



Регистрация мюонов космических лучей на подземном детекторе большого объема

Слуцкая О.Ю.

МИФИ, ИЯИ РАН

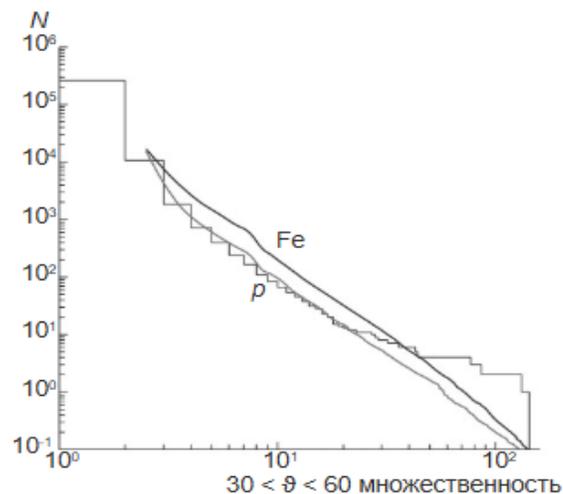
Научный руководитель: Н.Ю. Агафонова (ИЯИ РАН)

Мюонная загадка в КЛ

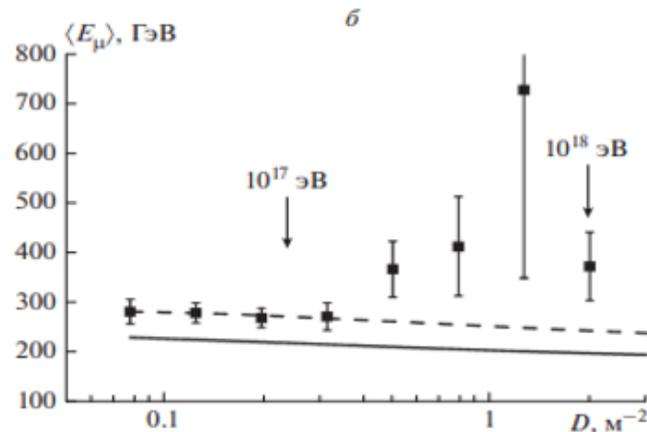
- **Мюонная загадка** – загадка в физике космических лучей, связанная с наблюдаемым избытком мюонов в ШАЛ при сверхвысоких энергиях (выше 10^{17} эВ). Причем этот избыток возрастает с увеличением энергии первичных частиц (с увеличением зенитного угла). Согласно существующим теориям, при развитии ШАЛ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

Мюонная загадка в КЛ

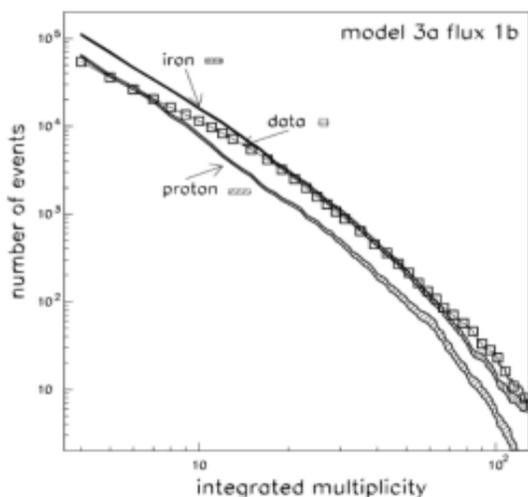
ALEPH



НЕВОД-ДЕКОР

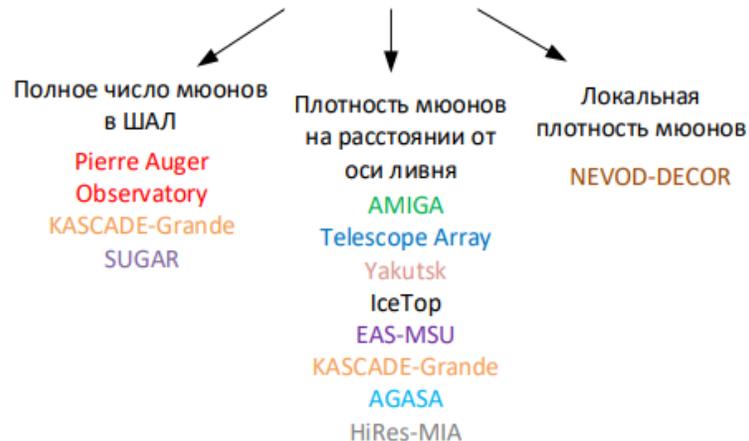


DELPHI



Эксперимент NEVOD-DECOR показал увеличение плотности мюонов по сравнению с моделированием с 10^{15} до 10^{18} эВ в 2010 году. Выше 10^{17} эВ наблюдалось превышение ожидаемого количества многомюонных событий при энергиях около 10^{18} эВ, и в качестве объяснения был предложен дефицит мюонов в моделировании. Эксперименты KASCADE-Grande и EAS-MSU показали отсутствие мюонного расхождения в этом диапазоне энергий, когда для моделирования воздушных ливней использовались новейшие модели адронного взаимодействия, настроенные на данные БАК, в то время как SUGAR array сообщил о дефиците мюонов даже для этих моделей.

