

Происхождение космических лучей

В.Н.Зиракашвили
(ИЗМИРАН)

Содержание

- Введение
- Ускорение галактических космических лучей в остатках сверхновых
- Пэватроны
- КЛ сверхвысоких энергий

Введение

Космические лучи (КЛ) – высоко-
энергичная компонента космической
плазмы

Плотность энергии в Галактике 1 эВ см^{-3}
(примерно равна плотности энергии газа и магнитного поля)

p - 90%, e^+, e^- - 1% при $E=10^{10} \text{ эВ}$

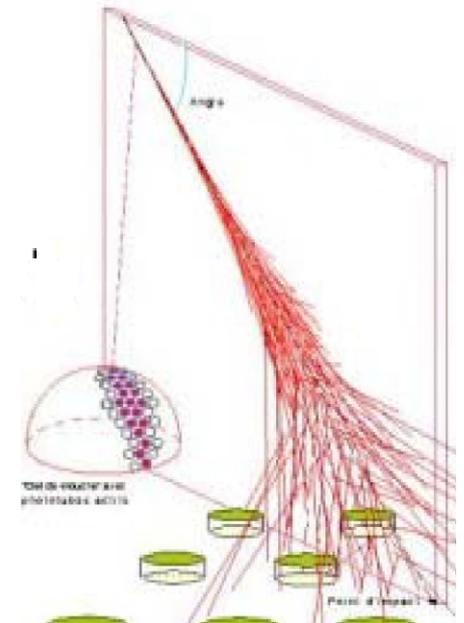
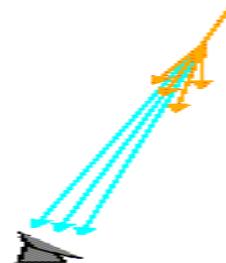
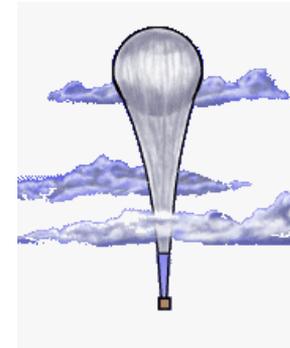
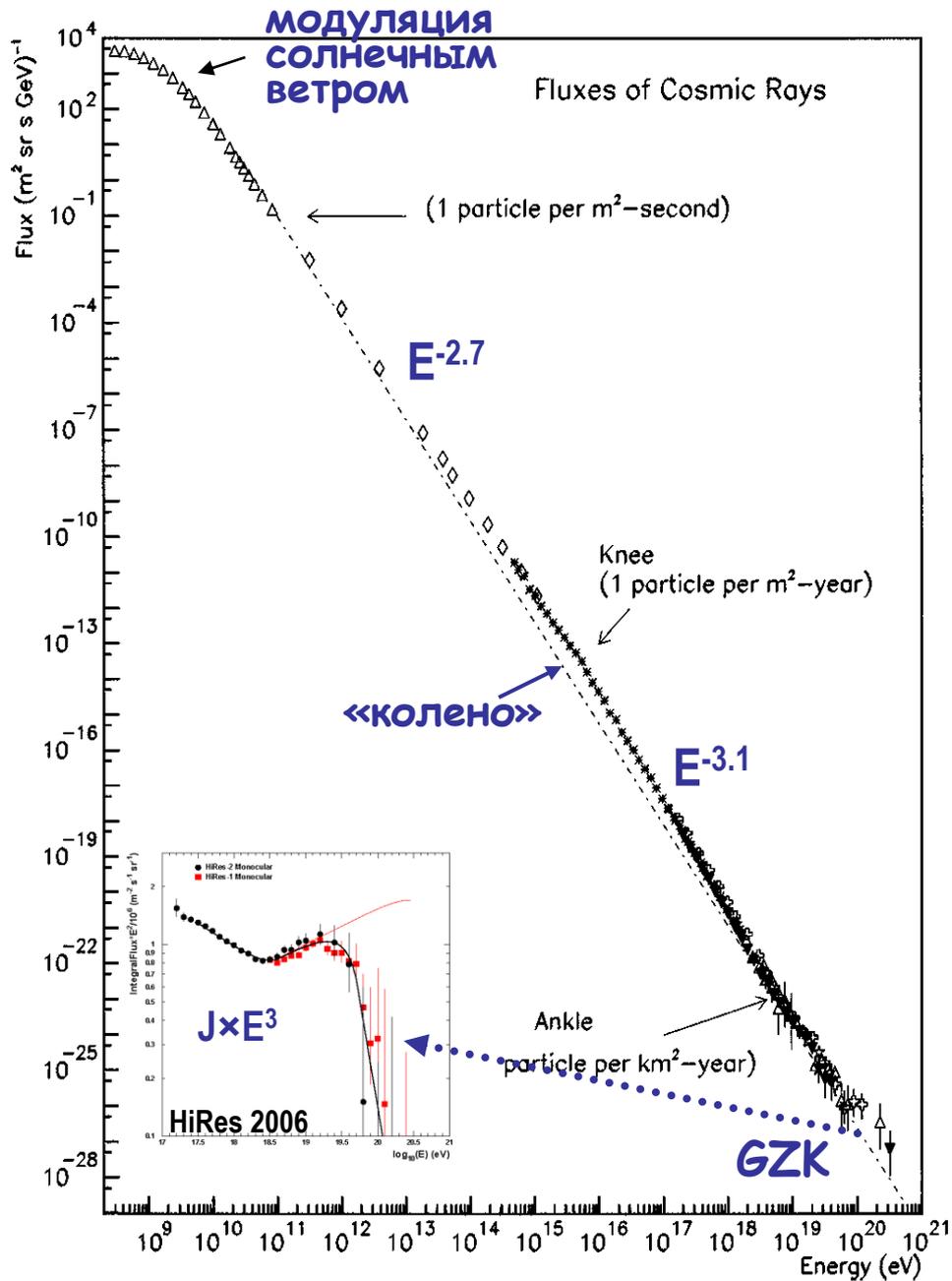
Степенной спектр

$N(E) \sim E^{-2.7}$, $10^{10} \text{ эВ} < E < 3 \cdot 10^{15} \text{ эВ}$

$N(E) \sim E^{-3.2}$, $E > 3 \cdot 10^{15} \text{ эВ}$

Высокая изотропия $\delta < 0.001$ при $E < 10^{15} \text{ эВ}$

Макс. энергия $> 10^{20} \text{ эВ}$



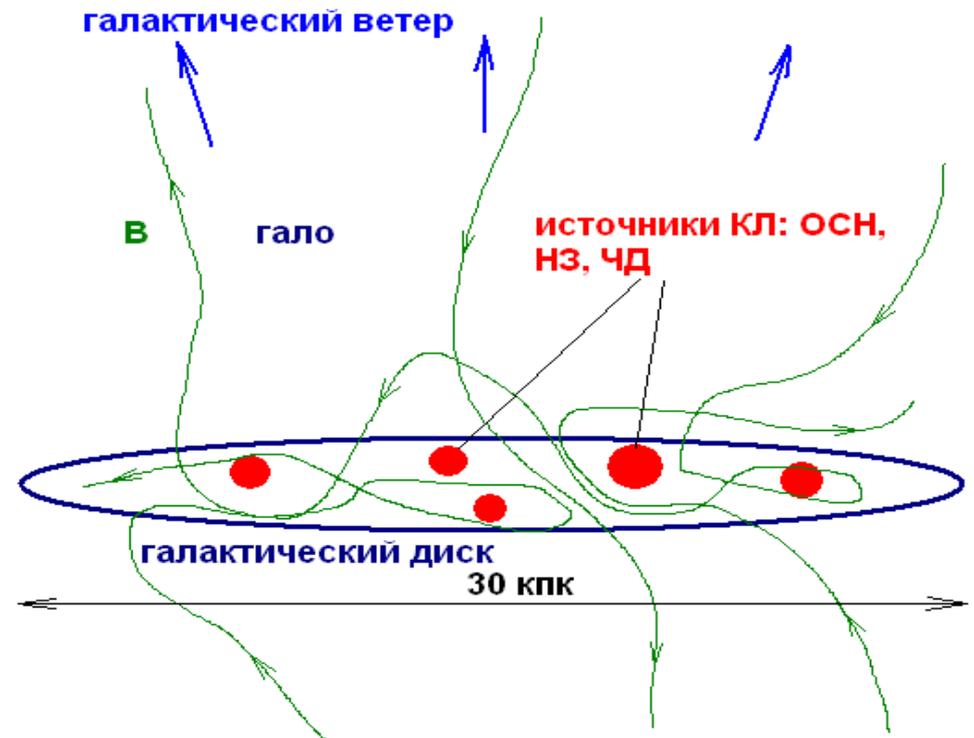
Общая картина ускорения и распространения КЛ в Галактике

$$N(E) \sim Q(E)T(E)$$

Хим. состав КЛ \rightarrow
 $T_{\text{disk}} \sim 10$ млн. лет

$$L_{\text{CR}} \sim 10^{41} \text{ эрг с}^{-1}$$

или 10 % механической
мощности сверхновых

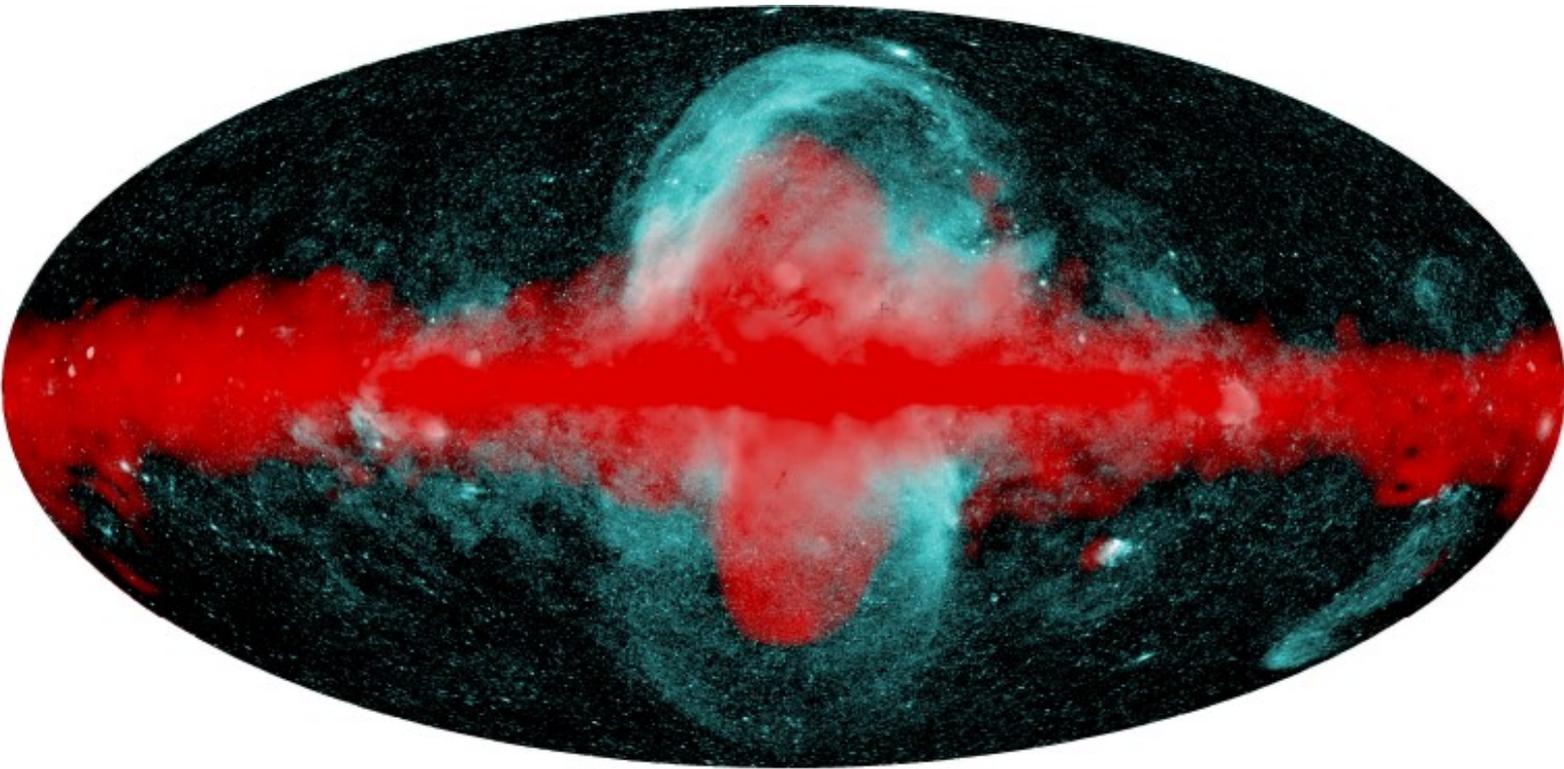


Сверхновые – наиболее вероятные источники КЛ
(Гинзбург, Сыроватский 1963)

Fermi and eRosita bubbles (Predehl et al. 2020)

