

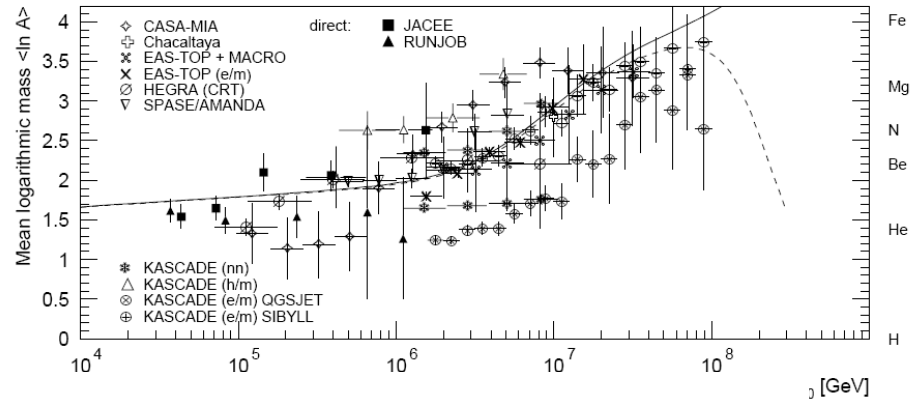
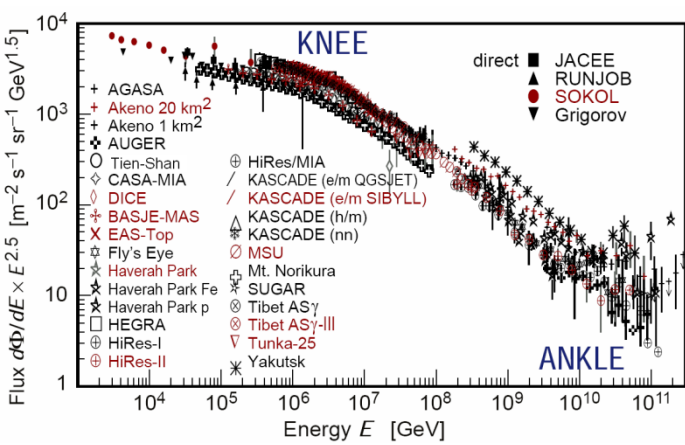
Колено в спектре ПКИ и близкий источник (эксперимент ГАММА)

В.П. Павлюченко (ФИАН) ,
Р.М. Мартиросов, Н.М. Никольская, А.Д. Ерлыкин
от ГАММА-коллаборации

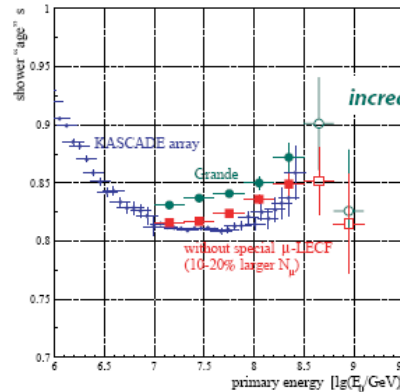
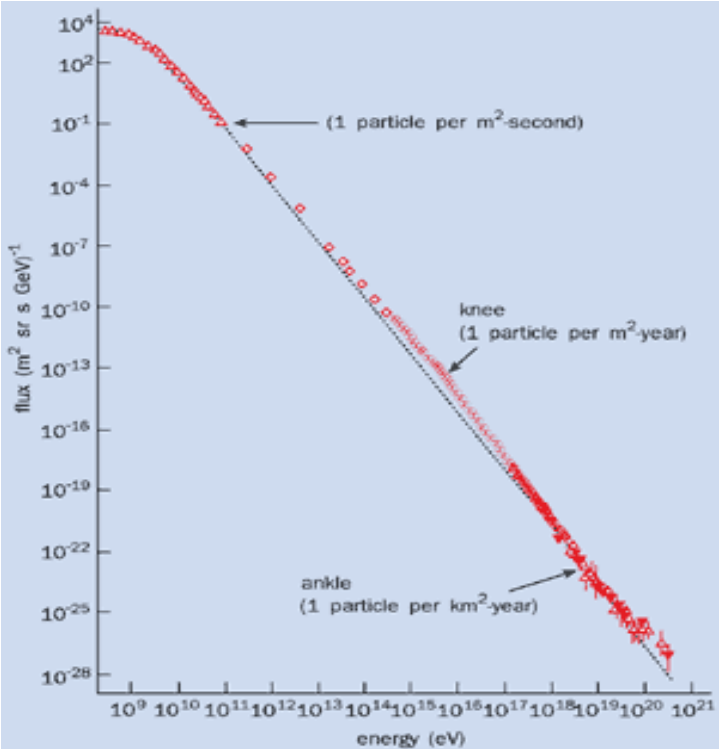


Дубна 11 - 15 авг 2014

Природа колена (1958 г.)



Shower Age vs. Primary Energy



increasing values above $10^{16} eV$
 → heavier composition!

- Abs. value of "age" s influenced by
 - parametrisation of LDF (difference KASCADE vs KA-Grande)
 - systematic uncertainties of muon sizes: $\Delta s = 0.02$
 - energy estimation: $\sigma(s) \approx 20\%$

Основные астрофизические модели

Диффузионная

Предельной энергии ускорения в оболочках SN

Близкий источник

Разностный метод

Предположения

1. **Установка** при фиксированных триггерных условиях работает с одинаковой **светосилой** независимо от времени суток и времени года, что обеспечивает одинаковые условия наблюдения разных направлений при вращении Земли.
 2. По пути от источника до Земли заряженные частицы испытывают многократное рассеяние в хаотичных магнитных полях (диффузия).
- Тогда изображение источника расплывается – чем дальше источник, тем сильнее, вплоть до полной неразличимости (радиус чувствительности). При отсутствии выделенного магнитного поля расплывание аксиально симметрично
 - *Происходит сепарация частиц с разными коэффициентами диффузии (близкий аналог – заход солнца)*

Разностный метод

«Слепой» поиск аномалий ПКИ на небесной сфере.

