



Многоканальная астрономия

Г.И. Рубцов (ИЯИ РАН)

XXIII Байкальская летняя школа
по физике частиц и астрофизике
16-17 июля 2023, Большие Коты



Лоренц-симметрия

- Все физические процессы протекают одинаково в любой инерциальной системе отчета
- В вычислениях используем 4-векторы $p = (E, \mathbf{p})$
- Инварианты: скалярные произведения или квадраты 4-векторов по метрике Минковского $\text{diag}(1, -1, -1, -1)$

$$E^2 - \mathbf{p}^2 = m^2$$

- Мы точно знаем, что Лоренц-симметрия имеет место при любых энергиях?

Нарушение Лоренц-инвариантности

- Дисперсионные соотношения

$$\gamma : \quad k_0^2 = k^2 + \alpha \frac{k^4}{M_{Pl}^2}$$
$$e^\pm : \quad p_0^2 = (1 + \xi)p^2 + m^2 + \beta \frac{p^4}{M_{Pl}^2}$$

- Сильные экспериментальные ограничения на ξ . Параметры α, β можно считать эффективной массой

$$m_{eff,\gamma}^2(k) = \alpha \frac{k^4}{M_{Pl}^2}$$
$$m_{eff,e^\pm}^2(p) = m^2 + \beta \frac{p^4}{M_{Pl}^2}$$



Как работать в теориях с Лоренц-нарушением?

- Нельзя переходить в систему центра масс, все расчеты делаются в лабораторной системе отчета
- Преобразование Лоренца можно выполнять формально, но теперь оно не приводит к эквивалентной теории
- Для вычисления порога можно использовать то, что на пороге групповые скорости всех вторичных частиц одинаковы
 - $\mathbf{v}_i = dE_i/d\mathbf{p}_i = \mathbf{u}$

Coleman, Glashow, Phys.Rev.D 59 (1999)

Интерактивное Лоренц-нарушение

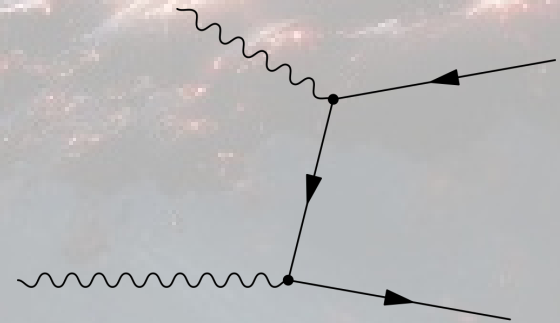
$$\gamma: \quad k_0^2 = k^2 + \alpha \frac{k^4}{M_{Pl}^2}$$

$$e^\pm: \quad p_0^2 = (1 + \xi)p^2 + m^2 + \beta \frac{p^4}{M_{Pl}^2}$$

$$m_{eff,\gamma}^2(k) = \alpha \frac{k^4}{M_{Pl}^2}$$

$$m_{eff,e^\pm}^2(p) = m^2 + \beta \frac{p^4}{M_{Pl}^2}$$

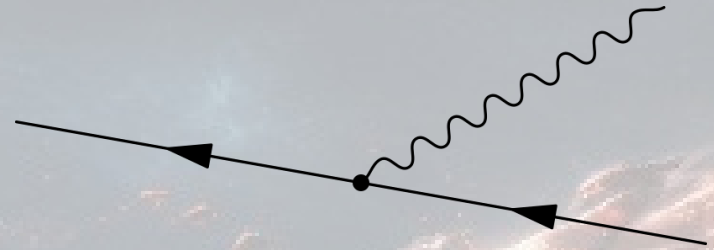
- Реакция рождения пар (ТэВ + эВ) пойдет/не пойдет?
- 1) $\alpha=0, \beta \gg 1, \xi=0$
- 2) $\alpha \gg 1, \beta=0, \xi=0$
- 3) $\alpha \ll -1, \beta=0, \xi=0$
- 4) $\alpha=0, \beta \ll -1, \xi=0$



Физические процессы в Лоренц-нарушенном мире

$$\gamma: \quad k_0^2 = k^2 + \alpha \frac{k^4}{M_{Pl}^2}$$

$$e^\pm: \quad p_0^2 = (1 + \xi)p^2 + m^2 + \beta \frac{p^4}{M_{Pl}^2}$$



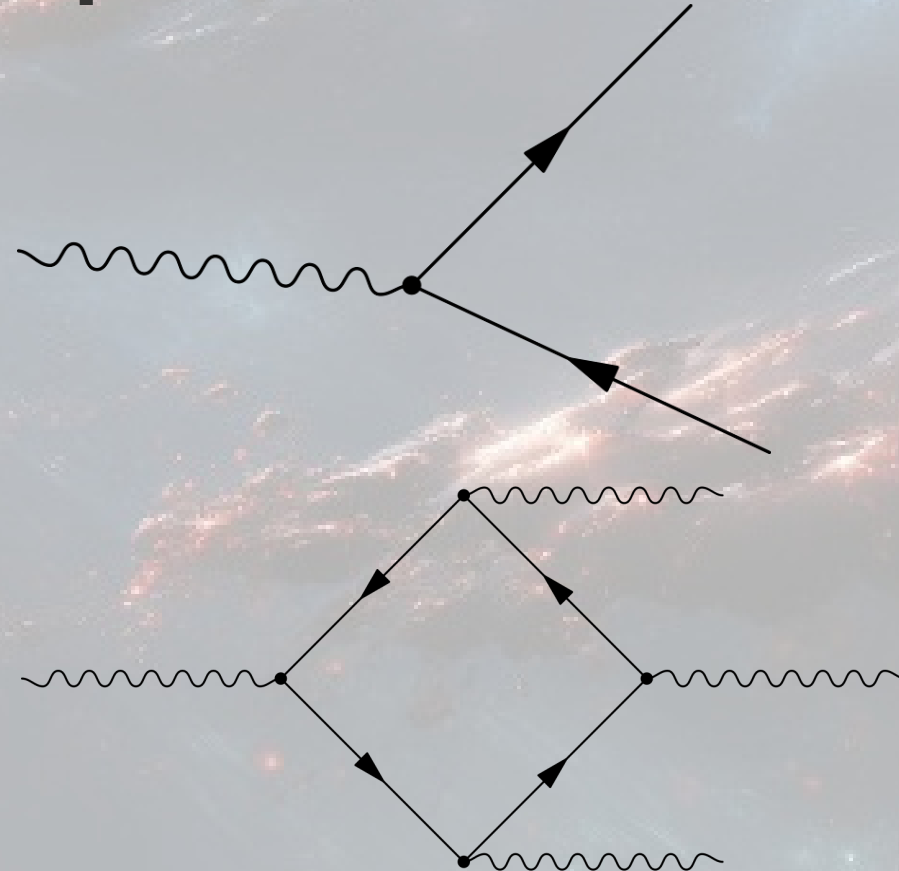
- Вакуумное черенковское излучение
 - $\xi > 0$ или $\beta > 0$, электрон в вакууме движется быстрее скорости света

Физические процессы в Лоренц-нарушенном мире

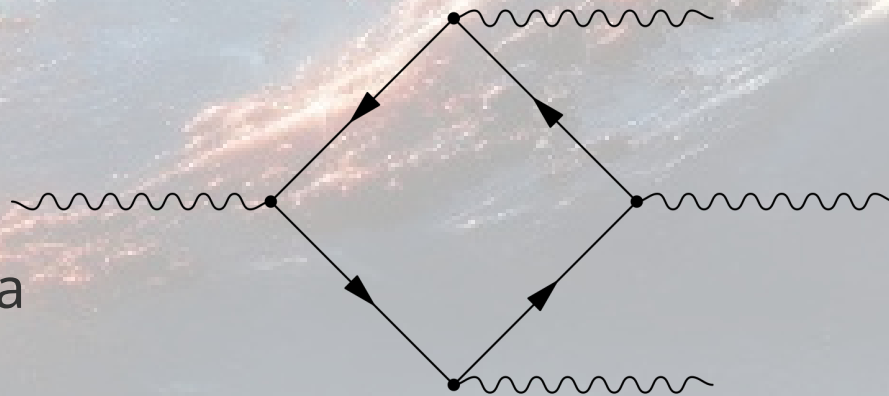
$$\gamma: \quad k_0^2 = k^2 + \alpha \frac{k^4}{M_{Pl}^2}$$

$$e^\pm: \quad p_0^2 = (1 + \xi)p^2 + m^2 + \beta \frac{p^4}{M_{Pl}^2}$$

- Распад фотона на e^+e^-
 - $\alpha > 0$ или $\beta < 0$
- Деление фотона на 3 фотона
 - $\alpha > 0$



Распад $\gamma \rightarrow 3\gamma$



- Деление фотона на 3 фотона
 - $\alpha > 0$

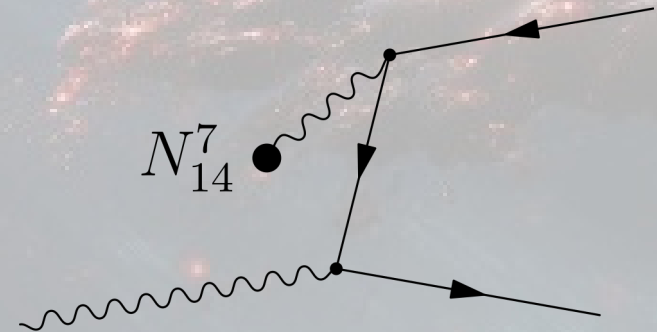
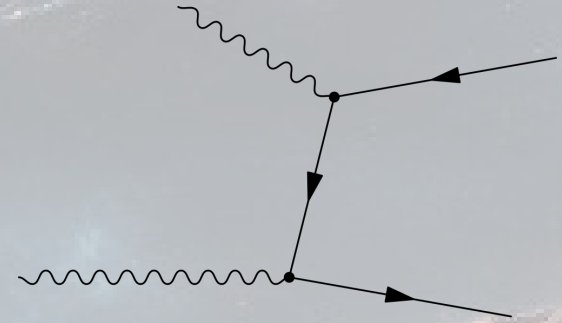
$$\Gamma(\gamma \rightarrow 3\gamma) \simeq \left(\frac{2\alpha_{em}^2}{45}\right)^2 \frac{1}{3!2^{11}\pi^9} \frac{\alpha^5 E_\gamma^{19}}{m^8 M_{Pl}^{10} \left(1 + \xi \frac{E_\gamma^2}{m^2} + \beta \frac{E_\gamma^4}{m^2 M_{Pl}^2}\right)^4} \cdot f$$

$$\Gamma_{\gamma \rightarrow 3\gamma} \simeq 1.2 \cdot 10^3 \left(\frac{2\alpha^2}{45}\right)^2 \frac{1}{2^8 3! \pi^4} \frac{E_\gamma^{19}}{m_e^8 M_{LV}^{10}} \simeq 5 \cdot 10^{-14} \frac{E_\gamma^{19}}{m_e^8 M_{LV}^{10}}.$$

Физические процессы в Лоренц-нарушенном мире

$$\gamma: \quad k_0^2 = k^2 + \alpha \frac{k^4}{M_{Pl}^2}$$

$$e^\pm: \quad p_0^2 = (1 + \xi)p^2 + m^2 + \beta \frac{p^4}{M_{Pl}^2}$$

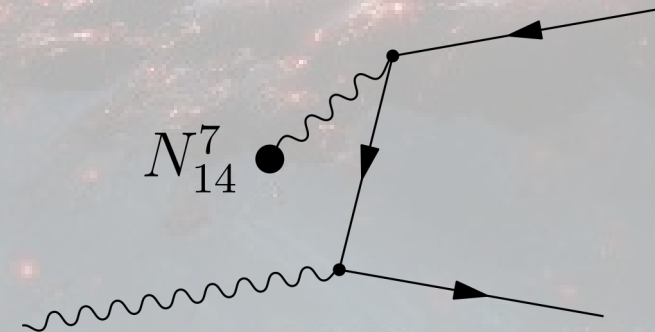
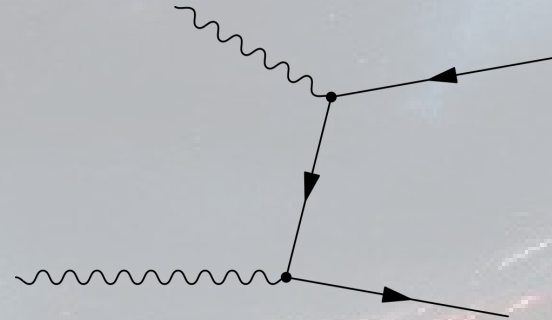


- Порог рождения пар сдвигается
- Процесс Бете-Гайтлера подавлен при $\alpha < 0$ или $\beta > 0$

GR, Satunin, Sibiryakov Phys.Rev.D 86 (2012)

Физические процессы в Лоренц-нарушенном мире

- Порог рождения пар сдвигается
- Процесс Бете-Гайтлера подавлен при $\alpha < 0$ или $\beta > 0$
- Вселенная может стать более прозрачной для гамма-квантов высоких энергий
- НО: атмосфера также станет прозрачнее
- Сильные ограничения на Лоренц-нарушение из самого факта наблюдения гамма-квантов высоких энергий





