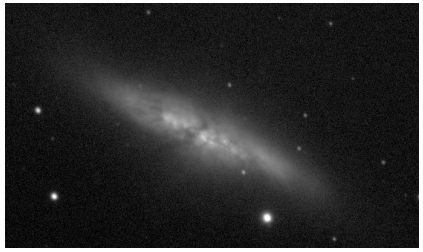
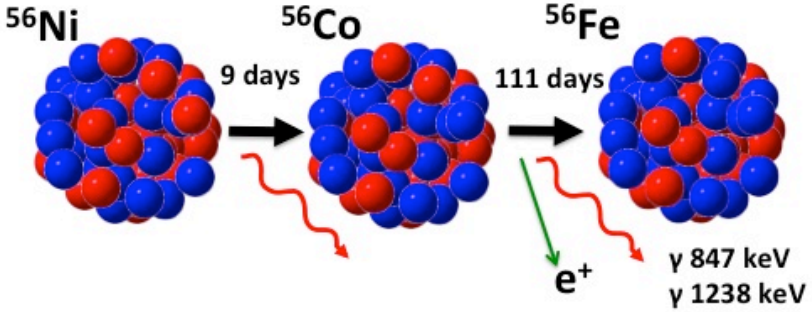
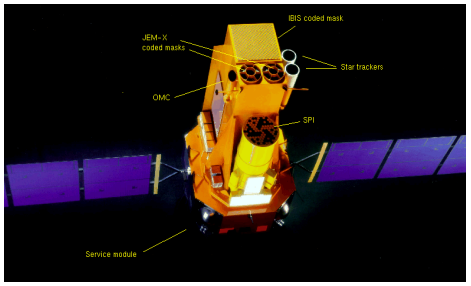
Первое детектирование гамма-излучения радиоактивного ^{56}Co от сверхновой типа Ia (SN2014J) обсерваторией ИНТЕГРАЛ.



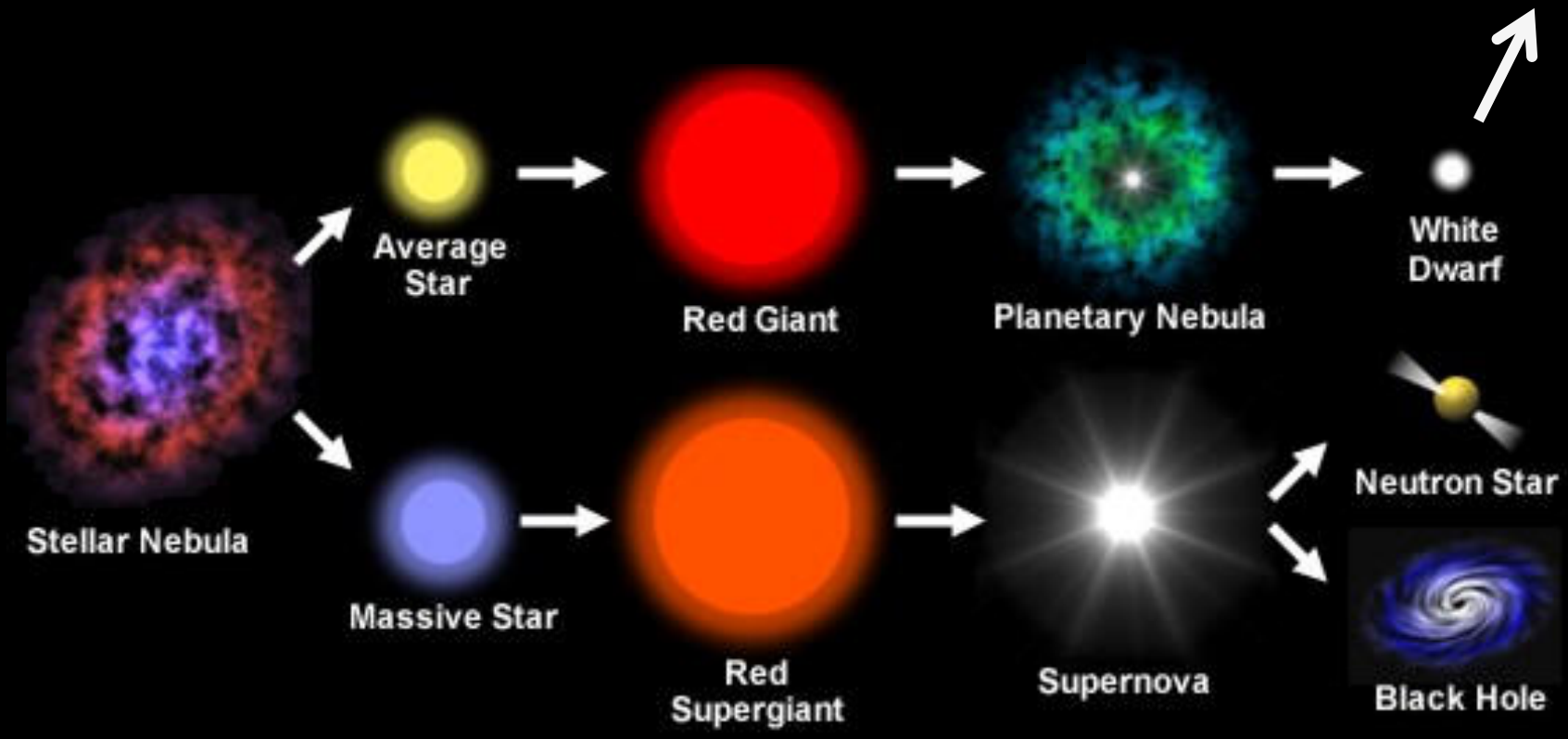




Е.Чуразов, Р.Сюняев, Дж.Изерн, Ю.Кнедлседер, П.Жан, Ф.Лебран, Н.Чугай, С.Гребенев, Э.Браво, С.Сазонов, М.Рено

Эволюция звезд разной массы

Type Ia
SN2014J



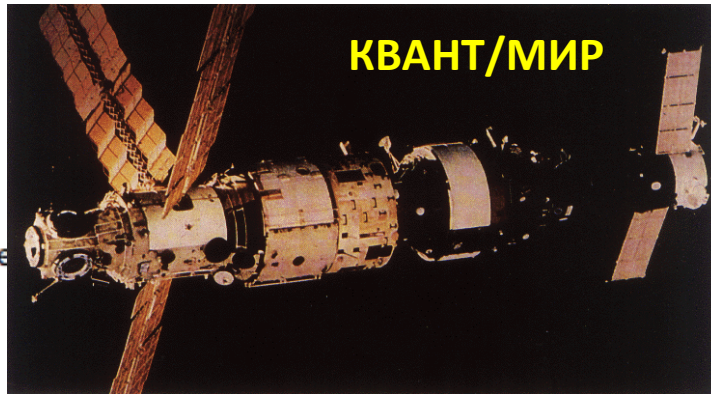
Type II
SN1987A

Ближайшие сверхновые в космическую эру (+ гамма-обсерватория в космосе)

Сверхновая типа II : SN1987A в LMC

Сверхновая типа Ia : SN2014J в M82

SN1987A типа II в Большом Магеллановом Облаке



Letters to Nature

Nature **330**, 227-229 (19 November 1987) | doi:10.1038/330227a0; Accepte

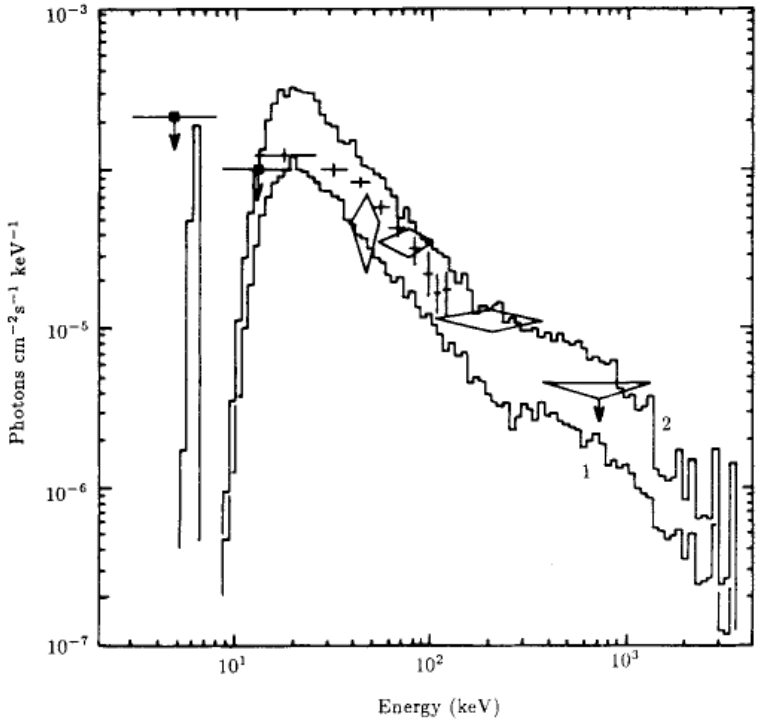
Discovery of hard X-ray emission from supernova 1987A

R. Sunyaev*, A. Kaniovsky*, V. Efremov*, M. Gilfanov*, E. Churazov*, S. Grebenev*, A. Kuznetsov*, A. Melioranskiy*, N. Yamburenko*, S. Yunin*, D. Stepanov*, I. Chulkov*, N. Pappe*, M. Boyarskiy*, E. Gavrilova*, V. Loznikov*, A. Prudkoglyad*, V. Rodin*, C. Reppin†, W. Pietsch†, J. Engelhauser†, J. Trümper†, W. Voges†, E. Kendziorra‡, M. Bezler†, R. Staubert†, A. C. Brinkman§, J. Heise§, W. A. Mels§, R. Jager§, G. K. Skinner||, O. Al-Emam||, T. G. Patterson|| & A. P. Willmore||

1. *Space Research Institute, USSR Academy of Sciences, Moscow, USSR
2. †Max-Planck-Institut für Physik und Astrophysik, Institut für Extraterrestrische Physik, 8046 Garching, FRG
3. ‡Astronomisches Institut der Universität Tübingen, 7400 Tübingen, FRG
4. §Space Research Laboratory, Utrecht, The Netherlands
5. ||Department of Space Research, University of Birmingham, Edgbaston, Birmingham B15 2TT, UK

We report the discovery of hard X-rays from the region of the supernova SN1987A in the Large Magellanic Cloud. The observations were made from the Mir-Kvant observatory 'Röntgen'. Hard X-rays were first observed on 10 August 1987

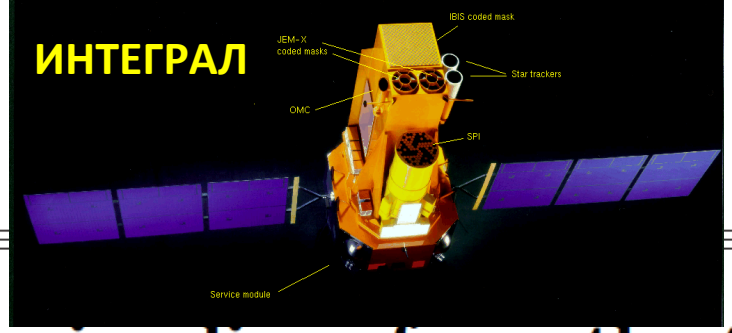
▲ Top



Сверхновая типа II: коллапс ядра массивной (20 масс Солнца) звезды.

SN2014J типа Ia в M82

LETTER



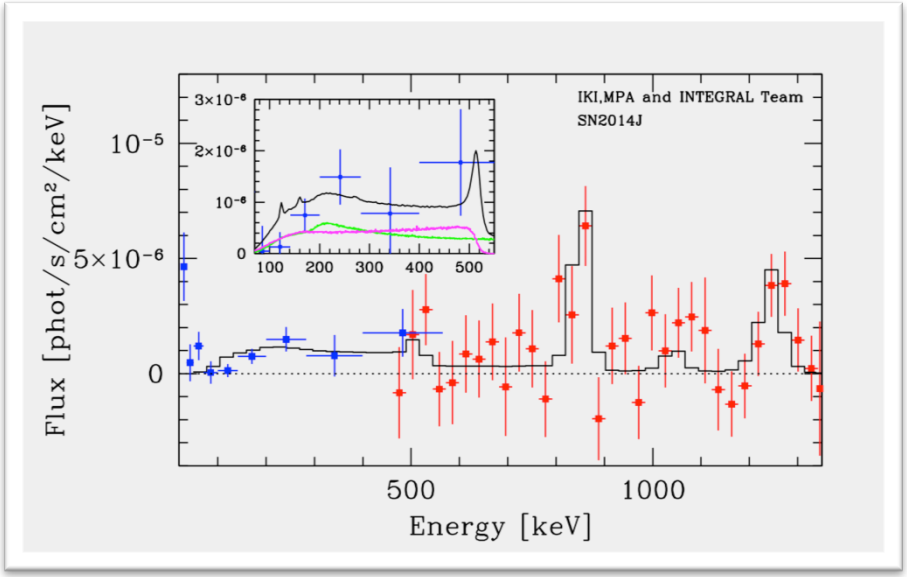
28 августа 2014

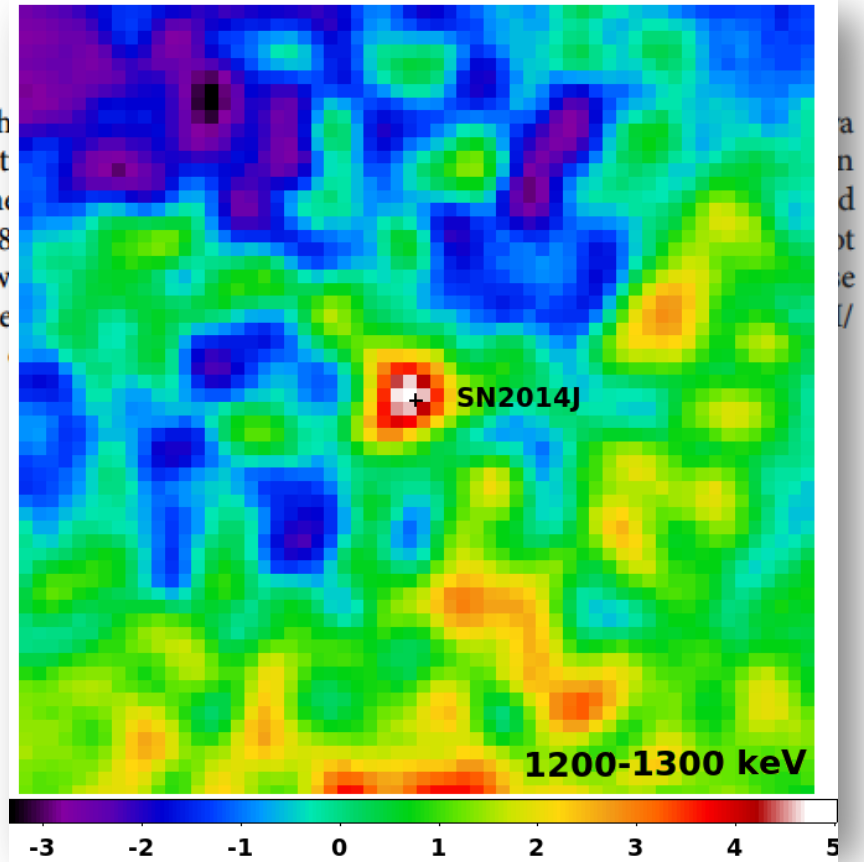
doi:10.1038/nature13672

Cobalt-56 γ-ray emission lines from the type Ia supernova 2014J

E. Churazov[1,2], R. Sunyaev[1,2], J. Isern[3], J. Knödlseder[4,5], P. Jean[4,5], F. Lebrun[6], N. Chugai[7], S. Grebenev[1], E. Bravo[8], S. Sazonov[1,9] & M. Renaud[10]

