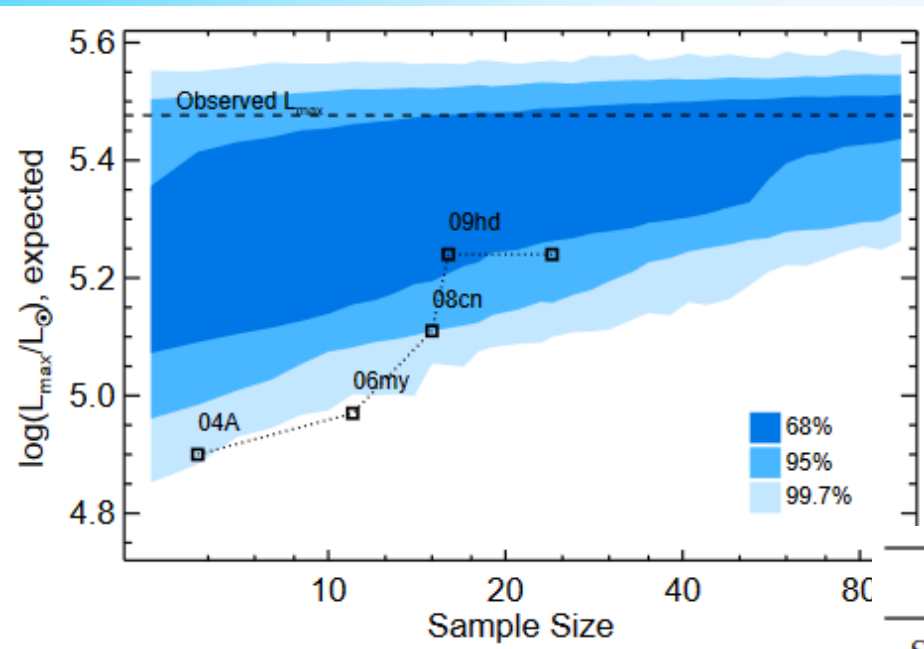
Пунктирная линия – Солпитевская функция.

1504.02635



# ДИСКУССИЯ ПО ПРОБЛЕМЕ КРАСНЫХ ГИГАНТОВ

2001.06020 – проблема на уровне 2-сигма;  
2001.07216 – проблема остается

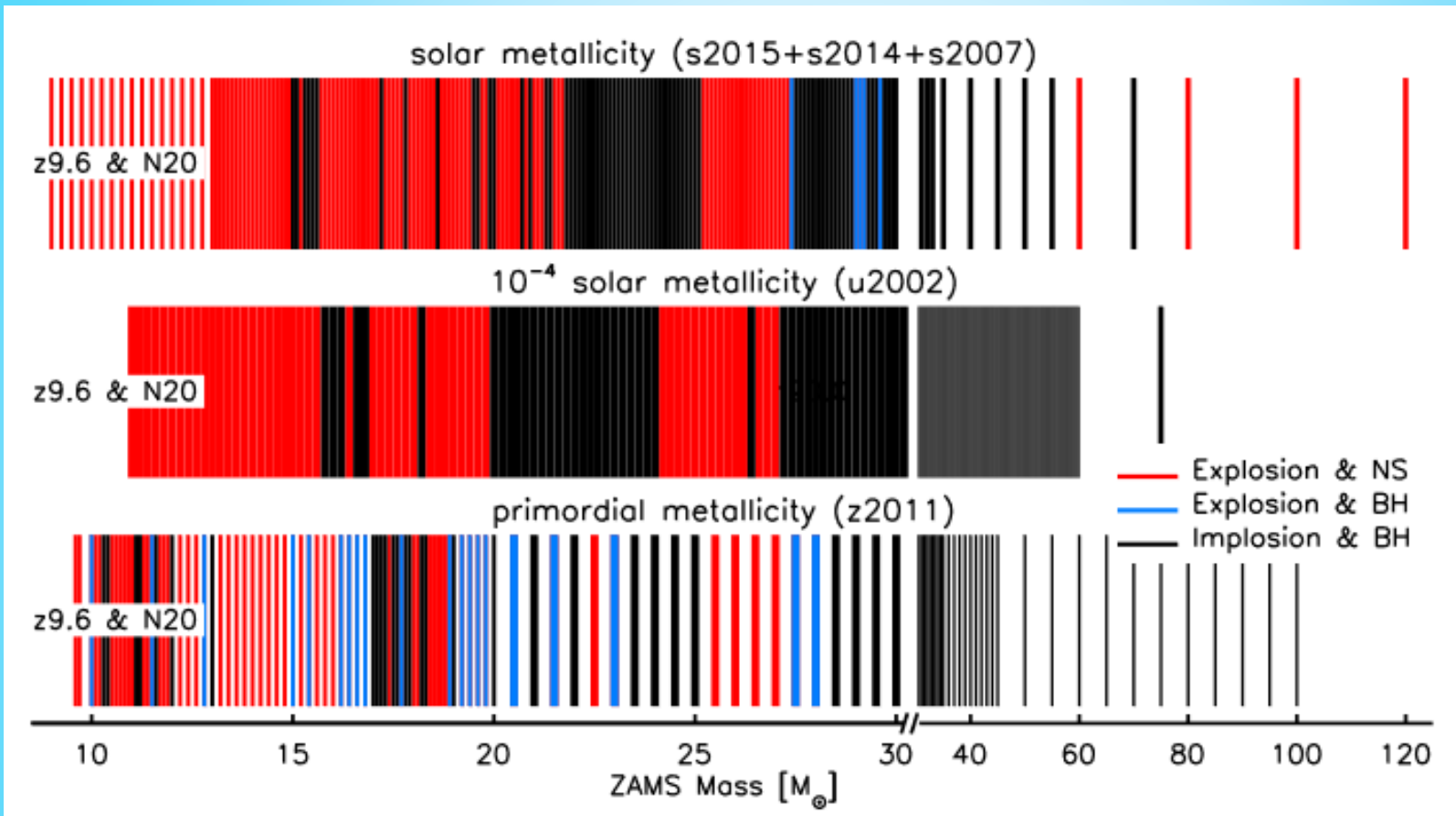


Решения:

- Изменения в звездной эволюции (часть массивных звезд взрываются не как красные сверхгиганты)
- Ошибки в определении светимости
- Статистика (см. рисунок)
- Нет CH для  $M > M_h$

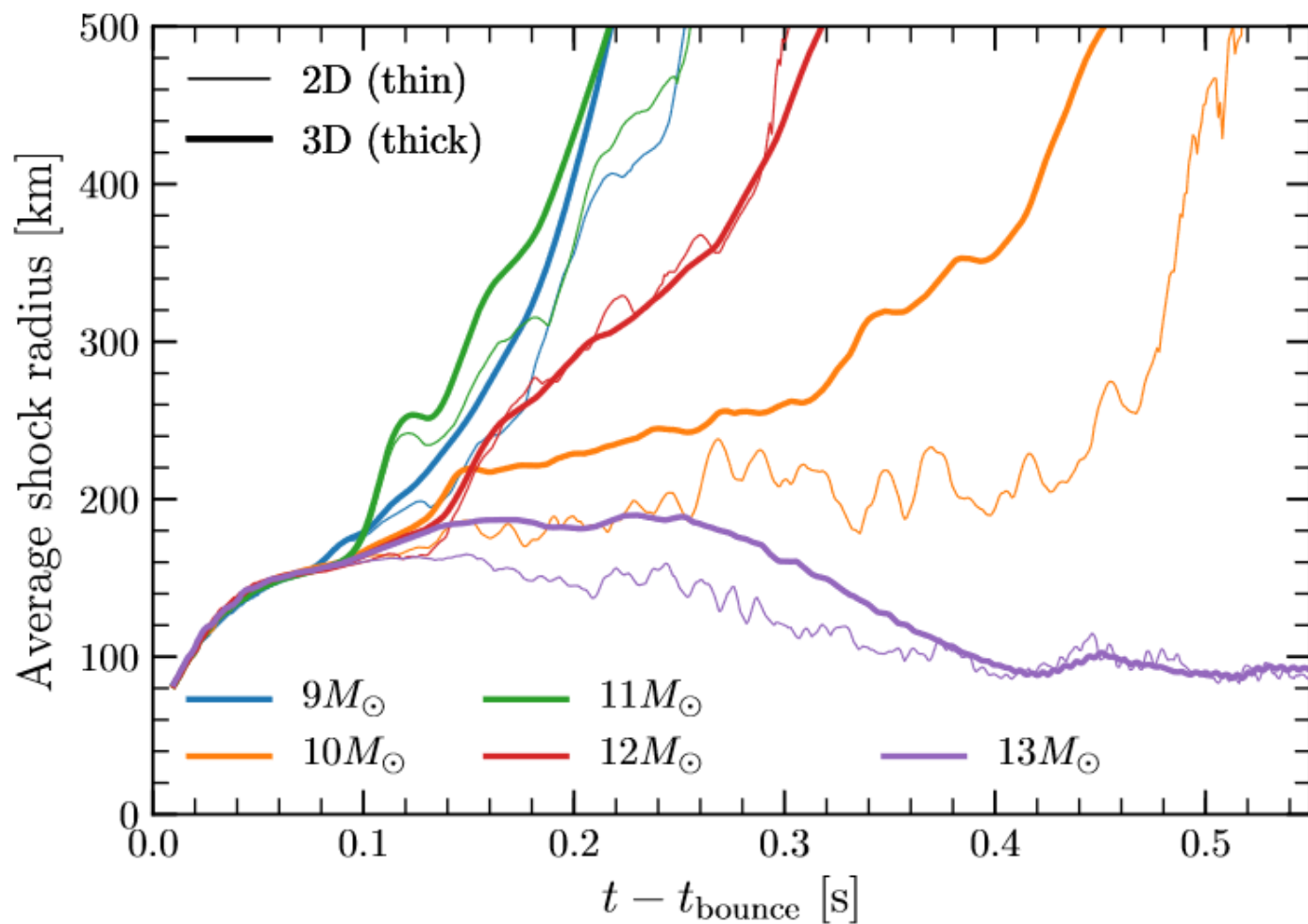
| Model                             | $M(L)$ | $M_l/M_\odot$          | $M_h/M_\odot$           |
|-----------------------------------|--------|------------------------|-------------------------|
| <u>Smartt (2015)</u>              | ET04   | $9.5^{+0.5}_{-2.0}$    | $16.5^{+2.5}_{-2.5}$    |
| <u>Davies &amp; Beasor (2018)</u> | ET04   | $7.5^{+0.3}_{-0.2}$    | $19.0^{+2.5}_{-1.3}$    |
| Davies                            | ET04   | $7.49^{+0.25}_{-0.27}$ | $19.05^{+2.22}_{-1.30}$ |
| Bayes                             | ET04   | $6.30^{+0.48}_{-0.54}$ | $19.01^{+4.04}_{-2.04}$ |
| <u>Smartt (2015)</u>              | S18    | $10.0^{+0.5}_{-1.5}$   | $18.5^{+3.0}_{-4.0}$    |
| Davies                            | S18    | $8.38^{+0.28}_{-0.30}$ | $21.33^{+2.48}_{-1.46}$ |
| Bayes                             | S18    | $7.06^{+0.54}_{-0.61}$ | $21.28^{+4.52}_{-2.28}$ |

