Дубна
6 октября 2005

КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ СВЕРХВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

С.В. Троицкий (ИЯИ РАН)

- Что это такое и почему интересно
- Атмосферные ливни и экспериментальная информация
- Экспериментальные результаты: энергии, тип частиц, направления прихода
- Возможные астрофизические источники
- Распространение, проблемы (ГЗК и другие)
- Неастрофизические источники и новая физика

КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ СВЕРХВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

Энергии $\gtrsim 10^{19}$ *эВ*

СОБЫТИЕ С НАИБОЛЬШЕЙ ЭНЕРГИЕЙ:

$$E \simeq 3 \times 10^{20}\ \text{эВ} \simeq 50\ \text{Дж}$$

ПАДЕНИЕ 1 КГ С ВЫСОТЫ 5 МЕТРОВ. . . НЕТ, ЭЛЕМЕНТАРНАЯ ЧАСТИЦА!

ЧИСЛО СОБЫТИЙ:

$E \gtrsim 10^{19}$ эВ, НЕСКОЛЬКО ТЫСЯЧ, 1960 — ...

$E \gtrsim 10^{20}$ эВ, НЕСКОЛЬКО ДЕСЯТКОВ, 1963 — ...

ПОЧЕМУ ЭТО ИНТЕРЕСНО?

- САМЫЕ ВЫСОКИЕ ЭНЕРГИИ
  - энергия в сцм больше, чем на имеющихся или планируемых ускорителях
  - изучение взаимодействий при этих энергиях?

  НО:
  - малая светимость
  - небольшие переданные импульсы
- ПРОИСХОЖДЕНИЕ ЧАСТИЦ С $E > (10^{18} \dots 10^{19})$ эВ

  — ИНОЕ, ЧЕМ ПРИ МЕНЬШИХ E (ВНЕГАЛАКТИЧЕСКАЯ КОМПОНЕНТА)
- ТРУДНО УСКОРИТЬ ЧАСТИЦЫ
- ТРУДНО НЕ ПОТЕРЯТЬ ЭНЕРГИЮ, ПОКА ЛЕТЯТ ДО ЗЕМЛИ

НАБЛЮДЕНИЕ: ШИРОКИЕ АТМОСФЕРНЫЕ ЛИВНИ

- взимодействие первичной частицы с атомами воздуха в верхних слоях атмосферы
- лавинообразное развитие каскада частиц
- у поверхности Земли –

  миллиарды частиц на площади несколько квадратных километров

НИКТО НЕ ВИДИТ ПЕРВУЮ ЧАСТИЦУ

$\Rightarrow$ косвенные методы определения ее энергии ($\pm 30\%$)

$\Rightarrow$ что за частица — ?

(заметная часть – протоны)

$\Rightarrow$ направление прилета

— известно надежнее всего, но точность все же невелика

ШИРОКИЕ АТМОСФЕРНЫЕ ЛИВНИ

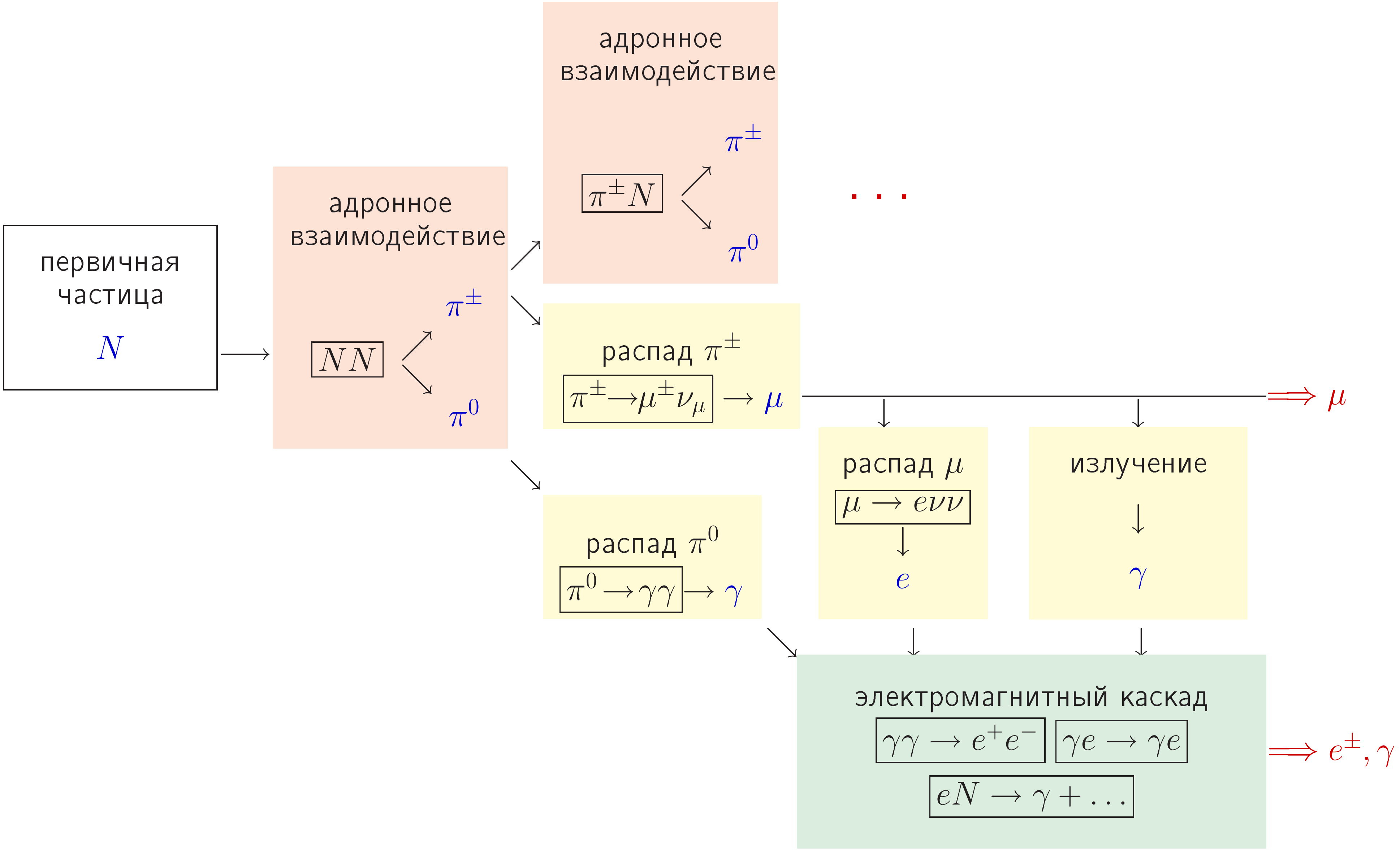
Развитие ливня:

многое известно, несмотря на экстраполяцию до высоких энергий

- первое взаимодействие:
  - высокая энергия – неопределенность
  - тип первичной частицы – неопределенность
  - флуктуации
- подобие (много частиц – флуктуации сглажены):
  - тип первичной частицы
  - энергия первичной частицы
  - глубина и мультиплетность первого взаимодействия
- единица измерения глубины атмосферы г/см^2
  - глубина атмосферы по вертикали примерно 1000 г/см^2

ШИРОКИЕ АТМОСФЕРНЫЕ ЛИВНИ

развитие ливня, вызванного нуклоном или ядром:



РАЗВИТИЕ АТМОСФЕРНОГО ЛИВНЯ

АДРОННЫЙ КАСКАД:

- мультиплетность $\sim 10^1$–10^2
- энергия быстро теряется
- затухает на $X \sim 200 \ldots 600$ г/см^2

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ КАСКАД:

- мультиплетность $= 2$
- затухает на $X \sim 400 \ldots 1500$ г/см^2

МЮОННЫЙ ХВОСТ:

- тянется на $X \gg 1000$ г/см^2

В наклонных ливнях поверхности Земли достигают одни мюоны!

ПРОДОЛЬНОЕ РАЗВИТИЕ ЛИВНЯ:

УНИВЕРСАЛЬНОСТЬ!

(пренебрежем распадами и зависящими от энергии эффектами среды – справедливо для электромагнитного каскада)

число заряженных частиц:

$$N_e = \mathrm{const}\, E \left(\frac{X - X_0}{X_{\max} - X_0} \right)^{\frac{X_{\max} - X}{a}} \exp \left(\frac{X_{\max} - X}{a} \right)$$

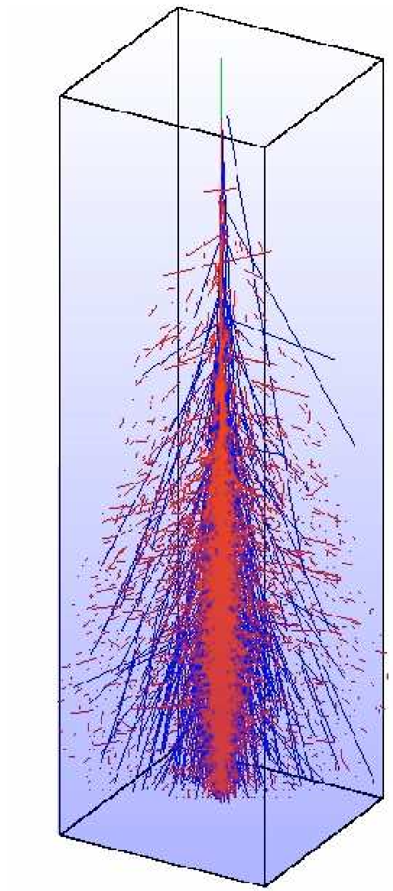
Gaisser, Hillas

$a \approx 70$ г/см^2

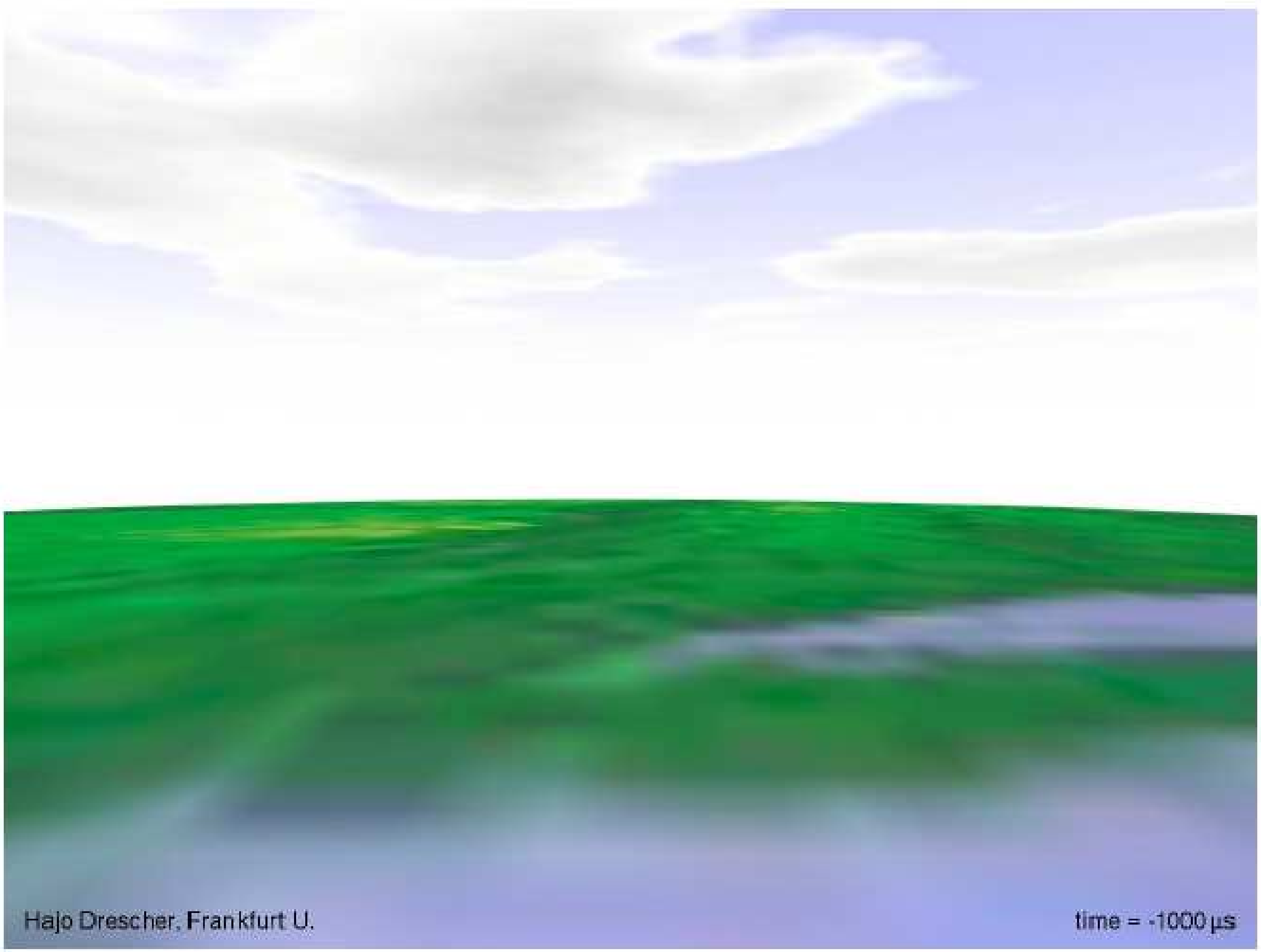
X_0 – глубина первого взаимодействия (флуктуирует, знает о первичной частице)

$X_{\max}$ – глубина максимального развития ливня (логарифмически растет с энергией и знает о первичной частице)

ПРОДОЛЬНОЕ РАЗВИТИЕ ЛИВНЯ



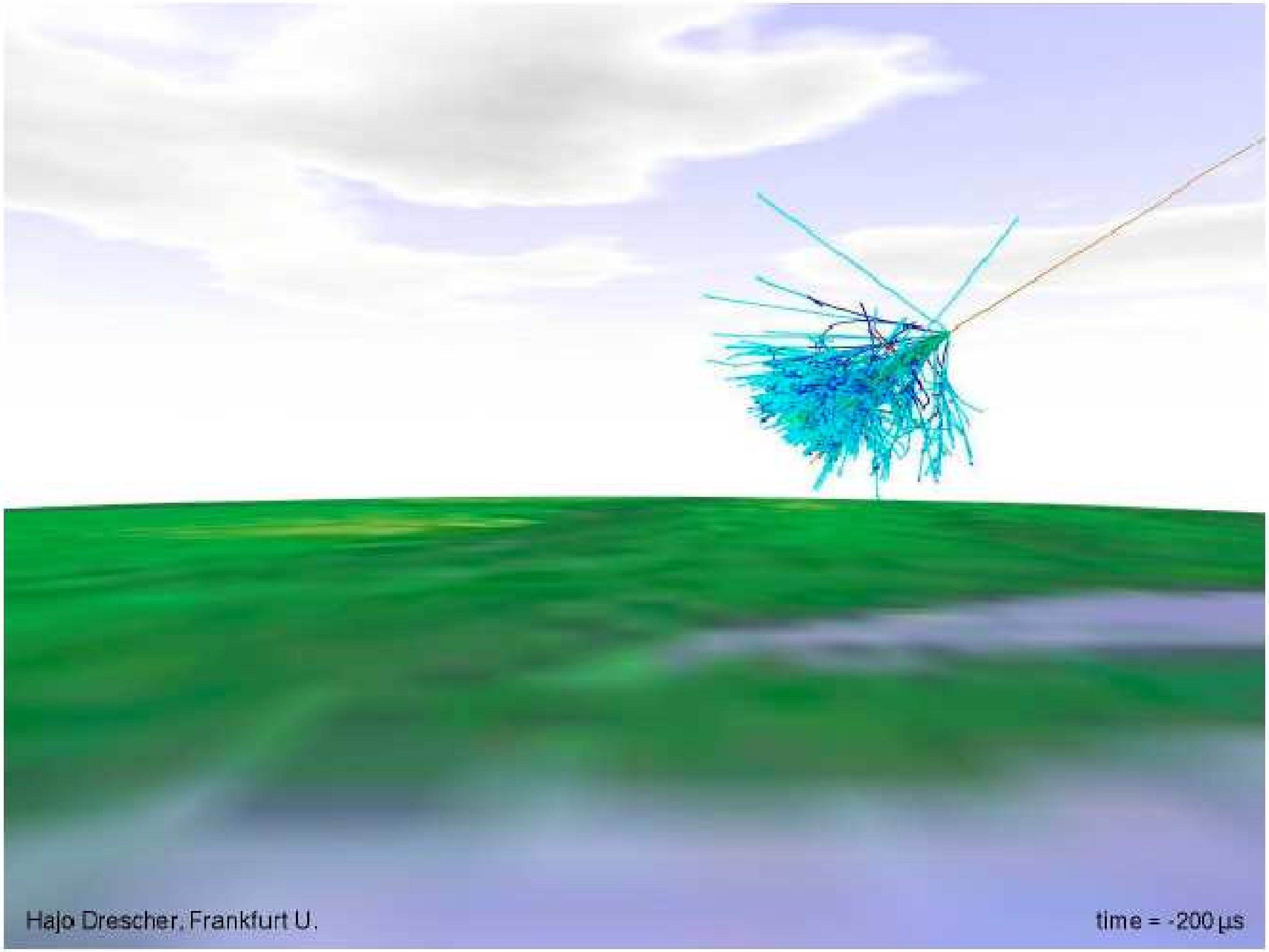
ПРОДОЛЬНОЕ РАЗВИТИЕ ЛИВНЯ



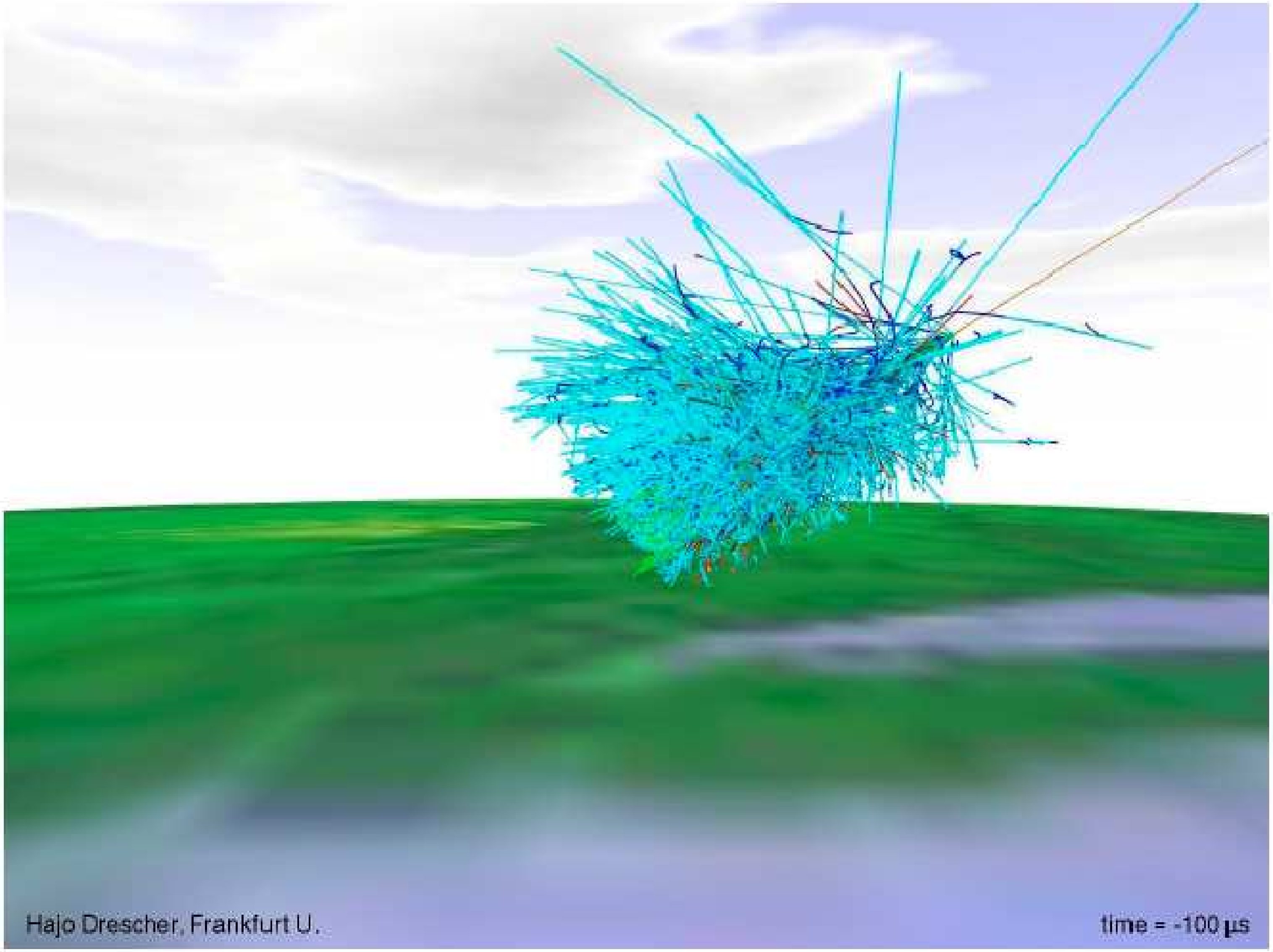
ПРОДОЛЬНОЕ РАЗВИТИЕ ЛИВНЯ

ПРОДОЛЬНОЕ РАЗВИТИЕ ЛИВНЯ

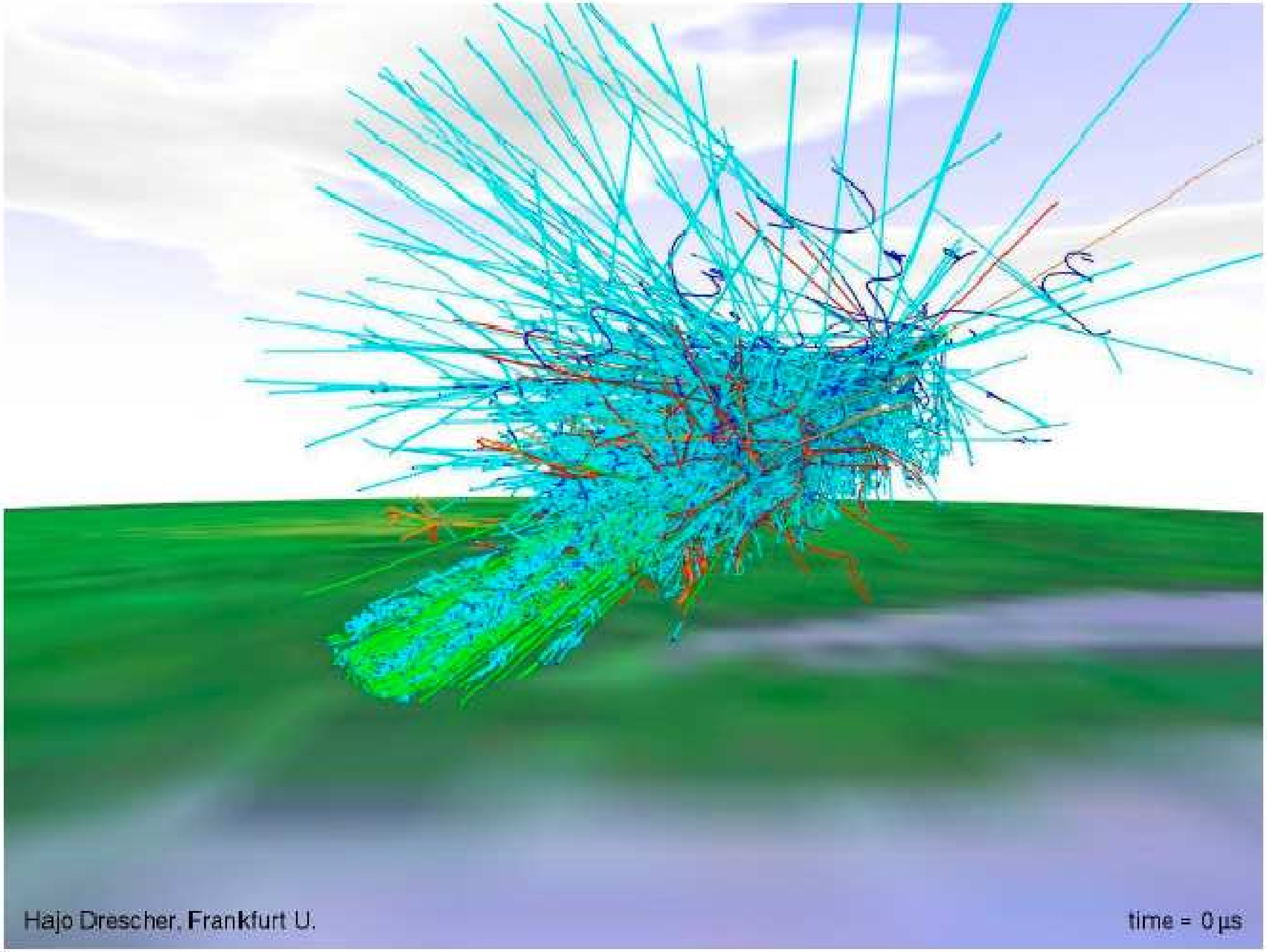
ПРОДОЛЬНОЕ РАЗВИТИЕ ЛИВНЯ



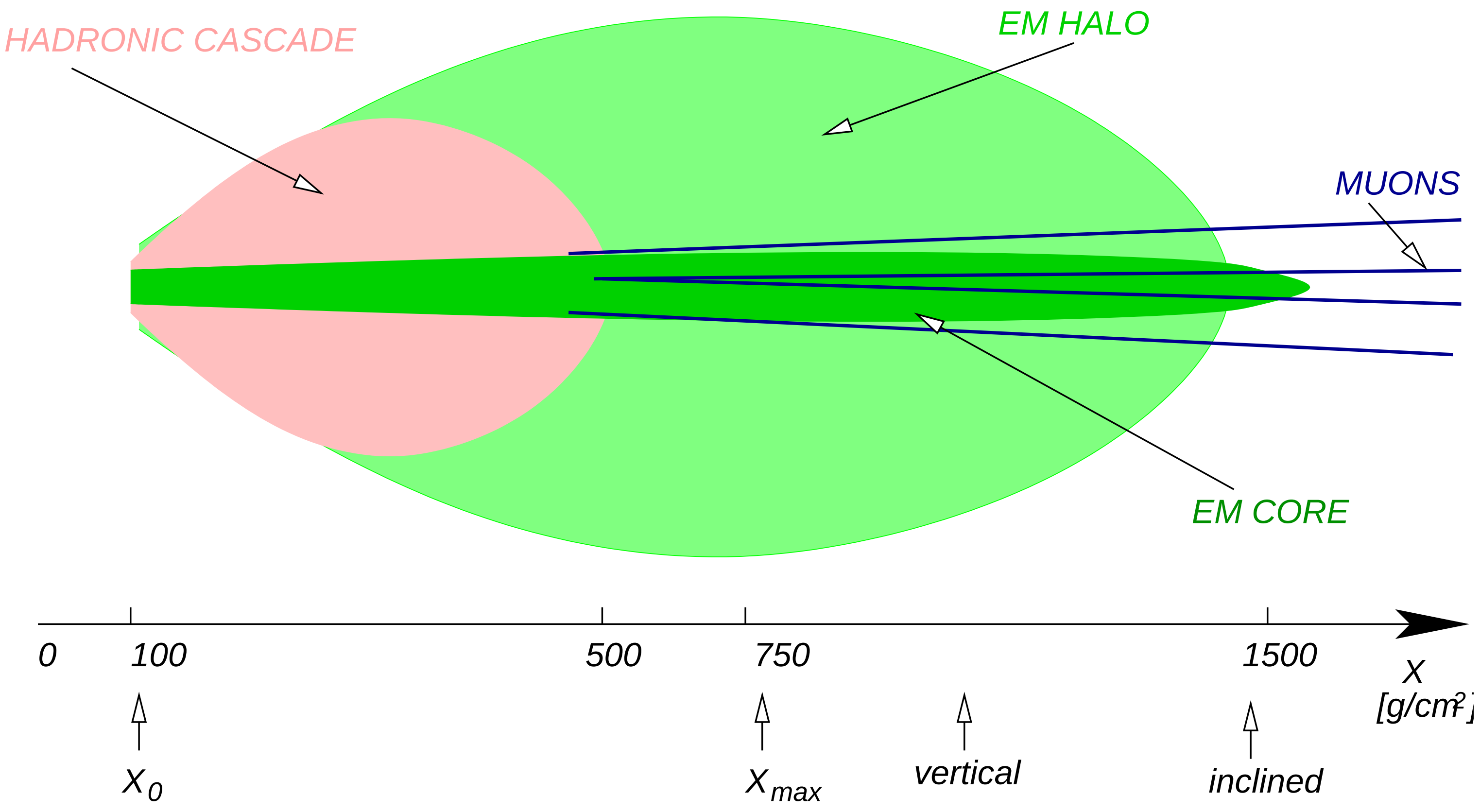
ПРОДОЛЬНОЕ РАЗВИТИЕ ЛИВНЯ



ПРОДОЛЬНОЕ РАЗВИТИЕ ЛИВНЯ



ПРОДОЛЬНОЕ РАЗВИТИЕ ЛИВНЯ



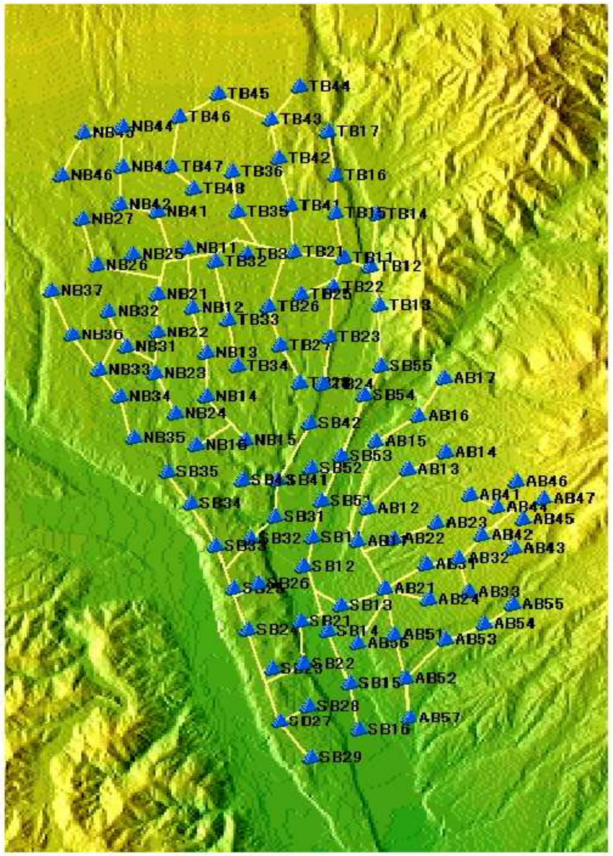
КАК ИЗВЛЕЧЬ ИНФОРМАЦИЮ?

