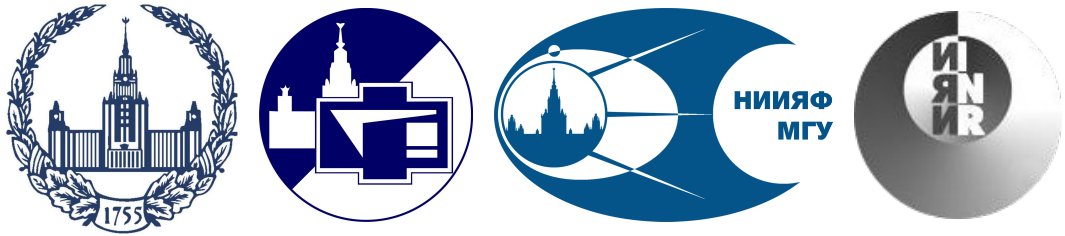
Кандидат в ПэВатроны HAWC J1825-134 и его первичный спектр протонов



Подлесный Егор
Джатдоев Тимур
Вайман Игорь

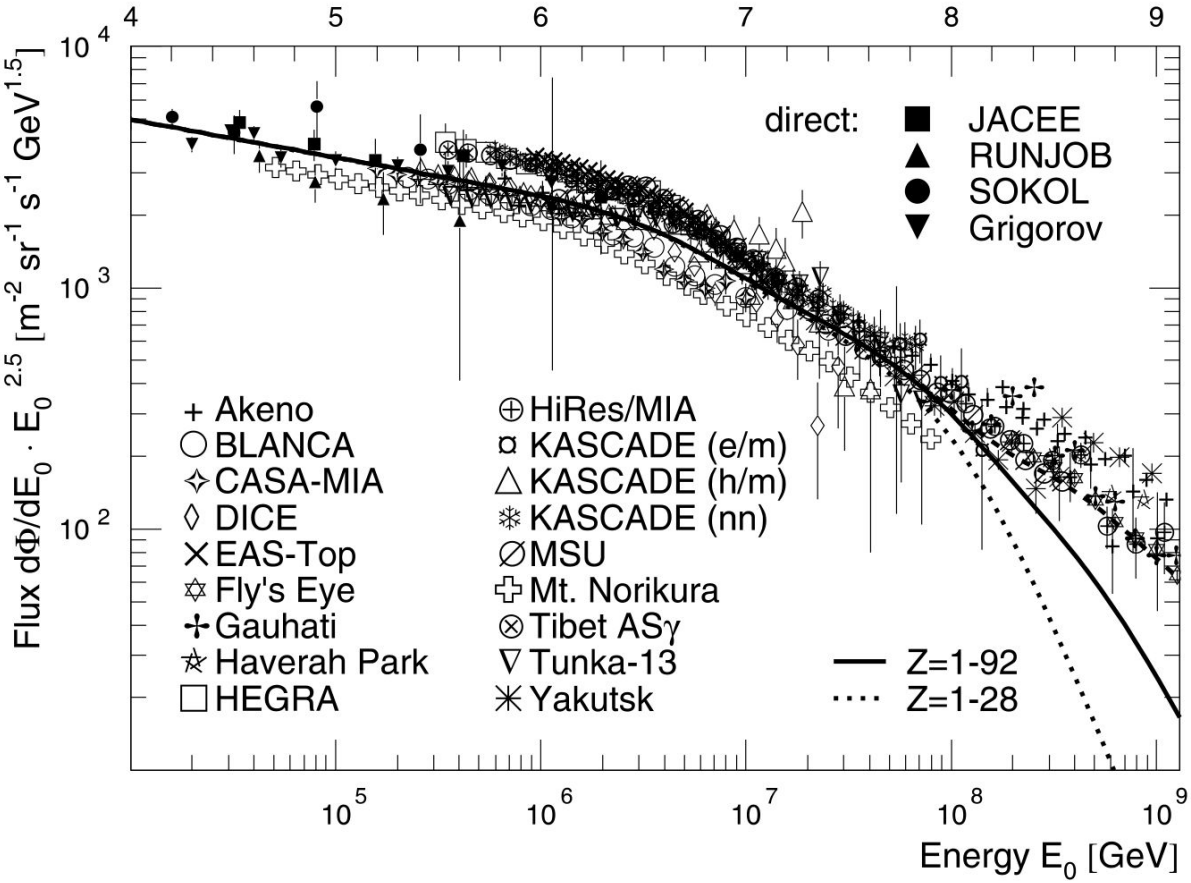


Рисунок из Hörandel, APh 19, 93–220 (2003)

Считается, что космические лучи с энергиями (по крайней мере) до колена их энергетического спектра (3×10^{15} эВ) имеют Галактическое происхождение

Возможные Галактические источники космических лучей

- остатки сверхновых
- регионы интенсивного звездообразования
- плерионы (pulsar wind nebulae, PWN)
- центр Галактики
- OB-ассоциации и сверхпузыри
- молодые звёздные скопления

Однако гамма-астрономические наблюдения до сих пор не дают достаточных оснований считать те или иные Галактические объекты ПэВатронами

- Гамма-спектры остатков сверхновых имеют обрыв при высоких энергиях (Ahnen et al. 2017; Abdalla et al. 2018)
- Спектр гамма-квантов из яркого региона интенсивного звездообразования Cygnus Cocoon имеет укручение при 10 ТэВ (Abeysekara et al. 2021)
- Наблюдаемые спектры гамма-квантов от плерионов (PWN) хорошо объясняются в рамках лептонных моделей (Khangulyanet al. 2019; Breuhaus et al. 2021)
- Даже если протоны ускоряются в центре Галактики до ~1 ПэВ, по-видимому, они дают небольшой вклад в наблюдаемый поток космических лучей у Земли (Abramowski et al. 2016)

Однако недавно коллаборация HAWC (High Altitude Water Cerenkov) заявила об открытии источника гамма-квантов с энергиями более 100 ТэВ без признаков экспоненциального обрыва спектра

The Astrophysical Journal Letters, 907:L30 (9pp), 2021 February 1 https://doi.org/10.3847/2041-8213/abd77b
© 2021. The American Astronomical Society. All rights reserved.

CrossMark

Evidence of 200 TeV Photons from HAWC J1825-134

A. Albert[1], R. Alfaro[2], C. Alvarez[3], J. R. Angeles Camacho[2], J. C. Arteaga-Velázquez[4], K. P. Arunbabu[5], D. Avila Rojas[2], H. A. Ayala Solares[6], V. Baghmanyan[7], E. Belmont-Moreno[2], S. Y. BenZvi[8], C. Brisbois[9], T. Capistrán[10], A. Carramiñana[11], S. Casanova[7], U. Cotti[4], J. Cotzomi[12], E. De la Fuente[13], R. Diaz Hernandez[11], B. L. Dingus[1], M. A. DuVernois[14], M. Durocher[1], J. C. Díaz-Vélez[13], K. Engel[9], C. Espinoza[2], K. Fang[15], H. Fleischhack[16], N. Fraija[10], A. Galván-Gámez[10], D. Garcia[2], J. A. García-González[2], F. Garfias[10], G. Giacinti[17], M. M. González[10], J. A. Goodman[9], J. P. Harding[1], B. Hona[18], D. Huang[16], F. Hueyotl-Zahuantitla[3], P. Hüntemeyer[16], A. Iriarte[10], A. Jardin-Blicq[17,19,20], V. Joshi[21], G. J. Kunde[1], A. Lara[5], W. H. Lee[10], H. León Vargas[2], J. T. Linnemann[22], A. L. Longinotti[10,11], G. Luis-Raya[23], J. Lundeen[22], K. Malone[1], V. Marandon[17], O. Martinez[12], J. Martínez-Castro[24], J. A. Matthews[25], P. Miranda-Romagnoli[26], E. Moreno[12], M. Mostafá[6], A. Nayerhoda[7], L. Nellen[27], M. Newbold[18], M. U. Nisa[22], R. Noriega-Papaqui[26], N. Omodei[15], A. Peisker[22], Y. Pérez Araujo[10], E. G. Pérez-Pérez[23], C. D. Rho[28], D. Rosa-González[11], H. Salazar[12], F. Salesa Greus[7,29], A. Sandoval[2], M. Schneider[9], F. Serna[2], R. W. Springer[18], K. Tollefson[22], I. Torres[11], R. Torres-Escobedo[13,30], F. Ureña-Mena[11], L. Villaseñor[12], E. Willox[9], H. Zhou[31], and C. de León[4]