A type Ia supernova is thought to be a thermonuclear explosion of either a single carbon–oxygen white dwarf or a pair of merging white dwarfs. The explosion fuses a large amount of radioactive ^{56}Ni (refs 1–3). After the explosion, the decay chain from ^{56}Ni to ^{56}Co to





SN2014J типа Ia в галактике M82

21 января 2014, Steve Fossey, UCL

Дата взрыва: 14 января 2014

M82 (Сигара)

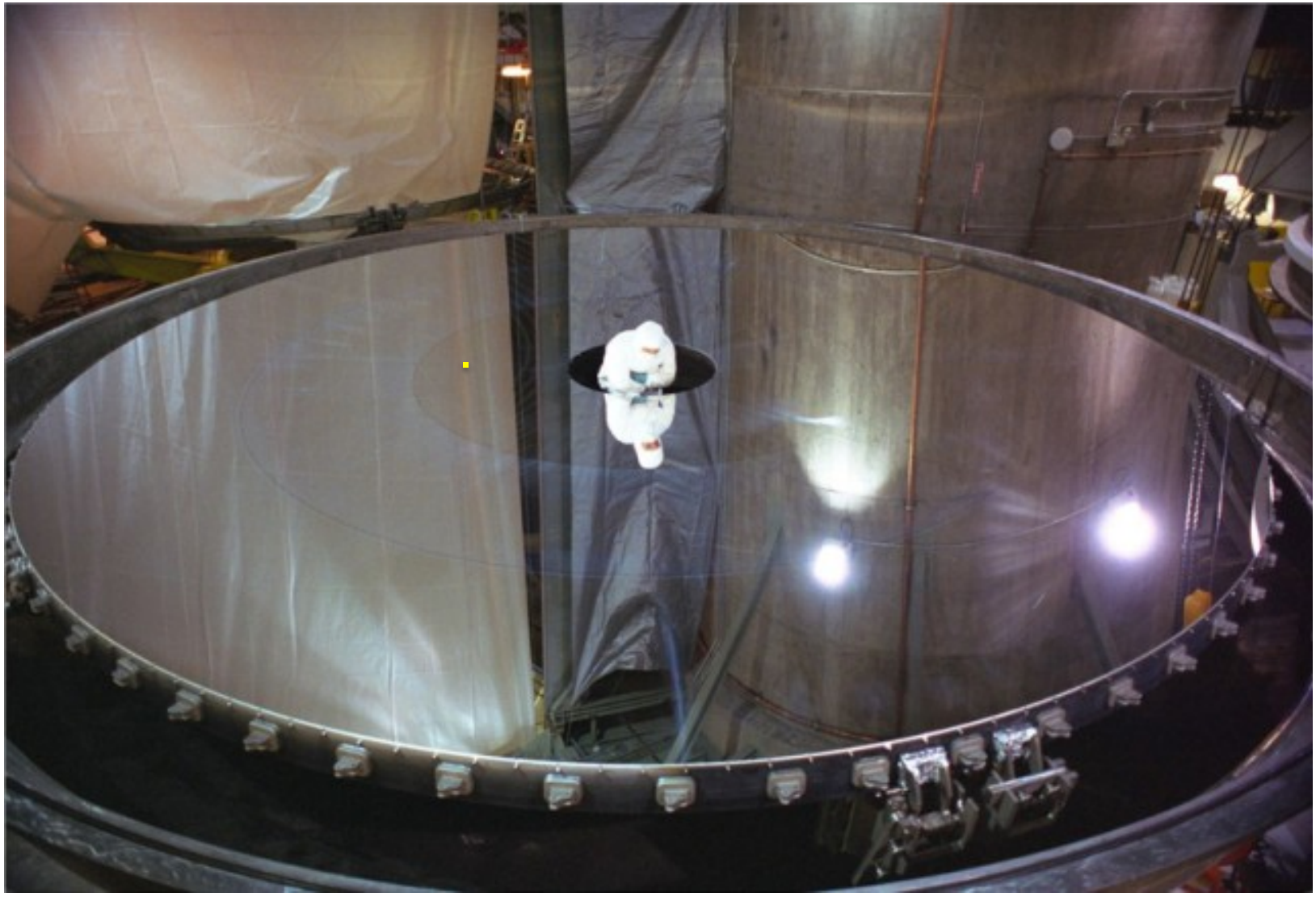
Расстояние до M82
3.5 Мпк – 11 млн.световых лет

Величина: 10.5 в пике
Поглощение: 1.7-2 величины

Сверхновая типа Ia

Первый шанс зарегистрировать сверхновую типа Ia в гамма-диапазоне

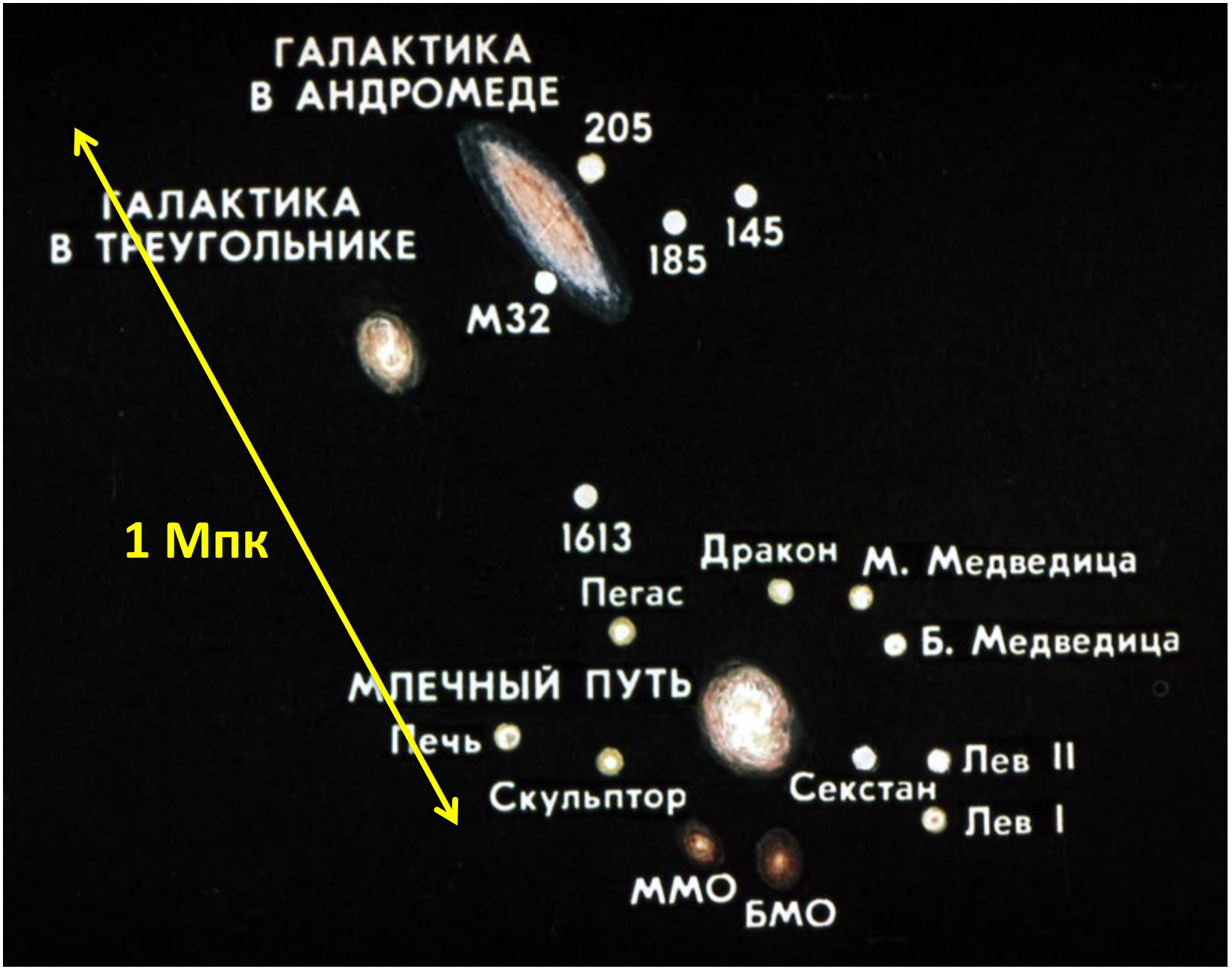
Почему для гамма диапазона нужна близкая сверхновая?



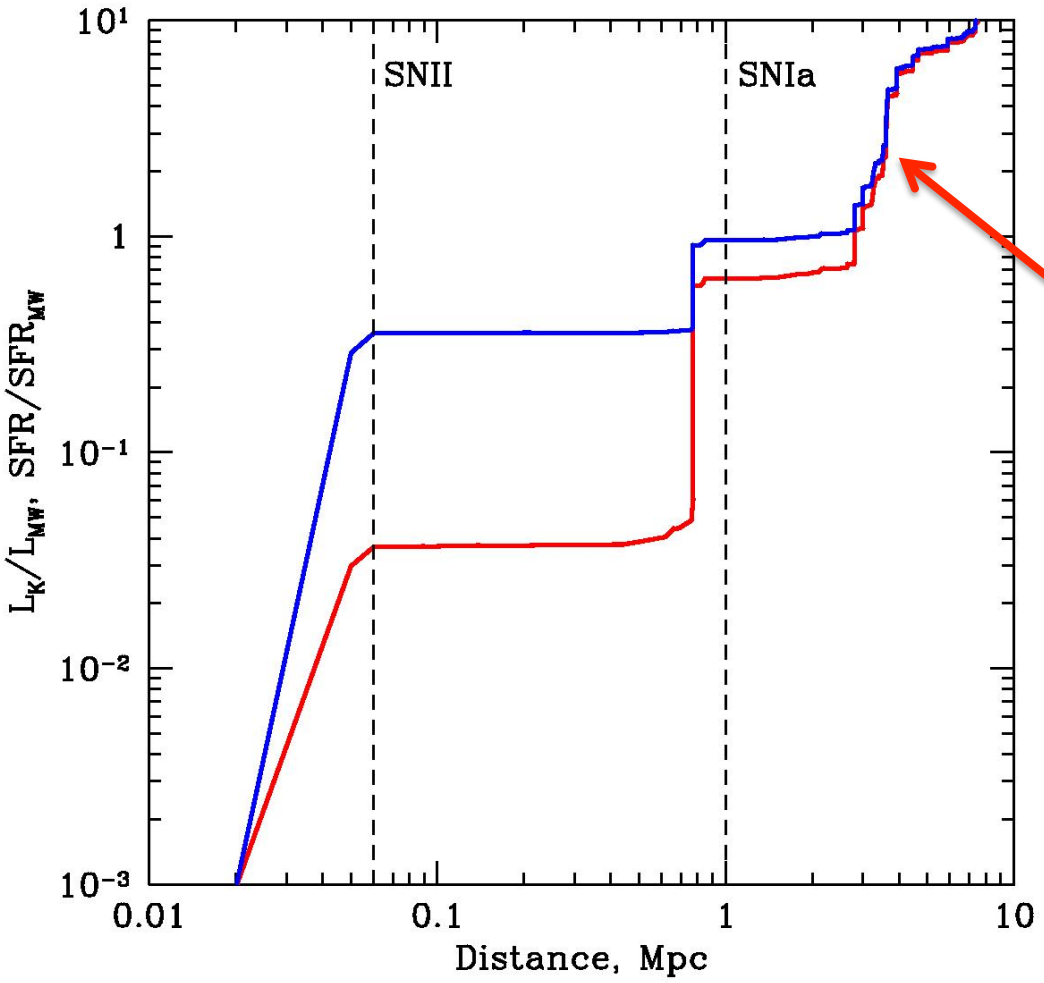
Как часто взрываются сверхновые Ia?

Раз в 100-200 лет в нашей Галактике

SN1604A	<6 kpc - в нашей Галактике [времена Бориса Годунова]
SN1972E	3.6 Mpc
SN1986G	3.7 Mpc
SN2011fe	6.4 Mpc
SN2014J	3.3-3.5 Mpc


ГАЛАКТИКА
В АНДРОМЕДЕ
205
ГАЛАКТИКА
В ТРЕУГОЛЬНИКЕ
185
145
M32
1 Мпк
1613
Дракон
М. Медведица
Пегас
Б. Медведица
МЛЕЧНЫЙ ПУТЬ
Печь
Лев II
Скульптор
Секстан
Лев I
ММО
БМО

Масса звезд внутри сферы с заданным R: M(<R)

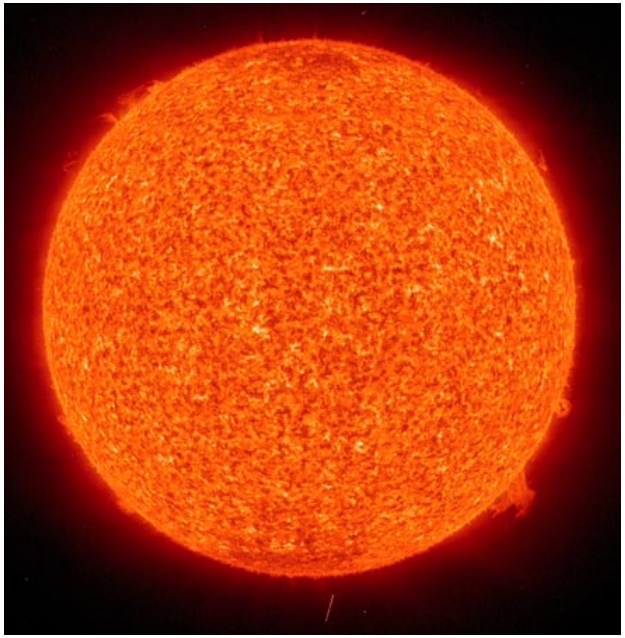


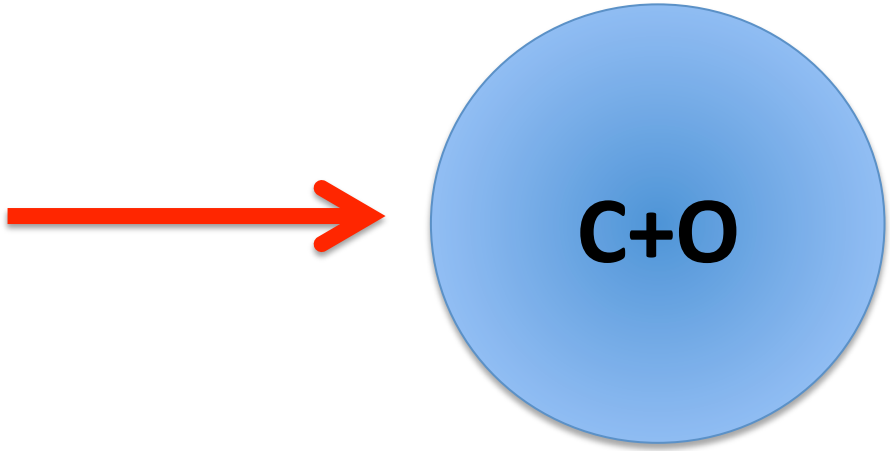
1 за 25 лет

(using catalog of local galaxies from Karachentsev's sample)

Наша Галактика: ~1 SNIa в столетие

Белый карлик = Конечная стадия эволюции звезд с массой M<8 масс Солнца





Радиус ~ 10 000 км
Масса ~ 0.5 масс Солнца
Углерод+Кислород

Белый карлик поддерживается давлением вырожденного электронного газа.