- о первичной частице
  - только косвенные данные
  - использование моделей взаимодействия и Монте-Карло
- о промежуточных взаимодействиях
  - взаимодействия в неизвестной области — только самые первые

НАБЛЮДАЕМЫЕ: НАЗЕМНАЯ РЕШЕТКА ДЕТЕКТОРОВ

ДЕТЕКТОРЫ ПОКРЫВАЮТ БОЛЬШУЮ ПЛОЩАДЬ

(ЧТОБЫ СОБРАТЬ РЕДКИЕ СОБЫТИЯ: $E \sim 10^{20}$ *эВ — 1 событие на 1* $\textit{км}^2$ *в 100 лет*)



НАБЛЮДАЕМЫЕ: НАЗЕМНАЯ РЕШЕТКА ДЕТЕКТОРОВ

информация о каждом событии:

- плотность частиц (двумерный срез)
- отдельно: плотность мюонов (закопать)
- временны́е характеристики

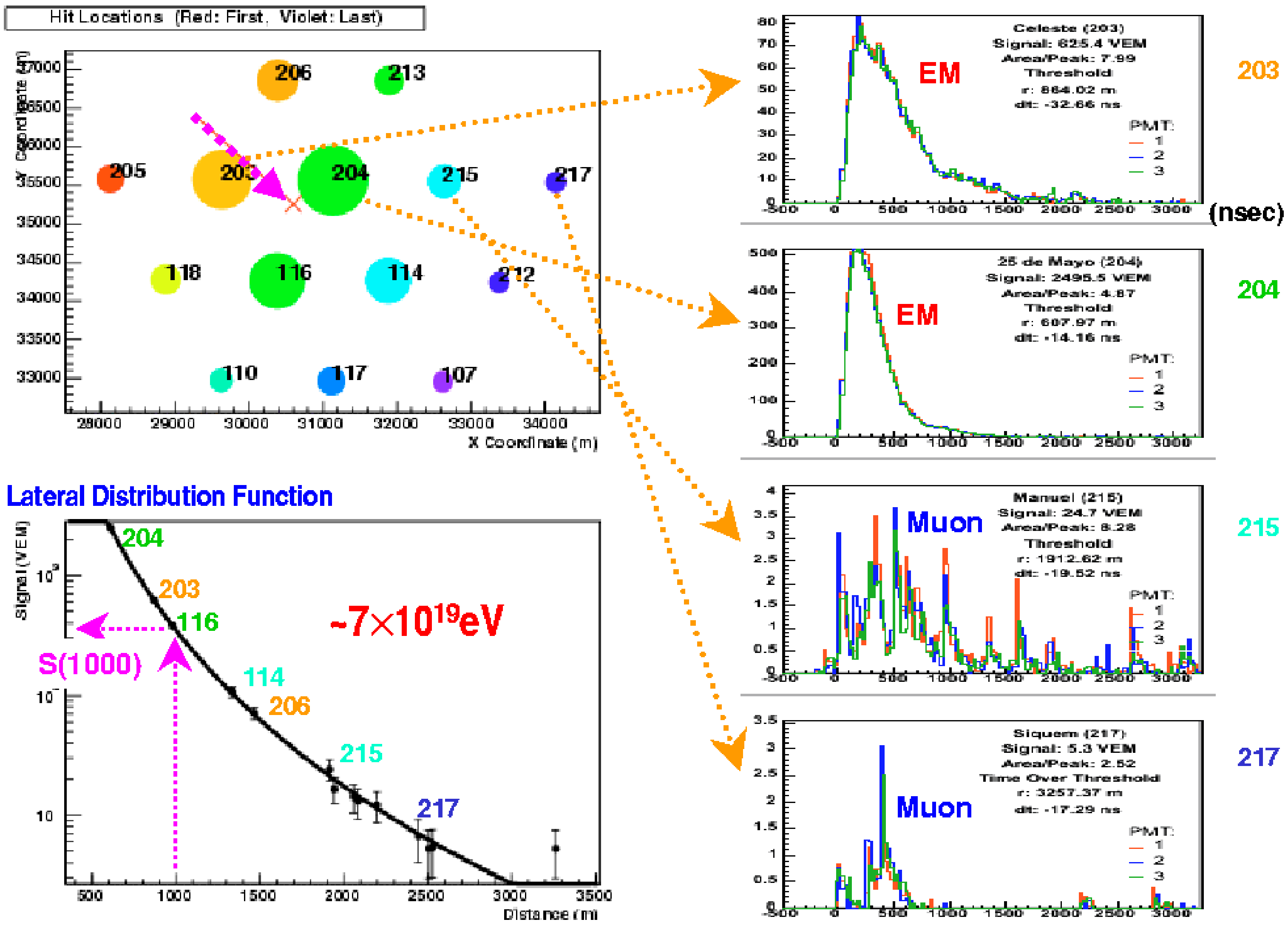
восстанавливается:

- направление прилета
- функция пространственного распределения частиц на срезе
- форма фронта

возможно:

- черенковский сигнал
  - частые детекторы, меньшие энергии (Якутск)

НАБЛЮДАЕМЫЕ: НАЗЕМНАЯ РЕШЕТКА ДЕТЕКТОРОВ



НАБЛЮДАЕМЫЕ: НАЗЕМНАЯ РЕШЕТКА ДЕТЕКТОРОВ

статистическая информация:

- зависимость от зенитного угла (то есть от X)
- зависимость от числа частиц (то есть $\sim$ от энергии)

$$\Downarrow$$

устанавливают законы

$$\Downarrow$$

применяют их к отдельным событиям

НАБЛЮДАЕМЫЕ: ФЛЮОРЕСЦЕНТНЫЙ ТЕЛЕСКОП

возбуждение атомов азота в атмосфере

$\Downarrow$

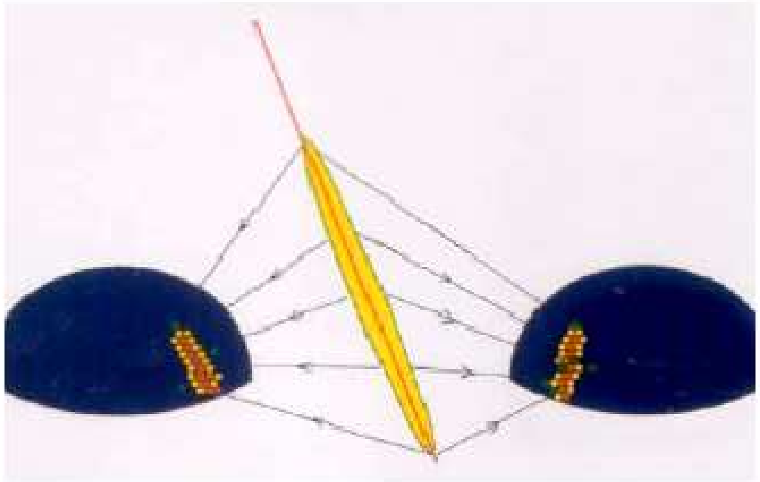
флюоресцентное излучение (ультрафиолет)

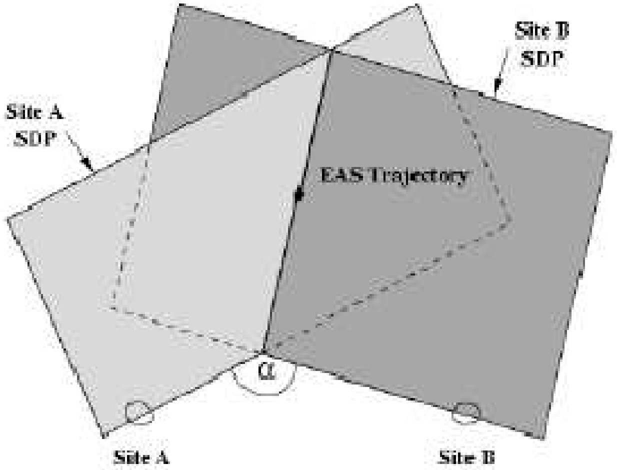
$\Downarrow$

специальные телескопы видят след (как метеор)

могут наблюдать развитие ливня, а не только срез на уровне Земли

НАБЛЮДАЕМЫЕ: ФЛЮОРЕСЦЕНТНЫЙ ТЕЛЕСКОП





НАБЛЮДАЕМЫЕ: ФЛЮОРЕСЦЕНТНЫЙ ТЕЛЕСКОП

информация о каждом событии:

- количество света с данного направления ...
- ...и в данный момент

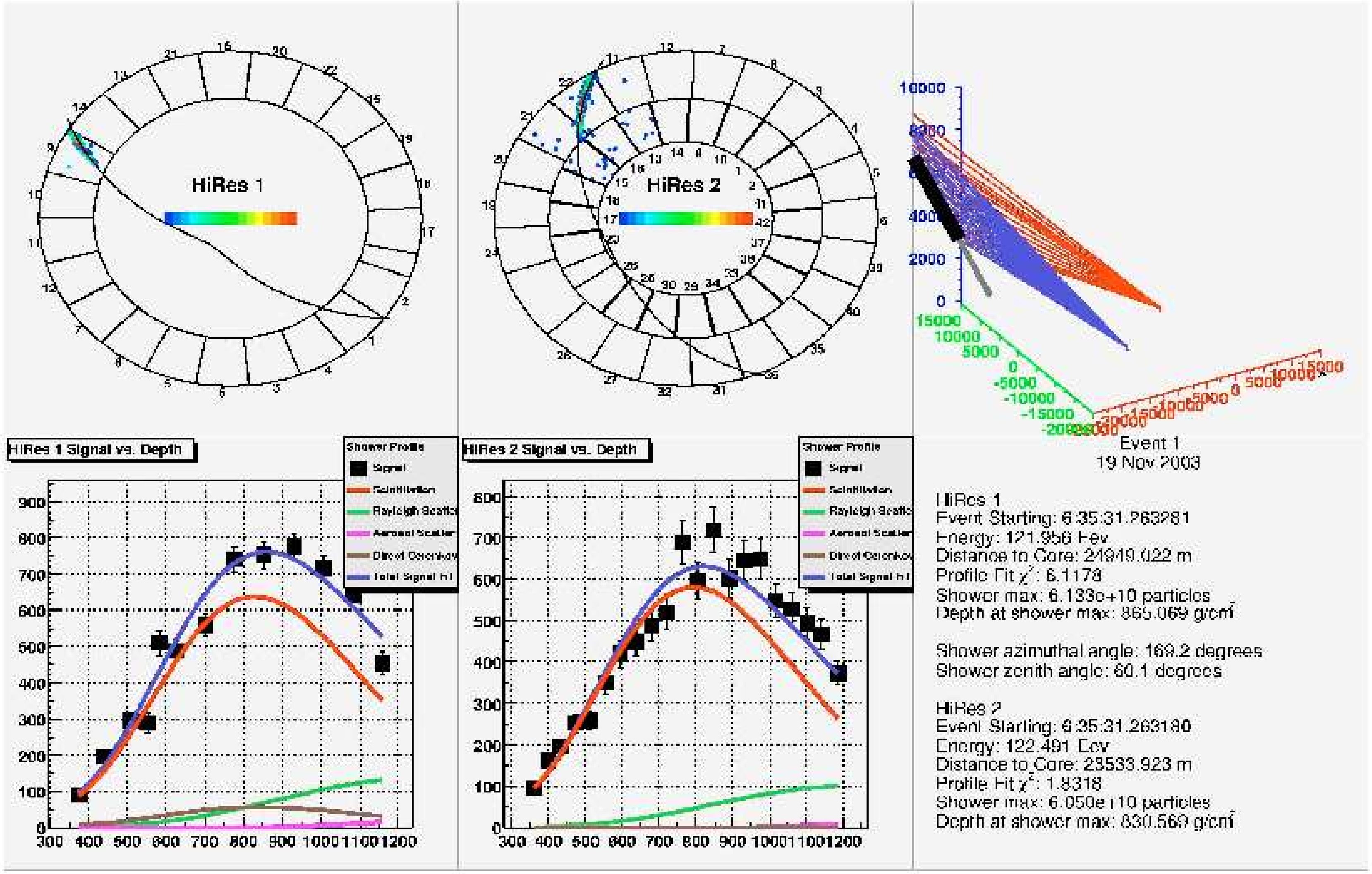
восстанавливается:

- полная энергия, отданная на возбуждение атомов азота
- продольное развитие ливня
- (стерео) $\Rightarrow$ направление прилета

замечания:

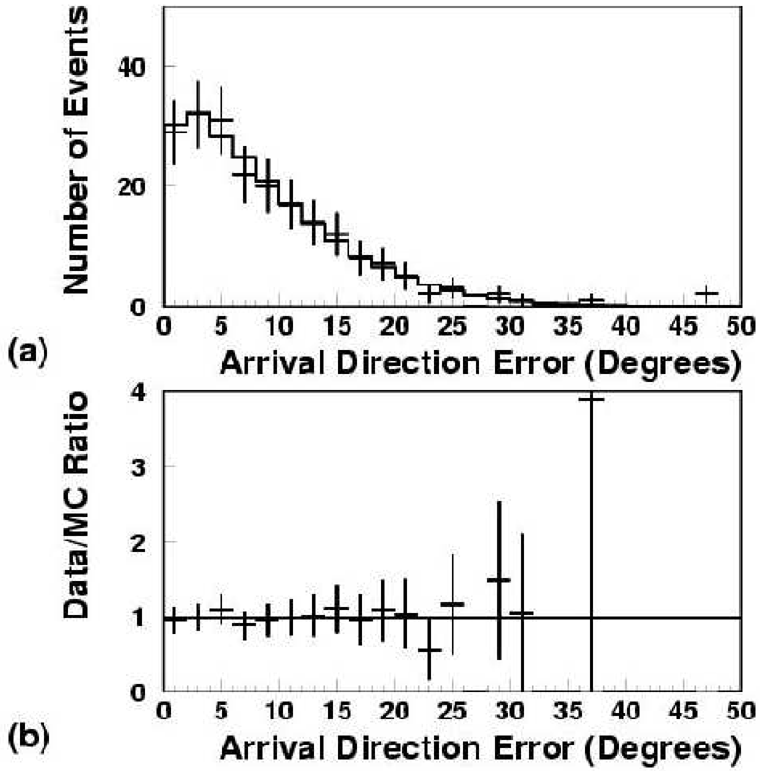
- "калориметрический" метод – менее модельно зависим
- работает только в ясные безлунные ночи ($\sim 10\%$ времени)

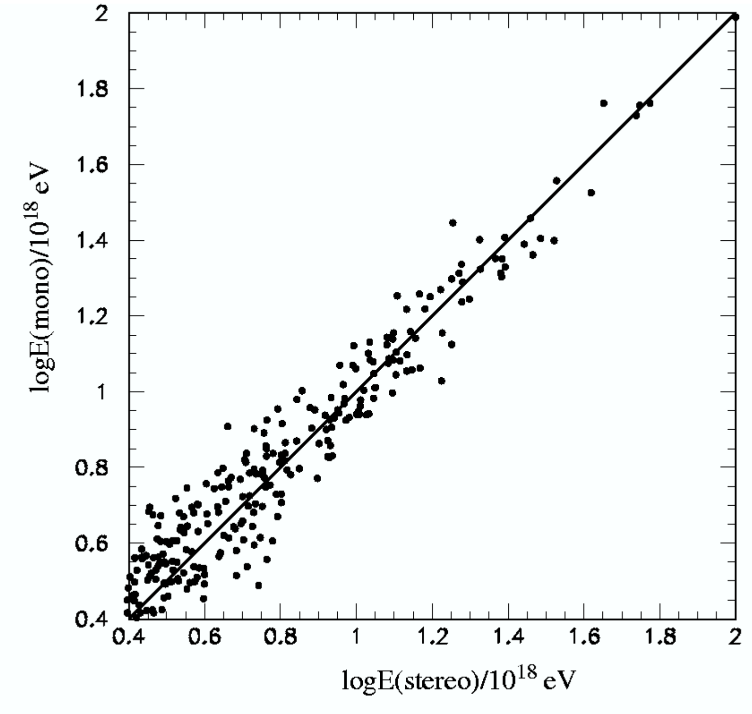
НАБЛЮДАЕМЫЕ: ФЛЮОРЕСЦЕНТНЫЙ ТЕЛЕСКОП



НАБЛЮДАЕМЫЕ: ФЛЮОРЕСЦЕНТНЫЙ ТЕЛЕСКОП

(моно) плохое направление прилета – плохая энергия и все остальное





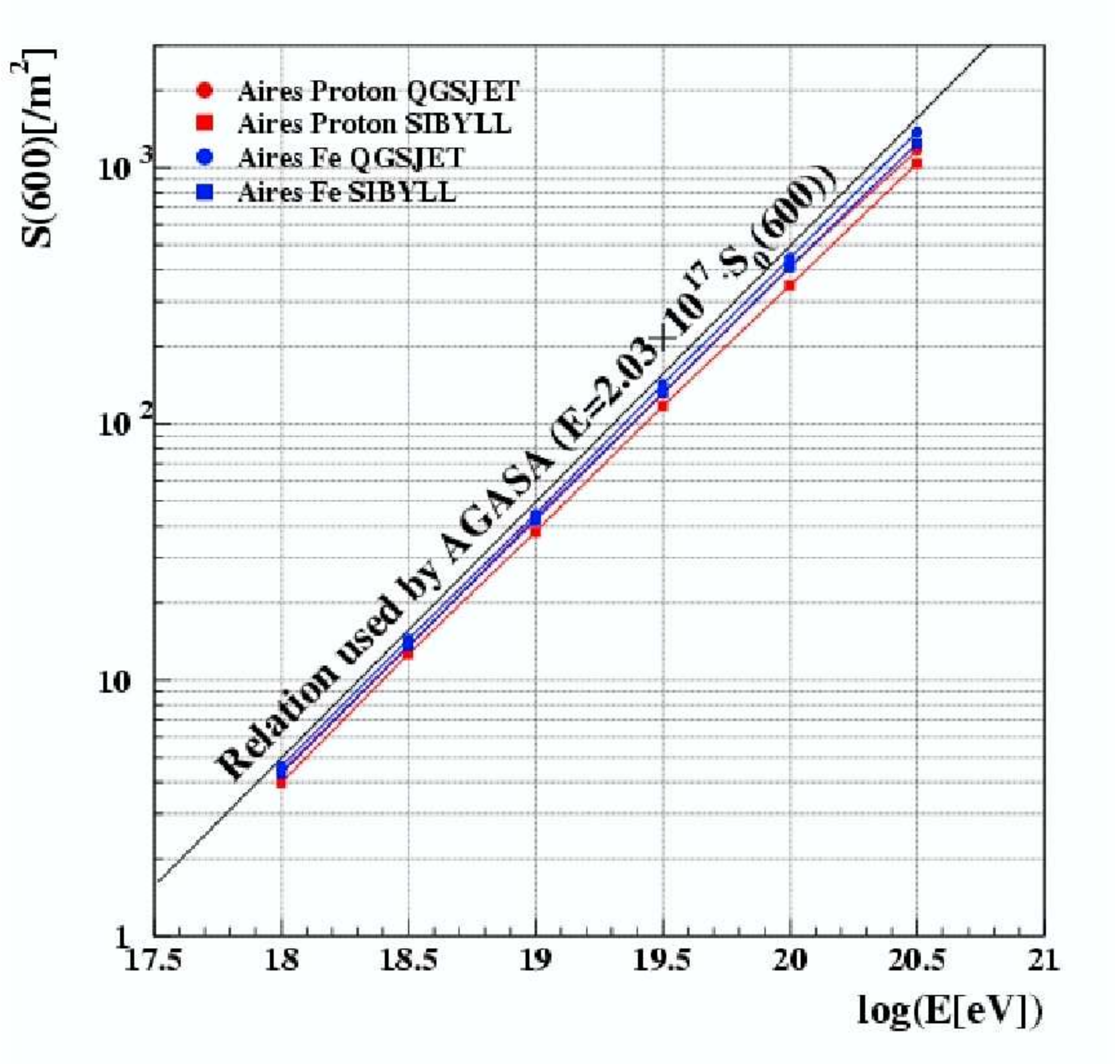
гибридный метод: (моно) флюоресцентный детектор плюс наземная решетка

НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ В ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

- УСРЕДНЕНИЕ
- МОДЕЛЬНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ
  - в развитии ливня
  - в правилах анализа
- ФЛУКТУАЦИИ
  - первое взаимодействие
  - мелкомасштабные (порядка размера детектора)
- эффекты селекции

НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ В ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

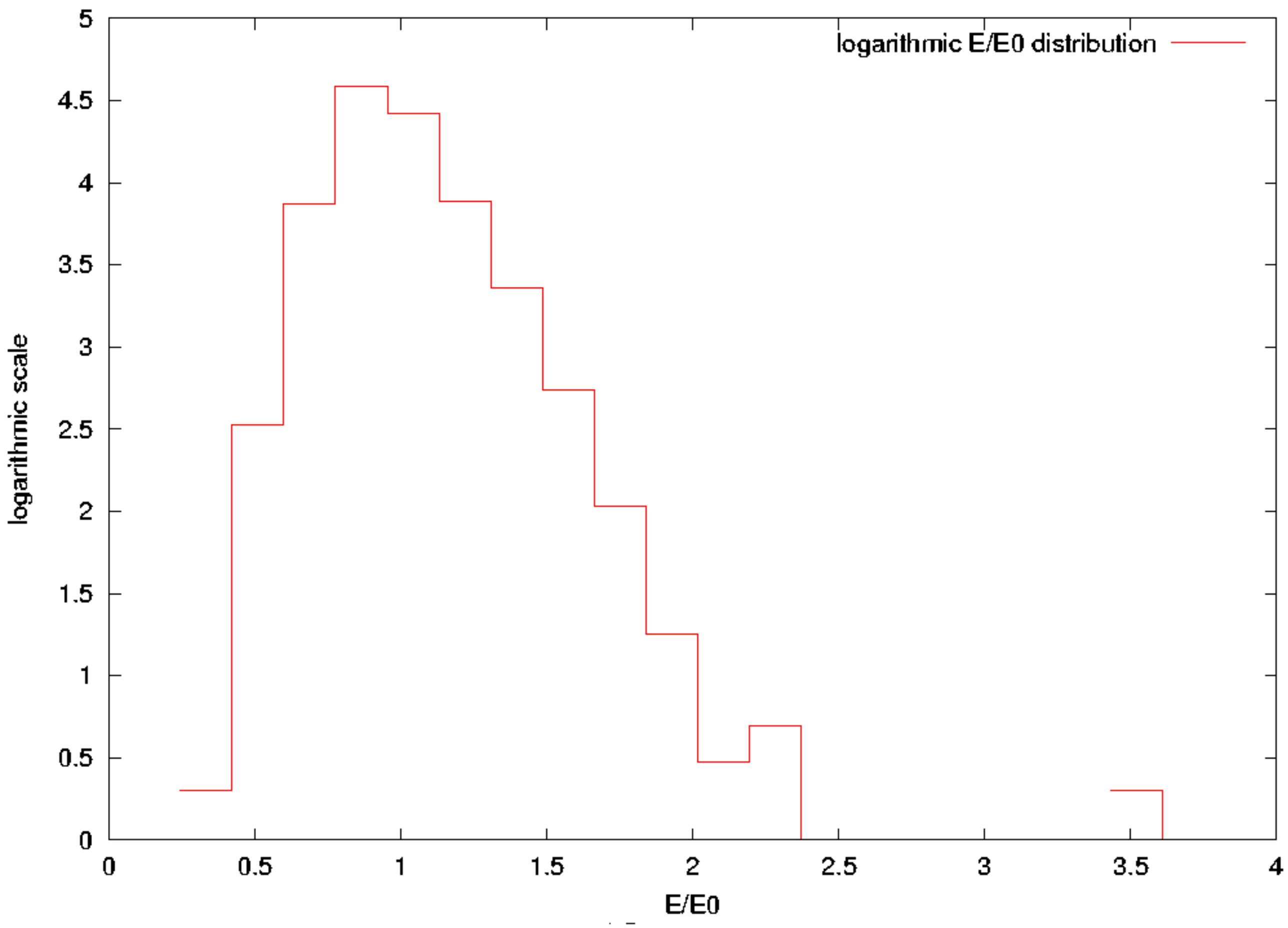
модельная зависимость



НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ В ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

НАЗЕМНЫЕ РЕШЕТКИ: МЕЛКОМАСШТАБНЫЕ ФЛУКТУАЦИИ

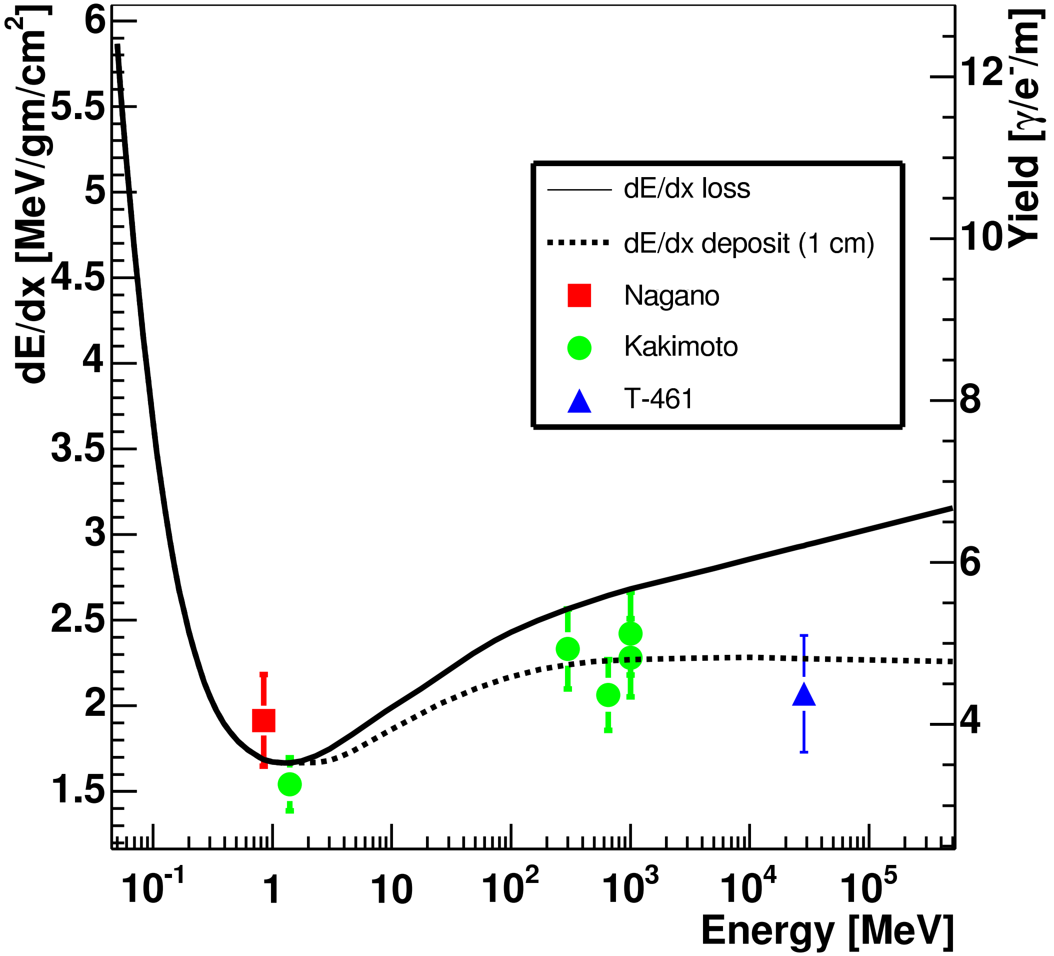
энергия одного ливня, по-разному упавшего на детекторы



НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ В ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

ФЛЮОРЕСЦЕНТНЫЕ ТЕЛЕСКОПЫ:

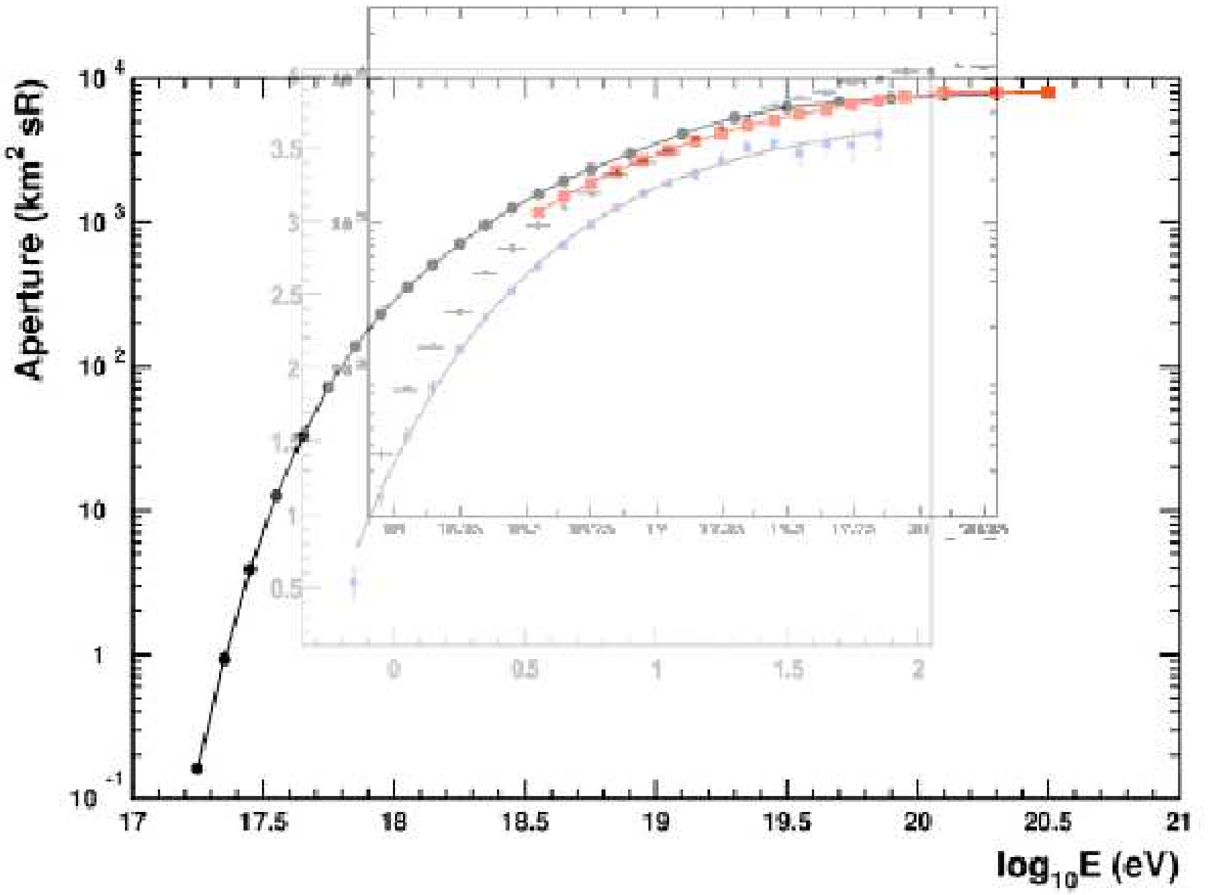
- неопределенность fluorescent yield



НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ В ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

ФЛЮОРЕСЦЕНТНЫЕ ТЕЛЕСКОПЫ:

- экспозиция зависит от энергии и трудно моделируема



ЭКСПЕРИМЕНТЫ: ПРОШЛОЕ

наземные решетки:

Volcano Ranch (1959–1963)

Haverah Park (1968–1987)

SUGAR (1968–1979)

AGASA (1990–2003)

флюоресцентный телескоп:

Fly's Eye (1981–1992)

ЭКСПЕРИМЕНТЫ: НАСТОЯЩЕЕ

наземная решетка:

Якутск (с 1974)

флюоресцентный телескоп:

HiRes (High Resolution Fly's Eye, с 1998)

гибридная установка:

Pierre Auger (с 2003)

ЭКСПЕРИМЕНТЫ: БУДУЩЕЕ

гибридная установка:

Telescope Array (строится)

флюоресцентные телескопы на орбите:

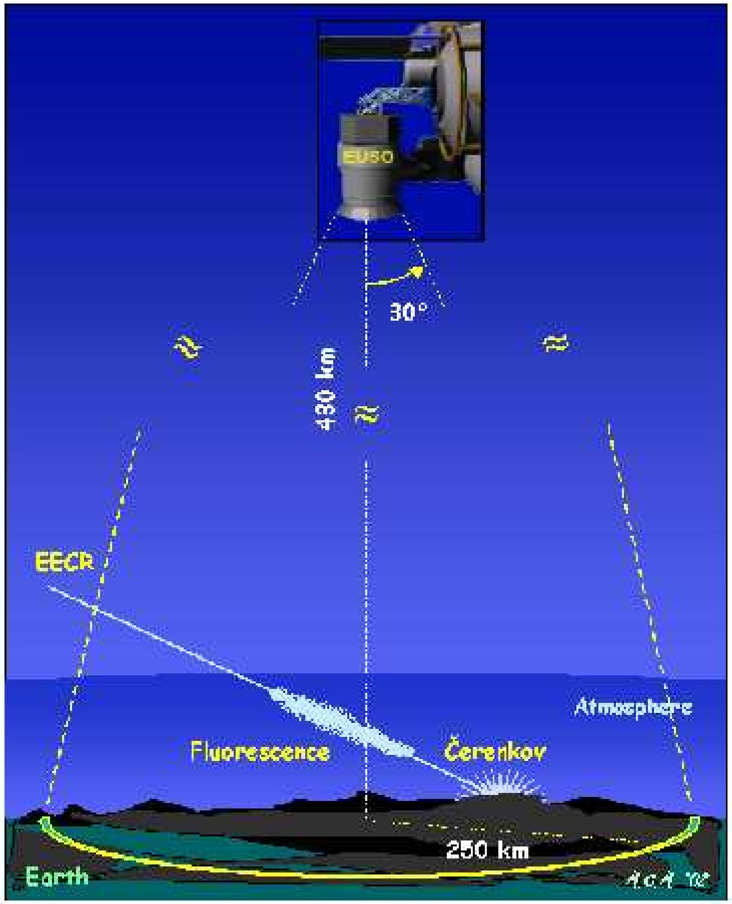
EUSO (обсуждается финансирование)

OWL (не обсуждается финансирование)

ТУС (прототип на спутнике “Татьяна”)

ЭКСПЕРИМЕНТЫ: БУДУЩЕЕ

флюоресцентные телескопы на орбите:



ЭКСПЕРИМЕНТЫ: БУДУЩЕЕ

флюоресцентные телескопы на орбите:

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

- РАЗВИТИЕ ЛИВНЕЙ
- ПЕРВИЧНЫЕ ЧАСТИЦЫ:
  - энергии $\leftrightarrow$ спектр
  - тип частиц (“химический состав”)
  - распределение направлений прилета

РЕЗУЛЬТАТЫ: РАЗВИТИЕ ЛИВНЕЙ

- ПРОДОЛЬНОЕ РАЗВИТИЕ ЛИВНЯ:
  - наземные решетки — зависимость от зенитного угла (усреднение)
  - флюоресцентные телескопы — развитие каждого ливня
- ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЧАСТИЦ
- СТРУКТУРА ФРОНТА ЛИВНЯ
- ДОЛЯ И ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МЮОНОВ

