



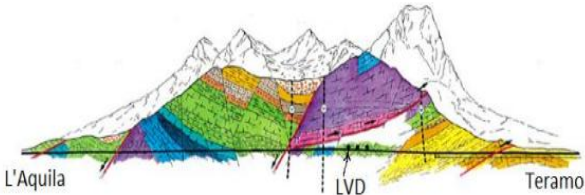
Мюоны высоких энергий, регистрируемые на LVD

Слуцкая О.Ю., магистр

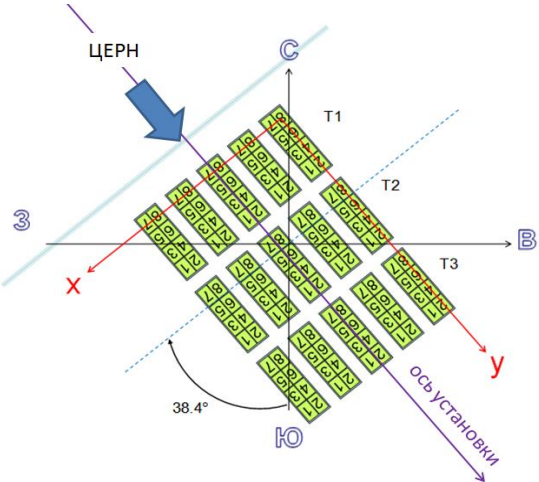
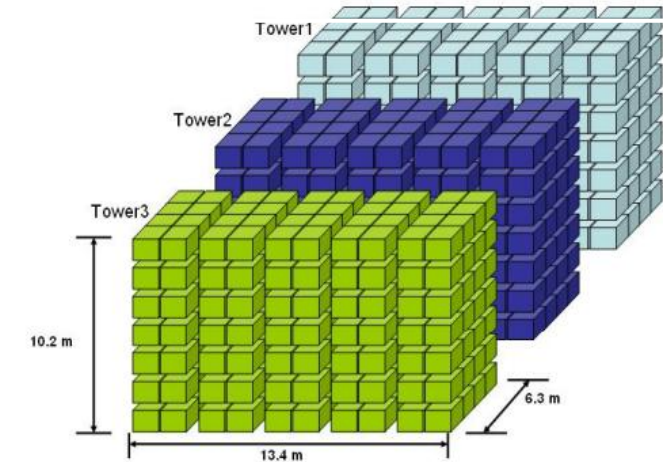
НИЯУ МИФИ, ИЯИ РАН

