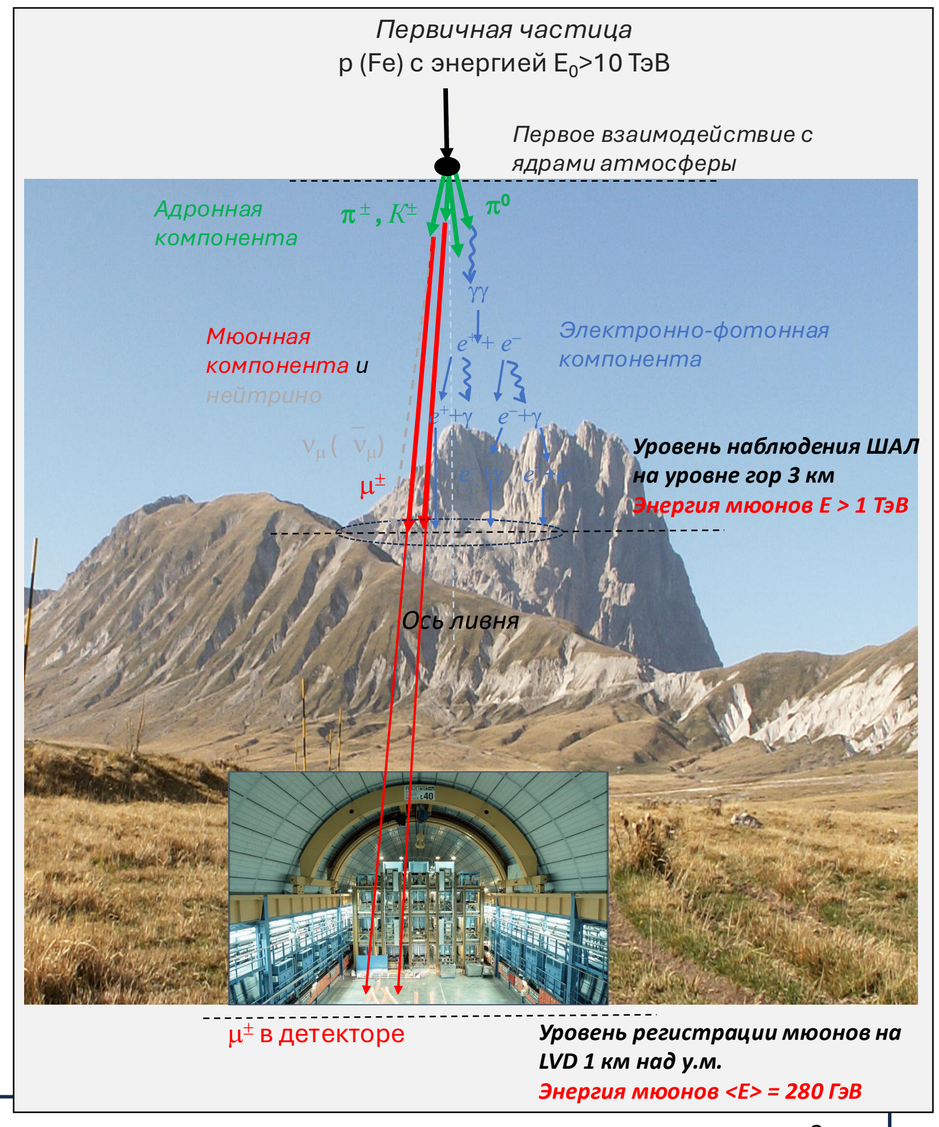
Применение программы FANSY 2.0 для изучения декогерентного распределения мюонов

