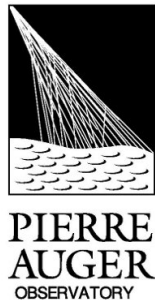
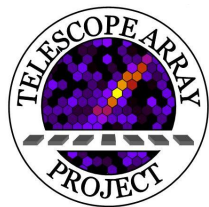


Telescope Array и Pierre Auger Observatory: статус, результаты

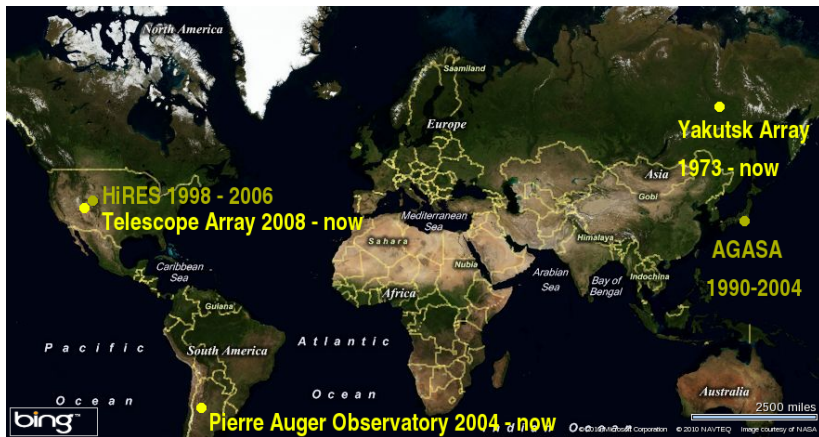
Г.И. Рубцов, И.И. Ткачев



33-я Всероссийская конференция по космическим лучам

Дубна, 13 августа 2014 г.

Эксперименты, регистрирующие космические лучи с энергией выше 10^{18} эВ



Эксперименты по КЛСВЭ ($E \gtrsim 10^{18}$ эВ)

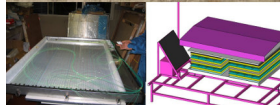
Yakutsk array



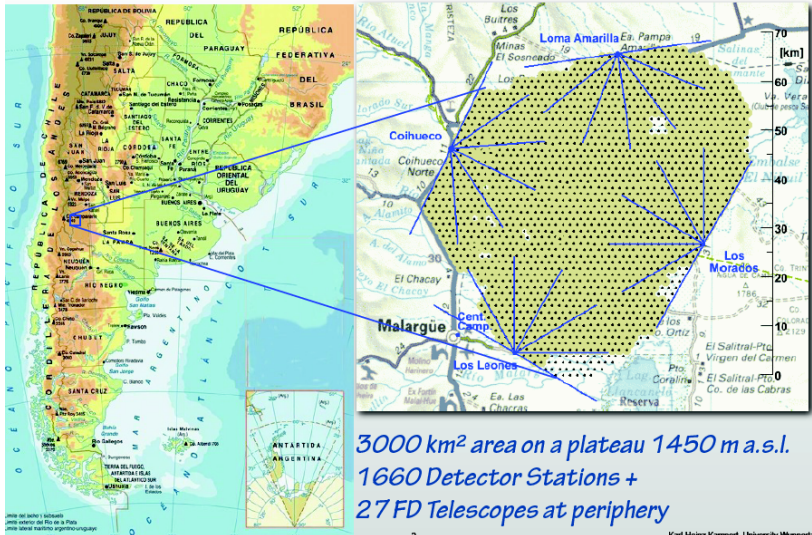
Pierre Auger



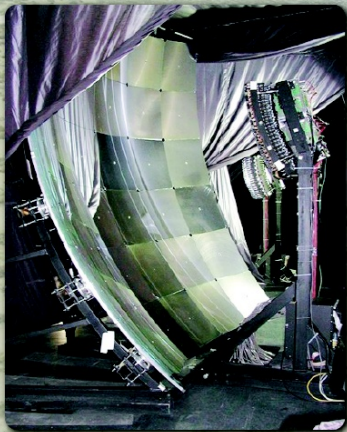
Telescope Array



Pierre Auger Observatory in Argentina



A Telescope and a Water Cherenkov Station

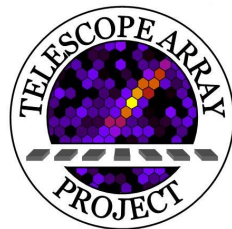
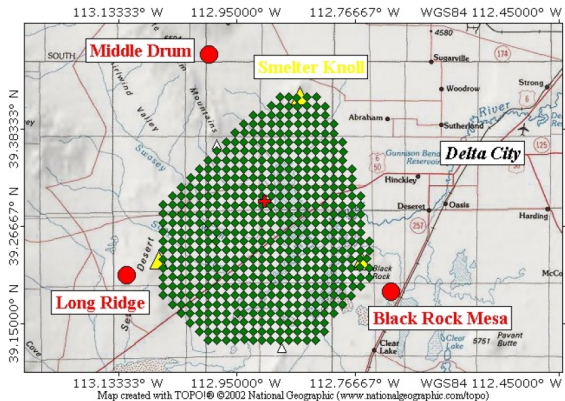


27 fluorescence telescopes...

...1660 Water Cherenkov tanks



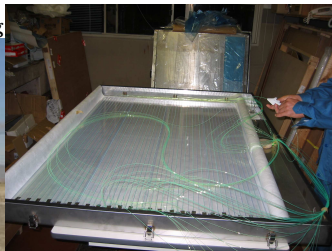
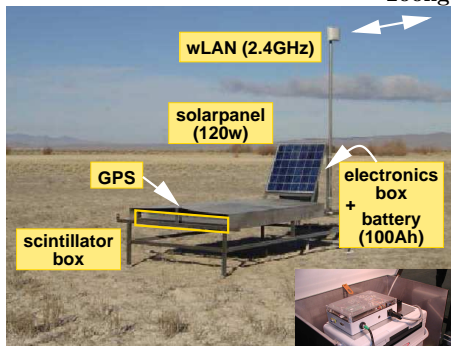
Обсерватория Telescope Array



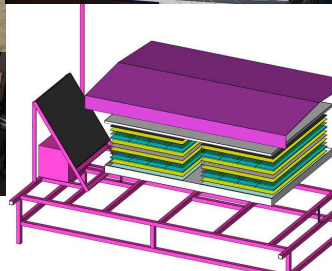
- ▶ Юта, 2 часа на машине от Солт-Лейк-Сити
- ▶ 507 SD, $S = 3m^2$, шаг 1.2 км
- ▶ 3 FD

Детектор наземной решетки ТА

< Surface Detector >



- WLSF: $1.0\text{mm}\phi$
(2cm separation)
- PMTs: ET 9123SA \times 2
- 3m^2 (12mm \times 2 layers)