- Вся статистика разбивается на два равных набора: один – события из конуса вокруг заданного направления (l_0, b_0) , а другой – все остальные.
- **Локальная аномалия предполагается при таком (l_0, b_0) , при котором отличие характеристик ШАЛ из этих наборов имеет локальный максимум (например, по χ^2).**
- Для этого **распределения** выбранного для анализа экспериментального параметра в обоих наборах **вычитаются** друг из друга.
- Равенство $n = n^{anti}$ в обоих наборах обеспечивается нахождением угла ψ_0 (или $H_0 = \text{Cos } \psi_0$) раствора конуса вокруг (l_0, b_0) , причем события при $H \geq H_0$ – приходят с направления (l_0, b_0) , а при $H < H_0$ – с противоположного.
Здесь для ливня с углами (l, b)

$$H = \text{Cos } \psi = \text{Sin} b_0 \text{Sin} b + \text{Cos} b_0 \text{Cos} b \text{Cos}(l - l_0)$$

В разностном методе автоматически вычитается общий фон и возможные методические ошибки, т.к. они одни и те же в обоих наборах.

Разностный метод

Разбиение небесной сферы при сканировании по (l_0, b_0)

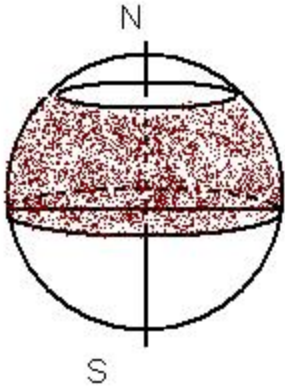


Рис. 1

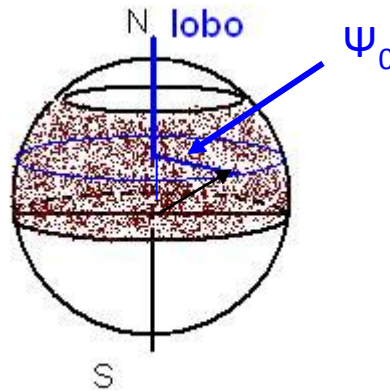


Рис. 2

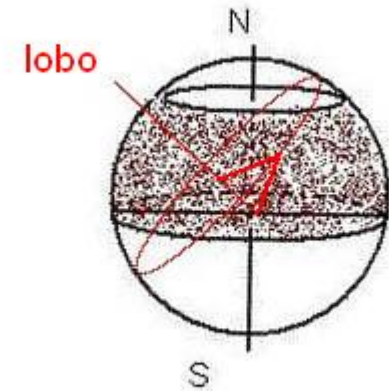


Рис. 3

Установка находится в центре сферы и вращается вокруг оси NS.

1. Полоса наблюдений на небесной сфере (экваториальные координаты).
2. Исследуемое направление **lobo** совпадает с осью вращения Земли.
3. **lobo** повернуто на произвольный угол относительно оси вращения Земли.

Разностный метод

- Численным параметром отличия распределений является величина χ^2/J , где

$$\chi^2 = \sum_i \left(\frac{\Delta_i}{\sigma_i} \right)^2$$

- J - число степеней свободы,
- $\Delta_i = m_i - m_i^{anti}$ разность между распределениями в интервале i ,
- σ_i - среднеквадратичная ошибка этой разности, вычисляется из распределения Пуассона

$$\sigma_i = \sqrt{m_i + m_i^{anti} + 1} = \sqrt{n_i + 1}$$

n_i – полное число событий в интервале i , оно не зависит от углов (l_0, b_0) .

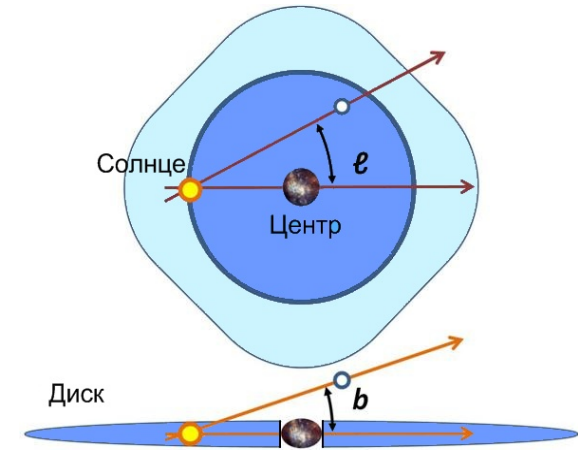
- Независимость n_i и σ_i важна для сравнения значений χ^2/J между собой при сканировании небесной сферы в поисках направления **с максимальным отличием распределений** (максимум χ^2/J). Равенство $n = n^{anti}$ позволяет на установке с ограниченным сектором обзора **исследовать всю небесную сферу** в пределах чувствительности метода, т.к. величины χ^2/J для направления (l_0, b_0) и противоположного ему равны, поскольку величины σ_i и $|\Delta_i|$ во всех интервалах равны.