HAWC — The High-Altitude Water Cherenkov Gamma-Ray Observatory

The HAWC Observatory (J. Goodman, Nov. 2016)

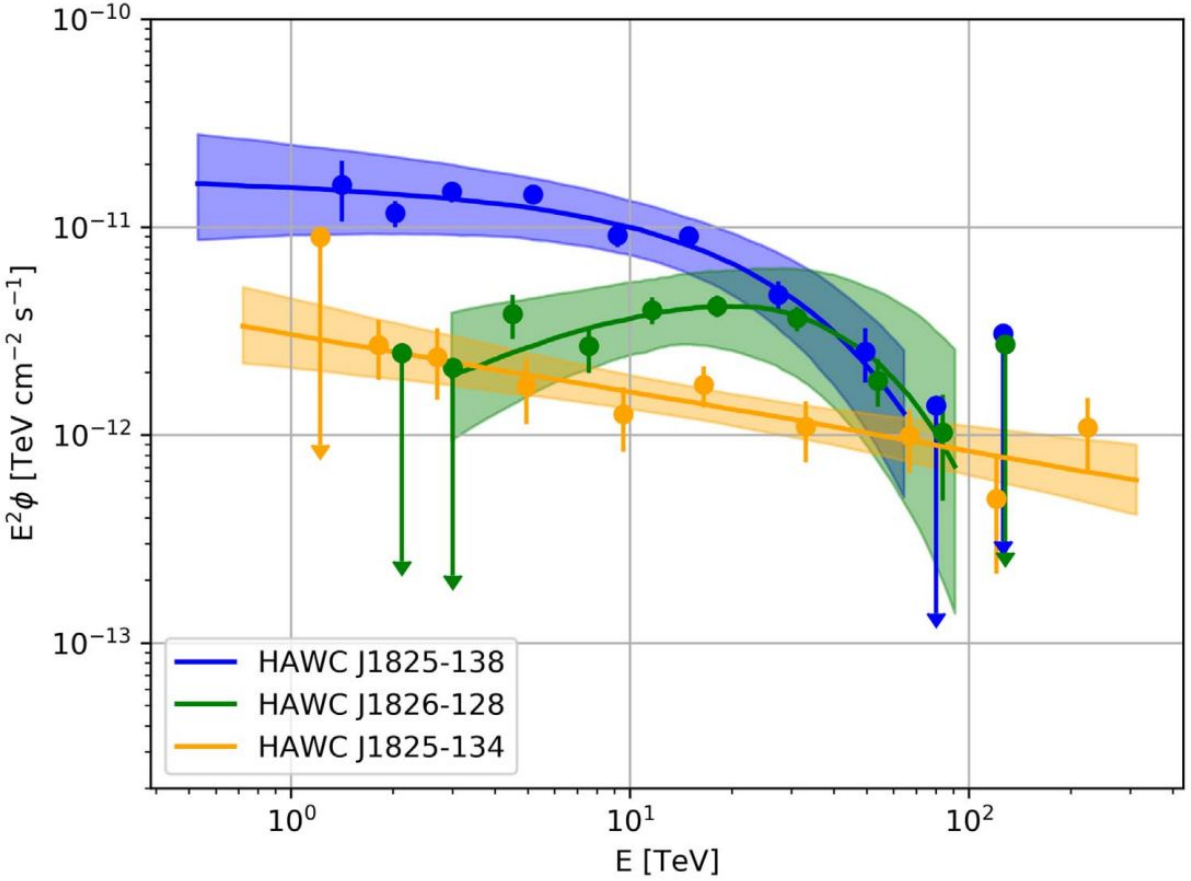
Характеристики:

Диапазон энергий — от 100 ГэВ до 100 ТэВ

Коэффициент подавления адронов — ~3 x 10^{-3} (на 10 ТэВ)

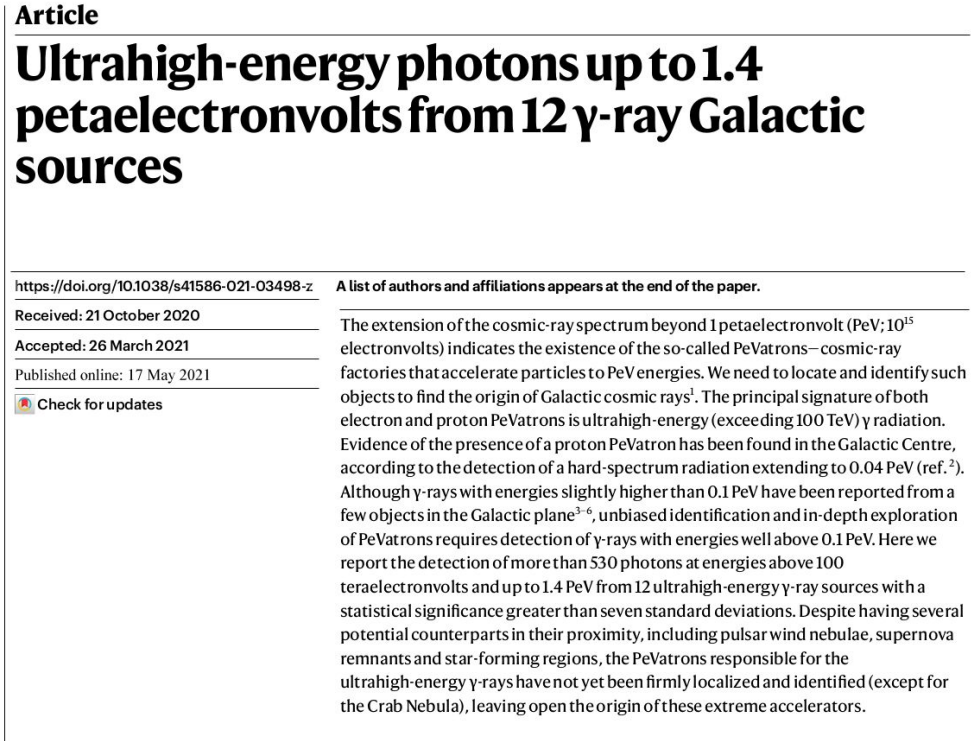
Угловое разрешение — ~0.2° (но возможны систематические сдвиги до ~0.5°) (на 10 ТэВ)

Энергетическое разрешение — ~10% (на 10 ТэВ)


10^{-10}
10^{-11}
10^{-12}
10^{-13}
$E^2\phi$ [TeV cm^{-2} s^{-1}]
HAWC J1825-138
HAWC J1826-128
HAWC J1825-134
10^0
10^1
10^2
E [TeV]

17 мая 2021 г. в Nature опубликовали статью коллаборации LHAASO (Large High Altitude Air Shower Observatory)

Ultrahigh-energy photons up to 1.4 petaelectronvolts from 12 γ-ray Galactic sources



Article

Ultrahigh-energy photons up to 1.4 petaelectronvolts from 12 γ-ray Galactic sources

https://doi.org/10.1038/s41586-021-03498-z

Received: 21 October 2020

Accepted: 26 March 2021

Published online: 17 May 2021

Check for updates

A list of authors and affiliations appears at the end of the paper.