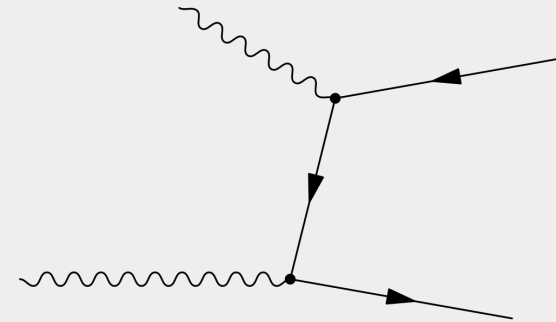
Унести с собой (EM-излучение)

- В эксперименте LHAASO зарегистрированы фотоны с энергией до 1.4 ПэВ
- GRB 221009A самый мощный гамма-всплеск за всю историю наблюдений
- Впервые зарегистрировано излучение от гамма-всплеска с энергией выше 10 ТэВ
- Нарушение Лоренц-инвариантности – одно из возможных объяснений аномальной прозрачности Вселенной

Унести с собой (задача)

$$\gamma : \quad k_0^2 = k^2 + \alpha \frac{k^4}{M_{Pl}^2}$$

$$e^\pm : \quad p_0^2 = (1 + \xi)p^2 + m^2 + \beta \frac{p^4}{M_{Pl}^2}$$



- 3) Вычислить порог рождения электрон-позитронной пары гамма-квантом с энергией TeV на фотоне фонового излучения $\sim eV$

Космические лучи ультравысоких энергий



фото Олега Калашева

Установки, регистрирующие космические лучи с $E > 1$ ЭэВ



Якутск ШАЛ



Pierre Auger



Telescope Array



Обсерватория Telescope Array



Telescope Array
Delta, Utah, USA. ~1400 m a.s. l.
Collaborators from HiRes, AGASA and other

Science goals:

- Origin and properties of the ultra-high energy cosmic rays:
 - spectrum, composition, anisotropy
- Physics of HE hadronic interactions
- Multi-messenger and interdisciplinary studies
 - photons, neutrino, dark matter
 - thunderstorms, TGFs
 - meteoroids

Коллаборация Telescope Array

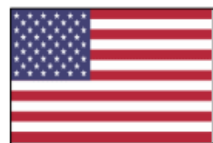
R.U. Abbasi^{1,2}, M. Abe³, T. Abu-Zayya¹,
 R. Cady², B.G. Cheon⁵, J. Chiba⁶,
 R. Gonzalez², W. Hanlon², M. Hayashi⁹
 D. Ivanov², H. Iwakura¹², A. Iwasaki⁴, H.
 H. Kawai¹⁹, S. Kawakami⁴, S. Kawana¹,
 S. Kishigami⁴, Y. Kubota¹², S. Kuri
 K. Machida¹¹, H. Matsumiya⁴, T. I
 R. Nakamura¹², T. Nakamura²³, T. Naka
 T. Okuda²⁵, Y. Omura⁴, M. Ono¹³, R. C
 G.I. Rubtsov¹⁶, D. Ryu²⁸, H. Sagawa⁷, R
 Y. Shibasaki¹², F. Shibata¹¹, N. Shiba
 B.T. Stokes², T.A. Stroman², T. Suzaw
 H. Tanaka⁴, K. Tanaka³⁰, M. Tanaka
 S. Troitsky¹⁶, R. Tsuda⁴, Y. Tsunesada



D.R. Bergman², S.A. Blake², I. Buckland²,
 kushima⁷, R. Fukushima⁴, G. Furlich²,
 T. Inadomi¹², N. Inoue³, T. Ishii¹¹, H. Ito¹³,
 O. Kalashev¹⁶, K. Kasahara¹⁷, S. Kasami¹⁸,
 Jim², M.H. Kim¹⁴, S.W. Kim¹⁴, Y. Kimura⁴,
 Lubsandorzhiiev¹⁶, J.P. Lundquist^{2,22},
 I. Myers², S. Nagataki¹³, K. Nakai⁴,
 Ogi^{4,24}, M. Ohnishi⁷, H. Ohoka⁷, Y. Oku¹⁸,
 kov^{16,27}, J. Remington², D.C. Rodriguez²,
 K. Sato⁴, T. Seki¹², K. Sekino⁷, P.D. Shah²,
 o¹⁸, J.D. Smith², P. Sokolsky², N. Sone¹²,
 shi⁷, A. Taketa²⁹, M. Takita⁷, Y. Tameda¹⁸,
 I. Tkachev¹⁶, H. Tokuno³², T. Tomida¹²,
 K. Yada⁷, M. Yamamoto¹², K. Yamazaki¹⁰,
 Z. Zundel²
 J University⁶ Tokyo University of Science
 of Yamanashi¹² Shinshu University (Inst. of
 rch of the Russian Academy of Sciences¹⁷
 ité Libre de Bruxelles²¹ Yonsei University²²
 umeikan University²⁶ National Inst. for
 onal Institute of Science and Technology²⁹
 ology³³ National Instit. for Quantum and
 35 Ewha Womans University

J. Yan
¹ Loyola University Chicago ² Univer
⁷ University of Tokyo (ICRR) ⁸ Kyoto Un
 Engineering) ¹³ RIKEN ¹⁴ Sungkyunkw
 Shibaura Institute of Technology ¹⁸ Osak
 University of Nova Gorica ²³ Kochi I
 Information and Communications Techr
 University of Tokyo (Earthquake Ins
 Radiological Science and Technology

160 members , 35 institutes, 7 countries



USA



Japan



Korea



Russia



Belgium

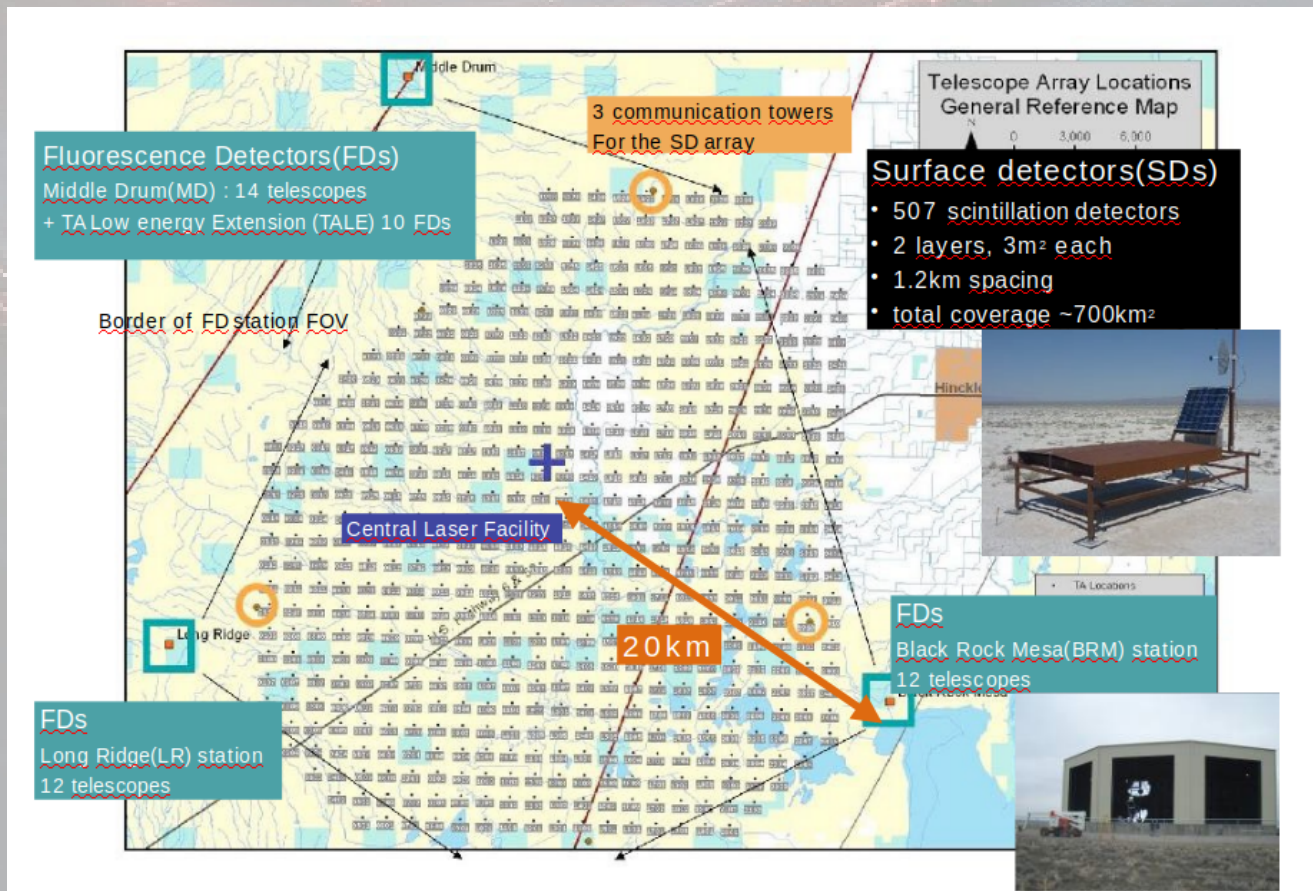


Czech Republic



Slovenia

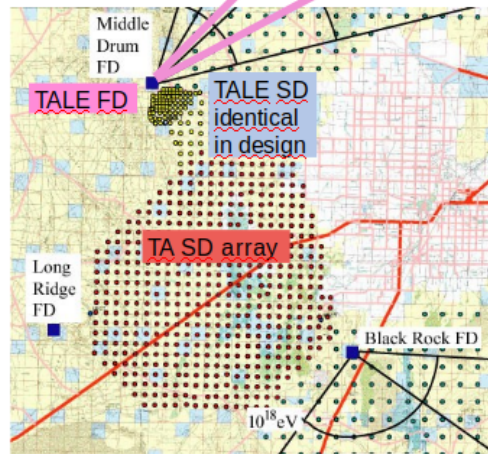
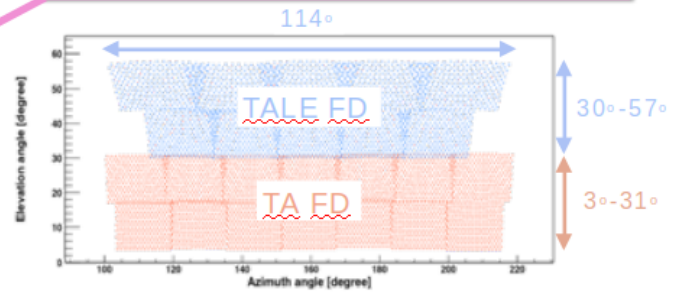
Обсерватория Telescope Array



TALE: TA Low Energy extension

Located in TA MD site
 10 FDs in the TALE station
 Elevation: 30°-57° (higher elevation than MD) Azimuthal: 114°

