

От водорода до урана = от первичного нуклеосинтеза к взрывам звезд

Проф. К.А. ПОСТНОВ

Кафедра астрофизики и звездной астрономии
Физический факультет МГУ
Государственный астрономический ин-т им. П.К.Штернберга

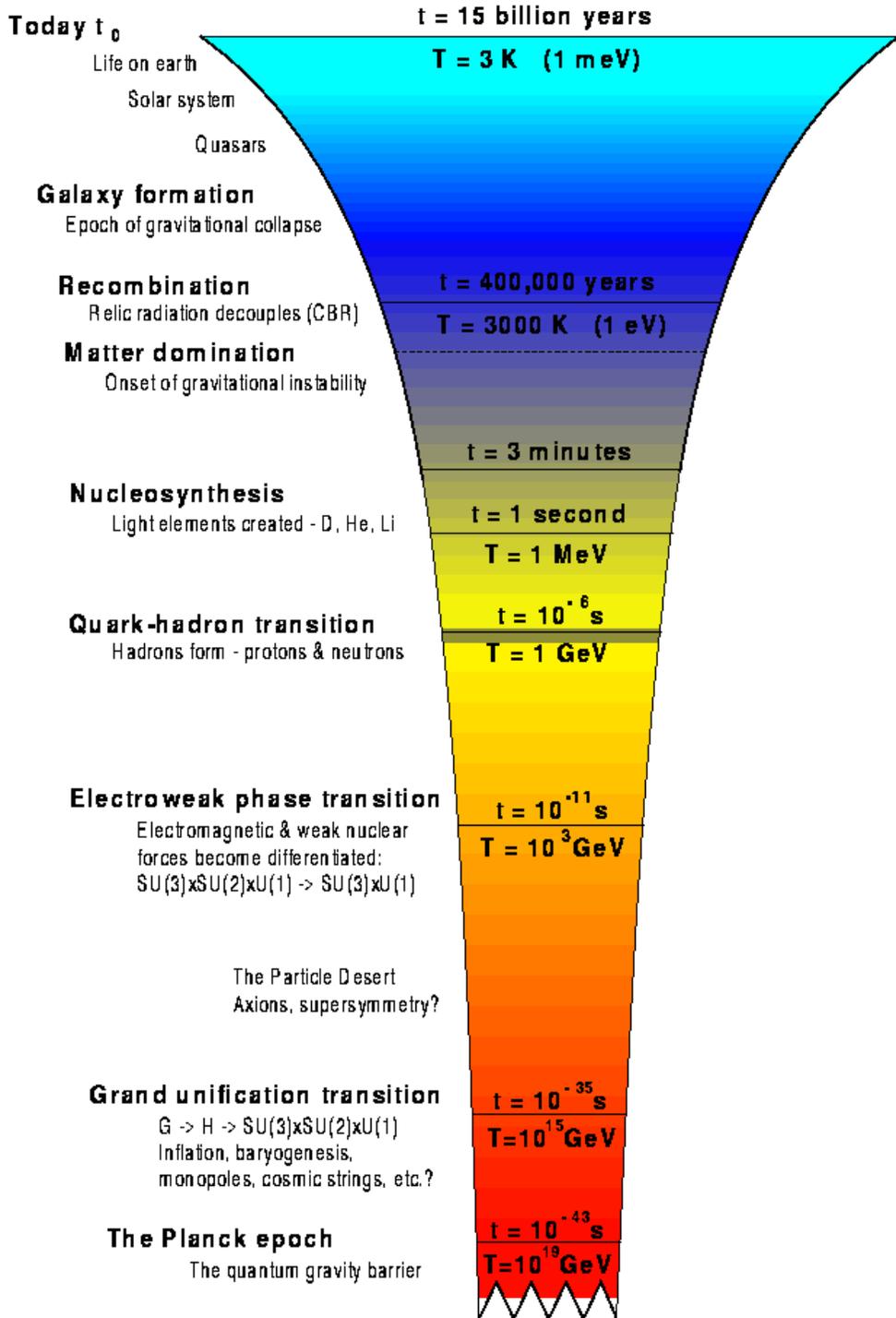


План

- Краткая история Вселенной
- Первичный нуклеосинтез
- Образование первых звезд
- Эволюция массивных звезд
- Коллапс ядра и вспышки сверхновых II типа
- Термоядерные сверхновые
- Гамма-всплески

Краткая история Вселенной

- $\sim 10^{-43}$ с – начало классического расширения Вселенной
- ~ 100 с -- первичный нуклеосинтез: ядра H, D, T, изотопов He, Li и Be
- $\sim 300\ 000$ лет – эпоха рекомбинации (отделение излучения от вещества)
- ~ 300 млн лет – образование первых звезд. Первые взрывы, обогащение межзвездной среды тяжелыми элементами.
- $\sim 1-13$ млрд. лет -- Газ → Звезды → Газ → Звезды ...



Современная Вселенная
 14 млрд. лет
 Образование звезд
 3 млн. лет

Рекомбинация
 300 тыс. лет

Первич. Нуклеосинтез
 1-100с

Отщепление нейтрино 0.1 с
 Барионы 10^{-7} - 10^{-4} с

Кварки 10^{-30} - 10^{-7} с

Инфляция $t < 10^{-30}$ с

Первичный нуклеосинтез ($t \sim 1-200$ с)

- Фазовый переход КХД при $T_{\text{QCD}} \sim 170 \text{ МэВ} \sim 10^{12} \text{ К} \rightarrow$ образование барионов ($n=udd$, $p=uud$) из кварк-глюонной плазмы
- n , p в ТДР из-за слабых взаимодействий

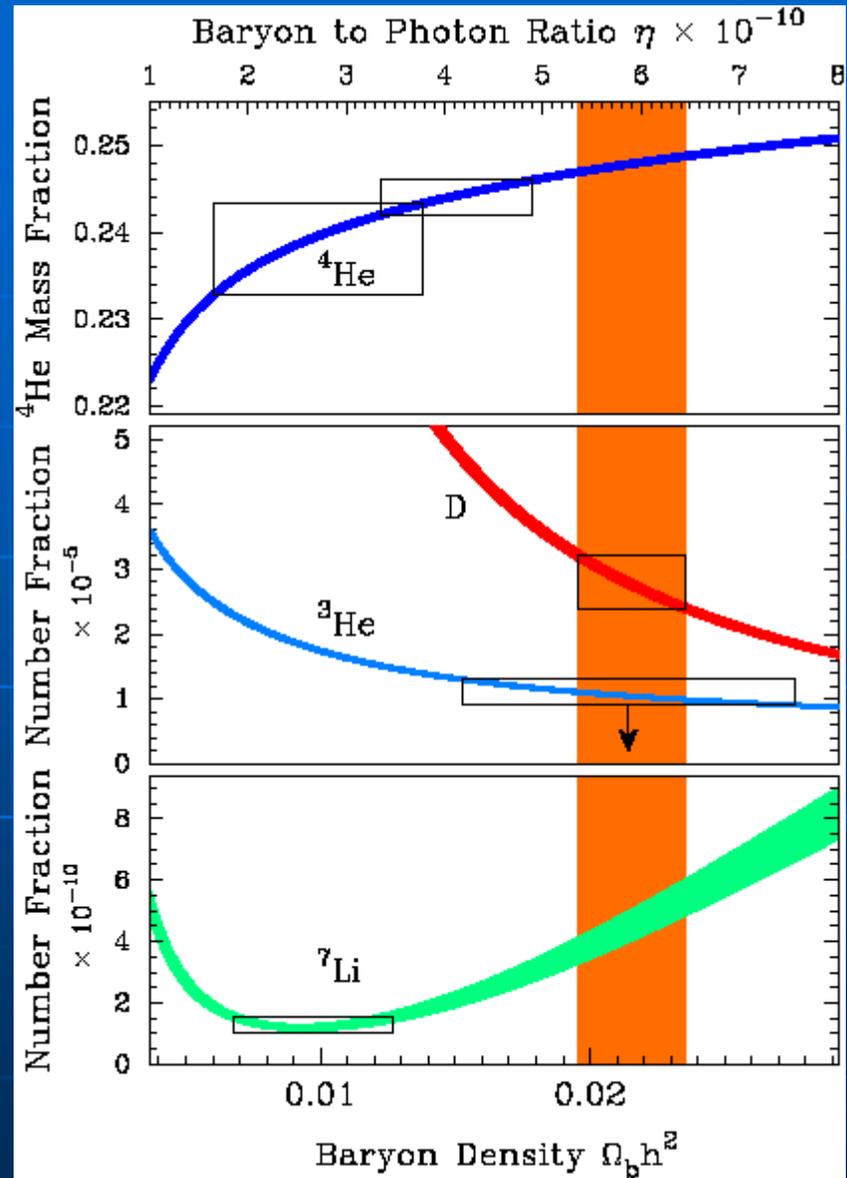
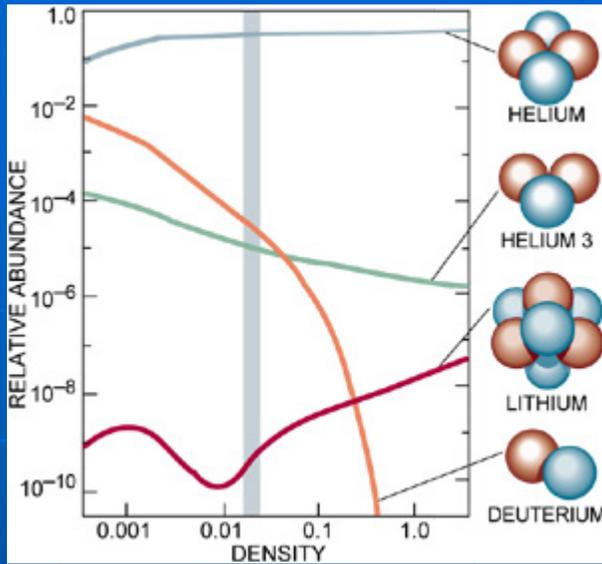


$$\frac{N_n}{N_p} \sim \exp\left(-\frac{(m_n - m_p)c^2}{kT}\right), \quad \Delta mc^2 = 1.293 \text{ МэВ}$$

- Вселенная расширяется и остывает ($T \sim 1/t^{1/2}$), сечения слабых взаимодействий уменьшается: $\sigma \sim G_F E^2$, \rightarrow
 $n\sigma c \sim T^2 T^3 \sim 1/t^{5/2} < H(t) \sim 1/t$.

Выход нейтрино из равновесия при $t \sim 0.1$ с

- При $T < 70 \text{ keV}$ из барионов образуются легчайшие ядра (первичный нуклеосинтез). $N_n/N_p \sim 0.16 \rightarrow \sim 25\% \text{ He}$



В звездах дейтерий быстро выгорает \Rightarrow ограничения на барионную плотность из первичного нуклеосинтеза:

$\Omega_b h_{100}^2 = 0.0214 \Rightarrow$

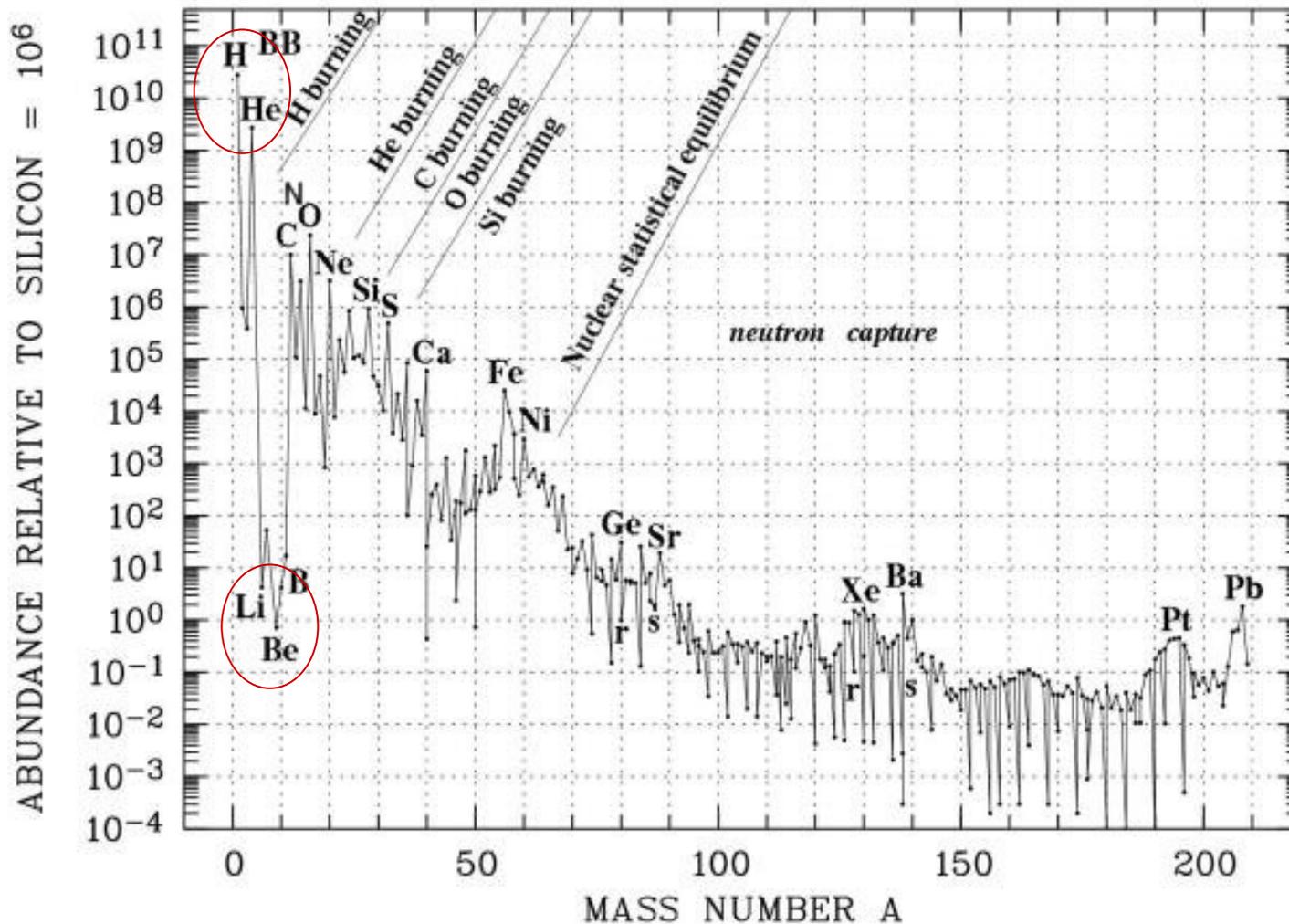
$\Omega_b \approx 0.04$ for $h_{100} = 0.7$

H												He					
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Cs	Ba		Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
Fr	Ra																
		La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	
		Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr	

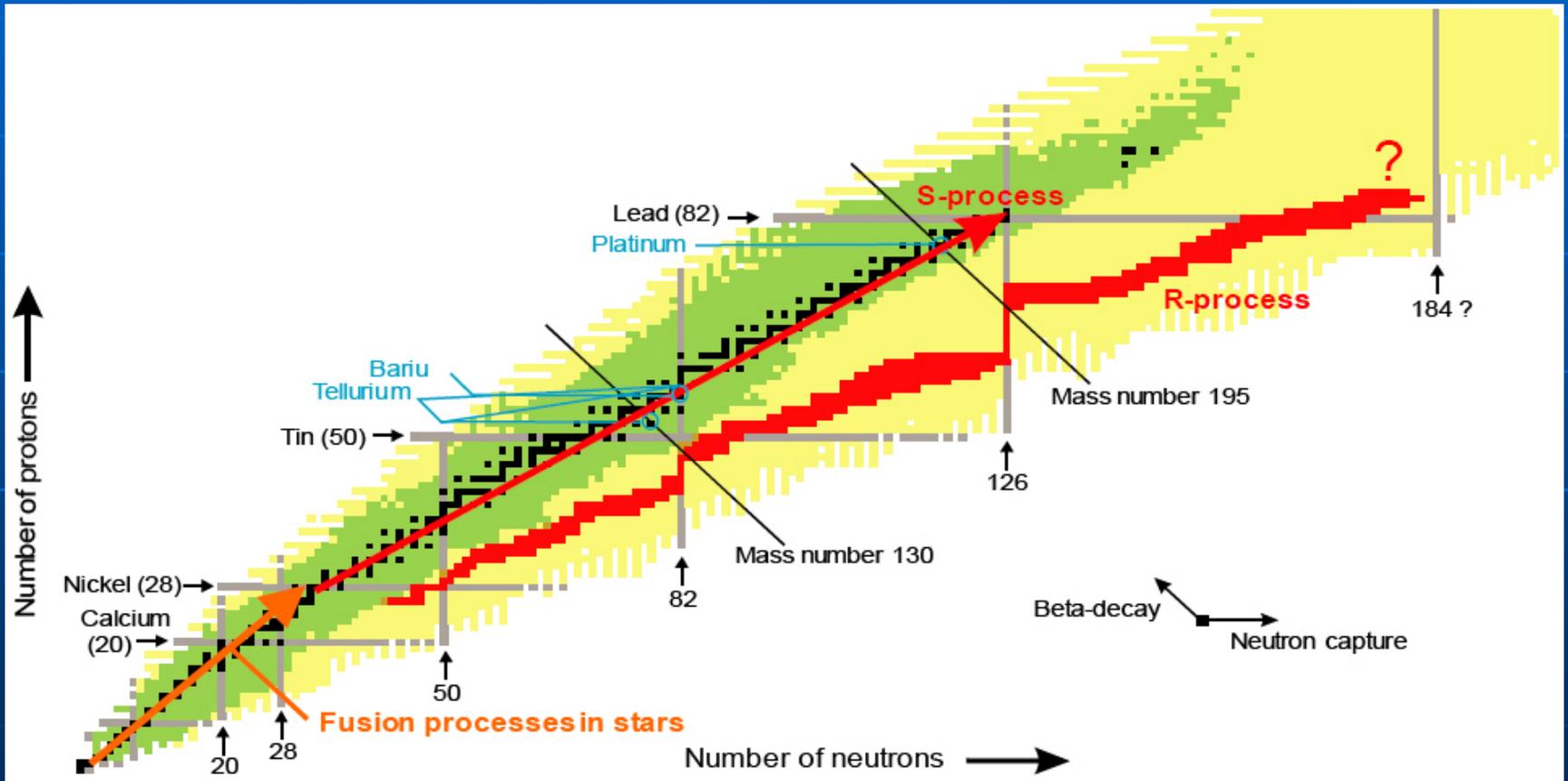
- Big Bang
- Supernovae
- Large Stars
- Small Stars
- Cosmic Rays