The extension of the cosmic-ray spectrum beyond 1 petaelectronvolt (PeV; 10^{15} electronvolts) indicates the existence of the so-called PeVatrons—cosmic-ray factories that accelerate particles to PeV energies. We need to locate and identify such objects to find the origin of Galactic cosmic rays[1]. The principal signature of both electron and proton PeVatrons is ultrahigh-energy (exceeding 100 TeV) γ radiation. Evidence of the presence of a proton PeVatron has been found in the Galactic Centre, according to the detection of a hard-spectrum radiation extending to 0.04 PeV (ref. [2]). Although γ-rays with energies slightly higher than 0.1 PeV have been reported from a few objects in the Galactic plane[3–6], unbiased identification and in-depth exploration of PeVatrons requires detection of γ-rays with energies well above 0.1 PeV. Here we report the detection of more than 530 photons at energies above 100 teraelectronvolts and up to 1.4 PeV from 12 ultrahigh-energy γ-ray sources with a statistical significance greater than seven standard deviations. Despite having several potential counterparts in their proximity, including pulsar wind nebulae, supernova remnants and star-forming regions, the PeVatrons responsible for the ultrahigh-energy γ-rays have not yet been firmly localized and identified (except for the Crab Nebula), leaving open the origin of these extreme accelerators.

12 источников гамма-квантов сверхвысоких энергий

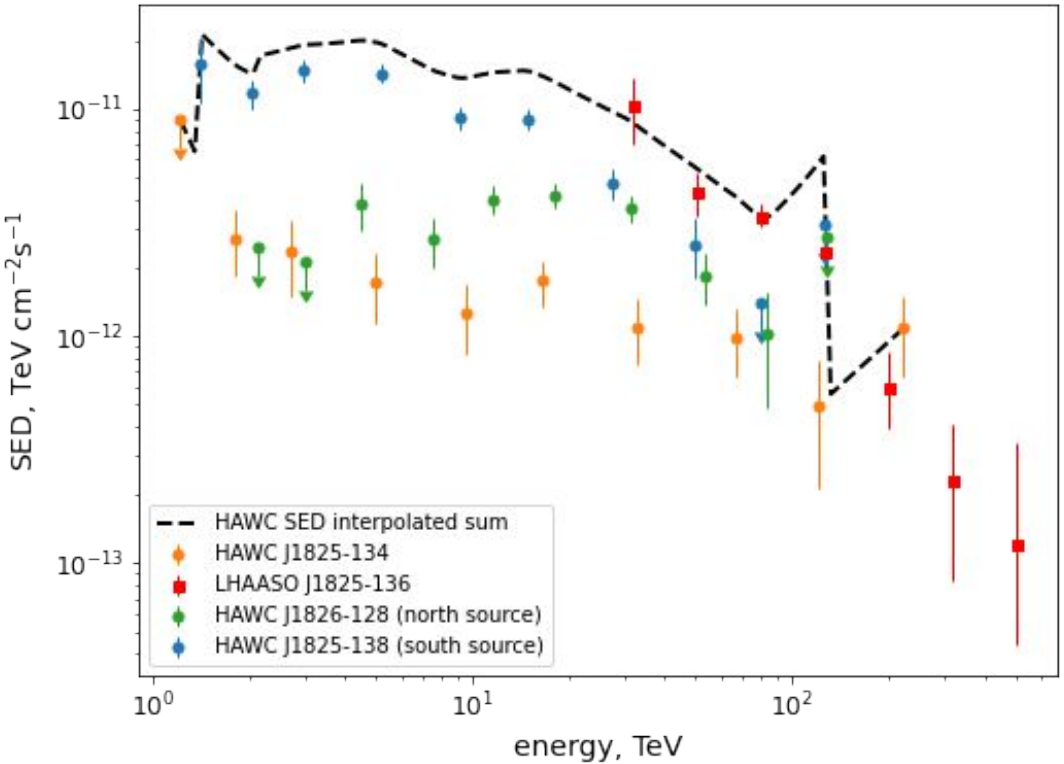
Source name	RA (°)	dec. (°)	Significance above 100 TeV (×σ)	E_{max} (PeV)	Flux at 100 TeV (CU)
LHAASO J0534+2202	83.55	22.05	17.8	0.88 ± 0.11	1.00(0.14)
LHAASO J1825-1326	276.45	−13.45	16.4	0.42 ± 0.16	3.57(0.52)
LHAASO J1839-0545	279.95	−5.75	7.7	0.21 ± 0.05	0.70(0.18)
LHAASO J1843-0338	280.75	−3.65	8.5	$0.26 -0.10^{+0.16}$	0.73(0.17)
LHAASO J1849-0003	282.35	−0.05	10.4	0.35 ± 0.07	0.74(0.15)
LHAASO J1908+0621	287.05	6.35	17.2	0.44 ± 0.05	1.36(0.18)
LHAASO J1929+1745	292.25	17.75	7.4	$0.71 -0.07^{+0.16}$	0.38(0.09)
LHAASO J1956+2845	299.05	28.75	7.4	0.42 ± 0.03	0.41(0.09)
LHAASO J2018+3651	304.75	36.85	10.4	0.27 ± 0.02	0.50(0.10)
LHAASO J2032+4102	308.05	41.05	10.5	1.42 ± 0.13	0.54(0.10)
LHAASO J2108+5157	317.15	51.95	8.3	0.43 ± 0.05	0.38(0.09)
LHAASO J2226+6057	336.75	60.95	13.6	0.57 ± 0.19	1.05(0.16)

Celestial coordinates (RA, dec.); statistical significance of detection above 100 TeV (calculated using a point-like template for the Crab Nebula and LHAASO J2108+5157 and 0.3° extension templates for the other sources); the corresponding differential photon fluxes at 100 TeV; and detected highest photon energies. Errors are estimated as the boundary values of the area that contains ±34.14% of events with respect to the most probable value of the event distribution. In most cases, the distribution is a Gaussian and the error is 1σ.

