

Гамма-пульсары (модели)

Электродинамика пульсара

$$E_{\parallel} \simeq \frac{\Omega R}{c} B = 2.1 \times 10^8 R_6 P^{-1} \text{ [ед. СГС]}$$

$$\Delta\Phi = -4\pi(\rho + \rho_{eff})$$

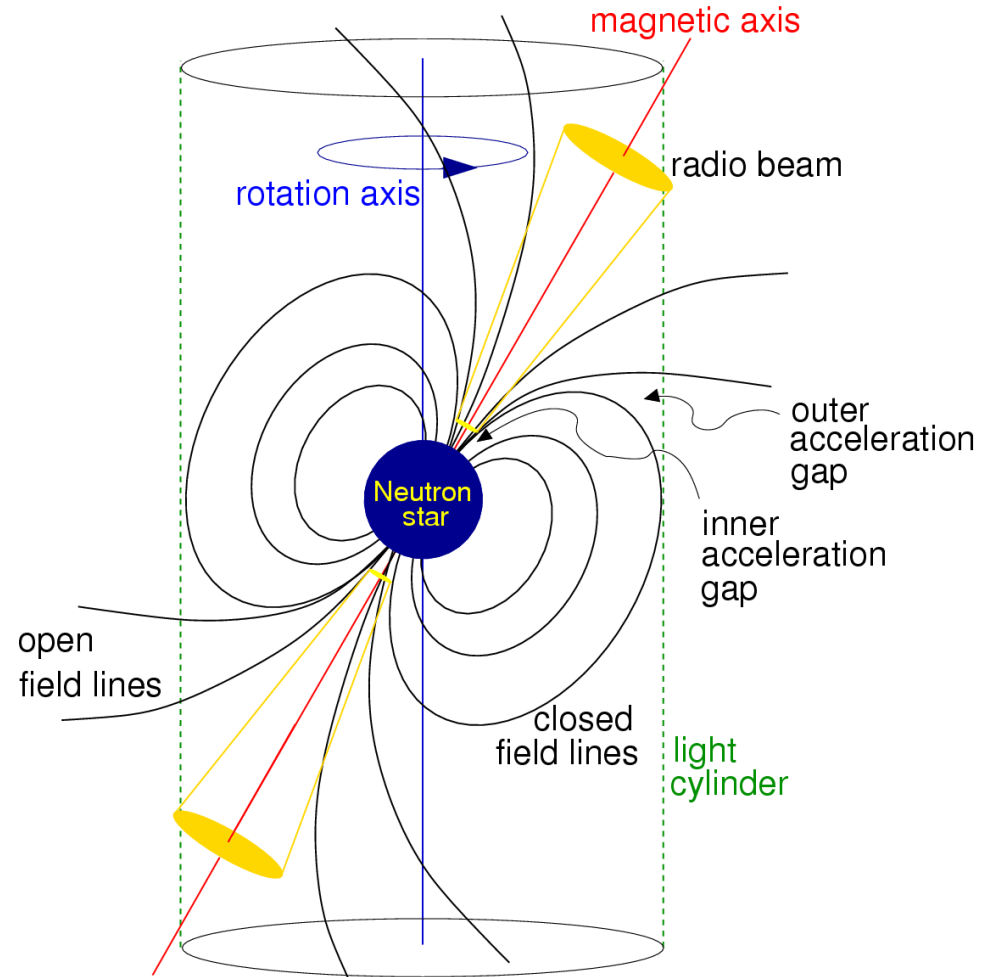
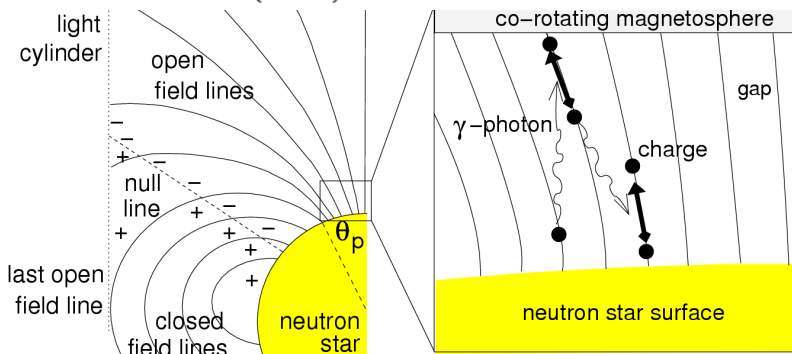
$$\vec{E} = -\nabla\Phi$$

$$\rho_{eff} \simeq \frac{\vec{\Omega} \cdot \vec{B}}{2\pi c}$$

$$\rho \simeq -\frac{\vec{\Omega} \cdot \vec{B}}{2\pi c}$$

$$\theta_0 \simeq \left(\frac{\Omega R}{c}\right)^{1/2} = 0.83 P^{-1/2} R_6^{1/2} \text{ [град]}$$

$$\theta_0 R \simeq R \left(\frac{\Omega R}{c}\right)^{1/2} = 145 P^{-1/2} R_6^{3/2} \text{ [M]}$$

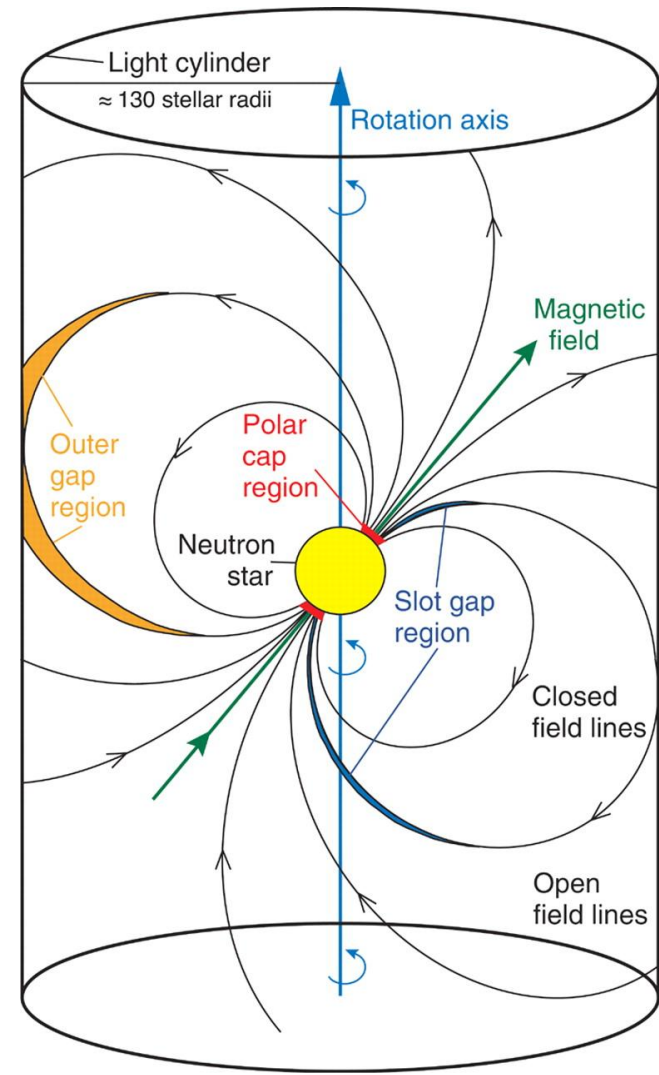
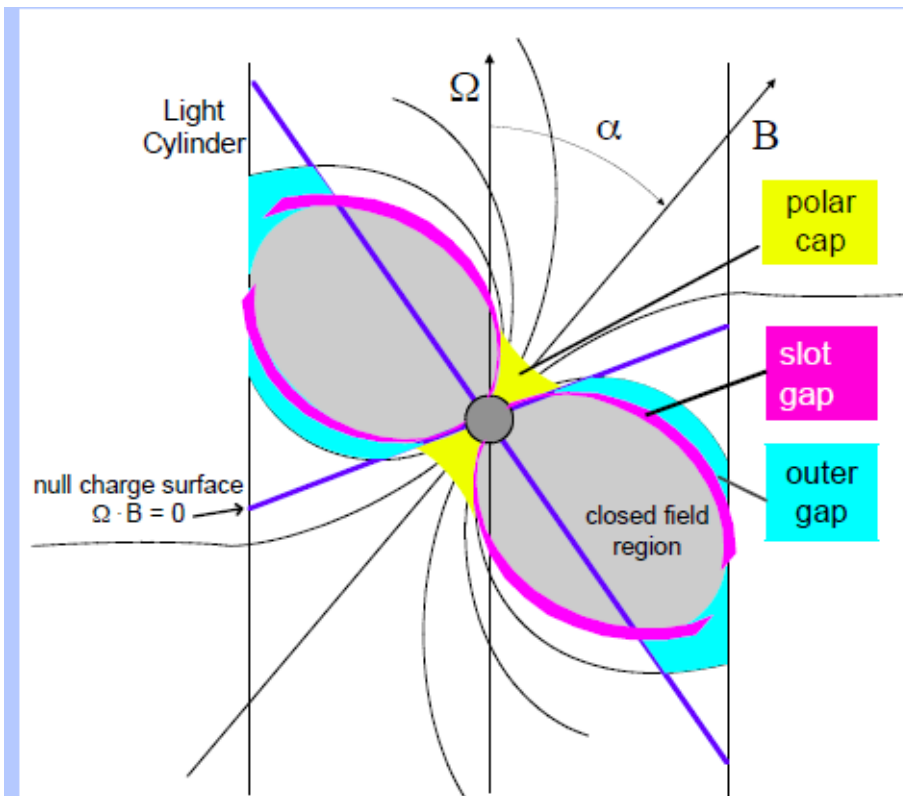


