

# Остатки сверхновых

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

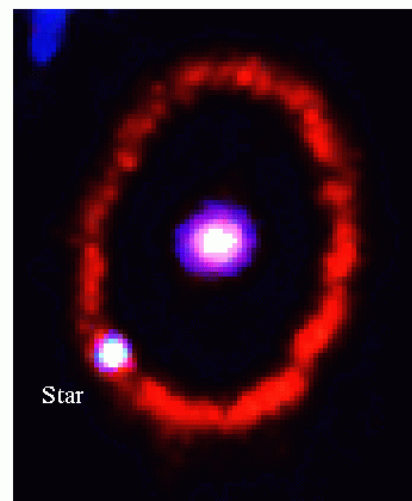
- Две ударные волны – внешняя и обратная (разогревает газ остатка)

Стадии:

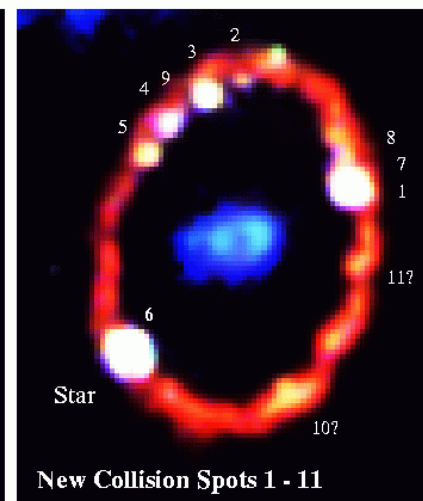
- Свободный разлет  $R(t) \sim t$ . Заканчивается при «сгребании» массы, примерно равной массе расширяющейся оболочки ( $\sim 100$  лет, 2 кпк) SN 1987A
- Адиабатическое расширение – радиационные потери не влияют на динамику, кин. энергия расходуется на нагрев газа фронтом сильной УВ и на ускорение сгребаемого 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
- Макс. энергия до 100 ПэВ ( $10^{17}$  эВ)

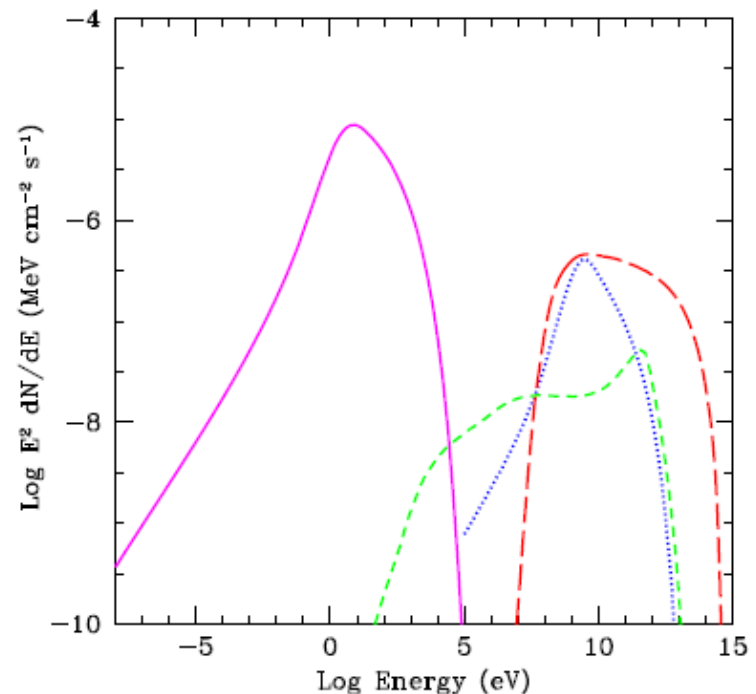
Лаборатории для исследования диффузного ускорения в сильных ударных волнах:

- Усиление магнитного поля
- Максимально возможные энергии?

# Процессы излучения

- Синхротронное – радио и рентгеновский диапазон
- Тормозное излучение нагретого УВ газа ( $T \sim 10^7$  K) – рентгеновский диапазон; нетепловое т. изл. – гамма-диапазон
- Обратное комптоновское рассеяние (на СМВ) – гамма-диапазон
- Адронные процессы - распад  $\pi^0$  – гамма-диапазон

**Fig. 7** Simulated broadband spectrum from SNR undergoing efficient DSA of electrons and protons. The *solid magenta curve* represents synchrotron emission, the *dotted blue curve* is IC emission, the *dashed green curve* corresponds to NTB, and the *long-dashed curve* represents the  $\pi^0$ -day emission

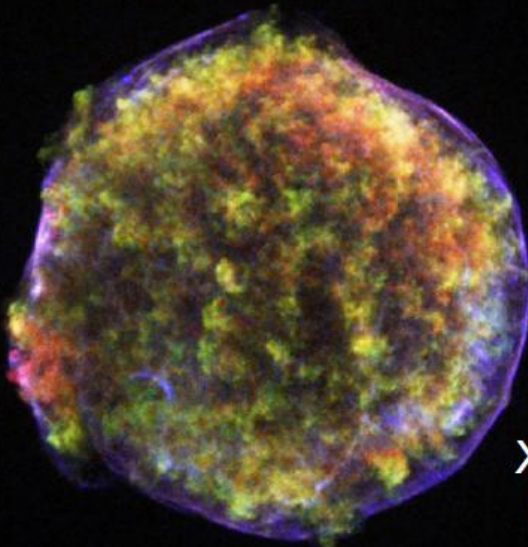


- Всего около 25 SNRs зарегистрировано в гамма-диапазоне
- Исторические SNRs:
  - Tycho
  - Cassiopeia A
- Молодые SNRs, яркие в диапазоне ТэВ:
  - RX J1713.7-3946
  - Vela Jr.
- SNRs, взаимодействующие с молекулярными облаками:
  - W51C, W44, IC443, W28, W49B, W30(G8.7-0.1), СТВ37А, ...
- Прозволюционировавшие SNRs не взаимодействующие с молекулярными облаками:
  - Cygnus Loop, (Puppis A)

# Исторические ОЧН (SNRs)

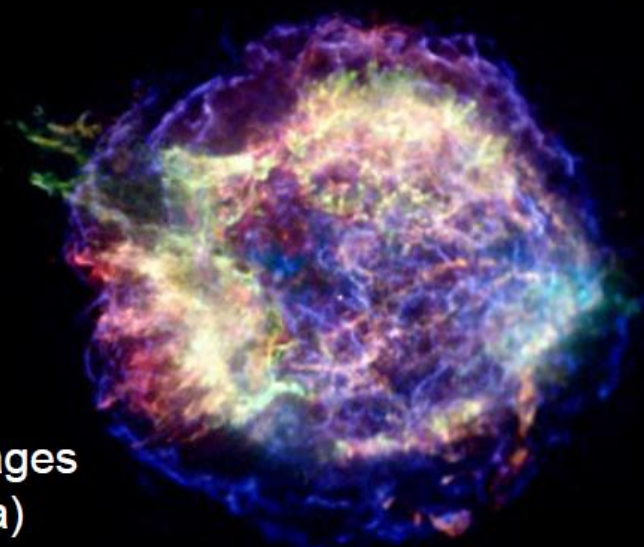
## ★ Tycho's SNR

- SN 1572
- SN type: Ia
- distance:  $\sim 3$  kpc
- radius:  $\sim 3.7$  pc



## ★ Cassiopeia A

- SN  $\sim 1680$
- SN type: IIb
- distance:  $\sim 3.4$  kpc
- radius:  $\sim 2.5$  pc

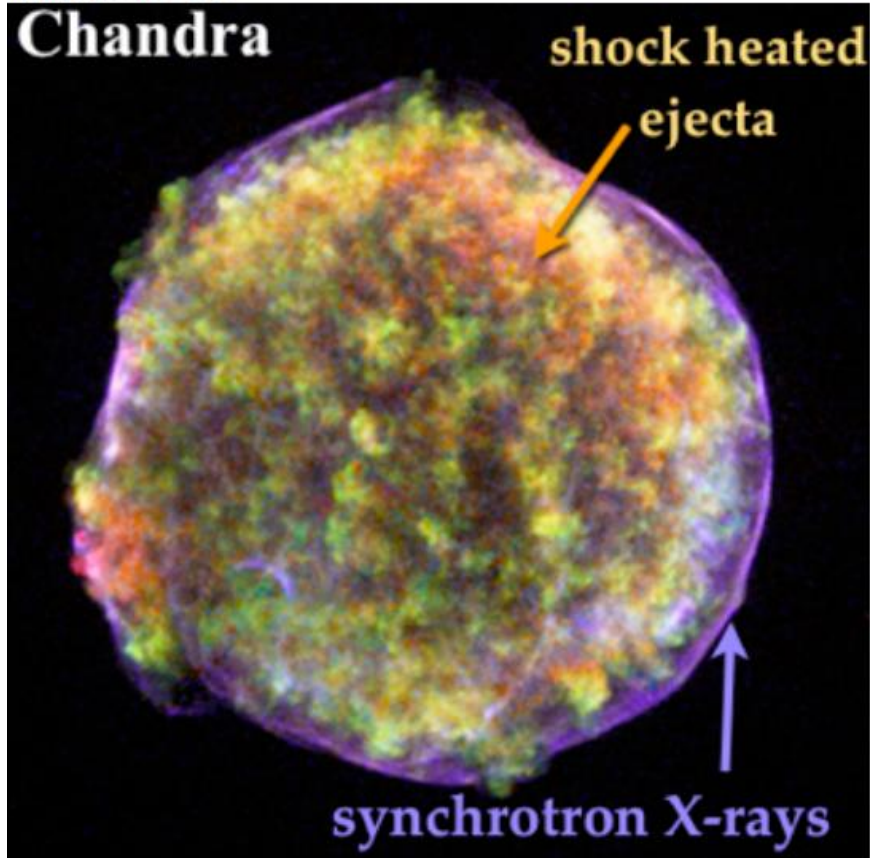


X-ray Images  
(Chandra)

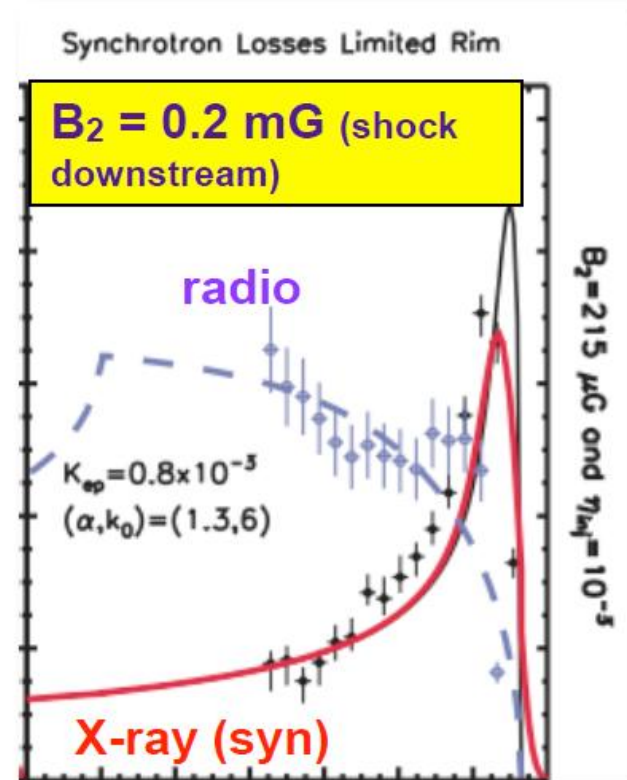
Most parameters are reasonably well known.  
→ largely help us interpret gamma-ray results.

