



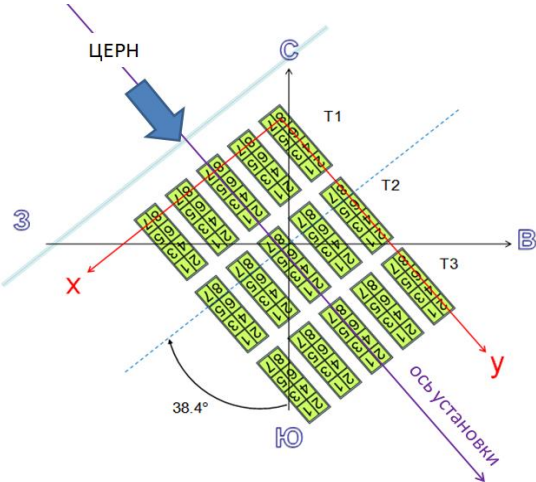
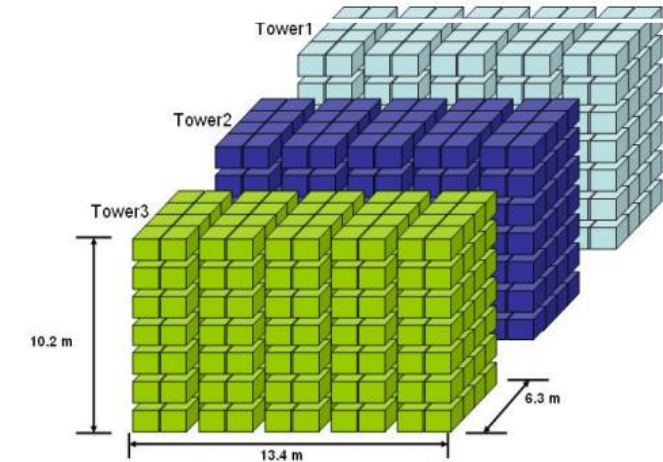
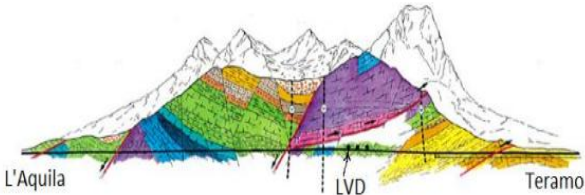
Мюоны высоких энергий, регистрируемые на LVD

Слуцкая О.Ю., магистр

Научный руководитель: Литвинович Е.А.

Научный консультант: Агафонова Н.Ю.

LVD-детектор



Сцинтилляционный детектор большого объема LVD (Large Volume Detector) находится в подземном зале А Лаборатории Гран Сассо на глубине 3600 м в.э.



Задачи эксперимента – регистрация нейтрино от коллапса звездных ядер в Галактике и изучение атмосферных мюонов.



Длина	22.7 метров
Ширина	13.2 метра
Высота	10 метров
Масса железа (сцинтилляционные контейнеры и поддерживающая структура)	1020 тонн
Масса всего сцинтиллятора	966 тонн
Состав сцинтиллятора	$C_nH_{2n}(\langle n \rangle = 9.6) + 1$ г/л PPO + 0.03 г/л PPOP
Плотность сцинтиллятора	~ 0.78 г/см ³
Число сцинтилляционных счетчиков	840 штук
Число PMTs (ФЭУ)	2520