104 SD infill array identical to main TA SD
 Variable spacing up to 400m



TALE FD Installed in Nov. 2012
Operation since Sep. 2013

TALE SD completed Mar. 2018
Hybrid trigger: Sep. 2018



TA × 4

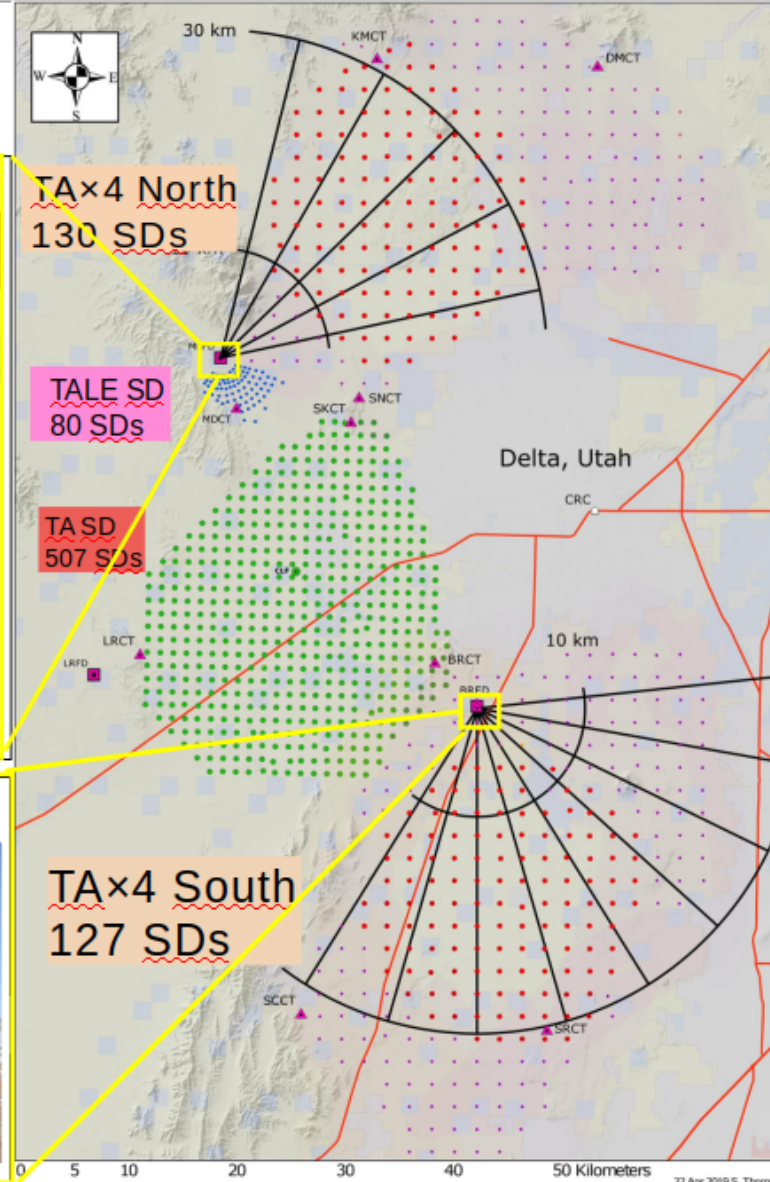
TA×4 northern FD station



routine
observation since
Jun. 2019

TA×4 southern FD station

routine
observation since
Aug. 2020



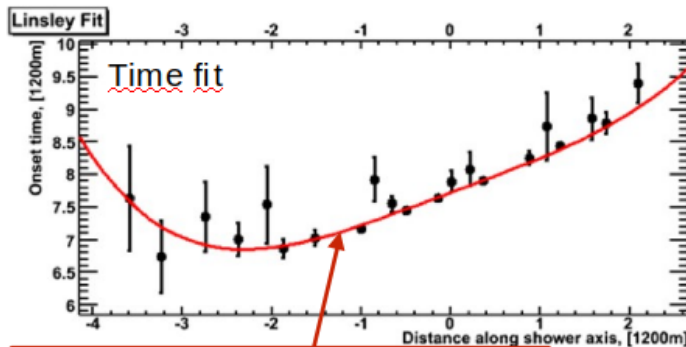
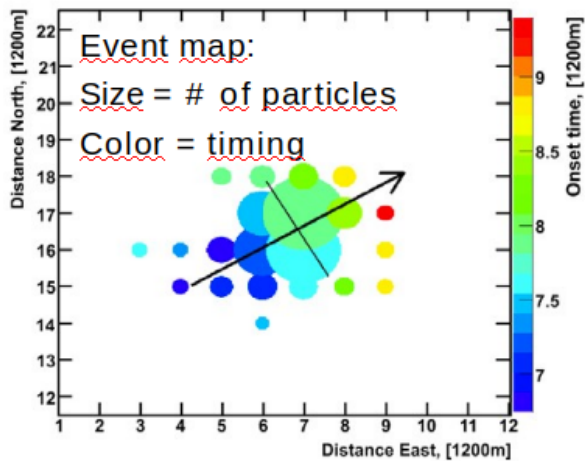
- Goal: fourfold increase in size of TA SD array (up to 3000 km²).
- Triple statistics for E>20 EeV in 5 years.

- Hybrid experiment:
 - 2 FD stations, 12 telescopes are installed

- 257 SD scintillators

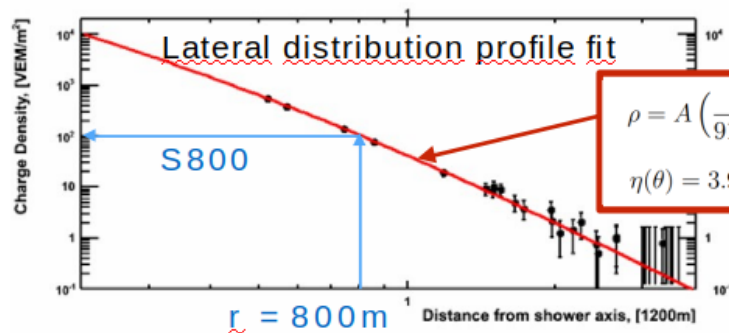


Реконструкция событий наземной решетки



$$\tau = a \left(1 - \frac{l}{12 \times 10^3 \text{m}}\right)^{1.05} \left(1.0 + \frac{s}{30\text{m}}\right)^{1.35} \rho^{-0.5}$$

Modified empirical formula in AGASA



$$\rho = A \left(\frac{s}{91.6\text{m}}\right)^{-1.2} \left(1 + \frac{s}{91.6\text{m}}\right)^{-(\eta(\theta)-1.2)} \left(1 + \left[\frac{s}{1000\text{m}}\right]^2\right)^{-0.6}$$

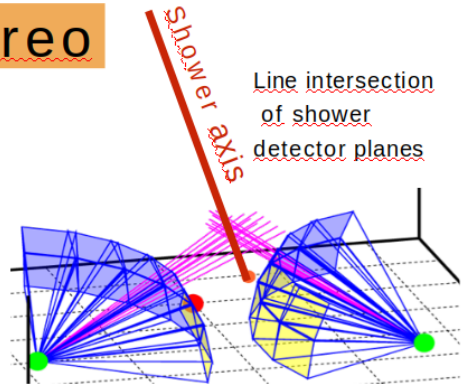
$$\eta(\theta) = 3.97 - 1.79 [\sec(\theta) - 1]$$

Empirical formula used by AGASA

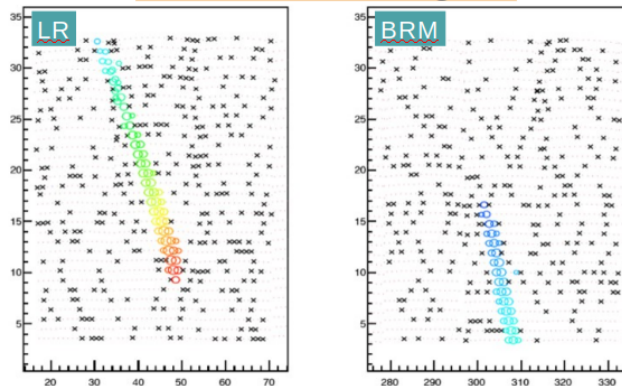
S800 -> primary energy

Восстановление событий в гибридном и стерео-режиме

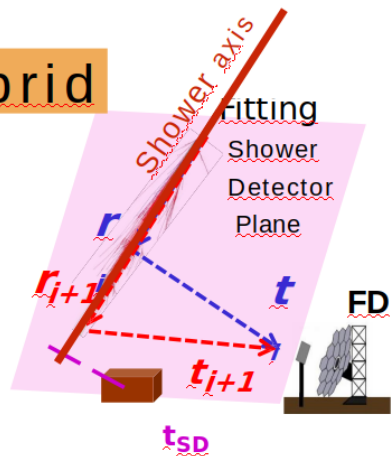
Stereo



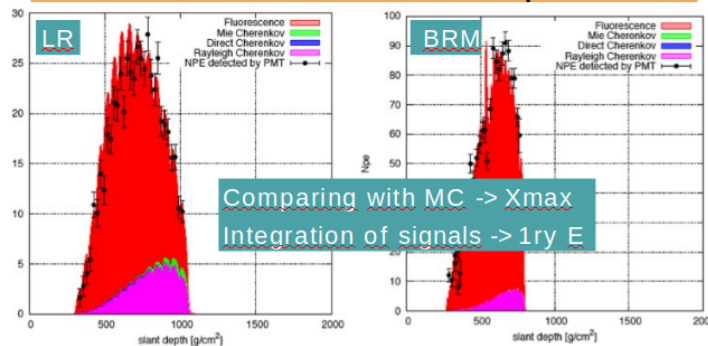
observed images



Hybrid



reconstructed shower profiles



Проблема происхождения космических лучей



Как нам представляется, к 2001 году или во всяком случае к 2012 году можно ожидать выяснения почти всех вопросов, сформулированных в конце предыдущего параграфа.

В.Л. Гинзбург, Астрофизика космических лучей, 1990 г.

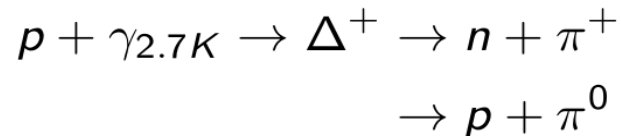
(Примечание: речь об источниках космических лучей)



Эффект Грейзена-Зацепина-Кузьмина

Greisen, 1966; Zatsepin, Kuzmin, 1966

Предсказано подавление спектра КЛ при $E \gtrsim 10^{19.7}$ eV.



END TO THE COSMIC-RAY SPECTRUM?

Kenneth Greisen

Cornell University, Ithaca, New York
(Received 1 April 1966)

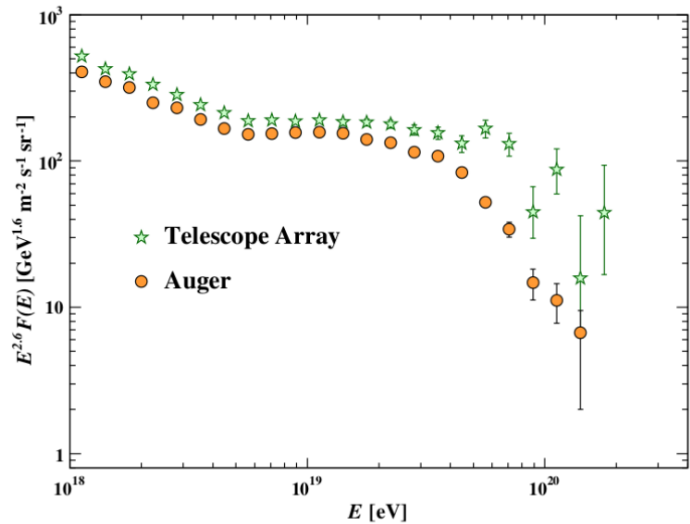
The primary cosmic-ray spectrum has been measured up to an energy of 10^{20} eV,¹ and several groups have described projects under development or in mind² to investigate the spectrum further, into the energy range 10^{21} - 10^{22} eV. This note predicts that above 10^{20} eV the primary spectrum will steepen abruptly, and the experiments in preparation will at last observe it to have a cosmologically meaningful termination.

О ВЕРХНЕЙ ГРАНИЦЕ СПЕКТРА КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

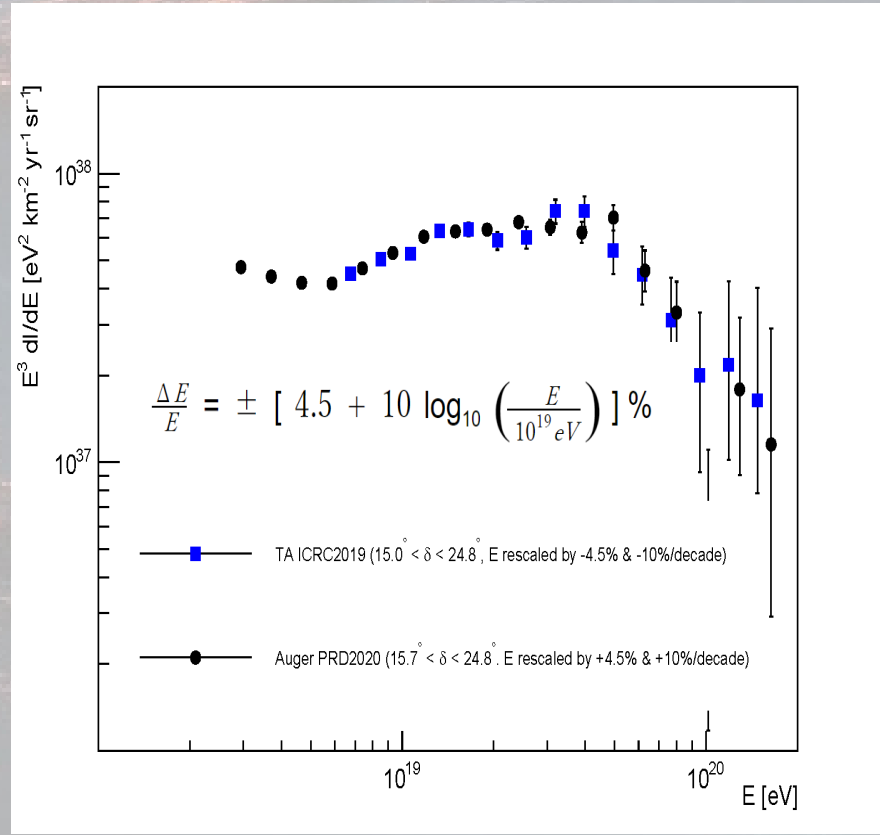
Г.Т.Зацепин, В.А.Кузьмин

В недавних измерениях [1,2] обнаружено мощное изотропное тепловое излучение Вселенной, обладающее, по-видимому, распределением Планка с температурой $T \approx 3^\circ K$. Интенсивность этого излучения такова ($N \approx 550$ фотонов/см³, $kT \approx 2,5 \cdot 10^{-4}$ эв), что возникают специфические эффекты при прохождении через него космических лучей сверхвысоких энергий, в частности обрезание спектра космических лучей в области 10^{20} эв.