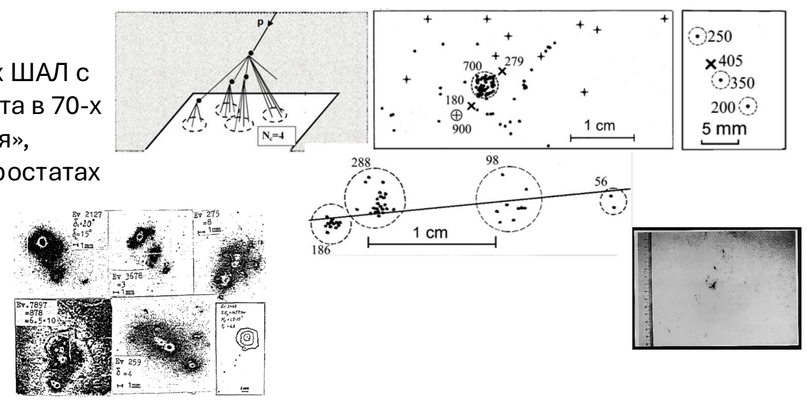
Н.Ю. Агафонова, Р.А Мухамедшин
ИЯИ РАН

Физико-математический пакет FANSY 2.0 предназначен для моделирования методом Монте-Карло развития ядерно-электромагнитных каскадов от протонов и ядер первичного космического излучения (ПКИ) в атмосфере. В основе пакета лежит последовательное моделирование развития каскада: разыгрывается пробег частицы ПКИ до первого адрон(ядро)-ядерного взаимодействия, в котором разыгрываются типы вторичных адронов (барионов и мезонов), их распределения по энергии и поперечным импульсам. Далее прослеживаются их истории (пробеги до взаимодействия, распады на барионы, мезоны, $e^{\pm}$, γ, $\mu^{\pm}$). Для $e^{\pm}$ и γ-квантов моделируются электромагнитные ливни с учетом генерации мюонов γ-квантами. Представлены результаты моделирования вертикальных ШАЛ с помощью FANSY 2.0 для изучения пространственного распределения групп мюонов на глубине. Ограничивая в моделировании энергию мюонов, достигших поверхности, можно дать оценку разлета мюонов под землей (на уровне детектора) и изучать взаимодействия и тип первоначальной частицы.



Компланарные события (первая регистрация):

Прямая регистрация самых энергичных частиц в стволах ШАЛ с помощью рентген-эмульсионных камер (РЭК) была начата в 70-х годах в высокогорных экспериментах «Памир», «Чакалтая», «Фуджи», а также в стратосферных экспериментах на аэростатах и сверхзвуковом самолете «Concorde».



Особенность программного кода **FANSY** (FAN-like Secondary particle Yield) — это возможность реализации **компланарной генерации частиц** (coplanar particle generation, CPG) в адрон-ядерных взаимодействиях при сверхвысоких энергиях, что отличает его от стандартных моделей генерации частиц.

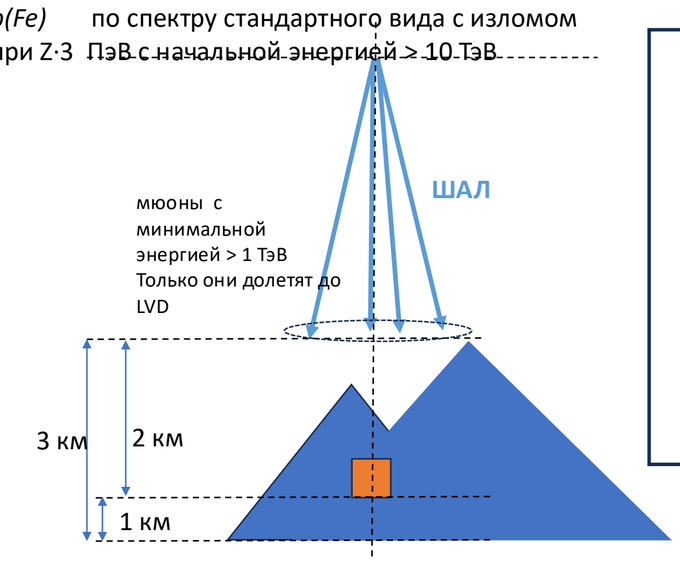
Основные параметры ШАЛ в FANSY 2.0:

- Азимутальный и зенитный углы падения – строго вертикаль
- Энергия и тип первичной частицы E_0 - p, Fe
- Координаты пересечения ствола ливня с плоскостью наблюдения (x, y)
- Энергия и тип частиц (E>1 ТэВ)

Ключевые особенности FANSY:

Характеристика	Обычные модели (QGSM, CORSIKA)	FANSY 2.0
Генерация частиц	Традиционная QGSM-типа + дистрибуция по углу	Дополнительно **компланарная генерация** наиболее энергичных частиц
Поперечный импульс	Обычное распределение p_t	Обычное распределение p_t
Энергетический диапазон	До $\sqrt{s} \lesssim 4$ TeV	При $E_0 \gtrsim 10^{16}$ eV ($\sqrt{s} \gtrsim 4$ TeV)
Совместимость с данными	Не описывают компланарность	Воспроизводит данные LHC (ALICE, ATLAS, CMS, TOTEM, LHCf) и космических лучей

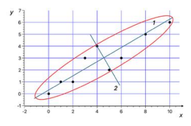
p(Fe) по спектру стандартного вида с изломом при Z·3 ТэВ с начальной энергией > 10 ТэВ



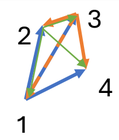
Параметры степени компланарности:

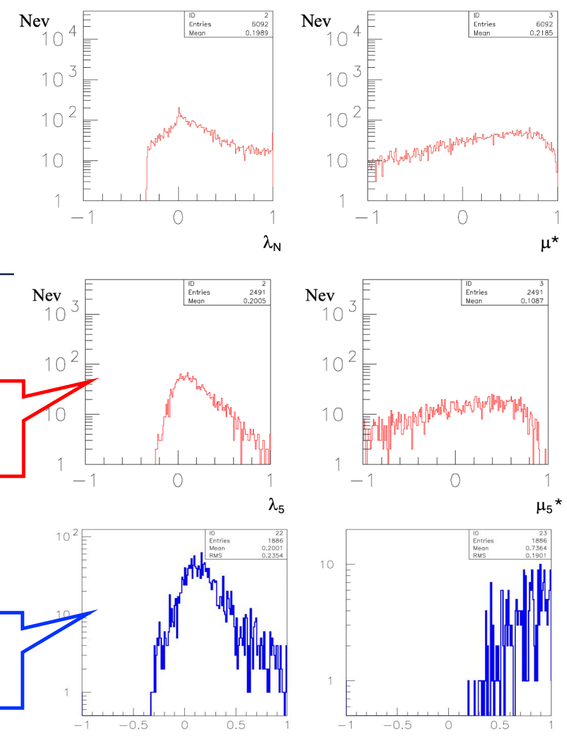
$$\mu_N = \frac{\beta}{\alpha} = \sqrt{\frac{a^2+1}{\frac{1}{a^2}+1}}\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}\left(\frac{-1}{a}x_i - y_i + d\right)^2}{\sum_{i=1}^{N}(ax_i - y_i + b)^2}}$$

$$= |a|\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}\left(\frac{-1}{a}x_i - y_i + d\right)^2}{\sum_{i=1}^{N}(ax_i - y_i + b)^2}}.$$



$$\lambda_N = \frac{\sum_{\neq j \neq k}^{N}\cos 2\varphi_{ij}^{k}}{N(N-1)(N-2)}$$





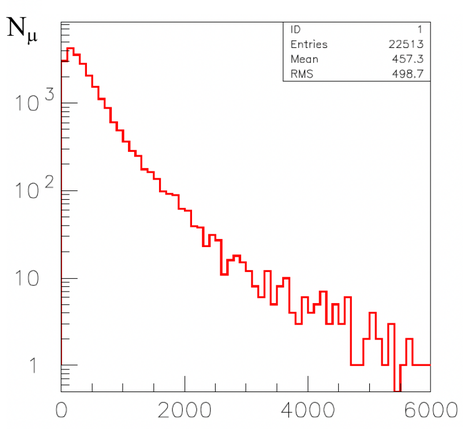
Физическая основа:

- Модель основана на гипотезе об эволюции 3D-пространства в 2D-пространства о при взаимодействии адронов при сверхвысоких энергиях
- Компланарность – естественное кинематическое следствие этой гипотезы
- Сечение компланарной генерации сравнимо с неупругим сечением взаимодействия протона

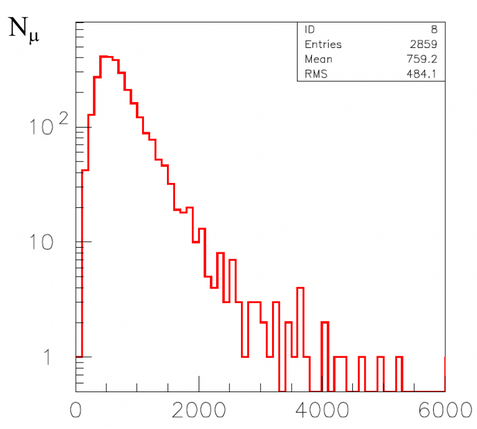
Техническая реализация:

- Код написан на FORTRAN (как и большинство кодов для физики космических лучей)
- Все версии FANSY 2.0 идентичны по множественности, сечению взаимодействия, коэффициенту неупругости, распределениям по $x_F=p_z/p_0$, различаются только по азимутальному p_t и
- Эта особенность критически важна для анализа данных космических лучей при сверхвысоких энергиях, где наблюдается аномальная компланарность наиболее энергичных частиц и/или подкаскадов центрального ствола ШАЛ (т.н. семейств квантов и адронов.

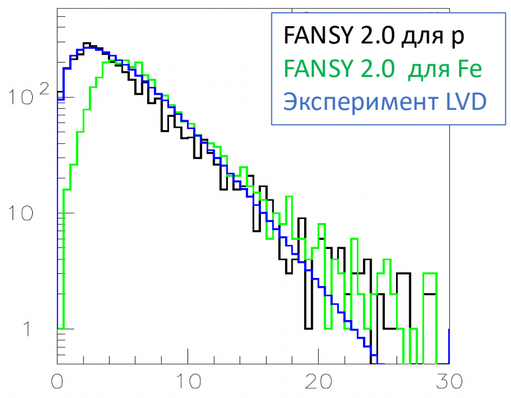
FANSY 2.0 Fe : Число ливней Nev=2882.



Распределение всех расстояний от оси ливня, см



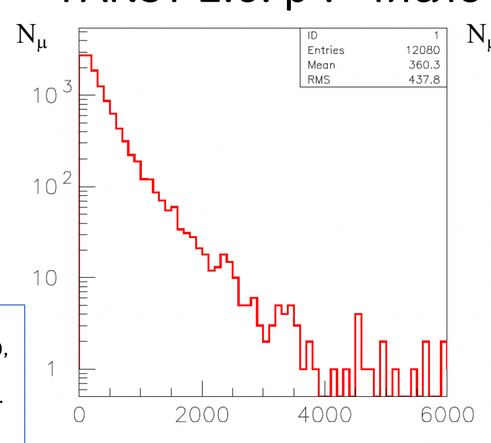
Распределение всех расстояний между парами мюонов в одном событии



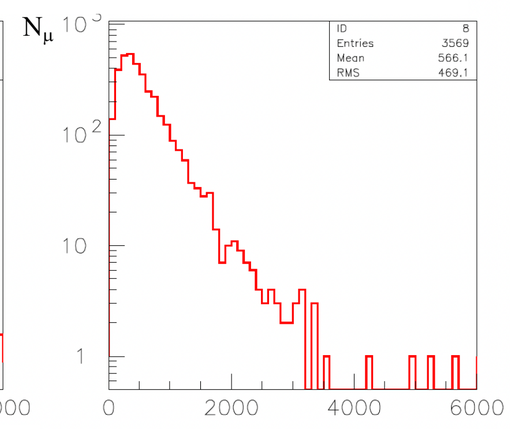
Литература:

1. Сотрудничество "Памир" II. Изв. АН СССР. Сер. физ. 50, 2125 (1986).
2. Р. А. Мухамедшин, докт. дисс., ИЯИ РАН (Москва, 2006).
3. Р. А. Мухамедшин, ЯФ 88, 418 (2025).
4. G. Bari, *et al.*, Nucl. Instrum. Methods A 277, 11 (1989).
5. Н. Ю. Агафонова, О. Г. Ряжская, ЯФ 85, 70 (2022).
6. Н.Ю. Агафонова. канд. дисс. ИЯИ РАН (Москва, 2016)

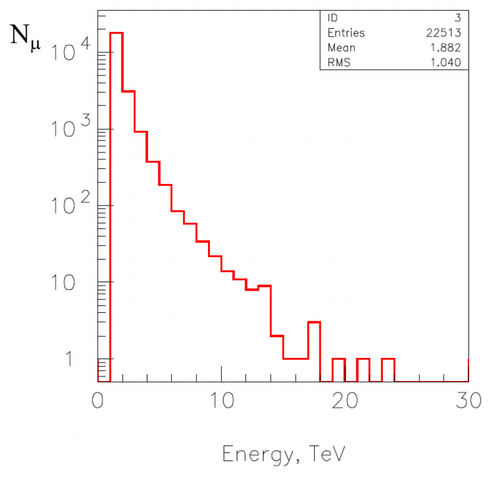
FANSY 2.0. p : Число ливней Nev=4508

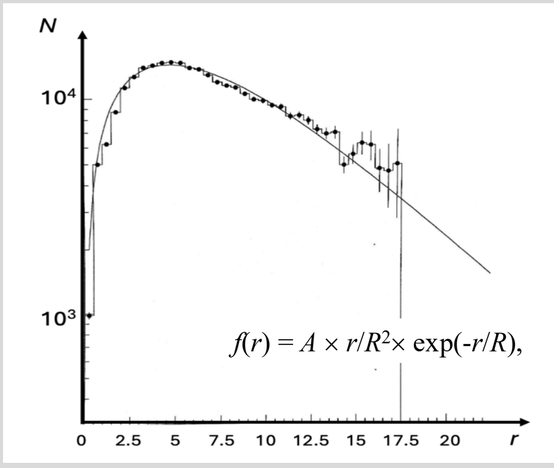


Распределение всех расстояний от оси ливня, см



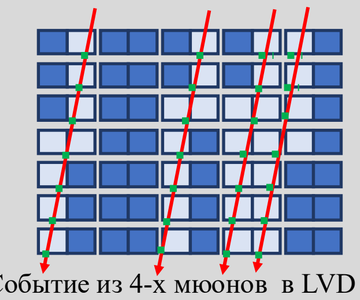
Распределение всех расстояний между парами мюонов в одном событии



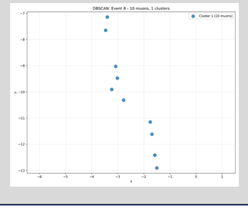
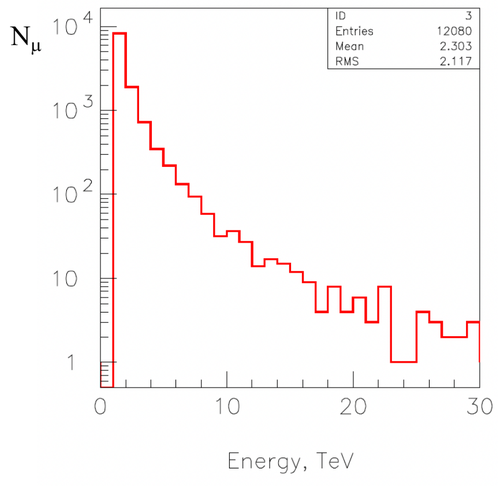


Декогерентная кривая, полученная на LVD:

Распределение расстояний между треками мюонов в группах. Точки с ошибками экспериментальные данные LVD



Событие из 4-х мюонов в LVD



Компланарное событие в LVD