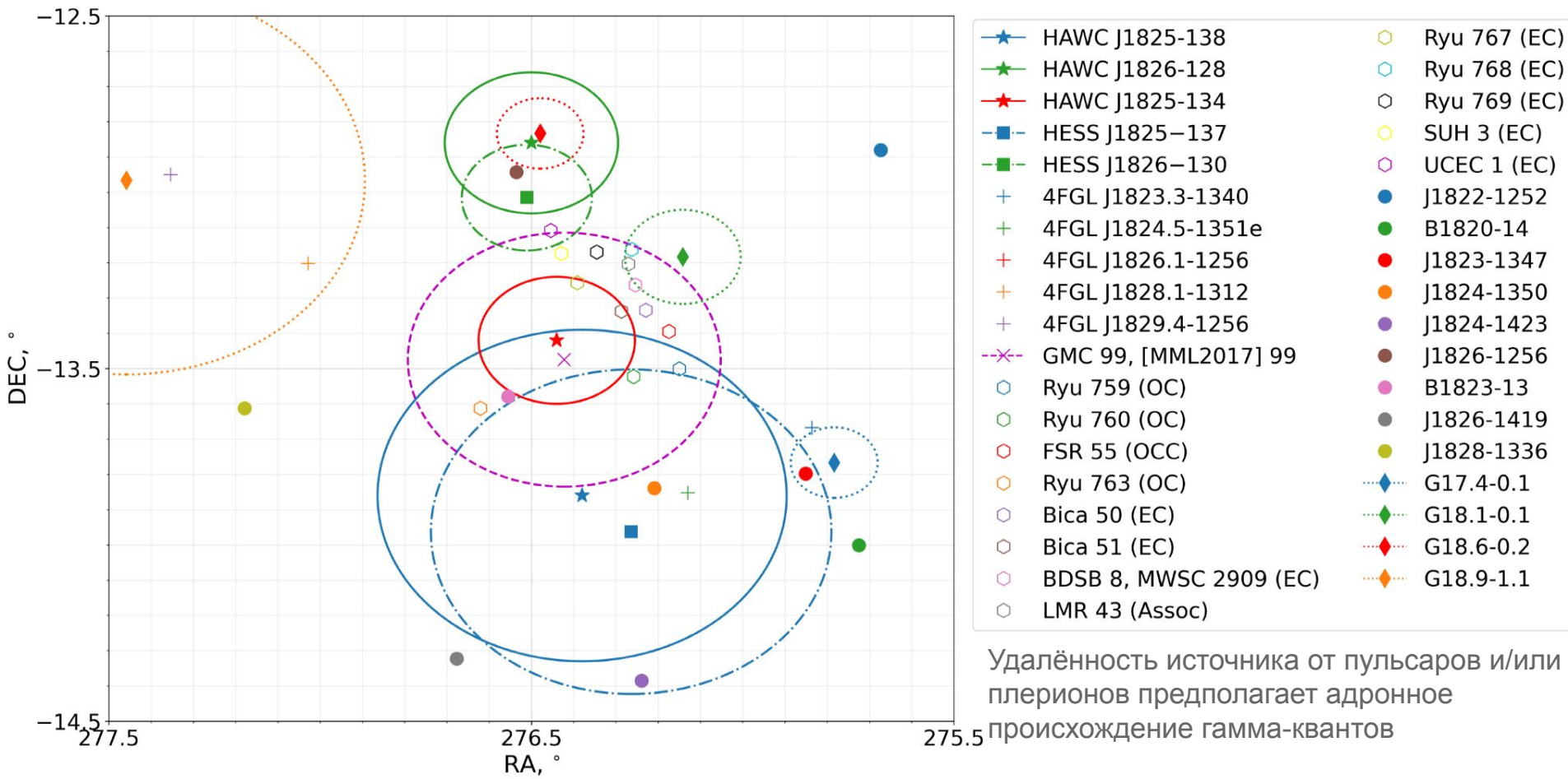
Table 1 | UHE γ-ray sources

LHAASO (2021)

Сравнение SED трёх источников HAWC с LHAASO J1825-136



Интерполированная сумма SED (E^2dN/dE) трёх источников HAWC согласуется с SED LHAASO J1825-136 в перекрывающейся области энергий



Удалённость источника от пульсаров и/или плерионов предполагает адронное происхождение гамма-квантов

Область неба вокруг кандидата в ПэВатроны HAWC J1825-134

Возможное объяснение происхождения гамма-квантов

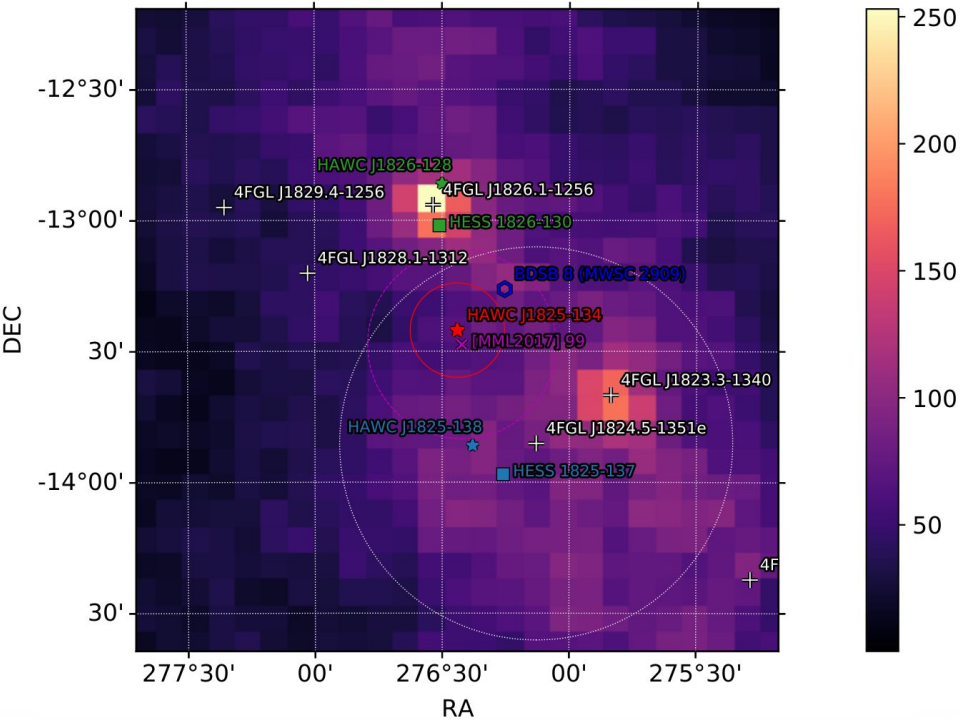
Версия HAWC:
Протоны могли ускориться в погружённом звёздном скоплении молодых звёзд BDSB 8 (MWSC 2909) (D ≈ 4.4 кпк [от Солнца]), а затем, покинув область ускорения, провзаимодействовать с покоящимся веществом гигантского молекулярного облака GMC 99 ([MML2017] 99)
(D ≈ 3.9 кпк), образовав гамма-кванты, наблюдаемые у Земли.

Наши замечания:
У LMR 43 D ≈ 3.7±1.7 kpc (Lee et al. 2012); для погружённых скоплений Bica 50, Ryu 767, Ryu 768, Ryu 769, UCEC 1 мы не нашли оценок расстояний от Солнца до них, поэтому они не могут быть исключены как возможные источники протонов сверхвысоких энергий.

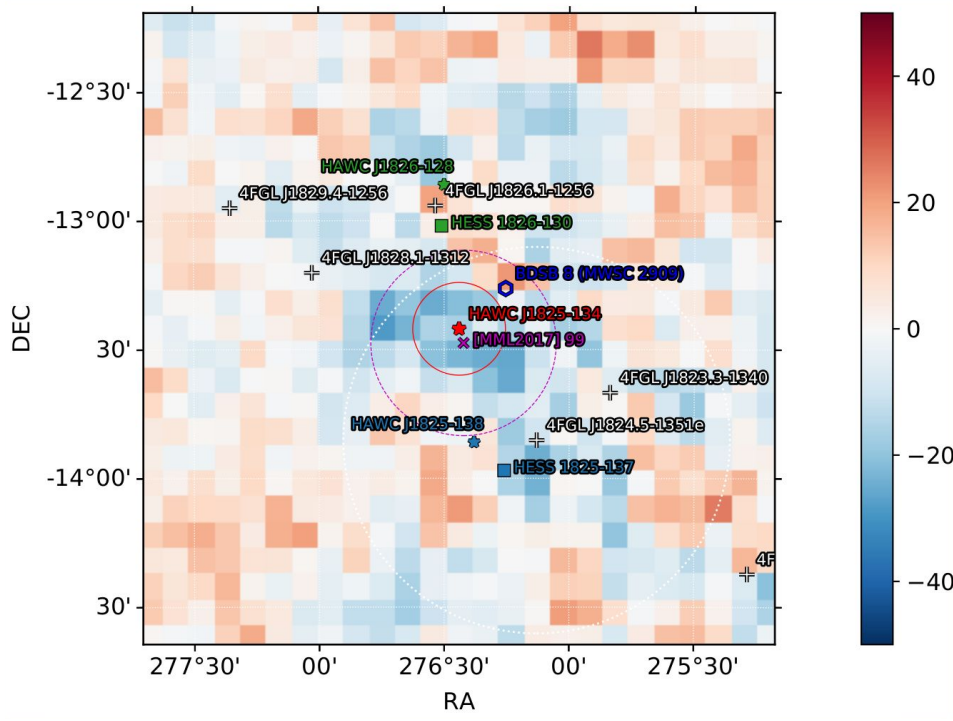
Центральный вопрос нашей работы: “Каков первичный спектр протонов кандидата в ПэВатроны HAWC J1825-134?”