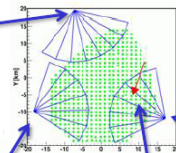
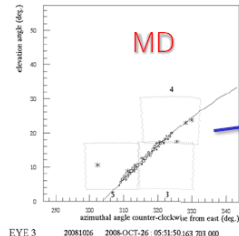
Telescope Array Middle Drum & TALE FD



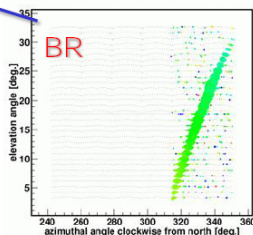
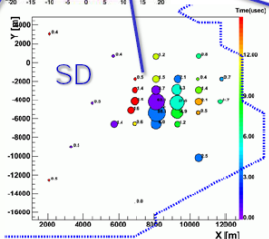
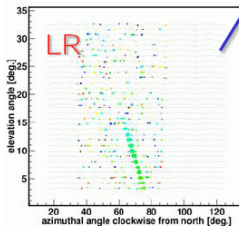
фото Олега Калашева

Пример гибридного события ТА

Triple FD Event (2008-10-26)



	θ [deg]	ϕ [deg]	X[km]	Y[km]
MD mono	51.43	73.76	7.83	-3.10
BR mono	51.50	77.09	7.67	-4.14
Stereo BR&LR	50.21	71.30	8.55	-4.88



I. Auger & TA

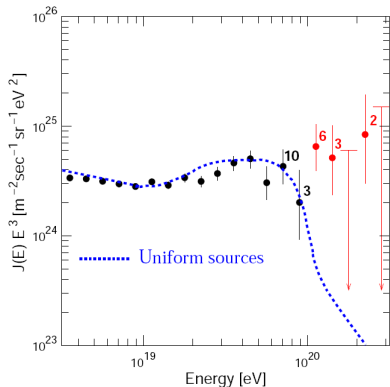
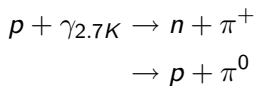
- ▶ Спектр
- ▶ Химический состав
- ▶ Источники

II. Auger + TA

- ▶ Совместные рабочие группы
- ▶ Крупномасштабная анизотропия: все небо (север + юг)

Greisen, 1966; Зацепин, Кузьмин, 1966

Предсказано обрезание спектра при $E \gtrsim 10^{19.7}$ эВ.

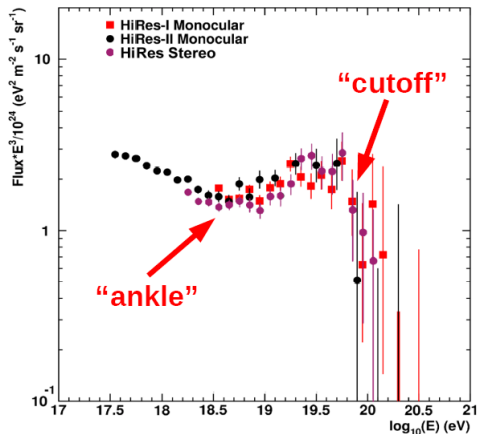


AGASA spectrum, 2003

Takeda, M. et al., Astropart. Phys
19(2003)

- ▶ Ожидается 1.9 событий
- ▶ Наблюдается 11 событий выше 10^{20} eV

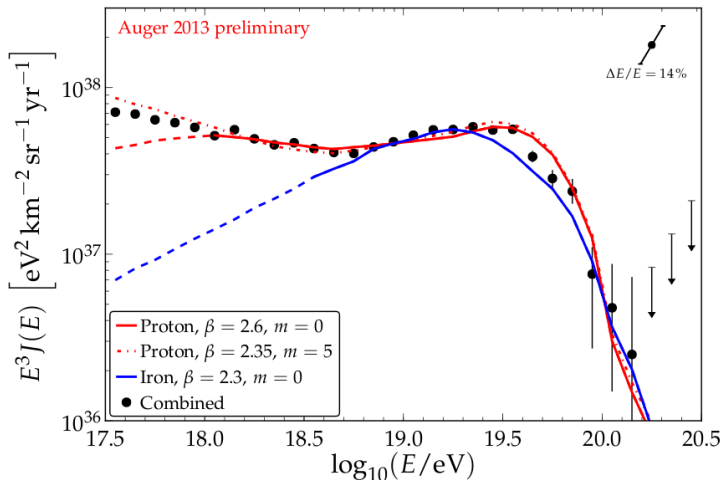
Cut-off observation by HiRES



Monocular: Quarks'06; PRL 100 (2008)

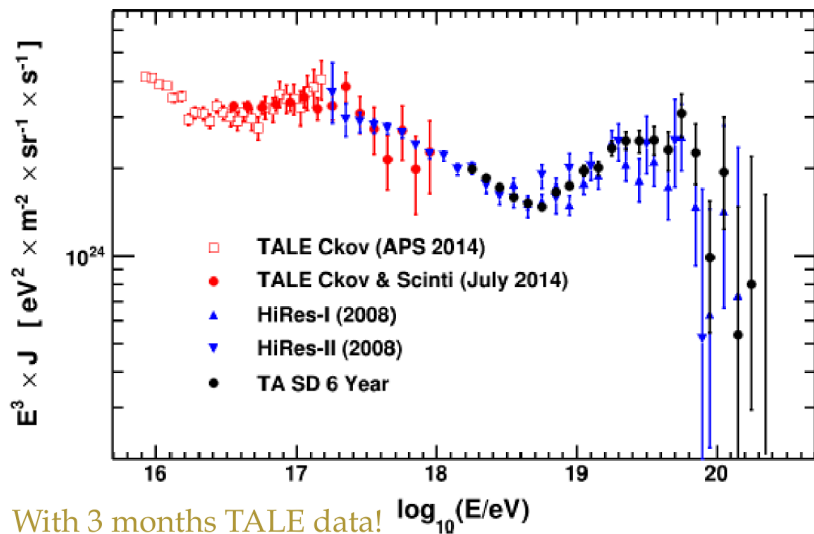
Stereo: Astropart. Phys. 32 (2010)