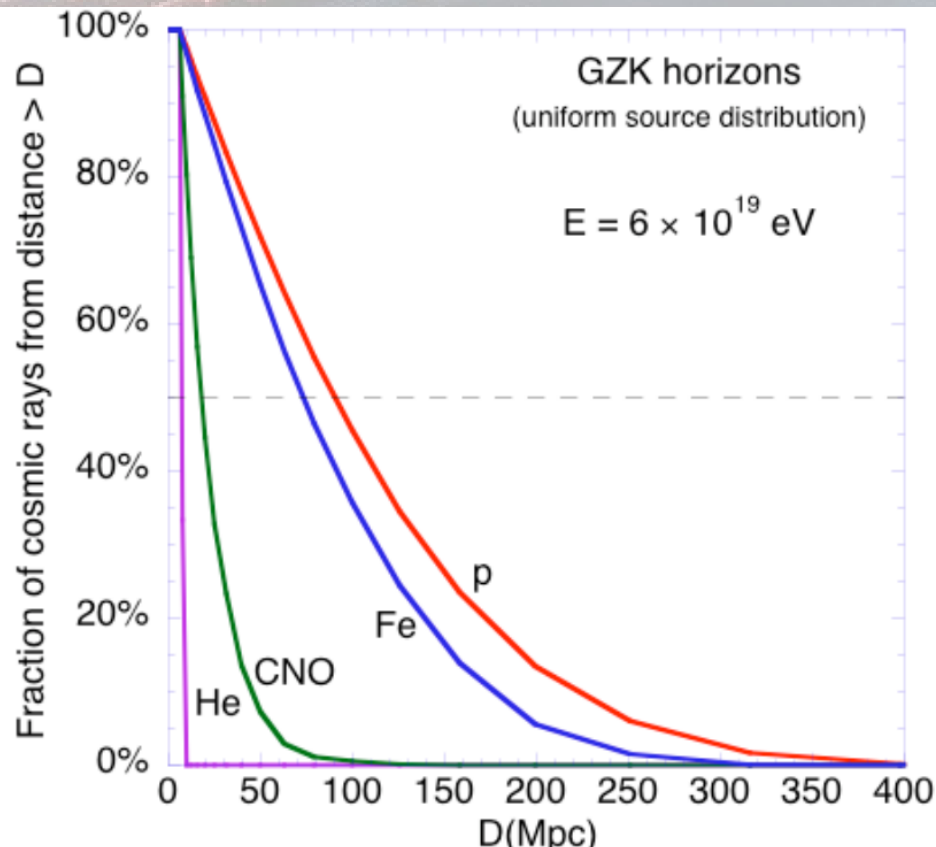
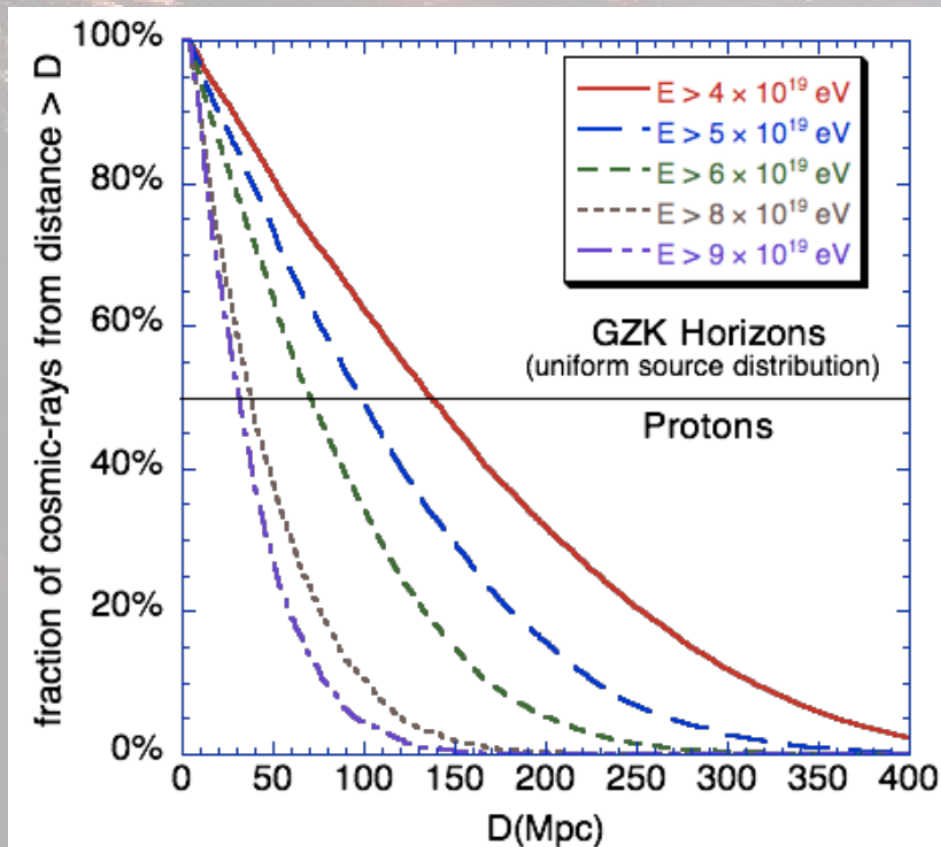
Эффект ГЗК: подтверждение в эксперименте



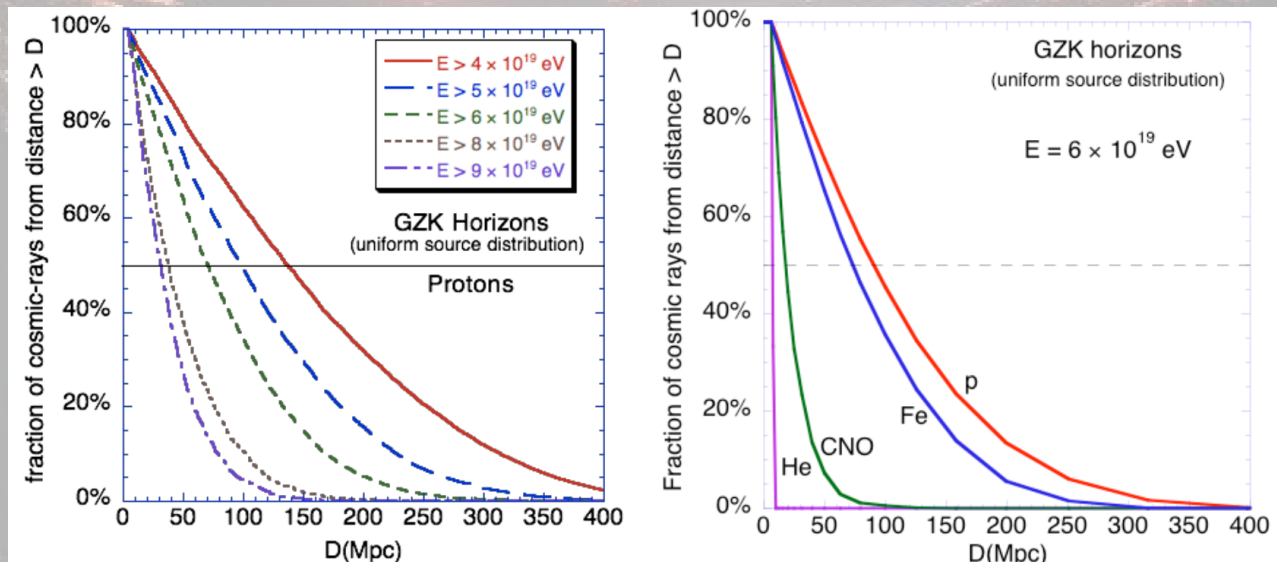
Particle Data Group'2018



Эффект Грейзена-Зацепина-Кузьмина

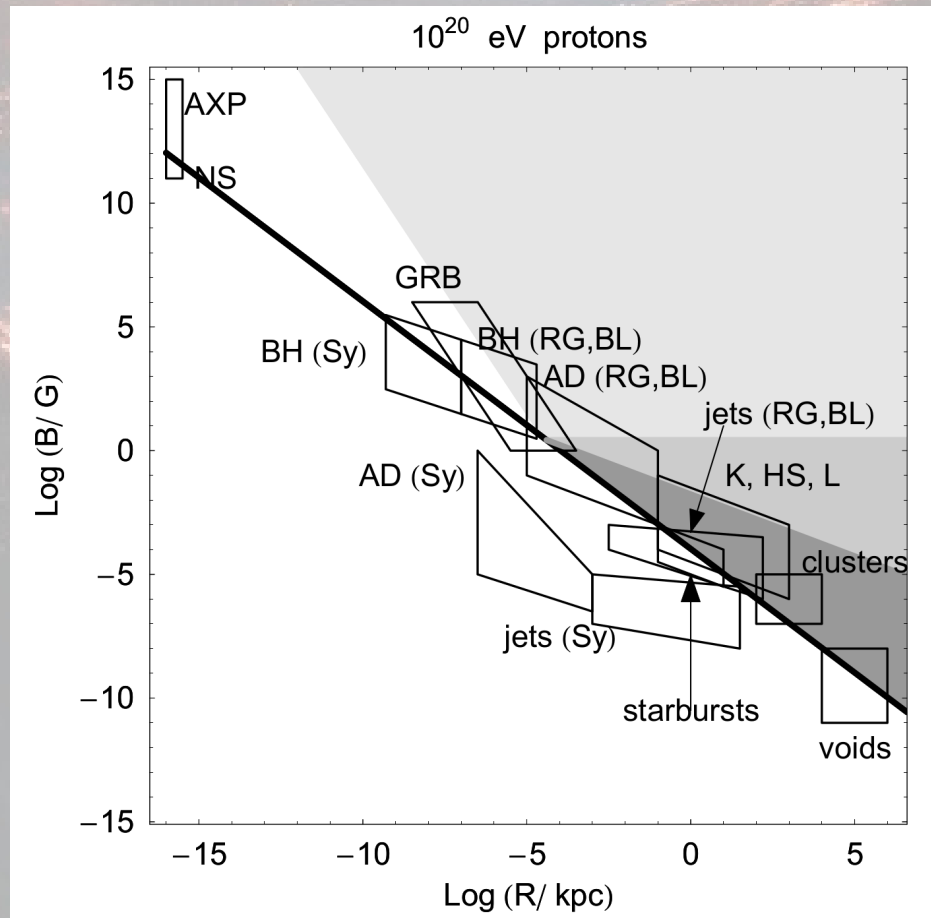


Эффект Грейзена-Зацепина-Кузьмина



- Отклонение протонов 60 ЭэВ в галактическом магнитном поле $2-6^\circ$
- Возможна ли астрономия космических лучей?

Рисунок Хилласа: Возможные источники КЛ



Птицына, Троицкий,
УФН 53 (2020) 691

Сколько источников КЛУВЭ?

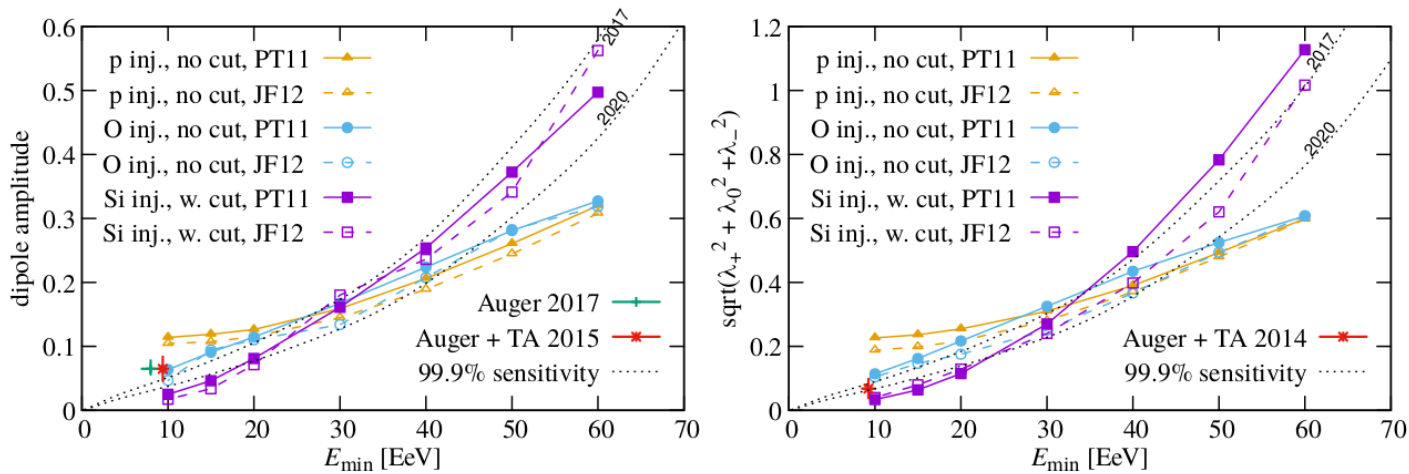
- ▶ Пусть мы видим N_{tot} событий
- ▶ Наблюдается N_{cl} кластеров на величине углового разрешения (отклонения в магнитных полях)
- ▶ Если кластеров мало, значит каждый источник в среднем производит в нашей выборке заметно меньше одного фотона
- ▶ Ограничение на минимальное число источников в видимой области (ГЗК-сфера) $\sim \pi N_{tot}^3 / 3N_{cl}^2$