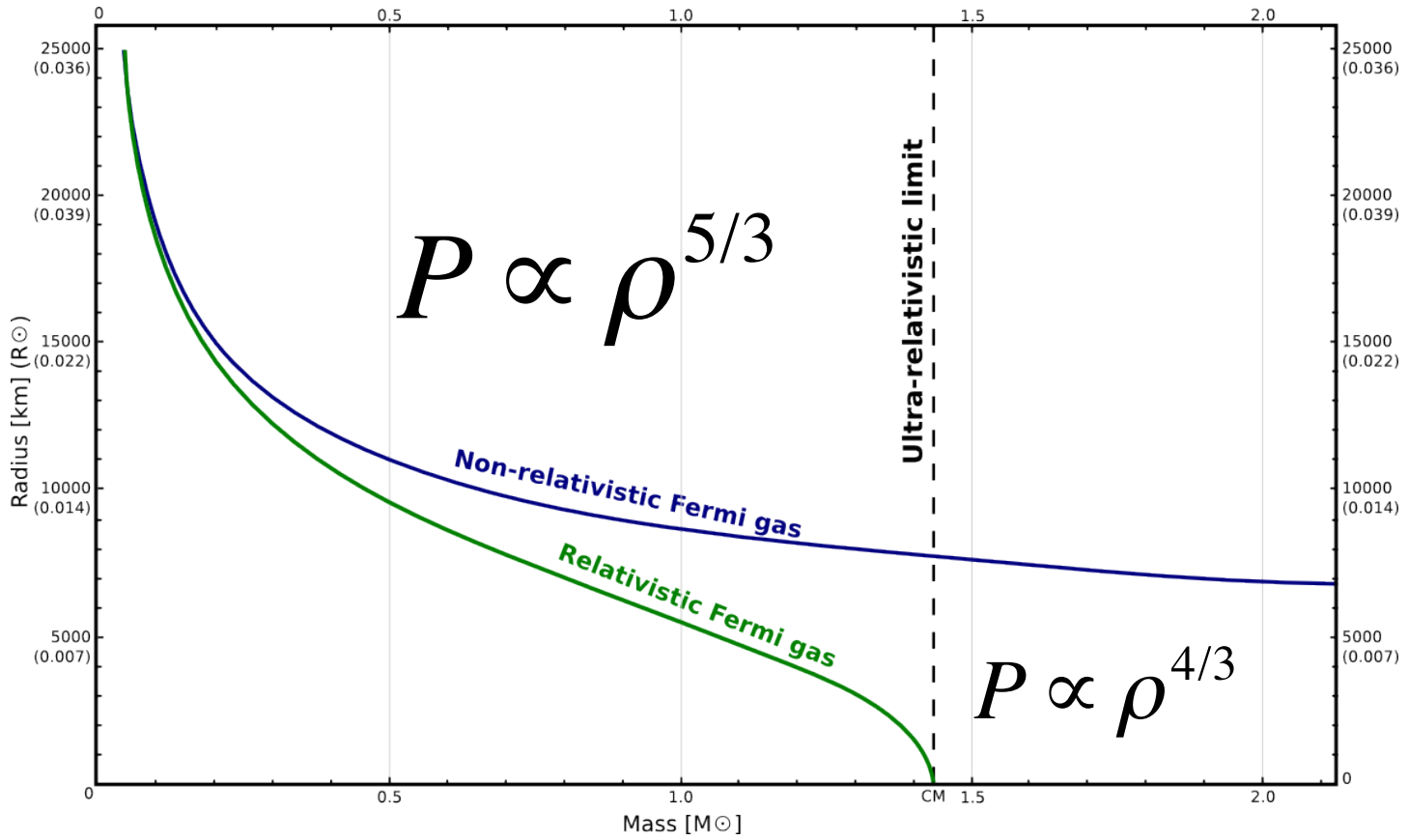
Максимальная масса ~1.4 M_{sun} – предел Чандрасекара

Предел Чандрасекара

C+O

$$\Delta p \Delta x \sim \hbar$$

$$\Delta x \propto \rho^{-1/3}$$



Радиус

Масса

Что произойдет с белым карликом, если его масса превысит предел Чандрасекара?

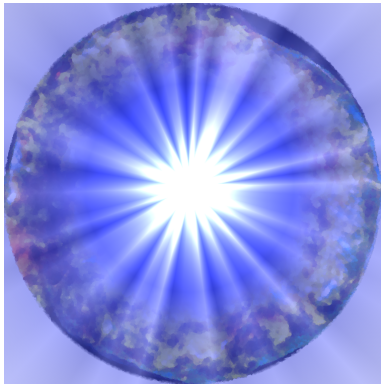
Белый карлик

C+O

+ΔM

Нейтронная Звезда (10 км)

Термоядерный взрыв : SNIa

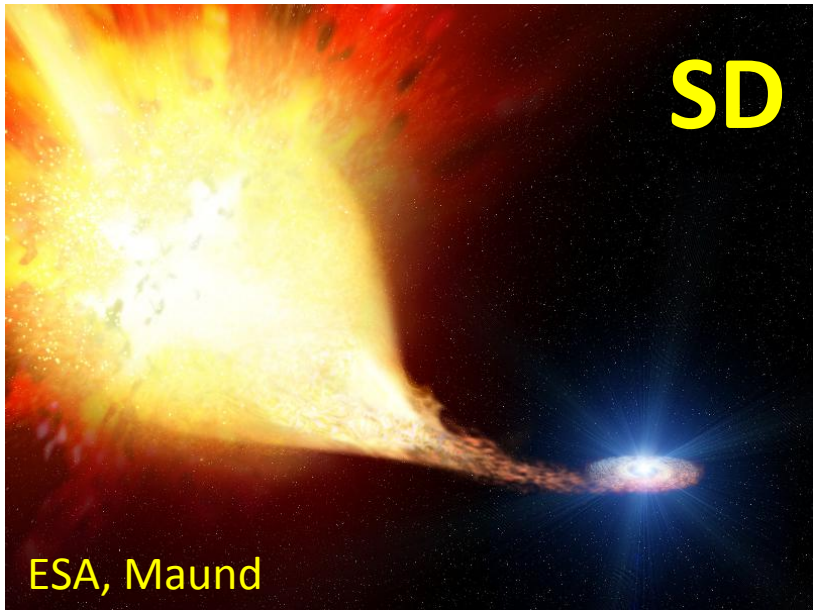


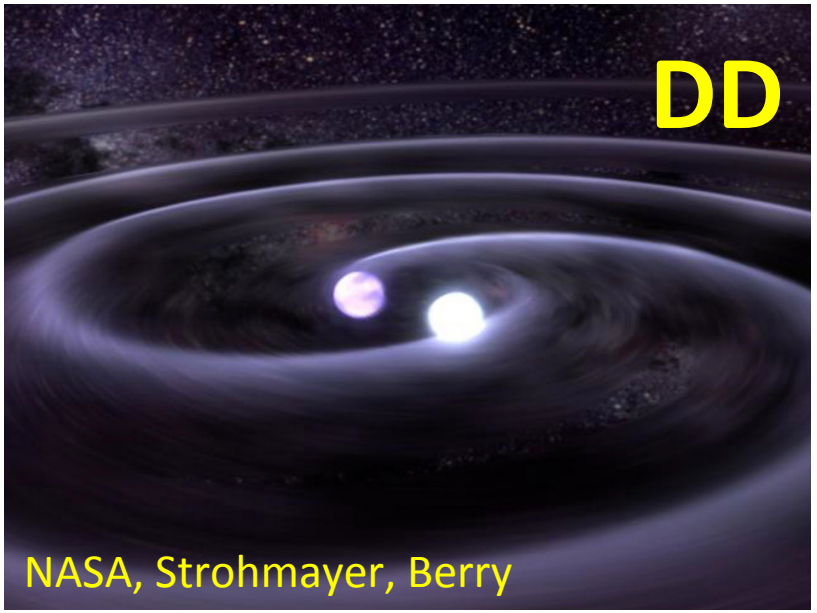
C,O→ Si, Ca, Ni

0.6-0.8 МэВ/нуклон

Скорость ~ 10^4 км/с

Рост массы белого карлика





WD+ΔM

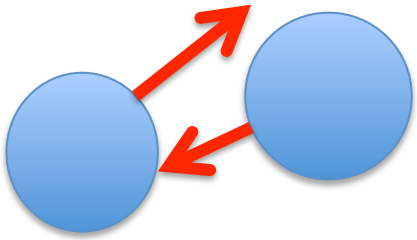
Whelan & Iben 1974

WD+WD

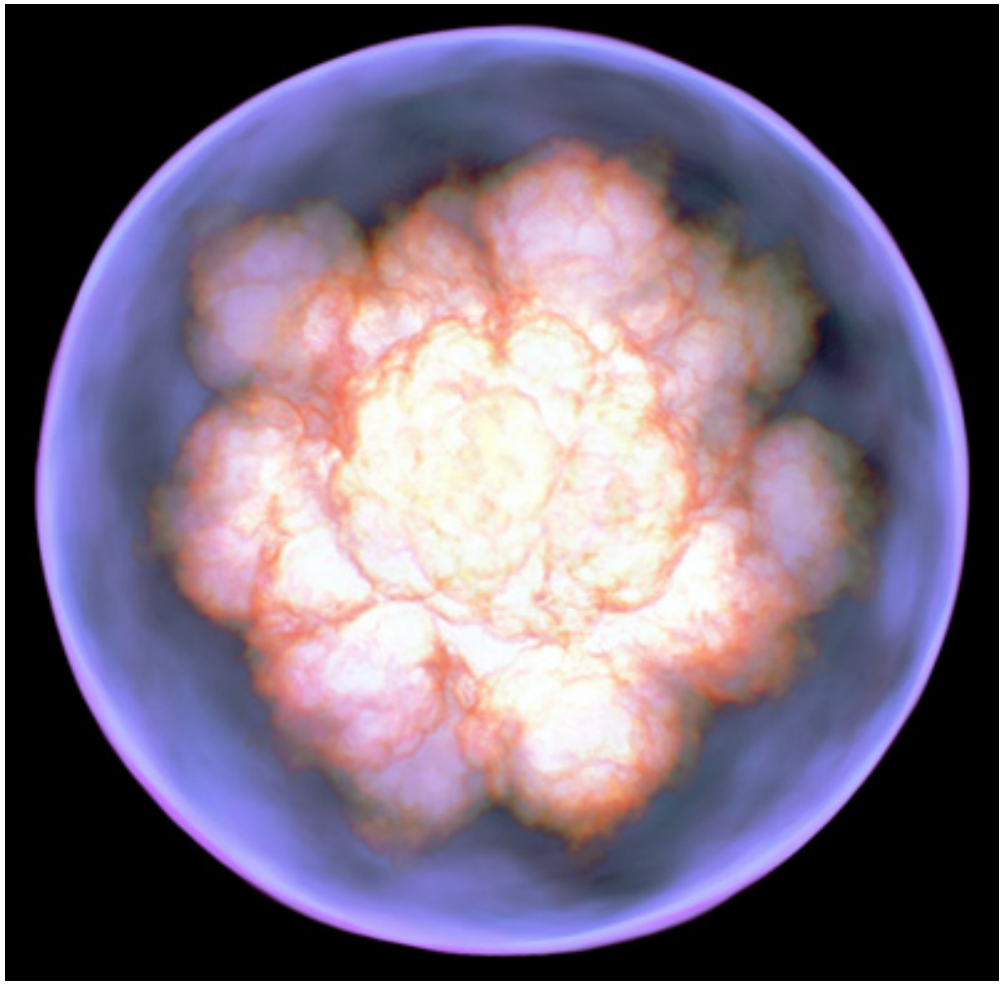
Iben & Tutukov 1984
Webbink 1984

DD’

Kushnir et al., 2013



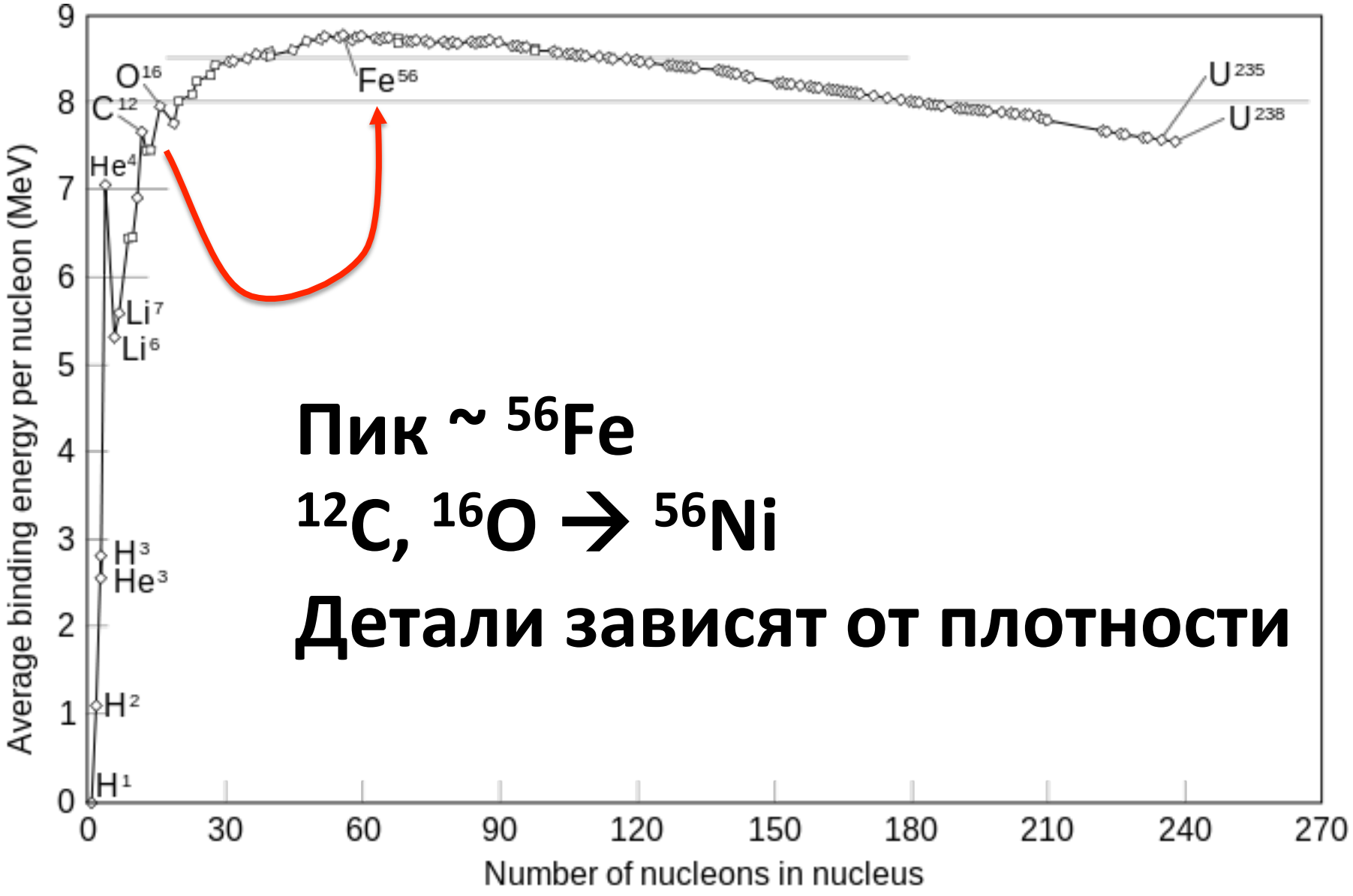
Горение C+O в белых карликах



1. Что поджигает?
   приближение к M_{Ch}
   столкновение + ударные
   взрыв на поверхности