Спектр Pierre Auger

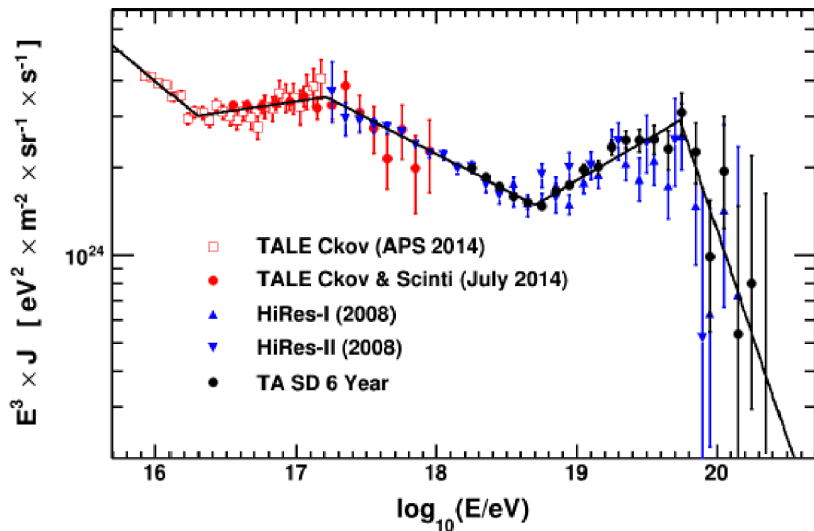


PRL 101 (2008) & Phys. Lett. B 685 (2010) & ICRC'2013

Спектр TA+TALE

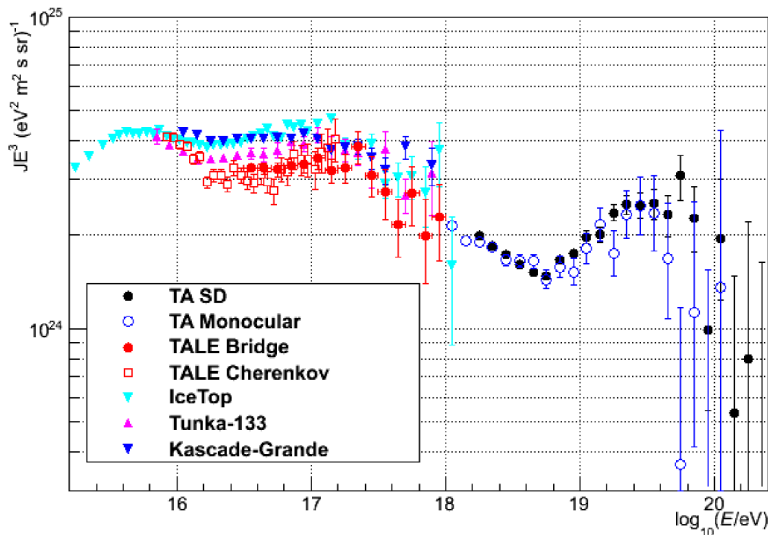


Спектр TA+TALE



Спектр TALE в сравнении с другими экспериментами

TA: SD and Mono Spectra, with TALE Cherenkov and Bridge



Для чего важно знать химический состав?

- ▶ понять физику источников
 - ▶ модели bottom-up: установить механизм ускорения
 - ▶ модели top-down: несовместимы с тяжелыми ядрами
- ▶ предсказать поток космогенных фотонов и нейтрино
- ▶ исследовать сечение взаимодействия при наивысших энергиях
- ▶ наиболее точно проверить Лоренц-инвариантность

Измерения химсостава $\gtrsim 10^{18}$ eV

Обсерватория	детектор	Наблюдаемая
HiRes	fluorescence stereo	X_{MAX}
Pierre Auger	fluorescence + SD (hybrid)	X_{MAX}
Telescope Array	stereo	X_{MAX}
Telescope Array	hybrid	X_{MAX}
Yakutsk	muon	ρ_{μ}
Pierre Auger	SD	X_{MAX}^{μ}
Pierre Auger	SD	risetime asymmetry
Telescope Array	SD	area-over-peak

SD – наземная решетка, X_{MAX} – глубина максимума ШАЛ

X_{MAX}^{μ} – высота рождения мюонов

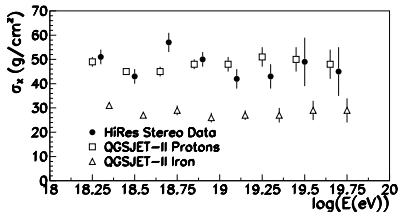
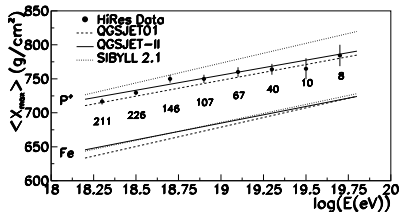
risetime – время нарастания сигнала от 10% до 50%

area-over-peak - отношение интегрального сигнала к пиковой интенсивности

Химический состав по глубине максимума ШАЛ

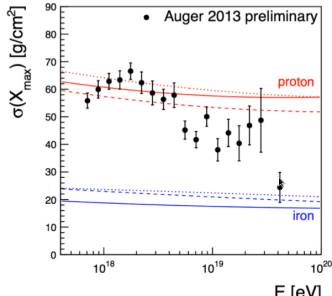
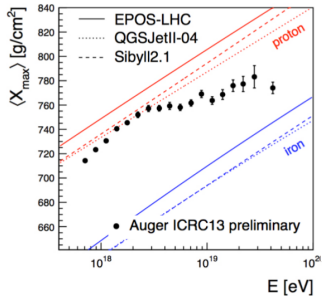
HiRes

Phys.Rev.Lett.104.161101

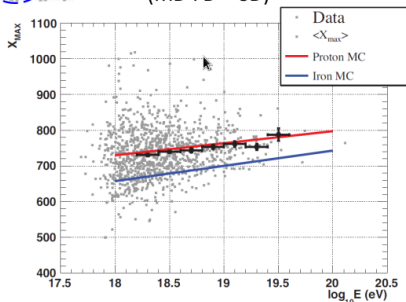
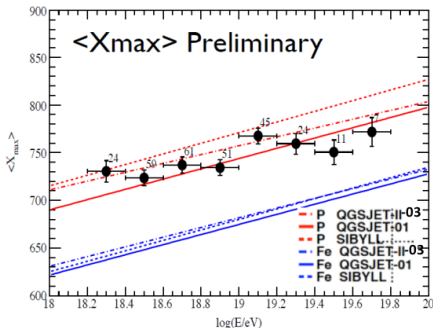
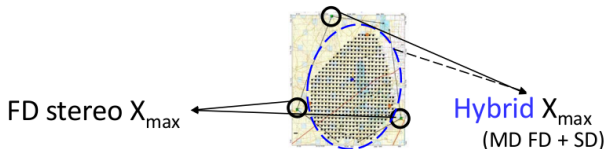


