

Диффузное астрофизическое излучение от 10^{-4} эВ до 10^{+20} эВ и ограничения на новые модели физики элементарных частиц

Г.И. Рубцов

Институт ядерных исследований РАН

*по материалам диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук
01.04.16 — физика атомного ядра и элементарных частиц*

**Семинар отдела “Теория фундаментальных
взаимодействий” Лаборатории теоретической
физики им. Н. Н. Боголюбова ОИЯИ**

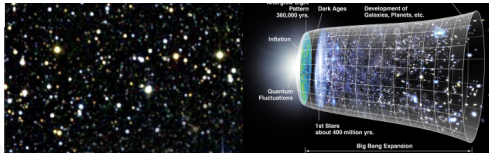
Дубна, 09 июня 2016 г.



Мотивация



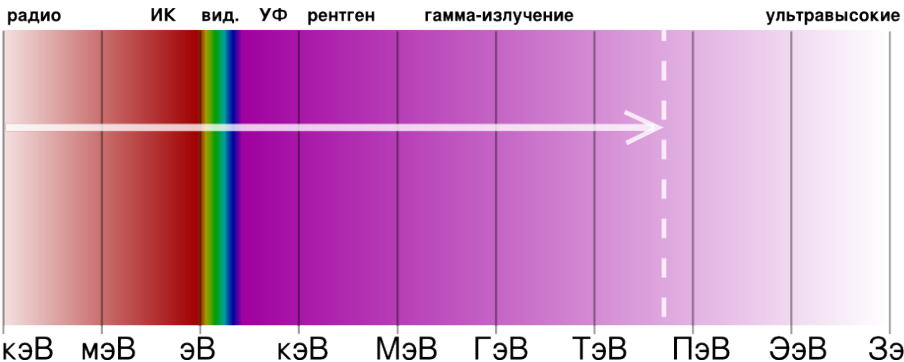
- ▶ Открыта последняя частица Стандартной модели физики частиц — скалярный бозон.
- ▶ СМ остается феноменологически неполной:
 - ▶ масса и осцилляции нейтрино
 - ▶ темная материя
 - ▶ генерация первичных возмущений (кроме Хиггс-инфляции)
 - ▶ барионная асимметрия
 - ▶ ...



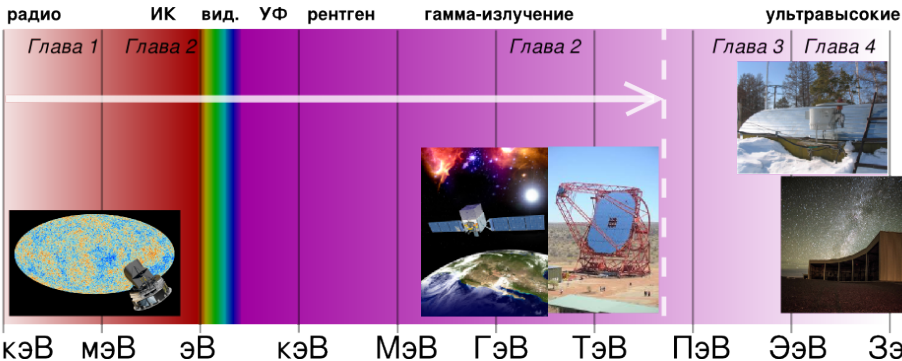


- ▶ Пределы роста для экспериментов физики частиц — размеры Земли, Солнечной системы, солнечная энергия.
- ▶ Новая физика может проявляться во Вселенной на недоступных в лаборатории пространственных и энергетических масштабах.
- ▶ Диффузное излучение может быть непосредственным участником или свидетелем протекающих во Вселенной процессов.

⇒ Интересно искать новые явления, наблюдая Вселенную



Спектр наблюдаемого электромагнитного излучения



Содержание диссертации

- Глава I Ограничения на модели новой физики частиц из наблюдений реликтового излучения *WMAP, Planck*
- Глава II Гамма-излучение блазаров и модели аксионоподобных частиц *Fermi LAT, H.E.S.S., MAGIC, VERITAS*
- Глава III Ограничения на модели происхождения космических лучей ультравысоких энергий по данным Якутской установки
- Глава IV Космическое излучение ультравысоких энергий по данным обсерватории Telescope Array

План доклада

Глава I Реликтовое излучение (РИ)

- ▶ поиск частиц с дробным электрическим зарядом в составе темной материи
- ▶ проверка сценария конформного скатывания, альтернативного инфляции

Глава II Внегалактическое фоновое излучение и гамма-излучение высоких энергий

- ▶ исследование аномального поглощения гамма-излучения и поиск аксионоподобных частиц

Глава III Поиск гамма-излучения ультравысоких энергий на Якутской установке

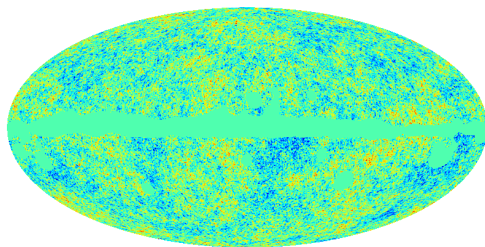
- ▶ ограничения на поток фотонов выше 10^{18} эВ
- ▶ поиск сверхтяжелой темной материи

Глава IV Космическое излучение ультравысоких в обсерватории Telescope Array

- ▶ горячее пятно на карте космических лучей
- ▶ ограничения на поток фотонов выше 10^{19} эВ

Глава I. Реликтовое излучение

- ▶ РИ — диффузное микроволновое космическое излучение, сформированное в эпоху рекомбинации.
- ▶ Спектр близок к спектру абсолютно черного тела с температурой 2.725 К. Температура неоднородна по небу, среднеквадратичное отклонение ~ 0.1 мК.



-0,47E-04 +0,079E-04

*Вселенная в возрасте 380 тыс. лет в объективе
поздней эволюции, 50 Мпикс*

- ▶ Планк, 12 августа 2009 – 23 октября 2013, Европейское космическое агентство
- ▶ Наиболее точное измерение карты температуры РИ
- ▶ Высокая чувствительность до мультиполей $l \sim 2500$

Описание новой физики

- ▶ МЗЧ — гипотетические частицы, несущие электрический заряд $e' = \epsilon e$, $\epsilon \ll 1$
- ▶ Такие частицы могут естественно возникать в моделях со скрытым сектором с калибровочной симметрией $U'(1)$, если темный фотон кинематически связан с обычным фотоном

$$\mathcal{L}_{\text{mix}} = \frac{\epsilon}{2} F'_{\mu\nu} F^{\mu\nu}.$$

Okun 1983, Holdom 1986

- ▶ МЗЧ могут составлять часть холодной темной материи

I.1 Поиск частиц с дробным электрическим зарядом

Как увидеть?

- ▶ МЗЧ рассеиваются на электронах и протонах плазмы эпохи рекомбинации

$$\dot{\theta}_b = -\frac{\dot{a}}{a}\theta_b + c_s^2 k^2 \delta_b + \frac{4\bar{\rho}_\gamma}{3\bar{\rho}_b} a n_e \sigma_T (\theta_\gamma - \theta_b) + a\Gamma_{mcp}\Omega_{mcp}(\theta_{mcp} - \theta_b),$$

$$\dot{\theta}_{mcp} = -\frac{\dot{a}}{a}\theta_{mcp} + c_{s,mcp}^2 k^2 \delta_{mcp} + a\Gamma_{mcp}\Omega_b(\theta_b - \theta_{mcp}),$$

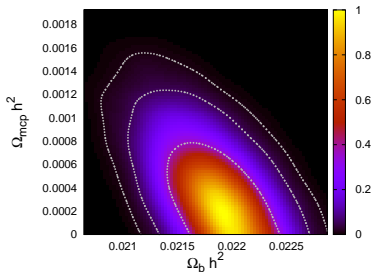
- ▶ При условии сильной связи $\Gamma_{mcp}(\Omega_b + \Omega_{mcp})H^{-1} \gtrsim 250$, МЗЧ до рекомбинации двигаются вместе с “барионной” компонентой плазмы.
- ▶ МЗЧ, в отличие от барионов, не вносят вклад в непрозрачность плазмы в момент рекомбинации, так как комптоновское рассеяние подавлено ϵ^4 .

⇒ **сильнее подавление спектра мощности РИ при больших мультипольных моментах**

I.1 Поиск частиц с дробным электрическим зарядом

Процесс

- ▶ Модельный спектр мощности вычисляется с помощью пакета *SAMB* с учетом модифицированных уравнений
- ▶ Спектр мощности сопоставляется с данными Planck с помощью кода, вычисляющего функцию правдоподобия Планк *plc-1.0*
- ▶ Пространство параметров исследуется методом Монте-Карло марковских цепей с помощью пакета *COSMOMC*



I.1 Поиск частиц с дробным электрическим зарядом

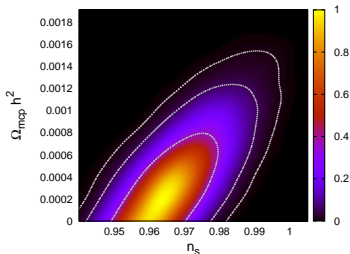
Результаты

- ▶ Получено ограничение на реликтовую плотность МЗЧ. Они составляют не более процента от CDM.

$$\Omega_{\text{мзч}} h^2 < 0.001 \text{ (95\% CL)}$$

Dolgov et al. Phys.Rev.D 88:117701 (2013)

- ▶ Присутствие даже малой доли МЗЧ влияет на оценку наклона спектра скалярных возмущений.