2. Режим горения?
   Дефлаграция
   Детонация
   Дефлаграция+детонация

Энергия связи на один нуклон

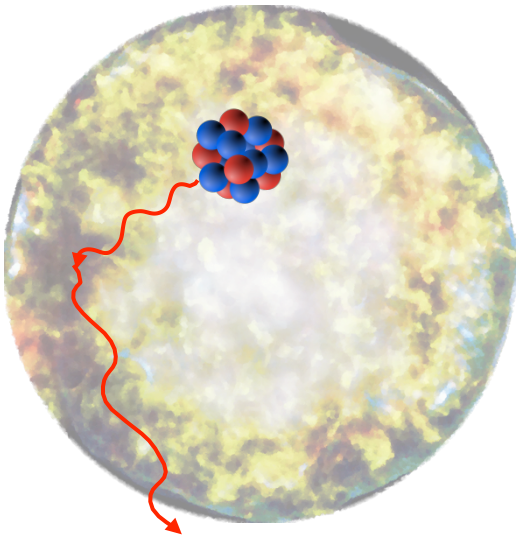


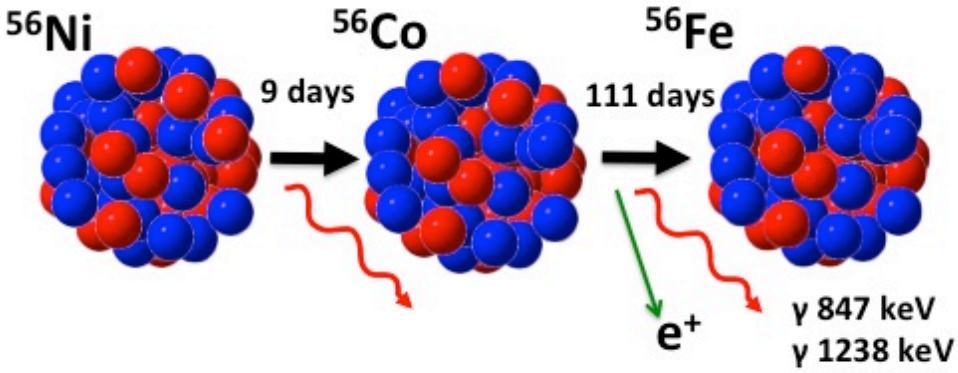
Пик ~ ^{56}Fe

^{12}C, ^{16}O → ^{56}Ni

Детали зависят от плотности

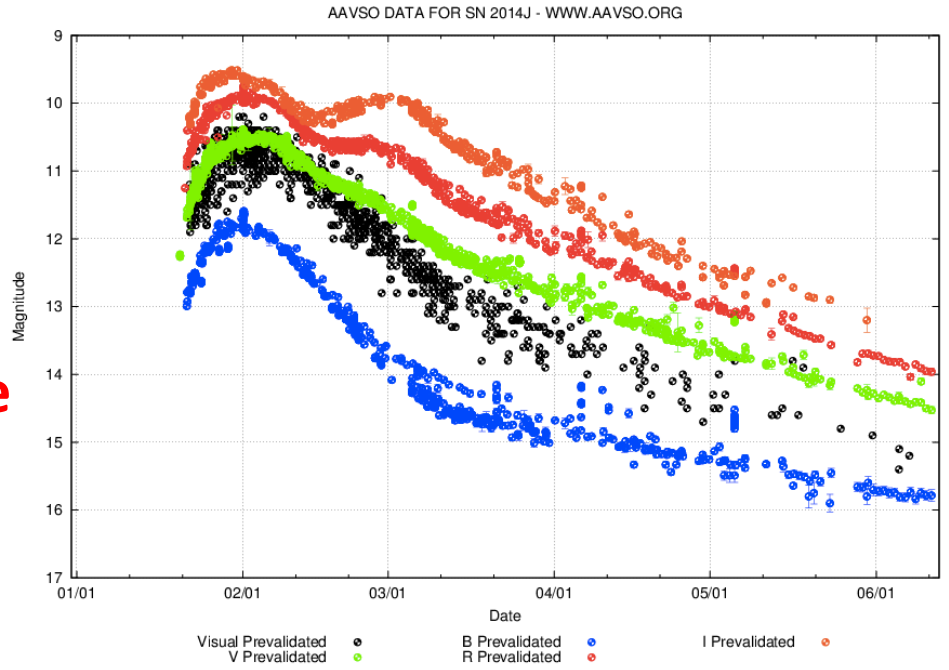
Почему мы видим сверхновые после взрыва?





1. Прямое гамма-излучение
2. Переработанное излучение (оптический диапазон)

$$\tau \propto t^{-2}$$



-10 дней

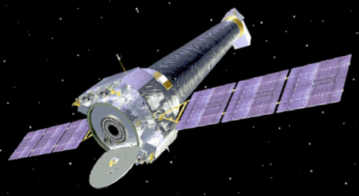
0

10 дней
Оптика

100 дней
γ-излучение

442 лет
Рентгеновское излучение

INTEGRAL
ESA+Roscosmos+NASA



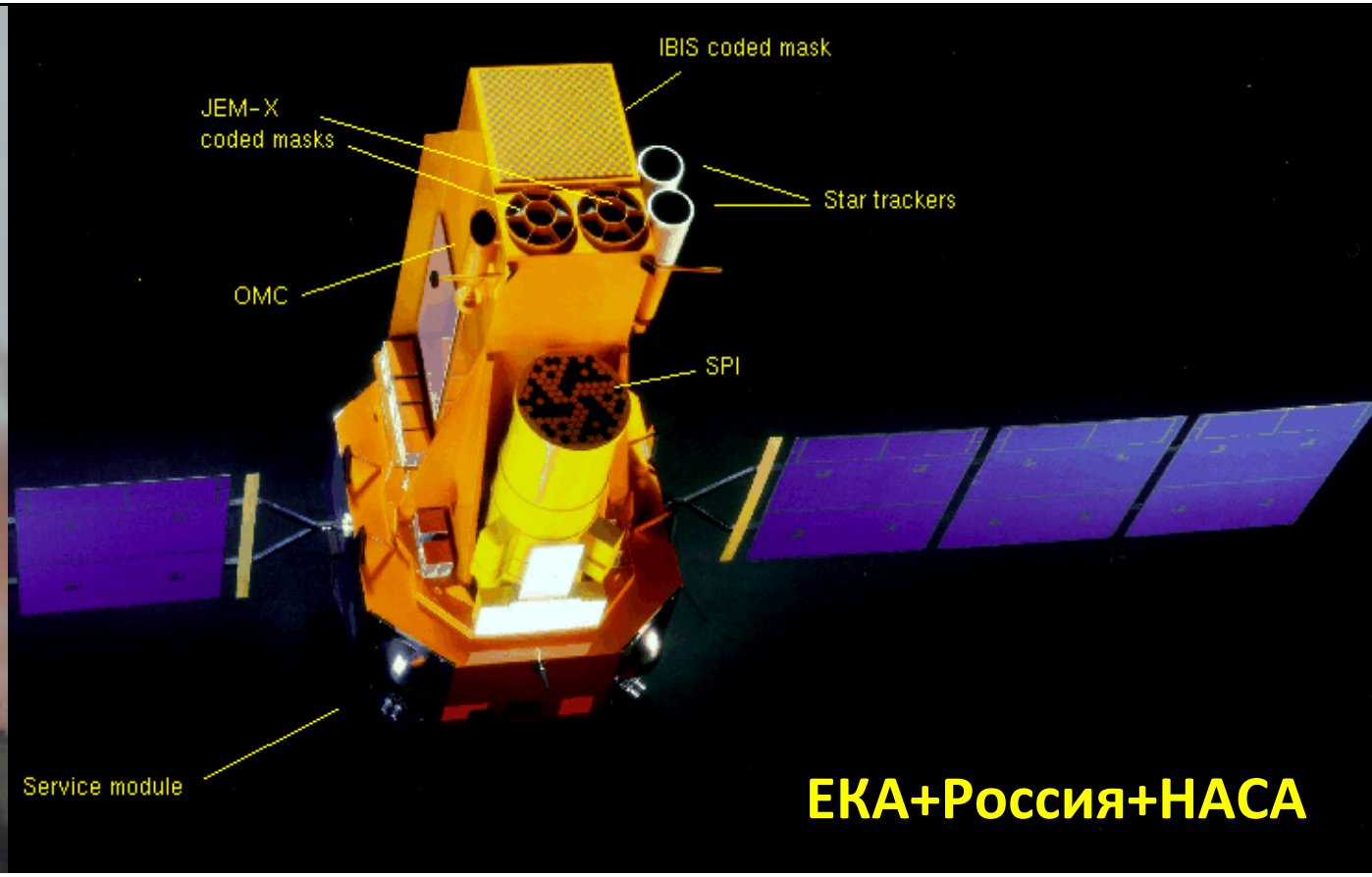
Chandra
NASA/CXC/SAO

Три элемента из стандартной физики

1) Предел Чандрасекара → 1.4 M_{sun}
2) Синтез C,O в Ni → 0.6-0.8 Мэв/нуклон
3) Распад Ni,Co → неск. МэВ на ядро

1) Оптическая толща
2) Скорость разлета
3) Масса Ni и поток в линиях

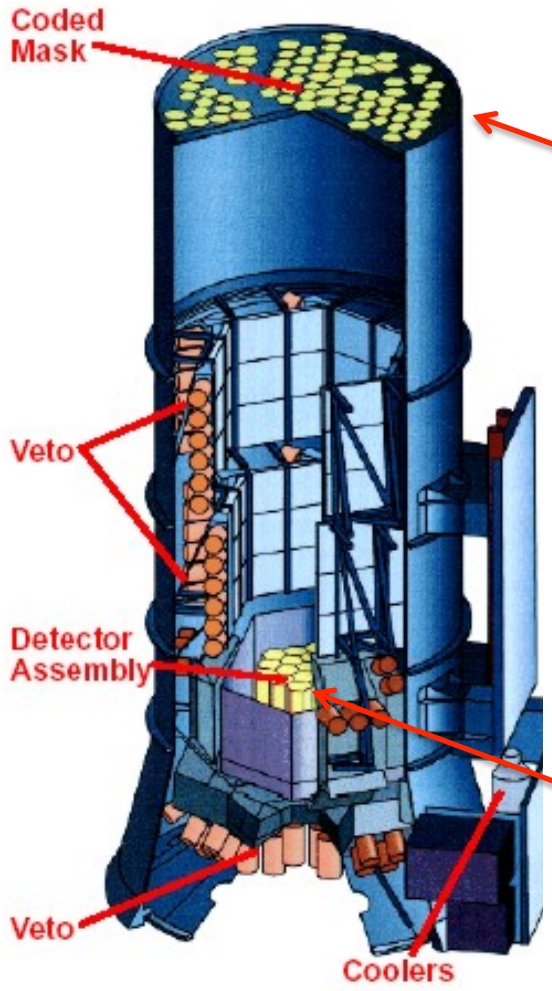
Международная обсерватория ИНТЕГРАЛ (ИКИ, КГУ, ГАИШ, ФТИ, ИПФ, МФТИ...)