# 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).

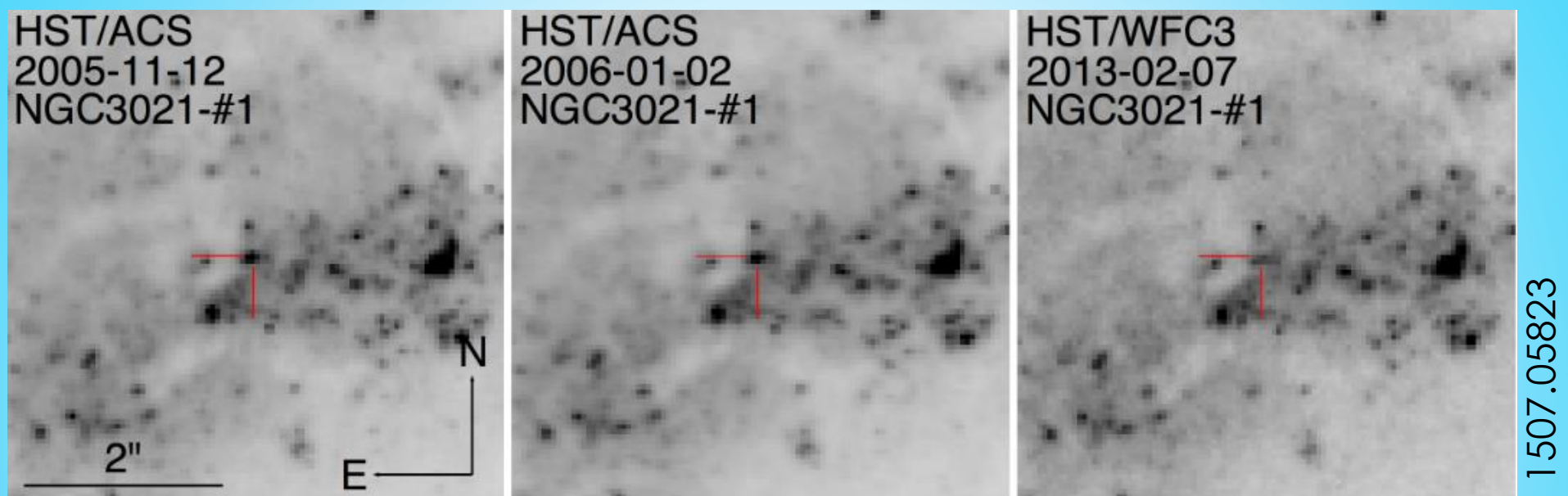
# ПРИМЕР НЕДАВНИХ РАСЧЕТОВ



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

1902.00547

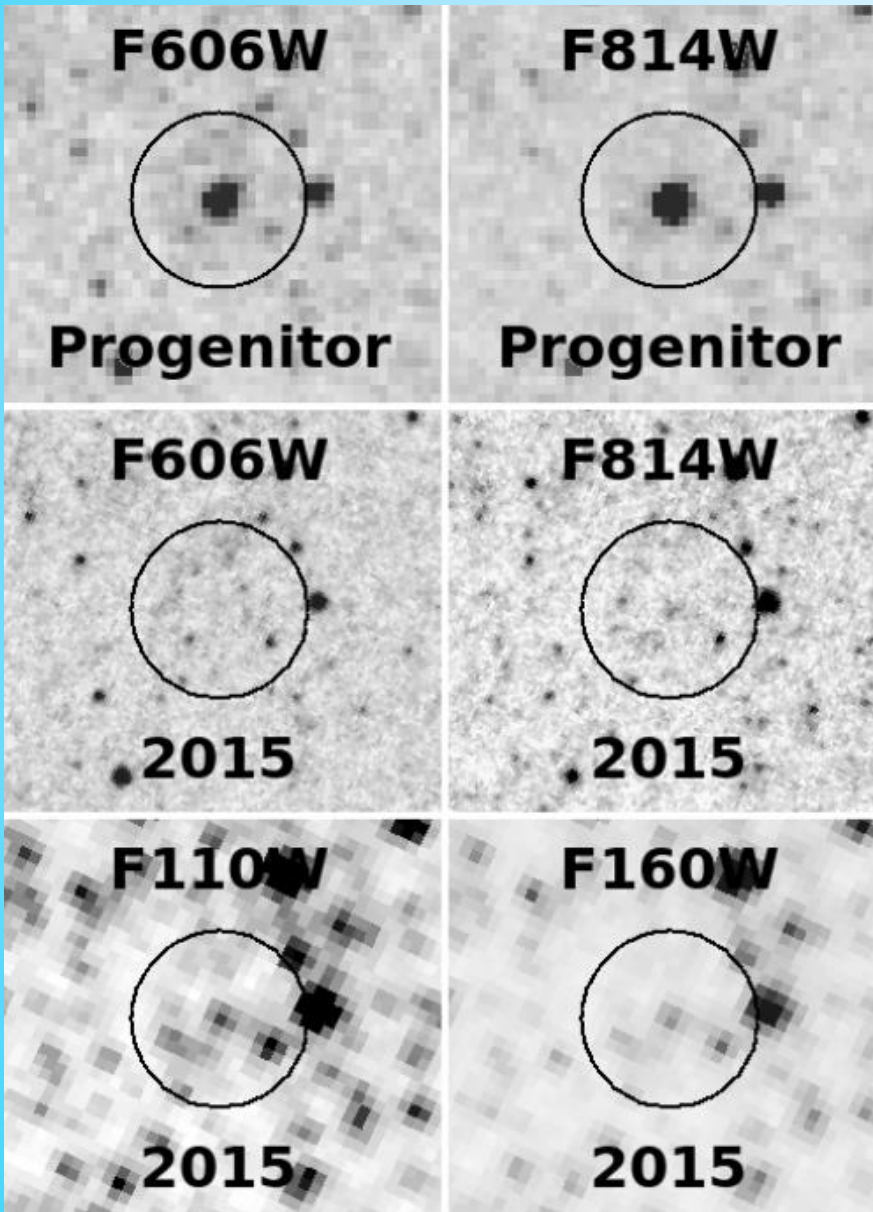
# ИСЧЕЗНОВЕНИЕ ЖЕЛТОГО СВЕРХГИГАНТА



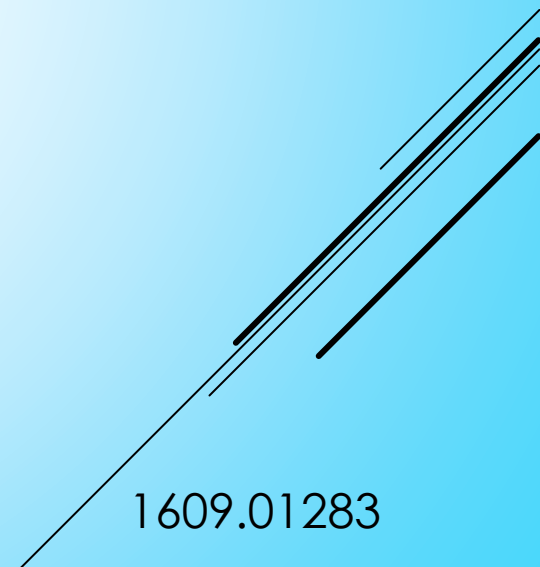
Масса 25-30 масс Солнца

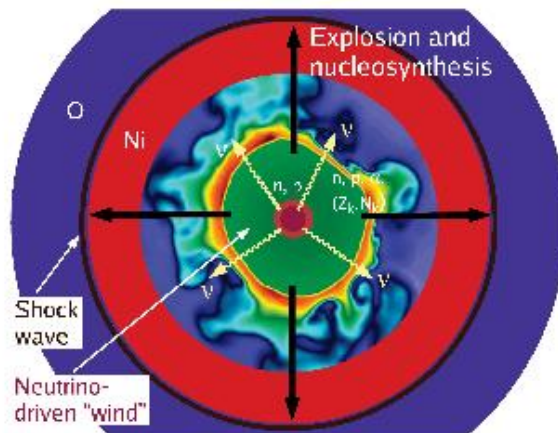
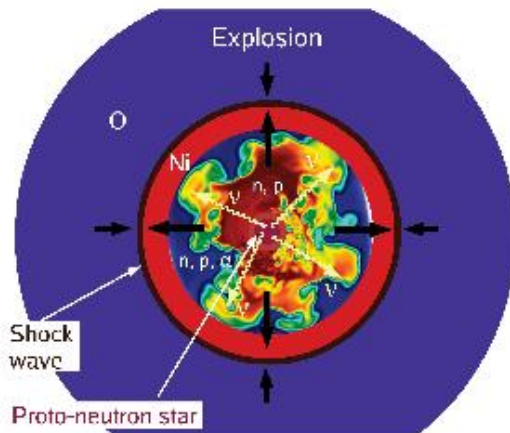
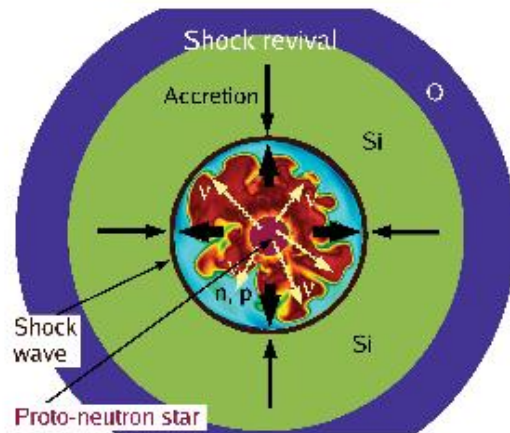
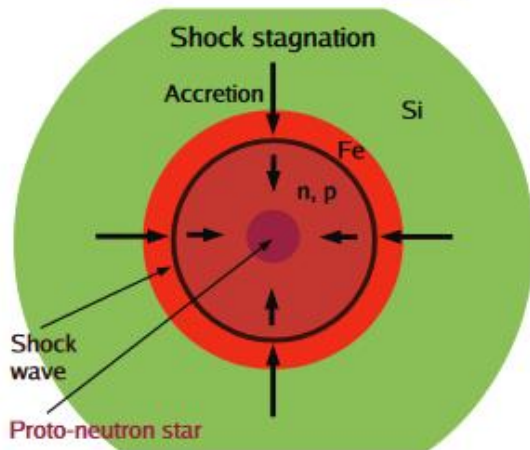
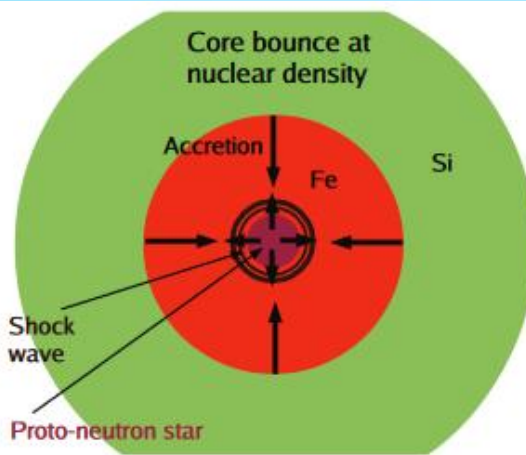
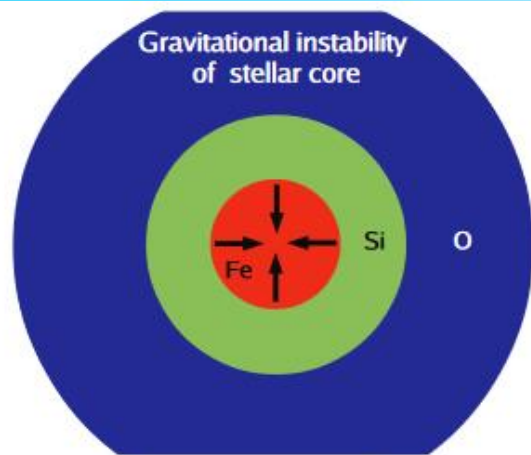


# ИСЧЕЗНОВЕНИЕ КРАСНОГО СВЕРХГИГАНТА



25 масс Солнца.

