



Астрофизические источники гамма излучения и нейтрино высоких энергий

А.М.БЫКОВ
ФТИ им. А.Ф.Иоффе РАН

ВККЛ МГУ 2022

**Со-авторы различных работ И.Н.Топтыгин, Е.Амато, Д.В.Бадмаев, М.Е. Каляшова,
С.М.Осипов, Г.Г.Павлов, А.Е.Петров, В.И.Романский, С.В.Троицкий, Д.Ч.Эллисон...**

H.E.S.S.



MAGIC



HAWC



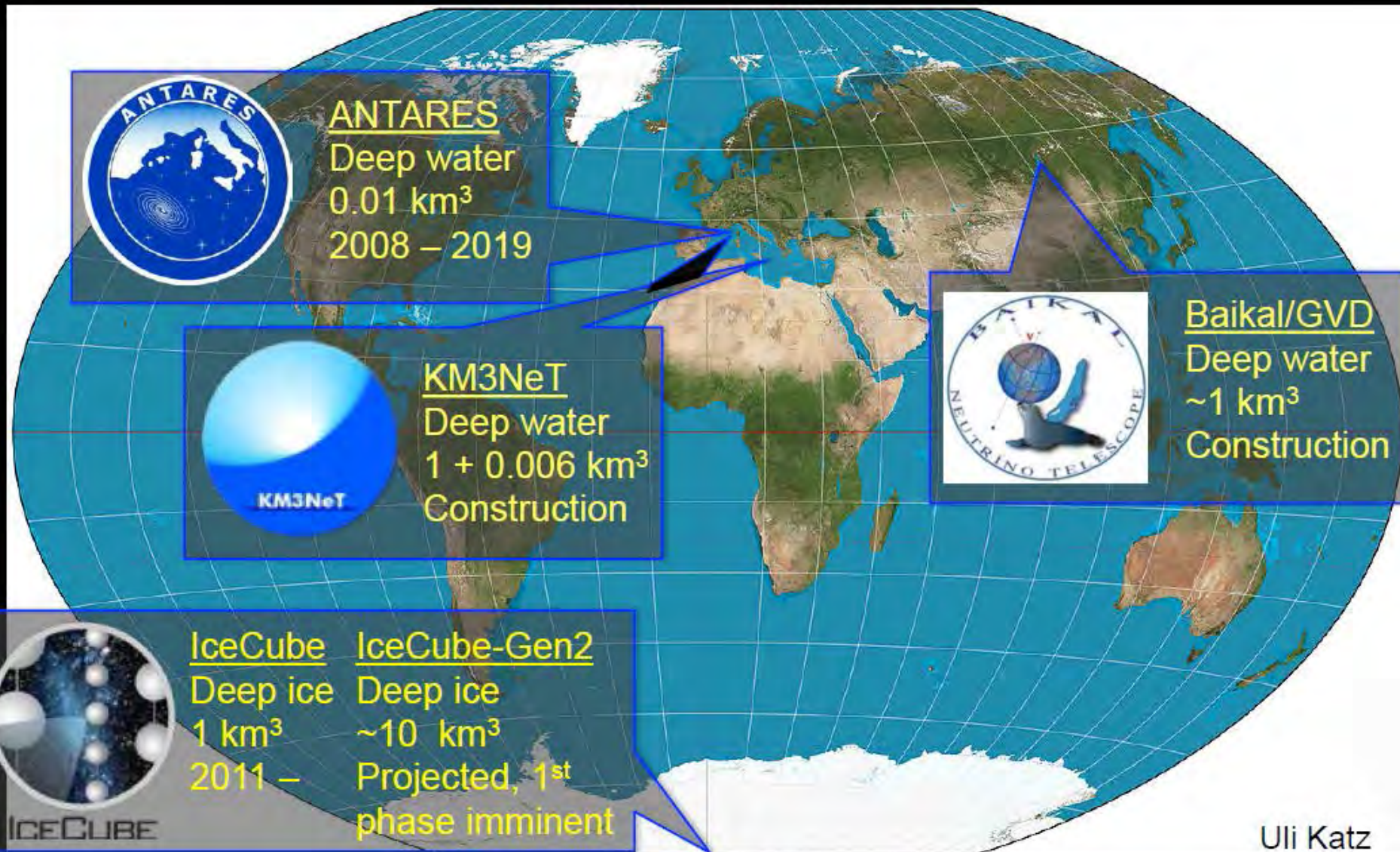
Тайга



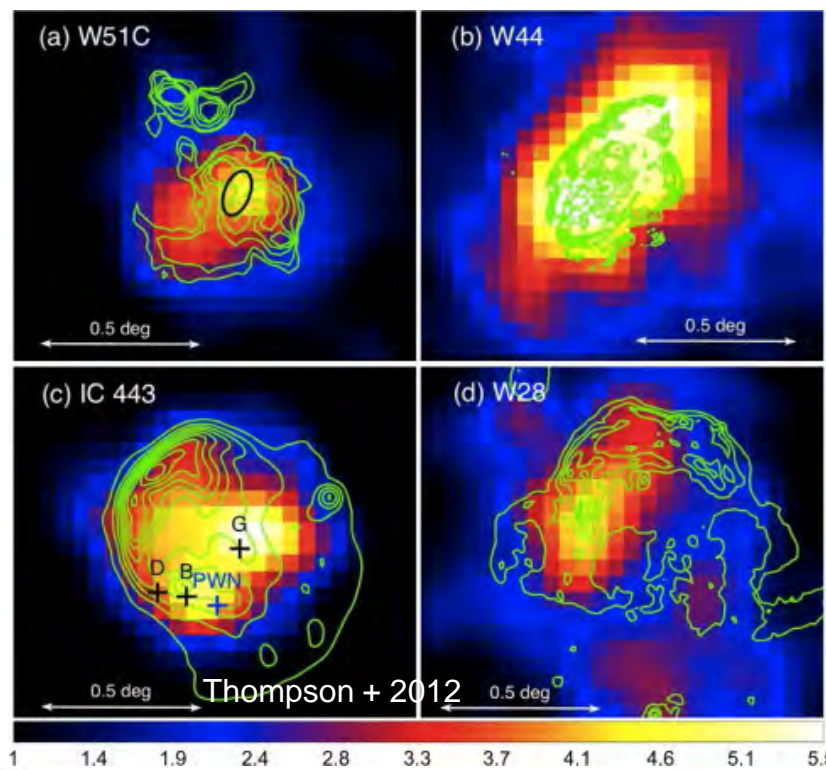
LHAASO



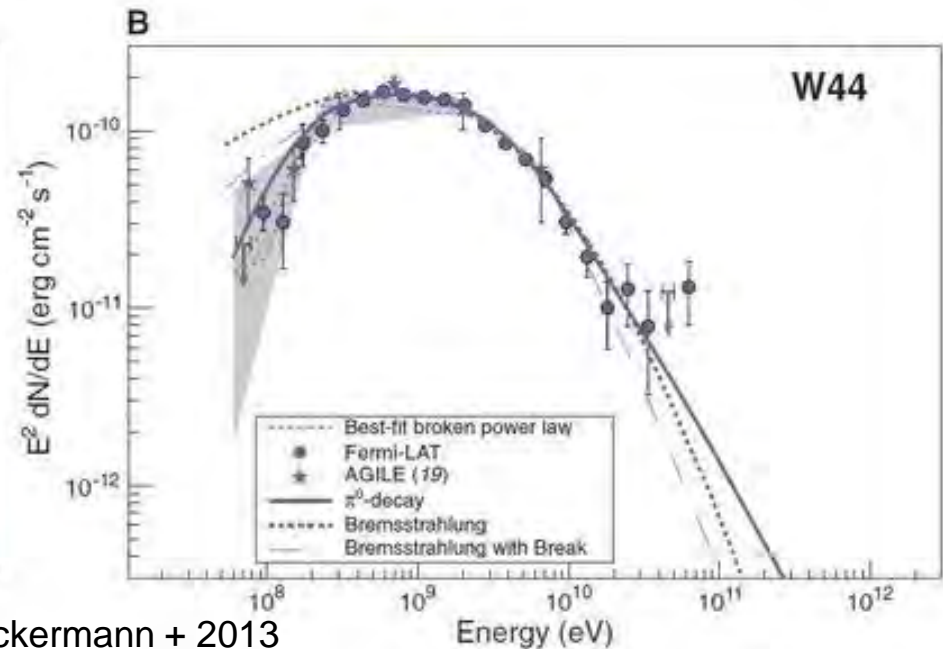
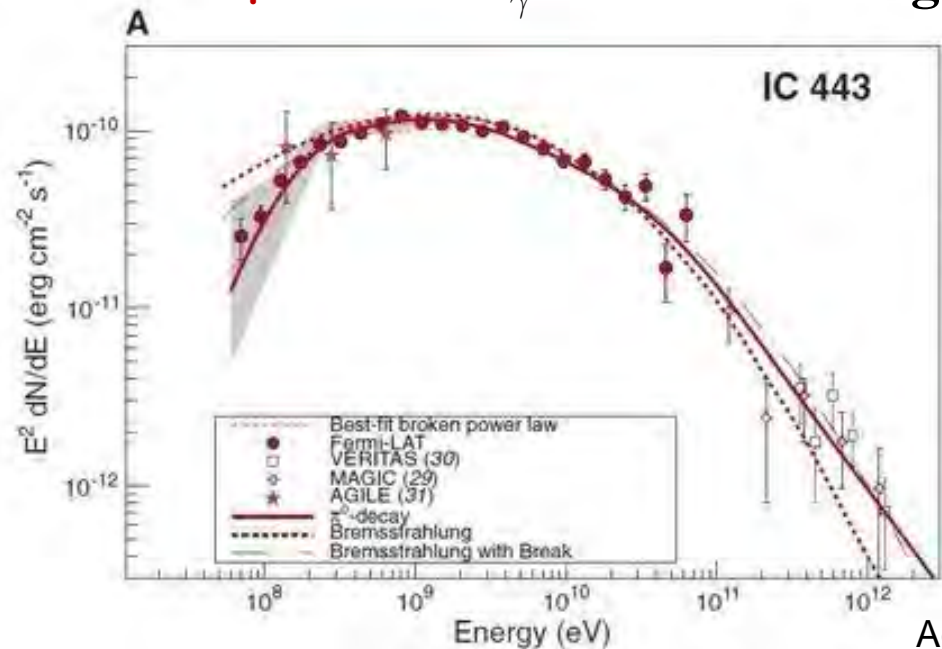
Обсерватории для наблюдений нейтрино высоких энергий



Гамма излучение сверхновых как источников КЛ

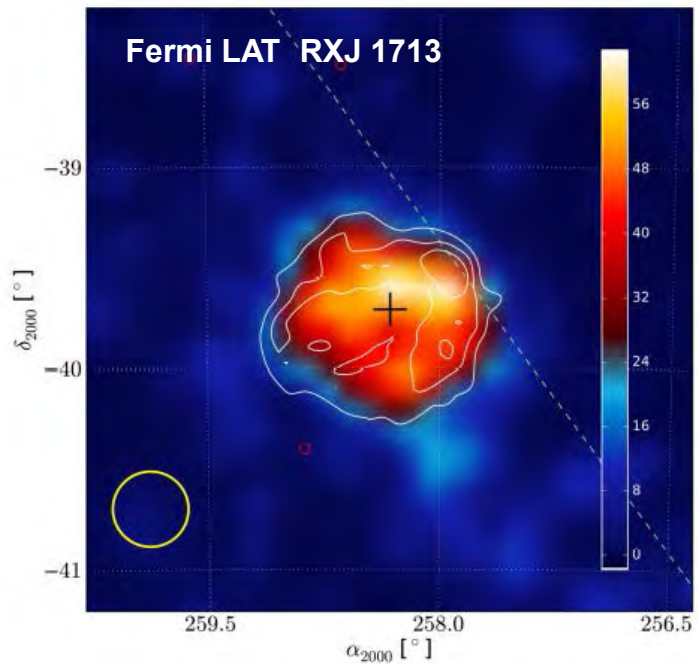


**Fermi и AGILE - адронный механизм
гамма-излучения СН
в молекулярных облаках.
Наиболее яркие ОСН $L_\gamma \sim 10^{34} - 10^{36} \text{ erg / s}$**

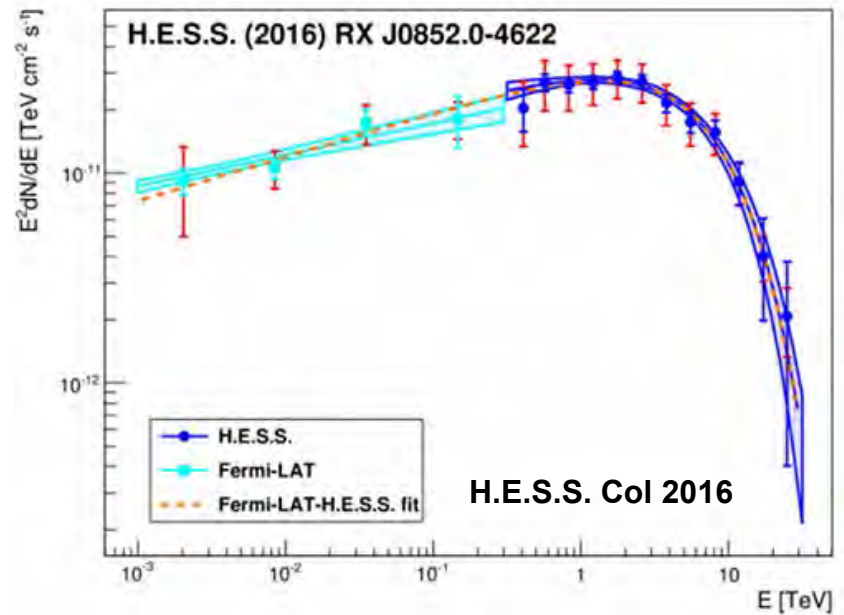
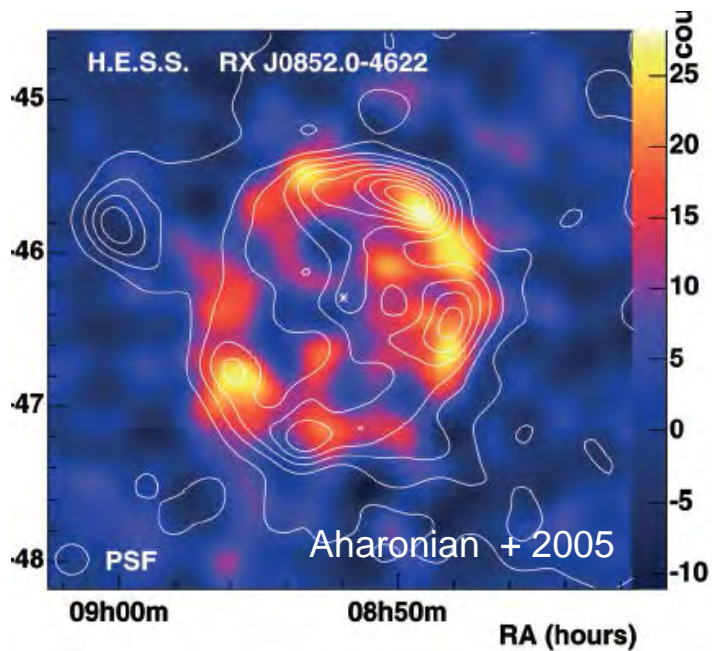
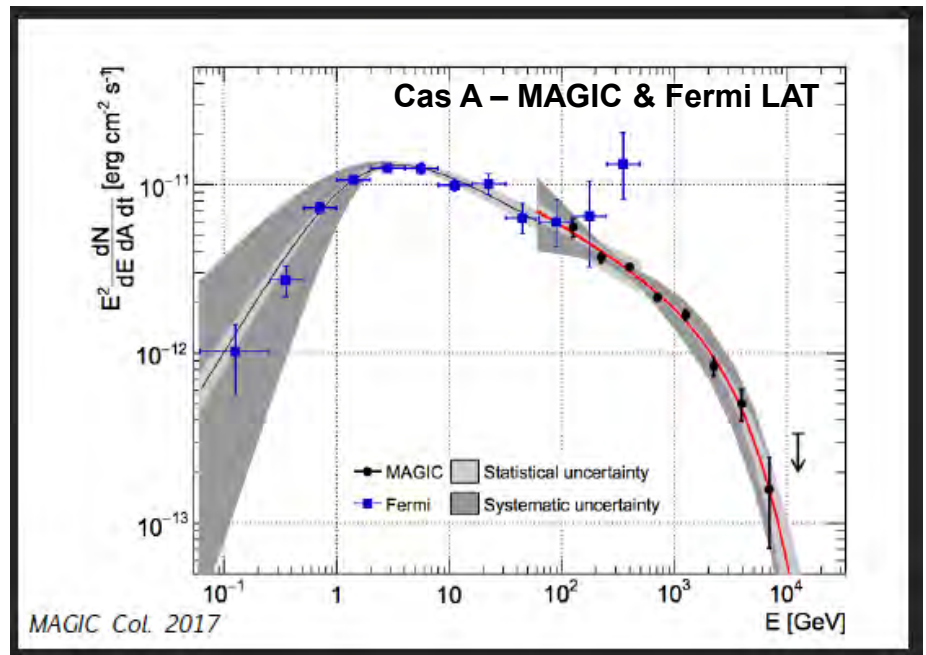


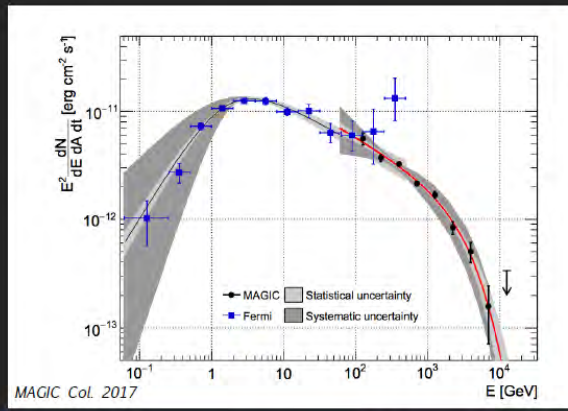
Ackermann + 2013

Ackermann + 2013



Federici + 2015





Fitted MAGIC spectrum assuming:

- Pure power-law (PWL)
- Power-law with exponential cut-off (EPWL)

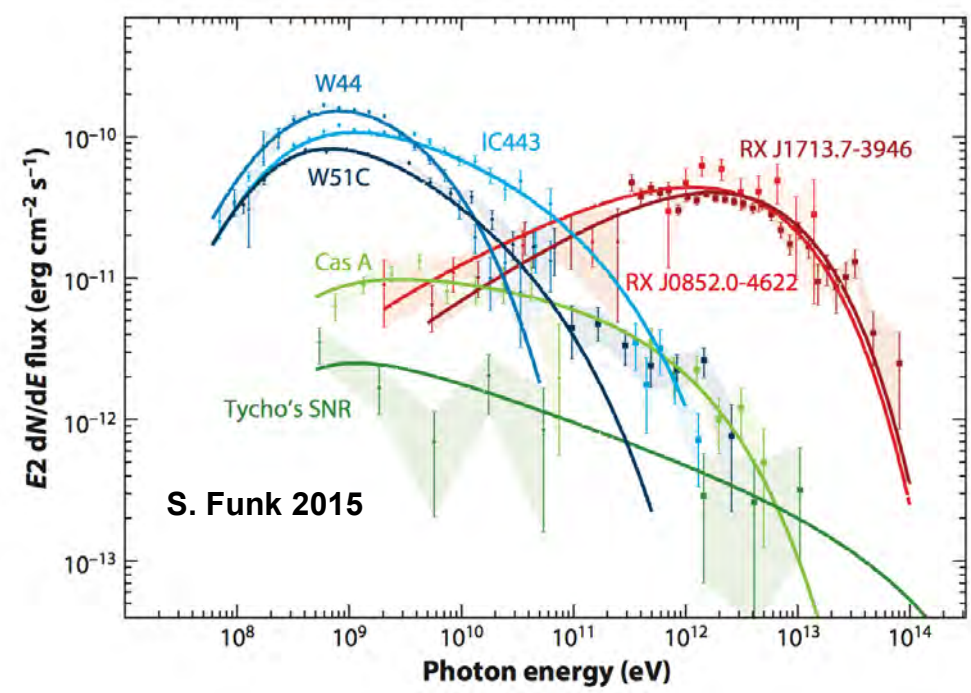
EPWL preferred over PWL with 4.6σ significance.