Современное обилие элементов

Альфа-элементы



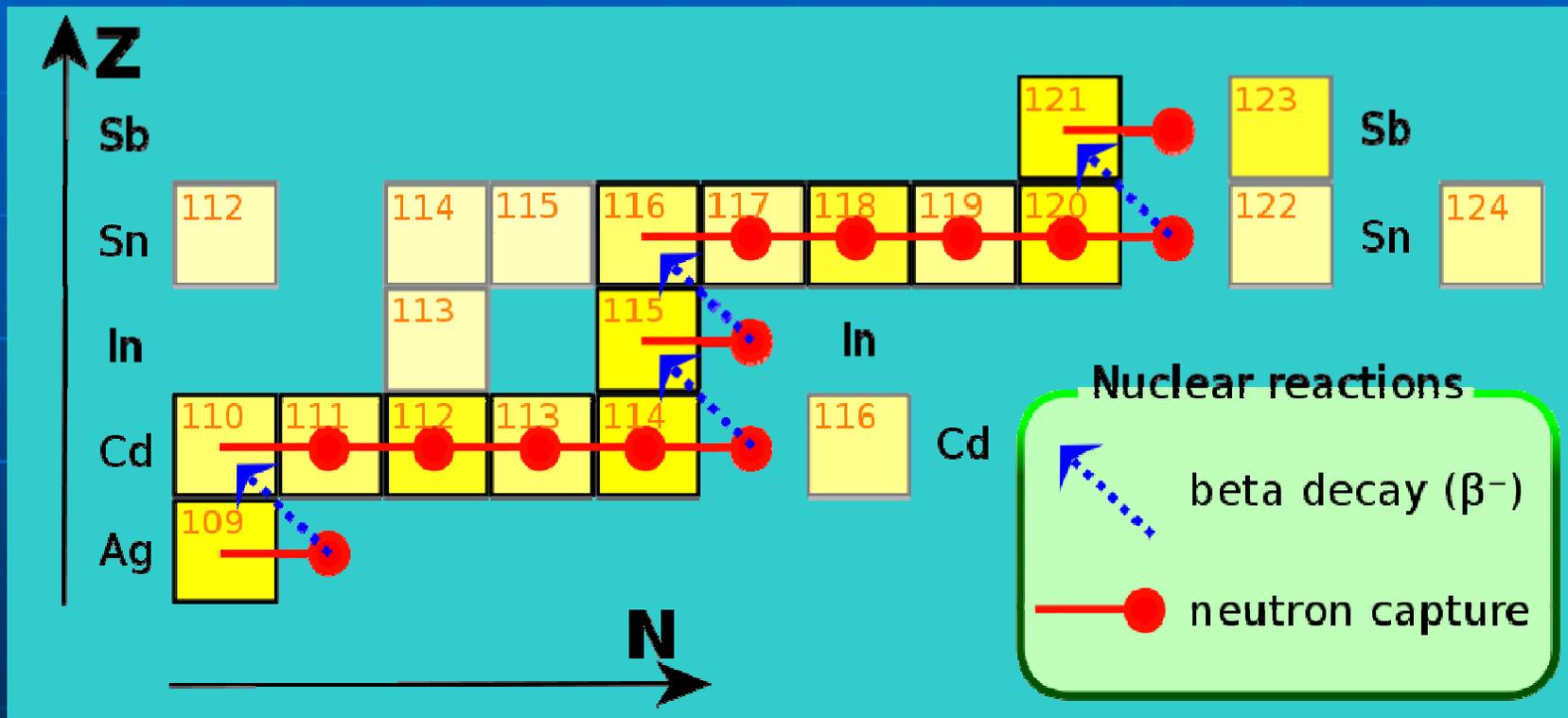
r- и s- процессы



S-процесс

- Элементы с $A > 60$ образуются при захвате нейтронов ядрами
- S(low): $\tau(\beta) \ll t(n, \gamma) \rightarrow \beta$ -стабильные изотопы с большим временем распада
- $T \sim 10^8$ К, $\rho_n \sim 10^{10} \text{ cm}^{-3}$, $\Delta t > 10^3$ лет
- Идет в красных гигантах
- Источник нейтронов: $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$, $^{22}\text{Ne}(\alpha, n)^{25}\text{Mg}$ + фотоядерные $^{13}\text{C}(\gamma, n)^{12}\text{C}$, $^{14}\text{N}(\gamma, n)^{13}\text{N}$
- До $Z=83$ (^{209}Bi). @ $Z=84-89$ нет стабильных ИЗОТОПОВ

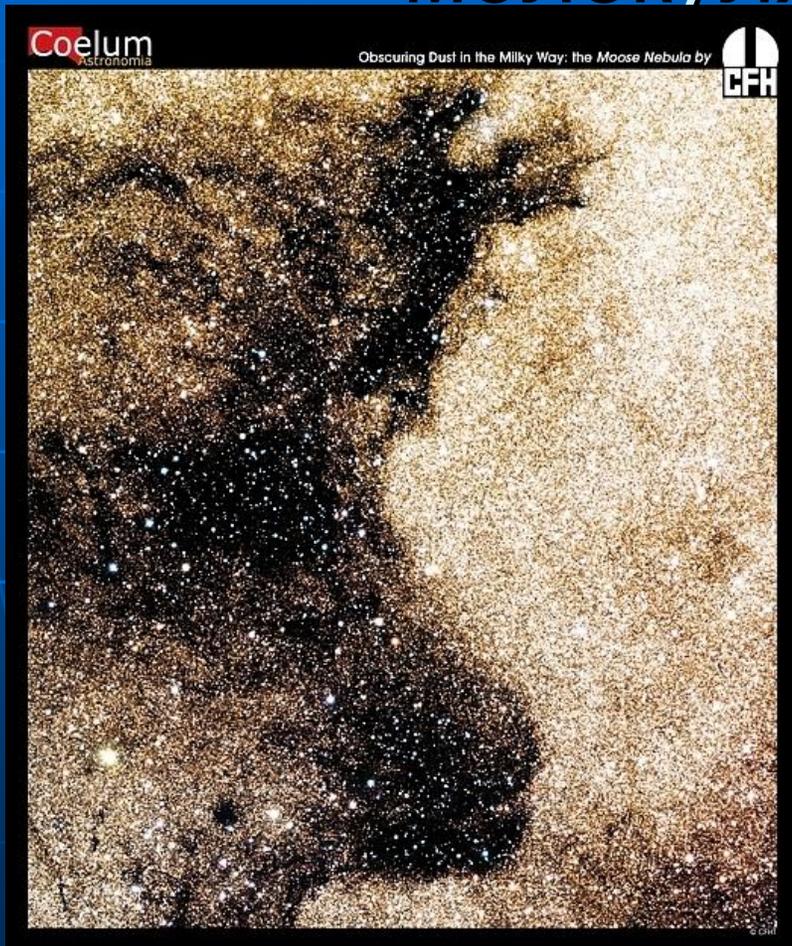
Ядра в «долине устойчивости»



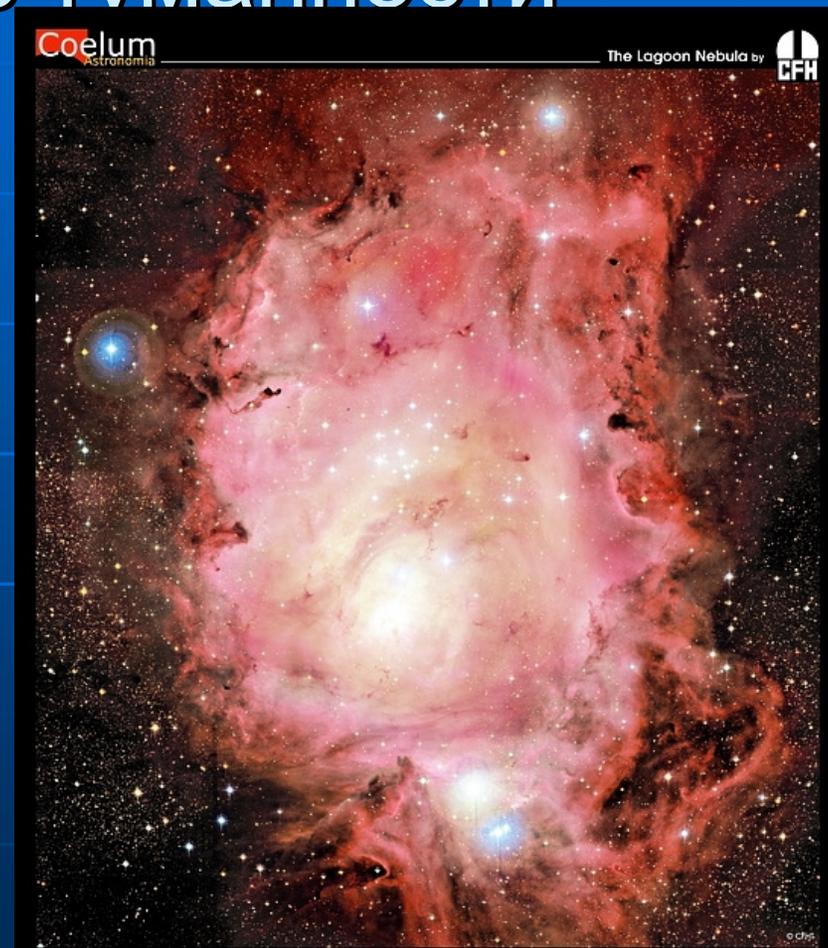
r-процесс

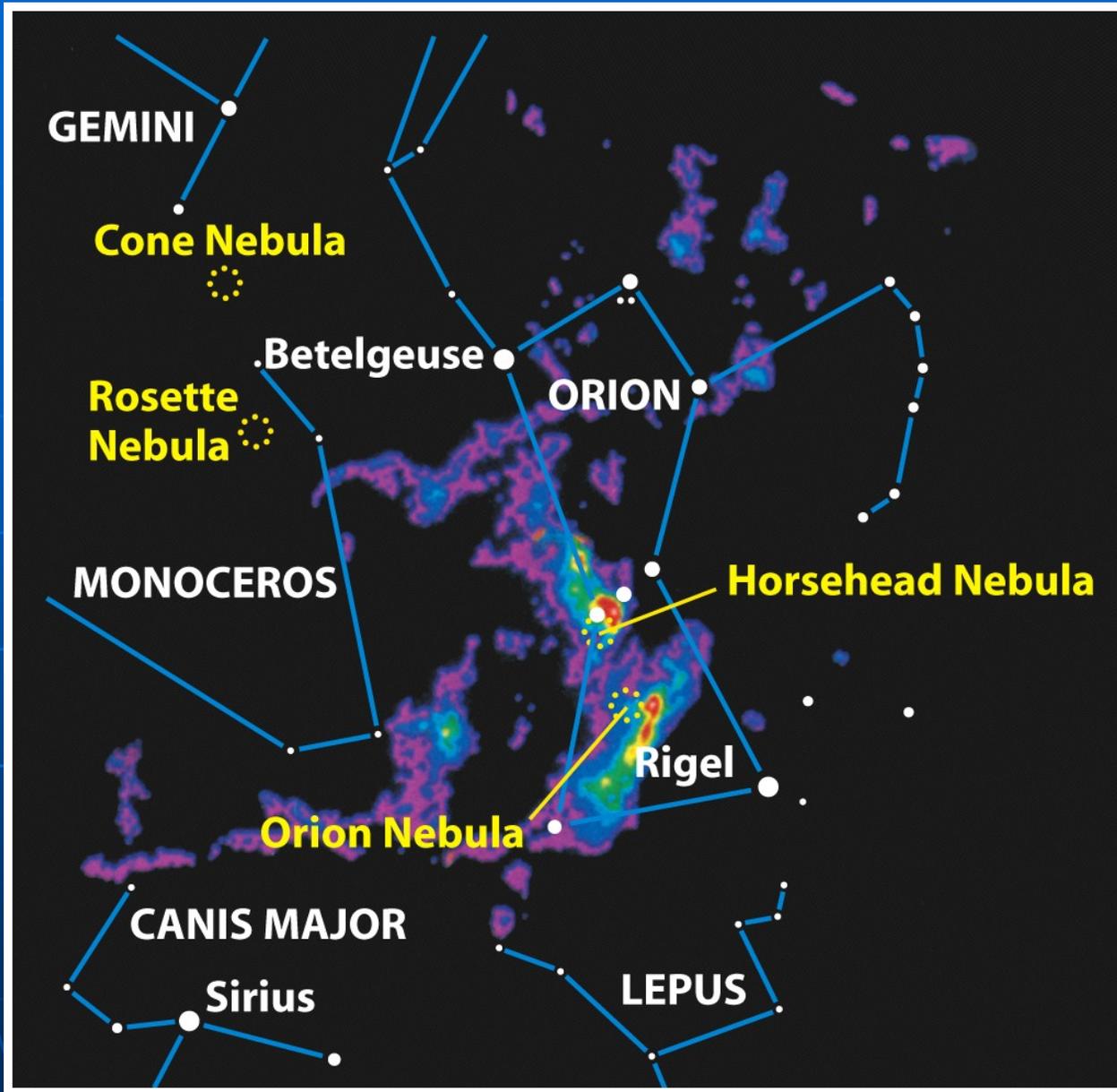
- r(rapid): $\tau(\beta) \gg \tau(n, \gamma) \rightarrow$ объясняет пики с магическими числами $N=50, 82, 126$
- $T \sim 10^9 \text{ K}$, $\rho_n > 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ @ $\tau(\beta) \sim 1 \text{ сек}$
- Идет при взрывах сверхновых, в центре массивных звезд на поздних стадиях эволюции
- Большой поток нейтрино способствует \rightarrow при слиянии двойных нейтронных звезд?
(Космические гамма-всплески?)

Образование звезд происходит в ХОЛОДНЫХ, ПЛОТНЫХ облаках молекулярного газа

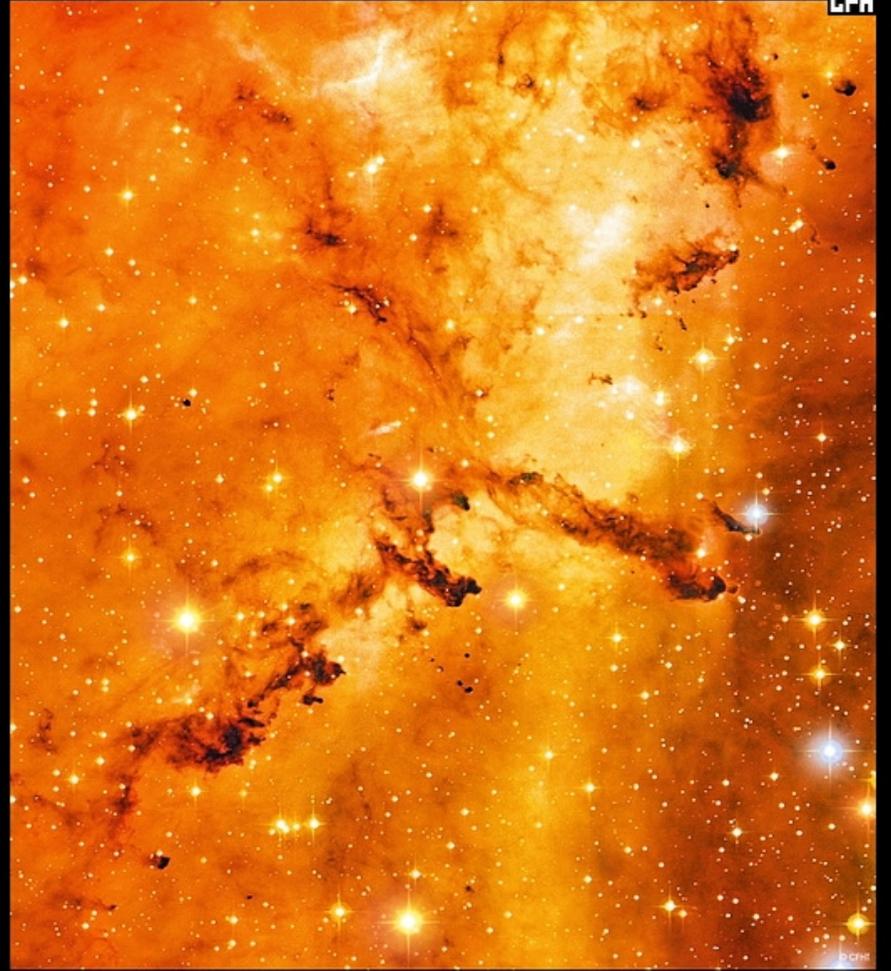


Молодые звезды ионизуют газ, вокруг них образуются яркие ЭМИССИОННЫЕ ТУМАННОСТИ









Яркие эмиссионные туманности вокруг областей звездообразования отлично видны в других галактиках





(M51 NASA HST)



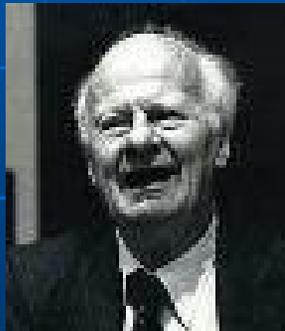
(Eagle Nebula: HST)

Источник энергии звезд – термоядерные реакции синтеза элементов

Высокие температуры и плотности в центре звезд позволяют идти термоядерным реакциям (А. Эддингтон)



Г.А. Гамов (1904-1968)

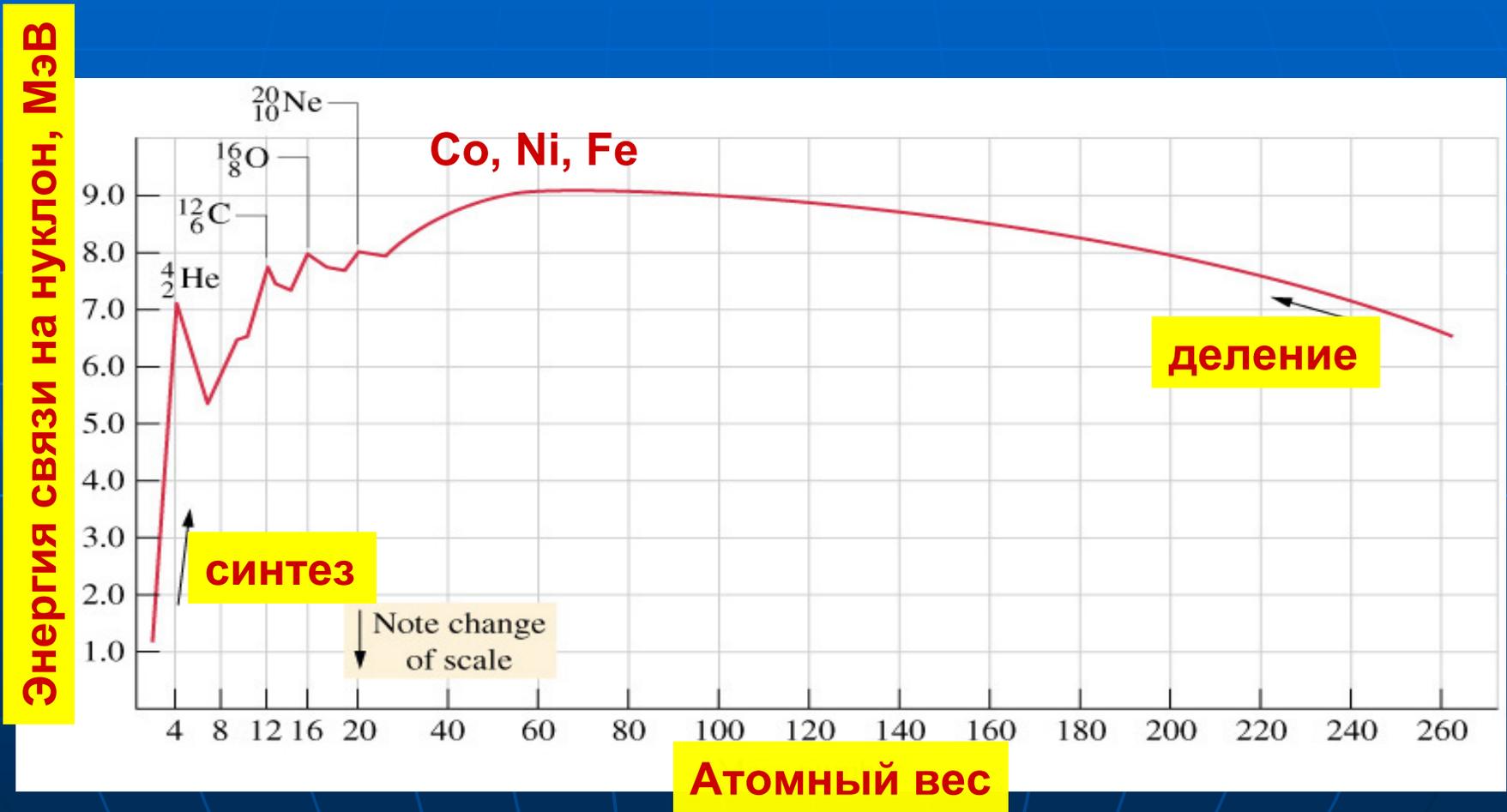


Г. Бете (1906-2005)



С. Чандрасекар (1910-1995)

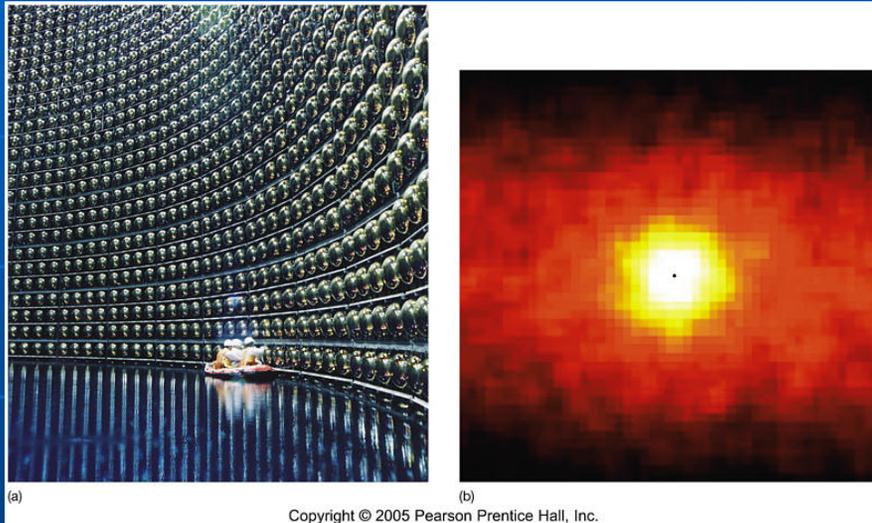
Выделение энергии в термоядерных реакциях $\Delta E \sim 0.006 Mc^2$



Солнечные нейтрино: эксперименты (1/2 Нобелевской премии 2002)



R.Davies M.Koshiba



Copyright © 2005 Pearson Prentice Hall, Inc.