Мюоны

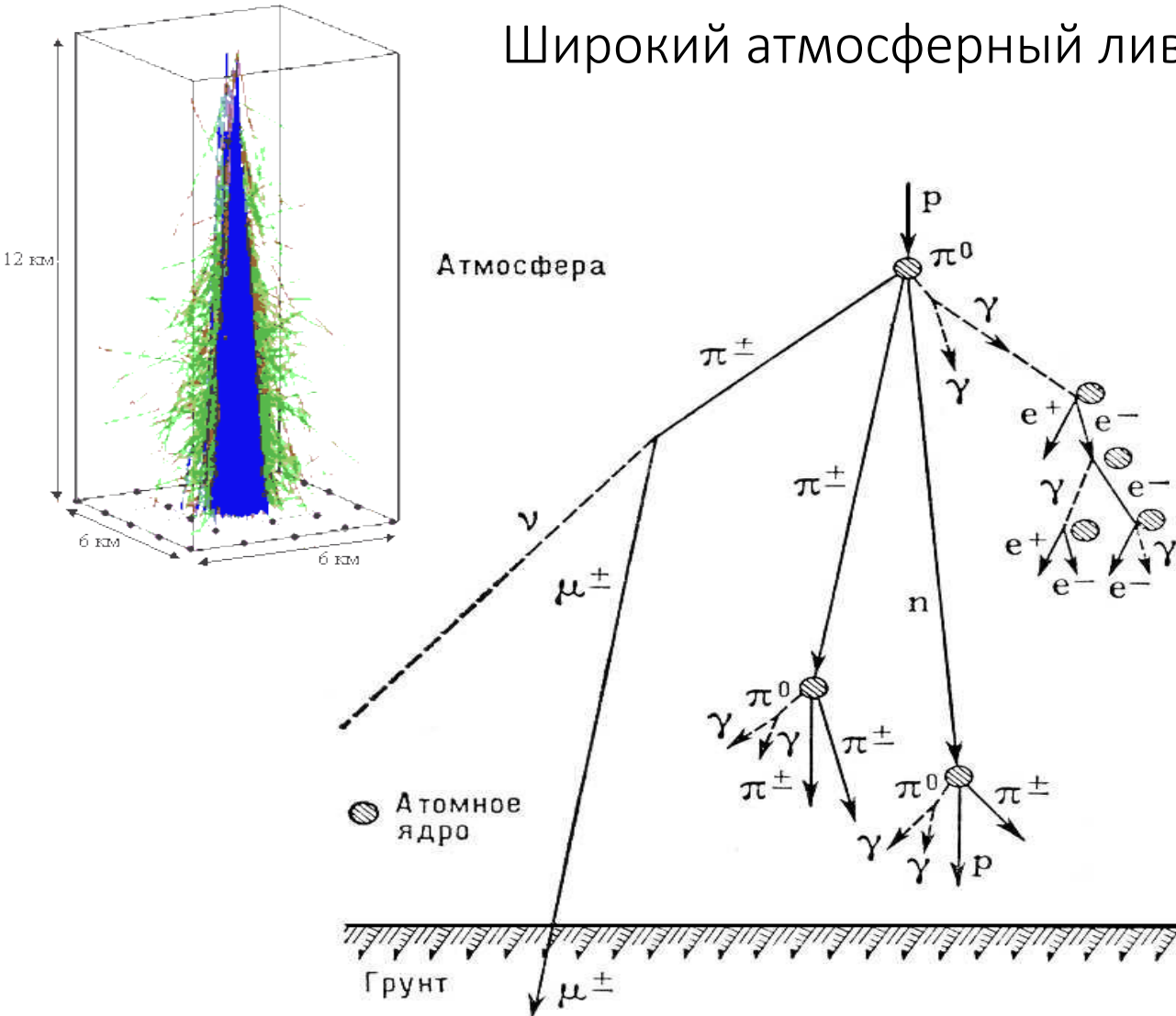
Широкий атмосферный ливень

$$\pi^+ (K^+) \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$$

$$\pi^- (K^-) \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$$

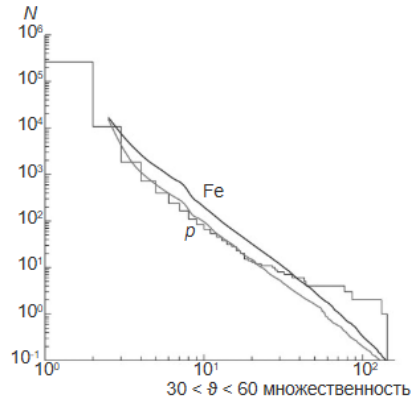
Энергия мюонов, проходящих через установку LVD имеют среднюю энергию ~ 280 ГэВ. Для этой энергии вычислены величины основных потерь мюона в веществе.

Ионизационные потери	$\left(-\frac{dE}{dx}\right) = 2,49 \frac{\text{МэВ}}{\text{г} \times \text{см}^{-2}}$
Тормозное излучение	$\left(-\frac{dE}{dx}\right)_\gamma \approx 0,25 \frac{\text{МэВ}}{\text{г} \times \text{см}^{-2}}$
Образование электрон-позитронных пар	$\left(-\frac{dE}{dx}\right)_p \approx 0,28 \frac{\text{МэВ}}{\text{г} \times \text{см}^{-2}}$
Неупругие потери	$\left(-\frac{dE}{dx}\right)_n = 0,115 \frac{\text{МэВ}}{\text{г} \times \text{см}^{-2}}$