Наиболее вероятно связаны с активностью
сверхмассивной черной дыры

$$W \sim 10^{56} \text{ erg},$$
$$L \sim 10^{41} \text{ erg /sec}$$



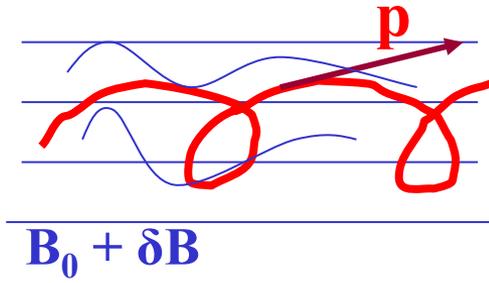
«микроскопическая» теория диффузии

$$r_g = 3.3 \cdot 10^{12} (p/Z)_{GV} B_{\mu G}^{-1} \text{ cm}$$

гирорадиус
частицы

$$\longrightarrow r_g \sim 1 / k_{\parallel} \longleftarrow$$

резонансное
волновое число



коэффициент
диффузии

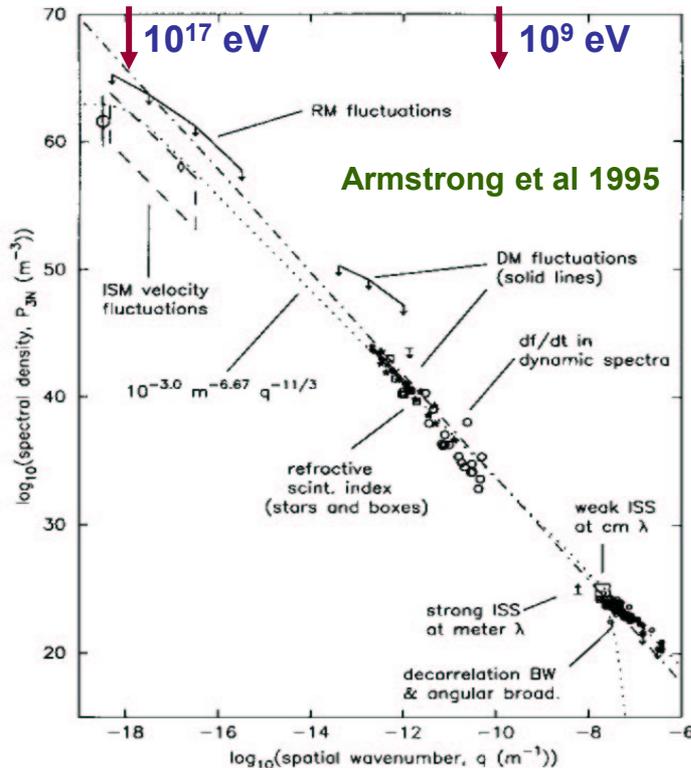
Jokipii 1971, ...

$$D \approx \frac{v r_g}{3} \frac{B_0^2}{\delta B_{res}^2}$$

$$\sim v r_g^{1/3} \dots v r_g^{1/2}$$

изотропный
Колмогоров,
 $k^{-5/3}$

Kraichnan -
Ирошников
 $k^{-3/2}$



Ускорение КЛ ударными волнами

Замечательная особенность -
степенной спектр ускоренных
частиц $\gamma = (\sigma + 2) / (\sigma - 1)$, где σ степень
сжатия ударной волны, для
сильных ударных волн $\sigma = 4$ and $\gamma = 2$

Крымский 1977;
Bell 1978

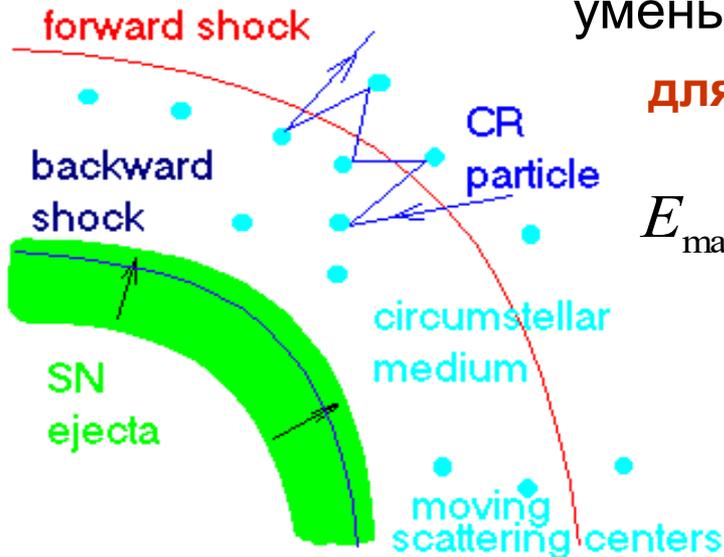
Максимальная энергия E_{\max} : $D(E_{\max}) \sim 0.1 u_{\text{sh}} R_{\text{sh}}$

Для молодых ОСН : $u_{\text{sh}} R_{\text{sh}} \sim 10^{28} \text{ см}^2 \text{ с}^{-1}$

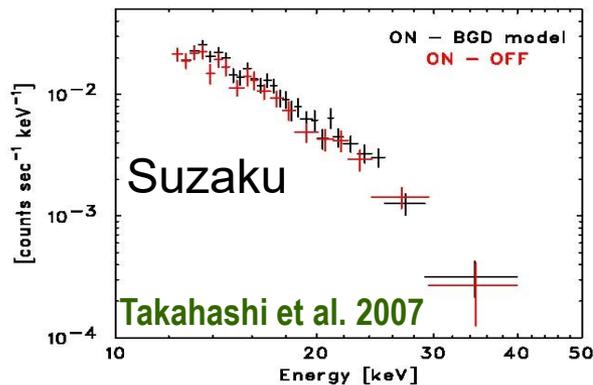
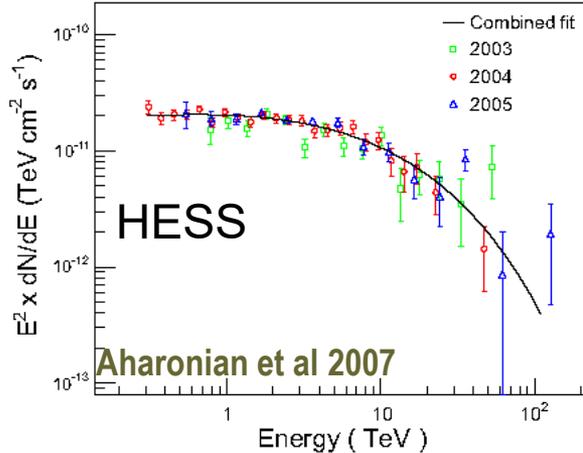
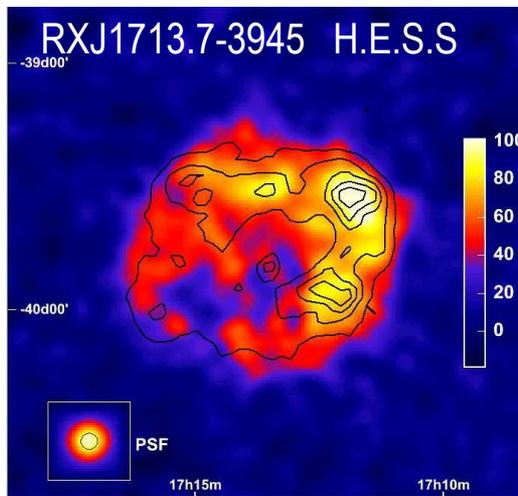
а в Галактике $D \sim 10^{28} \text{ см}^2 \text{ с}^{-1}$ при $E \sim 10$ ГэВ, т.е.
коэффициент диффузии КЛ должен быть сильно
уменьшен вблизи фронта УВ

для Бомовской диффузии $D = D_B = cr_g / 3$

$$E_{\max} = Z \cdot 10^{14} \text{ eV} \left(\frac{B}{10 \mu\text{G}} \right) \left(\frac{R_{\text{sh}}}{3 \text{ pc}} \right) \left(\frac{u_{\text{sh}}}{3000 \text{ km s}^{-1}} \right)$$



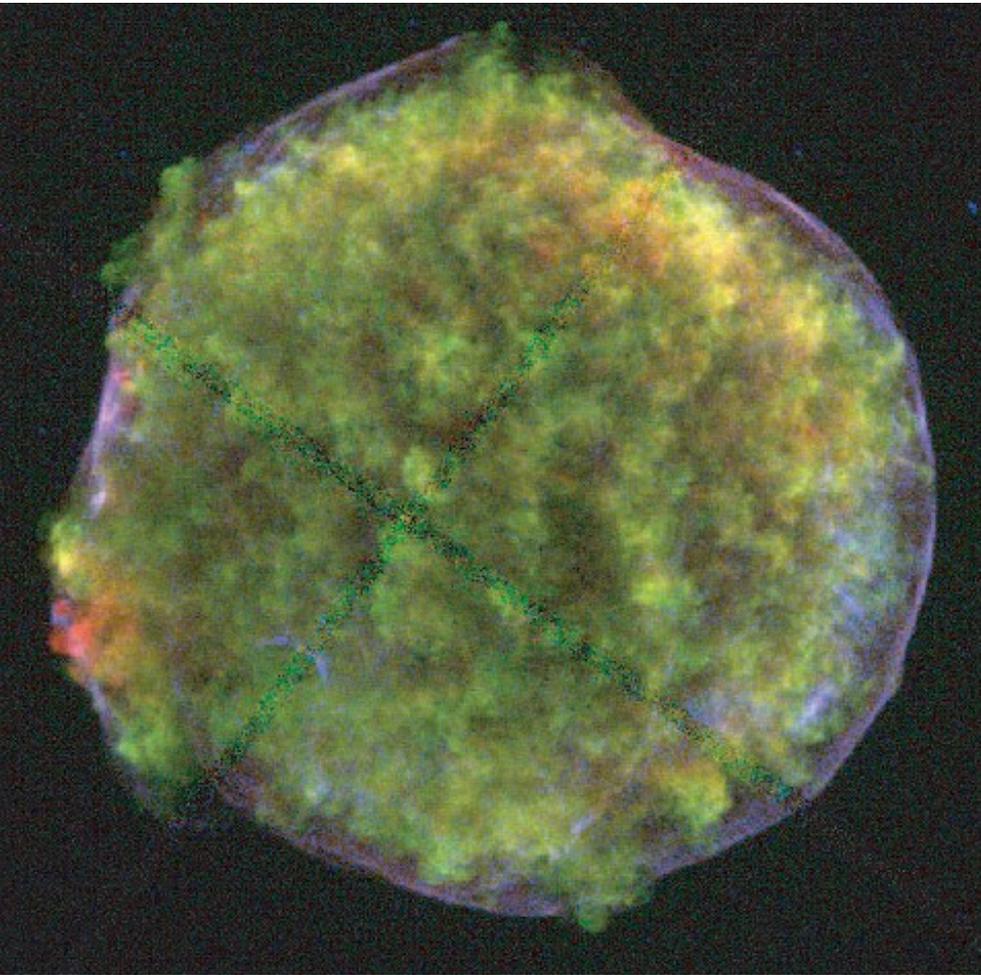
Гамма- и рентгеновские наблюдения остатков сверхновых



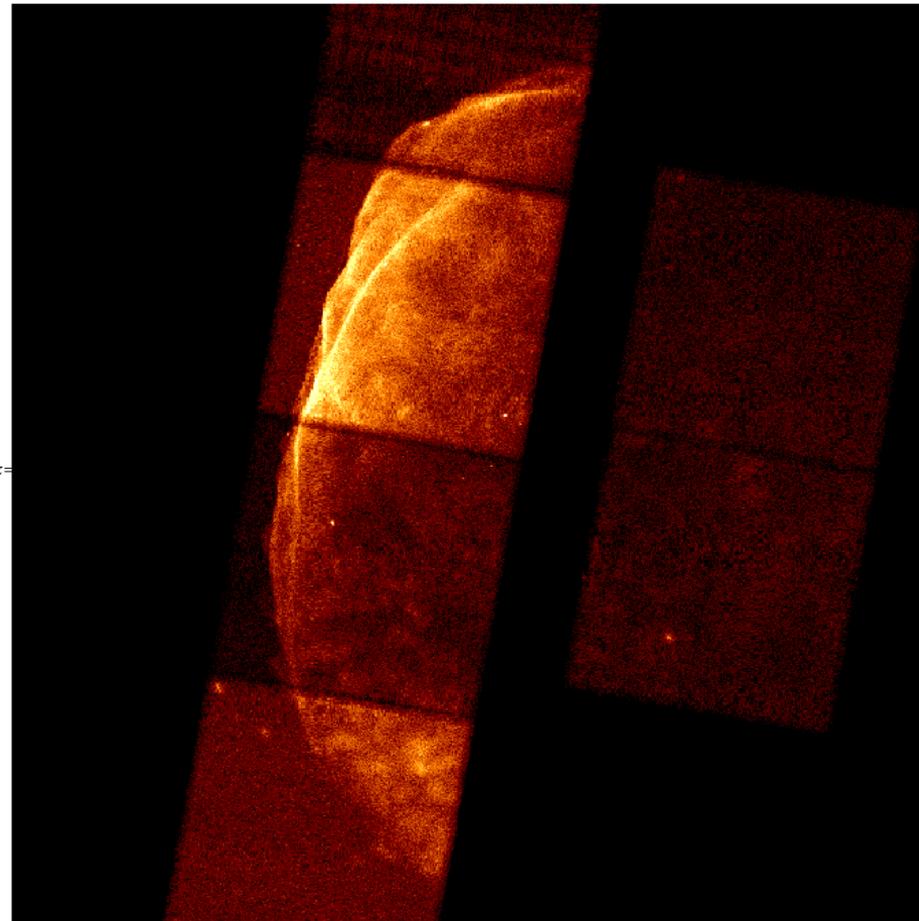
Независимо от интерпретации наблюдаемого гамма-излучения (обратный эффект Комптона или или π^0), в этом остатке эффективно ускоряются частицы до 100 ТэВ.