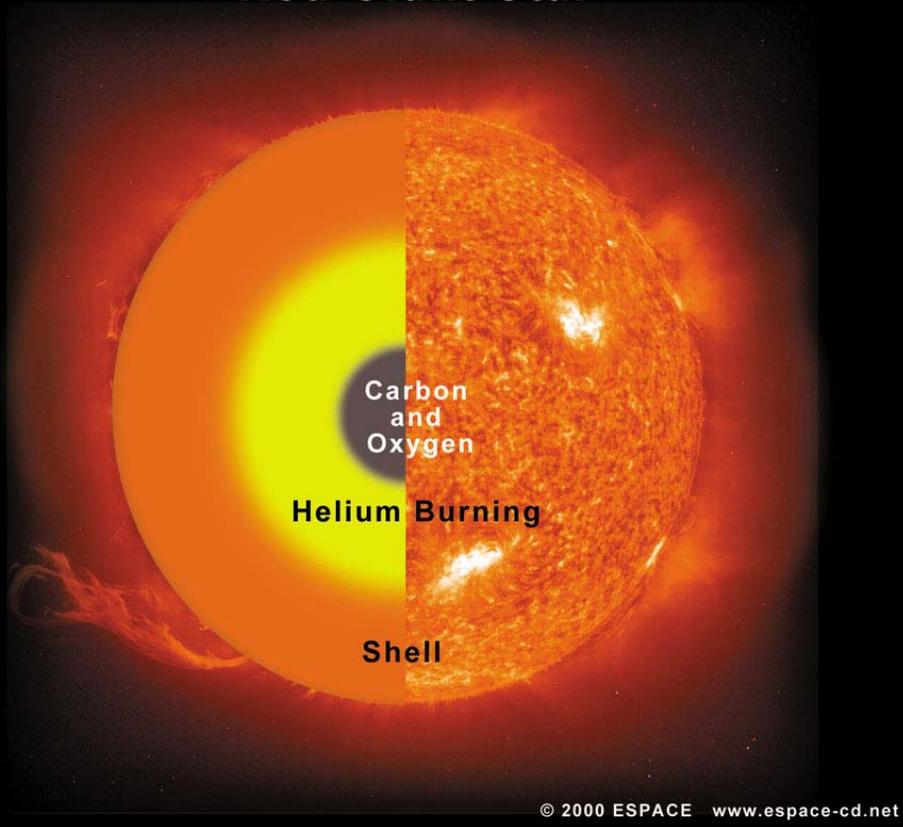
SuperKamiokande водный черенковский детектор (Япония). Детектирует в основном электронные нейтрино.

**Sudbury нейтрин. детектор на тяжелой воде (Canada) (1000 т).
Может регистр. нейтрино 3 сортов (ν_e, ν_μ, ν_τ)**



Время жизни звезды на главной последовательности – самое большое: $t = \eta Mc^2 / L \sim 10$ млрд. лет $/(M/M_{\text{Солнца}})^2$

Red Giant Star



После стадии главной последовательности (превращение водорода в гелий в ядре), радиус звезды увеличивается (стадия красного гиганта). Гелий в ядре превращается в углерод и кислород и т.д. до элементов «железного пика» (Co, Ni, Fe), время эволюции сокращается

Термоядерная эволюция звезд разных масс

Стадии		Звезда 20 M _⊙		Звезда 200 M _⊙	
Элемент	Продукт	T (10 ⁹ K)	время (годы)	T (10 ⁹ K)	время (годы)
H	He	0.02	10 ⁷	0.1	2×10 ⁶
He	O, C	0.2	10 ⁶	0.3	2×10 ⁵
C	Ne, Mg	0.8	10 ³	1.2	10
Ne	O, Mg	1.5	3	2.5	3×10 ⁻⁶
O	Si, S	2.0	0.8	3.0	2×10 ⁻⁶
Si	Fe	3.5	0.02	4.5	3×10 ⁻⁷

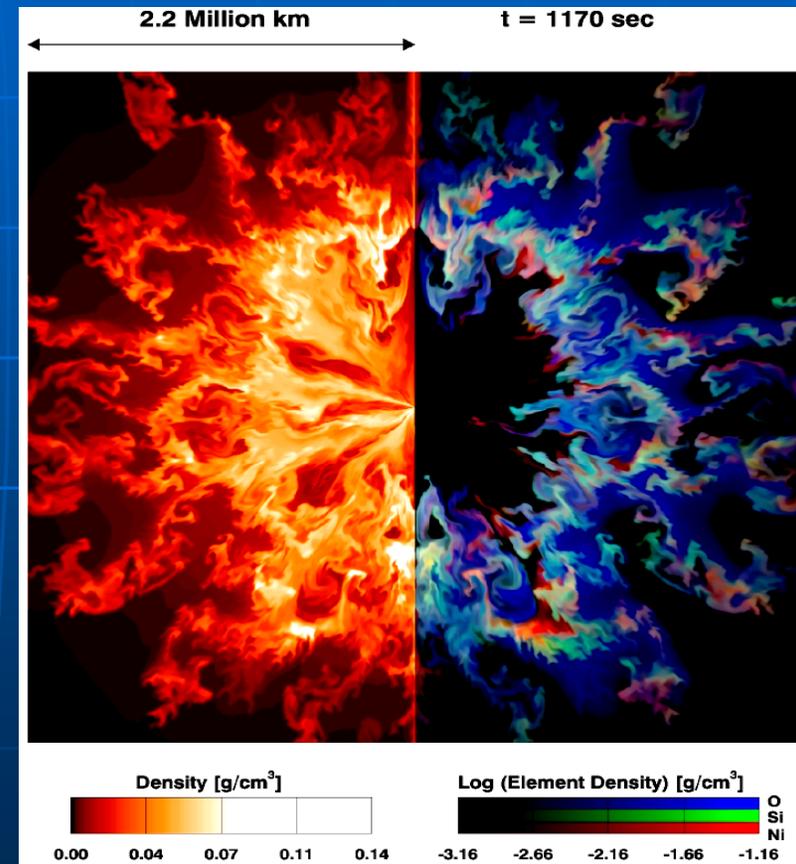
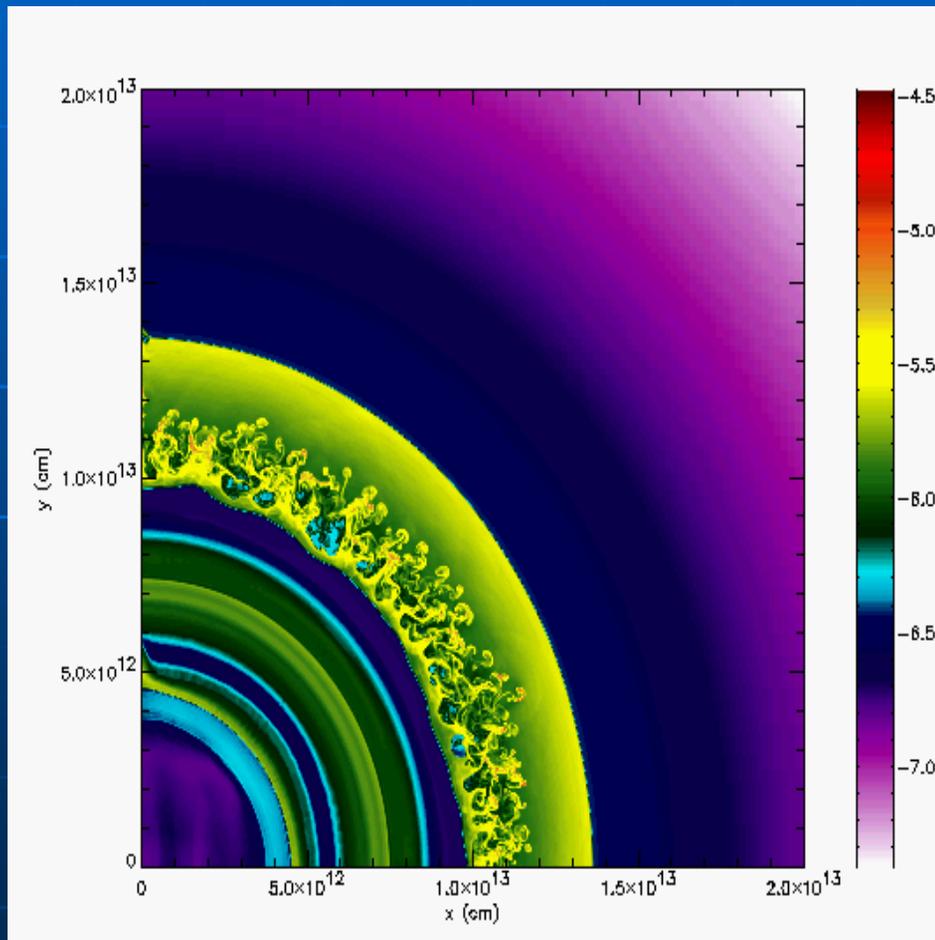
Конечные стадии эволюции

- Термоядерная эволюция массивных звезд завершается образованием железного ядра с массой около 2 масс Солнца
- Железное ядро неустойчиво («нейтронизация» ядер элементов при высоких плотностях, «развал» тяжелых ядер энергичными гамма-квантами и др. причины) и не может противостоять сжимающей ядро силе тяготения
- Начинается **гравитационный коллапс** (быстрое сжатие в шкале времени свободного падения), приводящий к образованию **нейтронной звезды** (и даже черной дыры для самых массивных звезд)

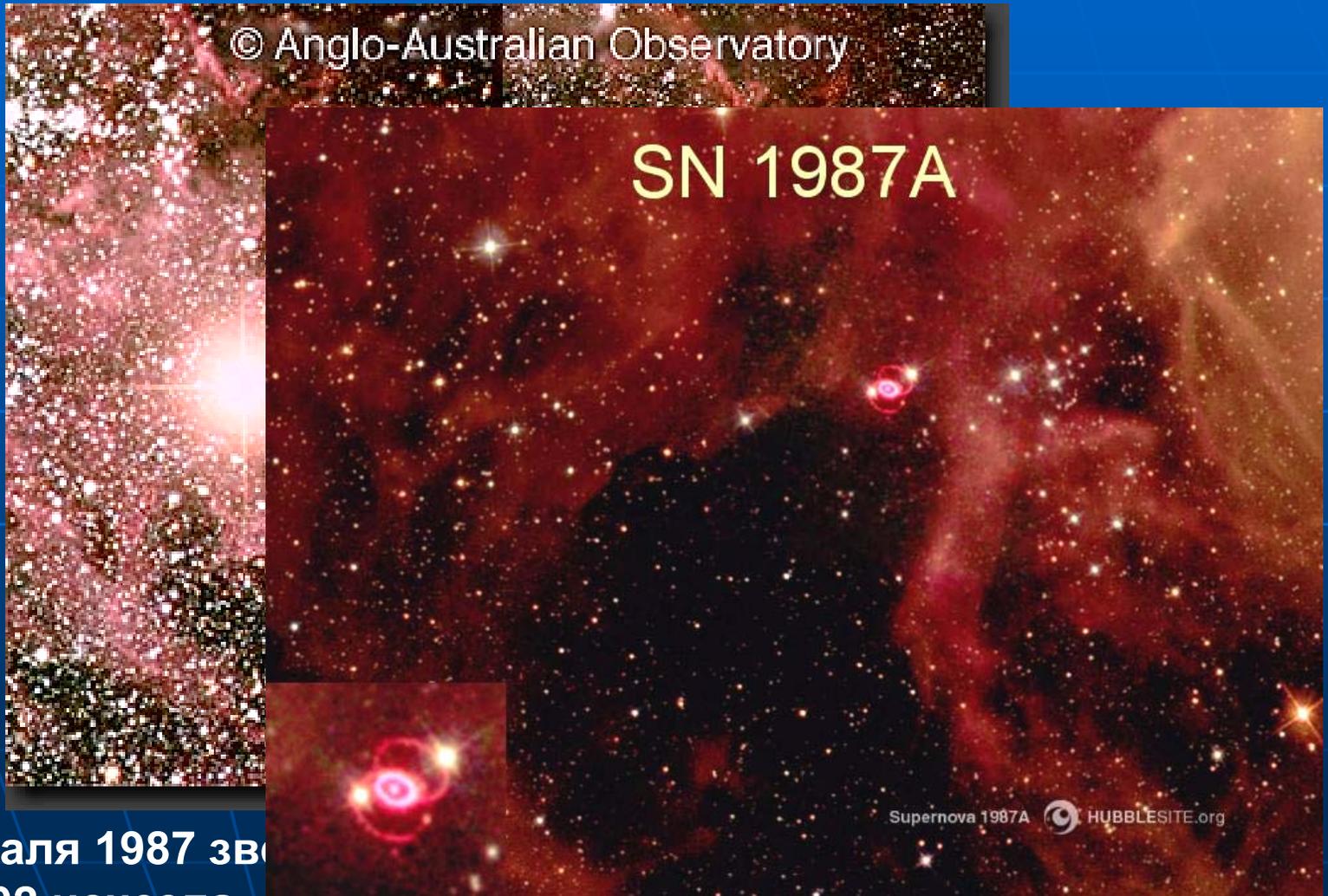
Вспышки сверхновых

- Энергия, выделяемая при коллапсе ядра огромна:
 $\Delta E = -GM_{\text{я}}^2/R_{\text{я}} - (-GM_{\text{я}}^2/R_{\text{НЗ}}) \sim GM_{\text{НЗ}}^2/R_{\text{НЗ}} \sim 10^{53}$ эрг
(для сравнения: Солнце за год выделяет «всего» $\sim 10^{41}$ эрг!)
- Но свыше 99% этой энергии уносят **нейтрино**
- Малая часть этой энергии передается оболочке звезды, которая в конечном счете приобретает кинетическую энергию $10^{49}-10^{50}$ эрг и расширяется в межзвездную среду со скоростью **10-20 тыс. км/с**
- Свечение разлетающейся оболочки наблюдается как явление **вспышки сверхновой (II типа)**

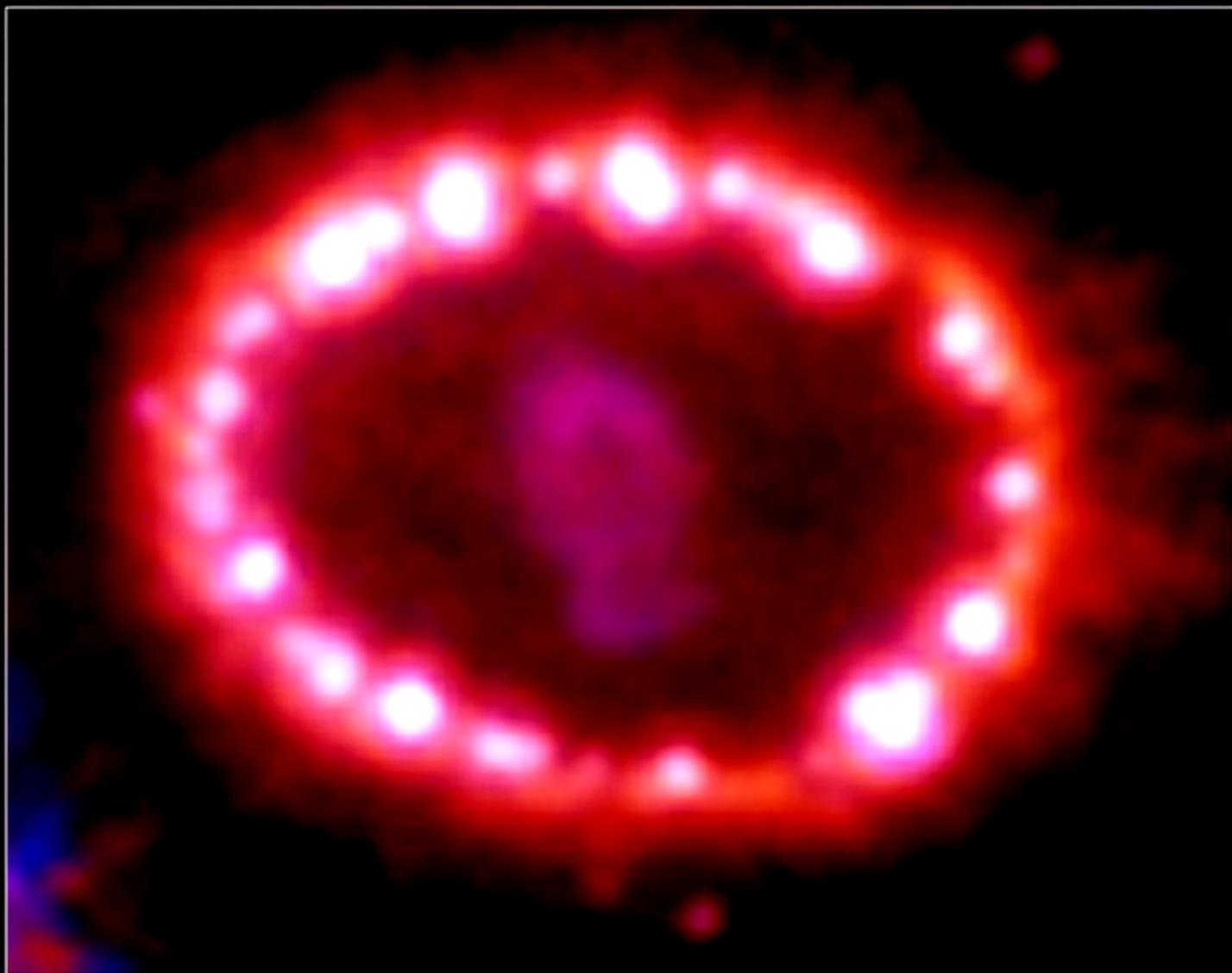
Современные расчеты СНИИ – «ПОЧТИ» успешны