# 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**

# Tycho's SNR

- Радио и рентгеновские данные дают информацию об  $e^-$  - наклон спектра (2.0-2.3), эн. обрезания (6-7 ТэВ) и величине магнитного поля ( $B_d \sim 215$  мкГс)
- Отсутствие рентгеновского теплового излучения дает  $n_H < 0.3 \text{ cm}^{-3}$

**Table 1**  
Parameters Used in the Spectral Energy Modeling Shown in Figure 4

| Case            | $D_{\text{kpc}}$<br>(kpc) | $n_H$<br>( $\text{cm}^{-3}$ ) | $E_{\text{SN}}$<br>( $10^{51}$ erg) | $E_{p,\text{tot}}$<br>( $10^{50}$ erg) | $E_{e,\text{tot}}$<br>(erg) |
|-----------------|---------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------------|-----------------------------|
| Far leptonic    | 3.50                      | 0.24                          | 2.0                                 | -                                      | $1.5 \times 10^{48}$        |
| Far hadronic    | 3.50                      | 0.24                          | 2.0                                 | 1.50                                   | $6.7 \times 10^{46}$        |
| Nearby hadronic | 2.78                      | 0.30                          | 1.0                                 | 0.61                                   | $4.3 \times 10^{46}$        |

Note. Spectral indices have been fixed to 2.3 for both electrons and protons.

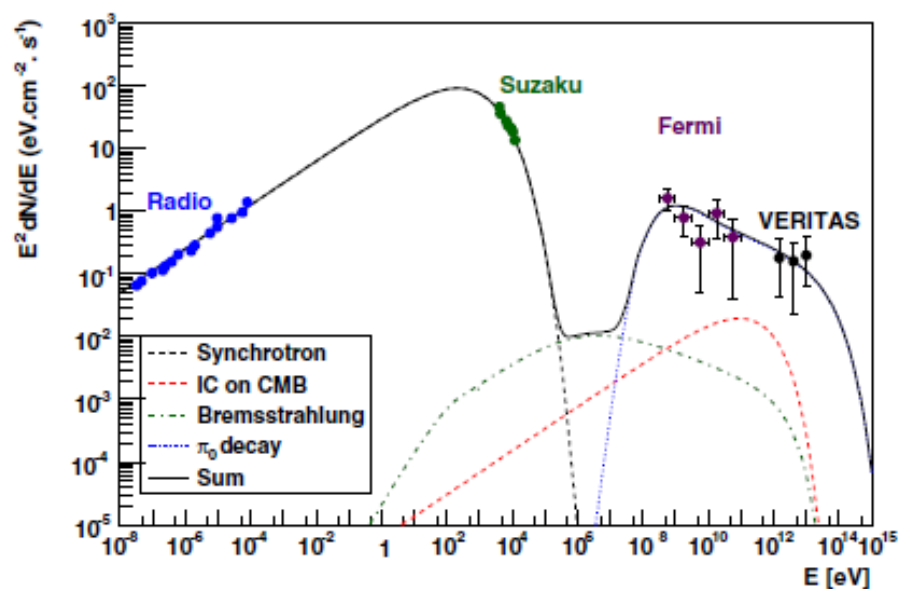
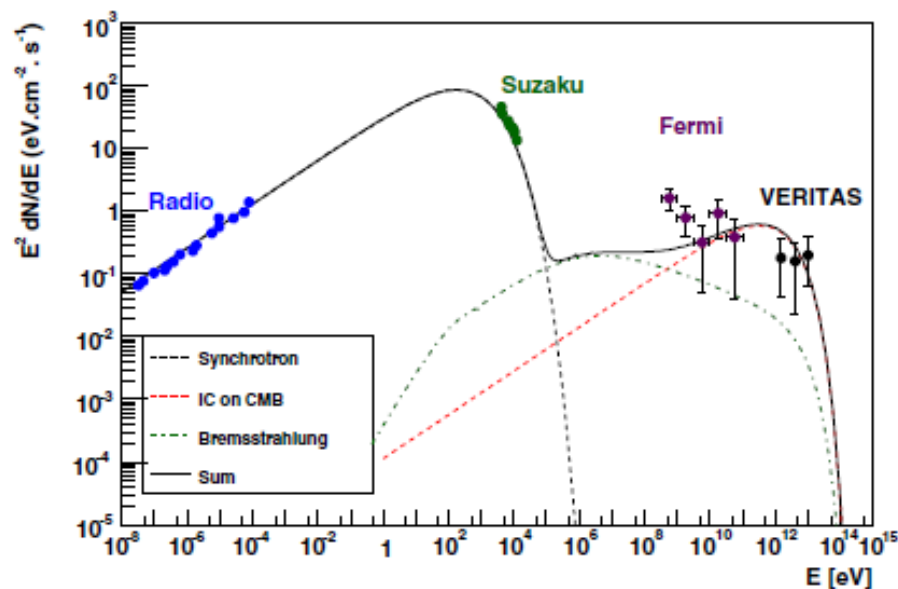
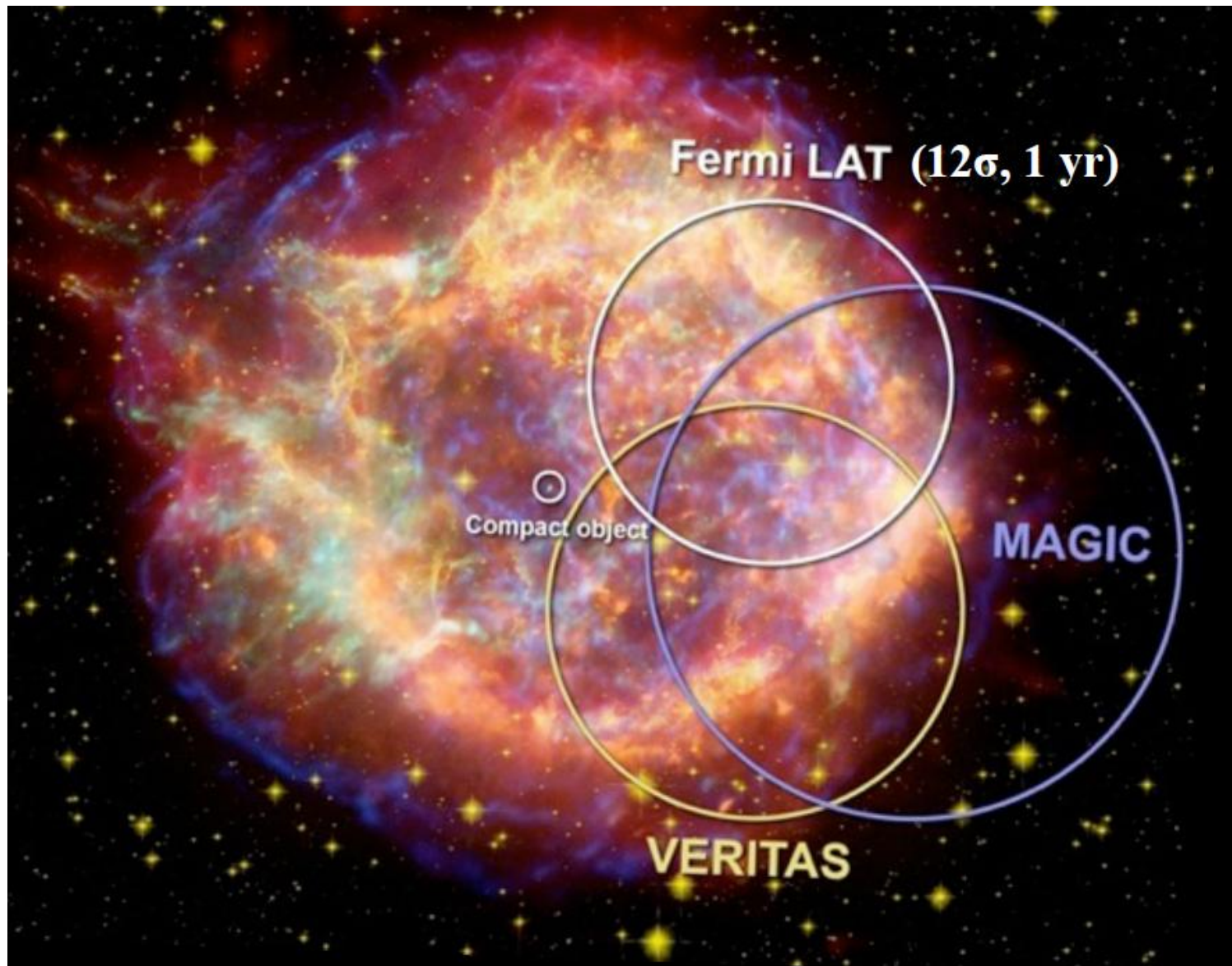


Figure 4. Broadband SED model of Tycho's SNR for the far scenario in leptonic model (left) and hadronic interpretation (right).

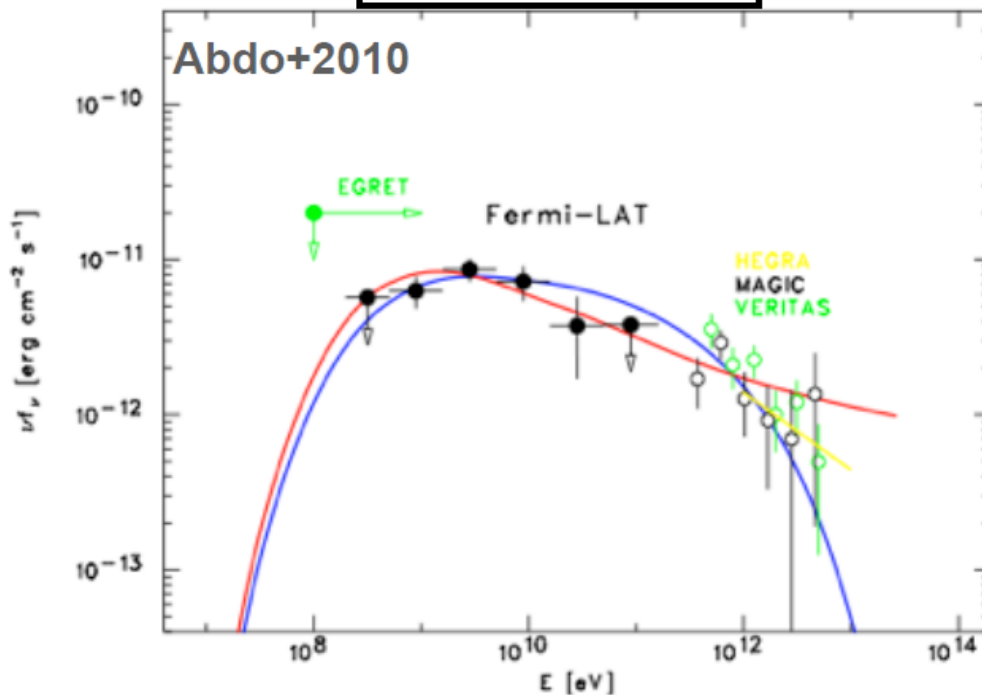
## Cas A: наблюдения в диапазоне ГэВ и ТэВ



# Cas A: гамма-спектр

**$B_2 = 0.3\text{-}0.5$  mG is inferred from the width of X-ray filaments (Vink & Laming 03; Parizot+06) and X-ray time-variability (Uchiyama & Aharonian 08)**

