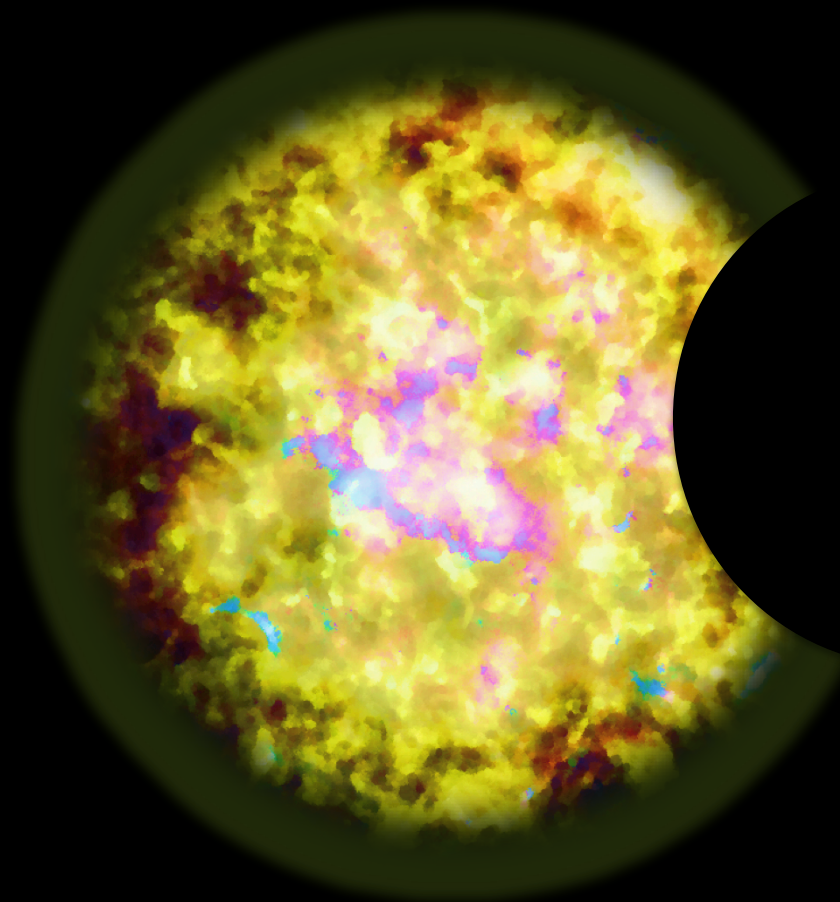
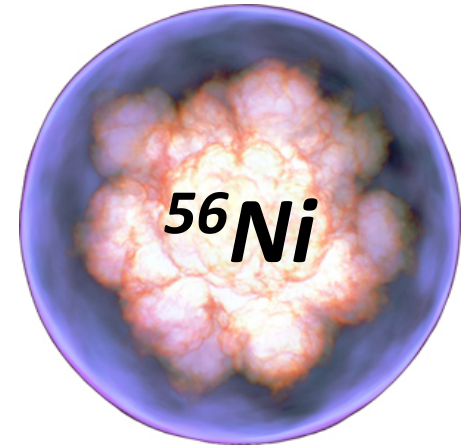
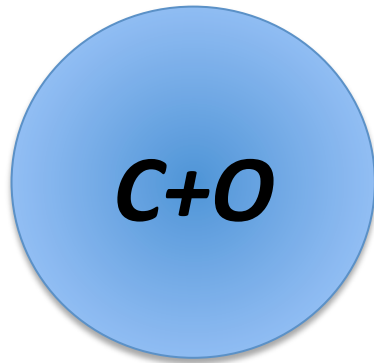


*Поляризация гамма-излучения и форма линии 511 кэВ, как  
индикаторы асимметрии и магнитных полей в сверхновых  
типа Ia*

*Е.Чуразов & И.Хабибуллин*

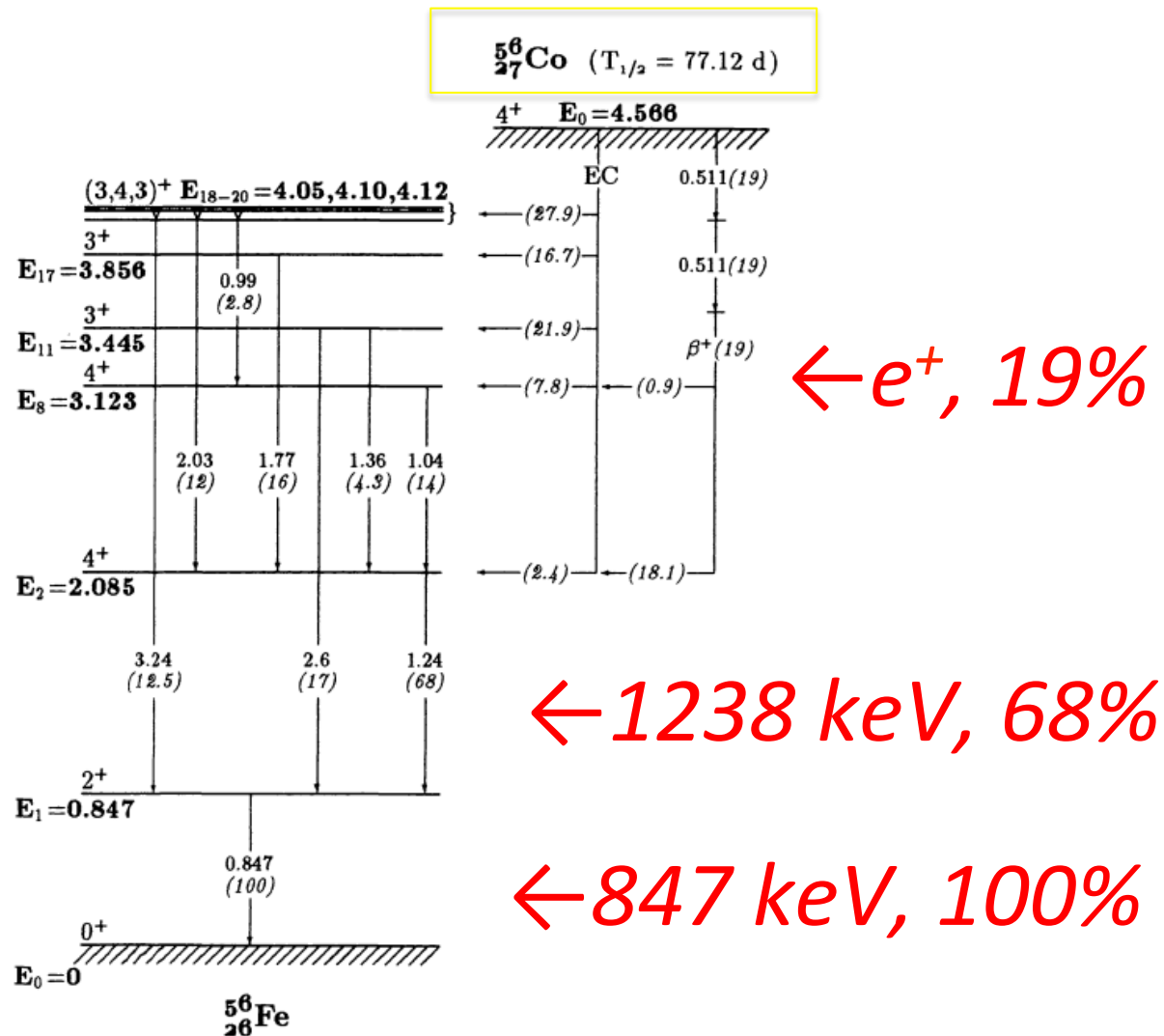


# Сверхновые типа Ia - термоядерные взрывы белых карликов

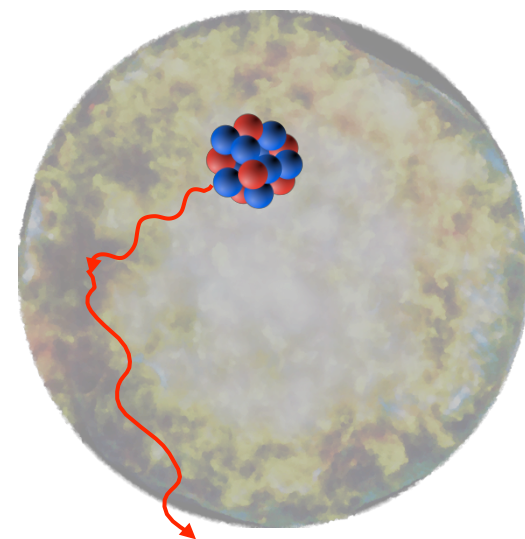
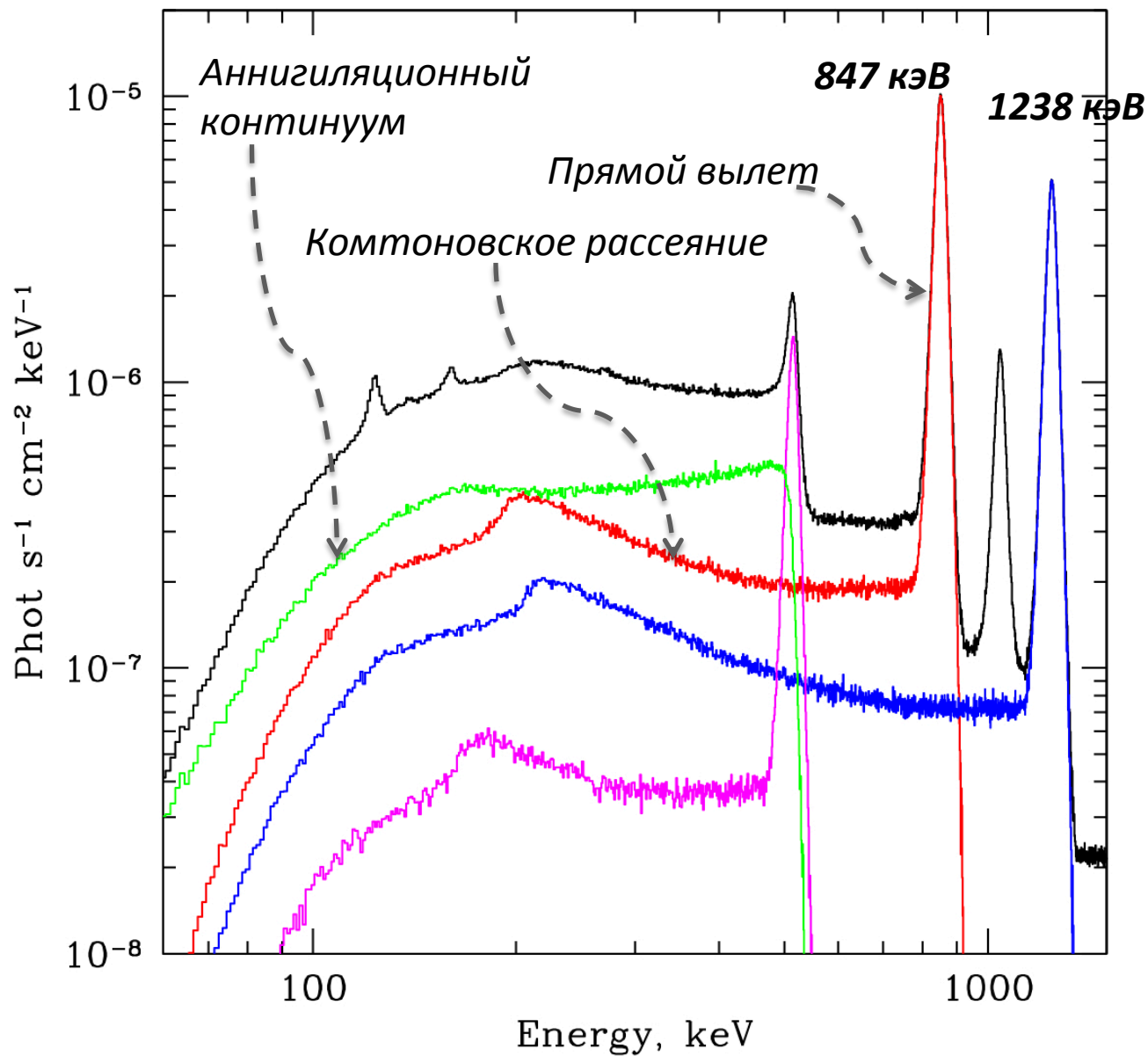


	Да	Нет	Затруднились с ответом
Что инициирует взрыва?			✓
Процесс горения?			✓
Предел Чандрасекара?			✓
Роль вращения?			✓
Роль магнитных полей?			✓
Убегание позитронов?			✓
Тип двойной системы?			✓