Первичная обработка

Отбирались ШАЛ с числом заряженных частиц $N_e > 10^5$, с зенитными углами $\theta < 40^\circ$ в лабораторной системе координат и с осями в радиусе $R < 60$ м от центра установки. Число событий 3.38 млн. при живом времени 11544 часа (последние 3 года работы)

Для каждого ШАЛ в дальнейшем использовались:

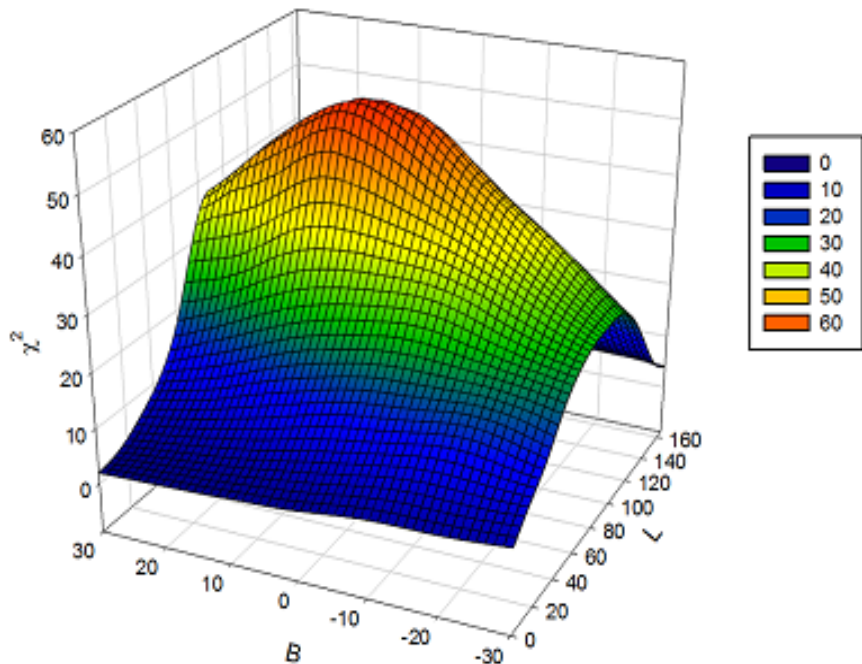
- небесные координаты прихода ШАЛ;
- так называемый «поперечный» возраст ливня S , из функции пространственного распределения в аппроксимации Нишимуры-Каматы-Грейзена (НКГ);
- (удобен с физической и методической точек зрения)
- для первичных протонов S в среднем меньше, чем для тяжелых ядер;
- параметр S коррелирован с глубиной максимума ШАЛ;



$$\rho(N_e, r, S) = 0.366 \frac{N_e}{r_0} S^2 (2.07 - S)^{5/4} \left(\frac{r}{r_0} \right)^{S-2} \left(1 + \frac{r}{r_0} \right)^{S-4.5}$$

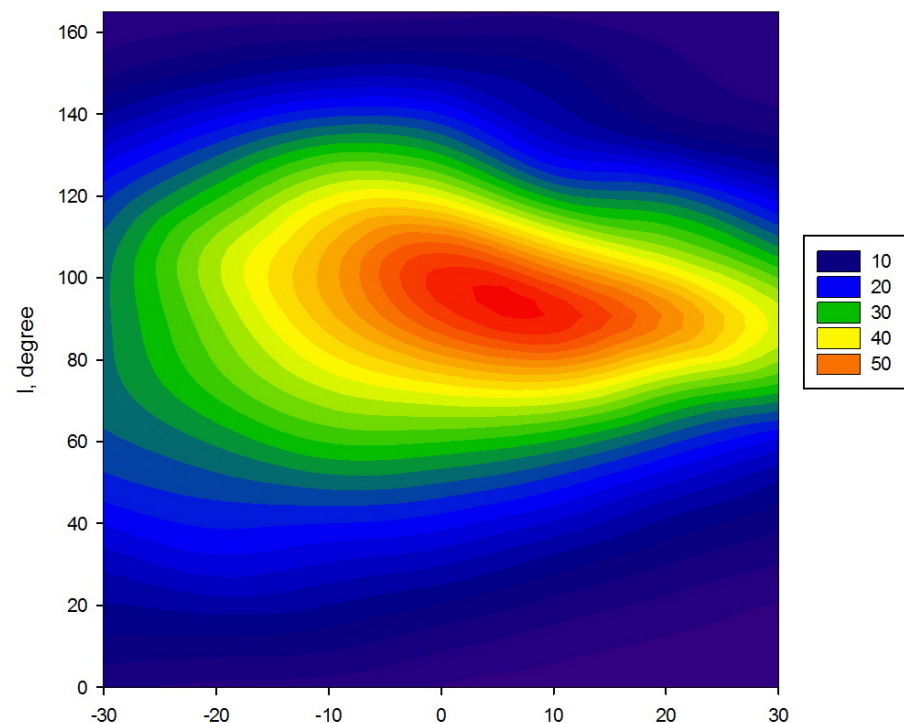
Слепой поиск максимума χ^2/J для параметра S