1.2 Проверка сценария конформного скатывания

Описание новой физики

- ▶ Модель конформного скатывания позволяет сгенерировать скалярные возмущения без инфляционного расширения Вселенной *V.A. Rubakov, JCAP 0909 (2009) 030*
- ▶ Теория до Большого взрыва записывается в виде:

$$S = S_{G+M} + S_\phi$$

S_{G+M} - действие гравитации и доминирующей материи,

$$S_\phi = \int d^4x \sqrt{-g} \left[g^{\mu\nu} \partial_\mu \phi^* \partial_\nu \phi + \frac{R}{6} \phi^* \phi + h^2 |\phi|^4 \right]$$

ϕ скатывается вниз по перевернутому потенциалу 4-ой степени от $|\phi| = 0$ до $|\phi| = f_0$, где конформная симметрия нарушается

$\chi = a\phi$

$$S_\chi = \int d^3x d\eta (\eta^{\mu\nu} \partial_\mu \chi^* \partial_\nu \chi + h^2 |\chi|^4)$$

$\eta^{\mu\nu}$ – метрика Минковского, η – конформное время

$$\operatorname{Re} \chi = \chi_c + \delta\chi_1/\sqrt{2}$$

$$\operatorname{Im} \chi = \delta\chi_2/\sqrt{2}$$

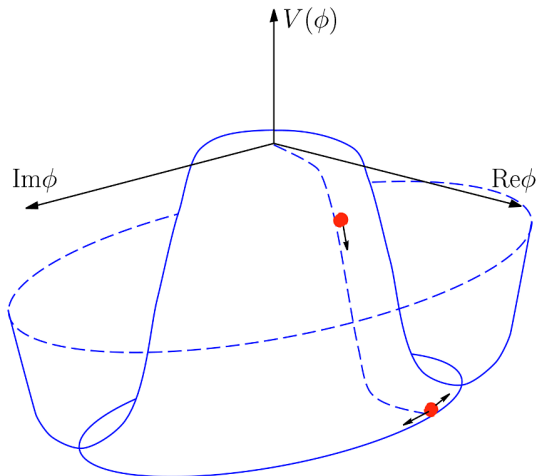
$$\chi_c(\eta) = \frac{1}{h(\eta_* - \eta)}$$

$$\theta \equiv \frac{\sqrt{2} \operatorname{Im} \chi}{\operatorname{Re} \chi} = \frac{\delta\chi_2}{\chi_c}$$

$$\frac{\partial}{\partial \eta} (\chi_c^2 \theta'(\eta)) = 0$$

⇒ эволюция
происходит вдоль
радиального
направления

- ▶ возмущения фазы в будущем должны будут преобразоваться в адиабатические возмущения



Радиальные возмущения

$$(\delta\chi_1)'' - \partial_i\partial_i\delta\chi_1 - 6h^2\chi_c^2\delta\chi_1 = 0$$

$$(\delta\chi_1)'' - \partial_i\partial_i\delta\chi_1 - \frac{6}{(\eta_* - \eta)^2}\delta\chi_1 = 0$$

Накладываем условия на время начала и конца конформного скатывания η_i, η_f :

$$k(\eta_* - \eta_i) \gg 1$$

$$k(\eta_* - \eta_f) \ll 1$$

$$\delta\chi_1^{(-)} = \frac{1}{4\pi} \sqrt{\frac{(\eta_* - \eta)}{2}} H_{5/2}^{(1)}[k(\eta_* - \eta)]$$

$$\delta\chi_2^{(-)} = \frac{1}{4\pi} \sqrt{\frac{(\eta_* - \eta)}{2}} H_{3/2}^{(1)}[k(\eta_* - \eta)]$$

В поздние времена $k(\eta_* - \eta) \ll 1$ имеем:

$$\delta\chi_1^{(-)} = \frac{3}{4\pi^{3/2}} \frac{1}{k^{5/2}(\eta_* - \eta)^2}$$

$$\mathcal{P}_{\chi_1} = \frac{9}{4\pi^2 k^2 (\eta_* - \eta)^4}$$

Красный спектр

Возмущения фазы

$$(\delta\chi_2)'' - \partial_i\partial_i\delta\chi_2 - 2h^2\chi_c^2\delta\chi_2 = 0$$

$$(\delta\chi_2)'' - \partial_i\partial_i\delta\chi_2 - \frac{2}{(\eta_* - \eta)^2}\delta\chi_2 = 0$$

$$\delta\chi_2^{(-)} = \frac{i}{2\pi^{3/2}} \frac{1}{k^{3/2}(\eta_* - \eta)}$$

$$\mathcal{P}_{\chi_2} = \frac{1}{4\pi^2 (\eta_* - \eta)^2}$$

Плоский спектр

1.2 Проверка сценария конформного скатывания

Как увидеть?

- ▶ Возмущения фазы в будущем превратятся в возмущения плотности
- ▶ Радиальные возмущения $\delta\chi_1$ определяют время завершения скатывания
- ▶ Как следствие, спектр мощности зависит от направления волнового вектора — статистическая анизотропия

$$\langle \zeta(\mathbf{k})\zeta^*(\mathbf{k}') \rangle = \frac{(2\pi)^6}{4\pi k^2} \delta(\mathbf{k} - \mathbf{k}') \frac{\mathcal{P}_\zeta(\mathbf{k})}{k}$$
$$\mathcal{P}_\zeta(\mathbf{k}) = \mathcal{P}_0(k) \left[1 + a(k) \sum_{LM} q_{LM} Y_{LM}(\hat{\mathbf{k}}) \right]$$
$$\hat{\mathbf{k}} \equiv \mathbf{k}/k$$

- ▶ $\{q_{LM}\}$ — параметры статистической анизотропии

1.2 Проверка сценария конформного скатывания

Процесс

- ▶ $\{q_{LM}\}$ в модели — гауссовы случайные величины, определяемые константой самодействия h (сценарий с промежуточной стадией):

$$\langle q_{LM} q_{L'M'}^* \rangle = \delta_{LM'} \delta_{MM'} \frac{3h^2}{\pi} \frac{1}{(L-1)(L+2)}$$

M. Libanov, S. Ramazanov, V. Rubakov, JCAP 1106 (2011) 010

- ▶ Карта температуры РИ — случайное гауссово поле:

$$\hat{C}_{lm|l'm'} \equiv \langle \hat{a}_{lm} \hat{a}_{l'm'}^* \rangle = B_l B_{l'} (C_l \delta_{ll'} \delta_{mm'} + \delta S_{lm|l'm'}(q)) + N_{lm|l'm'}$$

B_l — приборная функция, N — ковариация шума,
 $\delta S_{lm|l'm'}(q)$ — искомый эффект

- ▶ Оценка параметров $\{q_{LM}\}$ — методом наибольшего правдоподобия:

$$P(\hat{a}|\mathbf{q}) = \frac{1}{\sqrt{\det \hat{C}}} \exp\left(-\frac{1}{2} \hat{a}^+ \hat{C}^{-1} \hat{a}\right)$$

1.2 Проверка сценария конформного скатывания

Результаты

Таблица : Ограничения на параметр самодействия в моделях конформного скатывания по данным Planck

Модель	Ограничение
Сценарий без промежуточной стадии (LO)	$h^2 < 3.0$
Сценарий без промежуточной стадии (LO)	$h^2 \ln \frac{H_0}{\Lambda} < 0.52$
Сценарий с промежуточной стадией	$h^2 < 0.0013$
Анизотропная инфляция <i>Watanabe (2009)</i>	$ g_* < 0.026$

GR, Ramazanov Phys. Rev. D 91:043514 (2015)

- ▶ Статистическая анизотропия не найдена, параметры сценария ограничены.
- ▶ *Замечание:* статистическая анизотропия чувствительна к физике на принципиально более ранних, чем рекомбинация, стадиях развития Вселенной.

II. Аномальное поглощение γ -излучения и аксионы

Описание новой физики

- ▶ Гамма-излучение с энергией ТэВ взаимодействует с внегалактическим фоновым излучением, рождая пары e^+e^-
 - ▶ процесс чисто электромагнитный и, как мы думаем, полностью описан
 - ▶ должно наблюдаться смягчение спектра при высоких энергиях
- ▶ Некоторые объекты не демонстрируют ожидаемого смягчения спектра

см., например: H.E.S.S. Nature 440:1018-1021,2006

1. собственный спектр имеет излом вверх
2. ошибка в определении красного смещения (два наложенных объекта)
3. ошибка в модели поглощения на внегалактическом фоне

⇒ **новая физика или астрофизика**

II. Аномальное поглощение γ -излучения и аксионы

Описание новой физики

Несколько различных теоретических моделей:

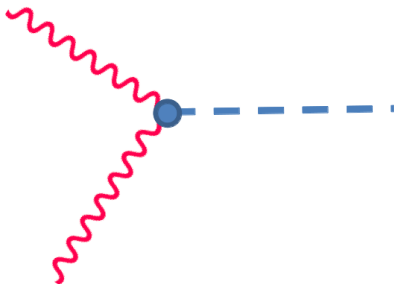
- ▶ Новая физика частиц
 - ▶ Фотоны осциллируют в гипотетические аксионоподобные частицы (ALP)
 - ▶ туда и обратно в межгалактических магнитных полях ($> 10^{-9}$ G) *De Angelis et al., Phys.Lett.B 659, 847 (2008)*
 - ▶ конверсия в ALP в источнике, а назад в Млечном Пути *Simet, Hooper, Serpico, Phys.Rev. D77, 063001 (2008)*
Fairbairn, Rashba, Troitsky, Phys. Rev., D84, 125019 (2011)
 - ▶ Лоренц-нарушение
Осторожно: атмосфера также будет более прозрачной
GR, Satunin, Sibiryakov, Phys.Rev. D89 (2014) 123011
- ▶ Новая астрофизика
 - ▶ Дополнительное гамма-излучение производится космическими лучами ультравысоких энергий от того же источника *Essey, Kusenko, Astropart. Phys. 33 81-85 (2010)*
 - ▶ Другие модели межгалактического фона и эволюции галактик

II. Аномальное поглощение γ -излучения и аксионы

Описание новой физики

Взаимодействие аксионоподобных частиц с фотонами

$$\mathcal{L}_{a\gamma\gamma} = \frac{g_{a\gamma\gamma}}{4} a F_{\mu\nu} \tilde{F}^{\mu\nu}$$



ALP \leftrightarrow γ осцилляции в магнитном поле

равновесие (2 фотона):(1 аксион) // подсчет степеней свободы

II. Аномальное поглощение γ -излучения и аксионы

Процесс

- ▶ Используем все доступные наблюдения блазаров спутником Fermi LAT и Черенковскими телескопами (VERITAS, HESS, MAGIC)
- ▶ Проверяем описывается ли спектр моделью поглощения
- ▶ Ищем проявления новой физики