$$R_L = c/\Omega = 4.8 \times 10^4 (P/1s) \text{ km}$$

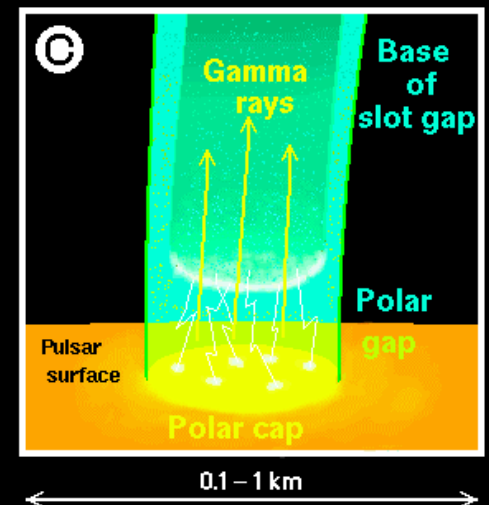
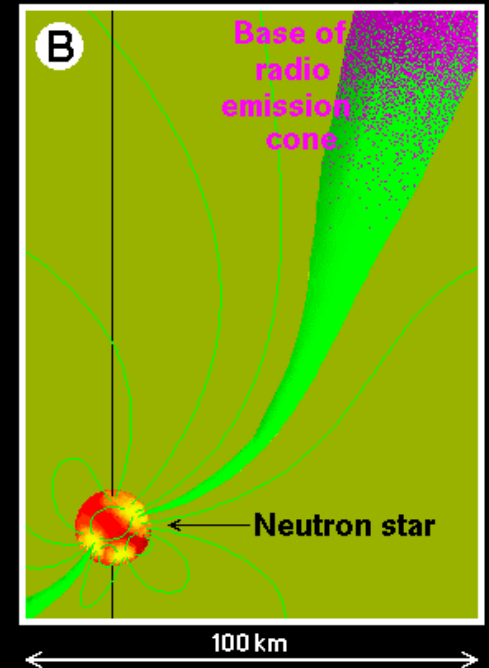
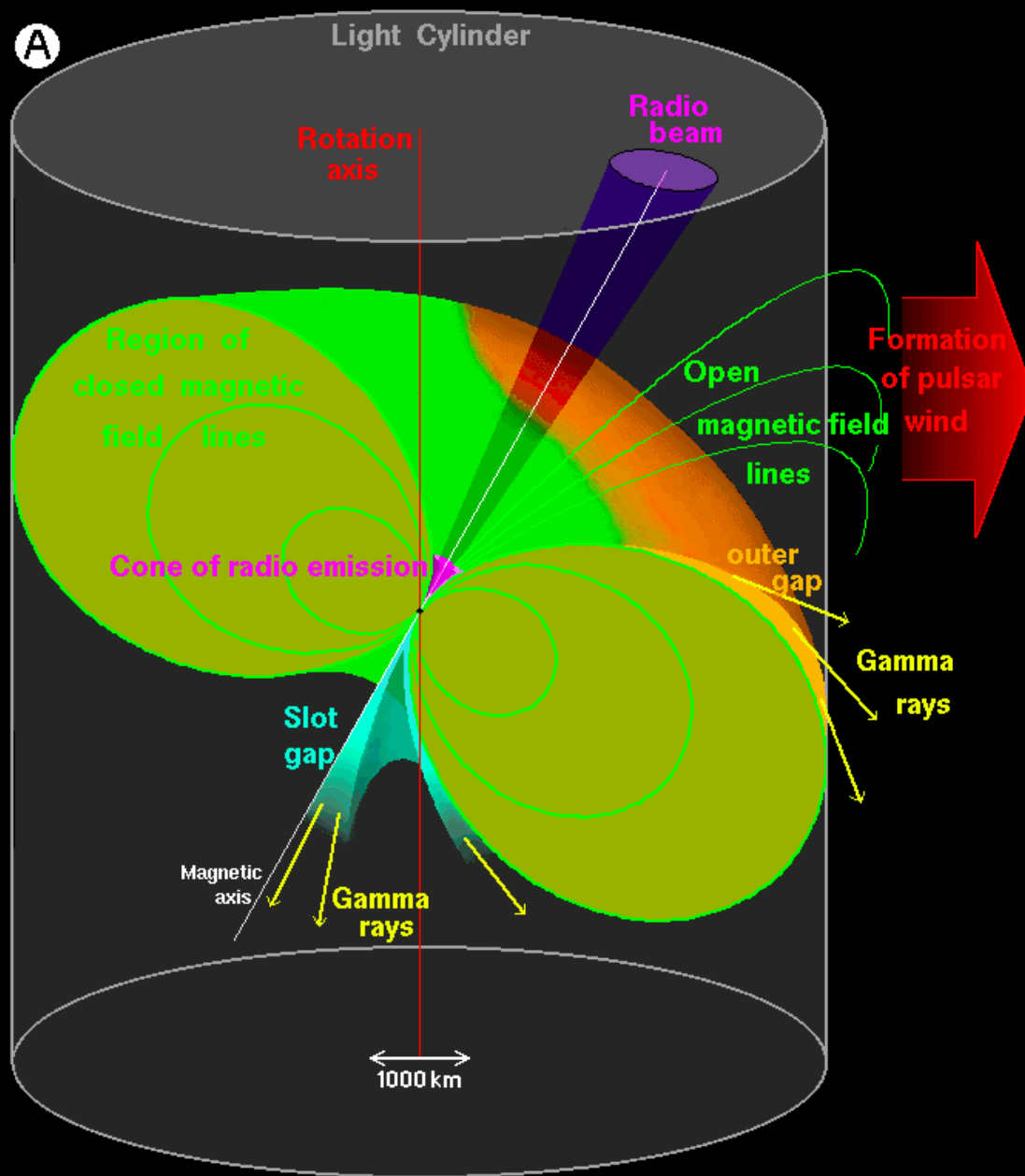
Гамма-пульсары (модели)

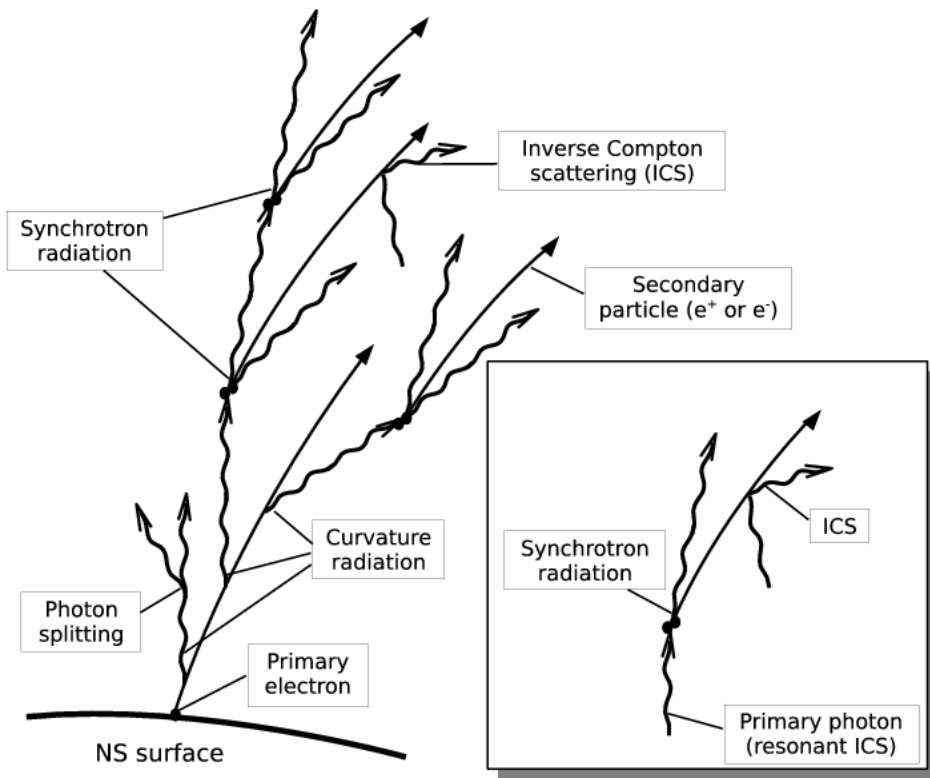
Модели:

- Polar cap
- Outer gap
- Slot gap



$$R_L = c/\Omega = 4.8 \times 10^4 (P/1s) \text{ km}$$

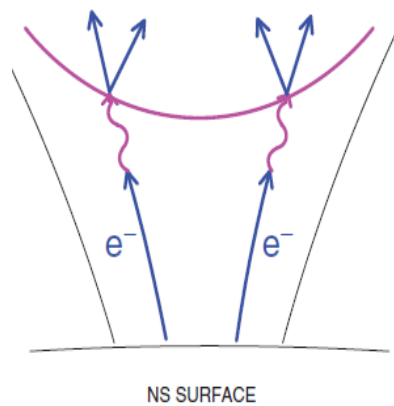




SPACE CHARGE "GAP"

$$T_s > T_{e,i}$$

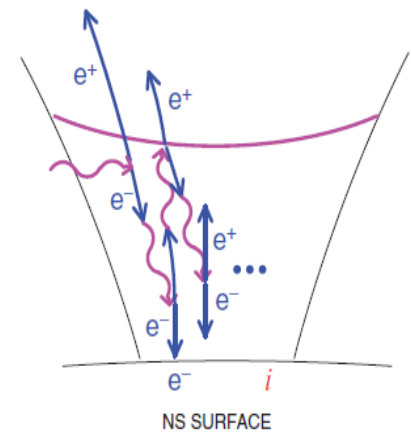
$$\Omega \cdot B > 0$$



VACUUM GAP

$$T_s < T_{e,i}$$

$$\Omega \cdot B < 0$$



Излучение кривизны (curvature radiation)

$$P = \frac{2}{3} \frac{e^2}{c^3} a_\mu a^\mu$$

$$a_\mu a^\mu = \gamma^4 [a^2 + \gamma^2 (\vec{v} \cdot \vec{a})^2 / c^2]$$

$$a = v^2 / R_c, \quad \vec{v} \cdot \vec{a} = 0$$

$$P = \frac{2}{3} \frac{e^2 c}{R_c^2} \gamma^4$$

$$P(\omega) = \frac{\sqrt{3}}{2\pi} \frac{e^2}{R_c} \gamma F(\omega/\omega_c), \quad \omega_c = \frac{3}{2} \frac{c}{R_c} \gamma^3 \quad \left(\frac{\hbar \omega_c}{mc^2} = \frac{3}{2} \frac{\lambda_c}{R_c} \gamma^3 \simeq 5.8 \frac{\gamma_6^3}{R_{c,7}} \right)$$

$$P = \frac{2}{3} r_e^2 c \beta^2 \sin^2 \alpha \gamma^2 B^2 = 2 \sigma_T c \beta^2 \sin^2 \alpha \gamma^2 U_B \quad - \text{ для синхротронного излучения}$$