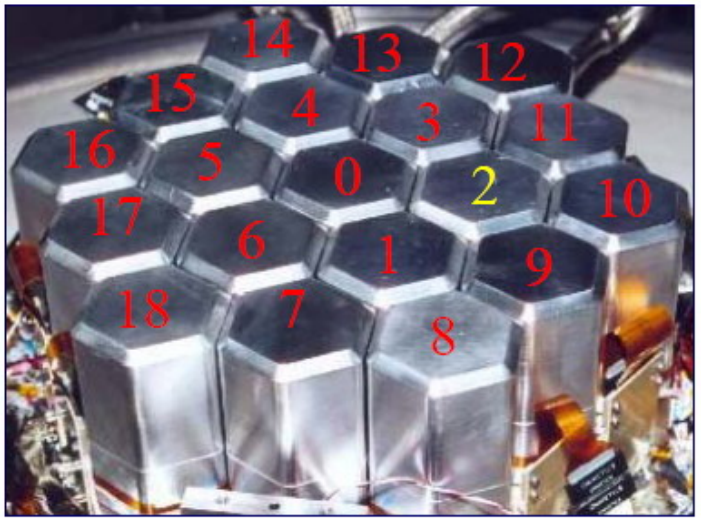
25% времени принадлежит российским ученым

Диапазон энергий : 20 кэВ – 8 МэВ
Угловое разрешение: 10'-2 град.
Энерг. Разрешение : E/ΔE~600 @ 1 МэВ

INTEGRAL/SPI



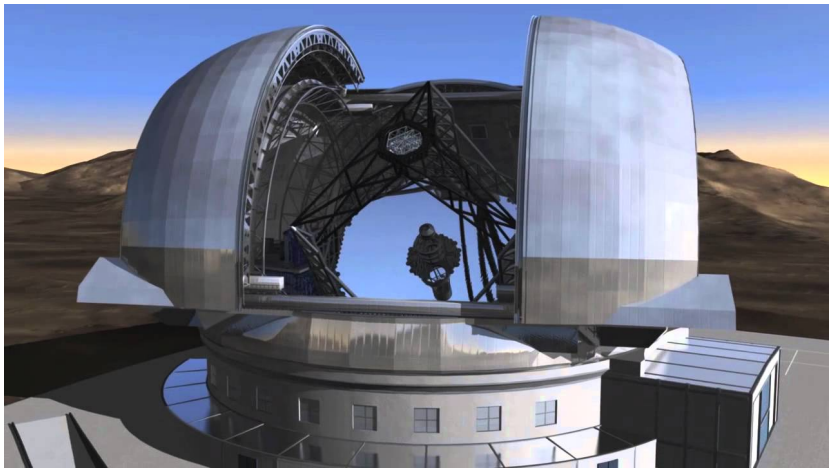
Маска из вольфрама

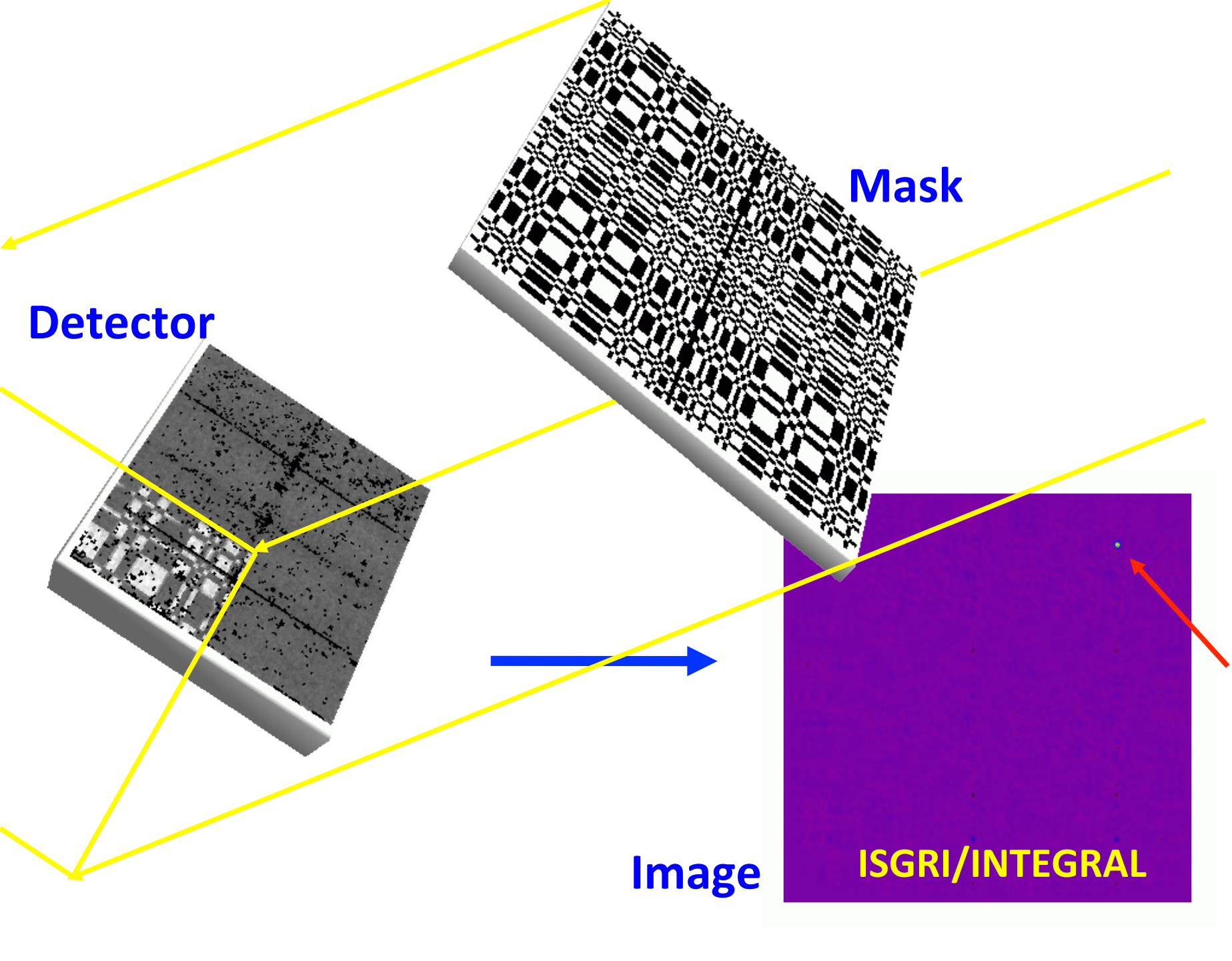


Разрешение: ~2 кэВ @ 511 кэВ

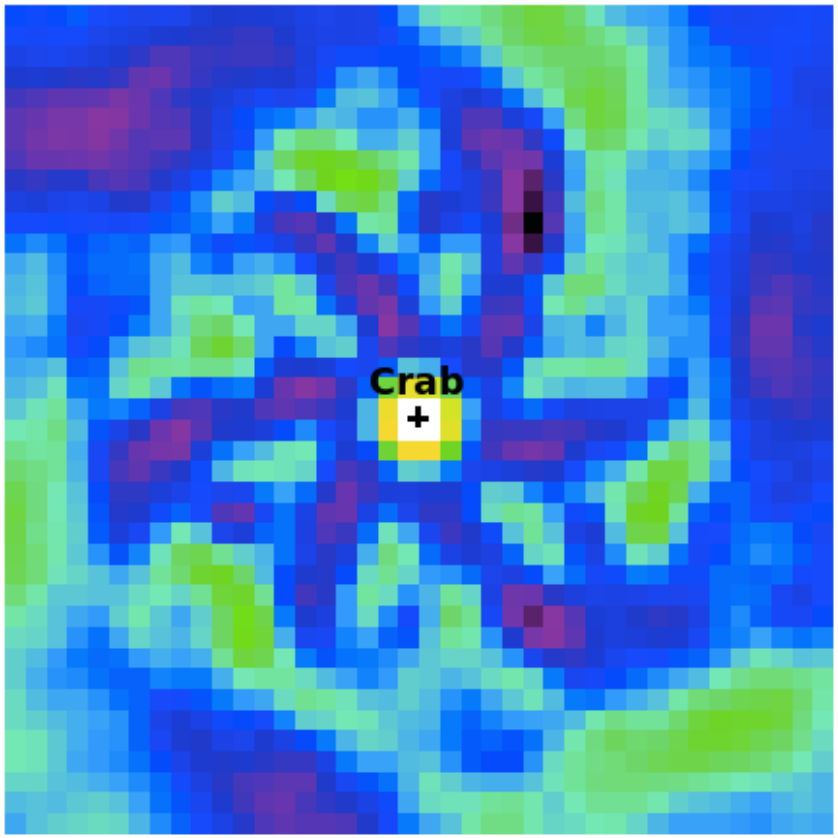
Площадь: ~70 см^2

Нет фокусирующих телескопов на энергиях > 80 keV

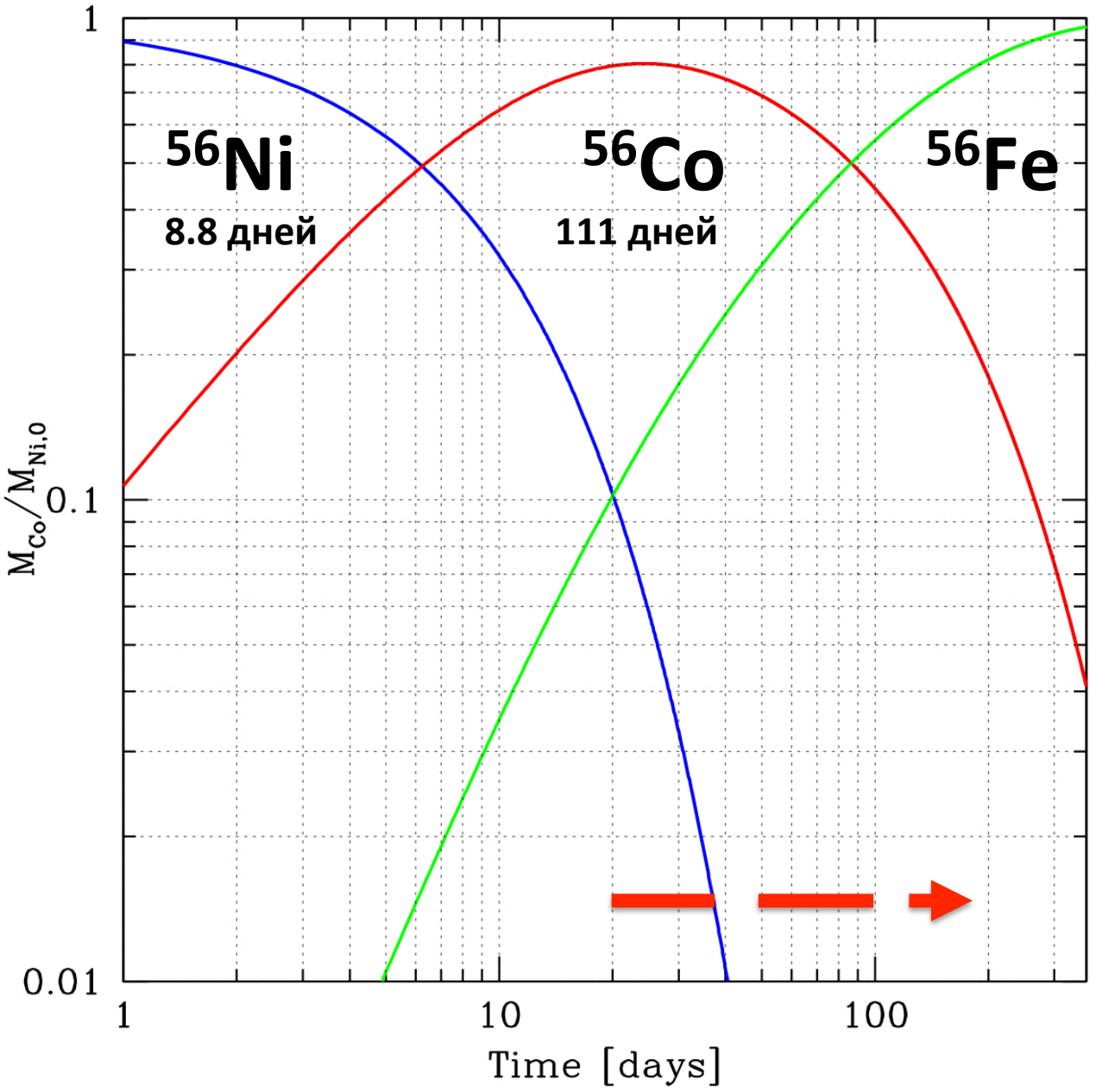



Mask
Detector
Image
ISGRI/INTEGRAL

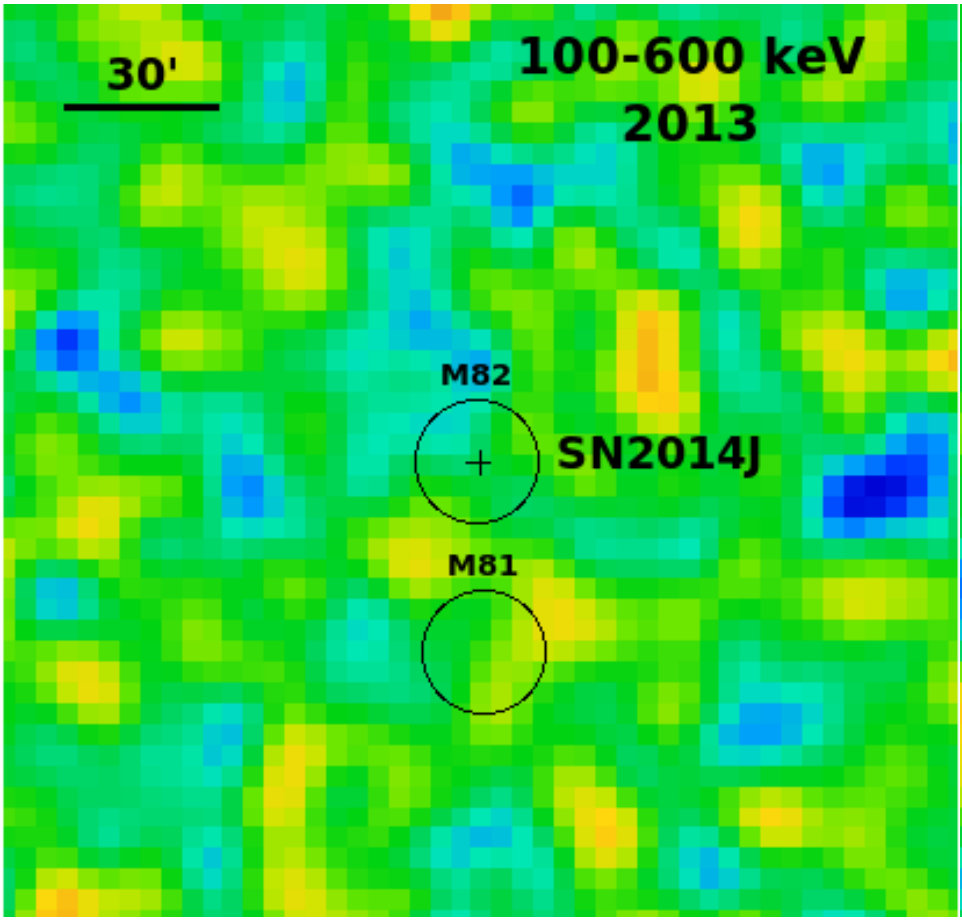
Крабовидная туманность «сквозь маску»

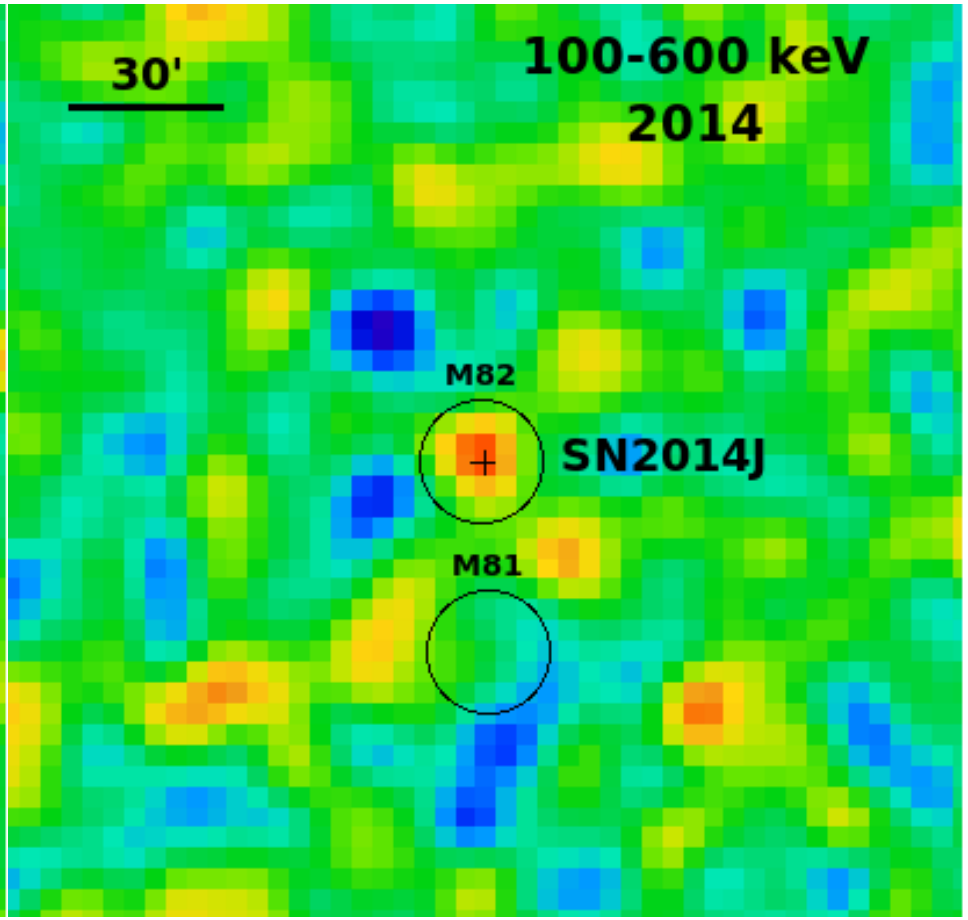


Эволюция массы Ni и Co: ^{56}Ni → ^{56}Co → ^{56}Fe



M82 до и после вспышки SN2014J (100-600 кэВ)