$E_{cut} = 3.5$ TeV

Fermi spectral index:	MAGIC Fit:
$\Gamma_1 = (0.90 \pm 0.08)$	$f(E) = N_0 (E/E_0)^{-\Gamma} \exp(-E/E_c)$
$\Gamma_2 = (2.37 \pm 0.04)$	$\Gamma_1 = (2.40 \pm 0.1_{sta} \pm 0.2_{sys})$
	$E_c = 3.5^{(+1.6_{-1.0})_{sta} (+0.8_{-0.9})_{sys}}$ TeV

Во многих случаях трудно надежно разделить лептонные и нуклонные механизмы излучения (кроме СН в молекулярных облаках)

Наблюдаемые спектры гамма-излучения молодых ОСН часто имеют фотонный индекс 2.2-2.4 и максимальные энергии ниже 100 ТэВ

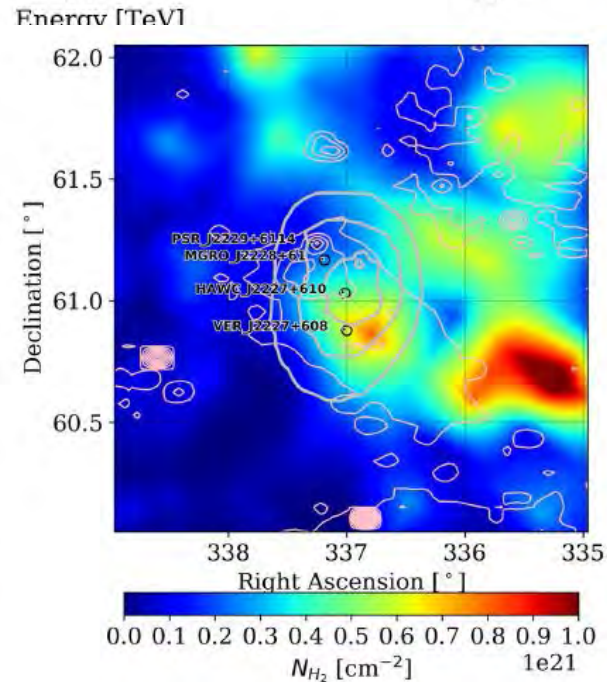
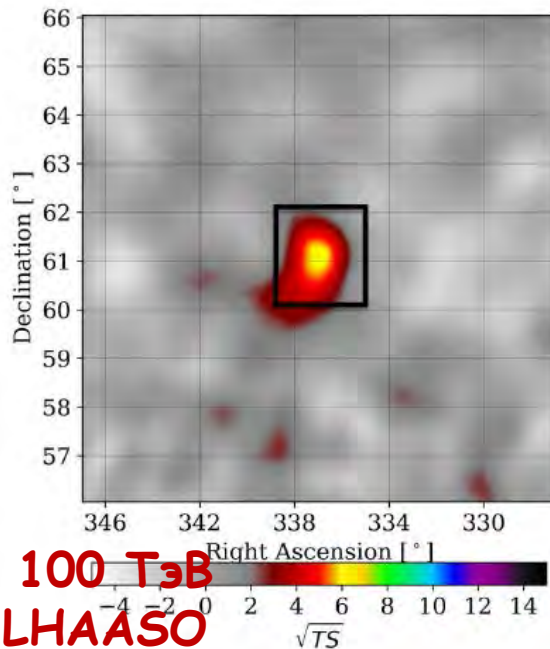
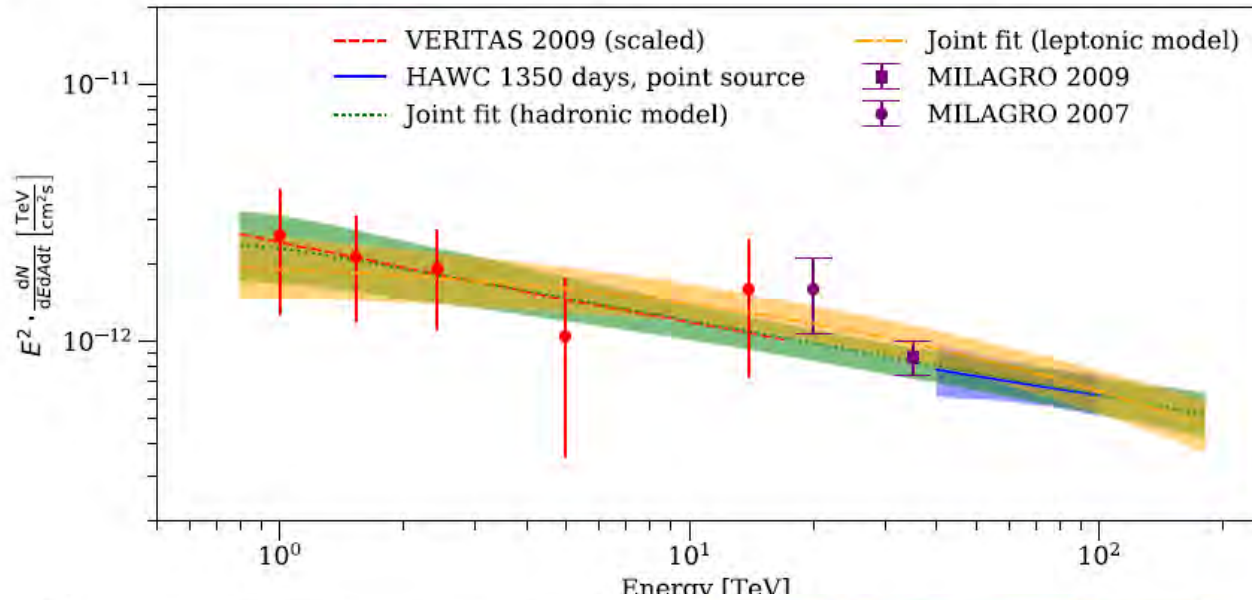


Какие источники ускоряют КЛ выше 100 ТэВ?

HAWC J2227+610 and Its Association with G106.3+2.7, a New Potential Galactic PeVatron

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL LETTERS, 896:L29 (9pp), 2020 June 20

Albert et al.



Также выше 100 ТэВ
видят Tibet LHAASO

Теория: ускорение КЛ до энергий выше ПЭВ возможно связано с некоторыми относительно редкими типами СН в первые десятилетия после вспышки

Модель спектра протонов
СН типа II_n ~ 30 лет
В.Н. Зиракашвили и В.С. Птускин 2015

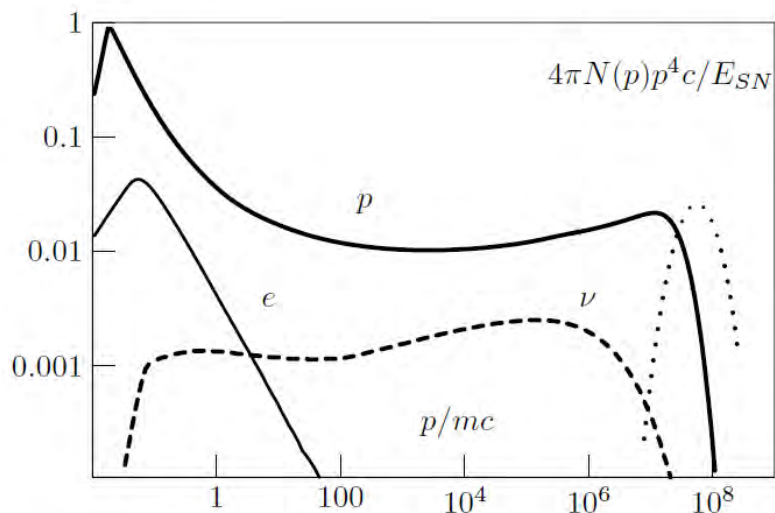
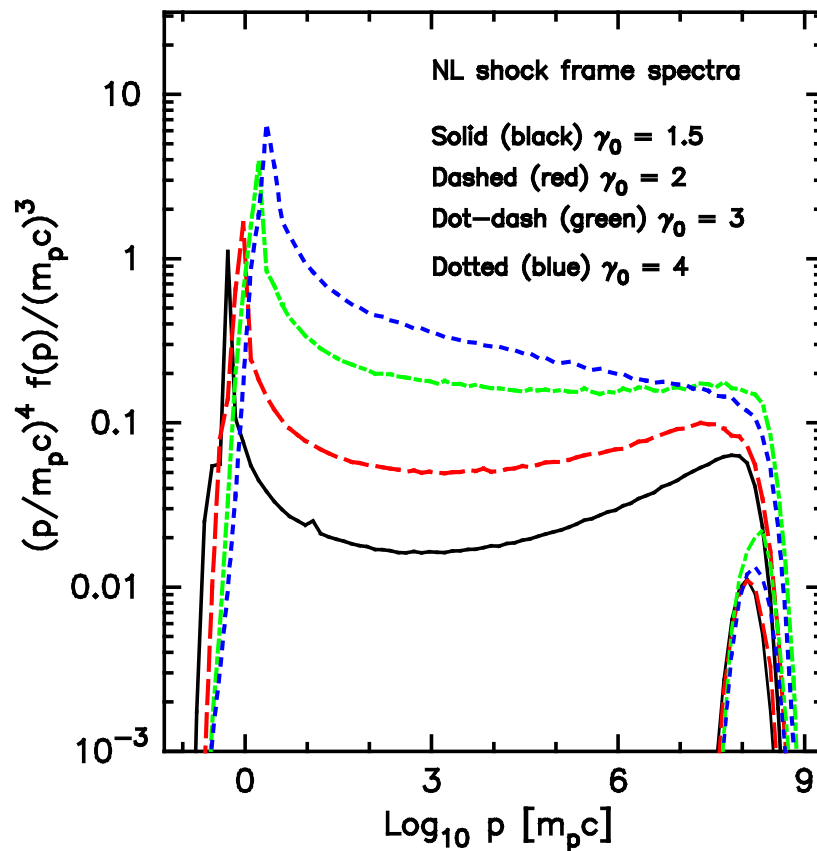


Figure 4: Spectra of particles produced in the supernova remnant during 30 yr after explosion. The spectrum of protons (thick solid line), the spectrum of secondary electrons (multiplied on 10^3 , thin solid line), the spectrum of neutrinos (thick dashed line) are shown.

Модель спектра протонов
СН типа Ib/c ~ несколько лет
А.Б., Д.Эллисон, С.Осипов

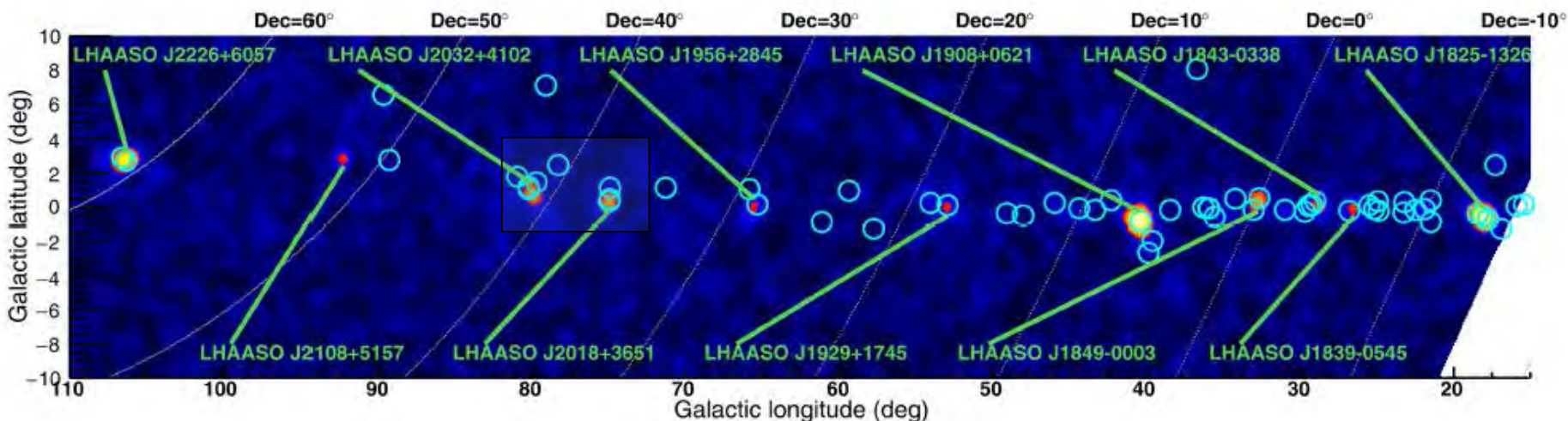
Space Sci. Reviews v.214, 41, (2018)



Релятивистские транзиенты как источники КЛ
доклад В.Романского и Universe. 2022; 8(1):32

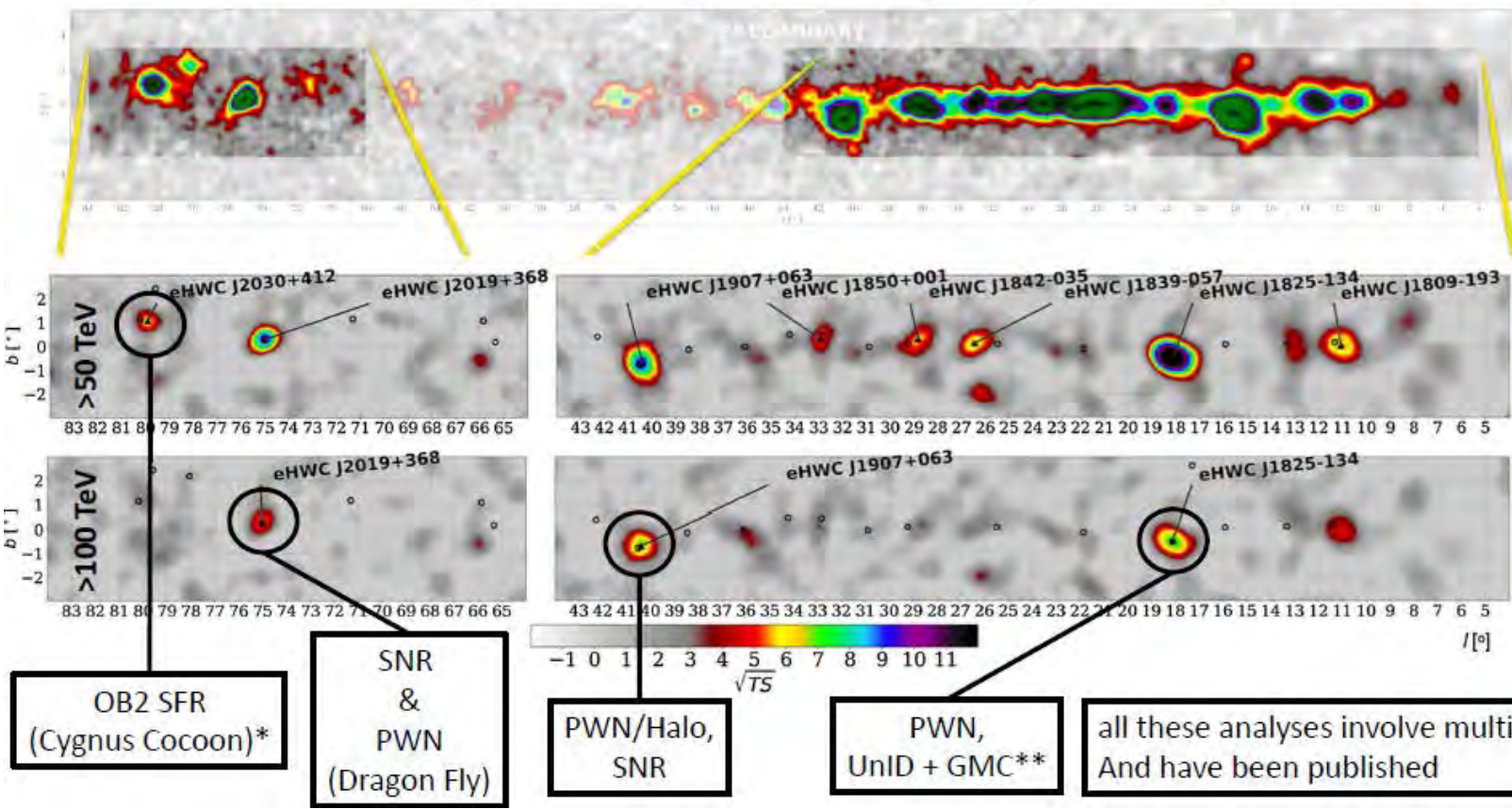
Что показывают наблюдения выше 100 ТэВ?