II. Список исследуемых источников (20 источников)

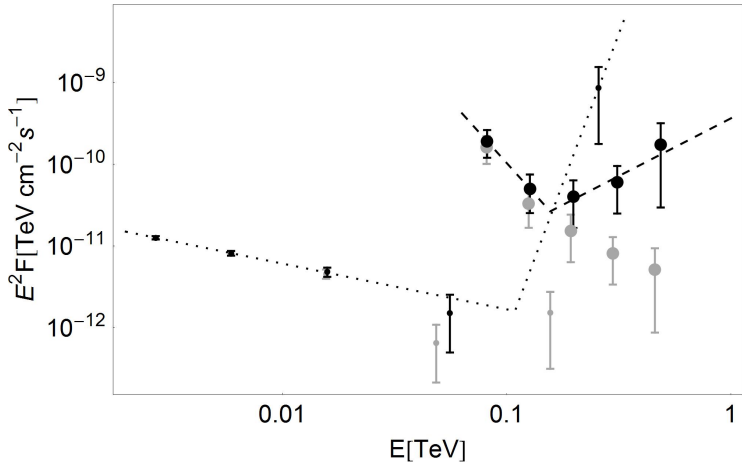
Name	Redshift	Class	Instrument
1ES 1959+650	0.048	BLL	VERITAS
PKS 2005-489	0.071	BLL	HESS
RGB J0152+017	0.080	BLL	HESS
W Com	0.102	BLL	VERITAS
1ES 1312-423	0.105	BLL	HESS
PKS 2155-304	0.116	BLL	HESS
RGB J0710+591	0.125	BLL	VERITAS
1ES 1215+303	0.130	BLL	MAGIC
1ES 0229+200	0.140	BLL	VERITAS
H 2356-309	0.165	BLL	HESS
1ES 1101-232	0.186	BLL	HESS
1ES 0347-121	0.188	BLL	HESS
1ES 0414+009	0.287	BLL	HESS
4C +21.35	0.432	FSRQ	MAGIC
3C 279	0.536	FSRQ	MAGIC
PKS 0454-234	1.003	FSRQ	LAT
PKS 0426-380	1.110	BLL	LAT
RGB J1448+361	1.508	BLL	LAT
PKS J0730-1141	1.591	FSRQ	LAT
B3 1307+433	2.156	BLL	LAT

both BL Lacs and
FSRQ

×

both Fermi and IACT
(high and low redshifts)

Еще 39 источников рассмотрены для исключения ошибки отбора. Для них известна только оценка сверху на поток в исследуемой области



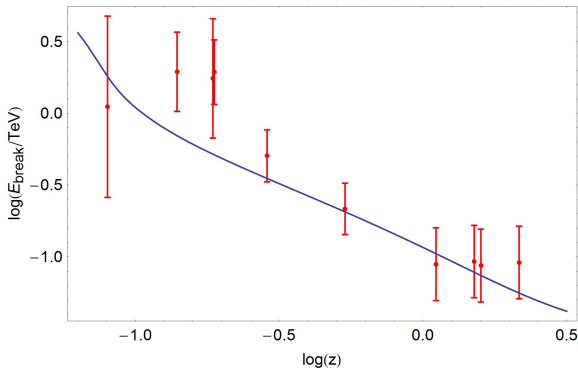
Наблюдаемый и восстановленный спектр для двух объектов:
 3C 279 ($z = 0.536$, большие точки) и PKS J0730-1141
 ($z = 1.591$, маленькие точки).

ГР, Троицкий, Письма в ЖЭТФ, 100, 6 (2014) 397. [arXiv:1406.0239](https://arxiv.org/abs/1406.0239)

// излом восстановленного спектра на энергии близкой к энергии, на которой поглощение становится существенным E_0

II. Исследуем положение излома

- ▶ Для 10 источников модель с изломом лучше, чем степенной спектр

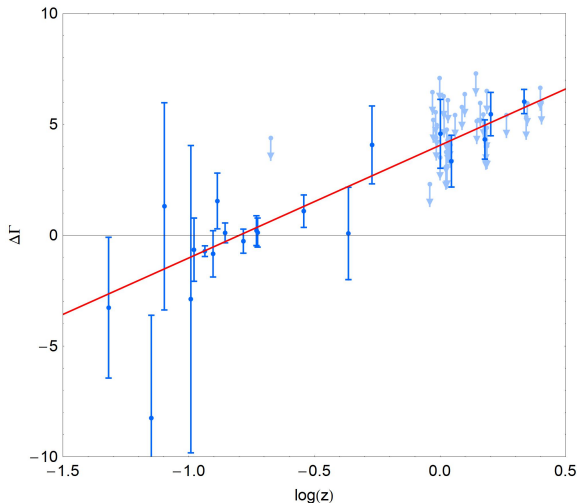


line - $E_0(z)$

положение
излома не
зависит от типа
источника

$$\log_{10}(E_{br}/E_0(z)) = 0.18 \pm 0.32$$

II. Изменение наклона спектра $\Delta\Gamma$ в изломе



предполагаем излом
при $E_0(z)$

находим лучшее
значение $\Delta\Gamma$

$$\Delta\Gamma = (5.08 \pm 0.37) \log_{10} z + (4.05 \pm 0.29)$$

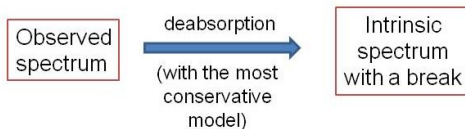
$\Delta\Gamma = const$ исключена
на уровне 12.4σ

Источники с верхними
ограничениями
исключают ошибку
отбора

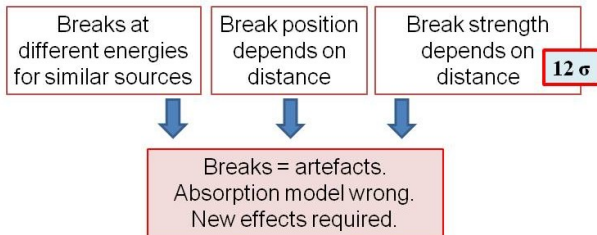
II. Аномальное поглощение γ -излучения и аксионы

Результаты

Individual source:



Ensemble of sources:



II. Аномальное поглощение γ -излучения и аксионы

Описание результата в моделях новой физики

- ▶ **(I)** аксион-фотонные осцилляции в экстрагалактических магнитных полях
 - ▶ эффективно $2/3$ частиц в состоянии фотона: $\tau \rightarrow 2/3\tau$
 - ▶ $12\sigma \Rightarrow 6\sigma$, эффект описан не полностью
- ▶ **(II)** конверсия в ALP в источнике, а затем назад вблизи Млечного Пути
 - ▶ $1/3$ фотонов превращается в ALP в источнике. В итоге, $2/3 \times 1/3 = 2/9$ исходного потока преобразуется назад и приходит на Землю без поглощения. Дополнительно, $2/3 \times 2/3 = 4/9$ фотонов приходят со стандартным поглощением.
 - ▶ $12\sigma \Rightarrow 2\sigma$, полное описание наблюдаемого эффекта
- ▶ **(III)** Дополнительное гамма-излучение производится космическими лучами ультравысоких энергий от того же источника
 - ▶ Требуется детализация модели. В работе.

Описание новой физики

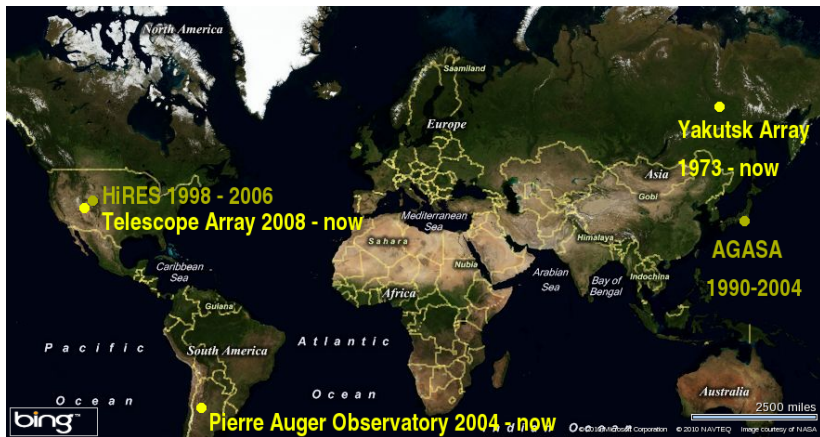
- ▶ Неизвестные источники происхождения космических лучей ультравысоких энергий
 - ▶ происхождение может быть связано с новой физикой
 - ▶ астрофизическое происхождение укажет на справедливость фундаментальных законов при предельных энергиях (Лоренц-инвариантность, безопасность будущих коллайдеров)
- ▶ Сверхтяжелая темная материя
 - ▶ $M \gtrsim 10^{21}$ эВ
 - ▶ может распадаться

Как увидеть?

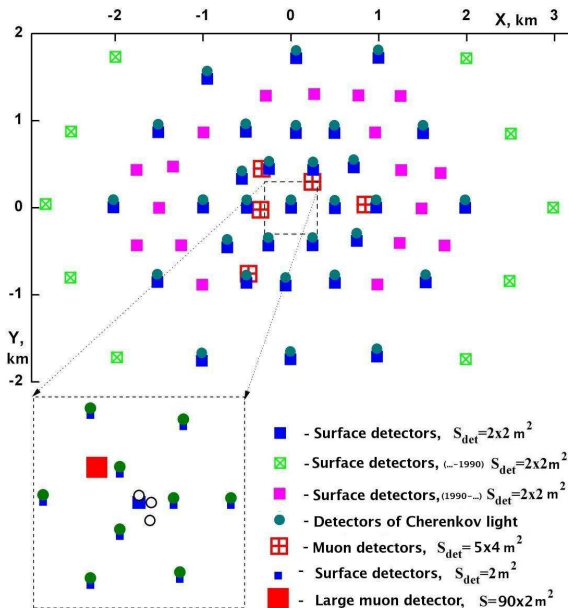
- ▶ Модели происхождения различаются величиной предсказанного потока гамма-квантов ультравысоких энергий
 - ▶ Распад сверхтяжелой темной материи рождает избыток фотонов ультравысоких энергий $E \gtrsim 10^{18}$ эВ
 - ▶ Астрофизические модели ускорения протонов предсказывают умеренный поток “космогенных” фотонов
 - ▶ Астрофизические модели ускорения ядер предсказывают очень слабый поток фотонов ультравысоких энергий

