

Исследование энергетических характеристик групп мюонов в наклонных ШАЛ

Р.П. Кокоулин, А.Г. Богданов, Л.И. Душкин, В.В. Киндин, Е.А. Ковыляева, Дж. Маннокки, А.А. Петрухин, О. Сааведра, Дж. Тринкоро, В.А. Хомяков, С.С. Хохлов, В.В. Шутенко, И.И. Яшин

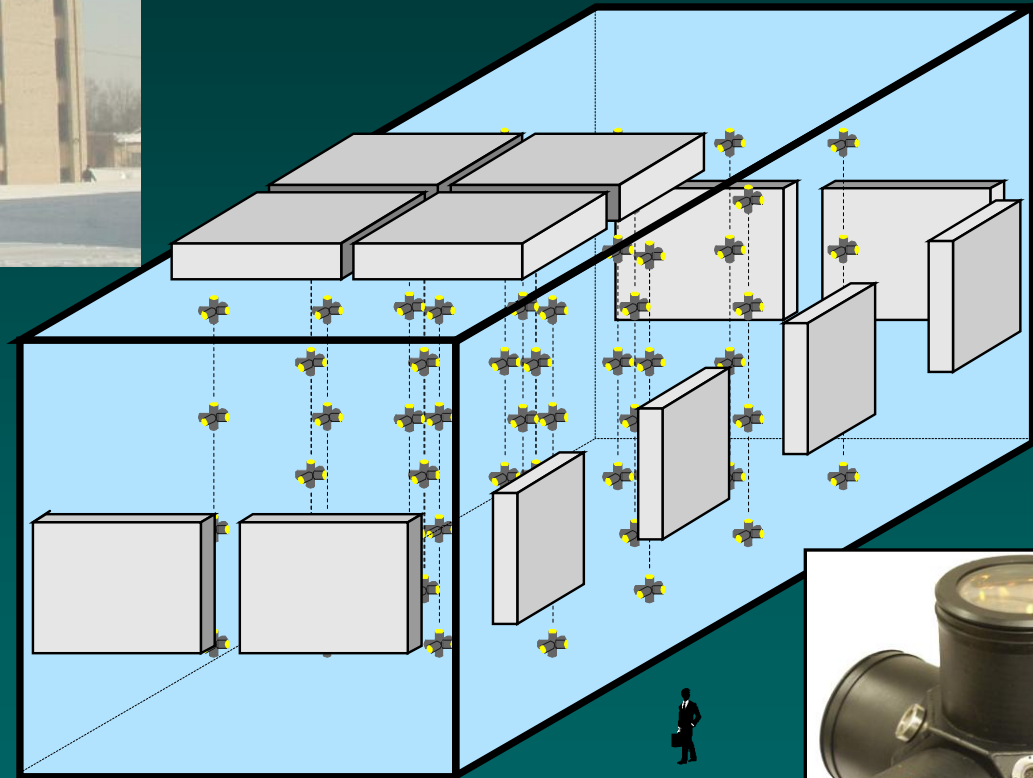
*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
Институт физики межпланетного пространства, Турин
Отделение физики Туринского университета, Турин*

Экспериментальный комплекс НЕВОД-ДЕКОР



НЕВОД:

объем $9 \times 9 \times 26 \text{ м}^3$;
91 КСМ; 546 ФЭУ-200



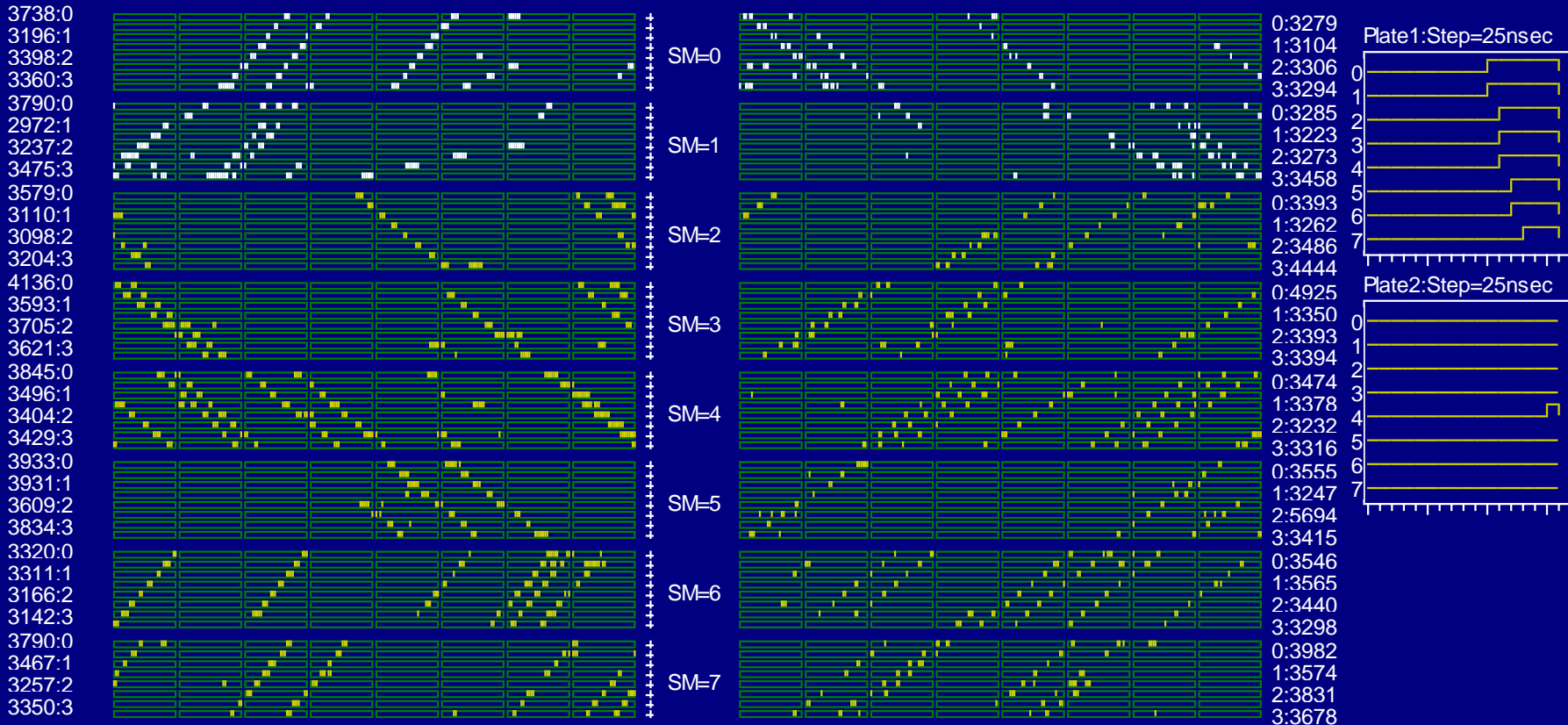
ДЕКОР:

8-слойные СМ из
стримерных трубок;
точность $\sim 1 \text{ см}$, углы
лучше 1° .



Отклик координатно-трекового детектора ДЕКОР для события с группой мюонов

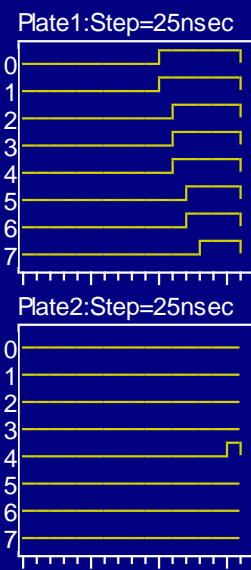
Run 239 --- Event 595423 ----06-05-2012 01:34:04.17 Trigger(1-16):01111000 00010000 Weit_Time:294.108 msec



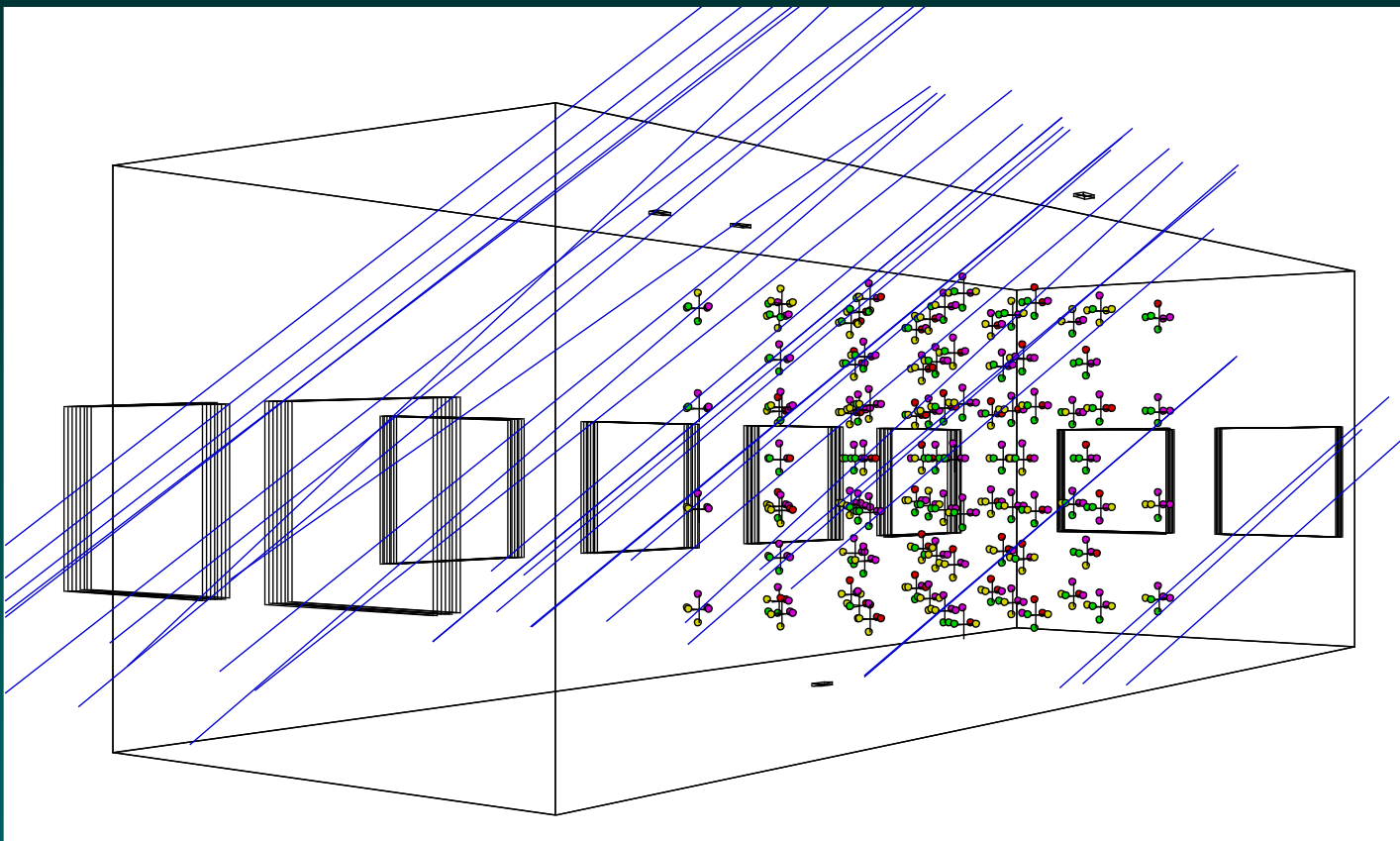
3738:0
3196:1
3398:2
3360:3
3790:0
2972:1
3237:2
3475:3
3579:0
3110:1
3098:2
3204:3
4136:0
3593:1
3705:2
3621:3
3845:0
3496:1
3404:2
3429:3
3933:0
3931:1
3609:2
3834:3
3320:0
3311:1
3166:2
3142:3
3790:0
3467:1
3257:2
3350:3