Карта неба LHAASO на энергиях выше 100 ТеV



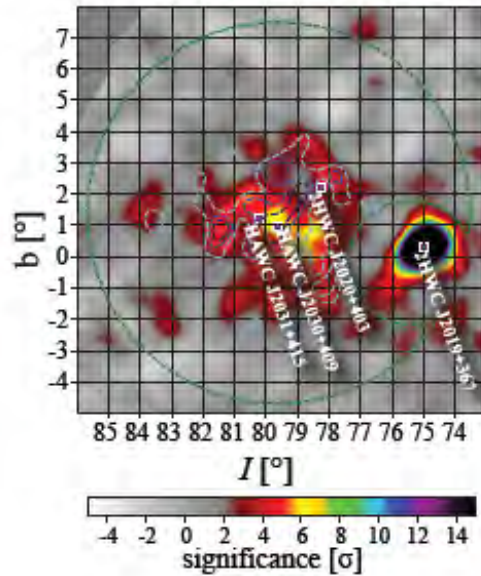
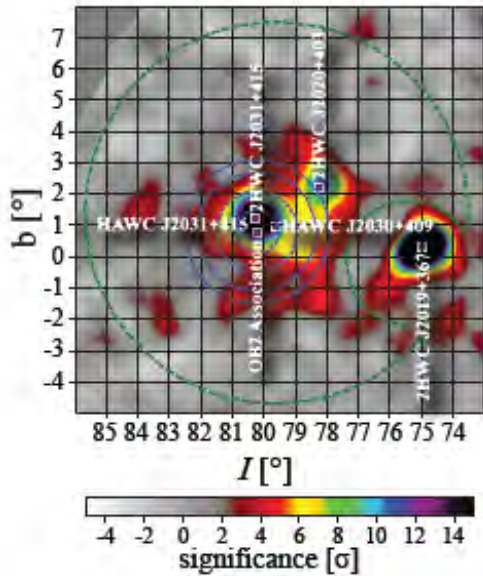
Cao et al Nature, Volume 594, Issue 7861, p.33, 2021

Карта Галактики HAWC



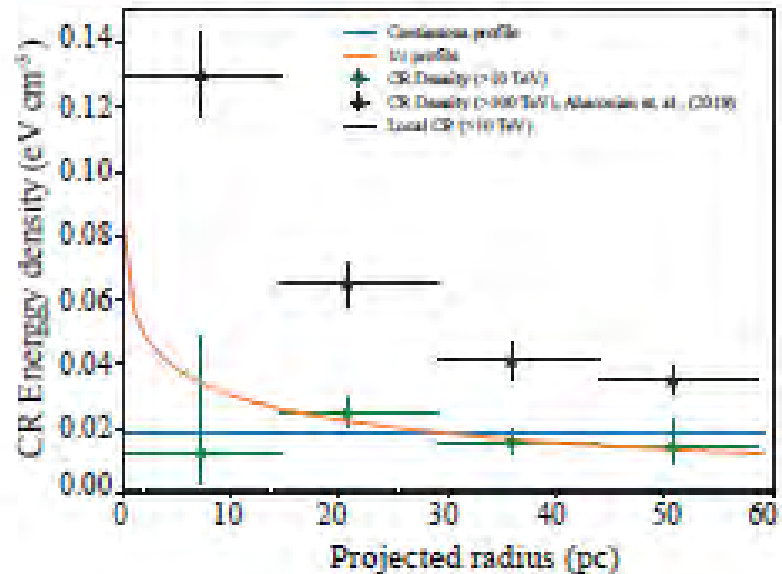
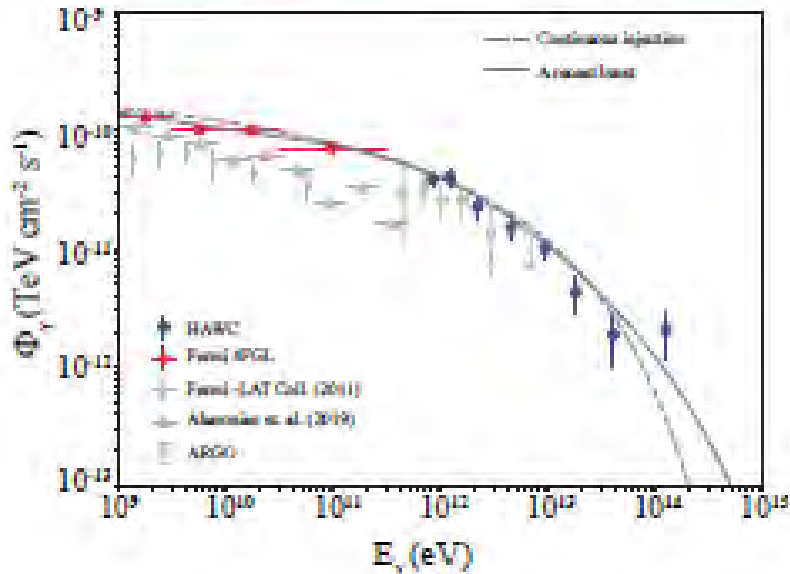
PRL 124, 021102 (2020)

Судгнус Сосооп - наблюдения НАВС

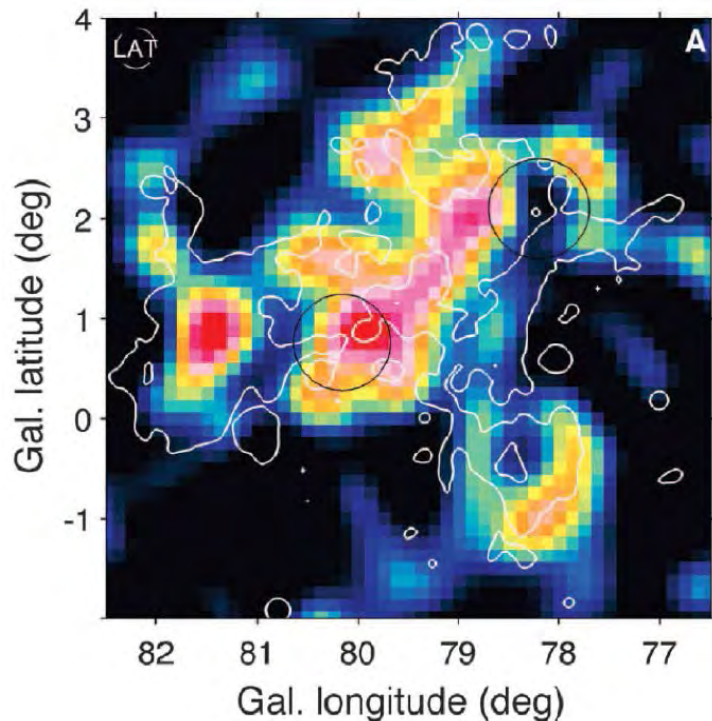


Источник протяженный
Совпадает по положению с Суг OB2

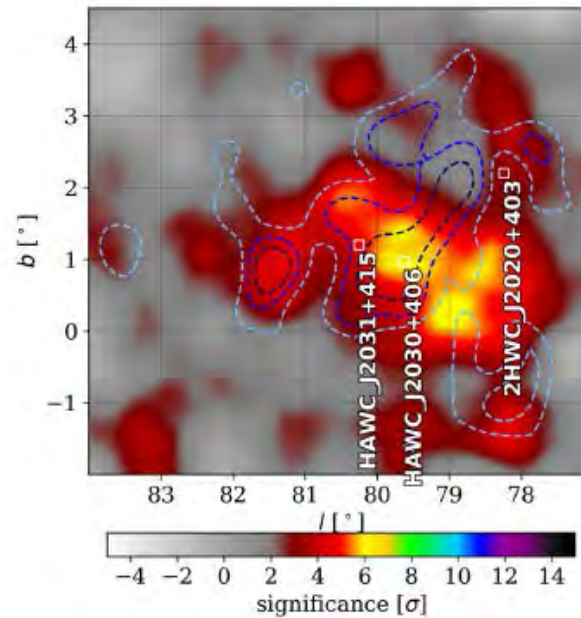
Спектр меняется от ГэВ к ТэВ
Вероятно адронный механизм
излучения от протонов до ПэВ



**Суднус Сосоон был открыт Fermi-LAT
его видит LHAASO HAWC ARGO и др.**



Ackermann + Fermi team 2011



В.Нона HAWC 2020

**Есть возможность использовать широкое поле
eROSITA для протяженного источника...**

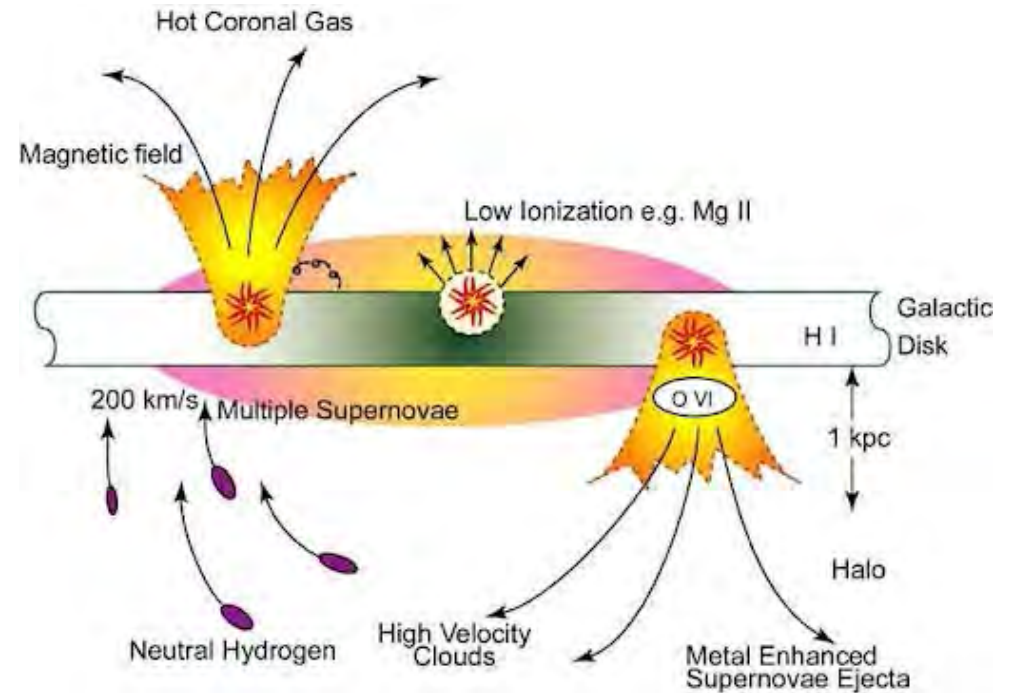
Источник Fermi Cygnus Cocoon
протяженный ~ 50 pc

гамма потоки анти-коррелируют с ИК
излучением MSX

Ассоциация Cygnus X на расстоянии 1.4 -
1.7 kpc состоит из нескольких скоплений
OB звезд. Cygnus OB2 имеет ~ 120 O stars
(Knodlseder 2000) и более 1000 B звезд в
области размером 10 pc. Там есть OCH
Gamma-Cygni, гамма-пульсары и двойные
гамма-источники PSR 2023 (о нем далее)

**Моделирование ускорения КЛ и
излучения протяженной сверхкаверны
(Cygnus Cocoon Superbubble)**

Сверх-каверны в межзвездной среде



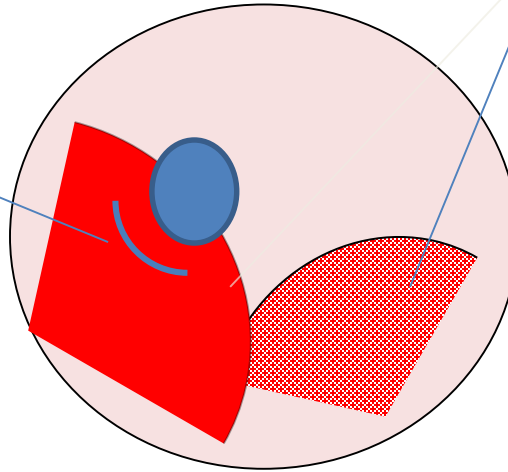
A 100 pc superbubble around star cluster NGC 1929 LMC

<http://www.solstation.com/x-objects/lmc2subub.jpg>

Кинетическая теория нетепловых процессов в сверх-кавернах

**Проблема с перемежаемыми
МГД-течениями с множественными УВ
и большим различием существенных
масштабов ... (см. АБ и И.Н.Топтыгин 2001)**

**Вторичные УВ от
рассеяния первичных
УВ на облаках**

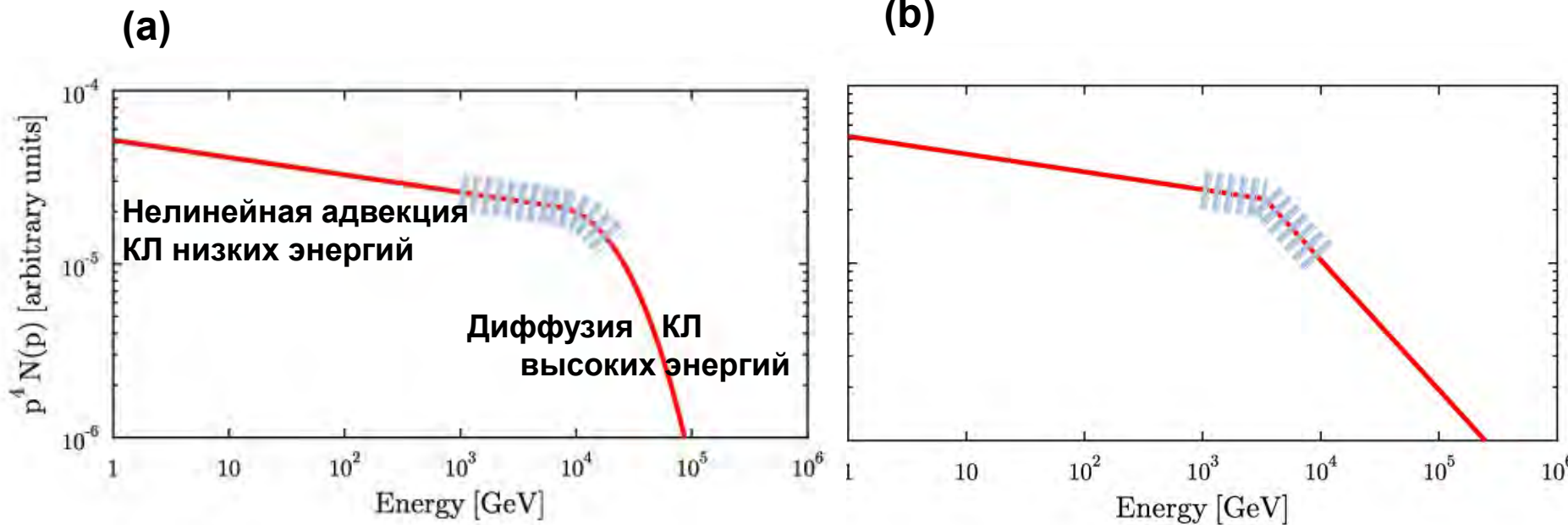


**Первичные УВ и
разрежения от СН**

Микроструктура бесстолкновительных УВ ~ 100 км (РiС гибридное)

Масштаб УВ и МГД течения десятки пк (кинетические у-я и Монте Карло)

Модель спектров протонов в Cygnus Cocoon

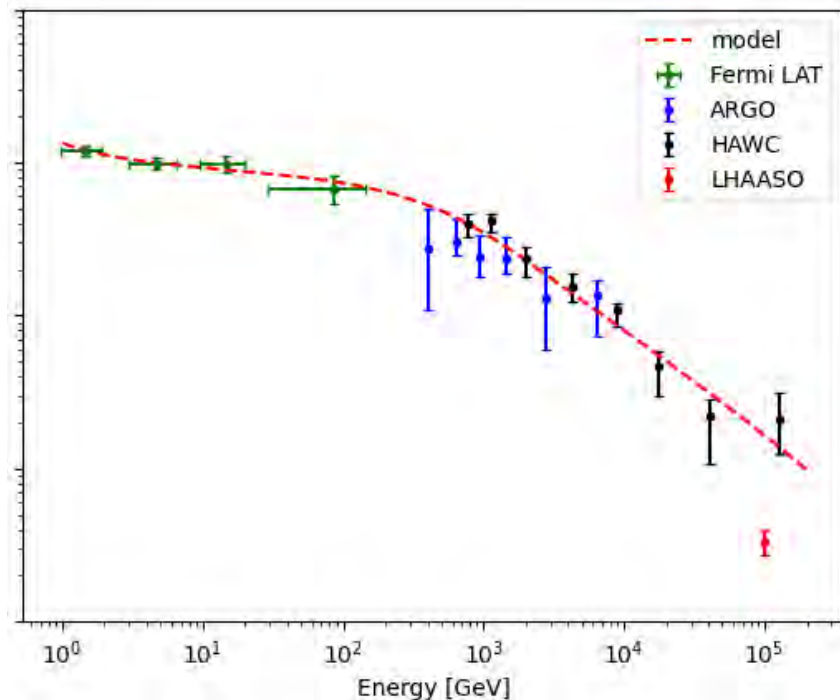
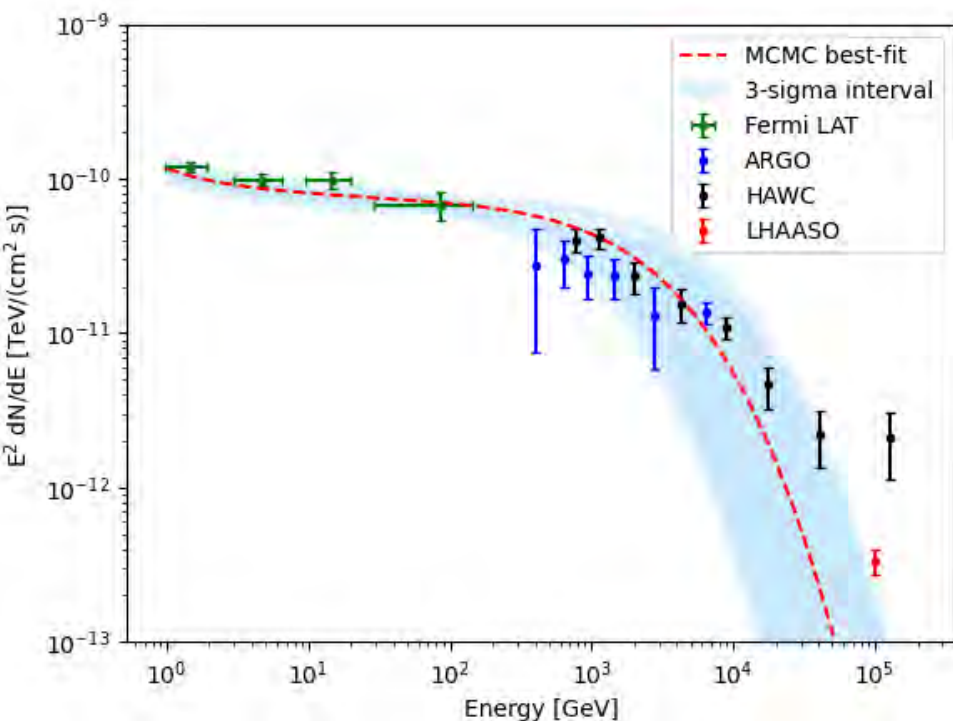


Излом в спектре протонов связан с изменением режима переноса КЛ в superbubble нелинейная адвекция КЛ низких энергий переходит в режим диффузии КЛ при рассеянии магнитной турбулентностью.

Две модели магнитной турбулентности

- (a) Колмогоровская каскадная турбулентность
- (b) Ансамбль слабых вторичных ударных волн

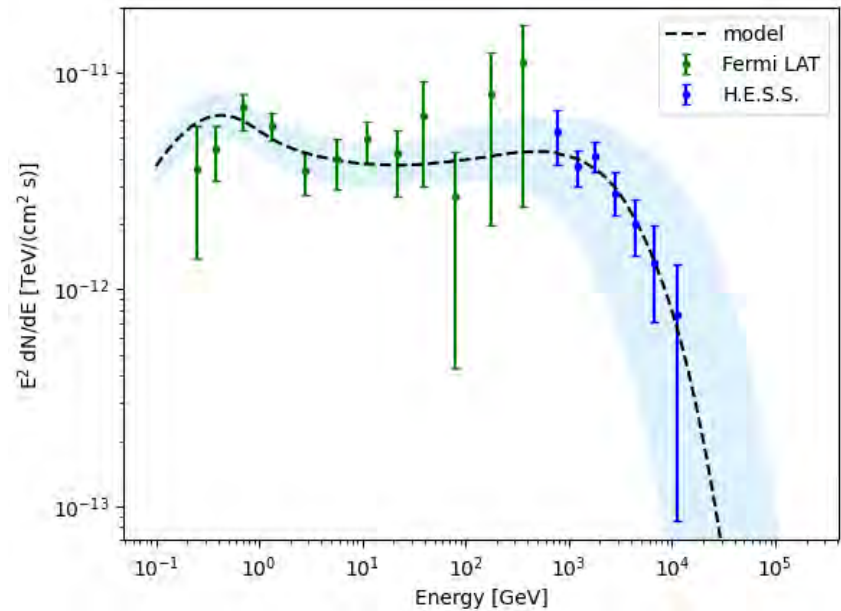
Модель спектра гамма-излучения Cygnus Cocoon – протяженного на десятки пк источника



AB & M.Kalyashova ASR 2022 (arXiv:2203.09842)

В галактиках существуют также десятки компактных скоплений
массивных звезд с размерами меньше пк, что они могут дать?