Gelmini, Kalashev, Semikoz JETP 2008

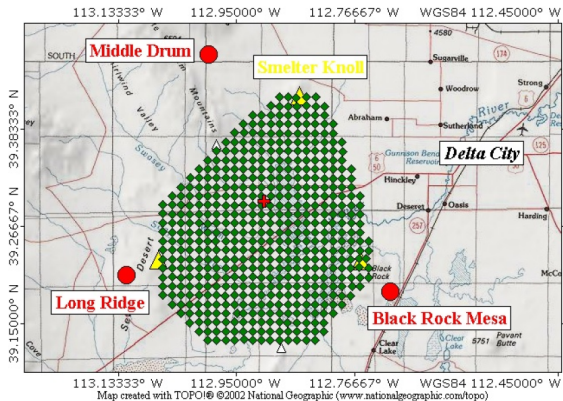
III, IV. Эксперименты, регистрирующие космические лучи $E > 10^{18}$ eV



III. Якутская комплексная установка ШАЛ



IV. Обсерватория Telescope Array

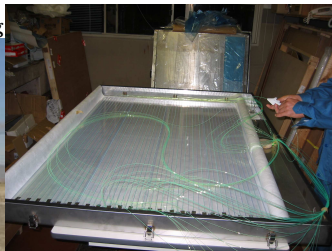
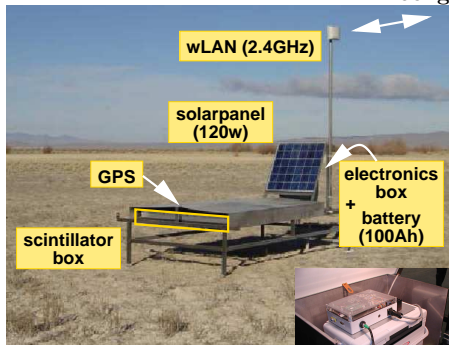


- ▶ Юта, 210 км от Солт-Лейк-Сити
- ▶ 507 наземных станций, $S = 3 \text{ м}^2$, интервал 1.2 км
- ▶ 3 флуоресцентных детектора
- ▶ 9 лет сбора данных

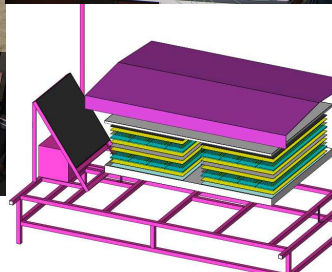
**Рекордная статистика КЛ
в северном полушарии**

IV. Станция наземной решетки Telescope Array

< Surface Detector >



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

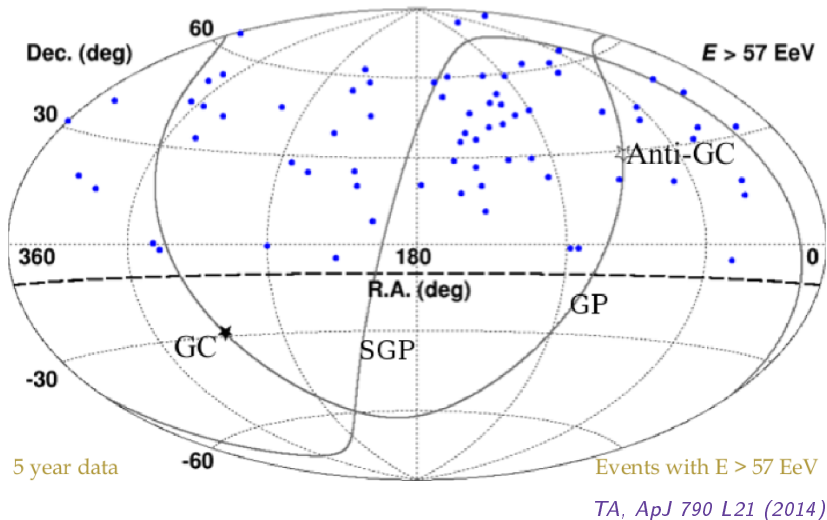


IV. Флуоресцентный детектор Telescope Array

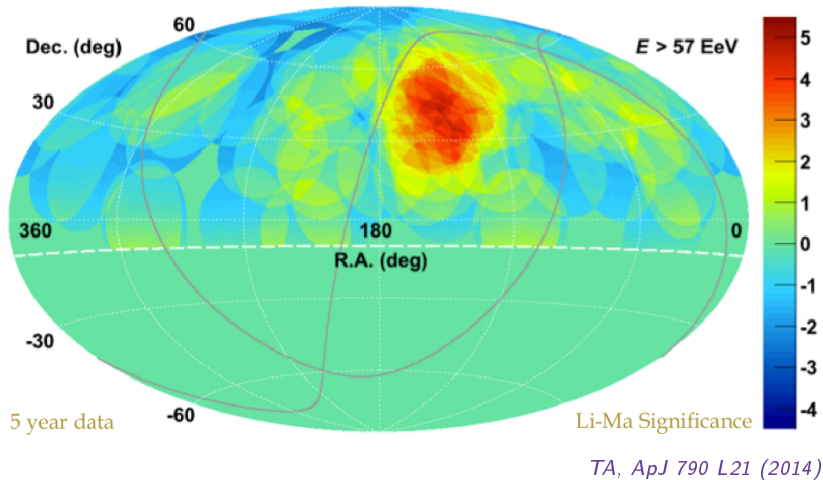


photo by Oleg Kalashev

IV. Горячее пятно: карта космических лучей $E > 57 \text{ EeV}$



IV. Горячее пятно: статистическая значимость

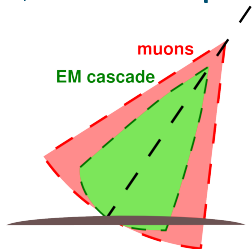


19 из 72 событий в круге радиусом 20° , фон: 4.5
статистическая значимость 3.4σ

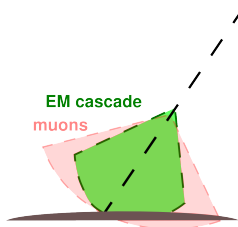
III,IV. Ограничения на поток фотонов УВЭ

Метод

ШАЛ, вызванные протоном



ШАЛ, вызванные фотоном



Якутская установка

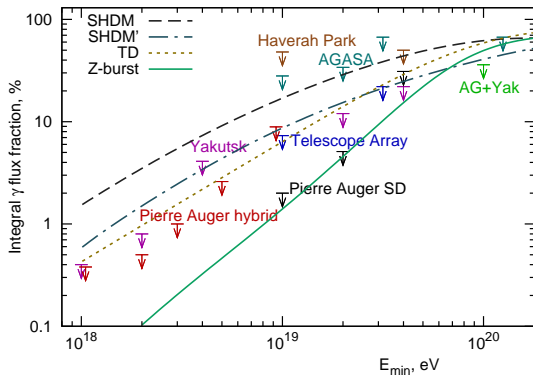
- ▶ анализ мюонных данных

Glushkov et al. Phys.Rev.D 82, 2010

Telescope Array

- ▶ реконструкция событий
- ▶ анализ кривизны фронта

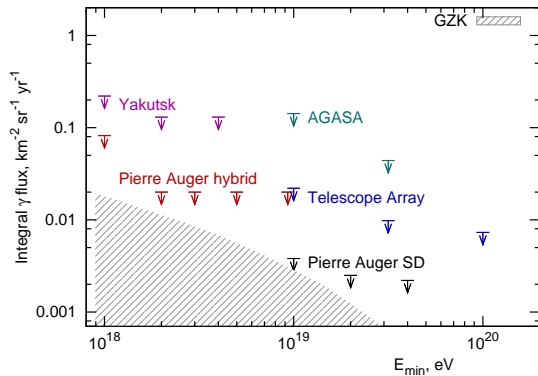
Abu-Zayyad et al. Phys.Rev.D 88, 2013



- ▶ модели распада сверхтяжелой темной материи и топологических дефектов ограничены

III,IV. Ограничения на поток фотонов УВЭ

Результаты



- ▶ предсказания астрофизических моделей ускорения протонов пока ниже чувствительности

Alvarez-Muniz et al., arXiv:1306.4199

Gelmini, Kalashev, Semikoz JETP 2008

Заключение

- ▶ Установлены ограничения на частицы с дробным электрическим зарядом, модели сверхтяжелой темной материи, космологические сценарии
- ▶ Обнаружено аномальное поглощение гамма-излучения. Указание на аксионоподобные частицы или новые астрофизические эффекты
- ▶ На карте космических лучей ультравысоких энергий обнаружено горячее пятно
- ▶ Установлены ограничения на поток фотонов ультравысоких энергий, указывающие на астрофизическое происхождение КЛ

Спасибо за внимание

Положения, выносимые на защиту 1/3

1. Построена система кинетических уравнений плазмы эпохи рекомбинации и рассчитан спектр реликтового излучения в присутствии гипотетических частиц с дробным электрическим зарядом. На основании данных спутника Планк по анизотропии микроволнового излучения получено ограничение на реликтовую плотность таких частиц. Показано, что в широком классе моделей реликтовая плотность частиц с дробным электрическим зарядом не может составлять более 1% от плотности холодной темной материи.
2. Из данных спутника Планк установлены наблюдательные ограничения на параметры гипотетического скалярного поля в моделях псевдоконформной Вселенной. Показано на уровне достоверности 95%, что параметр самодействия скалярного поля в модели конформного скатывания с промежуточной стадией не превышает $1.3 \cdot 10^{-3}$, а в модели без промежуточной стадии не превышает 0.52.
3. На основе данных спутника Fermi исследовано гамма-излучение с энергией выше 100 МэВ от блазара 3C 279 во время его семи затмений Солнцем. Получены ограничения на размер и поток протяженного гамма-излучения блазара.

Положения, выносимые на защиту 2/3

4. Из наблюдений гамма-излучения далеких блазаров наземными гамма-телескопами и орбитальным телескопом Fermi LAT установлена аномальная прозрачность Вселенной для фотонов с энергиями выше 100 ГэВ. Эффект обнаружен с высокой статистической значимостью и указывает на новые физические или астрофизические явления. Результат может быть интерпретирован в модели физики частиц с новыми аксионоподобными частицами.
5. На основании мюонных данных Якутской установки ШАЛ получены ограничения на поток фотонов с энергиями выше 10^{18} эВ, $2 \cdot 10^{18}$ эВ и $4 \cdot 10^{18}$ эВ. Показано, что доля фотонов при этих энергиях не превышает 0.4%, 0.8% и 4.1%, соответственно, с уровнем доверия 95%. Результат противоречит предсказаниям моделей распада топологических дефектов.
6. Получены ограничения на параметры сверхтяжелой темной материи из ненаблюдения фотонов ультравысоких энергий и формы спектра космических лучей. Показано, что модель сверхтяжелой темной материи не может описать весь поток космических лучей при энергиях порядка 10^{20} эВ. Установлены ограничения на допустимую долю потока, связанную с такой темной материей.

