39 Всероссийская конференция по космическим лучам

29 июня 2026 г. to 3 июля 2026 г.

Europe/Moscow timezone

# Корреляционный метод определения энергии космических лучей выше 1 ТэВ с использованием тонкого калориметра

**Докладчик: Федосимова Анастасия**

Со-авторы: Лебедев И.А., Ережеп Н.О.

Институт ядерной физики,

Физико-технический институт

Алматы, Казахстан

# ФЛУКТУАЦИИ МНОЖЕСТВЕННОСТИ ВТОРИЧНЫХ ЧАСТИЦ В КАСКАДНЫХ ПРОЦЕССАХ

Методы измерения энергии космических частиц условно можно разделить на три части:

1.Космические лучи с энергиями $E>10^{14}$ эВ измеряются в основном на наземных станциях космических лучей на основе анализа широких атмосферных ливней. Это косвенное измерение.

2.Космические лучи при $E<10^{12}$ эВ изучаются прямыми измерениями на космических аппаратах или высотных аэростатах с высокой точностью.

**3.В области $10^{12}$ – $10^{14}$ эВ существует недостаток высокоточных методов измерения.**

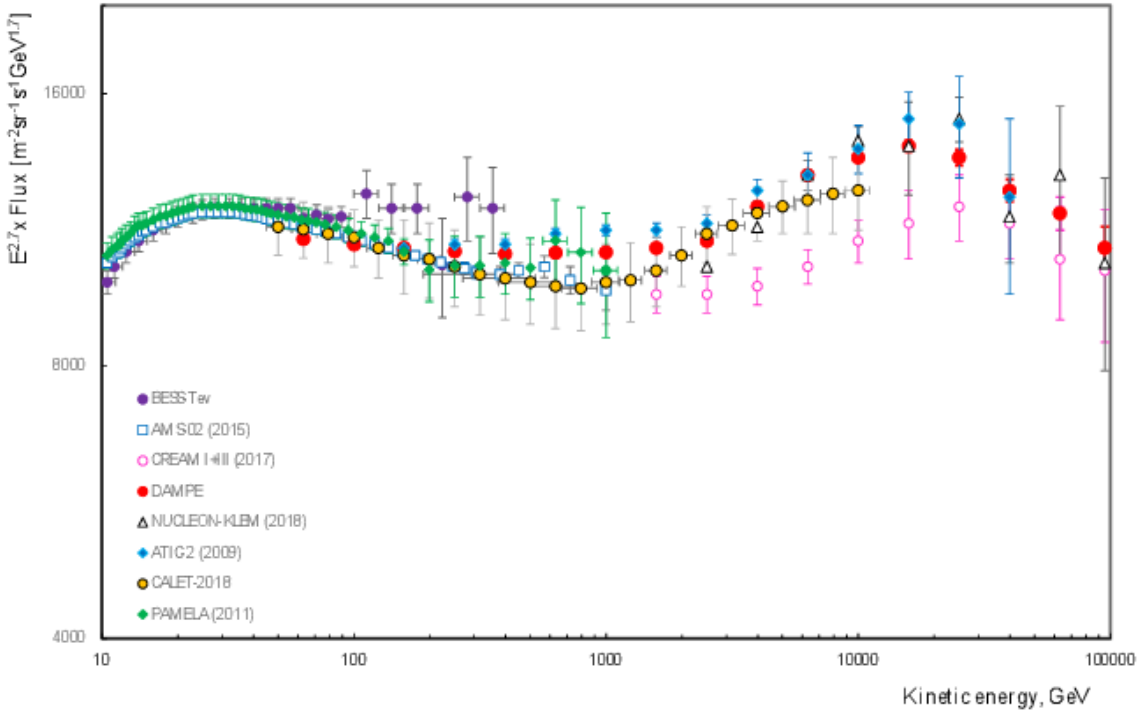



Рисунок 1 – Протонные спектры различных экспериментов

На рисунке 1 представлены протонные спектры различных экспериментов. При энергиях до $10^{11}$ эВ все представленные спектры практически совпадают. А при энергиях выше $10^{12}$ эВ наблюдается не только численное, но и концептуальное отличие поведения энергетических спектров космических лучей.

Главное преимущество прямых экспериментов – это возможность измерить заряд падающей частицы.

Значительно сложнее измерять энергию частиц с энергиями $E>10^{12}$ эВ.

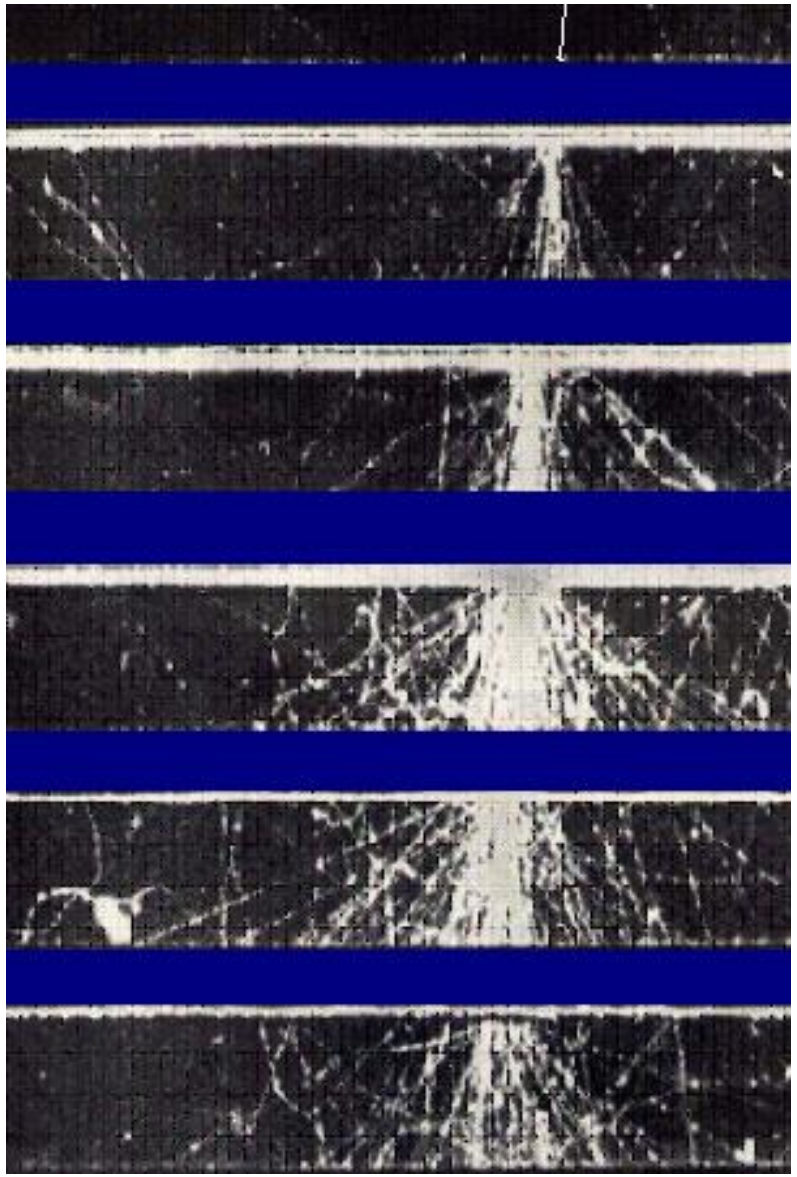
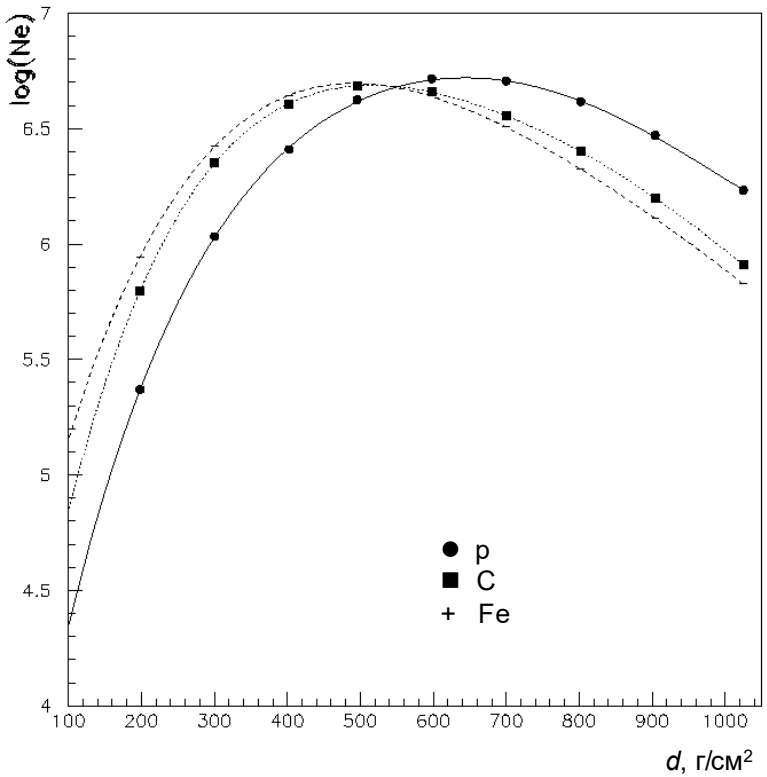