Дубовский, Тиняков, Ткачев, *Phys.Rev.Lett.* 85 (2000) 1154-1157

- ▶ По данным Auger для $E > 50$ ЭэВ, получаем $n > 10^{-4} \text{ Мрс}^{-3}$ (если источники производят протоны)

Калашев, Птицына, Троицкий, *Phys.Rev.* D86 (2012) 063005

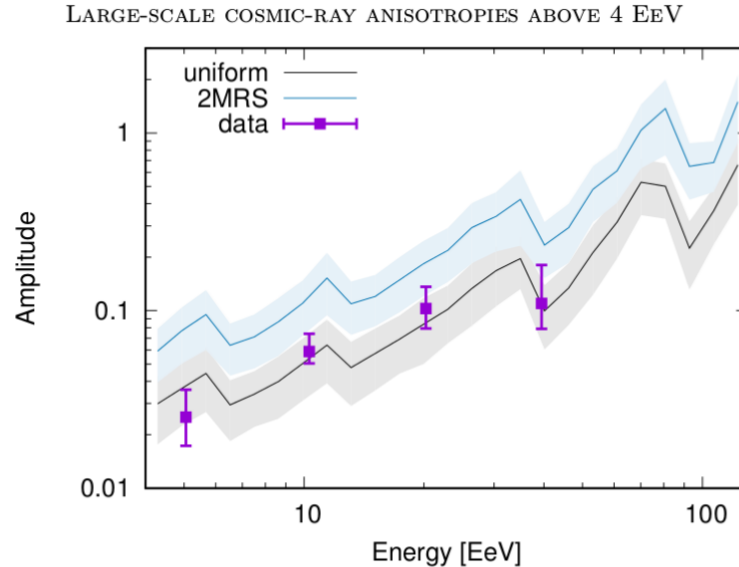
Поиск диполя и квадруполя



di Matteo, Tinyakov, MNRAS 476 (2018) 715

- ▶ В модели источников, повторяющей LSS, предсказан рост диполя и квадруполя с энергией
- ▶ Данные Оже по диполю согласуются с предсказанием
- ▶ Квадруполь не обнаружен: аргумент против чисто протонного состава

Поиск диполя и квадруполя

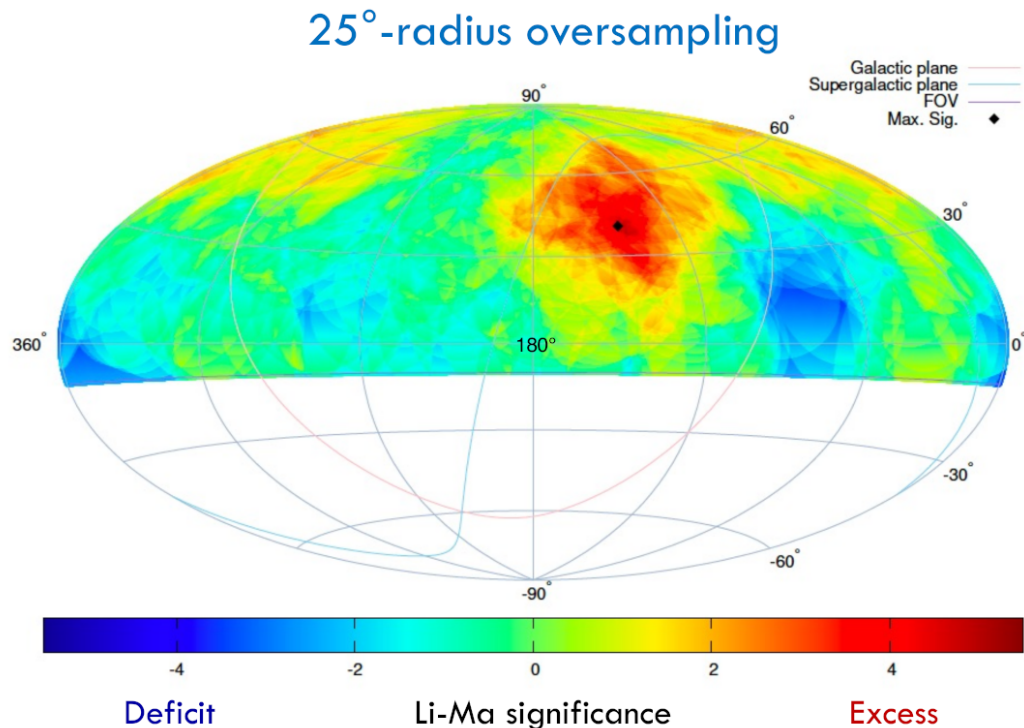


Auger collaboration, ApJ 868 (2018) 4

- ▶ обнаружение диполя 5σ при $E > 8$ ЭэВ
- ▶ согласуется с моделью изотропных источников $\rho = 10^{-4} \text{ Мпк}^{-3}$

Горячее пятно Telescope Array

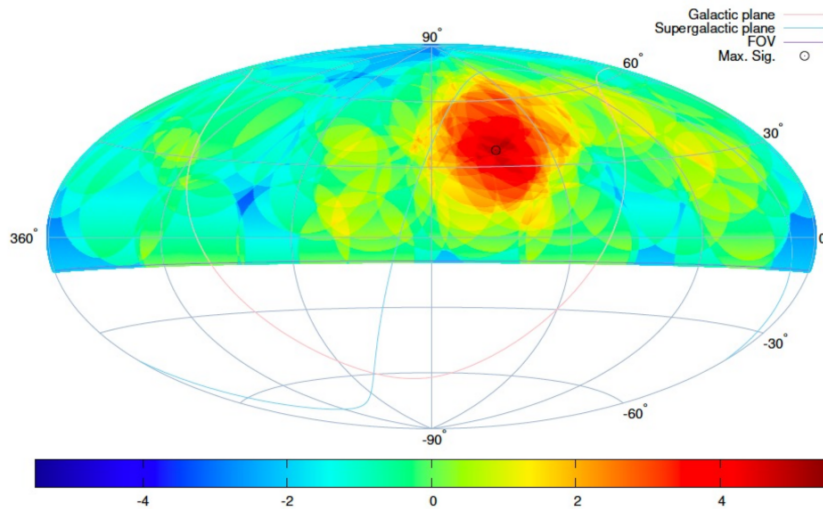
Li-Ma Significance Map with $E \geq 57$ EeV



- 205 events (14-year TA SD data)
- Max local sig.: **5.1 σ** at (144.0°, 40.5°)
 - Obs. : 44 events
 - N_{bg} : 16.9 events
 } ~160% excess
- Post-trial probability:
 - $P(S_{MC} > 5.1\sigma) = 7.4 \times 10^{-4} \rightarrow$ **3.2 σ**

Горячее пятно Telescope Array

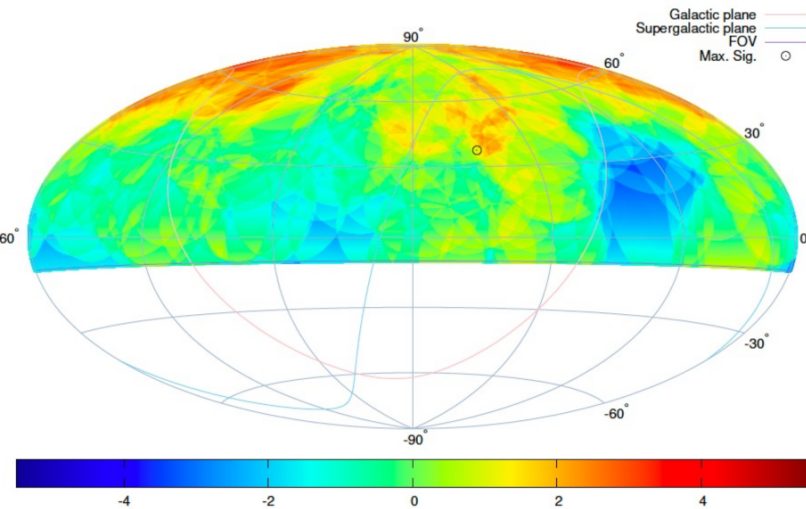
Independent Dataset Analysis



- 72 events (First 5-year)
- **5.0 σ** at (144.0°, 40.5°)

Obs. : 22 events

N_{bg} : 5.2 events



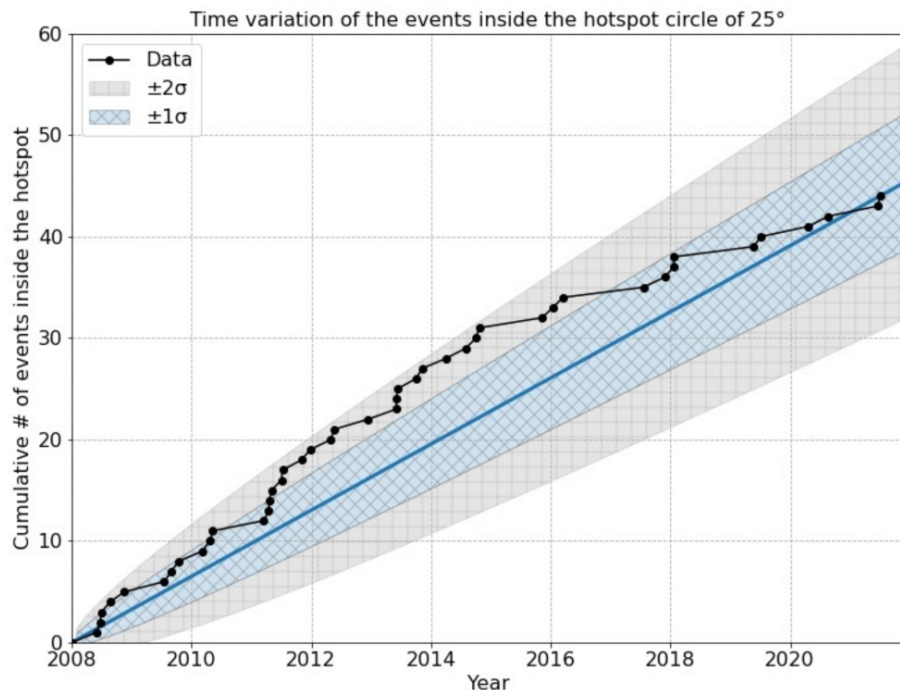
- 133 events (Last 9-year)
- **2.5 σ** at (144.0°, 40.5°)

Obs. : 22 events

N_{bg} : 11.6 events

Горячее пятно Telescope Array

Growth of the Hotspot



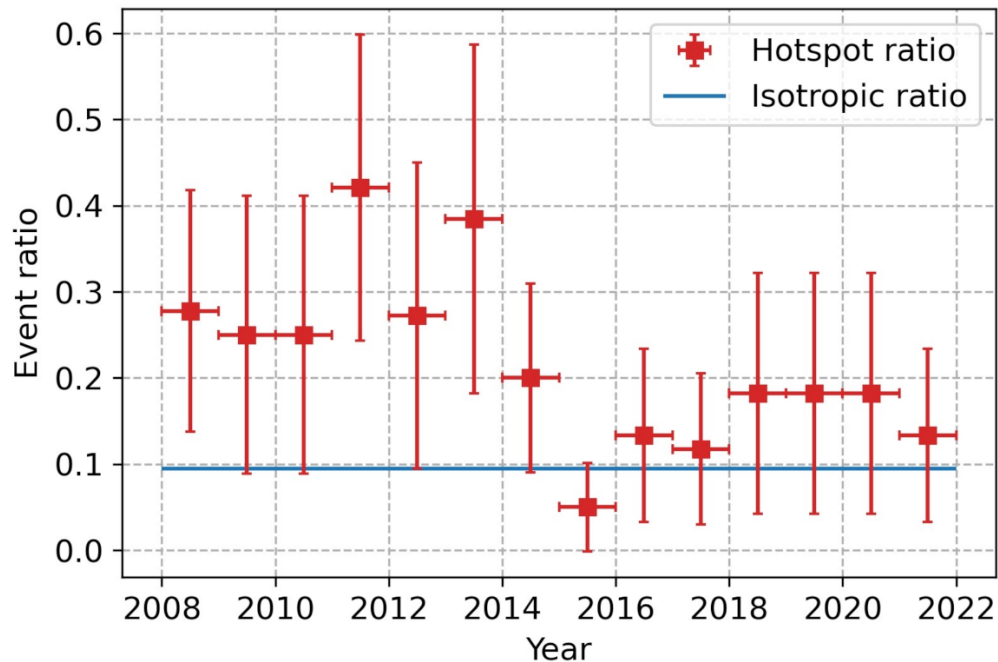
- Black dots: cumulative # of events falling inside the hotspot circle of 25°