Наши предположения и допущения:

1. Гамма-кванты от HAWC — результат взаимодействия протонов сверхвысоких энергий с покоящимися протонами гигантского молекулярного облака.
2. Мы интересуемся только формой спектра гамма-квантов (и протонов), полагая, что источник протонов имеет произвольную светимость.
3. Спектр первичных протонов представляется степенным законом с экспоненциальным обрывом (свободные параметры — спектральный индекс γ_p и энергия экспоненциального обрыва спектра $E_{c\text{-}p}$).
4. Спектры продуктов pp-реакции считаются на основе формул из работы Kelner et al. (2006).
5. На данном этапе работы мы пренебрегаем возможным вкладом тормозного излучения каскадных электронов.
6. Мы берём результаты анализа данных по источнику HAWC J1825-134 в неизменном виде, опубликованном коллаборацией HAWC.
7. Мы анализируем данные орбитального гамма-телескопа Fermi-LAT (от 1 ГэВ до 1 ТэВ), производя поиск источника HAWC J1825-134 в области неба с теми же координатами, которые указаны коллаборацией HAWC.



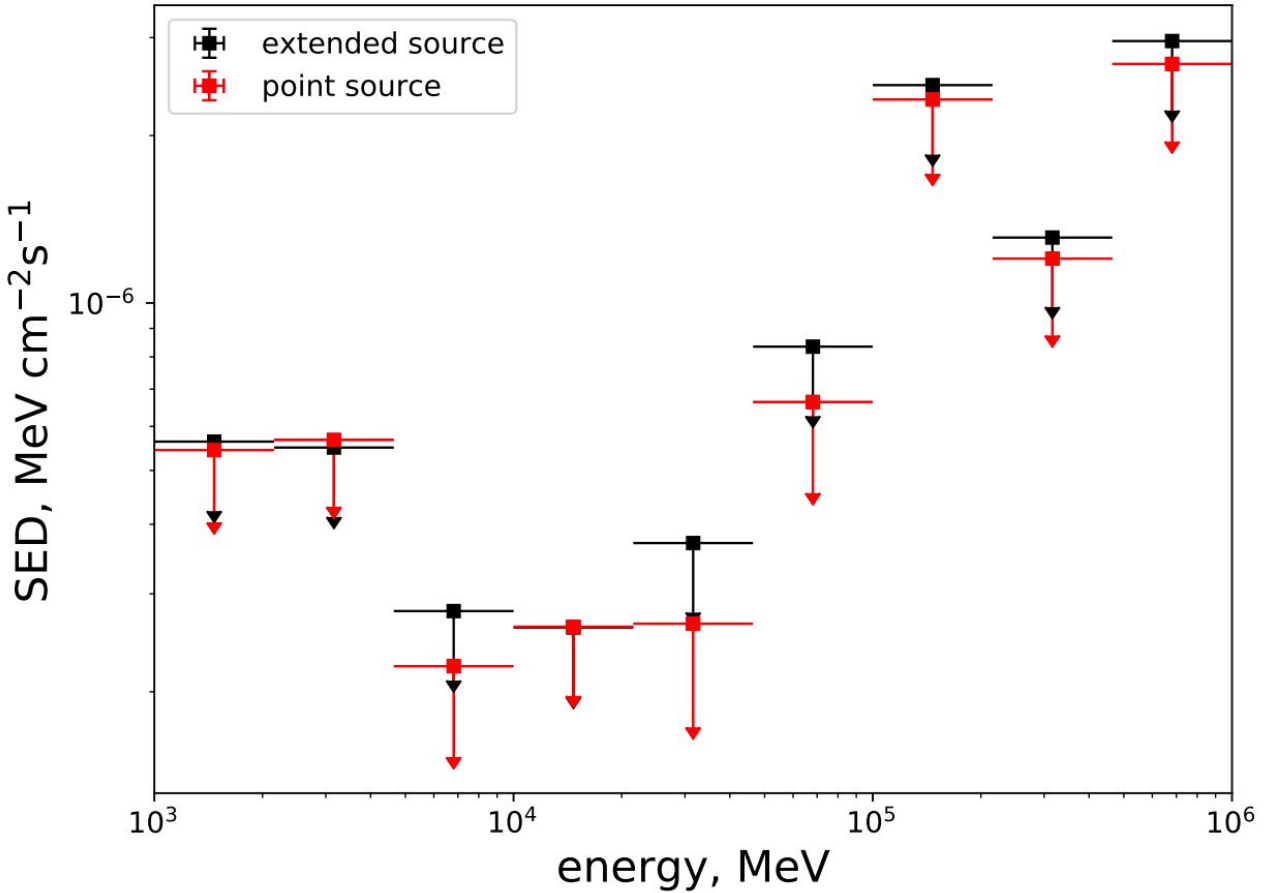
Карта отсчётов фотонов Fermi-LAT (E ⩾ 10 ГэВ)



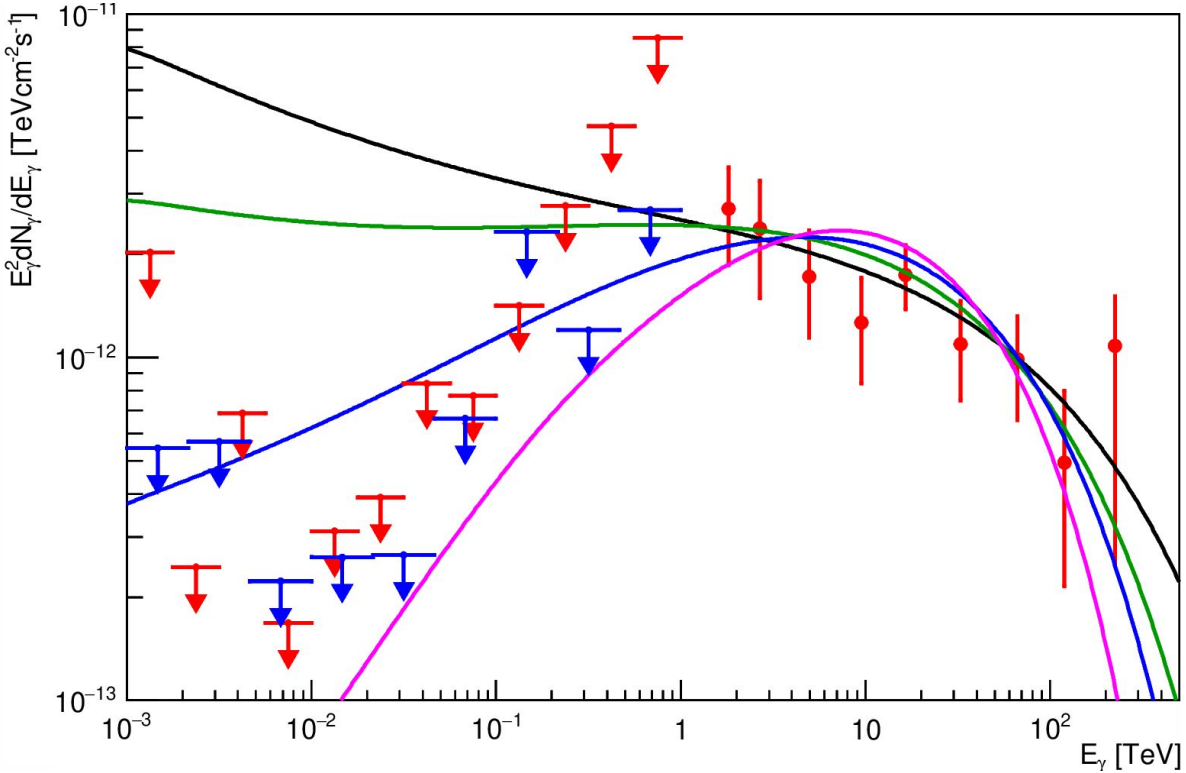
Карта остатков Fermi-LAT (E ⩾ 10 ГэВ)

