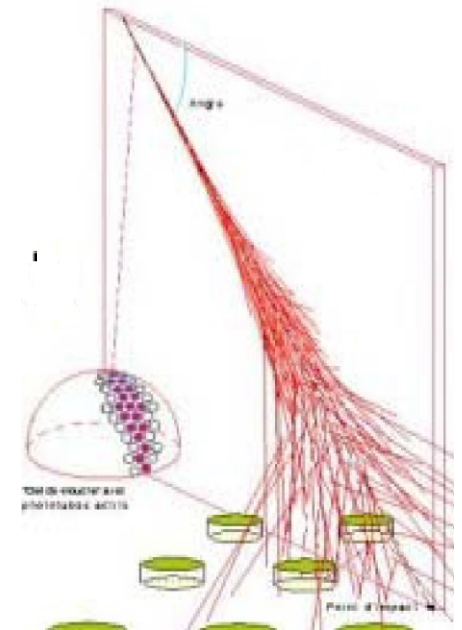
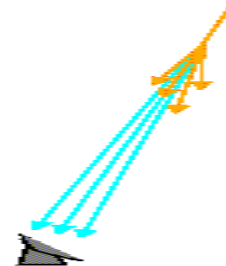
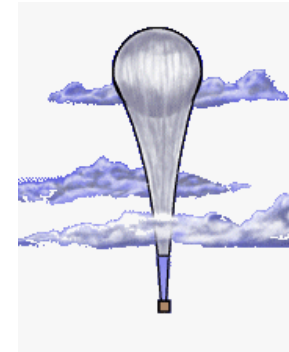
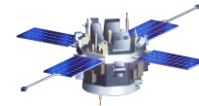
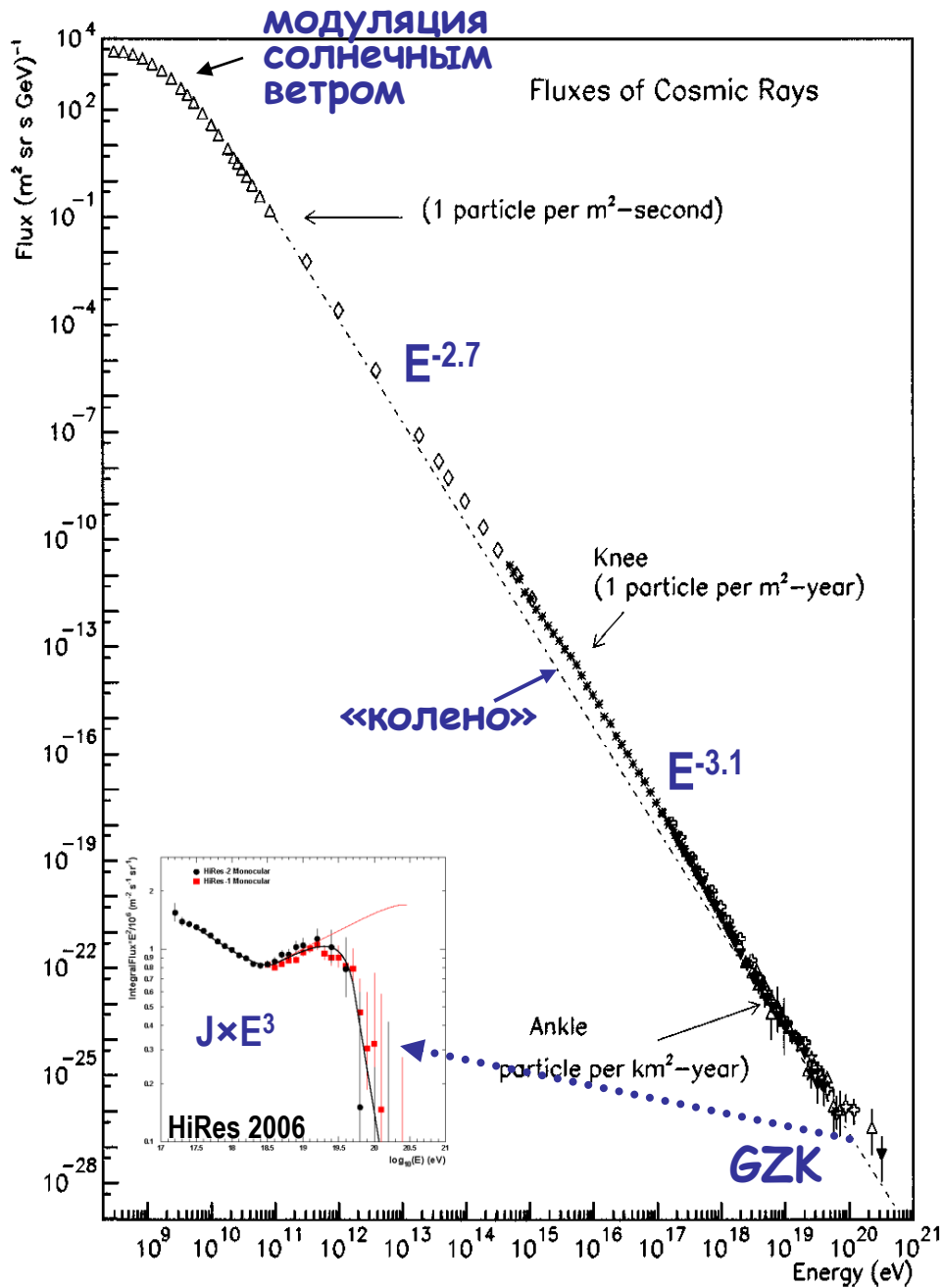


# Происхождение космических лучей

В.Н.Зиракашвили  
(ИЗМИРАН)

# Содержание

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



# Общая картина ускорения и распространения КЛ в Галактике

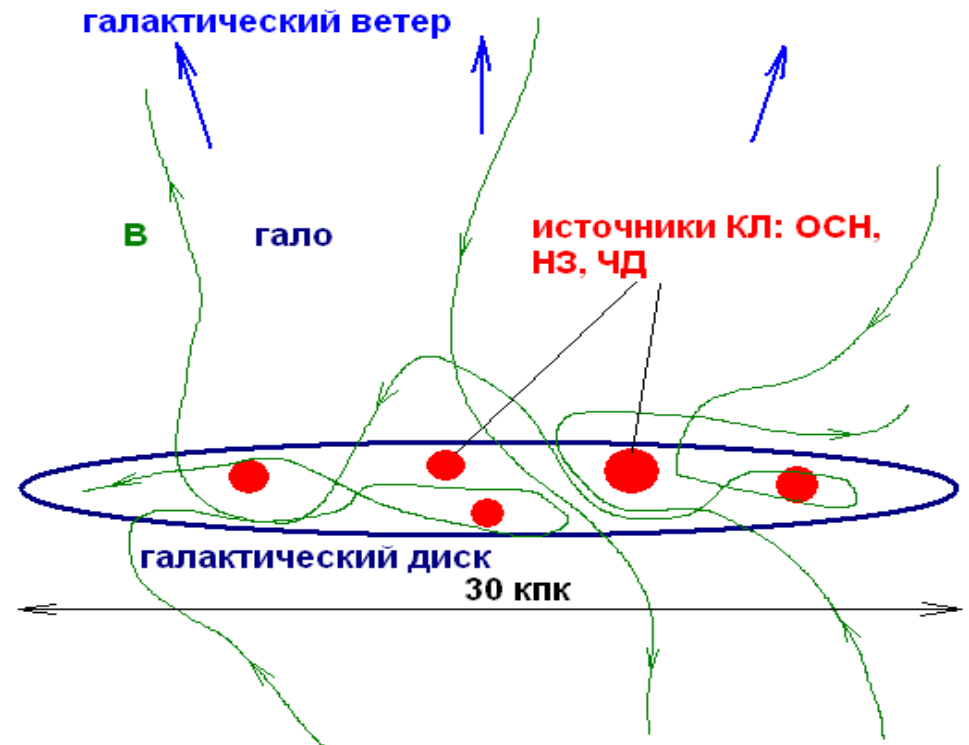
$$N(E) \sim Q(E)T(E)$$

Хим. состав КЛ  $\rightarrow$

$T_{\text{disk}} \sim 10$  млн. лет

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

или 10 % механической мощности сверхновых

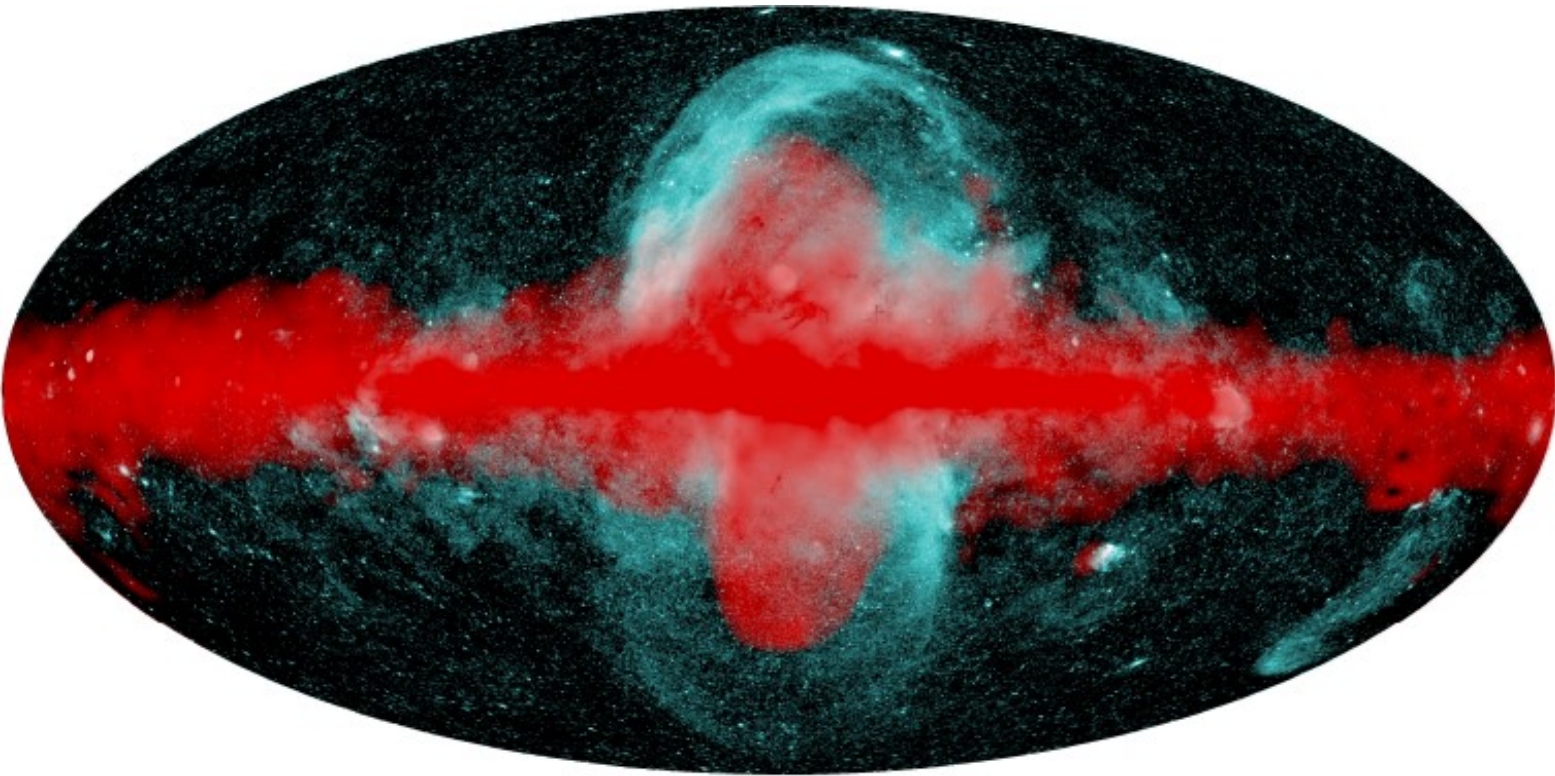


Сверхновые – наиболее вероятные источники КЛ  
(Гинзбург, Сыроватский 1963)

# Fermi and eRosita bubbles (Predehl et al. 2020)

Наиболее вероятно связаны с активностью  
сверхмассивной черной дыры

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



# Ускорение КЛ ударными волнами

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

Крымский 1977;  
Bell 1978

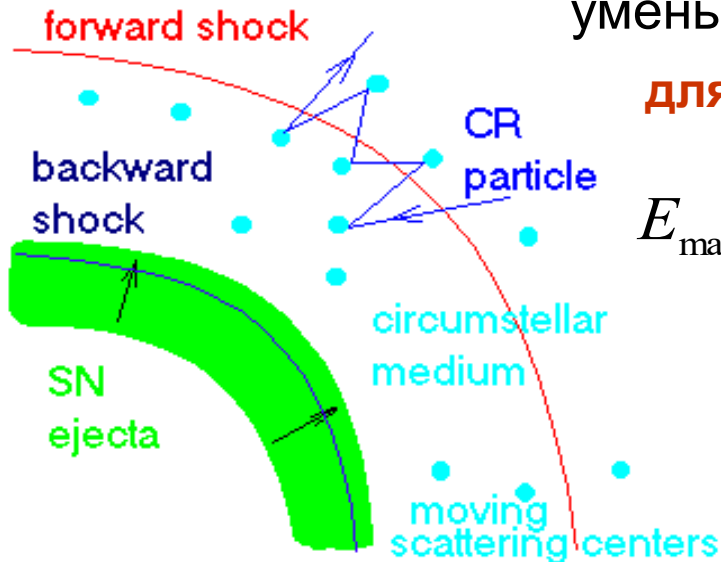
Максимальная энергия  $E_{\max}$  :  $D(E_{\max}) \sim 0.1 u_{\text{sh}} R_{\text{sh}}$