Auger

ICRC'2013; Phys.Rev.Lett.104.091101

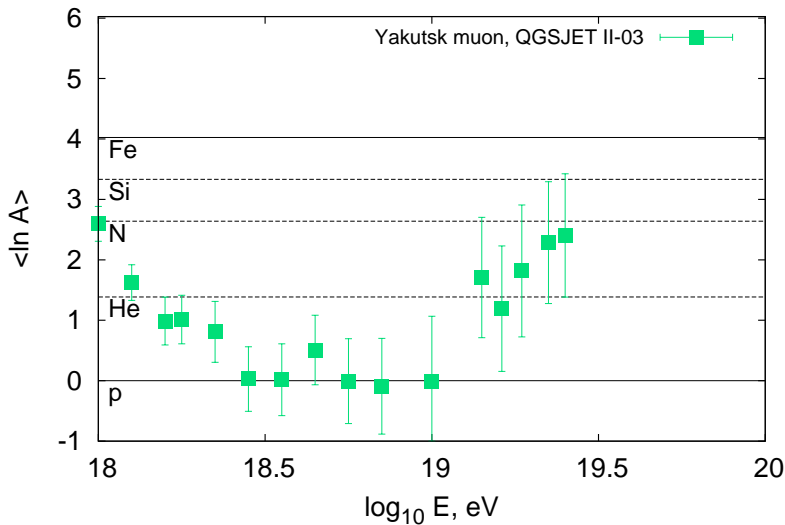


Telescope Array fluorescence stereo & hybrid



[Telescope Array] JPS'2014, ICRC'2013, arXiv:1408.1726

Якутская установка: химический состав по мюонам

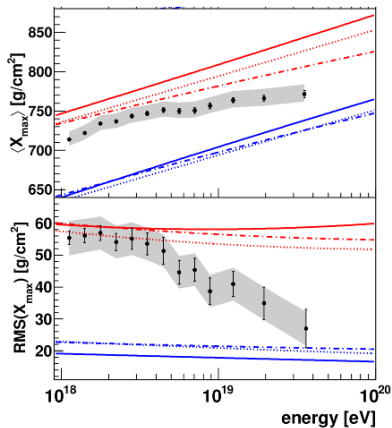
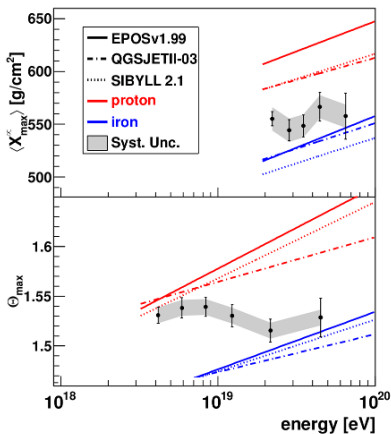


Состав по данным наземной решетки Auger

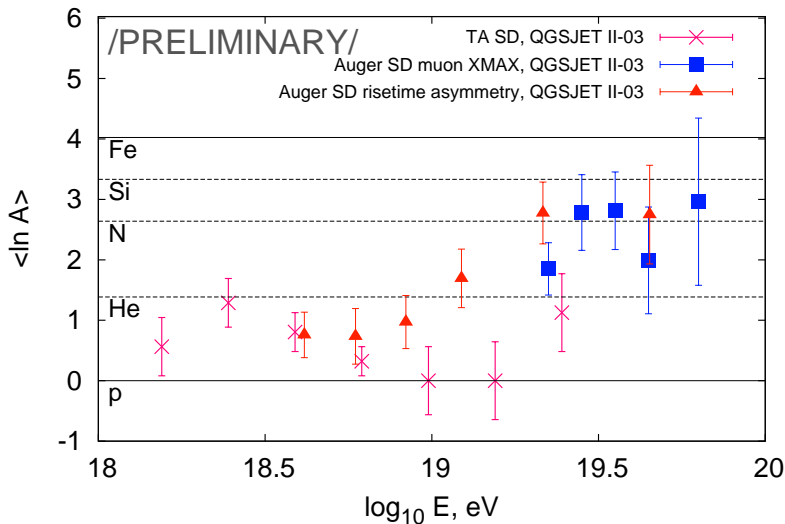
Две SD наблюдаемые, чувствительные к составу:

► высота рождения мюонов

► асимметрия risetime



Состав по данным наземной решетки ТА



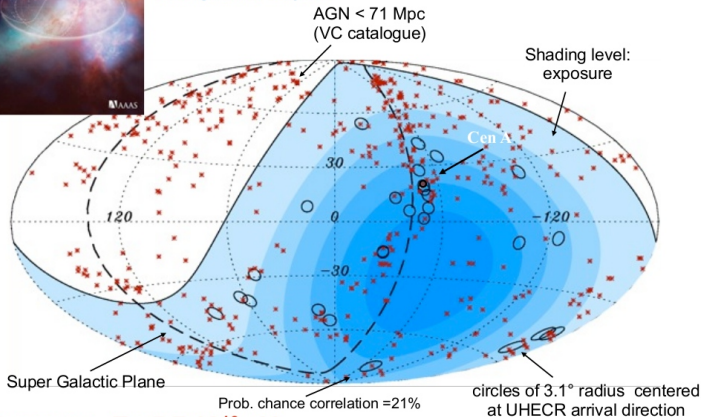
Auger: корреляции с активными ядрами галактик

November 9, 2007



“Correlation of the Highest-Energy Cosmic Rays with Nearby Extragalactic Objects”

Anisotropy of the UHECR sky

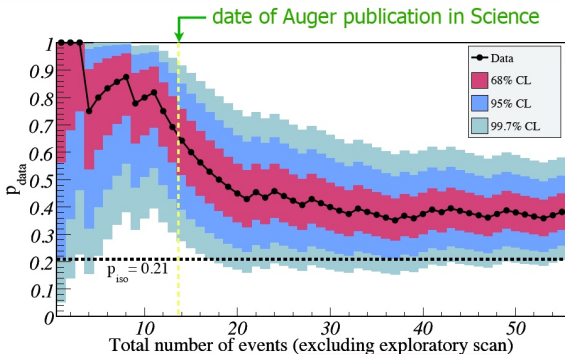


27 events $E > 5.7 \cdot 10^{19}$ eV

Angular resolution < 1°

- ▶ Sources
 - ▶ Véron-Cetty and Véron 12th AGN catalog (2006)
 - ▶ AGN, QSO, BL Lac sections
 - ▶ Cut on redshift $0 < z < 0.018$
- ▶ Cosmic rays
 - ▶ $E > 57 \text{ EeV}$ ($E > 55 \text{ EeV}$ after reconstruction update)
- ▶ Angular scale
 - ▶ $\delta = 3.1^\circ$
- ▶ Signal strength
 - ▶ In the control set, 9 events correlate out of 13, the fraction being $P = 0.69$

Auger: дополнительный набор данных



Auger collaboration, Astroparticle Phys. 34 (2010) 314

Before publication date: 9/13 correlate. Background: 2.7 ± 1.6

After publication date: 12/42 correlate. Background: 8.9 ± 3.0

Total: 21/55, fraction $P = 0.38$

▶ HiRes:

2 из 13, фон 3.2

HiRes collaboration, Astropart.Phys. 30 (2008) 175-179

▶ TA:

11 из 25, фон 5.9

TA collaboration, Astrophys.J. 757 (2012) 26

▶ AGASA + Yakutsk + HiRes-stereo:

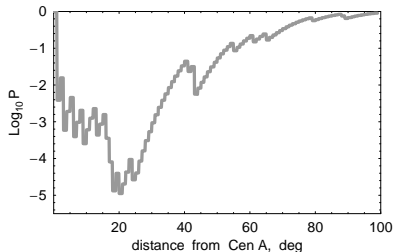
3 из 21, фон 5.0

GR, I. Tkachev, A. Dolgov, JETP Lett. 95 (2012) 501-503

AGNs or Cen A?