SM=0
SM=1
SM=2
SM=3
SM=4
SM=5
SM=6
SM=7

0:3279
1:3104
2:3306
3:3294
0:3285
1:3223
2:3273
3:3458
0:3393
1:3262
2:3486
3:4444
0:4925
1:3350
2:3393
3:3394
0:3474
1:3378
2:3232
3:3316
0:3555
1:3247
2:5694
3:3415
0:3546
1:3565
2:3440
3:3298
0:3982
1:3574
2:3831
3:3678

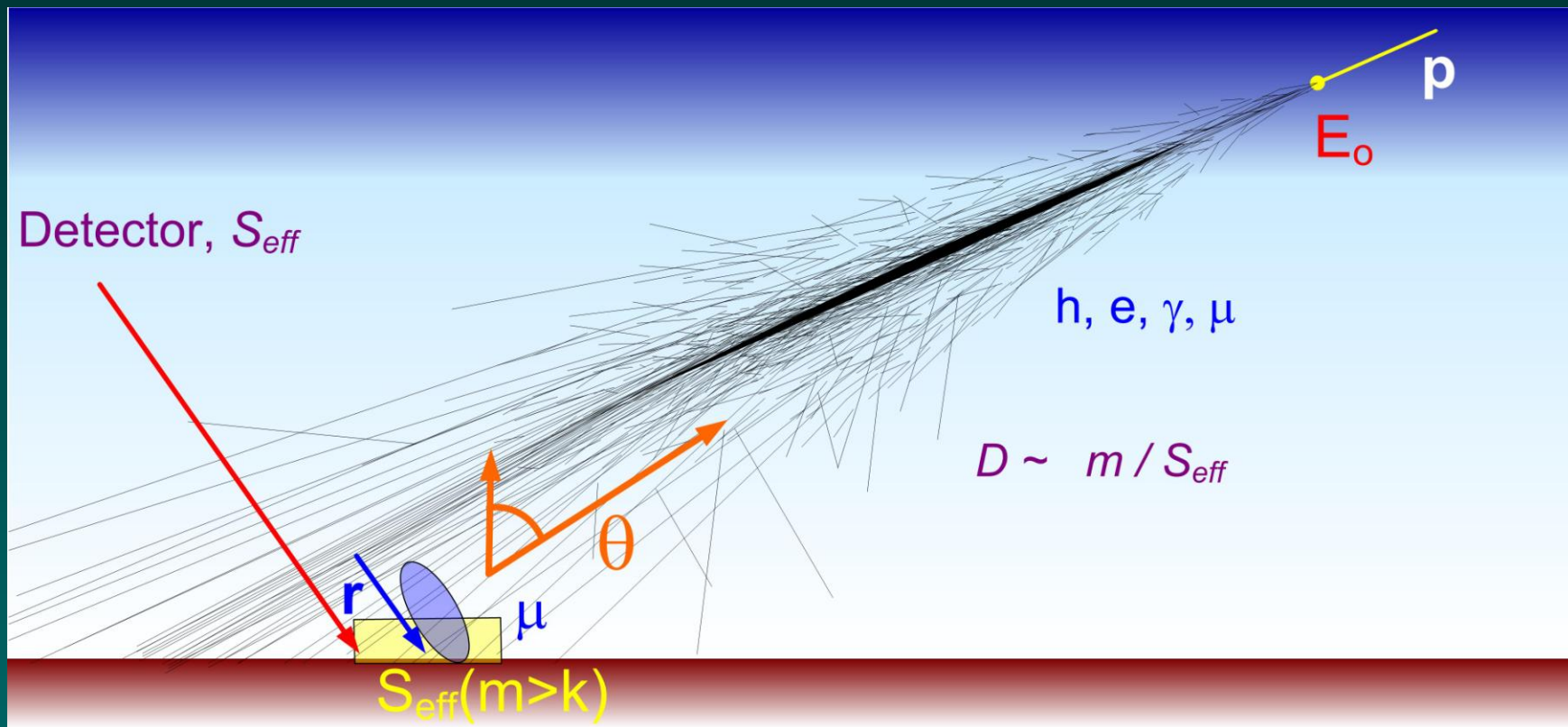


Пример события с группой мюонов в комплексе НЕВОД-ДЕКОР (геометрическая реконструкция)