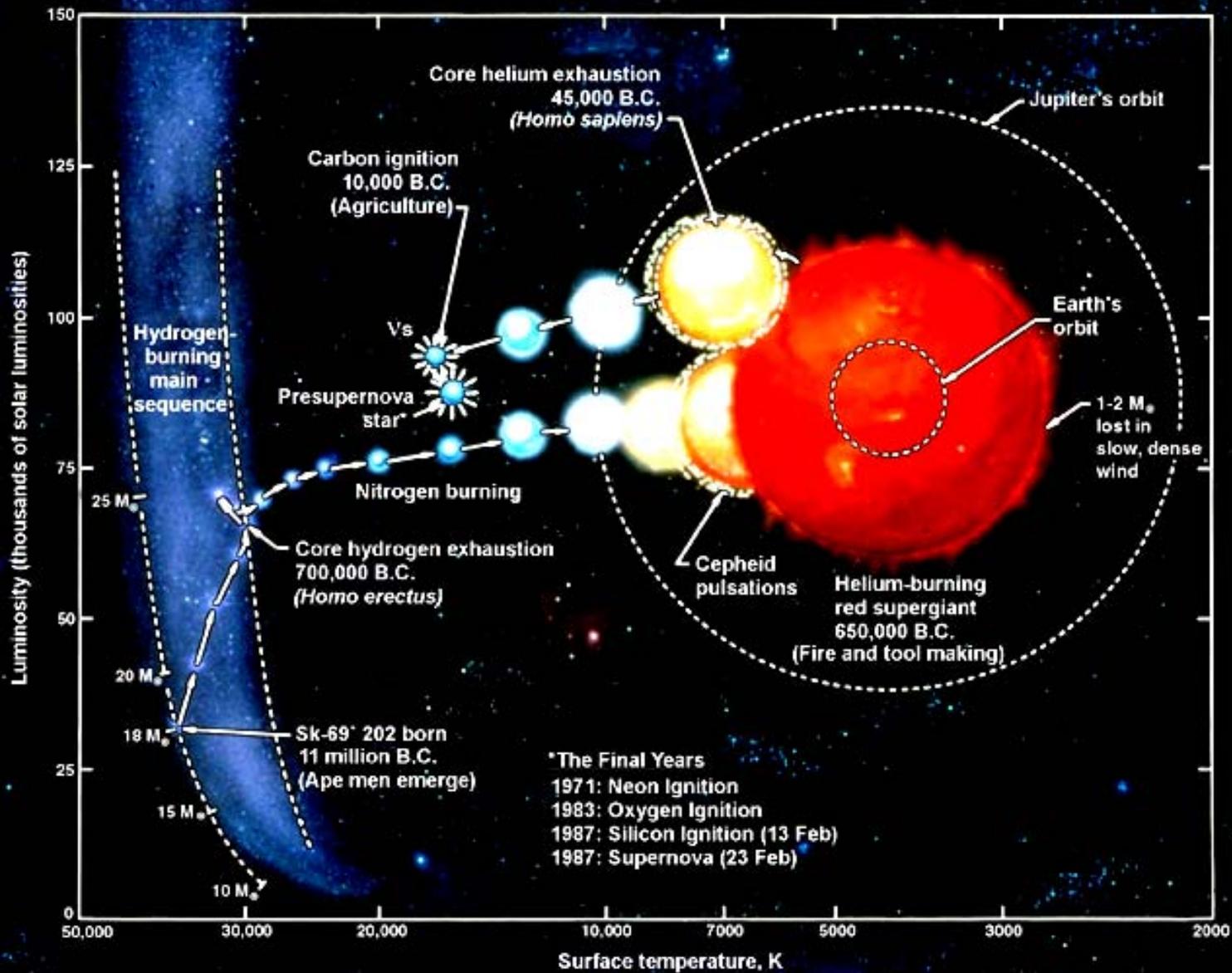
SN1987a в Большом Магеллановом Облаке



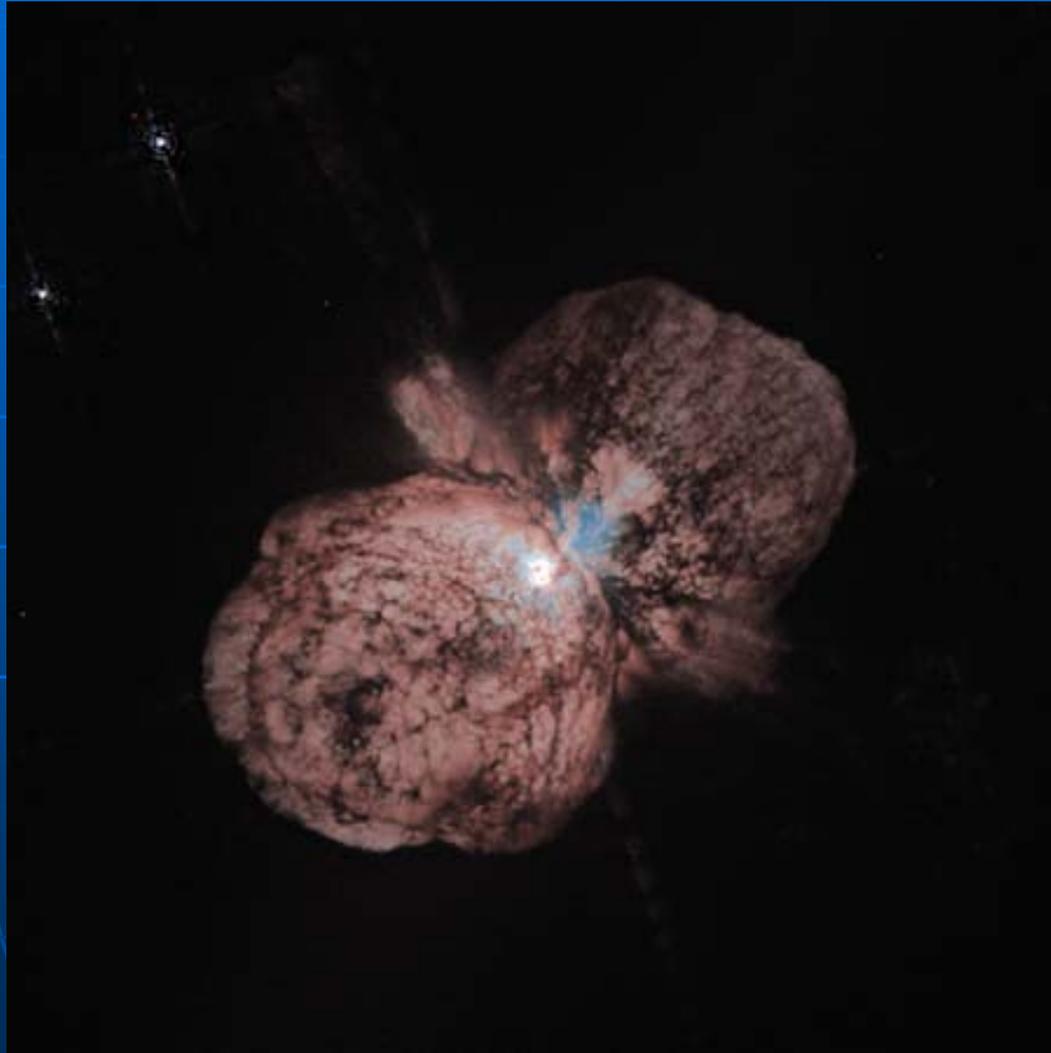
23 февраля 1987 зв
22.12.2009
Sk -69 202 исчезла...



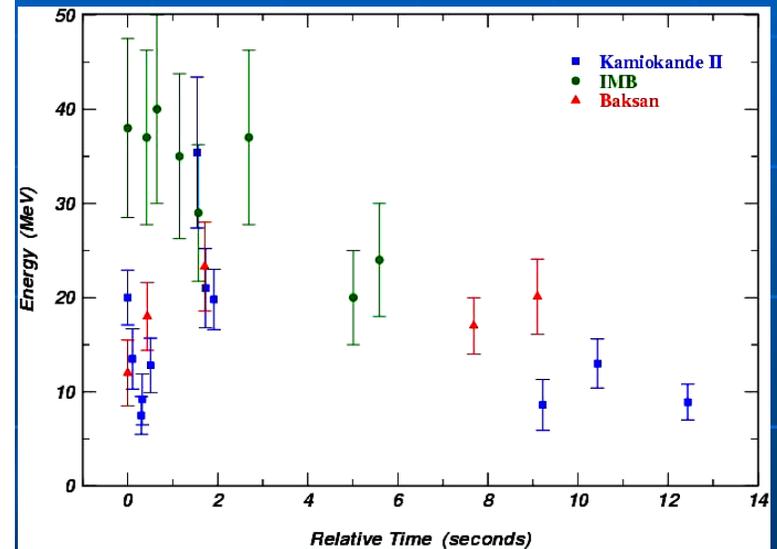
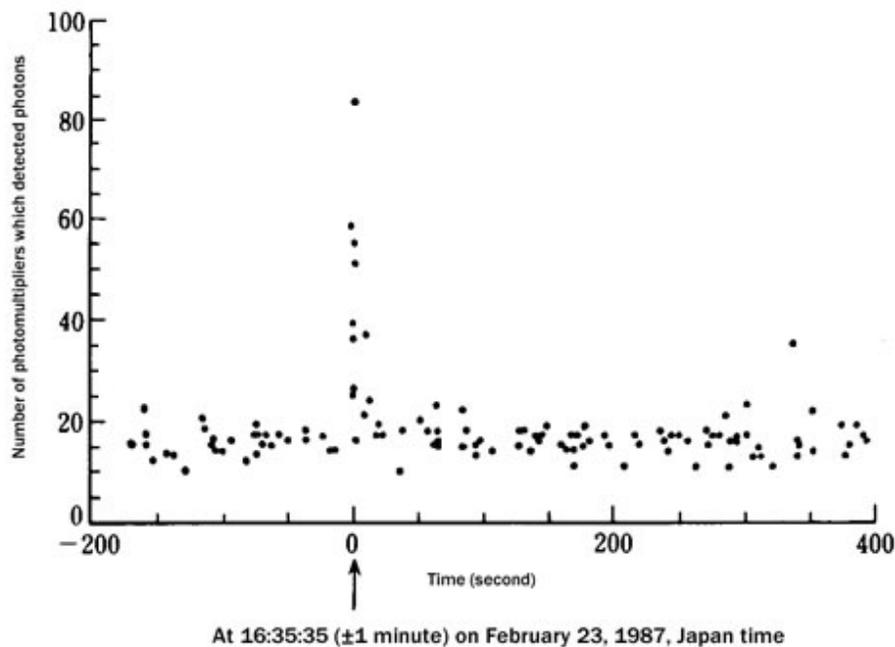
Supernova 1987A • November 28, 2003
Hubble Space Telescope • ACS



Звезда η Киля находится на конечной стадии термоядерной эволюции. Взрыв СН может произойти в ближайшие 1000 лет.



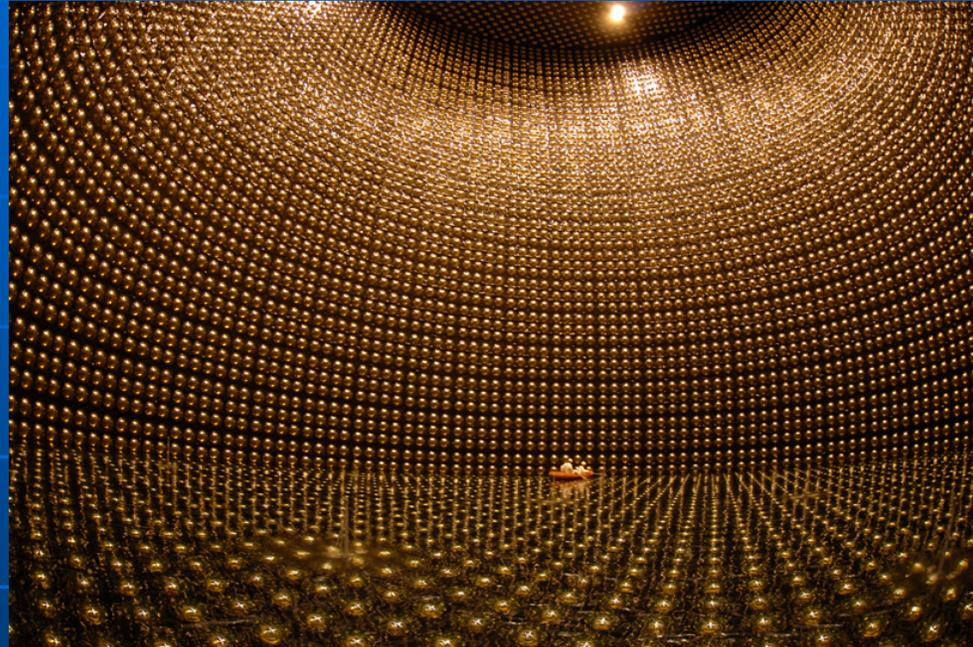
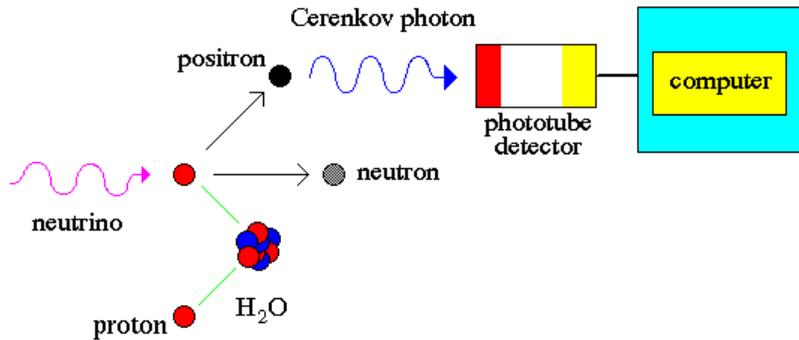
Нейтринный сигнал от SN1987a



Детектор Камиоканде (Япония)

Результаты 3-х детекторов
KII, IMB (США), Баксан (СССР)

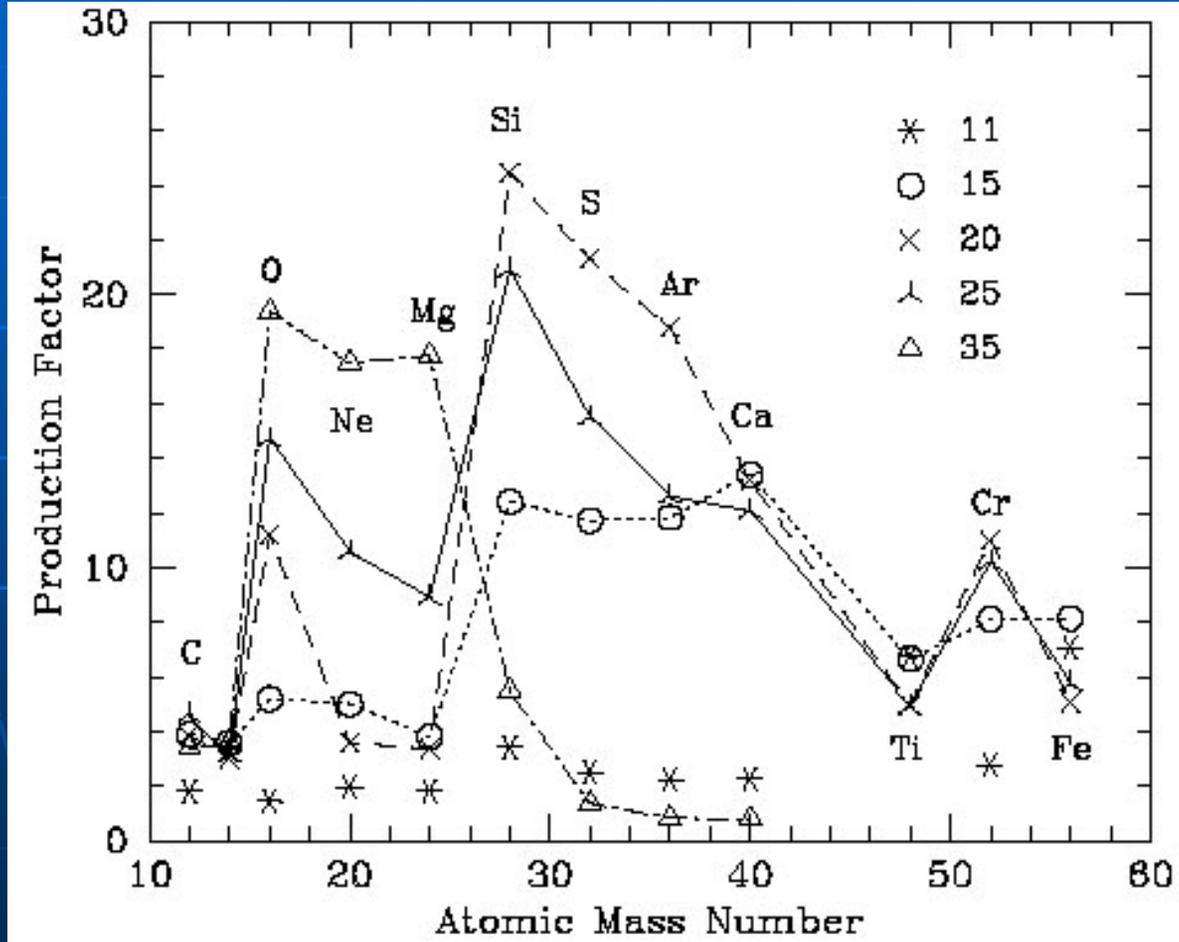
Neutrino Detector



Принцип работы черенковского нейтринного детектора

Детектор Суперкамиоканде (Япония)

Производство химических элементов в SNII



Woosley &
Weaver, 1995

Термоядерные сверхновые (SN Ia)

- В отличие от SN II (коллапсы ядер массивных звезд), эти сверхновые вспыхивают реже (примерно 1 раз в 100 лет в галактиках типа нашей), имеют большую светимость в максимуме блеска, схожие кривые блеска, встречаются во всех типах галактик, в т.ч. без звездообразования, и не связаны с эволюцией массивных звезд.
- Являются основным «поставщиком» элементов группы Fe в природе