# Гамма линии распада $^{56}\text{Co} \rightarrow ^{56}\text{Fe}$

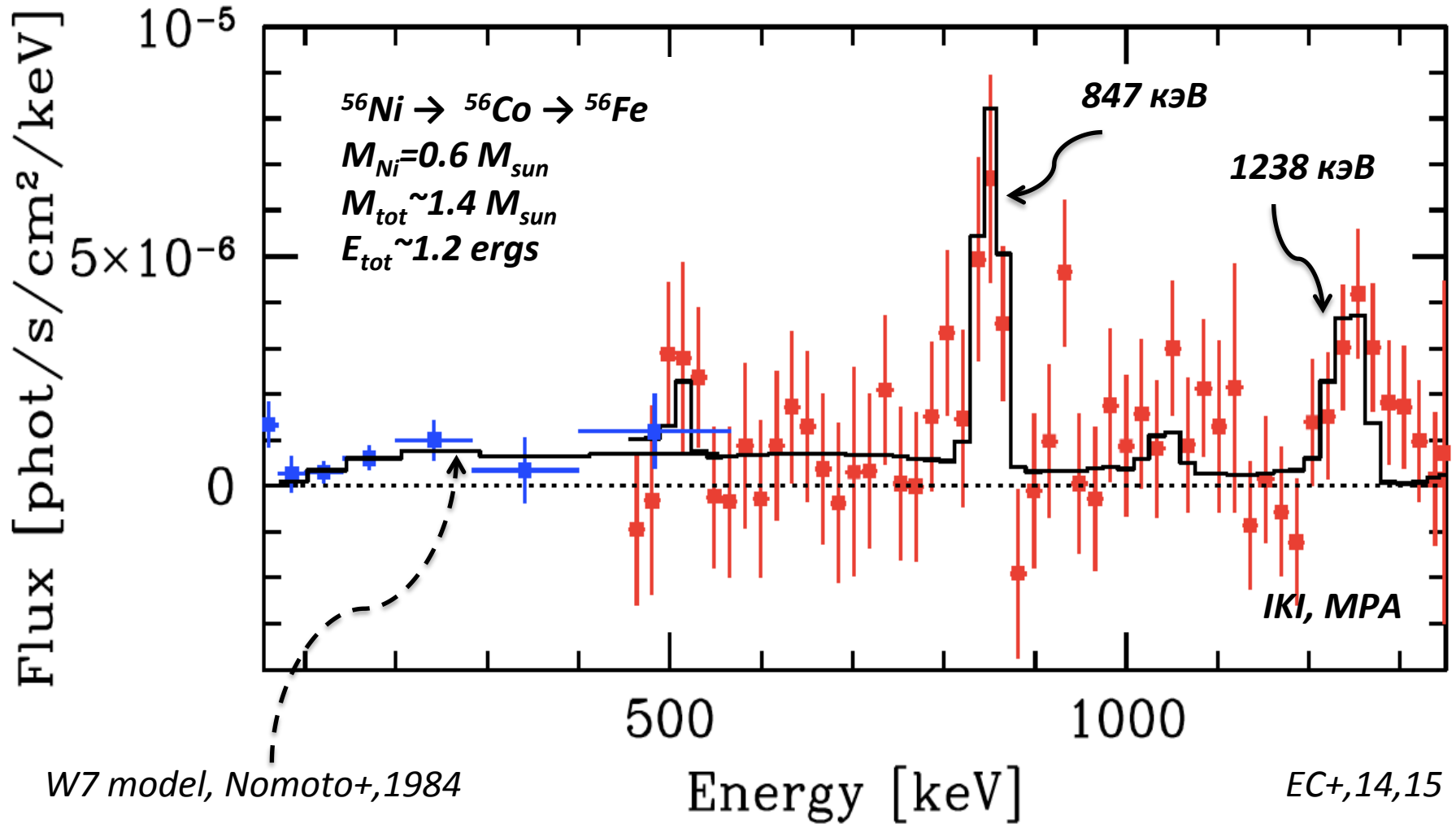


**Спектр излучения, выходящего из оболочки сверхновой  
при распаде  $^{56}\text{Co}$**



*75 дней с момента  
взрыва*

# SN2014J широкополосный спектр



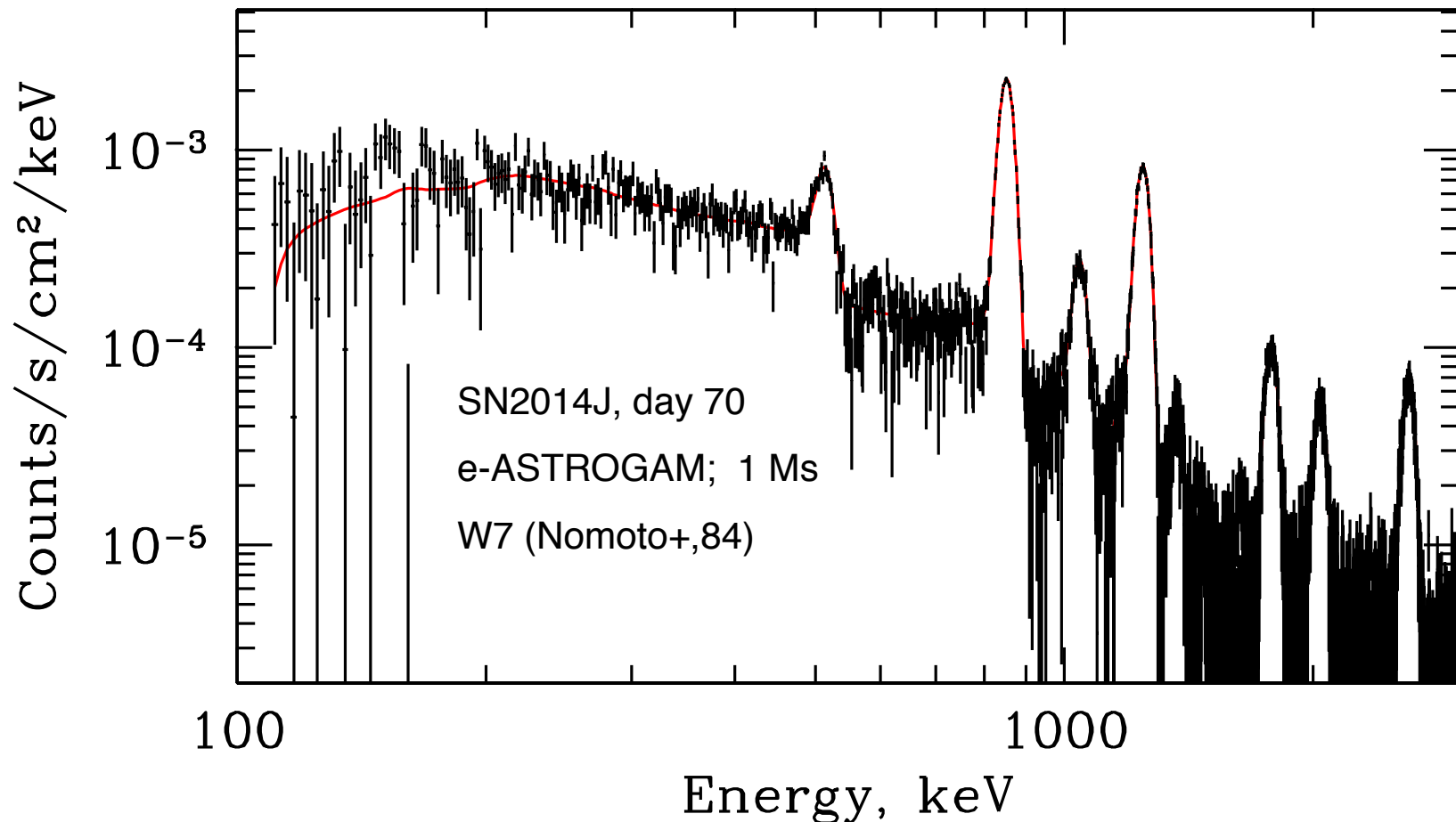
Обсерватория ИНТЕГРАЛ

4 Мсек; 11  $\sigma$

*de Angelis A., et al. "Science with e-ASTROGAM. A space mission for MeV-GeV gamma-ray astrophysics", JHEAp, 19, 1 (2018)*

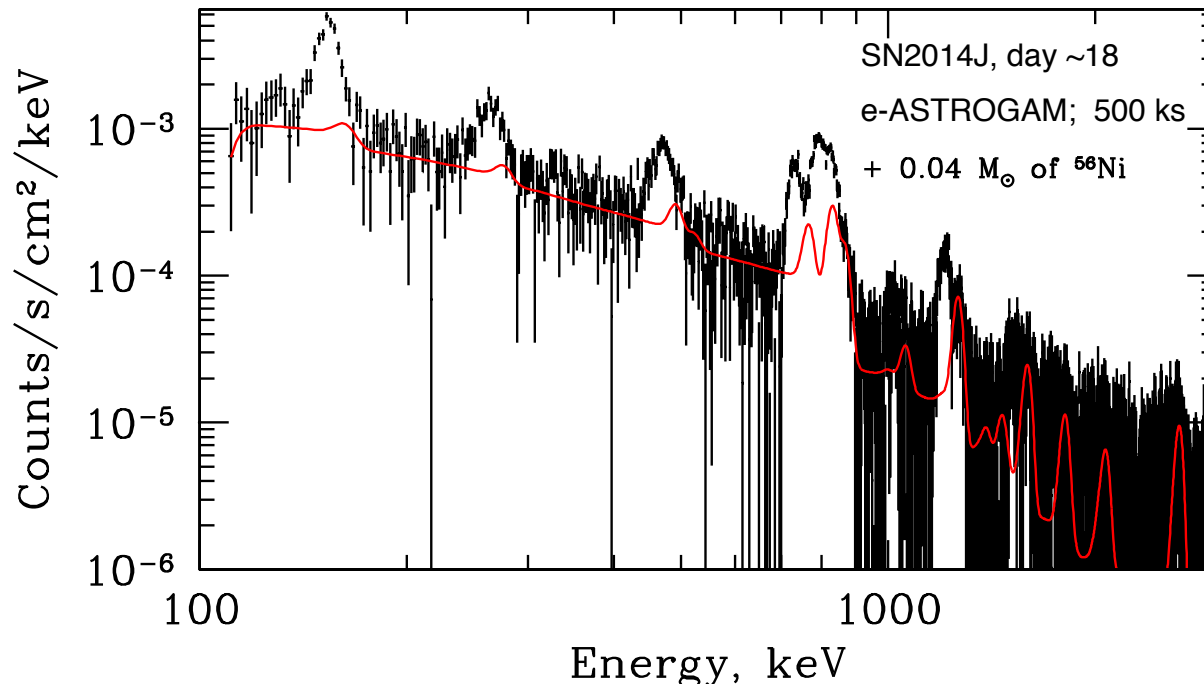
*"Sensitivity for the 847 keV line from thermonuclear SNe **70 times better** than that of the INTEGRAL spectrometer (SPI)"*

*"Pioneering polarimetric capability for both steady and transient sources"*



# Что ASTROGAM может дать SN Ia?

- ◆ >десяти SNIa на уровне INTEGRALa (масса, энергия)
- ◆ Радиоактивные элементы на поверхности
- ◆ Профили гамма-линий - механизм взрыва
- ◆ Поляризация – асимметрия врыва
- ◆ Выход позитронов – магнитные поля

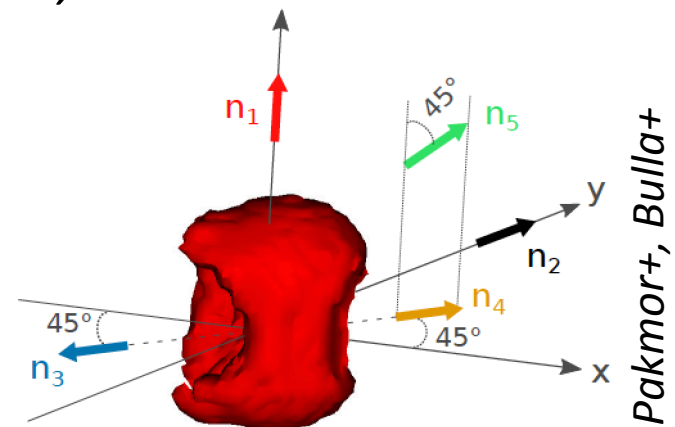


# Поляризация излучения сверхновых

*Brown & McLean 77, рассеяние в асферических атмосферах  
Shapiro & Sutherland 82; Höflich 91, Чузай 92, Kasen 03....*

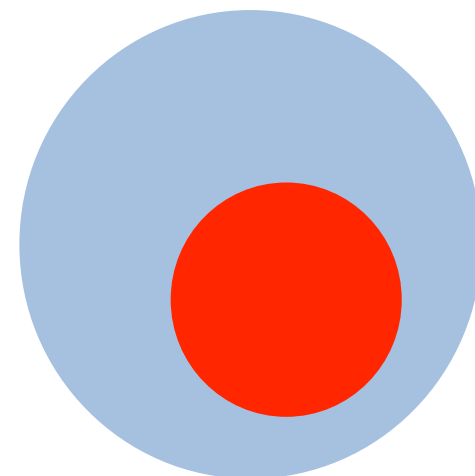
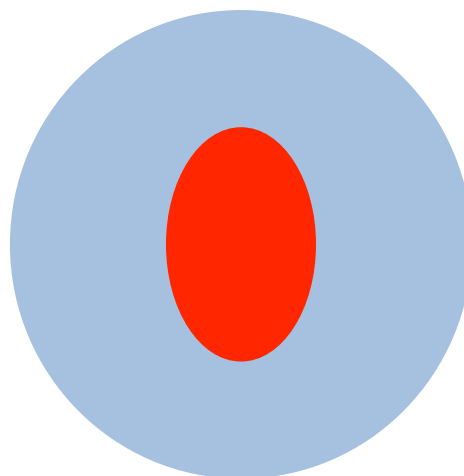
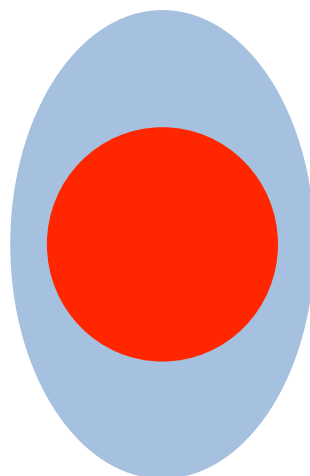
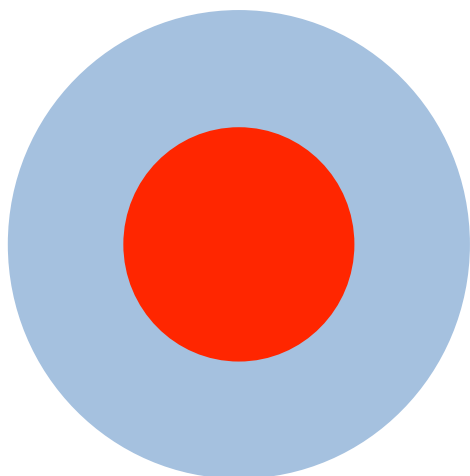
**Рассеяние гамма-лучей:**