Tensions within AGN interpretation:

- ▶ Virgo paucity
- ▶ Chemical composition (Fe or p?)
- ▶ Local AGNs are weak

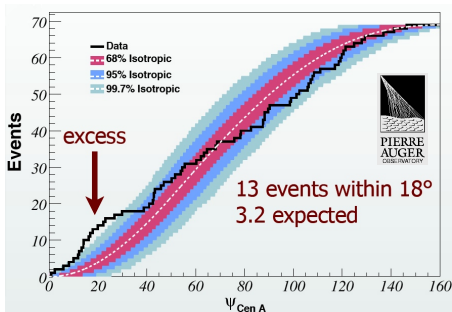


Cen A — alternative explanation for the correlation signal?

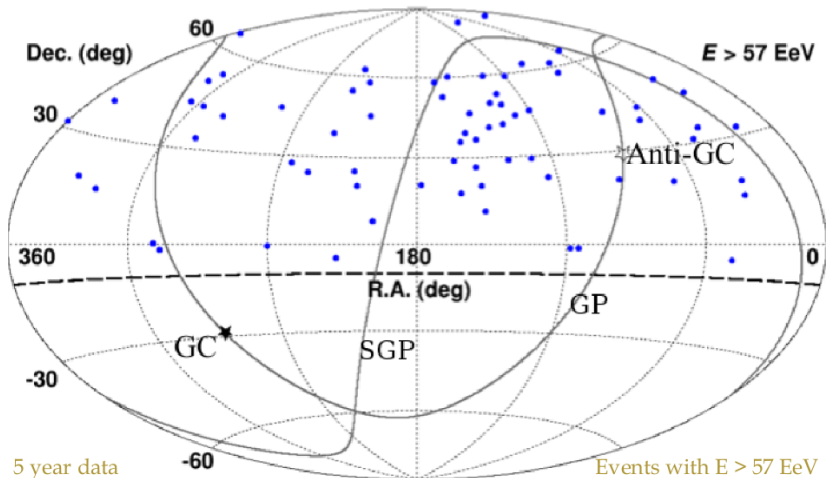
Gorbunov et al, 0711.4060, 0804.1088

Fargion, 0801.0227

- ▶ Cen A is the closest radiogalaxy by chance projected on LSS
- ▶ Is outside of HiRes and TA FOV

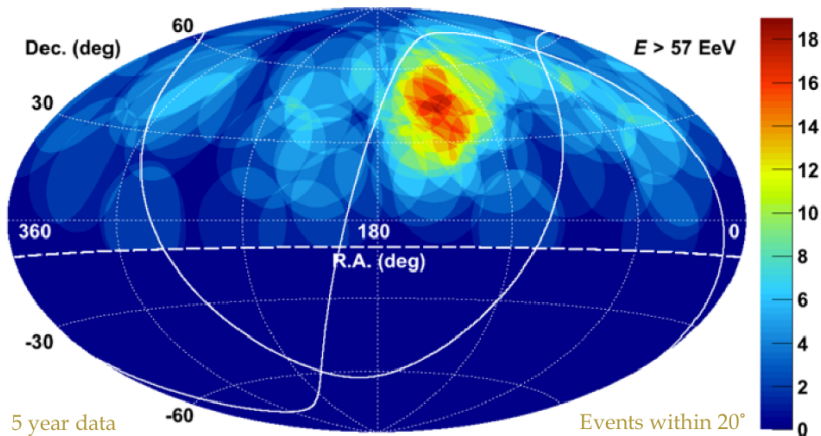


Горячее пятно TA, $E > 57$ ЭэВ



TA, *ApJ* 790 L21 (2014)

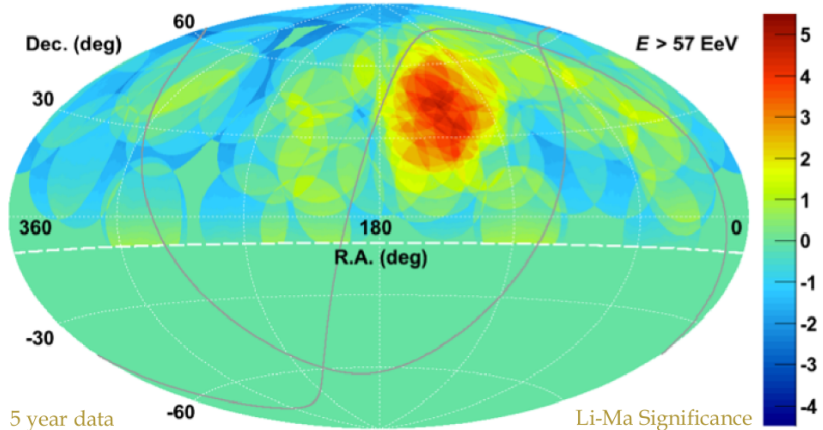
Горячее пятно TA, $E > 57 \text{ ЭэВ}$



TA, *ApJ* 790 L21 (2014)

Ближайший источник может давать значительную долю событий и выглядеть как пятно;
Размер пятна больше, чем ожидаемый для протонов ($2\text{-}3^\circ$)

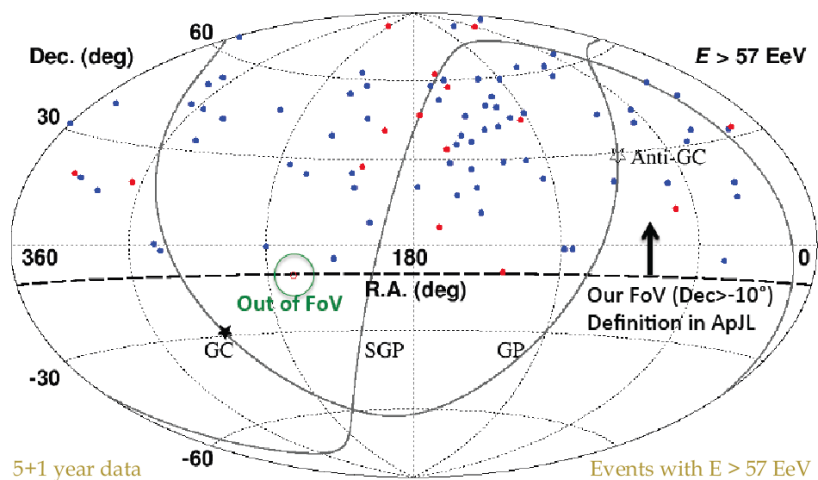
Горячее пятно TA, $E > 57$ ЭэВ



TA, *ApJ* 790 L21 (2014)

19 из 72 событий в круге радиусом 20° , фон: 4.5
значимость после учета look-elsewhere-effect: 3.4σ