Спектры гамма-излучения компактного скопления массивных звезд Westerlund 2

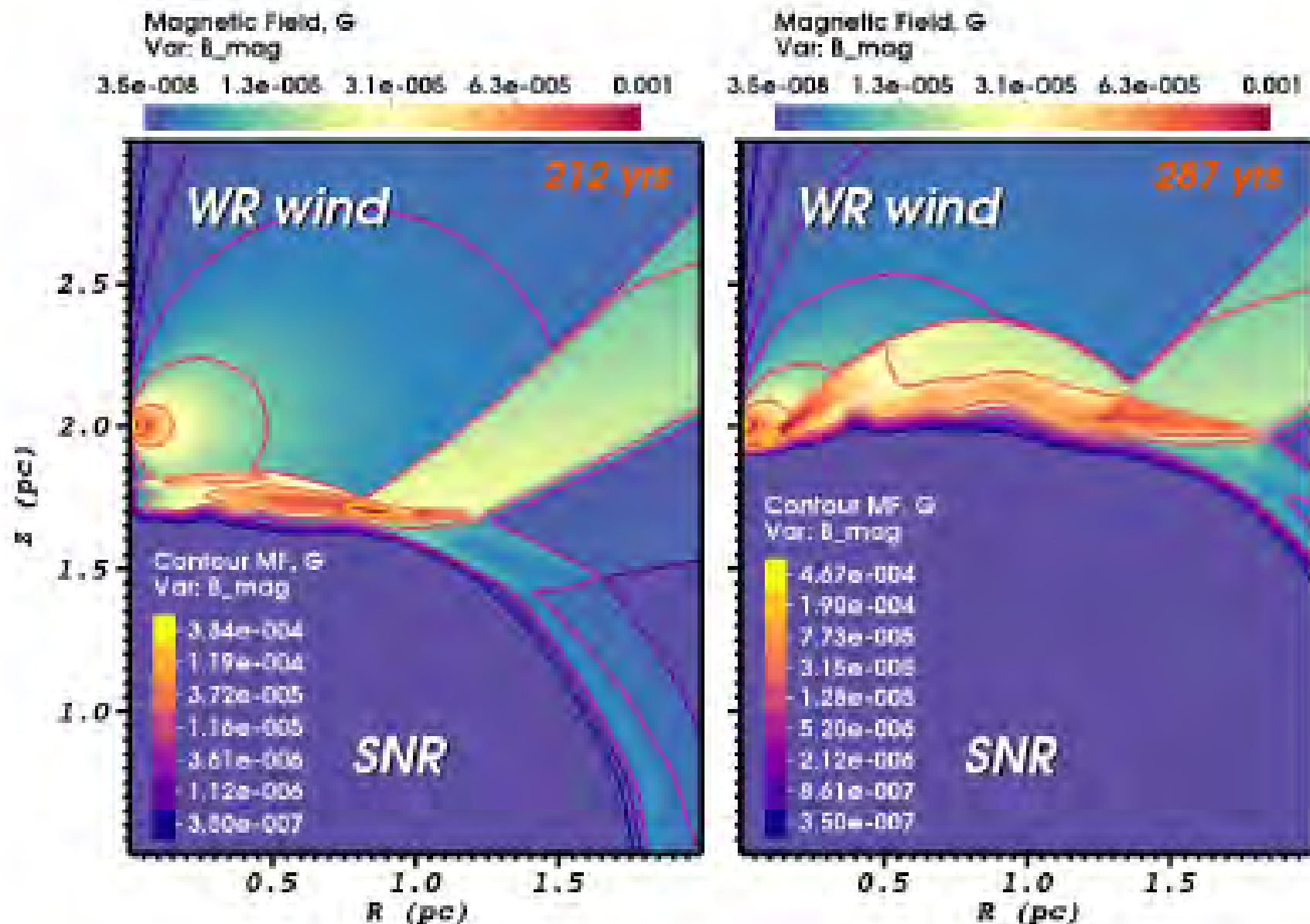


AB & M.Kalyashova ASR 2022 (arXiv:2203.09842)

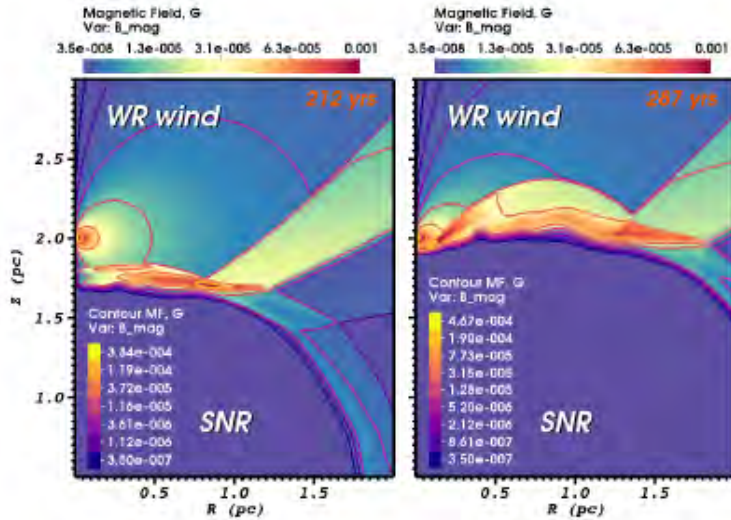
О возможной роли скоплений с WR в решении проблемы ^{22}Ne в КЛ доклад М.Каляшовой

Спектр гамма-излучения Westerlund 2 учитывает ускорение частиц в модели сталкивающихся ветров, но в скоплениях старше нескольких млн. лет должны быть и сверхновые...

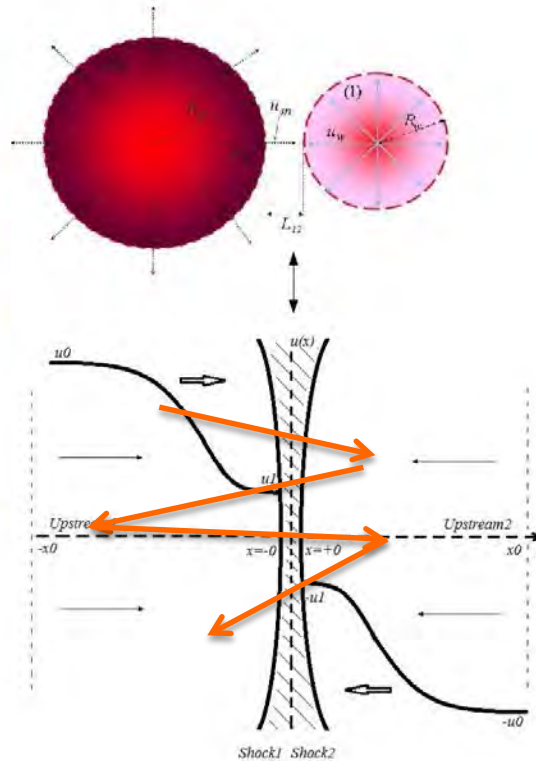
Модель столкновения оболочки СН с мощным звездным ветром



Fermi I: Столкновение СН с мощным ветром



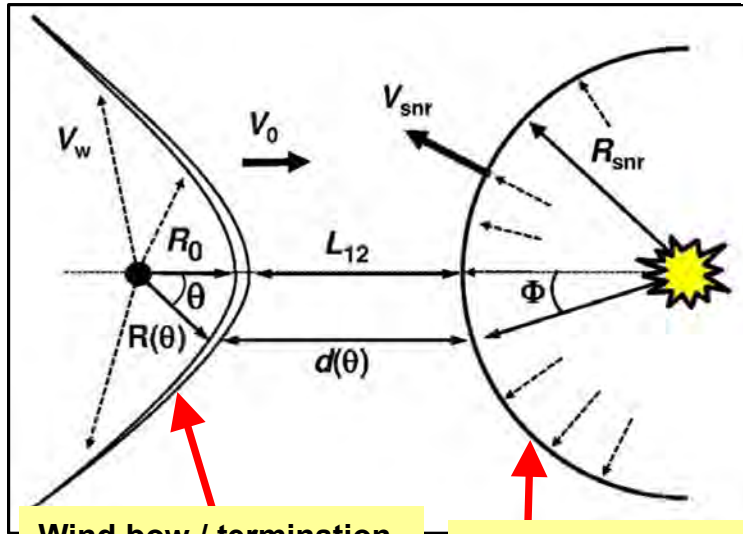
Badmaev AB 2019



$L_{kin} > 10^{38} \text{ erg s}^{-1}$
 $\beta_f \sim 0.01$

AB+ MNRAS V. 429, 2755, 2013

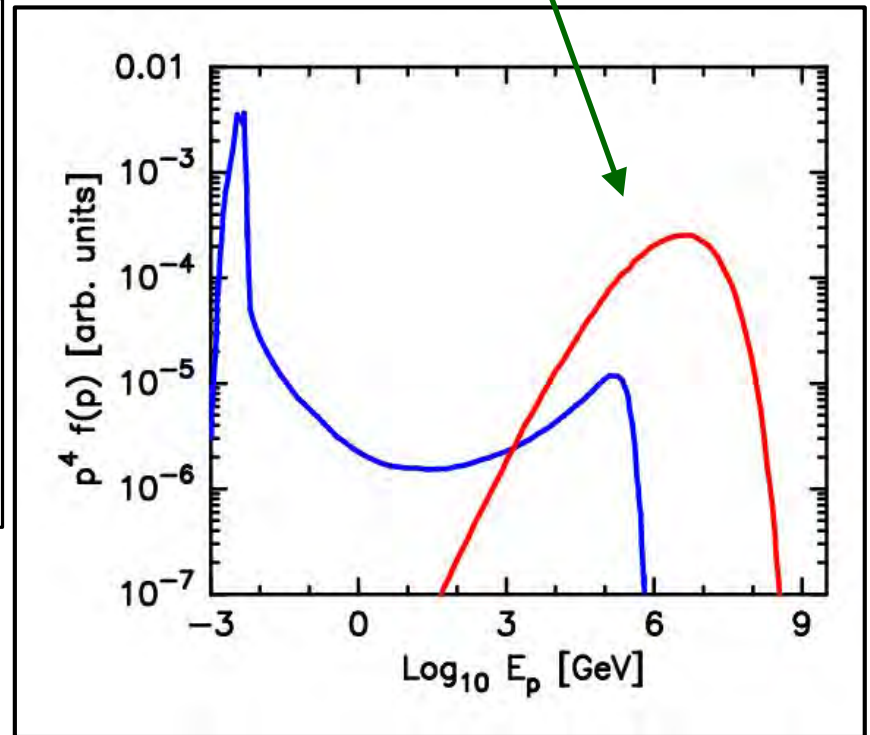
Геометрия области ускорения в сталкивающихся МГД течениях



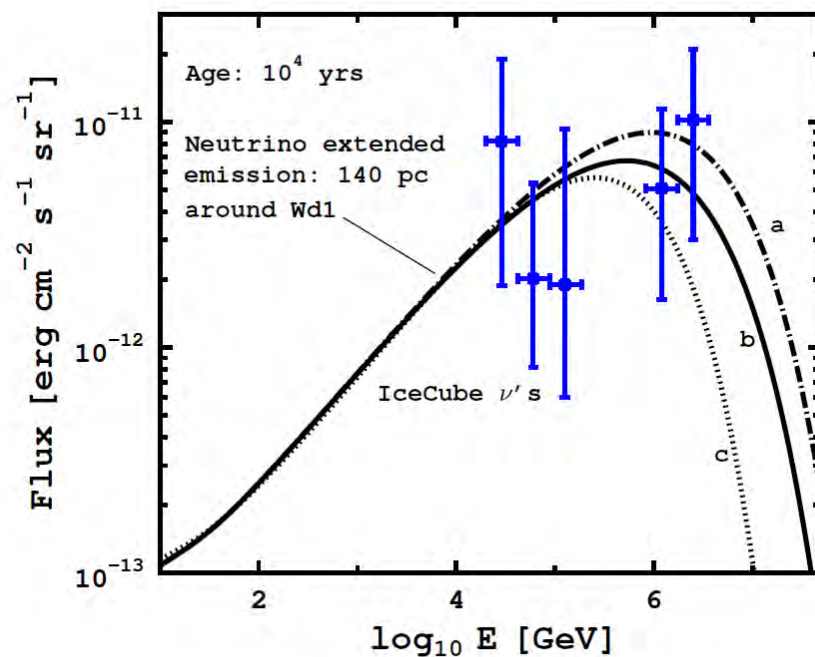
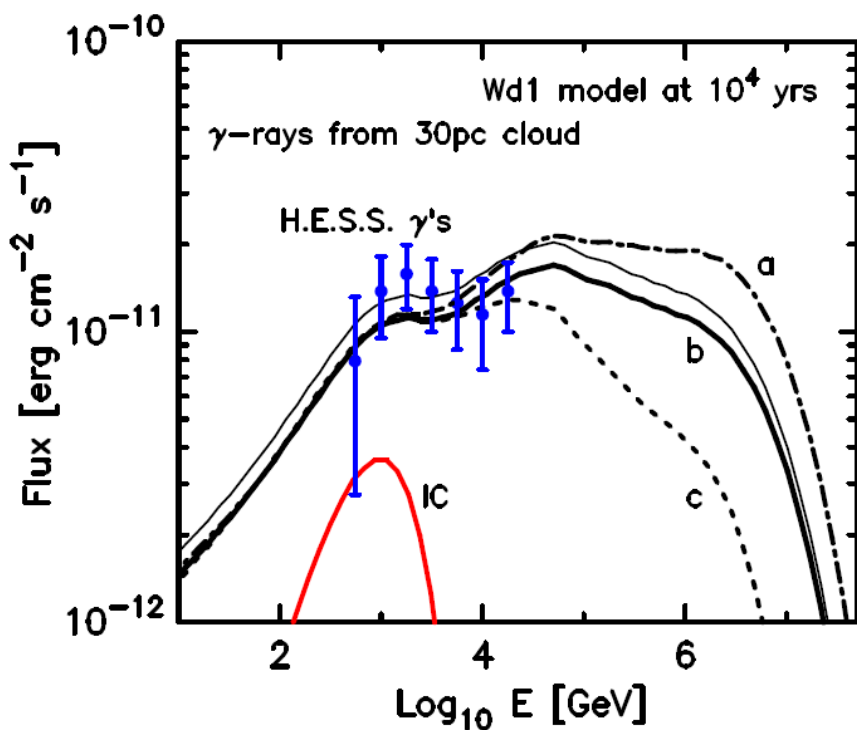
Wind bow / termination shock from young star

SNR blast wave

Жесткий пик - протоны высоких энергий ускоренные между сталкивающимися УВ звездного ветра и СН



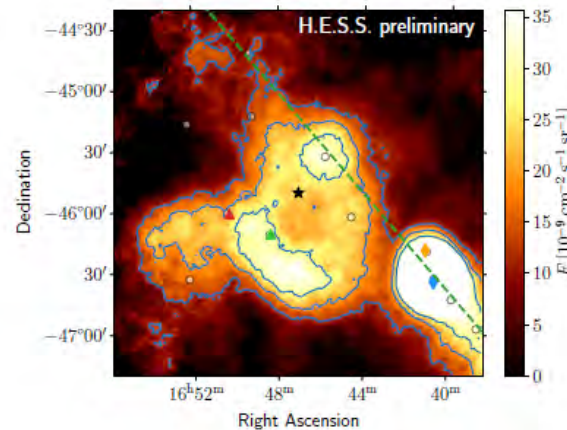
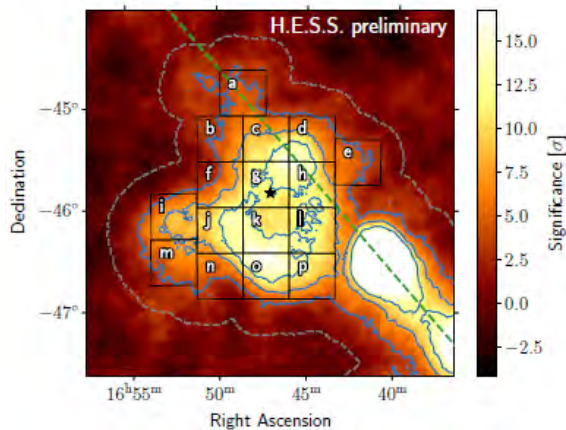
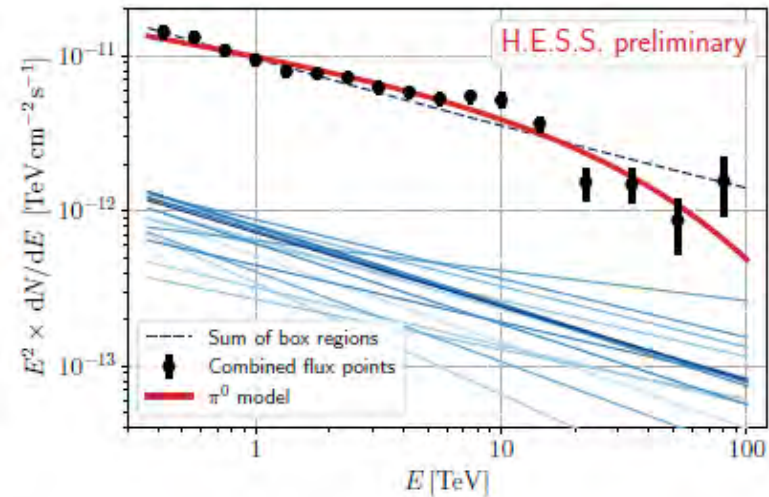
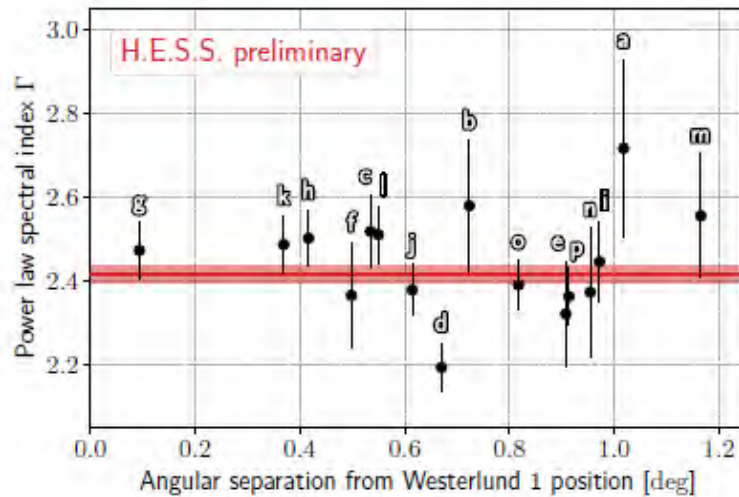
Модельные спектры гамма излучения и энергичных нейтрино из 140 пк - окрестности Westerlund I



Наблюдения H.E.S.S. Westerlund I (ICCR 2021)