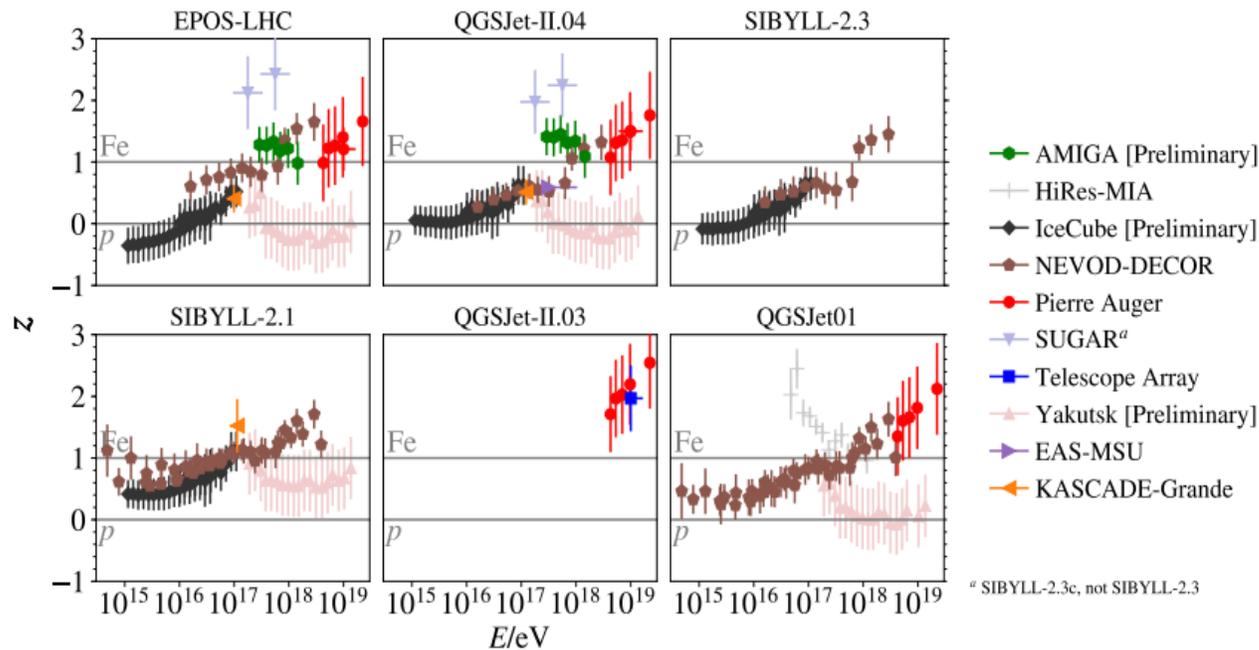
Исследование групп мюонов



Мюонная загадка

Как видно из рисунка, во многих экспериментах, в особенности самых крупных, в области энергий выше 10^{17} эВ наблюдается этот избыток мюонов.