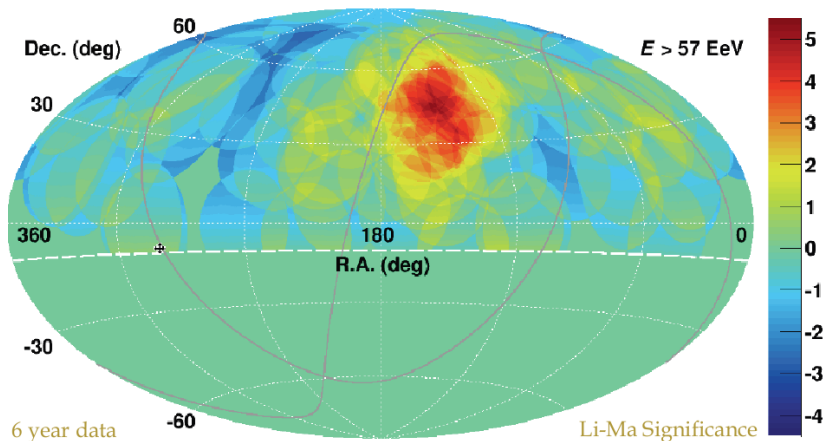
Горячее пятно ТА, 6-й год



D. Bergman, COSPAR'2014

добавилось 15 событий из них 4 в hotspot

Горячее пятно ТА, 6-й год



D. Bergman, COSPAR'2014

значимость выросла с 3.4σ до 4.0σ
возможно, указание на источник и величину магнитных полей
hotspot может отвечать за часть отличия спектров TA-Auger

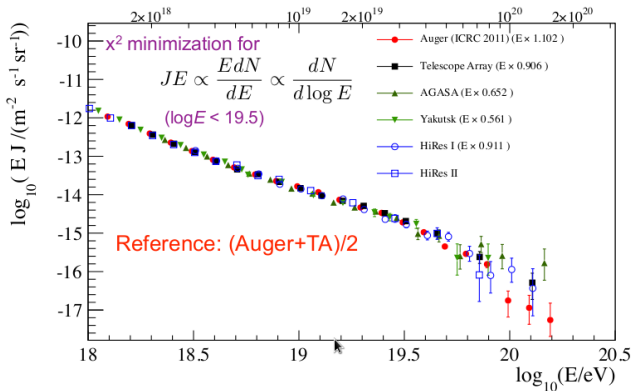
I. Auger & TA

- ▶ Спектр
- ▶ Химический состав
- ▶ Источники

II. Auger + TA

- ▶ Совместные рабочие группы
- ▶ Крупномасштабная анизотропия: все небо (север + юг)

Рабочая группа по спектру. Масштаб энергий

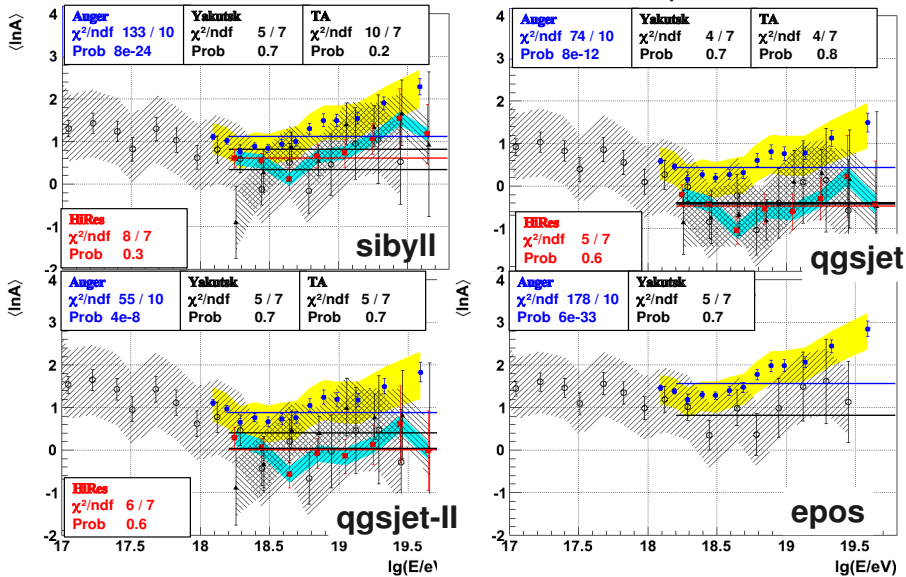


	Auger	TA	HiRes	AGASA	Yakutsk
energy shift	+10%	-9%	-9%	-35%	-44%

Y. Tsunetsada, Spectrum WG, UHECR'2012

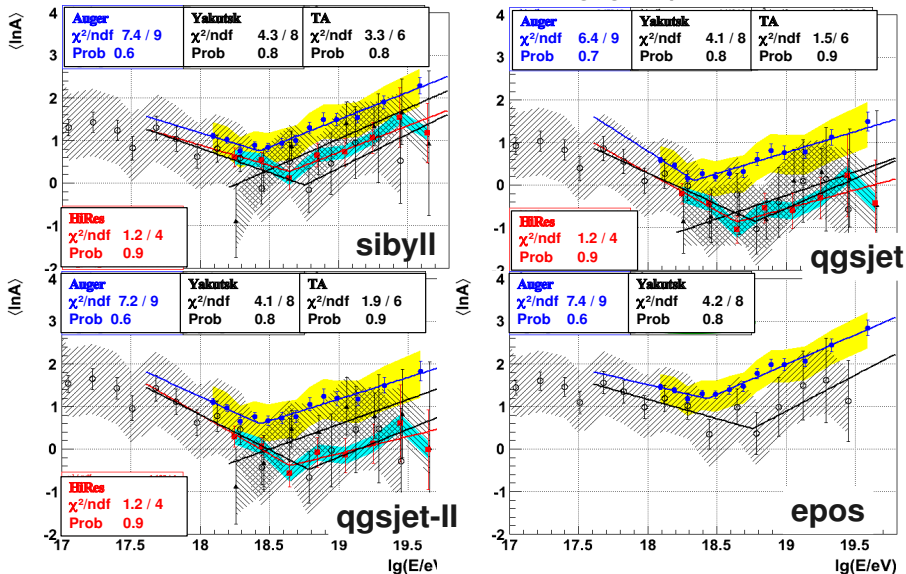
After normalizing the energy scales to half way between TA and Auger spectrums

Are the results consistent with a constant composition?