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

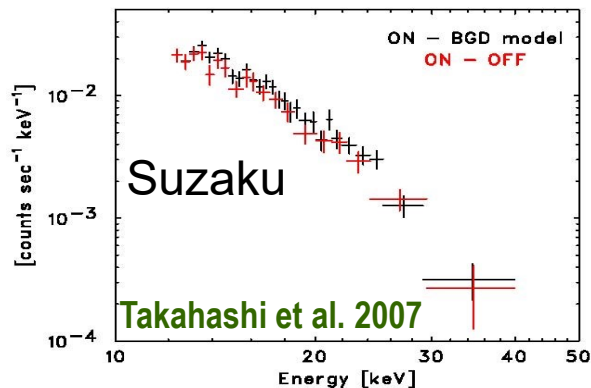
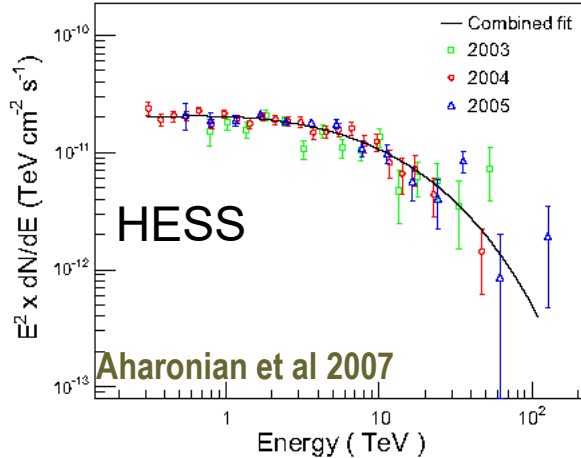
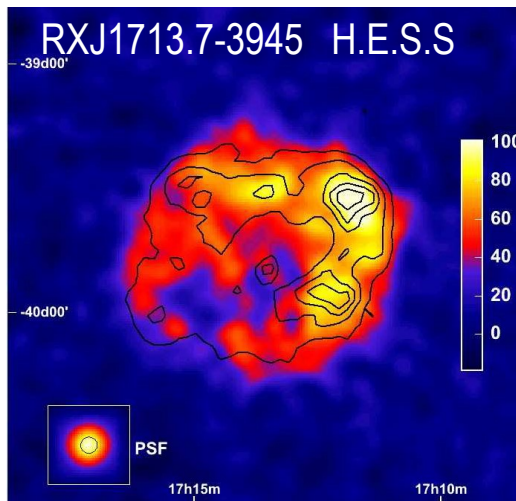
а в Галактике  $D \sim 10^{28} \text{ см}^2 \text{ с}^{-1}$  при  $E \sim 10$  ГэВ, т.е.  
коэффициент диффузии КЛ должен быть сильно  
уменьшен вблизи фронта УВ

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

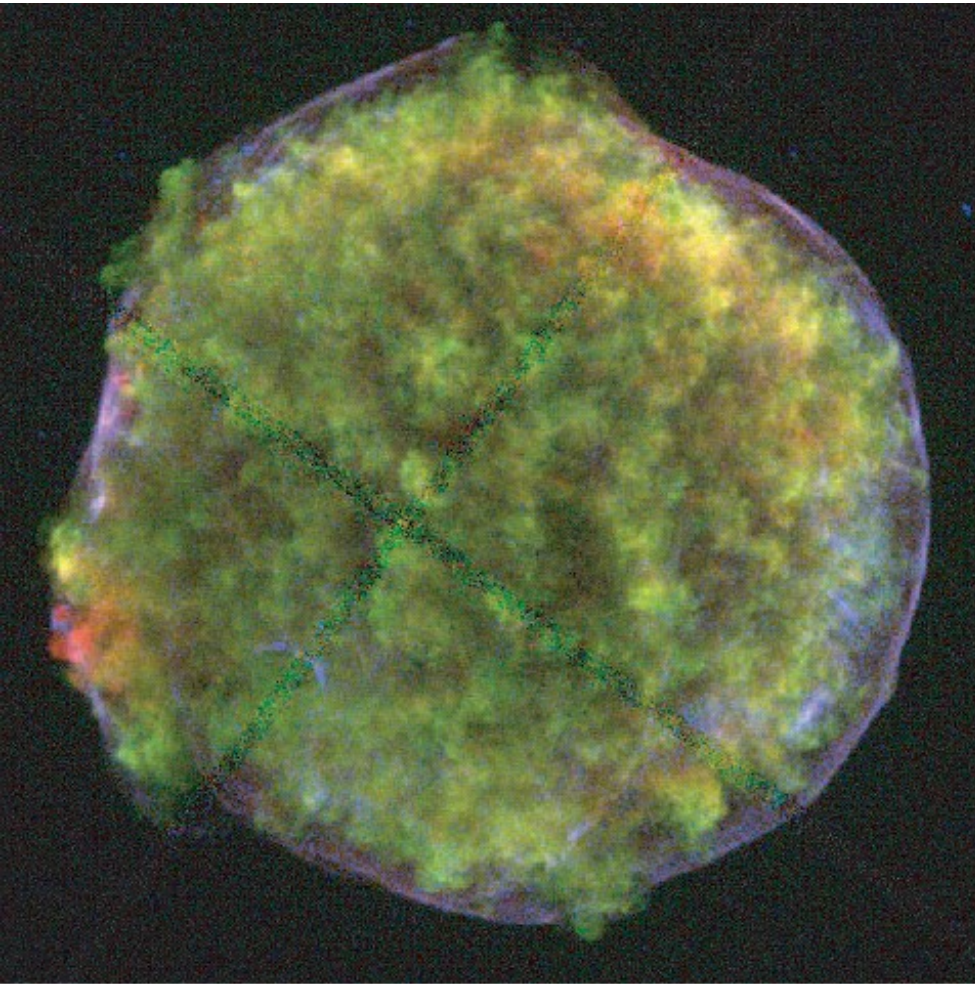


Независимо от интерпретации наблюдаемого гамма-излучения (обратный эффект Комптона или или  $\pi^0$ ), в этом остатке эффективно ускоряются частицы до 100 ТэВ.

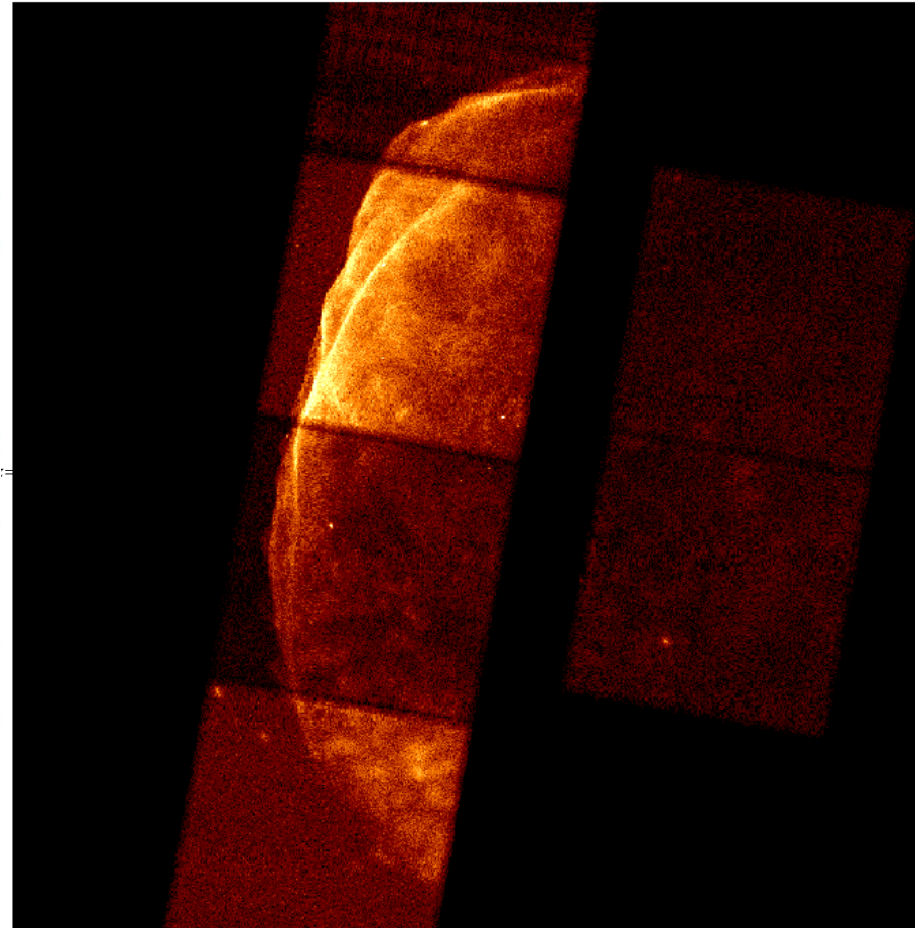
Рентгеновское, радио и гамма излучение зарегистрировано от всех исторических ОСН SN 1006, Тихо Браге, Кеплер, Кассиопея А



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)



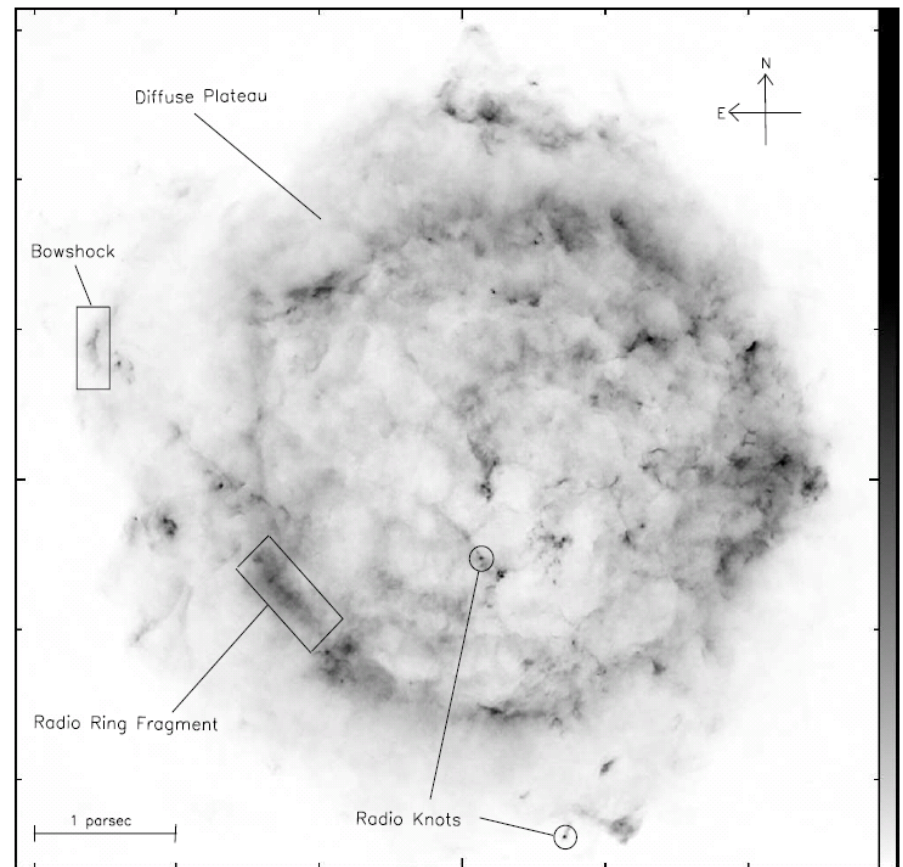
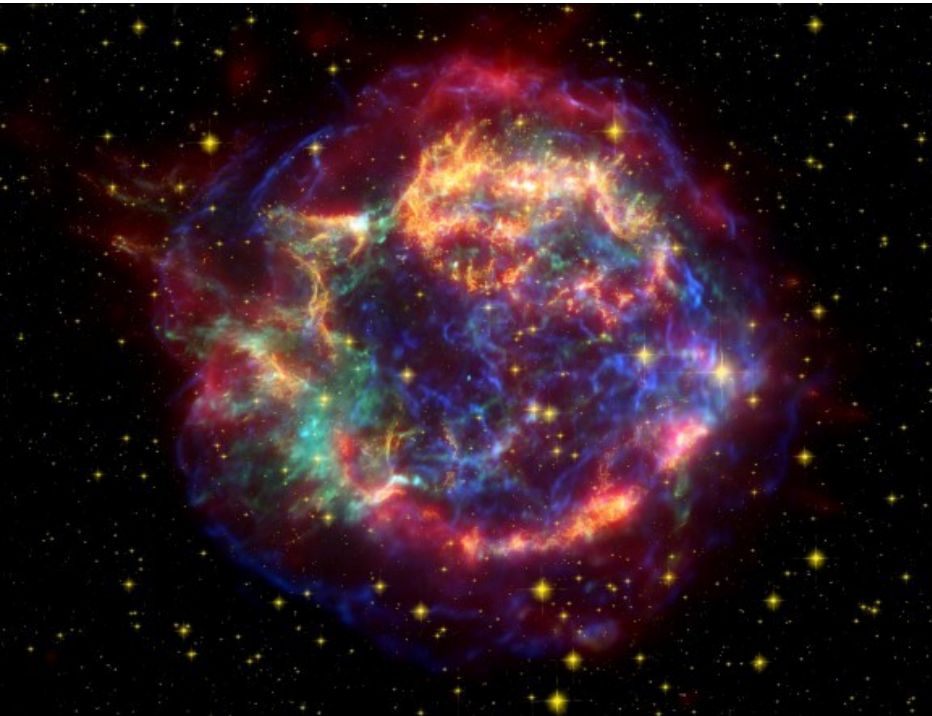
ОСН 1006



# 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

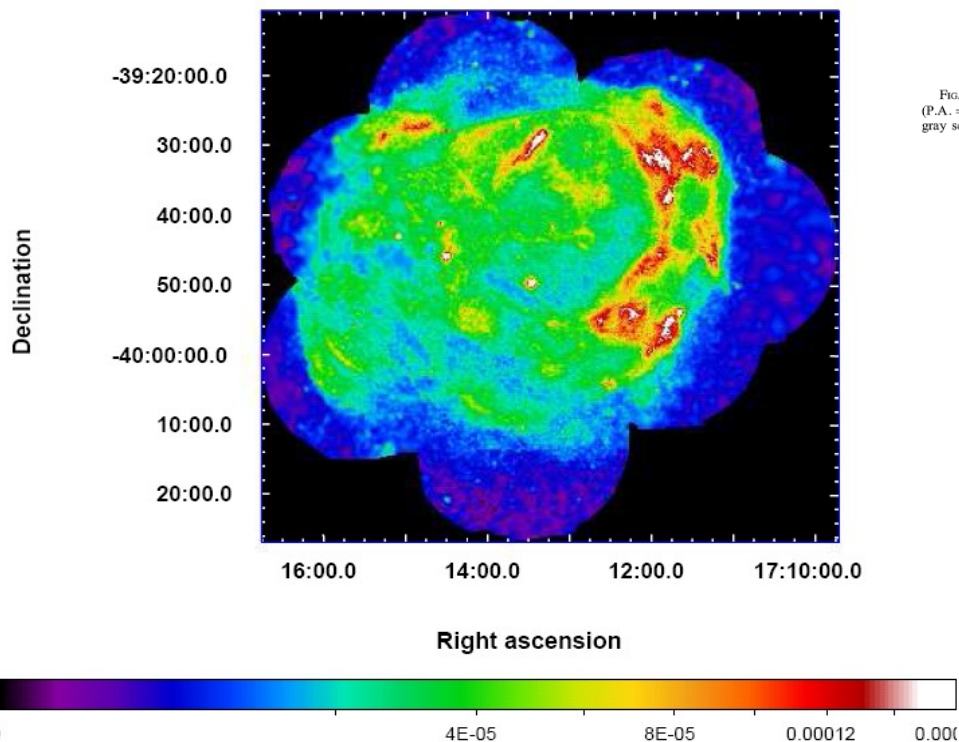


Fig. 1. EPIC MOS plus PN image in the 0.5-4.5 keV band. The units are  $\text{ph}/\text{cm}^2/\text{s}/\text{arcmin}^2$  and the scale is square root. The image was adaptively smoothed to a signal-to-noise ratio of 10.