Рентгеновское, радио и гамма излучение зарегистрировано от всех исторических ОСН SN 1006, Тихо Браге, Кеплер, Кассиопея А

Тонкие рентгеновские волокна на периферии остатка сверхновой объясняются синхротронными потерями ускоренных электронов в усиленном магнитном поле 100-500 $\mu\text{Гс}$. Это поле намного больше межзвездного 3-10 $\mu\text{Гс}$.



ОСН 1572 (Тихо Браге)

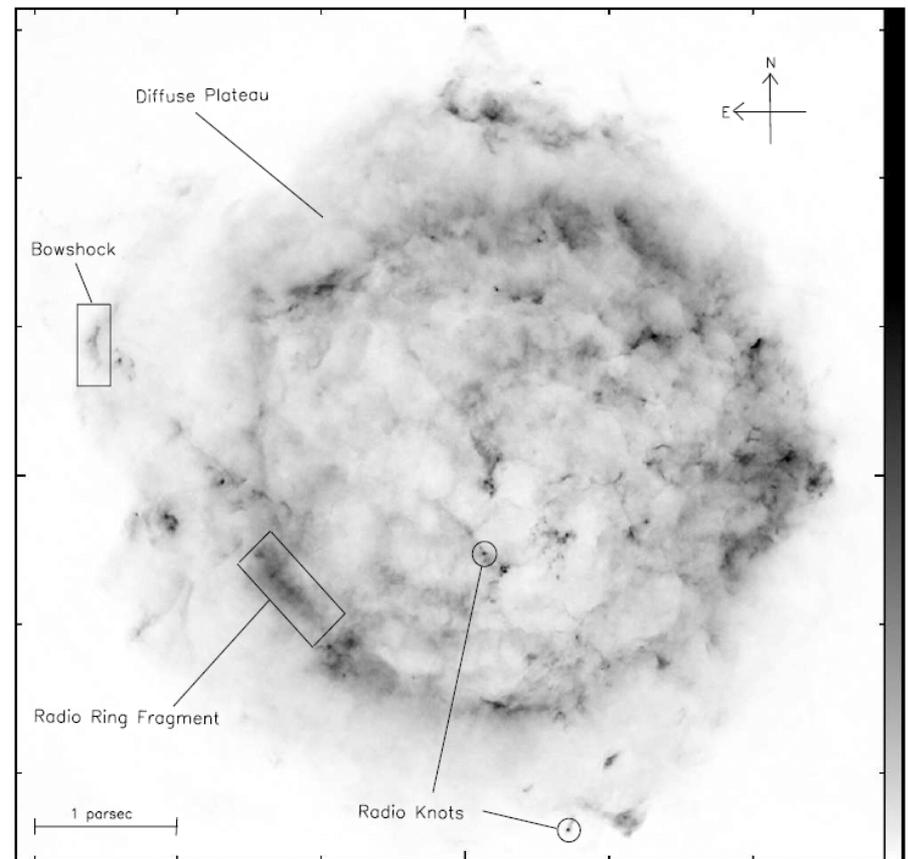
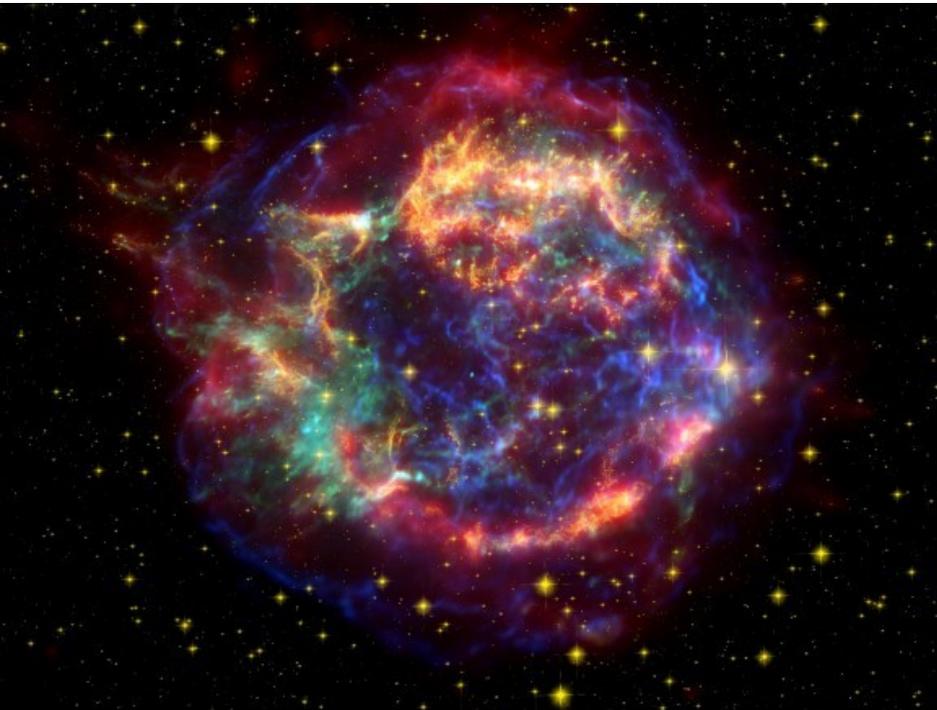


ОСН 1006

Радиоизображение Cas A

Atoyan et al. 2000

Рентгеновское изображение Cas A (Chandra)



Внутреннее кольцо радио- и рентгеновского излучения связаны с **обратной** УВ Cas A в то время как внешнее радио-плато и тонкие рентгеновские волокна связаны с **внешней** УВ.

Радиоизображение RX J1713.7-3046 (Lazendic et al. 2004)

Все рентгеновское
излучение нетепловое!

Рентгеновское изображение,
Acero et al. 2009

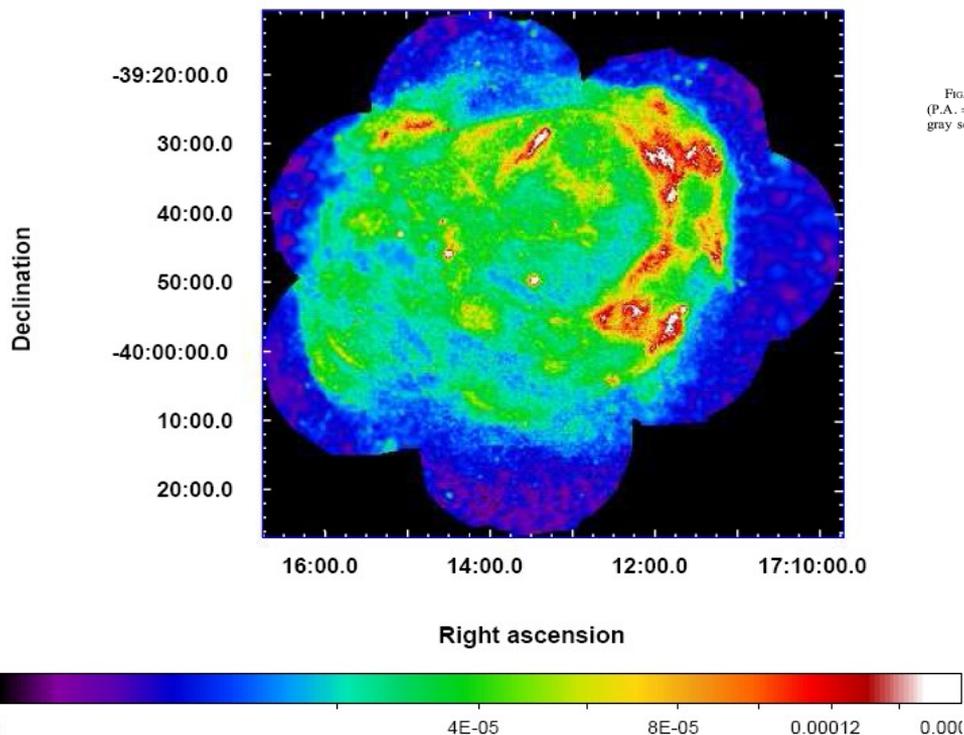


Fig. 1. EPIC MOS plus PN image in the 0.5-4.5 keV band. The units are $\text{ph}/\text{cm}^2/\text{s}/\text{arcmin}^2$ and the scale is square root. The image was adaptively smoothed to a signal-to-noise ratio of 10.

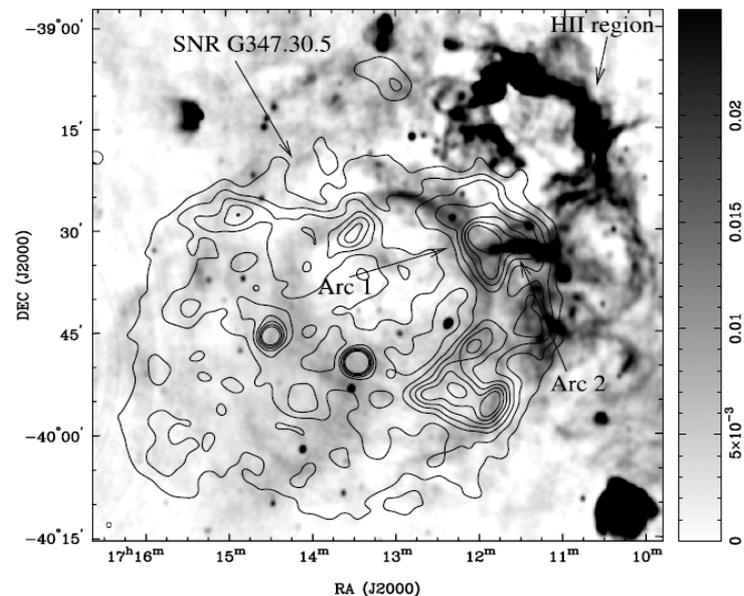


FIG. 5.—ATCA images of G347.3-0.5 and surrounding region at 1.4 GHz. The image was convolved with a Gaussian restoring beam of $46'' \times 36''$ (P.A. = -37°), shown by the tiny ellipse in the bottom left-hand corner. The image is overlaid with the *ROSAT* contours with the same levels as in Fig. 1. The linear gray scale is in units of $Jy \text{ beam}^{-1}$.

Внутреннее кольцо
рентгеновского и
радиоизлучения вероятно
производится
электронами,
ускоренными на обратной
УВ.

Самый молодой в нашей Галактике ОСН G1.9+0.3 (T~100 лет)