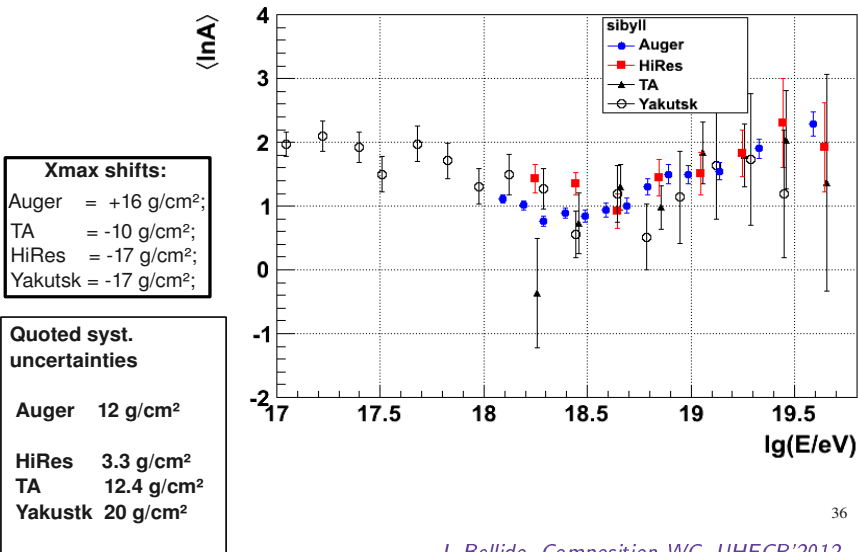
After normalizing the energy scales to half way between TA and Auger spectrums

Are the results consistent with a changing composition?

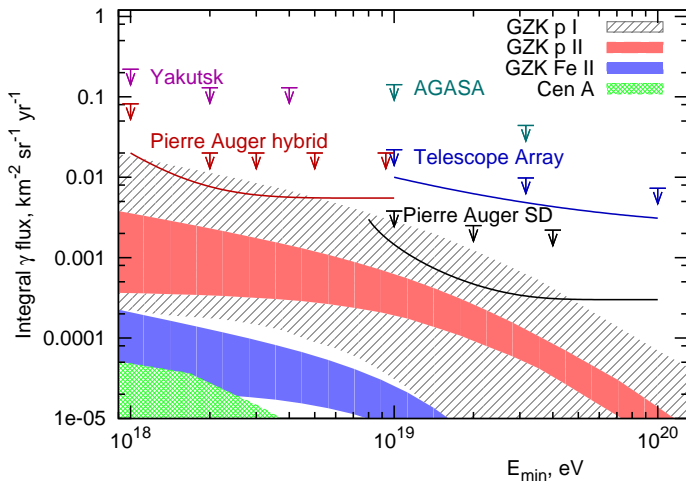


Does a shift in $\langle X_{\max} \rangle$ bring the results to agreement?

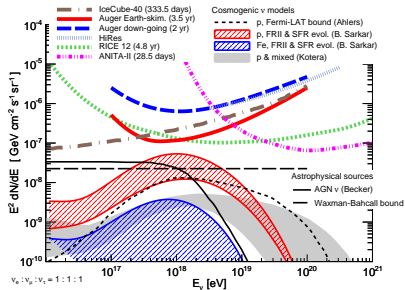
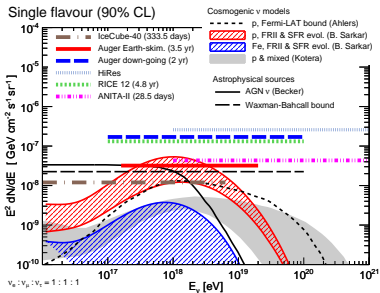
(After normalizing the energy scales to half way between TA and Auger spectrums)



Multimessenger WG: ограничения на фотоны



Multimessenger WG: ограничения на нейтрино

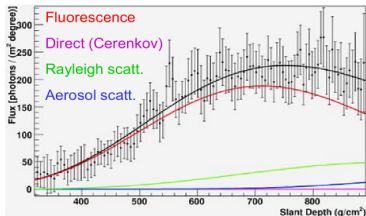


→ event rates (estimated):

ν Model	IceCube-40	Auger (Earth-skim.)	
GZK - p, Fermi-LAT (dashed black line)	~ 0.4	~ 0.6	Poorly constrained
GZK - p, FRIL evolution (top edge red band)	~ 1.8	~ 2.2	Starts to be constrained
AGN (solid black line)	~ 5.5	~ 1.2	Strongly constrained

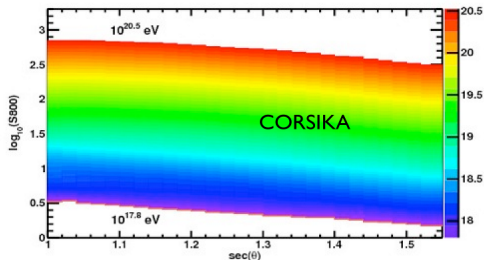
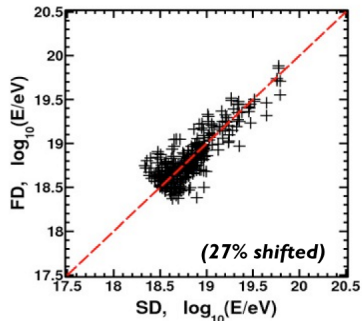
J. Alvarez-Muniz, GR, et al, Multimessenger WG, UHECR'2012

TA: comparison of energy scales



Energy derived
from fluorescence
light profile

→



Simulated SD signal at 800m
used to determine SD energy

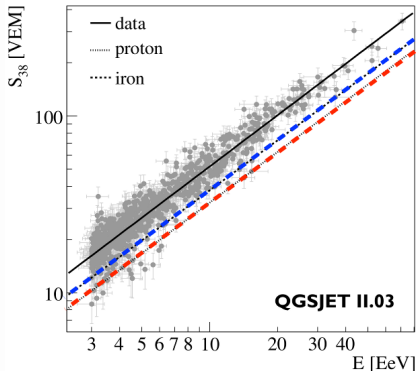
↑

SD energies 27% higher than FD energies (QGSJET II, protons)

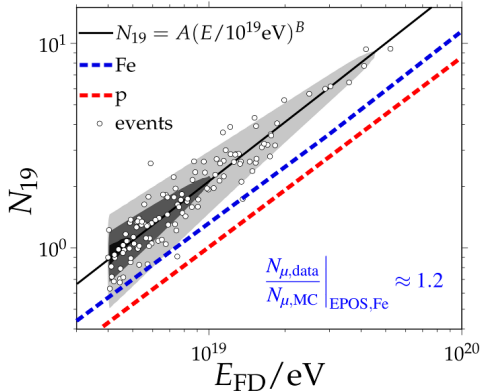
R. Engel, et al, Hadronic interaction WG, UHECR'2012

Auger: comparison of energy scales

Showers up to 60° zenith angle



Inclined showers (muon dominated)

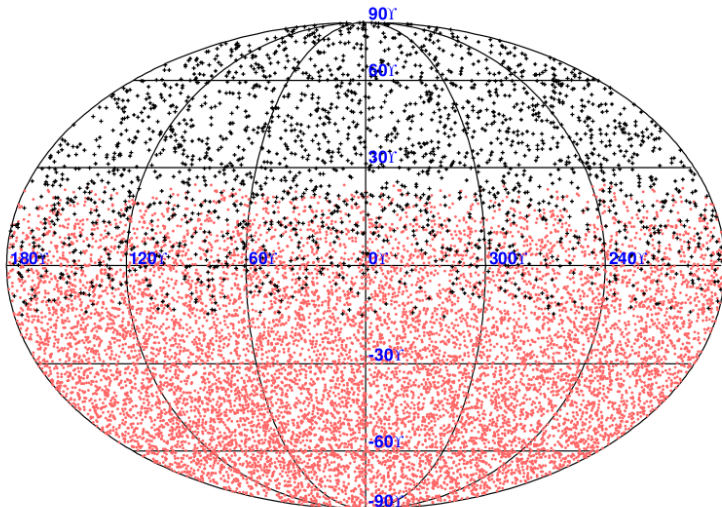


Discrepancy due mainly to muons

$$\frac{N_{\mu,\text{data}}}{N_{\mu,\text{MC}}}\bigg|_{\text{QGS,p}} = 2.13 \pm 0.04(\text{stat}) \pm 0.11(\text{sys})$$