**$\pi^0$ -decay model**



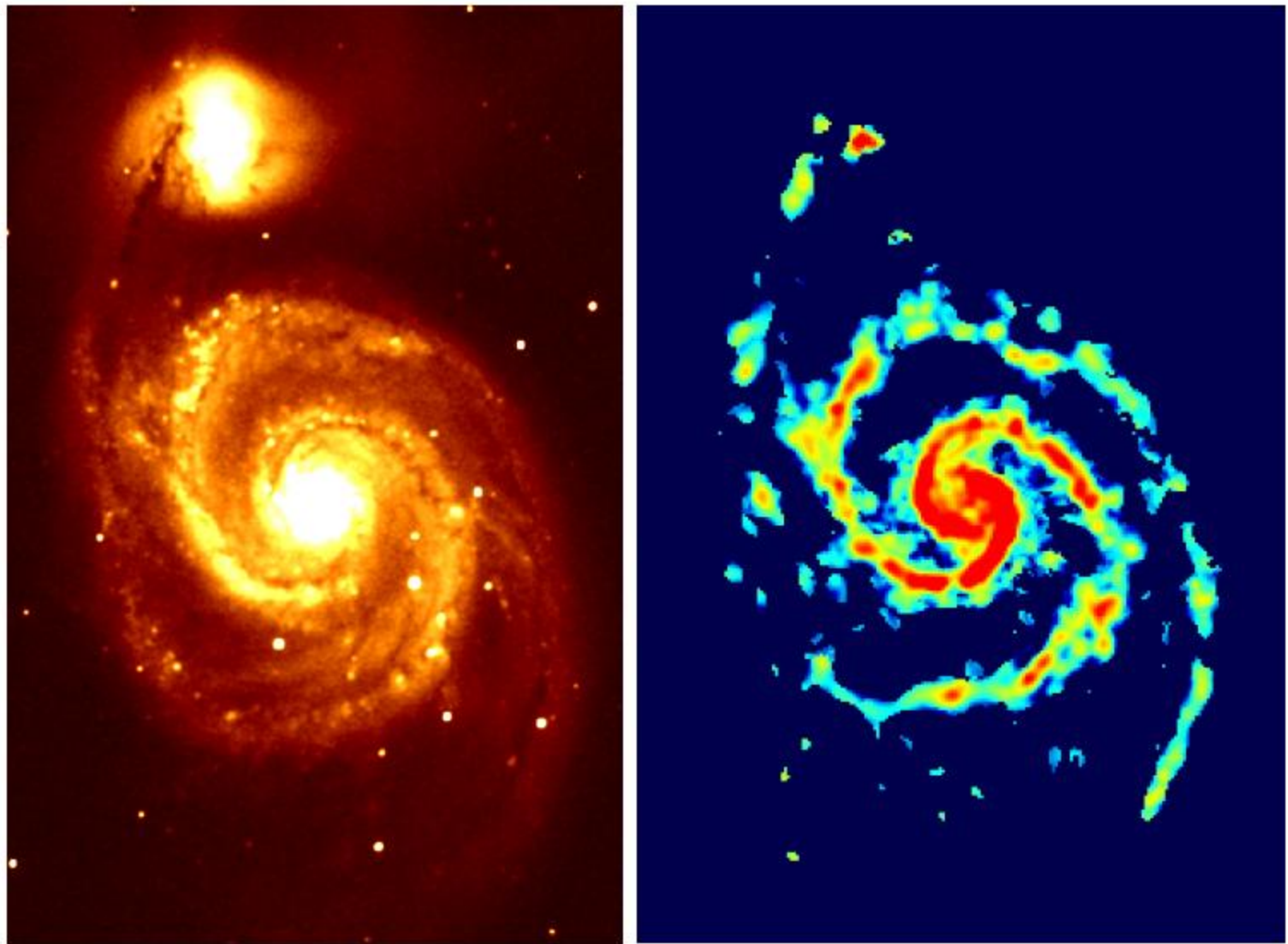
**Fermi-LAT spectrum:  
 $\Gamma = 2.0 \pm 0.1$**

**CR Proton:  $\sim 0.4 \times 10^{50}$  erg  
 $E_{\text{CR}} \sim 2\%$  of  $E_{\text{SN}} = 2 \times 10^{51}$  erg**

**CR spectral index = 2.3**

# SNRs, взаимодействующие с молекулярными облаками

- Молекулярные облака – холодные облака газа 5-300K (<1% в атомном или ионизованном состоянии),  $\text{H}_2$  (99.99%),  $n_{\text{H}_2} \sim 10^2 - 10^6 \text{ см}^{-3}$  (типичная  $\sim 10^3 \text{ см}^{-3}$ )
- Молекулы  $\text{H}_2$  формируются благодаря пыли (~1% массы), пыль также защищает молекулы от УВ излучения, поглощая его и переизлучая в ИК-диапазоне
- Всего ~120 видов молекул (13 атомов  $\text{HC}_{11}\text{N}$ ); CO -самая распространенная после  $\text{H}_2$  ( $10^{-4}$ ), дает очень яркие спектральные линии 2.6 и 1.3 мм – трассирует  $\text{H}_2$
- Массы от нескольких  $M_{\text{sun}}$  до  $10^6 M_{\text{sun}}$
- Гигантские молекулярные облака (GMC):  $>10^4 M_{\text{sun}}$  самогравитирующие
- Больше половины массы молекулярного газа в Галактике сосредоточено в GMC с  $M > 10^5 M_{\text{sun}}$
- GMC содержат SFRs (star formation regions)



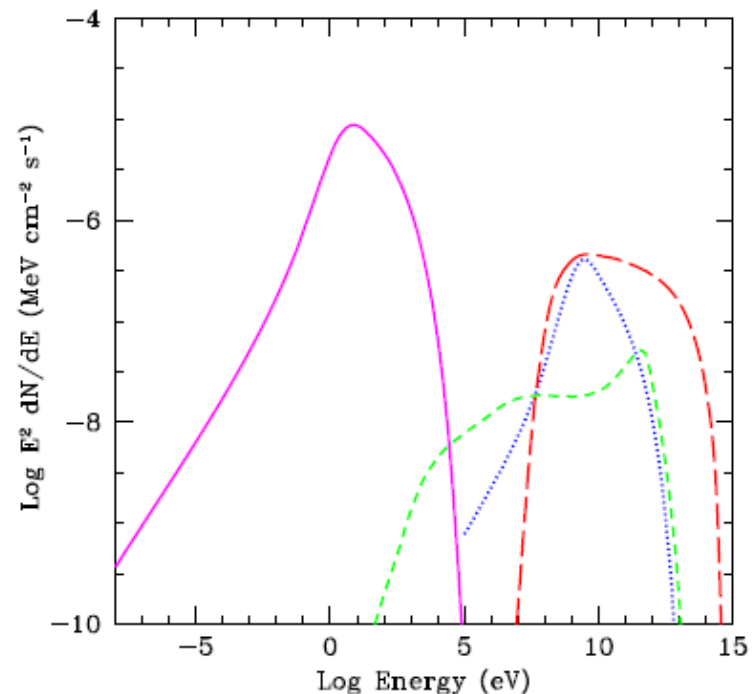
**Figure 3.** The left-hand panel shows an optical image of the Whirlpool Galaxy, M51, together with the small companion galaxy NGC 5195 in the upper left-hand portion of the image. The right-hand image shows the CO emission mapped with the BIMA Array from M51; the CO traces the molecular clouds in the galaxy. Note how tightly confined the CO emission is to the well-defined symmetric spiral arms in the galaxy. There is very little molecular gas between the spiral arms. (Credit: Stuart Vogel and the BIMA SONG collaboration.)

# Взаимодействие SNR-МС

- Все SFRs находятся в МС (абсолютное большинство в GMC)
- Наиболее массивные образующие звезды не успевают покинуть GMC, взрываются как CC SNe.
- Образующийся SNR эволюционирует в плотной среде GMC – взаимодействие SNR и GMC может сильно влиять на эволюцию SNR

- Интенсивность NTB (нетепловое тормозное излучение) и распад  $\pi^0$  пропорциональны  $n_0$  (плотности окружающей среды)
- Поэтому в плотных регионах (таких как SNR-MC) ожидается сильное гамма-излучение (если происходит эффективное ускорение CR)
- При этом для  $K_{\text{ep}} \sim 10^{-2}$  основным механизмом должен быть распад  $\pi^0$

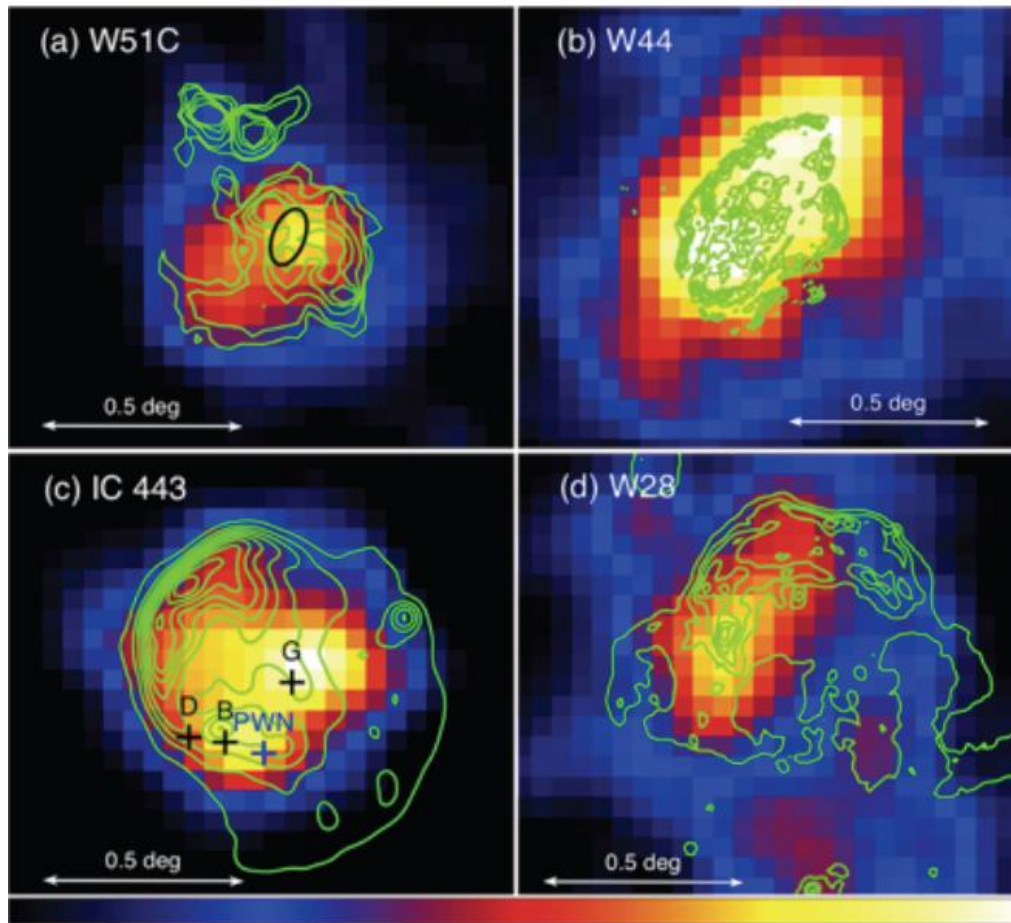
**Fig. 7** Simulated broadband spectrum from SNR undergoing efficient DSA of electrons and protons. The *solid magenta curve* represents synchrotron emission, the *dotted blue curve* is IC emission, the *dashed green curve* corresponds to NTB, and the *long-dashed curve* represents the  $\pi^0$ -day emission



# *SNRs Interacting with Molecular Clouds*

## LAT Discoveries of MC-SNRs

Fermi-LAT Collaboration (Uchiyama+) 2011



Extended GeV emission has been discovered from several SNRs, with **molecular cloud (MC)** interactions.