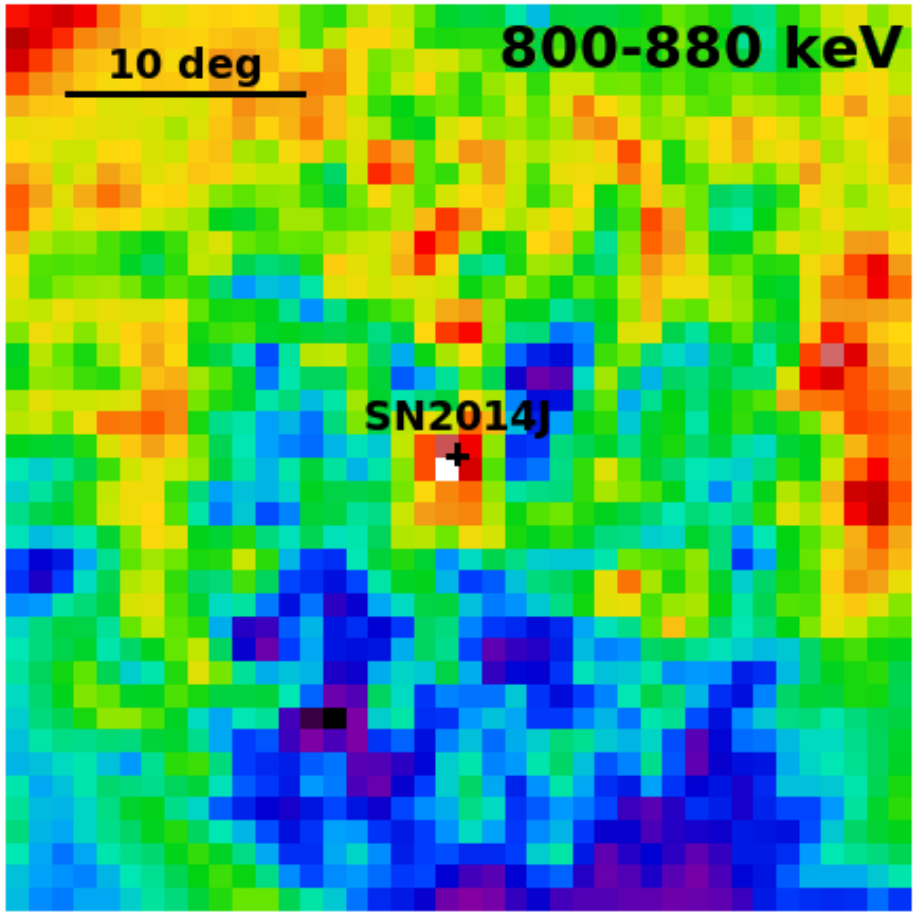


3.7σ

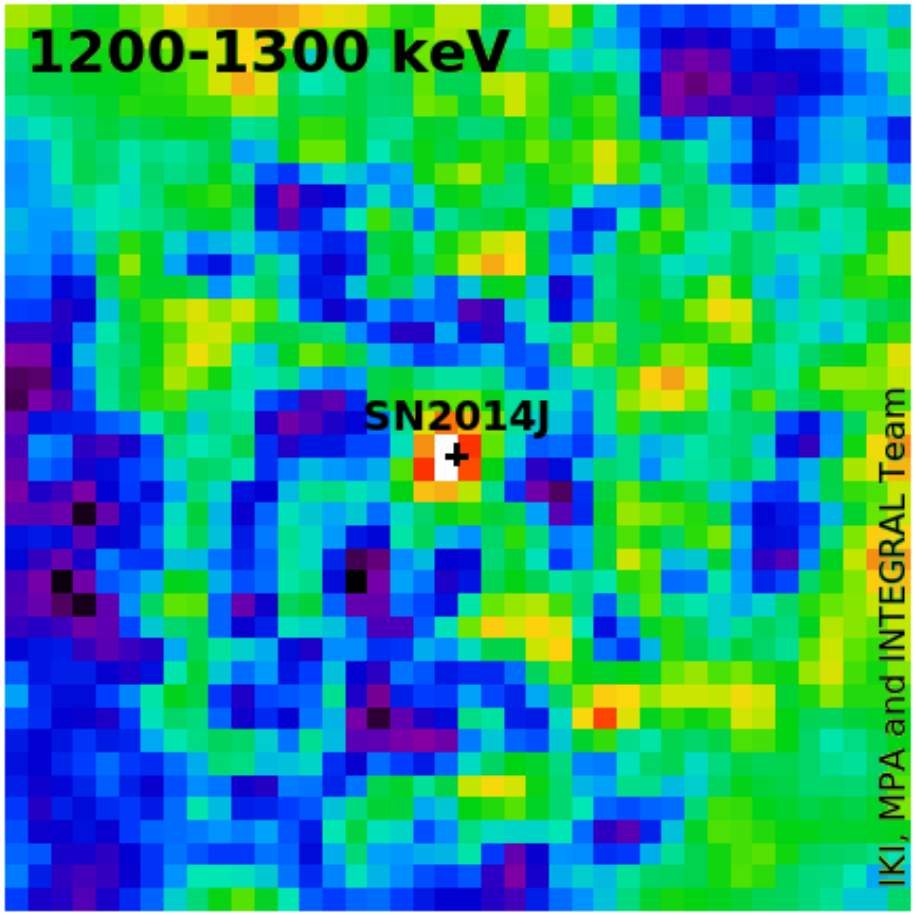
До

После

Изображения в узких полосах вблизи линий ^{56}Co

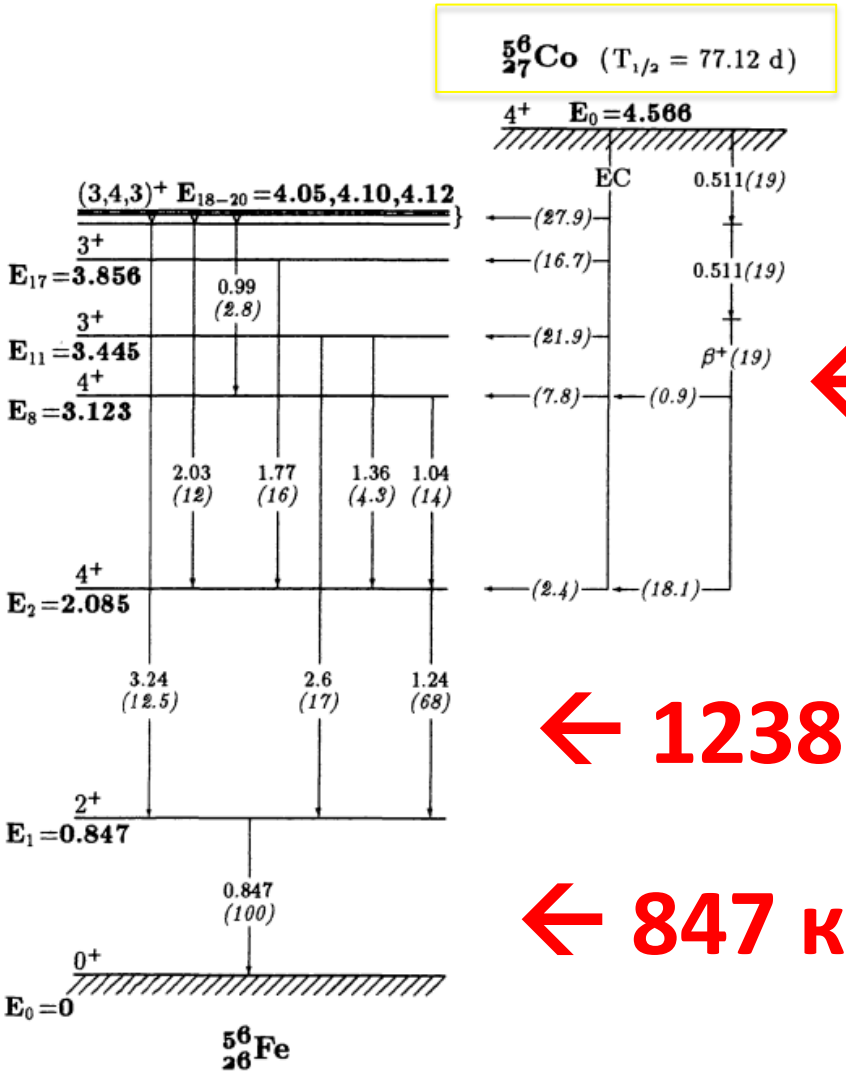


3.9σ



4.43σ

Распад $^{56}Co \rightarrow {}^{56}Fe$



← e^+, 19%

← 1238 кэВ, 68%

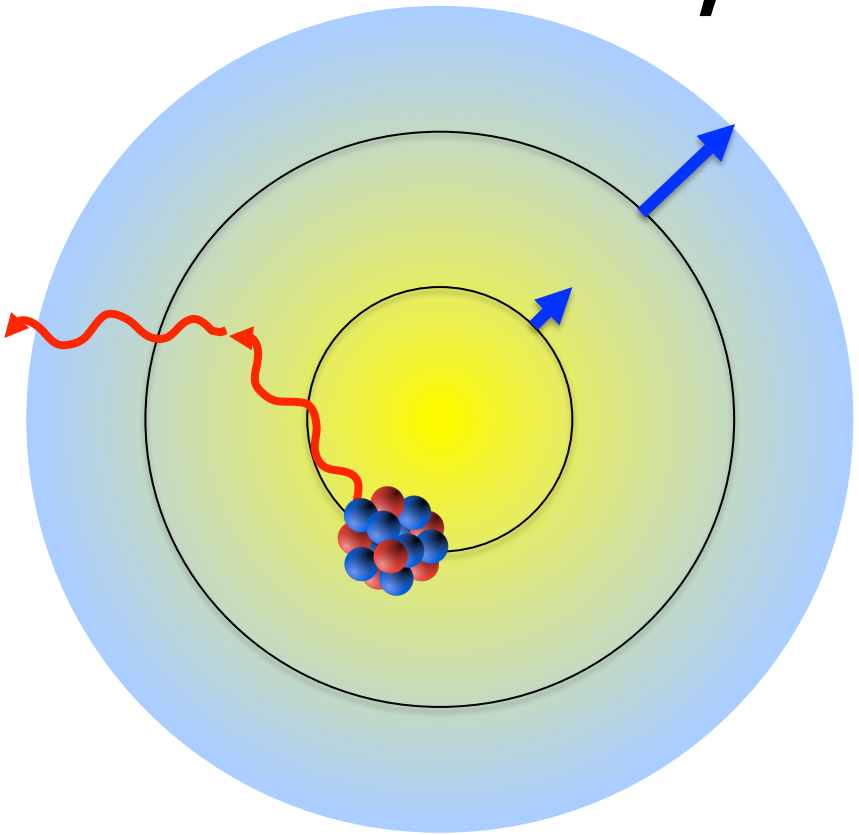
← 847 кэВ, 100%

Надежин, 94

Модель 3PAR

Гомологичное расширение
Полное перемешивание
Экспоненциальный профиль

$$r = \upsilon t$$



58% - Ni,Co,Fe
21% - Si
21% - S

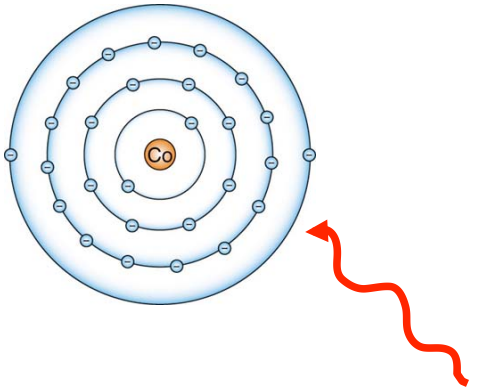
$$\rho \propto e^{-\upsilon/V_e}$$

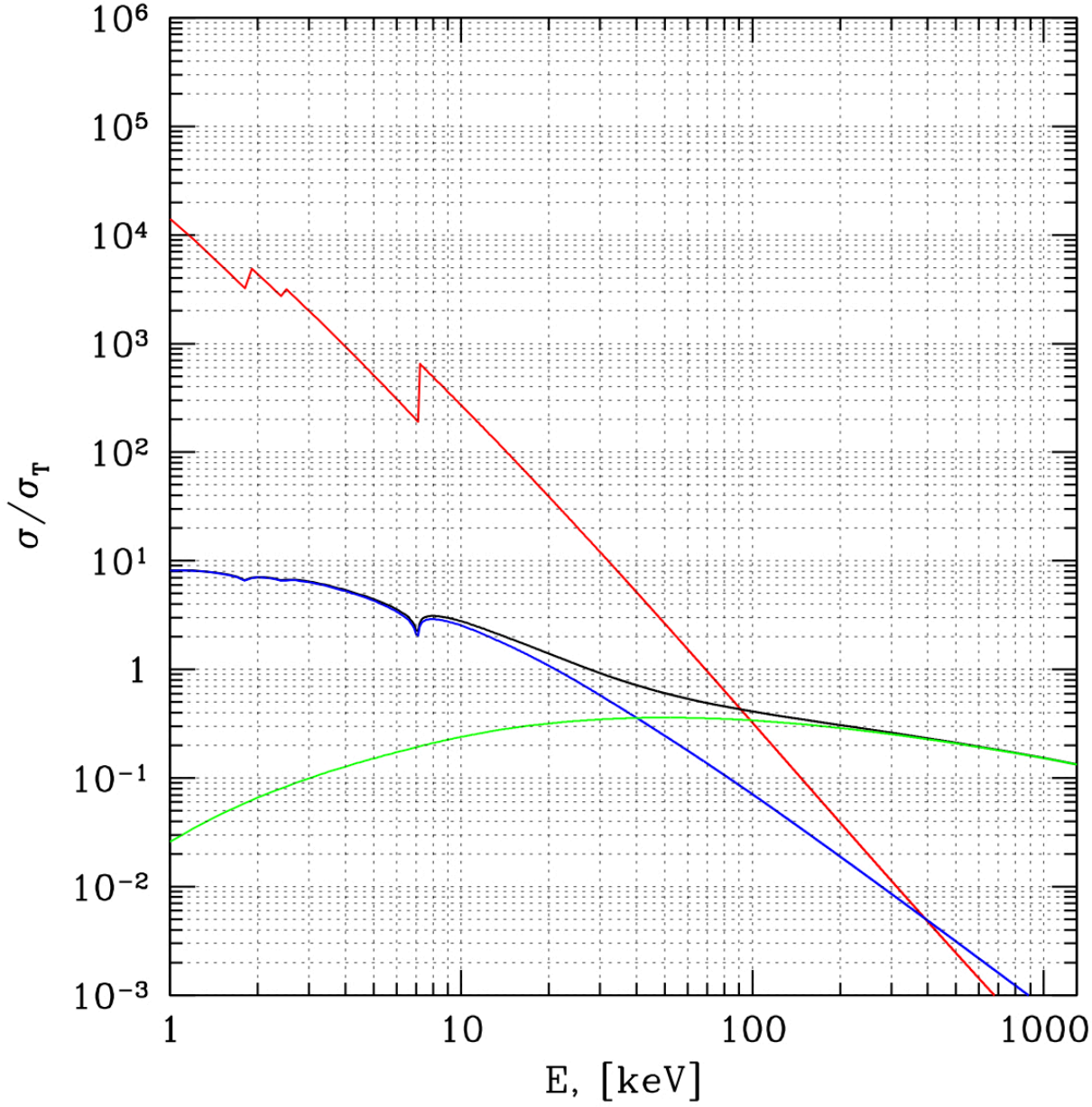
Dwarkadas & Chevalier 1998

$$M_{Ni}, M_{Ejecta}, V_e$$

$$V_e = \sqrt{\frac{E_K}{6M_{Ejecta}}}$$

Взаимодействие гамма-квантов с оболочкой





Фотопоглощение (ионизация)