Объединенные результаты



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

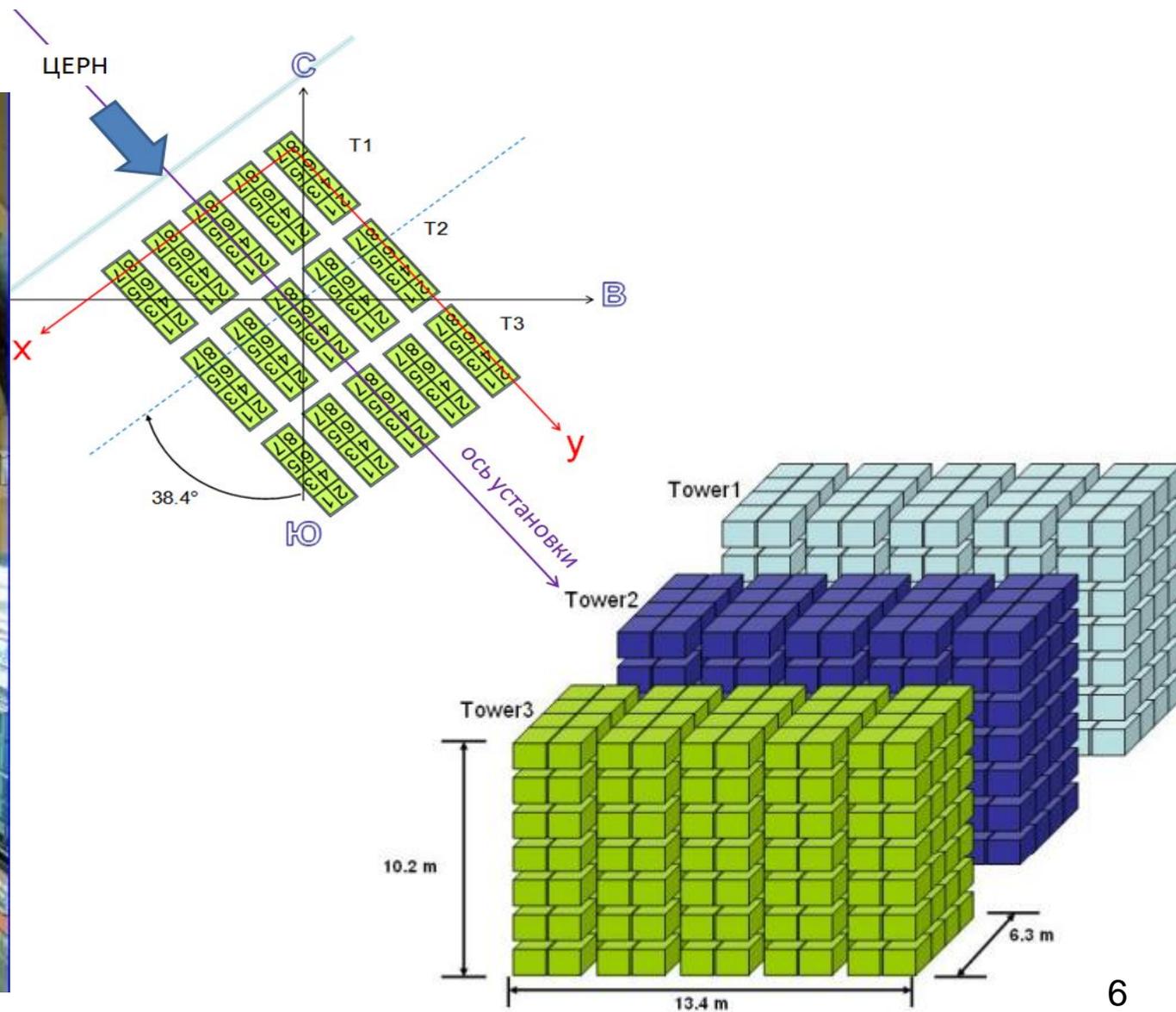
N_{μ}^{det} – полученное в эксперименте число мюонов

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

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

Схема установки LVD

Фронтальный вид установки LVD



Ионизационные потери в сцинтилляторе

Ионизационные потери высокоэнергетичных мюонов рассчитываются по следующей формуле:

$$\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{\text{иониз}} = \frac{L}{\beta^2} \left[B + 0.69 + 2 \ln \left(\frac{p}{m_{\mu} c^2} \right) + \ln \left(\frac{E'_m}{m_{\mu} c^2} \right) - 2\beta^2 - \delta \right]$$

где $E'_m = \frac{p^2 c^2}{E + (m_{\mu}^2 c^2 / 2m_e)}$, $p = \sqrt{T(T + 2m_{\mu} c^2)}$, $\delta = 4,606 \lg \left(\frac{p}{m_{\mu} c} \right) - c$, $\beta = 1$,
 $B = 18,95 \text{ МэВ}/(\text{г}/\text{см}^2)$, $L = 0,0876 \text{ МэВ}/(\text{г}/\text{см}^2)$, $C = 2,94$, $T = 280 \text{ ГэВ}$ (перевести в МэВ),
 $m = 105 \text{ МэВ}$.

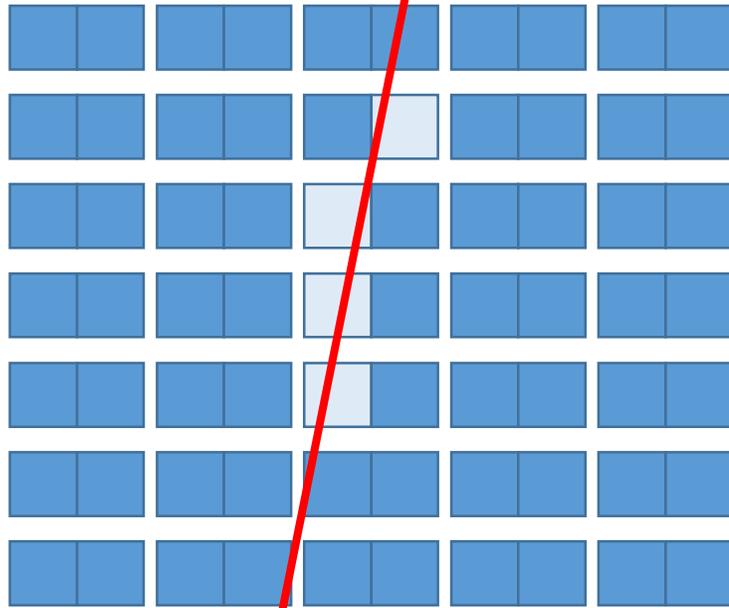
Средняя энергия мюонов, проходящих через установку $\sim 280 \text{ ГэВ}$, тогда:

$$\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{\text{иониз}} = 2.49 \frac{\text{МэВ}}{\text{г} \times \text{см}^{-2}}$$