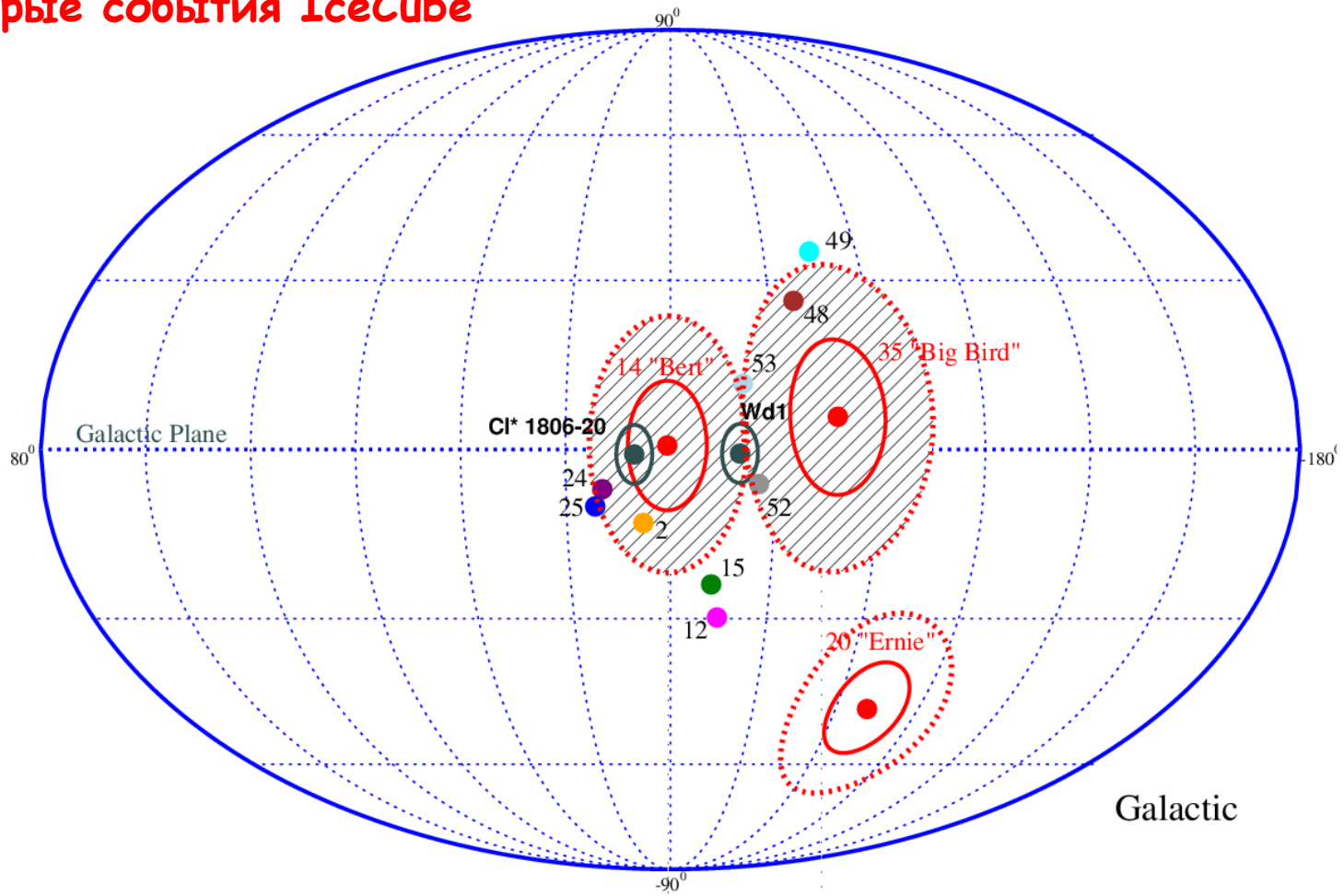
The young massive stellar cluster Westerlund 1 as seen with H.E.S.S.

Lars Mohrmann

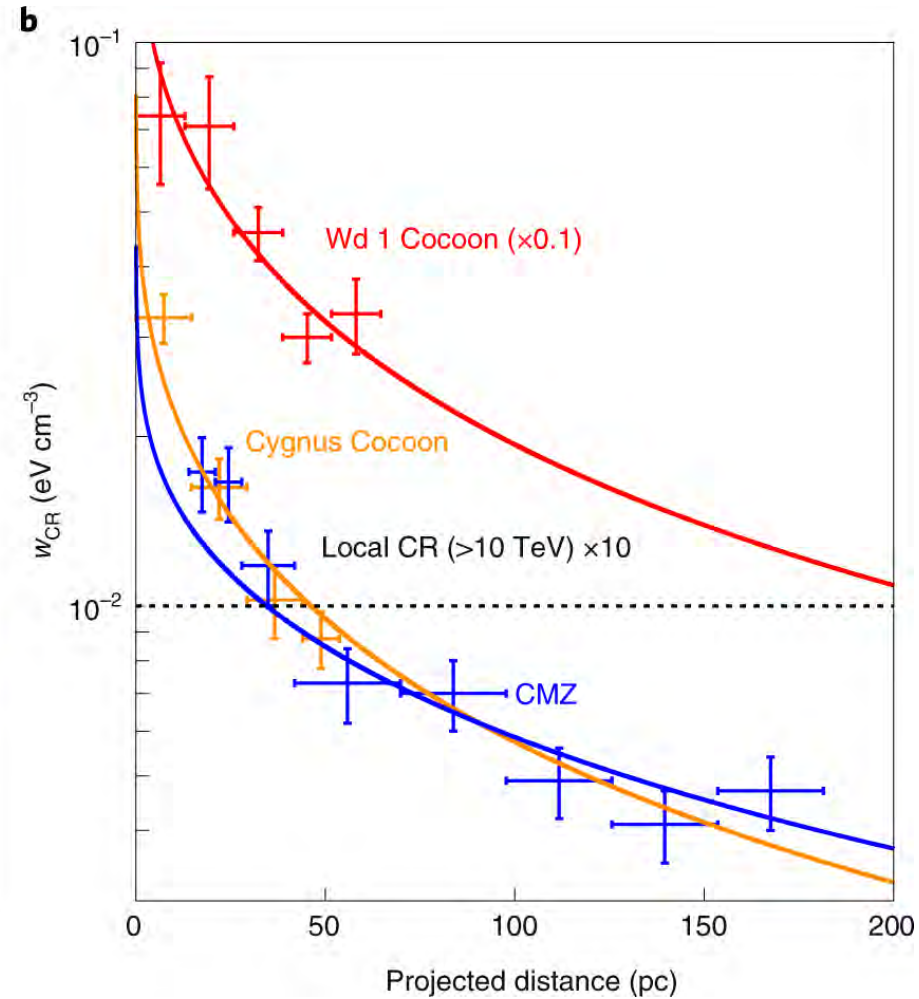
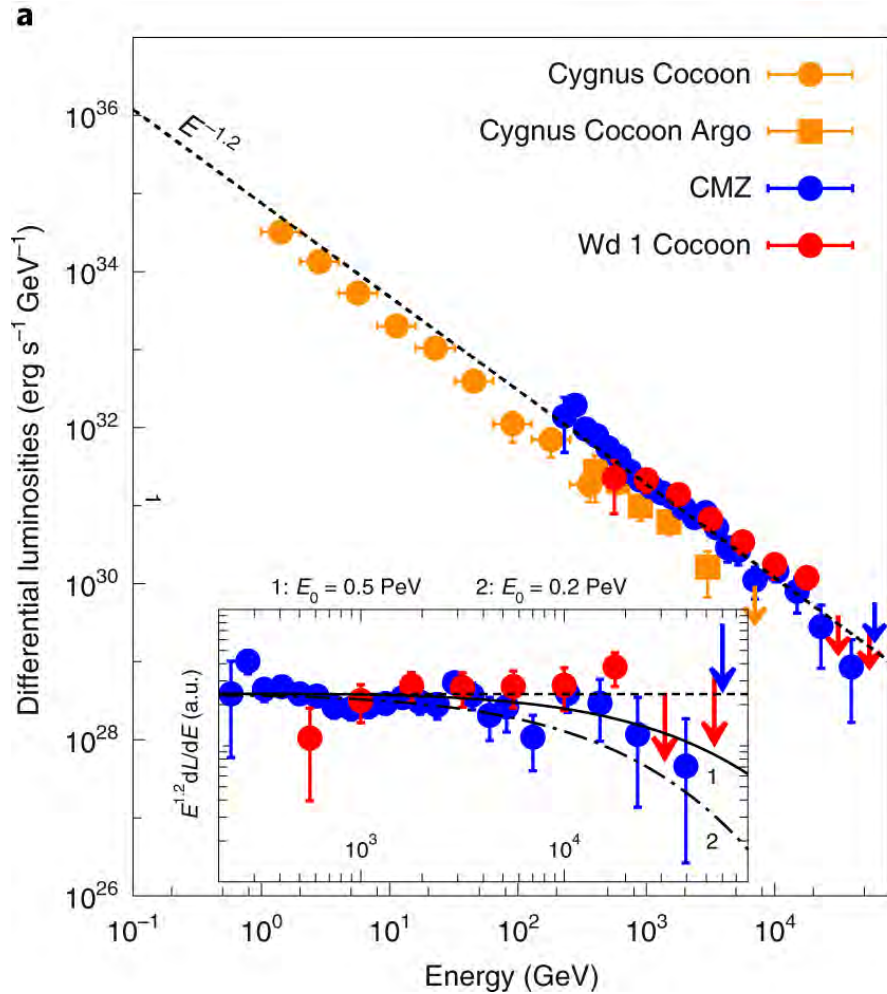


В наблюдаемый спектр гамма вносят вклад КЛ (а) ускоренные SN-Wind и звездными ветрами (см Wd2) покинувшие источник в облака

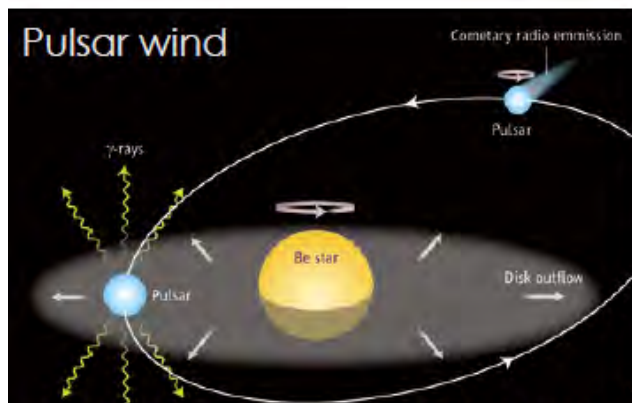
Возможный вклад двух компактных скоплений молодых звезд в некоторые события IceCube



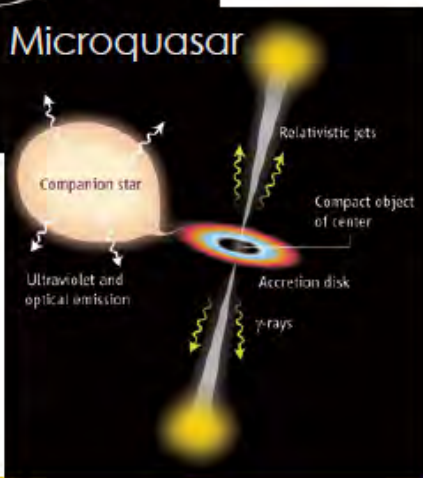
Наблюдения H.E.S.S. потенциальных источников ТЭВ в скоплениях молодых массивных звезд



Двойные звезды как гамма источники: микро-квазары и пульсары



Mirabel 2006



Skilton et al, 2009

Первый микро-квазар с аккрецирующей черной дырой

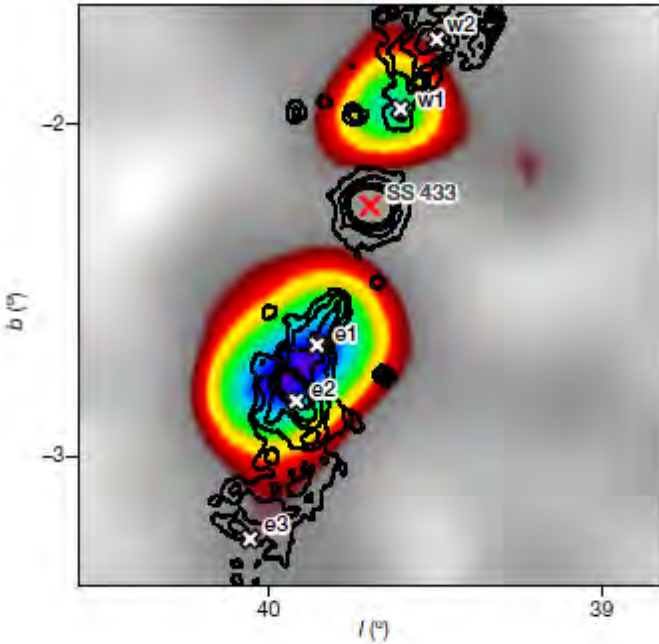
SS 433

Сверхкритическая аккреция $\sim 10^{-4}$ M_{\odot} /год
Орбитальный период 13d (прецессия 126d)

$M_x/M_v > 0.6$ черная дыра $M_x \sim 8-10 M_{\odot}$ + A
сверхгигант
(Черепашук Постнов Белинский MNRAS 485, 2638, 2019)

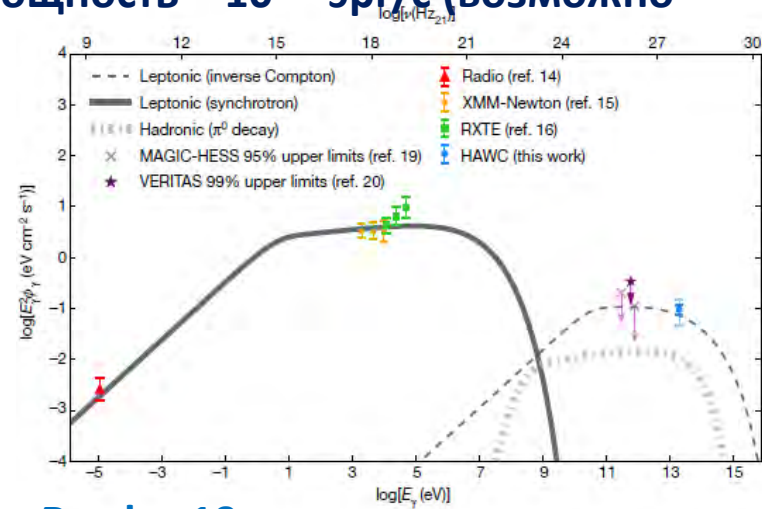
Джеты 0.26 с, мощность $\sim 10^{39}$ эрг/с (возможно барионные)

Остаток SN W50



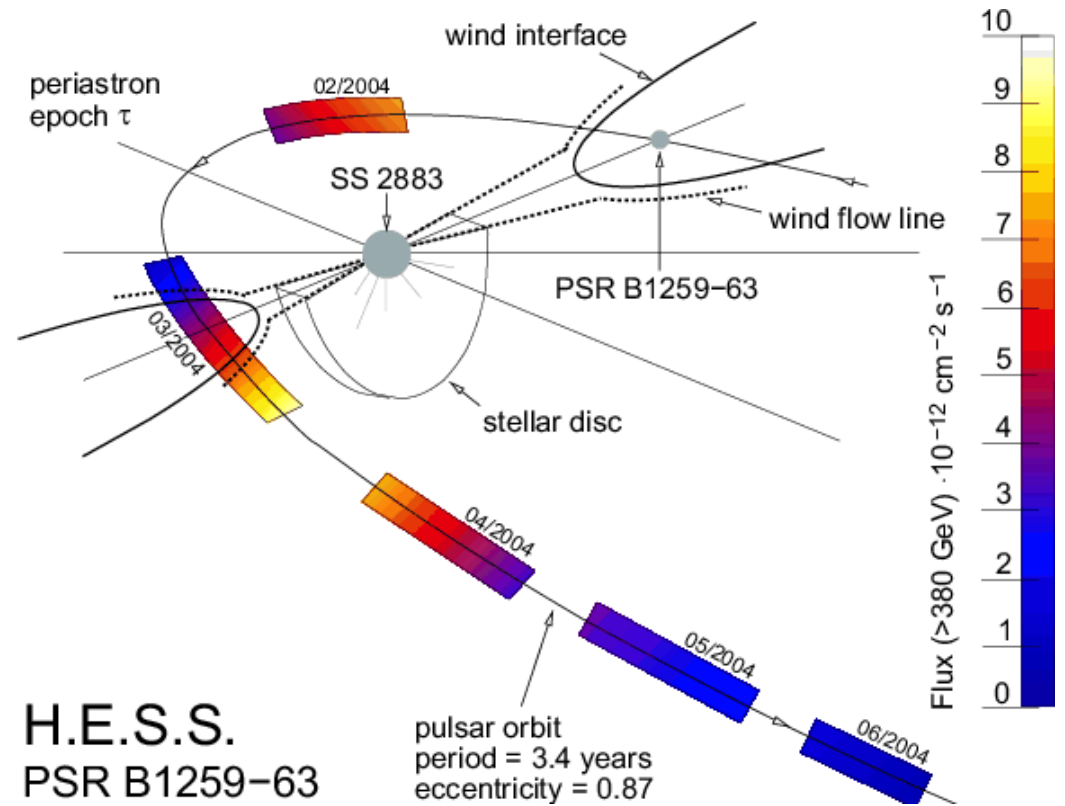
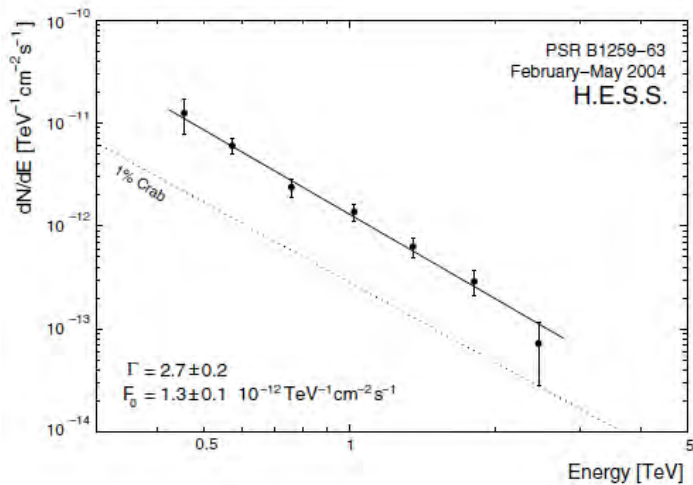
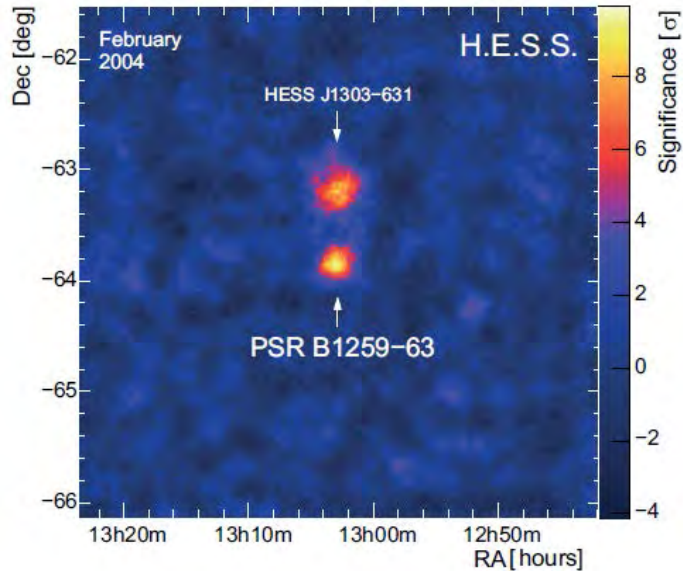
HE/VHE излучение (Bordas 2015, HAWC 2018) $L \sim 10^{32}$ эрг/с

Вероятно от взаимодействия джетов со средой, т.к. нет VHE центрального источника, фотоны до 20 ТэВ...