R. Engel, et al, Hadronic interaction WG, UHECR'2012

Рабочая группа по анизотропии: анализ полного неба

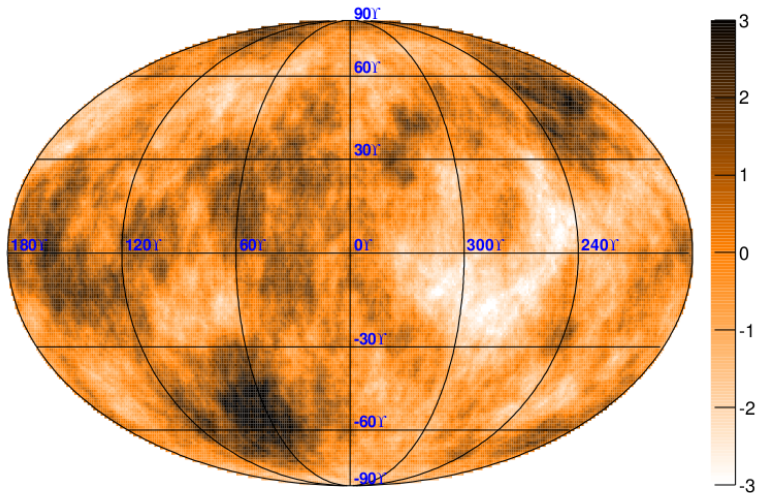


Совместный набор данных Auger+TA, $E > 10^{19}$ эВ
11087 + 2130 событий

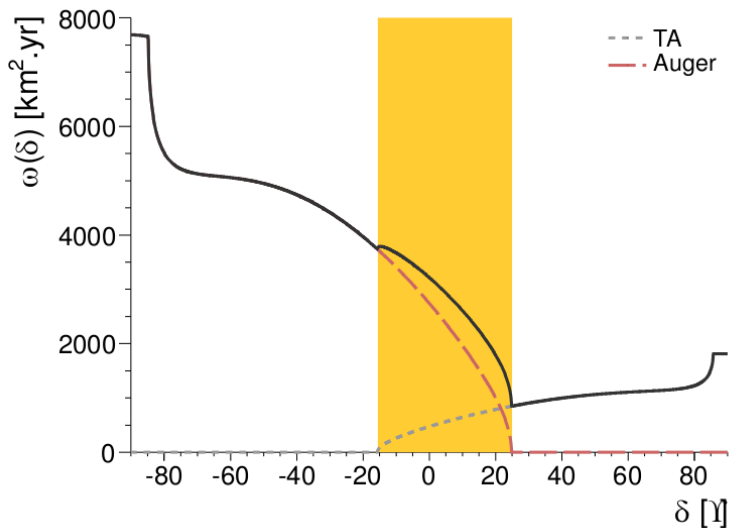
submitted to Astroparticle Physics

Рабочая группа по анизотропии: анализ полного неба

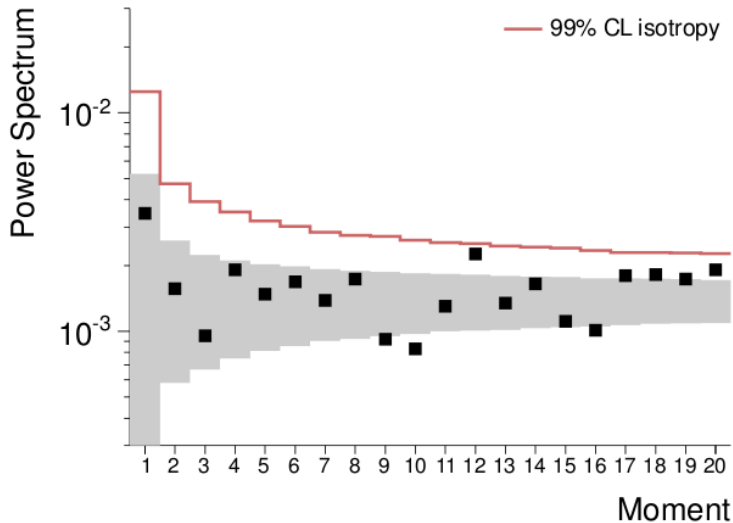
Equatorial Coordinates - 15° smoothing



Карта экспозиции



Рабочая группа по анизотропии: анализ полного неба



Анизотропия не обнаружена


Next: водный бак Оже в центре космических лучей ТА



Дельта, Юта, 23 июня 2014 г.

Заключение

- ▶ Спектр: наблюдается обрезание спектра, совместное с предсказанием Грейзена-Зацепина-Кузьмина
- ▶ Химический состав: отличия TA и Auger сохраняются
- ▶ Источники: есть указания (горячее пятно и Cen A)
- ▶ Auger+TA: анализ анизотропии по данным на всем небе
- ▶ Работа совместных групп продолжается в формате Auger+TA+IceCube+Yakutsk+KASCADE+Tunka, результаты на UHECR 2014 (12-15 октября 2014, Юта)
- ▶ Будущее:
 - ▶ результаты низкоэнергетических расширений HEAT, TALE
 - ▶ мюонные детекторы в Auger и TA
 - ▶ проект расширения TAx4 (+500 SD, шаг 2.08 км)

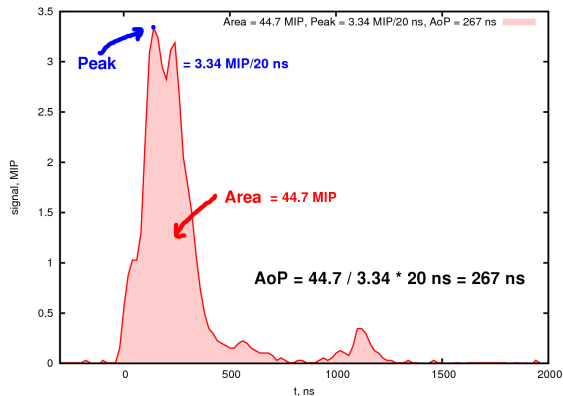


Спасибо за внимание!

Backup slides

Area over peak - new SD observable

- ▶ Consider a surface station time-resolved signal



- ▶ Both peak and area are well-measured and not much affected by fluctuations
- ▶ First introduced by Auger in the context of neutrino search