$\tau < 1$ , Комptonовское рассеяние



$P=0$

$P \neq 0$





## Комptonовское рассеяние

$$E_1 = \frac{E_0}{\left[ 1 + \frac{E_0}{m_e c^2} (1 - \cos \theta) \right]}$$

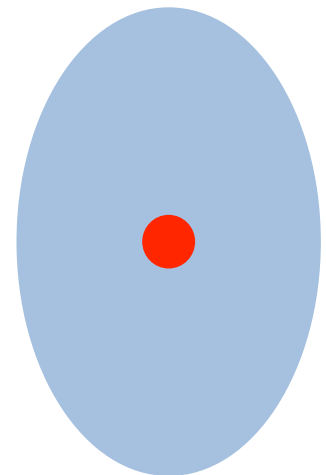
$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{1}{4} r_0^2 X^2 \left[ X + X^{-1} - 2 + 4 \cos^2 \Theta \right], \text{ where } X = \frac{E_1}{E_0}$$

$$I = \frac{1}{2} r_0^2 X^2 \left[ X + X^{-1} - \sin^2 \theta \right] a(\theta, \varphi)$$

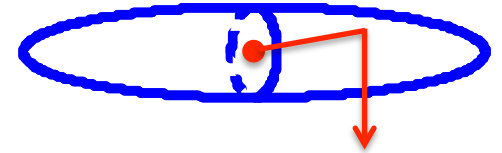
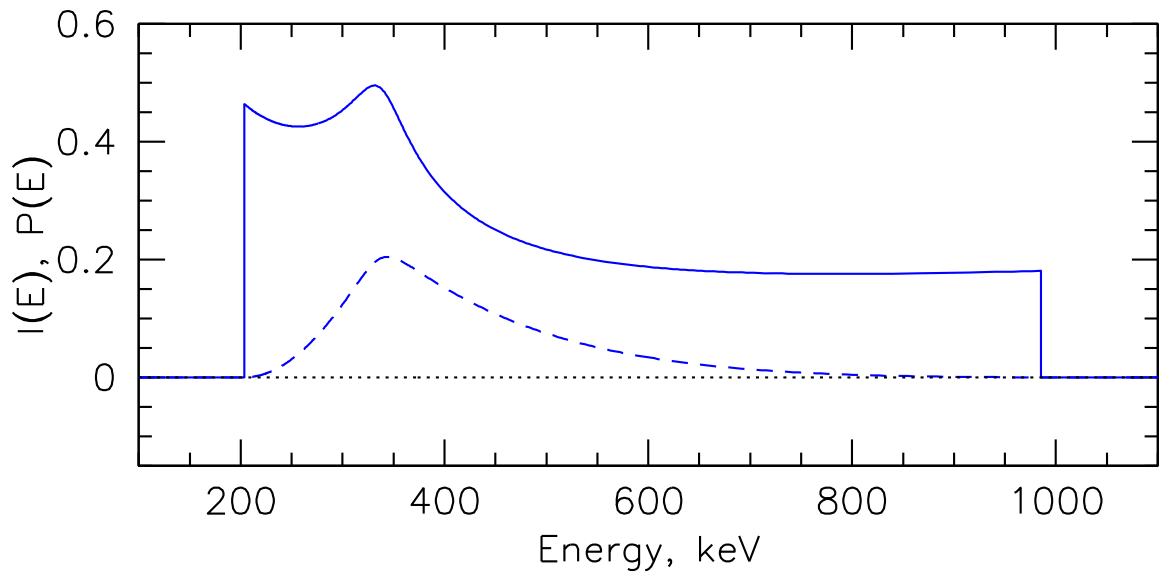
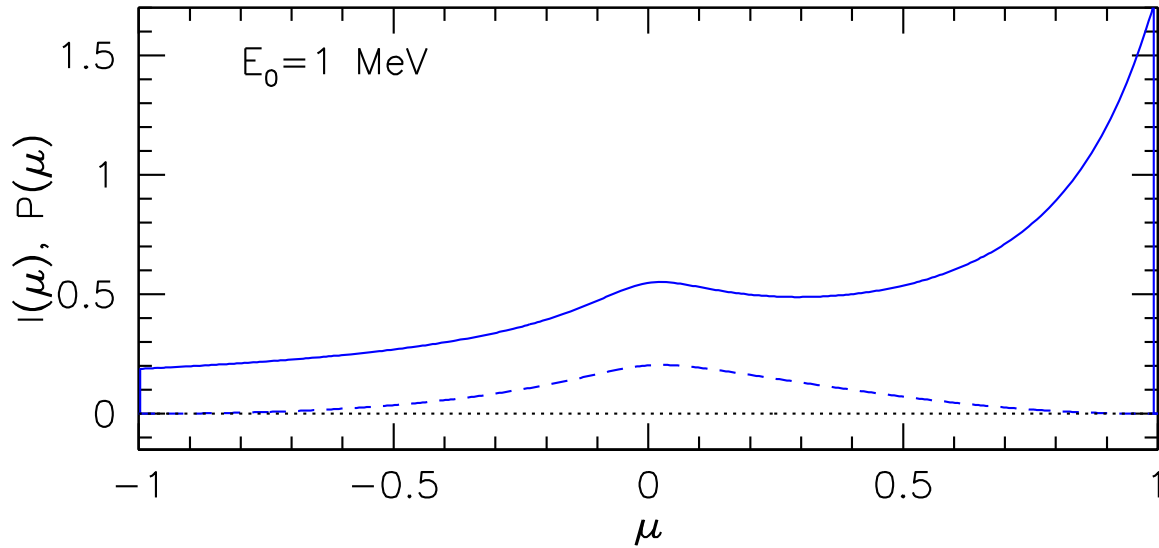
$$Q = \frac{1}{2} r_0^2 X^2 \left[ \cos 2\varphi \sin^2 \theta \right] a(\theta, \varphi)$$

1. Гамма-линии  $\Rightarrow$  угол  $\theta$

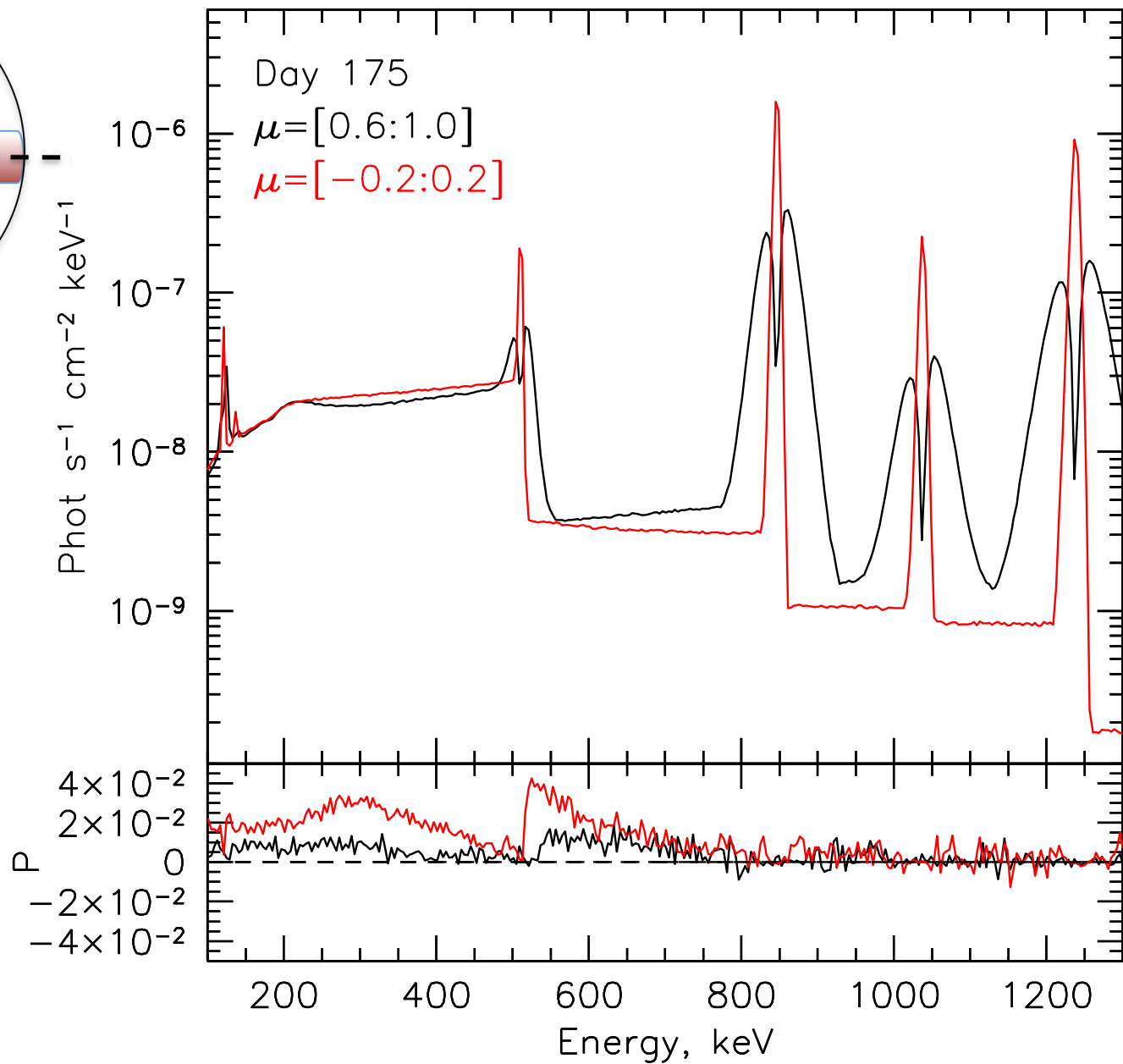
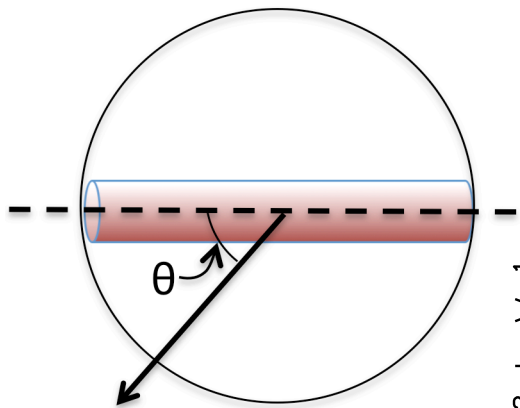
2. Поляризация  $\Rightarrow$  угол  $\varphi$



# Рассеяние линии с энергией 1 МэВ эллипсоидом вращения

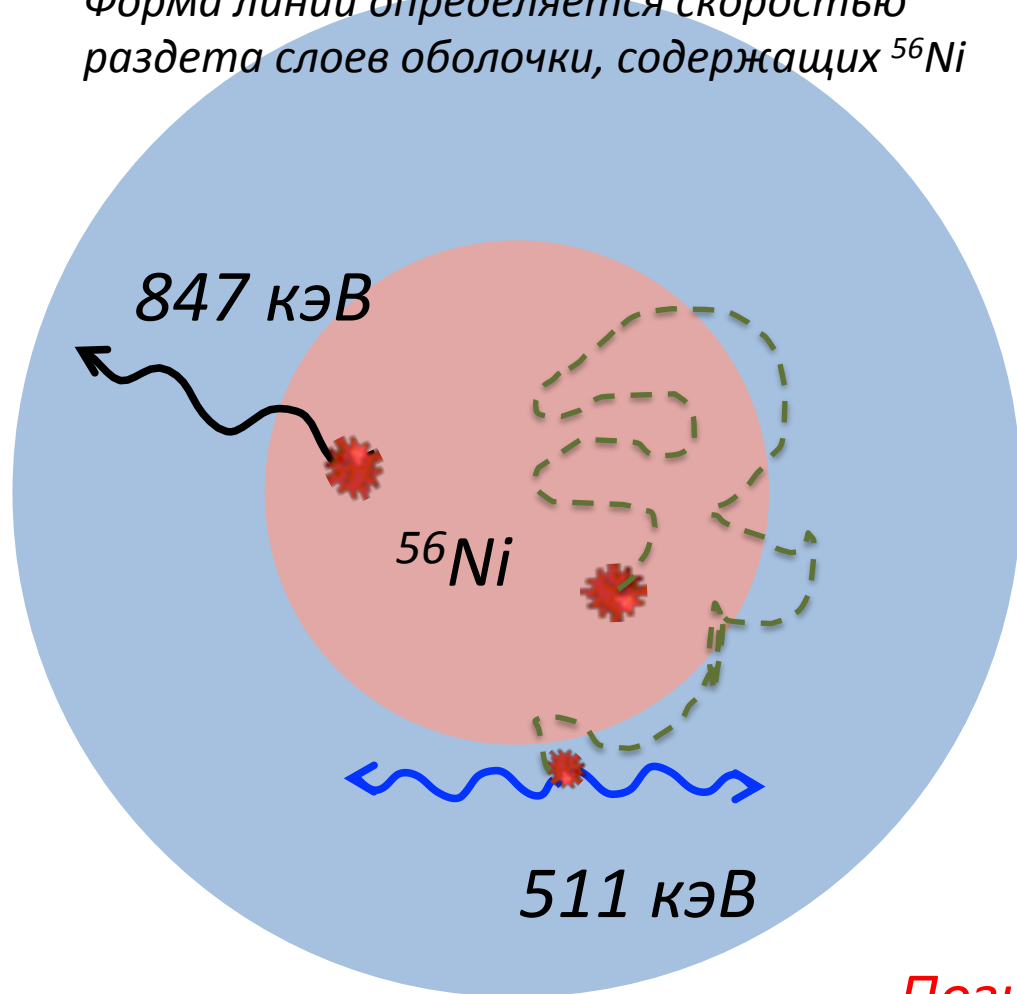


Prolate



## *γ-линии и аннигиляция позитронов в расширяющейся оболочке*

*Форма линий определяется скоростью раздета слоев оболочки, содержащих  $^{56}\text{Ni}$*