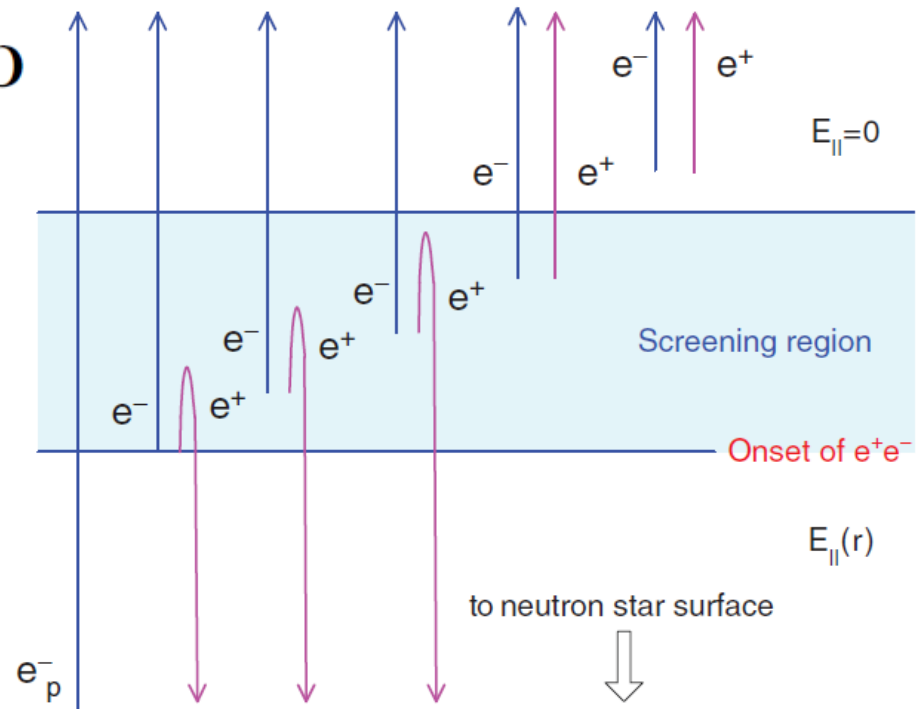
$$P(\omega) = \frac{\sqrt{3}}{2\pi} \frac{e^3 B}{mc^2} \sin \alpha F(\omega/\omega_c) \quad \frac{\hbar \omega_c}{mc^2} = \frac{3}{2} \gamma^2 \frac{B}{B_c} \sin \alpha$$

Рождение $e^- e^+$ пар

$$\gamma_e \sim 10^6 - 10^7$$

$$\hbar\omega \sin \delta \geq 2mc^2$$

$$\gamma + B \rightarrow e^- + e^+ + B$$



$$\zeta = \frac{\hbar\omega}{2mc^2} \frac{B \sin \delta}{B_c}, \quad B_c = \frac{m^2 c^3}{e\hbar} = 4.4 \times 10^{13} \text{ Гс}$$

Высота PFF (pair formation front):
0.02 – 0.1 R

Коэффициент умножения:

$$M_{e^-e^+} = N_{e^-e^+}/N_{e,p} \simeq 10^3 - 10^4$$

Polar cap

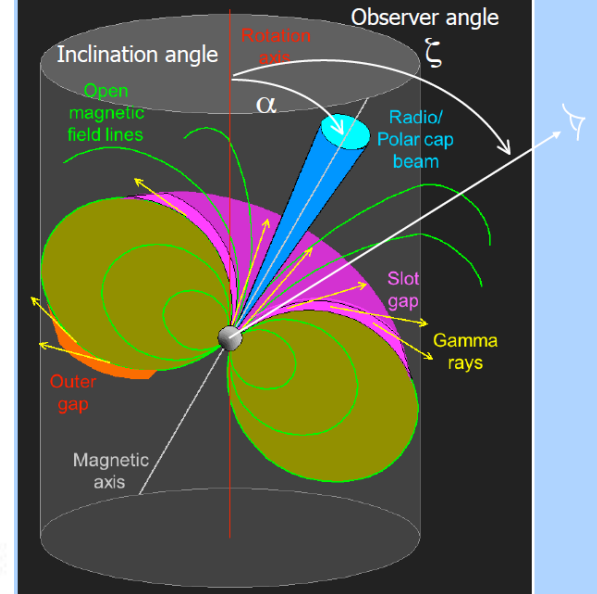
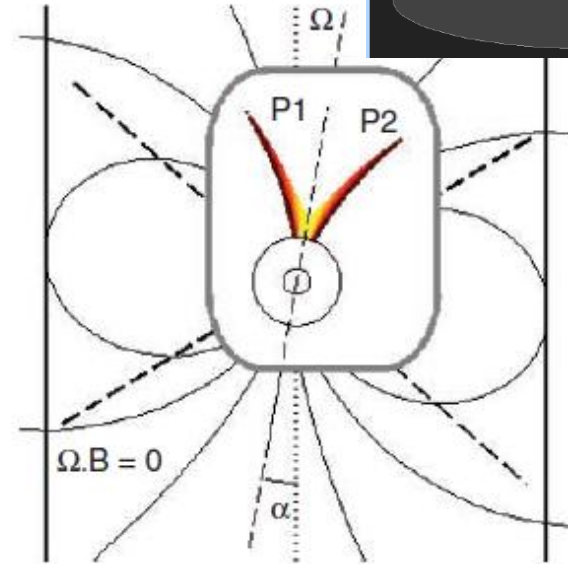
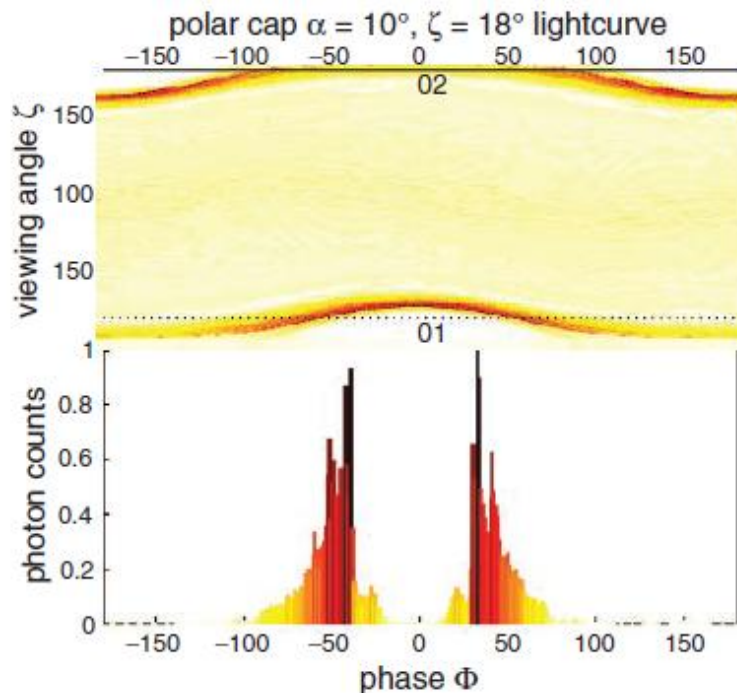
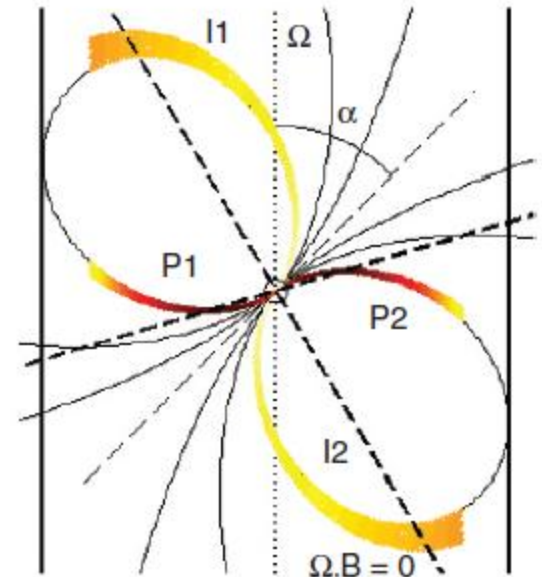
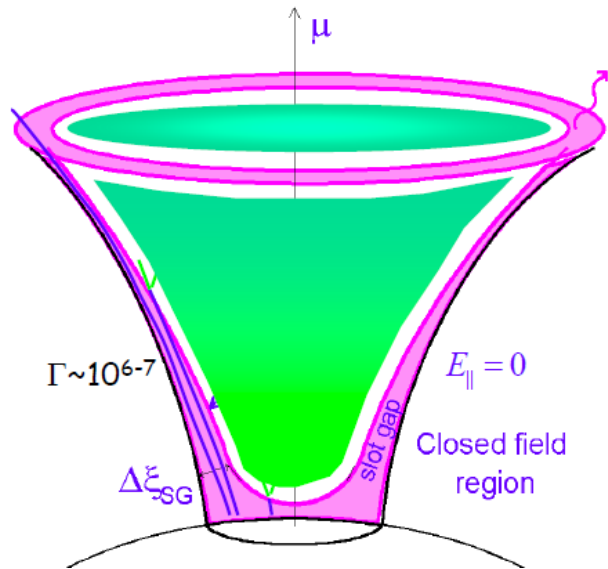


Fig. 19.5 Phase plot, sample lightcurve, and a sketch of the accelerator location for the polar cap model, for a typical inclination angle $\alpha = 10^\circ$. The central zoom gives the gap extent relative to the star size. The dashed lines outline the null surface. The shading in the lightcurve and gap sketch is the same. The phase plot illustrates the change in lightcurve as seen by different observers and the aperture of the pulsed beams (from [26])