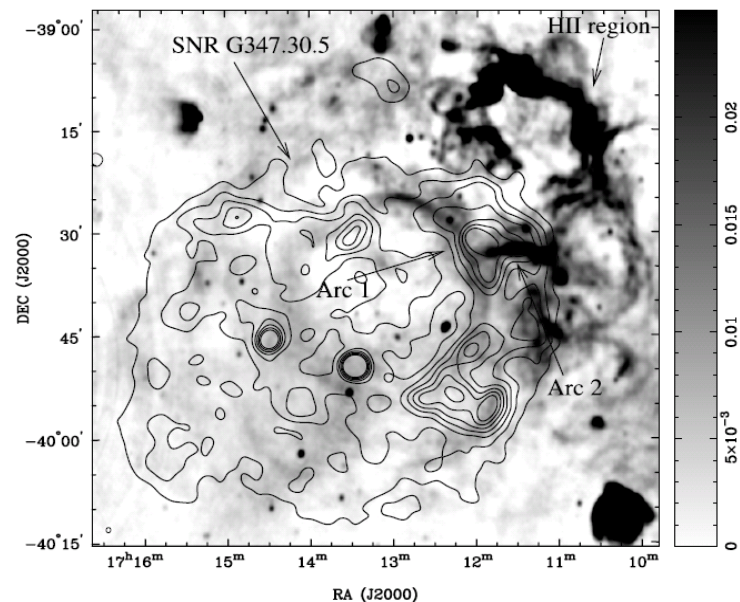
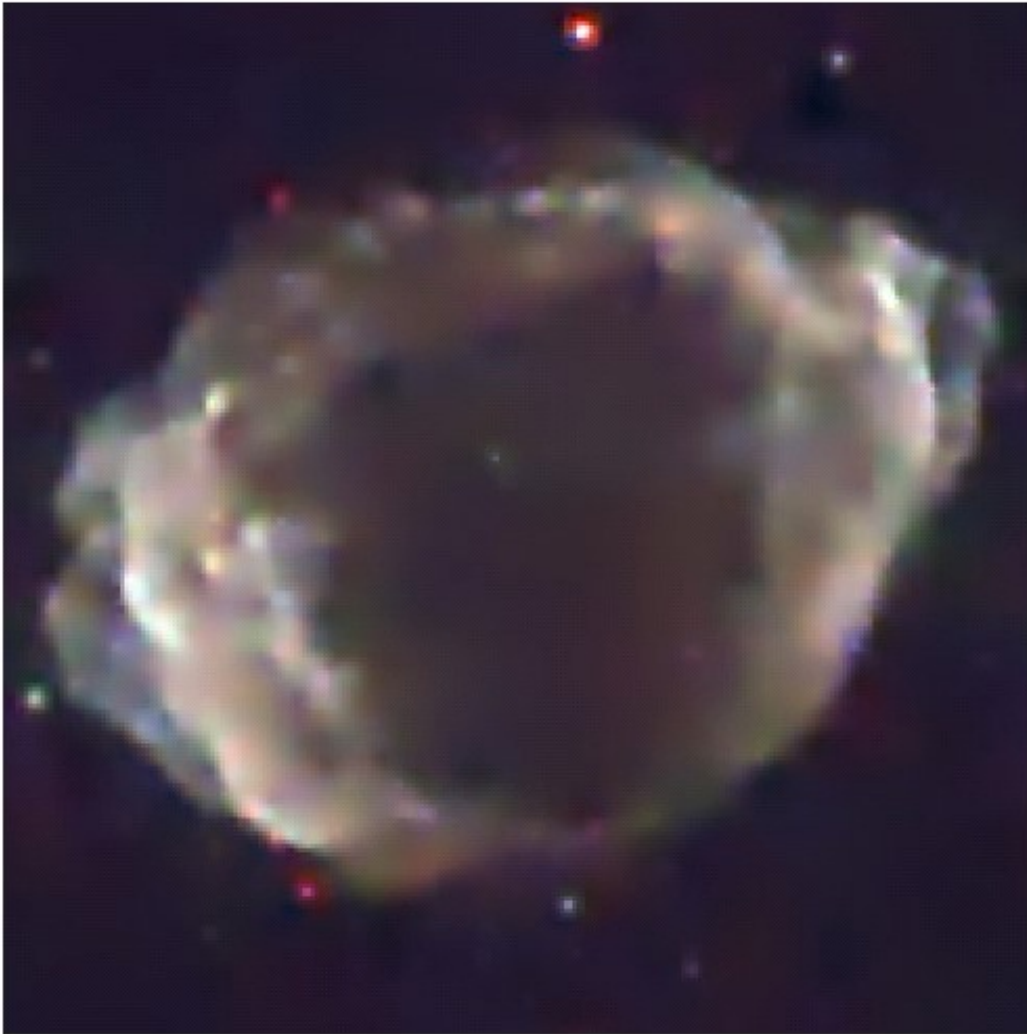


FIG. 5.—ATCA images of G347.3-0.5 and surrounding region at 1.4 GHz. The image was convolved with a Gaussian restoring beam of  $46'' \times 36''$  (P.A. =  $-37^\circ$ ), shown by the tiny ellipse in the bottom left-hand corner. The image is overlaid with the *ROSAT* contours with the same levels as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

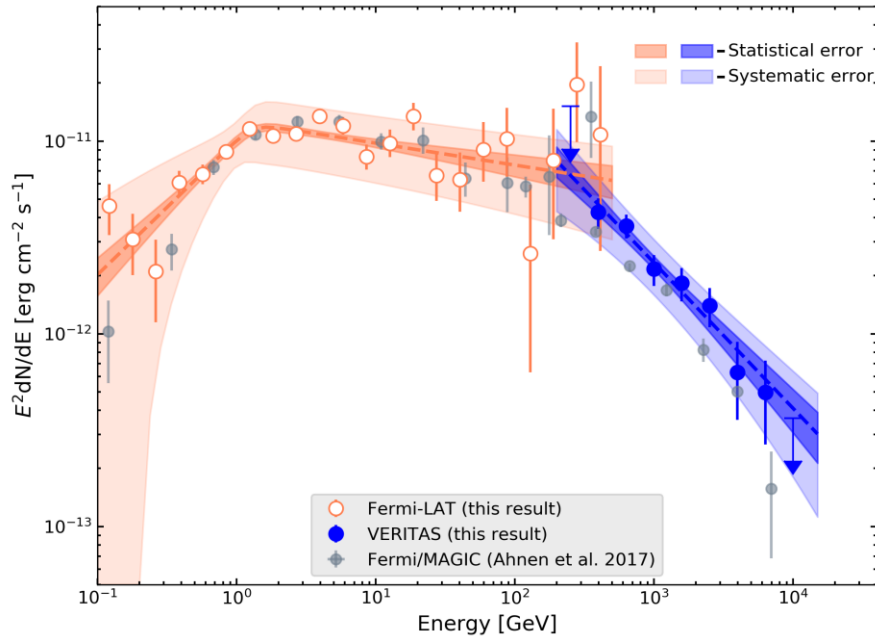


# Молодые ОСН в плотной среде

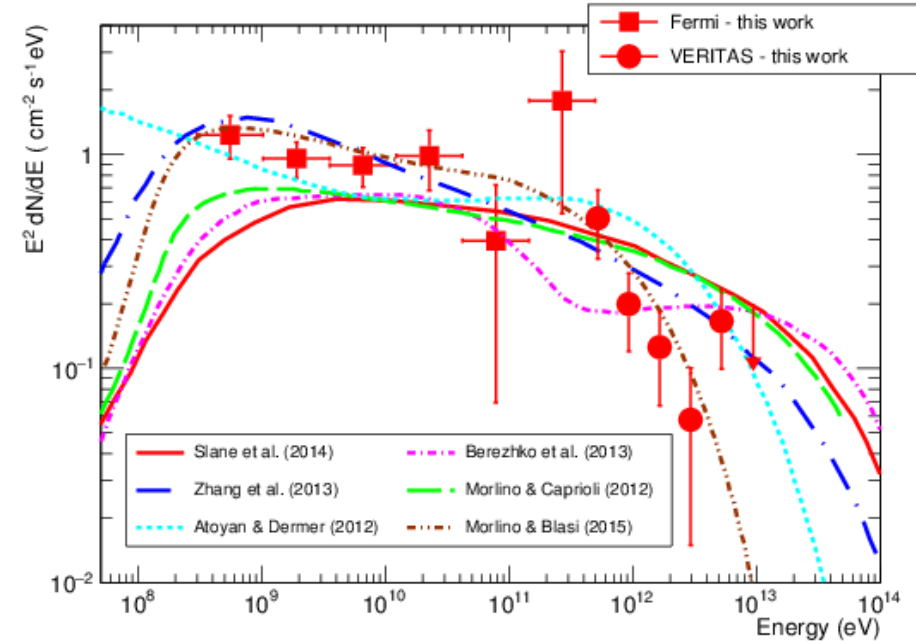
Cas A  $T=350$  yr

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

Tycho  $T=450$  yr



Abeysekara et al. 2020



Archambault et al. 2017

Гамма излучение производится протонами, максимальная энергия - десятки ТэВ

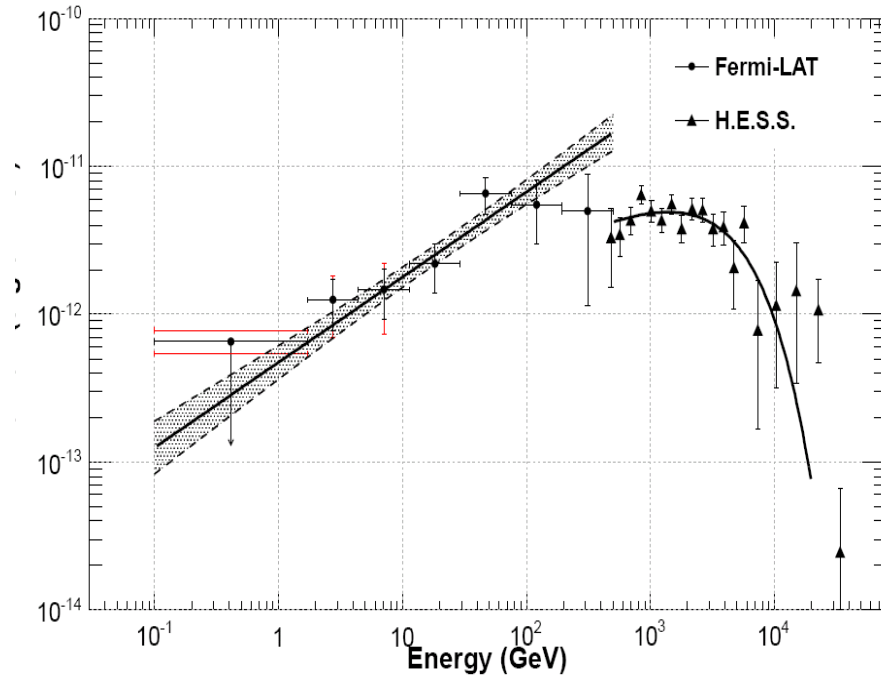
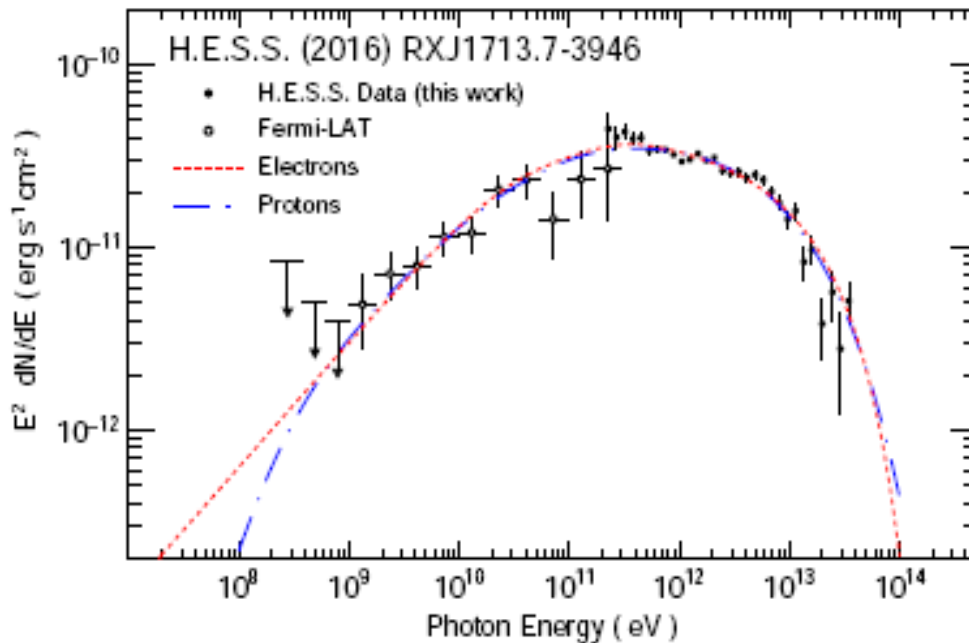
# Молодые ОСН в разреженной среде