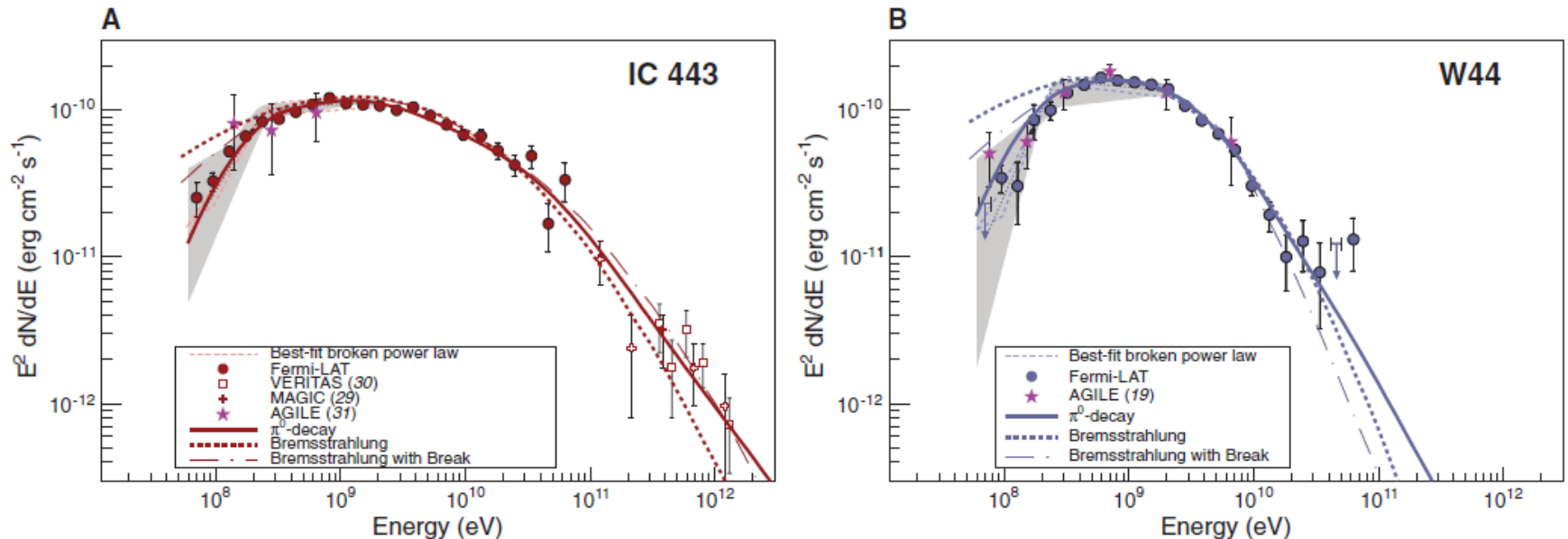
GeV extension is consistent with the size of a radio remnant (except for W28).

**The dominant class of LAT SNRs.**

2.5 yr count maps (>2 GeV, front-converted)

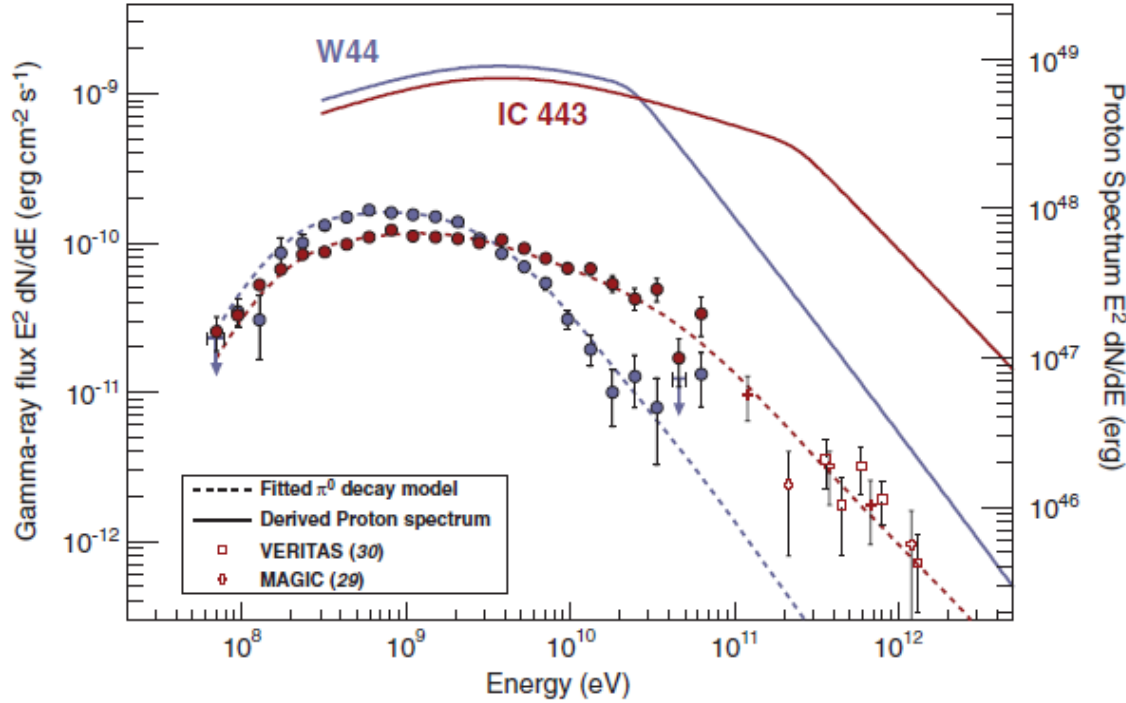
# Наблюдения SNRs-МС

- Основной класс SNRs, зарегистрированный Fermi-LAT
- SNRs IC 443, W44 – самые яркие SNRs во 2-ом каталоге LAT; возраст  $\sim 10^4$  лет (1.5 и 2.9 кпк)
- Спектры показывают наличие кинематического « $\pi^0$  горба» - прямое указание на адронный механизм



**Fig. 2.** (A and B) Gamma-ray spectra of IC 443 (A) and W44 (B) as measured with the Fermi LAT. Color-shaded areas bound by dashed lines denote the best-fit broadband smooth broken power law (60 MeV to 2 GeV); gray-shaded bands show systematic errors below 2 GeV due mainly to imperfect modeling of the galactic diffuse emission. At the high-energy end, TeV spectral data points for IC 443 from MAGIC (29) and VERITAS (30) are shown. Solid lines denote the best-

fit pion-decay gamma-ray spectra, dashed lines denote the best-fit bremsstrahlung spectra, and dash-dotted lines denote the best-fit bremsstrahlung spectra when including an ad hoc low-energy break at 300 MeV  $c^{-1}$  in the electron spectrum. These fits were done to the Fermi LAT data alone (not taking the TeV data points into account). Magenta stars denote measurements from the AGILE satellite for these two SNRs, taken from (31) and (19), respectively.



**Fig. 3.** Proton and gamma-ray spectra determined for IC 443 and W44. Also shown are the broadband spectral flux points derived in this study, along with TeV spectral data points for IC 443 from MAGIC (29) and VERITAS (30). The curvature evident in the proton distribution at  $\sim 2$  GeV is a consequence of the display in energy space (rather than momentum space). Gamma-ray spectra from the protons were computed using the energy-dependent cross section parameterized by (32). We took into account accelerated nuclei (heavier than protons) as well as nuclei in the target gas by applying an enhancement factor of 1.85 (33). Note that models of the gamma-ray production via  $pp$  interactions have some uncertainty. Relative to the model adopted here, an alternative model of (6) predicts  $\sim 30\%$  less photon flux near 70 MeV; the two models agree with each other to better than 15% above 200 MeV. The proton spectra assume average gas densities of  $n = 20 \text{ cm}^{-3}$  (IC 443) and  $n = 100 \text{ cm}^{-3}$  (W44) and distances of 1.5 kpc (IC 443) and 2.9 kpc (W44).

# SNR W51C

- Для того, чтобы объяснить наблюдаемый спектр NTB  $K_{ep} \gg 0.01$
- Для того, чтобы объяснить спектр IC нужно  $W_e \sim 10^{51}$  erg (что нереально)
- Адронная модель

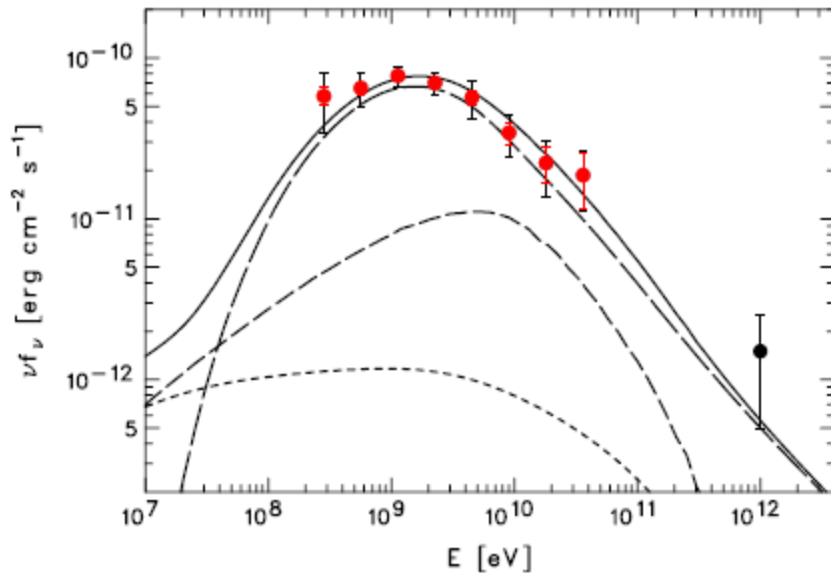


Figure 3. SED of the SNR W51C region measured with the *Fermi* LAT (red points) together with phenomenological modeling. Systematic errors (see Section 3.2) are indicated by black bars. The model consists of  $\pi^0$  decay (long-dashed curve), bremsstrahlung (dashed curve), and IC scattering (short-dashed curve). The integrated flux reported by H.E.S.S. is converted to the differential flux at 1 TeV assuming photon index  $\Gamma = 2.5 \pm 1.0$  (black point).