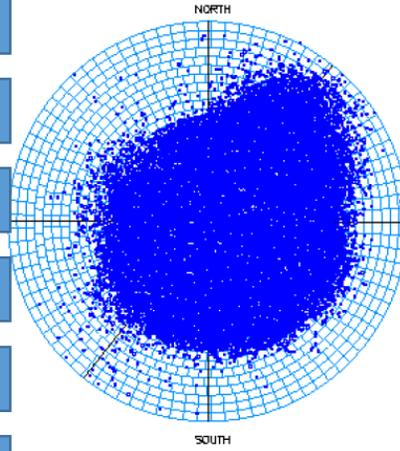
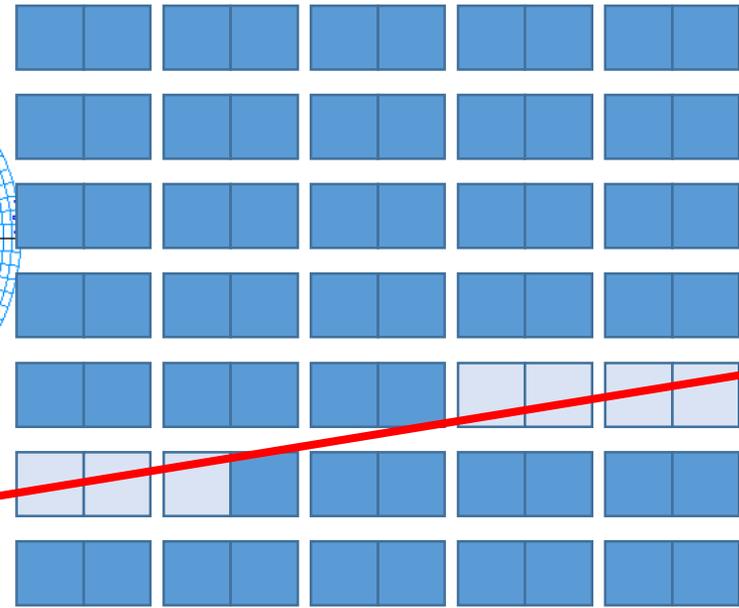
Расстояние, которое проходит мюон в счетчике определяется как: $x = \frac{E}{2,49 \cdot \rho}$

Максимальное расстояние в счетчике $\sim 2 \text{ м}$, энергия мюона $\approx 390 \text{ МэВ}$.

Почти вертикальные мюоны

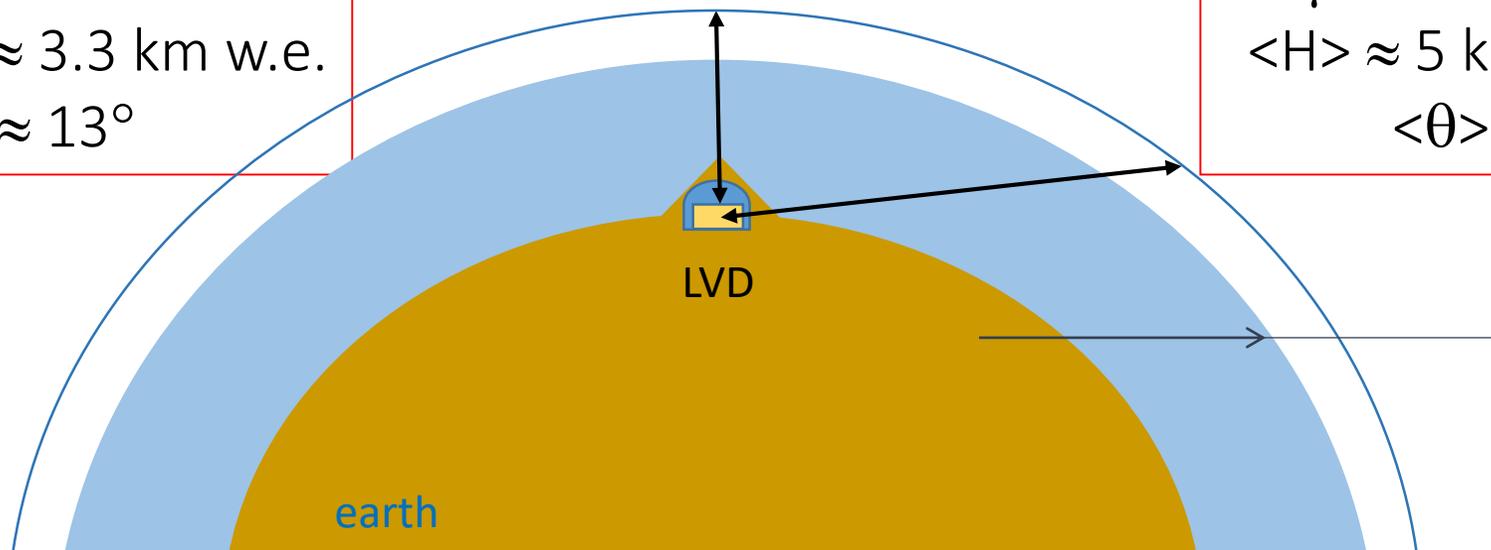


Почти горизонтальные мюоны



$\langle E_\mu \rangle \approx 270 \text{ GeV}$
 $\langle H \rangle \approx 3.3 \text{ km w.e.}$
 $\langle \theta \rangle \approx 13^\circ$