Borkowski et al. 2010

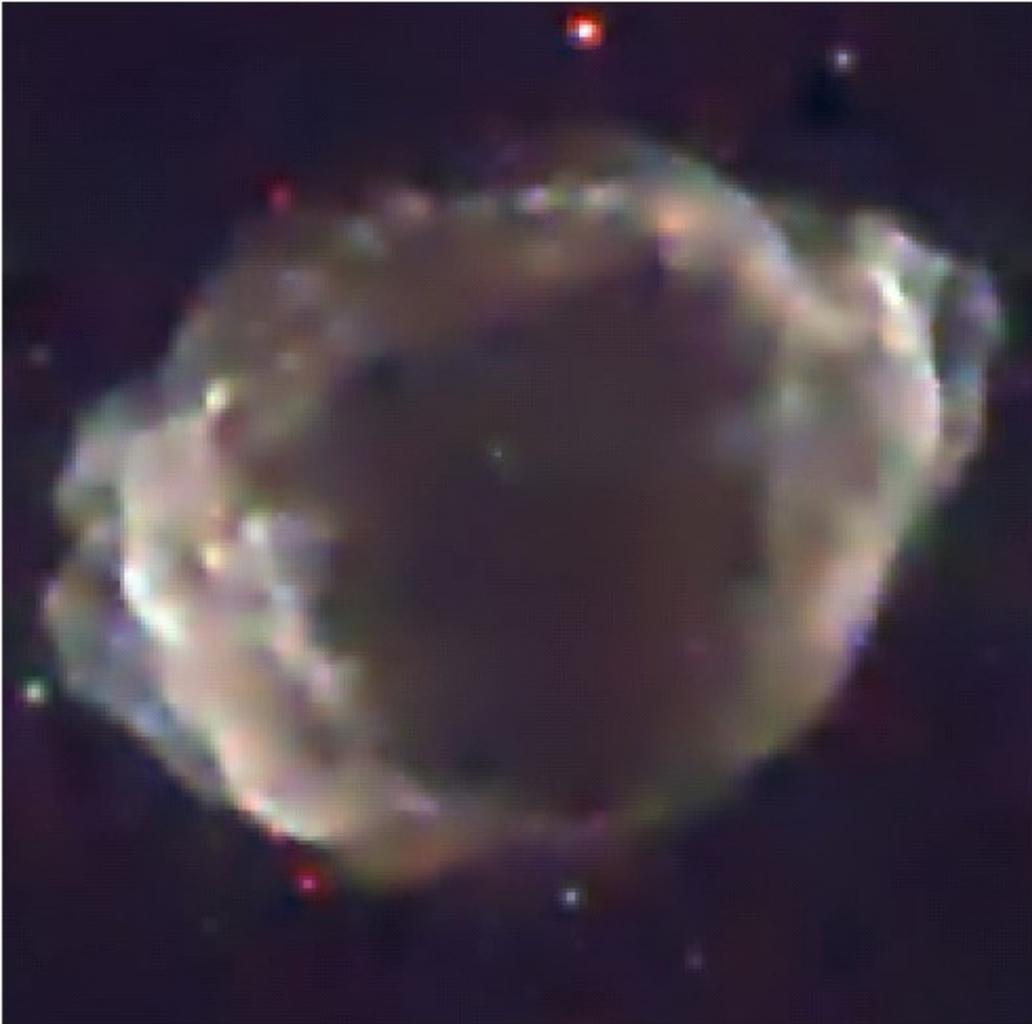


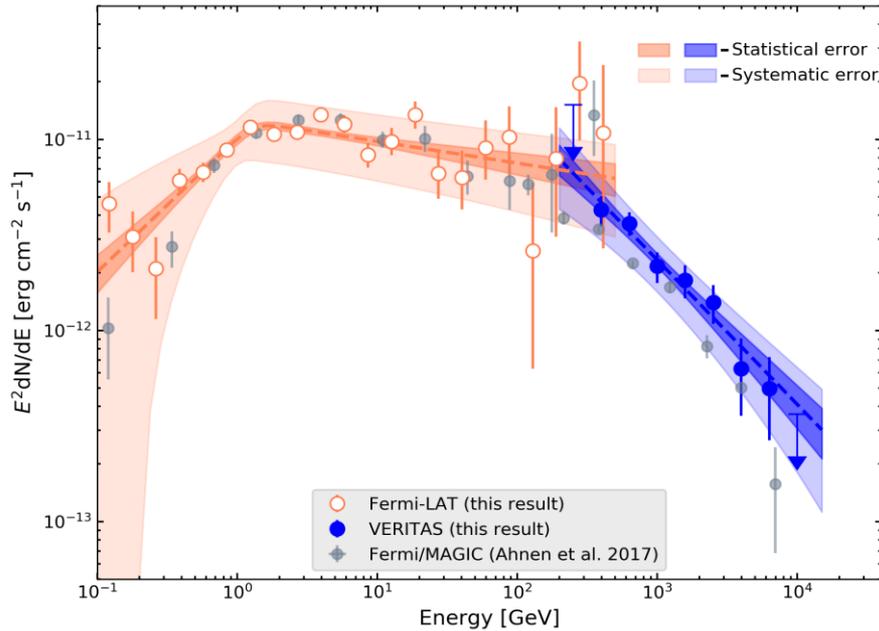
Figure 1. *Chandra* image of G1.9+0.3. Red, 1–3 keV; green, 3–4.5 keV; and blue, 4.5–7.5 keV. Image size is 127'' × 121''.

Young SNRs in denser medium

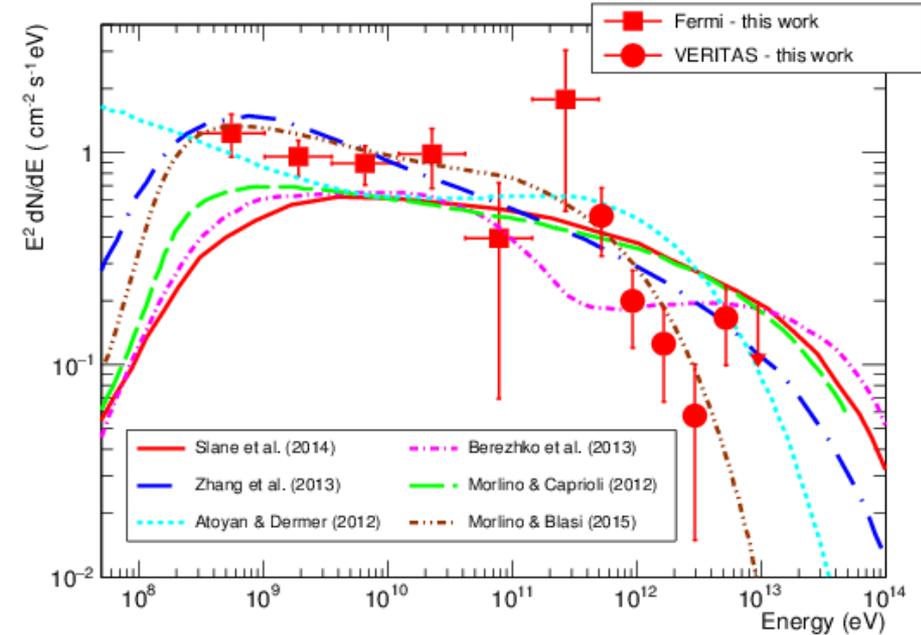
Cas A $T=350$ yr

$n_H \sim 0.3-1 \text{ cm}^{-3}$

Tycho $T=450$ yr



Abeysekara et al. 2020



Archambault et al. 2017

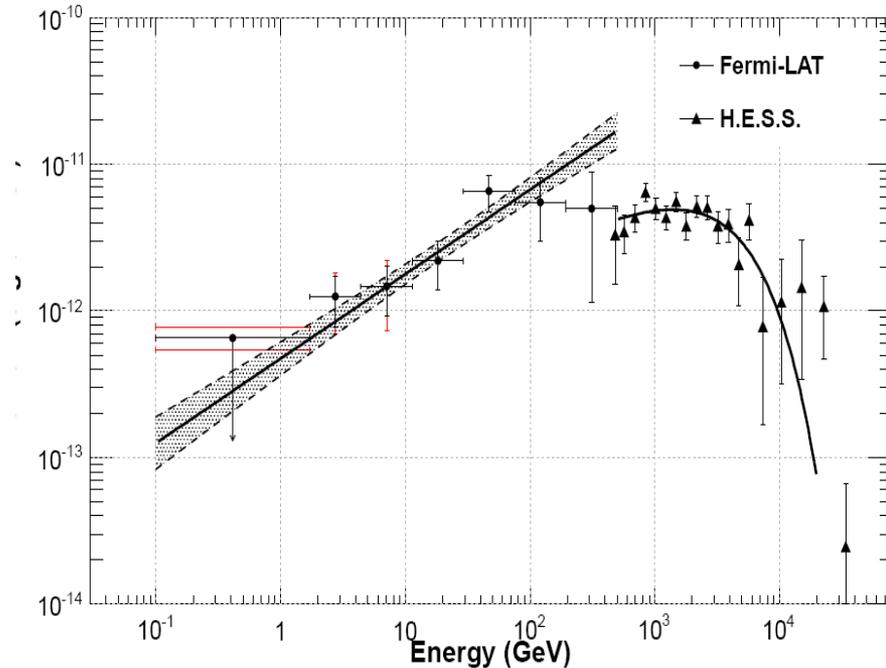
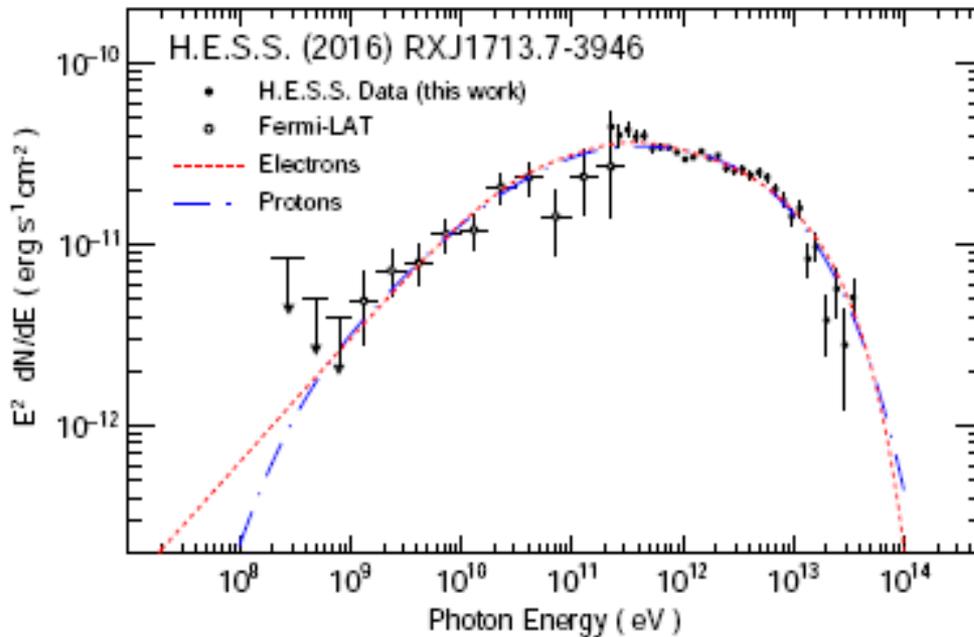
Hadronic origin of gamma-emission, spectral breaks at $E_b \sim 0.3-1$ TeV are observed. **The bad accelerators** at multi-TeV energies of protons.

Young SNRs in low density medium (wind blown bubbles)

RX J1713.7-3946

$n_H \leq 0.1 \text{ cm}^{-3}$

RCW86



Abdalla et al. 2017

$T \sim 1600 \text{ yr}$

Ajello et al. 2016

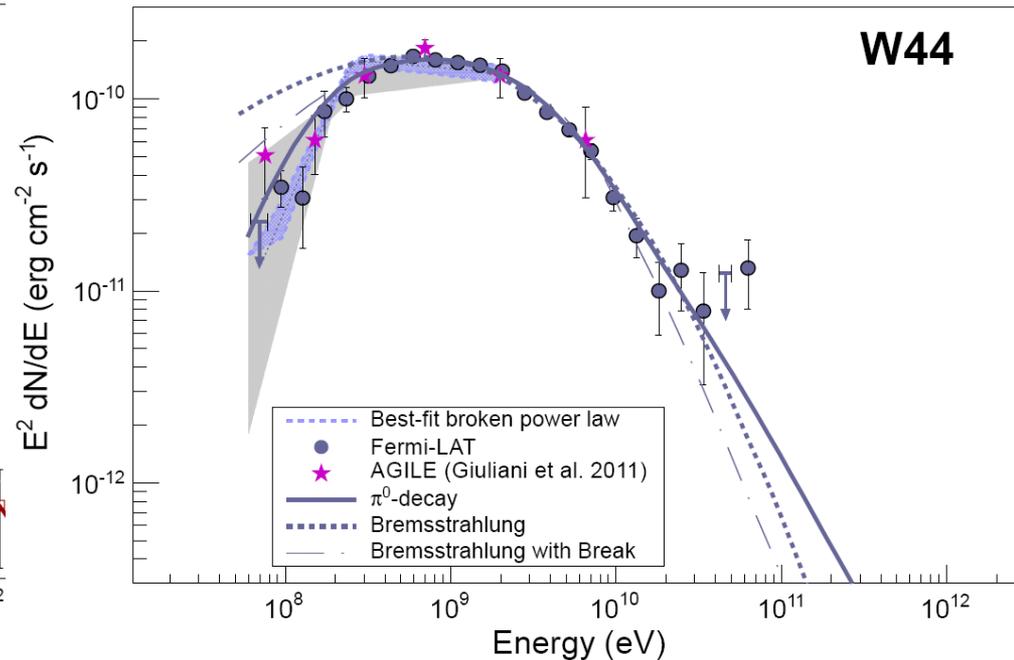
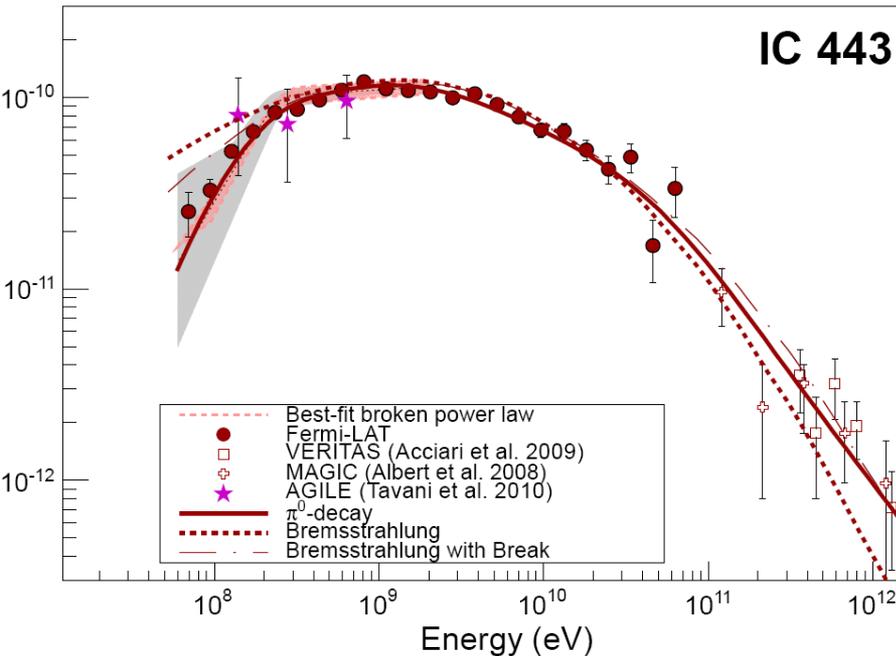
$T \sim 2000 \text{ yr}$

Probably the **leptonic** origin of gamma emission, however **hadronic** gamma rays from multiple small compact clouds are not excluded. In both cases protons are accelerated up to energies $\sim 100 \text{ TeV}$

Old SNRs (T > 10⁴ yr) in the dense medium

(Ackermann et al. 2013)

$$n_H > 1 \text{ cm}^{-3}$$



Old SNRs show gamma-ray spectra with steeper parts or **cut-offs**. TeV protons are not accelerated at present.

$E_{\text{max}} \sim 100$ GeV in IC443 and $E_{\text{max}} \sim 10$ GeV in W44. Probably because of **neutral damping** of MHD waves generated by accelerated particles.