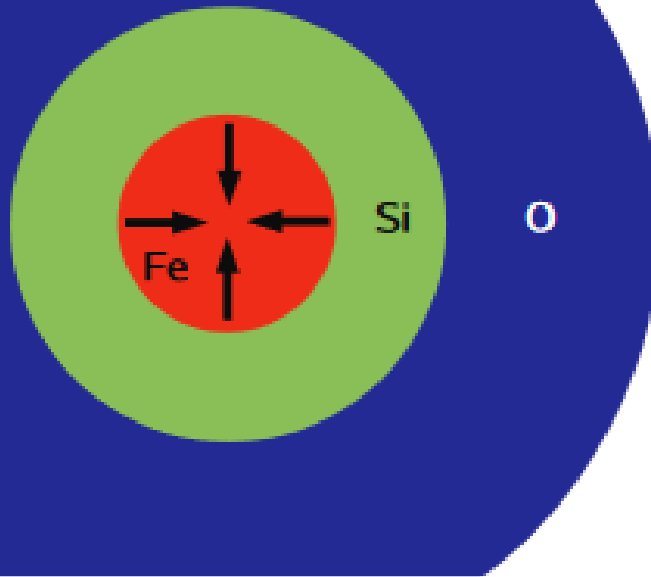




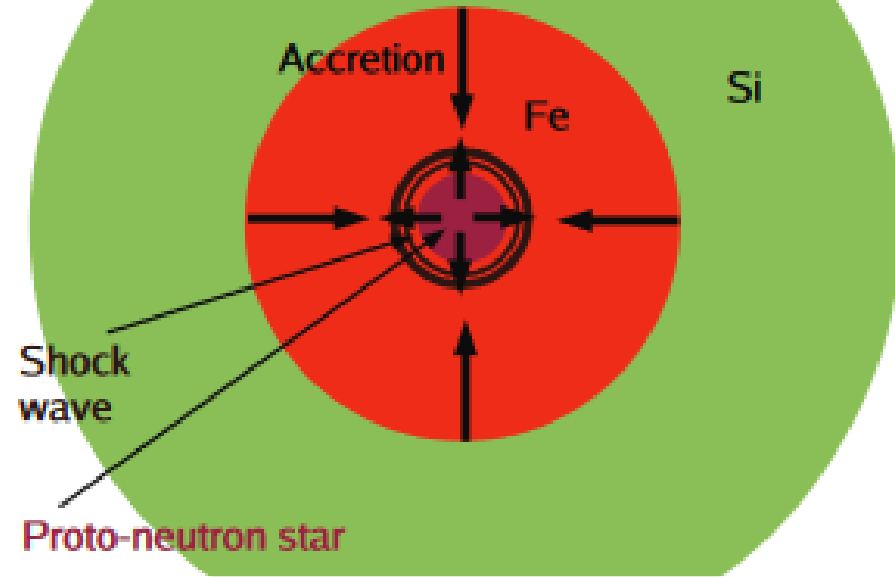
Основные стадии  
сверхновой с коллапсом.

1211.1378

Gravitational instability  
of stellar core



Core bounce at  
nuclear density

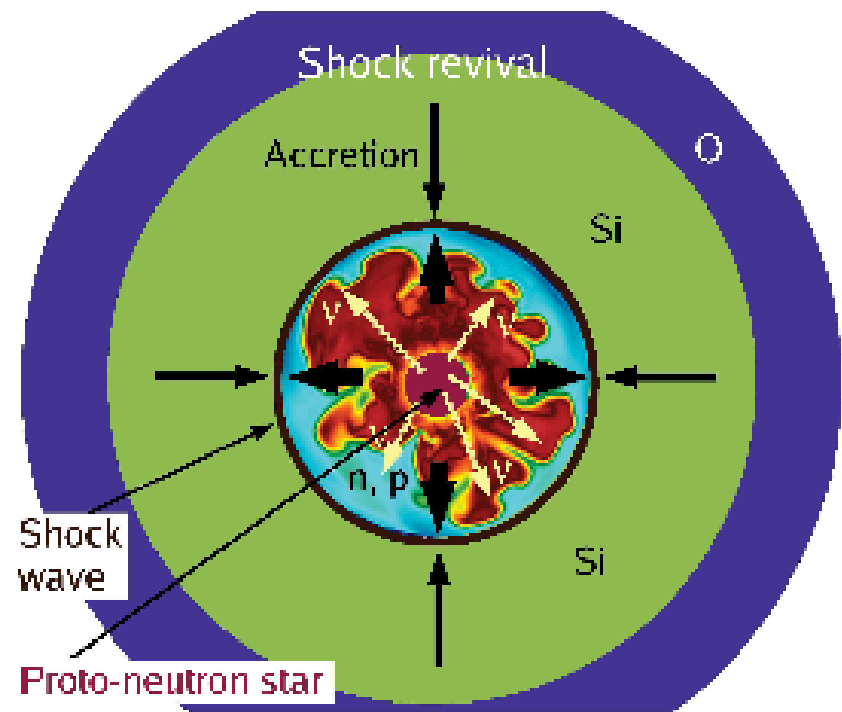
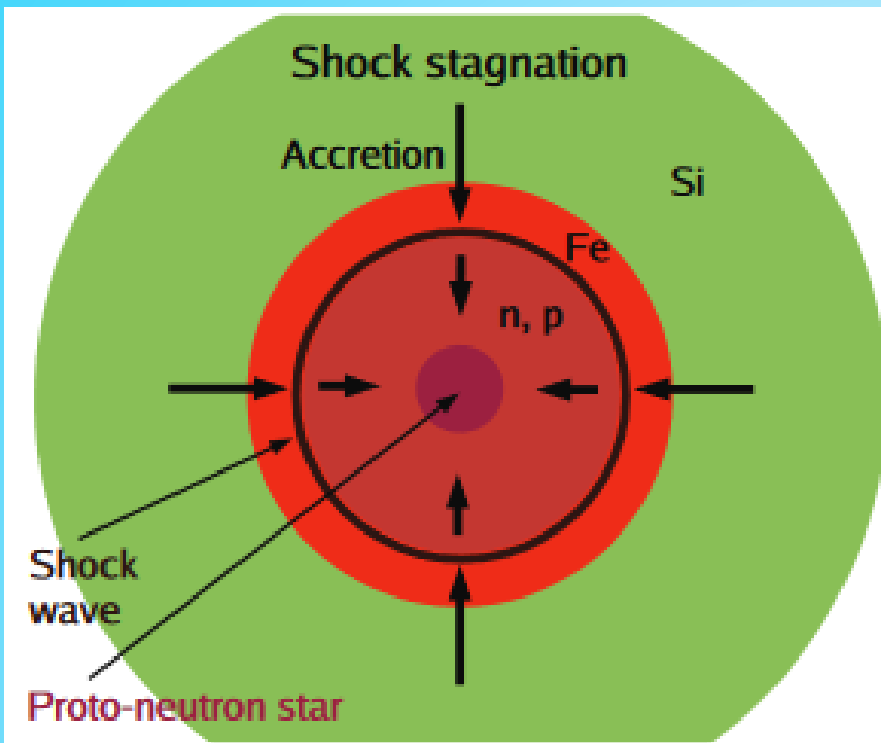


Коллапс начинается после потери устойчивости ядра звезды ( $\gamma < 4/3$ ).

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

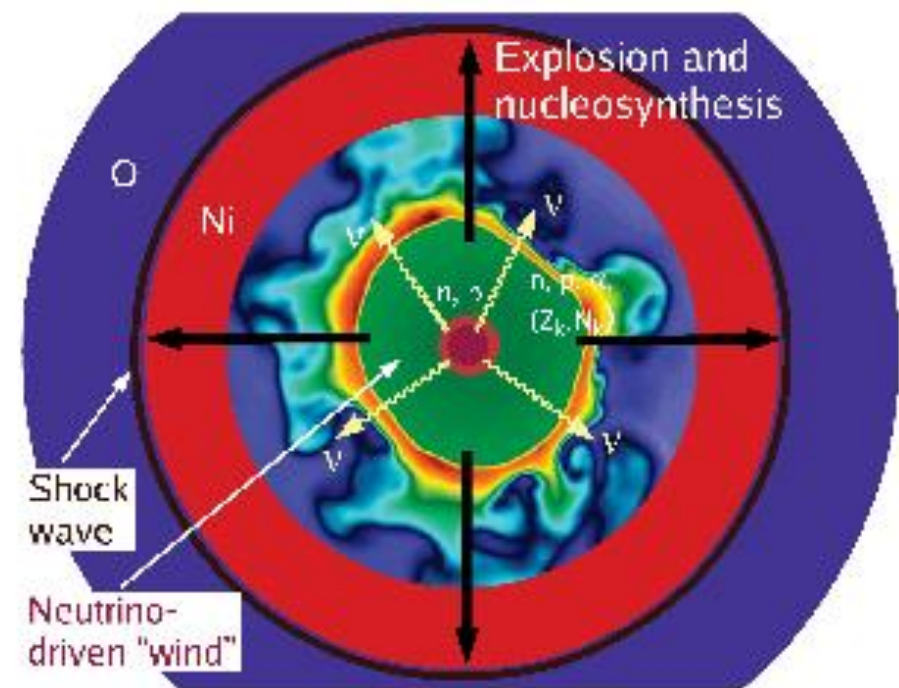
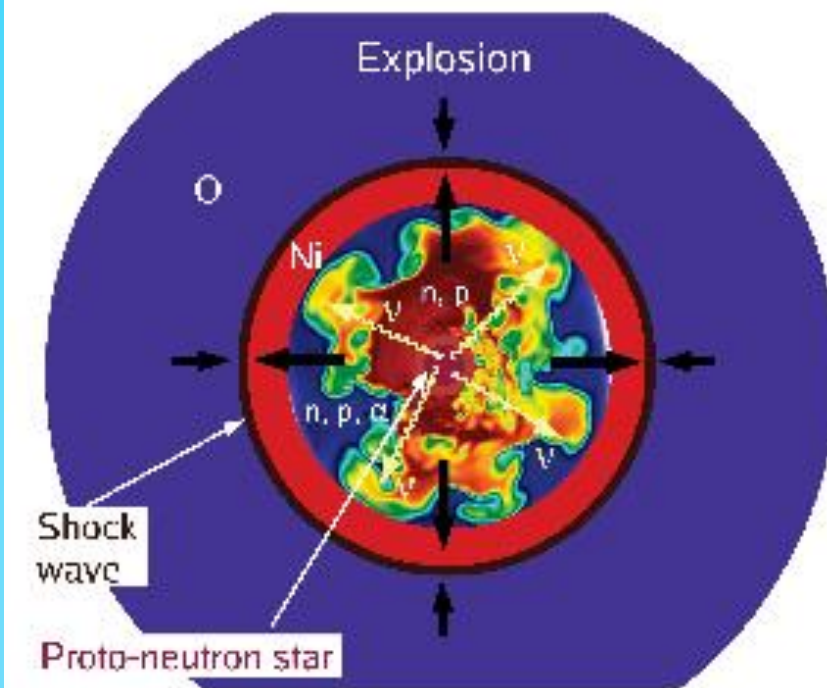
Вещество, прошедшее волну, начинает двигаться к центру  
 через 1-2 мсек после возникновения ударной волны  
 (т.е., после «отскока»).