Галактические координаты



Трёхмерная диаграмма

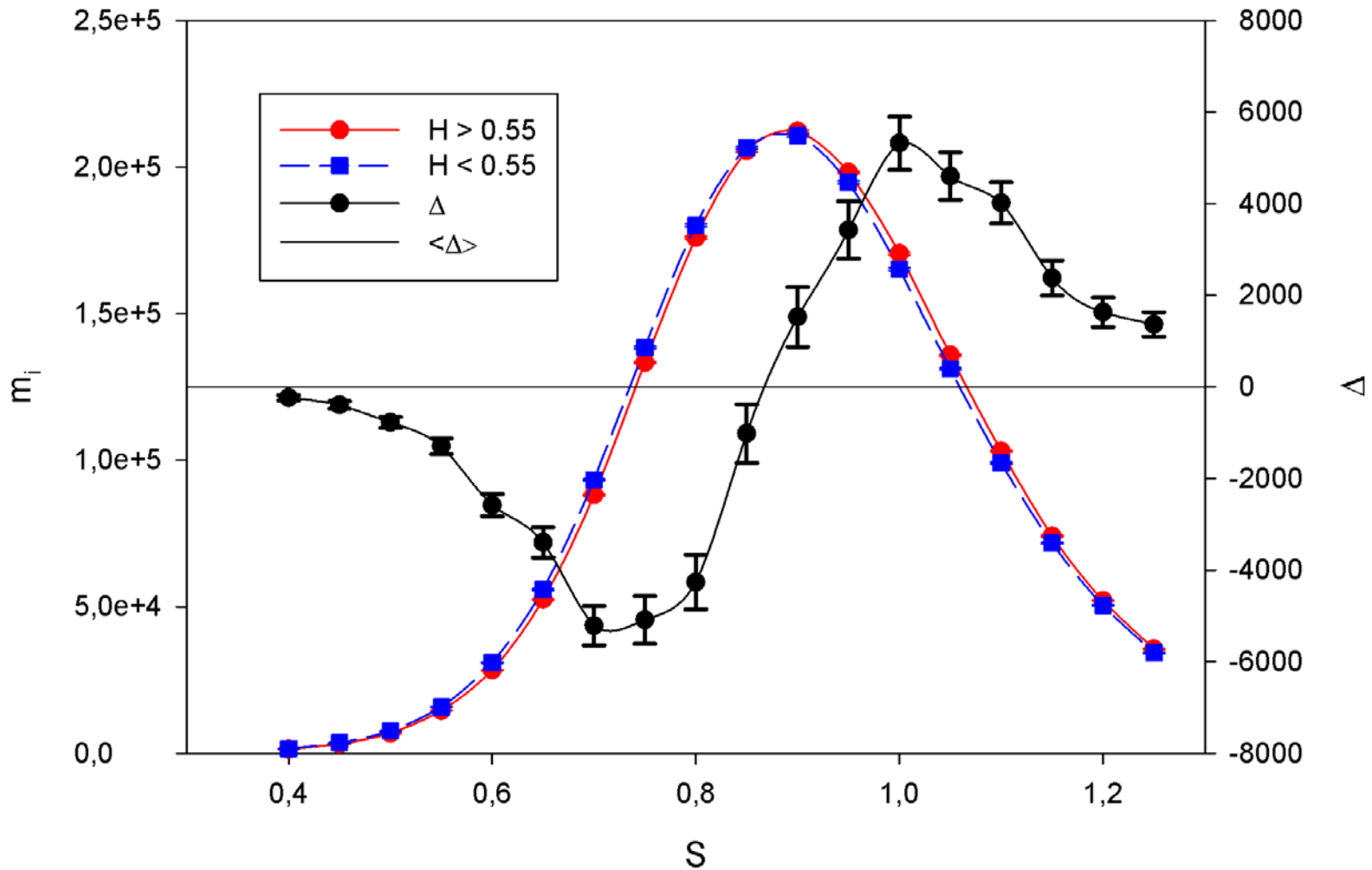
Галактические координаты



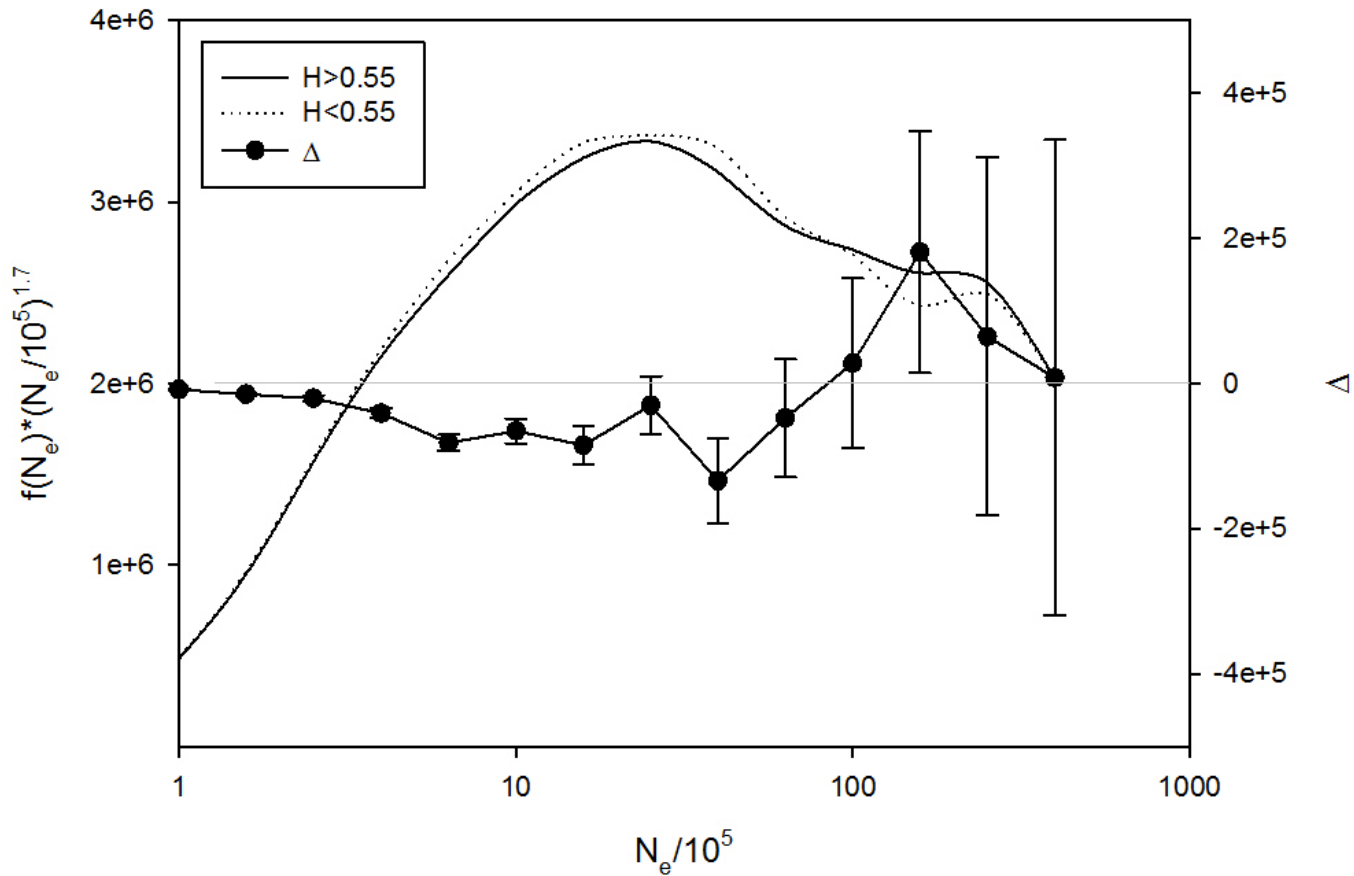
Контурная диаграмма (вид сверху)