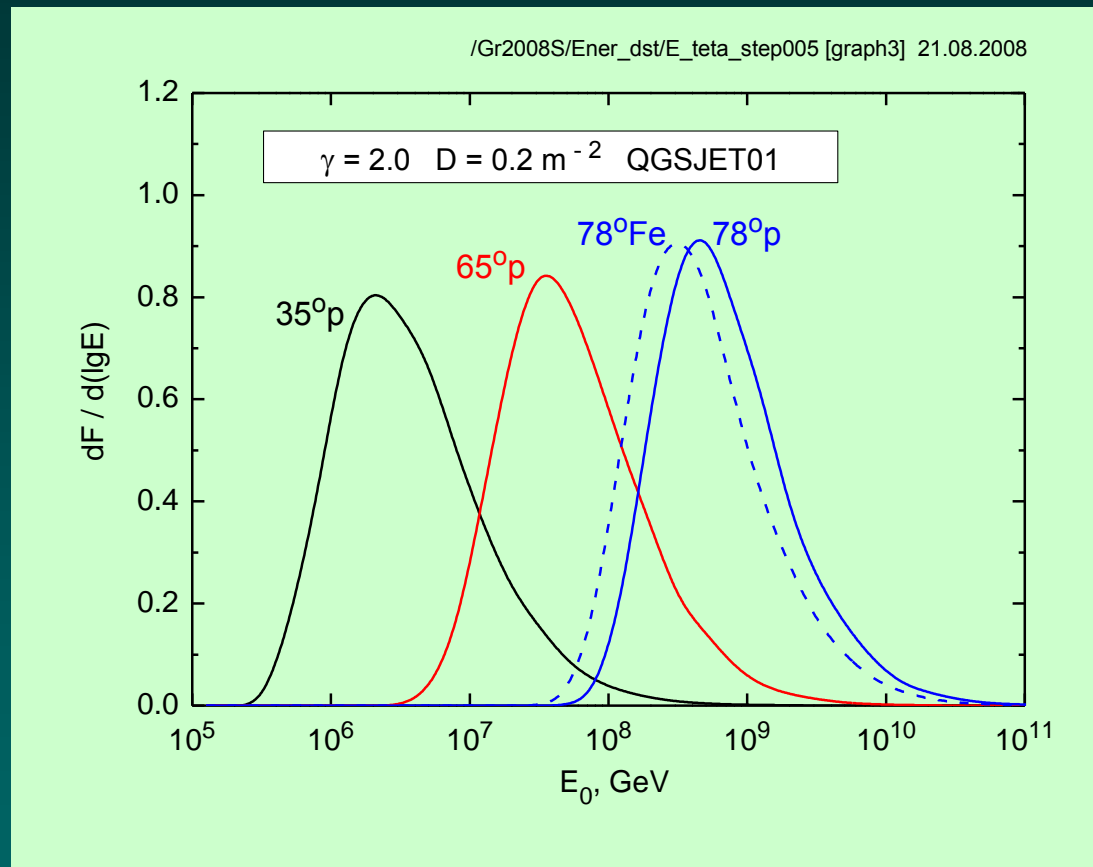
Плотность мюонов в группах оценивается по данным координатного детектора ДЕКОР; их энергосодержание измеряется в черенковском калориметре НЕВОД.

Новый подход к анализу данных по группам мюонов: метод спектров локальной плотности мюонов (СЛПМ) при разных зенитных углах



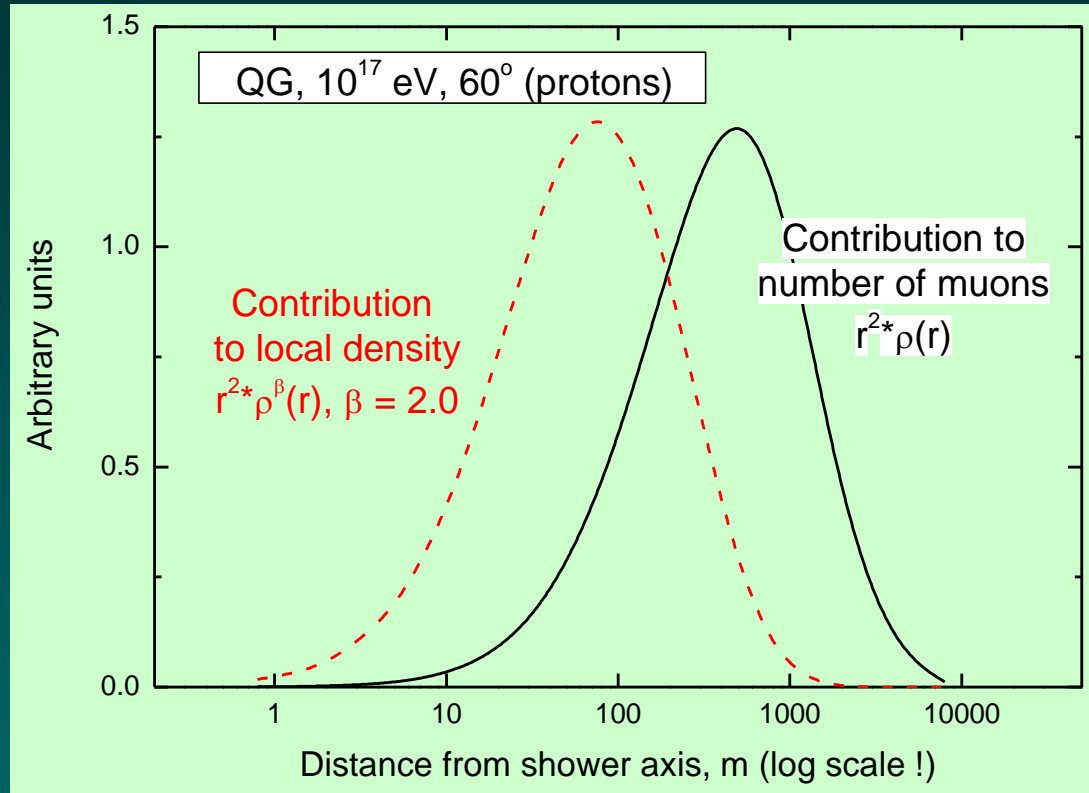
В индивидуальном событии оценивается локальная плотность мюонов (в точке наблюдения). Площадь сбора определяется поперечными размерами ШАЛ в мюонной компоненте и при больших зенитных углах достигает десятков кв. километров.