*Пробег позитрона определяется потерями энергии на ионизацию*

*Траектория движения определяется магнитным полем*

$$\tau_{847} \sim 0.8 \left( \frac{t}{100 d} \right)^{-2}$$

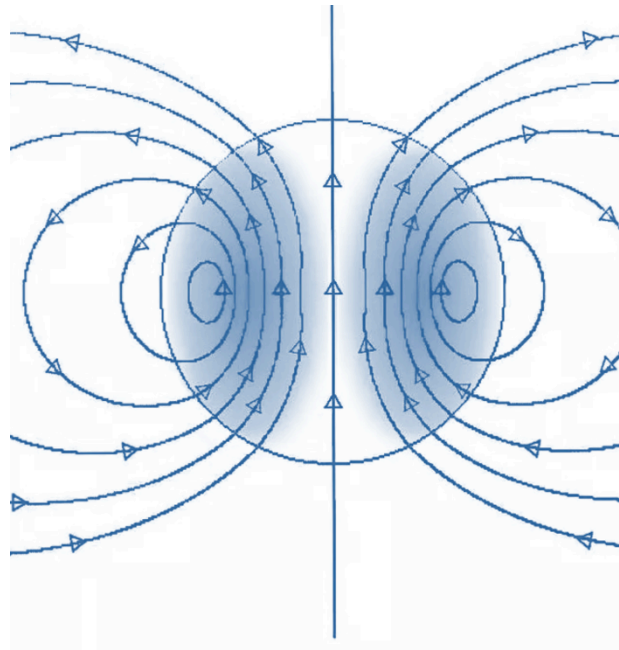
$$\tau_{e^+} \sim 40 \left( \frac{t}{100 d} \right)^{-2}$$

*Позитрон аннигилирует не там, где формируются гамма-линии!*

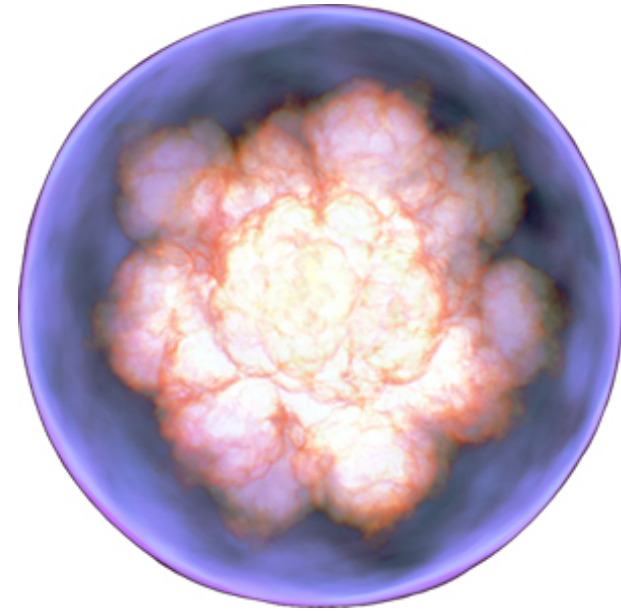
# Магнитное поле в расширяющейся оболочке



$B=0$



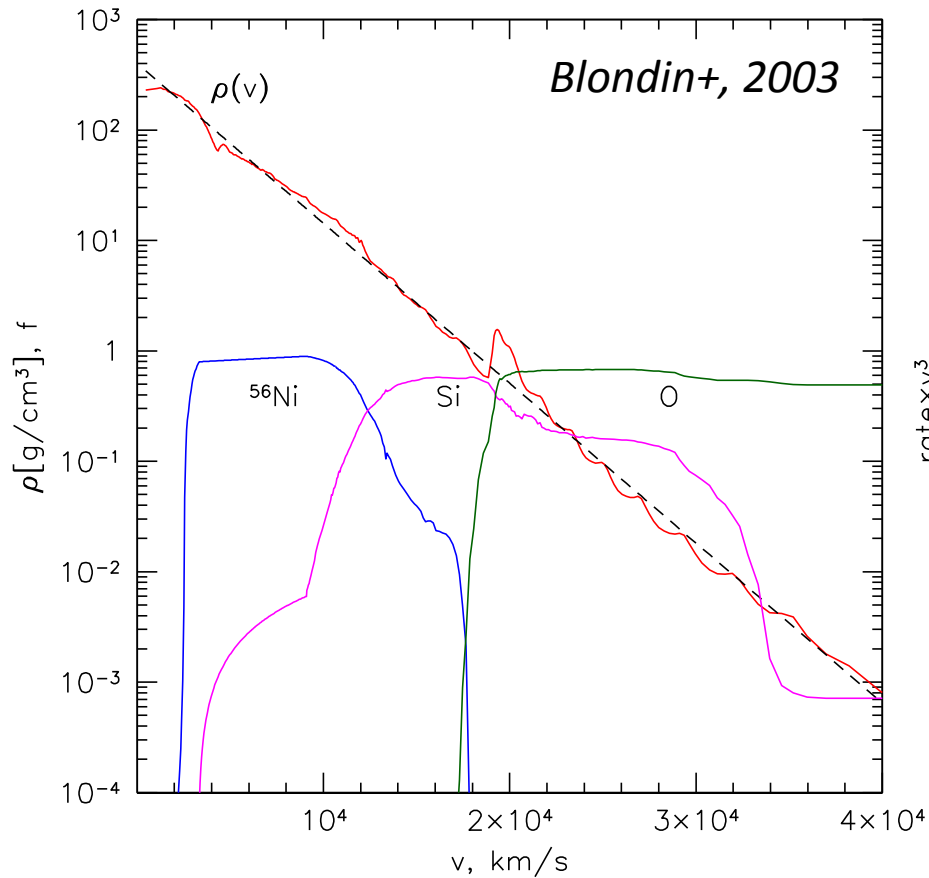
Дипольное



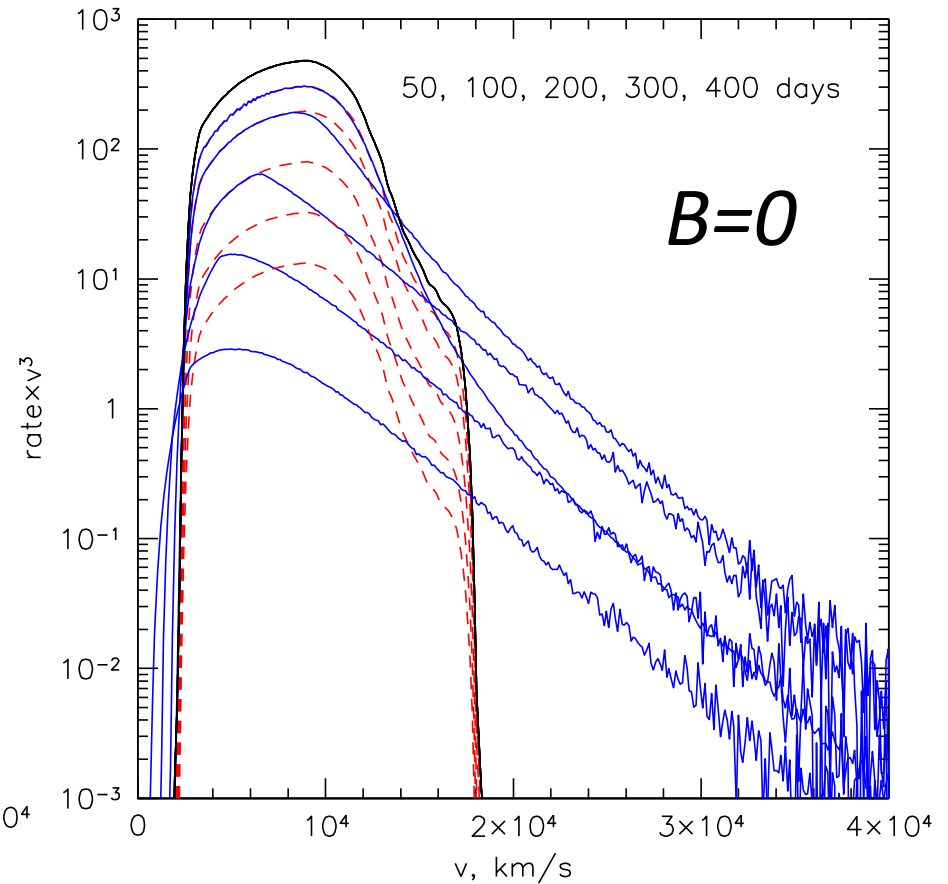
Запутанное

$$\lambda \equiv \frac{l}{R}$$

# Базовая сферически-симметричная модель



0 – 2 тыс. км/с – стабильные изотопы  
2 тыс. – 18 тыс. – <sup>56</sup>Ni  
18 тыс. – 40 тыс. – Si, O



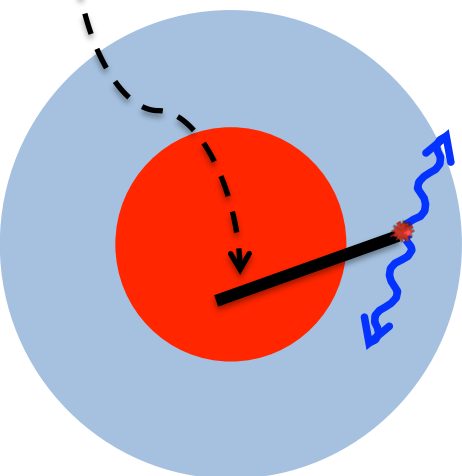
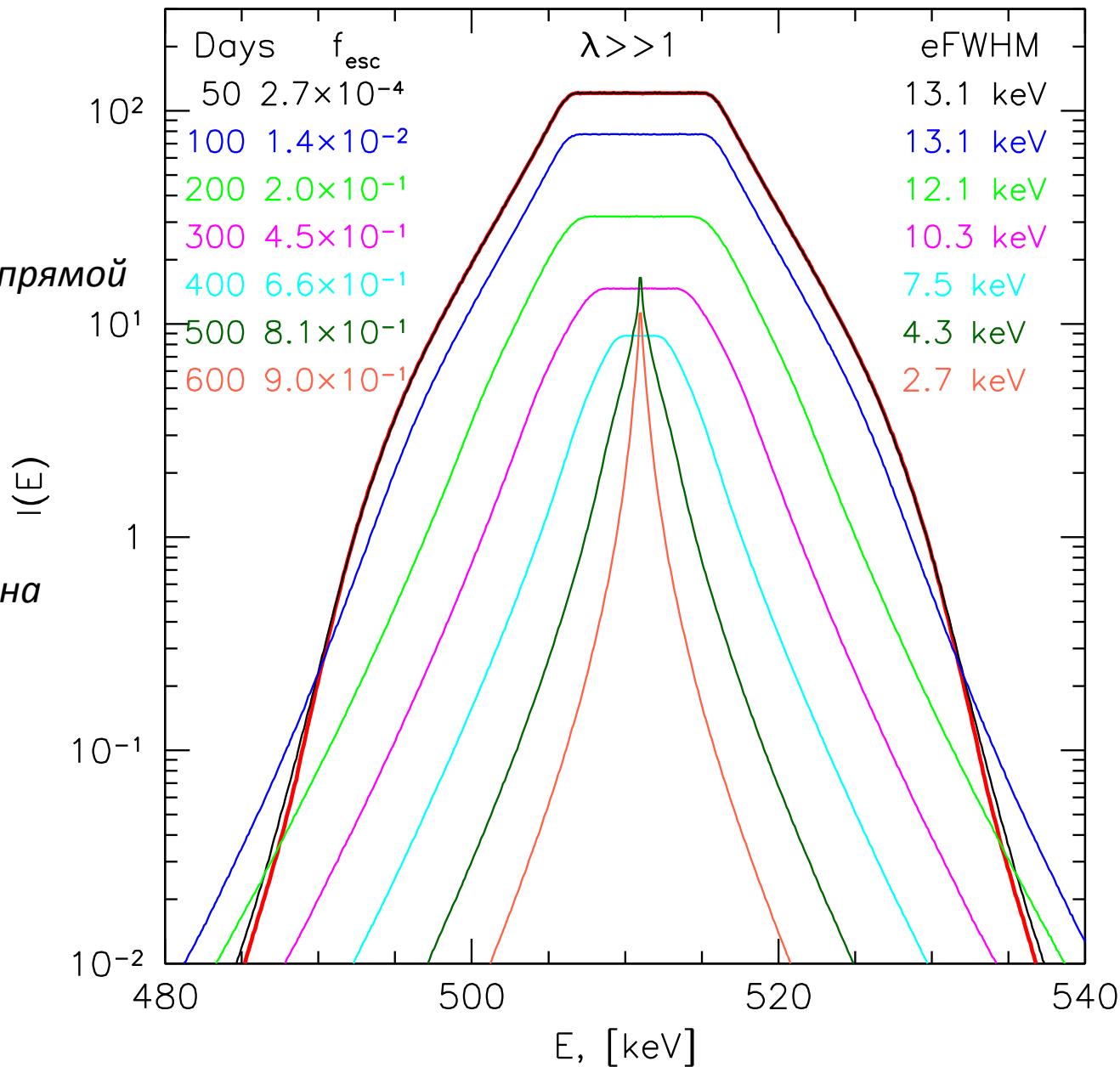
На поздних стадиях позитроны  
аннигилируют на меньших радиусах!