Локализованный максимум $\chi^2/J = 57.64$ в направлении
($l_o = 97^\circ \pm 3^\circ, b_o = 5^\circ \pm 3^\circ$) или ($l_o = 277^\circ \pm 3^\circ, b_o = -5^\circ \pm 3^\circ$)

Параметр S в направлении $l_o = 97^\circ, b_o = 5^\circ$ ($l_o = 277^\circ, b_o = -5^\circ$)



Параметр n $N_e^{1.7}$ в направлении $l_o = 97^\circ, b_o = 5^\circ$
 $(l_o = 277^\circ, b_o = -5^\circ)$ ($\alpha = 140^\circ$ (9h20m), $\delta = -57^\circ$)

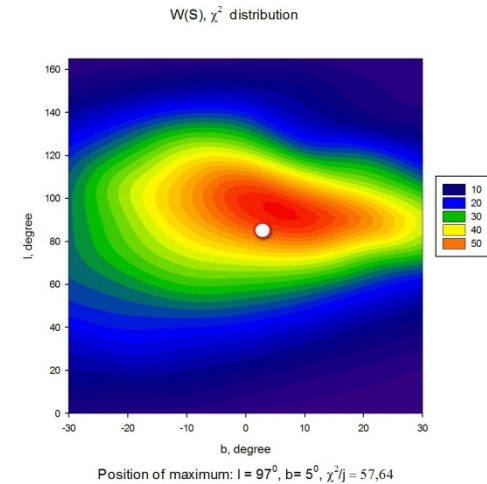


Обсуждение результатов

- Максимальное значение $\chi^2/J = 57.64 \pm 0.34$ при 17 степенях свободы в точке $l_0 = 277^\circ \pm 3^\circ$, $b_0 = -5^\circ \pm 3^\circ$ ($\alpha=140^\circ$ (9h20m), $\delta = -57^\circ$). Минимум равен 1.32 ± 0.34 при $l_0 = 15^\circ \pm 10^\circ$, $b_0 = 60^\circ \pm 10^\circ$.

- Высокая статистическая обеспеченность при 3.38 млн. ШАЛ.

- Вблизи точки максимума находится кластер в созвездии с двумя остатками сверхновых Vela X (263.9° , -3°) Vela Jr (266.2° , -1.2°), расстояния до которых составляют около 0.3 и 0.2 кпс соответственно.



- Избыток «молодых» ШАЛ с этого направления может являться следствием процесса сепарации по коэффициенту диффузии на пути от источника до Земли. Более «молодые» ливни характеризуют более легкий состав ПКИ. Поток ПКИ по пути обогащается протонами в направлении источника, приводя к «облегчению» состава и «омоложению» ШАЛ, пришедших со стороны источника, по сравнению с ливнями с обратной стороны.