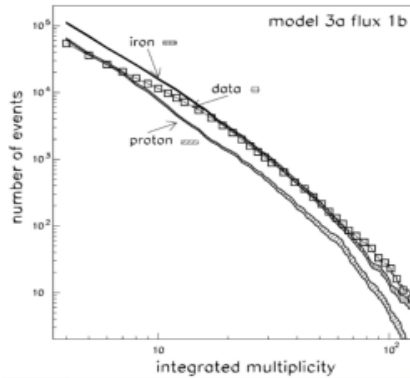


Мюонная загадка в КЛ

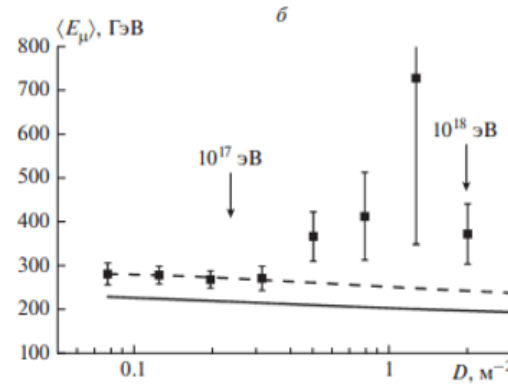
ALEPH



DELPHI

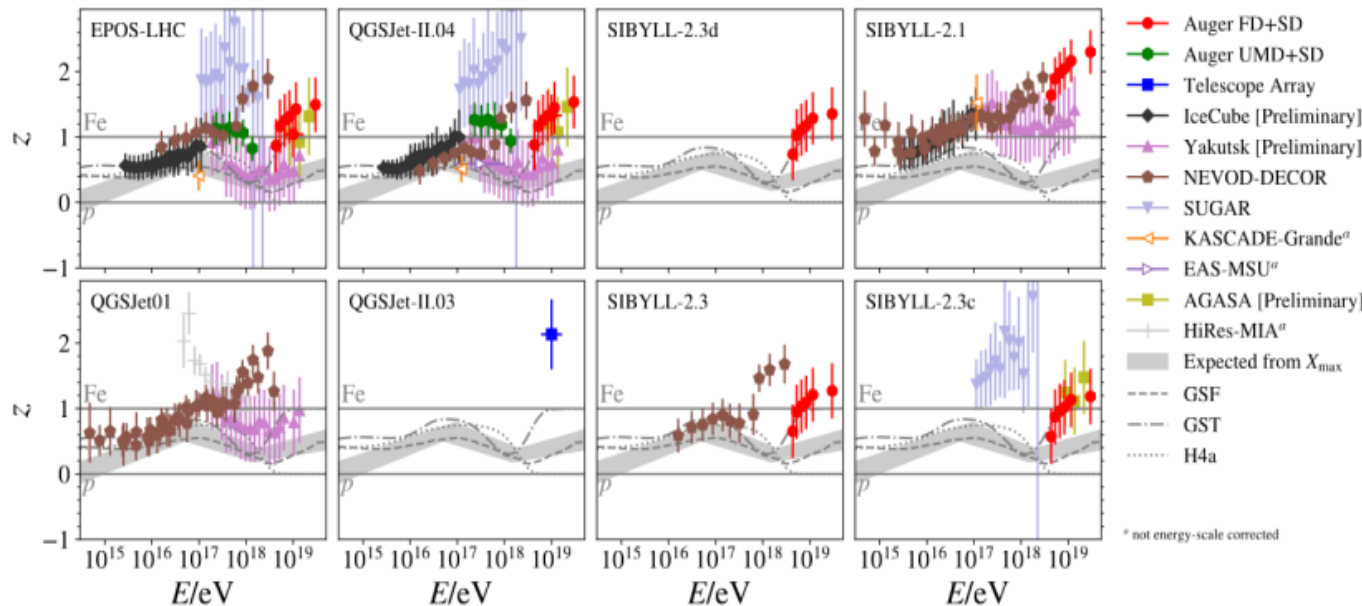


НЕВОД-ДЕКОР



Мюонная загадка – загадка в физике космических лучей, связанная с наблюдаемым избытком мюонов в ШАЛ при сверхвысоких энергиях (выше 10^{17} эВ). Причем этот избыток возрастает с увеличением энергии первичных частиц (с увеличением зенитного угла). Согласно существующим теориям, при развитии ШАЛ образуется определенное количество мюонов, но экспериментальные данные значительно превышают теоретические предсказания.

$$Z = \frac{\ln(N_{\mu}^{det}) - \ln(N_{\mu}^{sim,p})}{\ln(N_{\mu}^{sim,Fe}) - \ln(N_{\mu}^{sim,p})}$$



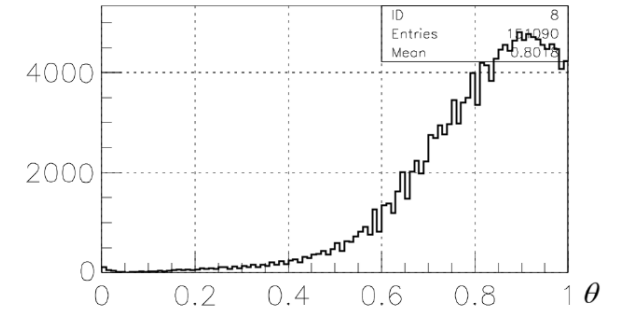
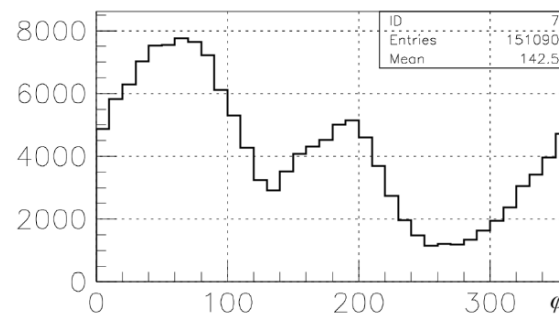
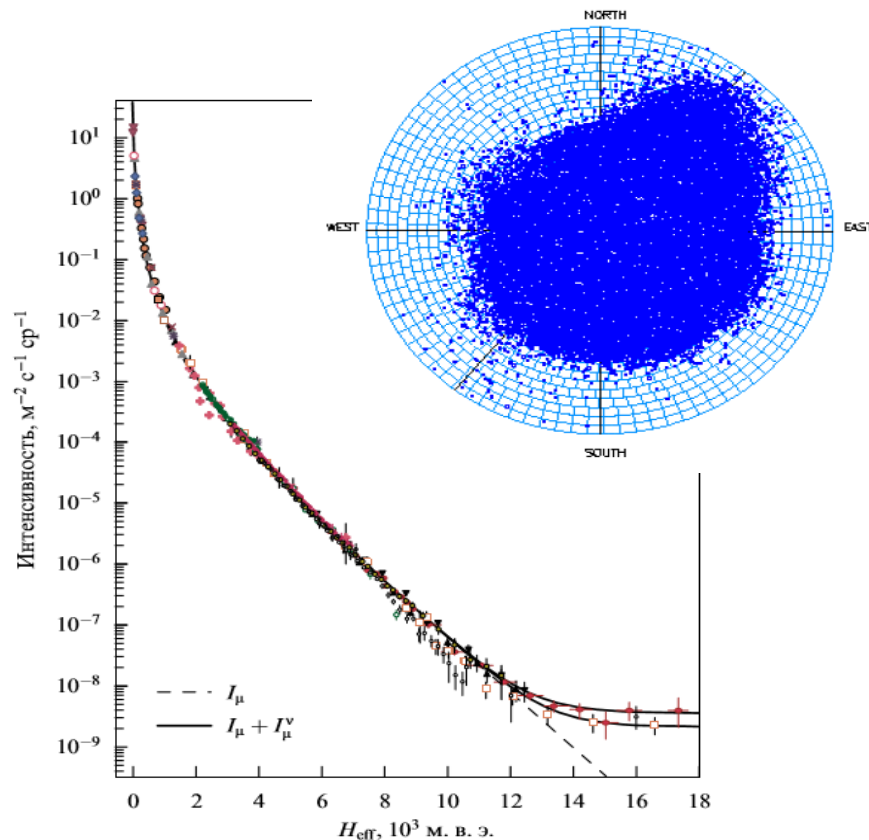
N_{μ}^{det} – полученное в эксперименте число мюонов