Slot gap



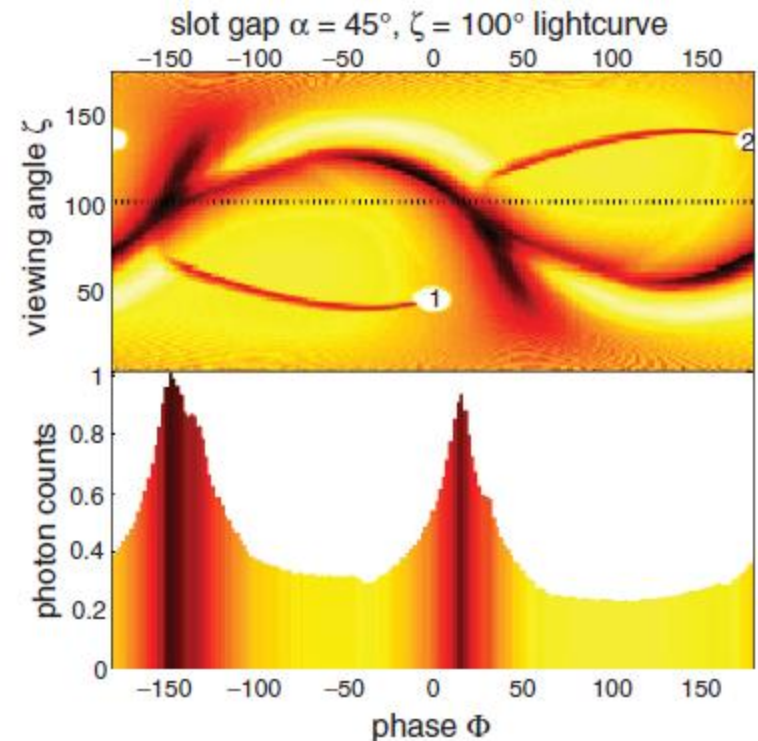
- Ширина щелевого зазора зависит от $\Lambda \equiv P B_{0,12}^{-4/7}$

$$\Delta \xi_{SG} \simeq \begin{cases} 4\Lambda, & \Lambda < 0.075 \\ 0.3, & \Lambda > 0.075 \end{cases} \quad \xi \equiv \theta / \theta_{PC}$$

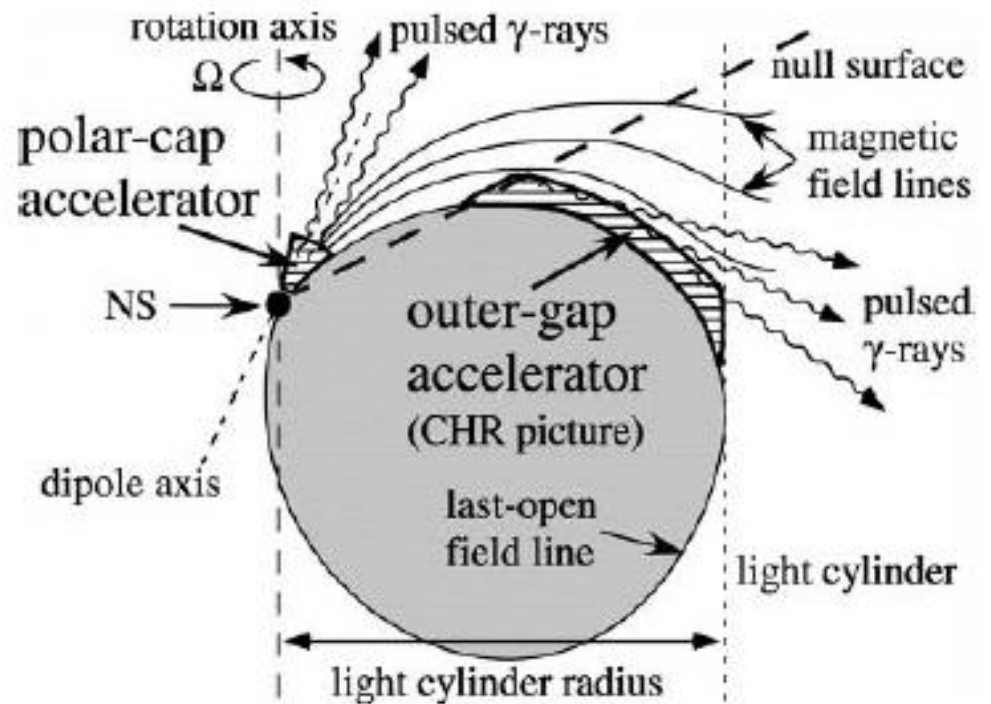
$$\gamma_{SG} \simeq 3 - 4 \times 10^7$$

ограничен потерями на излучение кривизны

$$M_{e^-e^+} = N_{e^-e^+} / N_{e,p} \sim 10^4 - 10^5$$

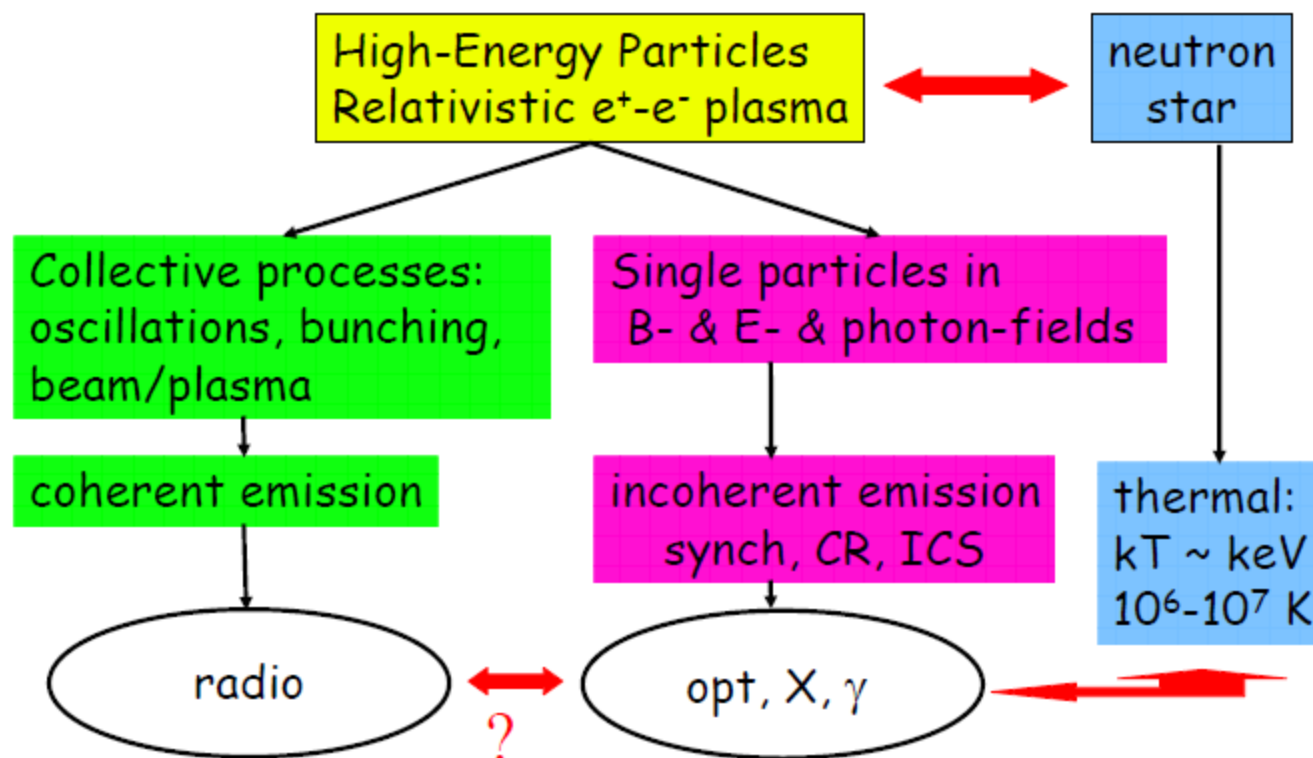


Outer gap



Излучение высоких энергий

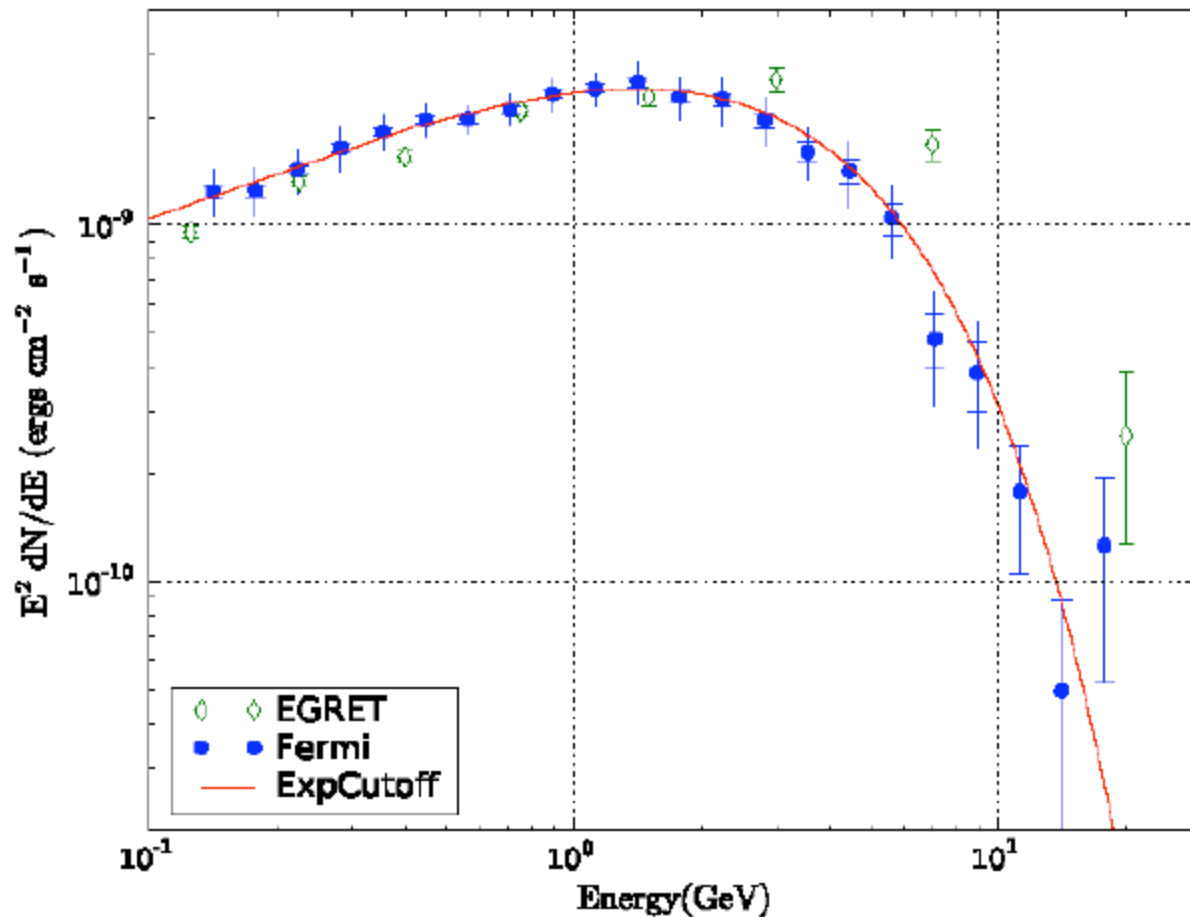
- Излучение кривизны
- Обратное комптоновское рассеяние (резонансное и нерезонансное)
- Синхротронное излучение вторичных частиц (<100 МэВ)