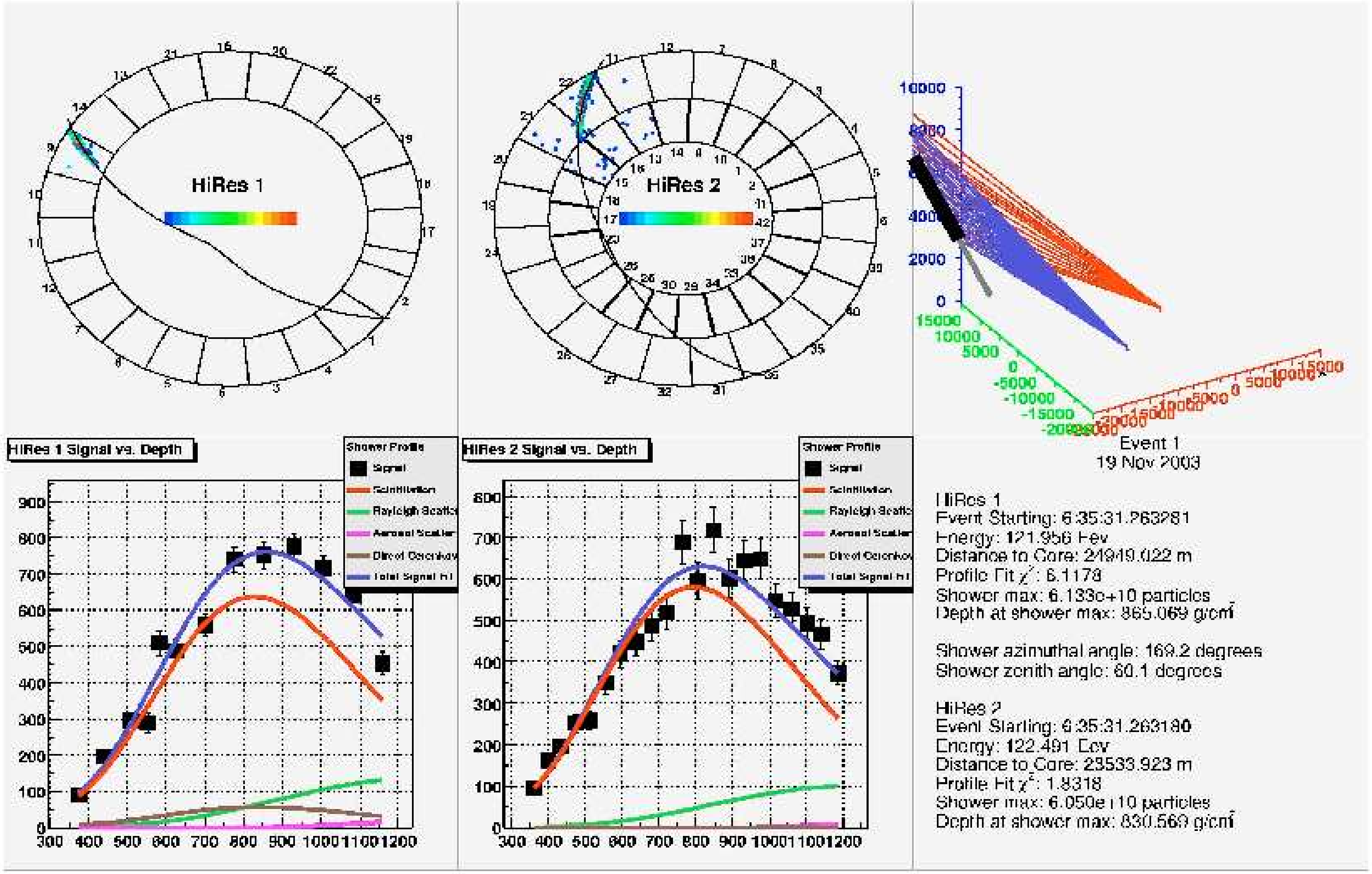
ВЫВОД:

при энергиях до $\sim 5 \cdot 10^{19}$ эВ, где большая статистика,

РАЗВИТИЕ СРЕДНЕСТАТИСТИЧЕСКОГО ЛИВНЯ СООТВЕТСТВУЕТ ОЖИДАНИЯМ

РЕЗУЛЬТАТЫ: РАЗВИТИЕ ЛИВНЕЙ

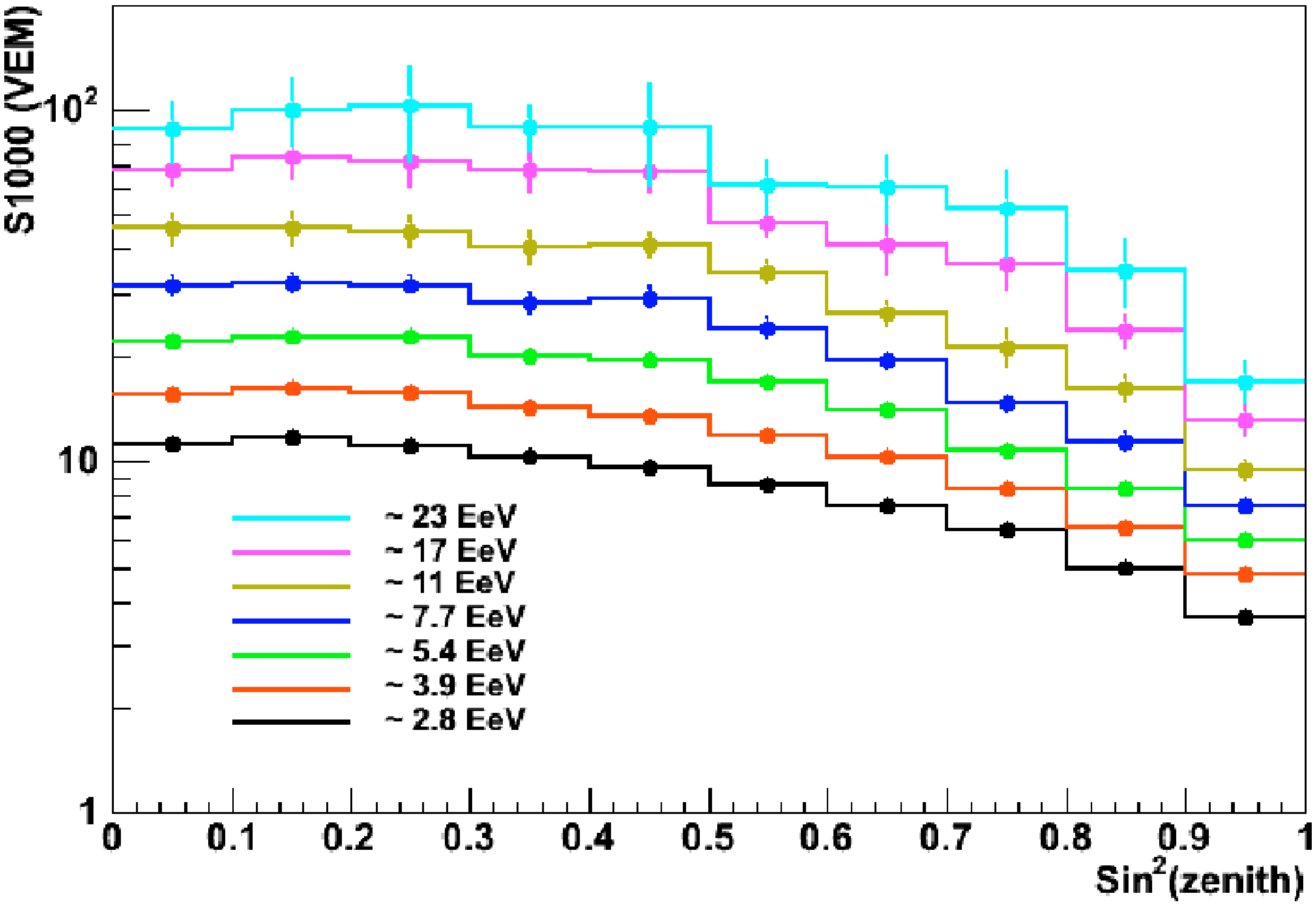
ПРОДОЛЬНОЕ РАЗВИТИЕ ЛИВНЯ:



РЕЗУЛЬТАТЫ: РАЗВИТИЕ ЛИВНЕЙ

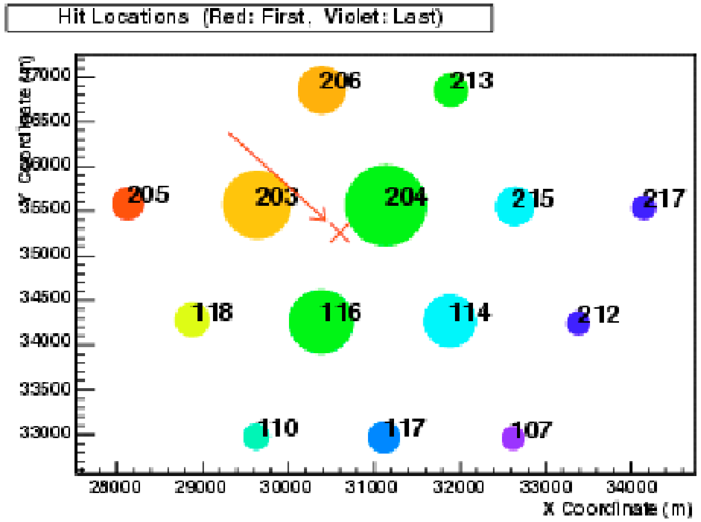
ПРОДОЛЬНОЕ РАЗВИТИЕ ЛИВНЯ:

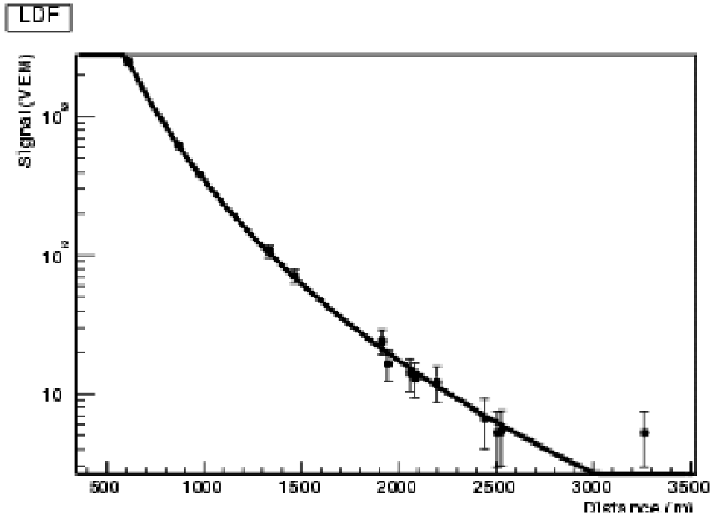
—



РЕЗУЛЬТАТЫ: РАЗВИТИЕ ЛИВНЕЙ

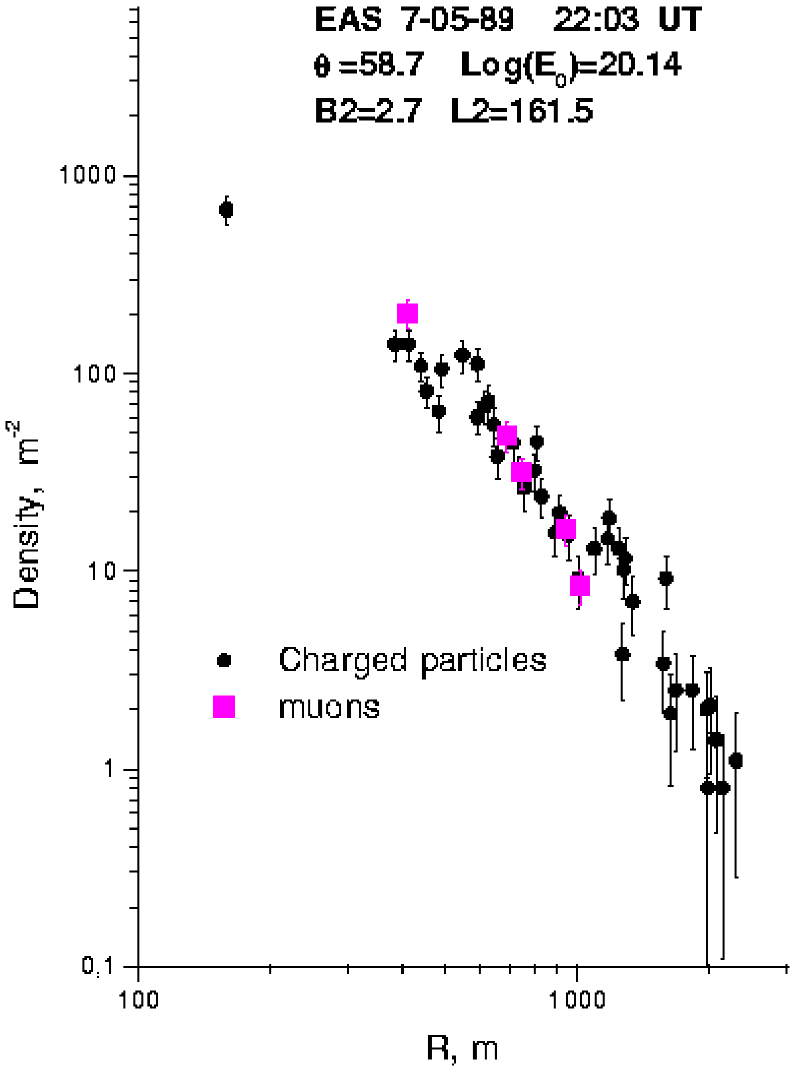
ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ:





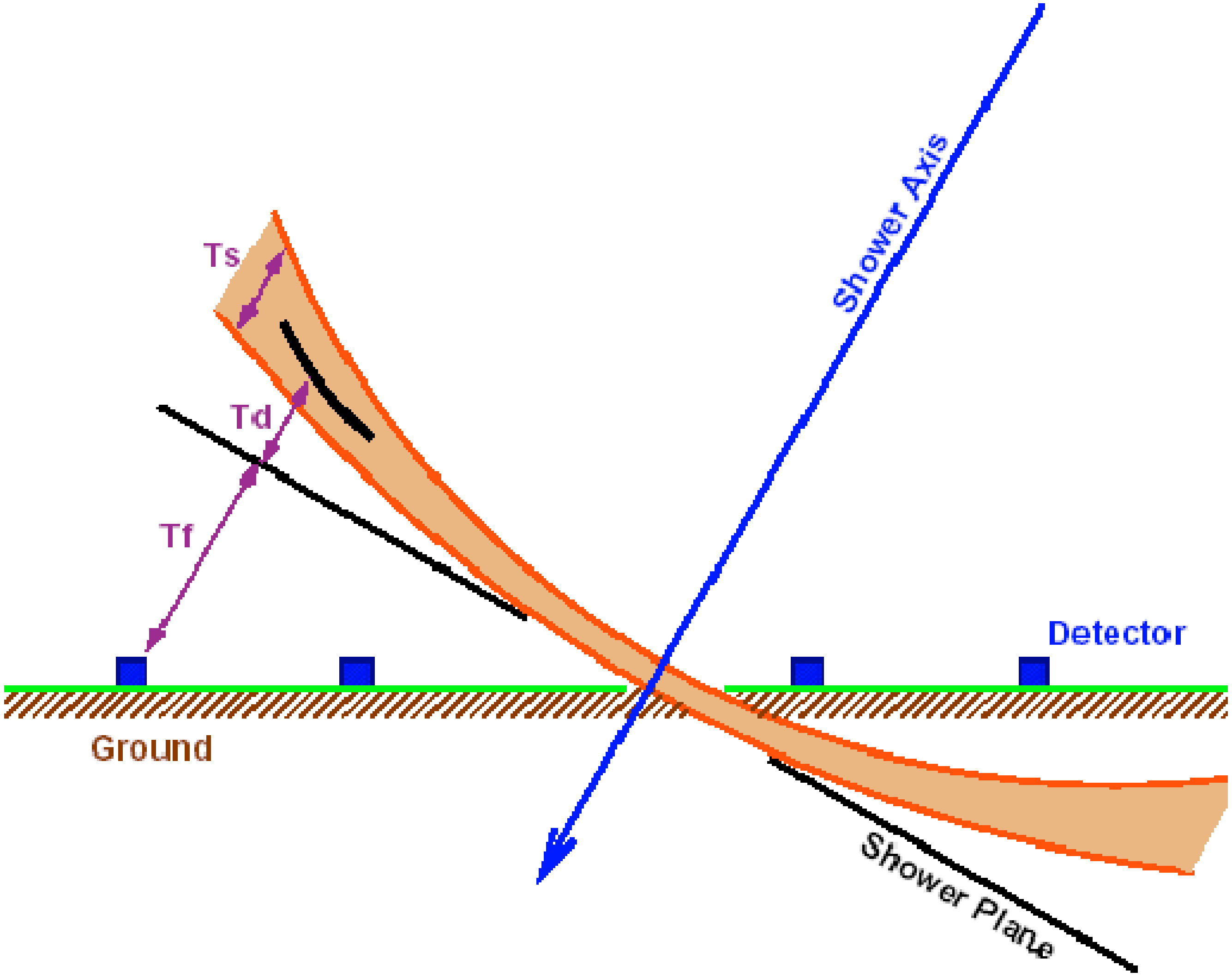
РЕЗУЛЬТАТЫ: РАЗВИТИЕ ЛИВНЕЙ

ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ И МЮОННАЯ КОМПОНЕНТА:



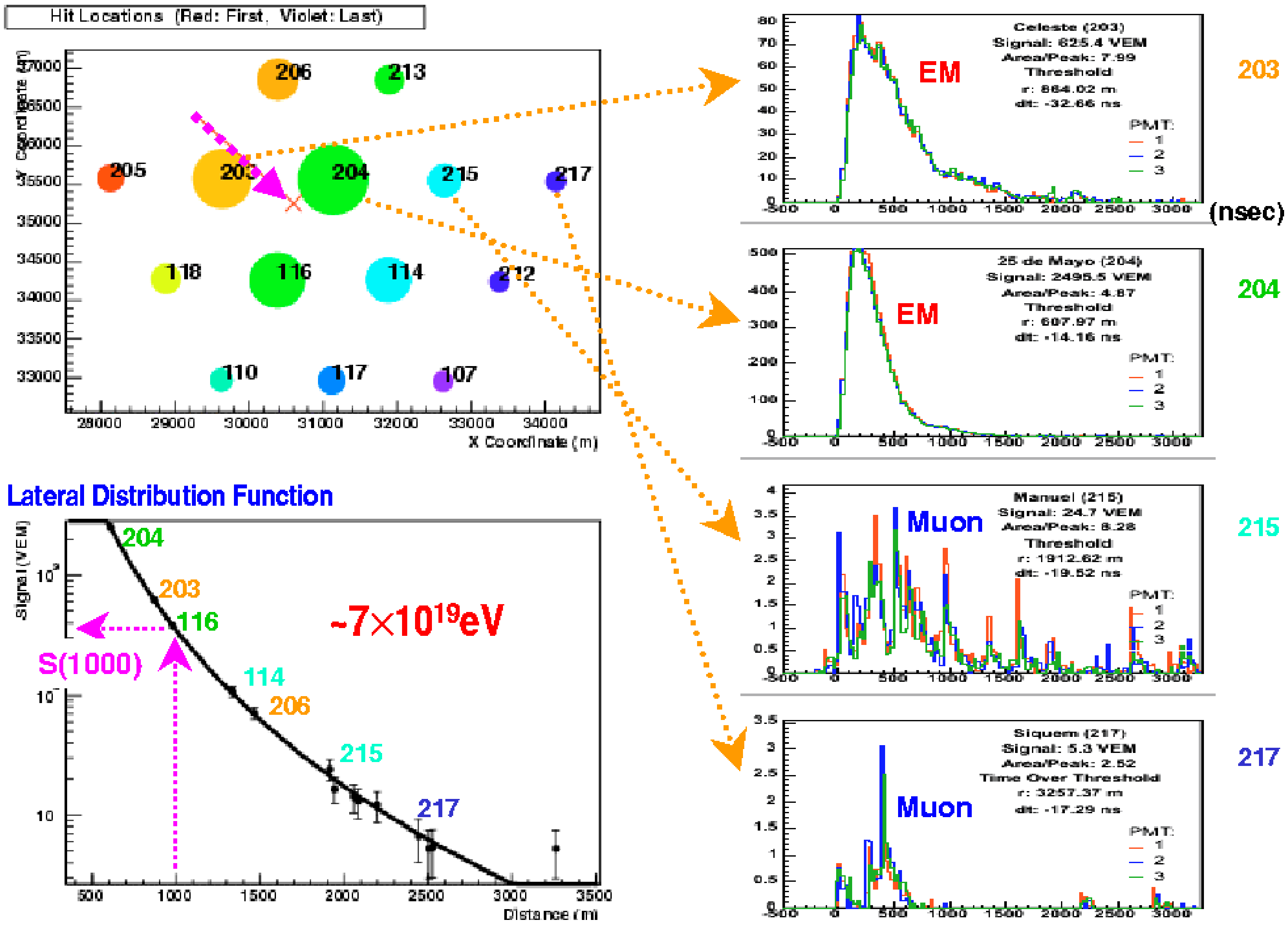
РЕЗУЛЬТАТЫ: РАЗВИТИЕ ЛИВНЕЙ

СТРУКТУРА ФРОНТА:



РЕЗУЛЬТАТЫ: РАЗВИТИЕ ЛИВНЕЙ

СТРУКТУРА ФРОНТА:

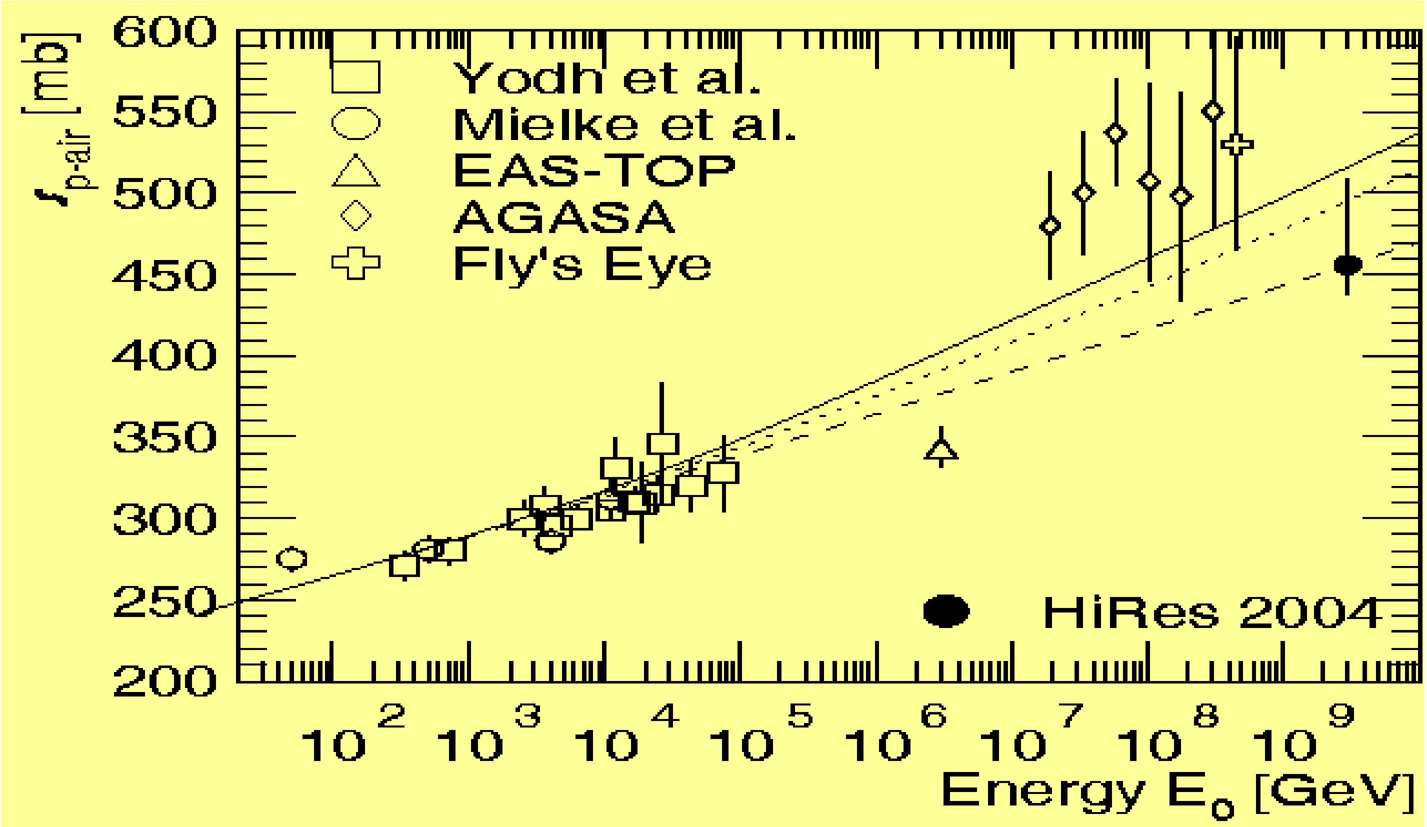


РЕЗУЛЬТАТЫ: РАЗВИТИЕ ЛИВНЕЙ

ПРЕДПОЛОЖЕНИЯ О ХИМИЧЕСКОМ СОСТАВЕ

$\Downarrow$

“ИЗМЕРЕНИЕ” ПРОТОН-ЯДЕРНОГО СЕЧЕНИЯ ПРИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЯХ



РЕЗУЛЬТАТЫ: ЭНЕРГИЯ

ИДЕОЛОГИЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЭНЕРГИИ:

• НАЗЕМНАЯ РЕШЕТКА:

$$N_e = \mathrm{const}\, E \left(\frac{X - X_0}{X_{\max} - X_0} \right)^{\frac{X_{\max} - X}{a}} \exp\left(\frac{X_{\max} - X}{a} \right)$$

* $X = X_{\max} \Rightarrow N_e = \mathrm{const}\, E$

* const из моделирования и сравнения с низкими энергиями (экстраполяция связывает с энергиями, при которых регистрируют первичные частицы, $E \lesssim 10^{14}$ эВ)

* связь $N_e(X_{\mathrm{obs}})$ и $N_e(X_{\max})$

— усреднение, основанное на зависимости от зенитного угла

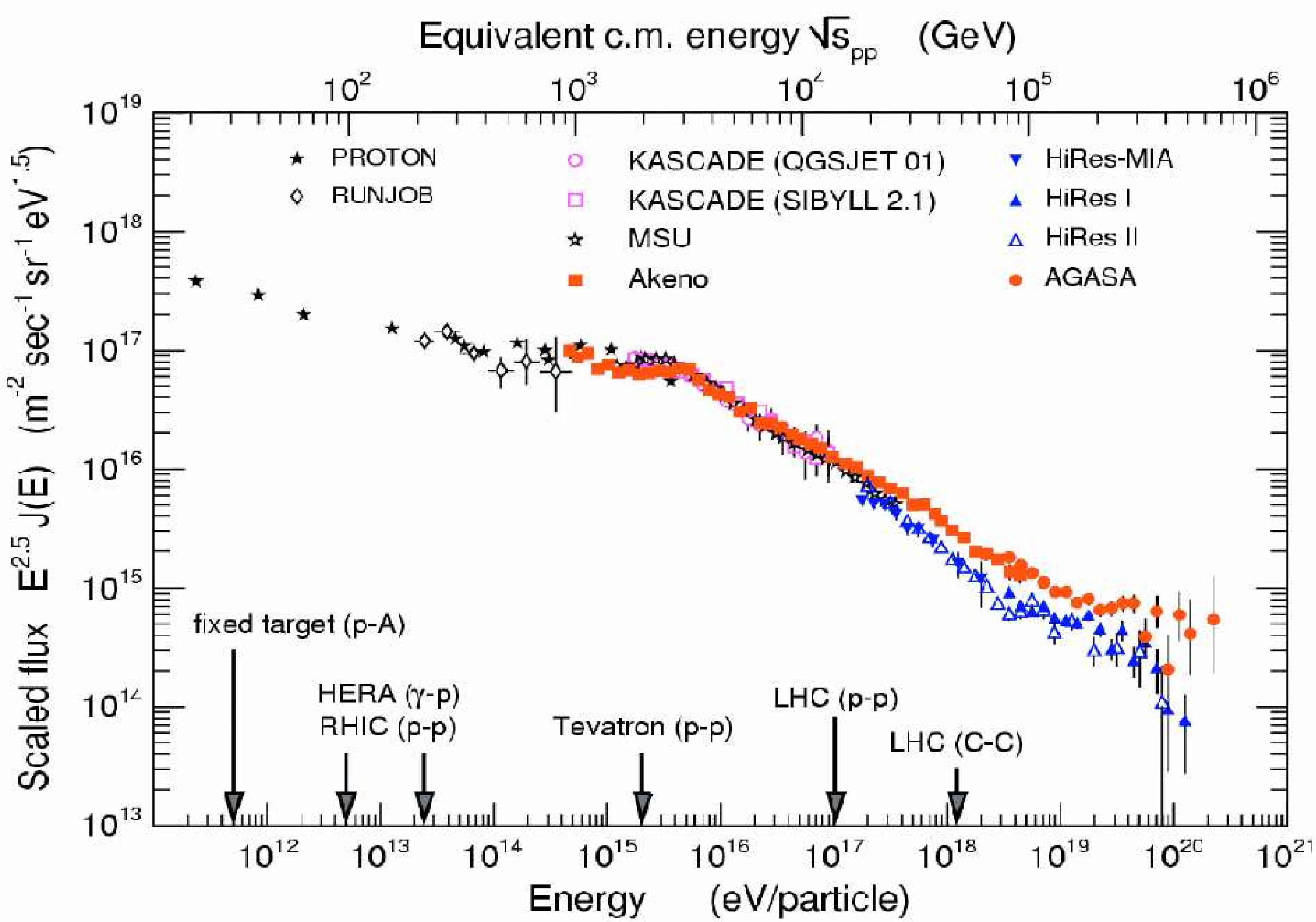
* N_e связывают с показаниями детекторов

(плотность частиц, приведенная к расстоянию 600 – 1000 м от оси ливня)

• ФЛЮОРЕСЦЕНТНЫЙ ТЕЛЕСКОП:

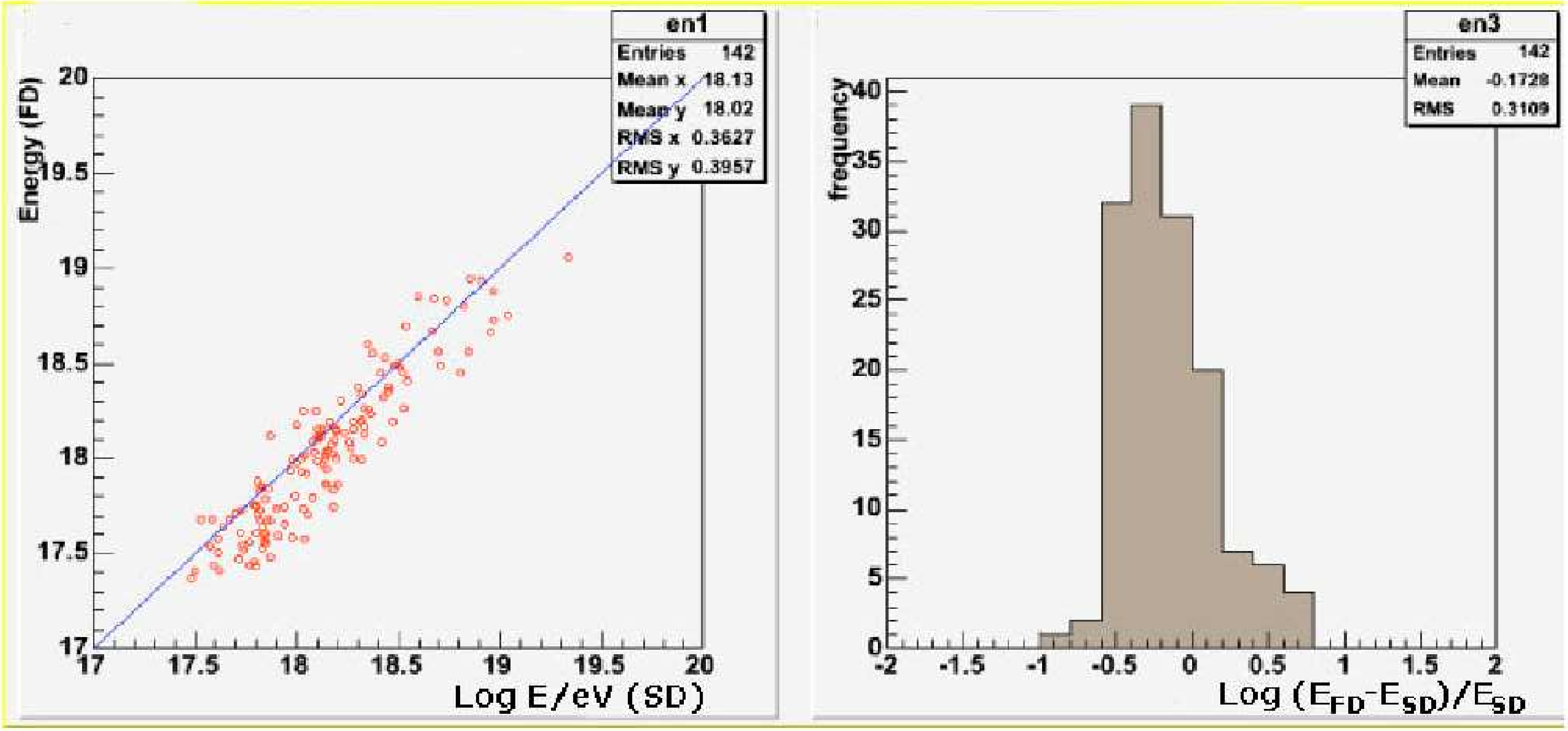
энергия определяется по полному числу фотонов с траектории