(в кавернах, произведенных ветром предсверхновой)

RX J1713.7-3946

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

RCW86



Abdalla et al. 2017

Ajello et al. 2016

$T \sim 1600 \text{ yr}$

$T \sim 2000 \text{ yr}$

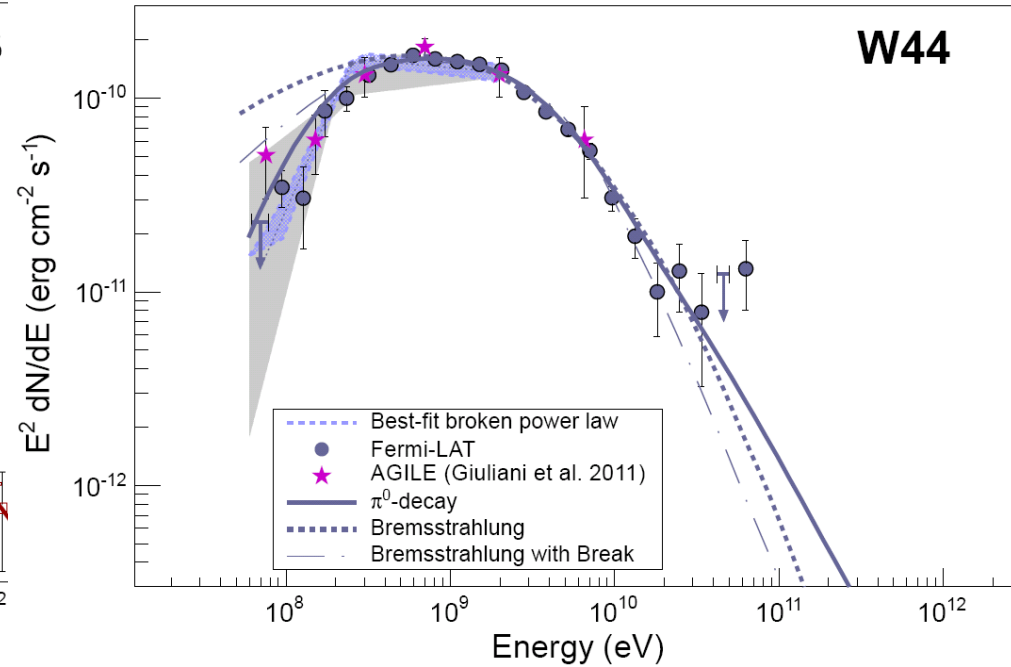
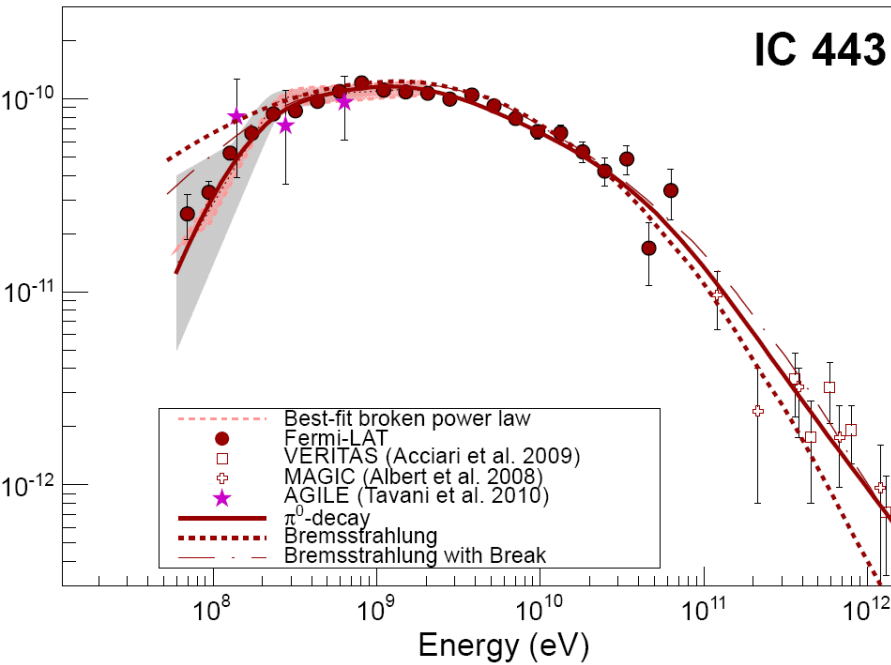
Гамма излучение производится ускоренными электронами,  
максимальная энергия 50-100 ТэВ



# Старые ОСН ( $T > 10^4$ лет) в очень плотной среде

(Ackermann et al. 2013)

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



Гамма излучение производится протонами. Максимальная энергия 10-100 ГэВ

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  
 $F > 10^{-11} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

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 (наиболее реалистично)

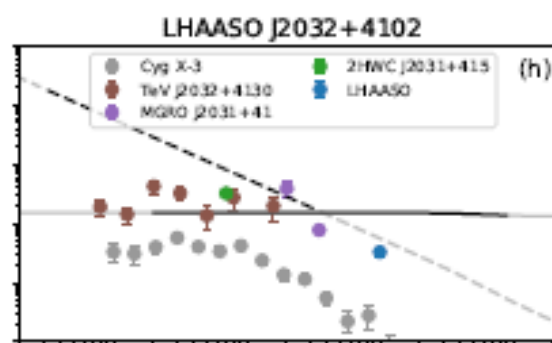
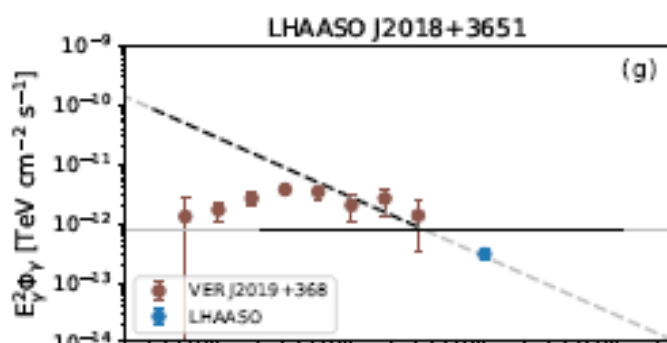
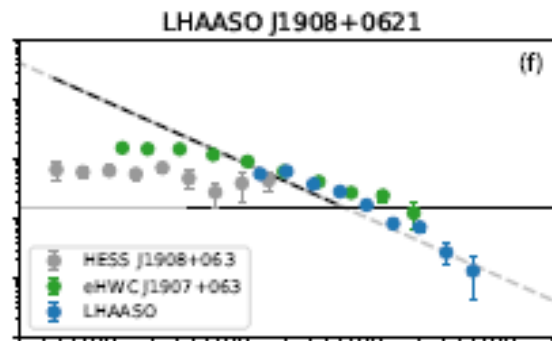
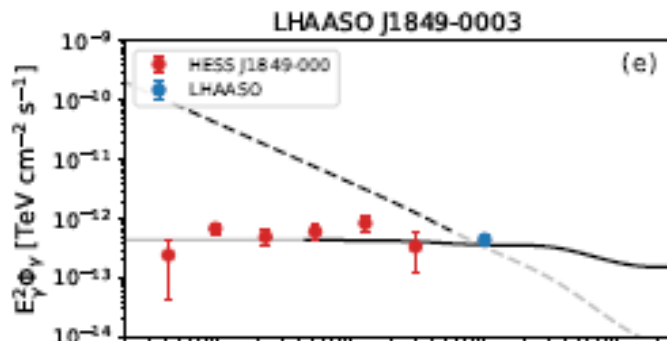
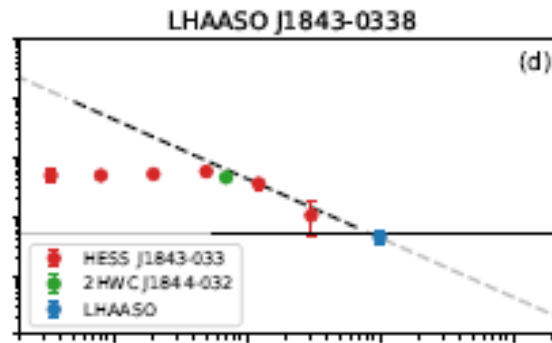
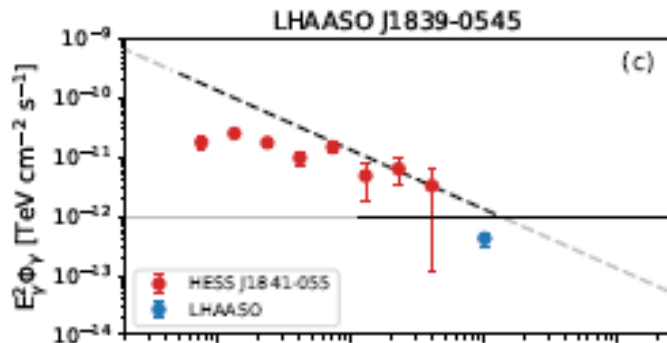
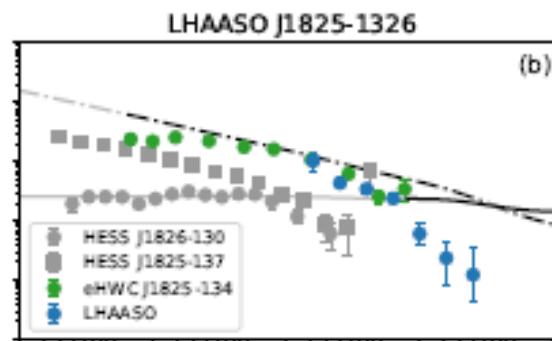
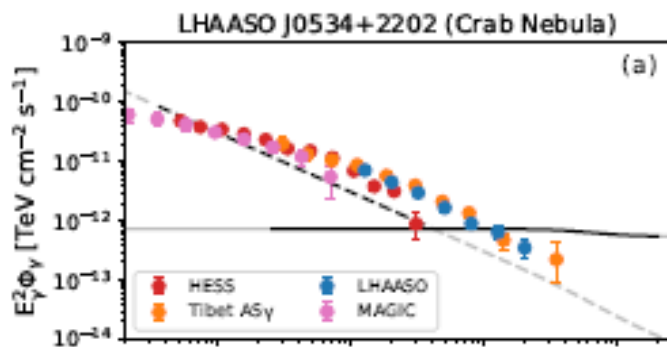
# List of PeVatrons ( $E_\gamma > 100$ TeV)

(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]

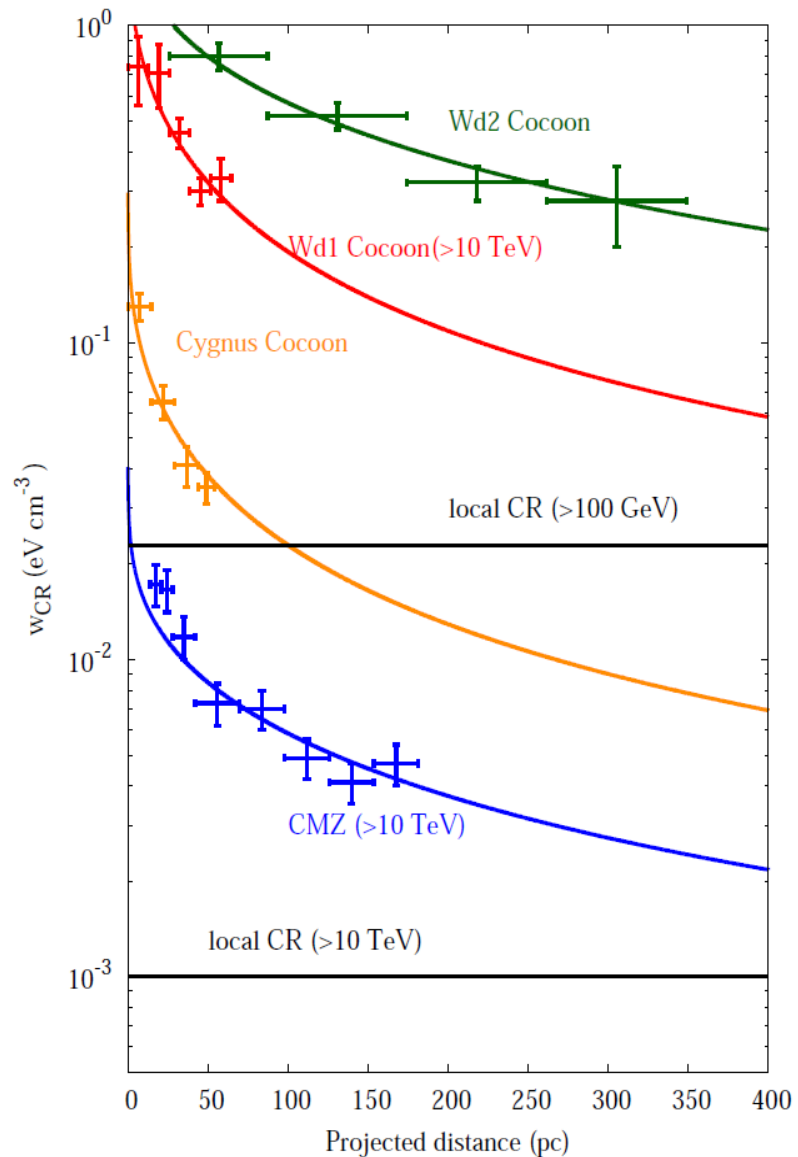
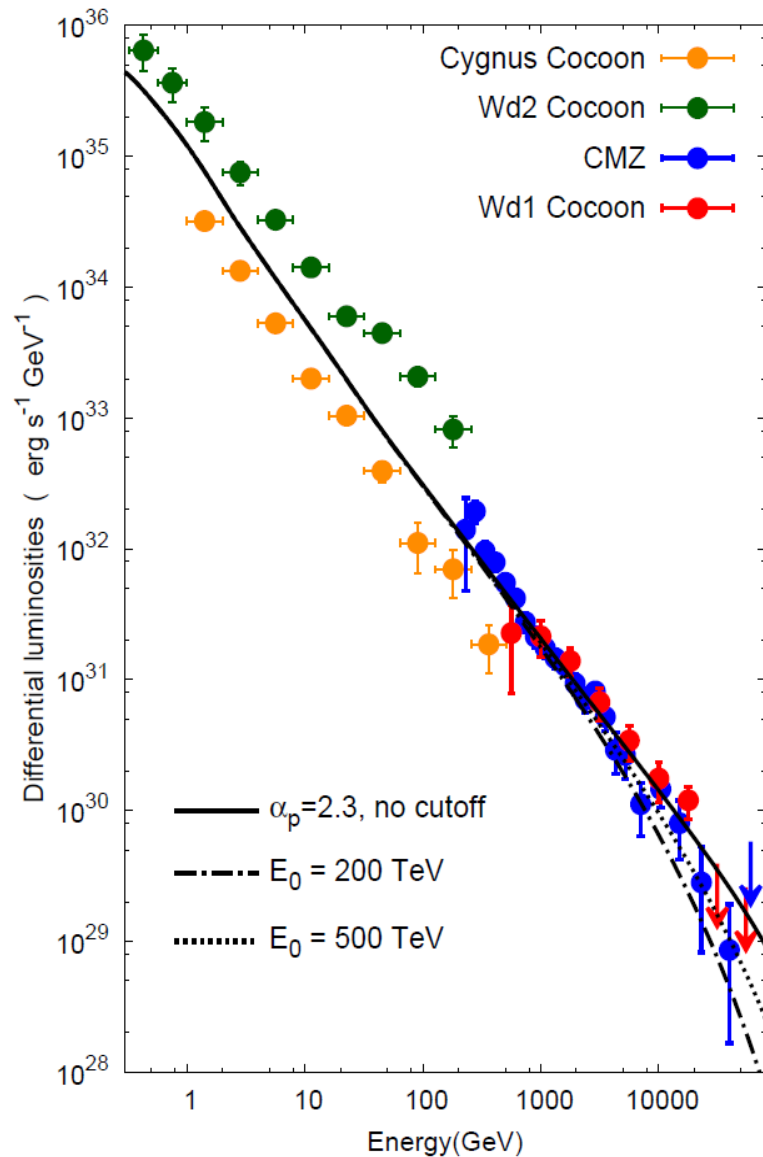
# LHAASO Pevatrons (Huang and Li 2021)