Рисунок 2 – Иллюстрация работы методики ионизационного калориметра

## Калориметрические методы в настоящее время являются практически единственным способом прямых измерений характеристик космических ядер с энергией E > $10^{12}$ эВ.

Техническая реализация современных ионизационных калориметров может быть различной, но идея остается неизменной: первичная частица входит в плотное вещество (например, железо или свинец), в котором происходят многочисленные ядерные и электромагнитные взаимодействия, которые рождают целый каскад вторичных частиц.
Для измерения характеристик каскада плотное вещество прослаивается специальными детекторами.

Измеряя сигналы от этих детекторов, формируется каскадная кривая - зависимость количества частиц в каскаде *N*, от глубины проникновения, *d*, каскада в калориметре. Если измерен максимум каскадной кривой, то можно определить энергию первичной частицы.




Ливни были смоделированы с помощью пакета программ CORSIKA QGSJET

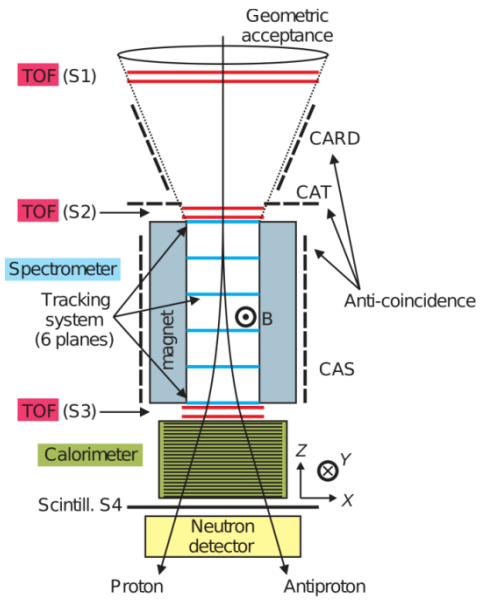
Рисунок 3 – Средние каскадные кривые, соответствующие первичной энергии $10^{16}$ эВ, образованных различными первичными частицами при прохождении слоя воздуха толщиной *d*.

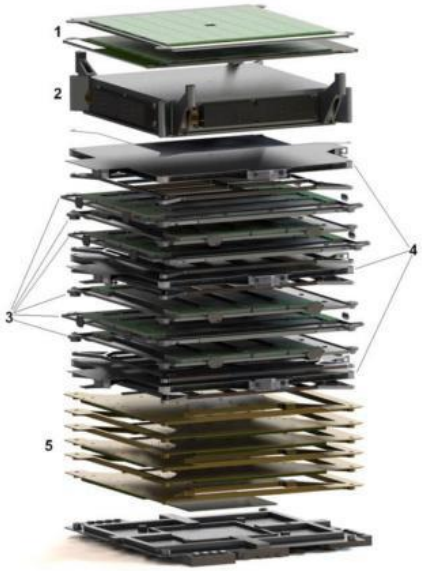
Использование массивных установок при прямых измерениях первичных космических лучей на космических аппаратах имеет ограничения из-за технических проблем подъема такой большой массы

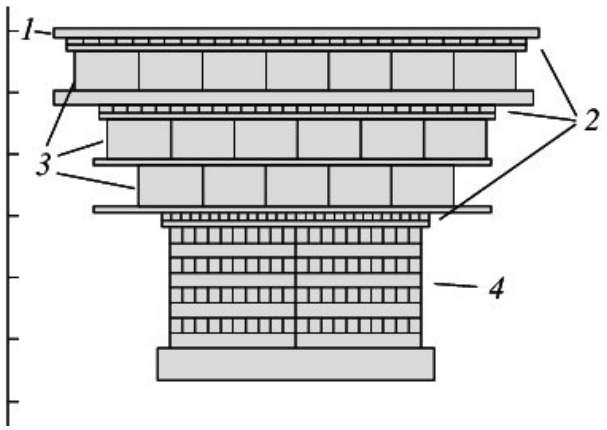
Рисунок 4 – Ионизационный калориметр, установленный на высокогорной станции на г. Арагац в Армении, площадью 10 м$^2$ и массой 70 т

Для космических экспериментов наиболее целесообразно использовать тонкий калориметр, регистрирующий только начало каскада

В тонком калориметре весь каскад вторичных частиц не измеряется, и в нем регистрируется только начало каскада.




## Калориметр PAMELA

Толщина: более 16 радиационных единиц.

Ограничения: Измерение энергии только для частиц, чей каскад достиг максимума внутри калориметра.

**Точность:** Высокая (<10%) только для E < 1 1 ТэВ.

## Калориметр НУКЛОН

Толщина калориметра:
11,5 радиационных единиц.

Методика: KLEM (по среднему углу разлета вторичных частиц).
Измерение энергии от 2 ТэВ до 500 ТэВ.

**Ошибки:** Более 45%

## Эксперимент ATIC

Толщина: приблизительно 22 радиационные длины.

Цель: Измерение спектра частиц (включая тяжелые ядра) до 100 ТэВ.

**Ошибки:** Более 30% при использовании методики каскадных кривых.

# Метод каскадных кривых

При использовании каскадных кривых для определения энергии $E$ в зависимости от числа частиц $N_e$ используют соотношение:

$$N_e=\alpha E^{\beta}$$

где $\alpha$, $\beta$ –коэффициенты которые зависят от глубины проникновения, массы первичной частицы.