РЕЗУЛЬТАТЫ: СИСТЕМАТИЧЕСКАЯ РАЗНИЦА В ЭНЕРГИИ

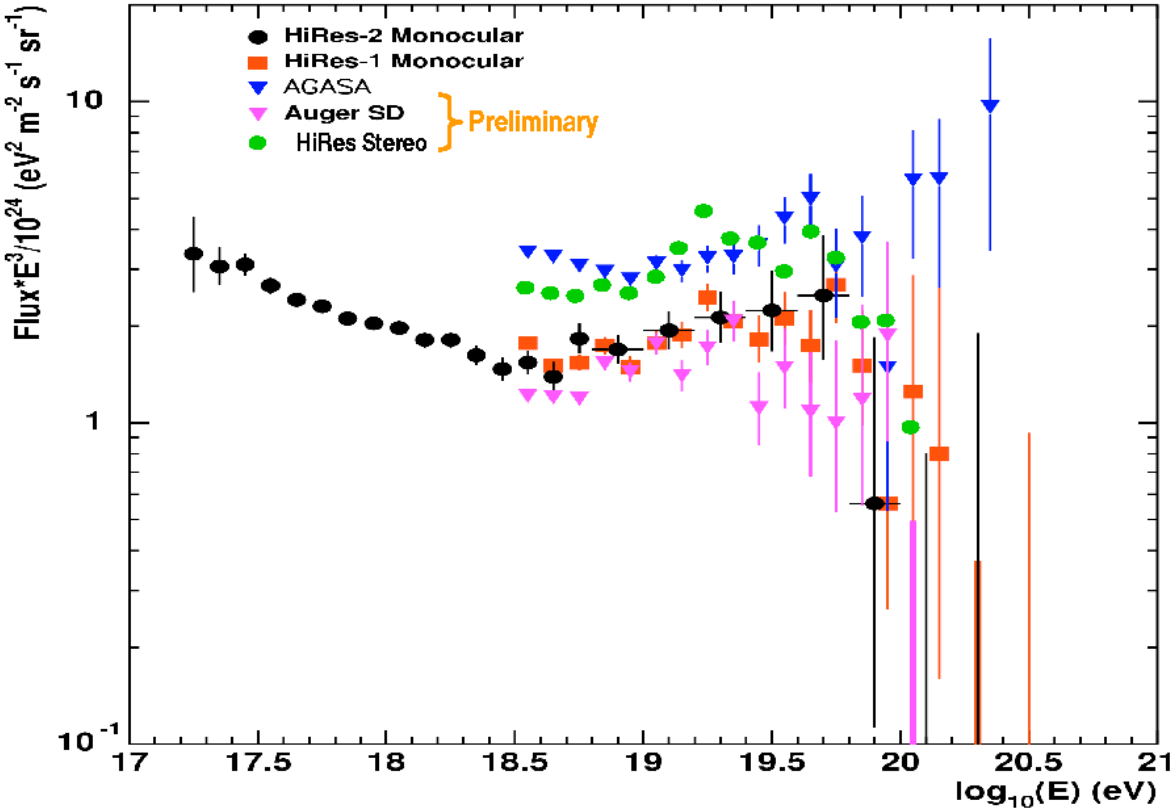


РЕЗУЛЬТАТЫ: СИСТЕМАТИЧЕСКАЯ РАЗНИЦА В ЭНЕРГИИ

ПЕРВЫЕ ГИБРИДНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ (PIERRE AUGER)



РЕЗУЛЬТАТЫ: СИСТЕМАТИЧЕСКАЯ РАЗНИЦА В ЭНЕРГИИ



СПЕКТР ПО ДАННЫМ PIERRE AUGER:

- согласуется с AGASA по данным наземной решетки
- согласуется с HiRes (mono) по данным флюоресцентных телескопов

РЕЗУЛЬТАТЫ: ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ

МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТИПА ПЕРВИЧНОЙ ЧАСТИЦЫ:

- глубина развития ливня (сечение первого взаимодействия $\leftrightarrow X_{\mathrm{max}}$)
- содержание мюонов

ТИПЫ ЧАСТИЦ, КОТОРЫЕ МОЖНО РАЗЛИЧИТЬ:

нейтрино $\leftrightarrow$ частицы с сильным и/или ЭМ взаимодействием

$\downarrow$

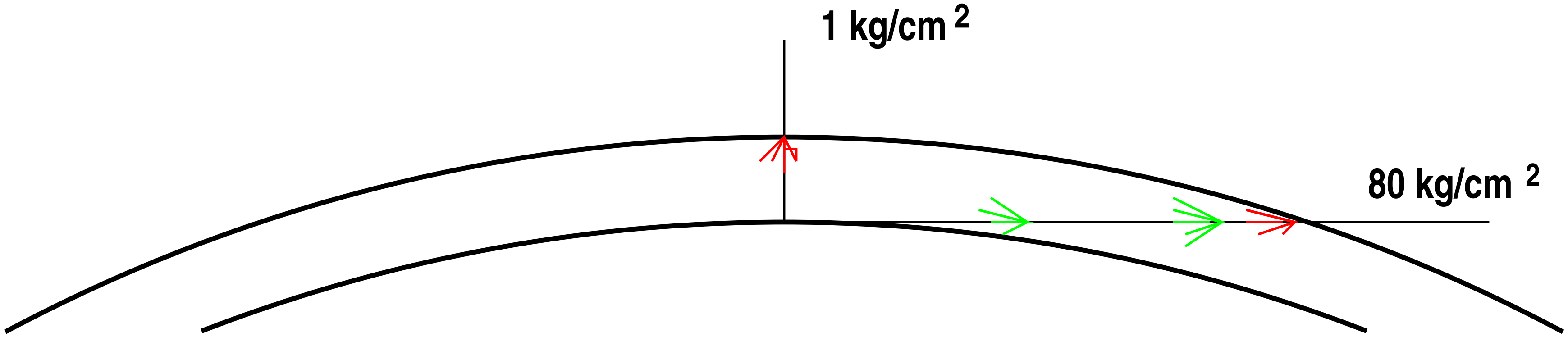
фотон $\leftrightarrow$ частицы с сильным взаимодействием

$\downarrow$

нуклоны, легкие ядра $\leftrightarrow$ тяжелые ядра

$\nu \leftrightarrow \gamma \leftrightarrow p \leftrightarrow$ Fe

РЕЗУЛЬТАТЫ: ИСКЛЮЧЕНИЕ НЕЙТРИНО



- СИЛЬНЫЕ, ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ:
  - длина свободного пробега $\ll 1\ \mathrm{kg/cm^2}$
  - ливни начинают развиваться в верхних слоях атмосферы
- СЛАБЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ:
  - длина свободного пробега $\gg 80\ \mathrm{kg/cm^2}$
  - ливни развиваются с равной вероятностью везде

ИЗБЫТКА ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ЛИВНЕЙ НЕ ОБНАРУЖЕНО

Результаты: химический состав

Определение глубины развития ливня

- прямые измерения флюоресцентным телескопом
- наземная решетка:
  - наклон функции пространственного распределения
  - временна́я зависимость – форма фронта
  - зависимость потока от зенитного угла

Определение мюонной компоненты

- закопать детекторы
- форма фронта

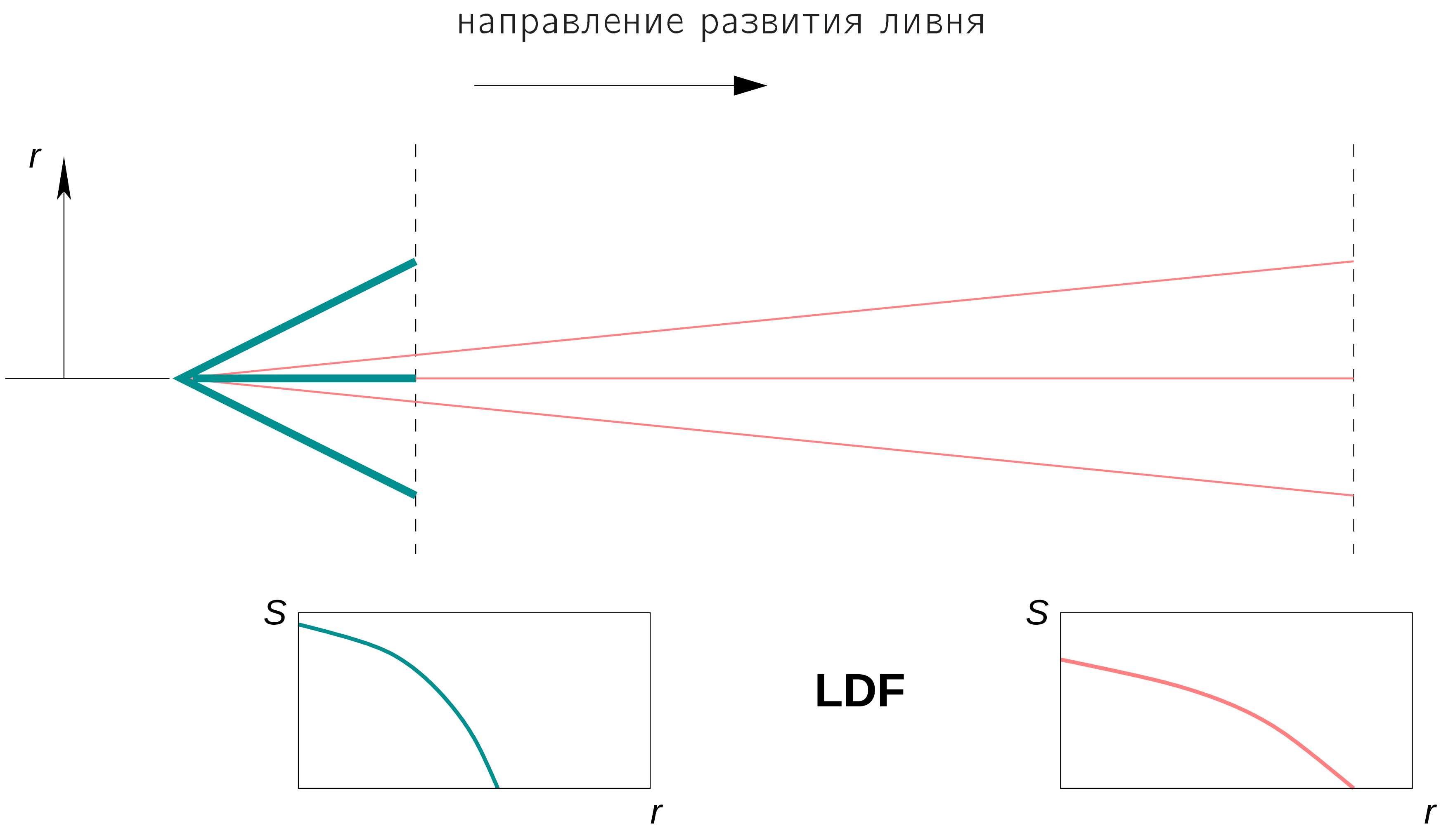
ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ

ПОЧЕМУ МЮОННАЯ КОМПОНЕНТА СВЯЗАНА С ТИПОМ ПЕРВИЧНОЙ ЧАСТИЦЫ?

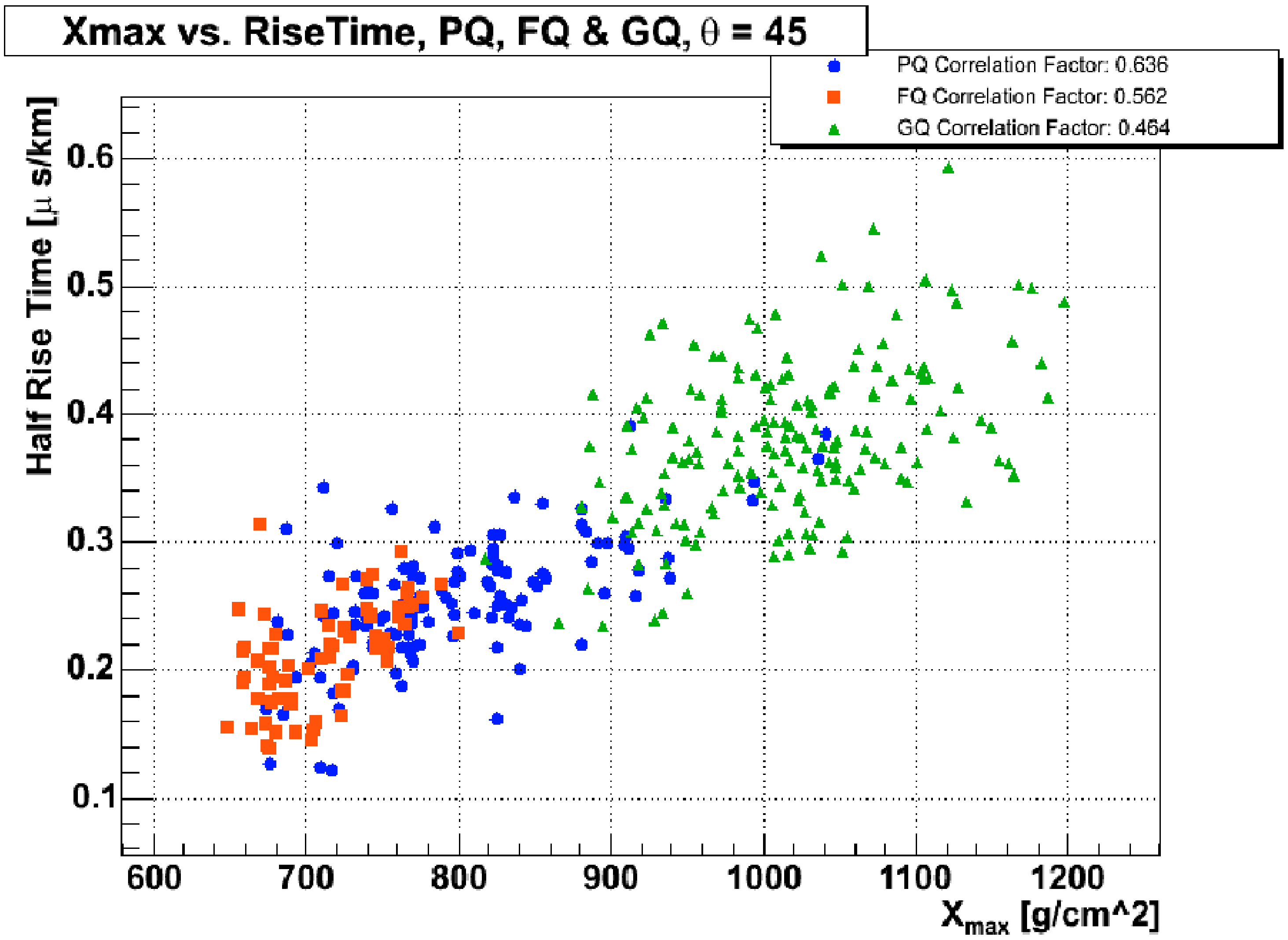
- ФОТОН:
  - электромагнитные взаимодействия доминируют над адронными (фотоядерное сечение мало)
  - мюоны — из адронного каскада
- ПРОТОНЫ – ЯДРА:
  - на каждом шаге адронного каскада $1/3$ уходит в $\pi^0 \to \gamma\gamma$
  - мюоны рождаются, когда энергия $\pi^\pm$ упадет до критической ($\pi^\pm$ распадаются раньше, чем взаимодействуют)
  - тяжелее ядро $\Rightarrow$ больше мультиплетность $\Rightarrow$ меньше шагов $\Rightarrow$ больше мюонов

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ

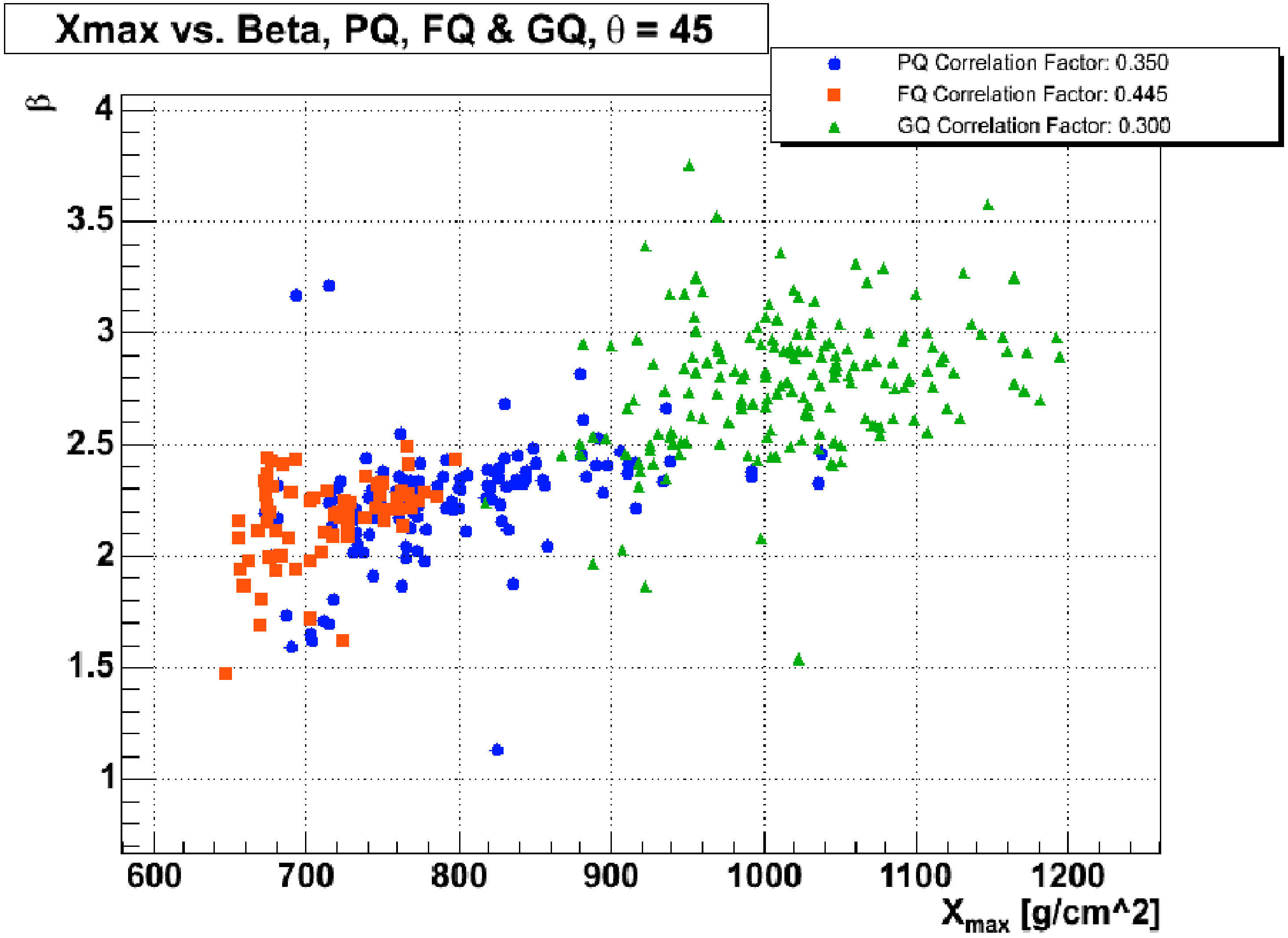
ФОРМА ФРОНТА И ВОЗРАСТ ЛИВНЯ



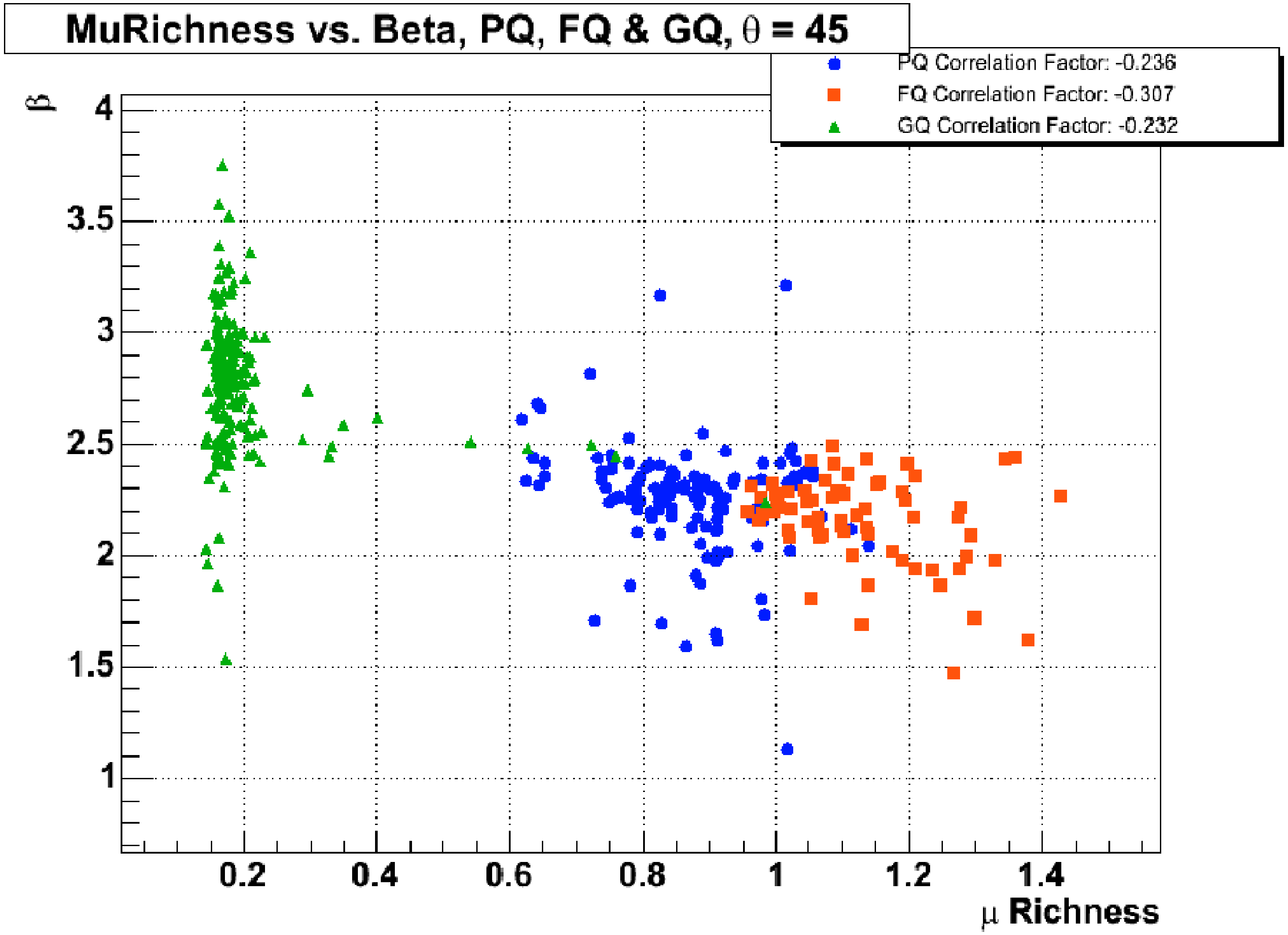
ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ



ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ

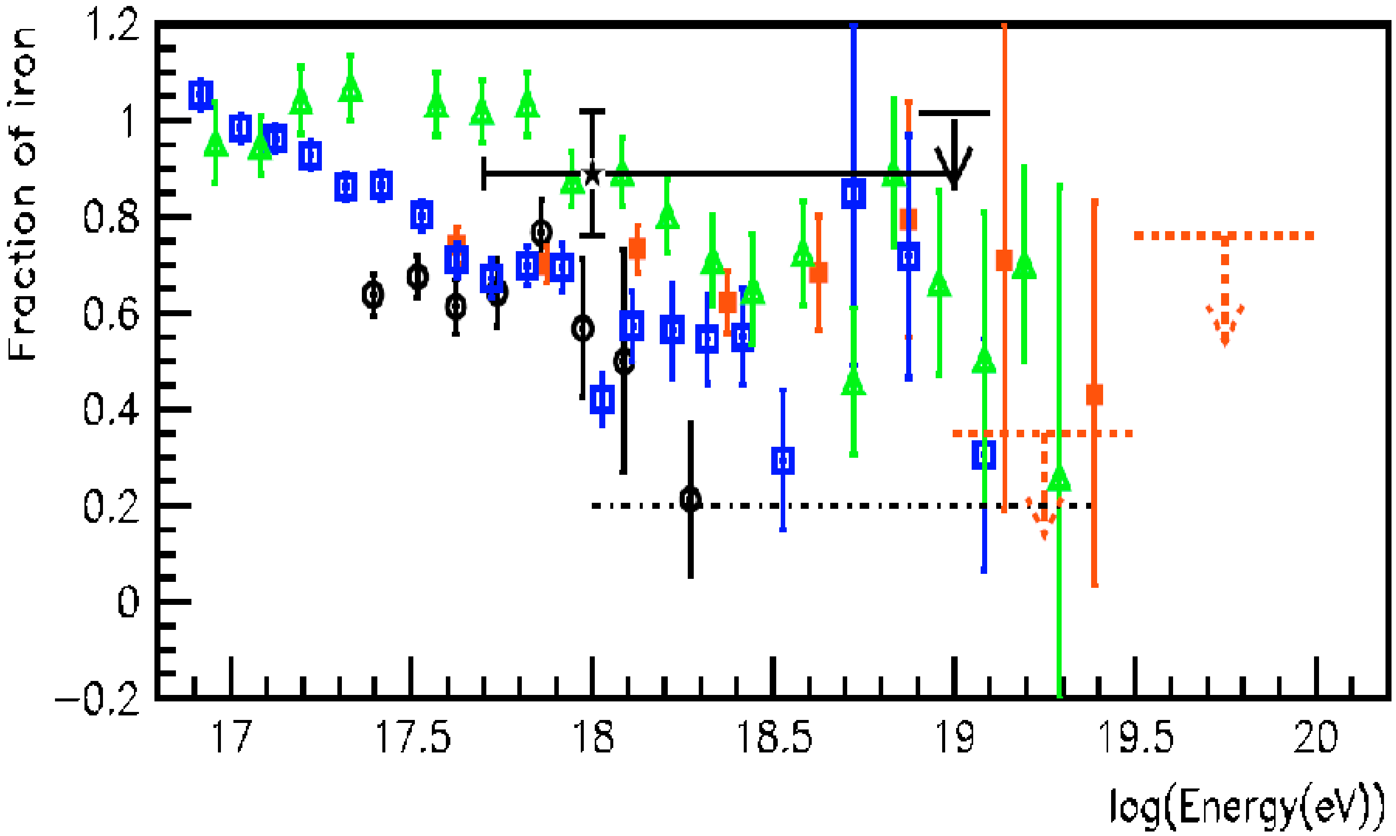


ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ



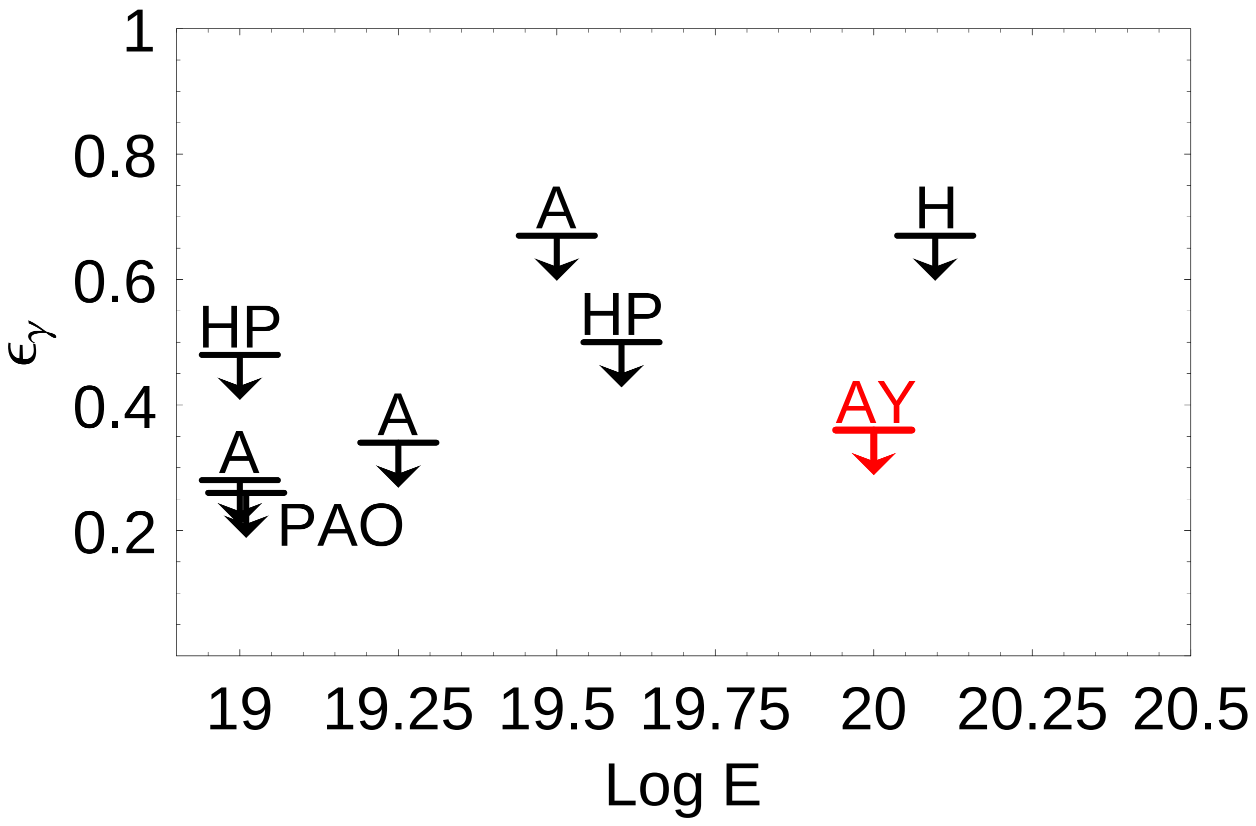
РЕЗУЛЬТАТЫ: ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ

ДОЛЯ ЖЕЛЕЗА



РЕЗУЛЬТАТЫ: ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ

ДОЛЯ ФОТОНОВ



РЕЗУЛЬТАТЫ: НАПРАВЛЕНИЯ ПРИЛЕТА

ГЛОБАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ:

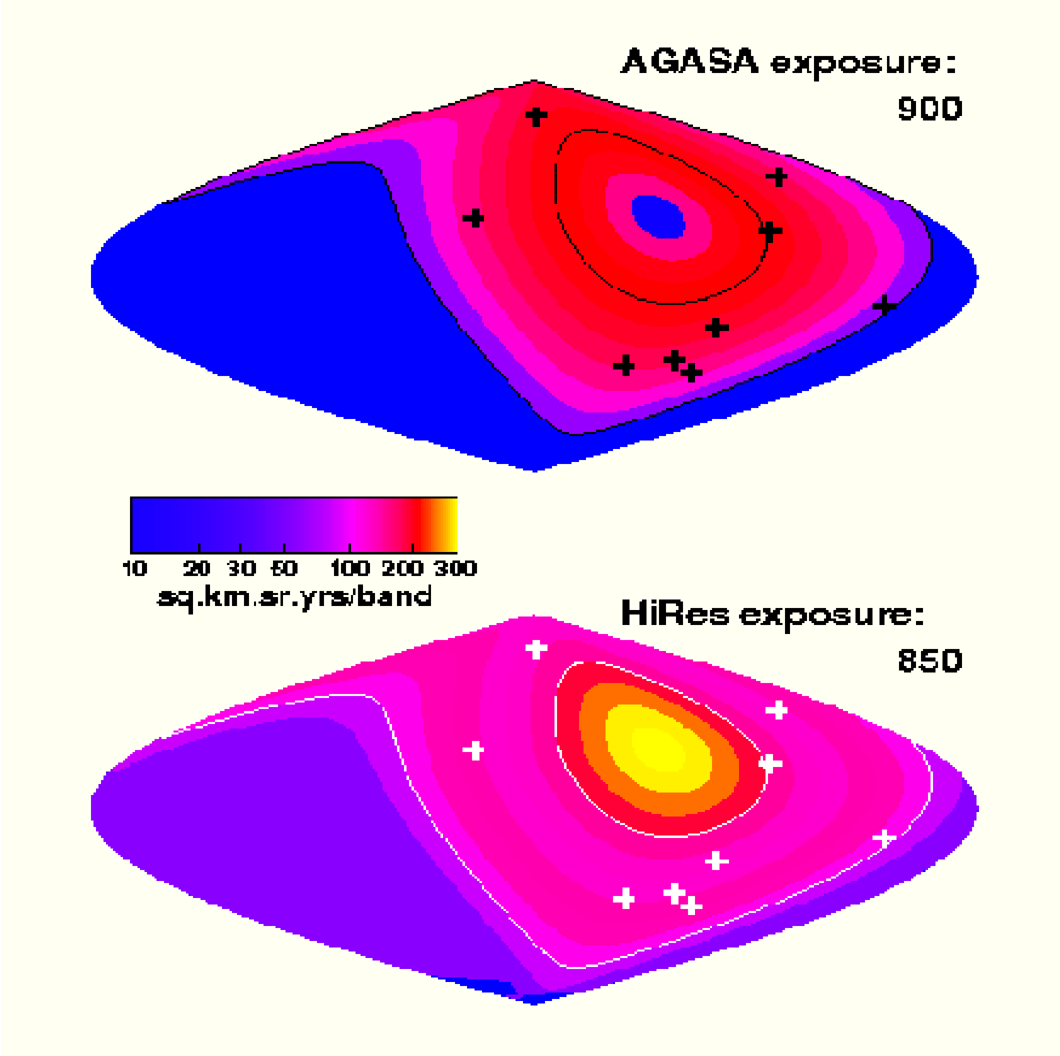
- ГАРМОНИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ
- ГАЛАКТИЧЕСКАЯ ПЛОСКОСТЬ, ГАЛАКТИЧЕСКИЙ ЦЕНТР
- СЕВЕР – ЮГ

МАЛЫЕ УГЛЫ:

- КЛАСТЕРИЗАЦИЯ
- КОРРЕЛЯЦИИ С ИСТОЧНИКАМИ

НАПРАВЛЕНИЯ ПРИЛЕТА

ЗАМЕЧАНИЕ: ЭКСПОЗИЦИЯ

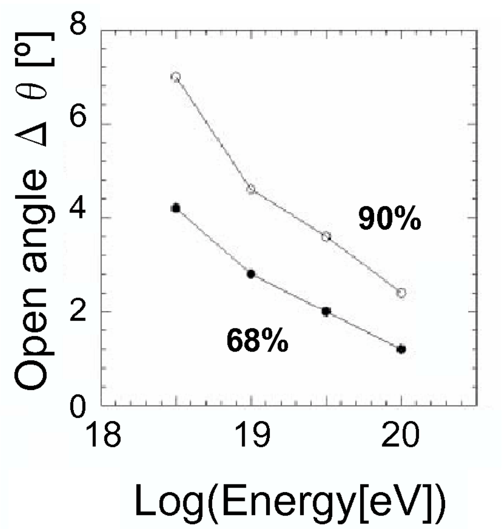


НАПРАВЛЕНИЯ ПРИЛЕТА

ЗАМЕЧАНИЕ: УГЛОВОЕ РАЗРЕШЕНИЕ

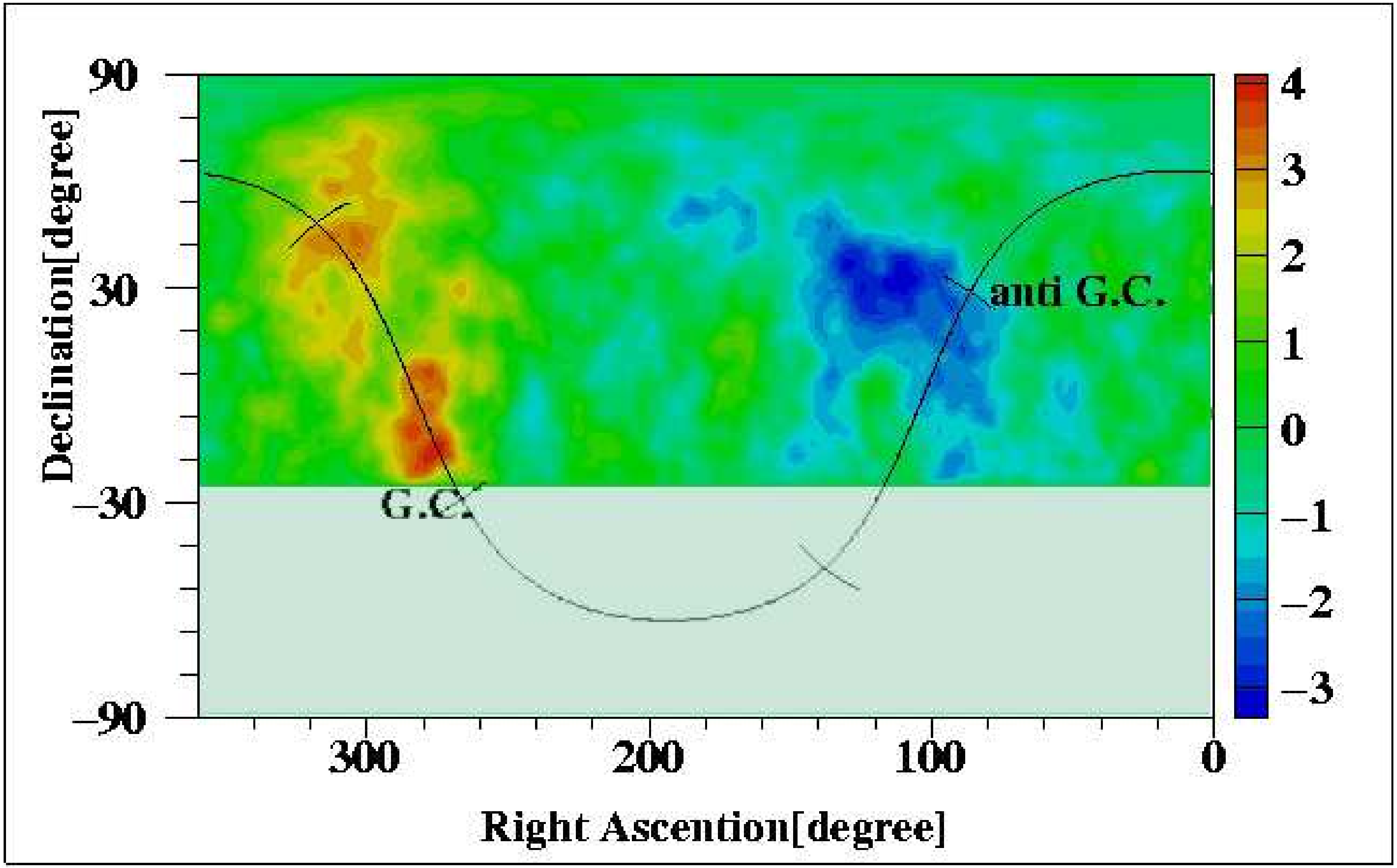
на 10^{19} эВ:

- HiRes stereo 0.6°
- Pierre Auger (гибрид) 0.6°
- Pierre Auger (наземная решетка) 1.4°
- AGASA 2.4°
- Якутск 3°
- SUGAR 6°



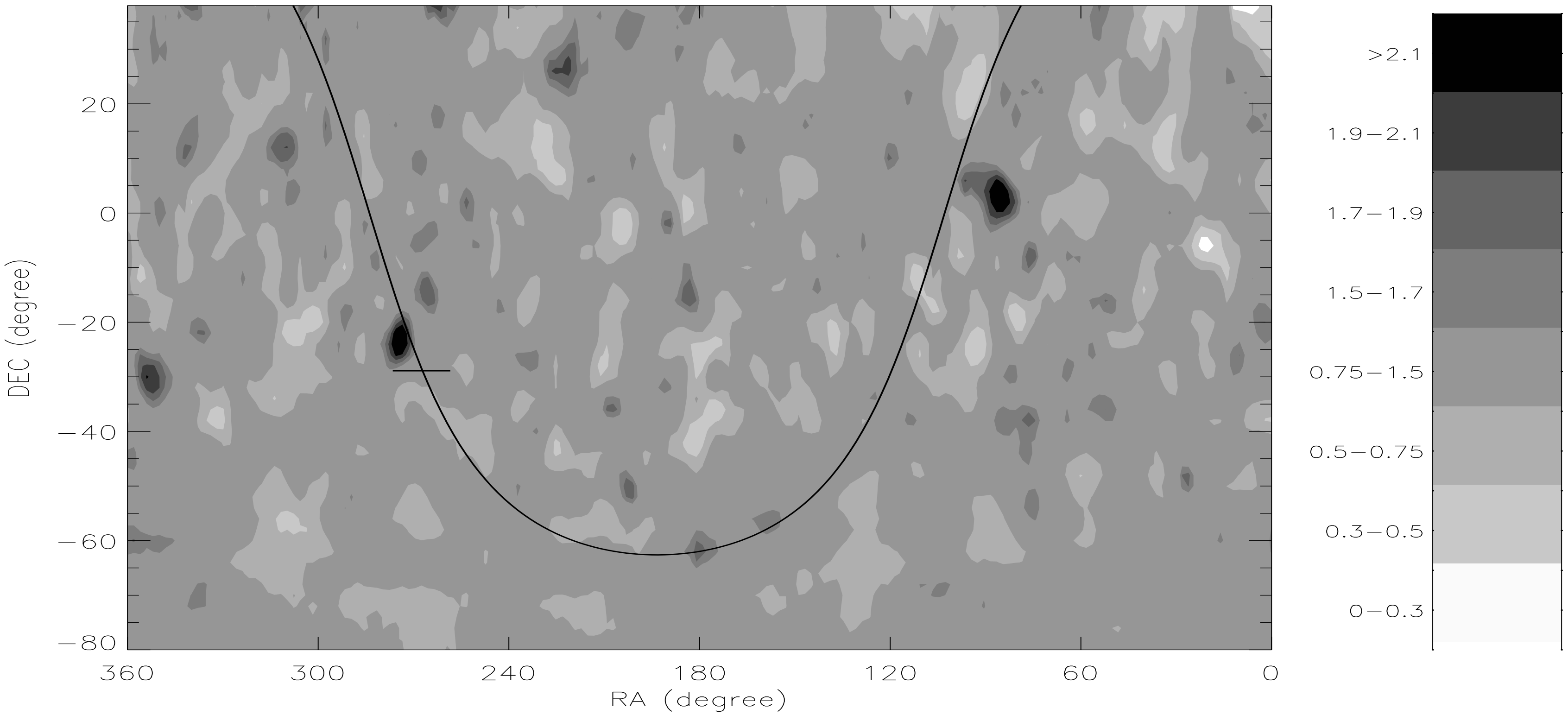
НАПРАВЛЕНИЯ ПРИЛЕТА: ГАЛАКТИЧЕСКАЯ АНИЗОТРОПИЯ?

- НАПРАВЛЕНИЯ ПРИЛЕТА при 10^{18} эВ (AGASA, Северное полушарие)



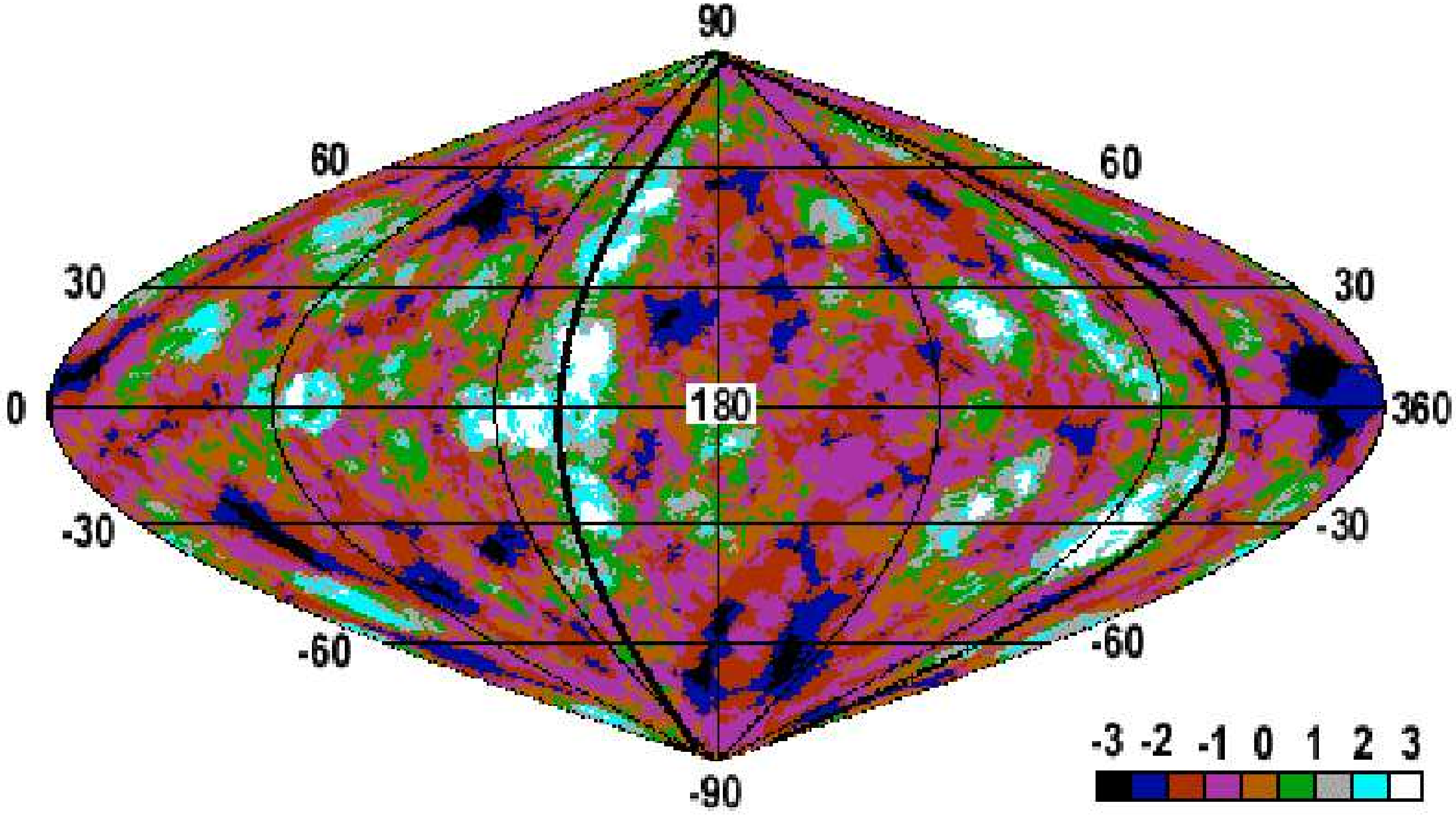
НАПРАВЛЕНИЯ ПРИЛЕТА: ГАЛАКТИЧЕСКАЯ АНИЗОТРОПИЯ?

- НАПРАВЛЕНИЯ ПРИЛЕТА при 10^{18} эВ (SUGAR, Южное полушарие)



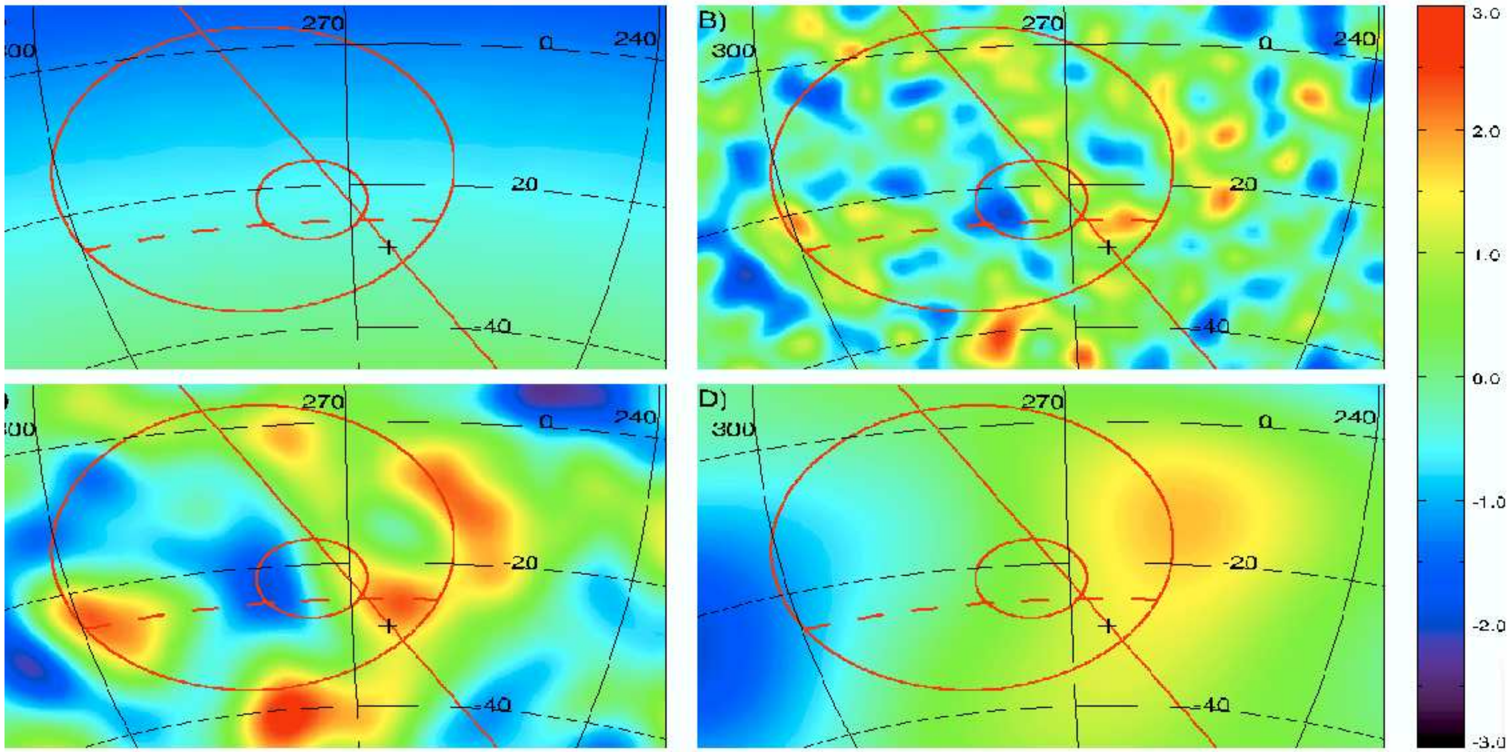
НАПРАВЛЕНИЯ ПРИЛЕТА: ГАЛАКТИЧЕСКАЯ АНИЗОТРОПИЯ?

- НАПРАВЛЕНИЯ ПРИЛЕТА при 10^{18} эВ (SUGAR, Южное полушарие и Якутск, Северное полушарие)



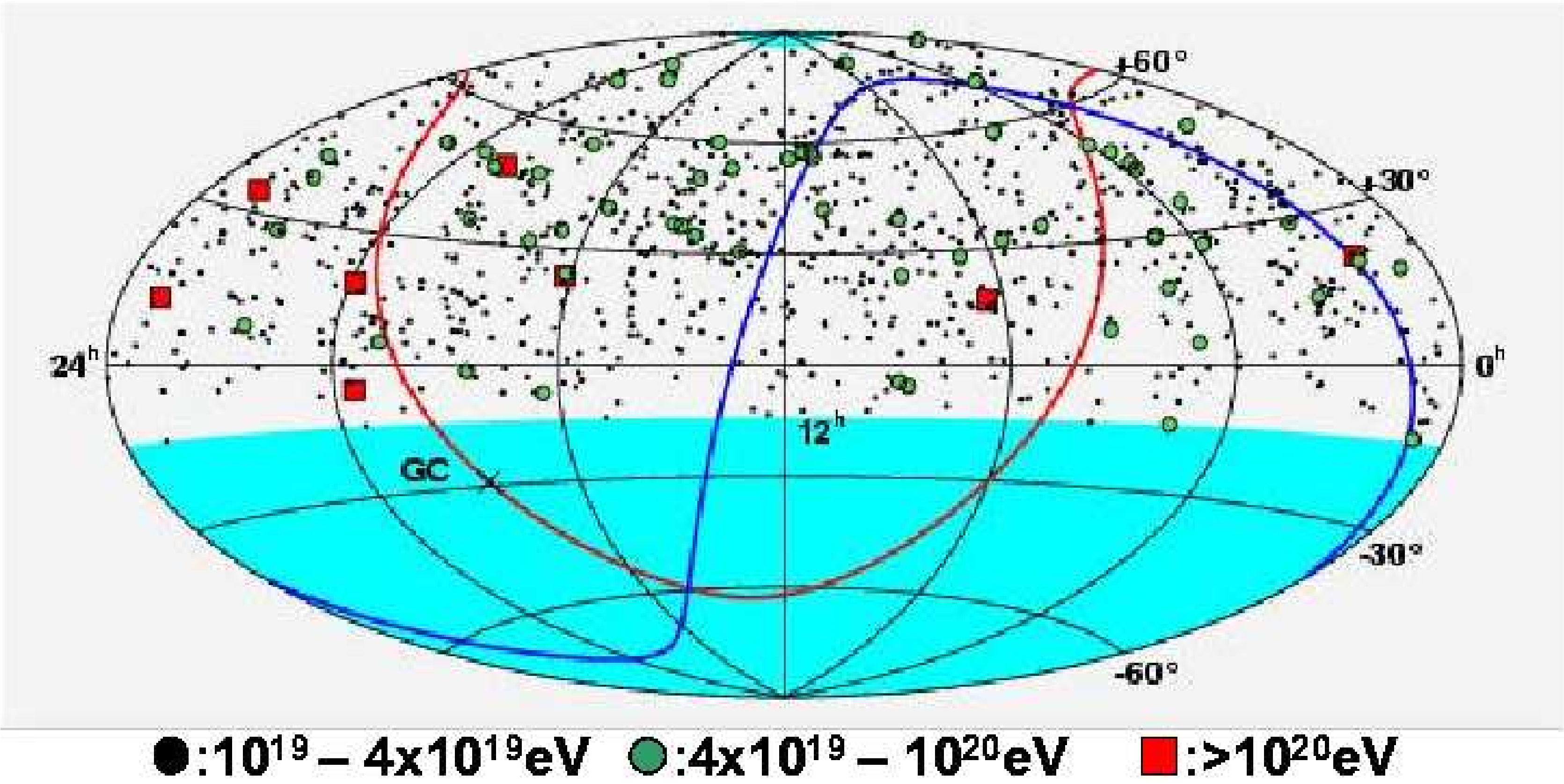
НАПРАВЛЕНИЯ ПРИЛЕТА: ГАЛАКТИЧЕСКАЯ АНИЗОТРОПИЯ?

- НАПРАВЛЕНИЯ ПРИЛЕТА при 10^{18} эВ (PIERRE AUGER, Южное полушарие)



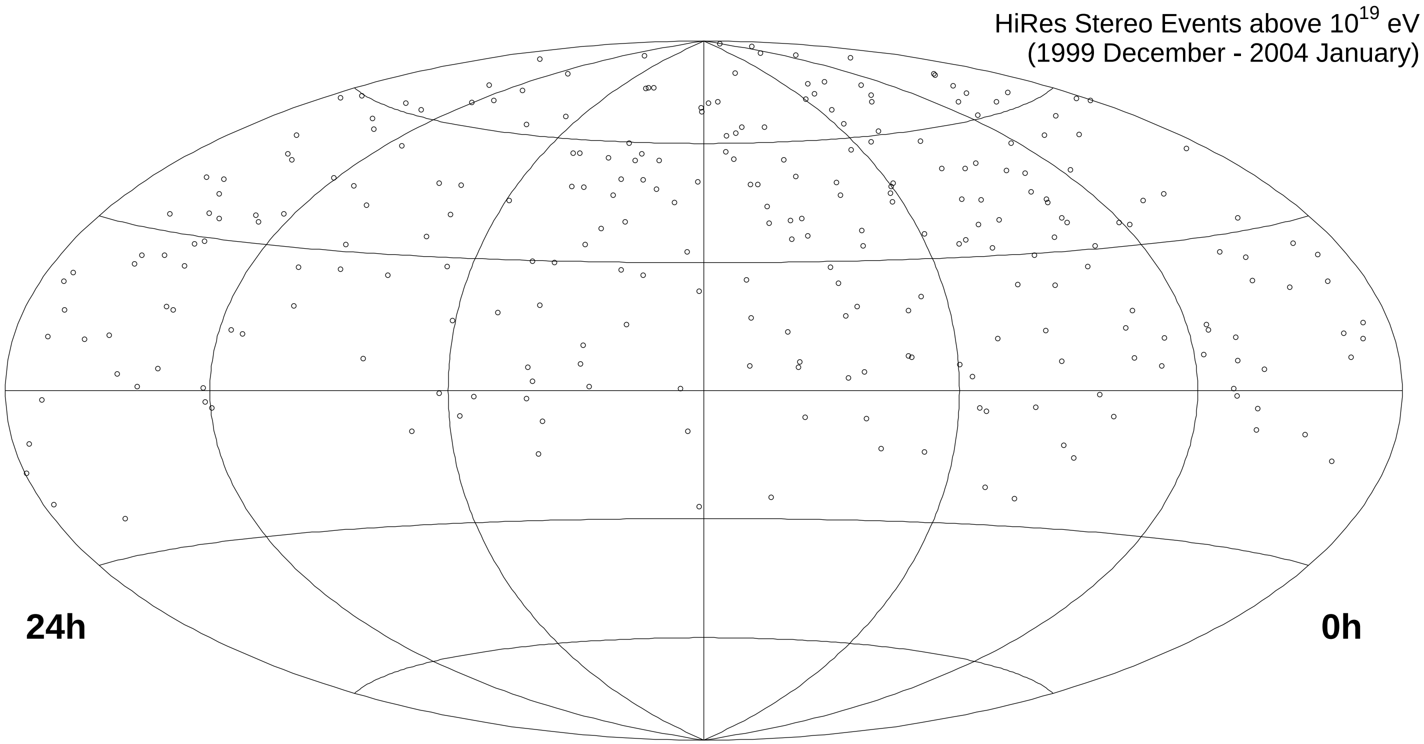
НАПРАВЛЕНИЯ ПРИЛЕТА: ИЗОТРОПИЯ ПРИ $E > 10^{19}$ эВ

- НАПРАВЛЕНИЯ ПРИЛЕТА ПРИ $E > 10^{19}$ эВ (AGASA)



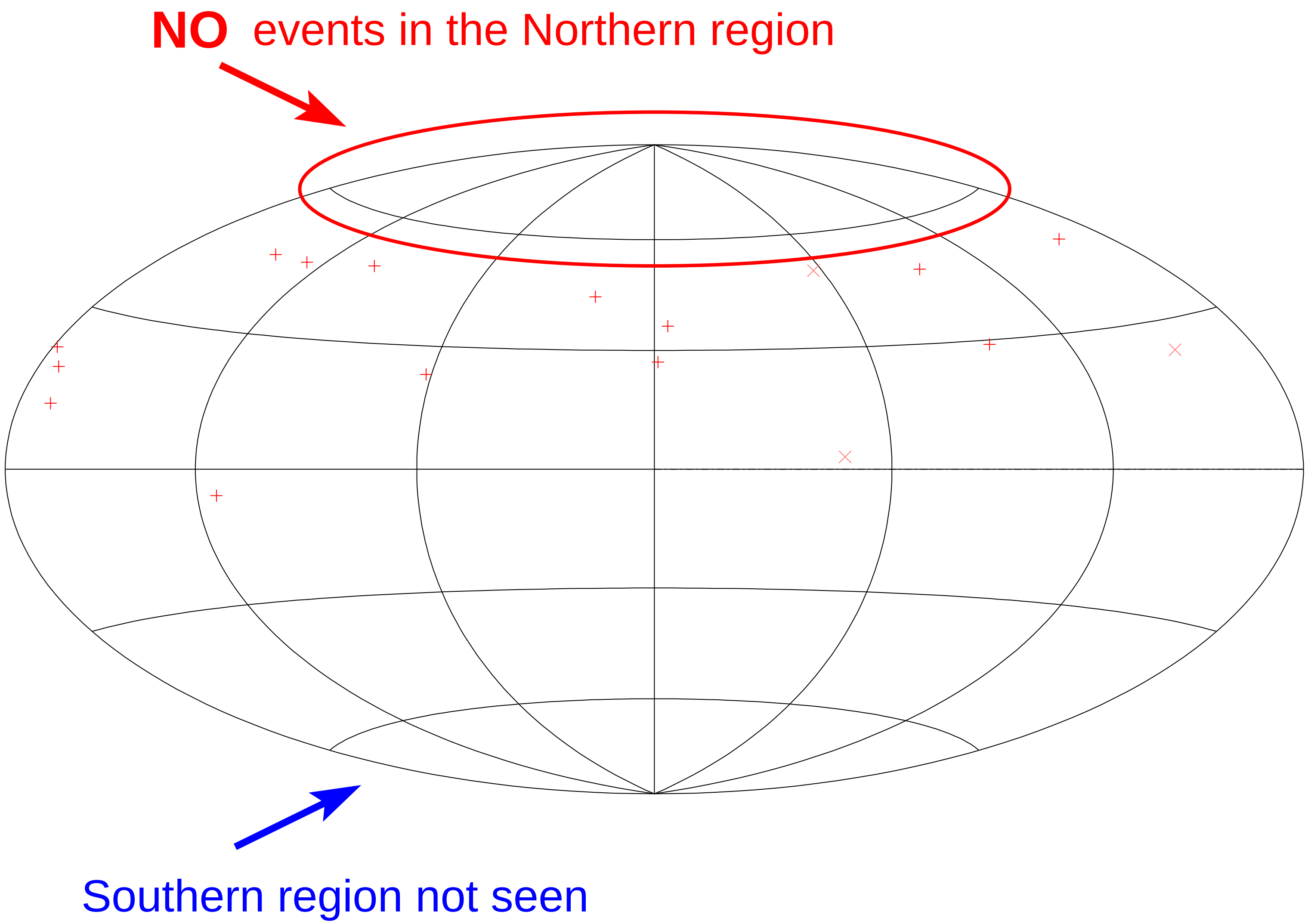
НАПРАВЛЕНИЯ ПРИЛЕТА: ИЗОТРОПИЯ ПРИ $E > 10^{19}$ эВ

- НАПРАВЛЕНИЯ ПРИЛЕТА ПРИ $E > 10^{19}$ эВ (HiRes stereo)

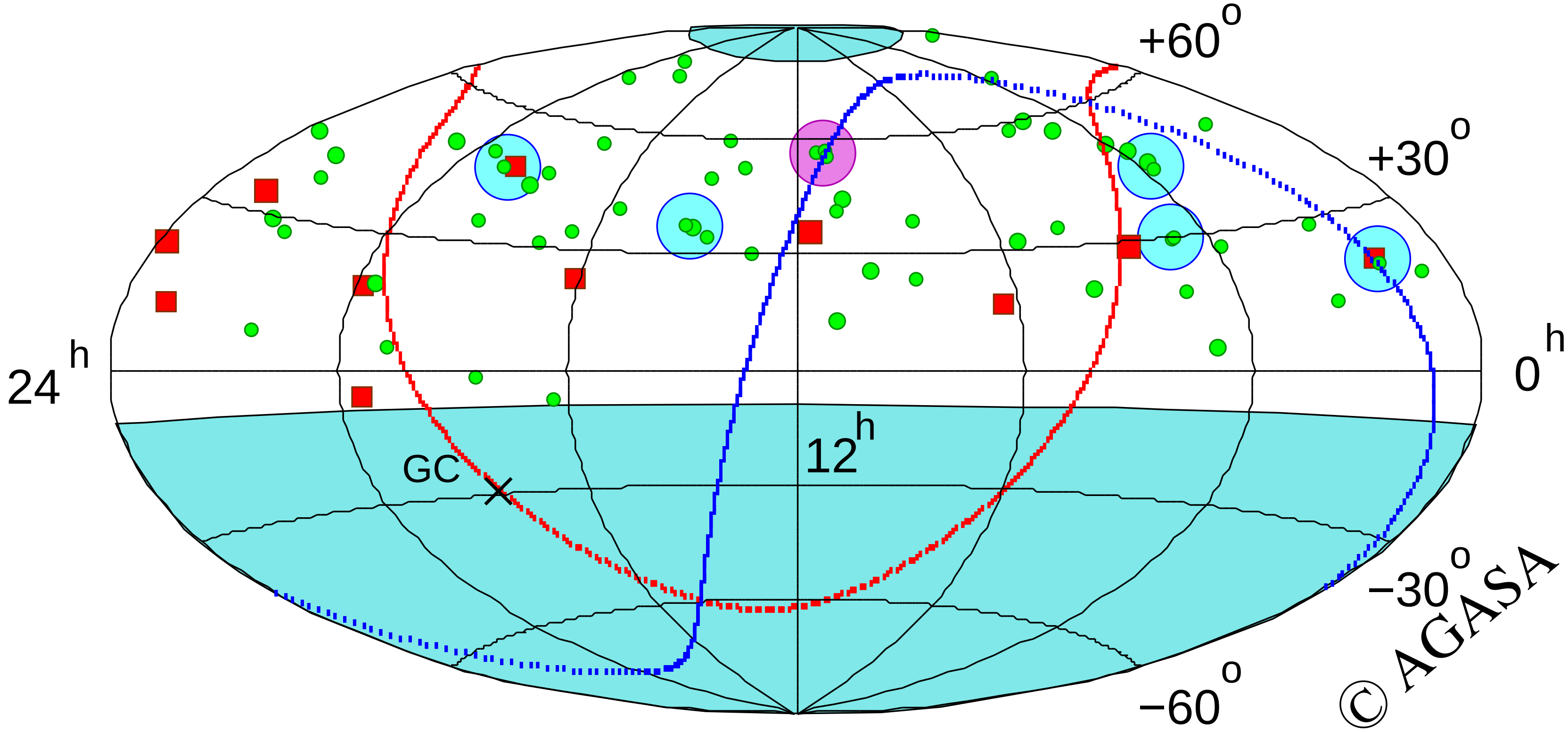


точность: $0.6°$

НАПРАВЛЕНИЯ ПРИЛЕТА: СЕВЕР–ЮГ при $E > 10^{20}$эВ?