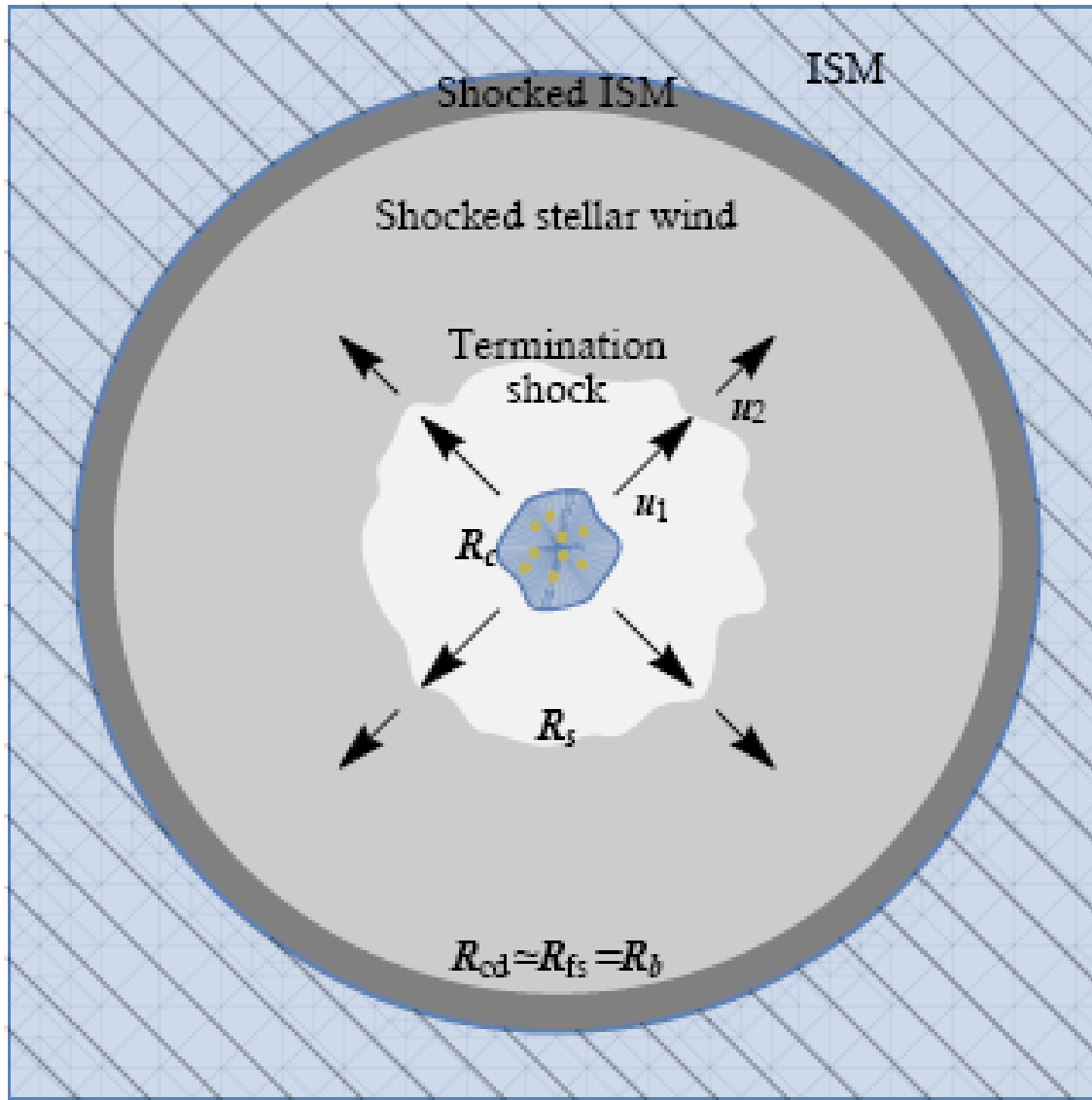
Вероятно,  
большая часть —  
пульсарные  
туманности, то  
есть ускорение  
электронов и  
позитронов.



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



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

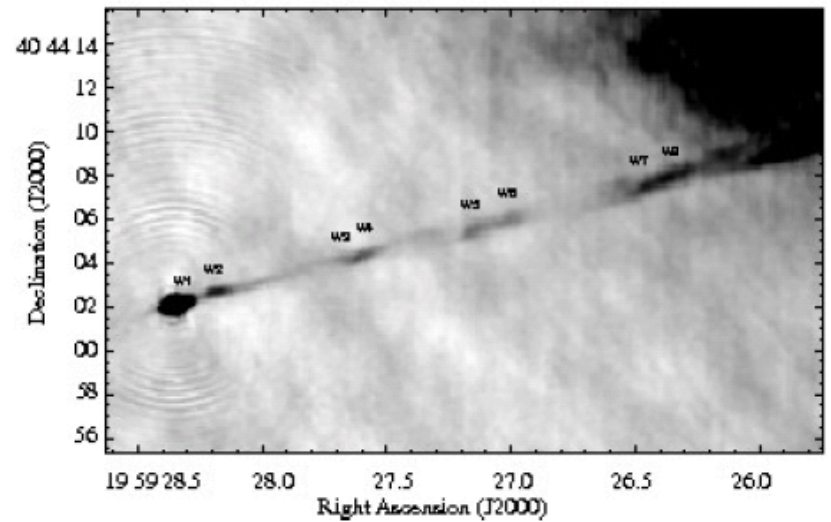


Более благоприятная ситуация по сравнению с остатком сверхновой – ускоренным частицам труднее выйти из системы. Кроме того ожидается высокий уровень МГД турбулентности как внутри, так и вне ударной волны. Возможно ускорение до ПэВ-ных энергий. Долгоживущий ускоритель (порядка миллиона лет).

# Ускорение частиц в релятивистских струях (джетах), возникающих при аккреции газа на сверхмассивные черные дыры в активных галактических ядрах

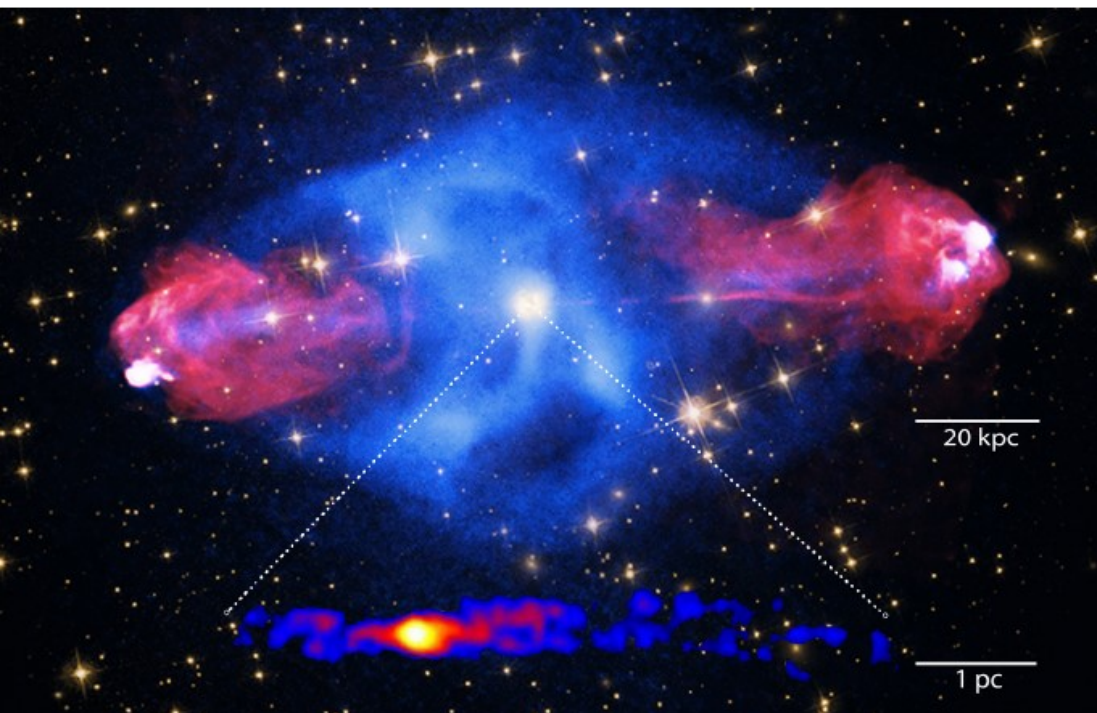
$$E_{\max} = 1.7 \cdot 10^{19} \text{eV} Z\beta^{1/2} \left( \frac{L_{\text{mag}}}{10^{44} \text{erg s}^{-1}} \right)^{1/2}$$

доускорение частиц, попадающих в джет сбоку Caprioli 2015 - объясняет обогащение тяжелыми ядрами

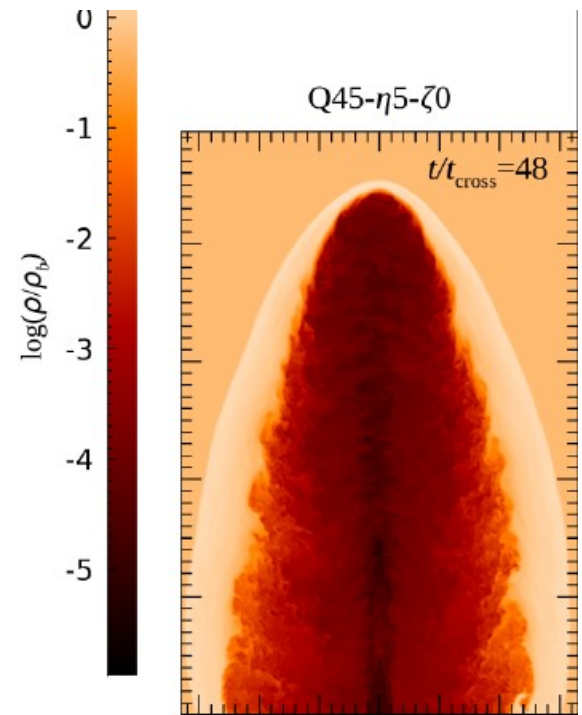


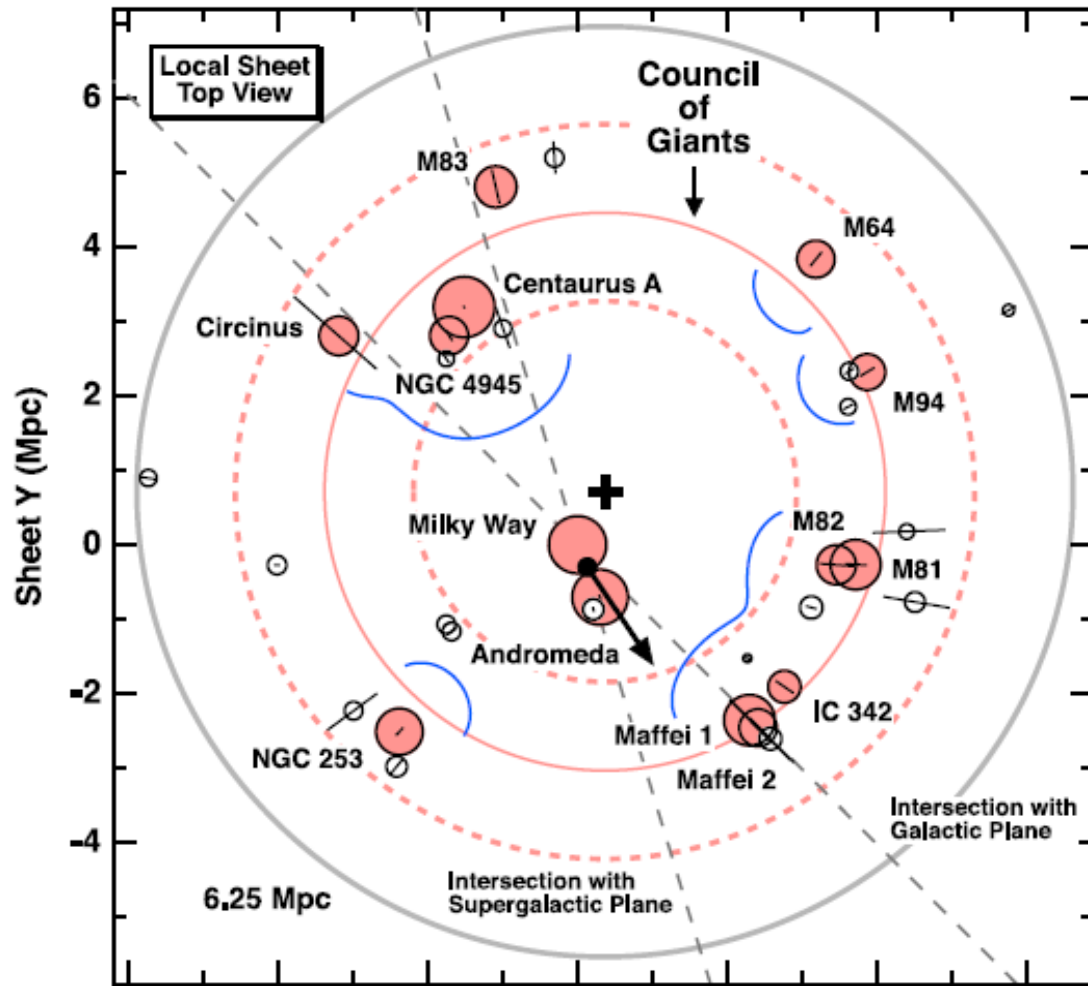
**Figure 2.** The inner jet of Cygnus A observed at 5 GHz. Note the weak emission between W1 and W2 which extends about half way to W3. Thereafter, there are only hints of smooth emission between the jet knots, which become brighter from W7 onwards. The jet seems straight, but note the possible bend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