Из рисунка видно, каскадные кривые существенно флуктуируют и практически сливаются при малых значениях глубины проникновения $d$.

Основным источником этих флуктуаций являются вариации глубины первого взаимодействия и множественности вторичных частиц в первом взаимодействии.

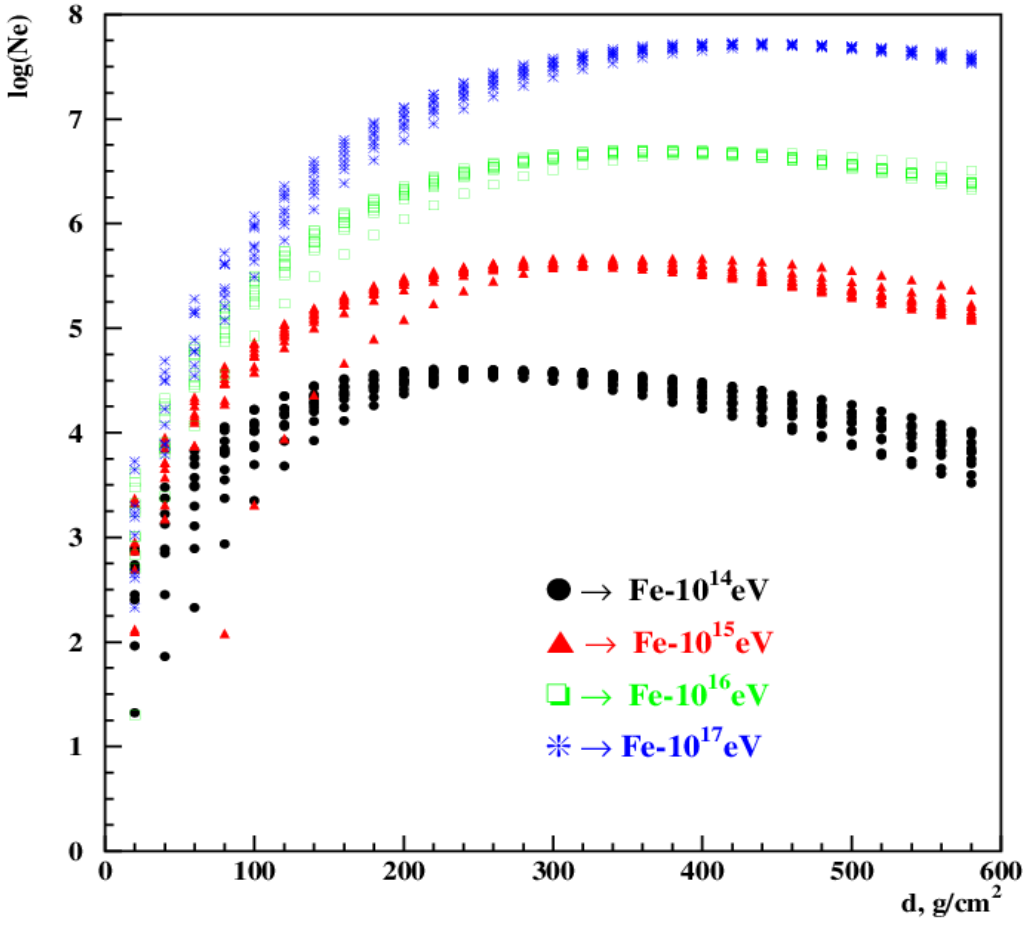
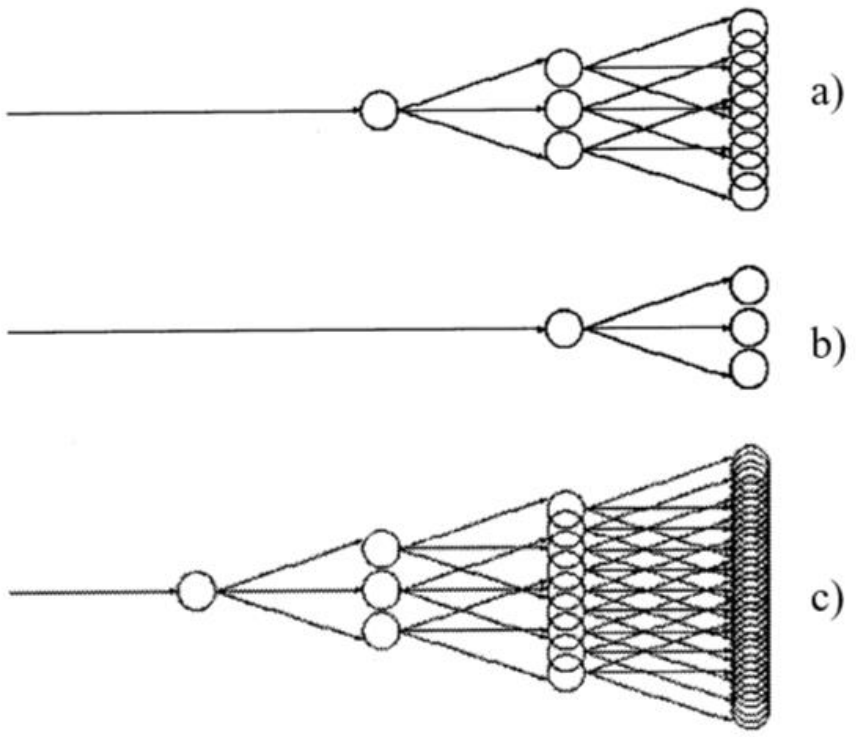
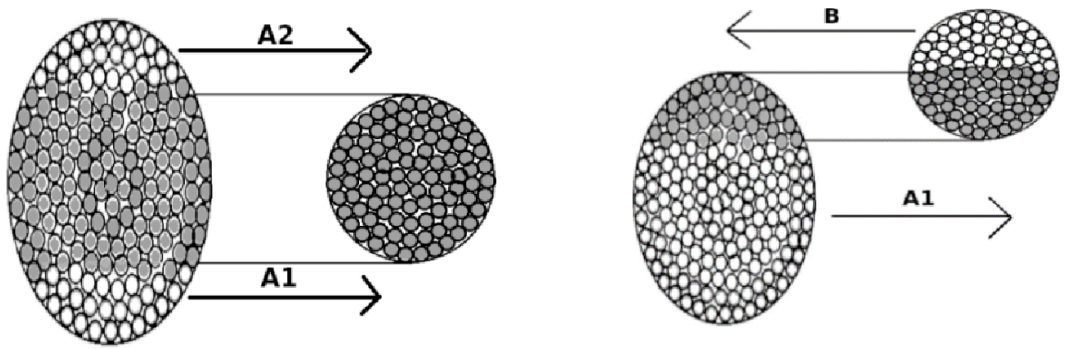



Рисунок 5 – Каскадные кривые, инициированные ядрами железа различных энергий в атмосфере Земли.