Сверхновая Тихо Браге 11 ноября 1572



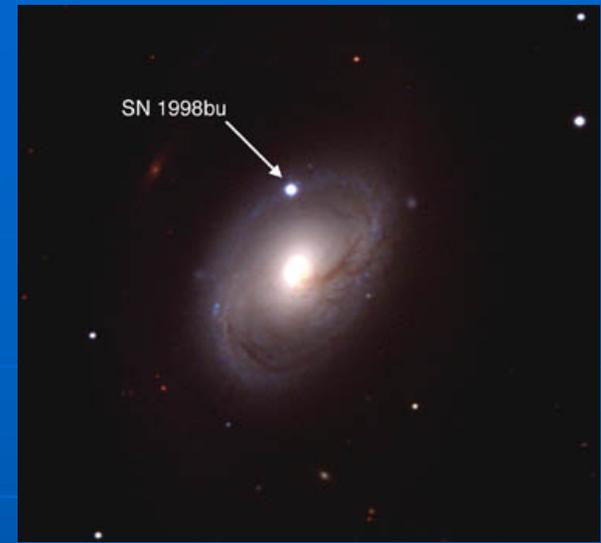
"Stella Nova" (1573), discovery chart



SN 1998aq



SN 1998dh



SN 1998bu



SN 1994D

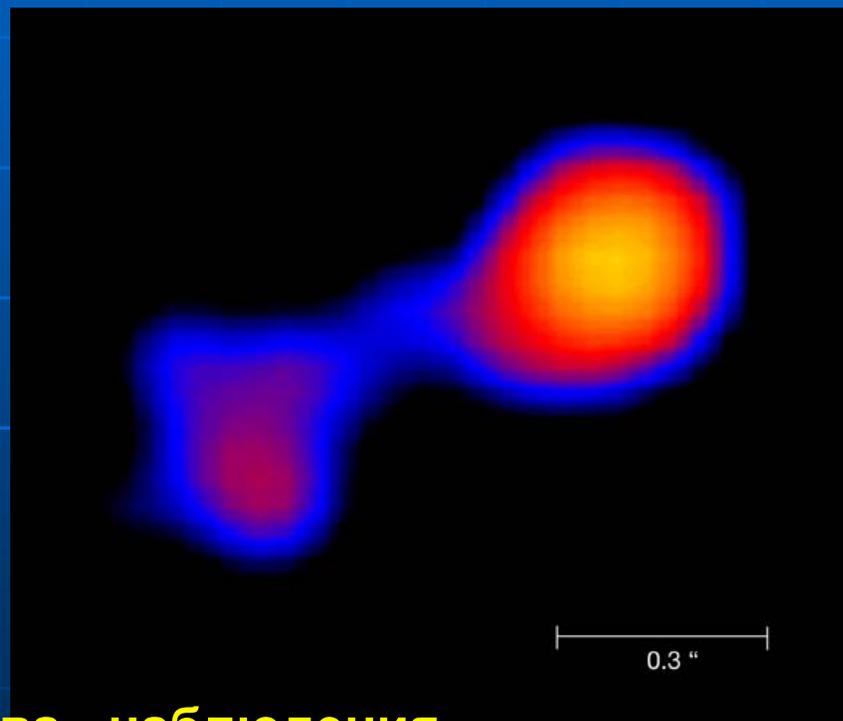
Ярчайшие природные термоядерные взрывы

20 млрд млрд млрд мегатонн

На несколько недель их яркость сравнима со светимостью целой галактики ($\sim 10^{43}$ эрг/с)

HST

СН Ia – термоядерный взрыв белого карлика с массой около максимально возможного значения $\sim 1.4 M_{\odot}$



Система Миры Кита. Справа - наблюдения рентгеновской обсерваторией Чандра (НАСА)

White Dwarf Deflagration

Resolution: 6 km

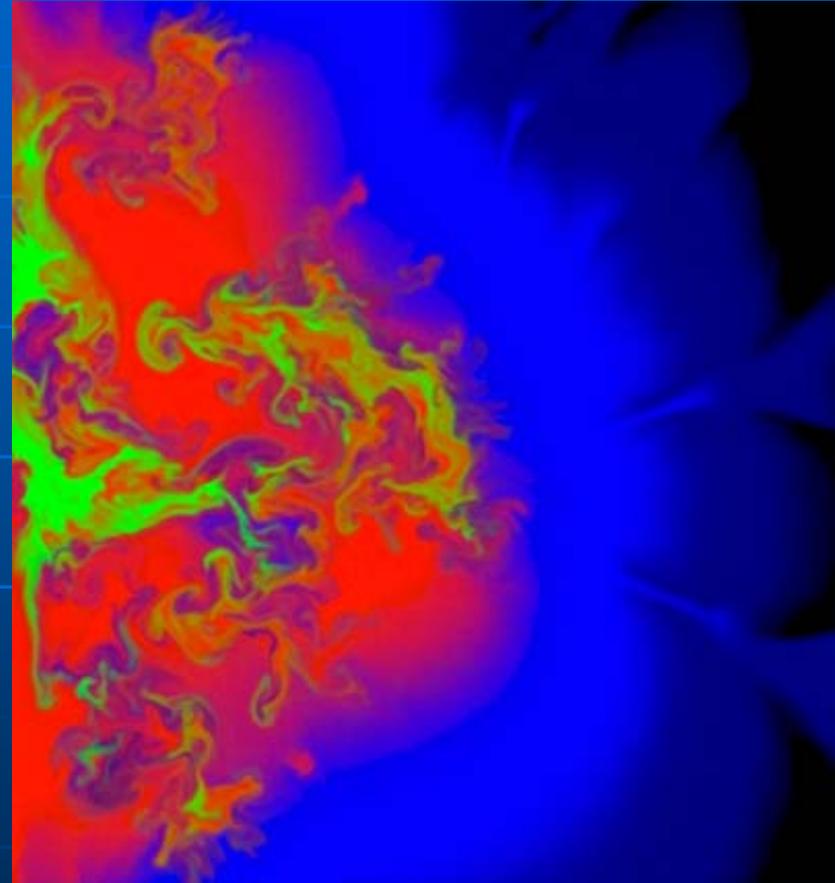
Initial Bubble Radius: 25 km

Ignition Offset: 100 km

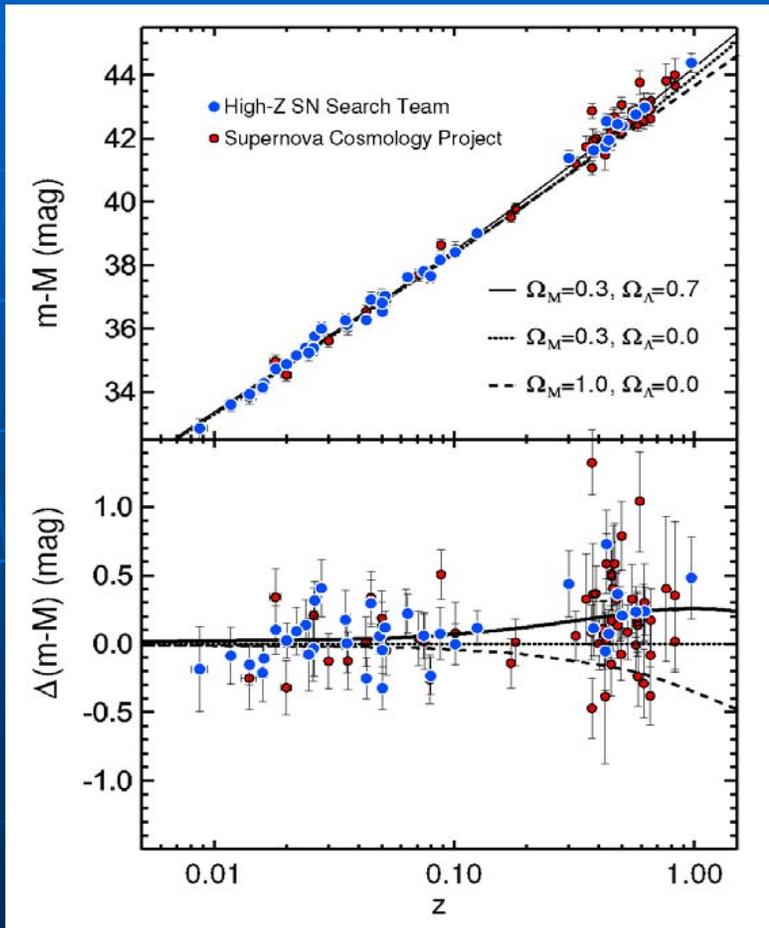
Variable 1: Density [1.5e+07 - 2.0e+07]

Variable 2: Reaction Progress [0.0 - 1.0]

Модели SN1a и синтез элементов группы железа



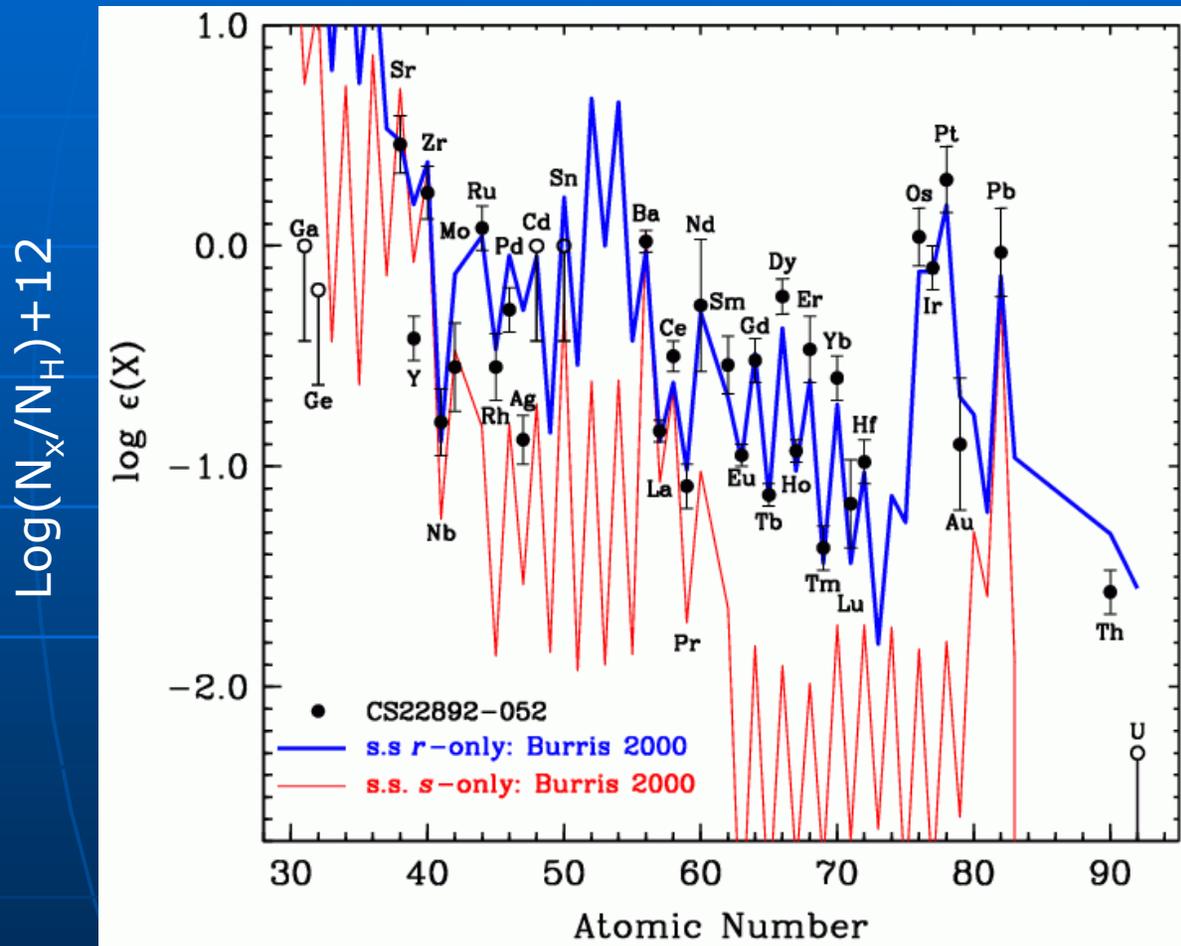
Роль СNIa в современной КОСМОЛОГИИ



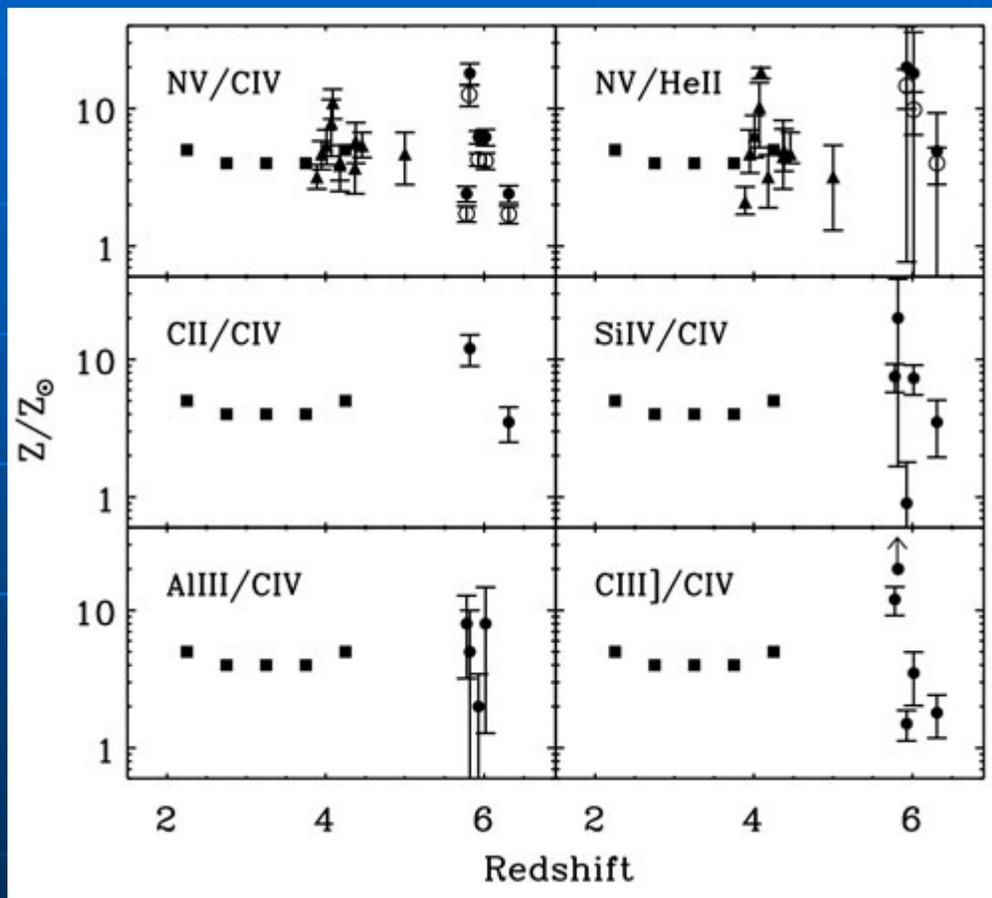
Измерение далеких СNIa привело к величайшему открытию конца XX века – ускоренному расширению Вселенной (1998)

Далекие сверхновые выглядят слабее, чем должны были бы наблюдаться при отсутствии ускоренного расширения

r-ЭЛЕМЕНТЫ В ДРУГИХ ЗВЕЗДАХ



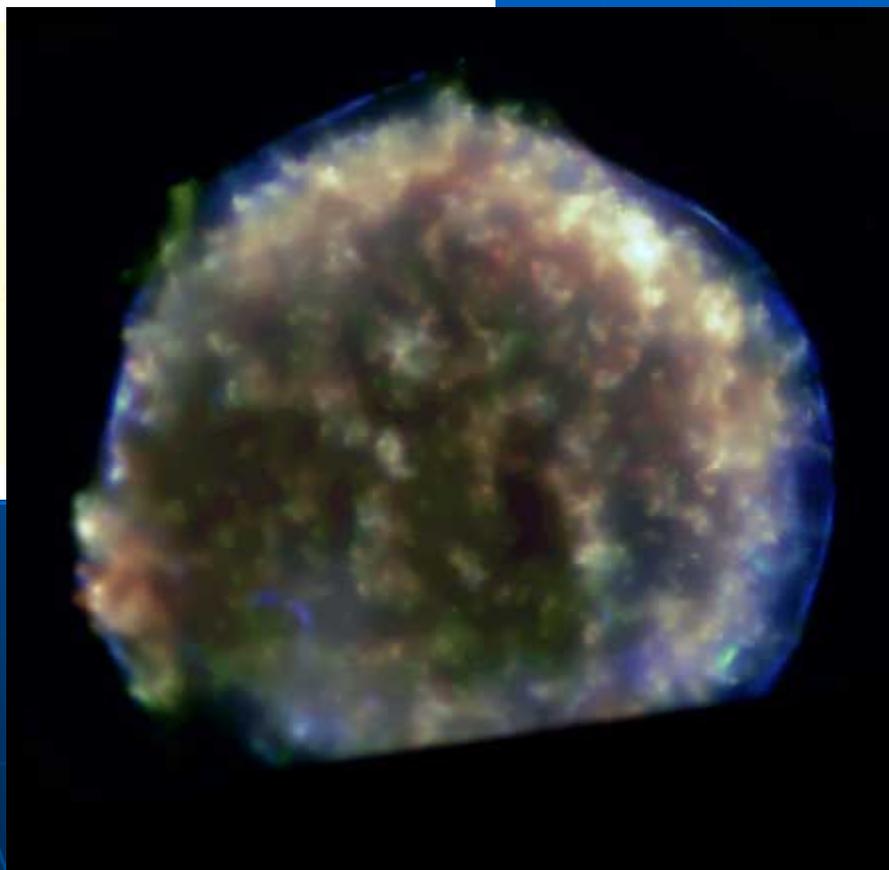
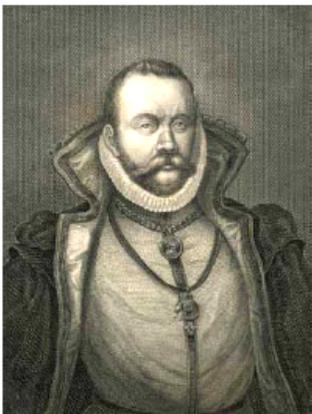
Эволюция содержания тяжелых элементов с красным смещением



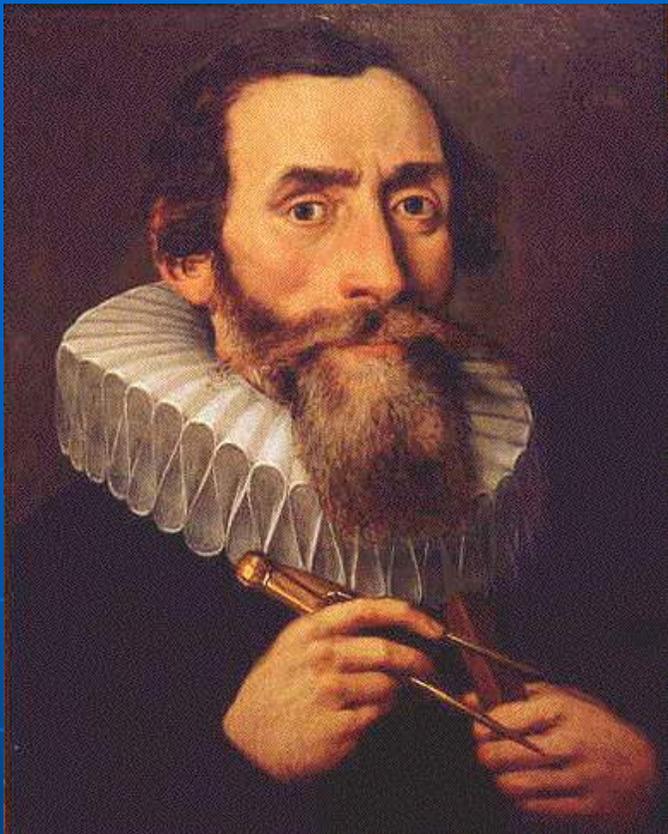
Jiang et al. 2007
(по линиям поглощения
в спектрах квазаров)