The spectral shape at $E < 1$ GeV favors a hadronic origin of gamma-emission.

Оценка энергии «колена» для квазипараллельных ударных волн (нерезонансная потоковая неустойчивость Белла на ударной волне с эффективным ускорением частиц)

Однородная среда

$$E_{\text{knee}} = 0.8 \text{ PeV} \left(\frac{E_{SN}}{10^{51} \text{ erg}} \right) \left(\frac{M_{ej}}{M_{\text{solar}}} \right)^{-2/3} n_H^{1/6}$$

ОСН типа Ia, II P ($M < 12 M_{\text{solar}}$)

Звездный ветер

$$E_{\text{knee}} = 2 \text{ PeV} \left(\frac{E_{SN}}{10^{51} \text{ erg}} \right) \left(\frac{M_{ej}}{M_{\text{solar}}} \right)^{-1} \left(\frac{\dot{M}}{10^{-4} M_{\text{solar}} \text{ yr}^{-1}} \right)^{1/2} \left(\frac{u_w}{10 \text{ km/s}} \right)^{-1/2}$$

ОСН типа IIb, IIc

В 10 раз больше для Бомовской диффузии в усиленном магнитном поле

В 5 раз меньше для ударной волны на которой 10% энергии переходит в ускоренные частицы

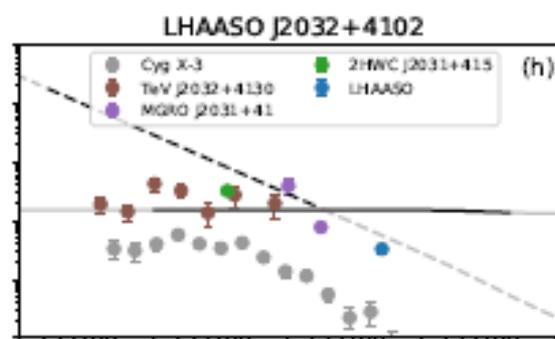
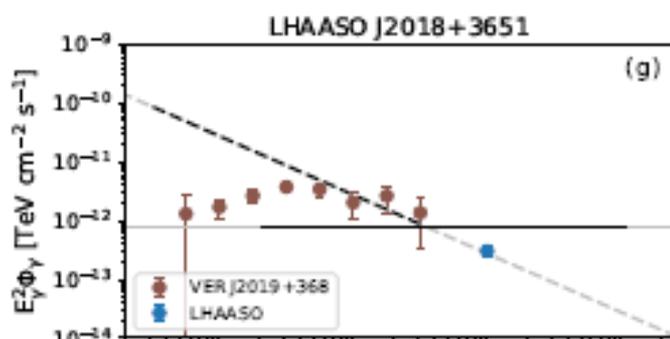
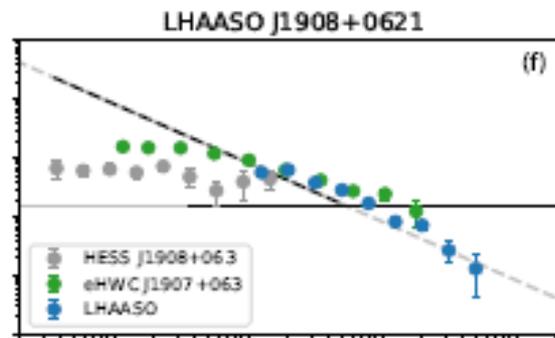
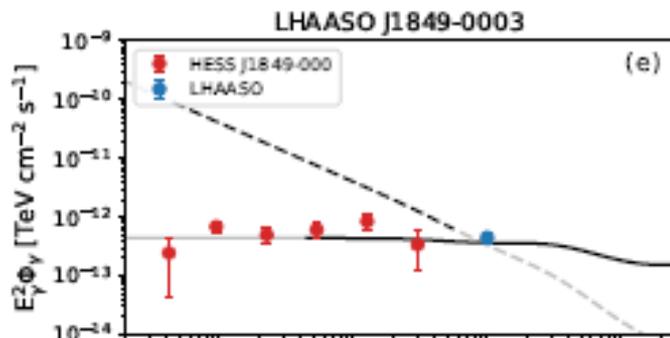
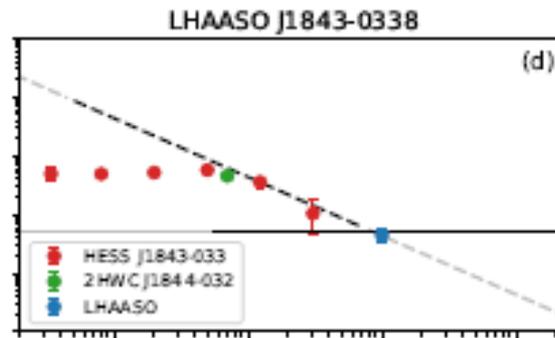
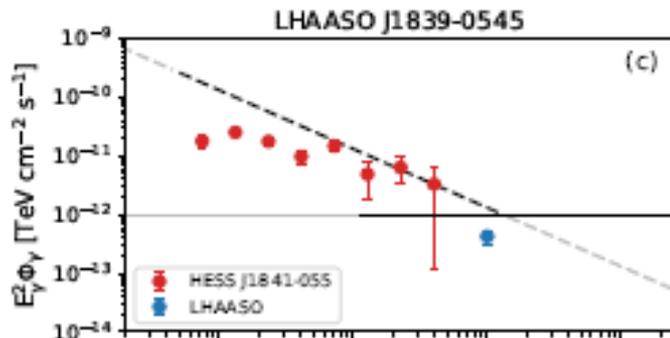
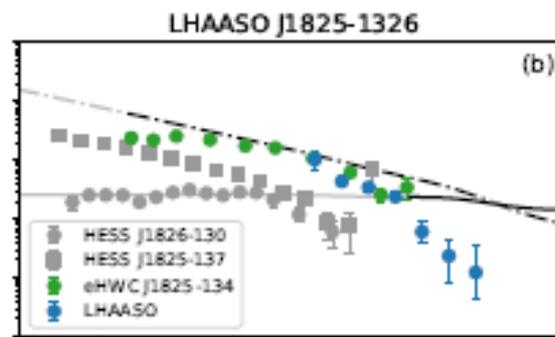
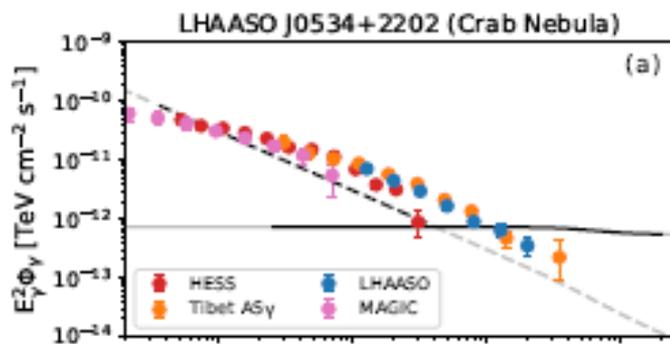
List of PeVatrons ($E_\gamma > 100$ TeV)

(Cristofari 2021)

Table 1. List of known Galactic pevatrons as of May 2021. This list is likely to be lengthened soon due to active ongoing detection campaigns.

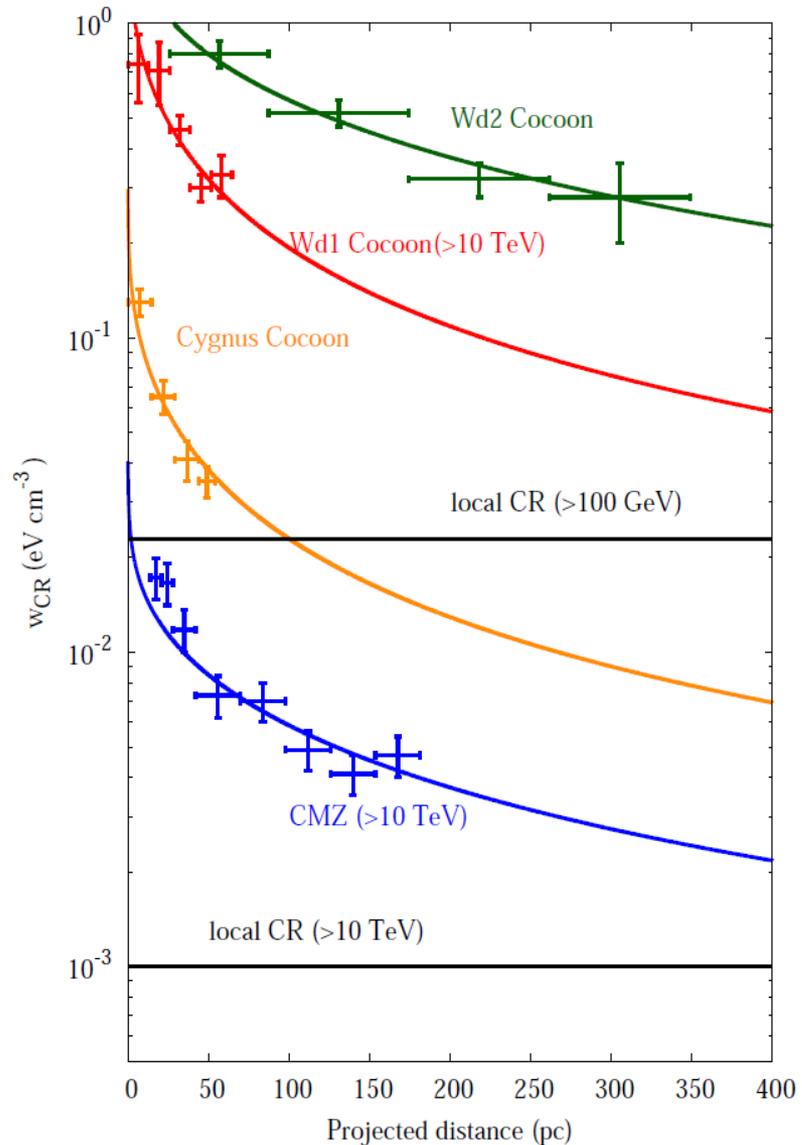
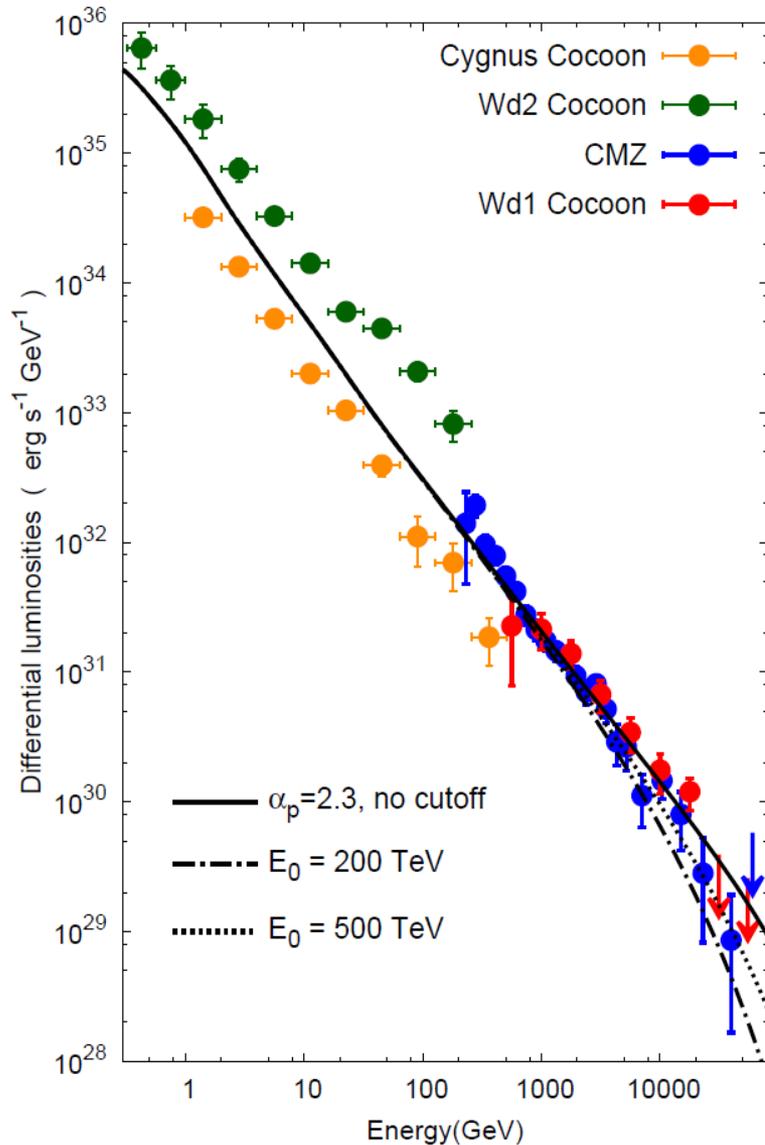
Source	Possible Association	Reference
HESS J1745-290	Sagittarius A*/Galactic center	[39]
Crab/LHAASO J0534+2202	PSR J0534+2200	[26,28,41,107]
LHAASO J1825-1326/2HWC J1825-134	PSR J1826-1334/PSR J1826-1256	[28,134]
LHAASO J1839-0545/2HWC 1837-065	PSR J1837-0034/PSRJ1838-0537	[28,40]
LHAASO J1843-0338/2HWC J1844-032	SNR G.28.6-0.1	[28,40]
LHAASO J1849-0003	PSR J1849-0001/W43	[28]
LHAASO J1908+0621/MGRO 1908+06/ 2HWC 1908+063	SNR G40.5-0.5/PSR 1907+0602/PSR 1907+0631	[28,40]
LHAASO J1929+1745	PSR J1928+1746/PSR1930+1852/SNR G54.1+0.3	[28]
LHAASO J1956+2845	PSR J1958+2846/SNR G66.0-0.0	[28]
LHAASO J2018+3651	PSR J2021+3651/Sh 2-104 (HII/YMC)	[28]
HWC J2019+368		[40]
LHAASO J2032+4102/2HWC J2031+415	Cygnus OB2/PSR 2032+4127/SNR G79.8+1.2	[28,135]
LHAASO J2108+5157		[28]
LHAASO J2226+6057	SNR G106.3+2.7/PSR J2229+6114	[28,69]
HESS J1702-420A	SNR G344.7-0.1/PSR J1702-4128	[136,137]