Необходим механизм для передачи дополнительной  
 энергии ударной волне.



1211.1378





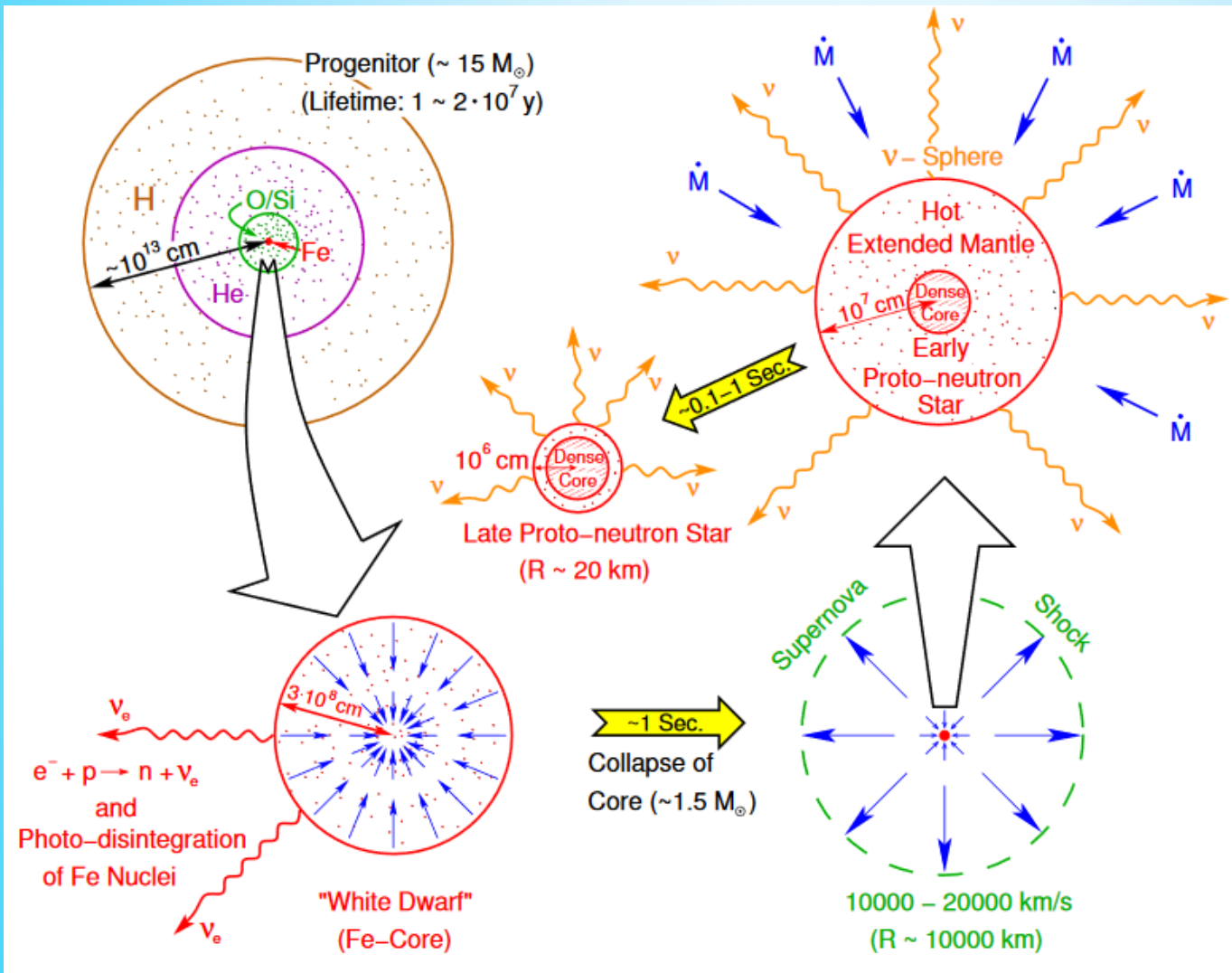
Волна останавливается на расстоянии  $\sim 100\text{-}200$  км от центра.

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

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

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

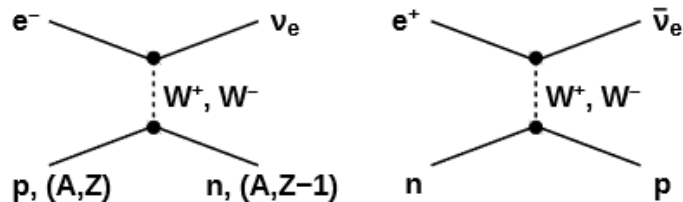
# СТАДИИ СВЕРХНОВОЙ И НЕЙТРИНО



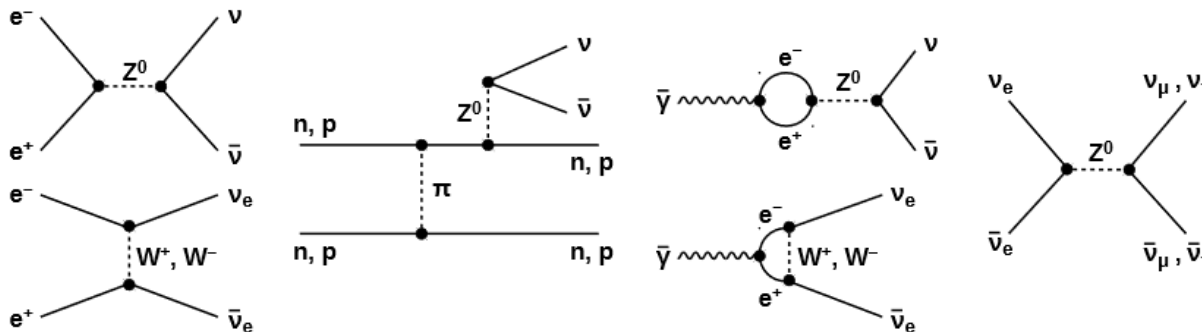
# НЕЙТРИННЫЕ ПРОЦЕССЫ

## Neutrino Reactions in Supernovae

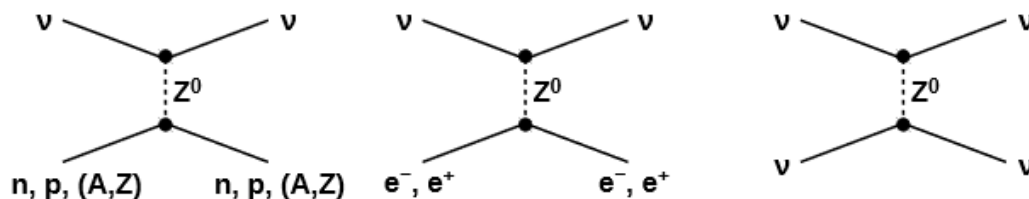
### CC $\beta$ -processes



### 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:

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

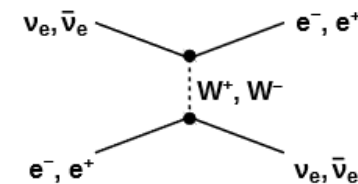
### Thermal pair processes:

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

### 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



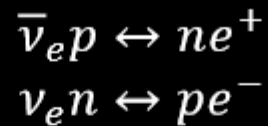
1211.1378

1702.08713

# ЭЛЕКТРОННЫЕ И ... ПРОЧИЕ

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

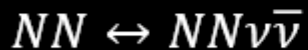
Thermal Equilibrium



Free  
streaming

Neutrino sphere

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



Scattering Atmosphere



Diffusion

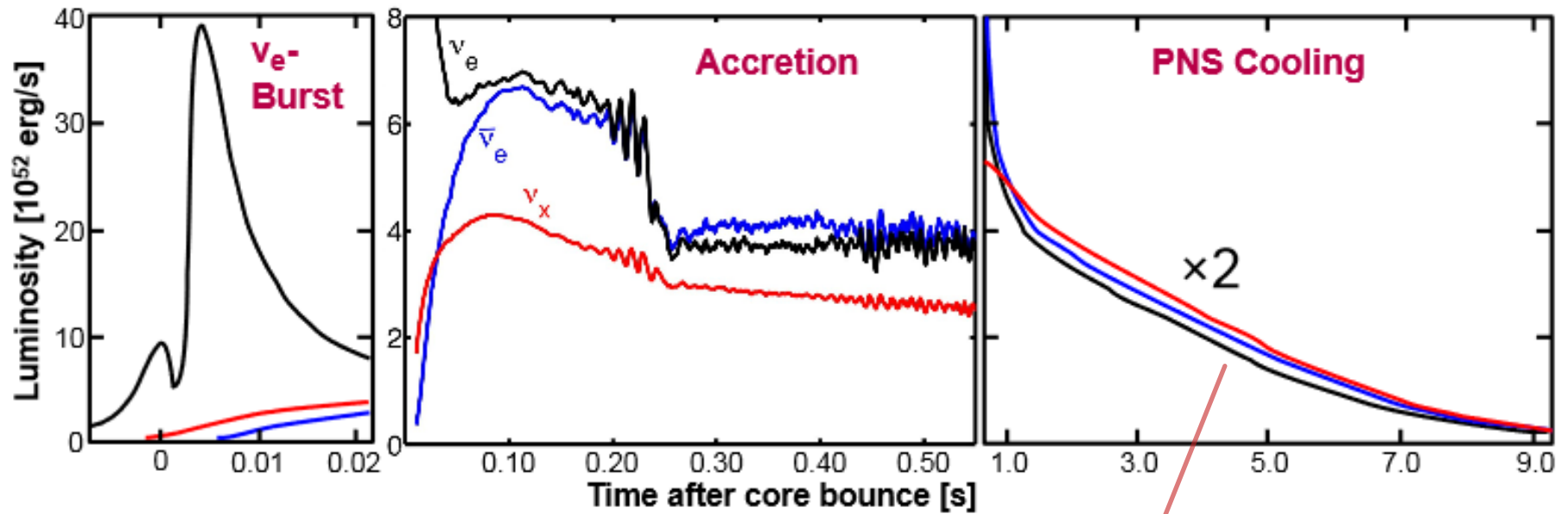
Free  
streaming

Energy sphere

Transport sphere

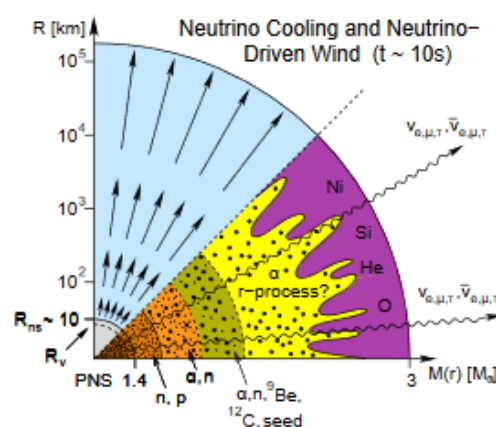
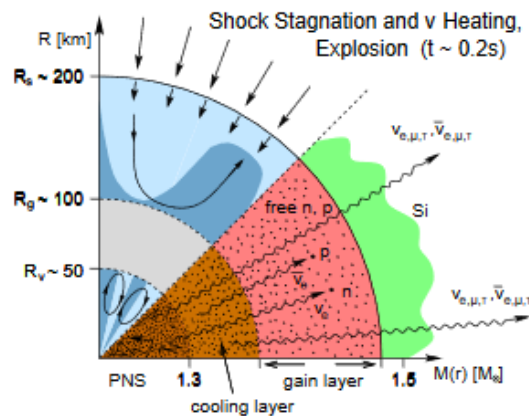
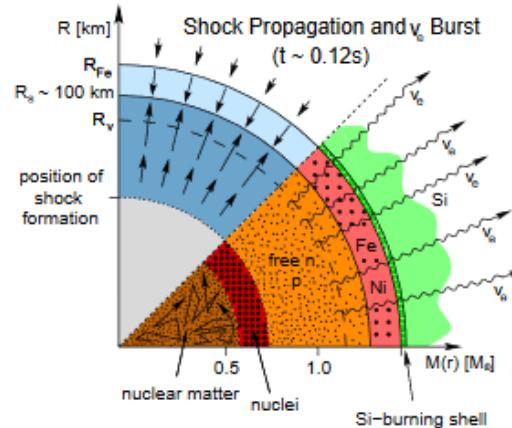
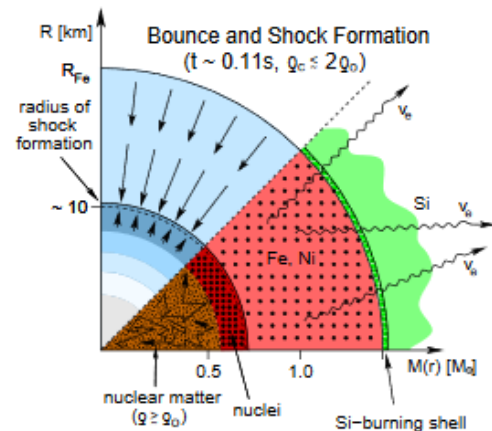
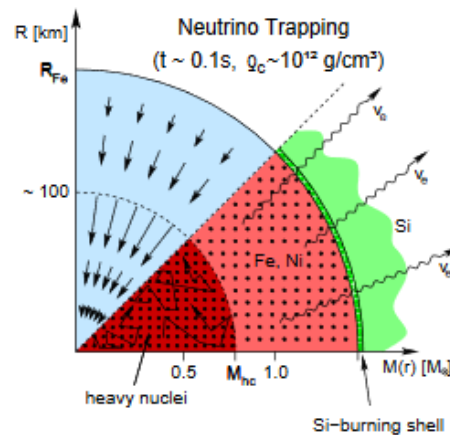
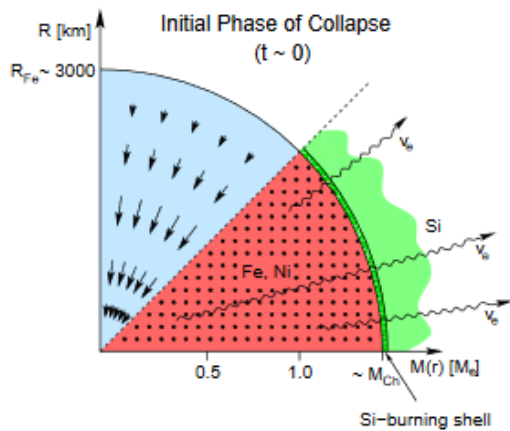


# НЕЙТРИННАЯ СВЕТИМОСТЬ



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

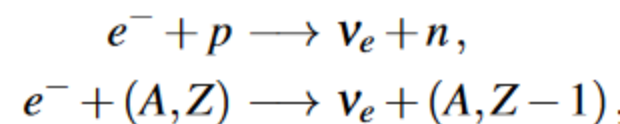
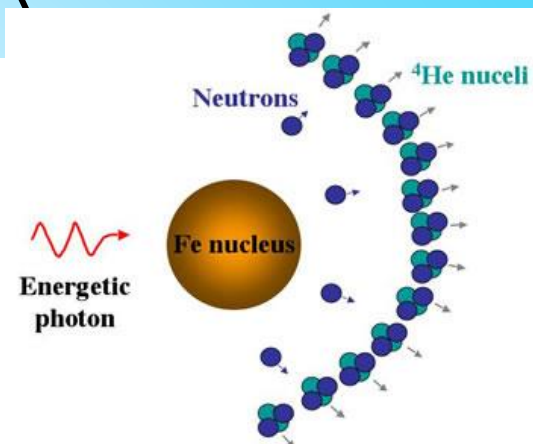
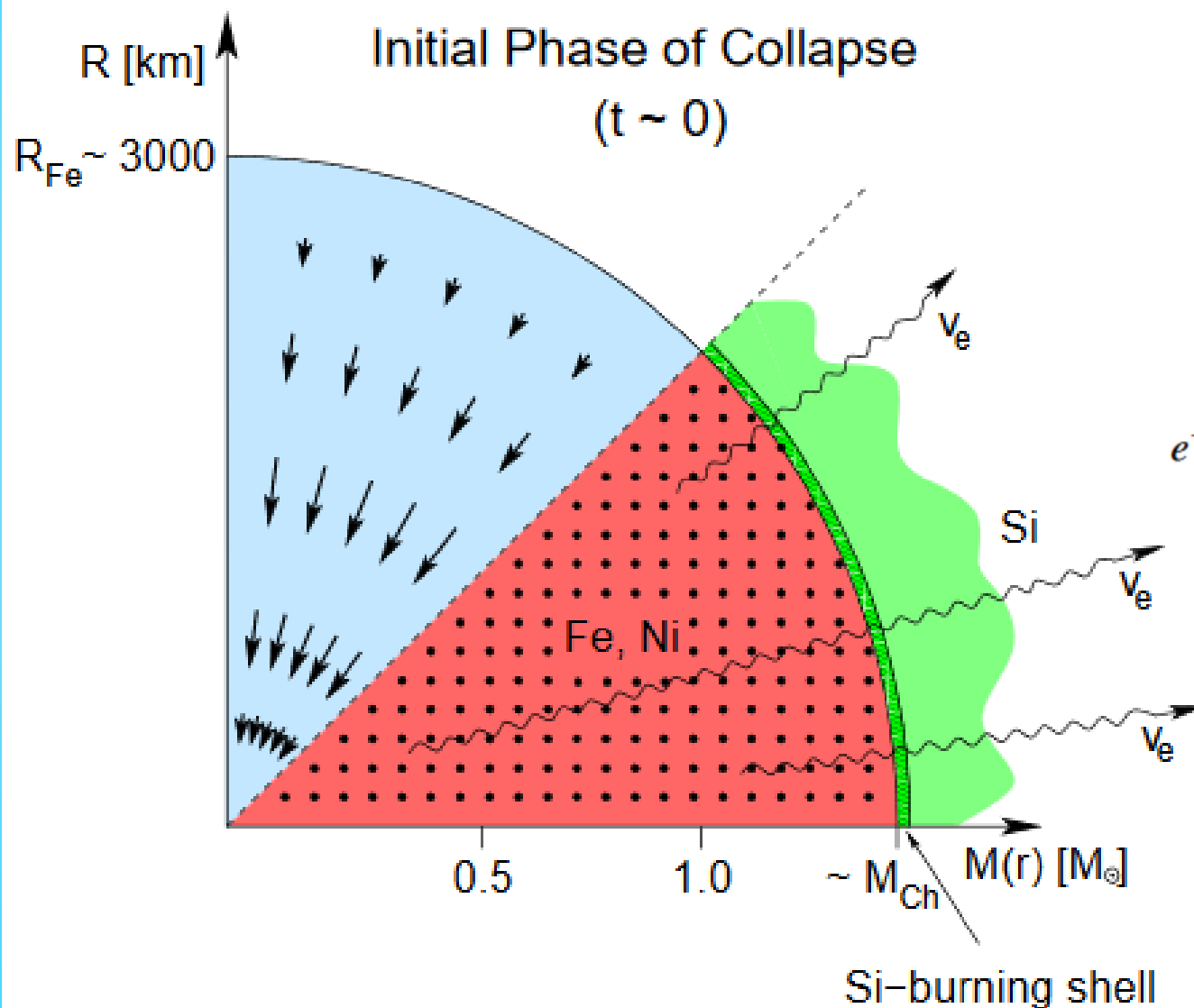
Типичная энергия нейтрино  $\sim 10$  МэВ.