Наблюдения

- Большинство профилей гамма-пульсаров имеют два пика с разницей по фазе 0.2-0.5
- Положение гамма-пиков не совпадает с положением радиопиков
- Спектры степенные с экспоненциальным завалом в области 1-6 ГэВ
- Сильное магнитное поле на световом цилиндре (и для молодых и для MSPs)
- Большая эффективность перевода потерь энергии вращения в гамма-излучение $L_\gamma/(dE/dt) > \sim 10 \%$
- Основная энергия излучается именно в гамма-диапазоне

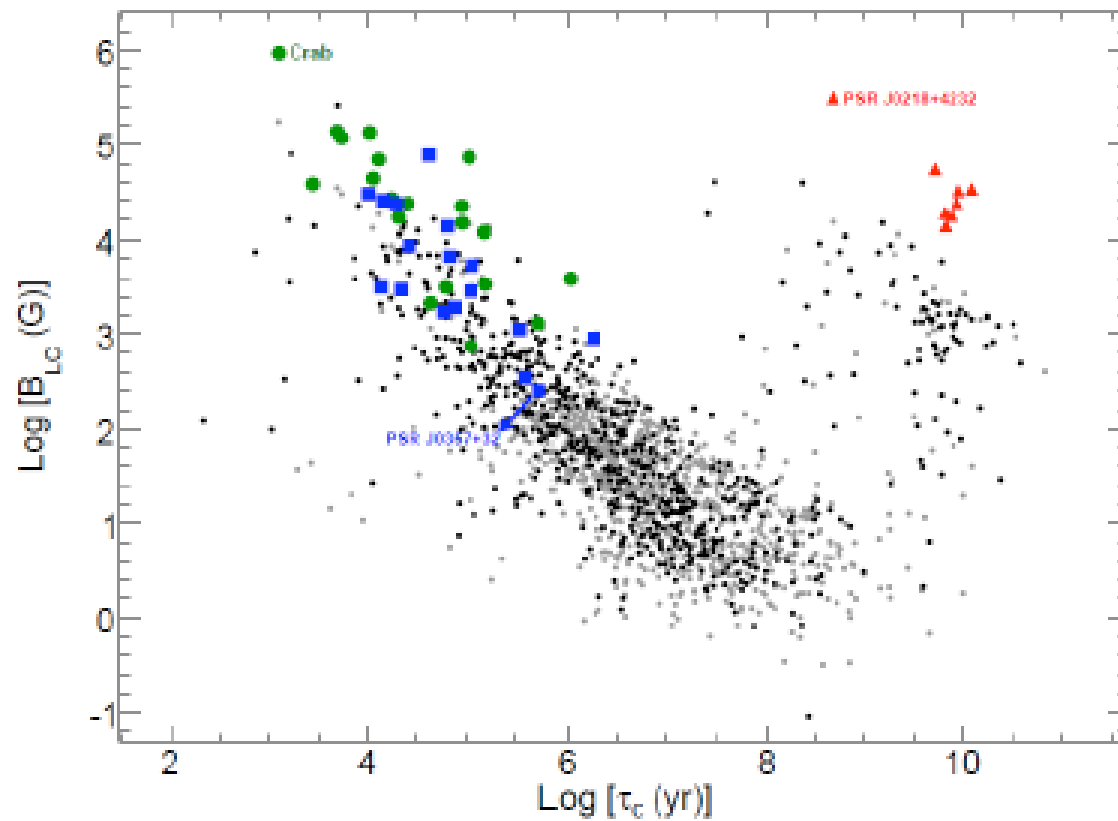
Vela спектр (усредненный по фазе)



Consistent with simple exponential

Not consistent with sharp pair production cutoff

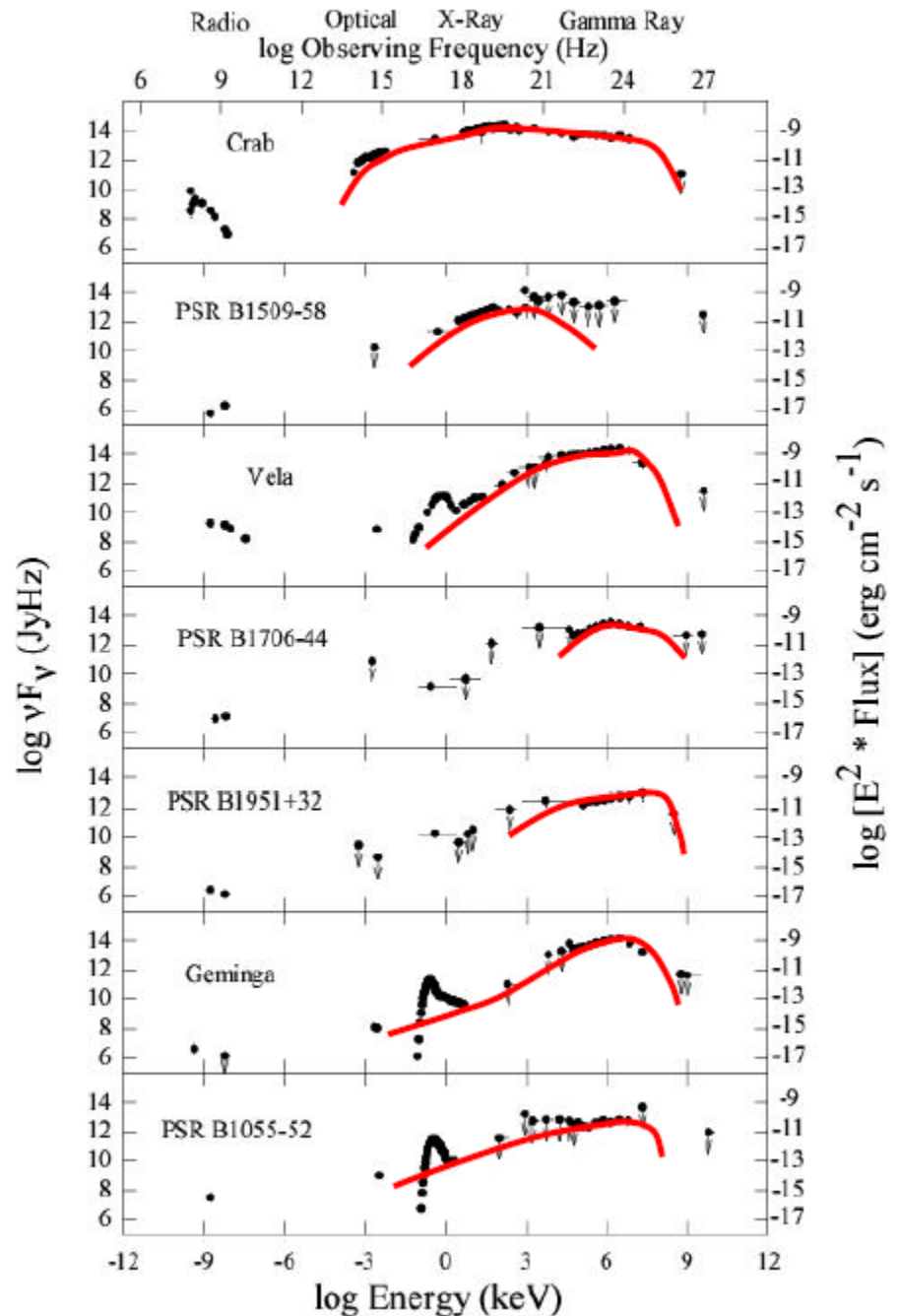
No evidence for magnetic pair attenuation:
Near-surface emission ruled out



B_{LC} vs. characteristic age for the catalog PSRs

Multi- λ Spectra of γ -ray Pulsars (pulsed emission)

- Maximum of Emission in the hard X- and γ -ray range
- High energy spectral cut-off
- Distinct spectral components



Заключение

- Завал в спектре в районе ГэВ – следовательно нет поглощения и распада фотона, т.е. излучение идет с больших высот – из внешней магнитосферы (OG, SG)
- Излучение кривизны от постоянно ускоряющихся частиц
- Ни одна из моделей не может объяснить всю феноменологию пульсаров Ферми, хотя OG и SG лучше описывают совокупность данных
- РС – узкий конус, возможно объясняет небольшое число пульсаров (aligned MPs)
- Излучение за световым цилиндром?

Галактические дискретные источники
гамма-излучения.

II Остатки сверхновых (SNRs).