Остатки сверхновых

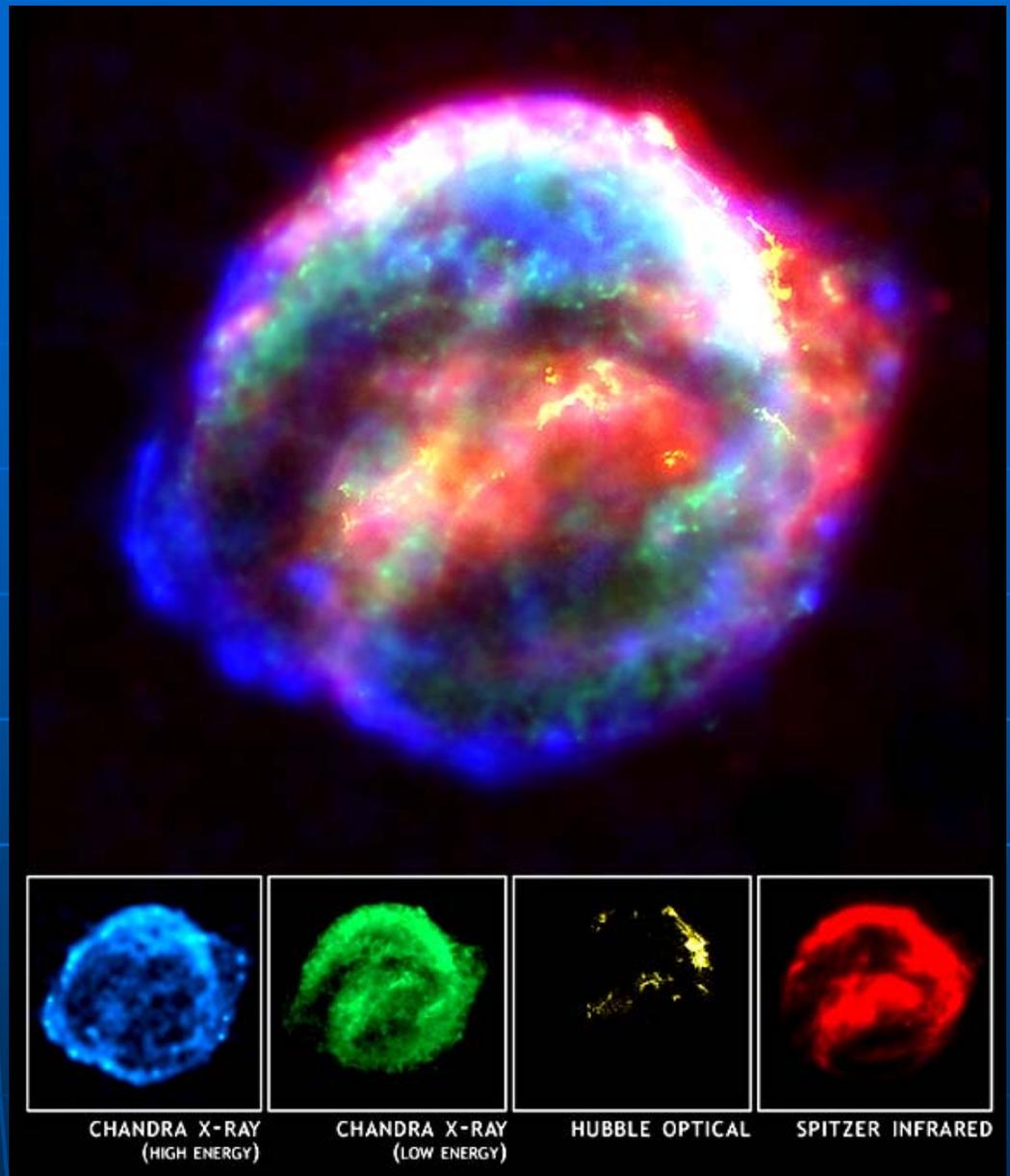
• discovery by Tycho de Brahe (Nov 11, 1572)



**SN Ia Тихо Браге.
Современный
вид остатка
в рентгеновских
лучах**



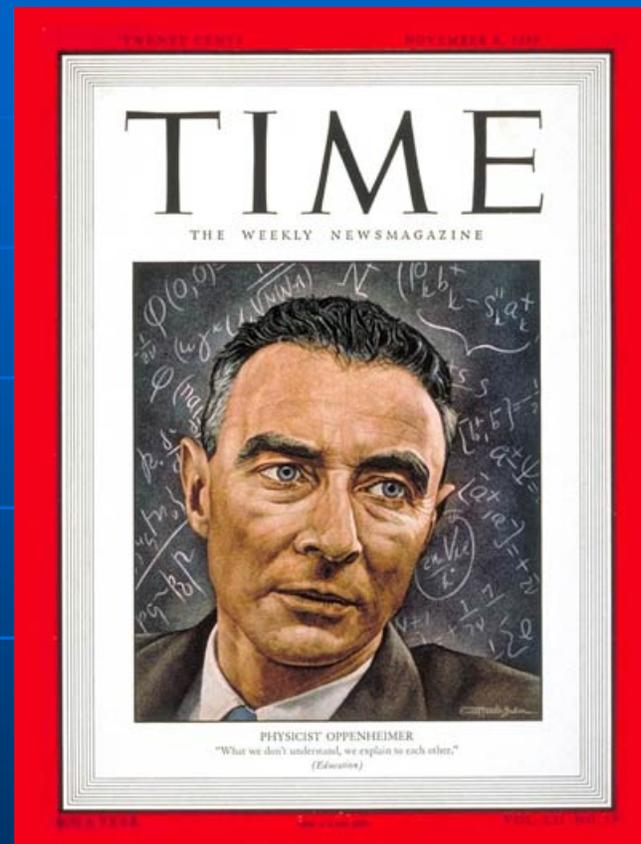
Иоганн Кеплер. SN 1604



И на Земле...

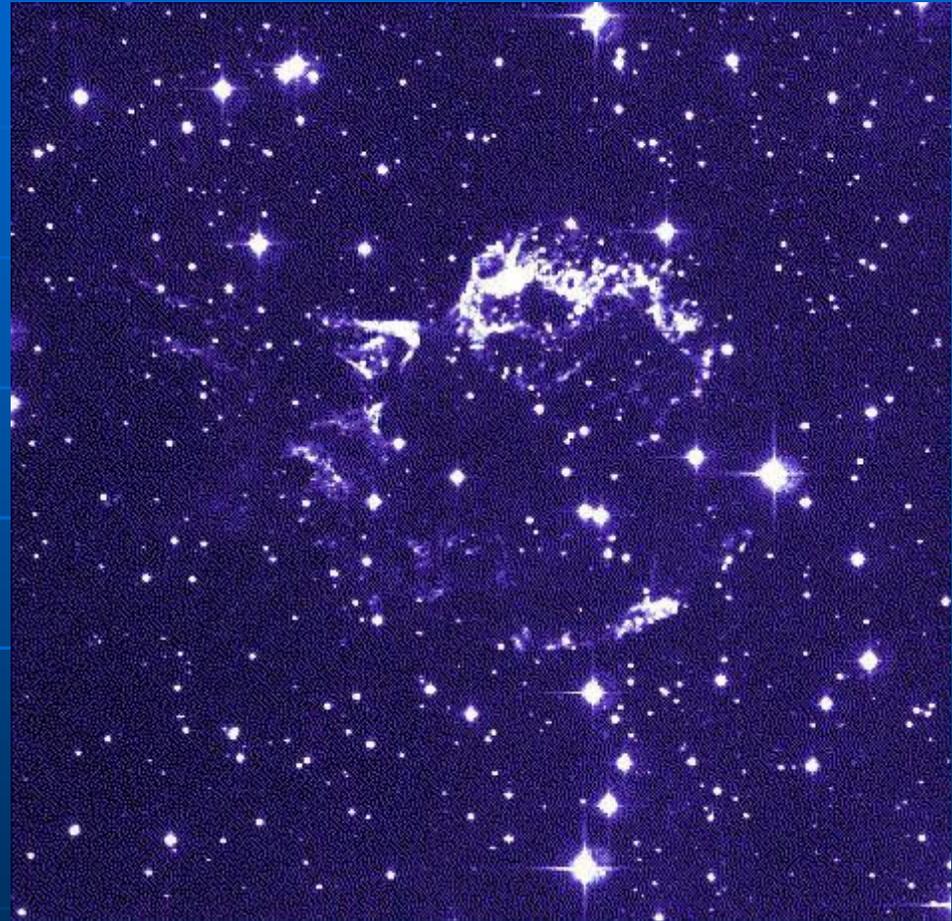
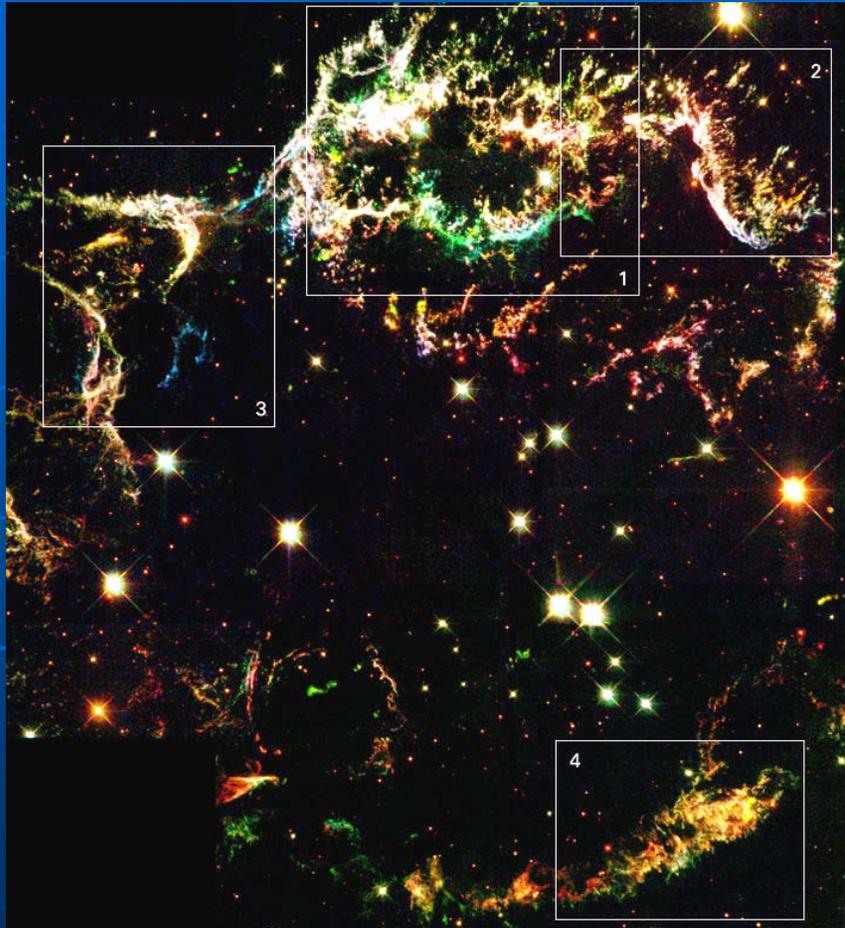


**Первый атомный взрыв
Тринити, 16 июля 1945, США**

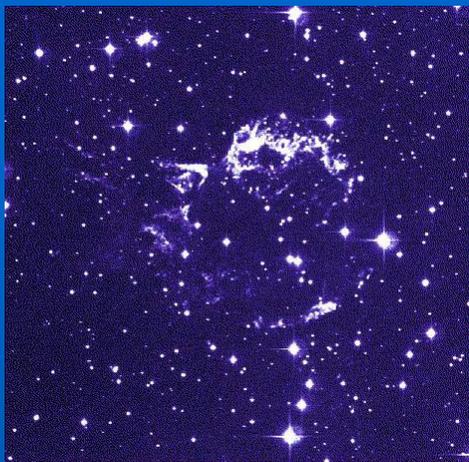


**Р. Оппенгеймер
Вып. от 8 ноября 1948**

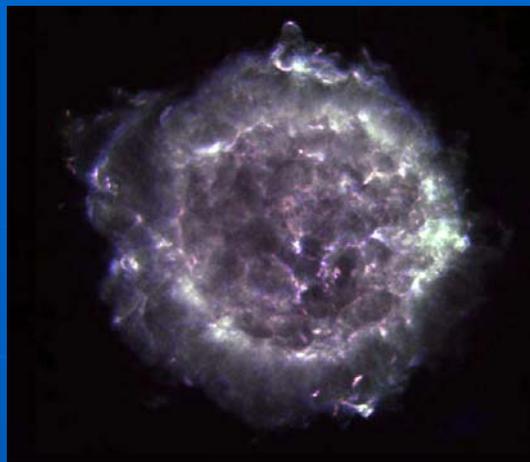
Остатки SNII: Cas A



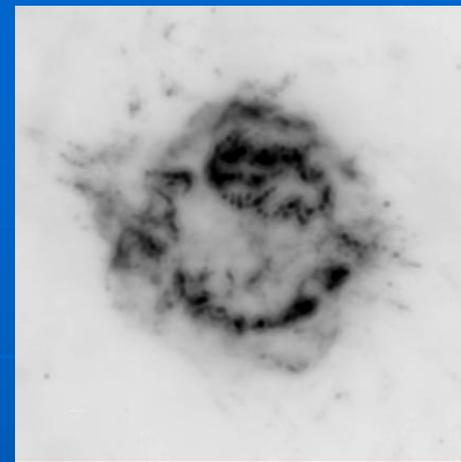
Взрыв ок. 320 лет назад, $M \sim 10 M_{\odot}$, едва виден в оптике



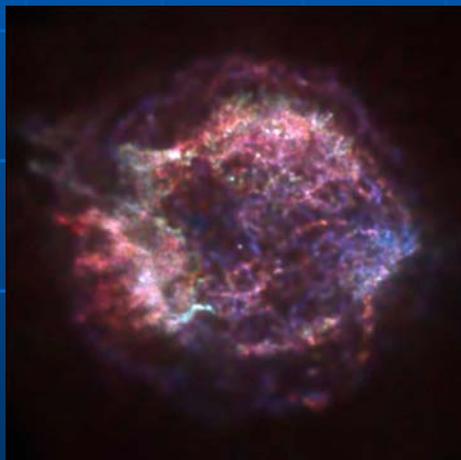
Видимый свет



радио

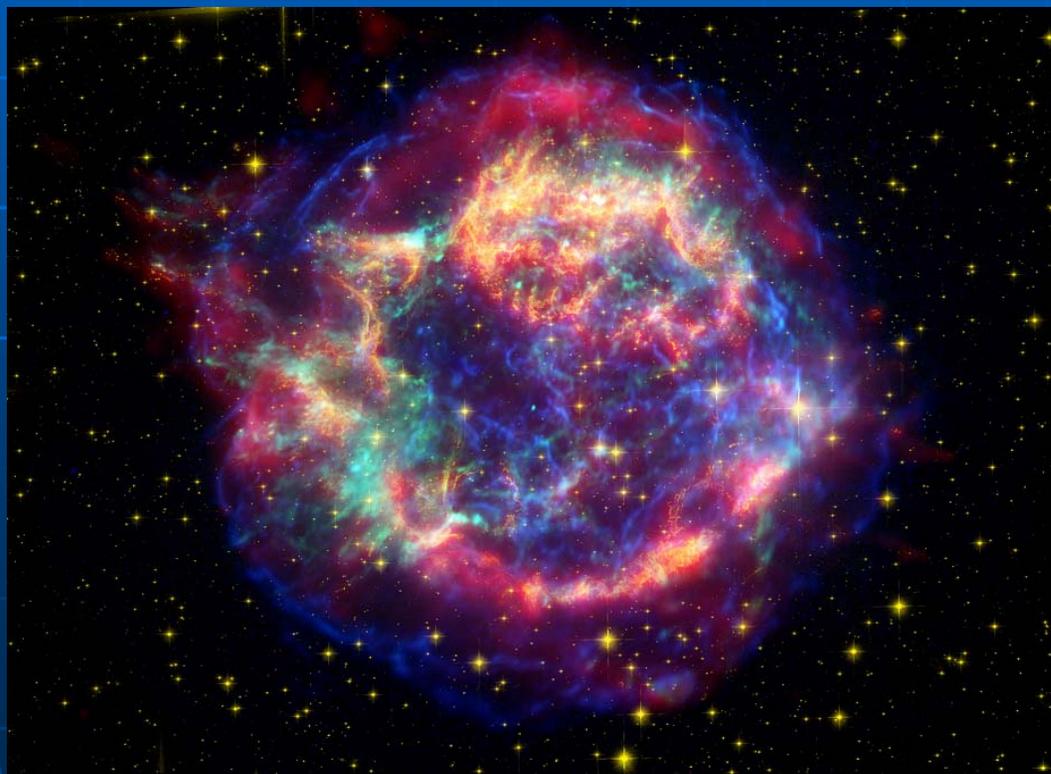


ИК



**Рентген, Чандра
Найден центральный
точечный источник -- H3**

22.12.2009





asa2_3d_sm_web.mpg

Взгляните на галактическую плоскость в радио диапазоне и увидите больше...



Область Лебеда.



Wide-Field Radio Image of the Galactic Center

$\lambda = 90 \text{ cm}$

(Kassim, LaRosa, Lazio, & Hyman 1999)