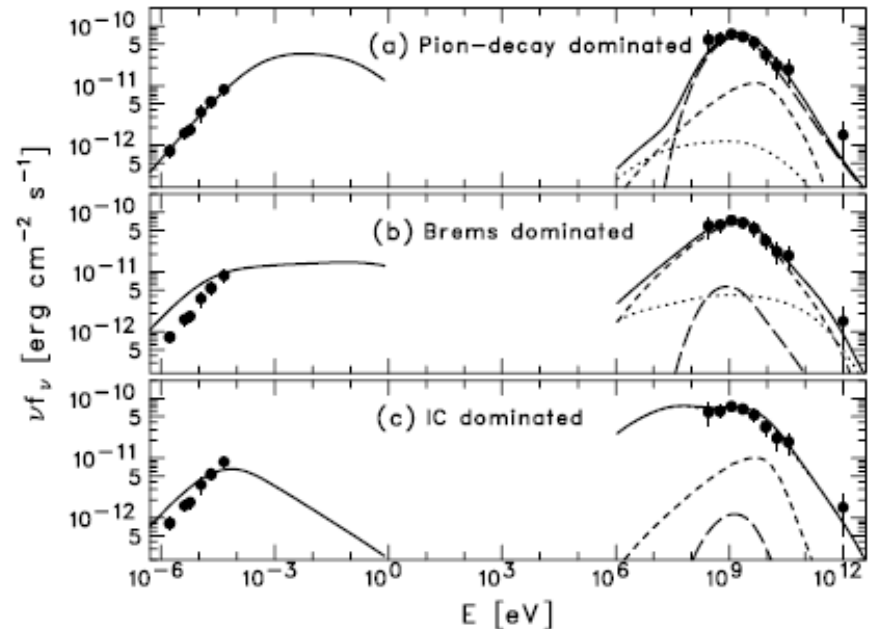
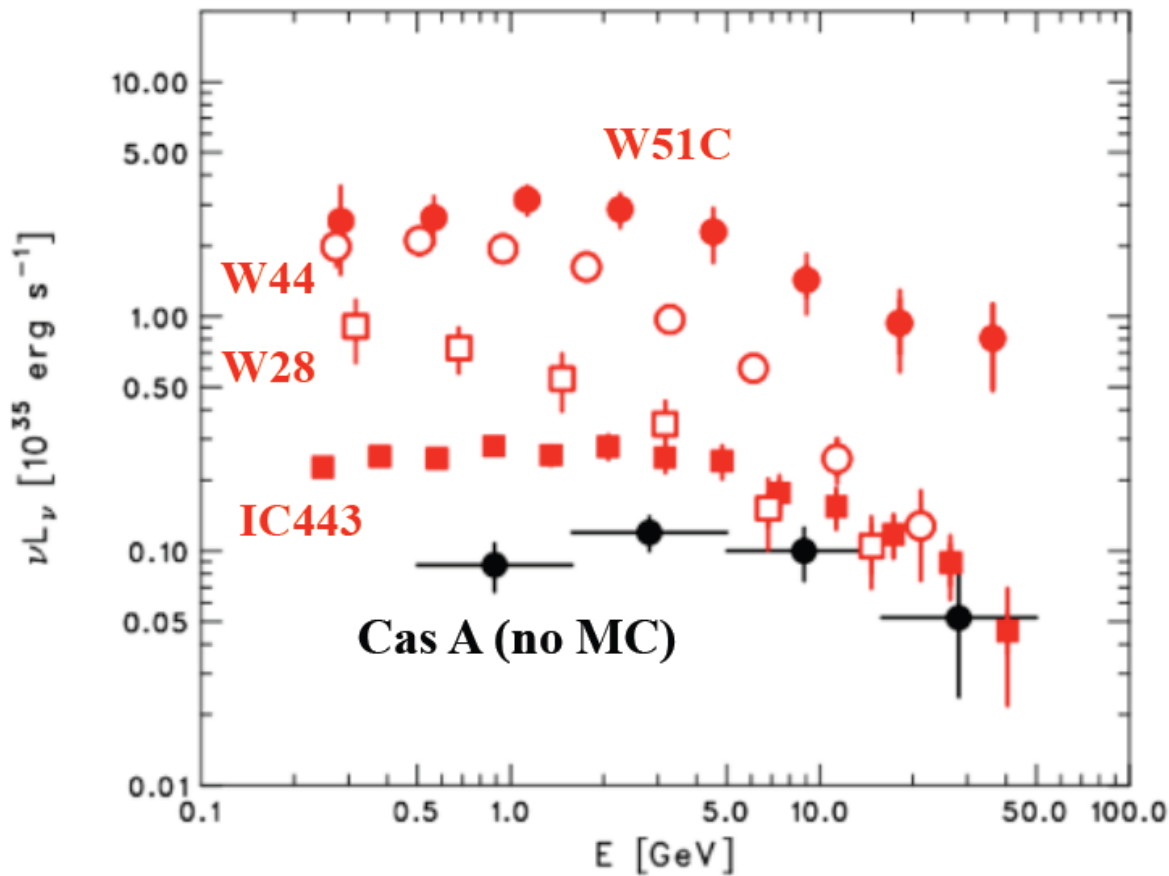


Figure 4. Three different scenarios for the multiwavelength modeling (see Table 1). The radio emission (from Moon & Koo 1994) is explained by synchrotron radiation, while the gamma-ray emission is modeled by different combinations of  $\pi^0$  decay (long-dashed curve), bremsstrahlung (dashed curve), and IC scattering (dotted curve). The sum of the three component is shown as a solid curve.

# Сравнение спектров SNRs

Fermi-LAT Collaboration (Uchiyama+) 2011



High GeV luminosity  
up to  $10^{36} \text{ erg/s}$

Assuming e/p ratio less  
than 10%,  
the only way to achieve  
the high luminosity is:

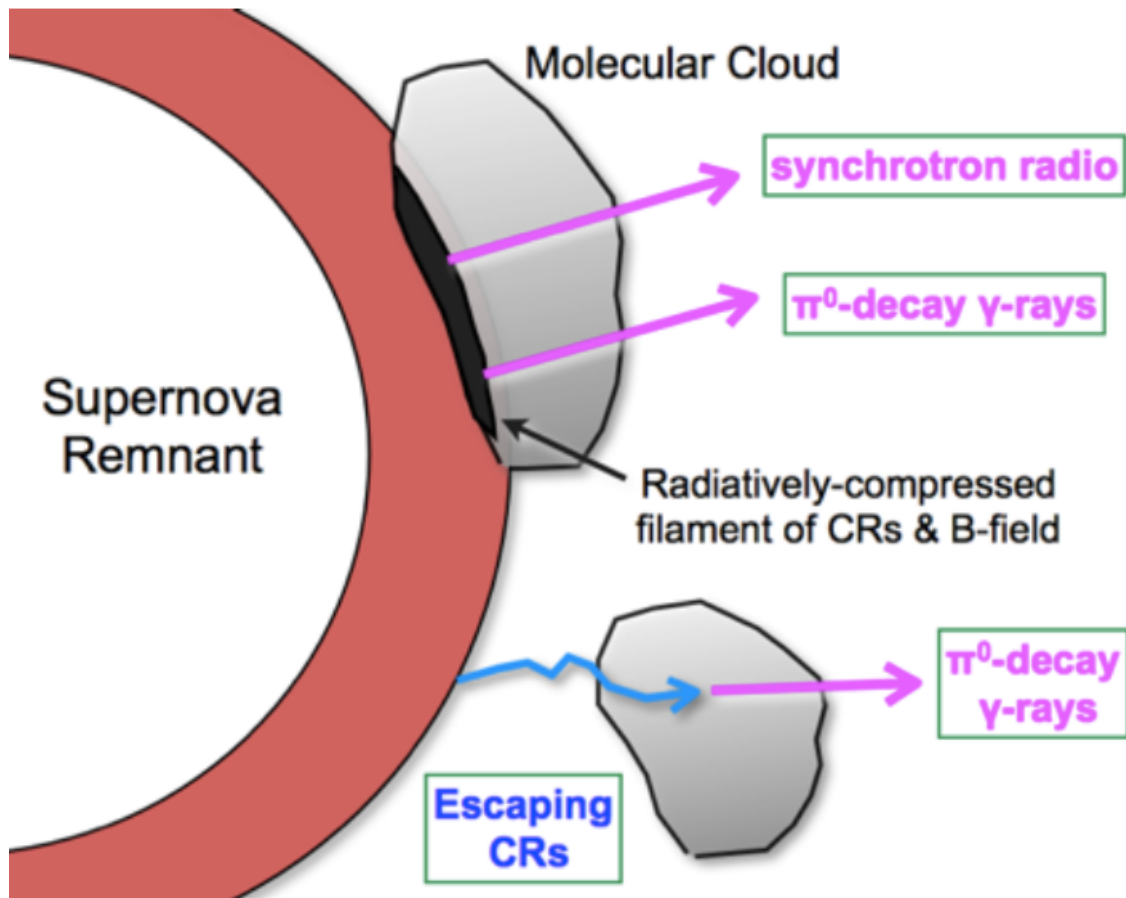
$\pi^0$ -decay  $\gamma$ -rays in dense  
gas ( $>10 \text{ cm}^{-3}$ ).

Spectral steepening  
in the GeV band

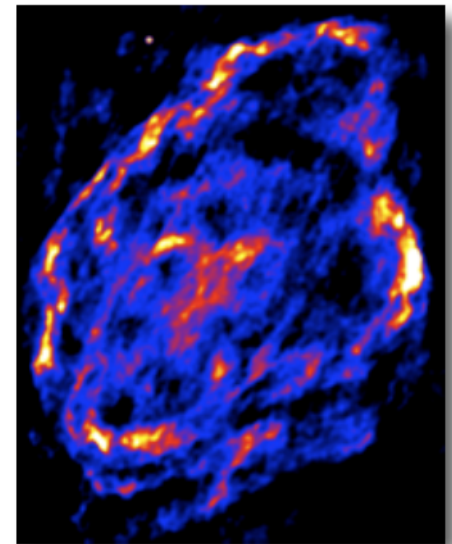
GeV luminosity  
 $\gg$  TeV luminosity

# Gamma-ray Emission Sites

Radio &  $\gamma$ -ray emissions from **radiatively-compressed filaments**  
**Crushed Cloud Model** (Uchiyama+2010)



**SNR W44**



synchrotron radio emission  
correlated with **shocked  $\text{H}_2$  gas**

# Итоги

- SNRs – основной источник CR до  $\sim 10^{17}$  эВ
- В ударных волнах происходит эффективное ускорение частиц (диффузное ускорение – механизм Ферми II рода) и усиление магнитного поля
- Ускоренные частицы излучают в радио, рентгеновском и гамма-диапазонах
- Открытые вопросы:
  - Максимальная энергия ускорения  $E_{\text{max}}$
  - Эффективность ускорения
  - Отношение энергии в ускоренных электронах и протонах (теория и локальные наблюдения CR показывают, что UV гораздо больше энергии передают p (и более тяжелым ядрам), чем e; однако нетепловое излучения большинства астрофизических объектов генерируется e).
- Наблюдения в гамма-диапазоне помогают определить основной механизм излучения в области больших энергий – лептонный или адронный и определить энергию, содержащуюся в адронной компоненте (и тем самым отношение энергии в адронах к энергии в электронах)

# ИТОГИ

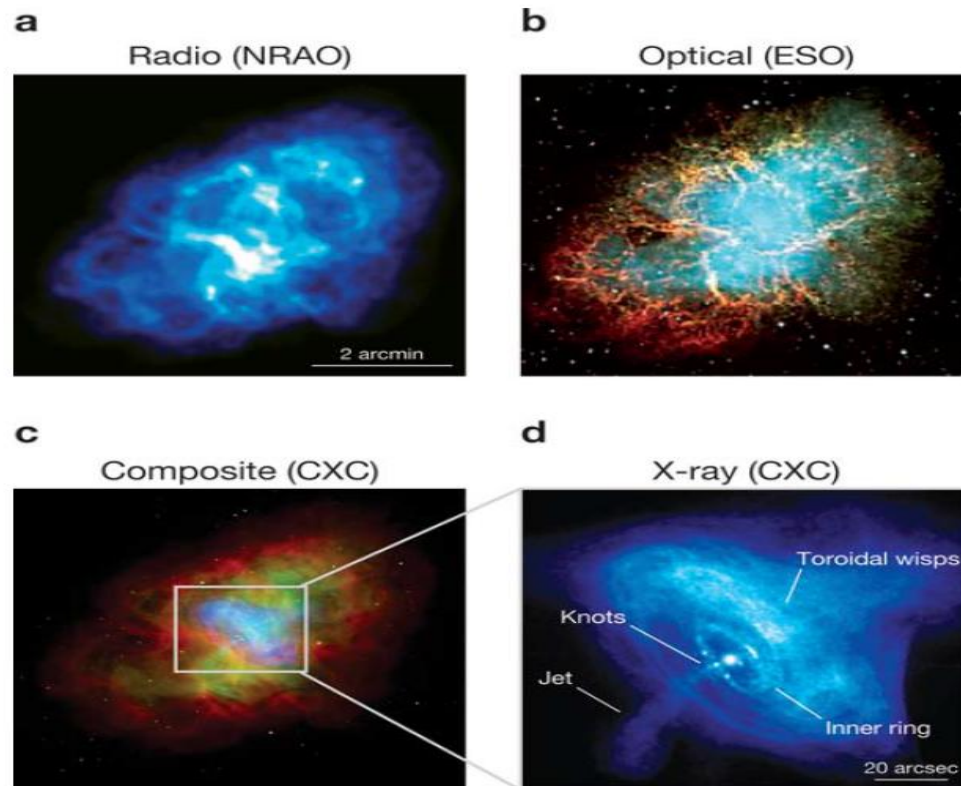
- **Historical SNRs**
  - Tycho & Cassiopeia A
  - Hadronic origin, Magnetic field amplification, CR energy content
- **Young TeV-bright SNRs**
  - RX J1713.7-3946 & Vela Jr.
  - Leptonic origin? (B-field too low?)
- **SNRs interacting with molecular clouds**
  - W51C, W44, IC443, W28, W49B, W30, CTB37A, ...
  - Hadronic origin
  - Most cases: re-acceleration of ambient GCRs
  - Runaway CRs would be responsible for some cases