Сygnus A в радио,  
рентгеновском и оптическом  
диапазонах (Blandford et al.  
2019)



Гидродинамическое  
моделирование  
джетов (Seo et al.  
2021)





Ближайшие крупные галактики – окраина Местного сверхскопления

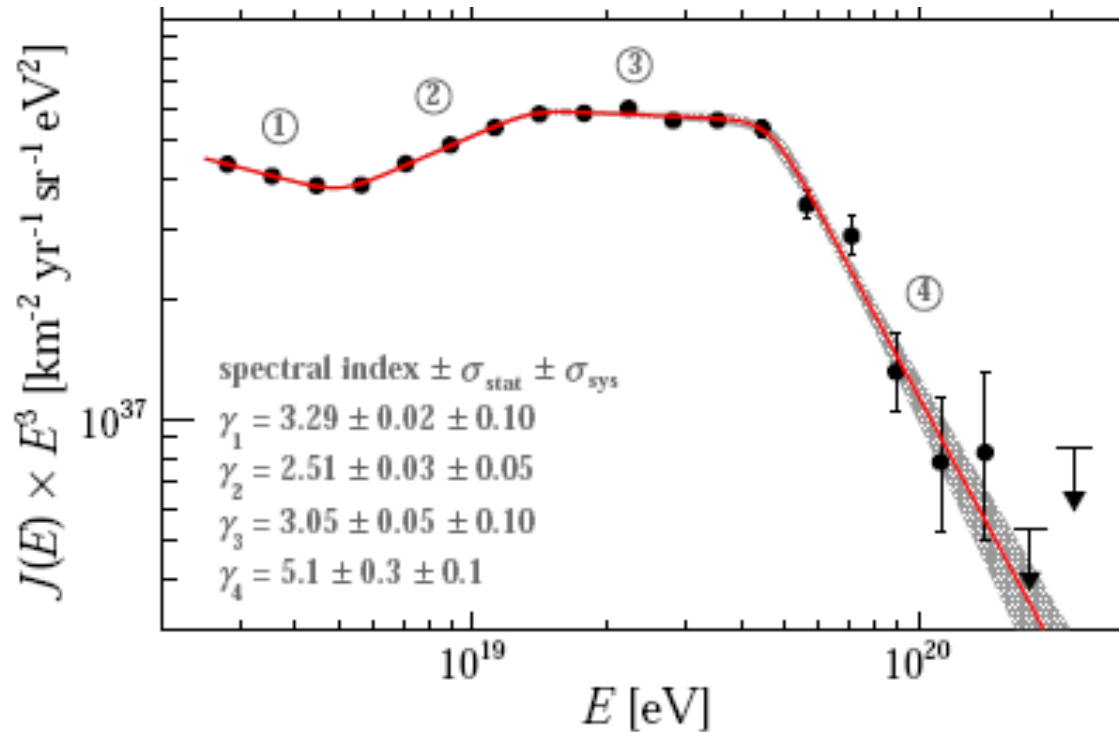
### Список ближайших СМЧД

Галакт. центр	Масса СМЧД
Галакт. центр	$4 \cdot 10^6$ солнечных масс
Андромеда (M31)	$2 \cdot 10^8$ солнечных масс
Центавр А	$6 \cdot 10^7$ солнечных масс
M81	$7 \cdot 10^7$ солнечных масс
M82	$3 \cdot 10^7$ солнечных масс

Центавр А – ближайший джет



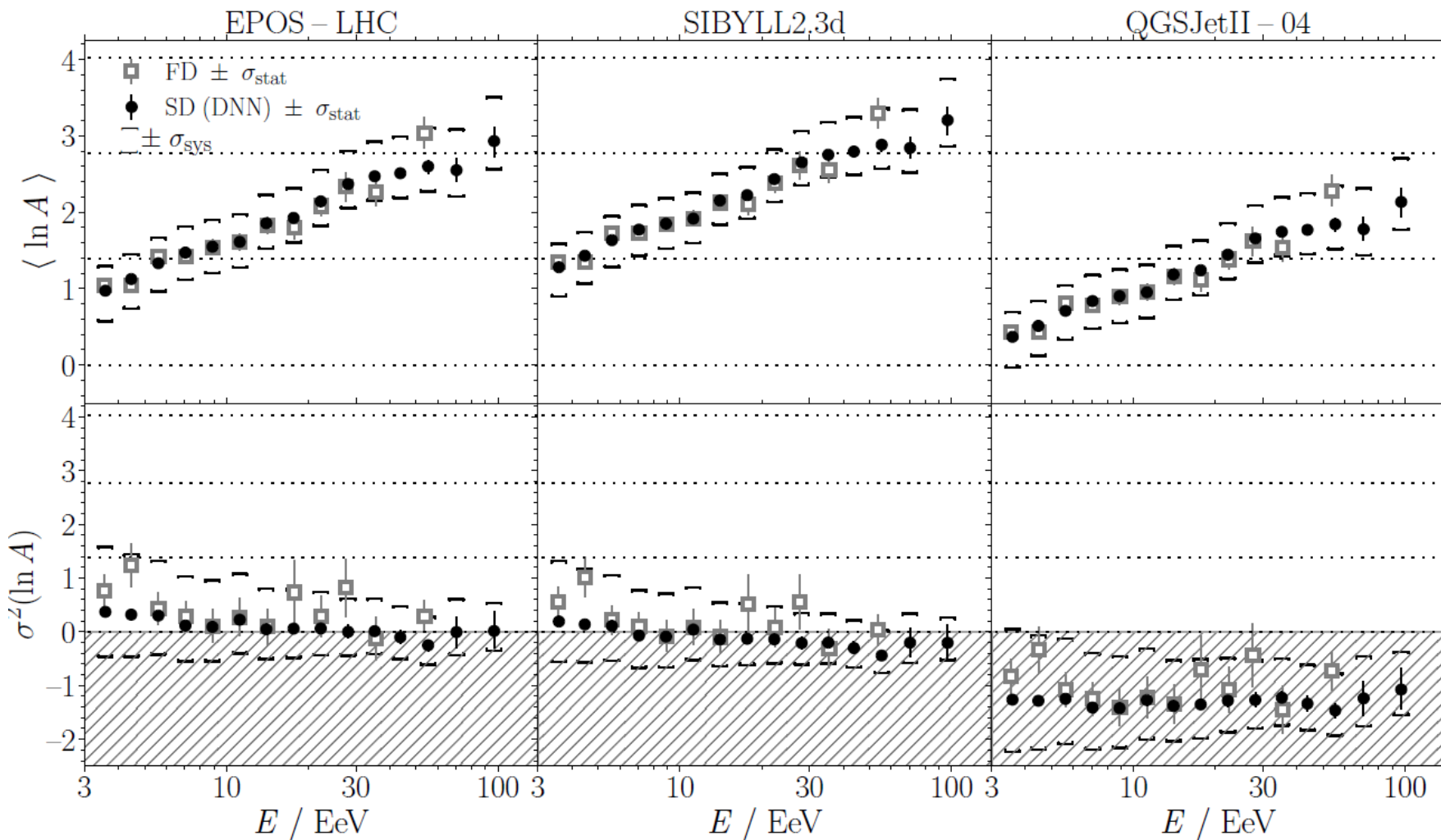
# Особенности в наблюдаемом спектре (РАО 2020)



Проще объяснить в модели с одним основным источником

# Химический состав (РАО 2024)

Утяжеление состава с ростом энергии, почти чистый состав



# Отличие спектров ТА и РАО

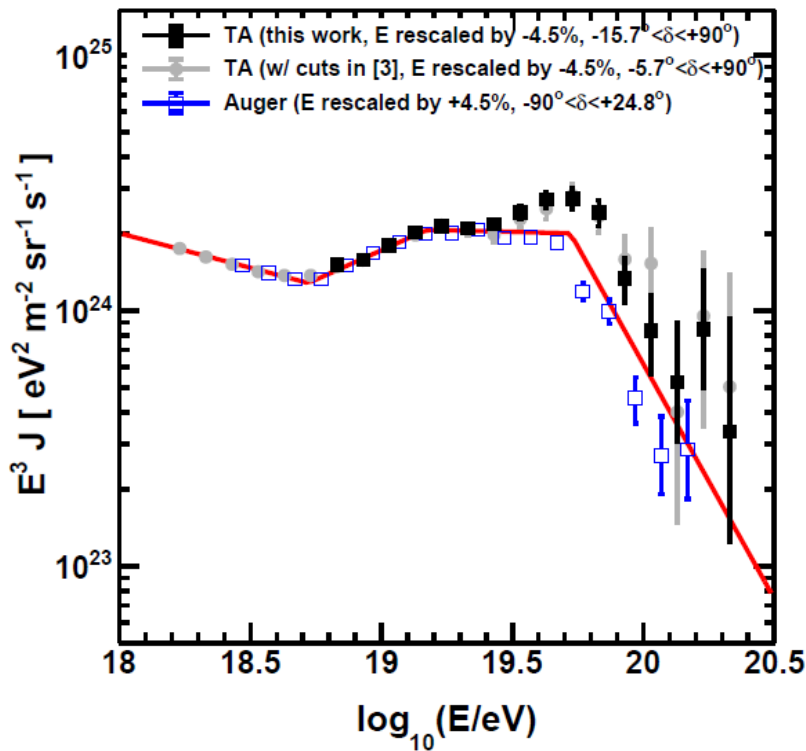


FIG. 1. Energy spectra of TA and Auger measured in their whole apertures. The black full squares indicate the energy

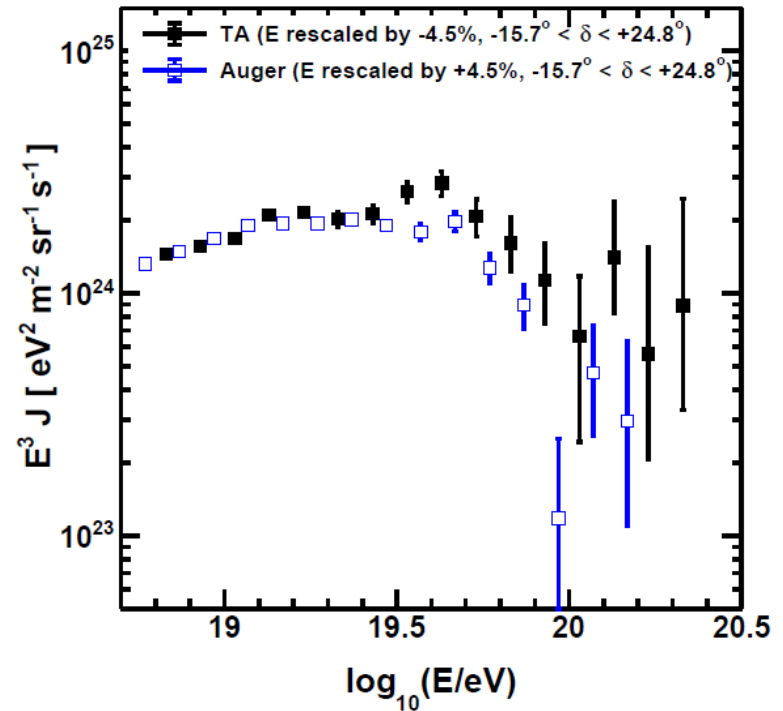


FIG. 2. TA (black full squares) and Auger (blue open squares) spectra in the full common declination band  $-15.7^\circ < \delta < +24.8^\circ$ .