LHAASO Pevatrons (Huang and Li 2021)

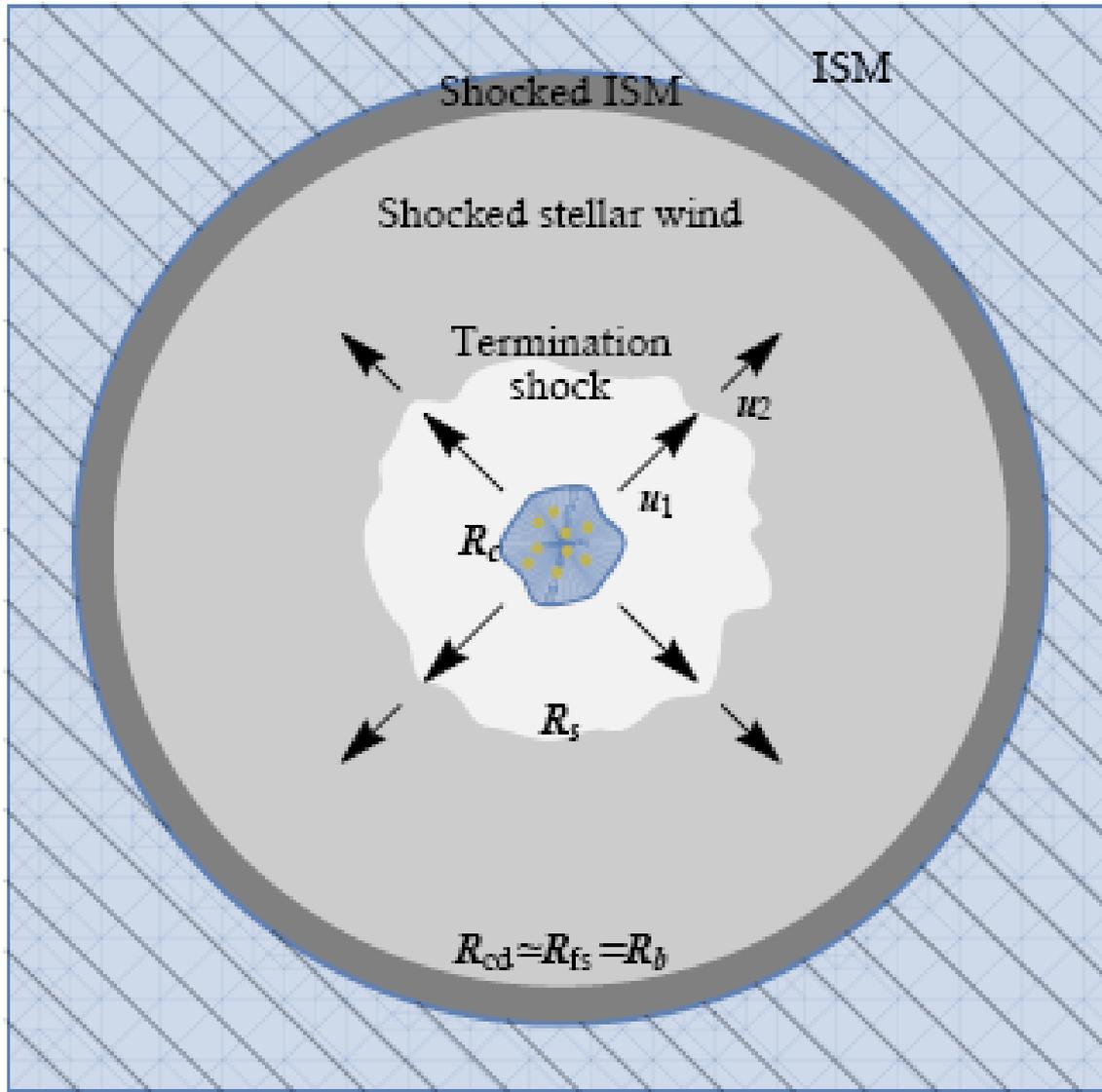


Вероятно,
большая часть —
пульсарные
туманности, то
есть ускорение
электронов и
позитронов.

Пэватроны в компактных звездных скоплениях (Aharonian et al. 2018)



Ускорение на внутренней ударной волне компактного звездного скопления (Morlino et al 2021)



Более благоприятная ситуация по сравнению с остатком сверхновой – ускоренным частицам труднее выйти из системы. Кроме того ожидается высокий уровень МГД турбулентности как внутри, так и вне ударной волны. Возможно ускорение до ПэВ-ных энергий. Долгоживущий ускоритель (порядка миллиона лет).

Численные результаты эволюции ОСН типа IIР и Ia в межзвездной среде (Zirakashvili & Ptuskin 2022)

IIР (W44)

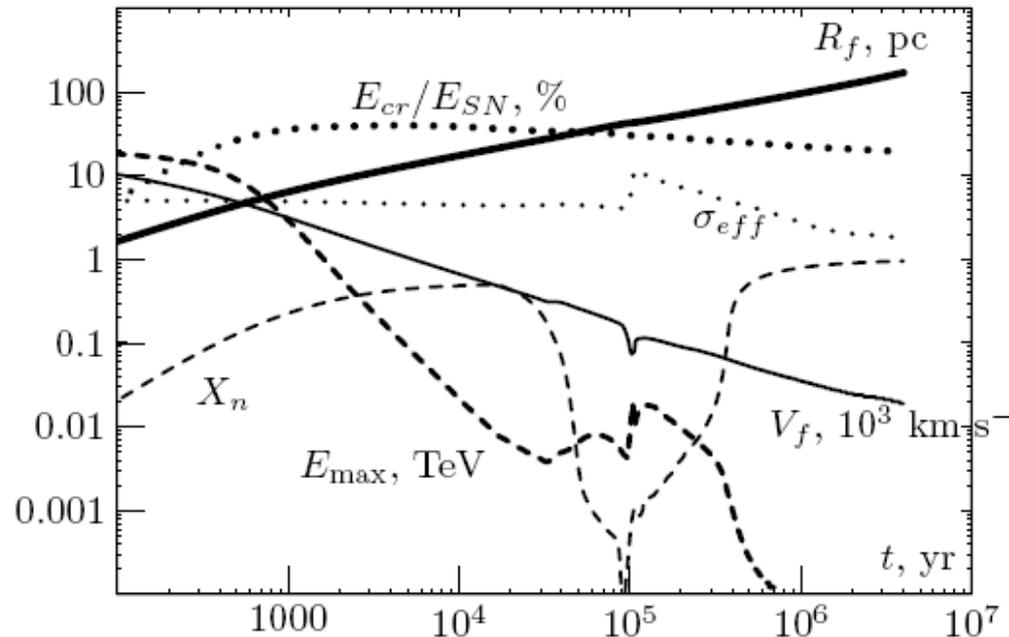
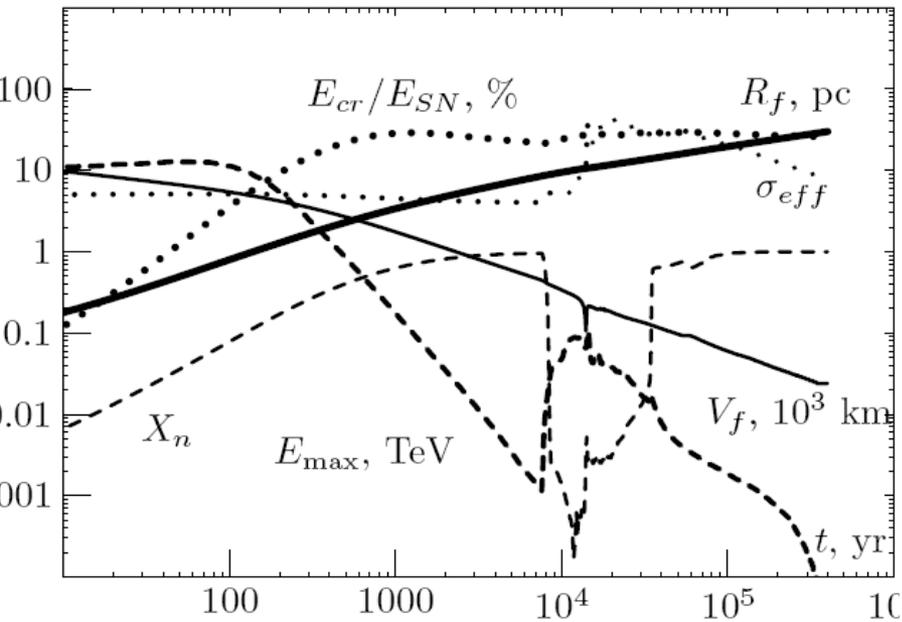
$$n_H = 7.0 \text{ cm}^{-3} \quad B_0 = 5 \text{ } \mu\text{G}$$

$$M_{ej} = 10 M_{\text{solar}} \quad E_{SN} = 1.8 \cdot 10^{51} \text{ erg}$$

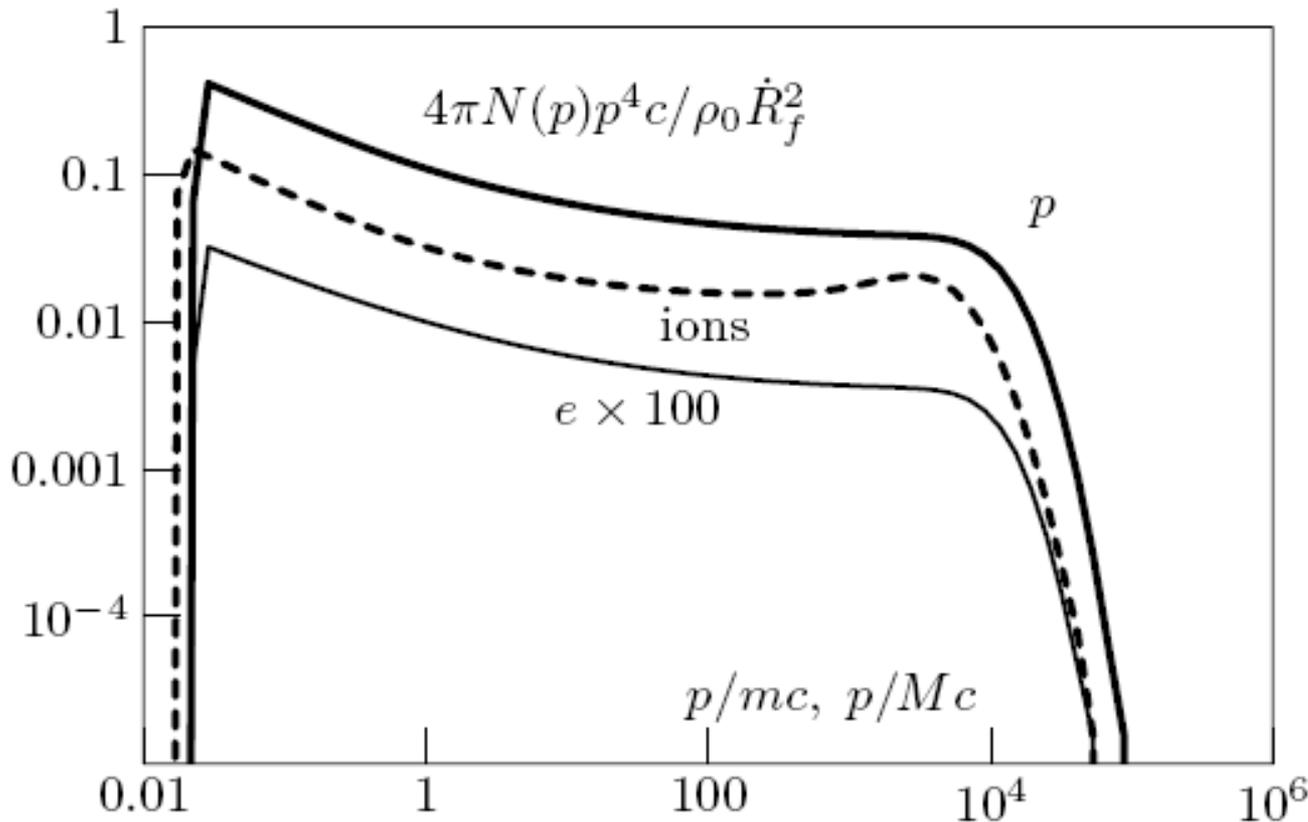
Ia (Tycho)