- Blue solid line: estimated event rate inside the hotspot

The increase rate of the events inside the hotspot circle is **consistent with the linear increase within $\sim 2\sigma$.**

Горячее пятно Telescope Array

Event Ratio of the Hotspot



Hotspot ratio:

of events inside the hotspot / total # of events

Isotropic ratio (Hotspot aperture):

of isotropic simulation events inside the hotspot / total # of isotropic simulation events (10^5)

(different from the definition of α)

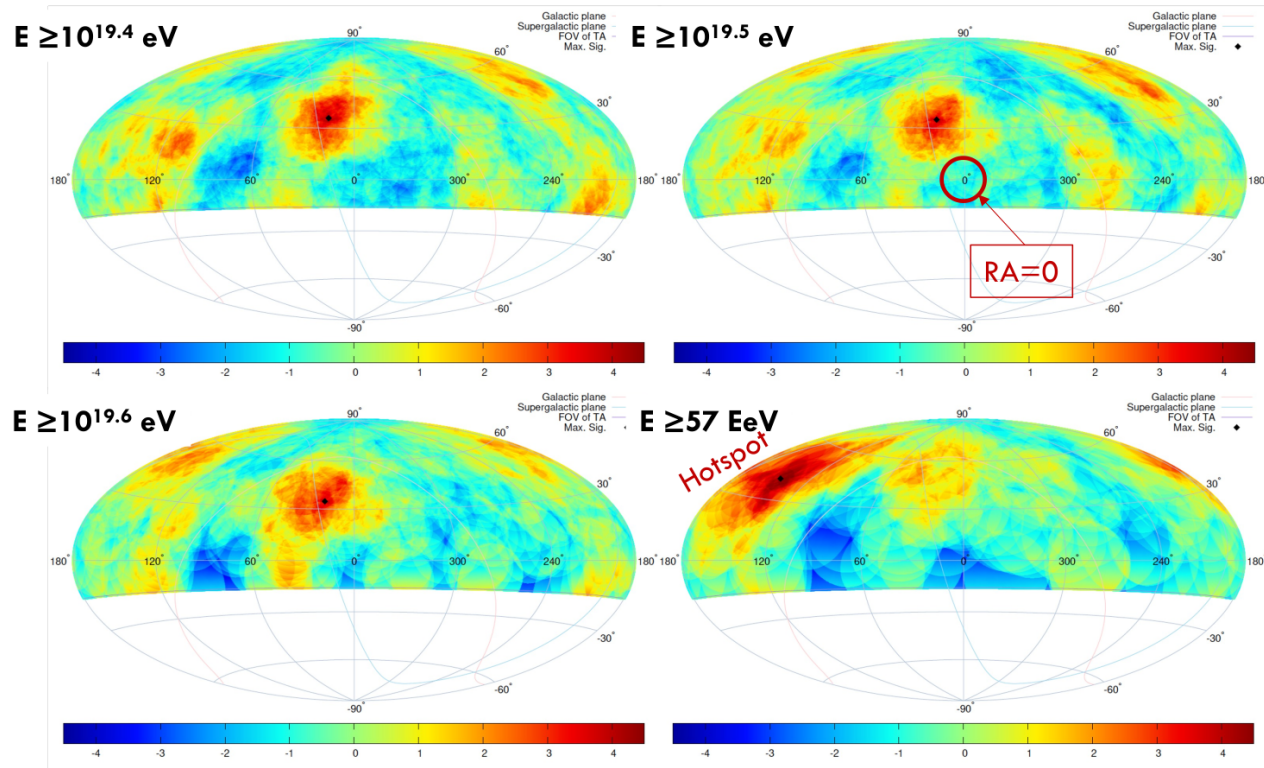
$$\beta = \frac{N_{\text{sim,circle}}}{N_{\text{sim,total}}}$$

$$\alpha = \frac{N_{\text{sim,on}}}{N_{\text{sim,off}}} = \frac{N_{\text{sim,circle}}}{(N_{\text{sim,total}} - N_{\text{sim,circle}})}$$

This plot shows that we observed more events inside the hotspot compared to the isotropic expectation except for one year.

TA: указание на новый избыток

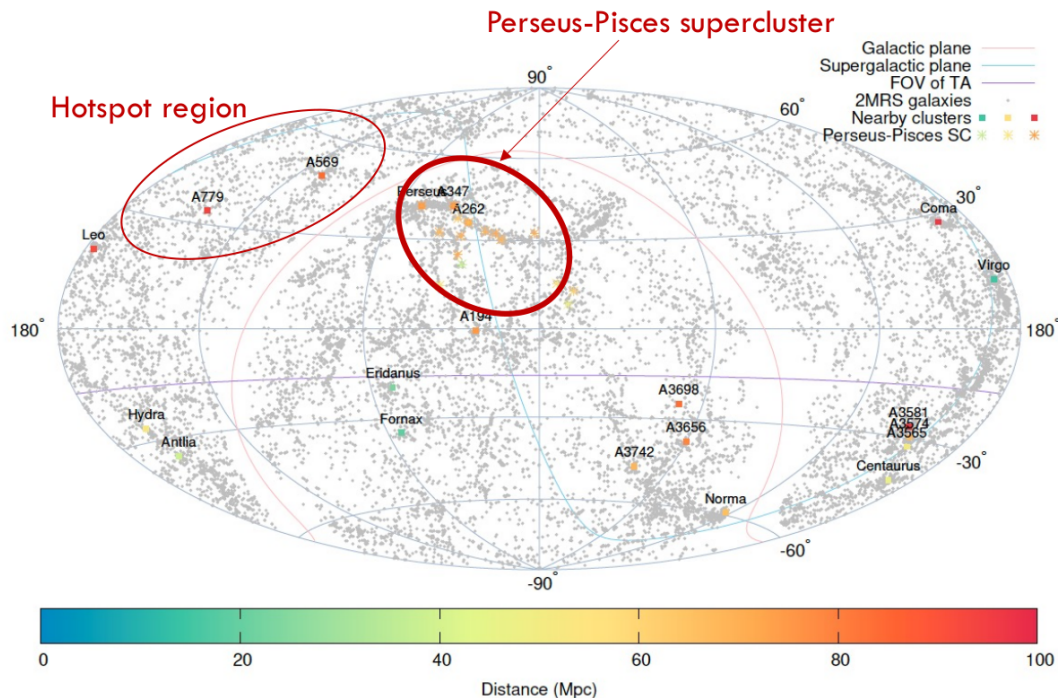
New excess in Slightly Lower Energy Events TA Collab., ICRC2021



- Li-Ma significance map: **excess (red)** / **deficit (blue)** of events compared to isotropy
- Black diamond (◆): the maximum Li-Ma significance position
- Equatorial coords. having RA=0 at center

TA: указание на новый избыток

What is Behind the New Excess?



Sky map with nearby galaxies and clusters of galaxies in equatorial coordinates

- Gray dots (•): nearby galaxies from the 2MASS Redshift Survey catalog
- Colored squares (■): nearby clusters of galaxies
- Colored asterisks (*): representative elements of Perseus-Pisces supercluster

TA: указание на новый избыток

Chance Probability Estimation

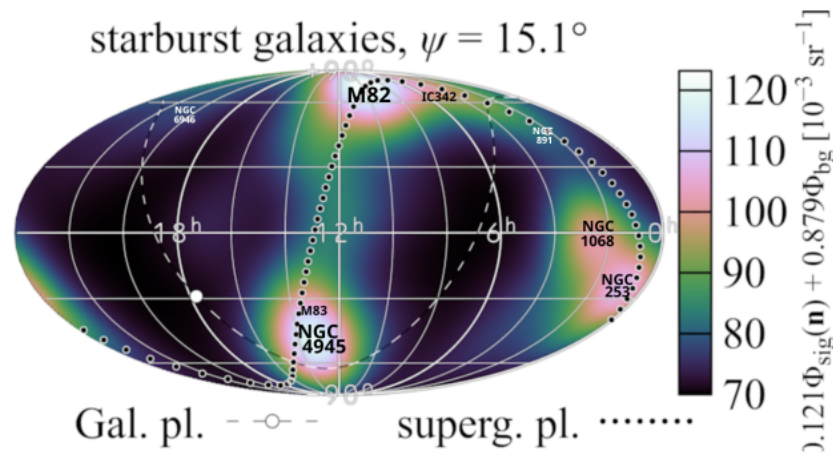
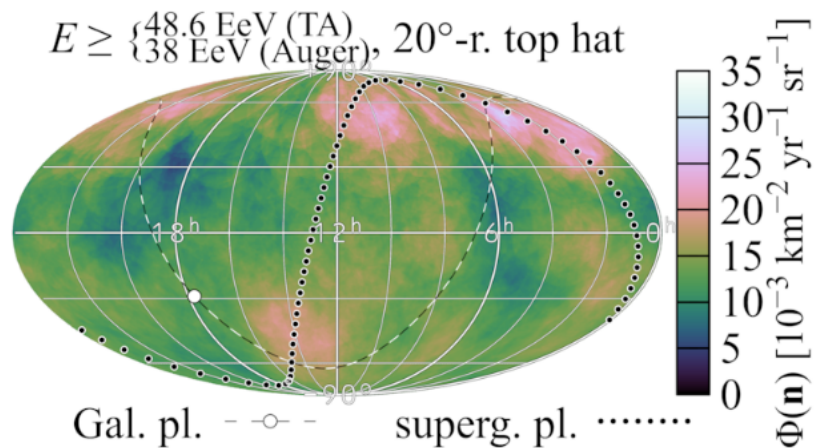
- To quantify how often this happens by chance, we generate many Monte-Carlo event sets, each containing the same number of events as the data, thrown isotropically according to the acceptance of the TA SD.
- We count as **successes** the number of sets where the point of maximum Li-Ma significance is at least as significant as in the data, and also occurs at least as close to the PPSC as in the data: $(S_{mc} \geq S_{obs})$ and $(\theta_{mc} \leq \theta_{obs})$.
- Chance probability of having equal or higher excess on top of the PPSC / major structures {PPSC, Virgo cluster, Coma SC, Leo SC, Hercules SC}

Summary of the Monte-Carlo studies that estimate the chance probability of having an excess

Energy (eV)	Events	Criteria	PPSC	Major structures
$E \geq 10^{19.4}$	1060	$(S_{mc} \geq 3.8\sigma) \& (\theta_{mc} \leq 8.6^\circ)$	3.1σ	2.5σ
$E \geq 10^{19.5}$	685	$(S_{mc} \geq 3.8\sigma) \& (\theta_{mc} \leq 7.4^\circ)$	3.2σ	2.6σ
$E \geq 10^{19.6}$	413	$(S_{mc} \geq 3.5\sigma) \& (\theta_{mc} \leq 6.8^\circ)$	3.0σ	2.4σ

TA-Auger: корреляции с галактиками звздообразования

catalogue	$E_{\min}^{(\text{Auger})}$	$E_{\min}^{(\text{TA})}$	ψ [deg]	f [%]	TS	significance
all galaxies	40 EeV	51 EeV	29^{+11}_{-12}	41^{+29}_{-18}	14.3	$2.7\sigma_{\text{global}}$
starburst	38 EeV	49 EeV	$15.1^{+4.6}_{-3.0}$	$12.1^{+4.5}_{-3.1}$	31.1	$4.6\sigma_{\text{global}}$





Унести с собой (космические лучи)

- Астрономия космических лучей возможна при энергиях выше 60 ЭэВ
- В эксперименте Auger обнаружена дипольная анизотропия направлений прихода КЛ с $E > 8$ ЭэВ
- Обнаружено указание на корреляции направлений прихода КЛ и галактик с интенсивным звездообразованием
- В эксперименте TA обнаружено указание на горячее пятно в окрестности Большой Медведицы



Гравитационные волны

A half century ago, the Russian physicist **Vladimir Braginsky** argued that in gravitational wave detectors, when monitoring an object on which the waves act, one might have to measure motions so small that they could get hidden by quantum fluctuations of the object. Later, in the mid-1970s, Braginsky realized that it should be possible to create quantum nondemolition (QND) technology to circumvent these quantum fluctuations.