$\langle E_\mu \rangle \approx 340 \text{ GeV}$
 $\langle H \rangle \approx 5 \text{ km w.e.}$
 $\langle \theta \rangle \approx 75^\circ$

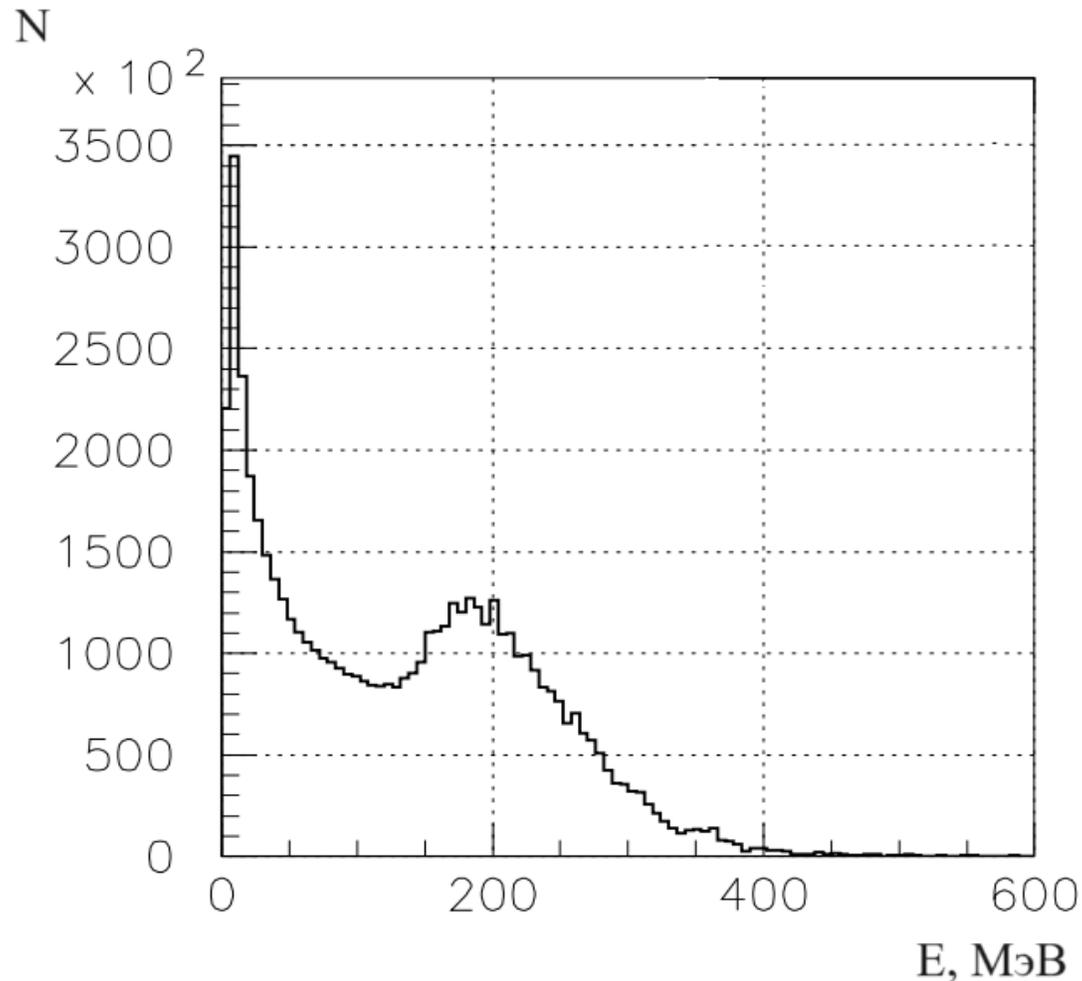


Формат записи данных LVD

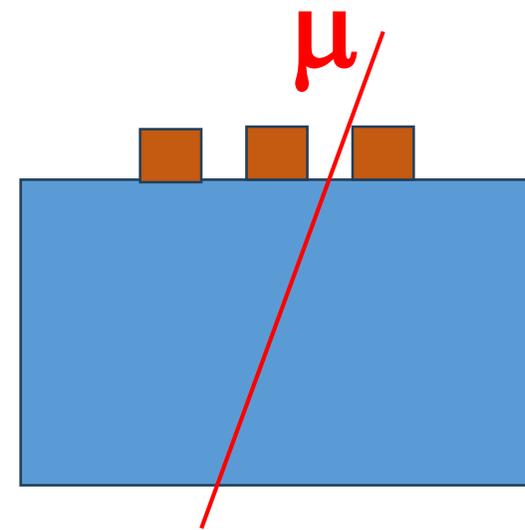
RUN	SEO	Number	date(6) ДД,ММ,ГГ,ЧЧ,МИ,СК	Udate	Utime	num. of counters
56119	255	55	30 8 22 13 0 11	30114	46811.2265275028	12
1157	0.2268945000	19.3299999237	0.0	1.54770		
1357	0.2265268625	169.0961700658	1.0	0.00000		
1466	0.2265268500	2807.6587895071	1.0	338.91688		
1464	0.2265271750	30.4099998474	0.0	2.84766		
1466	0.2265399250	16.4699993134	0.0	1.98812		
1466	0.2265409250	3.4699993134	0.0	0.41887		
1466	0.2265421125	1.4699993134	0.0	0.17745		
1466	0.2265475250	2.4699993134	0.0	0.29816		
1474	0.2265268750	98.5044391418	0.0	8.05329		
1473	0.2265268375	3803.0201534691	1.0	246.52809		
1471	0.2271020000	18.0300006866	0.0	1.35189		
1471	0.2273492125	13.0300006866	0.0	0.97699		
TCLP	time, ns	ADC, каналы	Trigg	Energy, MeV		