# Форма аннигиляционной линии без магнитного поля

$B=0$

Позитрон летит по прямой

Траектория позитрона

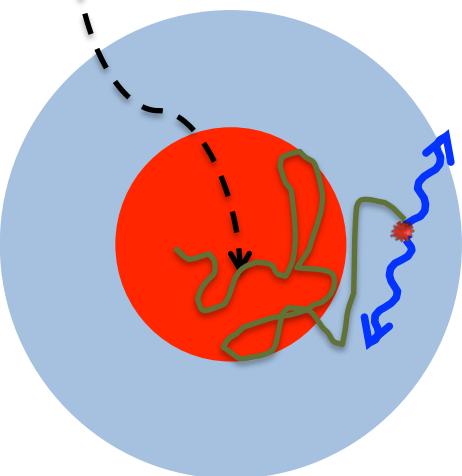
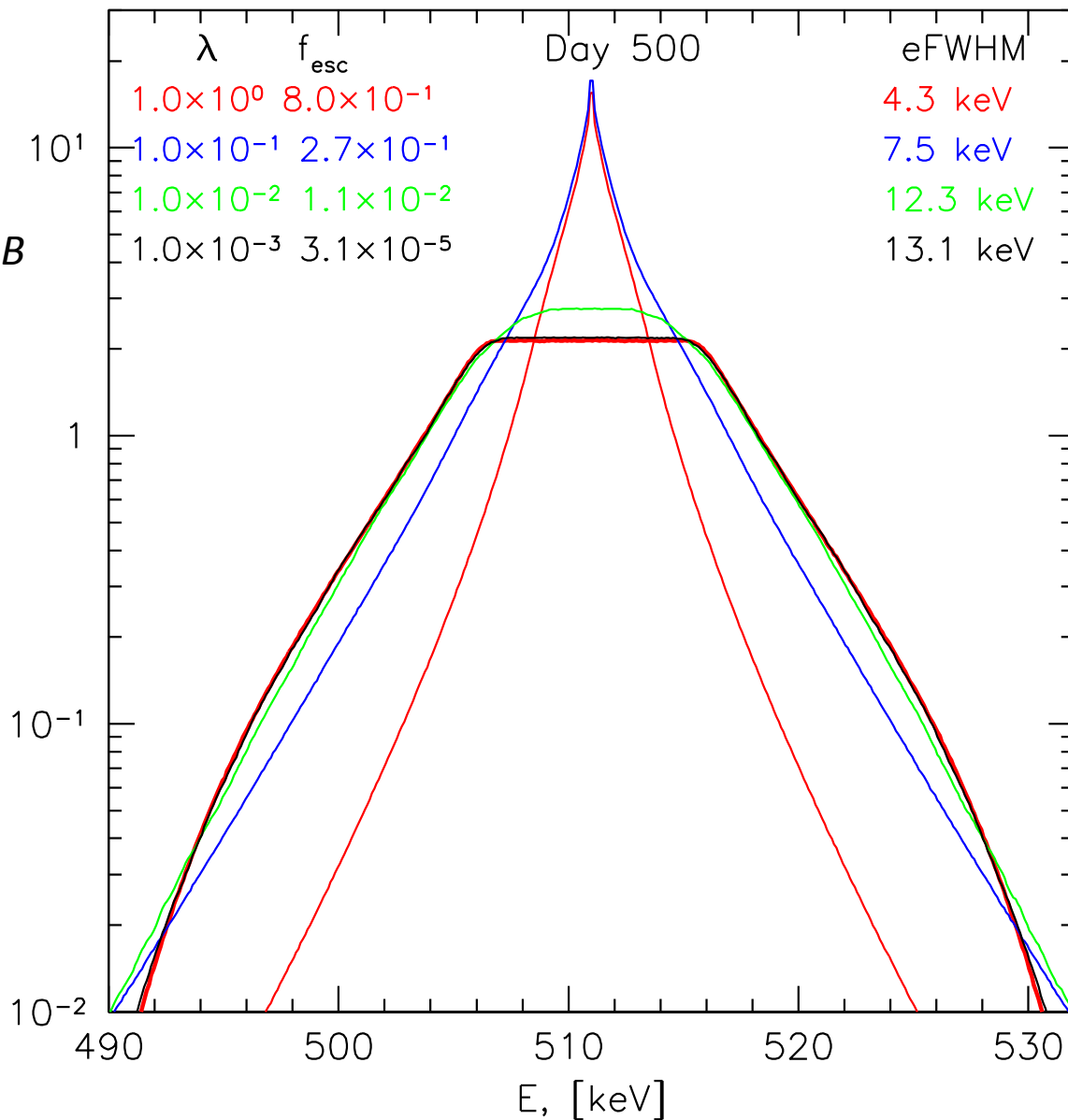


# Форма аннигиляционной линии с запутанным полем

$B=0$

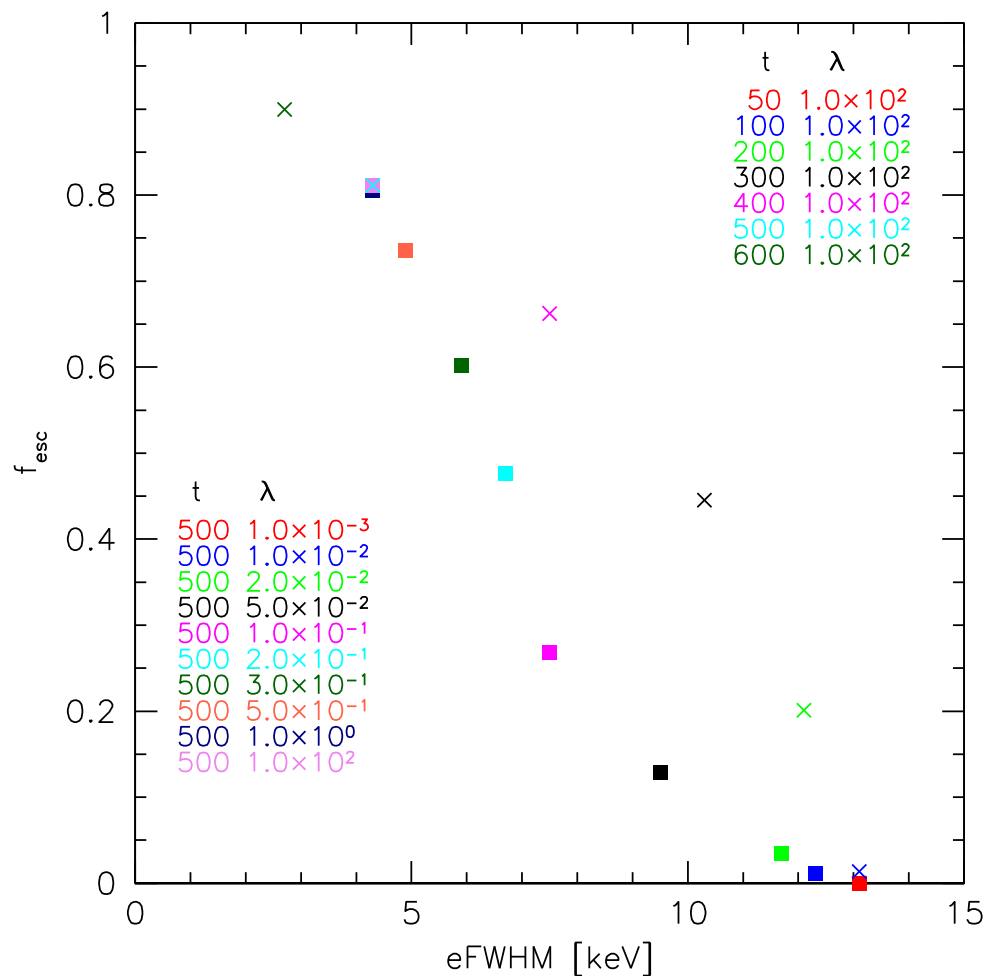
Позитрон летит вдоль  $B$

Траектория позитрона





# Ширина линии, как диагностика доли убегающих позитронов



Чем уже линия 511 кэВ, тем большая доля позитронов убегает

# Выводы

*Поляризация рассеянного излучения **гамма** линий  $\Rightarrow$  диагностика асимметрии*

*Профиль линии 511 кэВ не обязан совпадать с профилем линии 847 кэВ  $\Rightarrow$*

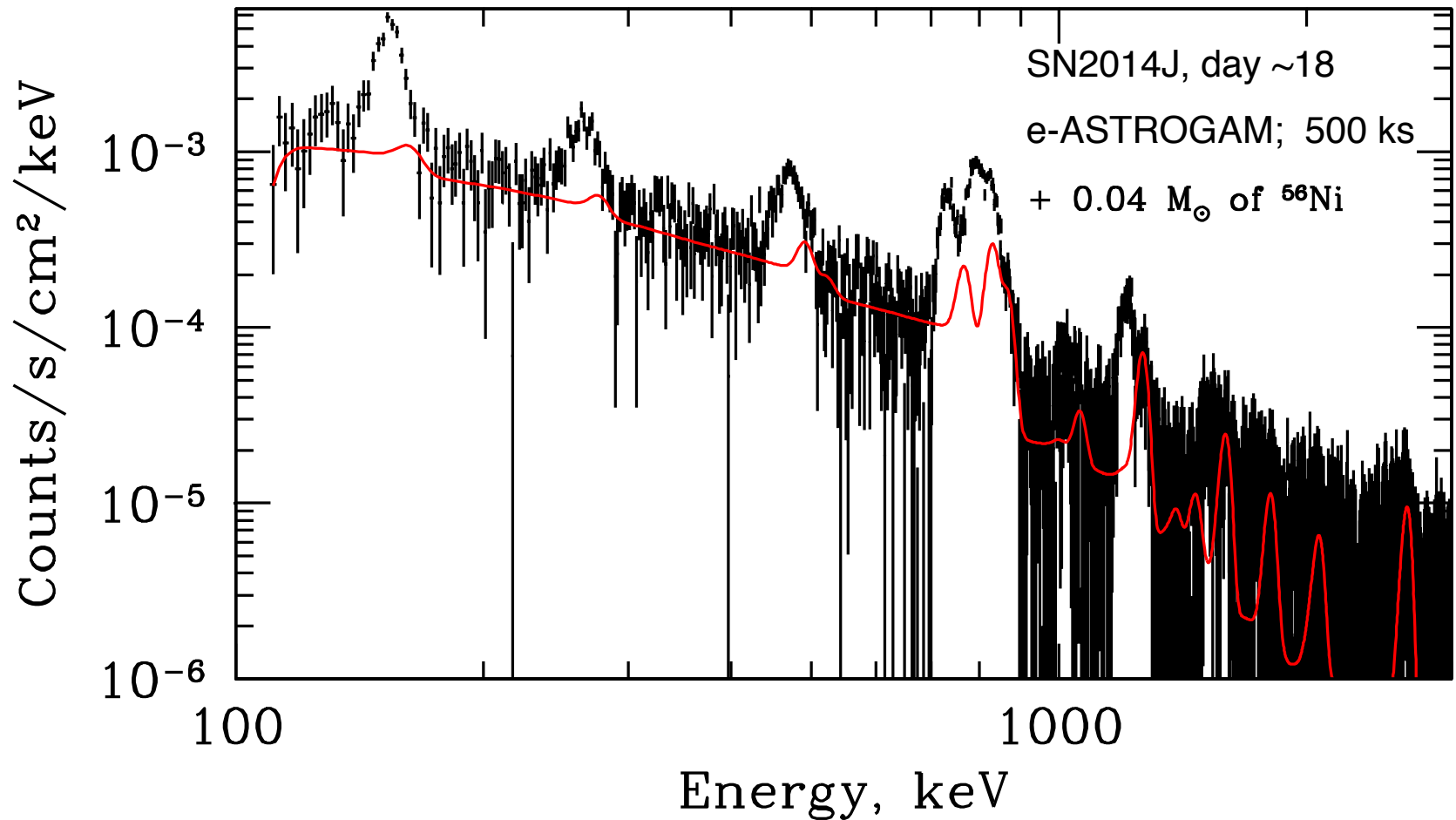
*Выход позитронов, топология магнитных полей*

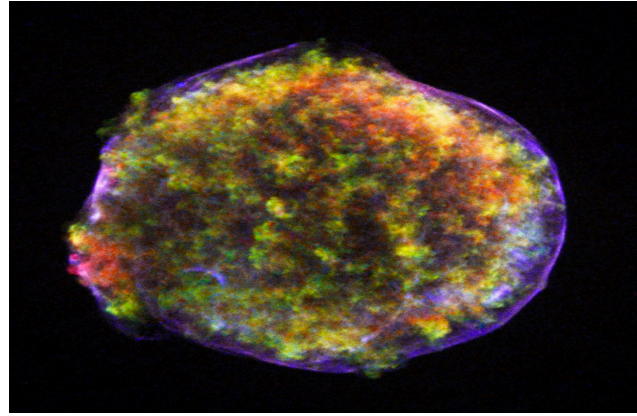
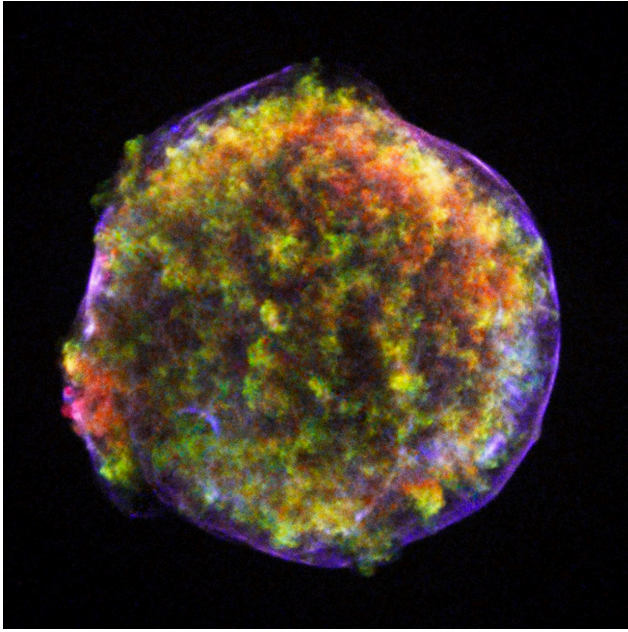
*[Если совпадает  $\Rightarrow$  надо искать другие источники позитронов]*