7. По данным 5 лет наблюдений наземной решетки Telescope Array на карте космических лучей с энергиями выше $5.7 \cdot 10^{19}$ эВ обнаружен избыток событий из определенной области неба (“горячее пятно”). В круг радиуса 20 градусов попадают 19 из 72 событий при ожидании 4.5 для изотропного распределения.
8. Разработан метод поиска первичных фотонов ультравысоких энергий по данным наземной решетки сцинтилляционных детекторных станций установки Telescope Array. Разработана и применена к событиям Telescope Array методика реконструкции, включающая оценку параметра кривизны Линсли для каждого события.
9. Установлены ограничения на поток первичных фотонов с энергиями выше 10^{19} эВ, $10^{19.5}$ эВ и 10^{20} эВ по данным трех лет наблюдения наземной решетки Telescope Array. Установлено, что поток фотонов при этих энергиях не превышает $1.9 \cdot 10^{-2}$, $0.97 \cdot 10^{-2}$ и $0.71 \cdot 10^{-2} \text{ km}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ yr}^{-1}$, соответственно, с уровнем доверия 95%. Результаты согласуются с астрофизическим происхождением космических лучей с энергиями выше 10^{19} эВ.

- [1] S. L. Dubovsky, D. S. Gorbunov, and G. I. Rubtsov, "Narrowing the window for millicharged particles by CMB anisotropy," *Письма в ЖЭТФ*, vol. 79, pp. 3–7, 2004.
- [2] A. D. Dolgov, S. L. Dubovsky, G. I. Rubtsov, and I. I. Tkachev, "Constraints on millicharged particles from Planck data," *Phys. Rev.*, vol. D88, no. 11, p. 117701, 2013.
- [3] M. Libanov, V. Rubakov, and G. Rubtsov, "Towards conformal cosmology," *Письма в ЖЭТФ*, vol. 102, pp. 630–640, 2015.
- [4] G. I. Rubtsov and S. R. Ramazanov, "Revisiting constraints on the (pseudo)conformal universe with Planck data," *Phys. Rev.*, vol. D91, no. 4, p. 043514, 2015.
- [5] E. Kotelnikov, G. Rubtsov, and S. Troitsky, "Constraining the extension of a possible gamma-ray halo of 3C 279 from 2008-2014 solar occultations," *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, vol. 450, no. 1, pp. L44–L47, 2015.
- [6] G. I. Rubtsov and S. V. Troitsky, "Breaks in gamma-ray spectra of distant blazars and transparency of the Universe," *Письма в ЖЭТФ*, vol. 100, pp. 397–401, 2014.
- [7] A. V. Glushkov, I. T. Makarov, M. I. Pravdin, I. E. Sleptsov, D. S. Gorbunov, G. I. Rubtsov, and S. V. Troitsky, "Constraints on the flux of primary cosmic-ray photons at energies $E > 10^{18}$ eV from Yakutsk muon data," *Phys. Rev.*, vol. D82, p. 041101, 2010.
- [8] O. E. Kalashev, G. I. Rubtsov, and S. V. Troitsky, "Sensitivity of cosmic-ray experiments to ultra-high-energy photons: reconstruction of the spectrum and limits on the superheavy dark matter," *Phys. Rev.*, vol. D80, p. 103006, 2009.
- [9] G. I. Rubtsov, I. I. Tkachev, and A. D. Dolgov, "Ultra-high energy cosmic ray correlations with Active Galactic Nuclei in the world dataset," *Письма в ЖЭТФ*, vol. 95, pp. 569–571, 2012.

- [10] T. Abu-Zayyad *et al.*, "Upper limit on the flux of photons with energies above 10^{19} eV using the Telescope Array surface detector," *Phys. Rev.*, vol. D88, no. 11, p. 112005, 2013.
- [11] T. Abu-Zayyad *et al.*, "The Cosmic Ray Energy Spectrum Observed with the Surface Detector of the Telescope Array Experiment," *Astrophys. J.*, vol. 768, p. L1, 2013.
- [12] R. U. Abbasi *et al.*, "Indications of Intermediate-Scale Anisotropy of Cosmic Rays with Energy Greater Than 57 EeV in the Northern Sky Measured with the Surface Detector of the Telescope Array Experiment," *Astrophys. J.*, vol. 790, p. L21, 2014.
- [13] S. Ramazanov and G. Rubtsov, "Primordial scalar perturbations via conformal mechanisms: statistical anisotropy," *EPJ Web Conf.*, vol. 70, p. 00042, 2014.
- [14] A. Glushkov, D. Gorbunov, I. Makarov, M. Pravdin, G. Rubtsov, I. Slepsov, and S. Troitsky, "Search for photons of energy $e > 10^{18}$ eV with yakutsk muon data," *Proceedings of the 31th International Cosmic Ray Conference, Lodz*, p. 558, 2009.
- [15] O. E. Kalashev, G. I. Rubtsov, and S. V. Troitsky, "Sensitivity of cosmic-ray experiments to ultra-high-energy photons: reconstruction of the spectrum and limits on the superheavy dark matter," *Proceedings of the 31th International Cosmic Ray Conference, Lodz*, p. 1080, 2009.
- [16] J. Alvarez-Muniz, M. Risse, G. I. Rubtsov, and B. T. Stokes, "Review of the Multimessenger Working Group at UHECR-2012," *EPJ Web Conf.*, vol. 53, p. 01009, 2013.
- [17] G. I. Rubtsov, "The highest energy cosmic rays: Observations and search for new physics," *PoS*, vol. QFTHEP2010, p. 008, 2010.
- [18] G. Rubtsov, D. Ivanov, B. Stokes, G. Thomson, and S. Troitsky, "Search for ultra-high energy photons in the telescope array surface detector first-year data," *Proceedings of the 31th International Cosmic Ray Conference, Lodz*, p. 718, 2009.

- [19] B. Stokes, R. Cady, D. Ivanov, G. Thomson, and G. Rubtsov, "Using corsika to quantify telescope array surface detector response," *Proceedings of the 31th International Cosmic Ray Conference, Lodz*, p. 1328, 2009.
- [20] G. I. Rubtsov, D. Ivanov, B. T. Stokes, G. B. Thomson, and S. V. Troitsky, "Search for ultra-high energy photons using Telescope Array surface detector," *AIP Conf. Proc.*, vol. 1367, pp. 181–184, 2011.
- [21] G. I. Rubtsov, M. Fukushima, and D. Ivanov, "Search for ultra-high energy photons and neutrinos using Telescope Array surface detector," in *Proceedings, 32nd International Cosmic Ray Conference (ICRC 2011)*, vol. 2, p. 242.
- [22] G. I. Rubtsov, M. Fukushima, D. Ivanov, B. T. Stokes, G. B. Thomson, and S. V. Troitsky, "Search for ultra-high energy photons and neutrinos using Telescope Array surface detector," *EPJ Web Conf.*, vol. 53, p. 05001, 2013.
- [23] G. I. Rubtsov, M. Fukushima, D. Ivanov, B. T. Stokes, G. B. Thomson, and S. V. Troitsky, "Search for Ultra-High Energy Photons and Neutrinos using the Telescope Array Scintillator Array Data," in *Proceedings, 33rd International Cosmic Ray Conference (ICRC2013): Rio de Janeiro, Brazil, July 2-9, 2013*, p. 0149, 2013.
- [24] T. Karg, J. Alvarez-Muniz, D. Kuempel, M. Settimo, G. Rubtsov, and S. Troitsky, "Report from the Multi-Messenger Working Group at UHECR-2014 Conference," in *2014 Conference on Ultrahigh Energy Cosmic Rays (UHECR2014) Springdale, USA, October 12-15, 2014*, 2015.
- [25] G. I. Rubtsov, M. Fukushima, D. Ivanov, B. T. Stokes, G. B. Thomson, and S. V. Troitsky, "Telescope Array search for photons and neutrinos with the surface detector data," *PoS*, vol. ICRC2015, p. 331, 2015.

1.1 условие сильной связи

$$\Gamma_{mcp}(\Omega_b + \Omega_{mcp})H^{-1} \gtrsim 250, \quad (1)$$

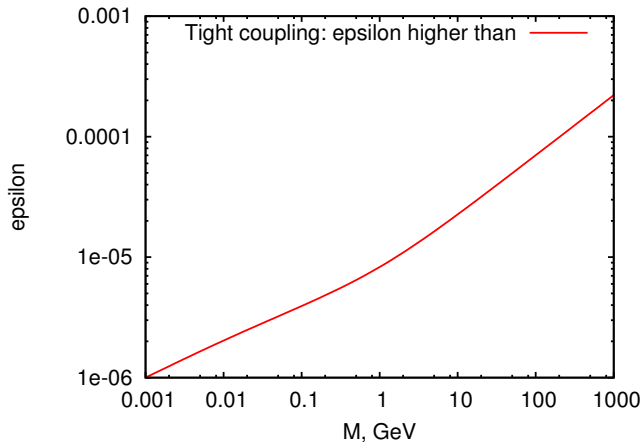
где Ω_b и Ω_{mcp} — реликтовые плотности барионов и МЗЧ, соответственно, H — параметр Хаббла, а Γ_{mcp} — темп передачи скорости на момент рекомбинации. Последняя величина задается следующим соотношением:

$$\Gamma_{mcp} = \frac{4\sqrt{2\pi}\alpha^2\epsilon^2\rho_{crit}}{3m_{\chi}m_p T^{3/2}} |\ln \theta_D| (\sqrt{\mu_{\chi,e}} + \sqrt{\mu_{\chi,p}}), \quad (2)$$

где $\mu_{\chi,e(p)}$ — приведенная масса МЗЧ и электрона (протона), α — постоянная тонкой структуры, T — температура, ρ_{crit} — критическая плотность в момент рекомбинации, $\theta_D = \sqrt{2\pi\alpha n_e / T^2 m_e}$ — угол Дебая. Последний задает нижнюю границу угла Резерфордского рассеяния, связанную с дебаевским экранированием.