12

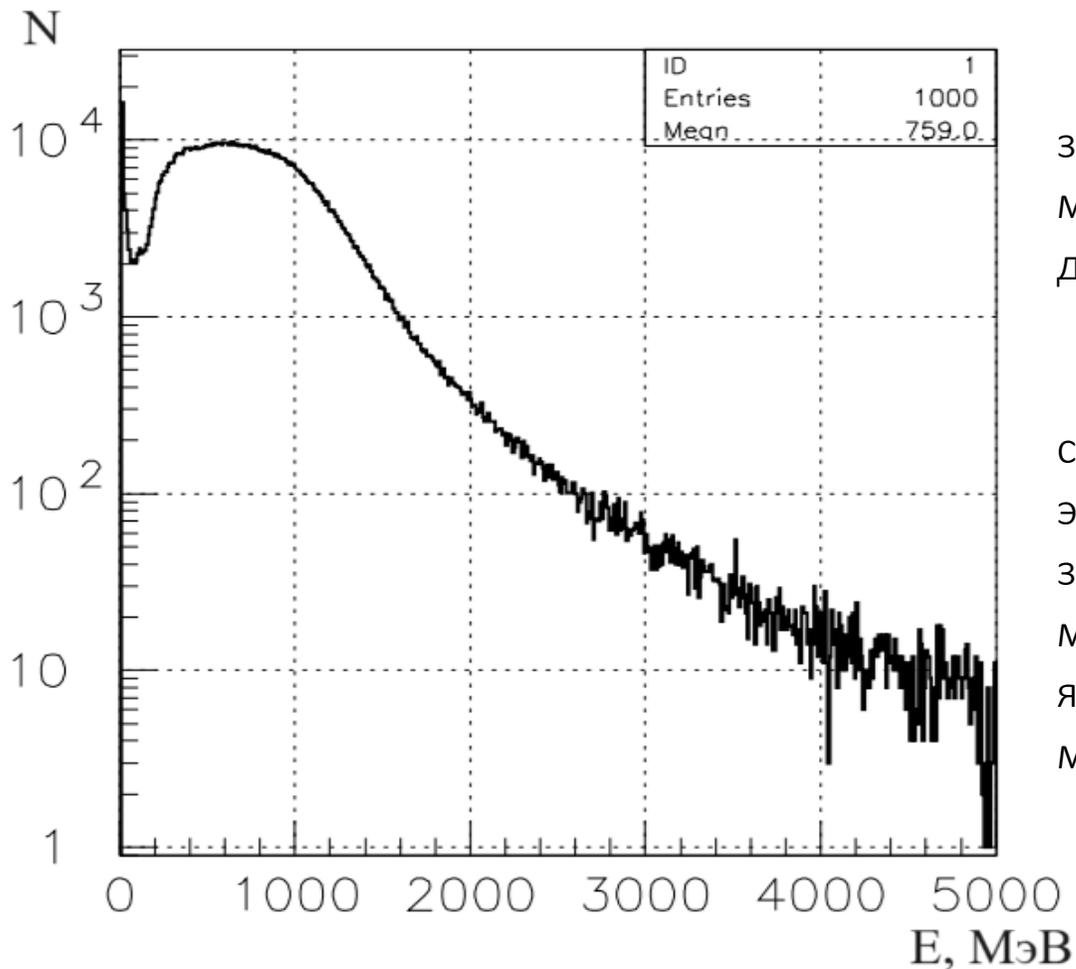
Распределение энергосделений в одном счетчике LVD



Это распределение имеет характерный максимум – так называемый мюонный пик в районе 185 МэВ. Эта энергия соответствует наиболее вероятной длине трека мюона при прохождении мюона через счетчик.