Научный руководитель: Н.Ю. Агафонова (ИЯИ РАН) и LVD коллаборация

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

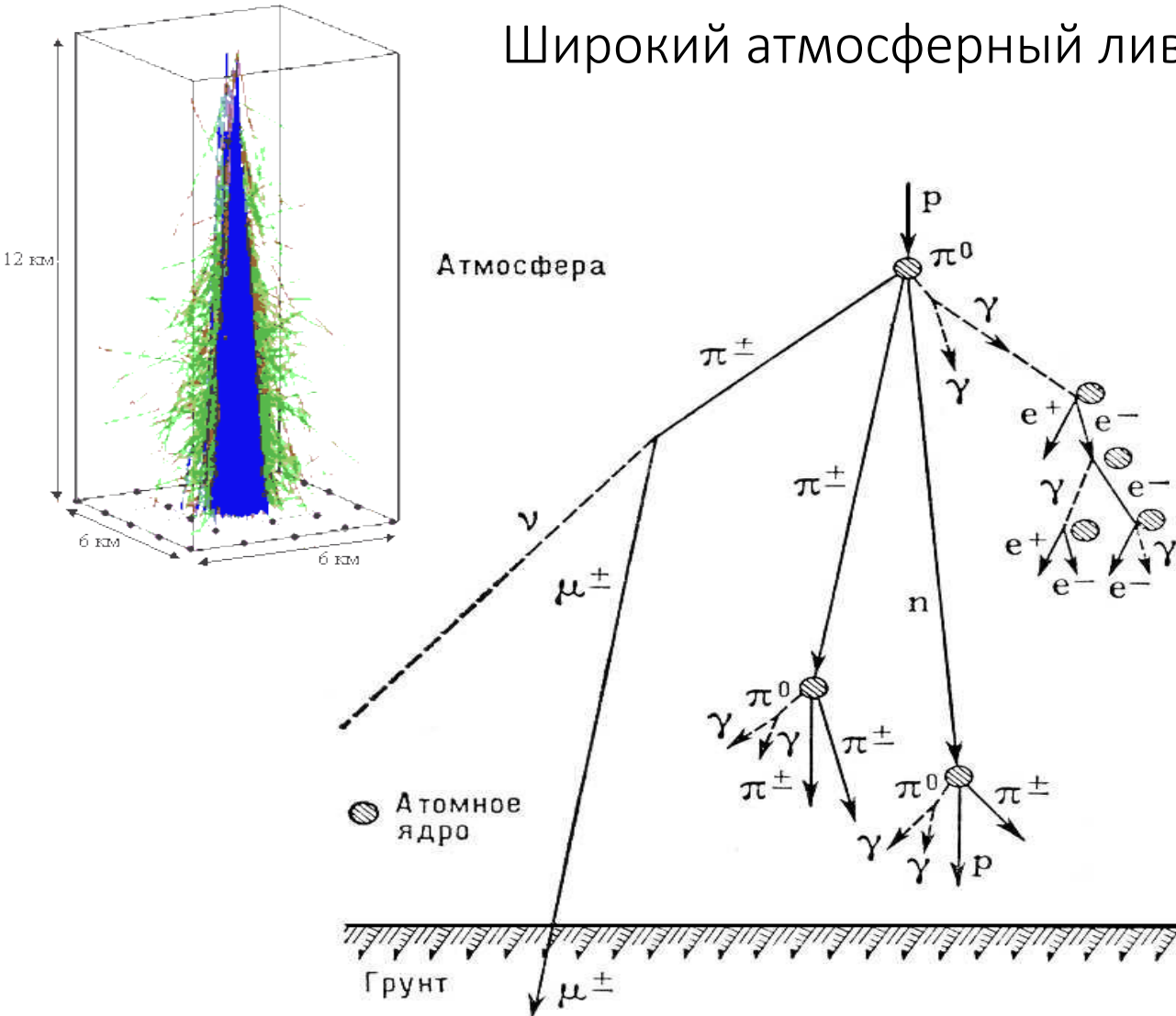
Широкий атмосферный ливень

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

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

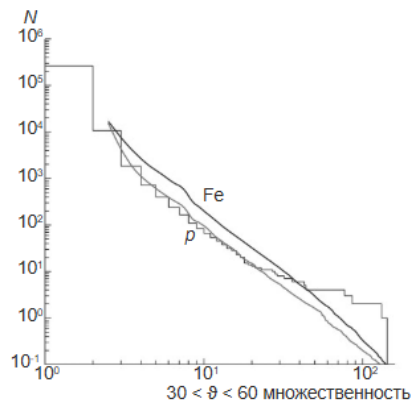
Энергия мюонов, проходящих через установку LVD имеют среднюю энергию ~ 280 ГэВ. Для этой энергии вычислены величины основных потерь мюона в веществе.

Ионизационные потери	$\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{\text{иониз}} = 2,49 \frac{\text{МэВ}}{\text{г} \times \text{см}^{-2}}$
Тормозное излучение	$\left(-\frac{dE}{dx}\right)_\gamma \approx 0,29 \frac{\text{МэВ}}{\text{г} \times \text{см}^{-2}}$
Образование электрон-позитронных пар	$\left(-\frac{dE}{dx}\right)_p \approx 0,15 \frac{\text{МэВ}}{\text{г} \times \text{см}^{-2}}$
Неупругие потери	$\left(-\frac{dE}{dx}\right)_n = 0,04 \frac{\text{МэВ}}{\text{г} \times \text{см}^{-2}}$