# Объясняется вкладом 2-х северных источников (TA Coll. 2024)

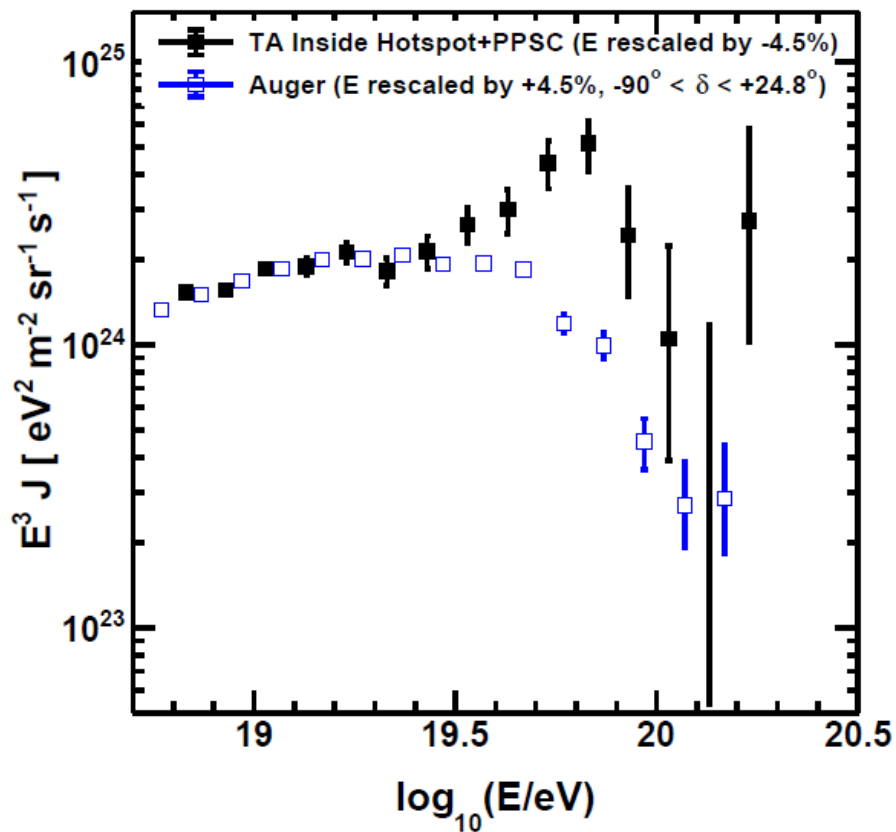


FIG. 5. The black full squares indicate the spectrum of events inside the Hotspot and PPSC excess regions, depicted

Совпадает с направлением на галактику Андромеда

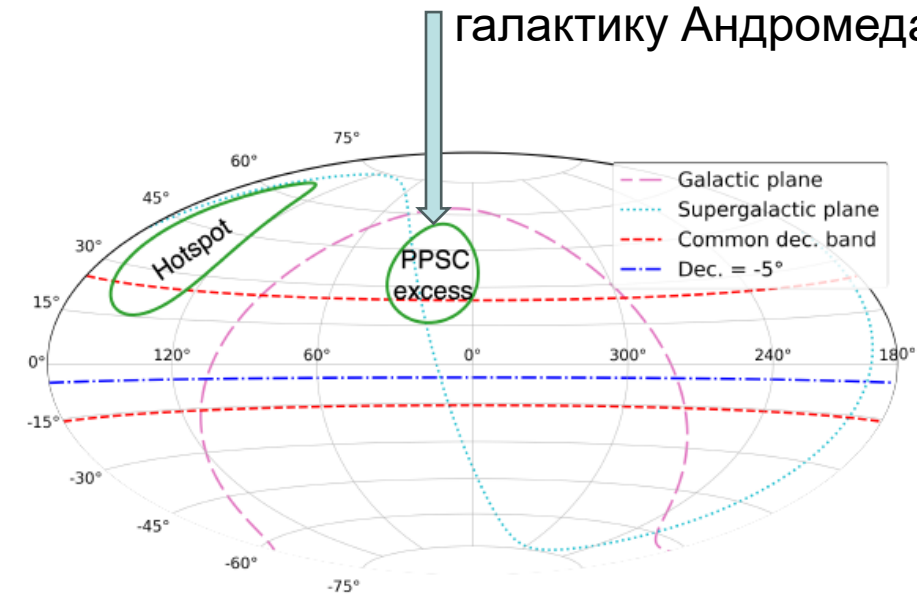


FIG. 4. Sky map in equatorial coordinates using Hammer projection. The green circles indicate the locations of the Hotspot and the Perseus-Pisces supercluster (PPSC) excess

# Отсутствие корреляции направлений прихода КЛ с $E > 100$ ЭэВ и ближайшими потенциальными источниками (TA collaboration arXiv:2311.1423)

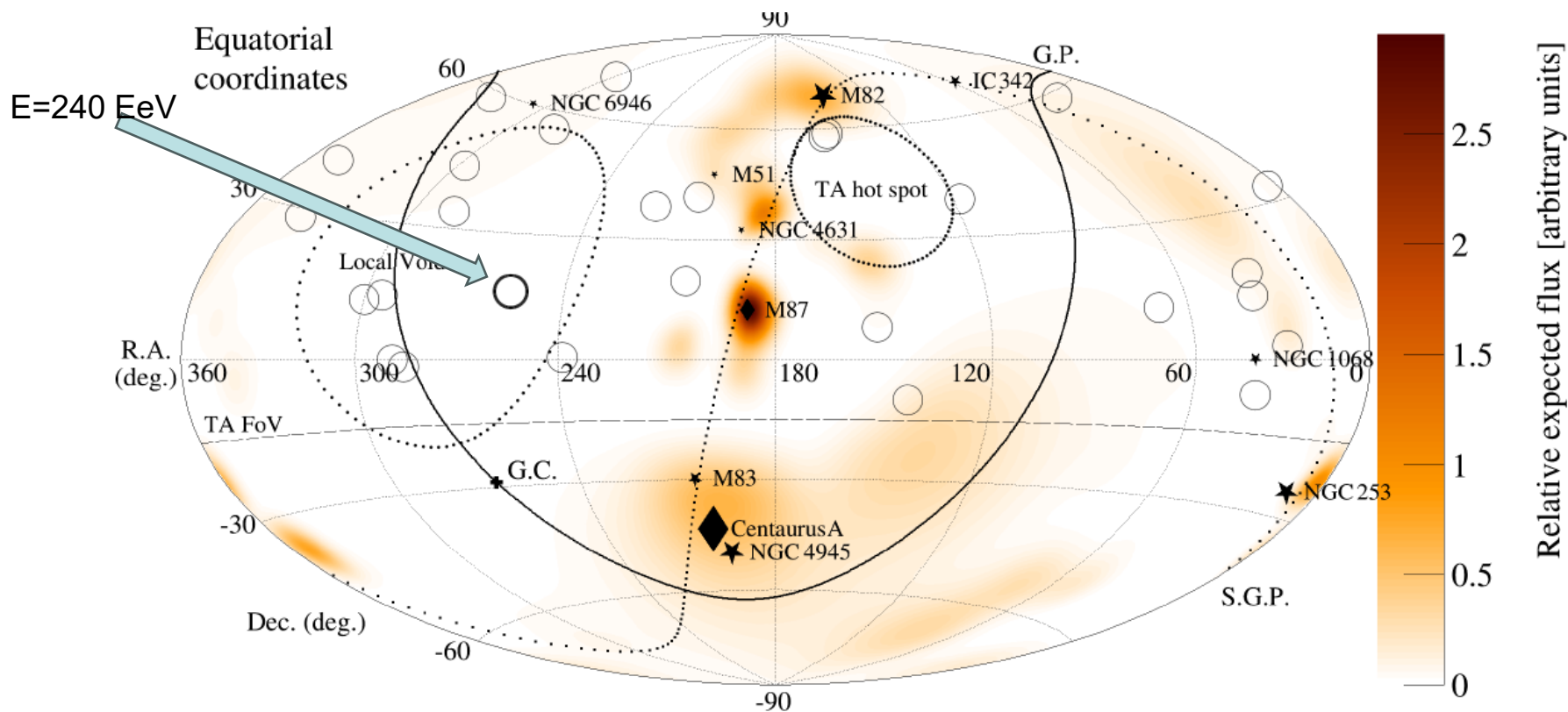


Figure 3: **Arrival directions (empty circle) of all  $> 100$  EeV cosmic rays observed by TA SD during 13.5 years operation.** The background and other symbols are the same as Fig. 2. No clustering around the highest energy event (thick circle) is evident.



## Fermi and eRosita bubbles (Predehl et al. 2020)

Наиболее вероятно связаны с активностью сверхмассивной черной дыры десятки млн. лет назад

$$W \sim 10^{56} - 10^{57} \text{ erg},$$
$$L \sim 10^{41} - 10^{42} \text{ erg /sec}$$

Ускорение КЛ в  
Галактическом центре

Fan 1951

Kulikov, Fomin,

Khristiansen 1969 -  
сверхвысокие энергии

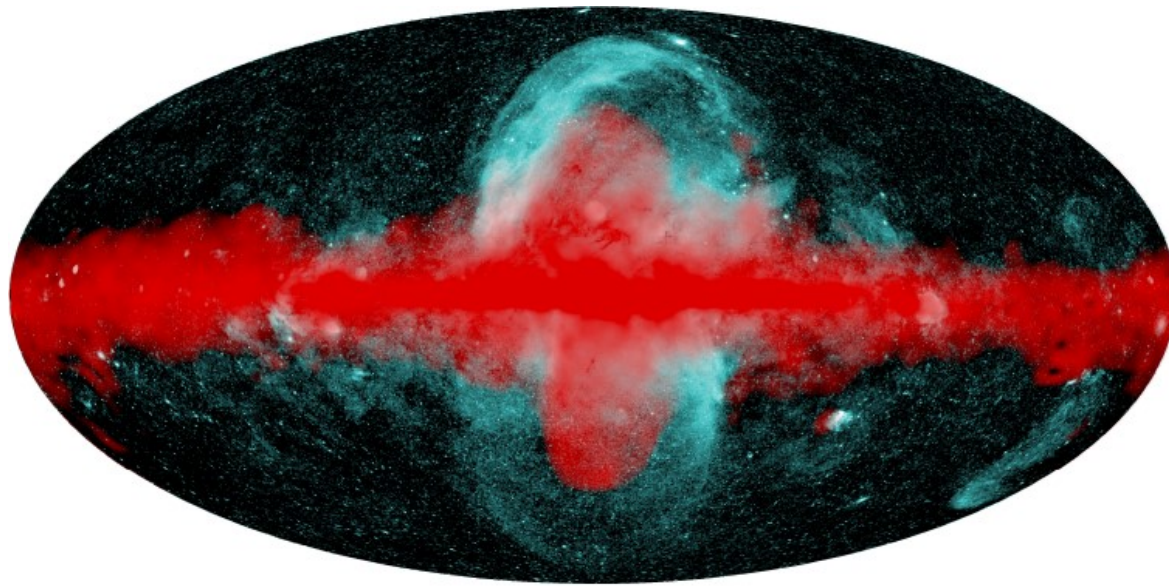
Wayland 1972

Ptuskin & Khazan 1981

Giler 1983

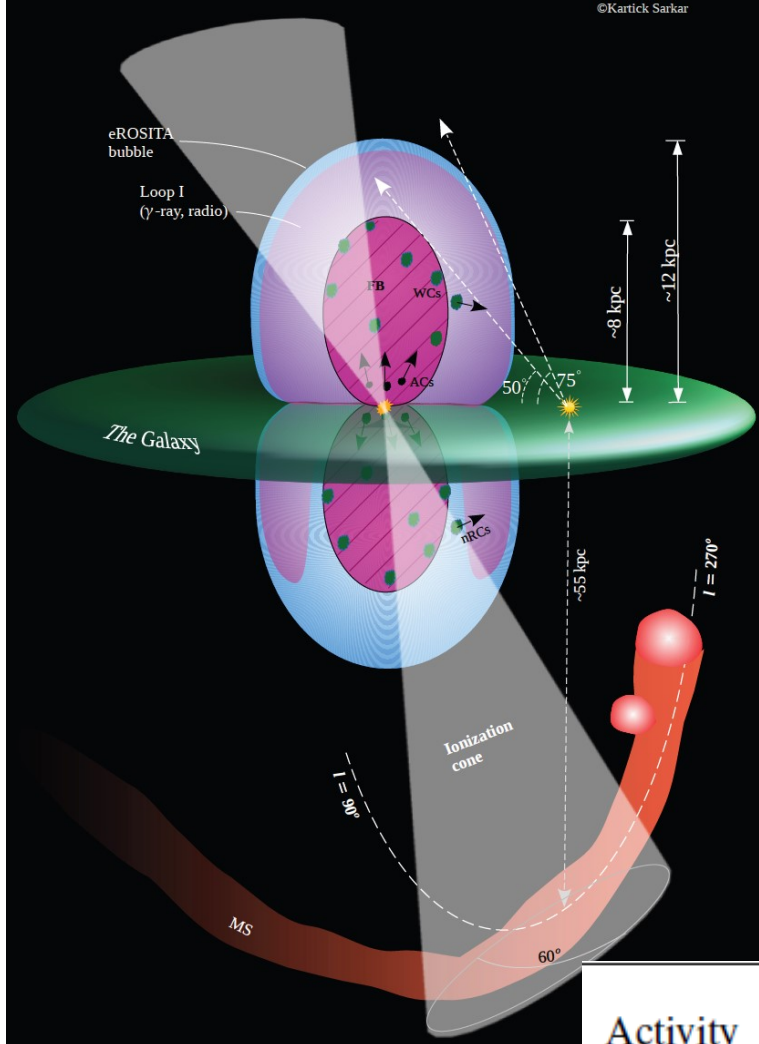
Istomin 2014

Fujita et al. 2017



Важный вопрос – как удерживаются частицы КЛ? – Зависит от магнитного поля в гало Галактики