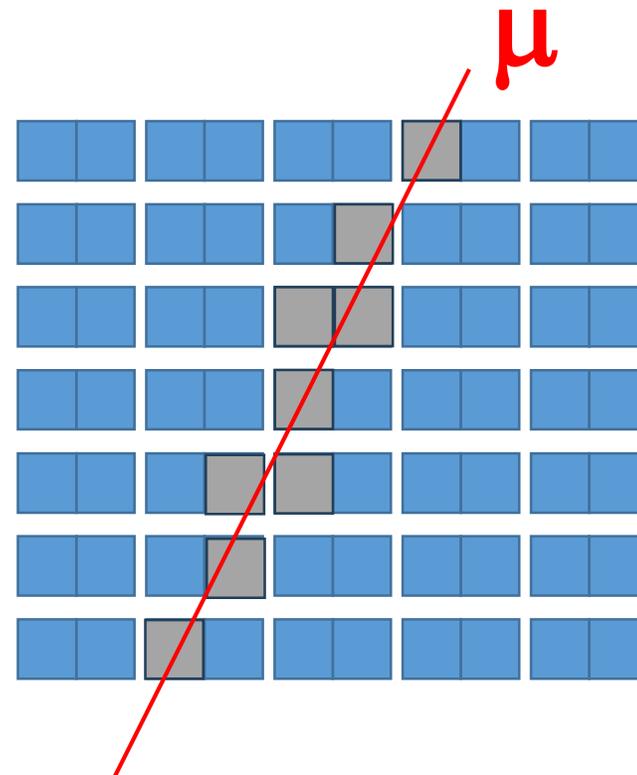


Распределение суммарных энерговывделений в мюонном событии

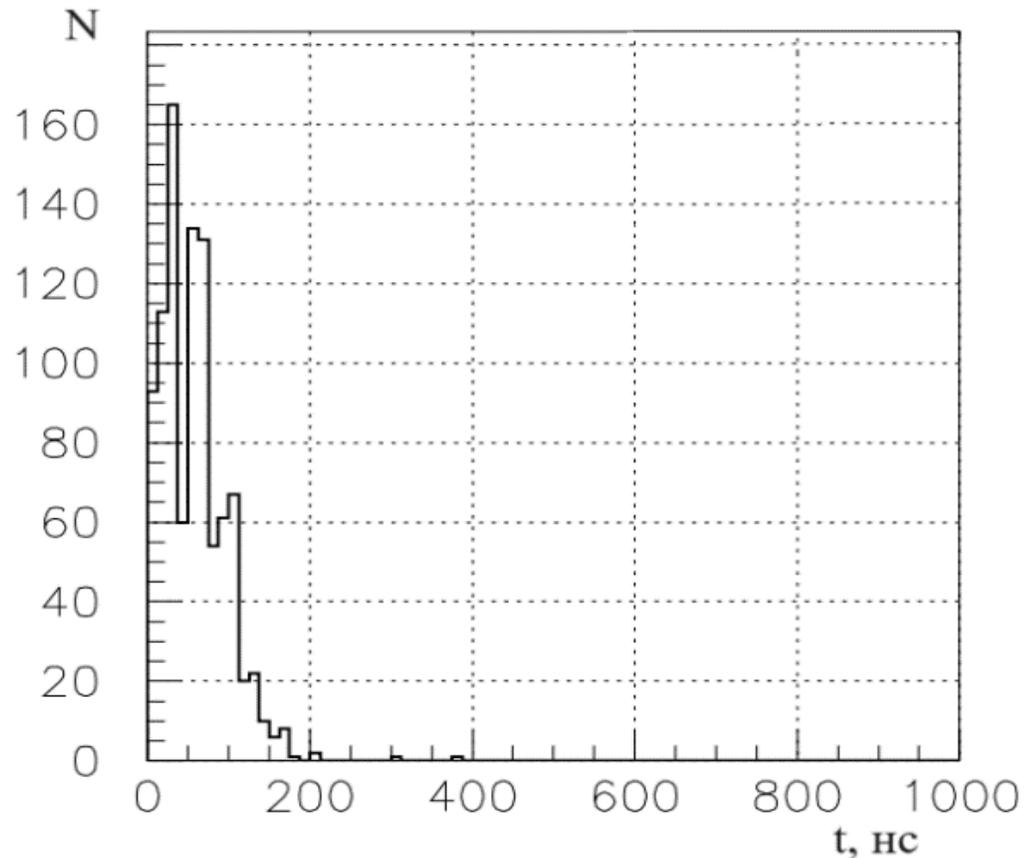


Область значений небольших суммарных энерговывделений соответствует мюонам, прошедшим через края детектора.

Область больших суммарных энерговывделений – это события, в которых зарегистрированы группы мюонов и электромагнитные и ядерные ливни, рожденные мюоном.