$N_{\mu}^{sim,p}$ – ожидаемое число мюонов, которое должно было получиться в эксперименте при чисто протонном составе КЛ

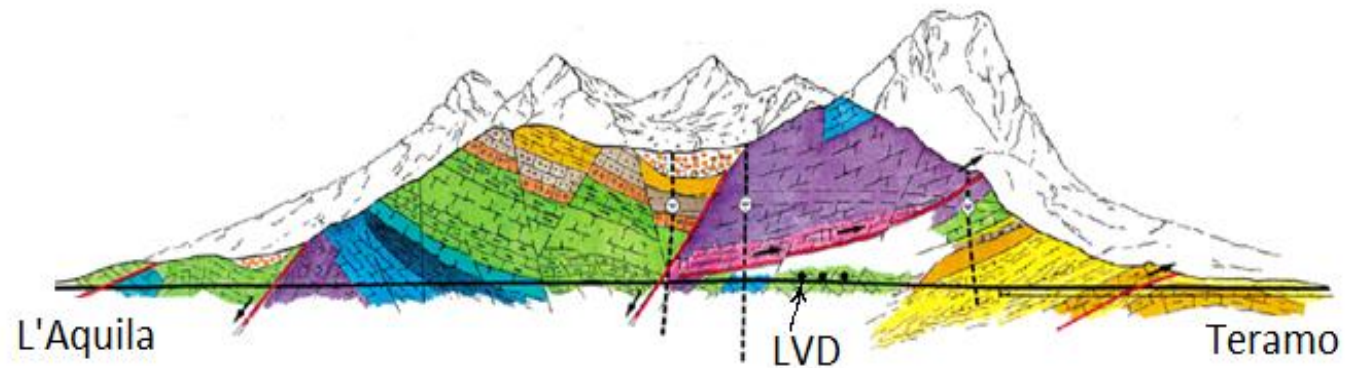
$N_{\mu}^{sim,Fe}$ – ожидаемое число мюонов, которое должно было получиться в эксперименте при чисто железном составе КЛ

Характеристики мюонов, зарегистрированных в детекторе LVD

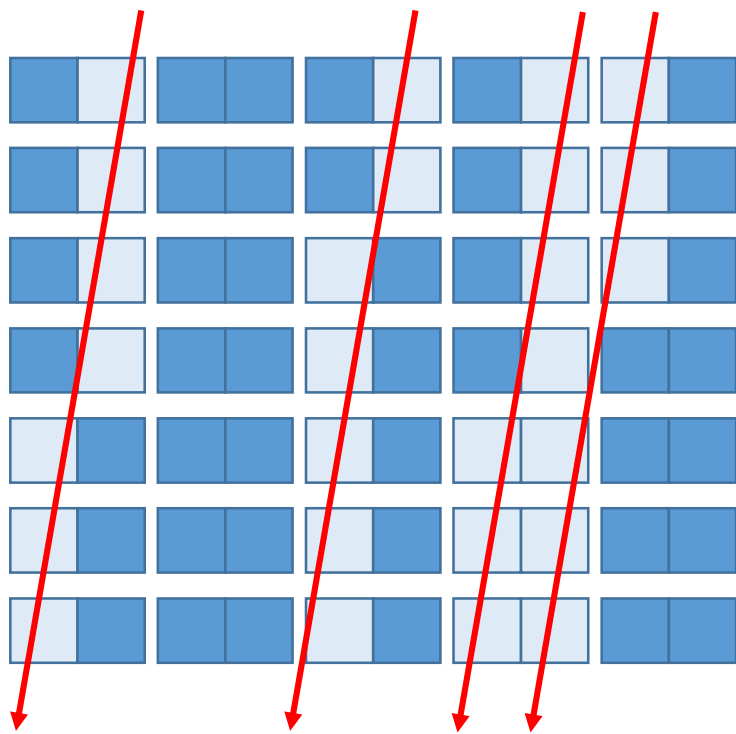
В период с июня 1999 по сентябрь 2002 года работала трековая система на двух башнях LVD. За этот период было реконструировано 151090 мюонных групп.