# Флуктуации первого взаимодействия

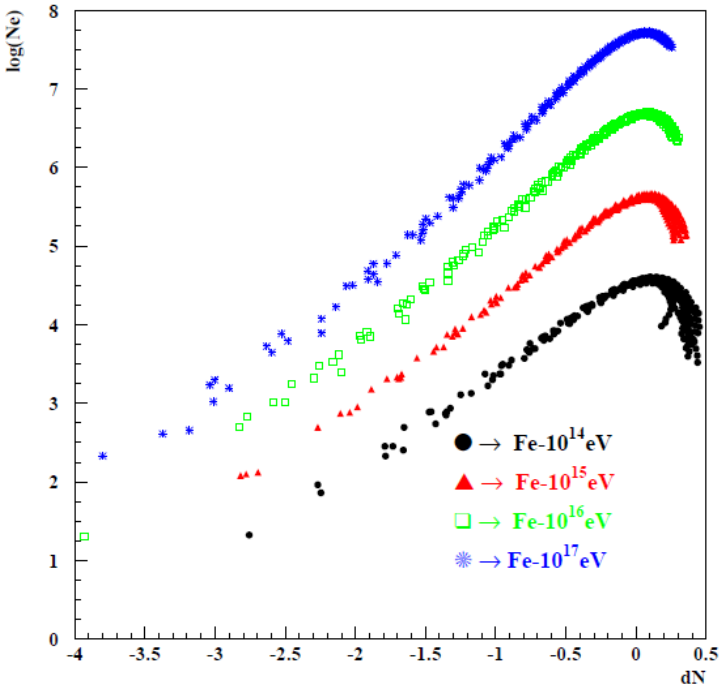


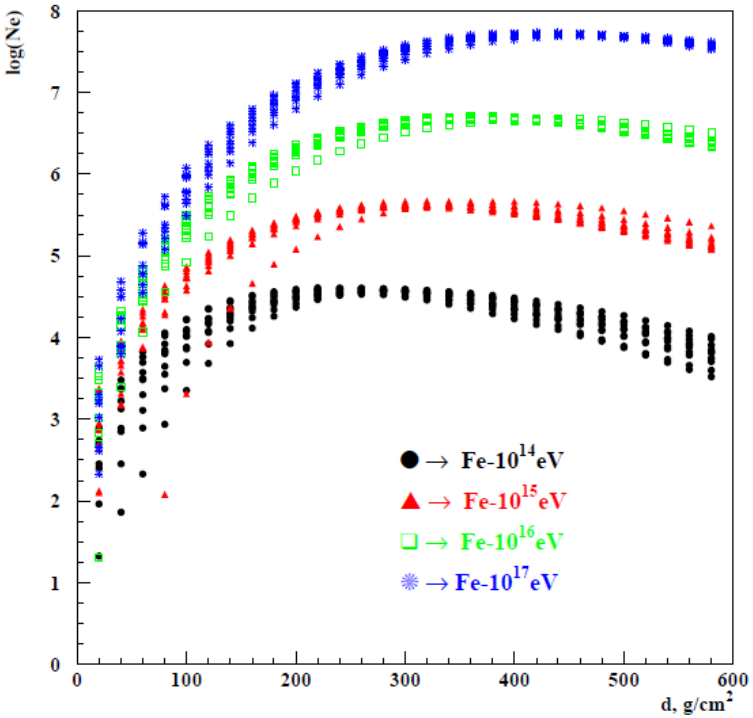




Прежде всего, число частиц в ливне зависит от параметров первого (нескольких первых) взаимодействия. Чем меньше глубина проникновения до первого взаимодействия, тем раньше начнет развиваться каскад и тем больше вторичных частиц будет на уровне наблюдения. Чем больше множественность первого взаимодействия, тем быстрее начинает развиваться каскад и тем больше вторичных частиц будет на уровне наблюдения.

Когда частиц в каскаде много, то флуктуации параметров отдельных взаимодействий более-менее компенсируют друг друга . Поэтому все каскады, образованные первичными частицами одинаковой массы и энергии, начиная с определенного момента, развиваются практически одинаково.

# Метод корреляционных кривых




Проблему флуктуаций первого взаимодействия можно решить, если вместо глубины проникновения выбрать параметр, который не зависит от флуктуаций первого взаимодействия.

В методе корреляционных кривых для определения первичной энергии нужно провести измерения числа вторичных частиц *N* на двух уровнях наблюдения, разделенных слоем поглотителя. На основе полученных измерений строятся корреляционные кривые – зависимость размера каскада log*N*(Z) от изменения количества числа частиц в каскаде при прохождении слоя поглотителя dZ

$$dN = \log N_e(Z) - \log N_e(Z+dZ)$$

При этом решается основная проблема тонкого калориметра – огромные флуктуации размера каскада на восходящей ветви каскадной кривой.

Сравните: беспорядочную картину в начале каскадных кривых и довольно упорядоченные корреляционные кривые.

Отрицательная область dN соответствует малым значениям глубины проникновения.

Рисунок 8 – Каскадные (нижний) и корреляционные (верхний) кривые, образованные ядрами железа с энергиями $10^{14}$эВ, $10^{15}$эВ, $10^{16}$эВ, $10^{17}$эВ при прохождении слоя воздуха толщиной *d*.