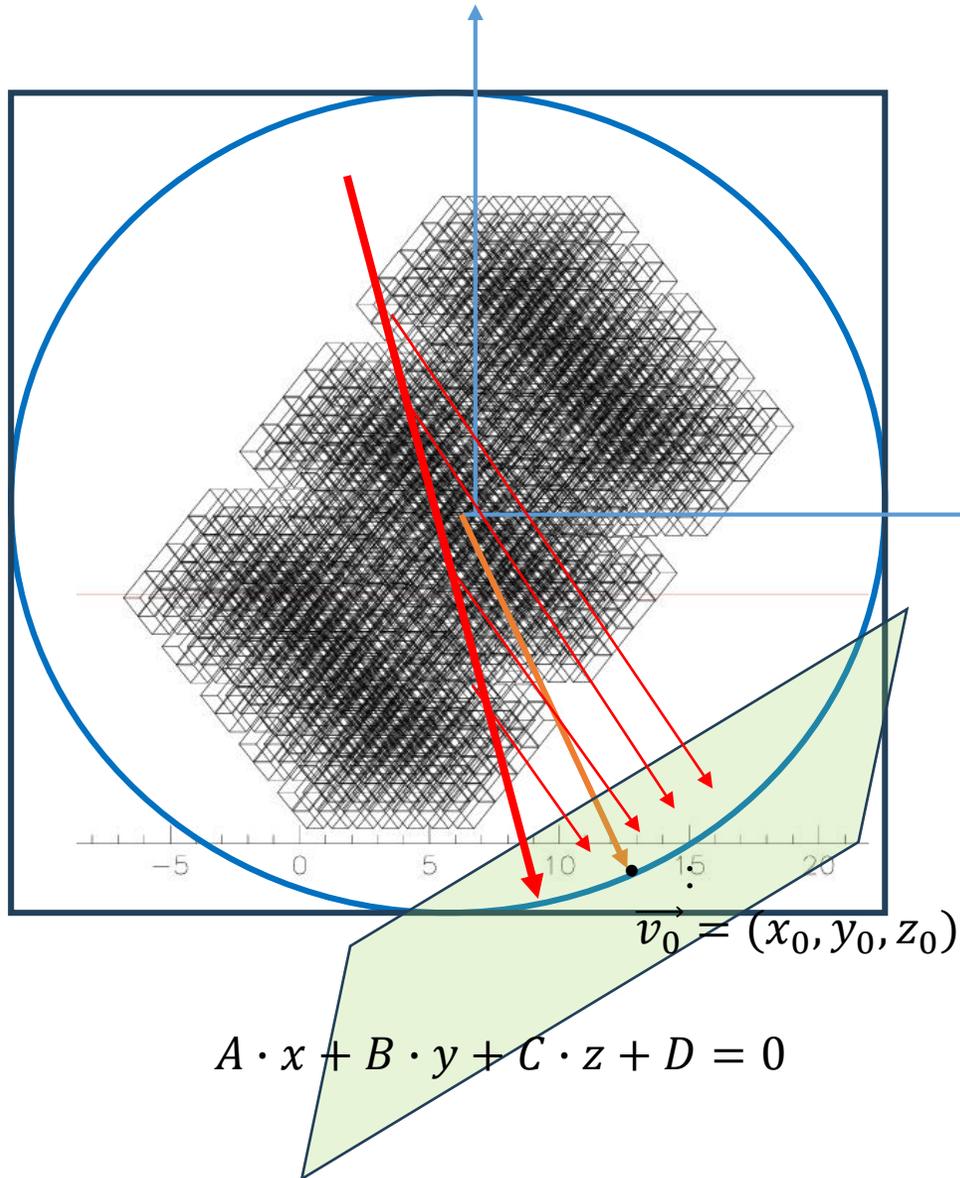
Распределение времени срабатывания счетчиков в мюонном событии



В рамках этой работы было получено, что время между срабатываниями счетчиков в событии не превышает 200 нс.

В анализе этих данных использовалась статистика за 80 суток работы детектора. Отобраны события, в которых сработало больше, чем 20 счетчиков.

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 счетчика 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 счетчика 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

Основные результаты работы, полученные в данной работе, можно сформулировать следующим образом:

- Детектор LVD является хорошим инструментом для исследований мюонов космических лучей, проходящих на глубину от 3 до 12 км в.э.
- Имеется обширная статистика за период с 2001 по 2022 год, когда ввели в строй набора статистики три башни установки.
- Анализируя экспериментальные данные, можно получить такие характеристики мюонов, как их интенсивность, угловое и энергетическое распределение, кратность мюонных групп и кривую раздвижения (распределение по расстоянию мюонов в группах).
- На основе имеющейся статистики были построены: распределение энерговыделений в одном счетчике, распределение суммарных энерговыделений в одном событии и распределение времени срабатывания счетчиков.
- Разрабатывается алгоритм реконструкции мюонных событий (направление угла прихода мюонов) в LVD без стрипповой системы с привлечением времени срабатывания счетчиков.

Список литературы

1. Петрухин А.А. Мюонная загадка в космических лучах и возможности ее решения. - ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА, 2021, том 84, № 1, с. 77-84.
2. Воробьев В.С. Исследование многочастичных событий в космических лучах на прототипах координатно-трекового детектора трек: дис. канд. физ.-мат. наук. М., 2022.
3. Юрина Е.А. и др. Статус эксперимента НЕВОД-ДЕКОР по исследованию энерговыделения групп мюонов, Изв. РАН, Сер. Физ., т. 85, № 4 (2021), с. 594–597.
4. Heck D., Knapp J., Capdevielle J.N. et al. // Report FZKA 6019. Karlsruhe: Forschungszentrum, 1998. 90 p.
5. Ostapchenko S. // Phys. Rev. D. 2011. V. 83. Art. No. 014018.
6. H.P. Dembinski et al. Report on tests and measurements of hadronic interaction properties with air showers. EPJ Web Conf. 210, 02004 (2019).

Спасибо за внимание!