Выводы

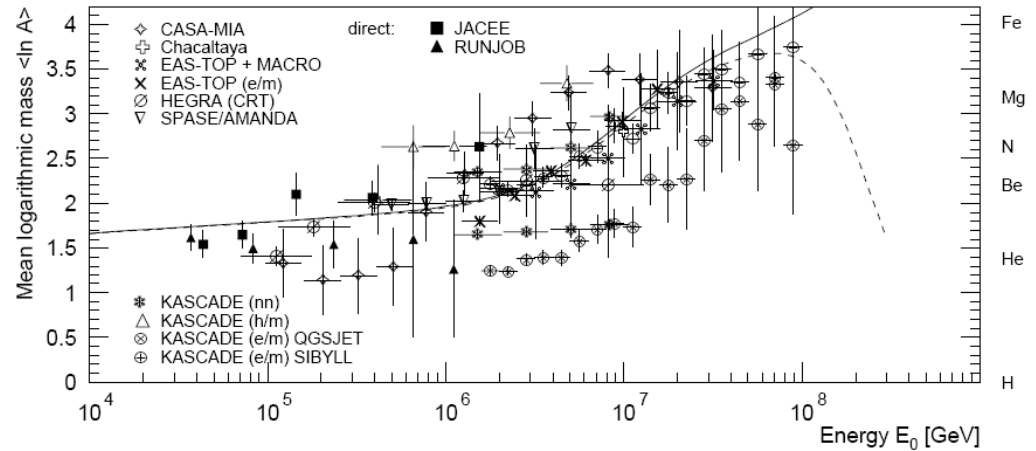
- С помощью анализа возраста ливней S диффузионно-разностным методом экспериментально получен статистически обеспеченный избыток частиц ПКИ в области колена со стороны близкого источника Южного полушария неба (Vela) относительно потока ПКИ с обратного направления. Избыток регистрируется на установке ГАММА на г. Арагац в виде ШАЛ с более «молодым», чем с противоположной стороны, возрастом.
- Зарегистрирован только избыток, а не абсолютная величина потока от источника, поэтому нельзя сказать полностью ли он формирует колено.
- С большой вероятностью зарегистрировано наличие диффузионного переноса ПКИ на пути от близкого источника до Земли, вызывающего «облегчение» состава и, соответственно, «омоложение» ШАЛ в районе колена.

Природа колена

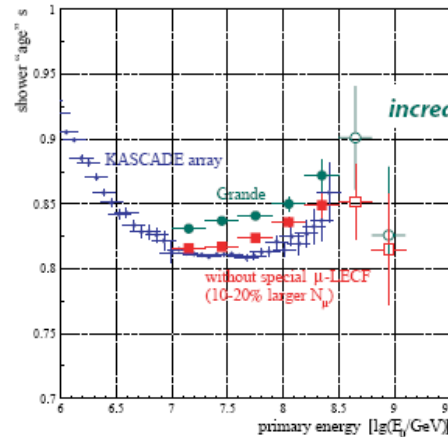
Если принять, что «легкий» избыток в области колена реален, то он объясняет:

- «утяжеление» состава ПКИ при энергиях выше колена,

- падение S с ростом энергии в области ниже колена с дальнейшим его постоянством или с последующим ростом. Падение S более быстрое, чем можно ожидать из-за сдвига максимума ШАЛ с ростом энергии,



Shower Age vs. Primary Energy



increasing values above 10^{16}eV
 → heavier composition!

Abs. value of "age" s influenced by

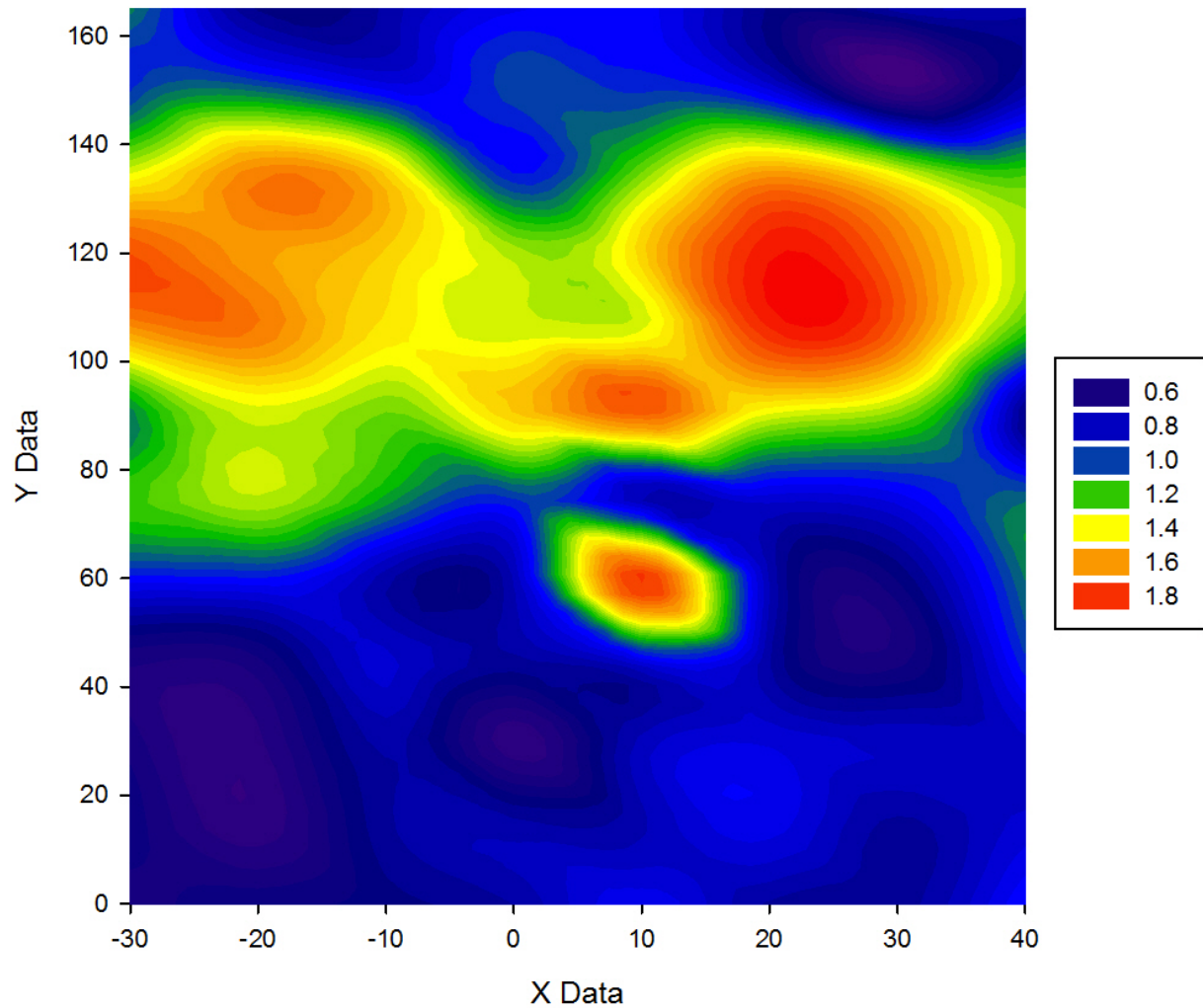
- parametrisation of LDF (difference KASCADE vs KA-Grande)
- systematic uncertainties of muon sizes: $\Delta s = 0.02$
- energy estimation: $\sigma(s) \approx 20\%$