$$n_H = 0.2 \text{ cm}^{-3} \quad B_0 = 3 \text{ } \mu\text{G}$$

$$M_{ej} = 1.4 M_{\text{solar}} \quad E_{SN} = 1.2 \cdot 10^{51} \text{ erg}$$



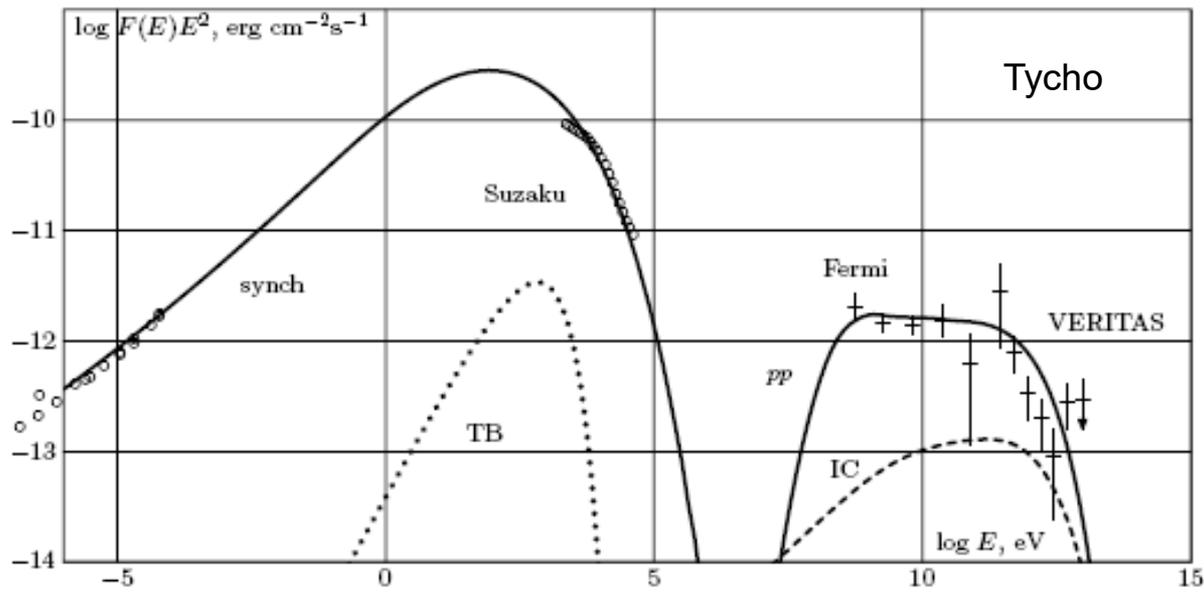
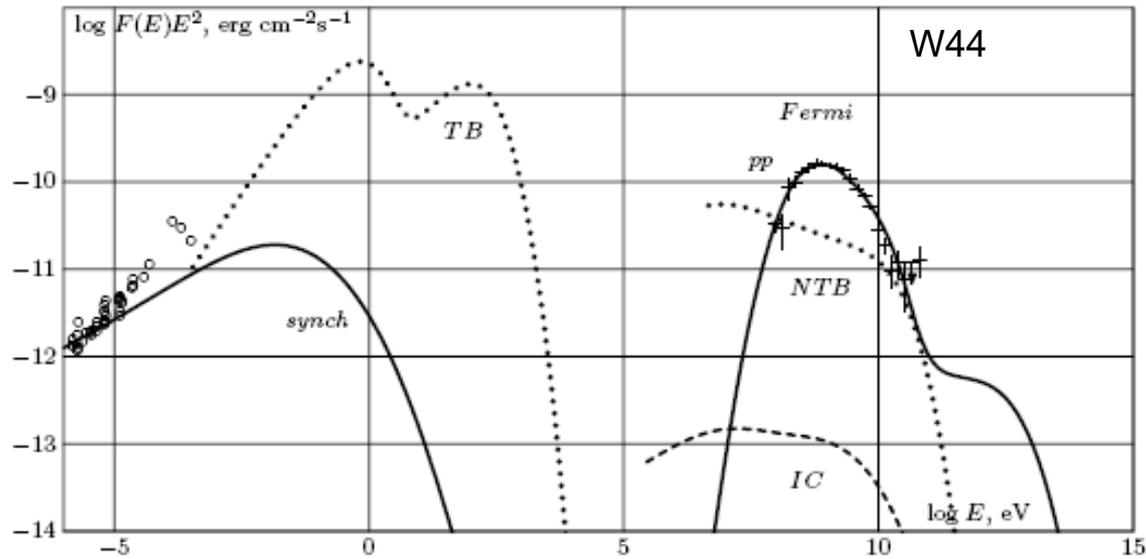
Спектры в ОСН Тихо Браге (T=340 лет)



Протоны и электроны инжектируются на внешней УВ, ионы инжектируются на обратной УВ

Альфвеновский дрейф за фронтом приводит к более мягким спектрам.

Моделирование электромагнитного излучения ОСН W44 и 1572 (Тихо Браге)



Достаточно ли ОСН типа IIР для
объяснения происхождения КЛ при
 $E < 100$ ТэВ? Да

$$L_{\text{SNR}} \sim E_{\text{SN}}/T \sim 10^{39} \text{ erg/s}$$

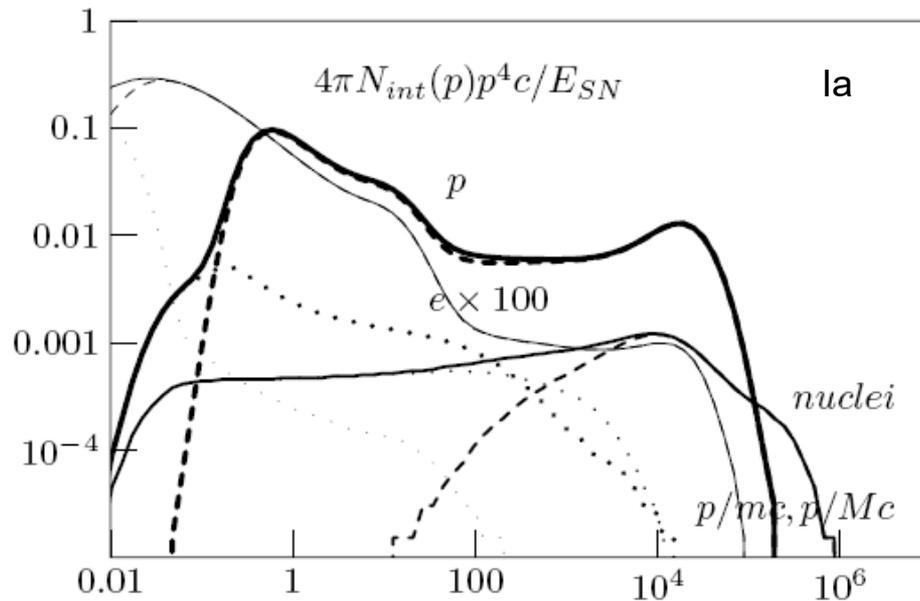
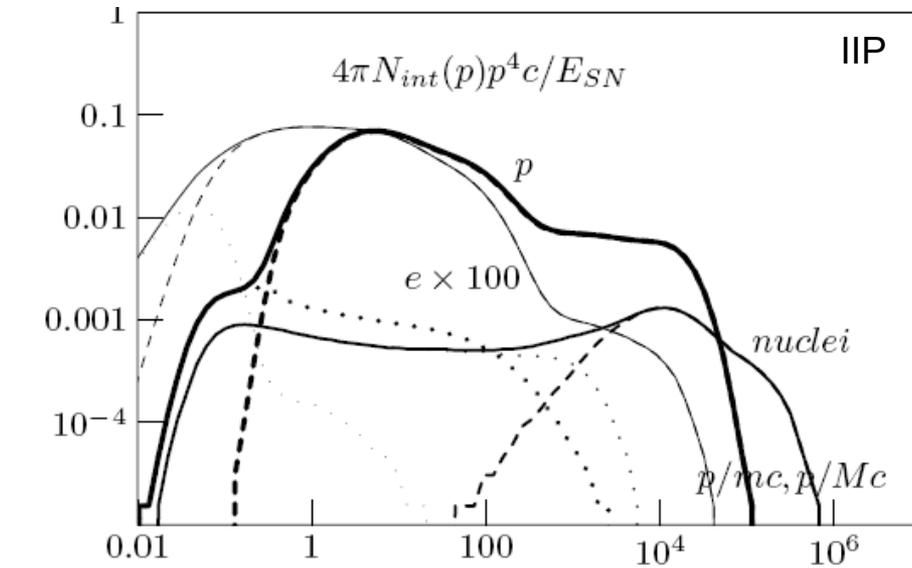
Достаточно 100 таких ОСН в Галактике для
объяснения энергетики источников КЛ.

Fermi LAT зарегистрировал около 20 самых
ярких и близких ОСН этого типа с
 $F > 10^{-11} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

$$E_{rad} = 200 \text{ GeV} \left(\frac{\eta_{esc}}{0.01} \right) n_H^{9/22} \left(\frac{E_{SN}}{10^{51} \text{ erg}} \right)^{5/11}$$

Максимальная энергия КЛ при переходе ОСН на радиационную стадию – энергия “hardening”

Спектры частиц, произведенных в ОСН



Электроны и протоны, ускоренные на внешней ударной волне уже покинули остаток, их спектры - спектры источников КЛ в Галактике

Результаты PAMELA

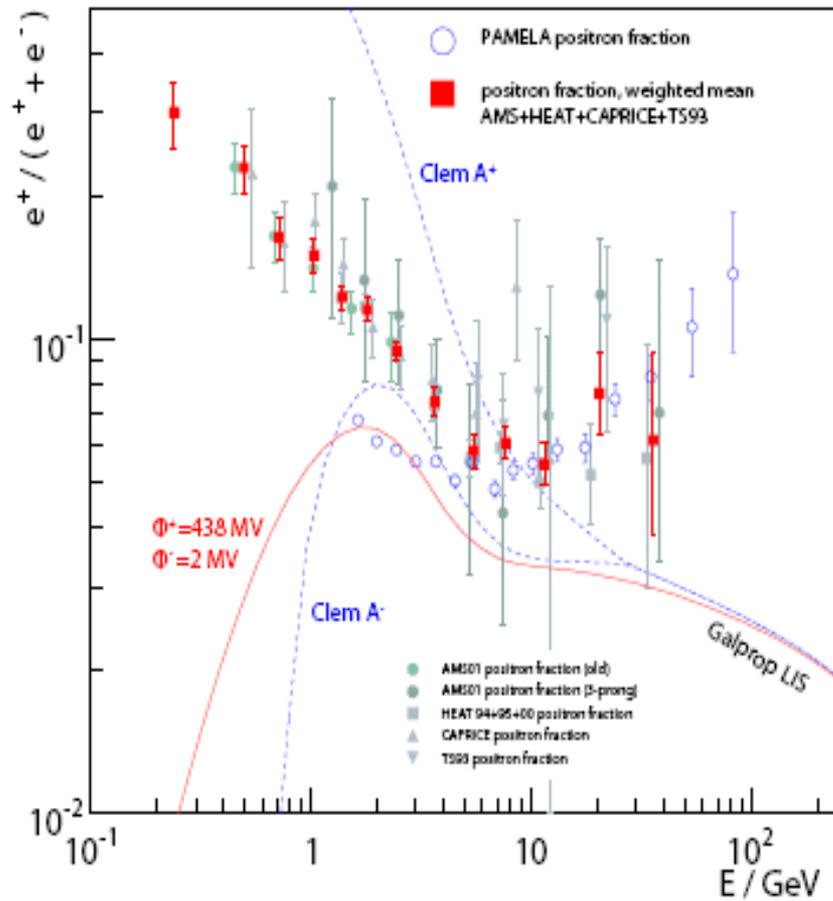
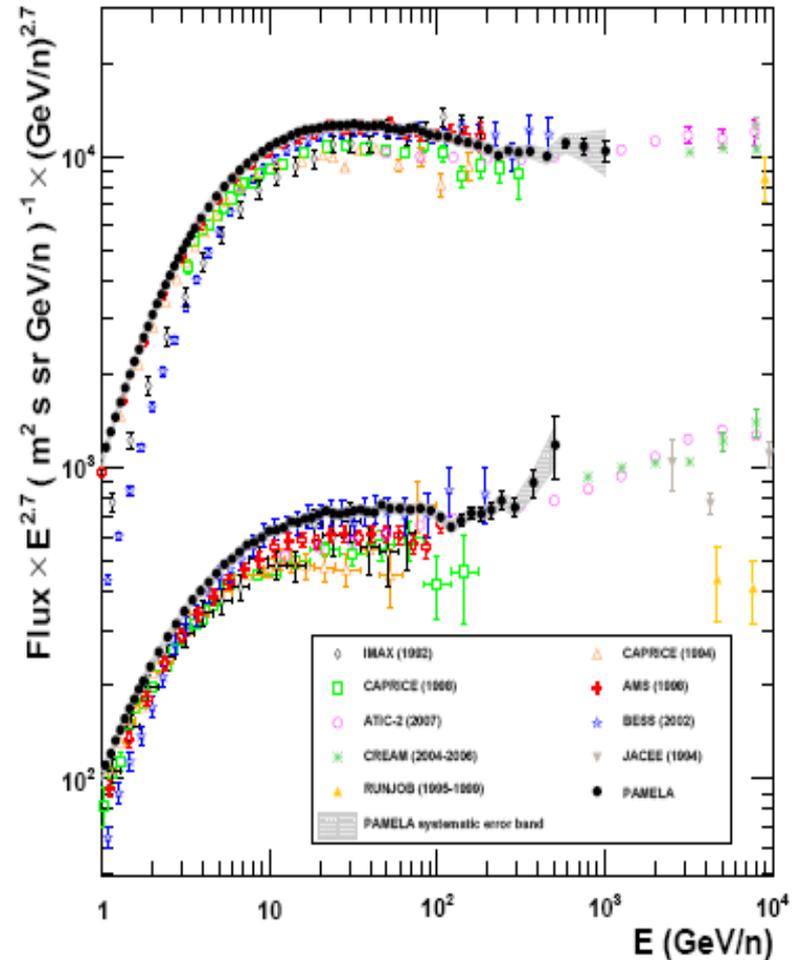


Fig. 1. Positron fraction data compared to predictions for the low-energy behaviour, based on the local interstellar spectrum (LIS) obtained in the conventional Galprop model. Data are from PAMELA [5], AMS-01 [3], [4], HEAT [2], CAPRICE [13] and TS-93 [14]. The weighted mean of the earlier measurements, taken during comparable solar conditions, is included for clarity. The solid line is based on charge-sign dependent modulation parameters in the force-field approximation formula (1), the dashed lines are obtained in the empirical model of Clem et al. [15], as described in the text.