1.1 условие сильной связи

$$\Gamma_{mcp}(\Omega_b + \Omega_{mcp})H^{-1} \gtrsim 250$$



1.2 perturbations

$$\mathcal{P}_{\chi_2} = \frac{1}{4\pi^2(\eta_* - \eta)^2}$$
$$\theta \equiv \frac{\sqrt{2} \operatorname{Im} \chi}{\operatorname{Re} \chi} = \frac{\delta\chi_2}{\chi_c}$$

$$\chi_c(\eta) = \frac{1}{h(\eta_* - \eta)}$$
$$\delta\chi_1 = \frac{3}{4\pi^{3/2}} \frac{1}{k^{5/2}(\eta_* - \eta)^2}$$

Therefore:

$$\mathcal{P}_\theta = \frac{h^2}{4\pi^2}$$
$$\mathcal{P}_\zeta \sim \mathcal{P}_\theta$$

flat perturbations

$$\chi_c + \delta\chi_1 = \frac{1}{h(\eta_* + \delta\eta_*(\mathbf{x}) - \eta)}$$

in the first approximation doesn't affect θ perturbation
in the next: *statistical anisotropy*

1.2 Primordial statistical anisotropy and CMB

- ▶ Observed temperature map $\delta T(\Omega)$

$$\delta T(\Omega) = \sum_{lm} a_{lm} Y_{lm}(\Omega),$$

$$a_{lm} = 4\pi i^l \int \frac{d\mathbf{k}}{(2\pi)^3} \Delta_l(k) \zeta(\mathbf{k}) Y_{lm}^*(\hat{\mathbf{k}}),$$

$\Delta_l(k)$ – transfer function

$$S_{|m|'m'} \equiv \langle a_{lm} a_{l'm'}^* \rangle = C_l \delta_{ll'} \delta_{mm'} + \delta S_{|m|'m'}$$

$$S_{lm'l'm'} = 4\pi i^{l-l'} \int dk \frac{\mathcal{P}_\zeta(\mathbf{k})}{k^3} \Delta_l(k) \Delta_{l'}(k) Y_{lm}^*(\hat{\mathbf{k}}) Y_{l'm'}(\hat{\mathbf{k}})$$

remember $\mathcal{P}_\zeta(\mathbf{k}) = \mathcal{P}_0(k) \left[1 + a(k) \sum_{LM} q_{LM} Y_{LM}(\hat{\mathbf{k}}) \right]$

$$S_{lm'l'm'} = \delta_{ll'} \delta_{mm'} 4\pi \int \frac{dk}{k} \mathcal{P}_0(k) \Delta_l^2(k) \\ + i^{l-l'} q_{LM} \int d\Omega Y_{LM}(\hat{\mathbf{k}}) Y_{lm}^*(\hat{\mathbf{k}}) Y_{l'm'}(\hat{\mathbf{k}}) \\ \times 4\pi \int \frac{dk}{k} \mathcal{P}_0(k) a(k) \Delta_l(k) \Delta_{l'}(k)$$

$$= \delta_{ll'} \delta_{mm'} C_l + i^{l-l'} q_{LM} (-1)^{m'} \sqrt{\frac{(2l+1)(2l'+1)}{4\pi(2L+1)}} C_{l0l'0}^{L0} C_{lm;l'-m'}^{LM} \times C_{ll'}$$

- ▶ Example: quadrupolar anisotropy $q_{2M} \neq 0$
- ▶ only $\delta S_{lm|l+1m'}$ and $\delta S_{lm|l+2m'} \neq 0$, $|m - m'| \leq 2$

- ▶ conformal rolling predicts absence of tensor perturbation
- ▶ scalar tilt may be a result of conformal symmetry breaking

V. Rubakov, M. Osipov, JETP Lett. 93:52-55 (2011)

- ▶ statistical anisotropy is a result of radial perturbations
⇒ parameters q_{LM} are Gaussian random variables.

Two sub-scenarios of the conformal rolling:

Sub-scenario A. The modes of interest are superhorizon at the end of conformal rolling $k/a < H$.

M. Libanov, V. Rubakov, JCAP 1011 (2010) 045

Sub-scenario B. They are subhorizon and there exists an intermediate stage.

M. Libanov, S. Ramazanov, V. Rubakov, JCAP 1106 (2011) 010

1.2 Conformal rolling. Sub-scenario A

The power spectrum in linear and next-to-linear order on h is:

$$\mathcal{P}_\zeta(\mathbf{k}) = \mathcal{P}_0(k) (1 + Q_1(\mathbf{k}) + Q_2(\mathbf{k}))$$

$$Q_1(\mathbf{k}) = -\frac{\pi}{k} \hat{k}_i \hat{k}_j \left(\partial_i \partial_j \eta_* - \frac{1}{3} \delta_{ij} \partial_k \partial_k \eta_* \right)$$

$$Q_2(\mathbf{k}) = -\frac{3}{2} (\hat{\mathbf{k}}\mathbf{v})^2, \quad \text{where } v_i \equiv -\partial_i \eta_*(\mathbf{x})$$

- ▶ dominated by infrared modes; one may consider Q_1, Q_2 constant tensor throughout our part of the Universe
- ▶ linear order:

$$\langle q_{2M} q_{2M'}^* \rangle = \delta_{MM'} \frac{\pi h^2 H_0^2}{25}, \quad a(k) = k^{-1}$$

- ▶ next-to-linear order:

$$q_{2M} = -\frac{4\pi \mathbf{v}^2}{5} Y_{2M}^*(\hat{\mathbf{v}}), \quad a(k) = 1$$

$$\langle \mathbf{v}^2 \rangle = \frac{3h^2}{8\pi^2} \ln \frac{H_0}{\Lambda}$$

1.2 Conformal rolling. Sub-scenario A: extension

- ▶ One may consider “pseudo-Conformal Universe”, where conformal field drives the cosmological evolution.

K. Hinterbichler, J. Khoury, JCAP 1204 (2012) 023

- ▶ Evolution of the Universe is a slow contraction and the metric is close to Minkowski.
- ▶ Main properties of theory are determined by spontaneous breaking of conformal symmetry $so(4, 2)$ to de Sitter symmetry $so(4, 1)$.
- ▶ Statistical anisotropy prediction is the same up to reparametrization in different realization of pseudo-Conformal Universe
- ▶ Galilean Genesis and conformal rolling sub-scenario A may be considered as a special case of general pseudo-conformal Universe

1.2 Galilean Genesis model

$$\mathcal{S}_\pi = \int d^4x \sqrt{-g} \left[-f^2 e^{2\pi} (\partial\pi)^2 + \frac{f^3}{\Lambda^3} (\partial\pi)^2 \square\pi + \frac{f^3}{2\Lambda^3} (\partial\pi)^4 \right]$$

P. Creminelli, A. Nicolis, E. Trincherini, JCAP 1011 (2010) 021

- ▶ Conformal invariance is spontaneously broken by solution $e^\pi = \frac{1}{t^* - t}$.
- ▶ Statistical anisotropy is the same up to reparametrization

$$h^2 \leftrightarrow \frac{2\Lambda^3}{3f^3}$$

1.2 Conformal rolling. Sub-scenario B

- ▶ If conformal field is spectacular it's possible that the modes of interest are subhorizon at the end of conformal rolling $k/a > H$.
- ▶ We assume the intermediate stage is long $r \equiv \eta_1 - \eta_* \gg k^{-1}$
- ▶ To preserve flat spectrum the dynamics of θ must be nearly Minkowskian at the intermediate stage.
- ▶ Statistical anisotropy

$$\mathcal{P}_\zeta(\mathbf{k}) = \mathcal{P}_0(k) \left[1 + \hat{\mathbf{k}}\mathbf{v}(\mathbf{x} - r\hat{\mathbf{k}}) - \hat{\mathbf{k}}\mathbf{v}(\mathbf{x} - r\hat{\mathbf{k}}) \right]$$

$$a(k) = 1$$

$$\langle q_{LM} q_{L'M'}^* \rangle = \delta_{LM'} \delta_{MM'} \frac{3h^2}{\pi} \frac{1}{(L-1)(L+2)}$$

1.2 Anisotropic inflation

- Inflation with vector fields

$$S = \int d^4x \sqrt{-g} \left[\frac{1}{2\kappa^2} R - \frac{1}{2} (\partial_\mu \phi)^2 - V(\phi) - \frac{1}{4} f^2(\phi) F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} \right]$$

M. Watanabe, S. Kanno, J. Soda Phys.Rev.Lett. 102 (2009) 191302

- Statistical anisotropy:

$$\mathcal{P}_\zeta(\mathbf{k}) = \mathcal{P}_0(k) [1 + g_s \sin^2 \theta], \quad \theta - \text{zenith angle}$$

$$g_s = 24N^2 I$$

N - e-folding number, I - anisotropy parameter; can be derived from parameters of the model.