Bordas 19

Двойной ТэВ гамма-источник PSR B1259-63 - Ве звезда излучение около периастра взаимодействие ПТ с диском?



Aharonian et al. A&A 2005

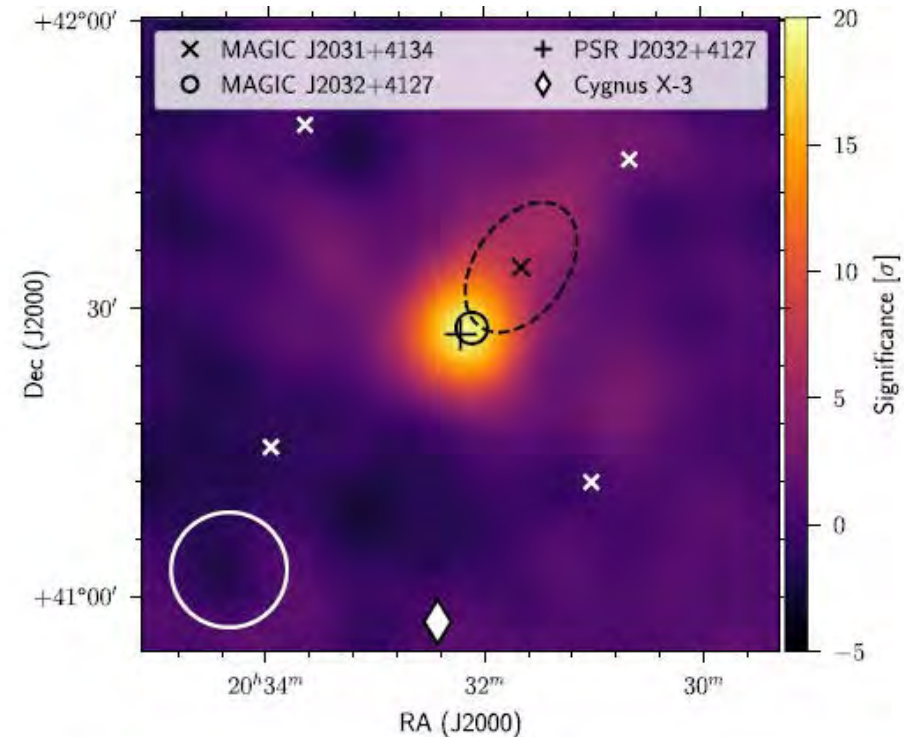
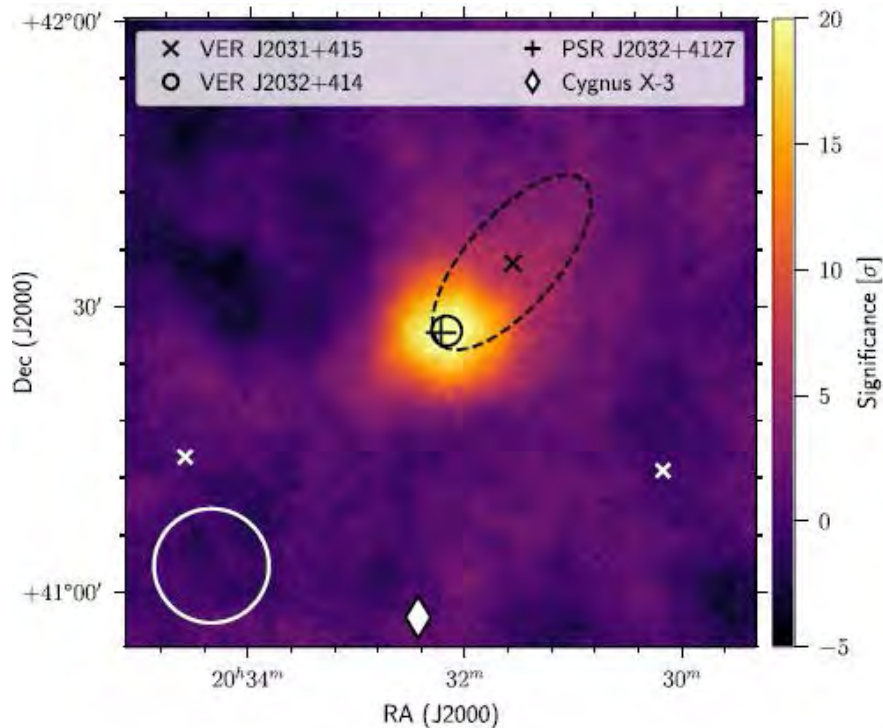
Двойные ТэВ гамма-источники

System	Star spectral type	Compact object	Porb [days]	HE emission	VHE emission
PSR B1259-53	Be	48ms pulsar	1236.72	yes	yes
LS 5039	O	-	3.91	yes	yes
LS I +61 303	Be	-	26.49	yes	yes
HESS J0632+057	Be	-	315.50	yes	yes
FGL J1018.6-5856	O	-	16.58	yes	yes
LMC P-3	O	-	10.2	yes	yes
PSR J2032+4127	Be	143 ms pulsar	50 years	yes	yes

From O.Blanch 2019

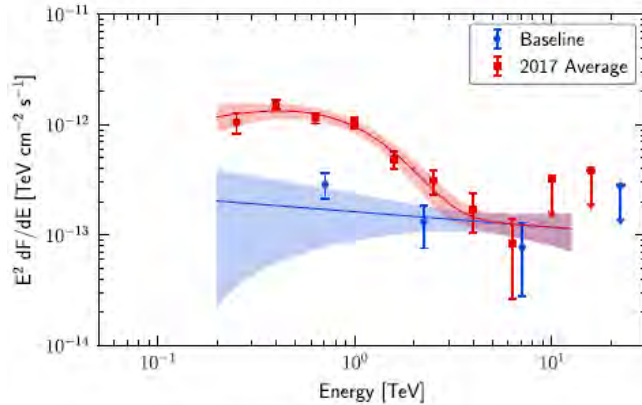
Пульсар J2032 в области Лебеда виден LHAASO MAGIC VERITAS

VERITAS MAGIC maps of a crowded region in Cygnus TeV emission PSR J2032+4127/MT92 213 @ periastron

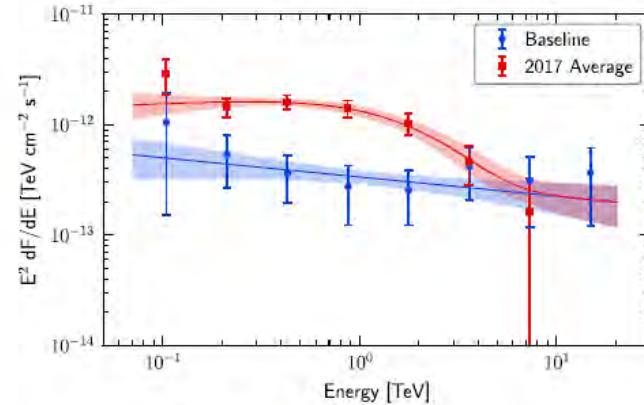


VERITAS & MAGIC teams *The Astrophysical Journal Letters*, 867:L19, 2018

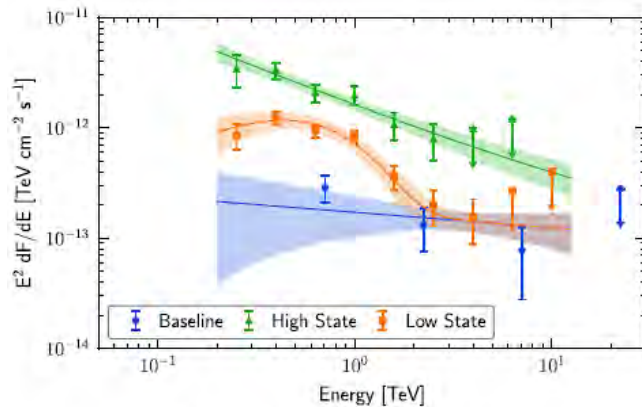
Спектры VERITAS MAGIC на разных орб. фазах PSR 2032



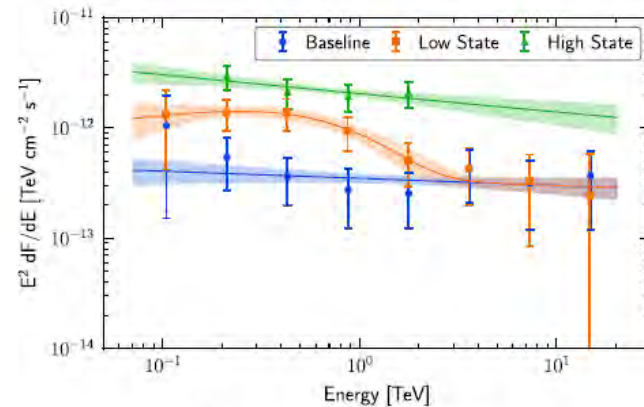
(a) VERITAS 2017 fall average



(b) MAGIC 2017 fall average



(c) VERITAS high & low states

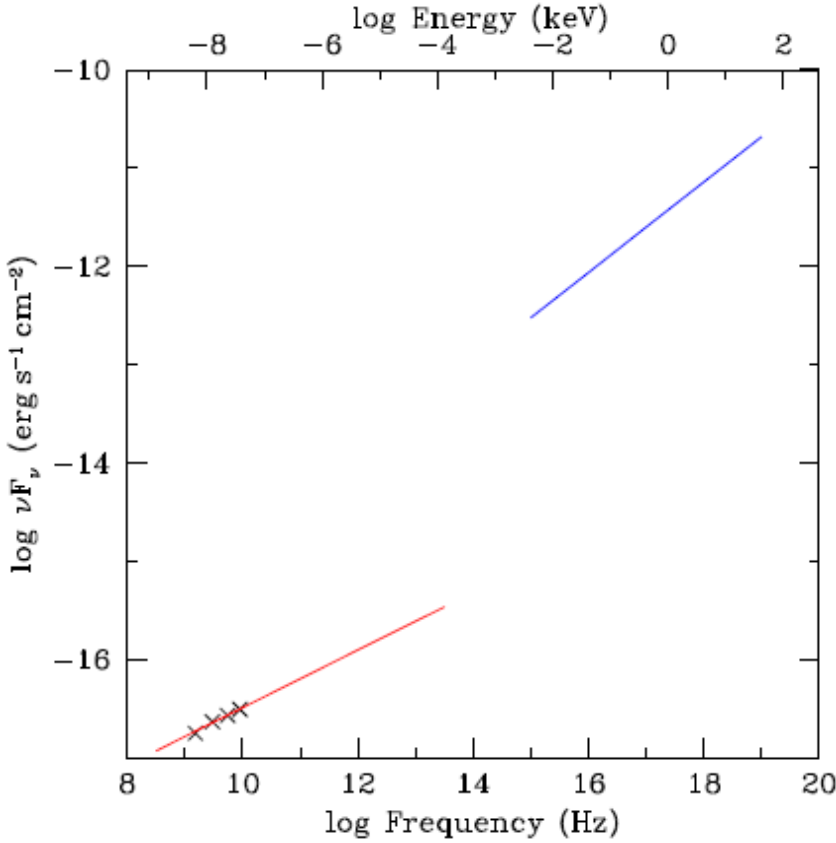
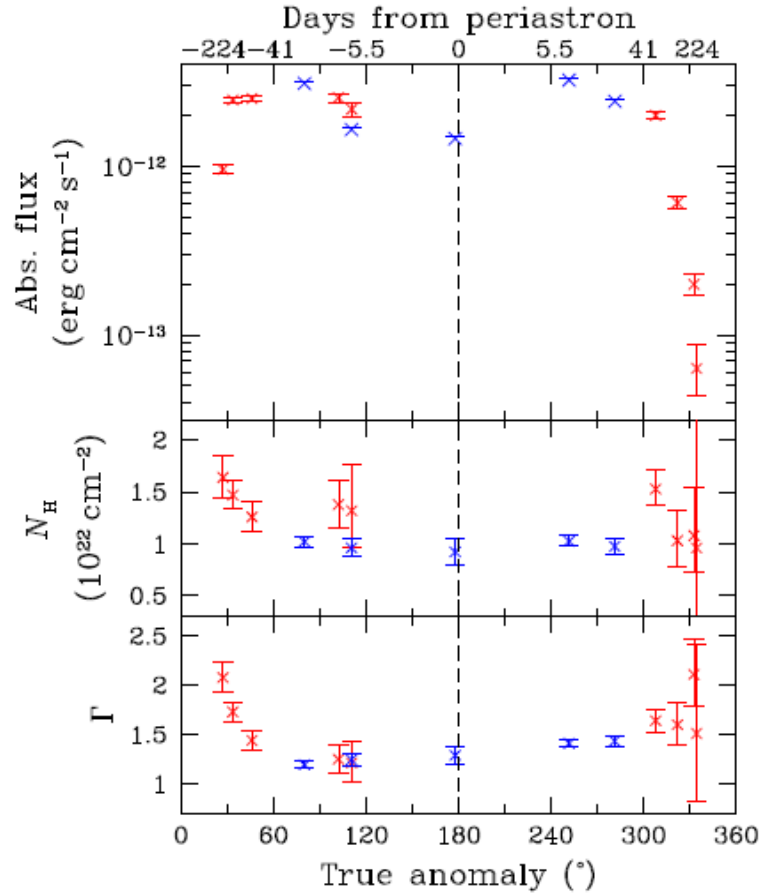


(d) MAGIC high & low states

VERITAS & MAGIC teams The Astrophysical Journal Letters, 867:L19, 2018

**Chandra XMM-Newton NuSTAR PSR 2032 (SED a week after periastron)
имеет очень жесткий синхротронный X-спектр с α -индексом ~ 1**

Ng + The Astrophysical Journal v.880, 147,2019



Модель ускорения КЛ в сталкивающихся МГД-течениях предсказывает индекс ~ 1 - Space Science Reviews, v. 207, p. 235, 2017

В области Лебеда возможно имеются источники ПэВ излучения!

Вспышка гамма излучения с энергиями выше 300 TeV продолжительностью около 2 месяцев в 2020 в направлении на Cygnus Cocoon была детектирована установкой Ковер-2 (Dzharpuev + Ap.J Lett 916, L22, 2921).

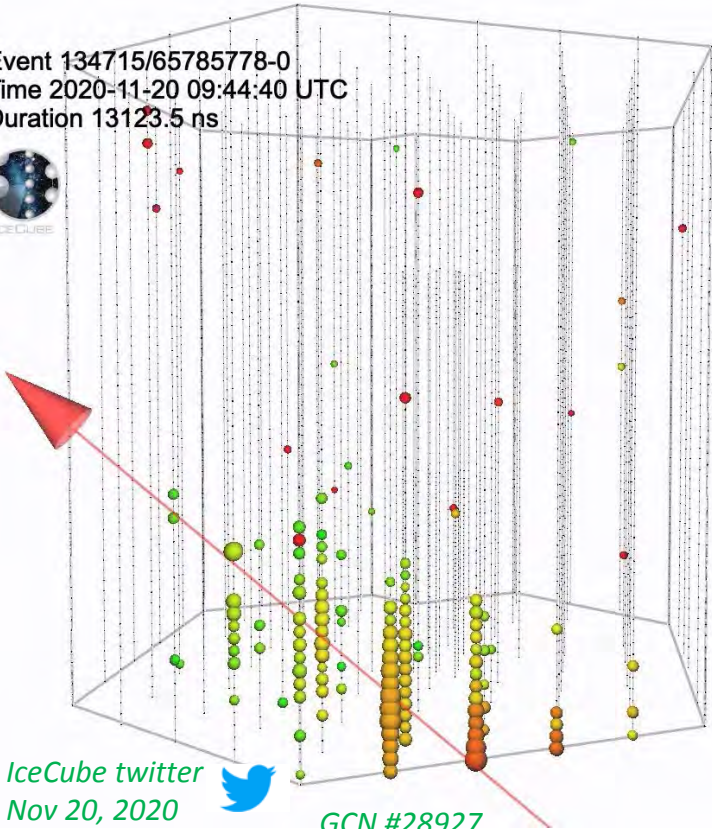
Вспышка совпала с нейтринным событием 150 TeV IceCube (IceCube Collaboration 2020).
Изотропная гамма-светимость $\sim 2 \cdot 10^{35} \text{ erg s}^{-1}$
(на расстоянии 1.5 kpc).

PSR 2032 и Cyg X3 естественные кандидаты

IceCube neutrino from Cygnus Cocoon

Фотоны 300 ТэВ зарегистрированные детектором Ковер-2 from Cygnus Cocoon

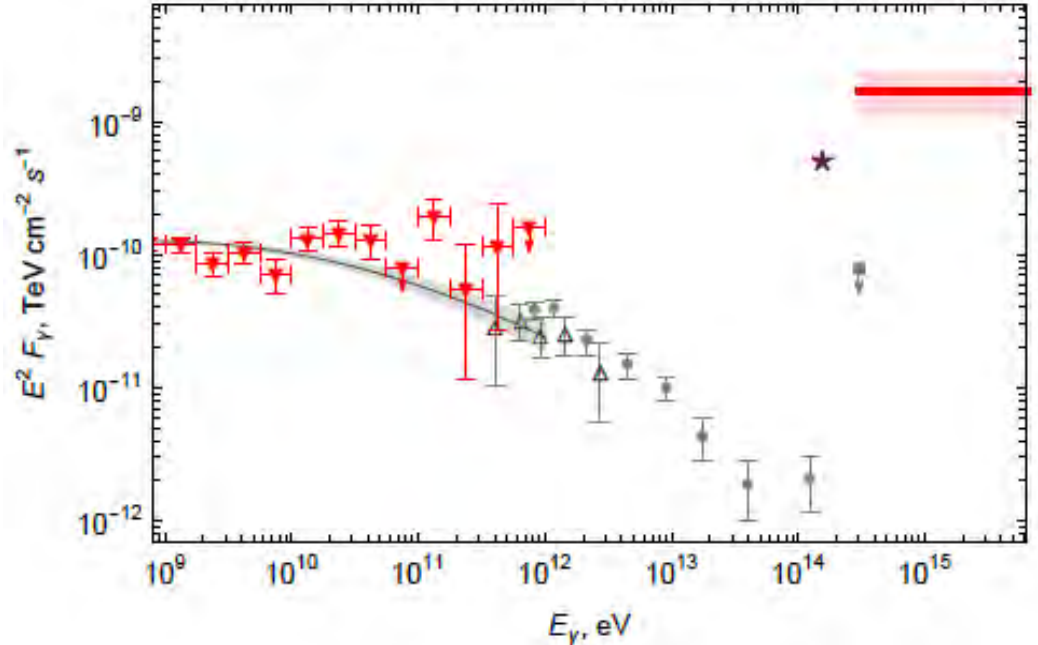
Event 134715/65785778-0
 Time 2020-11-20 09:44:40 UTC
 Duration 13123.5 ns



IceCube twitter
 Nov 20, 2020



GCN #28927



D. D. DZHAPPUEV¹, Yu. Z. AFASHOKOV¹, I. M. DZAPAROVA^{1,2}, T. A. DZHATDOEV^{1,3,1}, E. A. GORBACHEVA,
 I. S. KARPIKOV¹, M. M. KHADZHIEV¹, N. F. KLIMENKO¹, A. U. KUDZHAEV¹, A. N. KURENYA,¹
 A. S. LIVVANSKY¹, O. I. MIKHAILOVA¹, V. B. PETKOV^{1,2}, E. I. PODLESNYI^{4,3,1}, V. S. ROMANENKO¹,
 G. I. RUBTSOV¹, S. V. TROITSKY¹, I. B. UNATLOKOV¹, I. A. VAIMAN^{1,4,3}, A. F. YANIN¹, YA. V. ZHEZHER¹
 AND K. V. ZHURAVLEVA¹
 (CARPET-3 GROUP)