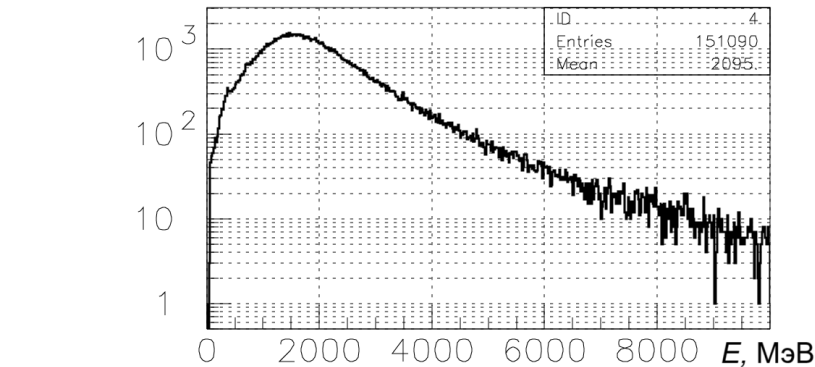
Распределение по азимутальному (ϕ) и зенитному ($\cos \theta$) углам реконструированных событий.



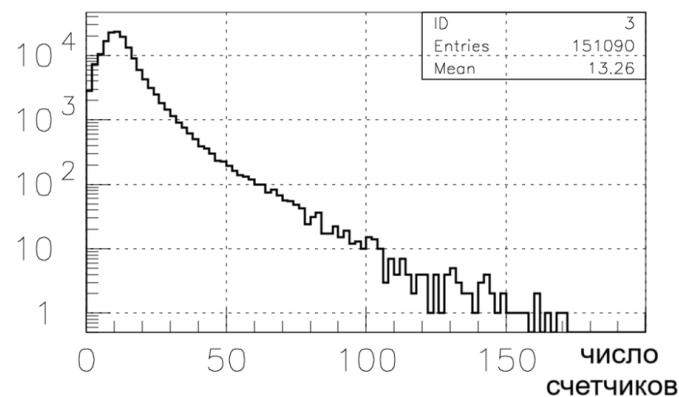
Характеристики мюонов, зарегистрированных в детекторе LVD



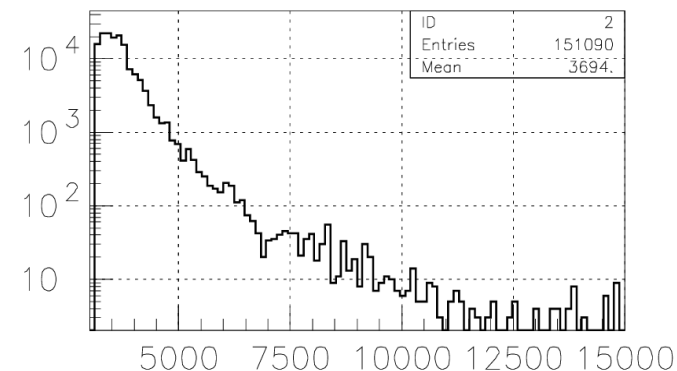
Мюонное событие – группа из 4 мюонов



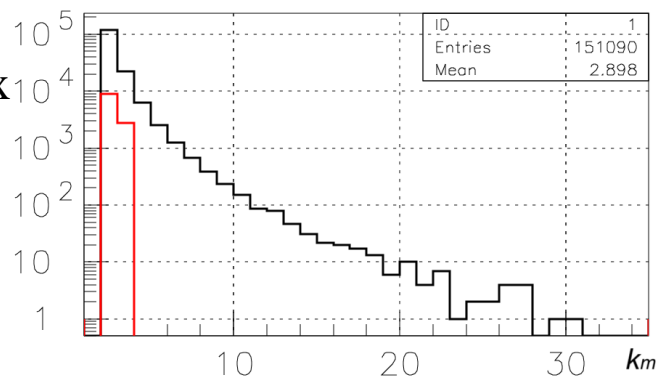
Распределение по суммарному энергосодержанию, реконструированных мюонных групп



Распределение по числу сработавших счетчиков в событии в реконструированных мюонных группах



Распределение числа зарегистрированных множественных событий по глубинам.



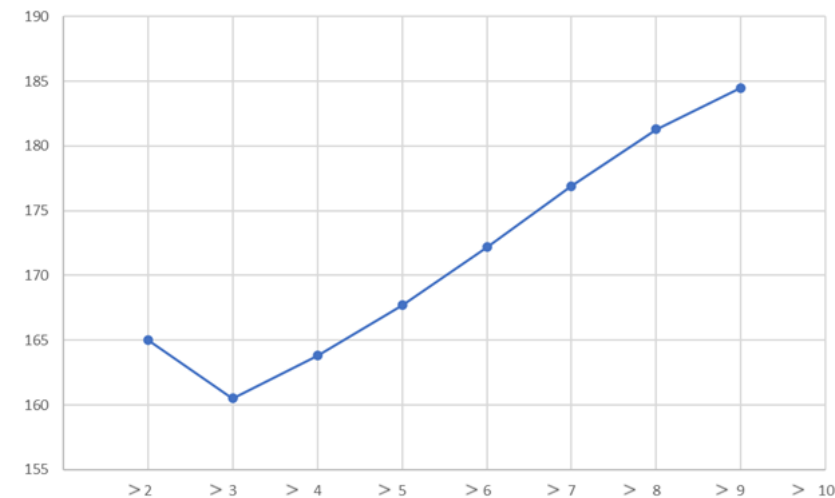
Распределение по кратности мюонов в событиях реконструированных мюонных групп (без одиночных мюонов).