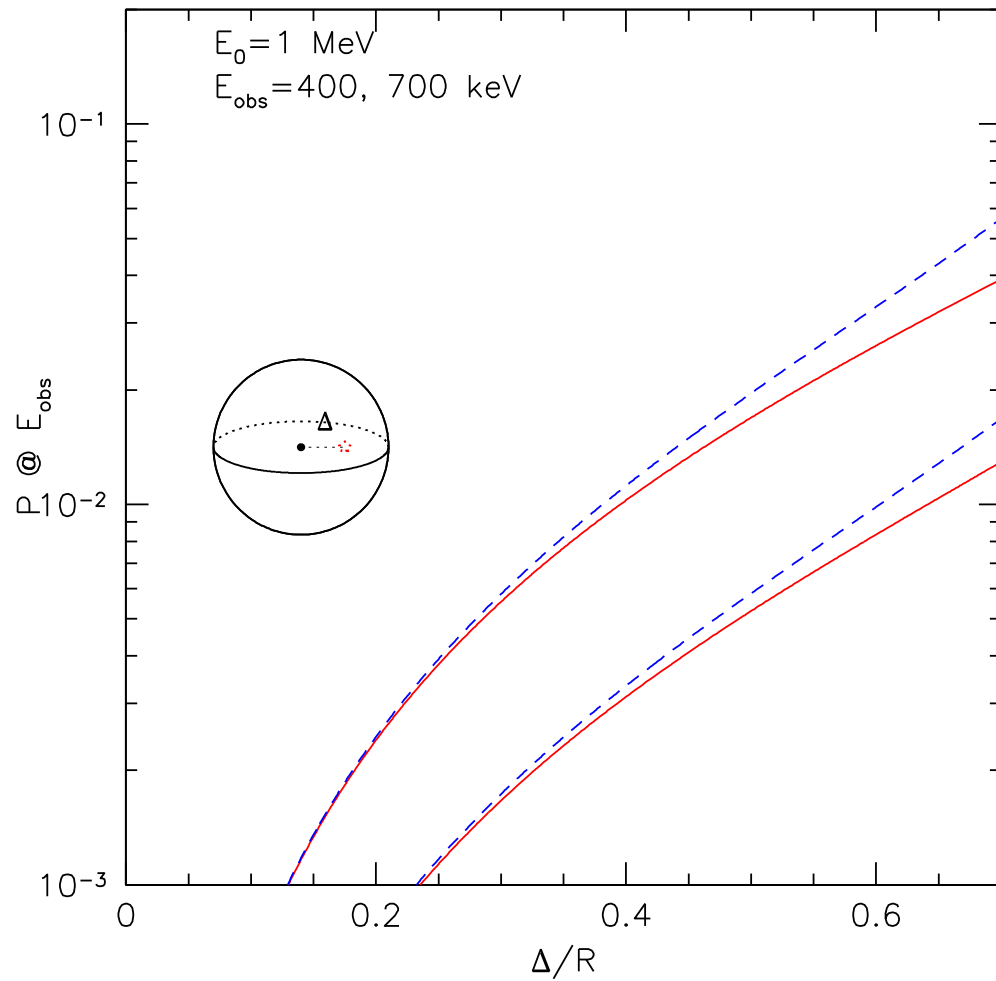
*За скобками остались: процесс аннигиляции в среде из тяжелых элементов, уширение линии, трех-фотонный континуум, эффекты запаздывания и т.п.*

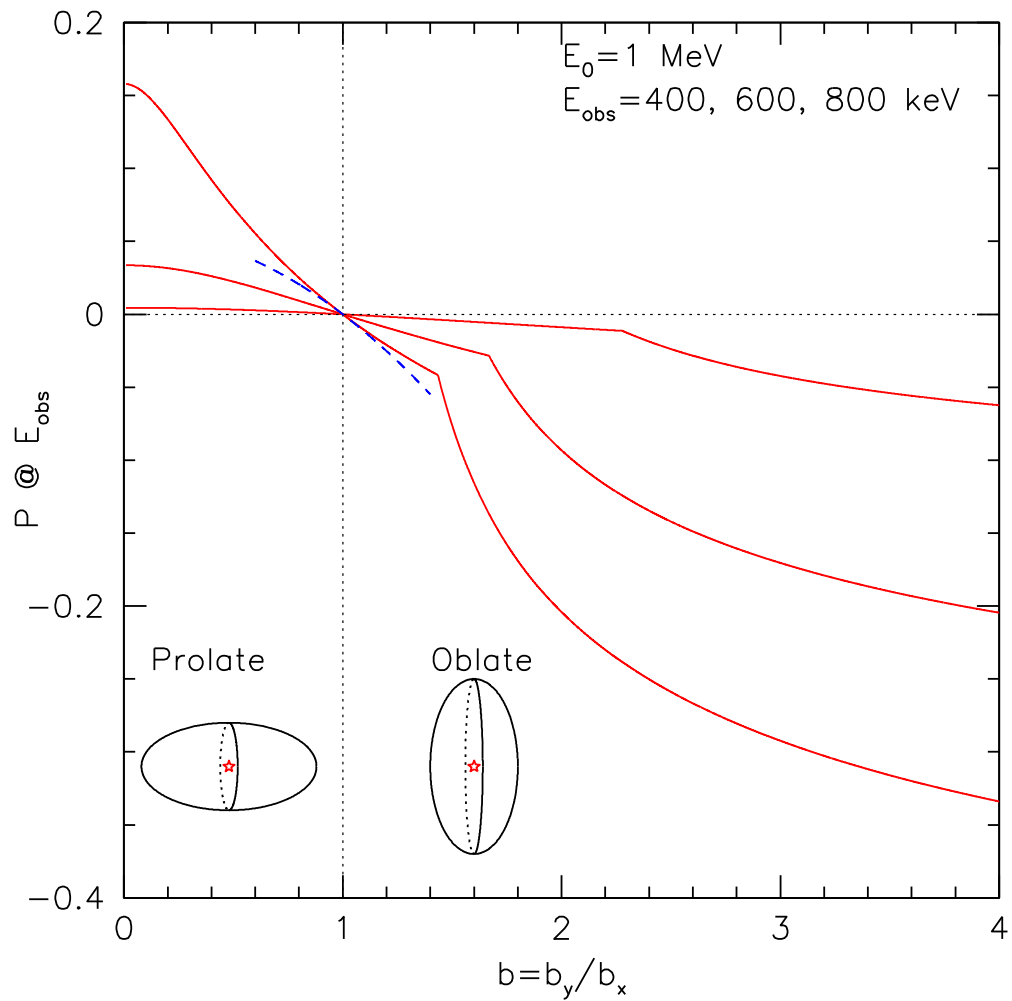


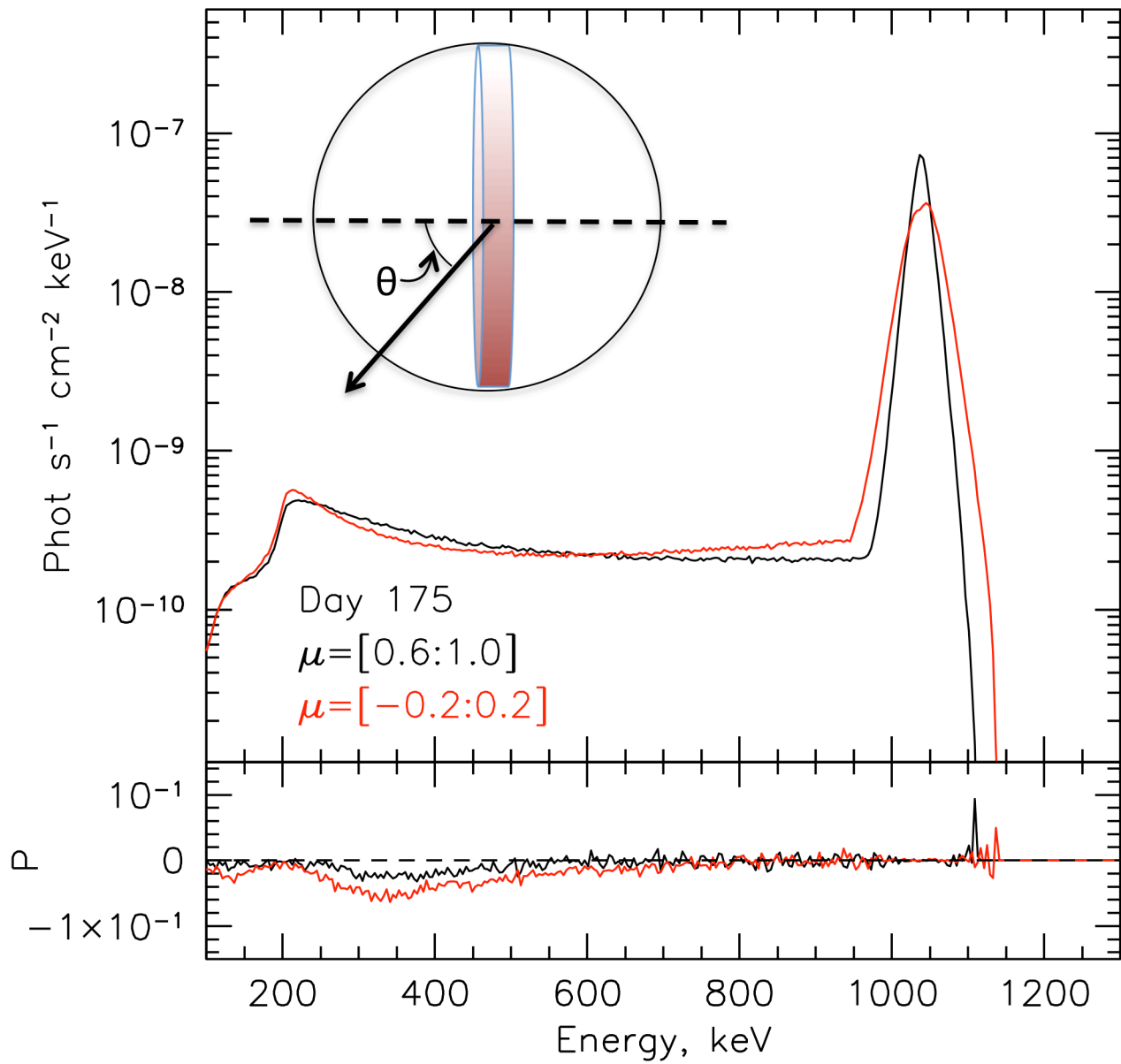
# 0.04 Солнечных массы $^{56}\text{Ni}$ на поверхности