Когерентное рассеяние

Некогерентное рассеяние (ионизация)

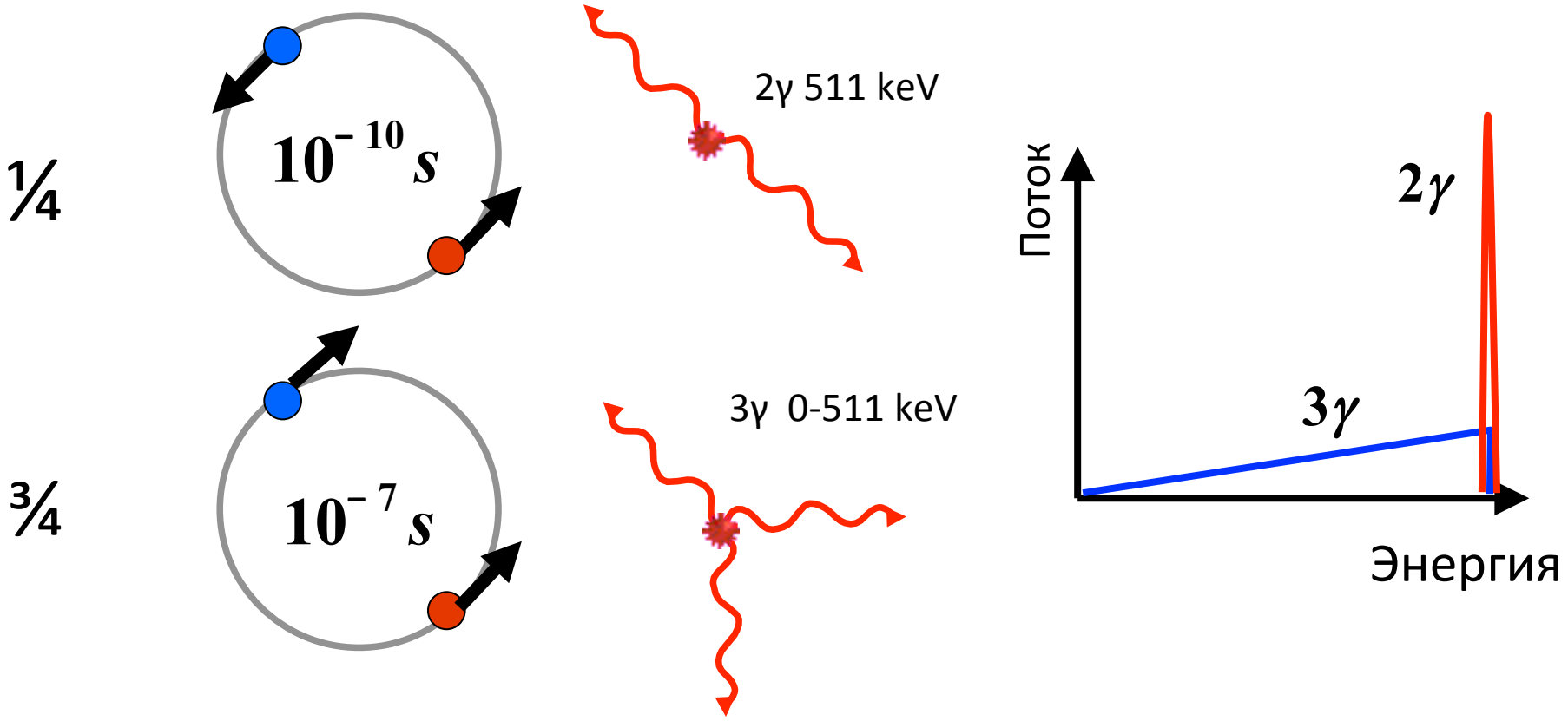
$$\tau \propto t^{-2}$$

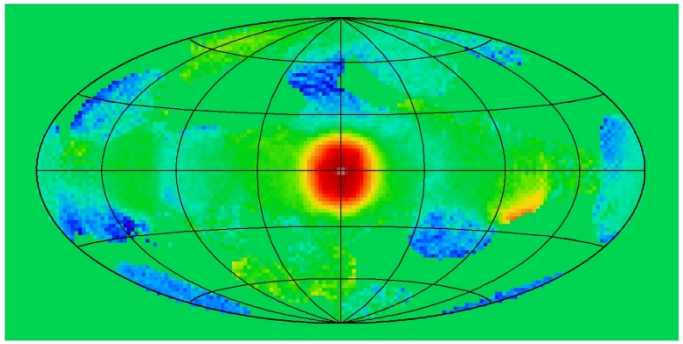
Судьба позитронов (19% распадов)

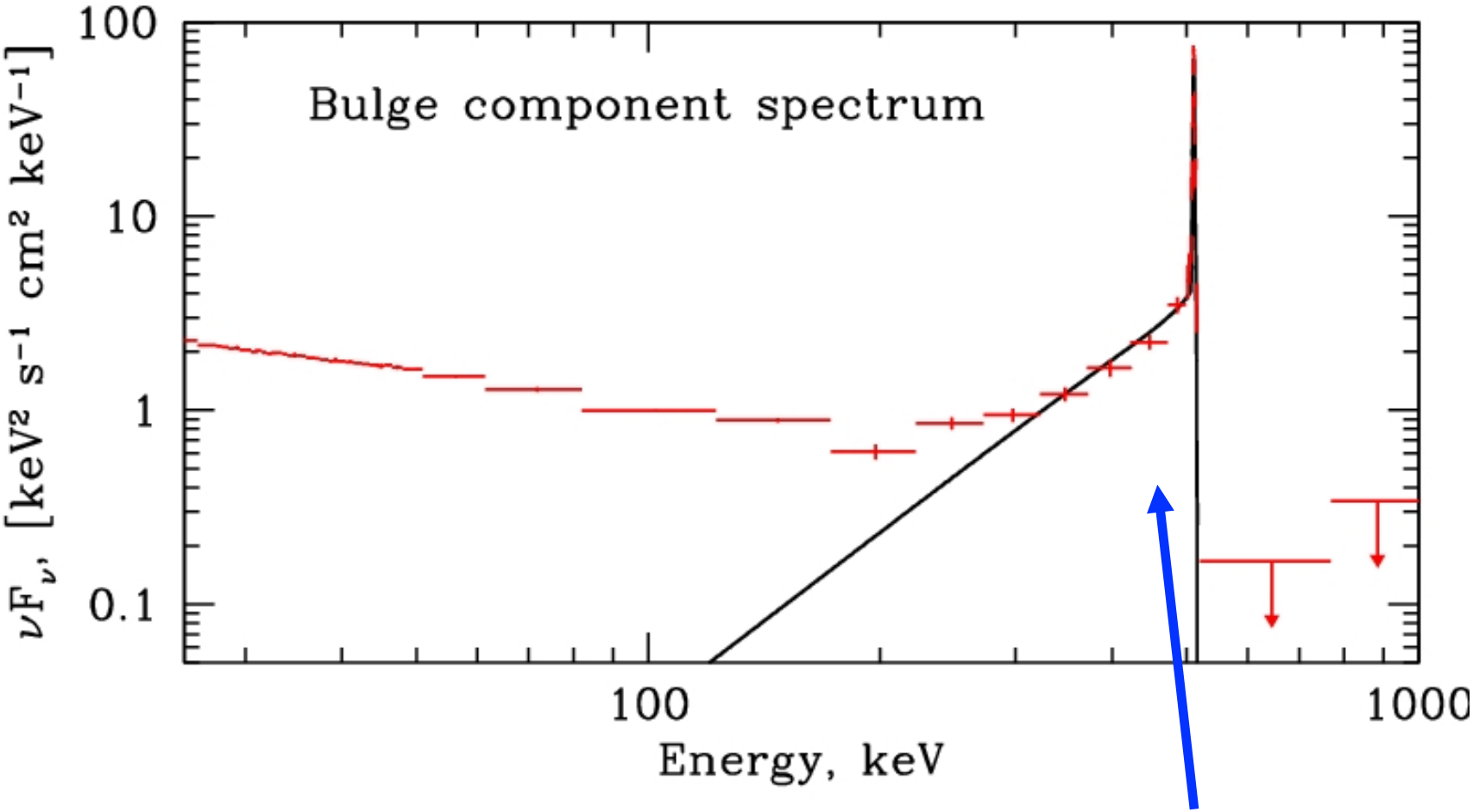
Средняя начальная энергия ~630 кэВ

1) Позитрон замедляется

2) Захватывает электрон и формирует атом «позитрония»