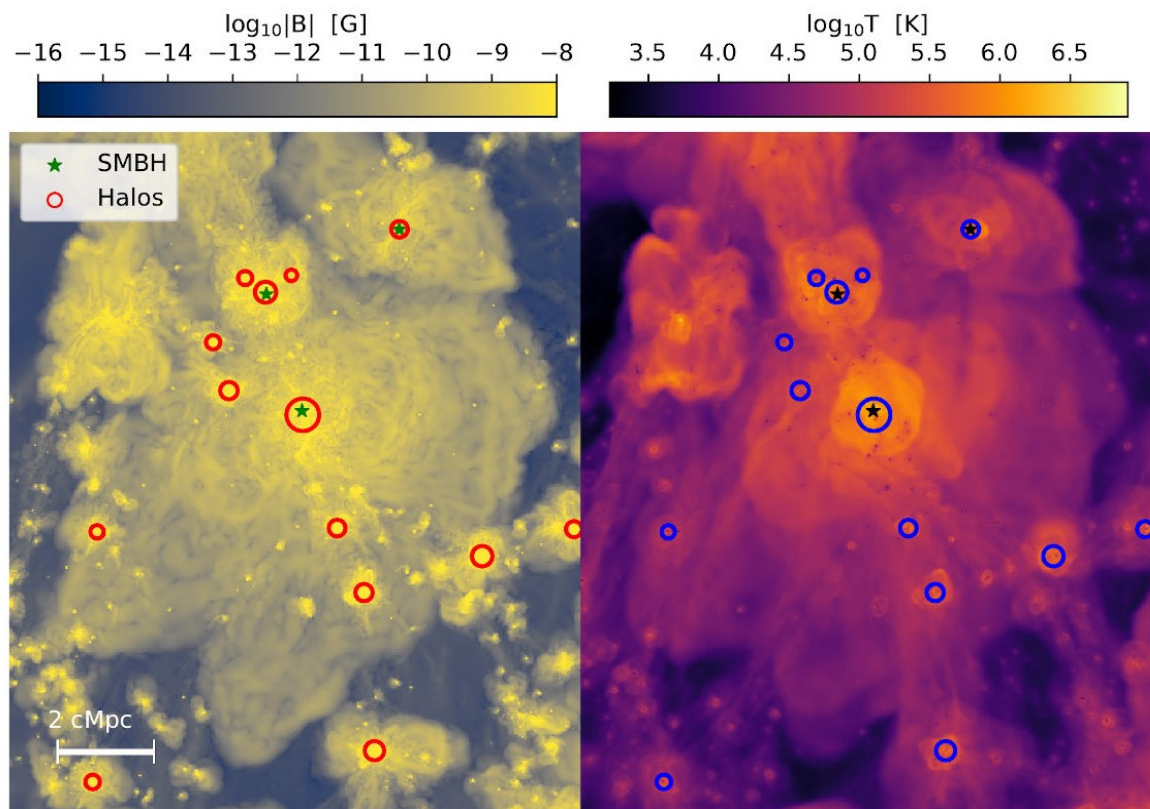
# Энергетика Галактического центра (Sarkar 2024)



Для сверхмассивной черной дыры в Галактическом центре  
 $L_{\text{Edd}} = 5 \cdot 10^{44}$  erg/sec –  
**достаточная мощность для ускорения КЛСВЭ**

Activity	Scale	Rates	Power [erg s <sup>-1</sup> ]
Star formation	~ 100 pc	0.07, 0.2 – 0.8 M <sub>⊙</sub> yr <sup>-1</sup>	10 <sup>40.3</sup> , 10 <sup>40.9–41.5</sup>
AGN (Current)	~ 10 <sup>-6</sup> pc	10 <sup>-8</sup> M <sub>⊙</sub> yr <sup>-1</sup>	10 <sup>38–38.7</sup>
AGN (~ 100 yr ago)	~ 10 <sup>-6</sup> pc	~ 10 <sup>-5</sup> to <sup>-4</sup> M <sub>⊙</sub> yr <sup>-1</sup>	10 <sup>41–42</sup>
AGN (~ 1-3 Myr ago)	~ 10 <sup>-6</sup> pc	-	10 <sup>43.7–44.7</sup>

# Протяженные гало галактик с горячим газом и магнитным полем в космологическом моделировании (Arámburo-García et al. 2021)

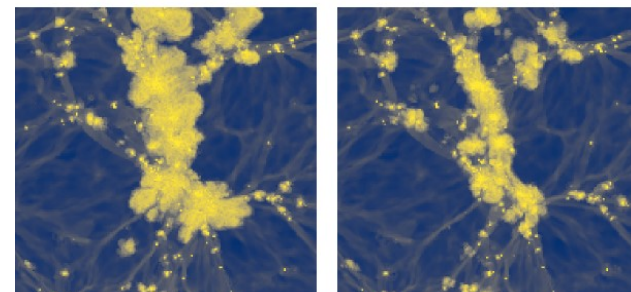


Пузыри  
выдуваются  
галактическим  
ветром на  
ранней стадии  
эволюции  
галактик

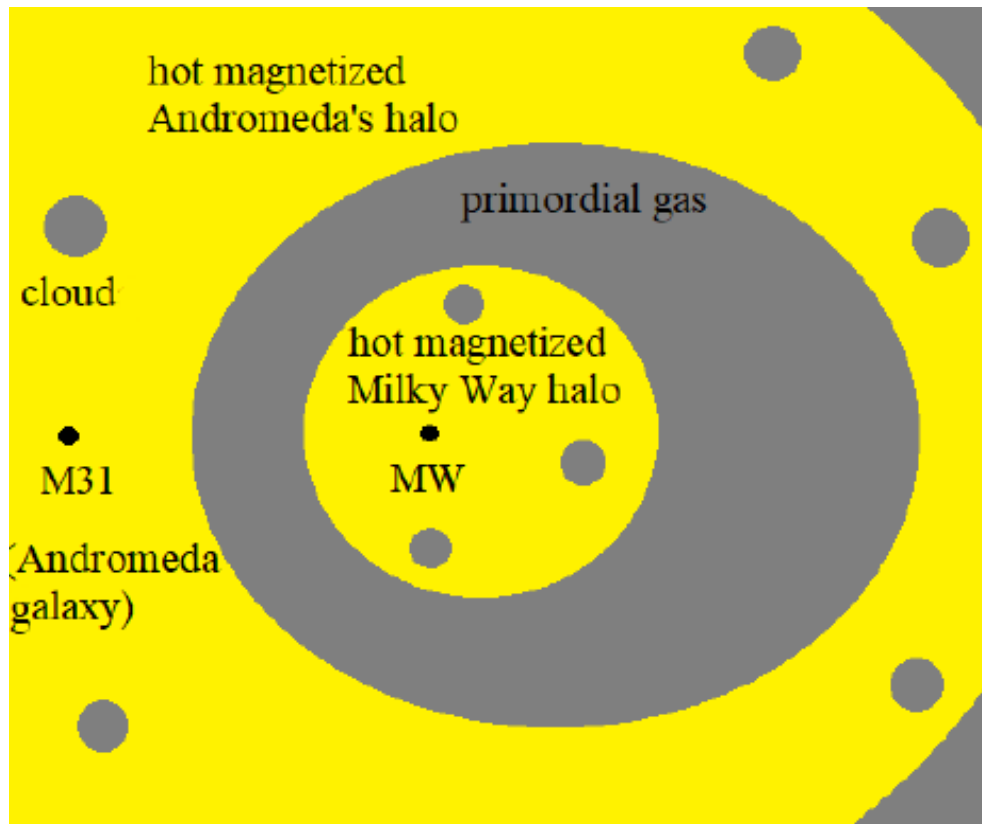
Роль черных дыр

Fiducial

SMBH feedback off



# Предполагаемые протяженные гало вокруг нашей Галактики и галактики Андромеда (Zirakashvili et al. 2023)

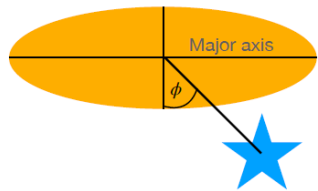


Образовались за счет энергии активного звездообразования и аккреции на центральную черную дыру 9-13 миллиардов лет назад

**Непродолжительное время – миллионы лет могут удерживать даже КЛ сверхвысоких энергий**

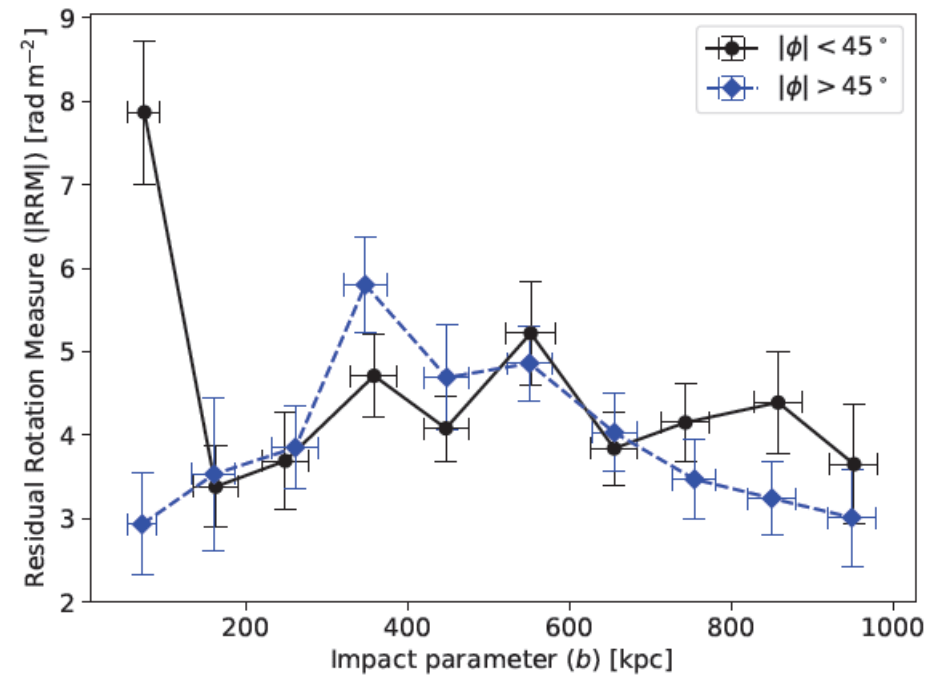
Горячий газ этих гало наблюдается в окрестности нашей Галактики, а также в других галактиках

# Эффект Фарадея в протяженных гало (Heesen et al. 2023, Böckmann et al. 2023)



$$\text{RM} = 0.81 \int_{\text{LoS}} \left( \frac{n_e}{\text{cm}^{-3}} \right) \left( \frac{B_{\parallel}}{\mu\text{G}} \right) \left( \frac{dr}{\text{pc}} \right) \text{ rad m}^{-2}$$

$$B_{\parallel} \sim 0.5 \mu\text{G}, \quad n_e = 10^{-4} \text{ cm}^{-3}$$



Микрогаусные магнитные поля наблюдаются на расстояниях порядка 100 кпк в других галактиках

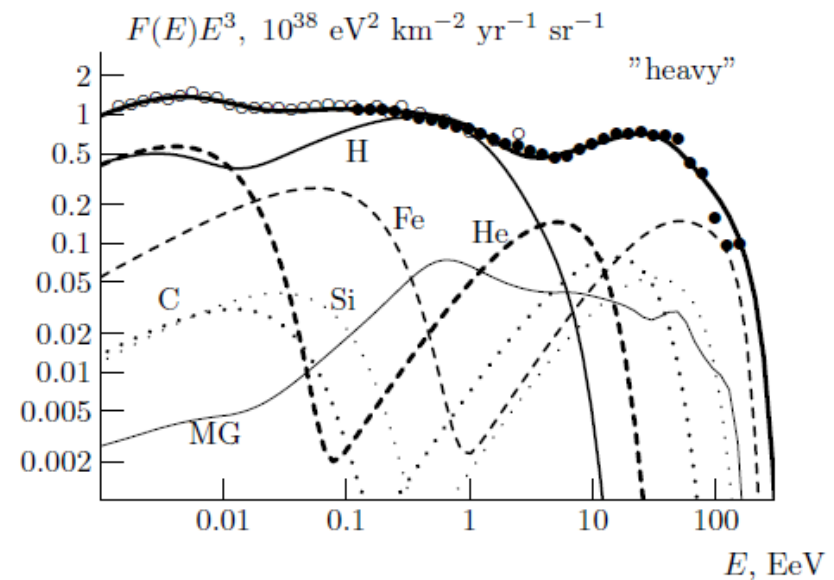
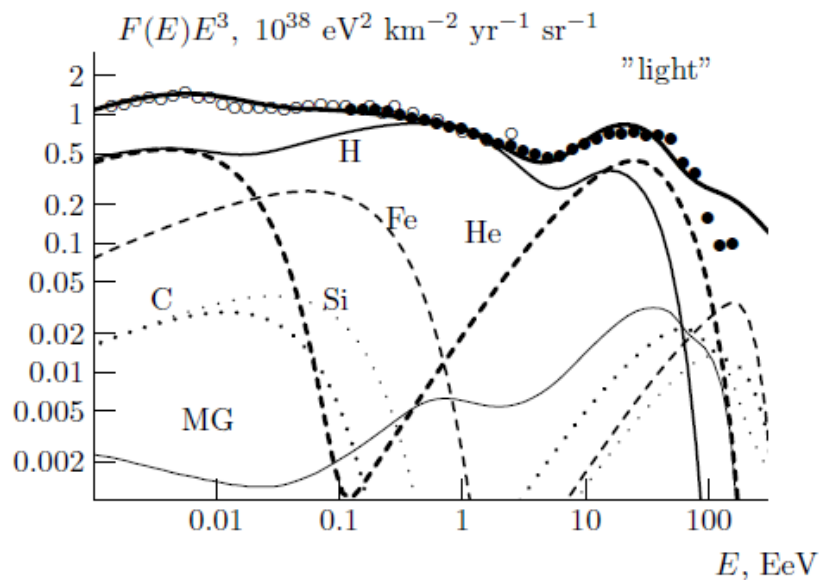


# Спектры КЛ сверхвысоких энергий от взрыва в Галактическом центре (Zirakashvili et al. 2023)

Радиус гало  $R = 400$  кпк, джет каждые 100 млн. лет

$l_c = 80$  кпк,  $B = 10^{-6}$  Гс,,  
последняя активность –  
3 млн. лет назад, энергия КЛ -  $3 \cdot 10^{55}$  эрг

$l_c = 40$  кпк,  $B = 0.5 \cdot 10^{-6}$  Гс,  
последняя активность –  
15 млн. лет назад, энергия КЛ -  $4 \cdot 10^{55}$  эрг



**Figure 3.** Spectra of different elements and all-particle spectrum (thick solid line) produced in Galactic center and observed at the Earth position in models "light" (left panel) and "heavy" (right panel). A possible metagalactic contribution in the all particle spectrum (MG) is shown by the thin solid line. Spectra of Tunka-25, Tunka-133 array ([43], open circles) and PAO ([44], energy shift +10%, black circles) are also shown.



# 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 IIP.
- 4) КЛСВЭ могут ускоряться во внегалактических объектах (гамма-всплески, активные ядра галактик и т.д.). Наиболее вероятно, что источники находятся близко – галактики Центавр А и Андромеда.
- 5) Галактические модели для КЛСВЭ возможны при наличии огромного гало (размер – сотни килопарсек) с микрогауссным магнитным полем. Такое гало может быть создано при энерговыделении растущей центральной черной дыры и вспышек сверхновых в молодой Галактике 10 млрд. лет назад.