Характеристики мюонов, зарегистрированных в детекторе LVD

Таблица: средние значения распределений в зависимости от угла θ

Зенитный угол	Число событий	Множественность	Число счетчиков	Суммарные энергопотери	Энергопотери / счетчик	Глубина, м.в.э.
θ	Соб.	$\langle k_m \rangle$	$\langle N \rangle$	$\langle \Sigma E \rangle$	$\langle E/N \rangle$	$\langle H \rangle$
0-10	144644	2,894	13,24	2089	164,4	3702
10-20	20241	2,918	12,49	2104	176,4	3537
20-30	34253	2,903	12,54	2037	167,8	3432
30-40	39310	2,903	13,03	2033	161,7	3531
40-50	30632	2,886	13,72	2094	158,5	3756
50-60	13637	2,852	14,25	2182	160,0	4193
60-70	4369	2,850	15,59	2371	161,0	4854
70-80	1535	2,862	16,66	2540	172,6	5484
80-90	607	2,805	18,07	2600	158,4	8968

Зависимость $\Sigma E/N$ от множественности зарегистрированных событий



Вычисление аксептанса LVD

Аксептанс (геометрический аксептанс) – это термин, обозначающий площадь регистрации установкой каких-либо частиц с наложенными некими условиями отбора. Нередко в аксептанс также включают и величину телесного угла, поэтому может он измеряется в см^2 или в $\text{см}^2 \times \text{стерадиан}$.

Алгоритм основан на повороте координат счетчиков LVD (x_t, y_t, z_t) в плоскость перпендикулярную выбранному углу (θ, ϕ) треков мюонов. В результате имеем 2-х мерную проекцию установки на плоскость (x, y)

Программа определения аксептанса LVD для регистрации атмосферных мюонов:

- использует координаты центров 840 счетчиков и угол ϕ, θ .
- поворачивает координаты счетчиков LVD (x_t, y_t, z_t) в плоскость перпендикулярную выбранному углу (θ, ϕ)
- разбивает плоскость $30 \text{ м} \times 30 \text{ м}$. на ячейки по $1 \text{ см} \times 1 \text{ см}$. В плоскости (x, y) запускает прямые в центре ячеек. (всего 3000×3000 ячеек)
- определяет попала прямая или нет через грани счетчика.
- вычисляет число счетчиков, пересекающих прямые треки (мюонов).
- суммирует число ячеек, в которых число попаданий > 2 (т.е. трек прошел больше чем через 2 счетчика)

Число ячеек и будет площадь регистрации всего детектора в см^2 .



Результаты

Для каждого месяца набора статистики проводятся калибровки счетчиков по энергии и времени. Номера счетчиков с их калибровками записаны в специальных файлах. Счетчики, не прошедшие калибровку, надо исключить из регистрации и вычислять акцептанс без них за каждый месяц. Пример вида установки для $\varphi = 45$, $\theta = 30$ при выброшенных 250 счетчиков из 840 показан на рисунке (б).