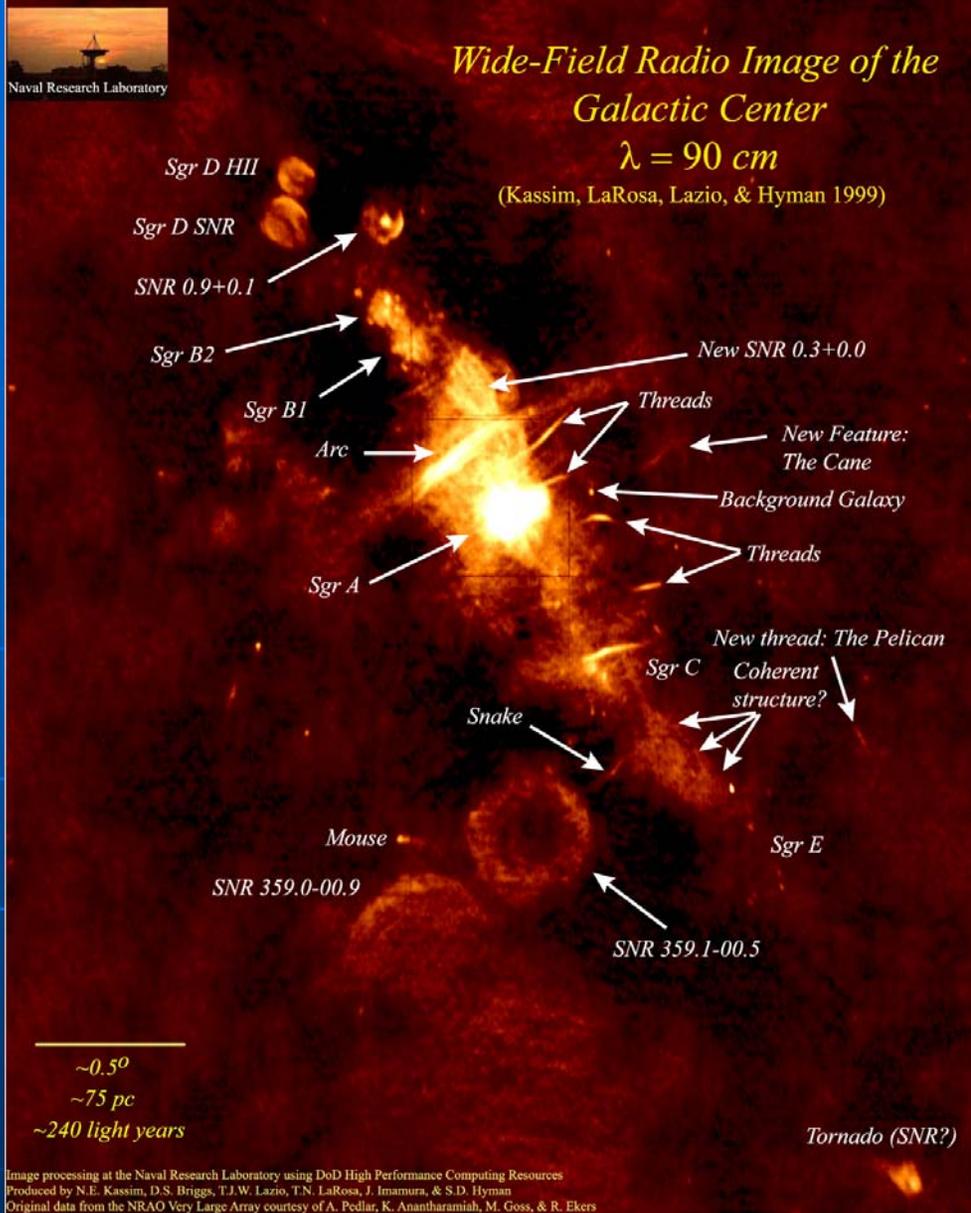
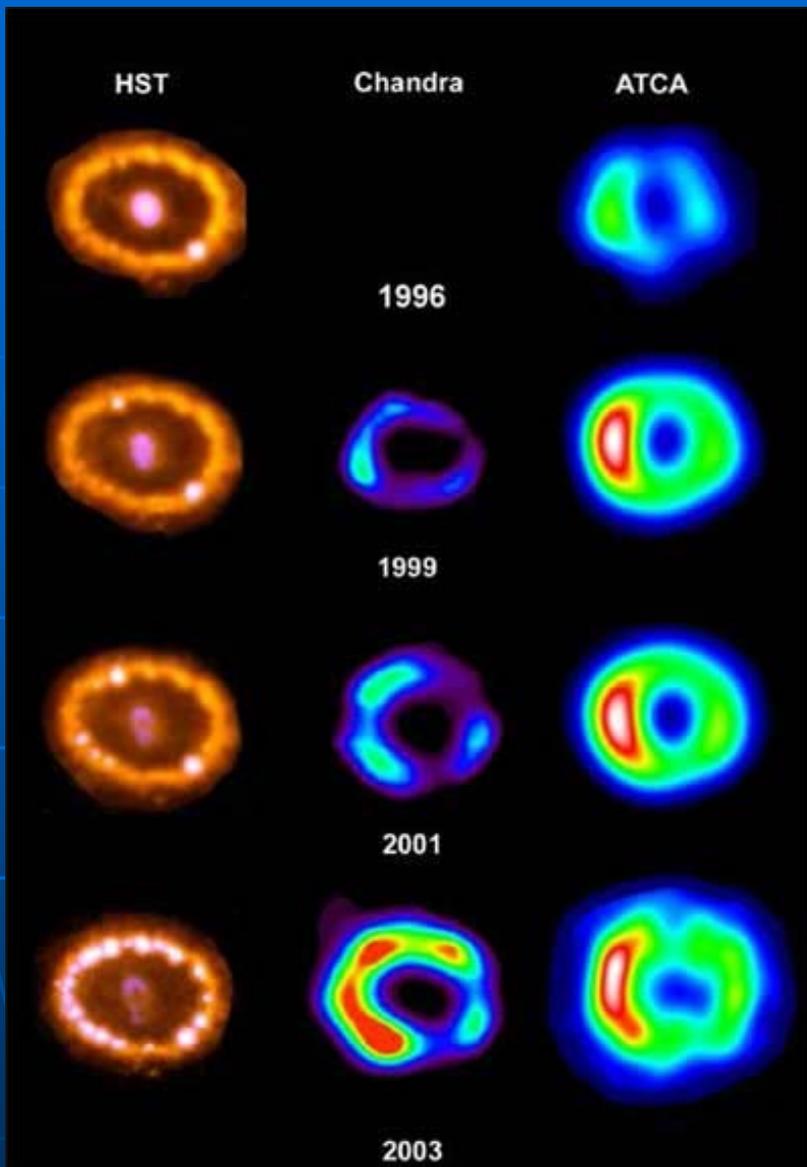
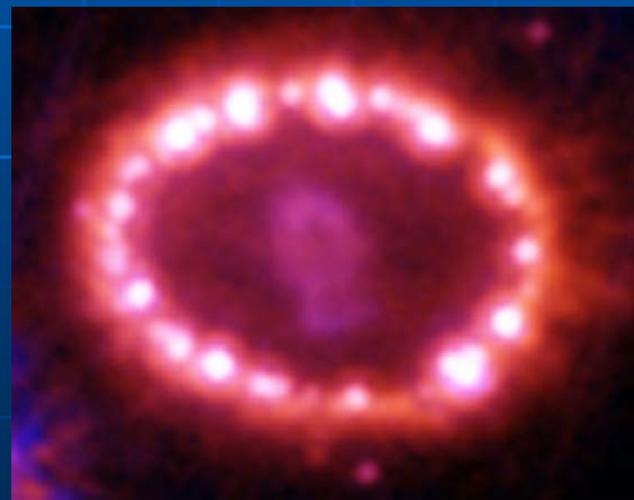


Image processing at the Naval Research Laboratory using DoD High Performance Computing Resources
 Produced by N.E. Kassim, D.S. Briggs, T.J.W. Lazio, T.N. LaRosa, J. Imamura, & S.D. Hyman
 Original data from the NRAO Very Large Array courtesy of A. Pedlar, K. Anantharamiah, M. Goss, & R. Ekers



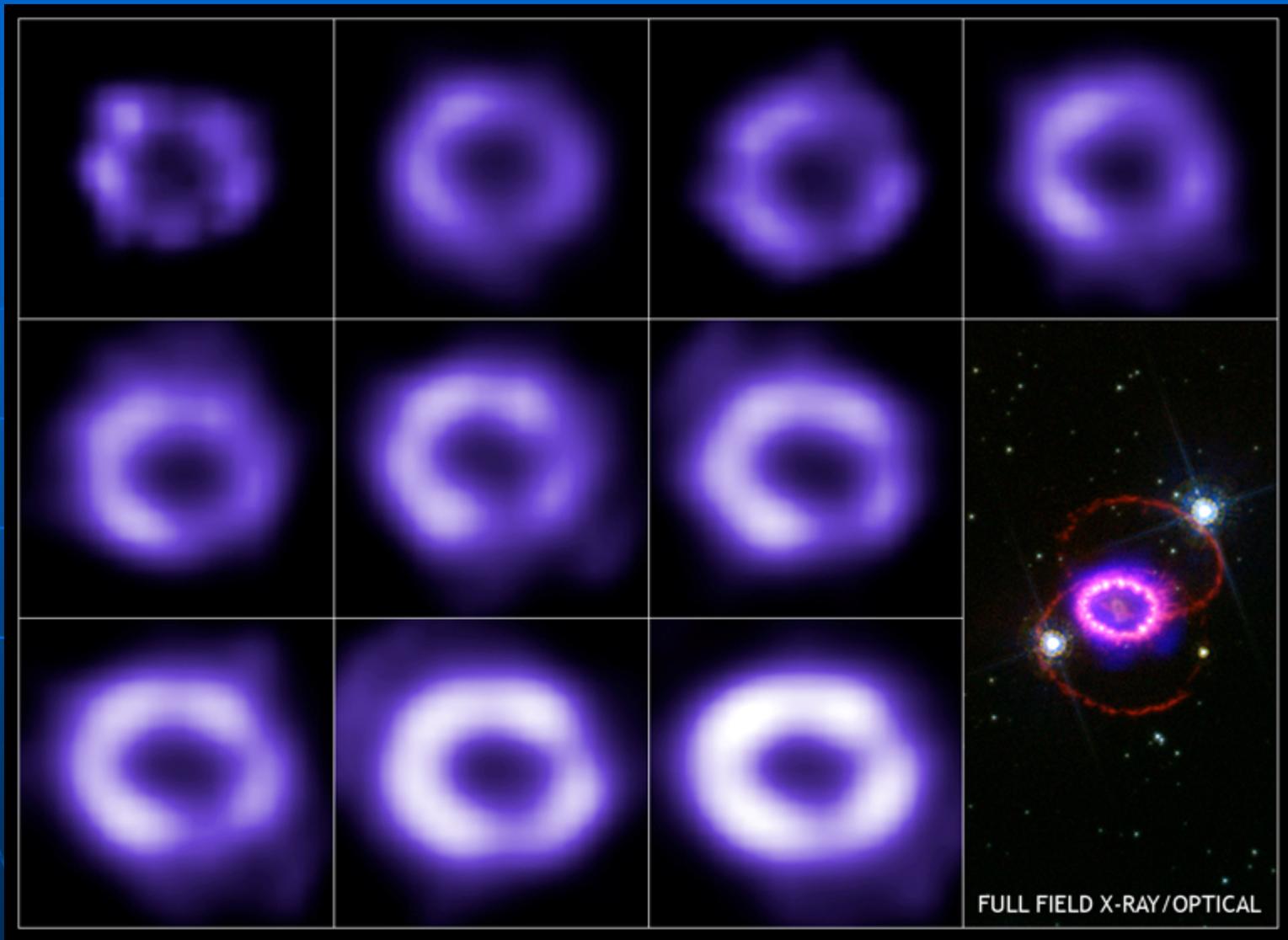
Взаимодействие ударной волны от SN1987a с неоднородной окружающей средой. Яркие пятна – свечение ионов C,N, возбужденный УВ через 10 лет после взрыва



1".66

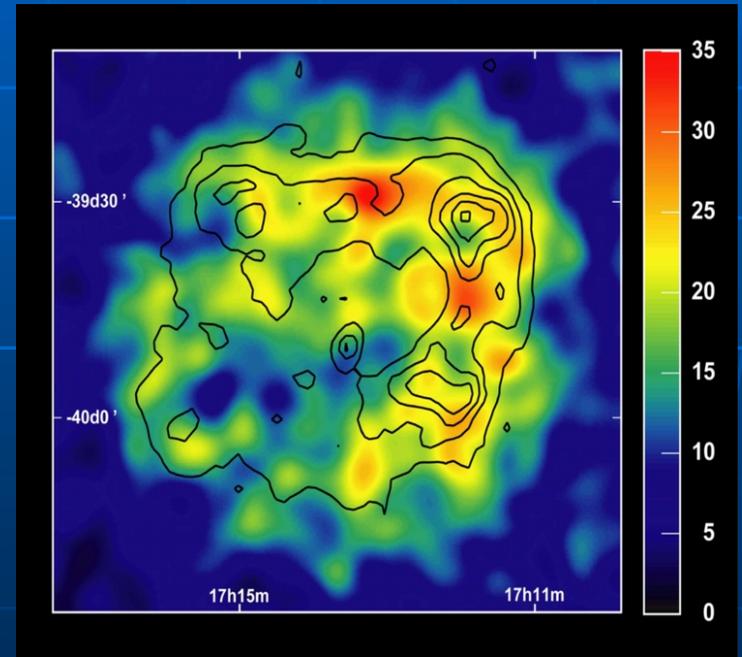
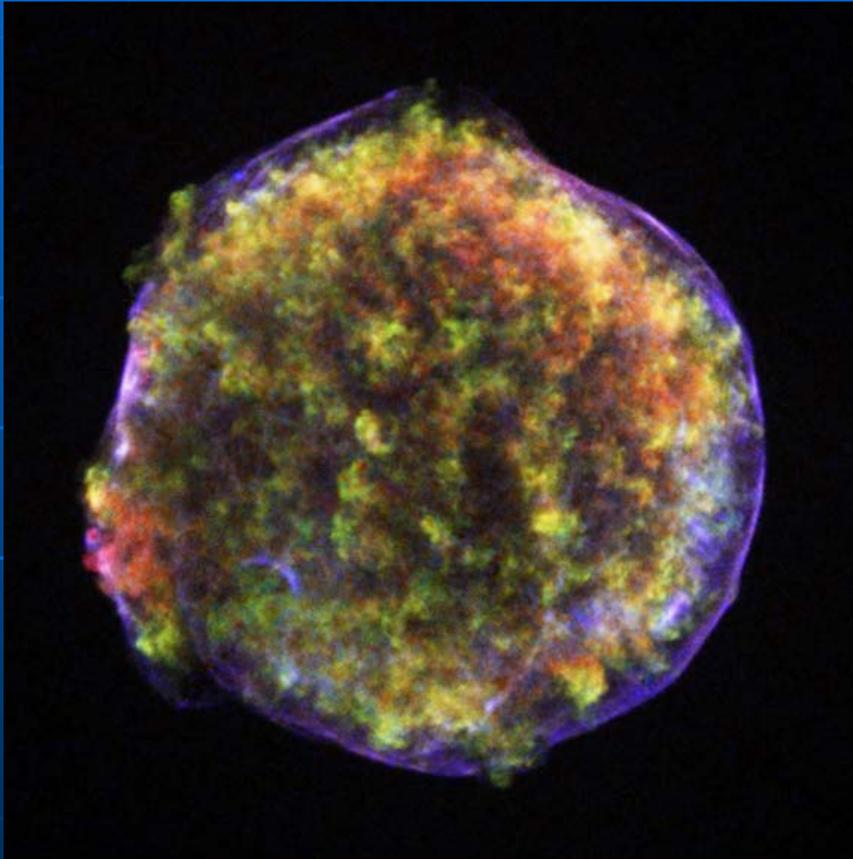






Tycho SNR (SN1a, 1572)

- Новые открытия (с 2005) – наблюдение ТэВ фотонов, доказывающие ускорение частиц высоких энергий на фронте УВ в остатках сверхновых (космические лучи)

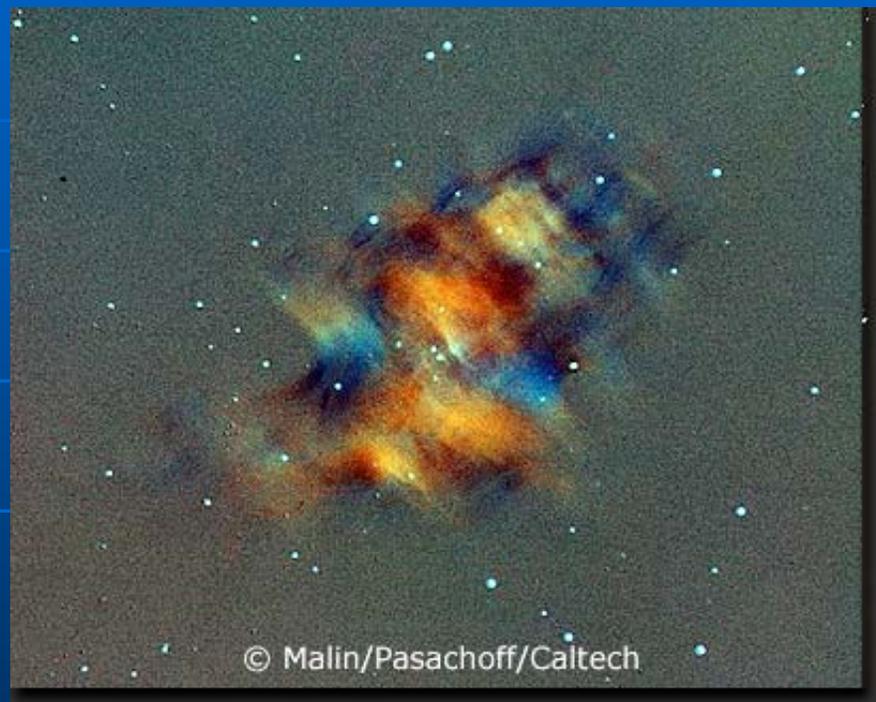
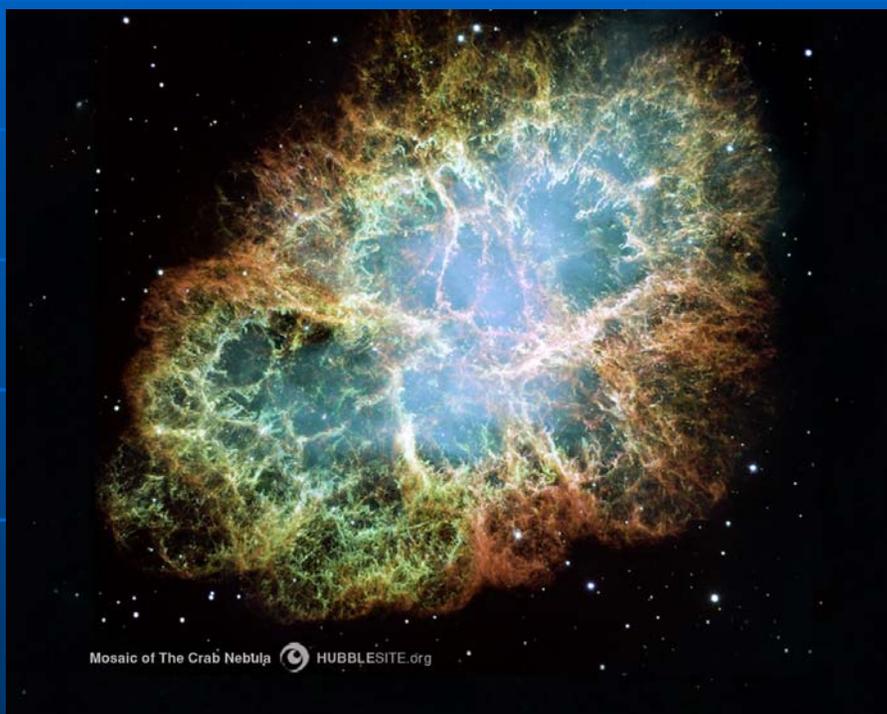


Плерионы – остатки СНИ, «заполненные» релятивистскими частицами от центральной НЗ



Крабовидная туманность (слева) – остаток СН 1054 г. Не видно оболочки и УВ. Диффузное свечение -- синхротронное излучение релятивистских электронов, генерируемых центральной нейтронной звездой – пульсаром Краб (справа)

Крабовидная туманность – синхротронное свечение релятивистских электронов в магнитном поле



Сильная поляризация (справа) доказывает синхротронную природу излучения

Старые остатки сверхновых

Cygnus Loop
HST · WFPC2



- **Тонкие
волокнистые
структуры,
видимые в
оптическом
диапазоне –
результат тепловой
неустойчивости
при охлаждении
горячей плазмы,
нагретой ударной
волной**