# Моделирование гетерогенного калориметра

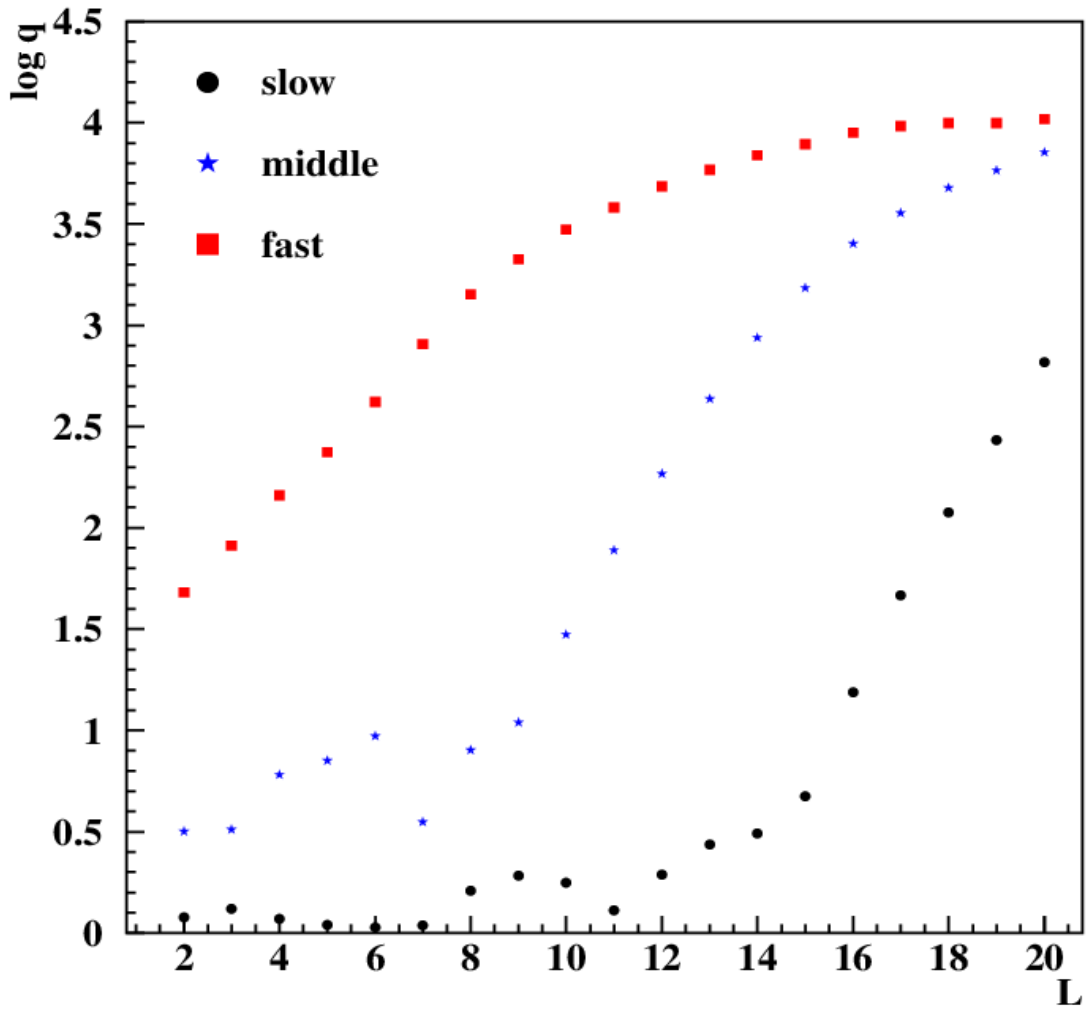



Рисунок 6 – Каскадные кривые для трех ливней протонов 10 ТэВ с быстрым, средним и медленным характером развития каскадного процесса

Для моделирования использовался калориметр эксперимента **PAMELA:**

- Состоит из **22 слоёв вольфрамового поглотителя** и **44 кремниевых микростриповых детекторов** (22 X- и 22 Y-плоскости).
- Размер калориметра — **16,1 × 13,1 см²**.
- Общая толщина составляет **16,3 радиационных длин** и около **0,6 длины ядерного взаимодействия.**

На рисунке 6 представлены каскадные кривые для трёх протонов с энергией 10 ТэВ, характеризующихся быстрым (fast), средним (middle) и медленным (slow) развитием каскада. Несмотря на одинаковую энергию первичных частиц, энерговыделение в калориметре существенно различается из-за флуктуаций глубины первого взаимодействия и множественности вторичных частиц в первых взаимодействиях.

# Подавление флуктуаций методом корреляционных кривых

Быстрый каскад начинает развиваться в верхних слоях калориметра, тогда как медленный каскад формируется значительно глубже. Это приводит к большим флуктуациям каскадных кривых и затрудняет определение энергии помощью методов, основанных на регистрации полного энерговыделения каскада или регистрации положении максимума каскада.

В отличие от каскадных кривых, корреляционные кривые практически совпадают, несмотря на различия в глубине первого взаимодействия и параметрах развития каскада. Это является проявлением универсальности каскадного процесса и позволяет существенно снизить влияние флуктуаций при определении энергии первичной частицы.

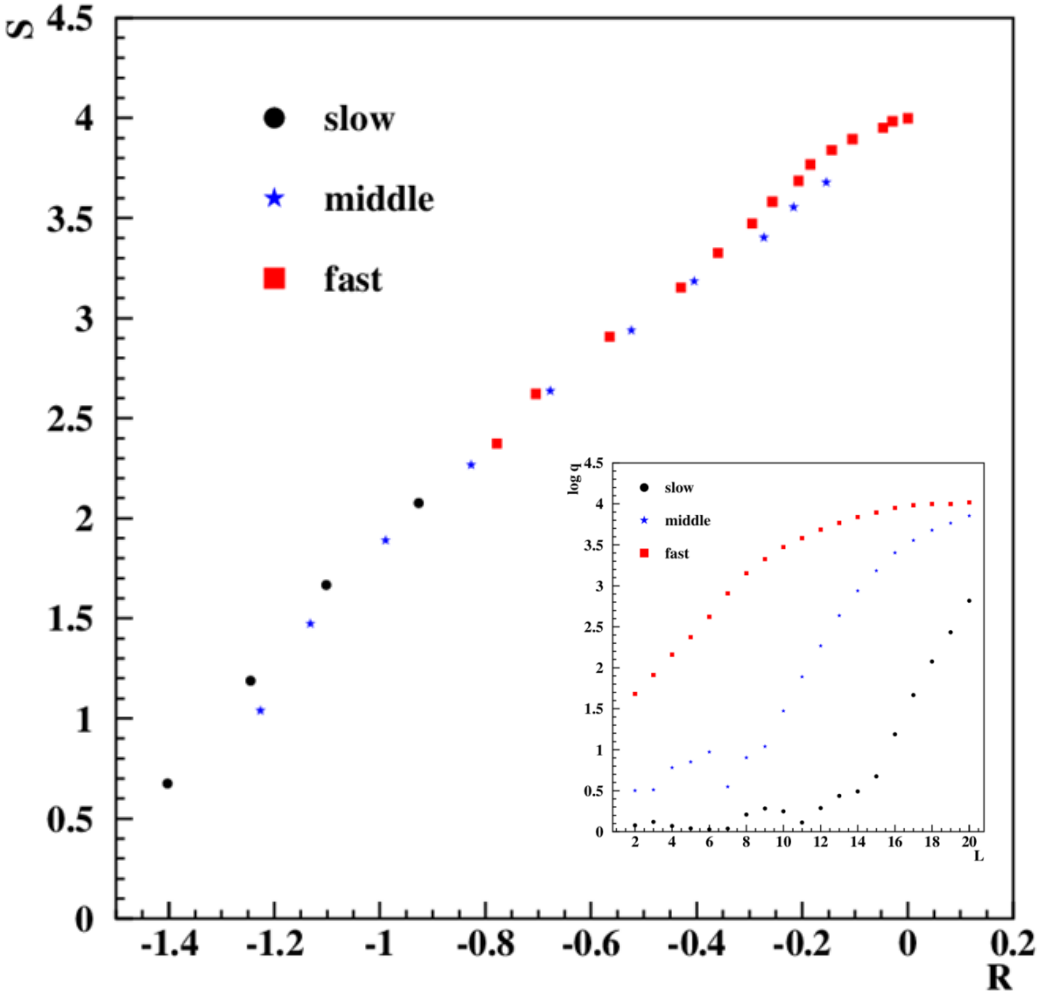



Рисунок 7 – Корреляционные кривые для трех ливней протонов 10 ТэВ с быстрым, средним и медленным характером развития каскадного процесса