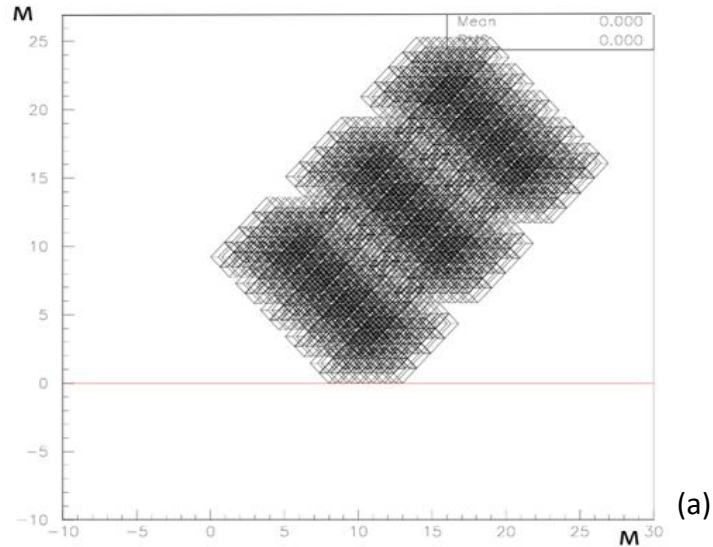
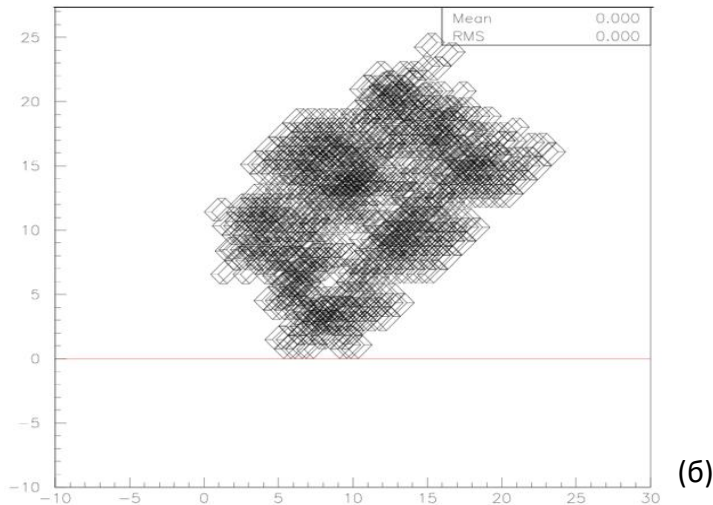
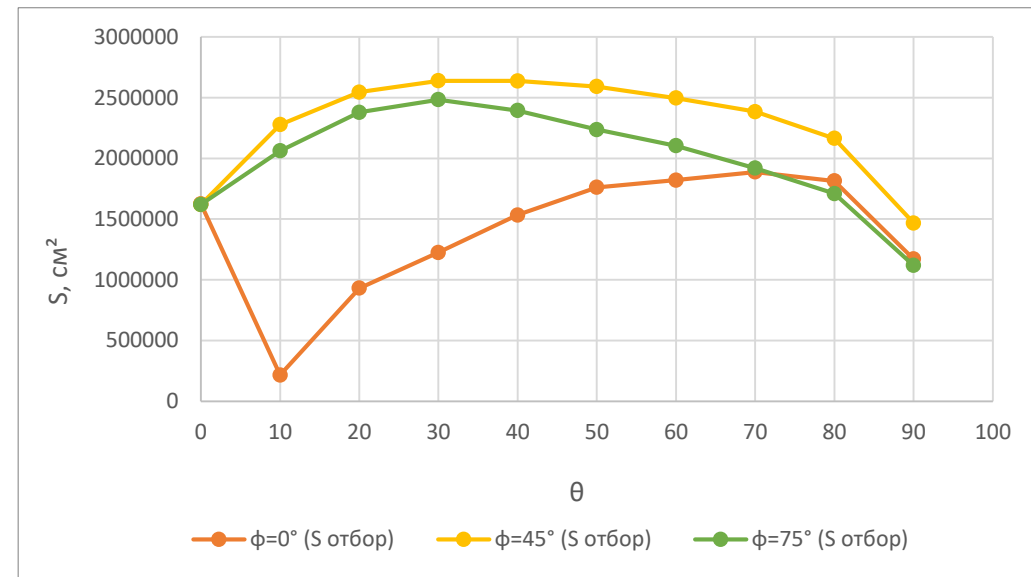
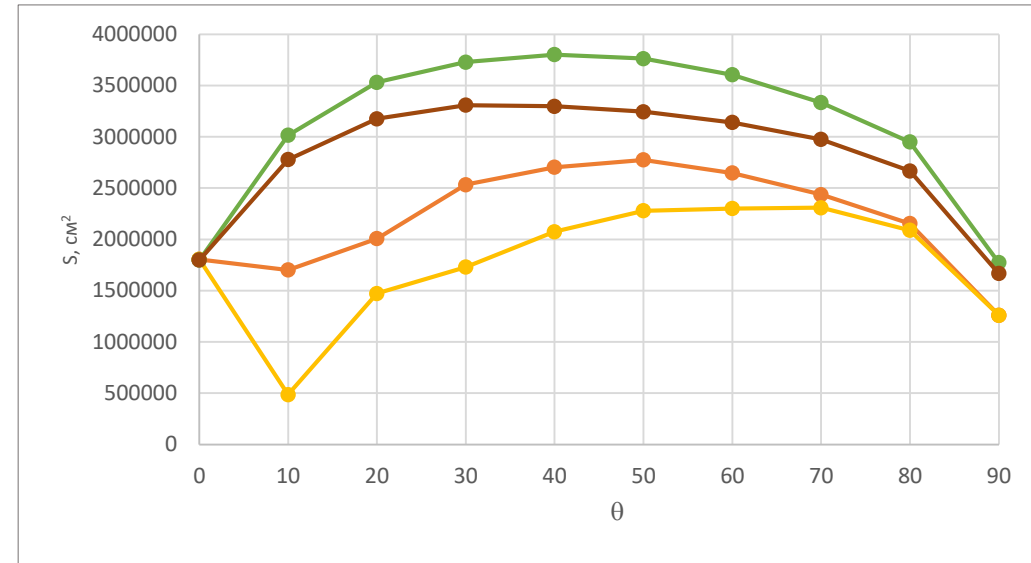