Вспышки сверхновых

Общие сведения:

- 2 основных типа: I – отсутствуют линии водорода, II – наблюдаются линии водорода
- Более подробная классификация – на основе кривых блеска и спектров.
- Физическая классификация: коллапс ядра ($M > \sim 8 M_{\text{Sun}}$: Ib/c, II), термоядерный взрыв белого карлика (Ia)

Сверхновые – спектры и кривые блеска

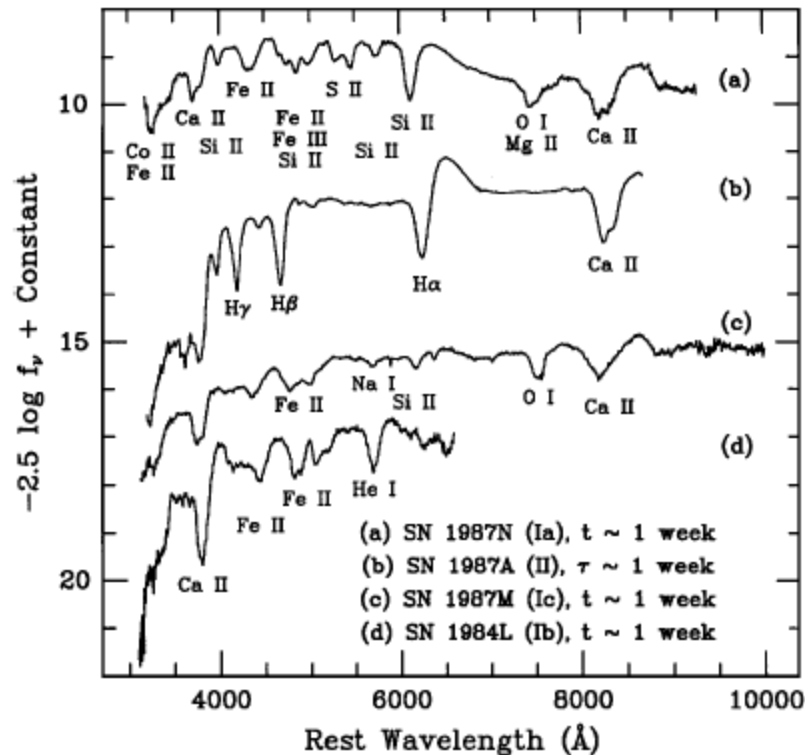


Figure 1 Spectra of SNe, showing early-time distinctions between the four major types and subtypes. The parent galaxies and their redshifts (kilometers per second) are as follows: SN 1987N (NGC 7606; 2171), SN 1987A (LMC; 291), SN 1987M (NGC 2715; 1339), and SN 1984L (NGC 991; 1532). In this review, the variables t and τ represent time after observed B-band maximum and time after core collapse, respectively. The ordinate units are essentially “AB magnitudes” as defined by Oke & Gunn (1983).

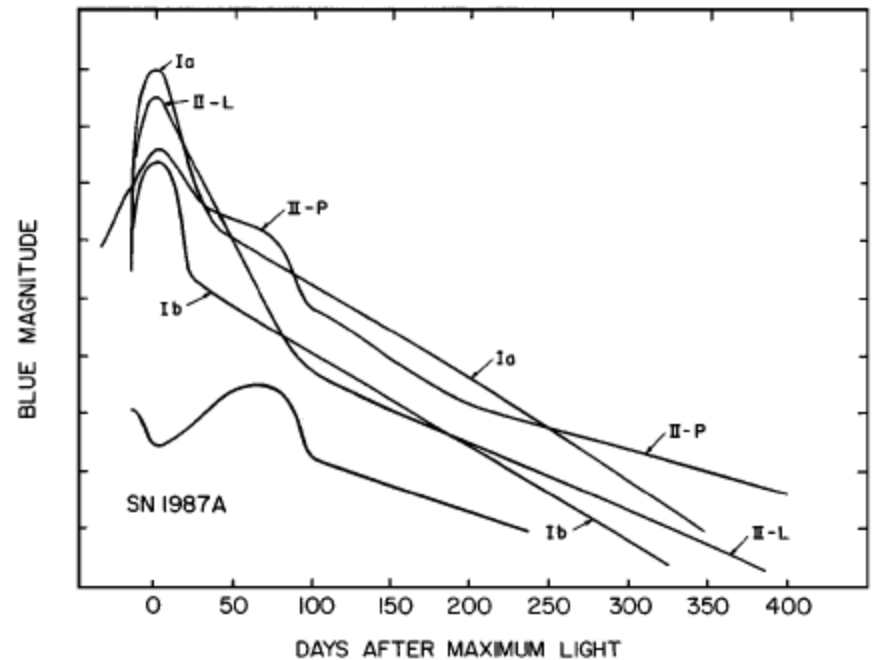
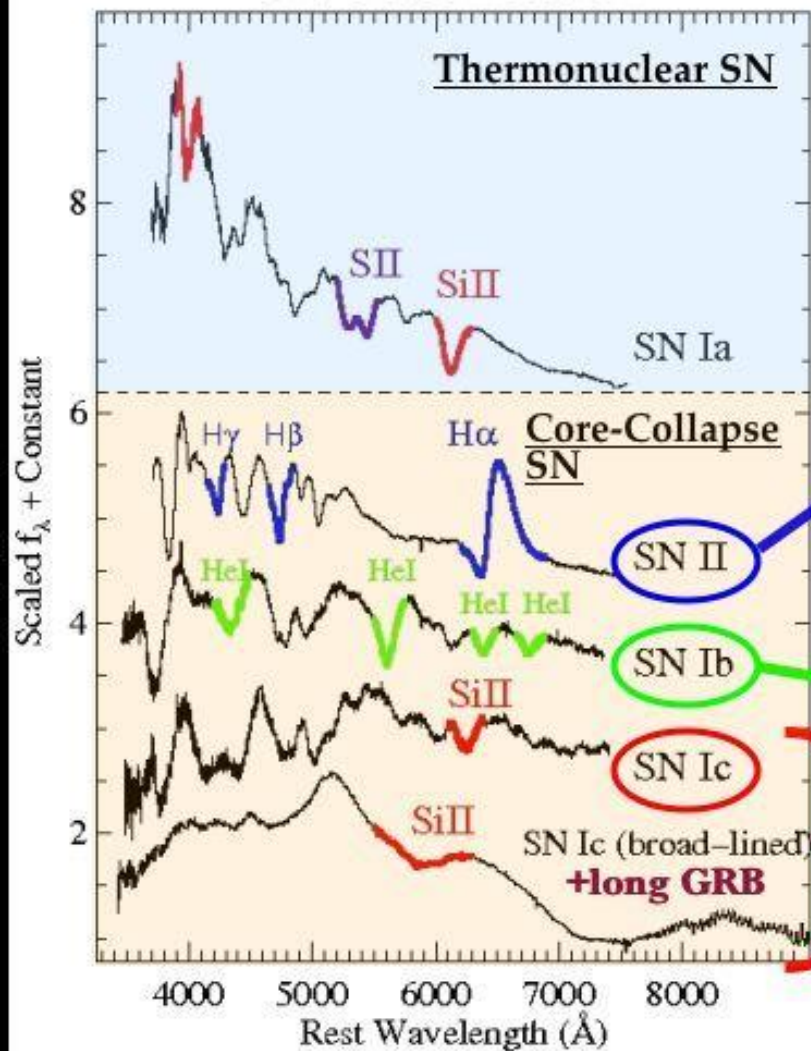


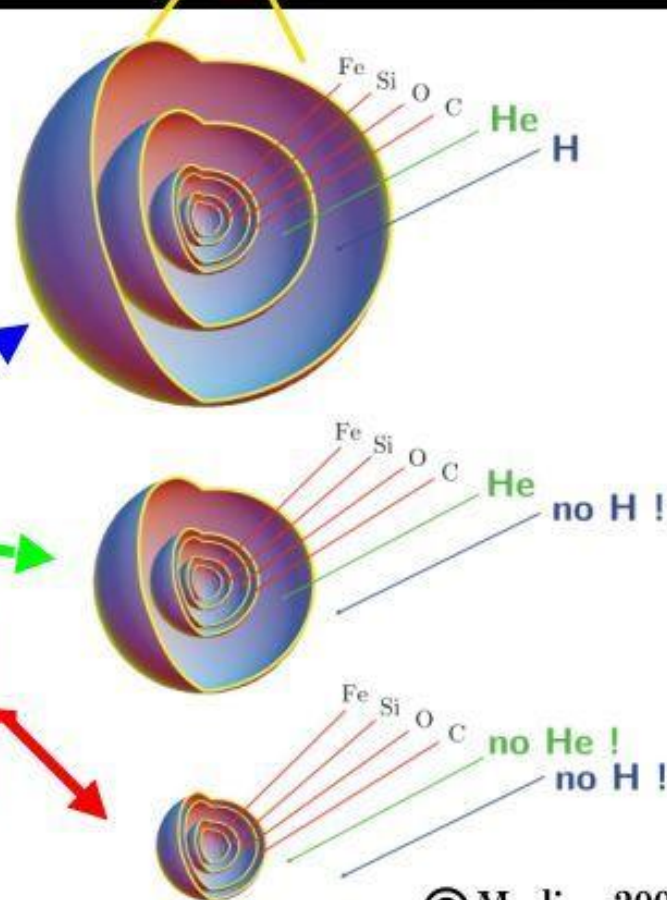
Figure 3 Schematic light curves for SNe of Types Ia, Ib, II-L, II-P, and SN 1987A. The curve for SNe Ib includes SNe Ic as well, and represents an average. For SNe II-L, SNe 1979C and 1980K are used, but these might be unusually luminous. From Wheeler 1990; reproduced with permission.