Заключение

- Исследование характеристик ШАЛ диффузионно-разностным методом показало его простоту, устойчивость, высокую чувствительность и способность обследовать всю небесную сферу на установке с ограниченными углами обзора в лабораторной системе.
- **Основное отличие метода – разностное исследование характеристик, а не интенсивности ШАЛ.**
- В качестве экспериментальных параметров, кроме возраста S , могут использоваться другие характеристики ШАЛ и их комбинации.
- Не требуется проведения специализированных экспериментов - можно анализировать уже имеющиеся экспериментальные данные.
- Требуется проверка на других установках

Спасибо !

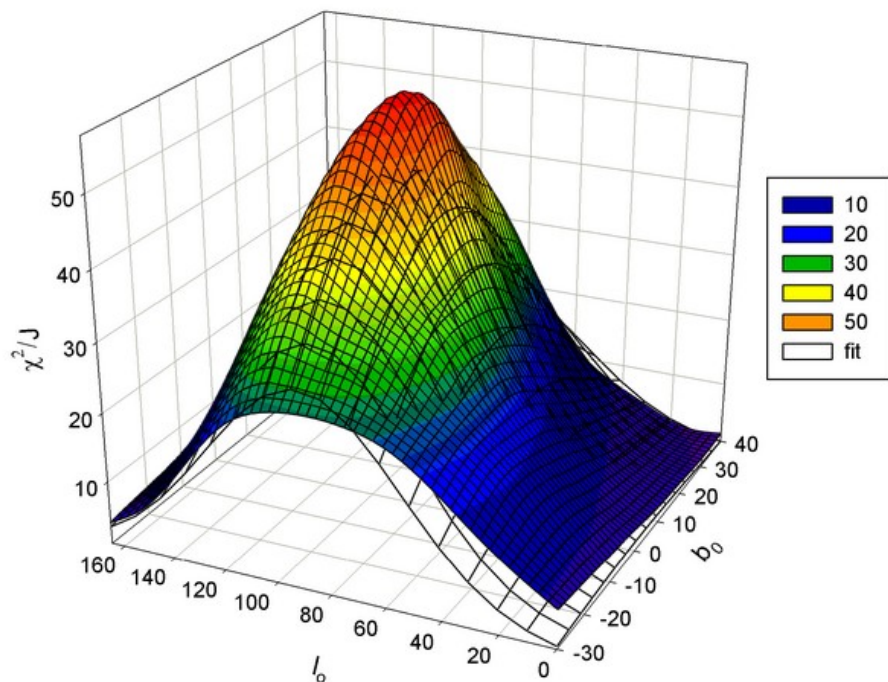
χ^2/J для N_e



Дубна 11 - 15 авг 2014

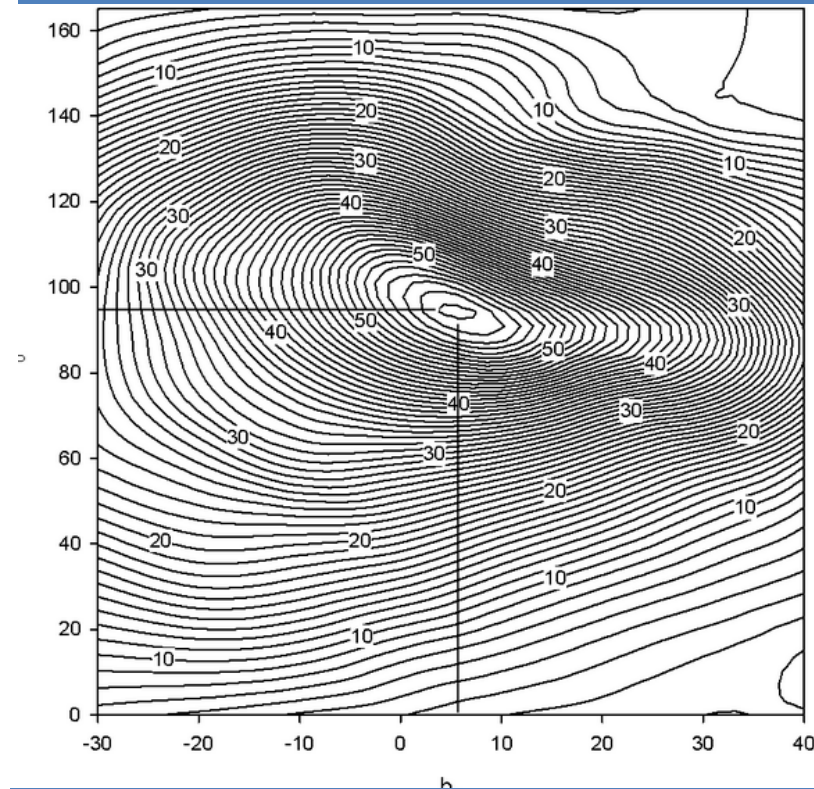
Слепой поиск максимума χ^2/J для параметра S