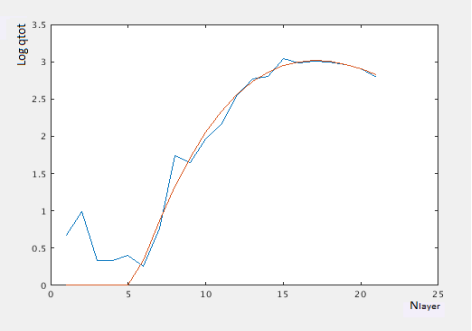
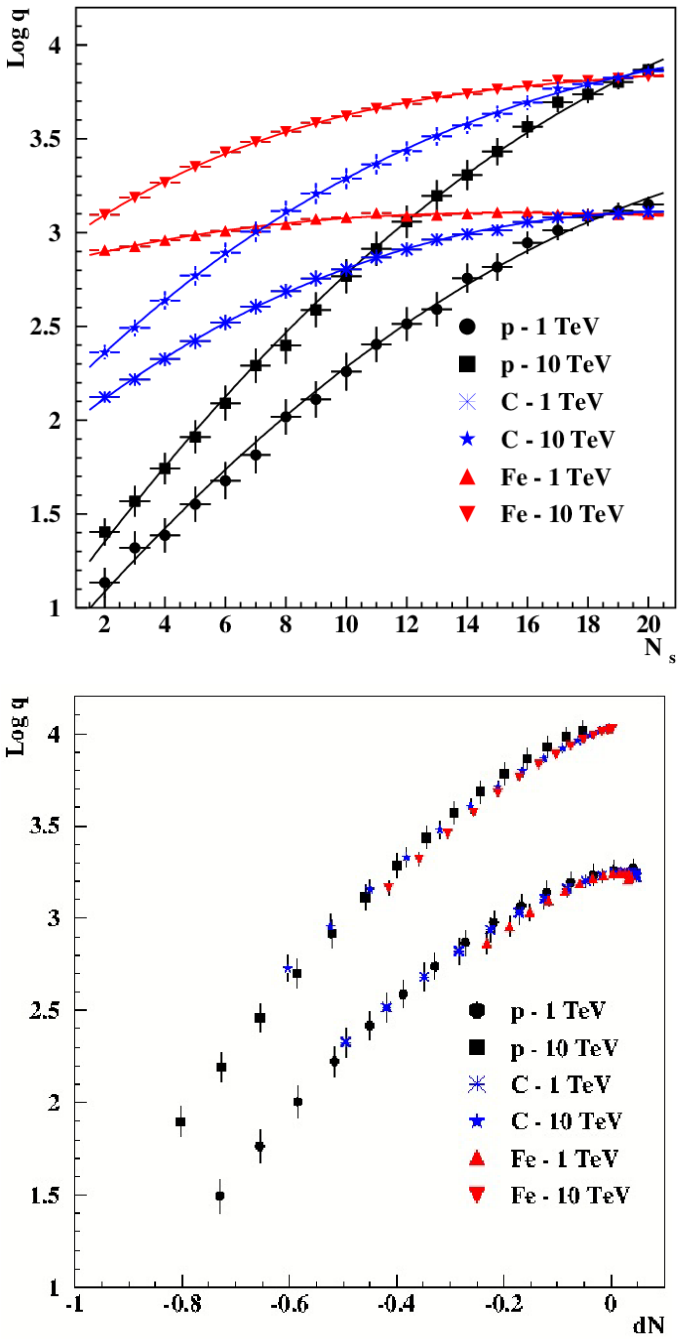



Рисунок 8 – Событие идентифицированное как протон с наложением сверху фита




# Процедура анализа:

1.Моделирование каскадов, образованных первичными протонами и ядрами углерода и железа с фиксированными энергиями.

2.Сглаживание каскадной кривой. Для уменьшения флуктуаций от слоя к слою использовался метод накопления сигнала по спектру.

3.Поиск начала каскада

4. Построение *logN*-*dN*–распределений

5. Фитирование (аппроксимация) *logN*-*dN*–распределений полиномиальными функциями третьего порядка для каждой фиксированной энергии как функции *logN* от *dN* в виде:

$$logN\ (dN) = a_0 + a_1 dN + a_2 dN^2 + a_3 dN^3 \qquad (1)$$

6. Вычисление коэффициентов $a_0$, $a_1$, $a_2$, $a_3$ в зависимости от энергии и построение зависимости *logN* от *dN* и $E_0$ в виде:

$$logN\ (dN\ E_0) = a_0(E_0) + a_1(E_0)dN + a_2(E_0)dN + a_3(E_0)dN^3 \qquad (2)$$

Рисунок 9 – Средние каскадные (верхний) и корреляционные (нижний) кривые,образованные ядрами железа, углерода и протонами с энергиями 1 ТэВ,10 ТэВ

# Точность определения энергии

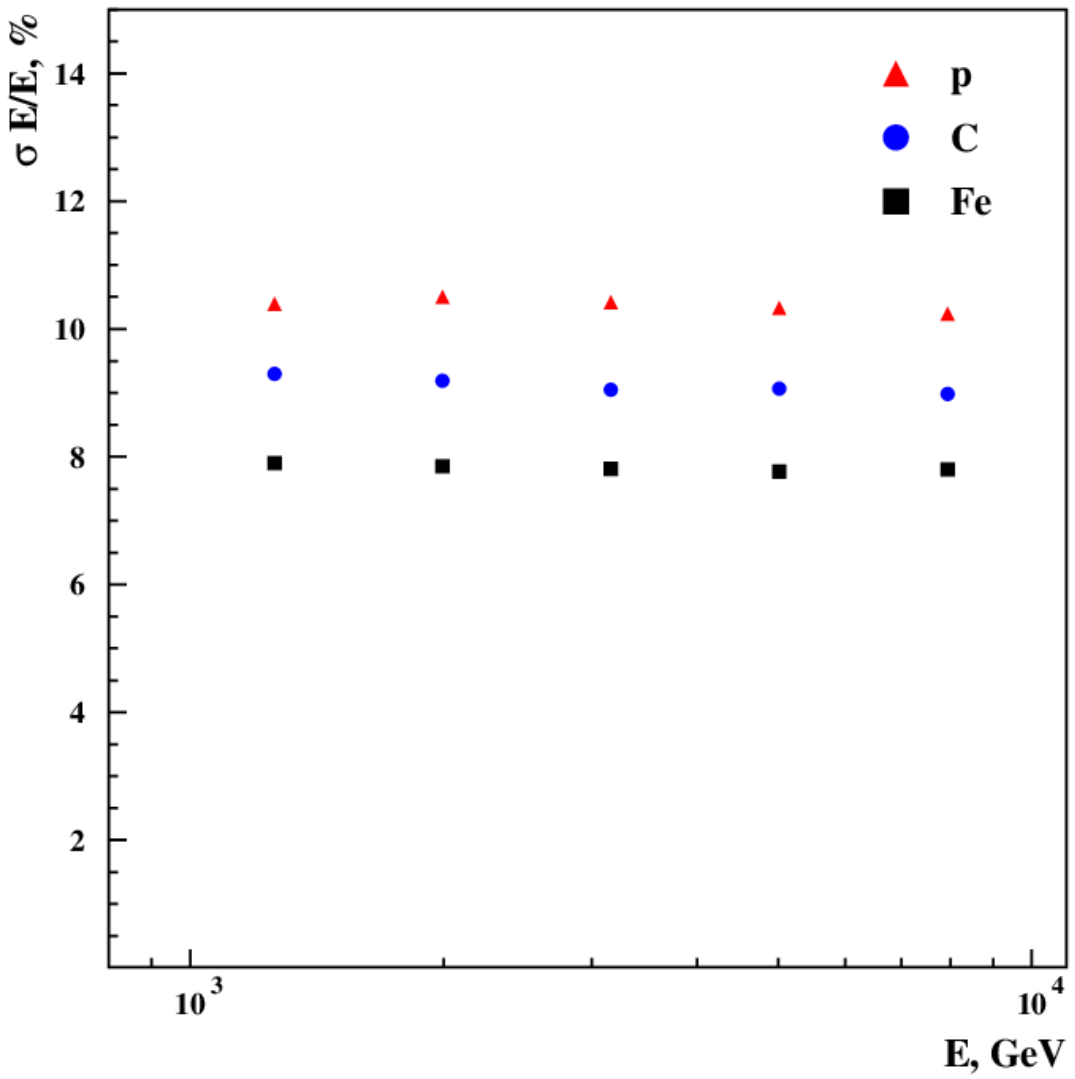



Рисунок 10 – Энергетическое разрешение каскадов p, C и Fe при разных энергиях в калориметре ПАМЕЛА.