J. Soda, Class.Quant.Grav. 29 (2012) 083001

$$\Rightarrow q_{20} = \frac{4}{3} \sqrt{\frac{\pi}{5}} g_s \quad (\text{in preferred coordinate frame})$$

1.2 Estimator

\hat{a}_{lm} – observed temperature map // $\delta \hat{T}(\Omega) = \sum \hat{a}_{lm} Y_{lm}(\Omega)$

- ▶ Estimator: $\hat{a}_{lm} \rightarrow \{q_{LM}\}$
- ▶ Maximum likelihood approach: $P(\hat{a}|\mathbf{q})$ is a probability density to observe \hat{a} given statistical anisotropy parameters equal to $\mathbf{q} = \{q_{LM}\}$
- ▶ CMB map is a Gaussian random:

$$\hat{C}_{lm'l'm'} \equiv \langle \hat{a}_{lm} \hat{a}_{l'm'}^* \rangle = B_l B_{l'} (C_l \delta_{ll'} \delta_{mm'} + \delta S_{lm'l'm'}(\mathbf{q})) + N_{lm'l'm'}$$

B_l – beam transfer function, N – noise covariance.

$$P(\hat{a}|\mathbf{q}) = \frac{1}{\sqrt{\det \hat{C}}} \exp\left(-\frac{1}{2} \hat{a}^+ \hat{C}^{-1} \hat{a}\right)$$

$$-\mathcal{L}(\hat{a}|\mathbf{q}) \equiv -\ln P(\hat{a}|\mathbf{q}) = \frac{1}{2} \text{Tr} \ln \hat{C}(\mathbf{q}) + \frac{1}{2} \hat{a}^+ \hat{C}^{-1}(\mathbf{q}) \hat{a}$$

1.2 Quadratic Maximum Likelihood (QML)

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \mathbf{q}^+} = 0$$

- ▶ \hat{C} is far from diagonal in both coordinate and harmonic spaces \Rightarrow computationally difficult to solve directly
- ▶ Let's expand log-likelihood up to quadratic order of \mathbf{q}

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \mathbf{q}^+} = \left. \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \mathbf{q}^+} \right|_0 + \left. \frac{\partial^2 \mathcal{L}}{\partial \mathbf{q}^+ \partial \mathbf{q}} \right|_0 \mathbf{q}$$

D.Hanson and A.Lewis, Phys.Rev.D 80 (2009) 063004

- ▶ Replace the second derivative by it's expectation value

$$\left\langle \frac{\partial^2 \mathcal{L}}{\partial \mathbf{q}^+ \partial \mathbf{q}} \right\rangle = - \left\langle \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \mathbf{q}^+} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \mathbf{q}} \right\rangle \equiv -\mathbf{F}$$

first equality follows from normalization $\int \exp(\mathcal{L}) d\hat{\mathbf{a}} = 1$

$$\left. \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \mathbf{q}^+} \right|_0 = \frac{1}{2} \hat{\mathbf{a}}^+ \hat{\mathbf{C}}_0^{-1} \frac{\partial \hat{\mathbf{C}}}{\partial \mathbf{q}^+} \hat{\mathbf{C}}_0^{-1} \hat{\mathbf{a}} - \frac{1}{2} \text{Tr} \left(\hat{\mathbf{C}}_0^{-1} \frac{\partial \hat{\mathbf{C}}}{\partial \mathbf{q}^+} \right)$$

Note: if \mathbf{x} - random with covariance \mathbf{C} , $\text{Tr} \mathbf{A} = \langle \mathbf{x}^+ \mathbf{A} \mathbf{C}^{-1} \mathbf{x} \rangle$

$$\mathbf{h} \equiv \frac{1}{2} \bar{\mathbf{a}}^+ \frac{\partial \hat{\mathbf{C}}}{\partial \mathbf{q}^+} \bar{\mathbf{a}}$$

$$\bar{\mathbf{a}} \equiv \hat{\mathbf{C}}_0^{-1} \hat{\mathbf{a}}$$

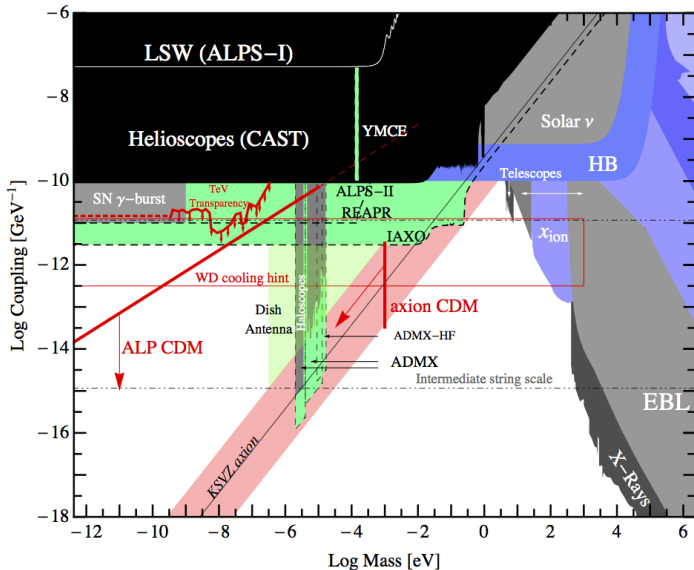
$$\left. \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \mathbf{q}^+} \right|_0 = \mathbf{h} - \langle \mathbf{h} \rangle_{iso}$$

where average is over statistically isotropic CMB realizations

$$\mathbf{q} = \mathbf{F}^{-1} (\mathbf{h} - \langle \mathbf{h} \rangle_{iso})$$

Inverse-variance filtering – most resource consuming operation. Performed by conjugate gradient technique with multigrid preconditioner

II. ALP parameter experimental constraints



II. Artificial reduction of EBL density test

- ▶ the artificial reduction of the EBL density 2.1 times below the lower limit, which is far beyond reasonable, reduces the significance of the effect down to 2σ
- ▶ the reduction is caused by the depletion of the sample (no spectral points above the E_0)

II. Object selection

- ▶ redshift is measured spectroscopically.
Define E_0 : energy for which optical depth is $\tau = 1$.
- ▶ mean energy of the last available spectral bin is higher than E_0
(see paper for details)
- ▶ atmospheric Cerenkov Telescopes:
 - ▶ TeVCat sources
 - ▶ spectra from literature; 5 or more points required
 - ▶ only one spectrum per object; no stacking of spectra obtained at different time/instrument
- ▶ Fermi LAT sources:
 - ▶ 2FGL blazars with following preselection:
 - $z > 0.7$ detected at $E > 10$ GeV with $TS > 16$ (99 sources)
 - ▶ spectrum constructed using Pass 7REP data for 5.5 years with *gtlike* tool in (2-4), (4-10), (10-30), (30-100) and (100-300) GeV bins.

II. Spectrum deabsorption

EBL model:

- ▶ We use lowest available absorption model. The “fiducial” model of Gilmore et al.

Gilmore, Somerville, Primack, Dominguez, MNRAS 422, 3189-3207 (2012)

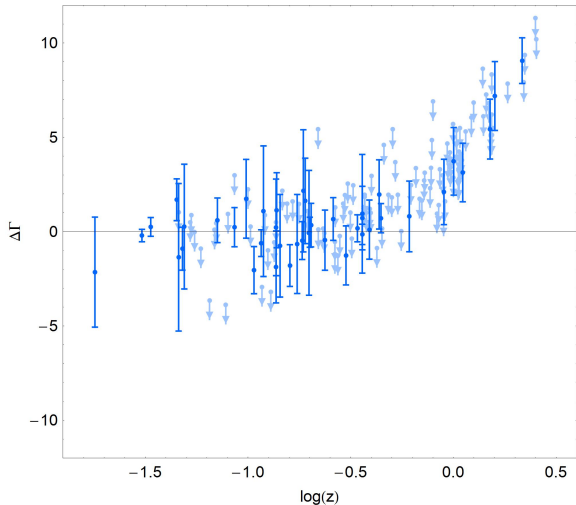
- ▶ The main results are also reproduced with another model

Franceschini, Rodighiero, Vaccari, Astron. Astrophys. 487, 837-852 (2008)

Deabsorption procedure:

- ▶ tabulated optical density for mean energy in each bin is used
- ▶ both bin integral flux and mean energy are transformed

II. Additional test: all Fermi blazars with known redshift



224 sources detected
above 10 GeV

assume break at
100 GeV

break is significant for
distant blazars only,
where $E_0 \sim 100$ GeV

II. Comparison to the preceding result

- ▶ Horns and Meyer have tested the points on blazar spectra for which optical density $\tau > 2$
- ▶ Based on 13 spectral points belonging to 7 blazars the absorption anomaly is identified at 4.2σ

Horns, Meyer, JCAP 1202, 033 (2012)

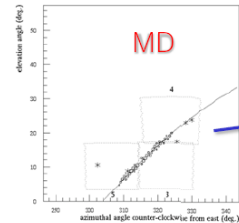
Difference of our approach

- ▶ larger sample of sources; Fermi LAT blazars included
- ▶ simultaneous data only; weaker smoothing due to variability
- ▶ different analysis method

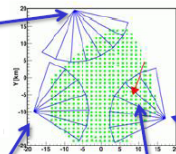
$\Rightarrow 12\sigma$

IV. Пример гибридного события Telescope Array

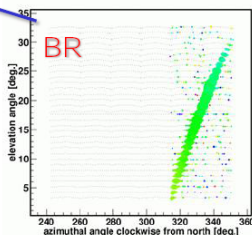
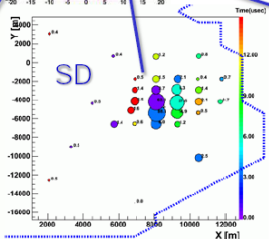
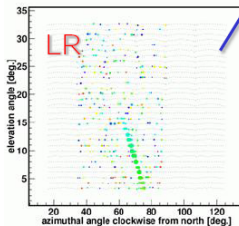
Triple FD Event (2008-10-26)



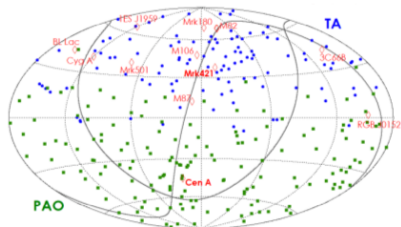
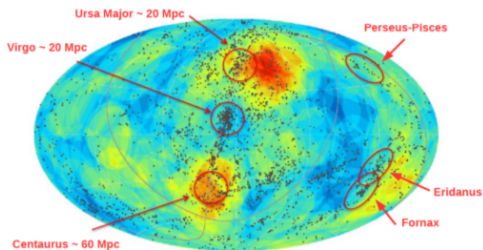
EYE 3 20081026 2008-OCT-26 05:51:50.163 703 000



	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



All sky Survey with TA&PAO



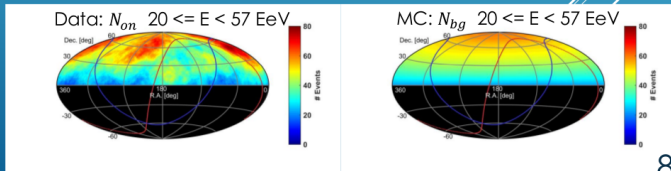
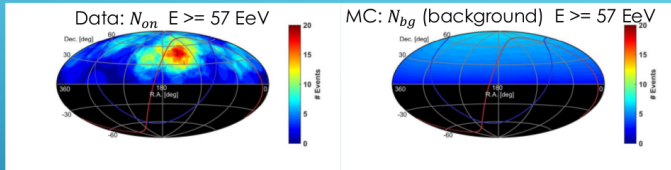
- Dots: 2MASS catalog Heliocentric velocity < 300 km/s $D < 45$ Mpc
- TA Hot spot near Ursa Major
- PAO Hot Spot at Cen A

- candidates: Mrk421, Mrk180, and starburst M82.