Despite poor localization, this event is exceptional.
the first neutrino alert associated with a plausible
Galactic source С.В.Троицкий 2021

Ap.J Lett 916, L22, 2021



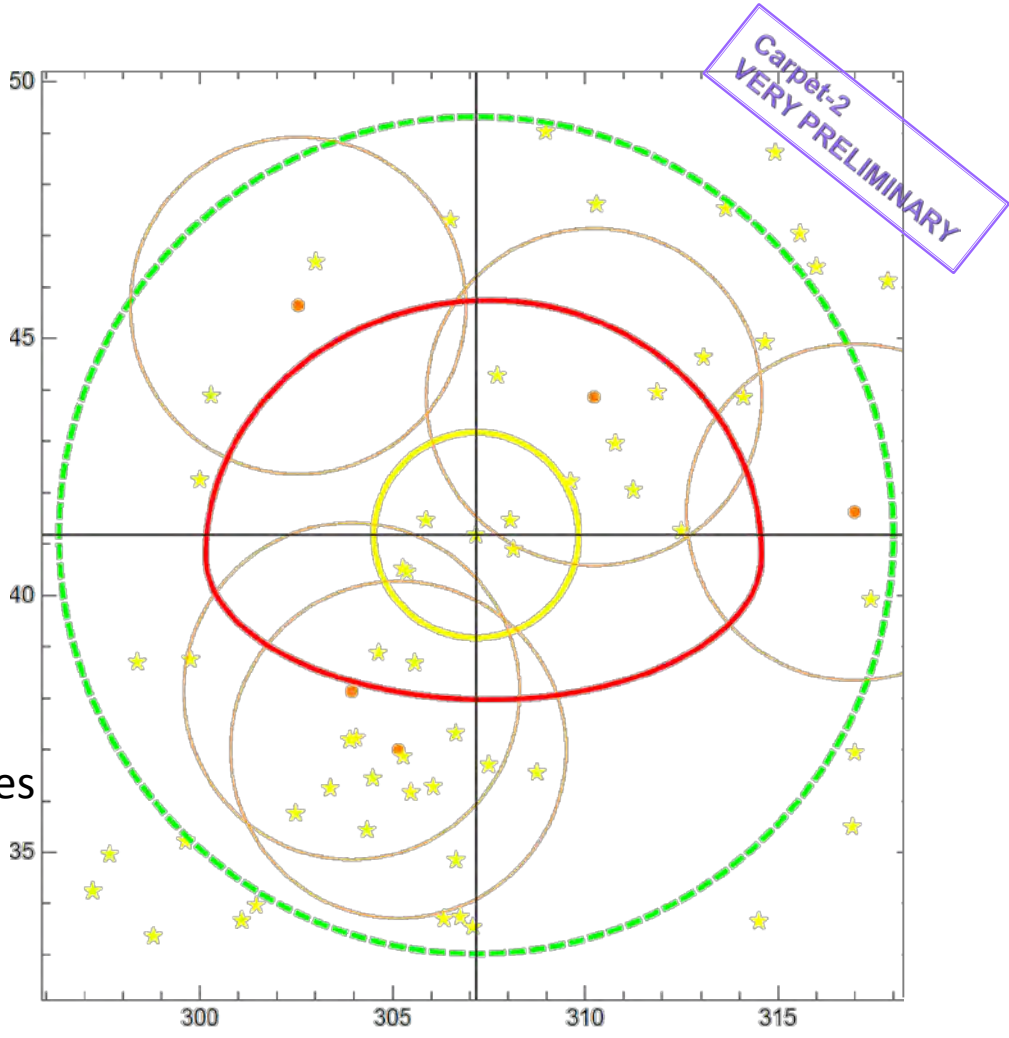
IceCube alert
90% CL

4FGL Fermi sources

Cyg Cocoon
(Fermi, 68% ext.)

Carpet
search
region

Carpet γ candidates
(68% CL)



GVD-80 // Sergey Troitsky

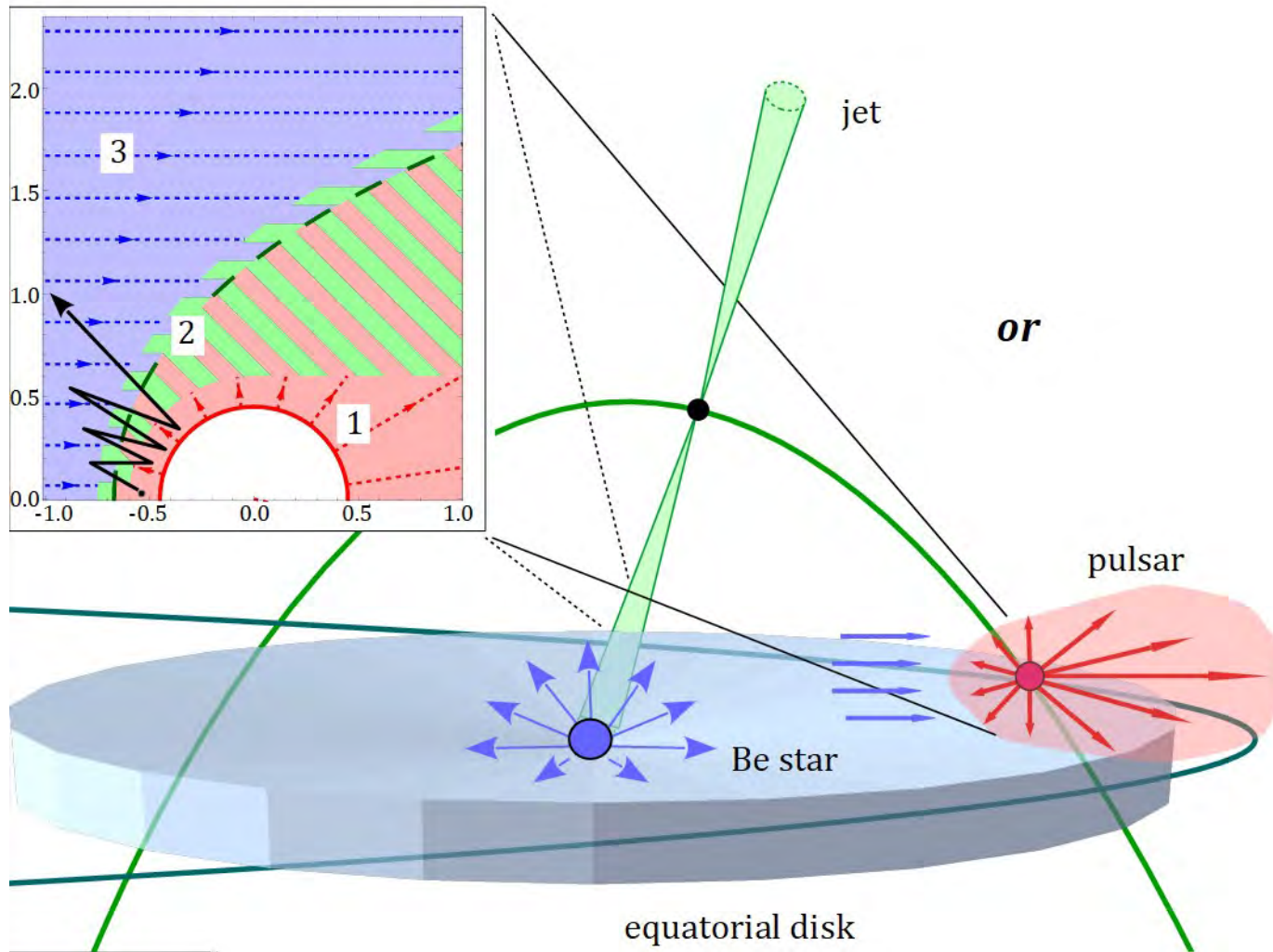


Галактический PSR J2032+4127 на расстоянии ~ 1.4 кpc
в двойной системе с Be звездой MT91 213 (B0Vp)
С периодом ~ 50 yr (Ho et al. 2017).

spin-down power $\sim 3 \cdot 10^{35}$ erg s⁻¹ (Camilo et al. 2009).

Рентгеновские наблюдения PSR J2032+4127 в периастре
показали очень жесткий синхротронный спектр

Если двойная система с PSR J2032+4127 является источником
ПЭВ фотонов (Ковер-2) и нейтрино (IceCube) то должен иметь место
эффективный механизм конверсии мощности системы в ПЭВ
(т.е. очень жесткие спектры частиц - протонов) для объяснения
совокупности данных VERITAS MAGIC и Ковер 2.



AB+ Astroph. J Lett., v. 921, id.L10, 2021

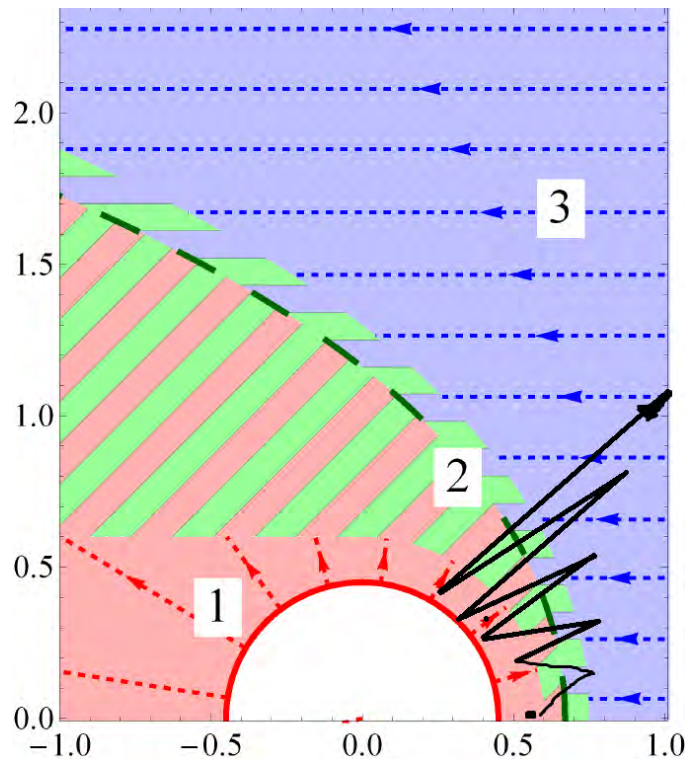
Ускорение на сталкивающихся ветрах – самый эффективный вариант ускорения Ферми (дает очень жесткие спектры)

The maximum energies of protons accelerated by outflows with frozen-in magnetic fields of a kinetic/magnetic luminosity \mathcal{L}_K can be estimated from the equation:

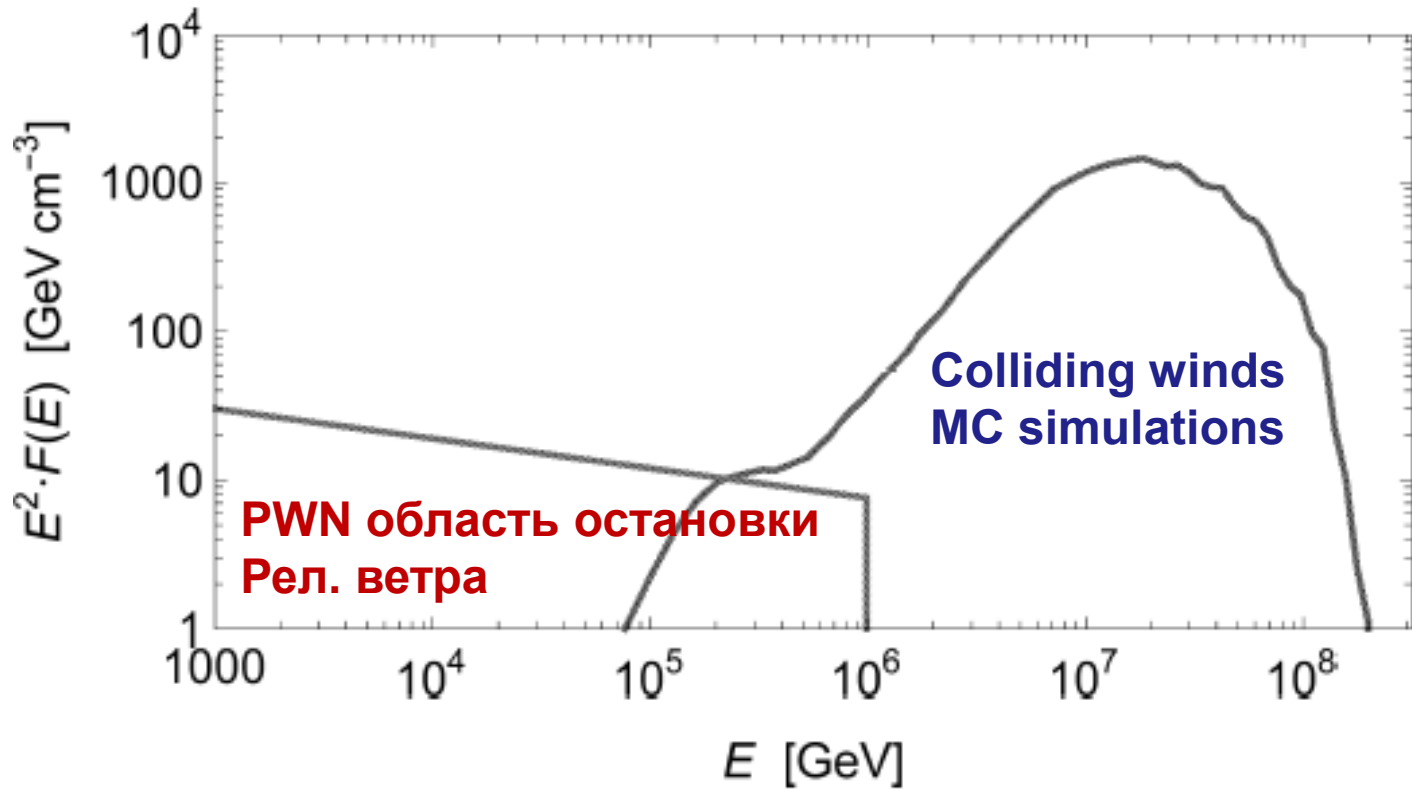
$$E_{\max} \approx \frac{f(\beta_f)}{\Gamma_f \Omega} \left(\frac{\mathcal{L}_K}{5 \times 10^{34} \text{ erg s}^{-1}} \right)^{1/2} \text{ PeV}, \quad (1)$$

Сильная анизотропия туманности и области фото-адронного излучения играет роль в понимании наблюдаемого потока и переменности излучения PSR B1259 в различных диапазонах.

Сильно уменьшает вероятность наблюдения вспышек подобных источников выше 100 ТэВ гамма-обсерваториями...

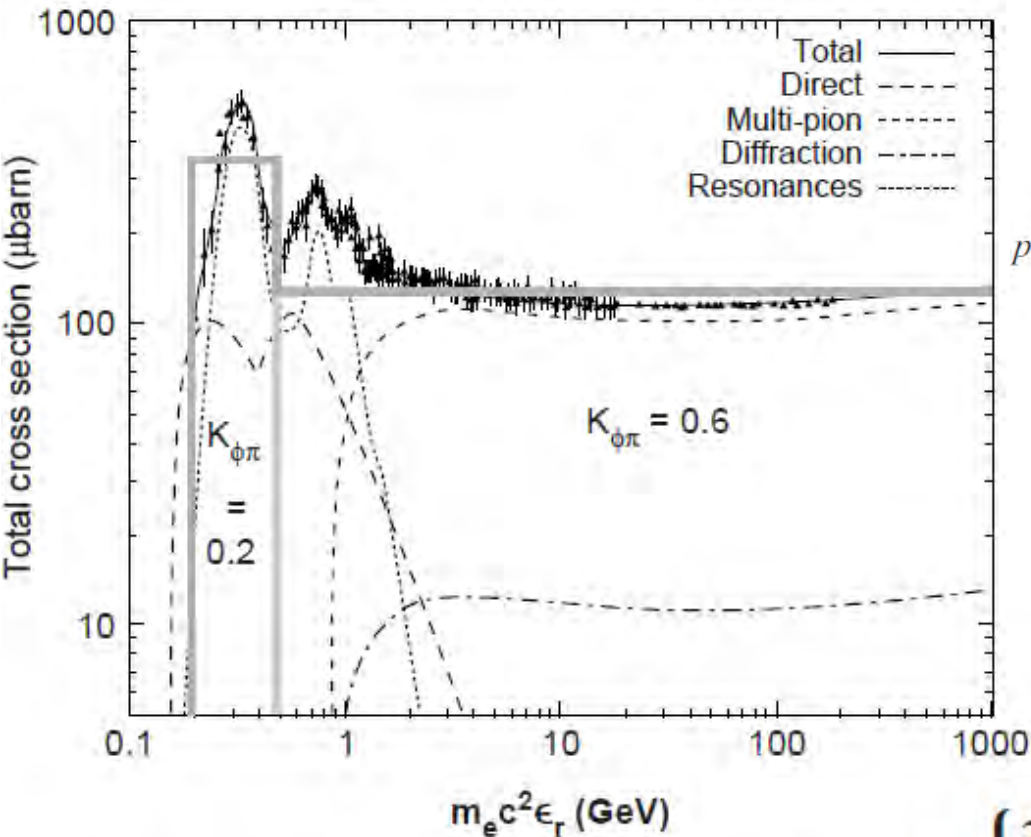


Спектры протонов в модели сталкивающихся МГД-течений



AB+ [Astroph. J Lett., v. 921, id.L10, 2021](#)

Фото-адронный механизм излучения (пороговый)



Одно пионный резонанс :
inelasticity $K=0.2$

$$p + \gamma \rightarrow \Delta^+ \rightarrow \begin{cases} p + \pi^0 \rightarrow p + 2\gamma, \\ n + \pi^+ \rightarrow n + e + 3\nu \rightarrow p + 2e + 4\nu, \end{cases}$$

Много-пионный канал:
Inelasticity $K=0.6$

Т.е. в этом канале 60% энергии протона поровну делится между π^0 , π^+ , and π^-

$$\sigma_{\phi\pi}(\epsilon_r) = \begin{cases} 340 \mu\text{b}, & \epsilon_{\text{thr}} = 390 \leq \epsilon_r \leq 980, \\ 120 \mu\text{b}, & \epsilon_r \leq 980, \end{cases}$$

from Dermer & Menon 2009

Модельные Спектры анизотропного излучения фотонов и нейтрино при Фото-Адронном процессе в