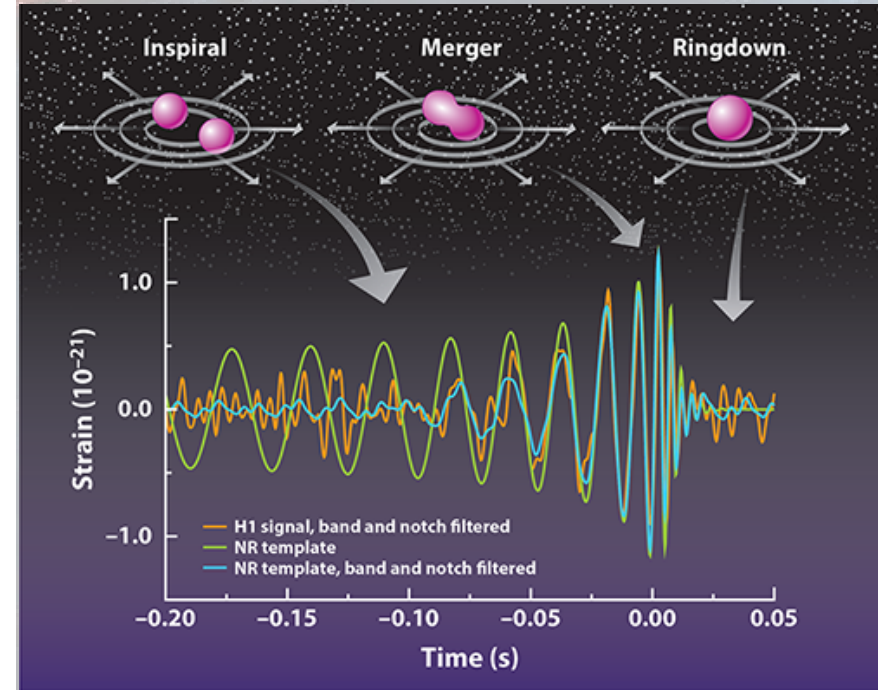
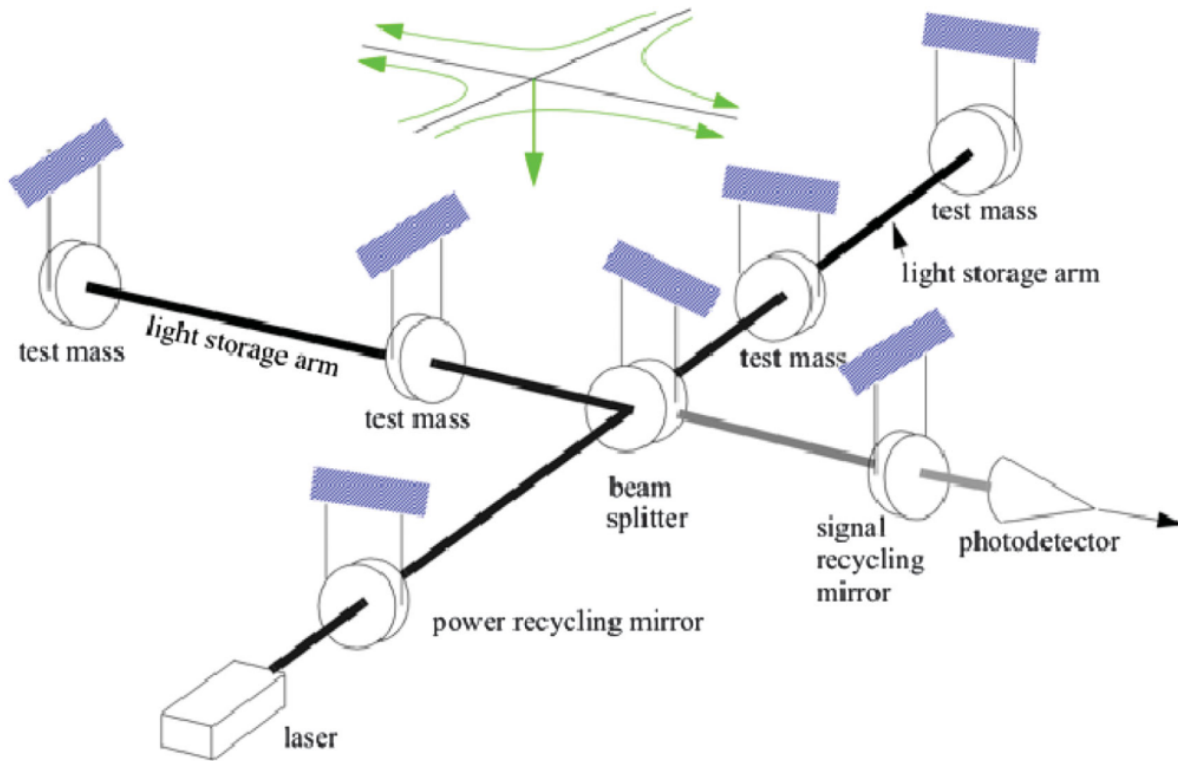
(c)Midjourney 5.2

The idea of using pulsar timing to detect gravitational waves was conceived independently in the late 1970s by **Michael Sazhin** and Steven Detweiler. Currently three radio-astronomy collaborations are attempting to detect gravitational waves using PTAs: the NANOGrav collaboration in North America, the European PTA, and the Parkes PTA (Australia).

Kip Thorne, Nobel lecture, 2017

Схема установки Advanced LIGO

Advanced LIGO Fabry-Perot Michelson Interferometer Schematic



Frans Pretorius, APS

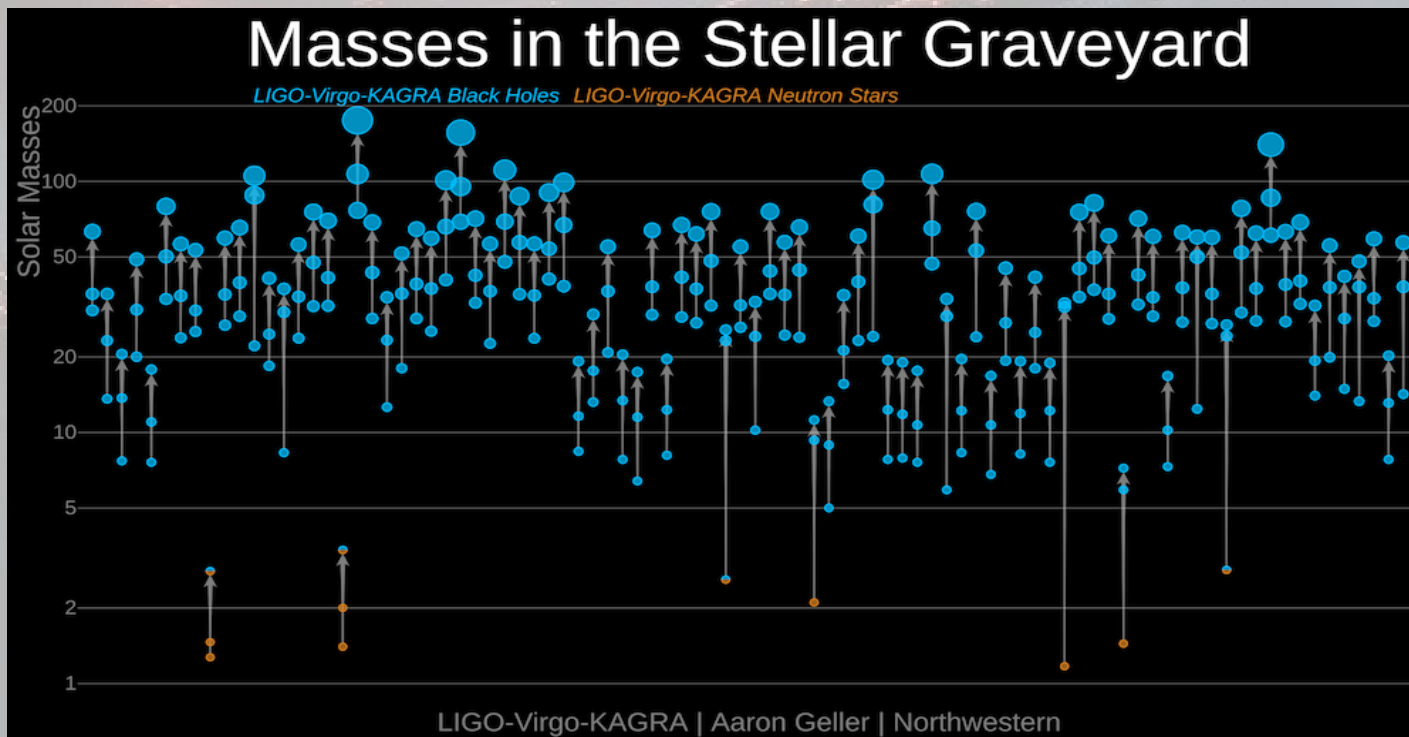
Rainer Weiss, Nobel lecture 2017

Гравитационно-волновая обсерватория LIGO



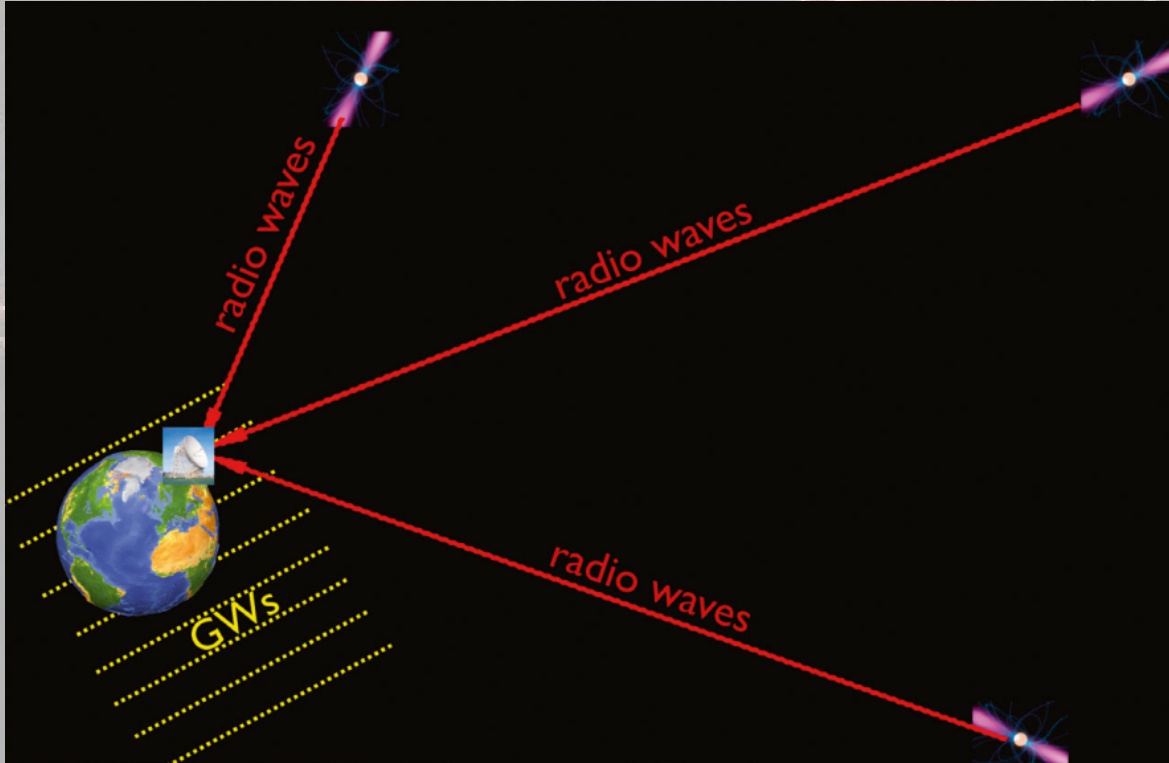
LIGO Collaboration

Совместный результат LIGO-Virgo-KAGRA



- 24 мая 2023 года начался сеанс O4 LIGO (после 3 лет перерыва)
- Статистика наблюдений существенно вырастет