# Пульсарные туманности (PWN = pulsar wind nebulae) или плерионы

- Поток релятивистских частиц от пульсаров – релятивистский ветер ( $e^- e^+$ )  $\dot{E} \sim 3 \cdot 10^{33} B_{12}^2 P_{ms}^{-4} \text{ erg s}^{-1}$
- $dE/dt > \sim 10^{36} \text{ эрг/с}$
- Там где давление ветра сравнивается с давлением окружающей среды образуется УВ; за УВ электрон-позитронная плазма образует расширяющуюся PWN, которая излучает синхротронным механизмом (от радио до рентгеновского диапазона) и IC в гамма-диапазоне.
- Типичные значения  $L_R/(dE/dt) \sim 10^{-4}$  ,  $L_X/(dE/dt) \sim 10^{-3}$
- Запас энергии  $\sim 10^{49} \text{ эрг}$
- Самый распространенный класс галактических VHE источников (>80)

# Crab Nebula

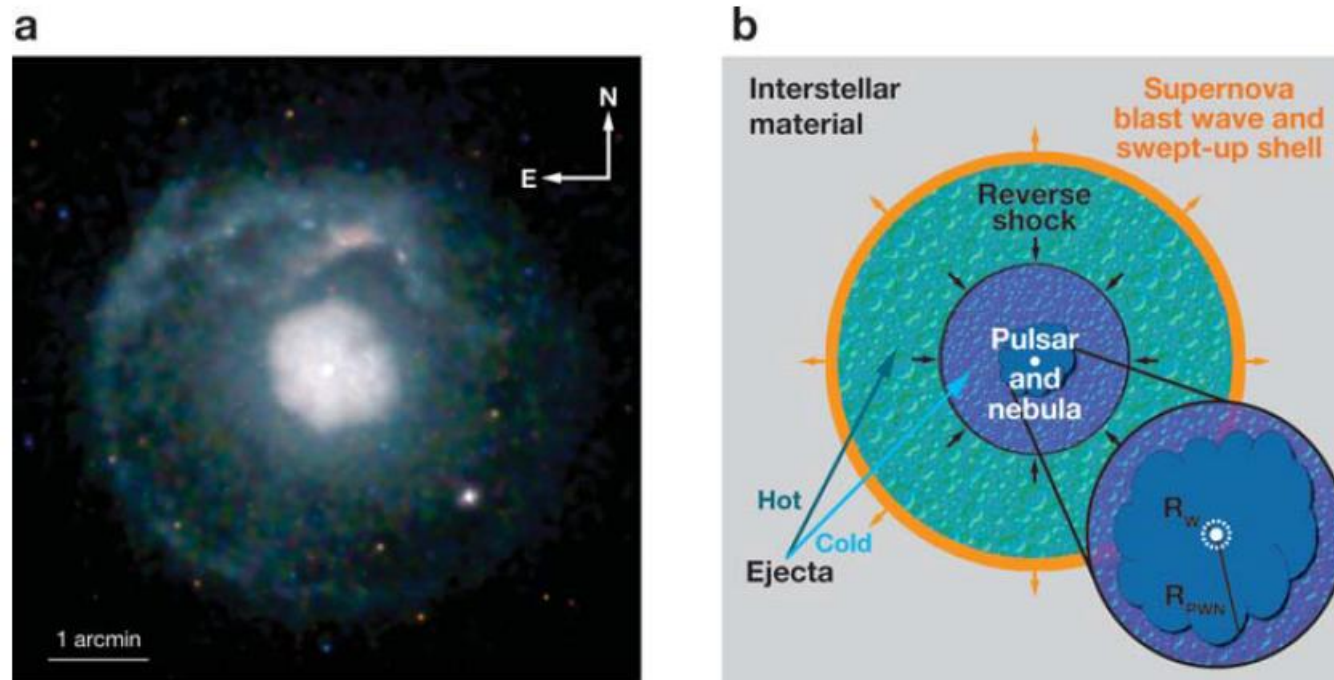
- Отличается от оболочечных остатков сверхновых (Tycho, Cas A). Энергетика определяется постоянным притоком магнитных поля и релятивистский частиц от центрального источника



**Figure 1**

Images of the Crab Nebula (G184.6–5.8). (a) Radio synchrotron emission from the confined wind, with enhancements along filaments. (b) Optical synchrotron emission (*blue-green*) surrounded by emission lines from filaments (*red*). (c) Composite image of radio (*red*), optical (*green*), and X-ray (*blue*) emission. (d) X-ray synchrotron emission from jets and wind downstream of the termination shock, marked by the inner ring. Note the decreasing size of the synchrotron nebula going from the radio to the X-ray band. Each image is oriented with north up and east to the left. The scale is indicated by the 2 arcmin scale bar, except for panel (d), where the 20 arcsec scale bar applies.

# SNR + PWN (composite SNR G21.5-0.9)



**Figure 2**

(a) A deep *Chandra* X-ray image of the composite SNR G21.5–0.9 (Matheson & Safi-Harb 2005). A circular supernova remnant (SNR) of diameter  $\approx 5'$  surrounds a symmetric pulsar wind nebula (PWN) of diameter  $\approx 1.5'$ , with the young pulsar J1833–1034 at the center (Gutpa et al., 2005; Camilo et al., 2006). The central location of the pulsar and PWN and the symmetric appearance of the PWN and SNR both argue for a relatively unevolved system in which the PWN expands freely and symmetrically into the unshocked interior of the SNR.

(b) A schematic diagram of a composite SNR showing the swept-up interstellar medium shell, hot and cold ejecta separated by the reverse shock, and the central pulsar and its nebula. The expanded PWN view shows the wind termination shock. Note that this diagram does not correspond directly to G21.5–0.9, in that a significant reverse shock has probably yet to form in this young SNR.

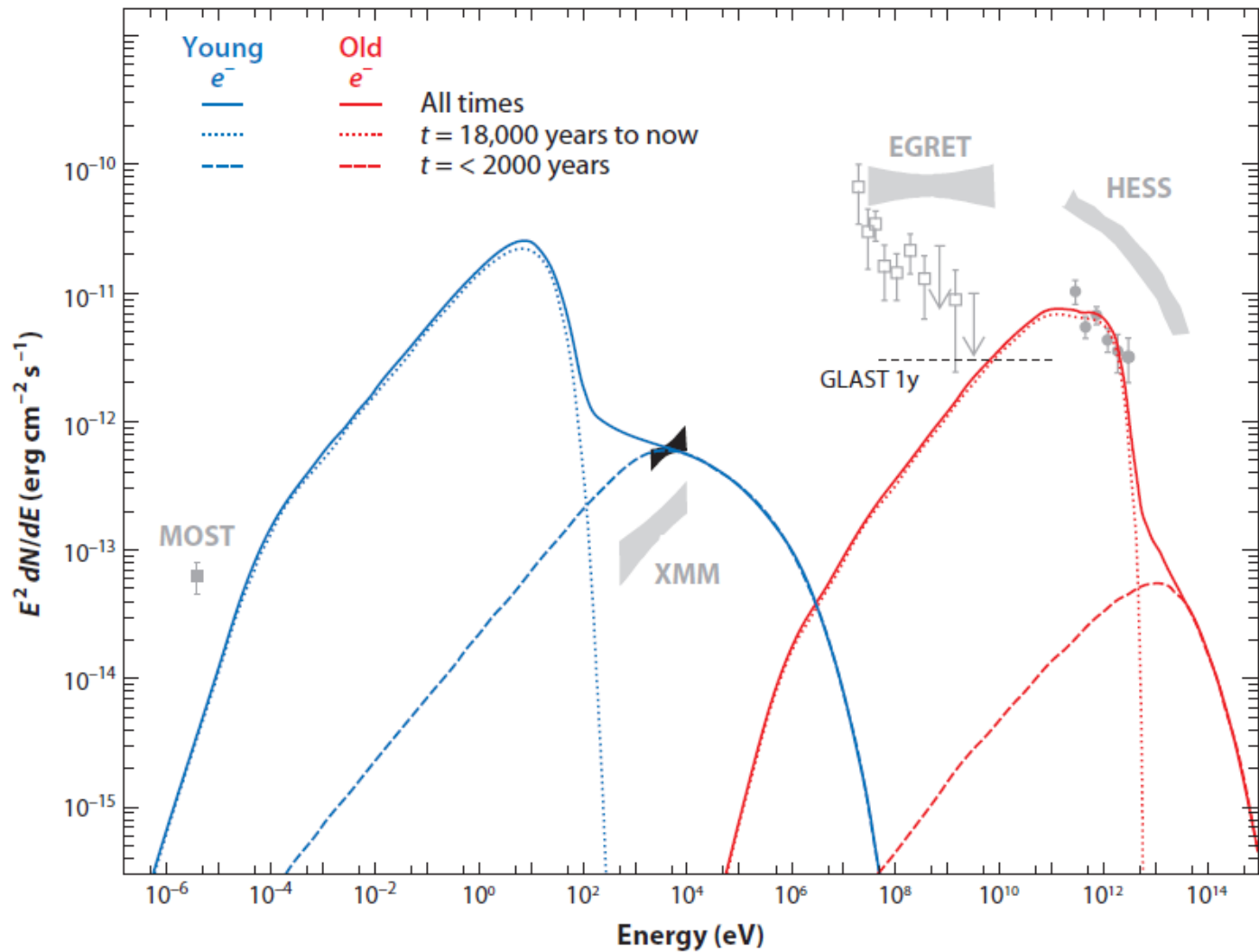


Figure 10

SED for HESS J1640-465, showing hypothetical contributions from young (*blue lines*)/old (*red lines*) electrons. Data for HESS J1825-137 are shown for comparison (*gray regions*). Reproduced from Funk et al. (2007).