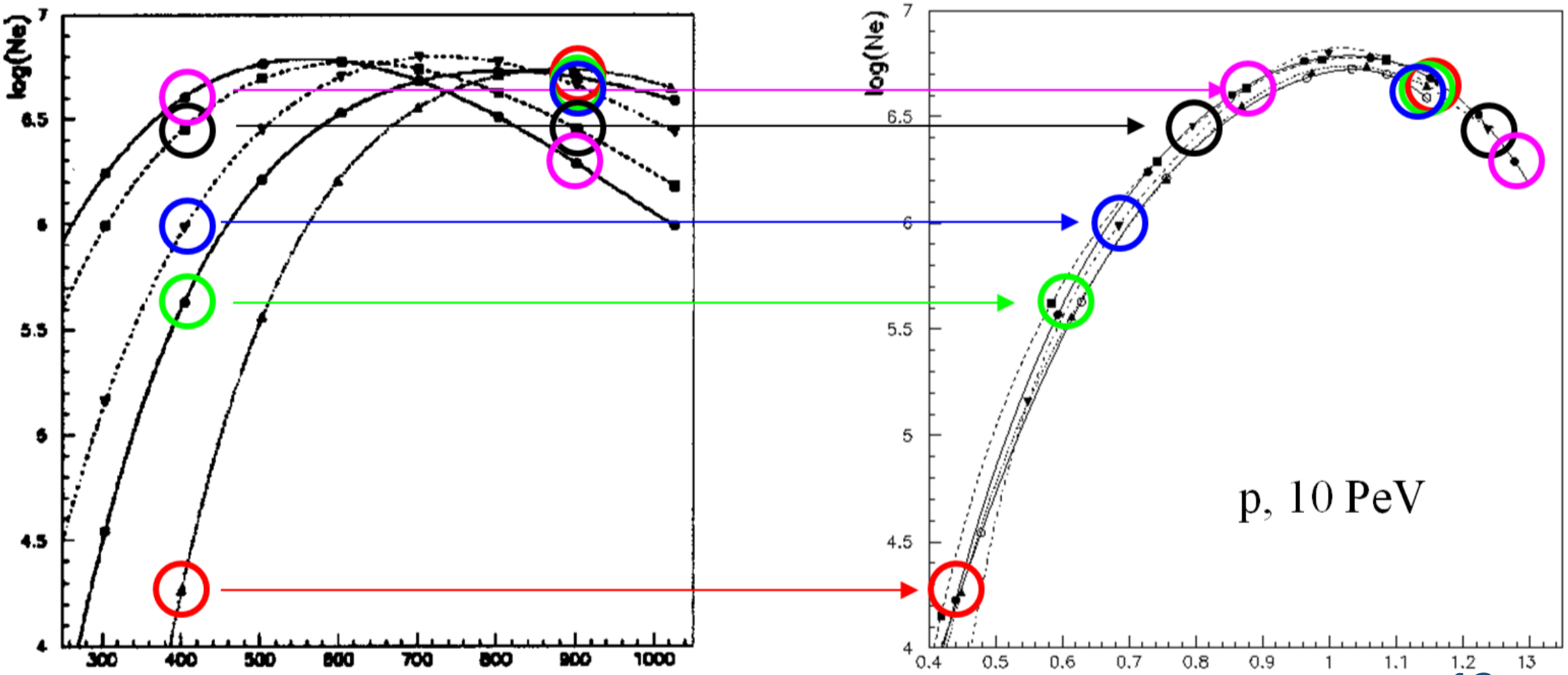
Современные космические эксперименты определяют энергию первичной частицы с ошибками
~ 30 процентов и более для ядер с энергиями выше 1 ТэВ.

При использовании методики корреляционных кривых на основе данных моделирования эксперимента PAMELA ошибки составляют ~ 10 процентов.

$$\sigma E = \sqrt{\frac{\sum(E - E_{rec})^2}{n-1}}$$

# Как это работает на наземных станциях, регистрирующих ШАЛ?

В качестве корреляционного параметра можно использовать возраст ливня.



# Или разницу между числом электронов и мюонов в ливне

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, 1001:182 (7pp), 2026 April 20 Lebedev et al.