## 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.

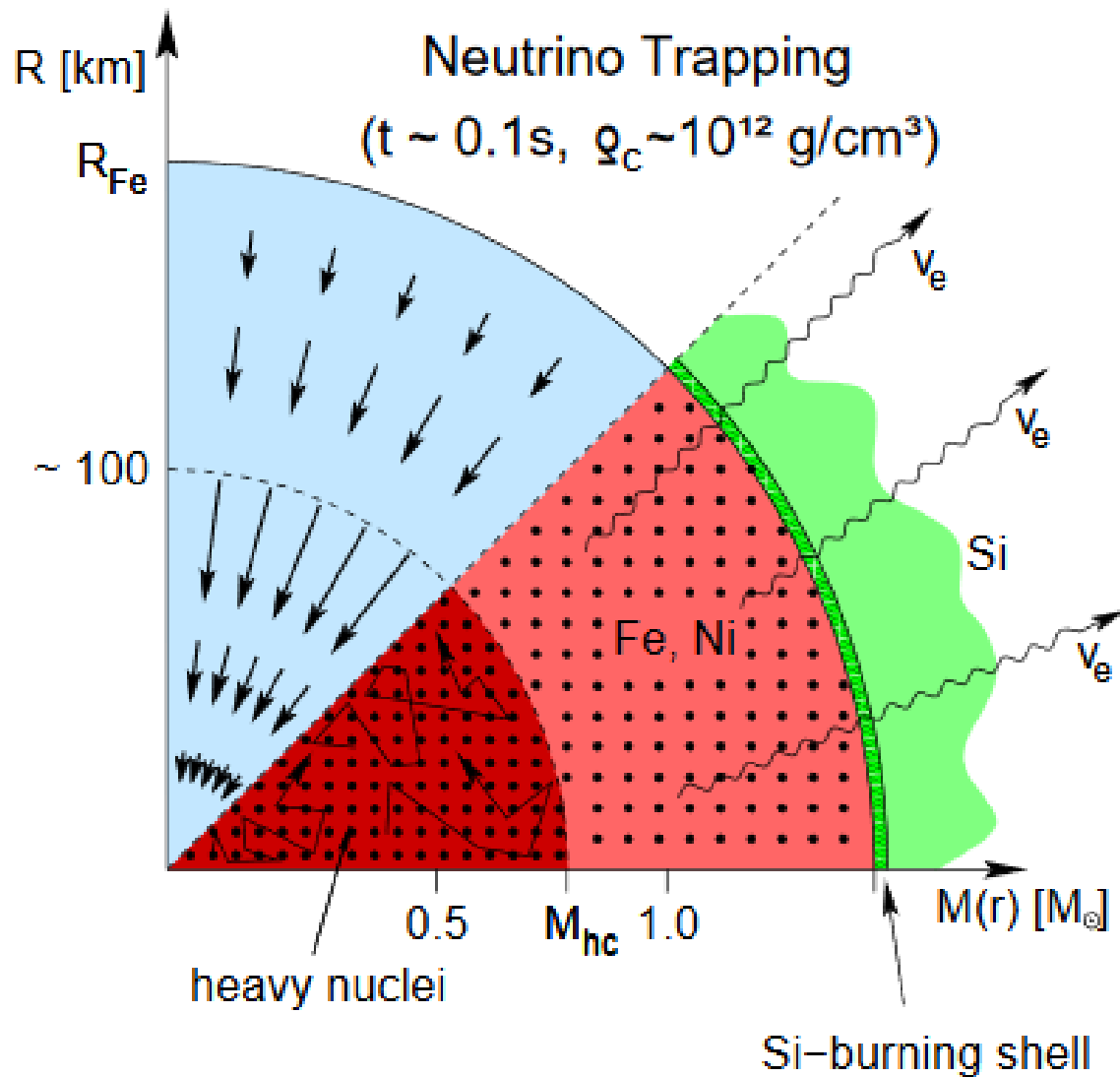
# НАЧАЛЬНАЯ ФАЗА КОЛЛАПСА



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

astro-ph/0612072

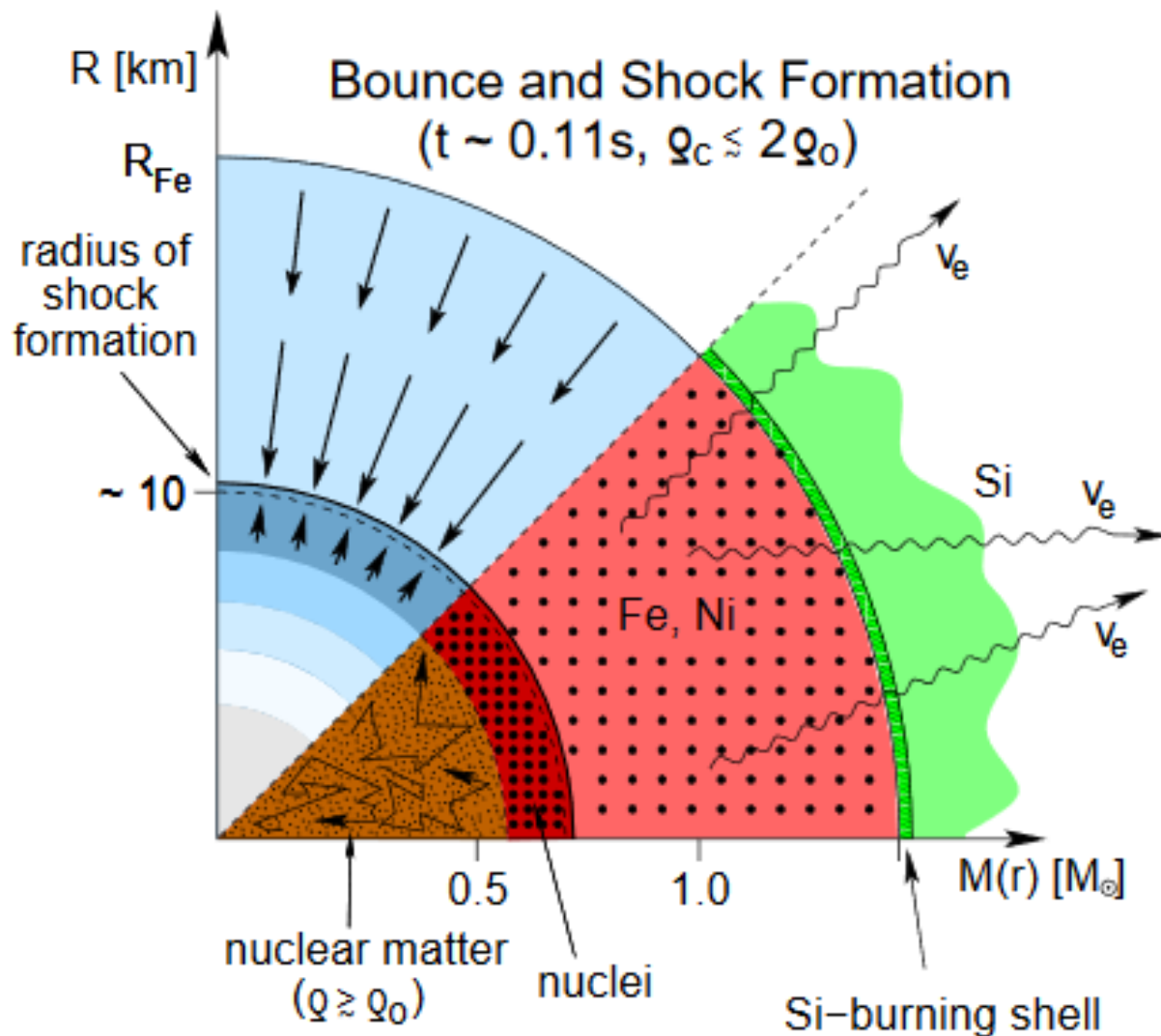
# ЗАХВАТ НЕЙТРИНО



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



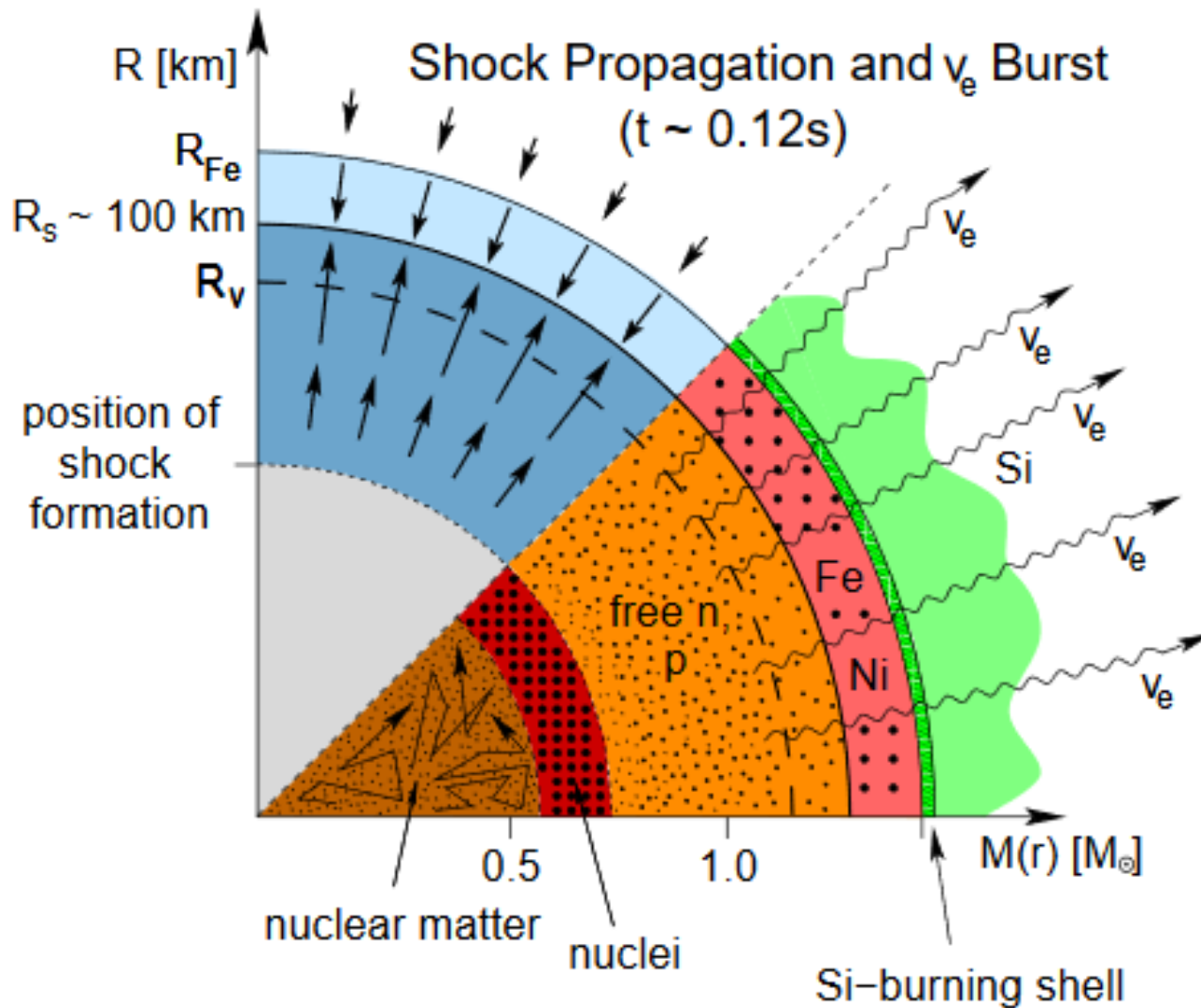
# ОТСКОК И ФОРМИРОВАНИЕ УДАРНОЙ ВОЛНЫ



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

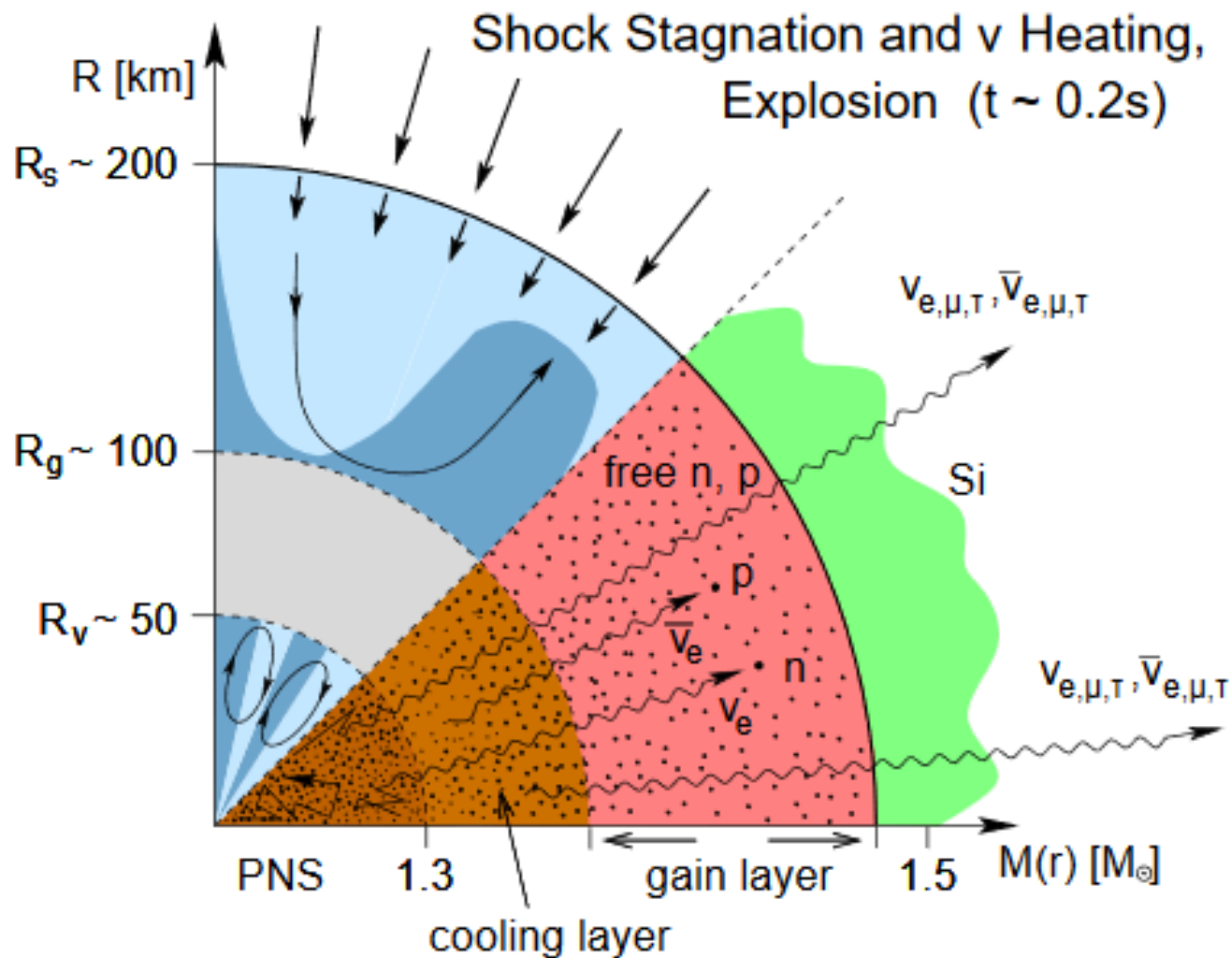
$$t_{\text{ff}} \sim \frac{1}{\sqrt{G\rho}} \sim \frac{0.004}{\sqrt{\rho_{12}}} \text{ s}$$

# ДВИЖЕНИЕ УДАРНОЙ ВОЛНЫ И НЕЙТРИННЫЙ ВСПЛЕСК



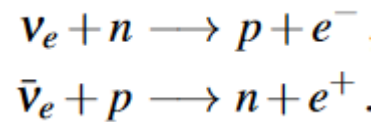
Когда ударная волна достигает области с низкой плотностью происходит нейтринный всплеск, т.к. ранее нейтрино были захвачены.