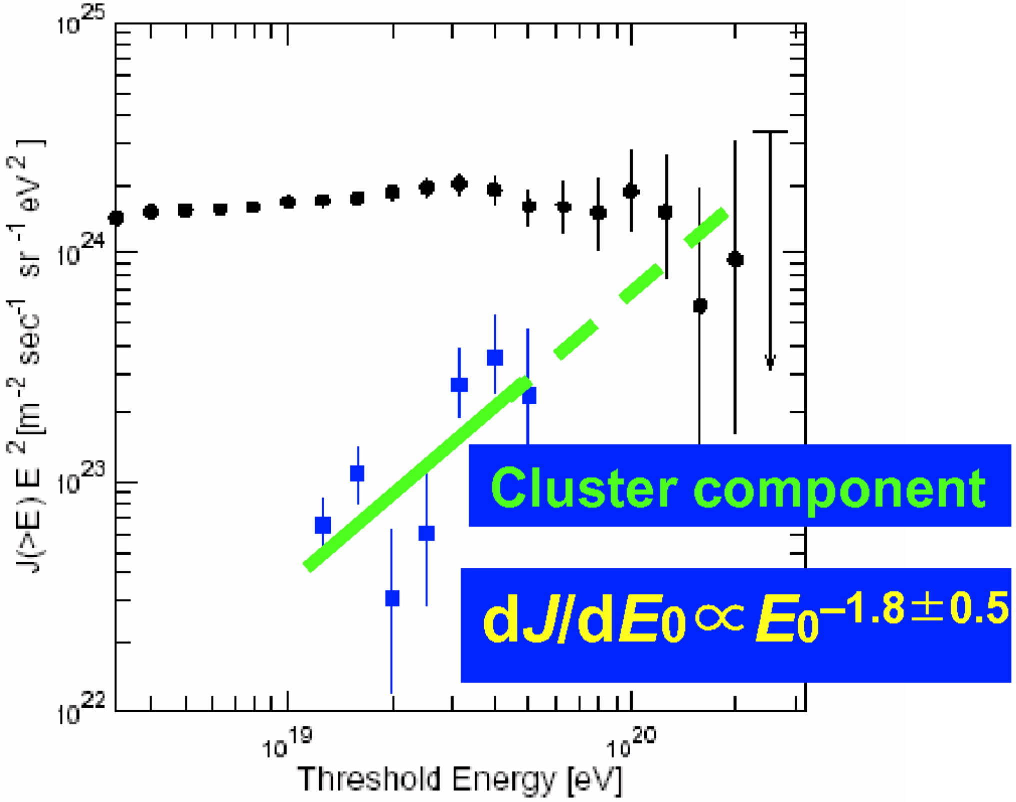
КЛАСТЕРЫ



AGASA: $E > 4 \cdot 10^{19}$ эВ, из 57 событий – 5 дублетов, 1 триплет

КЛАСТЕРЫ

СПЕКТР КЛАСТЕРИЗОВАННОЙ КОМПОНЕНТЫ



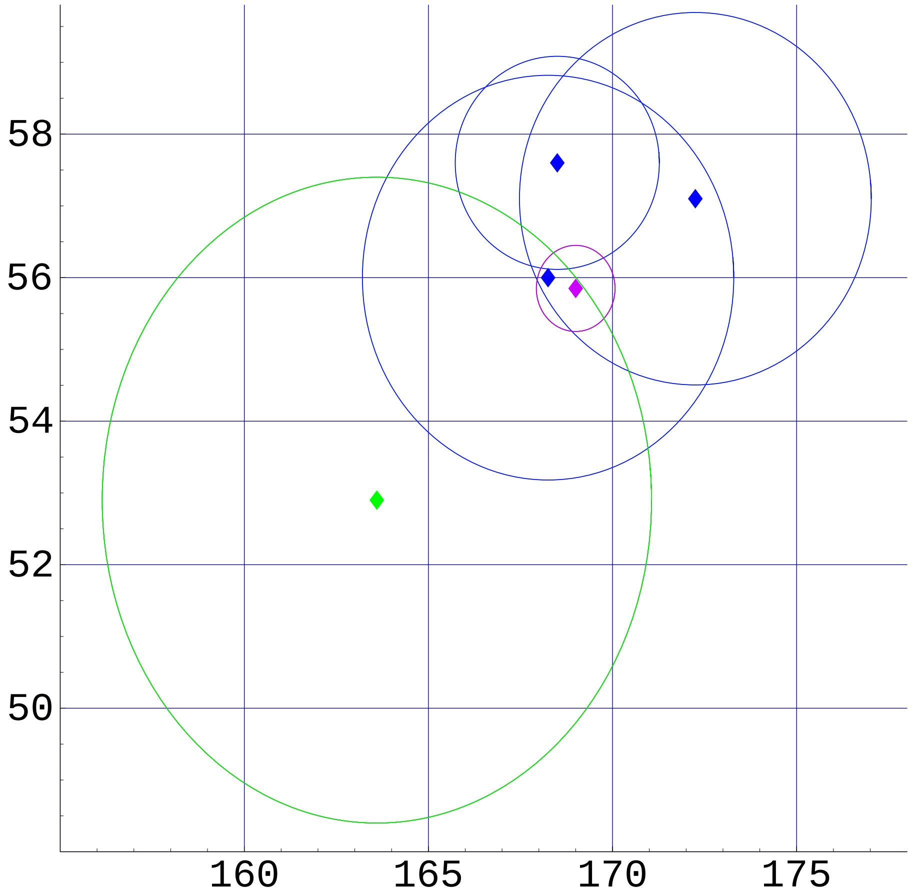
КЛАСТЕРЫ

ДРУГИЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ:

- Якутск – подтверждает
- совместный анализ Haverah Park, Volcano Ranch – подтверждает
- HiRes – не подтверждает!?

КЛАСТЕРЫ

КЛАСТЕР ИЗ 5-и СОБЫТИЙ, ЗАРЕГИСТРИРОВАННЫХ 3-мя ЭКСПЕРИМЕНТАМИ



ВОЗМОЖНЫЕ АСТРОФИЗИЧЕСКИЕ ИСТОЧНИКИ

- УСКОРЯЮТСЯ ЗАРЯЖЕННЫЕ ЧАСТИЦЫ
- УДЕРЖИВАЮТСЯ В УСКОРИТЕЛЕ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ
- ТЕРЯЮТ ЭНЕРГИЮ, ВЗАИМОДЕЙСТВУЯ С ИЗЛУЧЕНИЕМ

ВОЗМОЖНЫЕ АСТРОФИЗИЧЕСКИЕ ИСТОЧНИКИ

УДЕРЖАНИЕ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ: УНИВЕРСАЛЬНЫЕ ОГРАНИЧЕНИЯ

- АРГУМЕНТ ХИЛЛАСА:

  Ларморовский радиус частицы

  не превышает размера области ускорения

$$E_{\max} \approx Z \left(\frac{B}{1\ \mu\mathrm{G}}\right) \left(\frac{R}{1\ \mathrm{kpc}}\right) \cdot 10^{18}\ \mathrm{eV}$$

Z = заряд частицы

B = магнитное поле

R = размер области ускорения

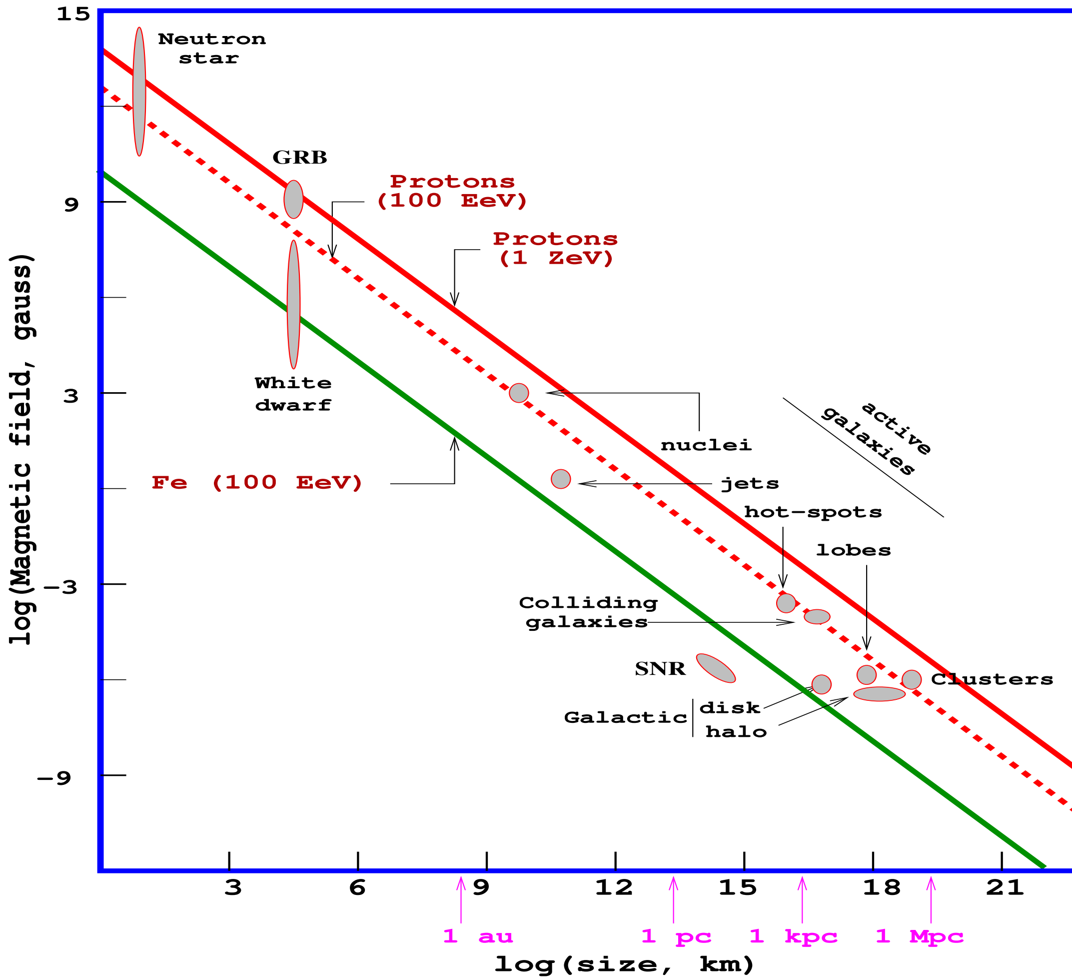
ПОТЕРИ: МОДЕЛЬНО-ЗАВИСИМЫЕ

- ПОТЕРИ НА СИНХРОТРОННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ
- ПОТЕРИ НА ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ СО СРЕДОЙ (в частности, CMB)

ВОЗМОЖНЫЕ АСТРОФИЗИЧЕСКИЕ ИСТОЧНИКИ

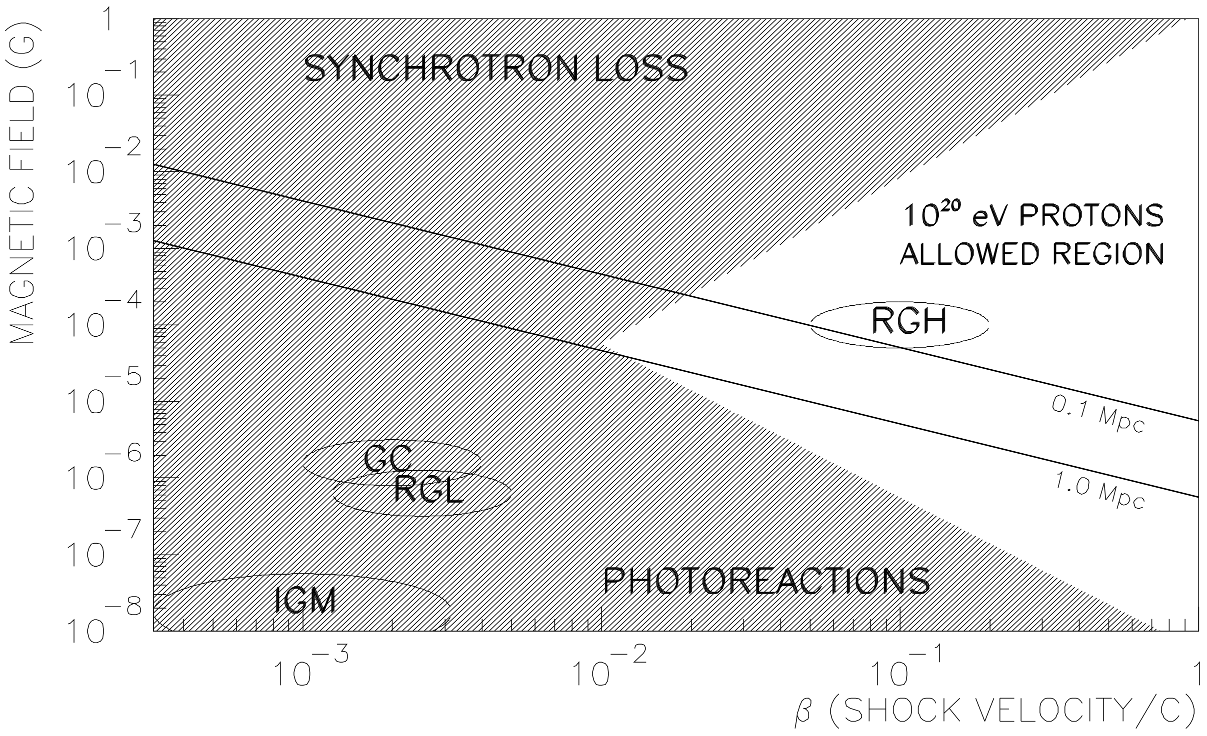
УДЕРЖАНИЕ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ: УНИВЕРСАЛЬНЫЕ ОГРАНИЧЕНИЯ

диаграмма Хилласа



ВОЗМОЖНЫЕ АСТРОФИЗИЧЕСКИЕ ИСТОЧНИКИ

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПОТЕРИ (ускорение ударными волнами)



IGM = межгалактическая среда

GC = скопления галактик

RGL = уши (lobes) радиогалактик

RGH = hot spots радиогалактик

ВОЗМОЖНЫЕ АСТРОФИЗИЧЕСКИЕ ИСТОЧНИКИ

- ГАЛАКТИКИ С АКТИВНЫМИ ЯДРАМИ
  - РАДИОГАЛАКТИКИ FR I, FR II
  - СЕЙФЕРТОВСКИЕ ГАЛАКТИКИ
  - HP-БЛАЗАРЫ
  - ЛАЦЕРТИДЫ
  - КВАЗАРЫ (радио-яркие, плоский спектр)
- ГАЛАКТИКИ С АКТИВНЫМИ ОБЛАСТЯМИ
  - СТАЛКИВАЮЩИЕСЯ ГАЛАКТИКИ
  - ГИГАНТСКИЕ ИНФРАКРАСНЫЕ ГАЛАКТИКИ
  - КАНДИДАТЫ В МЕРТВЫЕ КВАЗАРЫ
- НЕОПОЗНАННЫЕ ГАММА-ИСТОЧНИКИ

КОРРЕЛЯЦИИ НАПРАВЛЕНИЙ ПРИЛЕТА

с возможными источниками

Catalog	A	A *	A+Y	A+Y *	H
1 (FSRQ)	0.23	1.00	0.20	0.88	0.69
2 (FSRQ)	0.95	0.98	0.96	0.92	0.28
3 (Sy)	0.70	**0.013**	0.45	**0.038**	0.86
4 (Sy)	0.69	0.62	0.79	0.78	0.40
5 (BL)	0.17	**0.024**	0.29	$\mathbf{2.9 \cdot 10^{-3}}$	**0.040**
6 (BL)	0.59	0.56	0.44	0.77	0.078
7 (BL)	**0.027**	$\mathbf{4 \cdot 10^{-4}}$	0.051	$\mathbf{7 \cdot 10^{-4}}$	$\mathbf{5 \cdot 10^{-4}}$
8 (BL)	$\mathbf{7.4 \cdot 10^{-3}}$	0.20	$\mathbf{2.9 \cdot 10^{-3}}$	**0.027**	0.54
9 (RG)	0.56	0.56	0.58	0.46	1.00
10 (RG)	0.89	0.34	0.95	0.48	0.63
11 (coll.)	0.27	0.15	0.069	0.099	0.55
12 (LIG)	0.089	0.47	0.18	0.27	0.80
13 (LIG)	0.11	0.87	0.18	0.11	0.30
14 (LIG)	0.086	0.18	0.13	0.090	0.24
15 (dQSO)	1.00	0.17	1.00	0.22	1.00
16 (dQSO)	0.41	1.00	0.50	1.00	1.00
17 (γ)	0.24	0.68	0.14	0.80	0.20
18 (γ)	0.10	$\mathbf{5.1 \cdot 10^{-3}}$	0.16	$\mathbf{1.2 \cdot 10^{-3}}$	0.62
18a (γ)	0.24	**0.015**	0.37	$\mathbf{5.8 \cdot 10^{-3}}$	0.82
19 (γ)	0.27	0.31	0.34	1.00	0.40
19a (γ)	0.19	0.39	0.095	0.50	0.52
20 (γ)	1.00	1.00	1.00	1.00	**0.012**

Результаты сравнительного исследования:

- с событиями HiRes коррелируют только лацертиды
- лацертиды коррелируют также с событиями AGASA, Якутска

ВОЗМОЖНЫЕ АСТРОФИЗИЧЕСКИЕ ИСТОЧНИКИ

- ГАЛАКТИКИ С АКТИВНЫМИ ЯДРАМИ
  - РАДИОГАЛАКТИКИ FR I, FR II
  - СЕЙФЕРТОВСКИЕ ГАЛАКТИКИ
  - HP-БЛАЗАРЫ
  - ЛАЦЕРТИДЫ
  - КВАЗАРЫ (радио-яркие, плоский спектр)
- ГАЛАКТИКИ С АКТИВНЫМИ ОБЛАСТЯМИ
  - СТАЛКИВАЮЩИЕСЯ ГАЛАКТИКИ
  - ГИГАНТСКИЕ ИНФРАКРАСНЫЕ ГАЛАКТИКИ
  - КАНДИДАТЫ В МЕРТВЫЕ КВАЗАРЫ
- НЕОПОЗНАННЫЕ ГАММА-ИСТОЧНИКИ

ВОЗМОЖНЫЕ АСТРОФИЗИЧЕСКИЕ ИСТОЧНИКИ

- ГАЛАКТИКИ С АКТИВНЫМИ ЯДРАМИ
  - РАДИОГАЛАКТИКИ FR I, FR II
  - СЕЙФЕРТОВСКИЕ ГАЛАКТИКИ
  - HP-БЛАЗАРЫ
  - ЛАЦЕРТИДЫ
  - КВАЗАРЫ (радио-яркие, плоский спектр)
- ГАЛАКТИКИ С АКТИВНЫМИ ОБЛАСТЯМИ
  - СТАЛКИВАЮЩИЕСЯ ГАЛАКТИКИ
  - ГИГАНТСКИЕ ИНФРАКРАСНЫЕ ГАЛАКТИКИ
  - КАНДИДАТЫ В МЕРТВЫЕ КВАЗАРЫ
- НЕОПОЗНАННЫЕ ГАММА-ИСТОЧНИКИ

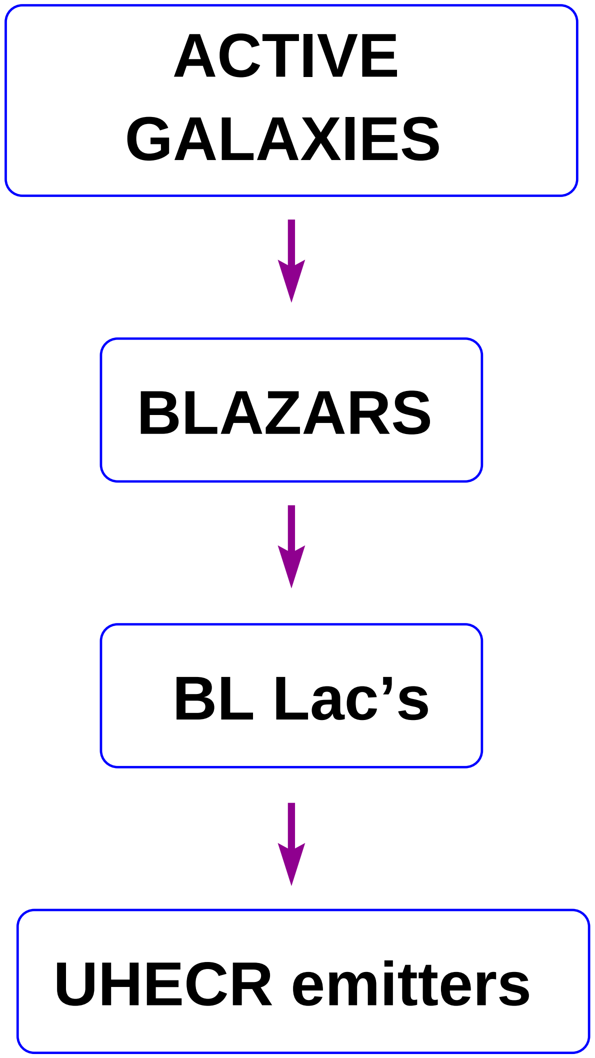
ВОЗМОЖНЫЕ АСТРОФИЗИЧЕСКИЕ ИСТОЧНИКИ

- ГАЛАКТИКИ С АКТИВНЫМИ ЯДРАМИ
  - РАДИОГАЛАКТИКИ FR I, FR II
  - СЕЙФЕРТОВСКИЕ ГАЛАКТИКИ
  - HP-БЛАЗАРЫ
  - ЛАЦЕРТИДЫ
  - КВАЗАРЫ (радио-яркие, плоский спектр)
- ГАЛАКТИКИ С АКТИВНЫМИ ОБЛАСТЯМИ
  - СТАЛКИВАЮЩИЕСЯ ГАЛАКТИКИ
  - ГИГАНТСКИЕ ИНФРАКРАСНЫЕ ГАЛАКТИКИ
  - КАНДИДАТЫ В МЕРТВЫЕ КВАЗАРЫ
- НЕОПОЗНАННЫЕ ГАММА-ИСТОЧНИКИ

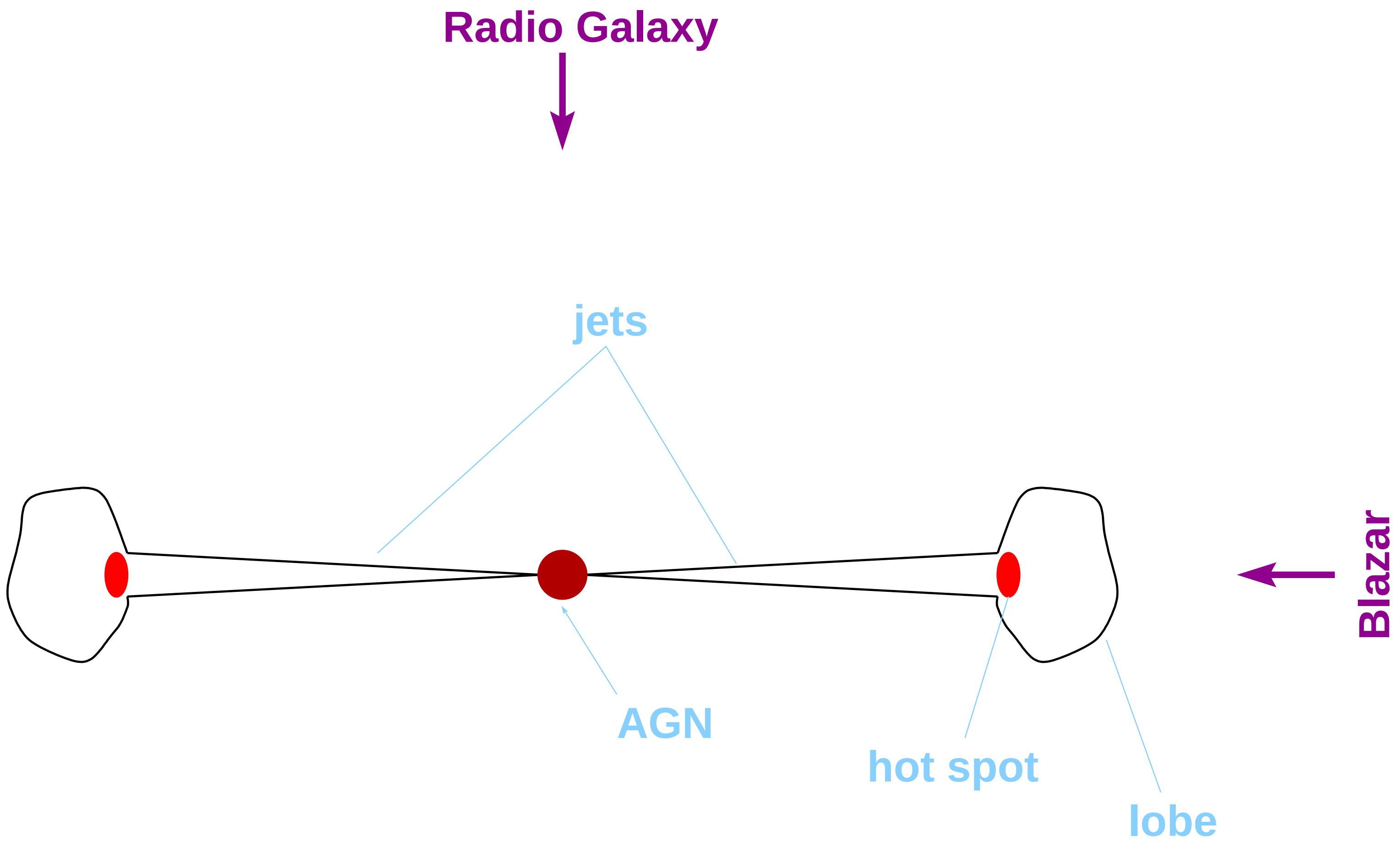
ВОЗМОЖНЫЕ АСТРОФИЗИЧЕСКИЕ ИСТОЧНИКИ

- ГАЛАКТИКИ С АКТИВНЫМИ ЯДРАМИ
  - РАДИОГАЛАКТИКИ FR I, FR II
  - СЕЙФЕРТОВСКИЕ ГАЛАКТИКИ
  - HP-БЛАЗАРЫ
  - ЛАЦЕРТИДЫ
  - КВАЗАРЫ (радио-яркие, плоский спектр)
- ГАЛАКТИКИ С АКТИВНЫМИ ОБЛАСТЯМИ
  - СТАЛКИВАЮЩИЕСЯ ГАЛАКТИКИ
  - ГИГАНТСКИЕ ИНФРАКРАСНЫЕ ГАЛАКТИКИ
  - КАНДИДАТЫ В МЕРТВЫЕ КВАЗАРЫ
- НЕОПОЗНАННЫЕ ГАММА-ИСТОЧНИКИ

ВОЗМОЖНЫЕ АСТРОФИЗИЧЕСКИЕ ИСТОЧНИКИ: лацертиды



ВОЗМОЖНЫЕ АСТРОФИЗИЧЕСКИЕ ИСТОЧНИКИ: лацертиды



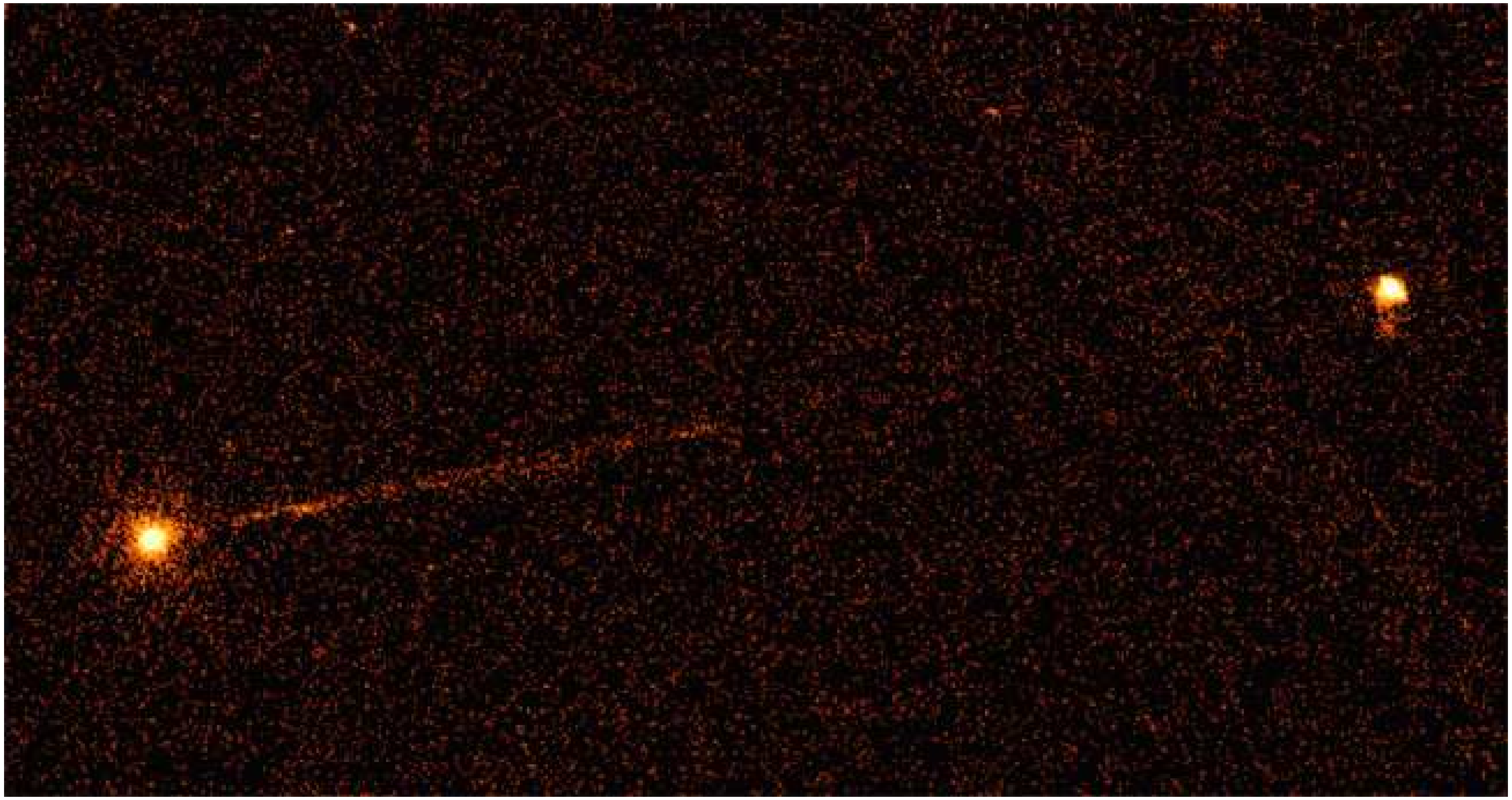
БЛАЗАРЫ: активные галактики, у которых струи направлены на наблюдателя

ЛАЦЕРТИДЫ: подкласс блазаров без эмиссионных линий в спектре;

возможно, могут ускорить частицы до бо́льших энергий

ВОЗМОЖНЫЕ АСТРОФИЗИЧЕСКИЕ ИСТОЧНИКИ: лацертиды

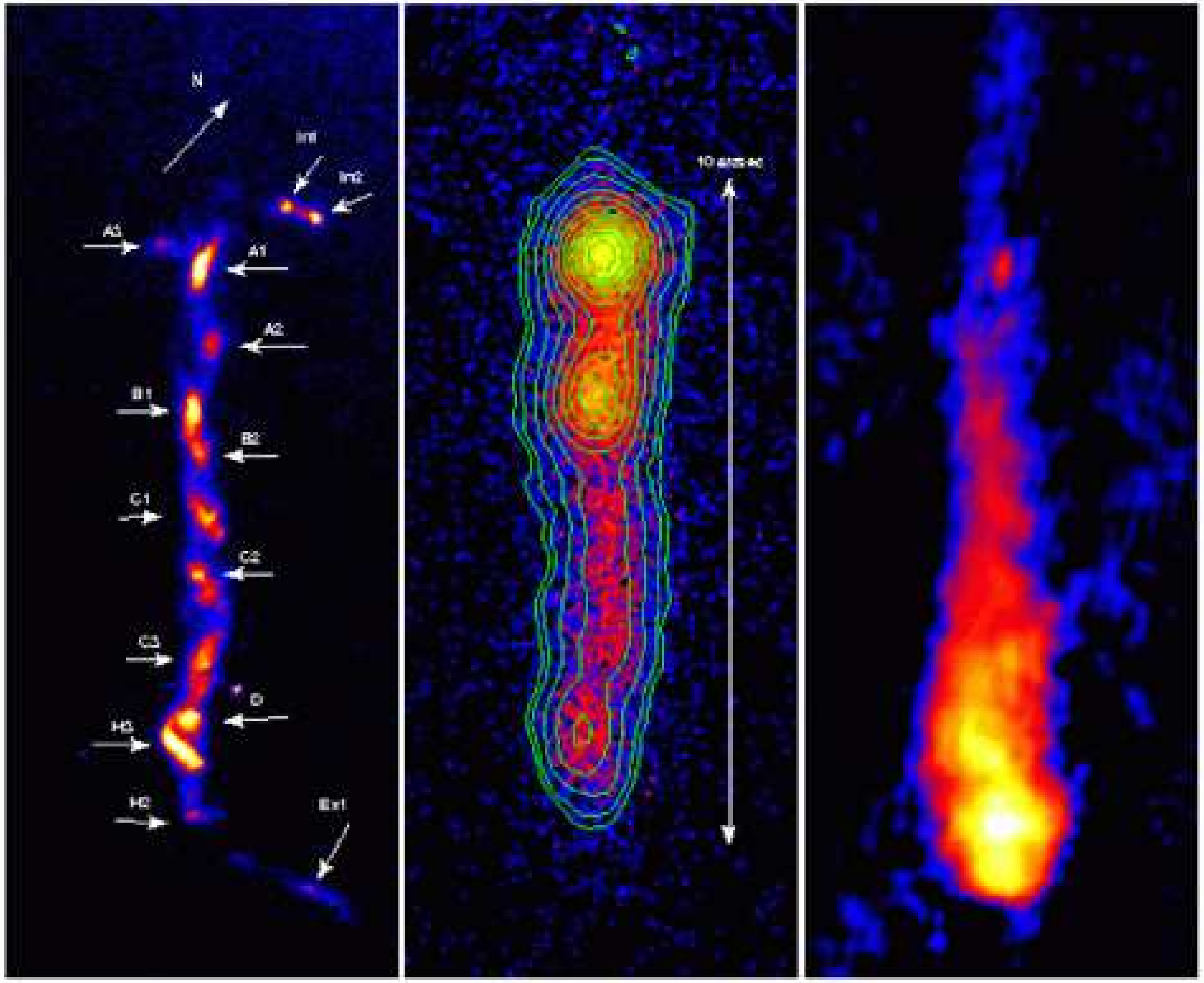
Активная галактика, вид сбоку (Pictor A в рентгеновских лучах):



ВОЗМОЖНЫЕ АСТРОФИЗИЧЕСКИЕ ИСТОЧНИКИ: лацертиды

Ускорение частиц в струях и "горячих пятнах"

(квазар 3C273, разные частоты):



ВОЗМОЖНЫЕ АСТРОФИЗИЧЕСКИЕ ИСТОЧНИКИ: лацертиды

ИСТОРИЯ КОРРЕЛЯЦИЙ С ЛАЦЕРТИДАМИ

AGASA, Якутск:

кластеры

$\downarrow$

кластеры совпадают с лацертидами

$\downarrow$

другие события тоже совпадают с лацертидами

ТРИ ВЫБОРКИ ЛАЦЕРТИД:

- 22 объекта — *Tinyakov, Tkachev, 2000*
- 14 объектов — *Gorbunov, Tinyakov, Tkachev, ST, 2001*
- 156 объектов (в том числе все 22 и 10 из 14) — *Tinyakov, Tkachev, 2001*

ВОЗМОЖНЫЕ АСТРОФИЗИЧЕСКИЕ ИСТОЧНИКИ: лацертиды

GTTT'04: КОРРЕЛЯЦИОННАЯ ФУНКЦИЯ

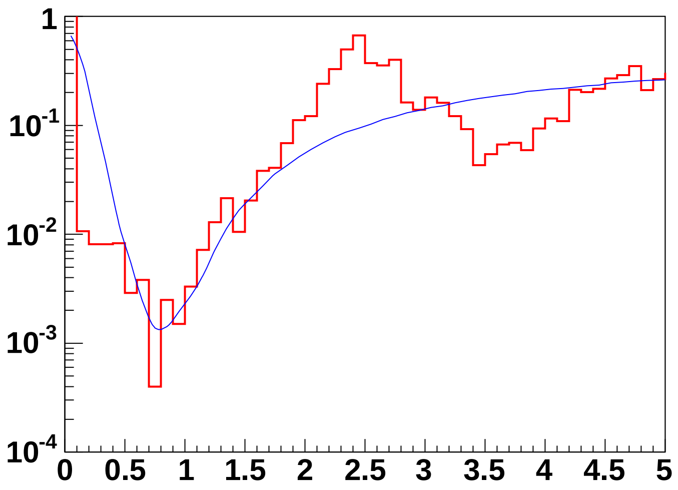
(число пар в пределах угла 0.8°,

определенного из углового разрешения)

11 пар "лацертида – космический луч"

3 пары ожидается при случайном распределении

вероятность иметь ≥ 11 пар: $4 \cdot 10^{-4}$



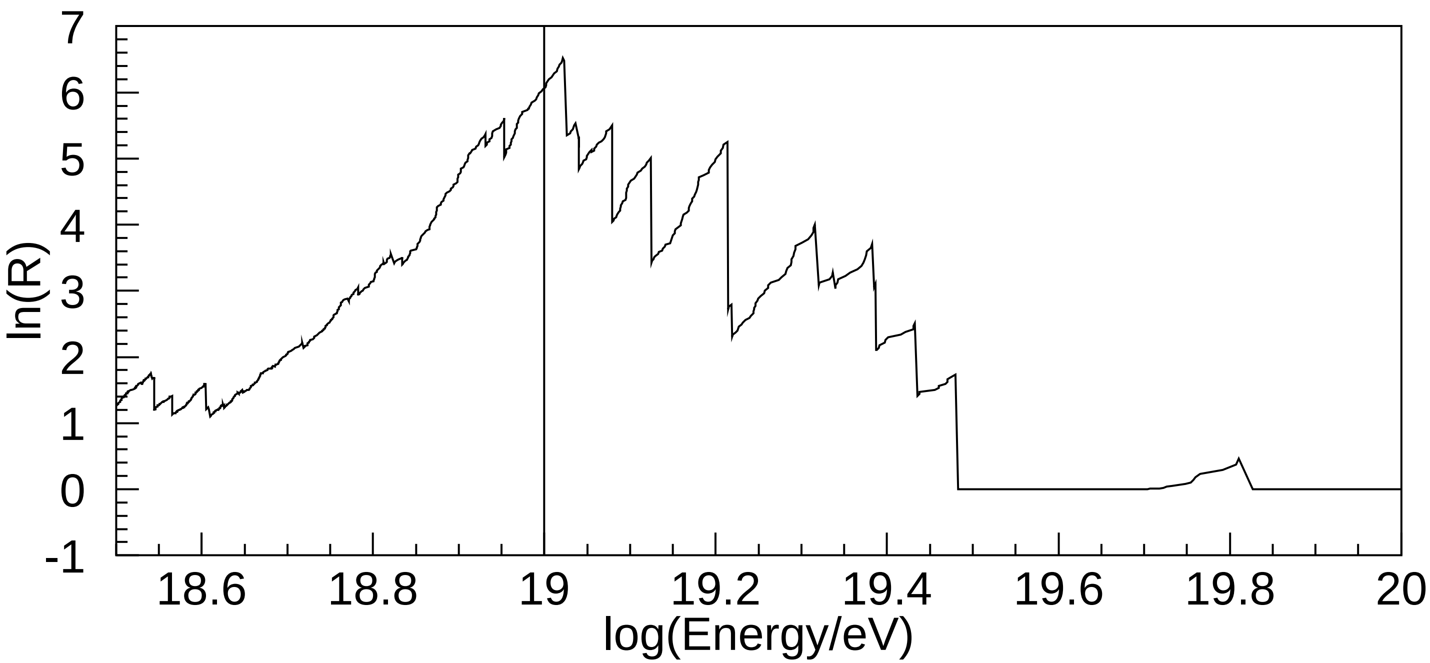
ВОЗМОЖНЫЕ АСТРОФИЗИЧЕСКИЕ ИСТОЧНИКИ: лацертиды

HIRES'05: MAXIMUM LIKELYHOOD (максимальное правдоподобие?)

(не требует фиксирования определенного угла,

использует точность определения направления прилета для *отдельных* событий)

вероятность случайно получить столь же высокое правдоподобие: $2 \cdot 10^{-4}$



ВОЗМОЖНЫЕ АСТРОФИЗИЧЕСКИЕ ИСТОЧНИКИ: лацертиды

ДВА МЕТОДА ДАЮТ ОДИНАКОВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ:

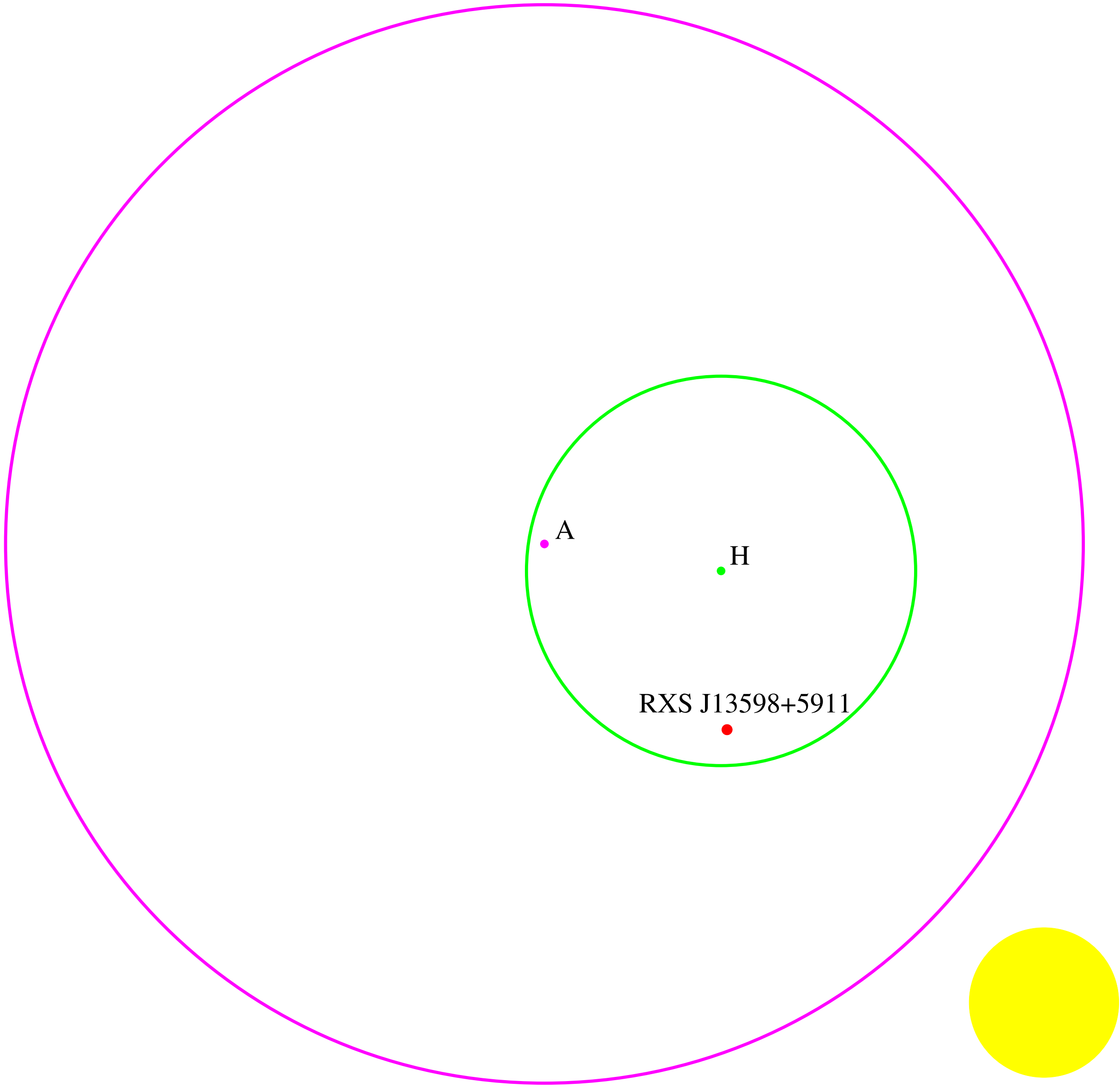
ДОЛЯ СИМУЛИРОВАННЫХ НАБОРОВ с ЧИСЛОМ ПАР (в фиксированном угловом бине), ПРЕВОСХОДЯЩИМ НАБЛЮДАЕМОЕ	ДОЛЯ СИМУЛИРОВАННЫХ НАБОРОВ с МАКСИМАЛЬНЫМ ПРАВДОПОДОБИЕМ (без фиксации угла), ПРЕВОСХОДЯЩИМ НАБЛЮДАЕМОЕ
GTTT'04	HIRES'05
$4 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$

HIRES STEREO, $E > 10^{19}$ эВ (271 событие)

VERON 2001, BL, mag< 18 (157 лацертид)

ВОЗМОЖНЫЕ АСТРОФИЗИЧЕСКИЕ ИСТОЧНИКИ: лацертиды

КАК ВЫГЛЯДЯТ КОРРЕЛЯЦИИ?



ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ: ИТОГИ

- ДВА ТИПА ЭКСПЕРИМЕНТОВ
  - наземные решетки детекторов
  - флюоресцентные телескопы
- ЭНЕРГИИ: систематическая разница
- СПЕКТР: принципиальная разница при $E \sim 10^{20}$ эВ
- ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ:

  доминируют протоны или легкие ядра, но заметная часть других частиц допустима
- ГЛОБАЛЬНАЯ ИЗОТРОПИЯ НАПРАВЛЕНИЙ ПРИЛЕТА

  (кроме, возможно, $E > 10^{20}$ эВ)
- КЛАСТЕРЫ: не подтверждены, но и не опровергнуты
- КОРРЕЛЯЦИИ С ЛАЦЕРТИДАМИ

РАСПРОСТРАНЕНИЕ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

ЯДРА

- фотодезынтеграция
- отклонение

ПРОТОНЫ

- $p\gamma$-взаимодействие (в т.ч. эффект ГЗК)
- отклонение

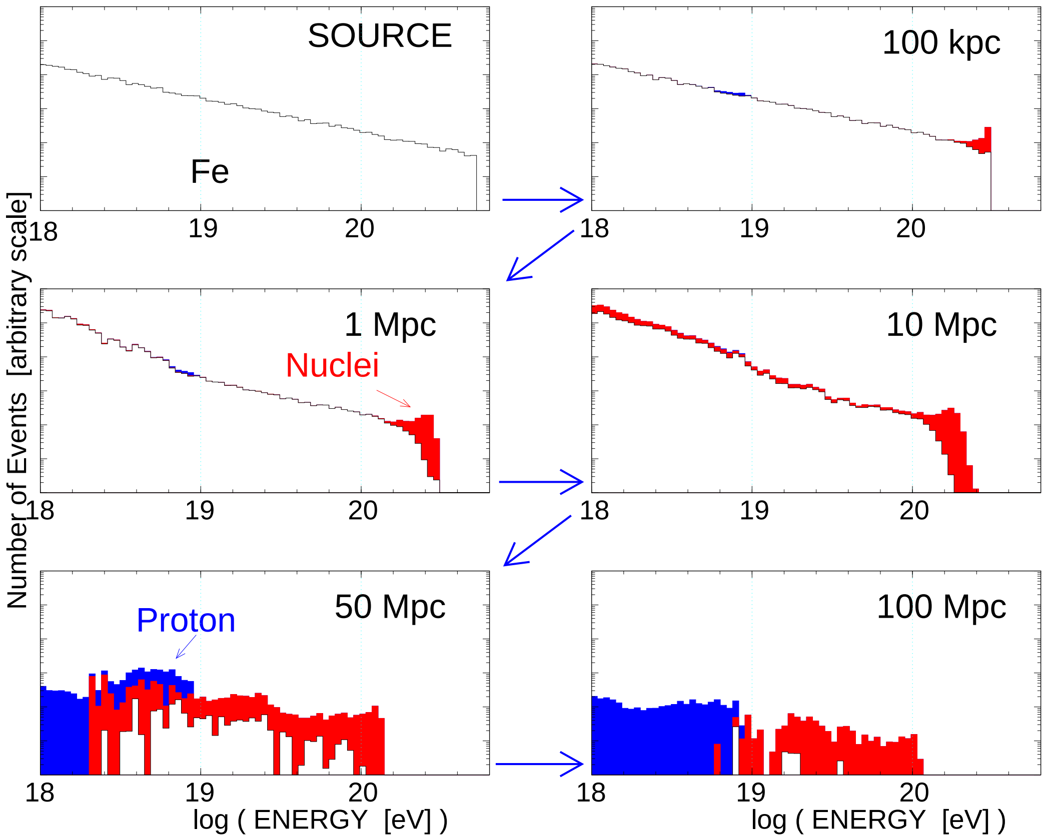
ФОТОНЫ

- электромагнитные каскады
- отклонение!

НЕЙТРИНО

- резонансное рассеяние $\nu\bar{\nu}$ (Z-burst)

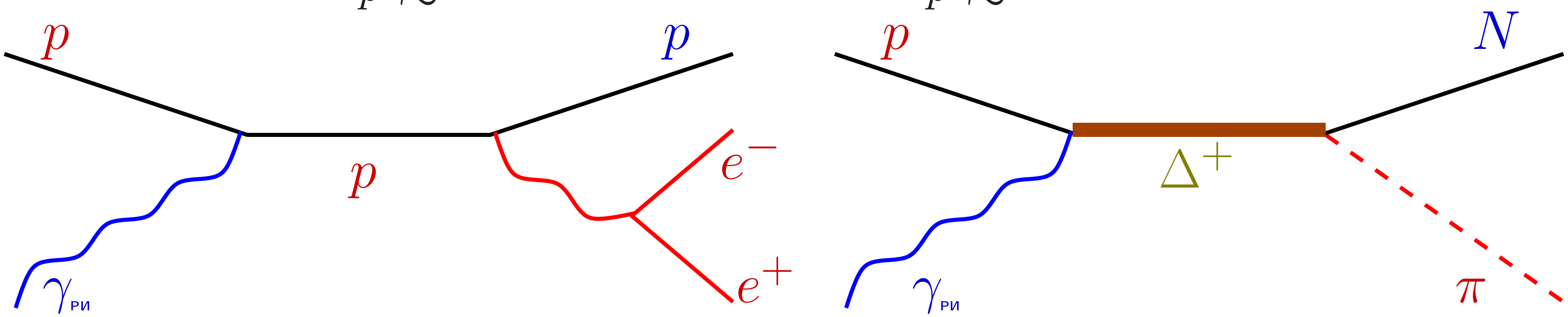
РАСПРОСТРАНЕНИЕ: ядра



РАСПРОСТРАНЕНИЕ: протоны

взаимодействие с фотонами реликтового излучения

$E_p \lesssim 5 \cdot 10^{19}$ eV $\qquad$ $E_p \gtrsim 5 \cdot 10^{19}$ eV



$L^{m.f.p.}_{p\gamma_{\text{ри}}\to pe^+e^-} \sim 1$ Mpc $\qquad$ $L^{m.f.p.}_{p\gamma_{\text{ри}}\to N\pi} \sim 5$ Mpc

$\Delta E_p/E_p \sim 10^{-3}$ $\qquad$ $\Delta E_p/E_p \sim 20\%$

РАСПРОСТРАНЕНИЕ: протоны

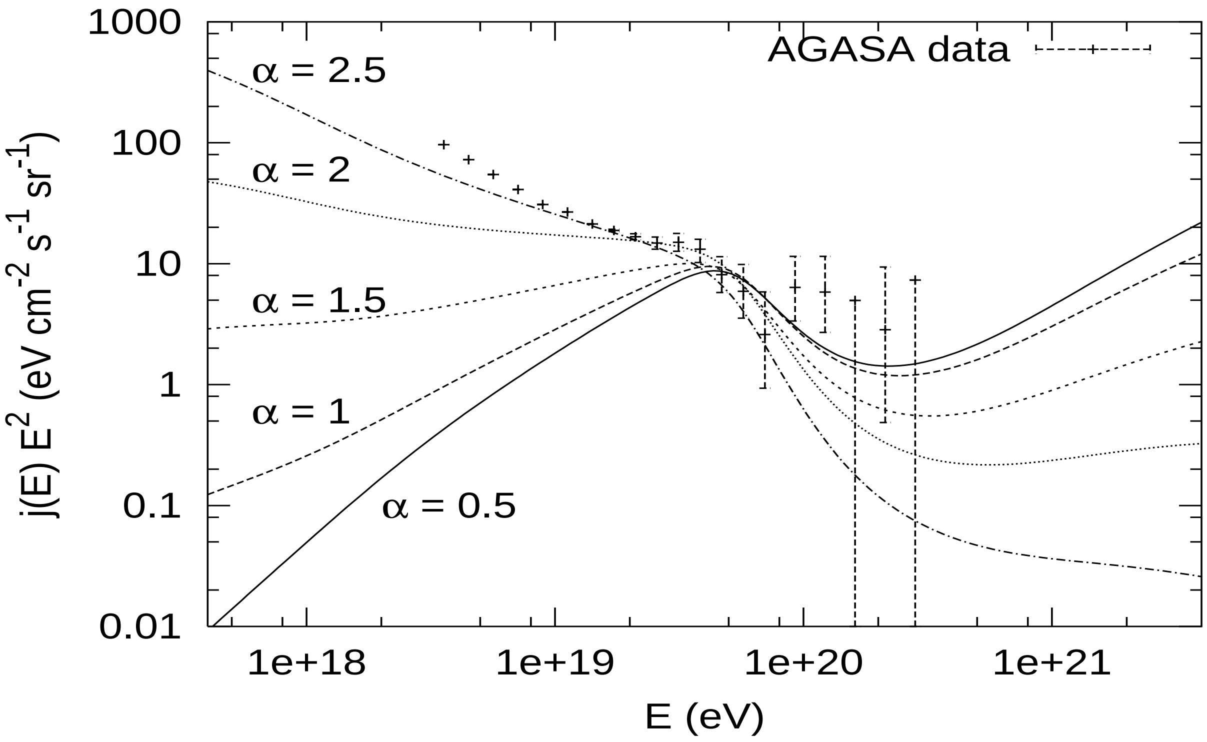
ЭФФЕКТ ГРЕЙЗЕНА–ЗАЦЕПИНА–КУЗЬМИНА (ГЗК)

- ОБРЕЗАНИЕ СПЕКТРА КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

  при энергиях выше порога $p\gamma \longrightarrow \Delta \longrightarrow N\pi$

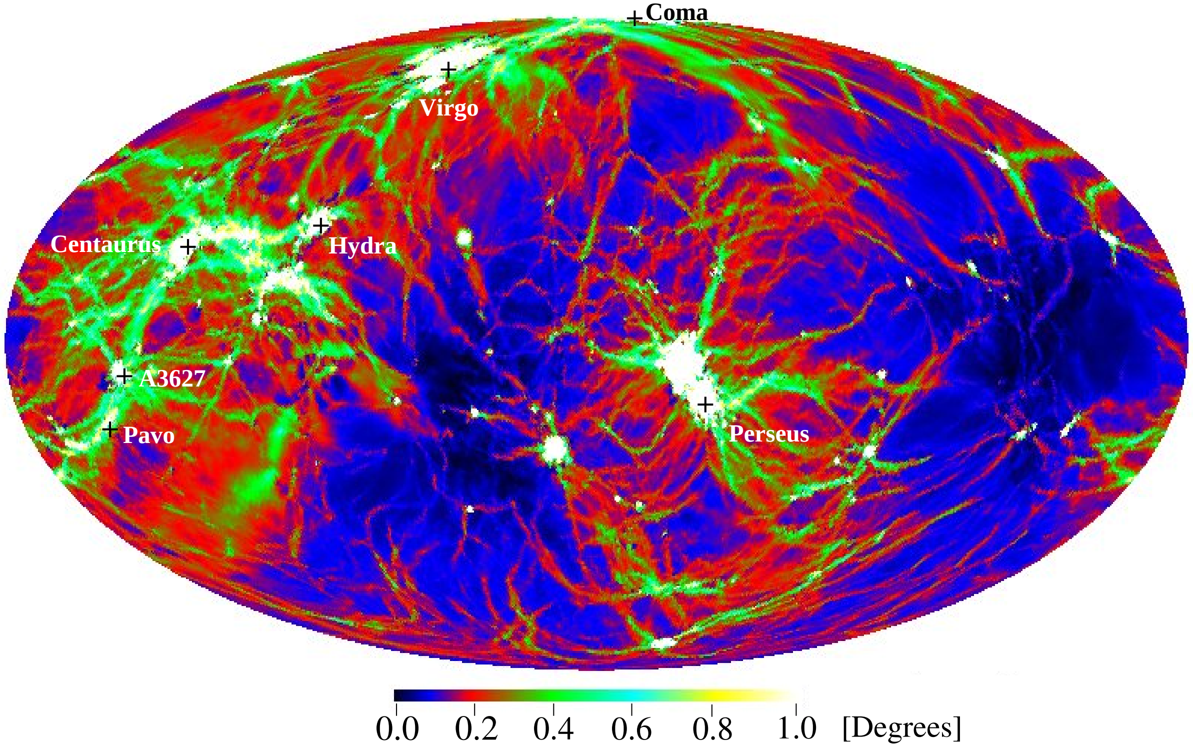
  – равномерно распределенные источники

  – спектр протонов в источнике достаточно быстро падает с энергией



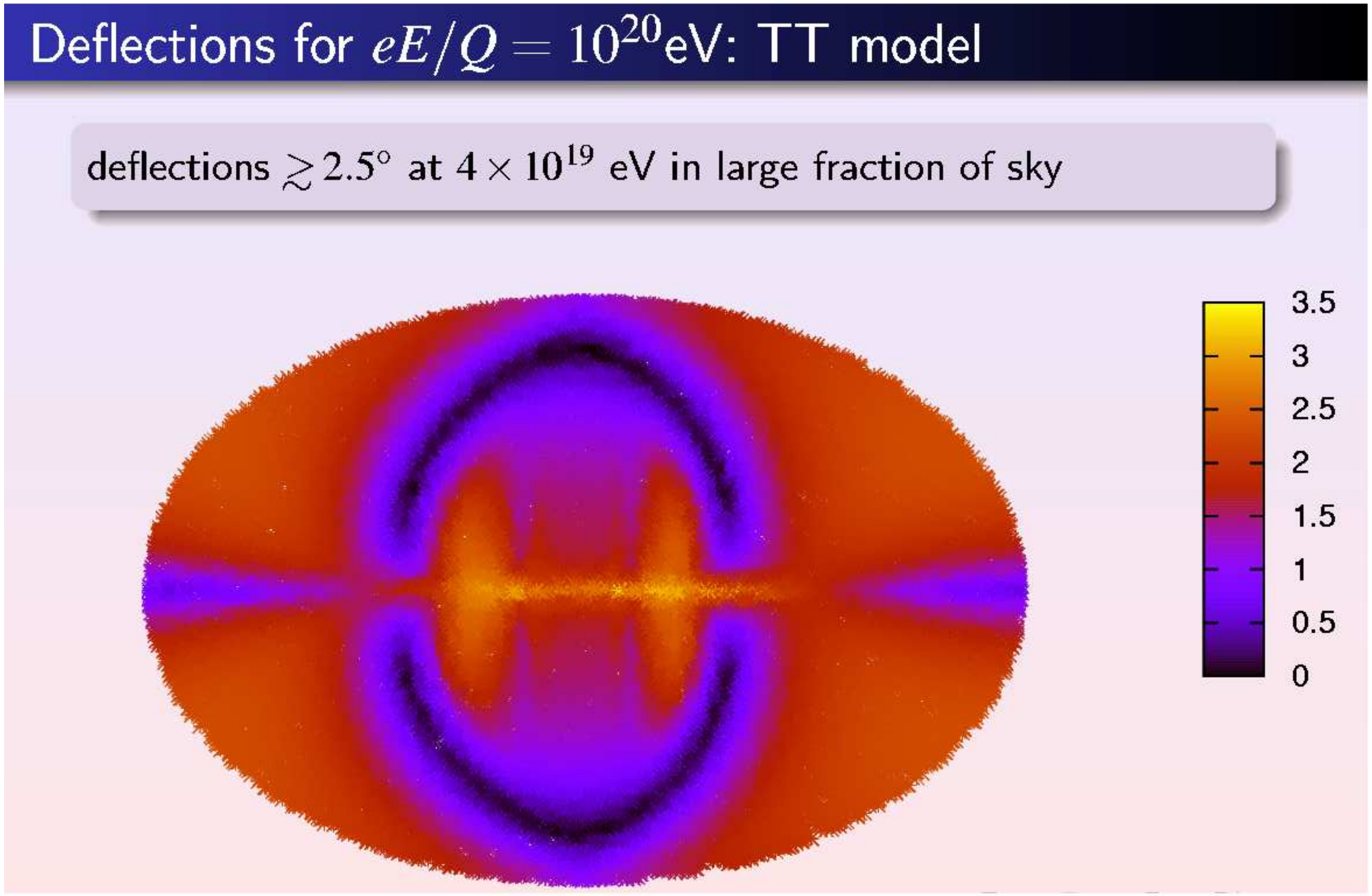
РАСПРОСТРАНЕНИЕ: протоны

ОТКЛОНЕНИЯ В МЕЖГАЛАКТИЧЕСКОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ МАЛЫ



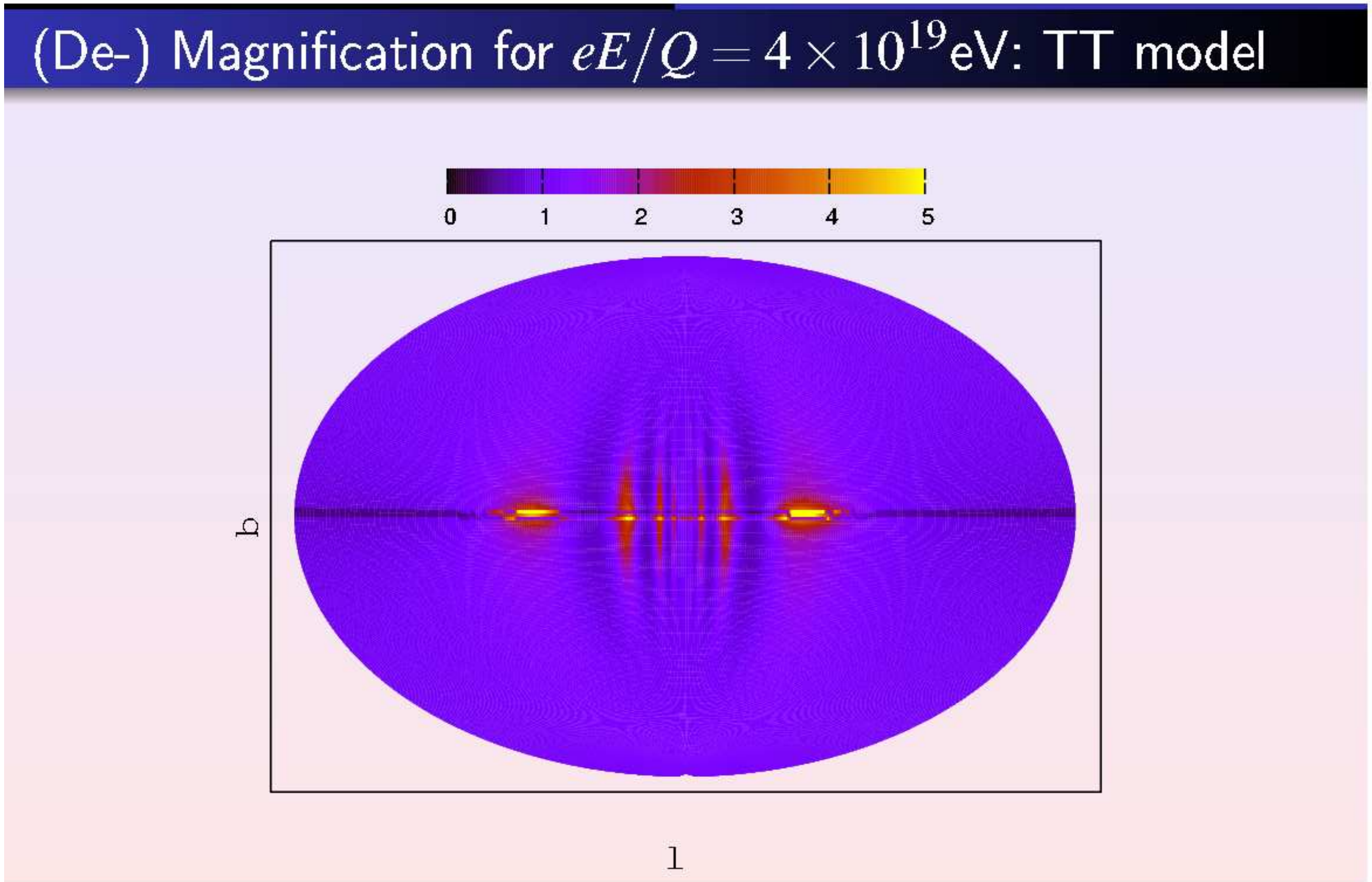
РАСПРОСТРАНЕНИЕ: протоны

ОТКЛОНЕНИЯ В ГАЛАКТИЧЕСКОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ СУЩЕСТВЕННЫ



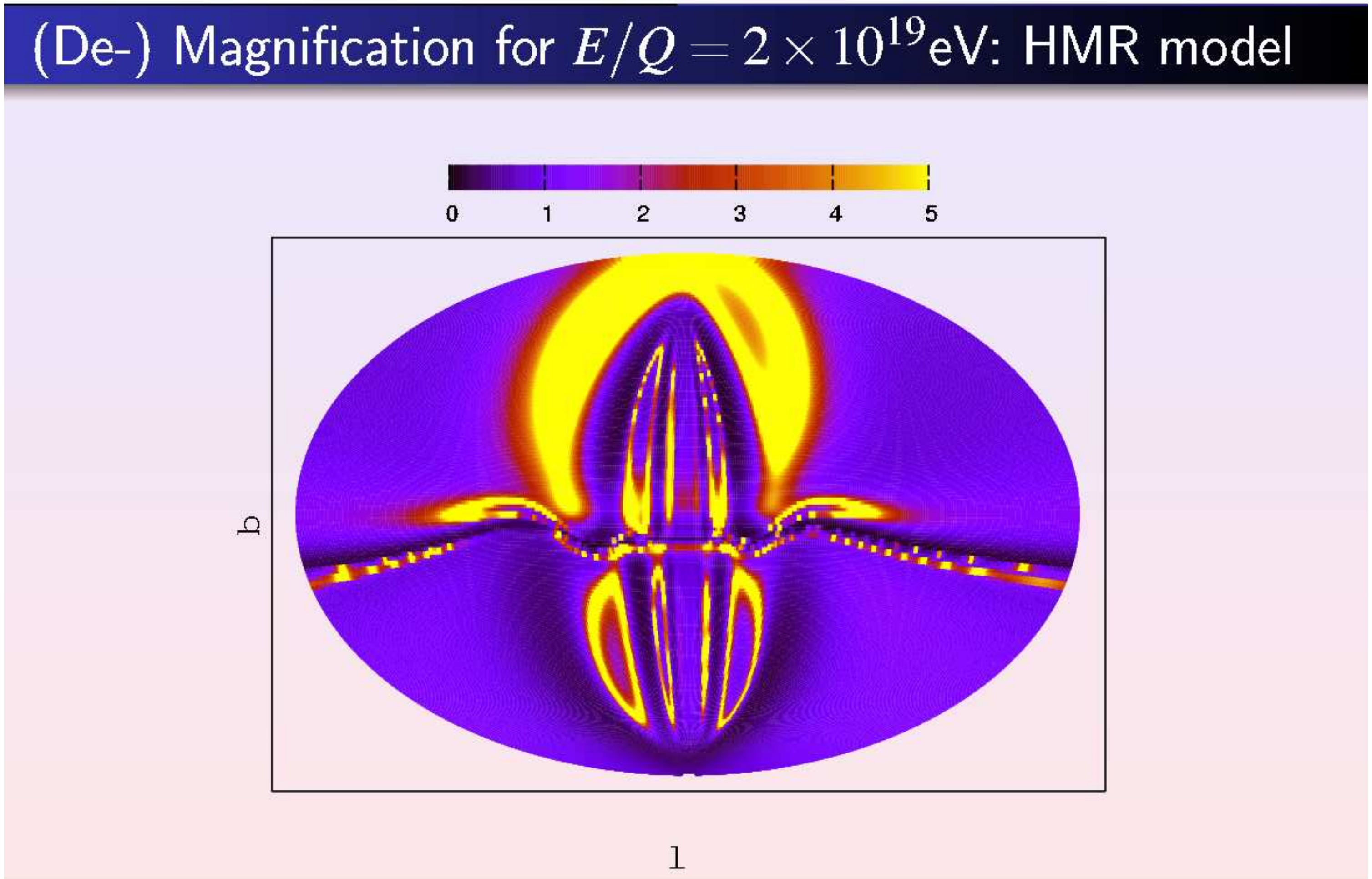
РАСПРОСТРАНЕНИЕ: протоны

ВОЗМОЖНОСТЬ МАГНИТНОГО ЛИНЗИРОВАНИЯ (КЛАСТЕРЫ?)