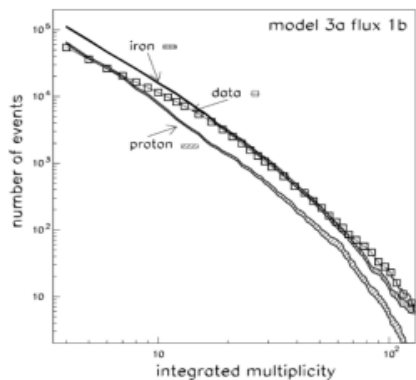


Мюонная загадка в КЛ

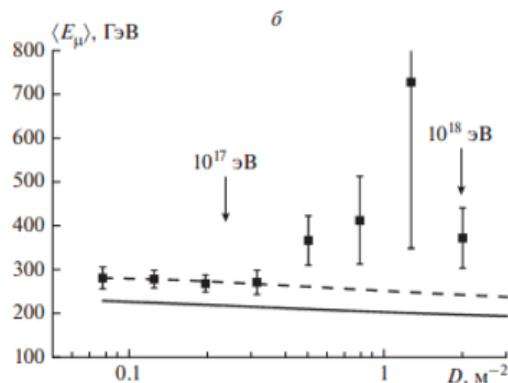
ALEPH



DELPHI

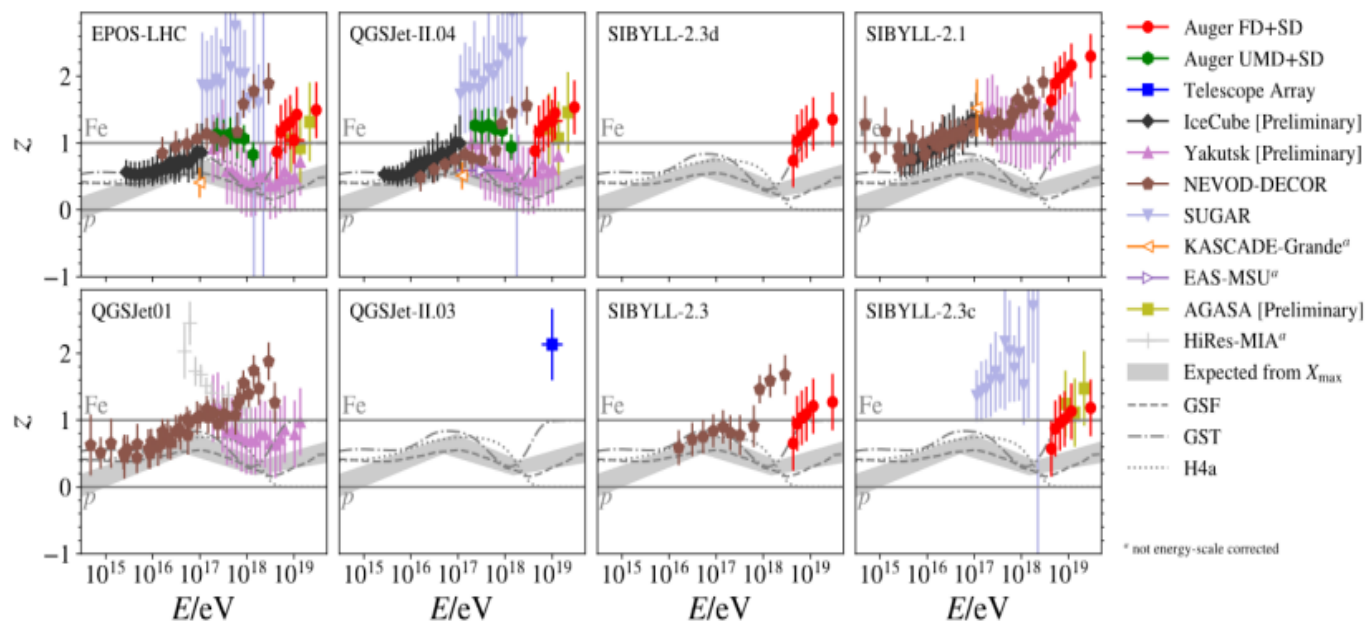


НЕВОД-ДЕКОР



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.