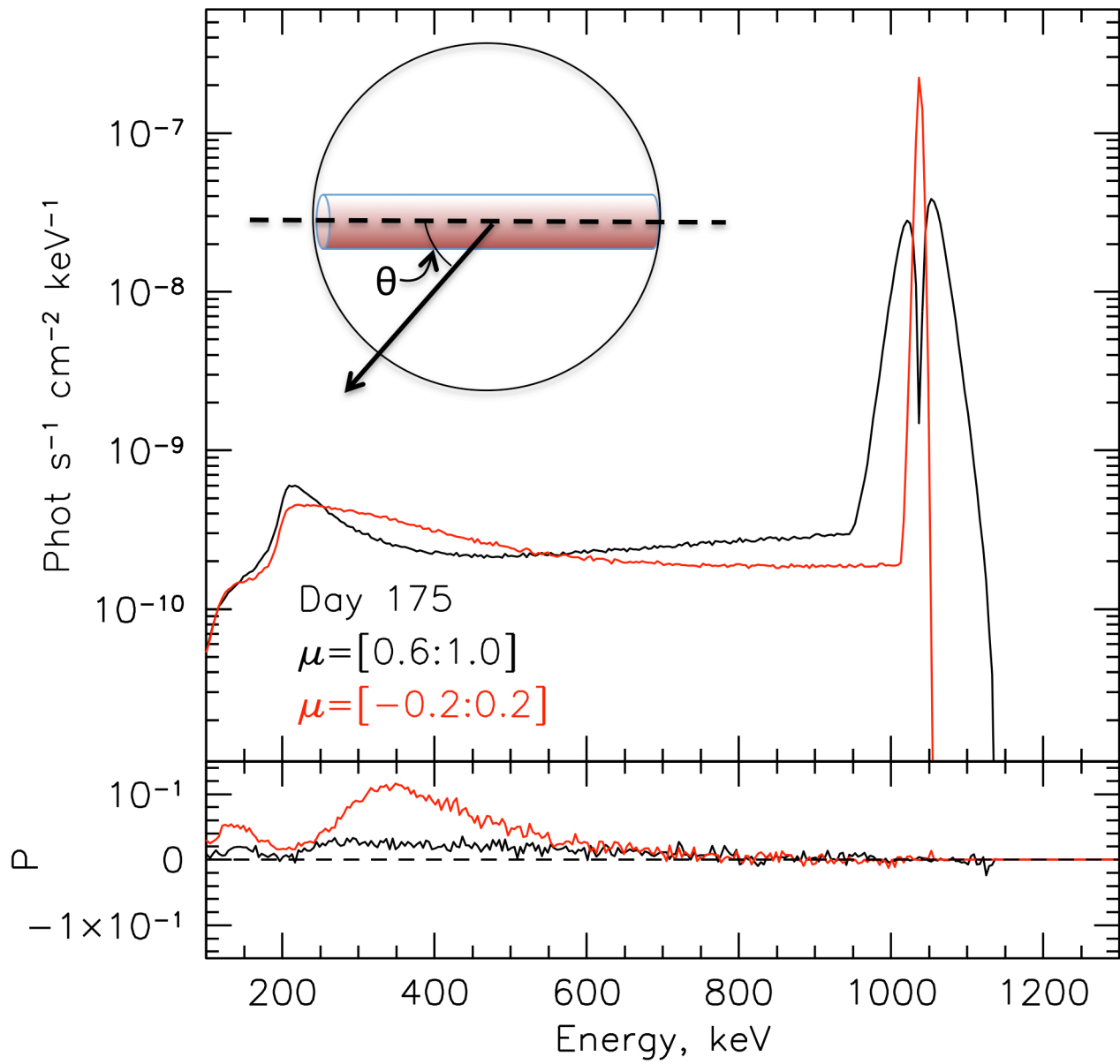


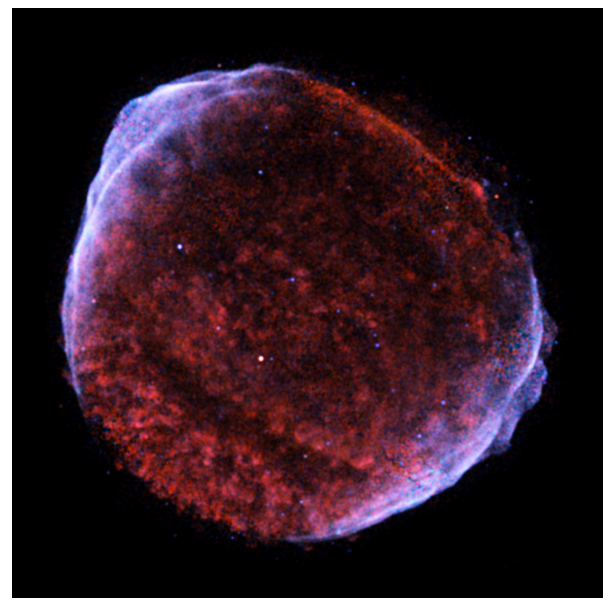




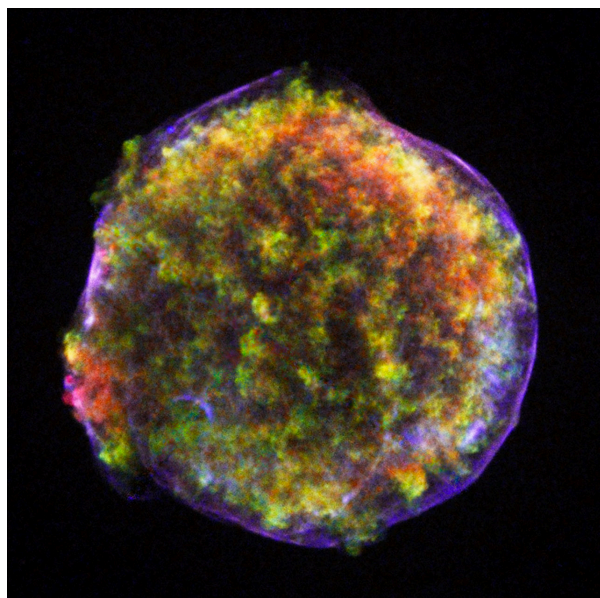




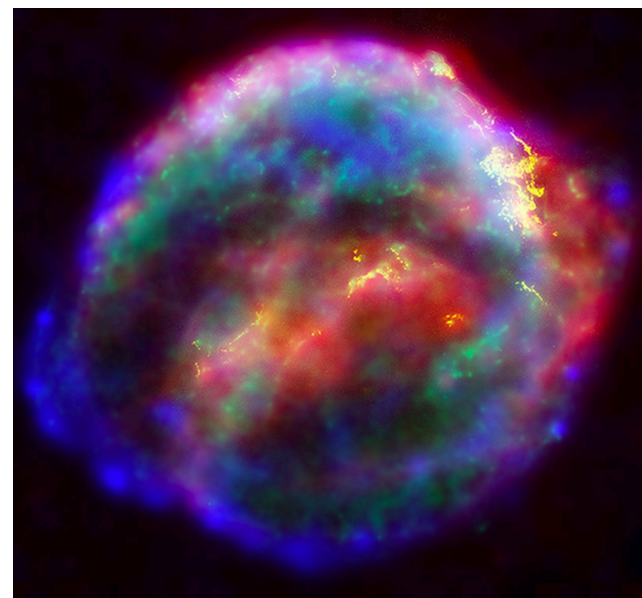




1006

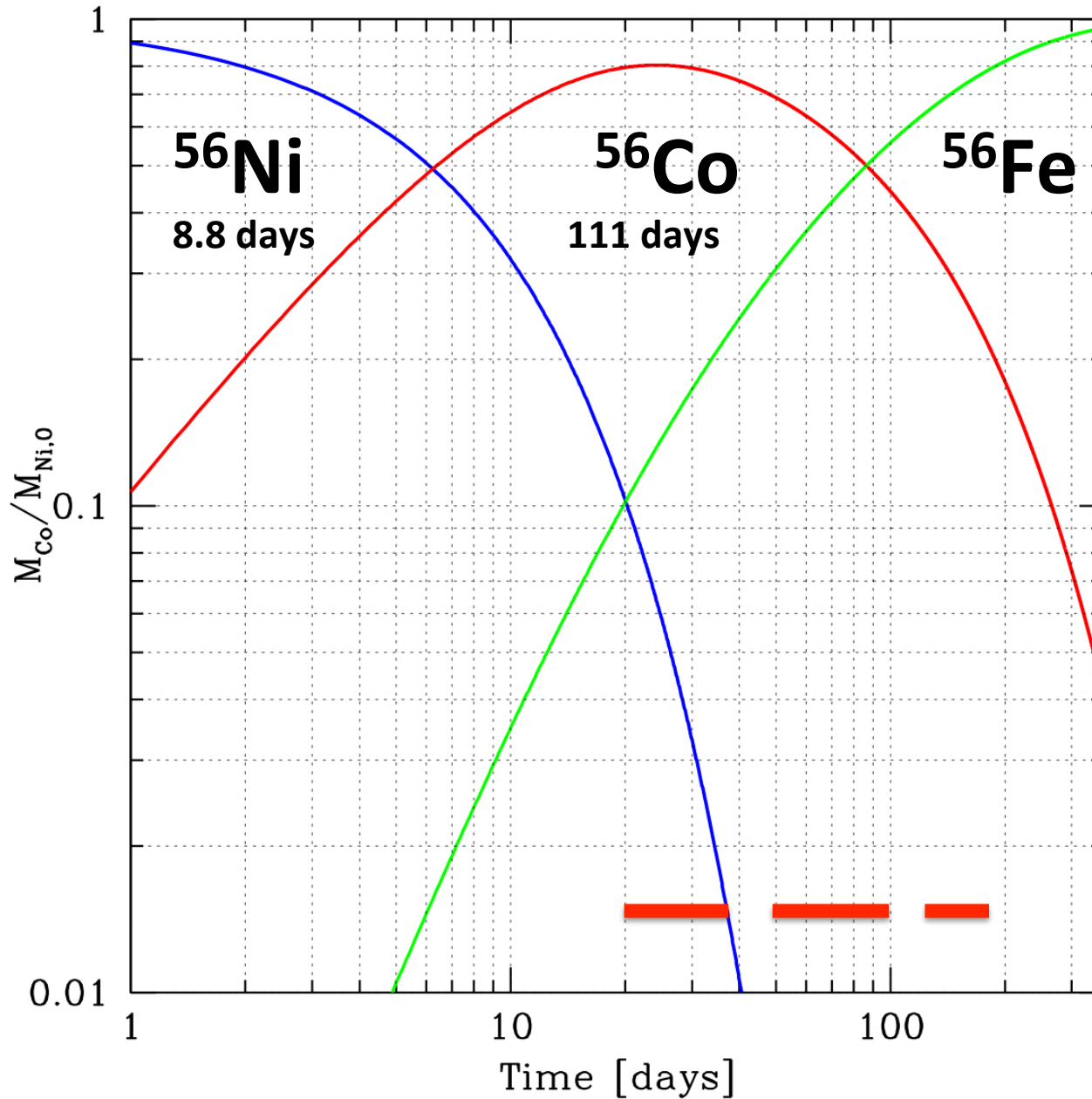


1572

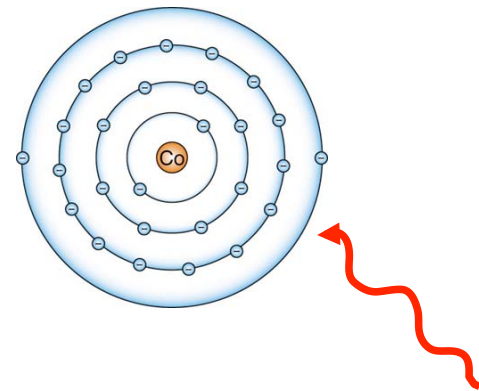
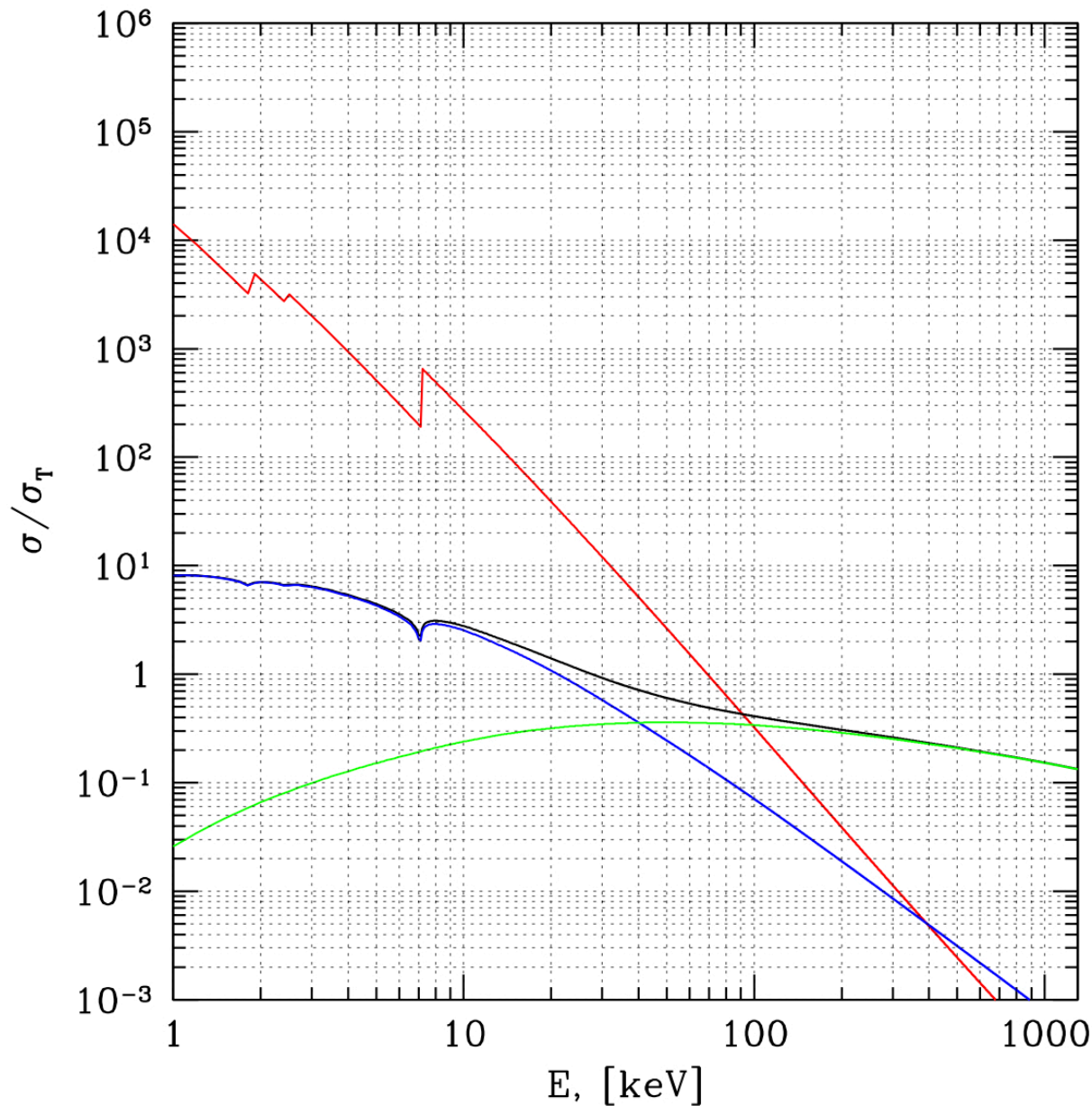