# ЗАМЕДЛЕНИЕ УДАРНОЙ ВОЛНЫ И НЕЙТРИННЫЙ НАГРЕВ

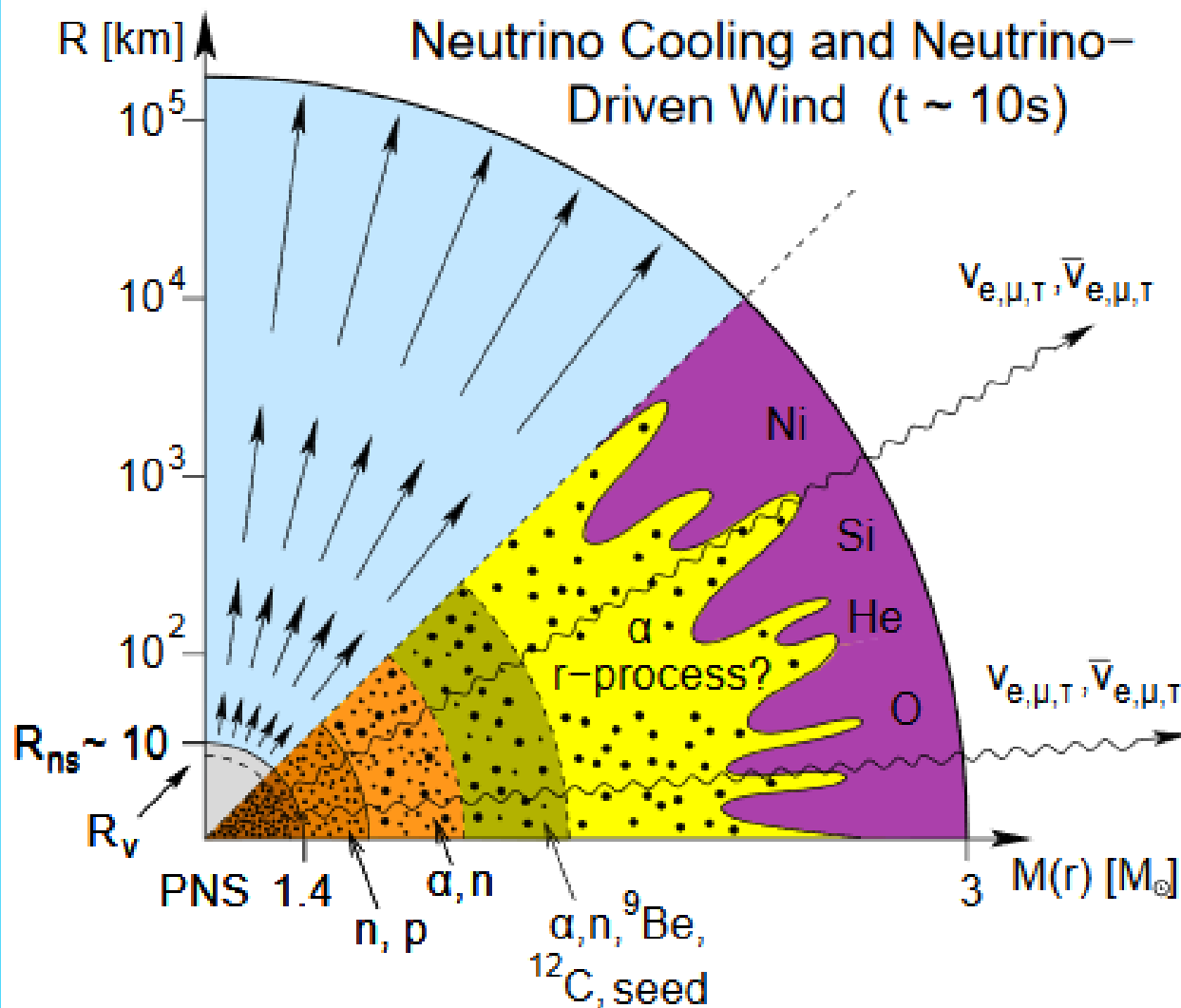


Из-за диссоциации ядер железа ударная волна замедляется.  
8.8 МэВ на нуклон, т.е.  $1.7 \cdot 10^{51}$  эрг для 0.1 массы Солнца.

Нейтрино могут передать свою энергию волне.



# НЕЙТРИННОЕ ОХЛАЖДЕНИЕ И НЕЙТРИННЫЙ ВЕТЕР



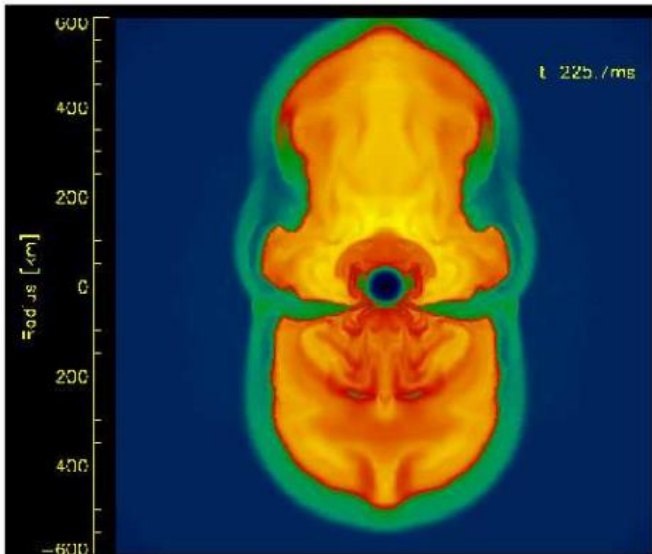
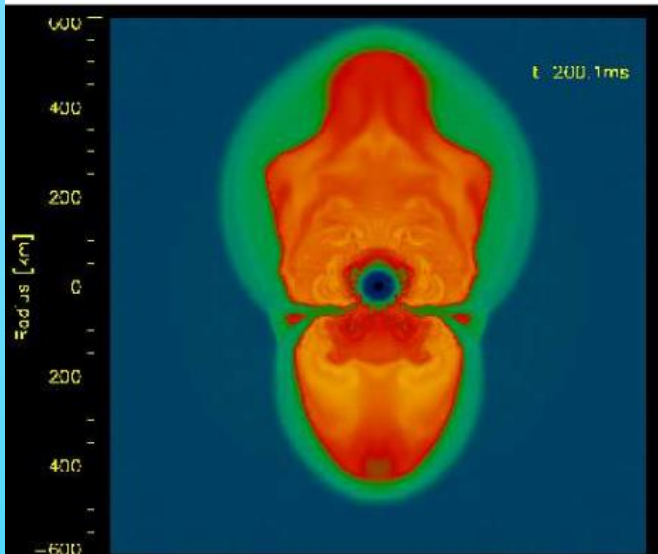
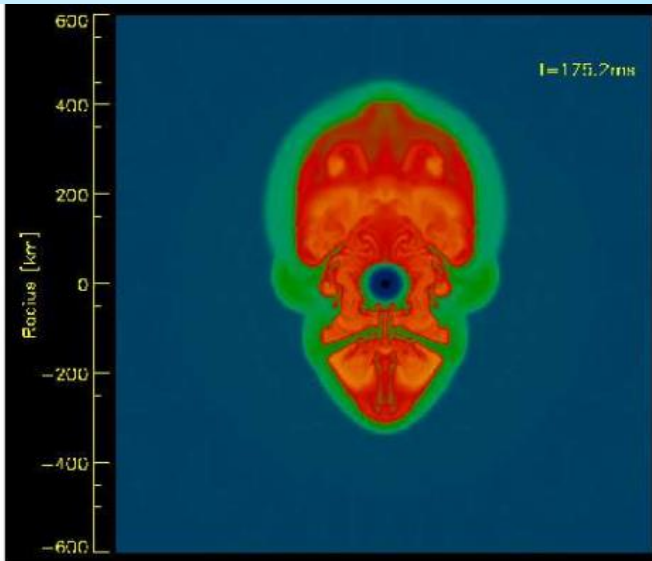
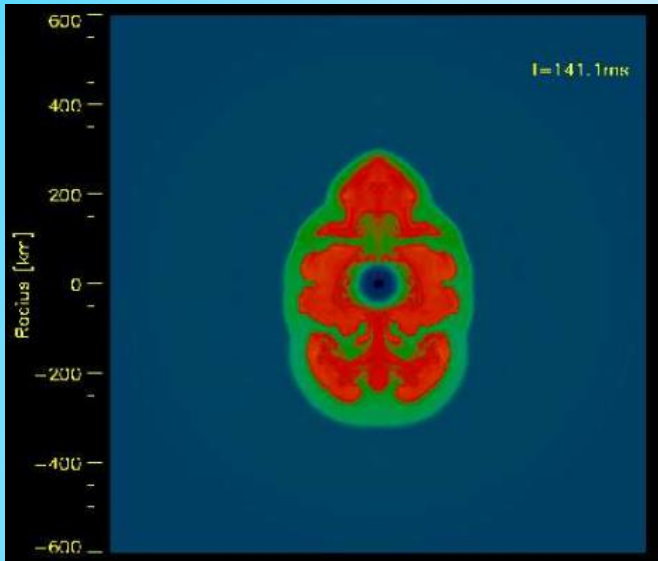
$$t_E \sim \frac{3R_{\text{ns}}^2}{\pi^2 c \lambda_0} \frac{E_{\text{th}}^0}{2E_V^0} \sim 10 \text{ s},$$