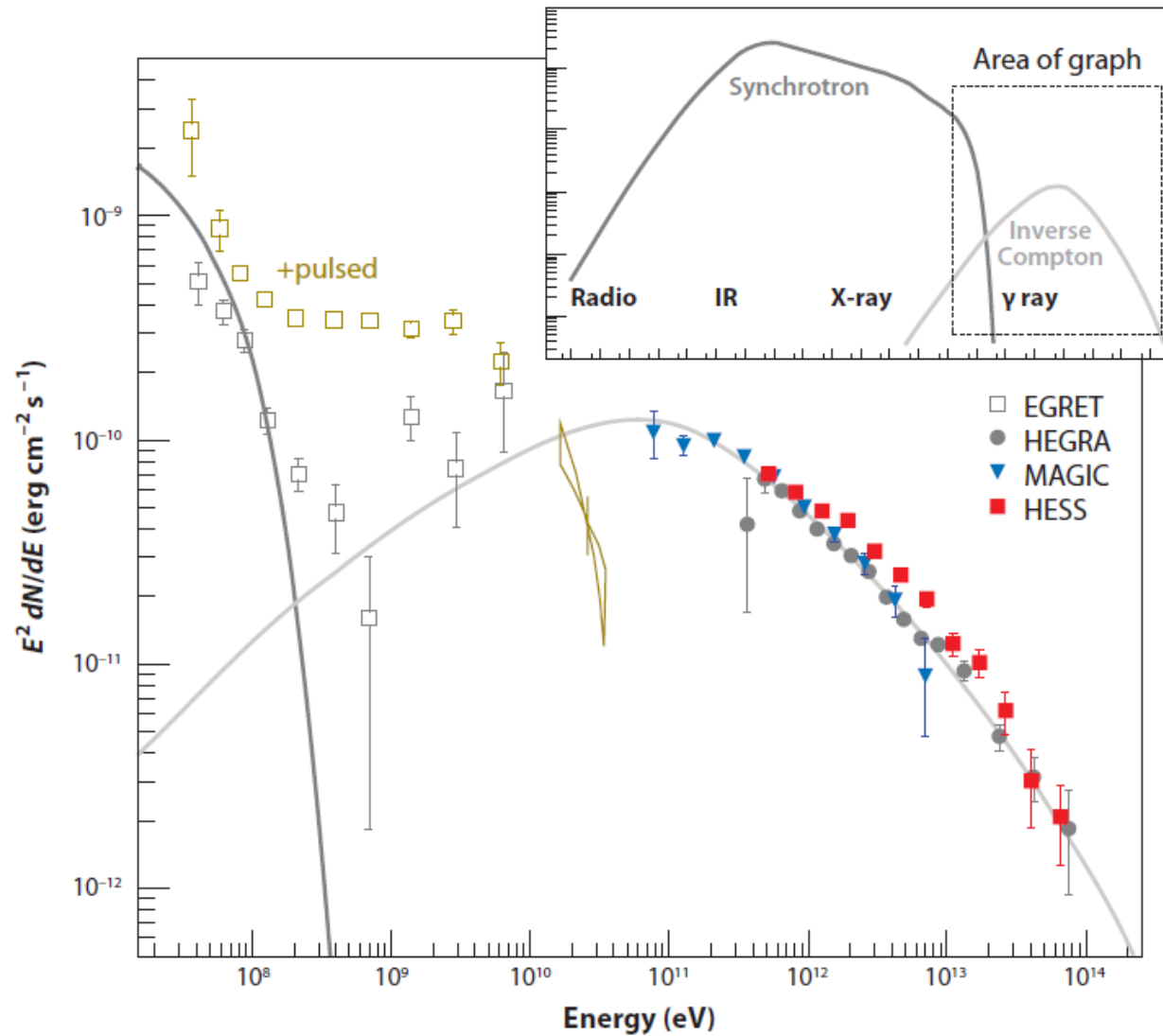


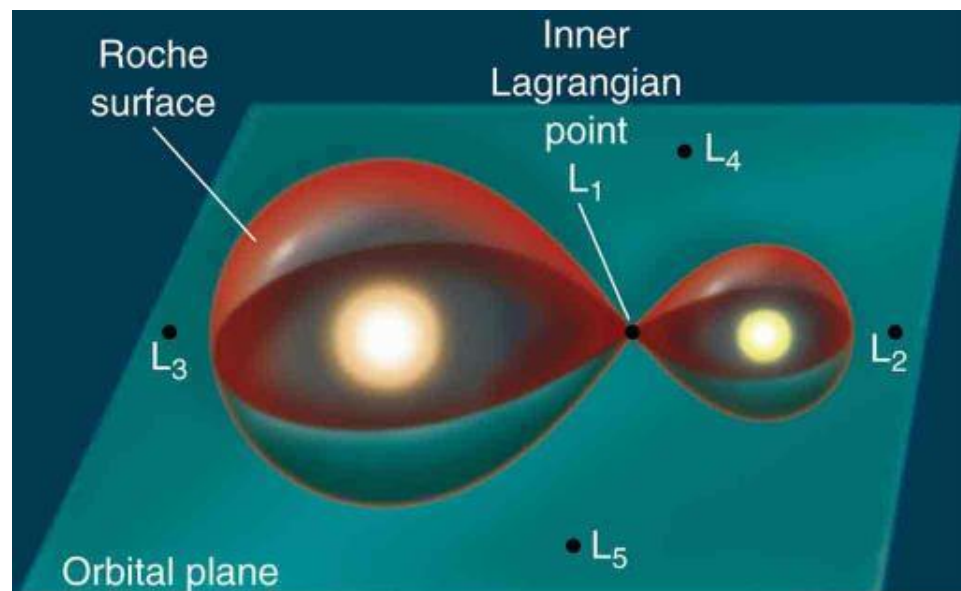
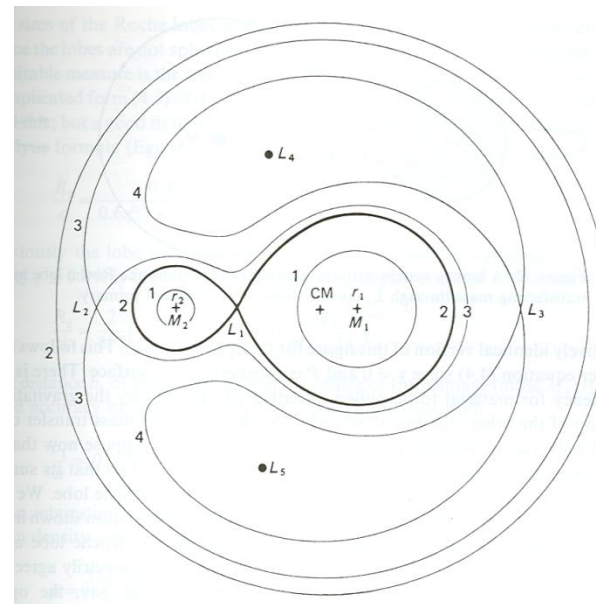
Figure 11

The SED of the Crab Nebula and Pulsar, adapted from Hinton (2009).

# Рентгеновские двойные системы

- >50% звезд входит в двойные и кратные системы
- Рентгеновские двойные: нормальная звезда + вырожденная звезда (нейтронная звезда, черная дыра)
- Перетекание вещества (аккреция) с нормального компонента на вырожденный – выделение гравитационной энергии, рентгеновское излучение
- HMXBs и LMXBs – массивные и маломассивные рентгеновские системы

Эквипотенциальные поверхности Роше и точки Лагранжа



# Roche Potential

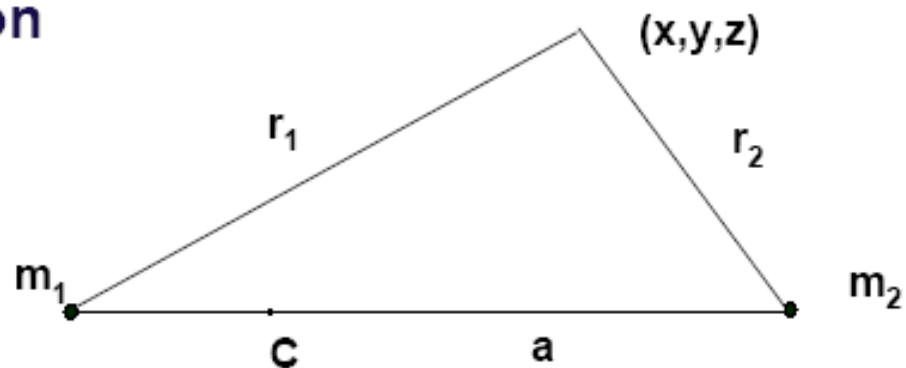
Assumes:

synchronous rotation

circular orbit

2 point masses

rotating frame



$$\omega^2 = \left( \frac{2\pi}{P} \right)^2 = \frac{G M}{a^3}$$

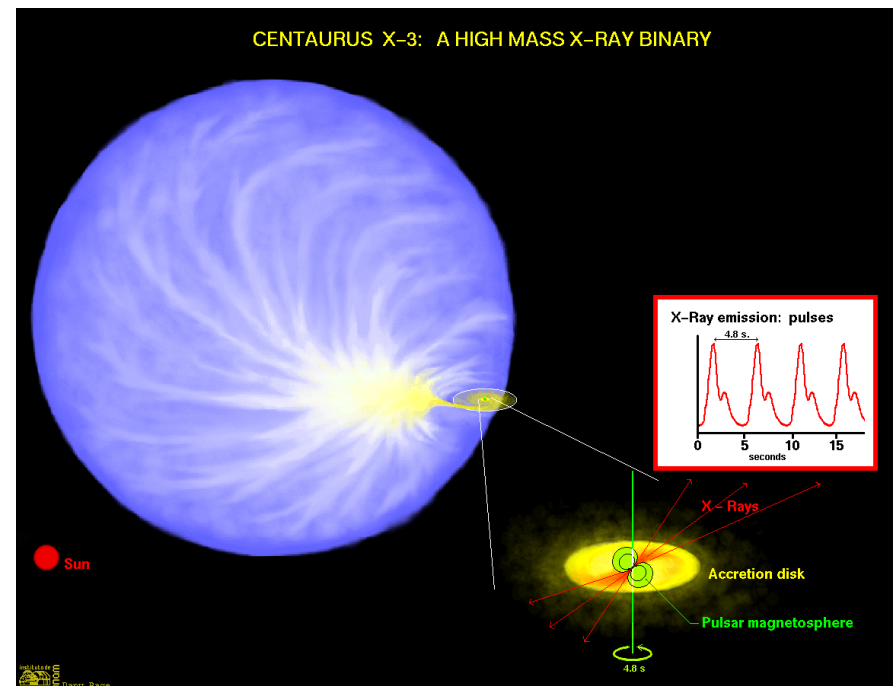
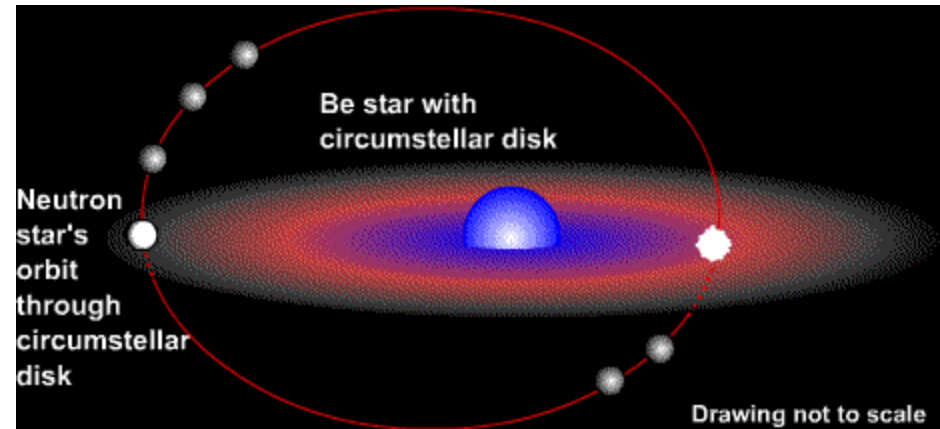
$$r_1^2 = x^2 + y^2 + z^2 \quad r_2^2 = (x - a)^2 + y^2 + z^2$$

$$\frac{x_c}{a} = \frac{m_2}{M} = \frac{q}{1+q} \quad q \equiv \frac{m_2}{m_1} \leq 1$$

$$\Phi = -\frac{G m_1}{r_1} - \frac{G m_2}{r_2} - \frac{\omega^2}{2} \left[ (x - x_c)^2 + y^2 \right]$$