SN Classification



Pre-Explosion Star

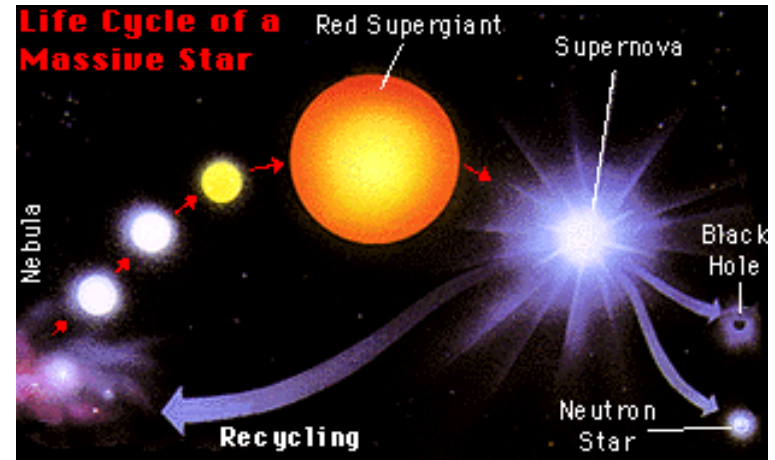
$>10 M_{\odot}$



© Modjaz 2008

SN II, Ib/c - коллапс ядра массивной звезды

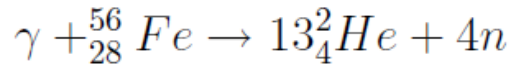
- Коллапс железного ядра (фотодиссоциация+нейтронизация)
- Практически мгновенное энергосвыделение $E \sim 10^{51}$ эрг в объеме $R \sim 10^{14}$ см (при этом еще $3-5 \times 10^{53}$ эрг уносится нейтрино)
- Энергия переходит в кин. и тепловую энергию расширяющейся оболочки $V \sim 3000-30000$ км/с. Нагрев и ускорение оболочки ударной волной.
- Источник энергии свечения оболочки (звезда увеличивает блеск на 9-10 порядков) для СН типа II – рекомбинация водорода ($\sim 10^{47}$ эрг) и радиоактивный распад $^{56}\text{Ni}(Z=28) \rightarrow ^{56}\text{Co}(Z=27) \rightarrow ^{56}\text{Fe}(Z=26)$



Потеря устойчивости

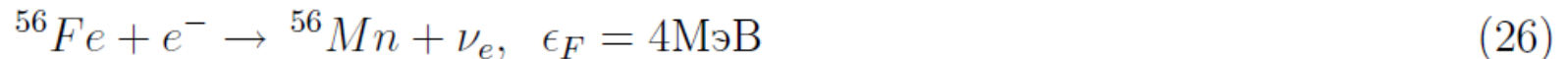
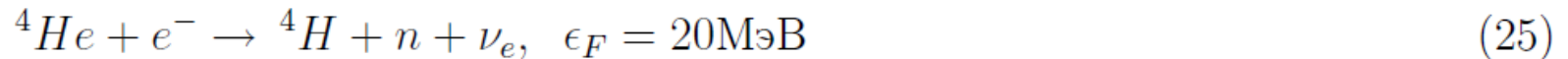
$$\rho \sim 3 \times 10^9 \text{ [г/см}^3\text{]} \quad T \sim 8 \times 10^9 K (\sim 0.7 \text{ [МэВ]})$$

Фотодиссоциация



Нейтронизация

Электроны становятся вырожденными ($\rho > 10^6 \text{ г/см}^3$). Начиная с некоторой пороговой энергии ϵ_F становятся возможны процессы нейтронизации:



$$\langle E_\nu \rangle \sim \langle E_{e^-} \rangle \sim \epsilon_F \simeq 51.6 (Y_e \rho_{12})^{1/3} \text{ МэВ}, \quad Y_e = n_e/n_b \quad (27)$$

Y_e уменьшается и уменьшается эффективный показатель адиабаты $\gamma = d \log P / d \log \rho$ с $5/3$ до $4/3$.

Радиоактивный распад ^{56}Ni

$$L(t)_{Ni} \simeq 10^{43} (M_{Ni}/0.1 M_{\odot}) \exp(-t/\tau_{Ni}) \quad [\text{эрг/с}] \quad \tau_{Ni} \simeq 7.6 \times 10^5 \quad [\text{с}] (\simeq 8.8 [\text{дней}])$$

Далее радиоактивный распад ^{56}Co с $\tau \sim 100$ дней.

Полный запас энергии в радиоактивном распаде порядка больше энергии рекомбинации.

Полная излученная энергия составляет проценты от энергии взрыва (т.е. $\sim 10^{49}$ эрг).

SN Ia

- Белый карлик (O-C) $M \sim M_{\text{Sun}}$
 $R \sim R_{\text{Earth}}$
- Аккреция в двойной системе или слияние двух WDs
- $M > M_{\text{Ch}} (=1.4M_{\text{Sun}})$ – потеря устойчивости, термоядерный взрыв

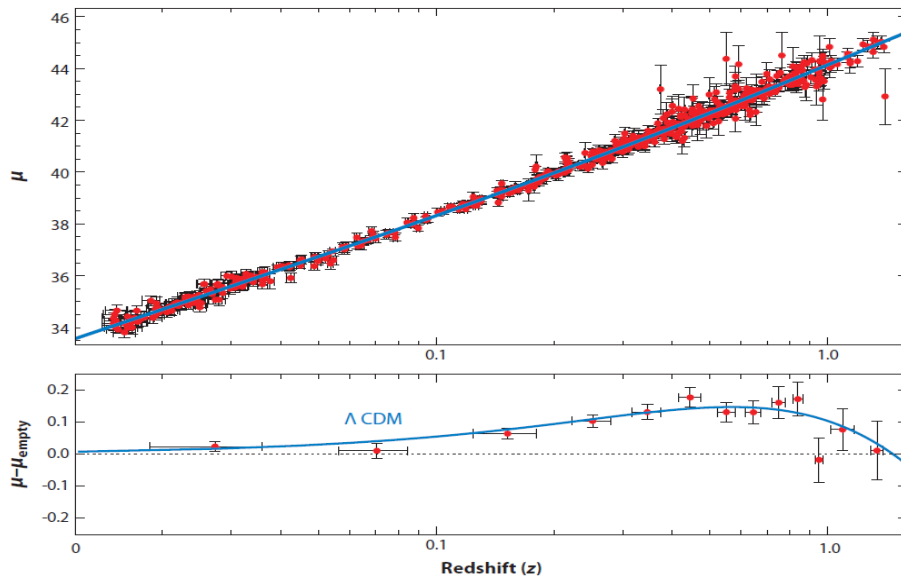
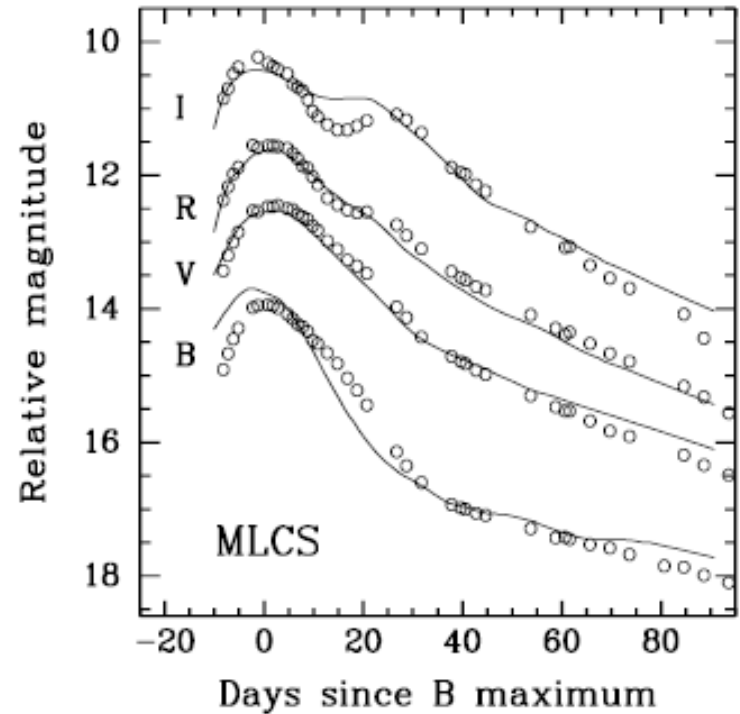


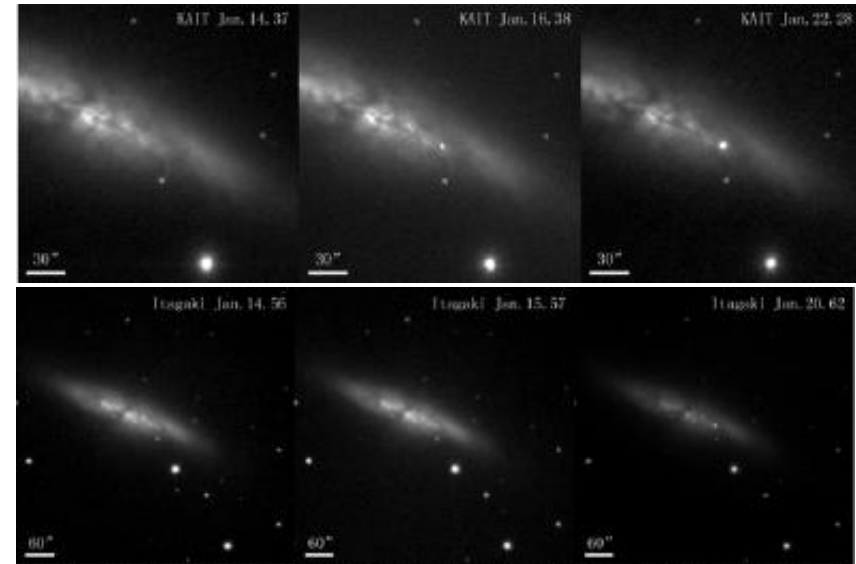
Figure 3

The Hubble diagram of Type Ia supernovae (SNe Ia), which correlates distance modulus (μ) versus redshift (z). The Union2 compilation (69) represents the currently largest SNe Ia sample. The linear expansion in the local universe can be traced out to $z < 0.1$. The Hubble constant sets the absolute level of the data, but it is irrelevant for the determination of Ω_{Λ} , which is a relative measurement (*bottom panel*). The distance relative to an empty universe model (μ_{empty} ; $\Omega_M = \Omega_{\Lambda} = 0$) is shown at bottom, where the data are binned for clarity. The blue curve shows the best-fit Λ CDM (cold dark matter) model ($\Omega_M = 0.3$; $\Omega_{\Lambda} = 0.7$).