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

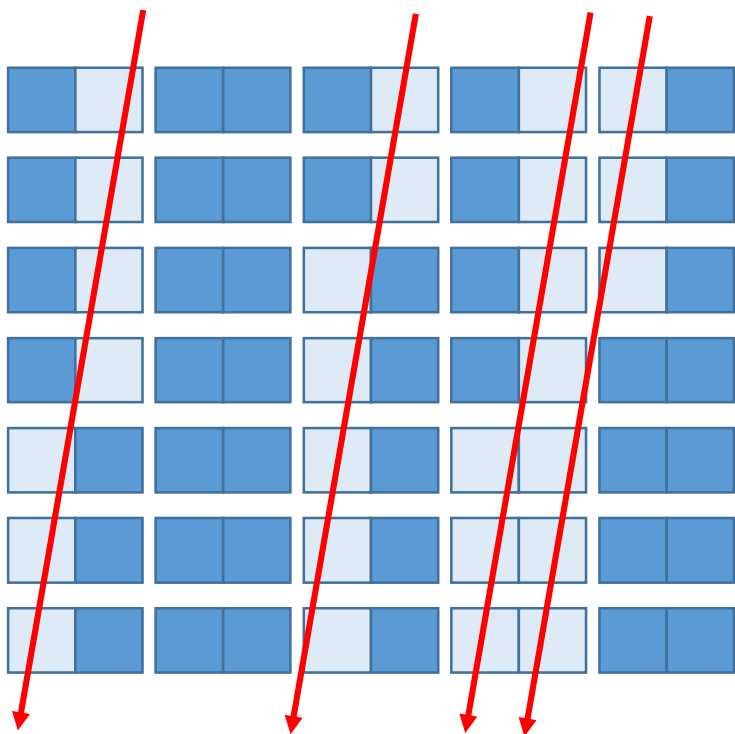


N_{μ}^{det} – полученное в эксперименте число мюонов

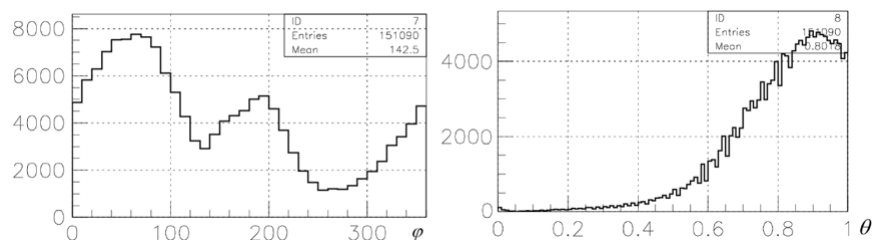
$N_{\mu}^{sim,p}$ – ожидаемое число мюонов, которое должно было получиться в эксперименте при чисто протонном составе КЛ

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

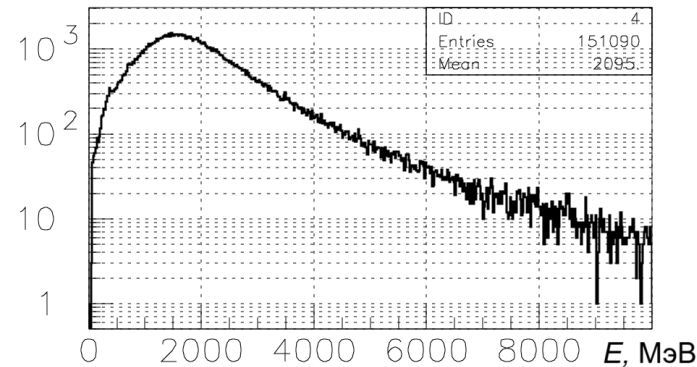
Характеристики мюонов, зарегистрированных в детекторе LVD