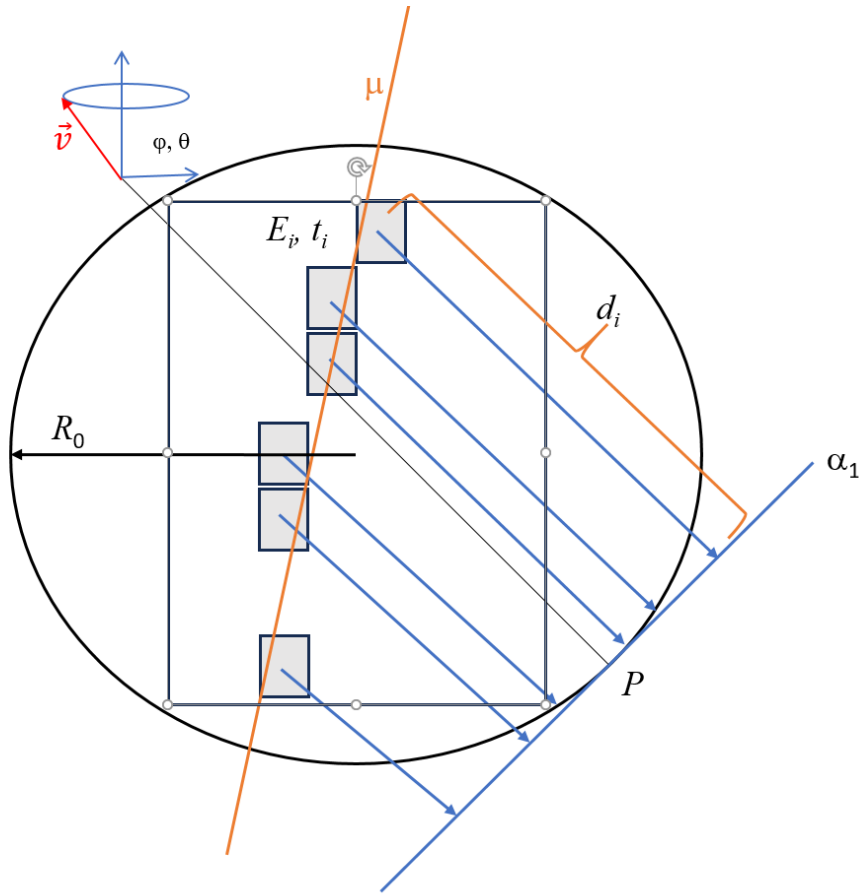
Схема установки LVD с учетом неработающих счетчиков для $\varphi = 45$, $\theta = 30$.



Проекция счетчиков установки LVD под углом слева – $\varphi = 45$, $\theta = 0$, справа – $\varphi = 45$, $\theta = 30$.



Реконструкция мюонных событий



- Переход к новой декартовой (Dec2) системе координат с центром посередине между восемью угловых счетчиков LVD.
- Строим сферическую систему (Spher1) координат– координаты точки в ней: ρ, θ, φ .
- Строим куб ребром $2R_0$ в Dec2 и сферу с диаметром $2R_0$ в Spher1.
- Разыгрываем случайно (Монте-Карло) точку в объеме куба (равномерно по объему) и смотрим – находится точка внутри сферы – если да: принимаем точку x_0, y_0, z_0 .
- Получаем вектор случайного направления: $\vec{v}_0 = (x_0, y_0, z_0)$
- Продолжим этот вектор до пересечения со сферой: $(k \cdot x_0)^2 + (k \cdot y_0)^2 + (k \cdot z_0)^2 = R_0^2$
- Случайная точка на сфере: $\vec{v} = (k \cdot x_0, k \cdot y_0, k \cdot z_0) = (x, y, z)$
- Пусть вектор $\vec{v}$ является вектором направления группы мюонов. Допустим сработали n счетчиков с номерами $i = (1, n)$. В каждом счетчике E_i в МЭВ и относительное местное время прихода импульса t_{iTDC} в nS .
- Общее уравнение плоскости в Dec2: $A \cdot x + B \cdot y + C \cdot z + D = 0$
- Построим уравнение плоскости, проходящей через точку $P(x_1, y_1, z_1)$ и перпендикулярную вектору $\vec{v}(x_1, y_1, z_1)$ (плоскость касательная к сфере): $x_1 \cdot (x - x_1) + y_1 \cdot (y - y_1) + z_1 \cdot (z - z_1) = 0$. $A=x_1, B=y_1, C=z_1$. Или уравнение плоскости: $A \cdot x + B \cdot y + C \cdot z + D = 0$ (плоскость α_1) $A=x_1, B=y_1, C=z_1, D = (-x_1^2, -y_1^2, -z_1^2)$.
- Все мюоны в группе будут падать на эту плоскость перпендикулярно.
- Расстояние от центра i -го танка до плоскости α_1 равно: $d_i = \frac{|A \cdot x_i + B \cdot y_i + C \cdot z_i + D|}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}}$
- Дополнительное время пролета мюона от танка i до плоскости α_1 равно: $t_{d_i} = \frac{d_i}{c}$ (nS), c – скорость света (если мюон очень релятивистский). Таким образом время прихода мюона на плоскость α_1 равно: $t_{i\alpha_1} = t_i + t_{d_i}$ (nS)
- В нашем предположении, случайно выбранный вектор $\vec{v}$ попал на направление группы мюонов. Это конечно же не так и величина $f(\vec{v})$ будет больше. Мы приходим к задаче двумерной минимизации функции $f(\vec{v}) = f(\theta, \varphi)$.

Заключение

- Детектор LVD является хорошим инструментом для исследований мюонов космических лучей, приходящих на глубину от 3 до 15 км в.э.
- Для решения «мюонной загадки» исследовались характеристики множественных мюонных событий такие как величина суммарных энергетических потерь и их удельная величина на 1 счетчик в зависимости от угла и глубины грунта прошедшего мюоном до регистрации в детекторе.
- Разработан алгоритм вычисления аксептанса с учетом отбора LVD событий и отбора откалиброванных счетчиков по энергии и временным задержкам. Приведены величины площади регистрации детектора для углов $\theta = 0, 10, 20, \dots 90$ и $\varphi = 0, 45, 75$.
- Разработан алгоритм реконструкции мюонных событий (направление угла прихода мюонов) в LVD без трековой системы с привлечением времени срабатывания счетчиков.

Спасибо за внимание!