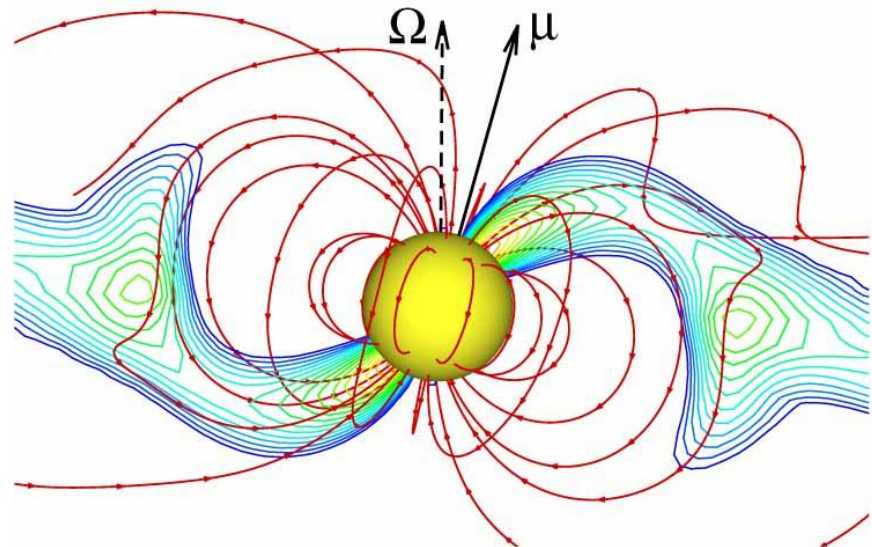
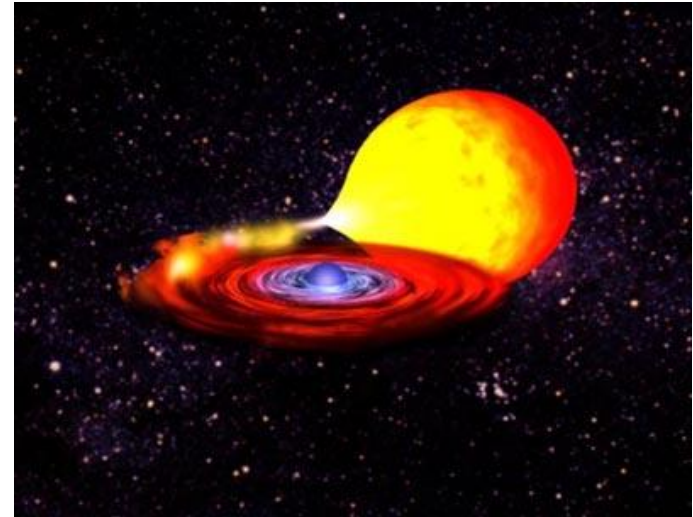
# HMXBs

- HMXBs (high-mass X-ray binaries) – нормальный компаньон молодая массивная звезда класса OB, вырожденный – НЗ или ЧД
- Среди первых открытых в начале 70-х годов (eg. Vela X-1, Cyg X-1, Cyg X-3, Her X-1)
  - Аккреция из звездного ветра или при переполнении полости Роша
  - Два основных типа: двойные Be (Be/X-ray binary), двойные с сверхгигантом (SG/X-ray binary)
  - 114 HMXBs в Галактике (4-ый каталог 2006 г). Всего  $2 \times 10^3$  -  $2 \times 10^4$
  - $\sim 10^{35} - 10^{36}$  эрг/с (ветер) или  $\sim 10^{38}$  эрг/с (переполнение полости Роша)
  - Время жизни  $\sim 10^6 - 10^7$  лет



# LMXBs (low-mass X-ray binaries)

- нормальный компаньон  
белый карлик или звезды  
поздних типов главной  
последовательности,  
звезды типа A, субгиганты  
F-G  $M < \sim 1M_{\text{Sun}}$
- Аккреция при  
переполнении полости  
Роша
- Множество подтипов
- 187 LMXBs в Галактике  
(4-ый каталог 2006 г)
- Время жизни  $\sim 10^8$ - $10^9$  лет



# Гамма-излучение HMXBs

LS I +61° 303:

- “Gamma-ray binaries” – 6 (MeV-GeV-TeV)
- Гамма-излучение модулировано с орбитальным периодом
- 3 – Be/X-binary
- Не всегда известен тип компактного объекта
- LS I +61° 303:
- Излучение двух различных популяций частиц.
- Спектр LAT похож на пульсарный – компактный объект молодой пульсар!?

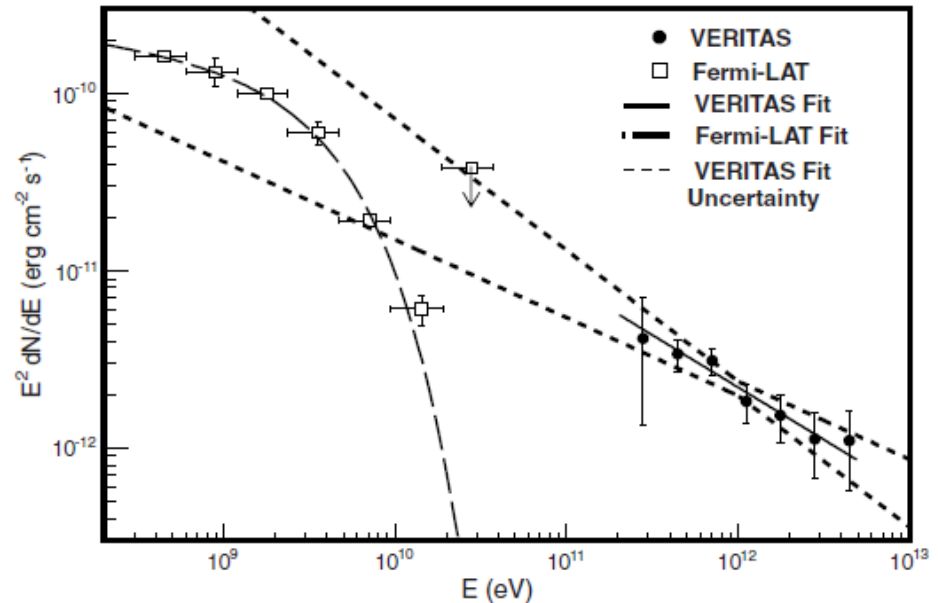


Figure 5. VERITAS and *Fermi*-LAT spectral energy distribution.

$$F = A E^{-\Gamma} \exp(-E/E_c)$$

Flux ( $E > 100$  MeV)

$$= 0.82 \pm 0.03 \text{ (stat)} \pm 0.07 \text{ (syst)} 10^{-6} \text{ ph/cm}^2/\text{s}$$

$$\Gamma = 2.21 \pm 0.04 \text{ (stat)} \pm 0.06 \text{ (syst)}$$

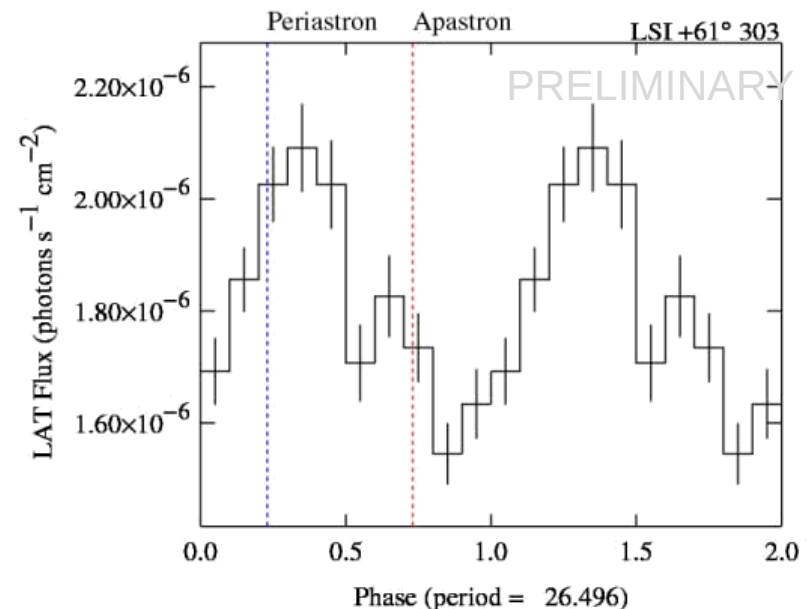
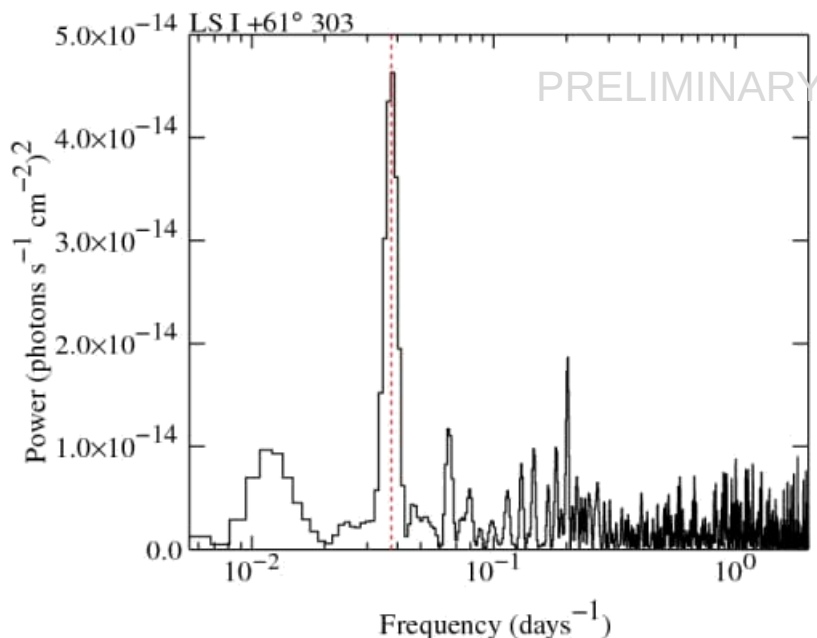
$$E_c = 6.3 \pm 1.1 \text{ (stat)} \pm 0.4 \text{ (syst)} \text{ GeV}$$

# Генерация гамма-излучения

- Лептонный механизм (обратное комптоновское рассеяние)
- Адронный механизм (распад  $\pi^0$ , образующихся при столкновении релятивистских протонов)
- LS I +61° 303 (P=26.5 дней) – неизвестно, что ускоряет частицы: молодой пульсар (ускорение в магнитосфере и/или в ударной волне при столкновении пульсарного и звездного ветров) или, например, релятивистский джет (струи)

# Первое детектирование в области МэВ - ГэВ

- Обнаружена периодичность в интенсивности гамма-излучения с периодом  $26.4 \pm 0.5$  дней
- Пик излучения приходится на периастр



# Итоги по дискретным источникам

- Основную популяцию галактических гамма-источников составляют гамма-пульсары (117 во 2-ом каталоге LAT)
- Всего несколько SNRs (6) , PWN (pulsar wind nebulae - 3) и HMXBs (6) детектированы Fermi-LAT в гамма-диапазоне (2-ой каталог; на сегодняшний день уже больше)
- PWN являются основными галактическими источниками в области VHE
- Множество неидентифицированных источников в плоскости Галактики (большинство – гамма-пульсары)