Proton and helium absolute fluxes measured by PAMELA above 1 GeV/n

Наблюдается
в спектрах и
первичных и
вторичных
ядер
(AMS Coll. 2018)

(AMS Coll. 2016)

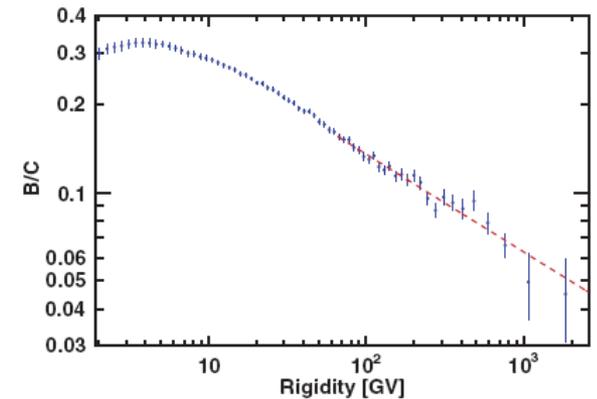
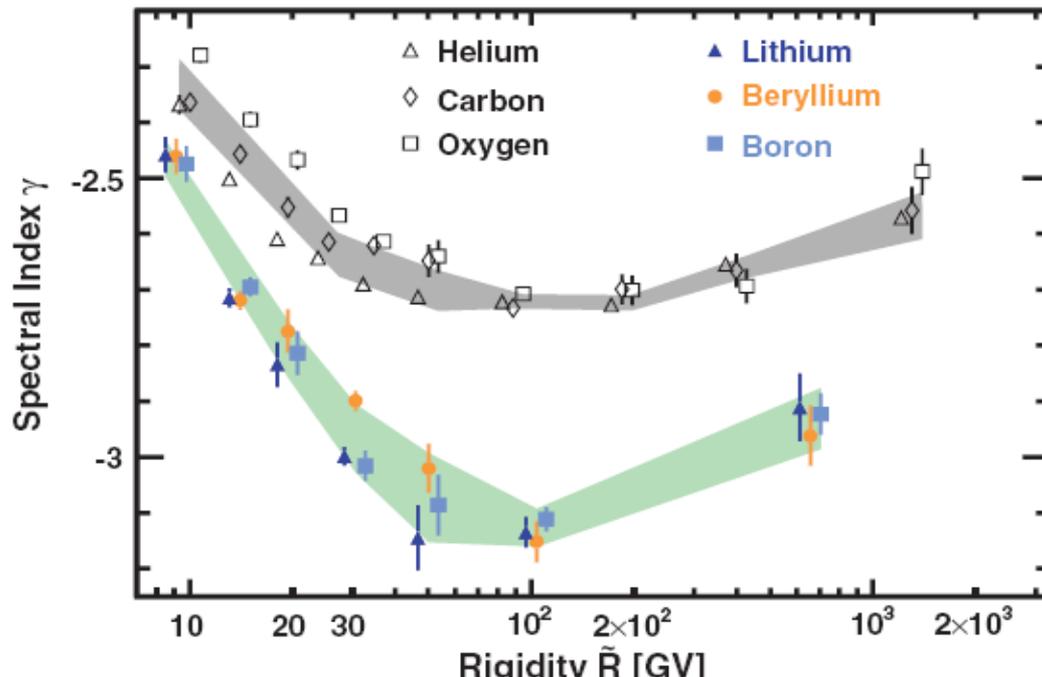
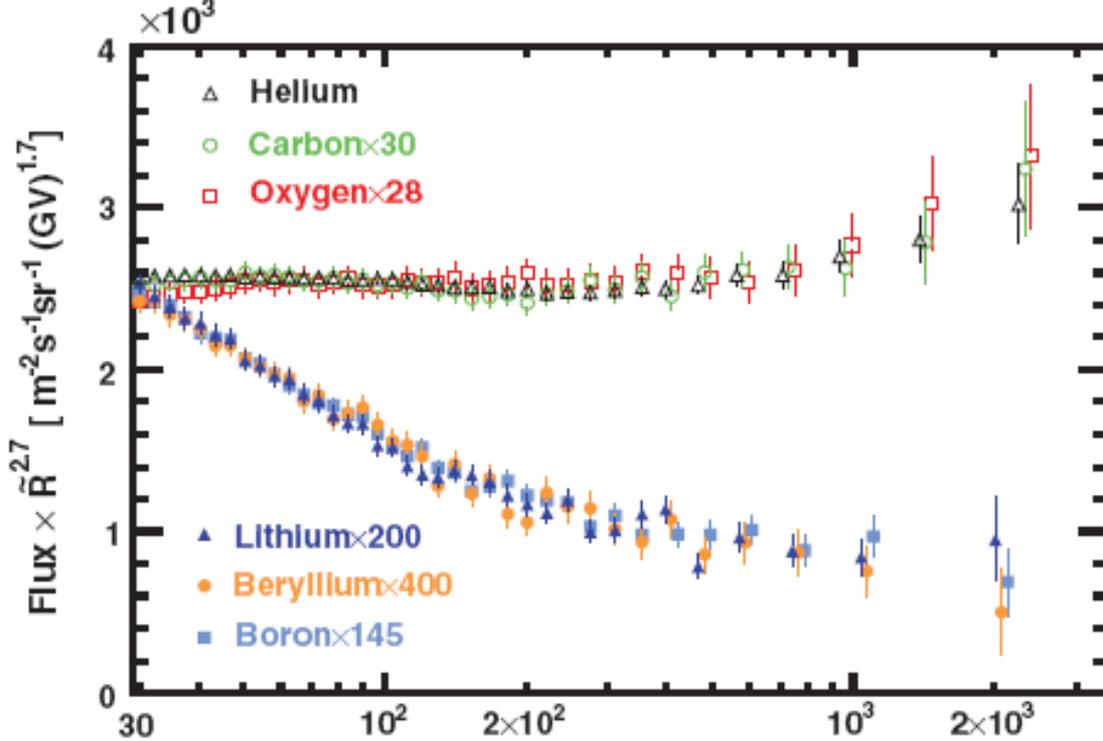


FIG. 1. The AMS boron to carbon ratio (B/C) as a function of rigidity in the interval from 1.9 GV to 2.6 TV based on 2.3 million boron and 8.3 million carbon nuclei. The dashed line shows the single power law fit starting from 65 GV with index $\Delta = -0.333 \pm 0.014(\text{fit}) \pm 0.005(\text{sys})$.

Ускорение частиц в релятивистских выбросах (джетах) активных галактических ядер

Cygnus A
(Steenbrugge,
Blundell 2008)

$$E_{\max} = 1.7 \cdot 10^{19} \text{eV} Z\beta^{1/2} \left(\frac{L_{\text{mag}}}{10^{44} \text{erg s}^{-1}} \right)^{1/2}$$

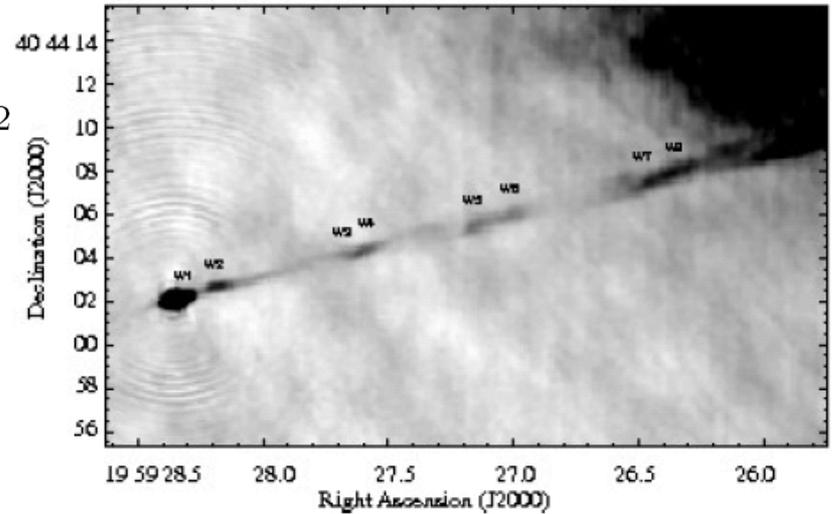


Figure 2. The inner jet of Cygnus A observed at 5 GHz. Note the weak emission between W1 and W2 which extends about half way to W3. Thereafter, there are only hints of smooth emission between the jet knots, which become brighter from W7 onwards. The jet seems straight, but note the possible bend between W3 and W4. W7 and W8 are the first jet knots in what we call the 'outer jet'.

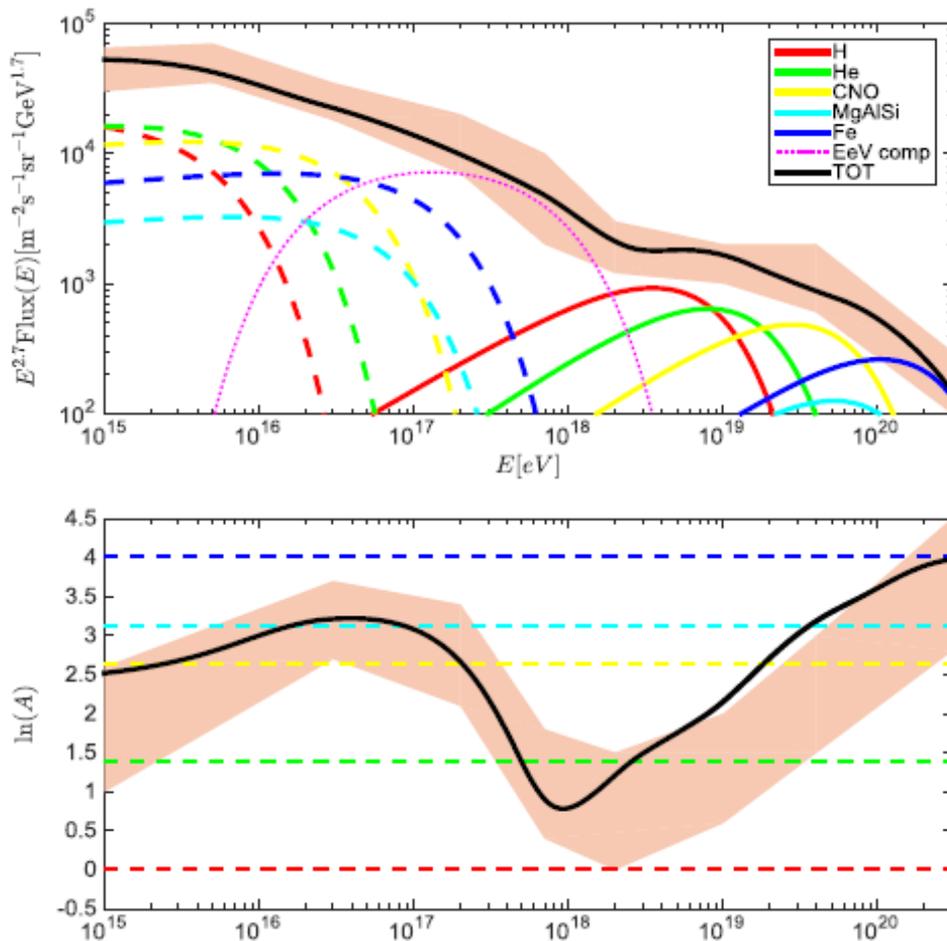
доускорение частиц,
попадающих в джет сбоку

Caprioli 2015



Фрикционное ускорение Бережко
1981

Espresso model (Caprioli 2015)



Космические лучи, произведенные сверхновыми той галактики, где находится джет, доускоряются в джете.

Выводы

- 1) Теория ускорения КЛ ударными волнами в ОСН находится в удовлетворительном согласии с наблюдениями.
- 2) Наблюдается достаточное для объяснения энергетики галактических КЛ количество старых ОСН, ярких в гамма-диапазоне.
- 3) Недостаточно большая максимальная энергия меньше 100 ТэВ для наиболее распространенных ОСН типа IIР. Более редкие ОСН типа Ibc, IIп могут ускорять КЛ до больших энергий. Не исключен вклад компактных звездных скоплений, пульсарных туманностей и сверхмассивной черной дыры в центре Галактики.
- 4) КЛ с энергиями больше 10^{18} эВ вероятно ускорятся во внегалактических объектах (гамма-всплески, активные ядра галактик и т.д.)