K. Fang, et al., ApJ, 794, 126 (2014)
H.-N. He, et al., arXiv:1411.5273 (2014)

TWO ENERGY RANGE LI-MA STATISTICS

- ▶ N_{off} calculated from 2 million MC events $E \geq 20$ EeV.
- ▶ $E \geq 57$ EeV were 144,486 MC events.
- ▶ 1.0×1.0 degree oversampling. 20° window.
- ▶ Window scans down to 0 declination.



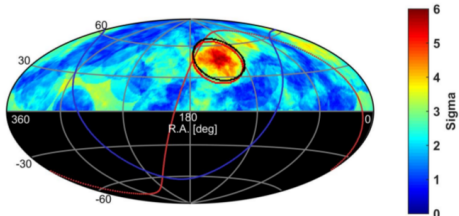
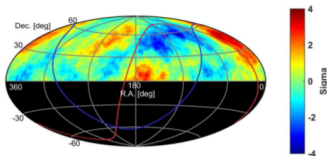
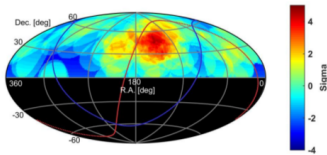
HOT/COLD LI-MA STATISTICS

Map Max.: 4.65 **High Energy HOTSPOT**

▶ Hot/Coldspot is max. significance (preliminary): 146 R.A. 47 Decl.

- ▶ 3 degrees from previous hotspot.
- ▶ 17 degrees from supergalactic plane

Combined significance from multiplying probabilities.



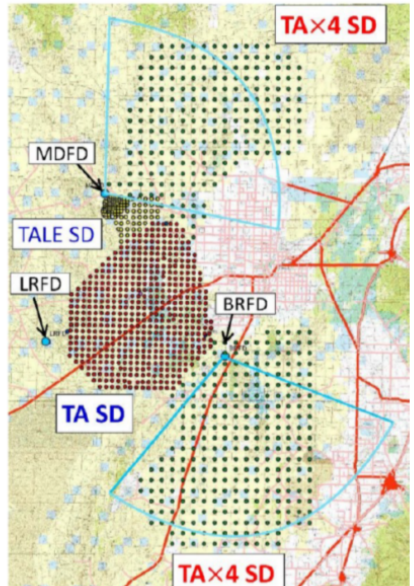
Red circle – ICRC2015 Hotspot **Black Circle– Hot/Coldspot**

Circular bin with maximum joint significance (p-values multiplied)
HOT excess > 4.62 σ and **COLD deficit < -3.23 σ**

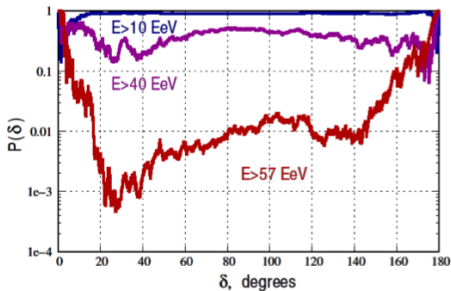
Map Min.: -3.86 **Low Energy COLDSPOT**

TA×4

- Major upgrade
- Quadruple TA SD (~3000 km²) approved
- Two FD stations Submitted

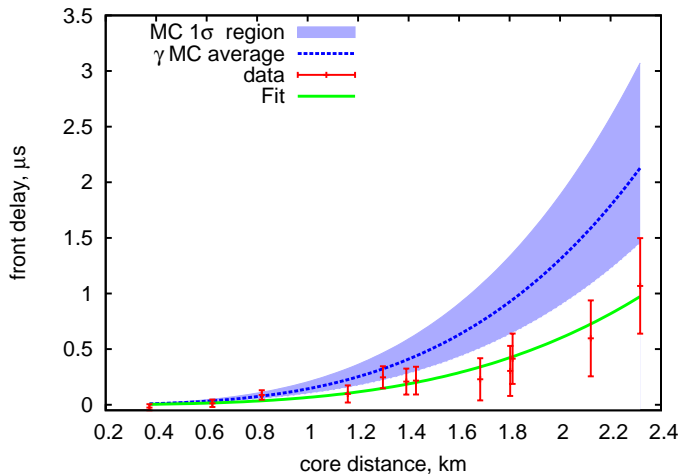


IV. Автокорреляционная функция



- AutoCorrelation
- Count number of pairs separated by angle δ
- Compare to random isotropic distributions
- $E > 57 \text{ EeV}$
- Deviation from isotropy at 3σ around 20°

IV. Front curvature for a typical event, $\theta = 53.6^\circ$



- ▶ Data collected by TA surface detector for the five years:
2008-05-11 — 2013-05-04

Cuts:

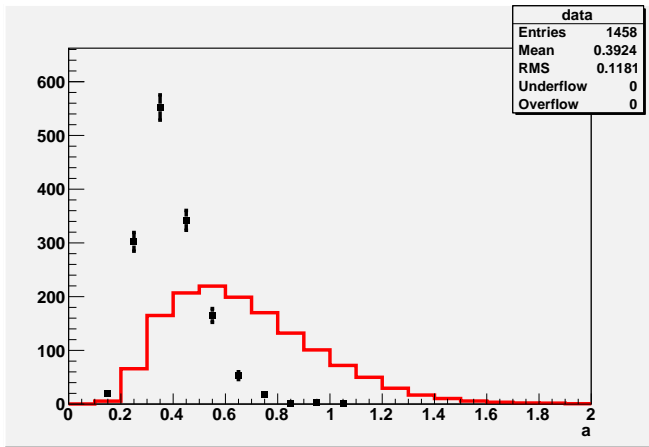
- ▶ 7 or more detectors triggered
- ▶ core distance to array boundary is larger than 1200m
- ▶ $\chi^2/\text{d.o.f.} < 5$
- ▶ $45^\circ < \theta < 60^\circ$
- ▶ $E_\gamma > 10^{19}$ eV
(E_γ is estimated for every event using photon Monte-Carlo)

1458 events after cuts

IV. Photon Monte-Carlo set

- ▶ CORSIKA with QGSJET-II-03, FLUKA and EGS4.
PRESHOWER for geomagnetic field cascading
- ▶ Thinning with weight optimisation ($\varepsilon = 10^{-6}$)
Kobal, Astropart.Phys.15:259,2001
- ▶ Dethinning technique is used
Stokes et al, oral #181, July 3rd, ICRC'13
Stokes et al, Astropart.Phys.35:759,2012
- ▶ Detector response is calculated with GEANT sampler
- ▶ $E \in [10^{18.4}, 10^{20.5}]$ eV, $\theta \in [0^\circ, 65^\circ]$, E^{-2} spectrum
- ▶ Same reconstruction code with exactly same cuts is applied to both data and Monte-Carlo sets

Linsley curvature "a": $E > 10^{19}$ eV, $45^\circ < \theta < 60^\circ$



data

photon MC

IV. Event-by-event method

- ▶ For each event with curvature a_{obs} we select photon MC events compatible by arrival direction and S_{800} .
- ▶ We calculate curvature distribution function $f_{\gamma}(a)$ for MC photons
- ▶ Let's define percentile rank of Linsley parameter a for photon primaries

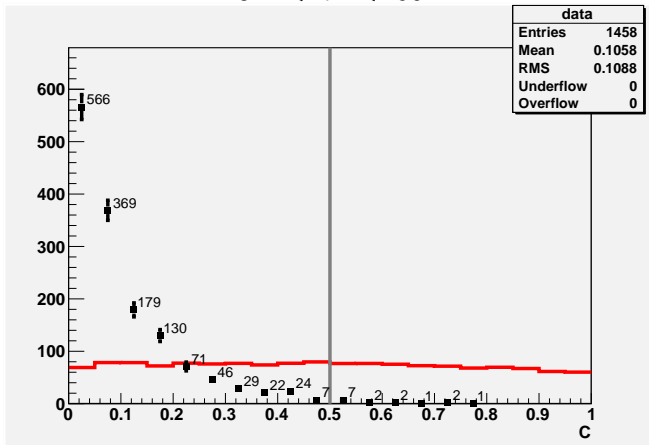
$$\mathcal{C} = \int_{-\infty}^{a_{obs}} f_{\gamma}(a) da$$

- ▶ \mathcal{C} is defined event-by-event (e.g. photon median: $\mathcal{C} = 0.5$)
- ▶ For γ events, \mathcal{C} is uniformly distributed between 0 and 1.

Gorbunov, GR, Troitsky, Astropart.Phys. 28:28-40

Telescope Array Collaboration, arXiv:1304.5614

$45^\circ < \theta < 60^\circ$



data photon MC

IV. Results

- ▶ Statistical test gives the maximum expected number of photons in the set \bar{N}_γ
- ▶ Exposure A is calculated using photon MC

$$E_\gamma > 10^{19.0} \text{ eV}, \quad \bar{N}_\gamma < 34.8, \quad A = 1254 \text{ km}^2 \text{ sr yr}$$

$$E_\gamma > 10^{19.5} \text{ eV}, \quad \bar{N}_\gamma < 8.7, \quad A = 1540 \text{ km}^2 \text{ sr yr}$$

$$E_\gamma > 10^{20.0} \text{ eV}, \quad \bar{N}_\gamma < 8.7, \quad A = 2091 \text{ km}^2 \text{ sr yr}$$

- ▶ $F_\gamma = \bar{N}_\gamma/A$

$$E_\gamma > 10^{19.0} \text{ eV}, \quad F_\gamma < 2.80 \cdot 10^{-2} \text{ km}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ yr}^{-1}$$

$$E_\gamma > 10^{19.5} \text{ eV}, \quad F_\gamma < 0.56 \cdot 10^{-2} \text{ km}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ yr}^{-1}$$

$$E_\gamma > 10^{20.0} \text{ eV}, \quad F_\gamma < 0.42 \cdot 10^{-2} \text{ km}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ yr}^{-1}$$

(95% CL) /PRELIMINARY/

IV. Photon flux limits