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

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

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

# ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ НЕУСТОЙЧИВОСТИ. SASI

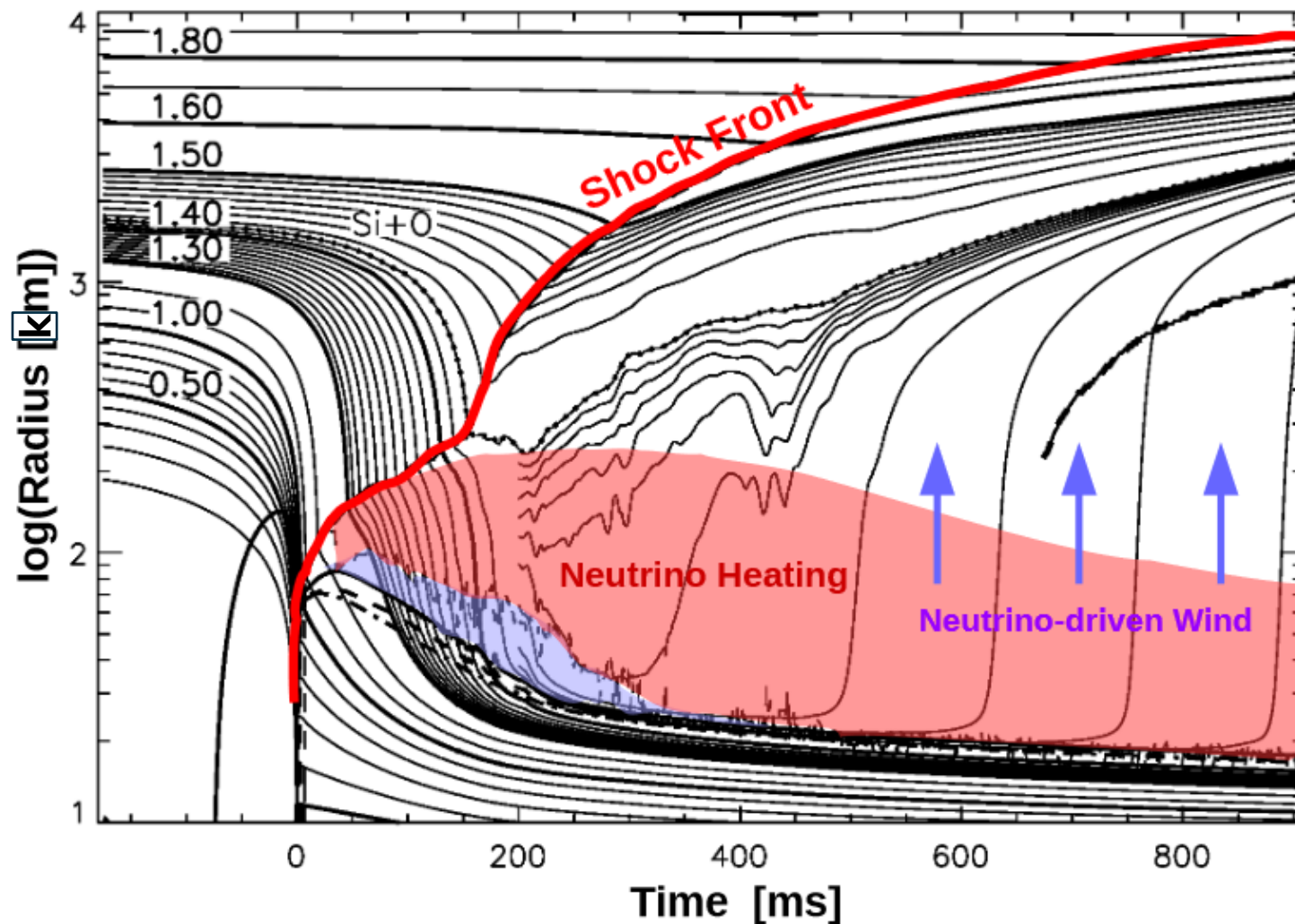


Standing  
Accretion  
Shock  
Instability

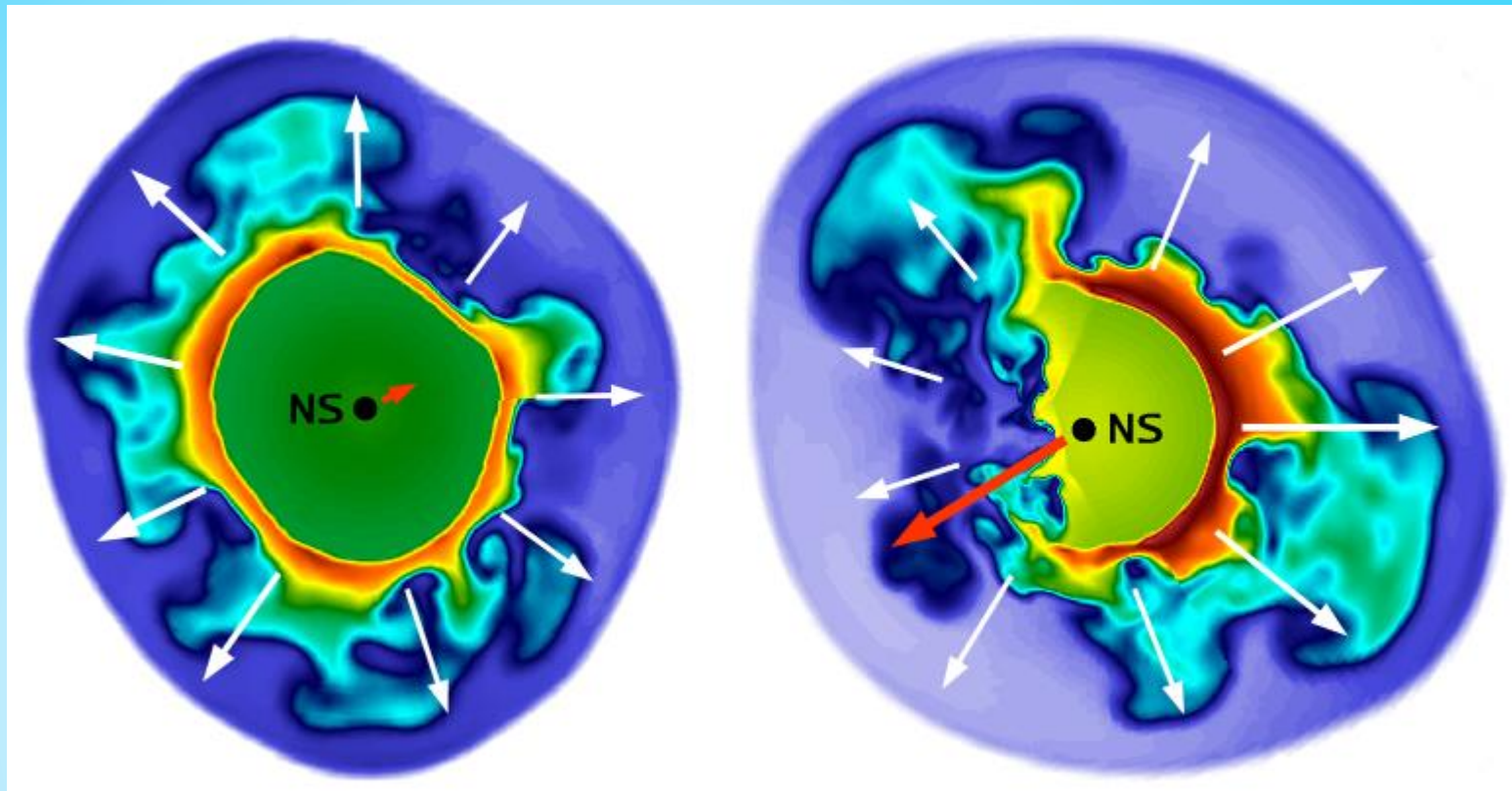
astro-ph/0612072



# ВЗРЫВ ЗВЕЗДЫ 15 МАСС СОЛНЦА



# КИК

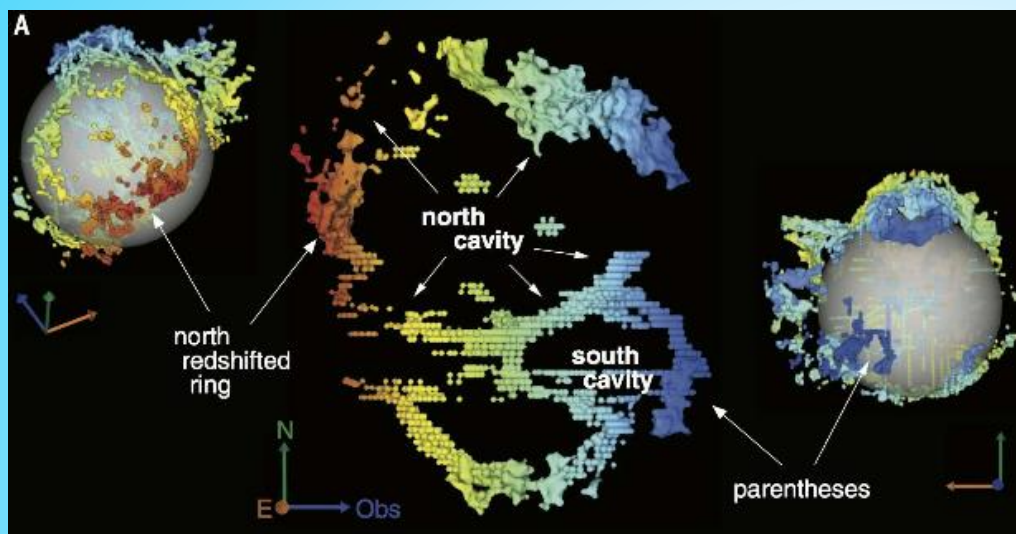


Две модели взрыва звезды 15 Msun.  
Цвет показывает энтропию.  
Плотность выше там, где ниже энтропия.

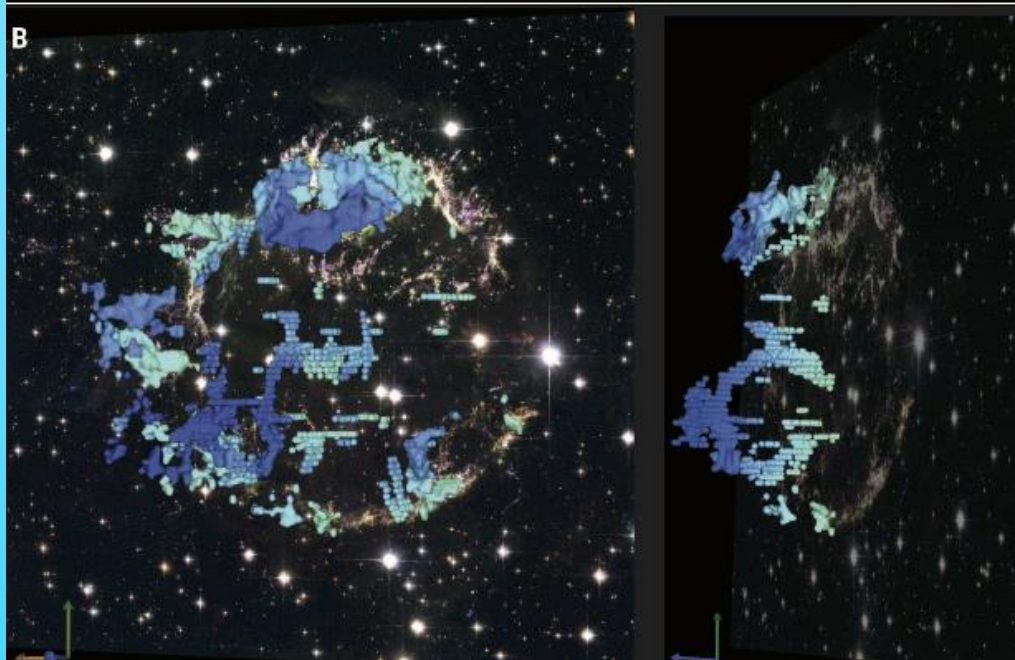
$$v_{\text{ns}} \approx \frac{2G\Delta m}{r_i v_s} \approx 540 \frac{\text{km}}{\text{s}} \left( \frac{\Delta m}{10^{-3} M_{\odot}} \right) \left( \frac{r_i}{100 \text{ km}} \right)^{-1} \left( \frac{v_s}{5000 \text{ km/s}} \right)^{-1}$$

1702.08825

# ПОМОГУТ ЛИ ОСТАТКИ СВЕРХНОВЫХ?



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



1701.00891



# КЛЮЧЕВЫЕ ОБЗОРЫ

- Sn Ia. 1802.03125
- CCSN. 1806.07267,  
1211.1378,  
astro-ph/0612072
- SLSN. 1803.01875