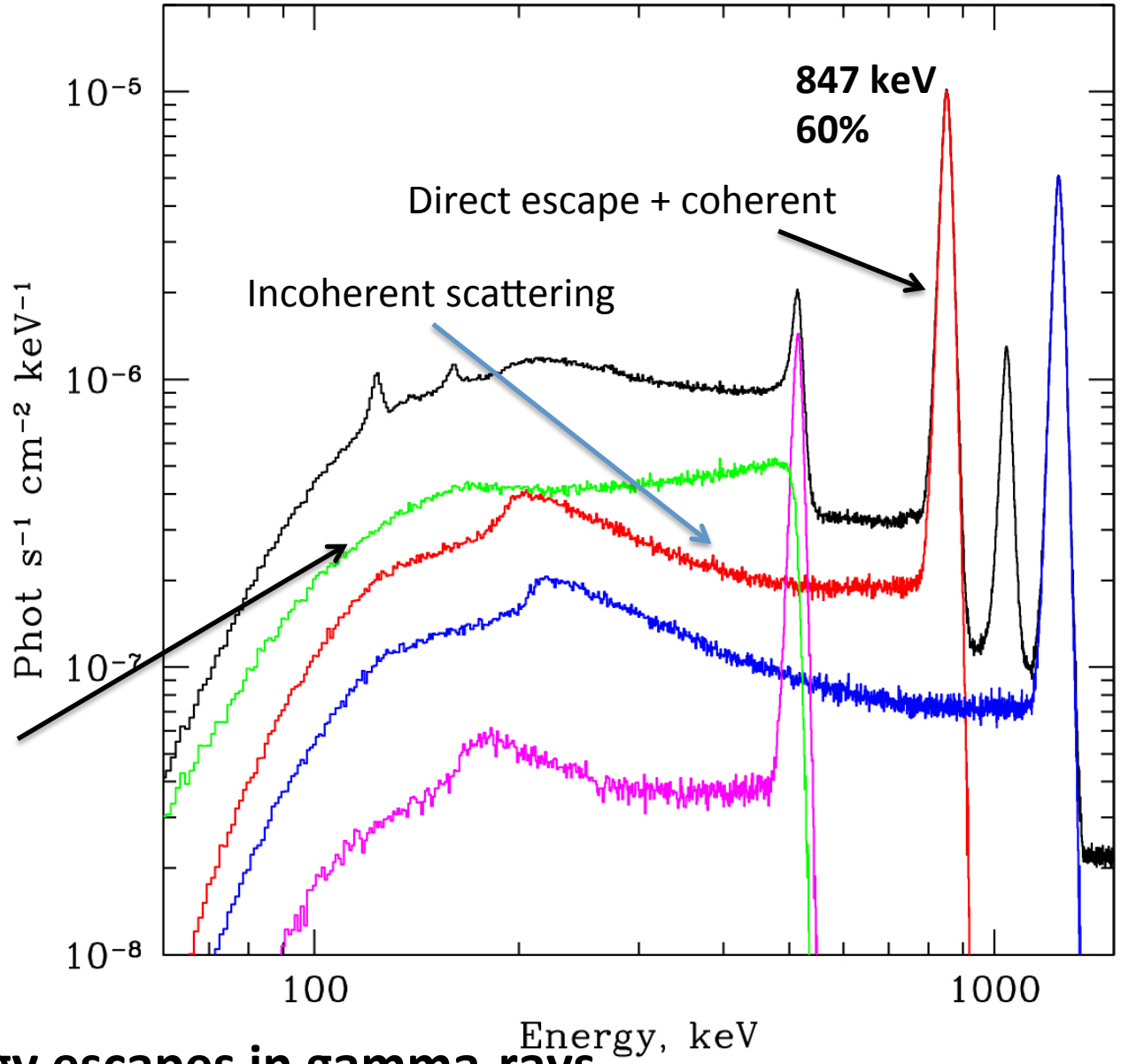




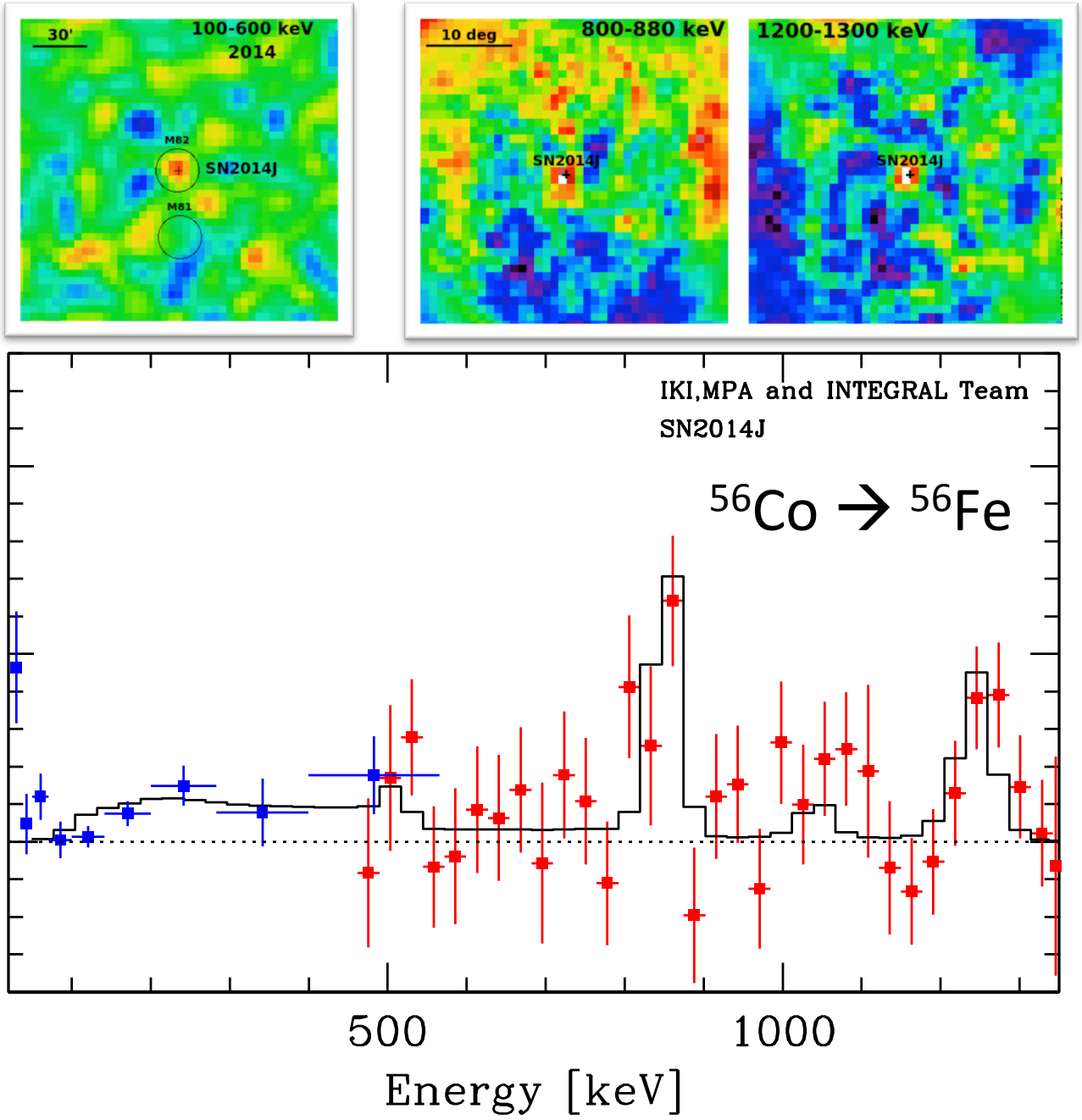
EC et al, 2005, 2011

Аннигиляция позитронов

Типичный выходящий спектр (модель)



77% of energy escapes in gamma-rays


30'
100-600 keV
2014
M82
SN2014J
M81
10 deg
800-880 keV
SN2014J
1200-1300 keV
SN2014J
IKI,MPA and INTEGRAL Team
SN2014J
^{56}Co → ^{56}Fe
Flux [phot/s/cm²/keV]
10⁻⁵
5×10⁻⁶
0
500
1000
Energy [keV]

Линии 847 и 1238 кэВ на 75-ый день

Parameter	847 keV line	1238 keV line
Flux, 10^{-4} phot cm^{-2} s^{-1}	2.34±0.74	2.78±0.74
Luminosity, 10^{41} erg s^{-1}	4.7	8.1
V_{shift} (l.o.s. velocity), km s^{-1}	-1900±1600	-4300±1600
Line width (l.o.s. velocity rms), σ_v, km s^{-1}	3600±1300	4700±1400

На этот момент:

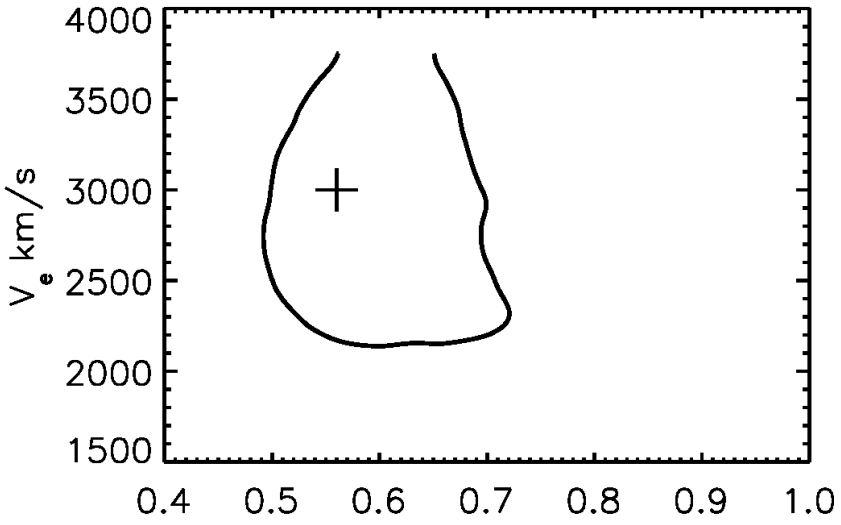
77% гамма-излучения уходит из оболочки

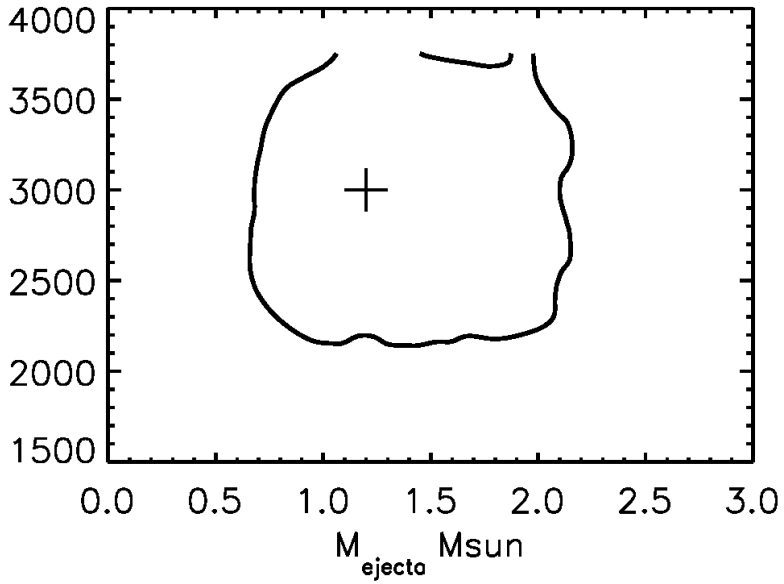
23% + кинетическая энергия позитронов → нагрев

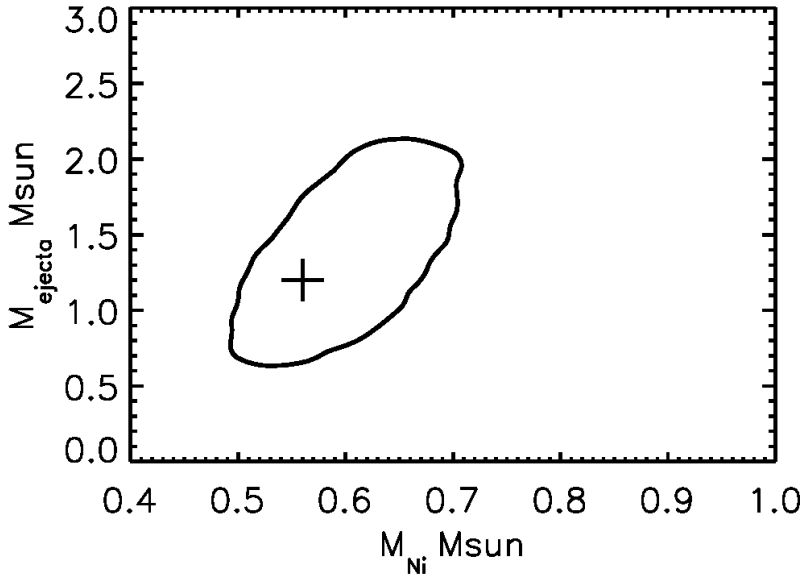
~$3x10^{42}$ эрг/с в гамма диапазоне

~$1x10^{42}$ эрг/с в оптическом диапазоне

Параметры модели 3PAR







$$M_{Ni}, M_{Ejecta}, V_e$$

$$M_{Ni} \sim 0.6\, M_{Sun} \quad [\pm 0.1]$$

$$M_{Ejecta} \sim 1.3\, M_{Sun} \quad [\pm 0.7]$$

$$V_e \sim 3000 \text{ km/s} \quad [\pm 1000]$$

SN2014J и «канонические» модели

Model	M_{Ni}, M_{Sun}	M_{Ej}, M_{Sun}	E_K, 10^{51} erg	$\Delta\chi^2$
W7[2]	0.59	1.38	1.24	54.4
DDT1p1	0.54	1.36	1.29	52.5
DD4[30]	0.61	1.39	1.24	52.0
DDT1p4	0.66	1.36	1.35	51.9
3PAR, best-fitting	0.56	1.20	1.3	50.5
3PAR, fiducial	0.70	1.38	1.3	49.3
DDT1p4halo	0.62	1.55	1.3	49.1
HED6[30]	0.26	0.77	0.72	38.2
DETO[29]	1.16	1.38	1.44	12.1

Nomoto+, 1984; Woosley & Weaver, 1991; Hoeflich & Khokhlov, 1996; Bravo+, 2014

Supernova seen through γ-ray eyes

Observations of γ-ray photons from a type Ia supernova indicate that stellar explosions of this kind get their energy from sudden thermonuclear fusion in the progenitor star. SEE LETTER P.406

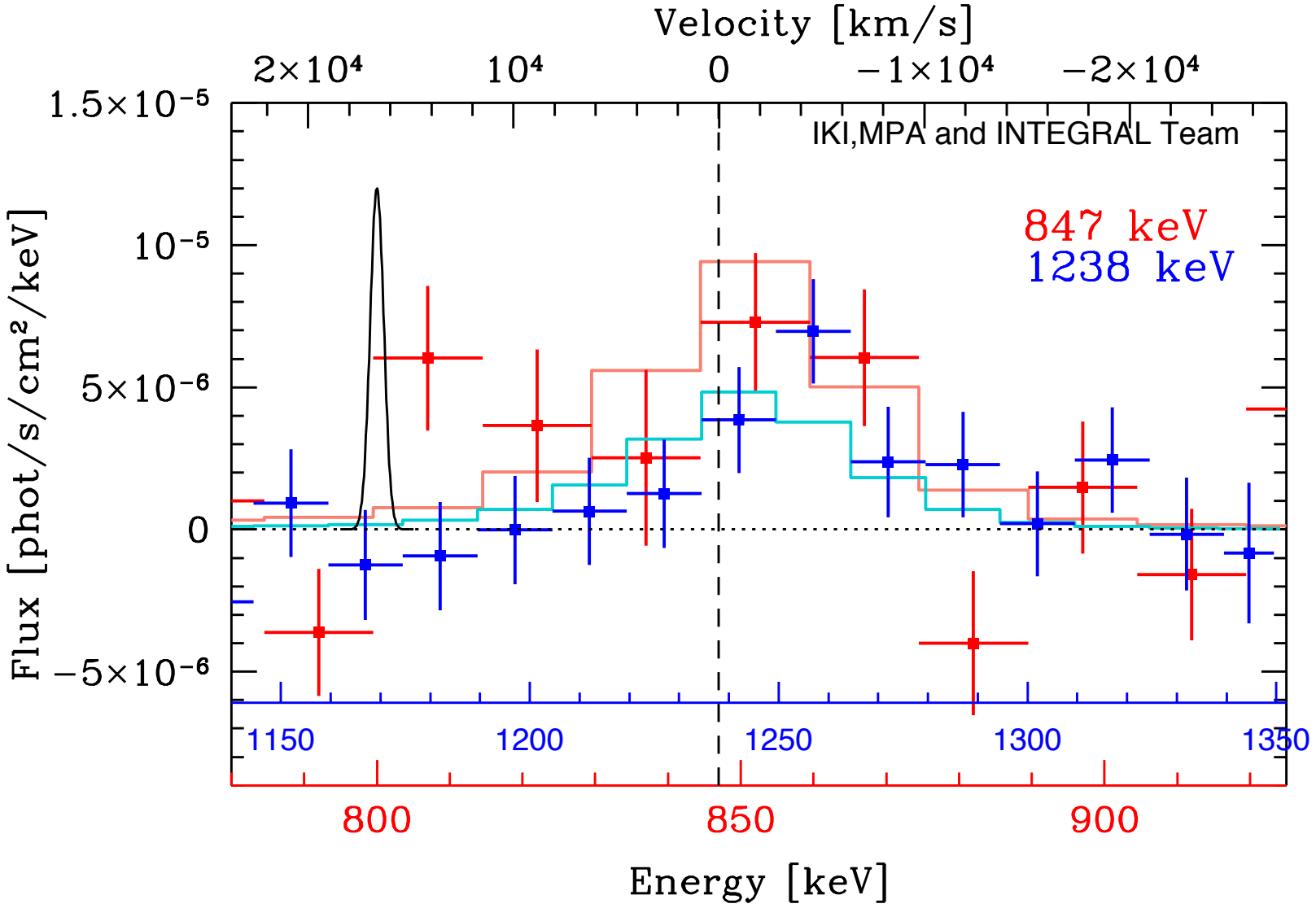
ROBERT P. KIRSHNER

… … ….

… … ….

Upsetting the conventional wisdom is always a joy in science. You can get prizes for that. But there is also a deep pleasure in showing decisive evidence on an important physical idea that has been used without proof for decades. The INTEGRAL data establish the thermonuclear explosion mechanism for type Ia supernovae. It is a wonderful result. ■

Уширение линий за счет эффекта Доплера (возможность измерить скорость разлета)



Главные результаты

- ✔ SNIa = Термоядерный взрыв
- ✔ Гамма-линии ^{56}Co (847 и 1238 кэВ)
- ✔ 0.6±0.1 M_{sun} радиоактивного ^{56}Ni
- ✔ Скорость ~10000 км/с →Энергия на нуклон ~0.6 МэВ
- ✔ M_{ejecta}~1.3 M_{sun}
- ✔ Аннигиляция позитронов

- ☐ DD или SD? Что было на этом месте?
- ☐ Структура скоростей/асимметрия?
- ☐ Выход позитронов?