Вклад различных первичных энергий в формирование групп мюонов при разных зенитных углах



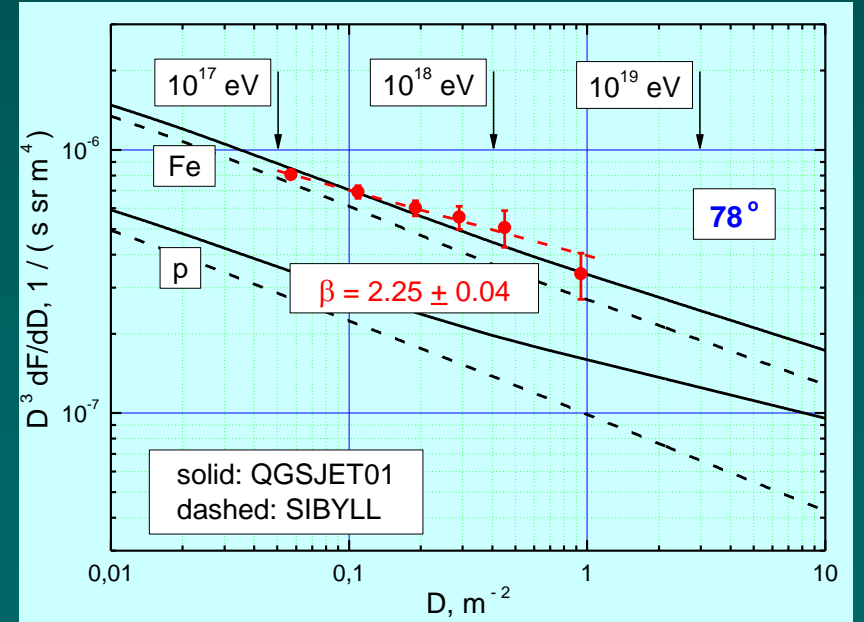
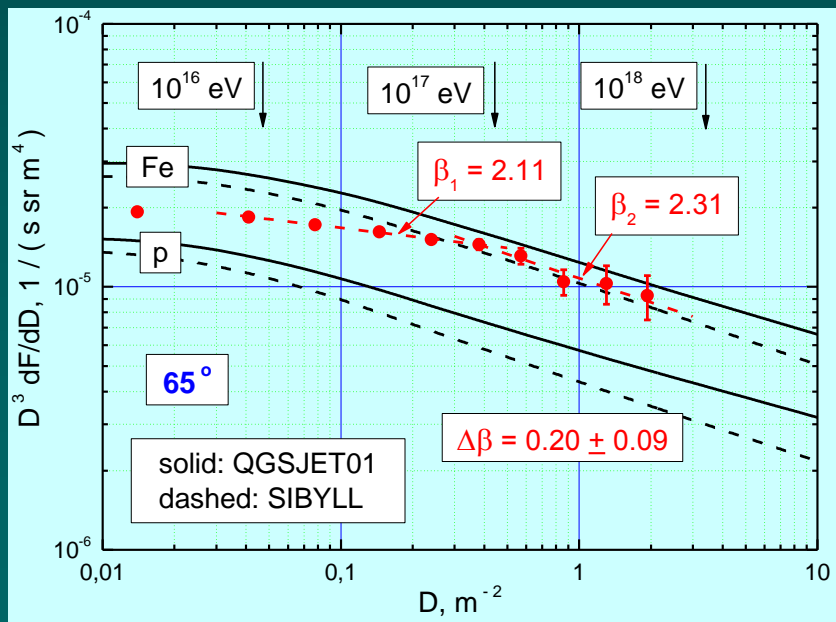
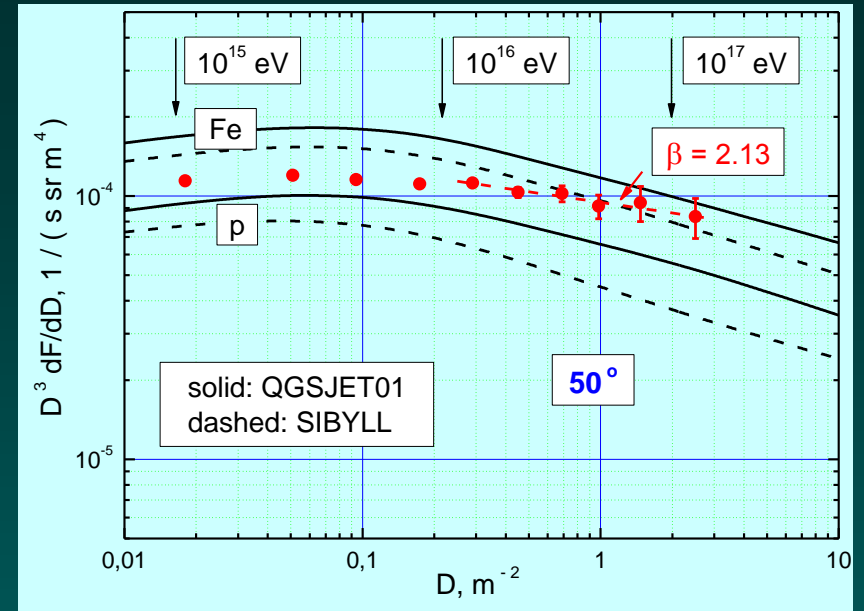
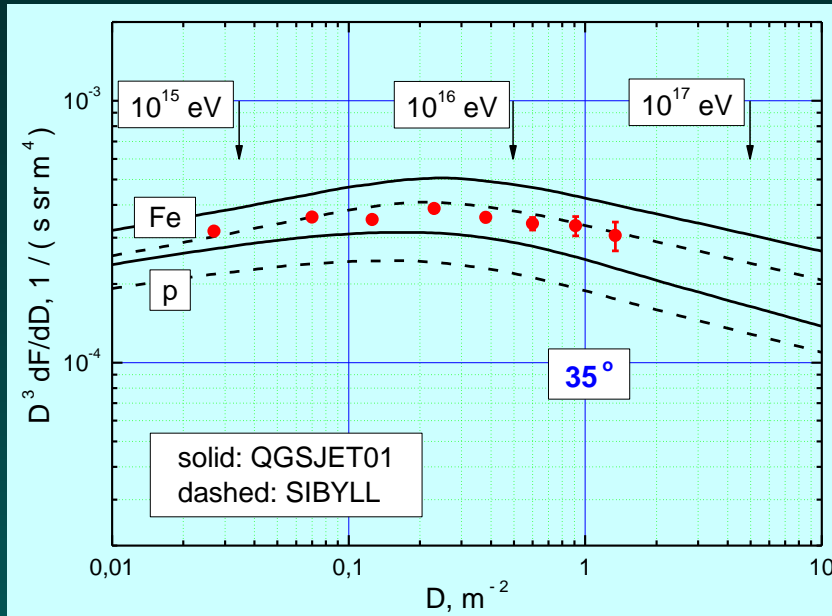
Одновременное измерение в широком интервале зенитных углов обеспечивает очень широкий диапазон первичных энергий.