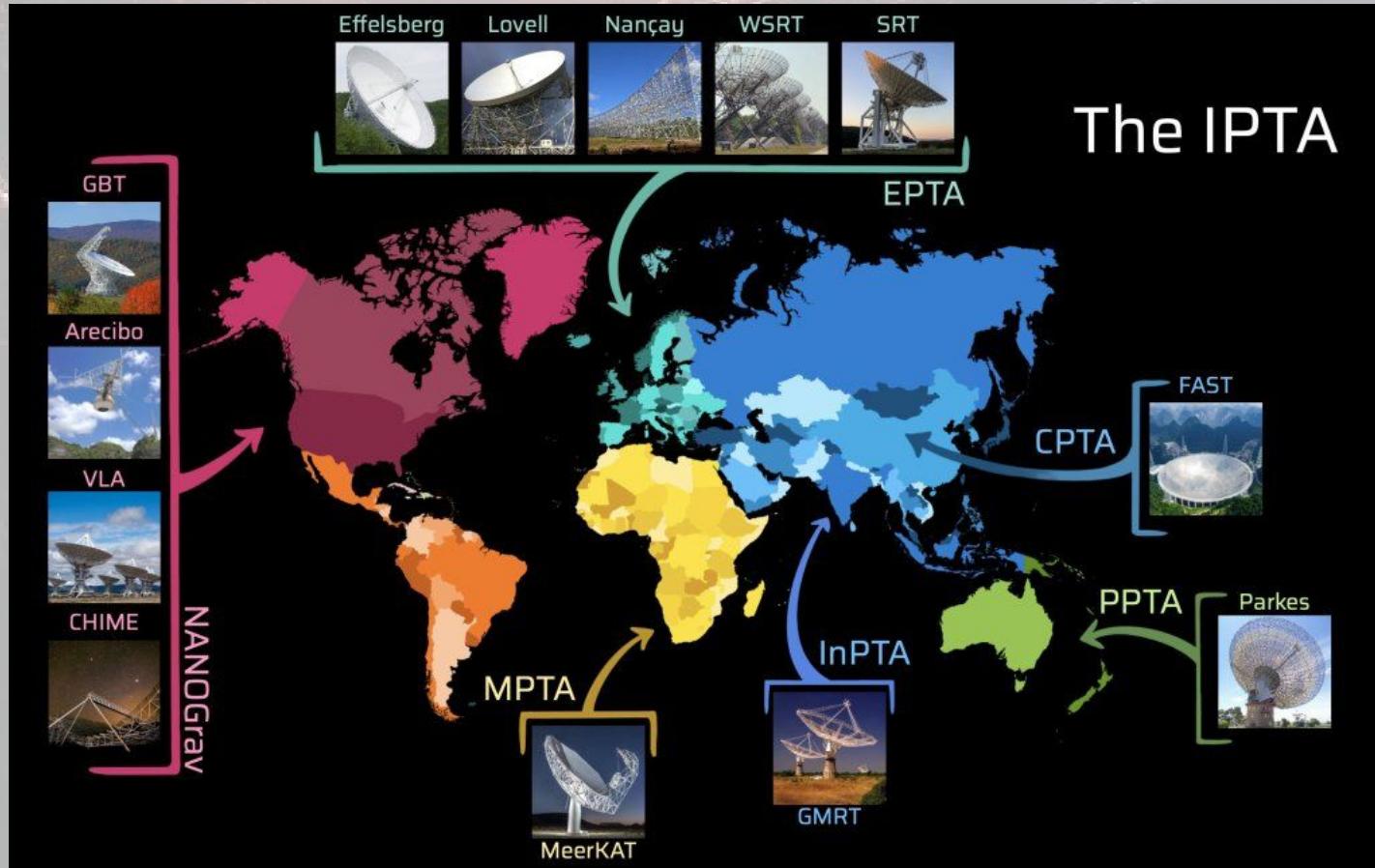
Идея пульсарного тайминга



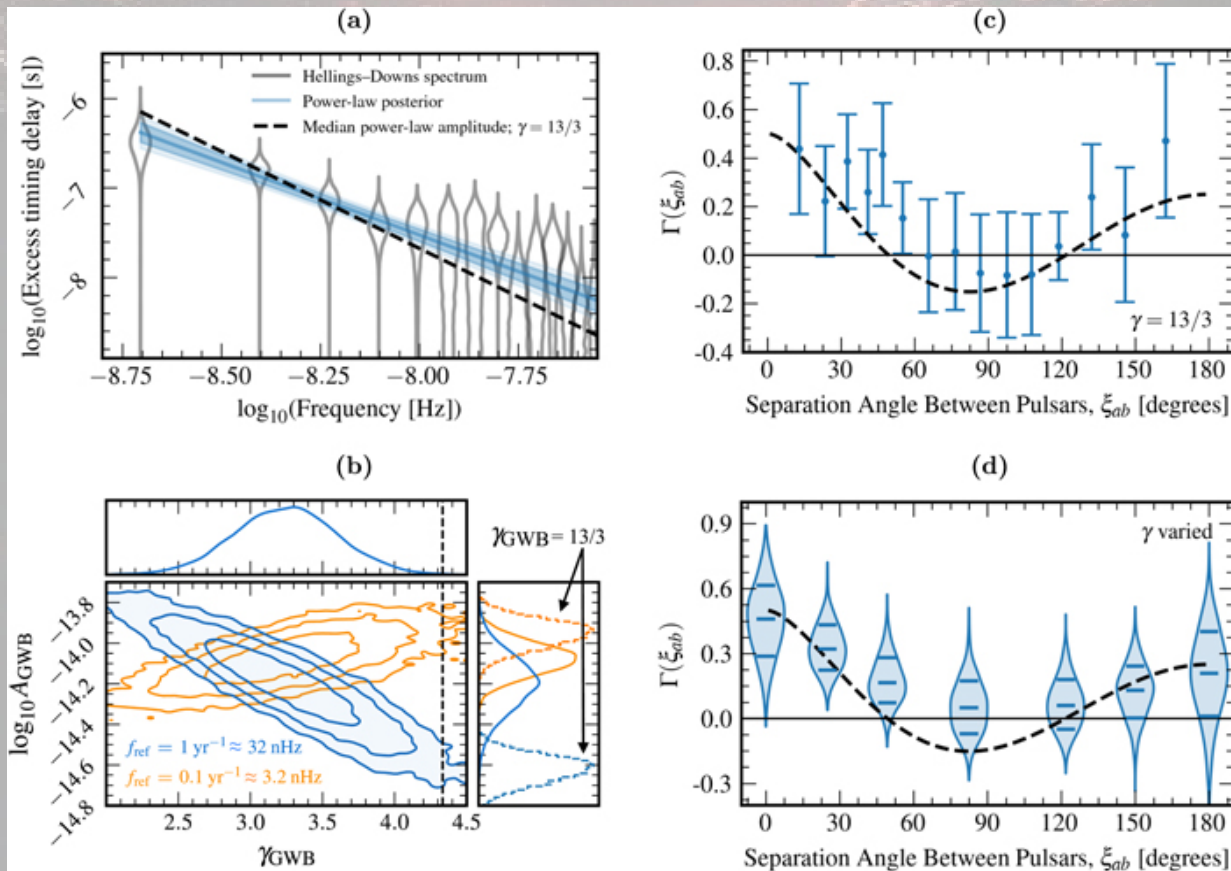
- Времена прихода сигналов от пульсаров модулируются гравитационной волной, проходящей через Землю

International Pulsar Timing collaboration

- IPTA



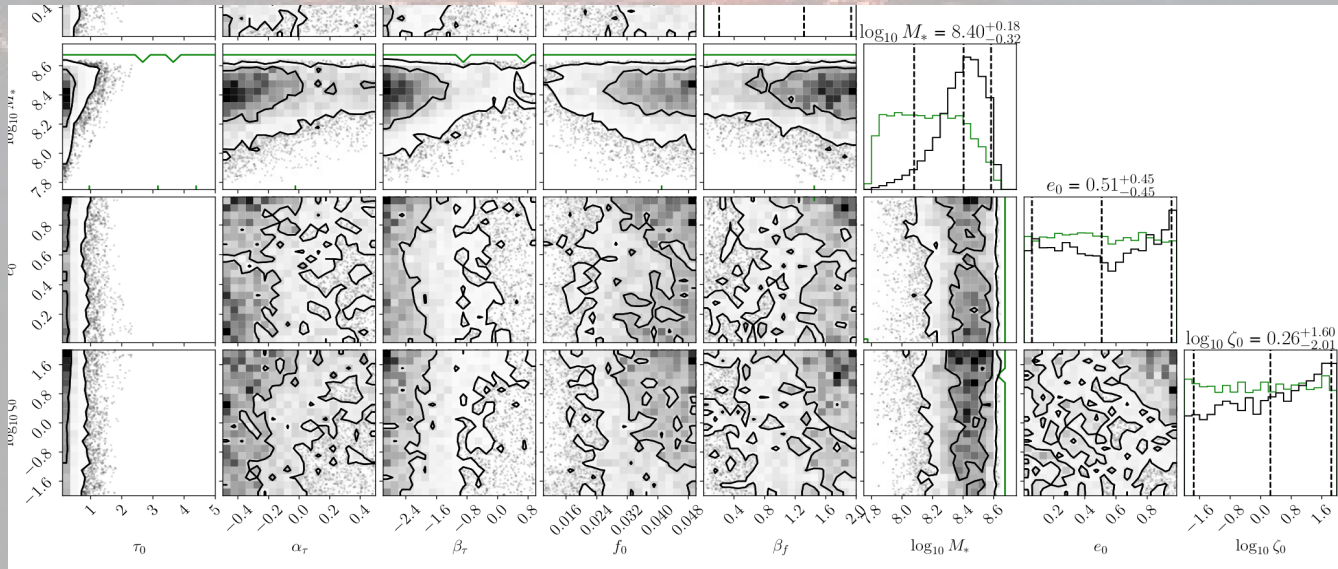
Результат 15 лет наблюдения NANOGrav, анонс 28.06.2023



- Указание на нГц гравитационные волны
- Согласуется с результатами EPTA, RPTA, SPTA, анонсированными в тот же день
- Статистическая значимость на уровне 3σ

Интерпретация результата пульсарных массивов

- Результат коллапса сверхмассивных черных дыр



EPTA collaboration
arXiv:2306.16227

- Новая физика: взаимодействующая темная материя (Ghoshal, Strumia), аксионные струны (Servant, Simakachorn), таящие доменные стенки (Babichev et al.), ...



Унести с собой (грав. волны)

- Зарегистрированы гравитационные волны от слияния нейтронных звезд в двойной системе и слияния черных дыр в двойной системе
- Наблюдались гравитационные волны от короткого гамма-всплеска GRB 170817A / GW170817
- Получено указание на гравитационные волны наногерцового диапазона из тайминга пульсаров

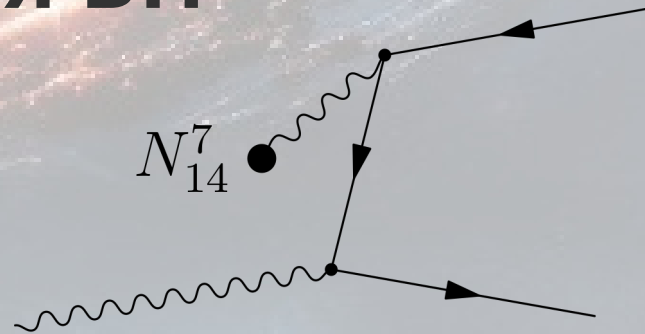
Спасибо за внимание!



Запасные слайды



Модификация сечения ВН

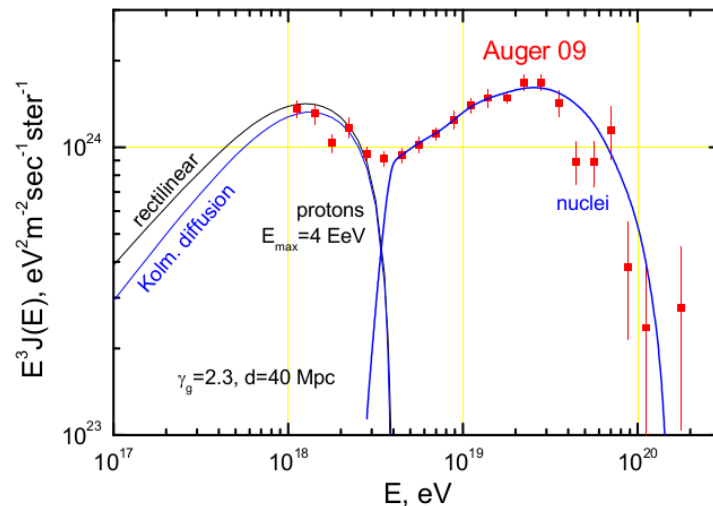
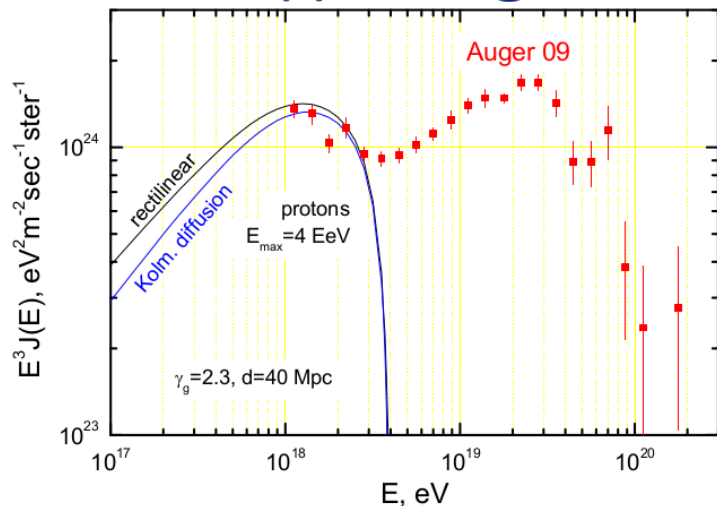


$$\sigma_{\gamma Z \rightarrow Ze^+e^-} = \frac{4Z^2\alpha^3}{3k|\omega_{LV}|} \left[2 \log \frac{1}{\alpha Z^{1/3}} + \frac{1}{2} \log \frac{k|\omega_{LV}|}{m^2} \right] \log \frac{k|\omega_{LV}|}{m^2}. \quad (40)$$

$$\sigma_{\gamma Z \rightarrow Ze^+e^-}^{LI} = \frac{28Z^2\alpha^3}{9m^2} \times \begin{cases} \log \frac{2k}{m} - \frac{109}{42} & \text{no screening} \\ \log \frac{183}{Z^{1/3}} - \frac{1}{42} & \text{with screening} \end{cases}$$

Источники не найдены: обескураживающая модель

The disappointing model



Aloisio, Berezhinsky, Gazizov, Astropart.Phys. 34 (2011) 620-626

- На больших энергиях тяжелый состав: не видно направления на источник
- Невозможно наблюдать космогенные фотоны и нейтрино