В данных Fermi-LAT нет сигнала от HAWC J1825-134.

Верхние пределы Fermi-LAT на SED



Верхние пределы Fermi-LAT, наблюдения HAWC и модельные кривые спектрально-энергетического распределения HAWC J1825-134



Чёрный:

γ_p = 2.2, $E_{c\text{-}p}$ = 3 PeV

Зелёный:

γ_p = 2.06, $E_{c\text{-}p}$ = 1 PeV

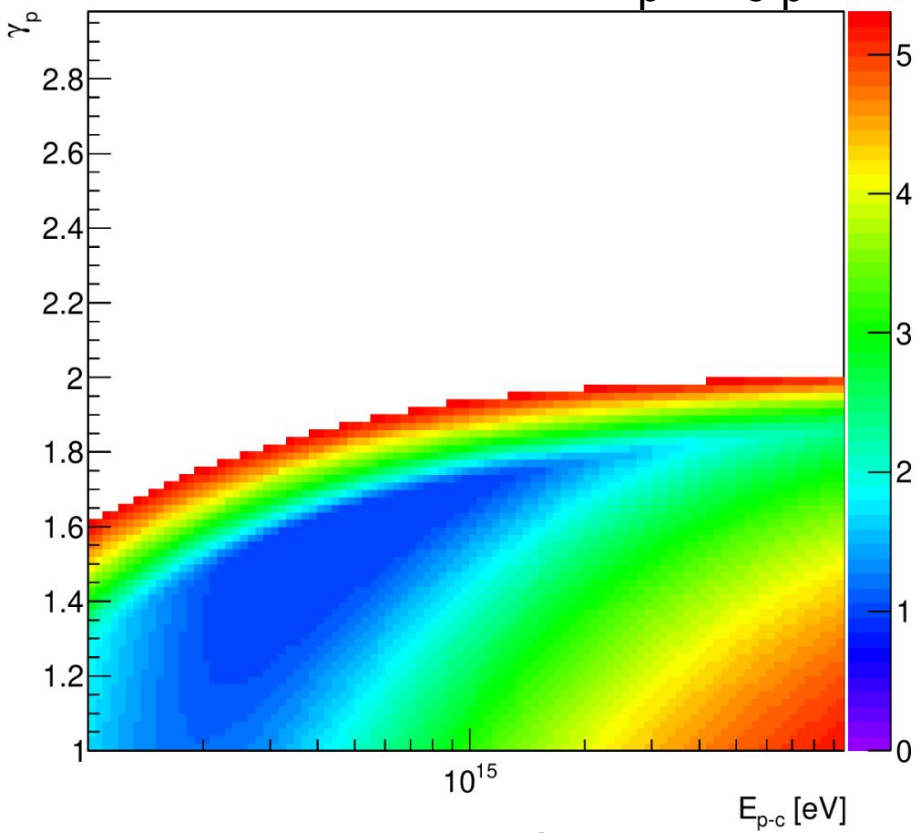
Синий:

γ_p = 1.8, $E_{c\text{-}p}$ = 500 TeV

Лиловый:

γ_p = 1.3, $E_{c\text{-}p}$ = 200 TeV

Сканирование области параметров первичного спектра протонов (γ_p, $E_{c\text{-}p}$)



Белая область исключена из-за превышения верхних пределов Fermi-LAT. Цветная шкала отражает значимость отклонения гипотезы о значениях параметров, соответствующих данному пикселю

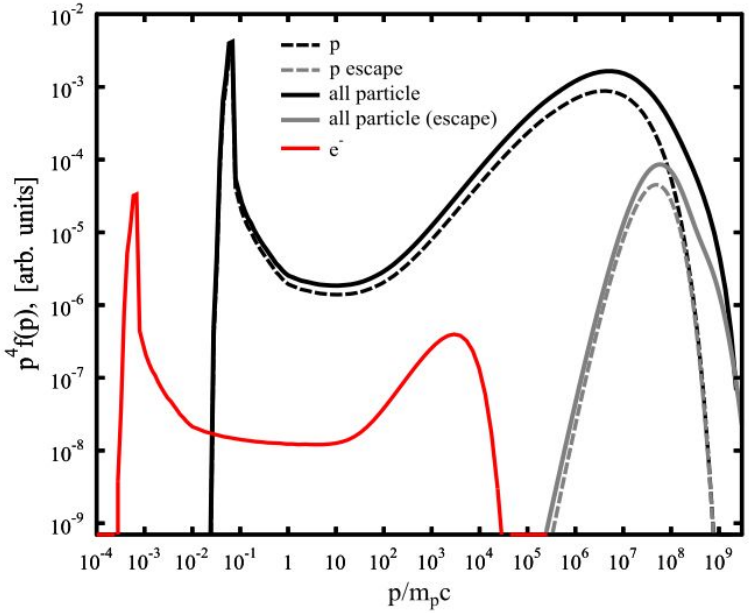


Fig. 1. Cosmic rays accelerated by a colliding shock flow (CSF) system at the end of the CSF phase. The all-particle hadron spectrum (i.e., the sum of protons and heavier nuclei) is shown by a thick black line for the trapped CRs and by a gray line for the escaping CRs. The electron spectrum, which is suppressed by synchrotron losses at $\gtrsim 5$ TeV, is shown in red. The troughs in the spectra below ~ 100 GeV result when acceleration is dominated by the isolated SNR shock. The harder spectral shapes at higher energies are due to the efficient particle acceleration when the SNR CRs interact with the colliding stellar wind shock (Bykov et al., 2013; Gladilin et al., 2014). The primary electron-to-proton ratio at relativistic energies is set by the normalization factor $K_{ep} = 0.03$ Park et al. (2015).

Жёсткие первичные спектры протонов, например, предсказываются в работах *Bykov et al. 2018, Advances in Space Research, 62, 2764 (рис. слева отсюда);*
Bykov et al. 2013, MNRAS 429, 2755–2762

Выводы

1. Отсутствие видимого потока гамма-квантов в области энергий Fermi-LAT и наблюдения HAWC накладывают значительные требования на жёсткость спектра протонов (γ_p ~ 1.0...1.6) источника HAWC J1825-134 и существенно ограничивают сверху энергию экспоненциального обрыва спектра первичных протонов ($E_{c\text{-}p}$ < 3 ПэВ).
2. Это даёт основание поставить под сомнение сложившееся до этого представление о том, что галактические адронные ПэВатроны имеют первичный спектр с наклоном около γ_p = 2 и $E_{c\text{-}p}$ = 1...3 ПэВ.
3. Альтернативной интерпретацией является изломанный первичный спектр протонов с жёстким наклоном при низких энергиях и менее жёстким, но простирающимся выше 1 ПэВ при высоких энергиях. Эту возможность ещё предстоит исследовать.