Вклад различных расстояний от оси ливня в полное число мюонов ШАЛ и в спектр событий, отбираемых по локальной плотности мюонов

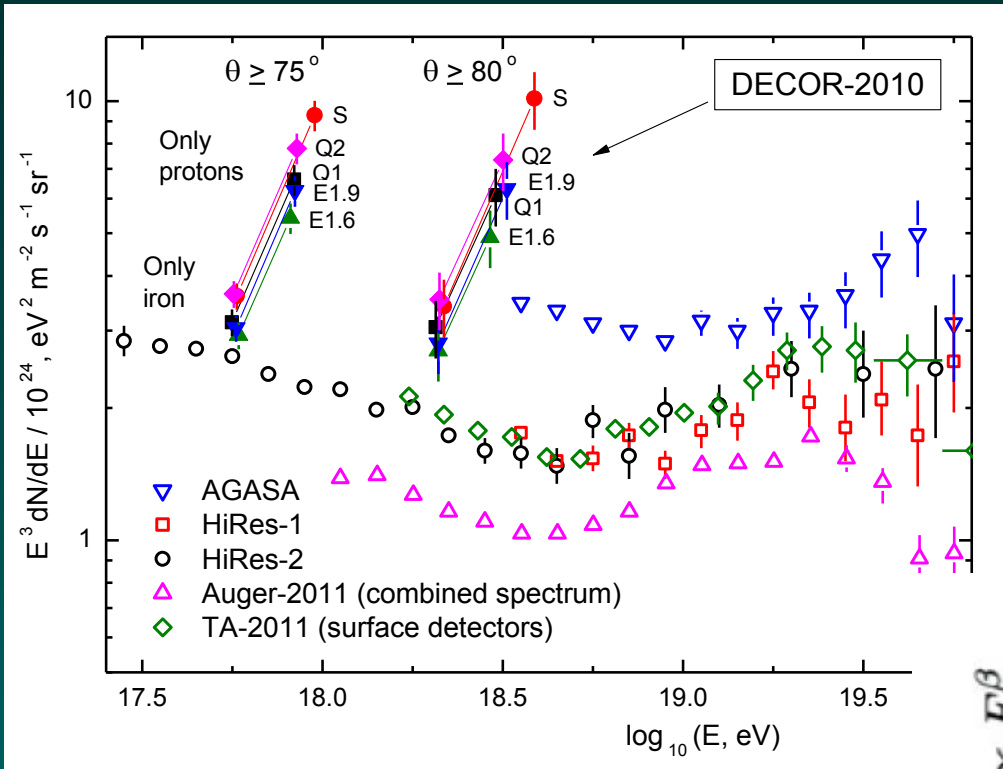


Отбор событий по плотности мюонов предопределяет повышенную чувствительность к центральной части ШАЛ (передняя область взаимодействия адронов).