Галактические координаты



Трёхмерная диаграмма

Галактические координаты

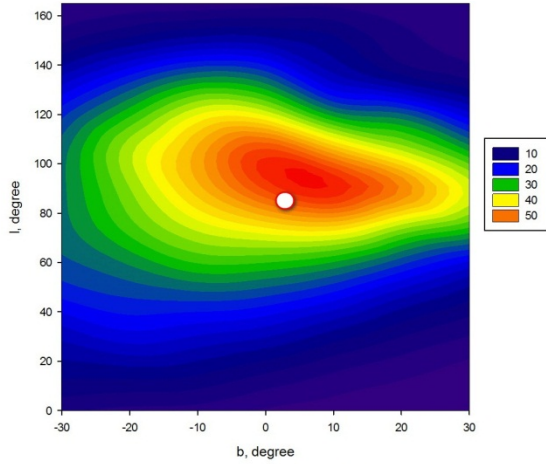


Контурная диаграмма (вид сверху)

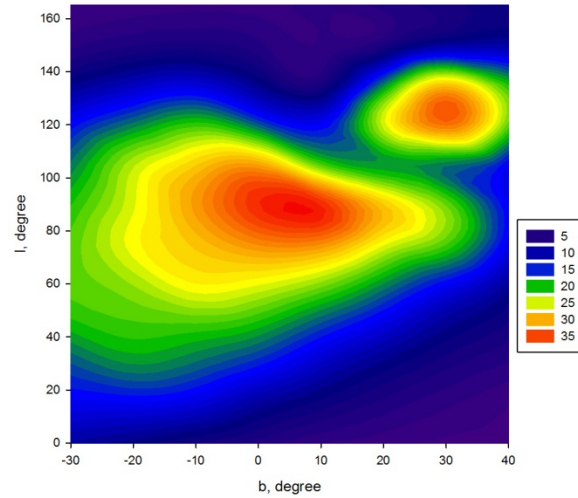
Локализованный максимум χ^2/J в направлении $(l_0 = 97^\circ \pm 3^\circ, b_0 = 5^\circ \pm 3^\circ)$
или $(l_0 = 277^\circ \pm 3^\circ, b_0 = -5^\circ \pm 3^\circ)$ **Двумерный Гаусс $l_0 = 270.3^\circ, b_0 = -0.1^\circ$**

χ^2/J для S

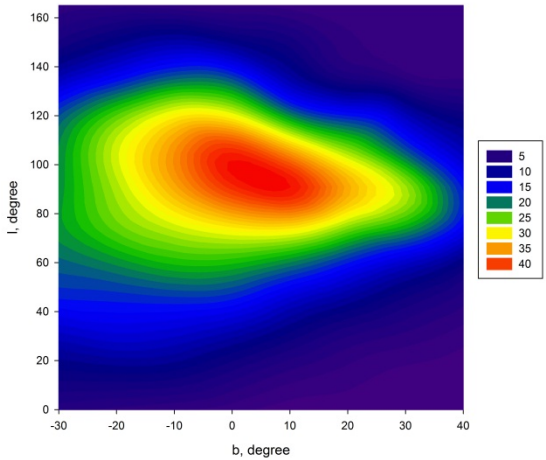
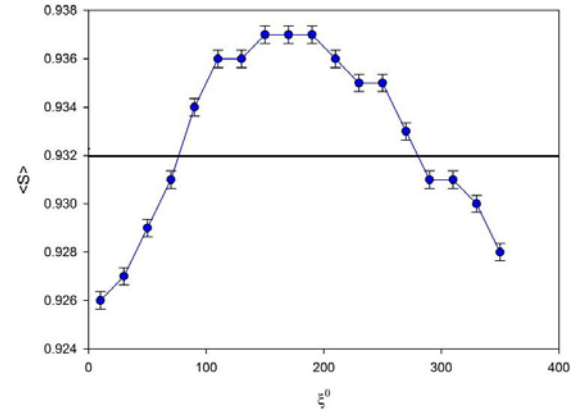
Без искажений
57.64



при $45 < \xi < 60$ $S = S + 0.07$
34.54

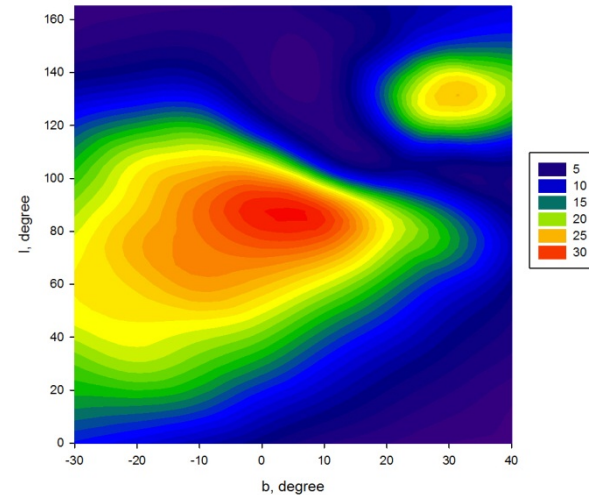


«Синус»



случайные
ошибки S
 $\sigma = 0.1$
42.71

«Анти
Синус»
26.27



Разделяются эффекты, связанные с установкой и связанные с неподвижной системой небесных координат