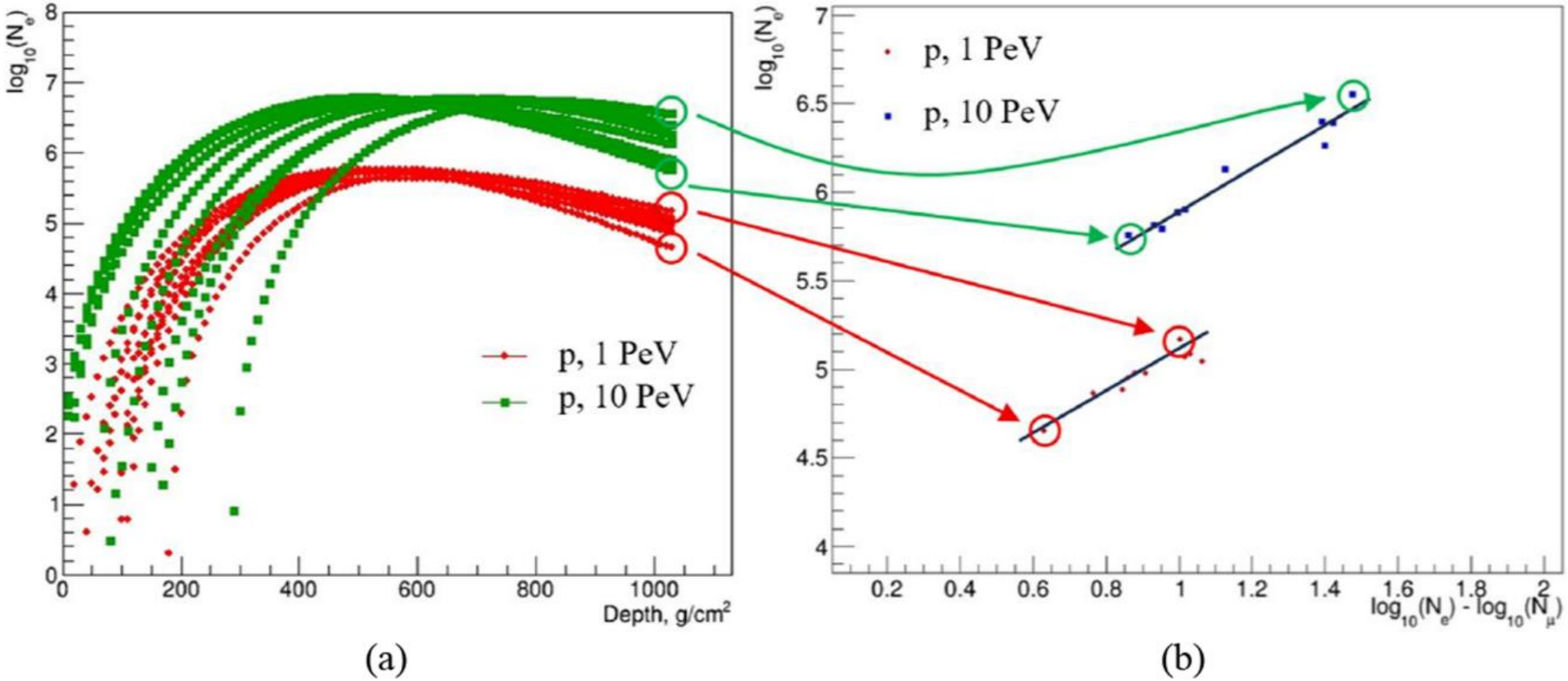



**Figure 1.** (a) Cascade curves for 10 proton-induced air showers at primary energies of 1 PeV (red curves) and 10 PeV (green curves) obtained from CORSIKA simulations and (b) LF curves for the same showers at the observation level of 1023 g $cm^{-2}$.

# Метод корреляционных кривых в исследовании анизотропии космических лучей по данным KASCADE

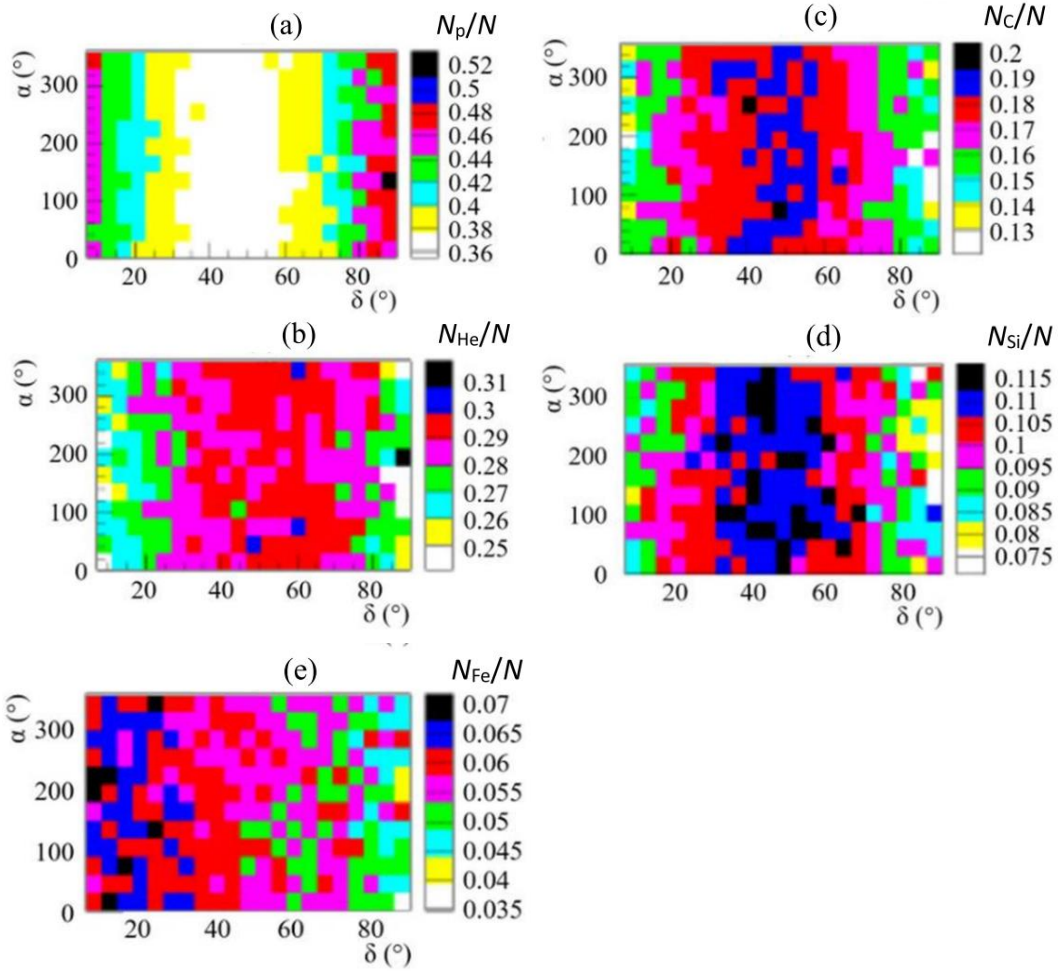



**Figure 5.** Distributions over R.A. ($\alpha$) and decl. ($\delta$) of the fractional contribution of each elemental group, normalized to the total number of events in each sky cell: (a) p; (b) He; (c) C; (d) Si; and (e) Fe.

На основе методики корреляционных кривых в работе [1] проведено исследование анизотропии элементарных групп космических лучей, используя данные эксперимента KASCADE.

**Предложенный подход позволяет:**

1. **Уменьшить ошибки в оценке первичной энергии**
2. **Анализировать отдельные ливни.**
3. **Позволяет проводить одновременный анализ ливней, прибывающих под существенно разными зенитными углами θ.**

Для изучения анизотропии космических лучей проанализированы распределения прямого восхождения в зависимости от склонения для пяти элементарных групп (p, He, C, Si и Fe). Анализ экспериментальных данных, полученных в рамках коллаборации KASCADE, выявил существенные различия в распределении этих групп в экваториальных координатах, что может указывать на направленную структуру потоков космических лучей различного элементного состава.

Наблюдаемые особенности могут свидетельствовать о влиянии близлежащих спиральных рукавов и структуры галактического магнитного поля на распространение космических лучей.

(#83 indico, №37 в программе конференции)


**[1] I. Lebedev, A. Fedosimova, Kh. Olimov, P. Krassovitskiy, N. Yerezhep, S. Ibraimova, E. Bondar Indications of Anisotropy of Cosmic-Ray Elemental Groups Based on KASCADE Data // Astrophysical Journal, 1001:182 (7pp), 2026**

# Заключение

В целом, полученные результаты и разработанная методика определения энергии первичных космических частиц на основе корреляционных кривых зависимости количества частиц (или энерговыделения) от изменения количества числа частиц в каскаде при прохождении слоя поглотителя dZ при прямых измерениях с использованием тонкого калориметра позволяет:

- Уменьшить влияние флуктуаций первого (нескольких первых) взаимодействий на точность определения энергии
- Увеличить количество событий доступных для анализа в тонких калориметрах.
- Единой методикой определять энергию космических лучей как на наземных установках ШАЛ, так и на калориметрах за пределами атмосферы Земли

# Спасибо за внимание!

Institute of Nuclear Physics, Almaty, Kazakhstan
**Anastasia Fedosimova**
✉ ananastasia@list.ru
☎ +7 707 542 52 55
**Prof. Igor A. Lebedev**
✉ lebedev692007@yandex.kz

Институт ядерной физики, Алматы, Казахстан
**Федосимова Анастасия**
✉ ananastasia@list.ru
☎ +7 707 542 52 55
**Проф. Лебедев Игорь Александрович**
✉ lebedev692007@yandex.kz