НЕВОД-ДЕКОР: спектры плотности мюонов при разных зенитных углах (данные 2002-2007 гг)

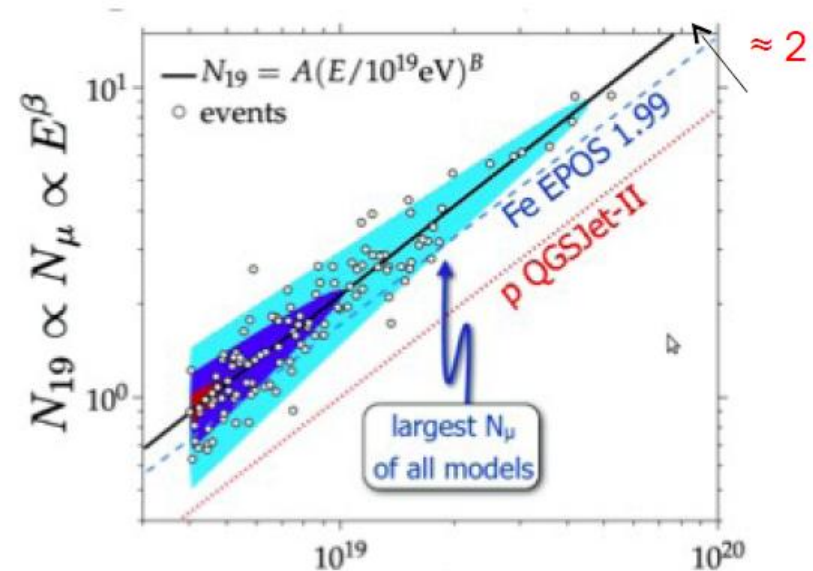


Проблема избытка мюонов в ШАЛ (мюонных групп) при сверхвысоких первичных энергиях



Pierre Auger Observatory

DECOR-2010



Проблема избытка мюонов при сверхвысоких первичных энергиях

В ряде экспериментов наблюдается избыток групп мюонов по сравнению с расчетом, даже в предположении тяжелого (ядра железа) состава ПКЛ (т.н. мюонная загадка, 'muon puzzle').

Необходимо измерение (оценка) энергетических характеристик мюонной компоненты. Возможный подход – измерение энерговыделений групп мюонов в веществе детектора.

Средние потери энергии мюонов $dE/dX \sim a + bE$; если в группах появляется избыток мюонов высоких энергий, это должно отразиться на зависимости энерговыделения ΔE от энергии первичной частицы.

Эксперимент по исследованию энерговыделения мюонных групп на комплексе НЕВОД-ДЕКОР начат в 2012 году. Здесь представлены результаты анализа данных, накопленных за период с мая 2012 по февраль 2014 г.

Экспериментальные данные

Две серии измерений:

03.05.2012 – 20.03.2013, 5542 ч

16.07.2013 – 24.02.2014, 4131 ч

Итого: 9673 ч «живого» времени

Отбор групп:

$m \geq 5$, $\theta \geq 55^\circ$, 2 сектора φ (по 60°) – 16416 событий

Дополнительно (за 3253 ч) $40^\circ \leq \theta < 55^\circ$ – 15084 события

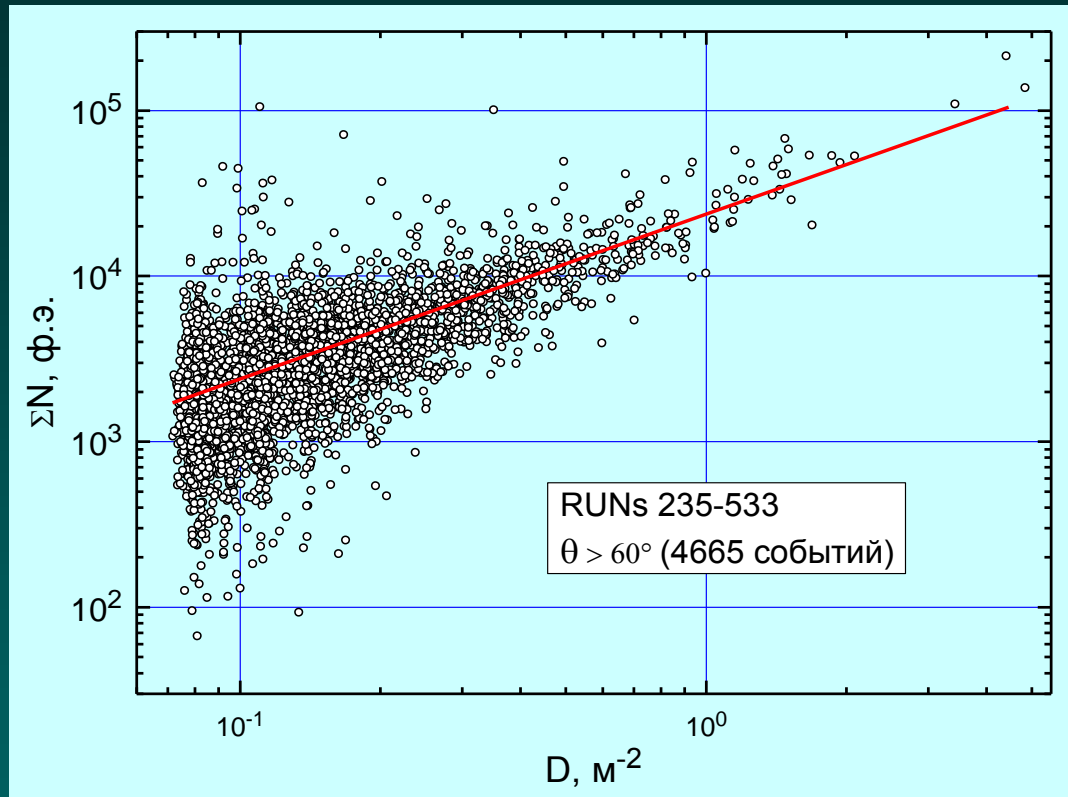
В качестве отклика ЧВД использовалась сумма сигналов всех ФЭУ (Σ , в числе фотоэлектронов).