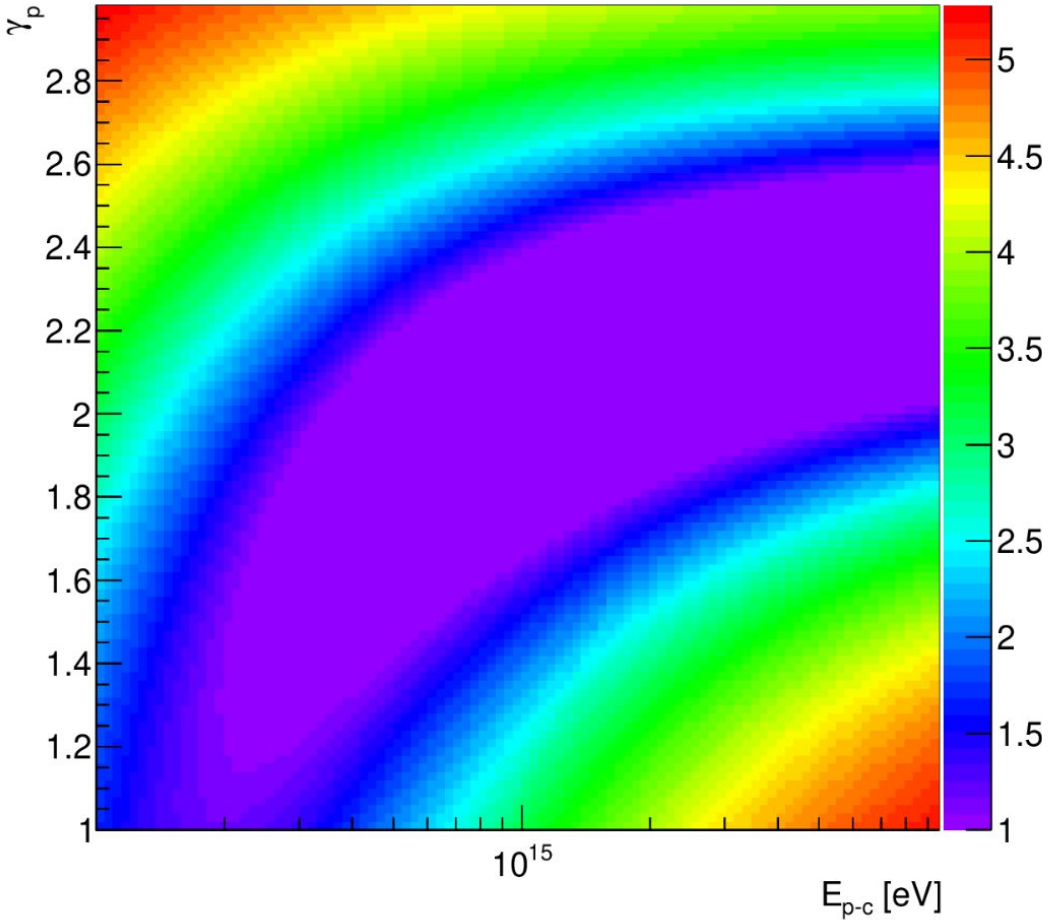
Результаты нашей работы опубликованы в препринте Dzhatdoev et al. (2021) arXiv:2101.10781.

Спасибо за внимание!

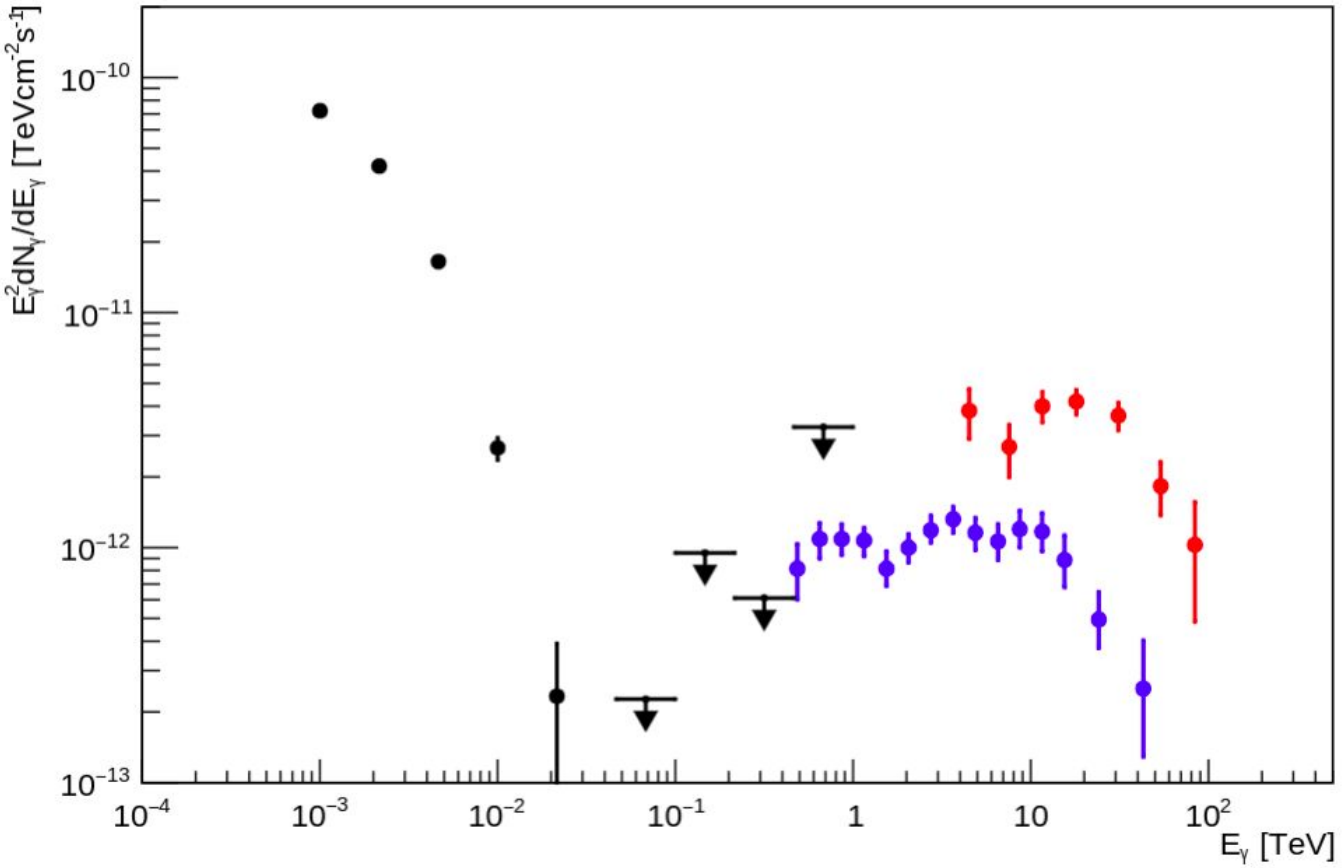
Докладчик — стипендиат фонда развития теоретической физики и математики “БАЗИС” (договор № 20-2-10-7-1) и Некоммерческого фонда развития науки и образования “ИНТЕЛЛЕКТ” (договор № АСП-03-НС_ФФ/2021)