SN Ia 2014J в M82 ($d \approx 3.5$ Мпк)

- 21 января 2014 г. (Stephen J. Fossey и его студенты - 0.35 м телескоп, университет Лондонской обсерватории)
- На сегодня **17,628** observations for **SN 2014J** from **227** observers!!!
- Через ~50 дней гамма-спектрометром SPI обсерватории ИНТЕГРАЛ зарегистрирована линия 847 кэВ (распад ^{56}Co) (впервые в истории!)
- $M_{\text{Ni}} \sim 0.7 M_{\text{Sun}}$



Остатки сверхновых

- Несколько M_{Sun}
- $E \sim 10^{51}$ эрг
- Расширяется со сверхзвуковой скоростью
- Ударные волны взаимодействуют с околозвездной и межзвездной средой
- Замедление в течении десятков тысяч лет
- Каталог Галактических остатков сверхновых ~ 200 SNRs.
Идентифицируются по радиоизлучению

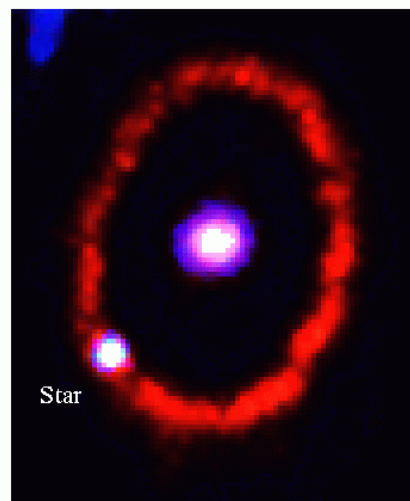
- Две ударные волны – внешняя и обратная (разогревает газ остатка)

Стадии:

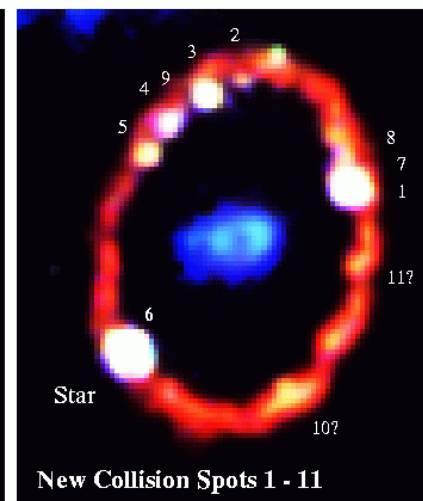
- Свободный разлет $R(t) \sim t$. Заканчивается при «сгребании» массы, примерно равной массе расширяющейся оболочки (~ 100 лет, 2 кпк) SN 1987A
- Адиабатическое расширение – радиационные потери не влияют на динамику, кин. энергия расходуется на нагрев газа фронтом сильной УВ и на ускорение сгребаемого межзвездного газа.
- T падает, становятся важными процессы радиативного охлаждения. Стадия снегоочистителя (“snow-plow”) $T < 6 \times 10^5$ К. УВ сгребает газ и передает ему свой импульс $R \sim t^{2/7}$

SN 1987A

HST/WFPC2 May 1995



HST/WFPC2 Nov 2000



$$R(t) \simeq 0.31 \left(\frac{E_{51}}{n} \right)^{1/5} t_{years}^{2/5} \text{ [пк]}$$

Остатки сверхновых

Источники Галактических космических лучей (ГКЛ):

- $\sim 10^{50}$ эрг в энергии протонов КЛ
- Наклон степени 2.0.-2.3
- Макс. энергия $\sim$ ПэВ (10^{15} эВ)

Лаборатории для исследования диффузного ускорения в сильных ударных волнах:

- Усиление магнитного поля
- Максимально возможные энергии?

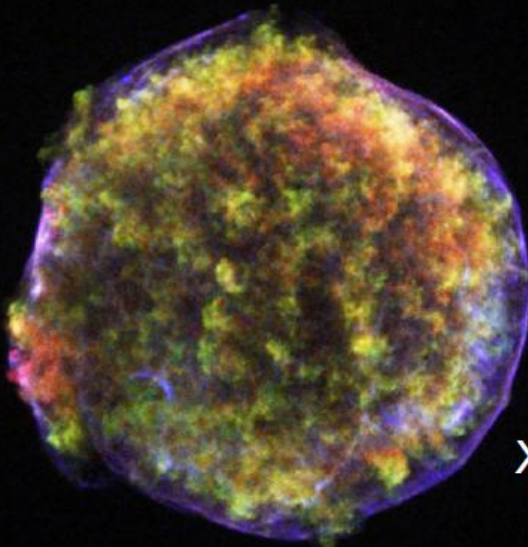
Процессы излучения

- Синхротронное – радио и рентгеновский диапазон
- Обратное комптоновское рассеяние (на СМВ)
- Тормозное излучение
- Распад π^0

Исторические ОЧН (SNRs)

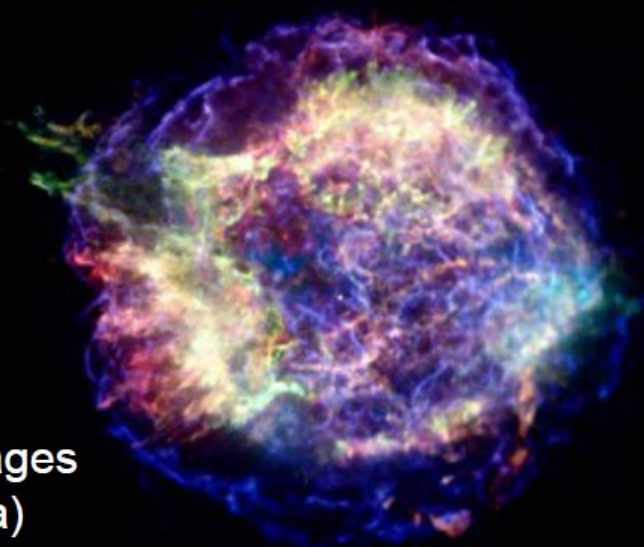
★ Tycho's SNR

- SN 1572
- SN type: Ia
- distance: ~ 3 kpc
- radius: ~ 3.7 pc



★ Cassiopeia A

- SN ~ 1680
- SN type: IIb
- distance: ~ 3.4 kpc
- radius: ~ 2.5 pc

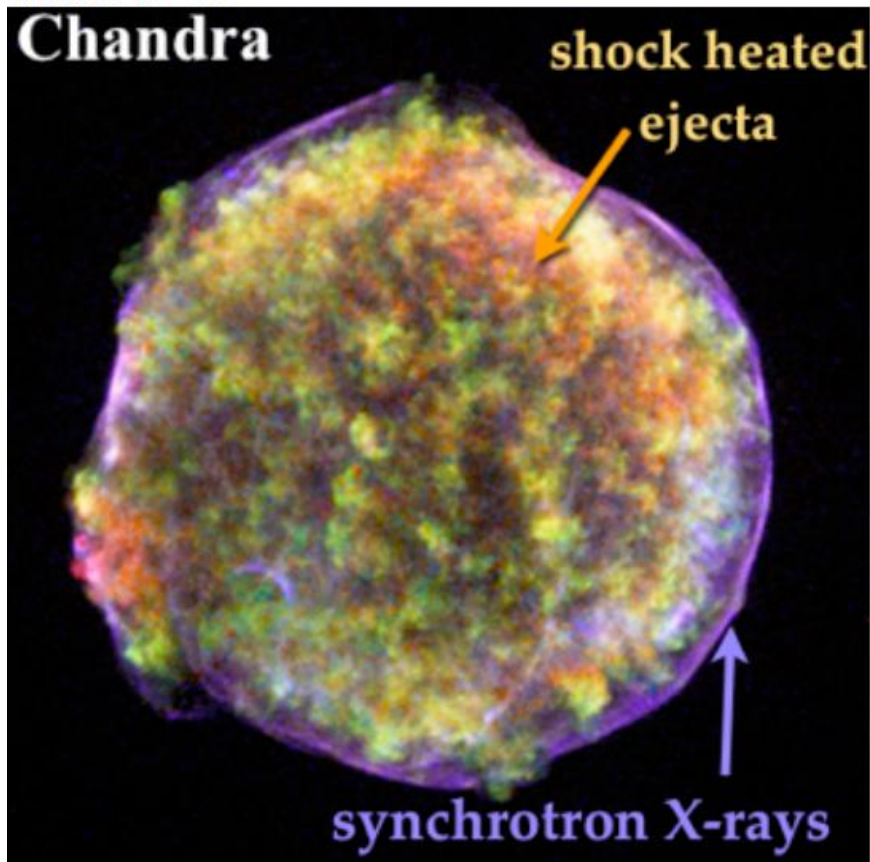


X-ray Images
(Chandra)

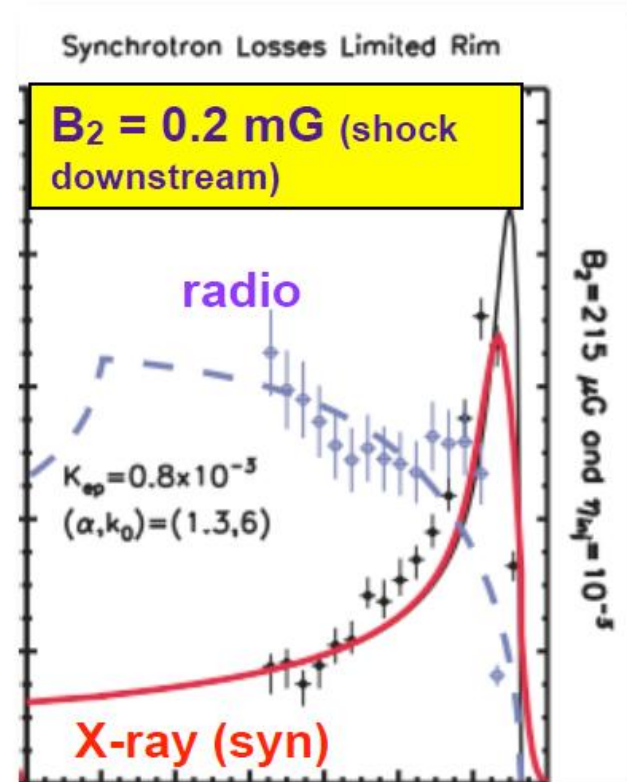
Most parameters are reasonably well known.
→ largely help us interpret gamma-ray results.

Tycho SNR: синхротронное излучение и МП

Warren+05



X-ray/radio radial profile



Cassam-Chenai+07

$B_2 = 0.1\text{-}0.2 \text{ mG}$ is inferred from the width of X-ray filaments