1604

# Evolution of Ni and Co mass: $^{56}\text{Ni} \rightarrow ^{56}\text{Co} \rightarrow ^{56}\text{Fe}$



# Interaction of gamma-rays with the ejecta



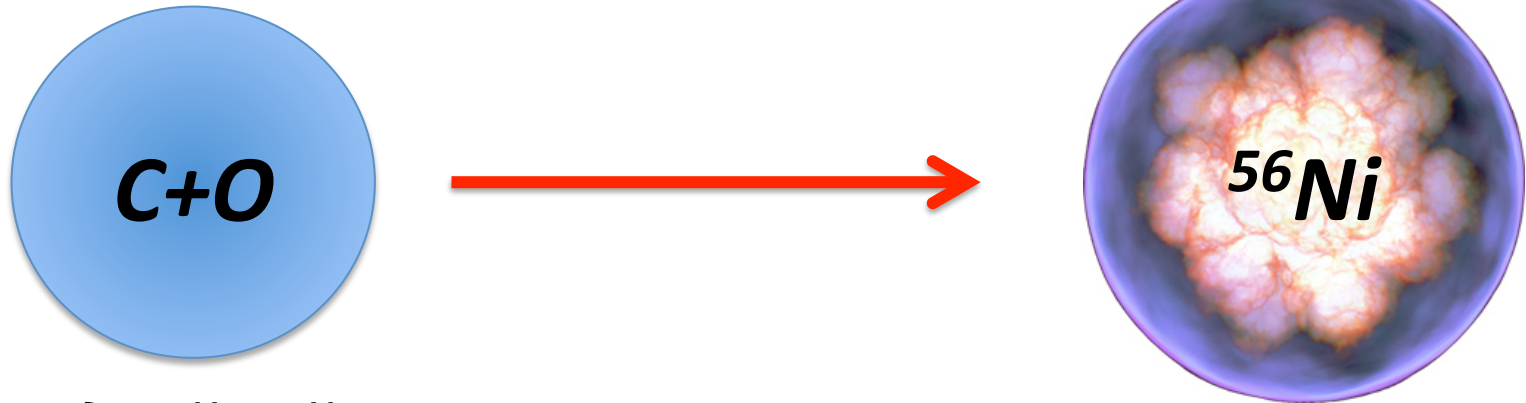
**Photoabsorption  
(ionization)**

**Coherent scattering**

**Incoherent scattering  
(ionization)**

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

# Сверхновые типа Ia - термоядерные взрывы белых карликов



*Тип двойной системы и ее эволюция*

*Механизм взрыва*

*Процесс горения*

*Роль предела Чандрасекара*

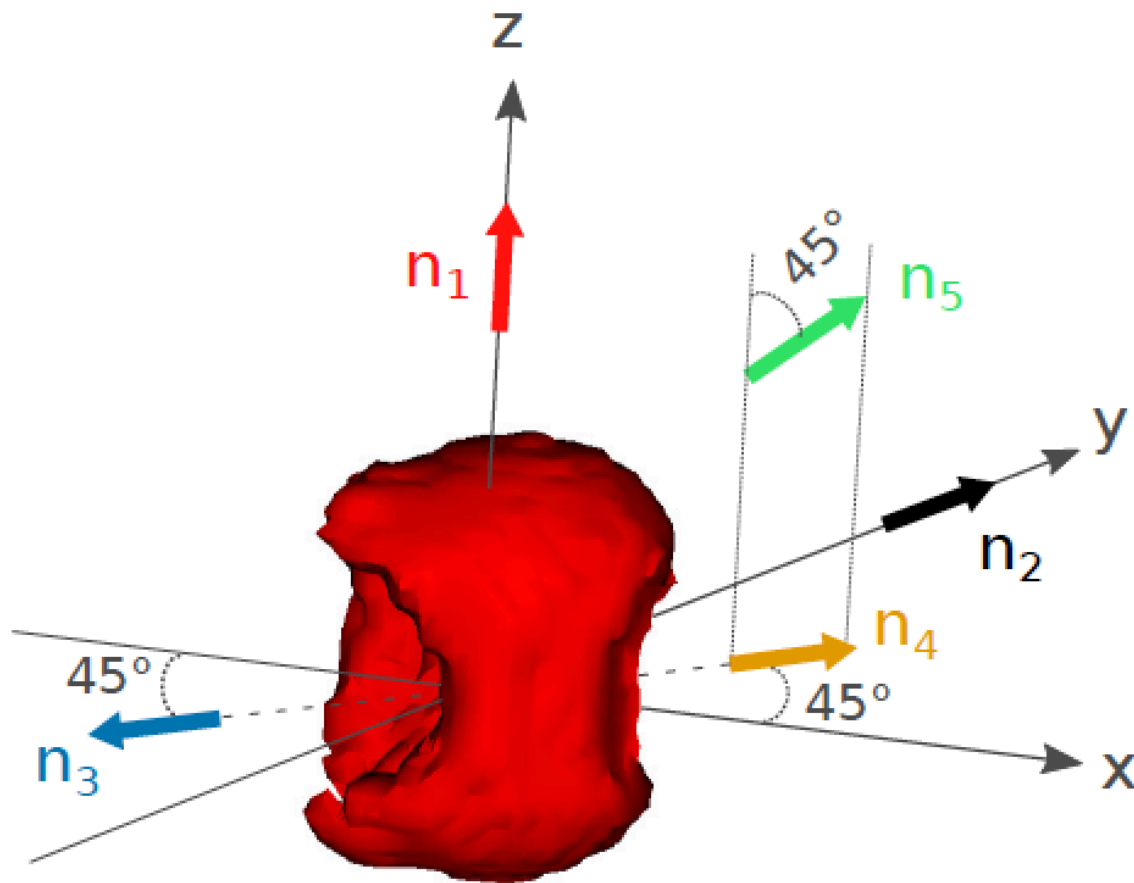
*Роль вращения*

*Роль и топология магнитных полей*

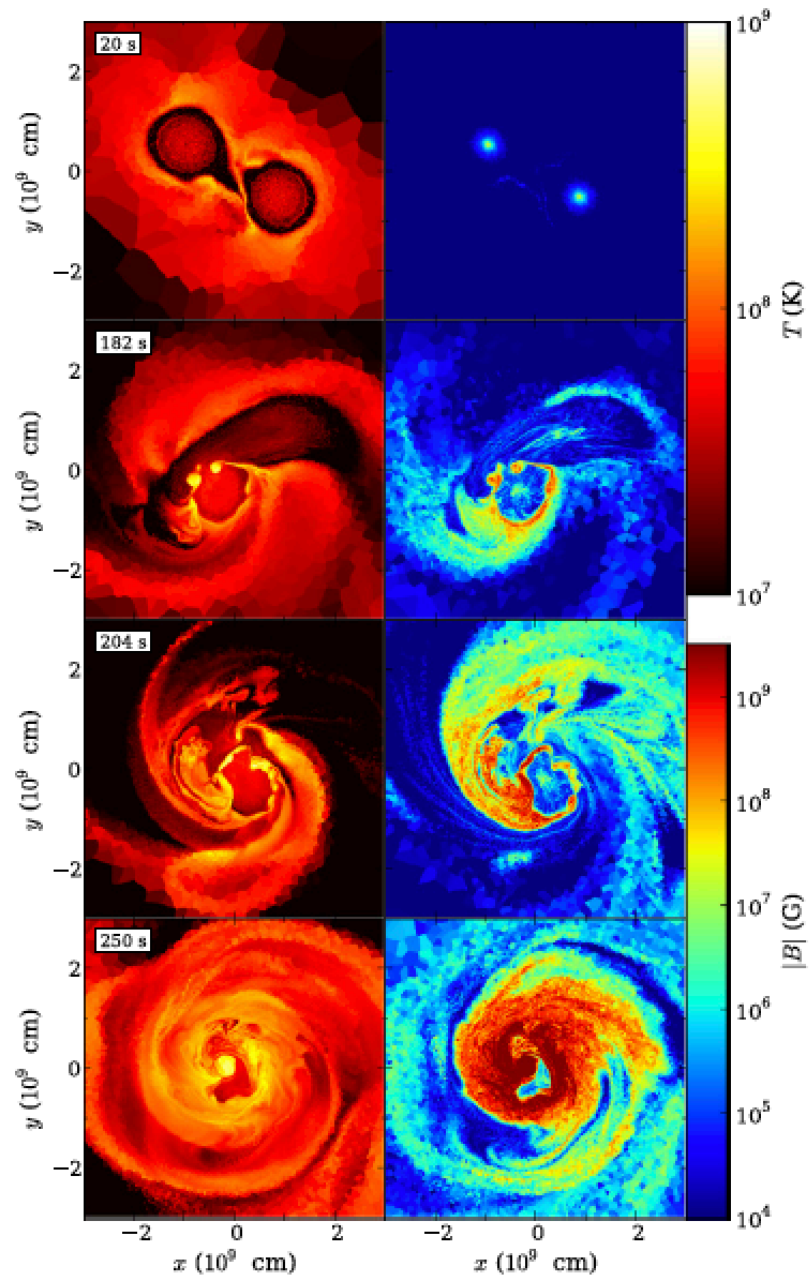
*Убегают ли позитроны из оболочки?*

*SD, DD, CD or collision?*

*Deflagration | Double Detonation | Delayed Detonation*

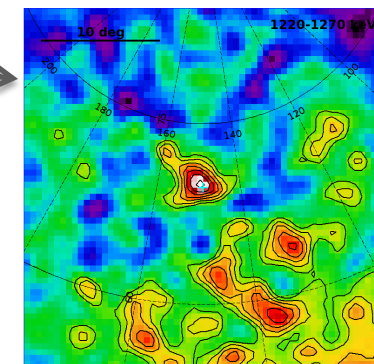
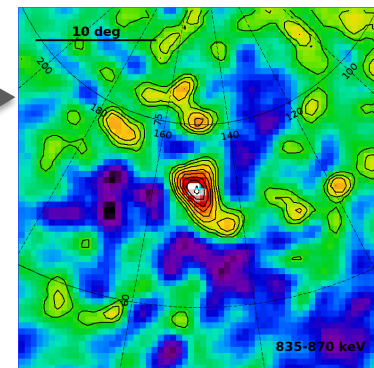
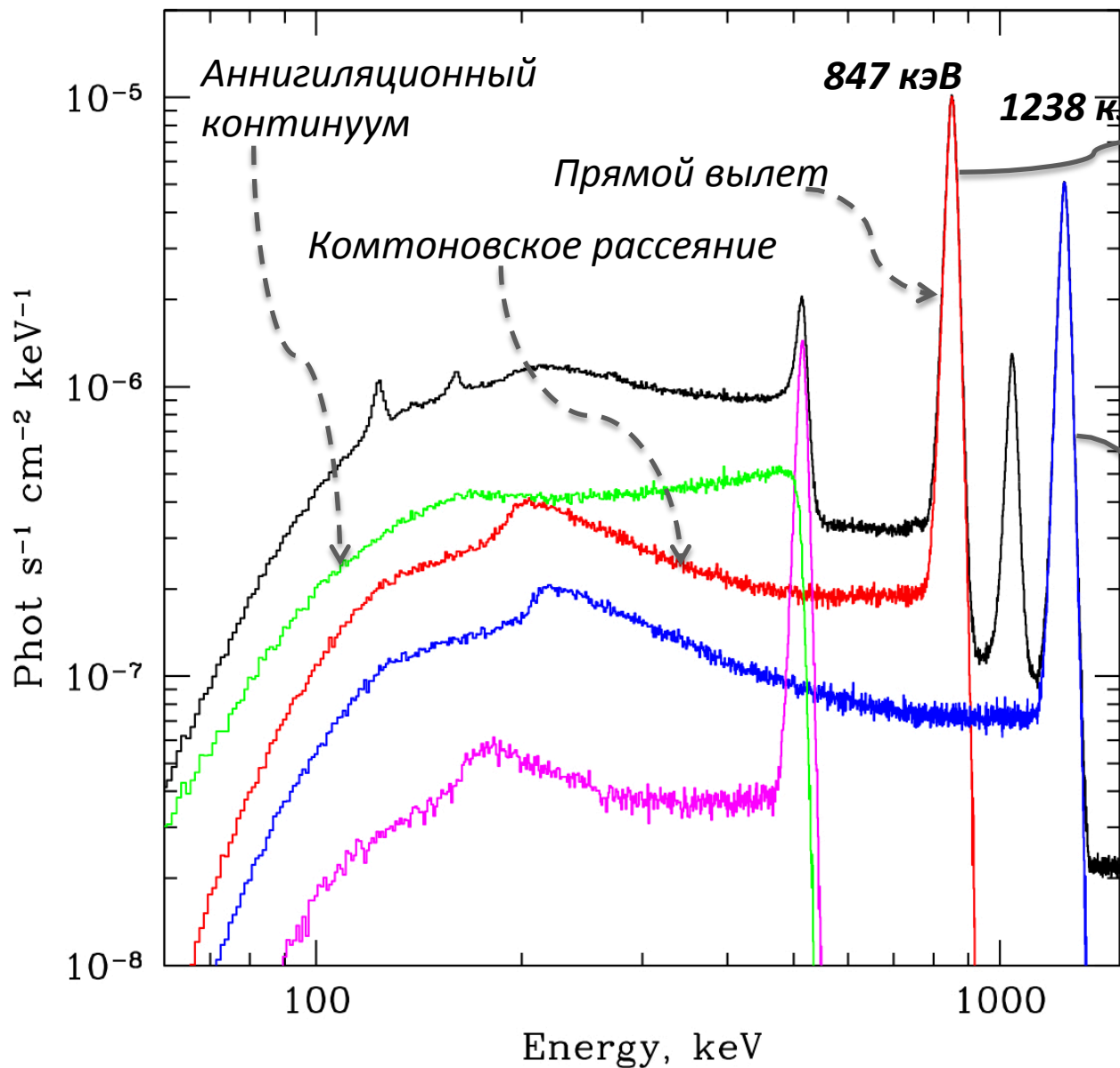


**Figure 2.** Sketch depicting the orientations of the five observers selected in this work with respect to the  $^{56}\text{Ni}$  distribution. Viewing angle  $n_2$ ,  $n_3$  and  $n_4$  are in the equatorial plane, with  $n_3$  facing the cavity created by the presence of the secondary star (see text).



**Figure 1.** Series of temperature  $T$  (left column) and magnetic field strength  $|B|$  (right) logarithmic intensity profiles in the equatorial plane of the merger for four snapshots in time (rows; time indicated at the top left of each row).

# Расчет спектра излучения, выходящего из оболочки сверхновой при распаде $^{56}\text{Co}$



Изображения в  $\gamma$ -линиях  $^{56}\text{Co}$