РАСПРОСТРАНЕНИЕ: протоны

ВОЗМОЖНОСТЬ МАГНИТНОГО ЛИНЗИРОВАНИЯ (КЛАСТЕРЫ?)



ПРОБЛЕМА ГЗК

СИЛЬНАЯ:

нет обрезания (AGASA)

- локальная концентрация источников
- или странный механизм ускорения
- или другие частицы

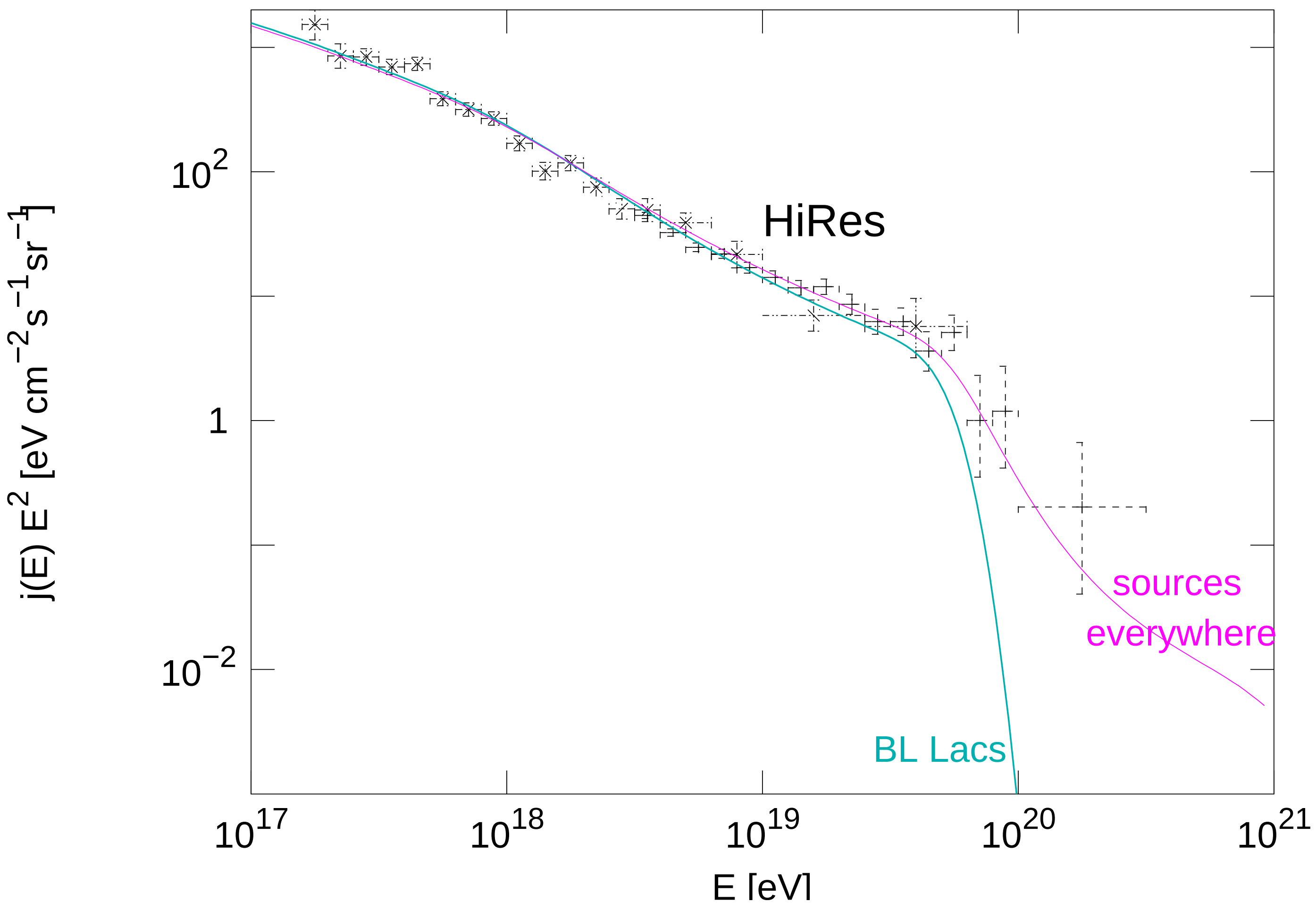
СЛАБАЯ:

есть обрезание, но нет близких источников

- неизвестные источники
- или странный механизм ускорения
- или другие частицы

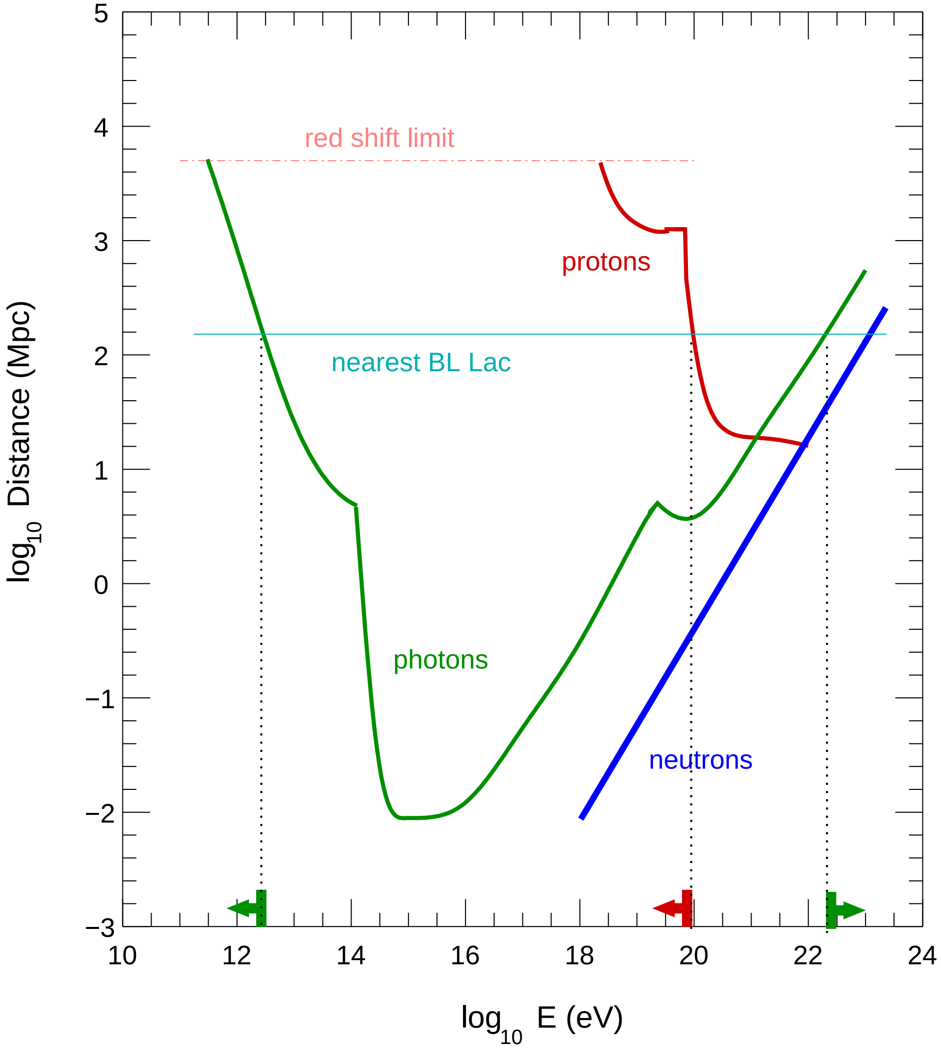
ПРОБЛЕМА ГЗК

СЛАБАЯ — даже HiRes mono



ПРОБЛЕМА ГЗК

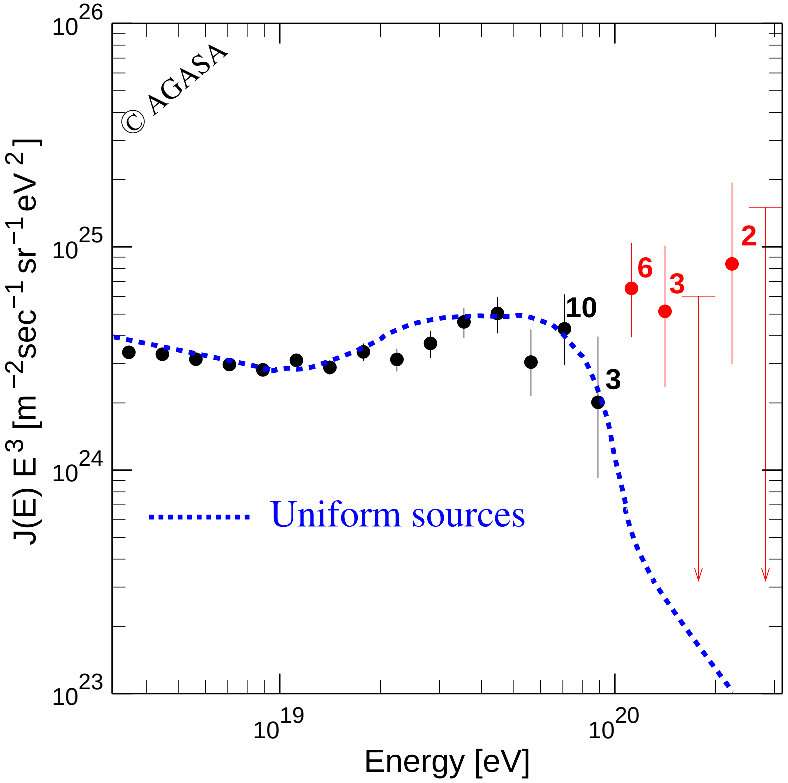
НЕ ТОЛЬКО ПРОТОНЫ



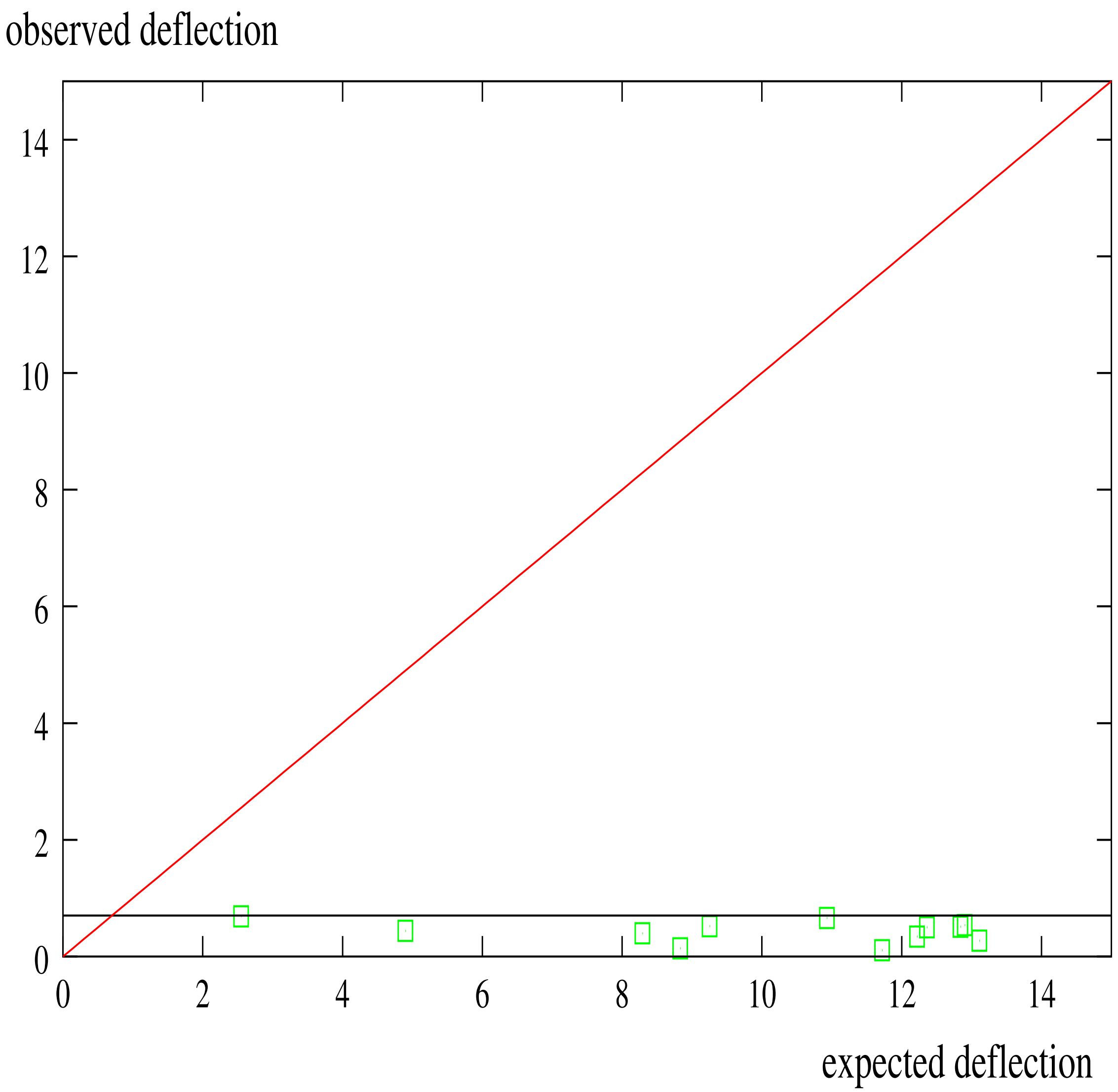
ПРОБЛЕМА ГЗК

ДРУГИЕ СИГНАЛЫ от $p\gamma$- взаимодействия

- форма спектра ниже обрезания (почти все эксперименты видят ямку и горбик)
- вторичные нейтрино
- вторичные фотоны



НЕЙТРАЛЬНЫЕ ЧАСТИЦЫ ОТ ЛАЦЕРТИД



$\Rightarrow$ нейтральные частицы ($\sim 3\%$) от очень далеких объектов

НЕЙТРАЛЬНЫЕ ЧАСТИЦЫ ОТ ЛАЦЕРТИД

ЗАВИСИМОСТЬ КОРРЕЛЯЦИЙ ОТ ЭНЕРГИИ

<table>
<tr><td rowspan="2">ВСЕ ДАННЫЕ HIRES
(без ограничений по E)
$2 \cdot 10^{-4}$</td><td>ОПУБЛИКОВАННЫЕ
($E > 10^{19}$ эВ)</td><td>$2 \cdot 10^{-4}$</td></tr>
<tr><td>ОСТАЛЬНЫЕ
($E < 10^{19}$ эВ)</td><td>$6 \cdot 10^{-3}$</td></tr>
</table>

НЕЙТРАЛЬНЫЕ ЧАСТИЦЫ ОТ ЛАЦЕРТИД

ВОЗМОЖНЫЕ ОБЪЯСНЕНИЯ: ОБЩИЕ ПРОБЛЕМЫ

Происхождение:

- ускорение заряженных частиц
- вероятность родить нейтралы
- сопутствующее излучение

Распространение:

- потери энергии
- отклонения в магнитных полях
- сопутствующее излучение

Атмосферные ливни:

- сечение взаимодействия с воздухом

НЕЙТРАЛЬНЫЕ ЧАСТИЦЫ

фотоны

нейтрино

π^0

нейтрон

аксион

сголдстино

нейтралино

с-адроны

ТЯЖЕЛЫЕ ЧАСТИЦЫ

НЕЛЬЗЯ УСКОРИТЬ НЕЙТРАЛЬНЫЕ ЧАСТИЦЫ

$\Downarrow$

УСКОРЯТЬ ПРОТОНЫ, РОЖДАТЬ НЕЙТРАЛЫ

ТЯЖЕЛЫЕ НЕЙТРАЛЫ

$\Downarrow$

МАЛАЯ ВЕРОЯТНОСТЬ РОЖДЕНИЯ

$\Downarrow$

ТРЕБУЕТСЯ БОЛЬШОЙ ПОТОК ПРОТОНОВ

$\Downarrow$

ЗАПРЕЩЕНО из анализа сопутствующего излучения (EGRET, нейтрино)

НЕЙТРАЛЬНЫЕ ЧАСТИЦЫ

фотоны

нейтрино

π^0

нейтрон

аксион

сголдстино

нейтралино

сопутствующее излучение

с-адроны

тяжелые — сопутствующее излучение

НЕЙТРАЛЬНЫЕ ЧАСТИЦЫ

фотоны	
нейтрино	
π^0 нейтрон	
аксион сголдстино	
нейтралино	сопутствующее излучение
с-адроны	нужно легкое глюино — закрыто (ускорители) нужен легкий b-скварк — закрыто (ускорители) тяжелые — сопутствующее излучение

ВТОРИЧНЫЕ ФОТОНЫ (ГЗК)

$$p_{\mathrm{UHE}} + \gamma_{\mathrm{CMB}} \to \begin{cases} \pi^0 \to \gamma\gamma \\ \ldots \end{cases}$$

- НАПРАВЛЕНИЕ: p_{UHE} СЛАБО ОТКЛОНЯЕТСЯ В МЕЖГАЛАКТИЧЕСКОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Dolag et.al., 2004

- НО:
  - $FLUX(\gamma)/FLUX(p) \sim 10^{-3}$ при $E \sim 10^{19}$ эВ

    Gelmini, Kalashev, Semikoz, 2004

  - ОТКЛОНЕНИЯ В ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ КАСКАДЕ! (в бытность электроном)

    Gorbunov, Kalashev, ST, 2005

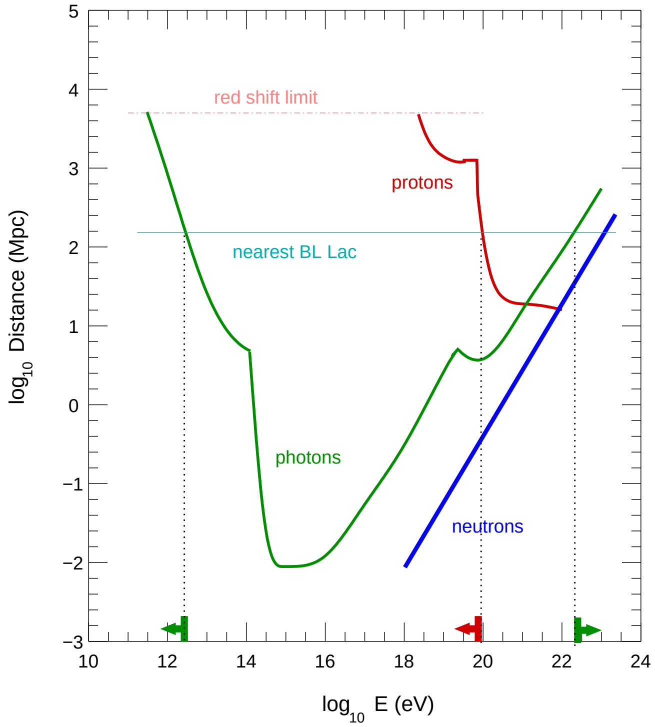
НЕЙТРАЛЬНЫЕ ЧАСТИЦЫ

фотоны	вторичные (ГЗК) $\Rightarrow$ недостаточен поток
нейтрино	
π^0 нейтрон	
аксион сголдстино	
нейтралино	сопутствующее излучение
с-адроны	нужно легкое глюино — закрыто (ускорители) нужен легкий b-скварк — закрыто (ускорители) тяжелые — сопутствующее излучение

ФОТОНЫ ОТ ИСТОЧНИКОВ

ПОСМОТРИМ ВНИМАТЕЛЬНО $\Rightarrow$ РАЗРЕШЕНЫ ПРИ $E > 10^{22}$ эВ

Kalashev et.al., 2001



- легко родить $\Rightarrow$ разумные потоки $\Rightarrow$ $(\pm)$ нет проблем с EGRET
- как ускорить протоны до 10^{23} эВ?

НЕЙТРАЛЬНЫЕ ЧАСТИЦЫ

фотоны	от источника $\Rightarrow$ требуются огромные энергии вторичные (ГЗК) $\Rightarrow$ недостаточен поток
нейтрино	
π^0 нейтрон	
аксион сголдстино	
нейтралино	сопутствующее излучение
с-адроны	нужно легкое глюино — закрыто (ускорители) нужен легкий b-скварк — закрыто (ускорители) тяжелые — сопутствующее излучение

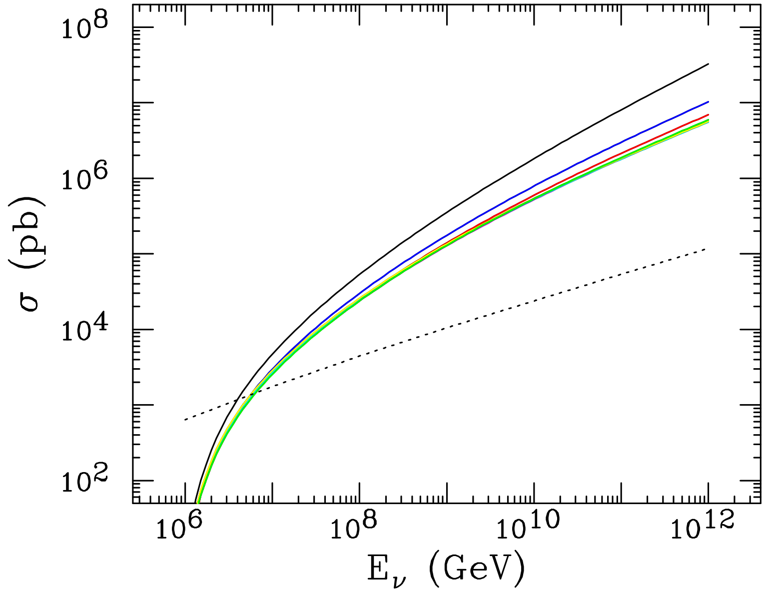
НЕЙТРАЛЬНЫЕ ЧАСТИЦЫ

фотоны	от источника $\Rightarrow$ требуются огромные энергии вторичные (ГЗК) $\Rightarrow$ недостаточен поток
нейтрино	необычные ливни – запрещено
π^0 нейтрон	
аксион сголдстино	
нейтралино	необычные ливни – запрещено сопутствующее излучение
с-адроны	нужно легкое глюино — закрыто (ускорители) нужен легкий b-скварк — закрыто (ускорители) тяжелые — сопутствующее излучение

БОЛЬШОЕ СЕЧЕНИЕ НЕЙТРИНО-ВОЗДУХ

[теоретическая трудность: высокие (адронные!) сечения ν-воздух, но низкие ν-$\gamma_{\rm CMB}$ ...]

ГРАВИТАЦИЯ НА НИЗКИХ ЭНЕРГИЯХ:



Anchordoqui et.al., 2003

ПРОТОНЫ: 500 mb

ВСЕ РАВНО НЕОБЫЧНЫЕ ЛИВНИ! ВСЕ РАВНО ЗАПРЕЩЕНО

(ОГРАНИЧЕНИЯ НА НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКУЮ ГРАВИТАЦИЮ)

Anchordoqui et.al., 2004

НЕЙТРАЛЬНЫЕ ЧАСТИЦЫ

фотоны	от источника $\Rightarrow$ требуются огромные энергии вторичные (ГЗК) $\Rightarrow$ недостаточен поток
нейтрино	необычные ливни – запрещено большое сечение ν-воздух – запрещено
π^0 нейтрон	
аксион сголдстино	
нейтралино	необычные ливни – запрещено сопутствующее излучение
с-адроны	нужно легкое глюино — закрыто (ускорители) нужен легкий b-скварк — закрыто (ускорители) тяжелые — сопутствующее излучение

Z-BURST

резонансное рассеяние нейтрино на реликтовых антинейтрино, $E_{\text{res}} \approx \dfrac{4\ \text{eV}}{m_\nu} \cdot 10^{21}\ \text{eV}$.

фотоны среди продуктов распада Z

- высокая концентрация реликтовых нейтрино вблизи нас (запрещено из космологии)
- огромный поток нейтрино на $E \sim 10^{21}$ eV

  $\Rightarrow$ ОГРОМНЫЙ поток протонов на $E \sim 10^{22}$ eV

  – как ускорить?

  – вторичные фотоны запрещены EGRET

    $*$ непрозрачные источники $\Rightarrow$ вторичные нейтрино запрещены (Байкал, AMANDA)

НЕЙТРАЛЬНЫЕ ЧАСТИЦЫ

фотоны	от источника $\Rightarrow$ требуются огромные энергии вторичные (ГЗК) $\Rightarrow$ недостаточен поток
нейтрино	необычные ливни – запрещено большое сечение ν-воздух – запрещено Z-burst $\left\{ \begin{array}{l} \text{огромные энергии!} \\ \text{сопутствующее излучение} + \text{космология} \end{array} \right.$
π^0 нейтрон	
аксион сголдстино	
нейтралино	необычные ливни – запрещено сопутствующее излучение
с-адроны	нужно легкое глюино — закрыто (ускорители) нужен легкий b-скварк — закрыто (ускорители) тяжелые — сопутствующее излучение

АКСИОН, СГОЛДСТИНО и т.д.

- СВОБОДНО РАСПРОСТРАНЯЮТСЯ
- ТРУДНО РОДИТЬ
- В МАГНИТНОМ ПОЛЕ ОСЦИЛЛИРУЮТ В ФОТОНЫ
- БОЛЬШИЕ ПОТОКИ В ИСТОЧНИКЕ $\Rightarrow$ СОПУТСТВУЮЩЕЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

НЕЙТРАЛЬНЫЕ ЧАСТИЦЫ

фотоны	от источника $\Rightarrow$ требуются огромные энергии вторичные (ГЗК) $\Rightarrow$ недостаточен поток
нейтрино	необычные ливни – запрещено большое сечение ν-воздух – запрещено Z-burst $\left\{\begin{array}{l}\text{огромные энергии!}\\ \text{сопутствующее излучение} + \text{космология}\end{array}\right.$
π^0 нейтрон	
аксион сголдстино	сопутствующее излучение
нейтралино	необычные ливни – запрещено сопутствующее излучение
с-адроны	нужно легкое глюино — закрыто (ускорители) нужен легкий b-скварк — закрыто (ускорители) тяжелые — сопутствующее излучение

НАРУШЕНИЕ ЛОРЕНЦ-ИНВАРИАНТНОСТИ

РАЗНЫЕ ЧАСТИЦЫ $i \Rightarrow$ РАЗНЫЕ МАКСИМАЛЬНЫЕ СКОРОСТИ c_i

π^0 и/или нейтрон могут быть стабильными при высоких энергиях

$$p \longrightarrow e^+ n \nu$$

- КИНЕМАТИЧЕСКИ ЗАПРЕЩЕН $c_p = c_n = c_\nu = c_e = 1$
- РАЗРЕШЕН ПРИ НЕКОТОРЫХ ЭНЕРГИЯХ, ЕСЛИ $c_p, c_e, c_\nu < c_n$

ЭФФЕКТИВНАЯ РЕЛЯТИВИСТСКАЯ КИНЕМАТИКА:

$c \mapsto c_p, \qquad m_n^2 \mapsto m_{\text{eff}}^2 = m_n^2 - (c_p^2 - c_n^2)\mathbf{p}^2$

$m_{\text{eff}} < m_p + m_e + m_\nu \Rightarrow$ бета-распад запрещен!

СТАБИЛЬНЫЙ НЕЙТРОН, $E \gtrsim 2.7 \cdot 10^{19} \left(\dfrac{10^{-24}}{c_p - c_n}\right)^{1/2}$ эВ

НЕСТАБИЛЬНЫЙ ПРОТОН, $E \gtrsim 4.1 \cdot 10^{19} \left(\dfrac{10^{-24}}{c_p - c_n}\right)^{1/2}$ эВ

НЕЙТРАЛЬНЫЕ ЧАСТИЦЫ

фотоны	от источника $\Rightarrow$ требуются огромные энергии вторичные (ГЗК) $\Rightarrow$ недостаточен поток
нейтрино	необычные ливни – запрещено большое сечение ν-воздух – запрещено Z-burst $\begin{cases} \text{огромные энергии!} \\ \text{сопутствующее излучение} + \text{космология} \end{cases}$
π^0 нейтрон	распад $\Rightarrow$ нарушение лоренцевой инвариантности
аксион сголдстино	сопутствующее излучение
нейтралино	необычные ливни – запрещено сопутствующее излучение
с-адроны	нужно легкое глюино — закрыто (ускорители) нужен легкий b-скварк — закрыто (ускорители) тяжелые — сопутствующее излучение

НЕЙТРАЛЬНЫЕ ЧАСТИЦЫ ОТ ЛАЦЕРТИД

- СТАНДАРТНАЯ МОДЕЛЬ + СТАНДАРТНАЯ КОСМОЛОГИЯ + СТАНДАРТНАЯ АСТРОФИЗИКА:
  НЕТ ОБЪЯСНЕНИЯ
- СТАНДАРТНАЯ МОДЕЛЬ + СТАНДАРТНАЯ КОСМОЛОГИЯ:
  фотоны, но $E \sim 10^{23}$ eV
- СТАНДАРТНАЯ МОДЕЛЬ:
  Z-burst, но повышенная концентрация реликтовых ν
- СУПЕРСИММЕТРИЯ, ДРУГИЕ НОВЫЕ ЧАСТИЦЫ, ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ, НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ГРАВИТАЦИЯ:
  НЕТ ОБЪЯСНЕНИЯ
- НАРУШЕНИЕ ЛОРЕНЦ-ИНВАРИАНТНОСТИ:
  OK, но искусственно

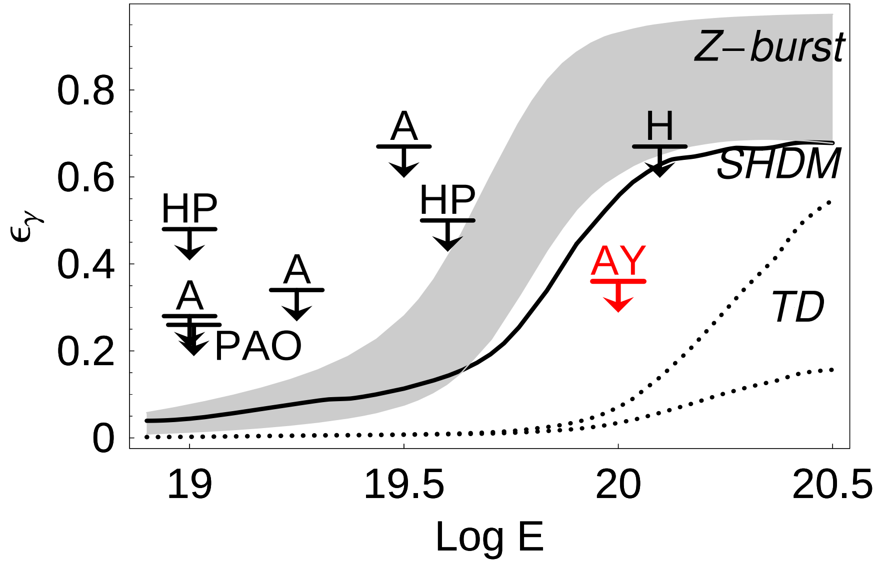
ПРОБЛЕМА ГЗК

ТЕ ЖЕ РЕШЕНИЯ! ПЛЮС НЕУСКОРИТЕЛЬНЫЕ МЕХАНИЗМЫ

- РОЖДЕНИЕ НАБЛЮДАЕМЫХ ЭНЕРГИЧНЫХ ЧАСТИЦ В РАСПАДАХ СВЕРХТЯЖЕЛЫХ ЧАСТИЦ
  - теоретическая трудность: метастабильные тяжелые частицы
  - вариант: метастабильные топологические дефекты распадаются на нестабильные тяжелые частицы
- предсказания (почти всегда):
  - галактическая анизотропия (пока не наблюдалась)
  - фотоны высоких энергий (видимо, исключены)
- проблемы с кластеризацией

ПРОБЛЕМА ГЗК: НЕУСКОРИТЕЛЬНЫЕ МЕХАНИЗМЫ

ограничения на долю фотонов:



ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ: ИТОГИ

- ДВА ТИПА ЭКСПЕРИМЕНТОВ
  - наземные решетки детекторов
  - флюоресцентные телескопы
- ЭНЕРГИИ: систематическая разница
- СПЕКТР: принципиальная разница при $E \sim 10^{20}$ эВ
- ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ:
  доминируют протоны или легкие ядра, но заметная часть других частиц допустима
- ГЛОБАЛЬНАЯ ИЗОТРОПИЯ НАПРАВЛЕНИЙ ПРИЛЕТА
  (кроме, возможно, $E > 10^{20}$ эВ)
- КЛАСТЕРЫ: не подтверждены, но и не опровергнуты
- КОРРЕЛЯЦИИ С ЛАЦЕРТИДАМИ

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБСУЖДЕНИЕ: ИТОГИ

- ПРОБЛЕМЫ с одновременным объяснением происхождения, распространения и детектирования частиц
- ПРОБЛЕМА ГЗК
- НЕЙТРАЛЬНЫЕ ЧАСТИЦЫ ОТ ЛАЦЕРТИД
- ЕСТЬ МЕСТО НОВОЙ ФИЗИКЕ!