Дополнительные слайды

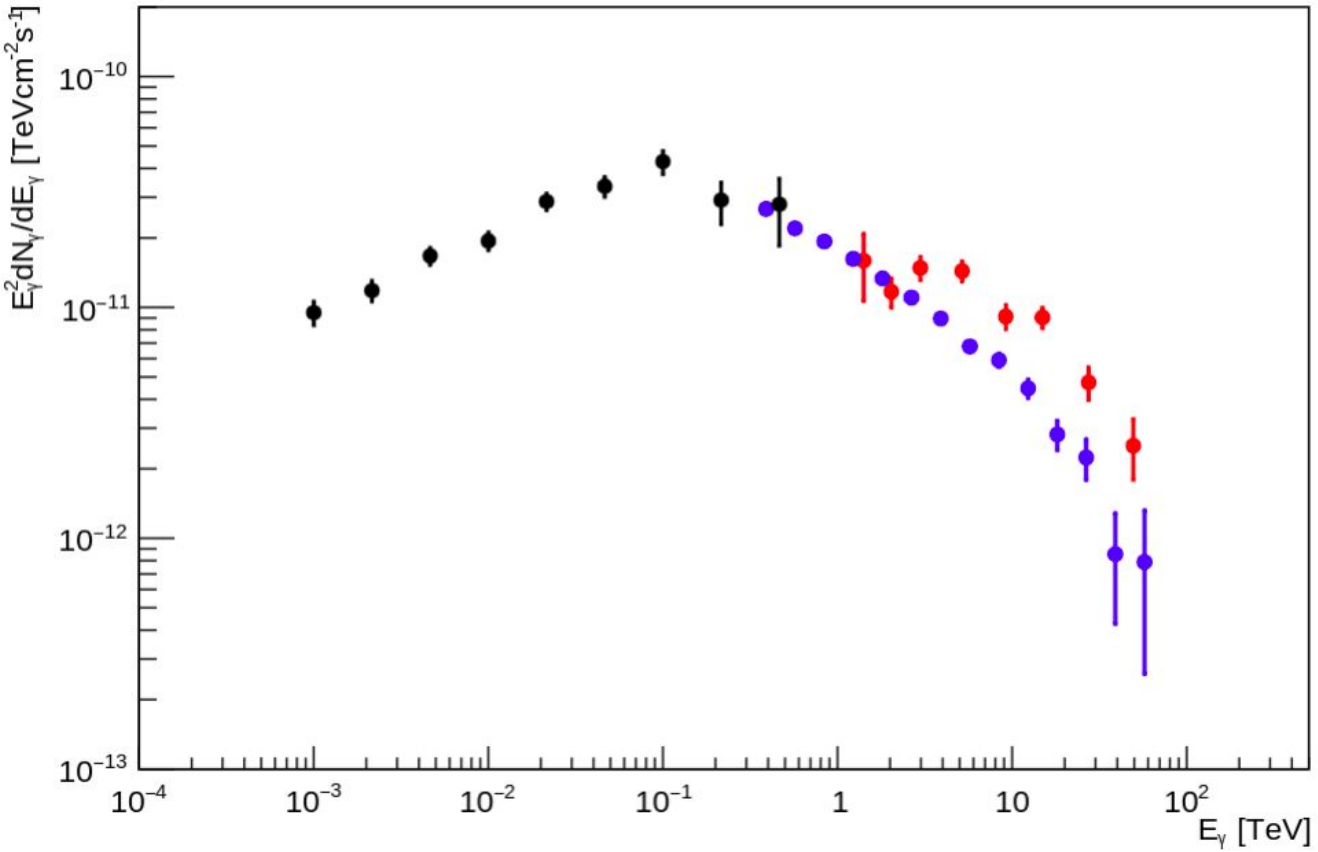
Exclusion significance map (только по данным HAWC)



HAWC J1826-128 (северный источник, ассоциированный с пульсаром)

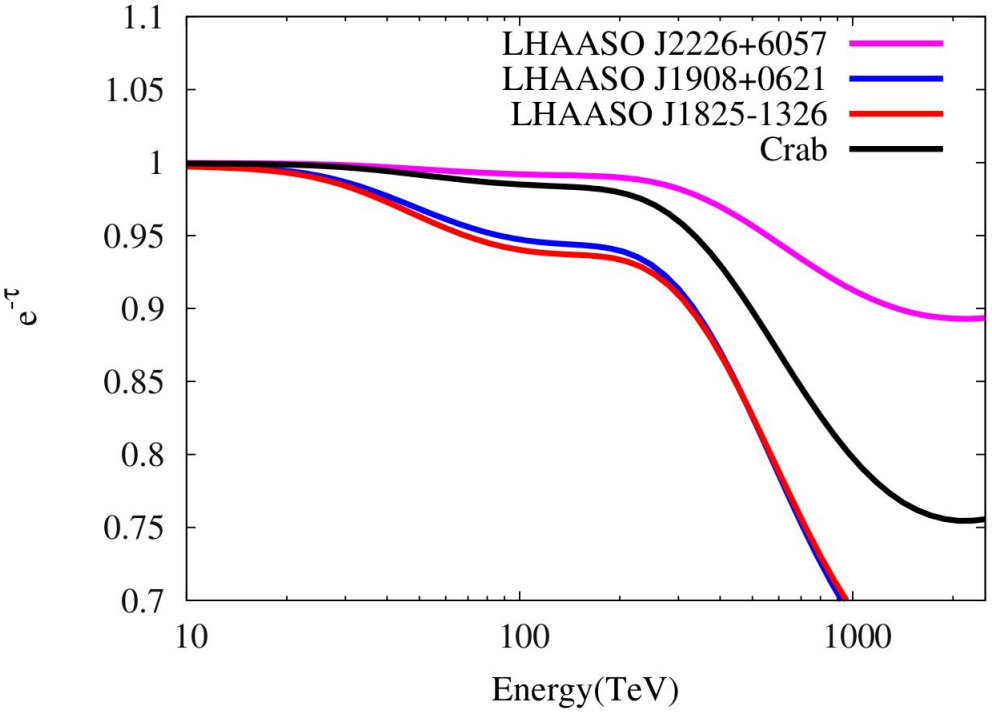


HAWC J1825-138 (южный источник, ассоциированный с PWN)



Вероятность выживания гамма-квантов при распространении от некоторых галактических источников к наблюдателю

LHAASO (2021)



Литература

- Ahnen, M. L., Ansoldi, S., Antonelli, L. A., et al. 2017, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 472 2956, doi: 10.1093/mnras/stx2079
- Abdalla, H., Abramowski, A., Aharonian, F., et al. 2018, Astronomy & Astrophysics, 612, A6, doi: 10.1051/0004-6361/201629790
- Abramowski, A., Aharonian, F., Benkhali, F. A., et al.2016, Nature, 531, 476, doi: 10.1038/nature17147
- Abeysekara, A. U., Albert, A., Alfaro, R., et al. 2021, Nature Astronomy, doi: 10.1038/s41550-021-01318-y
- Bykov, A., Ellison, D., Gladilin, P., & Osipov, S. 2018, Advances in Space Research, 62, 2764, doi:10.1016/j.asr.2017.05.043
- Breuhaus, M., Hahn, J., Romoli, C., et al. 2021, The Astrophysical Journal Letters, 908, L49,doi: 10.3847/2041-8213/abe41a
- Kelner, S. R., Aharonian, F. A., & Bugayov, V. V. 2006, Physical Review D, 74, doi: 10.1103/physrevd.74.034018
- Khangulyan, D., Arakawa, M., & Aharonian, F. 2019, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 491,3217, doi: 10.1093/mnras/stz3261
- LHAASO collaboration 2021, Nature, https://doi.org/10.1038/s41586-021-03498-z