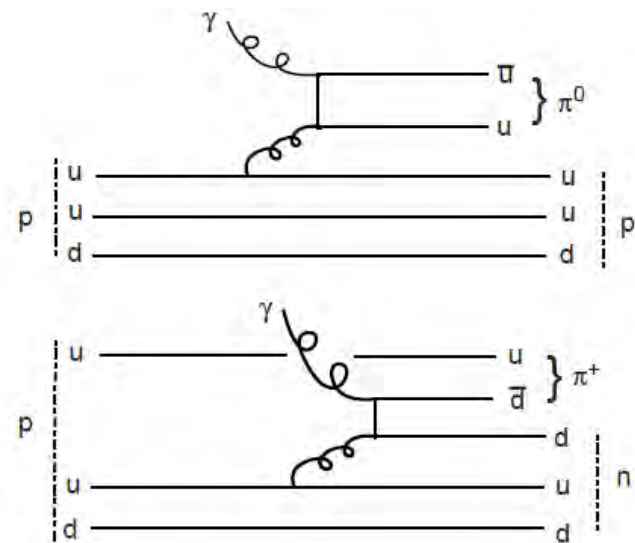
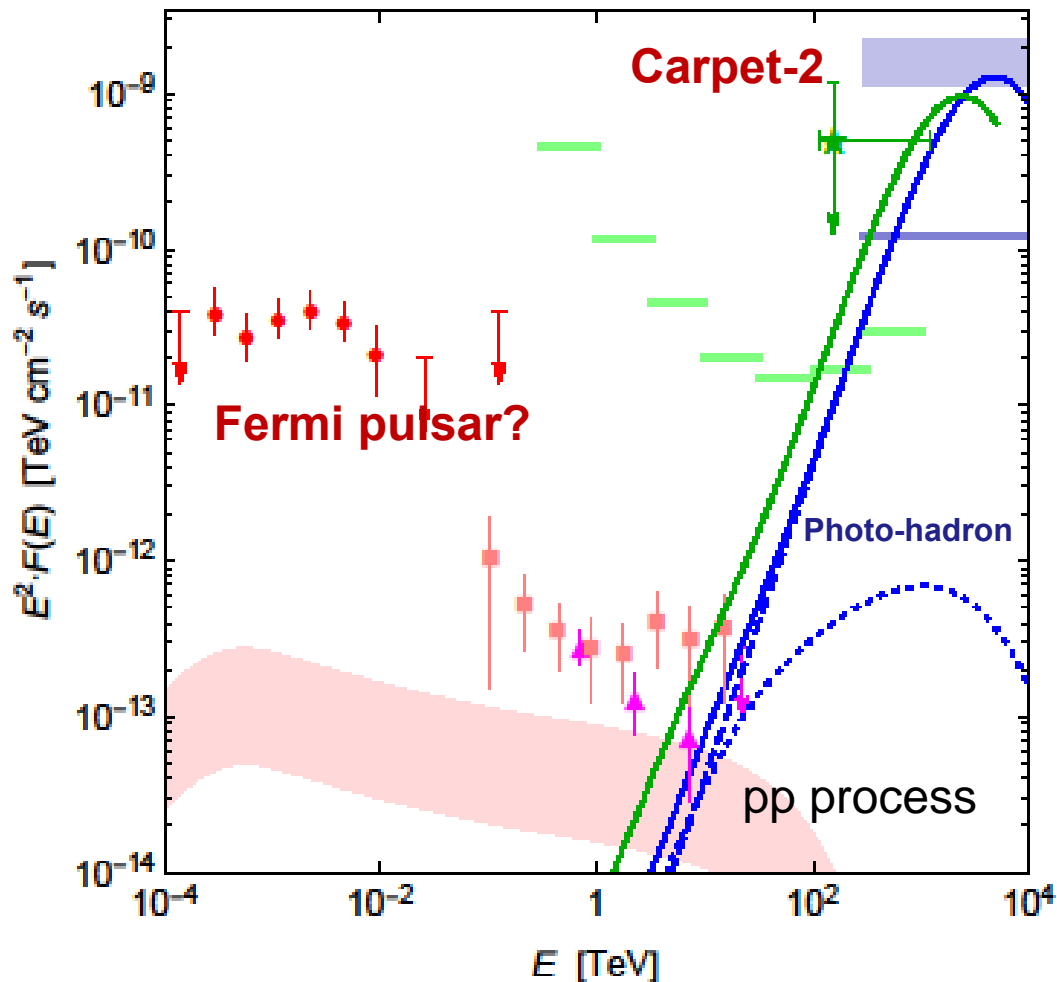
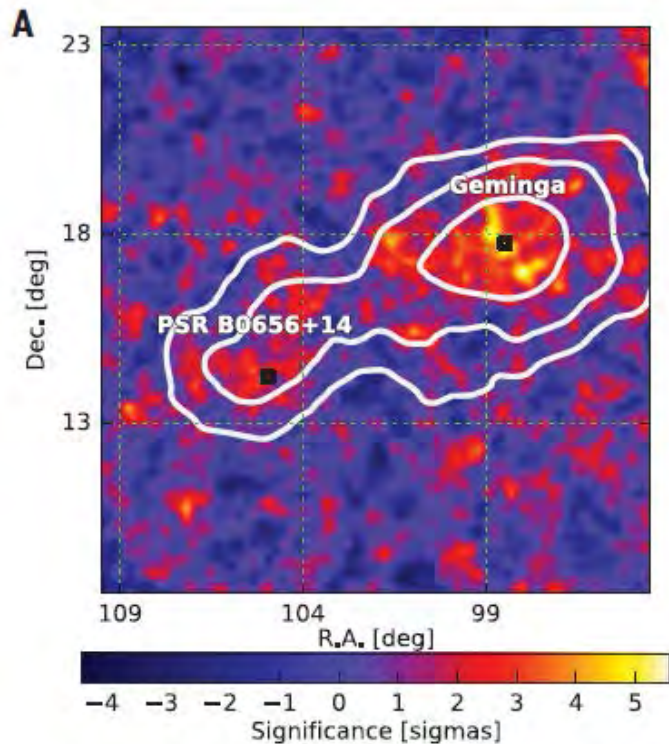


Photo-hadron cross-sections are from Kelner Aharonian PhRvD

Протяженные ТэВ гало вокруг пульсарных туманностей



HAWC Science 358, 911, 2017
 $D(100\text{TeV}) \sim 5 \cdot 10^{27} \text{ cm}^2/\text{s}$

Рассматриваются как
 возможные источники
 Позитронов КЛ

Detection of Geminga with H.E.S.S.

A.M.W. Mitchell

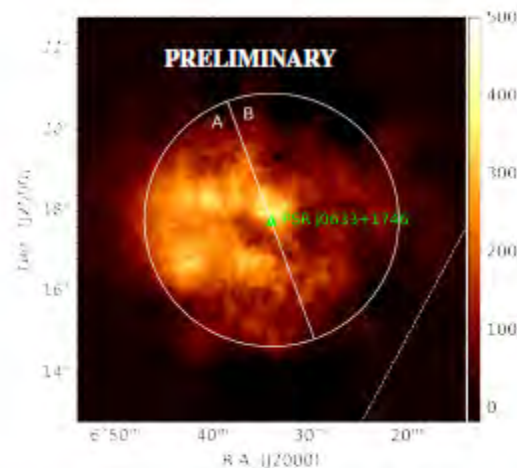
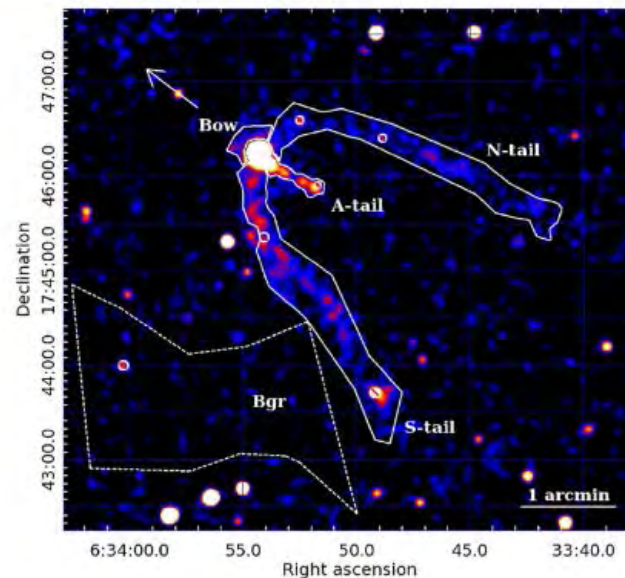


Figure 2: Excess emission in the Geminga region, correlated with 0.5° radius. To establish whether the emission is isotropic, two regions (A & B) were defined as described in the main text. There is a clear asymmetry to the emission, with side A a factor ~ 1.5 brighter than side B.

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, 835:66 (19pp), 2017 January 20

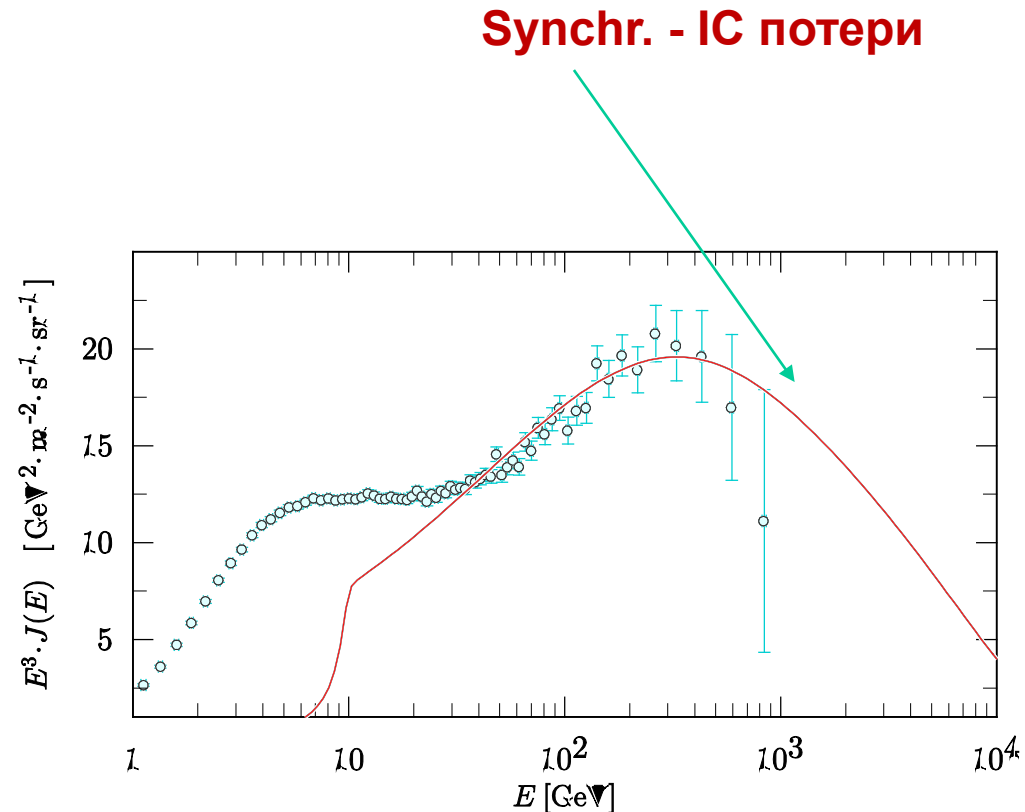
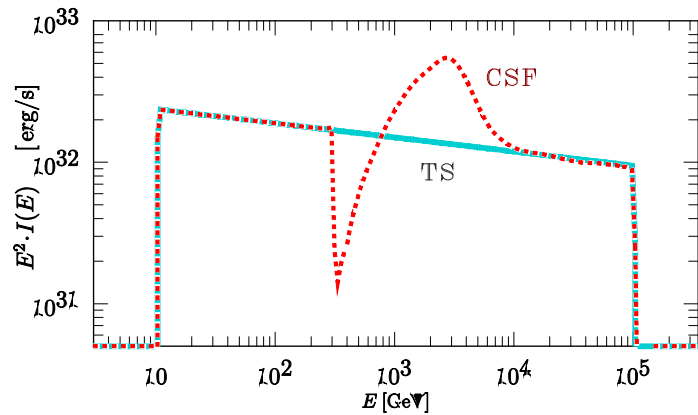
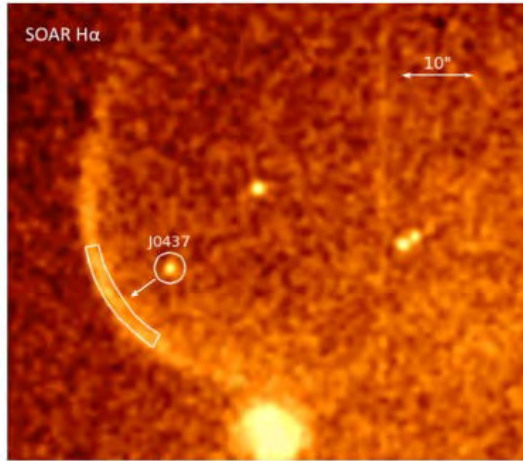


Geminga
 Chandra NASA
 жесткий спектр!

Posselt+ 2017

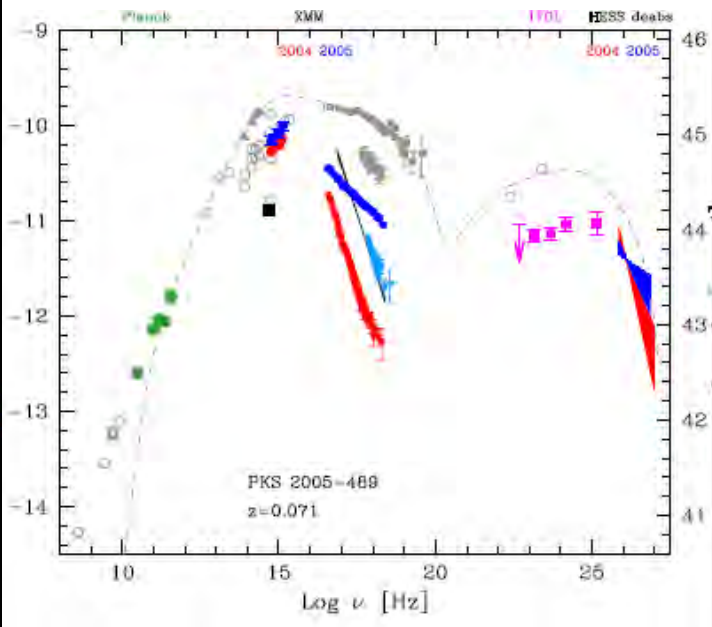
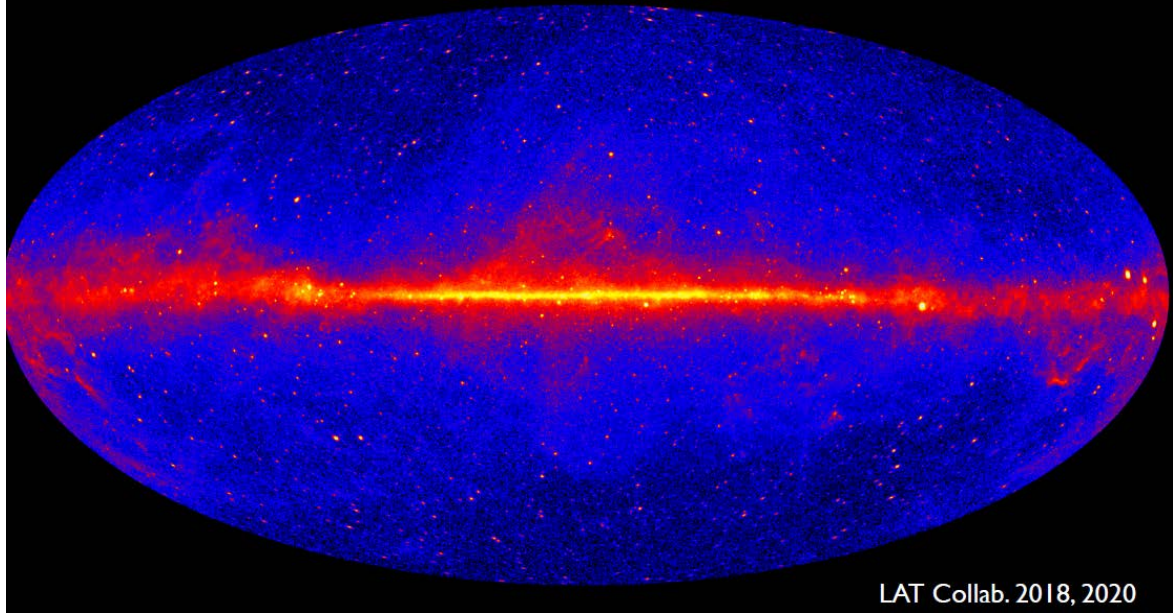
Ускорение ГэВ-ТэВ позитронов, электронов и пере-ускорение КЛ головной UV пульсарной туманности ближайшего миллисекундного пульсара J0437-4715

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, 831:129 (11pp), 2016 November 10



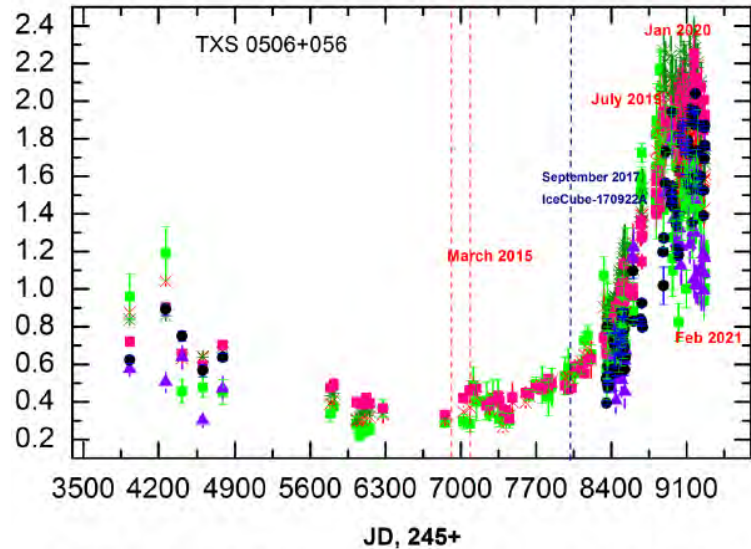
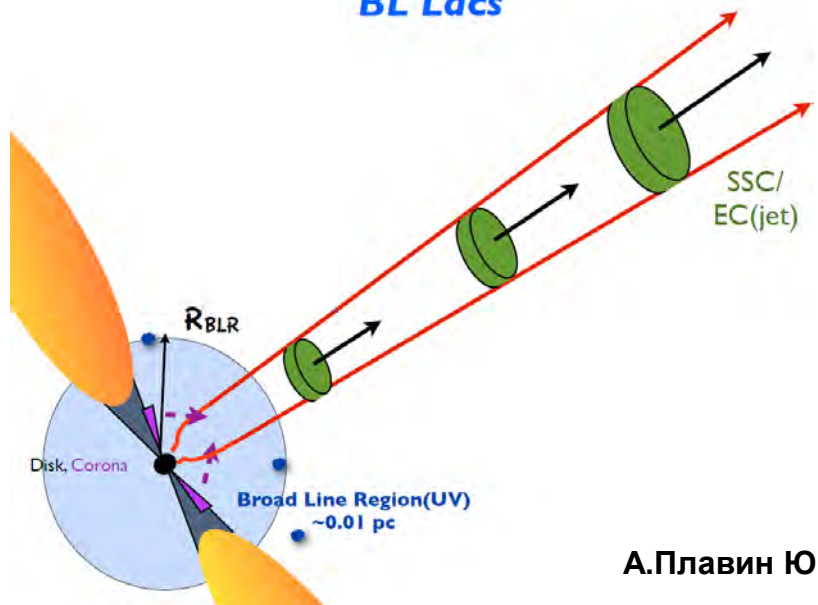
Fermi-LAT 10yr: ~ 3500 γ -ray blazars
 ~ 0.09 blazars / deg²

HESS, MAGIC, VERITAS:
 83 blazars



TXS 0506+056:
 Нейтрино пришло в начале
 радиовспышки

Блазары - источники гамма и нейтрино
 BL Lacs



А.Плавин Ю.Ковалев С.Троицкий: Все нейтрино рождаются во время вспышек?

Спасибо за внимание!

Поддержка РФФ 21-72-20020