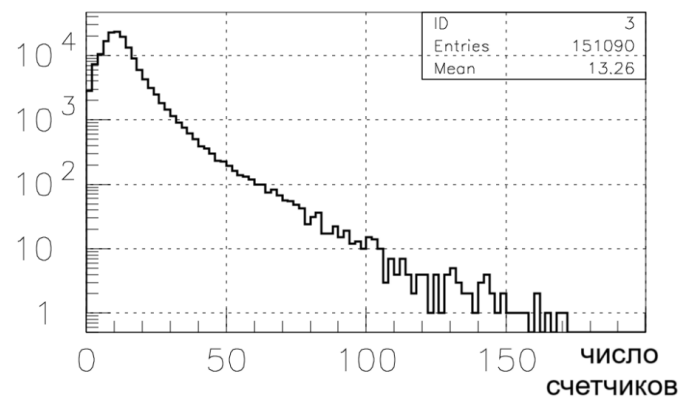
Мюонное событие – группа из 4 мюонов



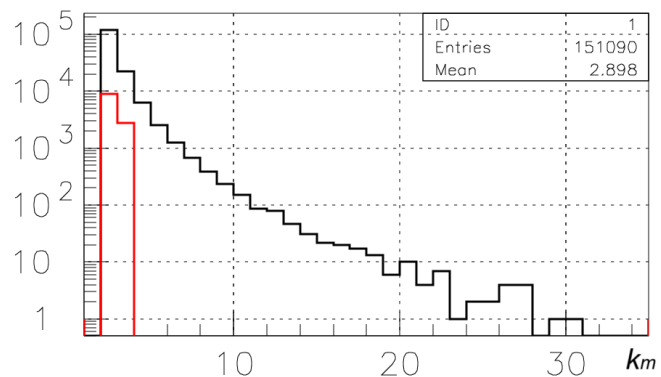
Распределение по азимутальному (ϕ) и зенитному ($\cos \theta$) углам реконструированных событий



Распределение по суммарному энергосодержанию, реконструированных мюонных групп



Распределение по числу сработавших счетчиков в событии в реконструированных мюонных группах



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

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:

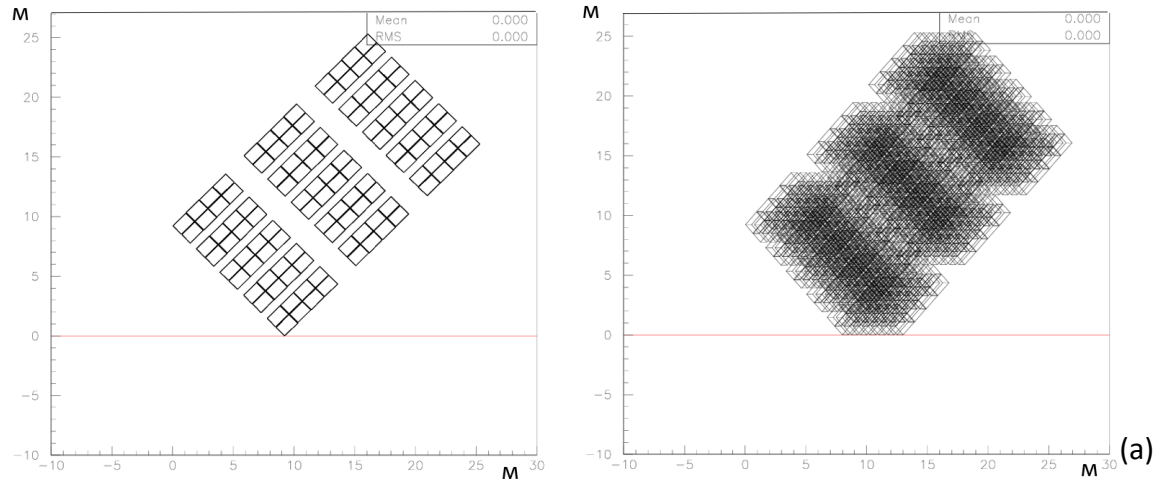
- использует координаты центров 840 счетчиков и угол φ, θ .
- поворачивает координаты счетчиков LVD (x_t, y_t, z_t) в плоскость перпендикулярную выбранному углу (θ, φ)
- разбивает плоскость $30 \text{ м} \times 30 \text{ м}$. на ячейки по $1 \text{ см} \times 1 \text{ см}$. В плоскости (x, y) запускает 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).