ST ScI OPO PRC95-11 · February 1995

2/14/95 zgl

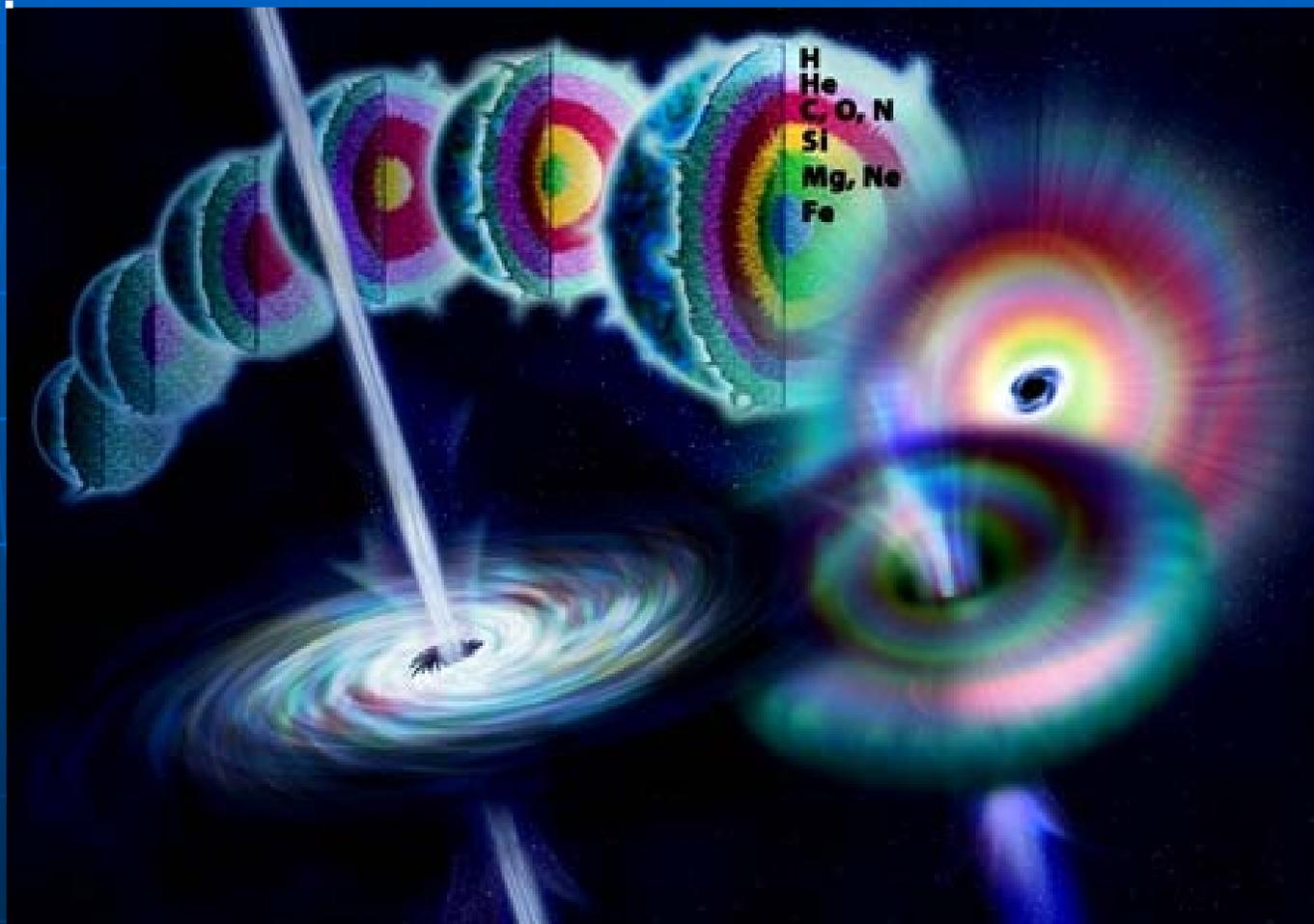


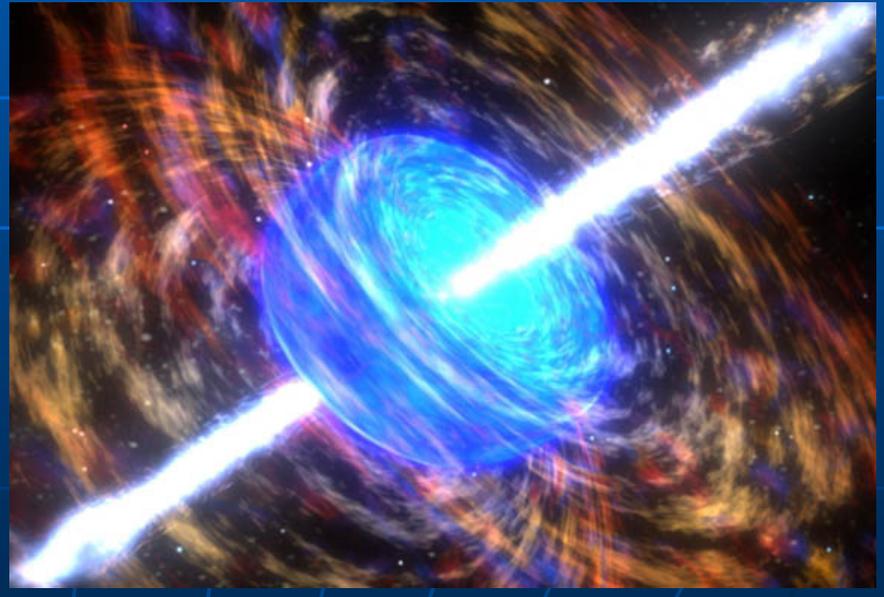
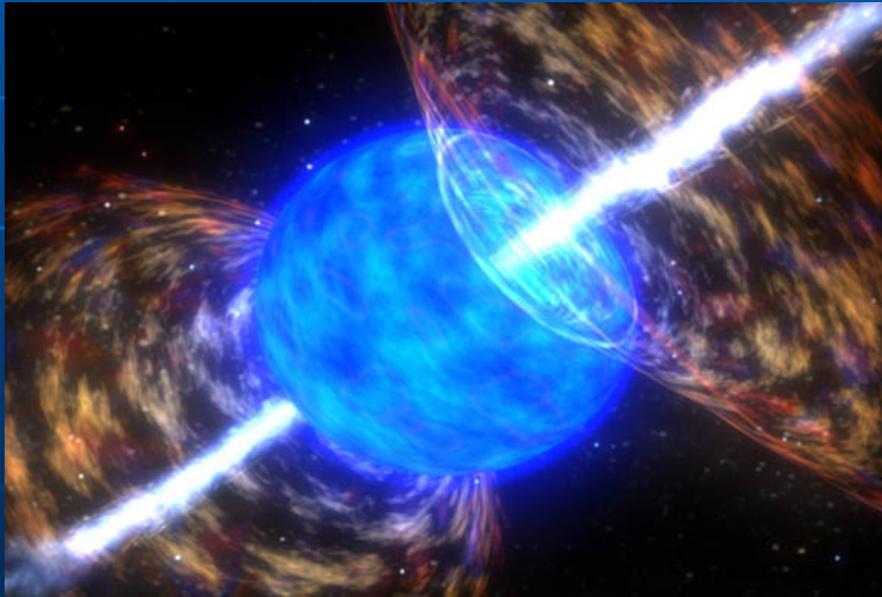
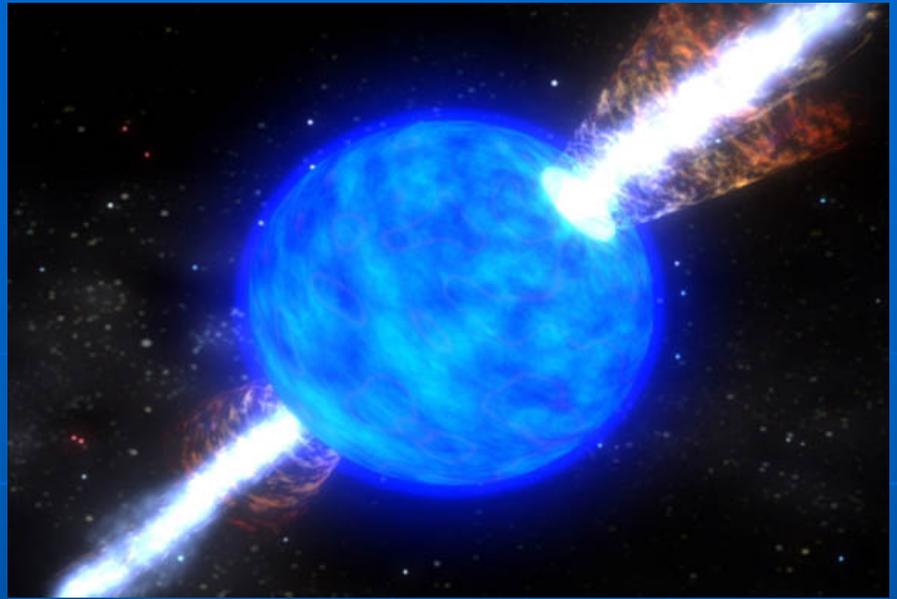
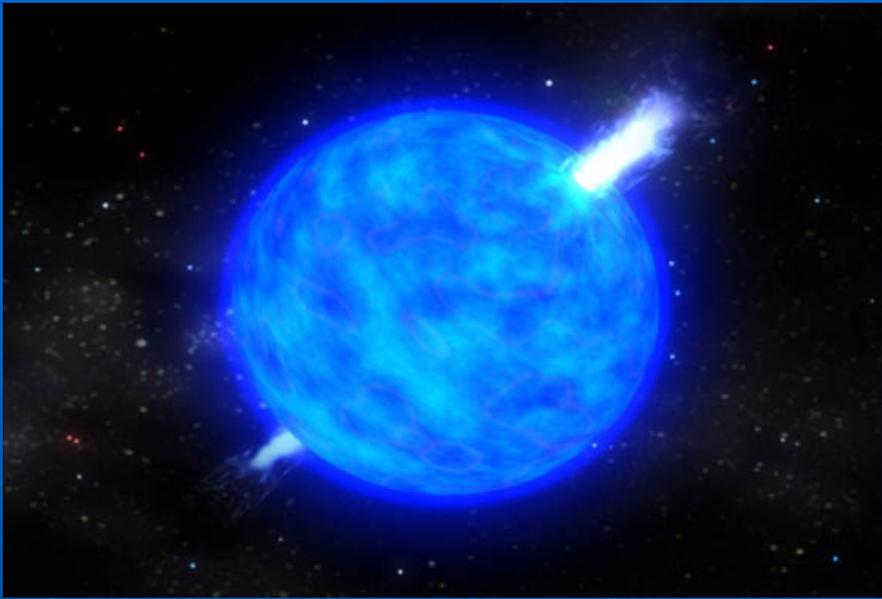
При уменьшении скорости расширения остатка до 10-100 км/с (~дисперсии скоростей в межзвездной среде), Происходит постепенное «растворение» в Межзвездной среде (возраст остатка $\sim 10^4$ лет).

Космические гамма-всплески – самые мощные взрывы в КОСМОСЕ

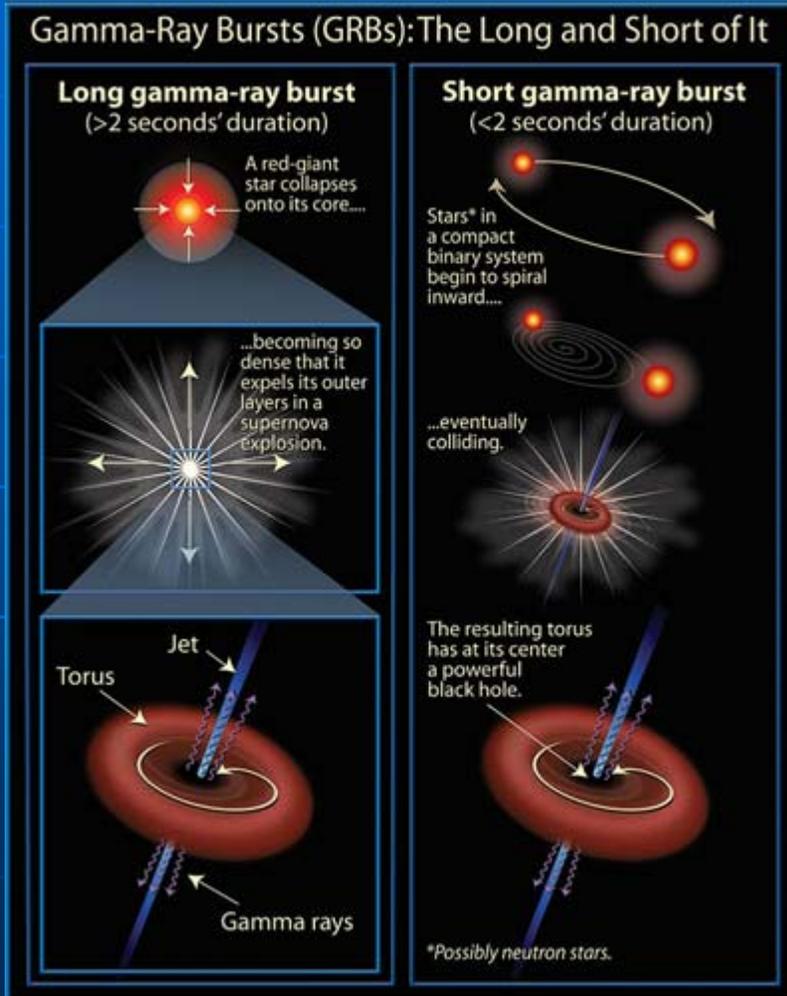
- Открыты в конце 1960-х
- Природа стала проясняться в конце 1990-х
- Некоторые из этих всплесков ассоциируются с самыми энергичными сверхновыми («гиперновые»)
- Видны до красных смещений $z \sim 6.3$ – самые далекие взрывы
- Энерговыделение только в гамма-излучении порядка 10^{51} эрг
- Послесвечения гамма-всплесков видны во всех диапазонах (от радио до рентгеновского)

Эволюция массивной звезды с вращением и магнитным полем может оканчиваться образованием быстровращающейся черной дыры. Этот процесс может сопровождаться выделением огромной энергии в виде узконаправленного релятивистского джета.





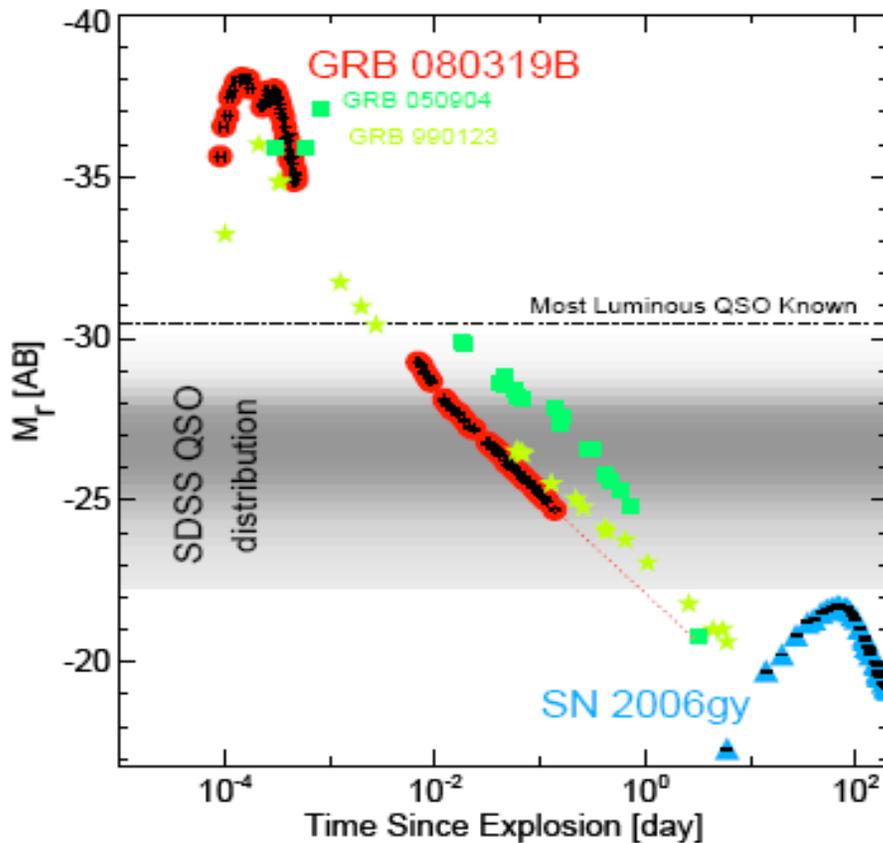
Сливающиеся из-за излучения гравитационных волн двойные нейтронные звезды могут приводить к коротким мощным гамма-всплескам (Блинников и др. 1984)



(Price & Rosswog, 2005)

binary_crash_sm.mpg

Самый яркий гамма-всплеск 19 марта 2008 г

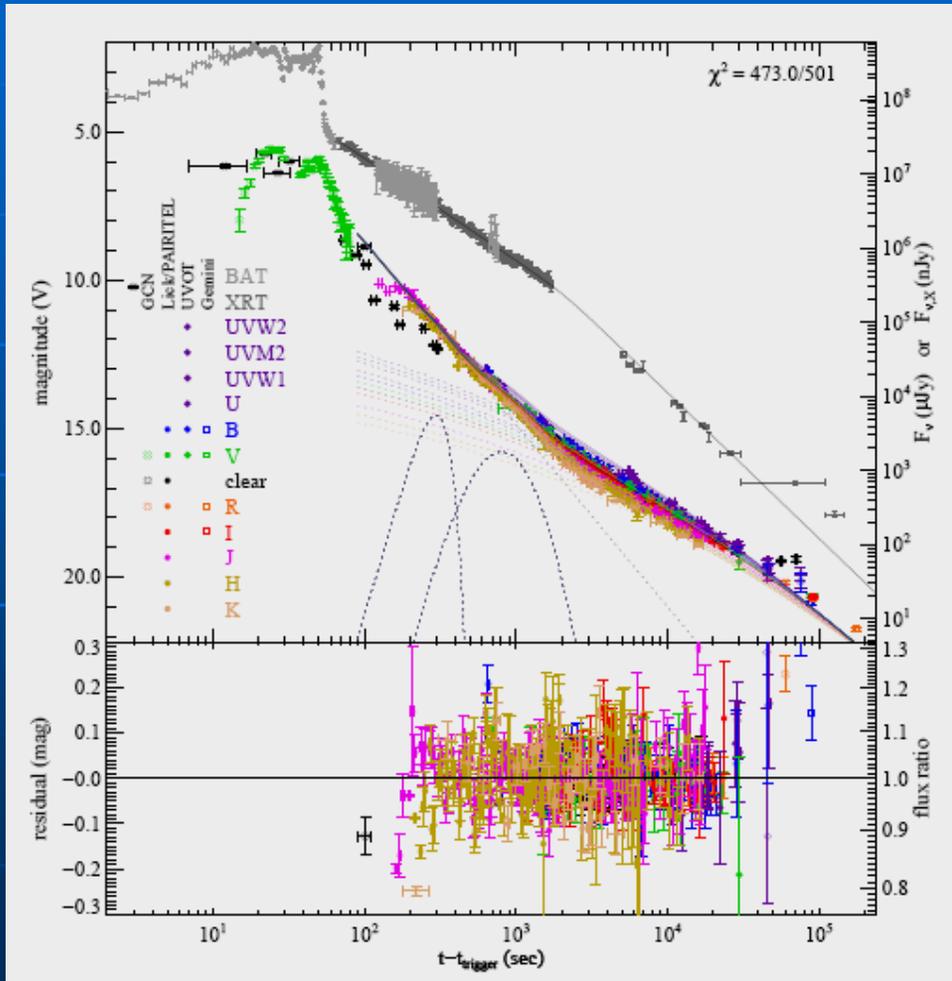


В мягком гамма-диапазоне выделилась энергия, сопоставимая с энергией покоя Солнца $\sim 10^{54}$ эрг (предполагая сф.-симм.)

Максимум блеска этого ГВ в видимом свете был в миллион раз ярче самой яркой сверхновой

(Bloom et al. 2008)

... И его в течение 10 секунд можно было видеть простым глазом! При красном смещении $z \sim 1$ расстояние до источника ~ 6 млрд. парсек (почти что «край» Вселенной)!



Если бы такой взрыв произошел в центре нашей Галактики, он светил бы в видимом свете ярче Солнца.

(Bloom et al. 2008)

Заключение

- Эволюция звезд -- основной источник обогащения межзвездной среды тяжелыми элементами (альфа-элементы, железный пик, r- s- процессы)
- Причина взрывов звезд-- гравитационный коллапс проэволюционировавших ядер массивных звезд с образованием нейтронной звезды (СНII) или термоядерный взрыв белых карликов с предельной массой (~ 1.4 Солнца) (СН1а)
- В ударных волнах, порождаемых сверхновыми, происходит ускорение заряженных частиц до энергий около 10^{15} эВ
- Самые энергичные взрывы -- космические гамма-всплески, по видимому, связаны с образованием черных дыр при коллапсе очень массивных вращающихся звезд или слиянием двойных нейтронных звезд. Возможно, r-процессы наиболее активно происходят при слияниях нейтронных звезд