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

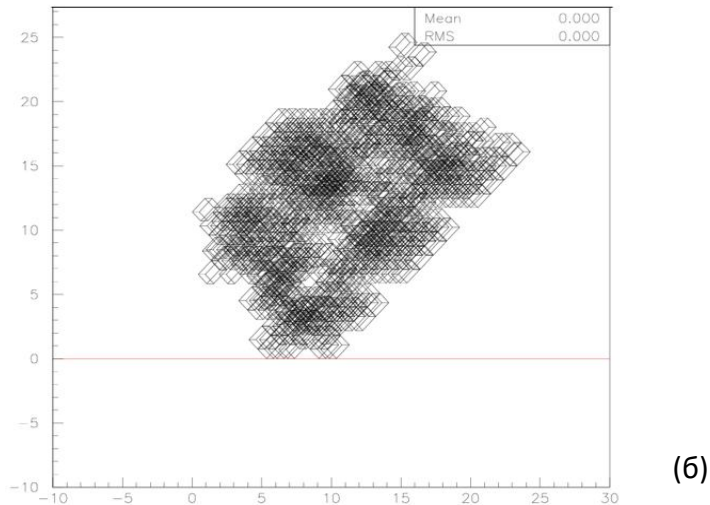
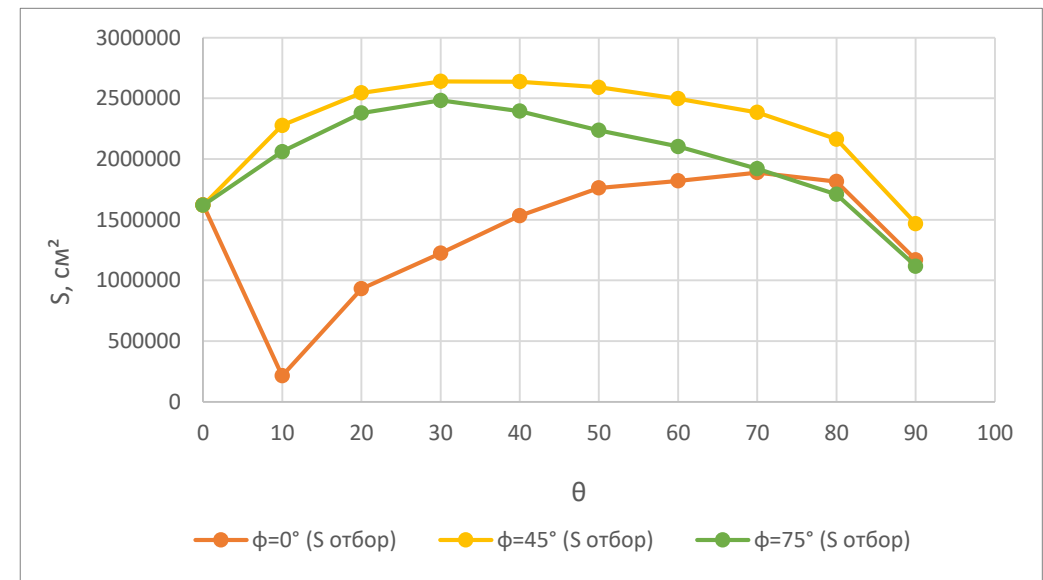
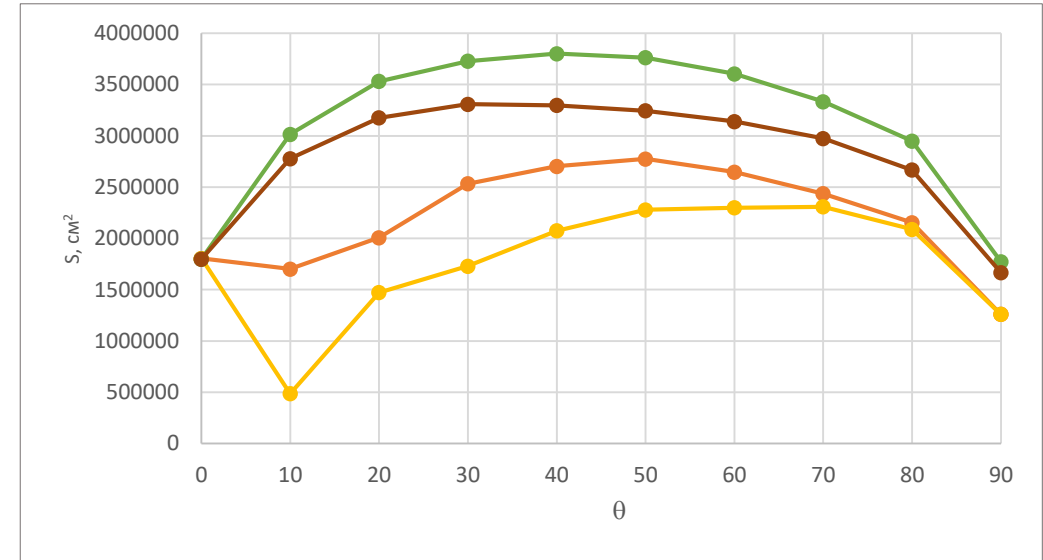


Схема установки LVD с учетом неработающих счетчиков для $\varphi = 45$, $\theta = 30$.



- 8

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!