Плотность мюонов в событиях оценивалась как

$$D = (m - \beta) / S_{\text{дет}}(\theta, \varphi);$$

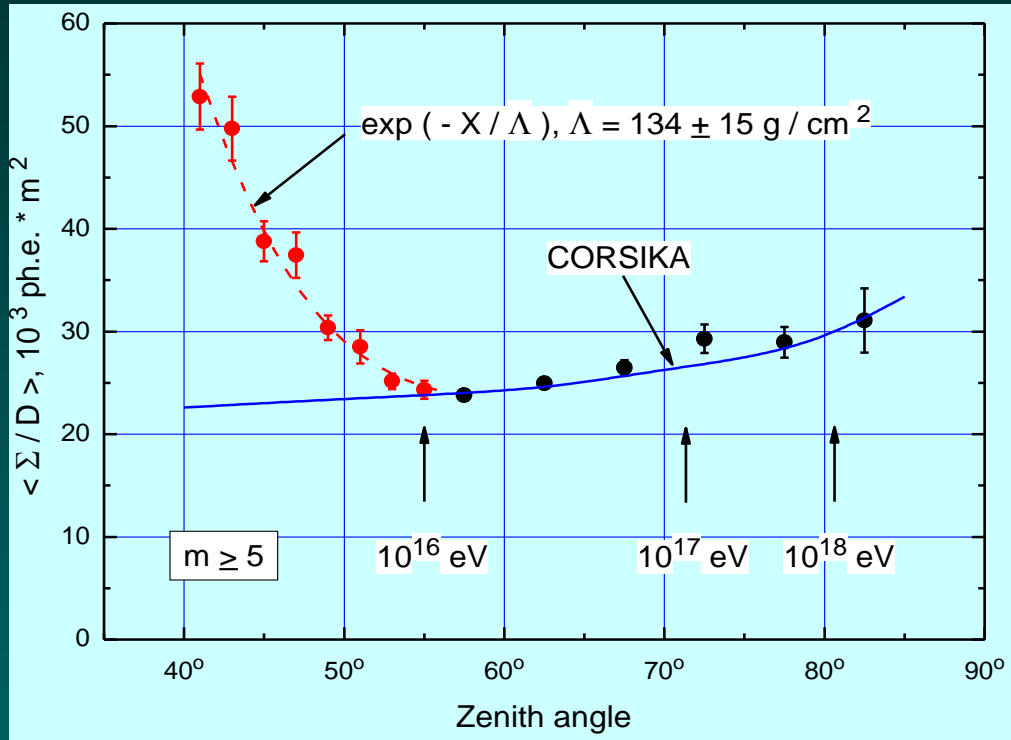
здесь $\beta \sim 2.1$ – показатель наклона СЛПМ.

Корреляции суммарного энерговыведения с плотностью мюонов

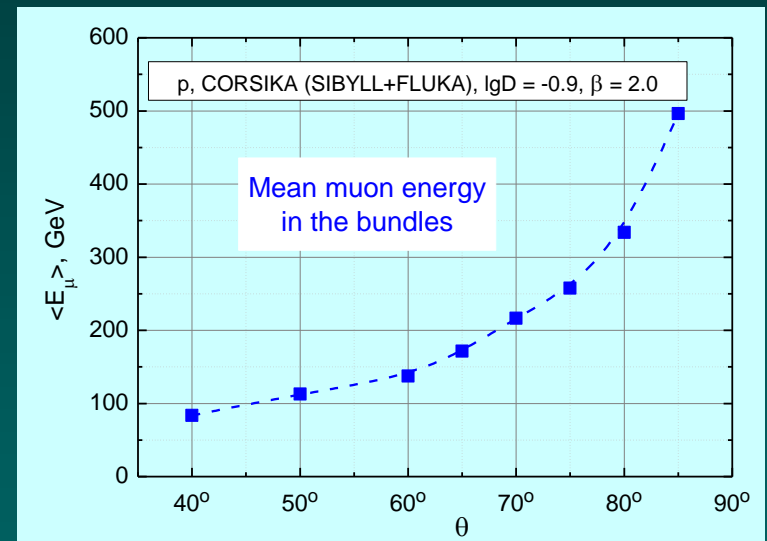


В первом приближении, суммарное энерговыведение пропорционально плотности мюонов в группе. Поэтому далее мы рассматриваем удельное энерговыведение $\Sigma N(\text{ф.э.}) / D$ (т.е., нормированное на плотность мюонов).

Зависимость удельного энерговыделения от зенитного угла

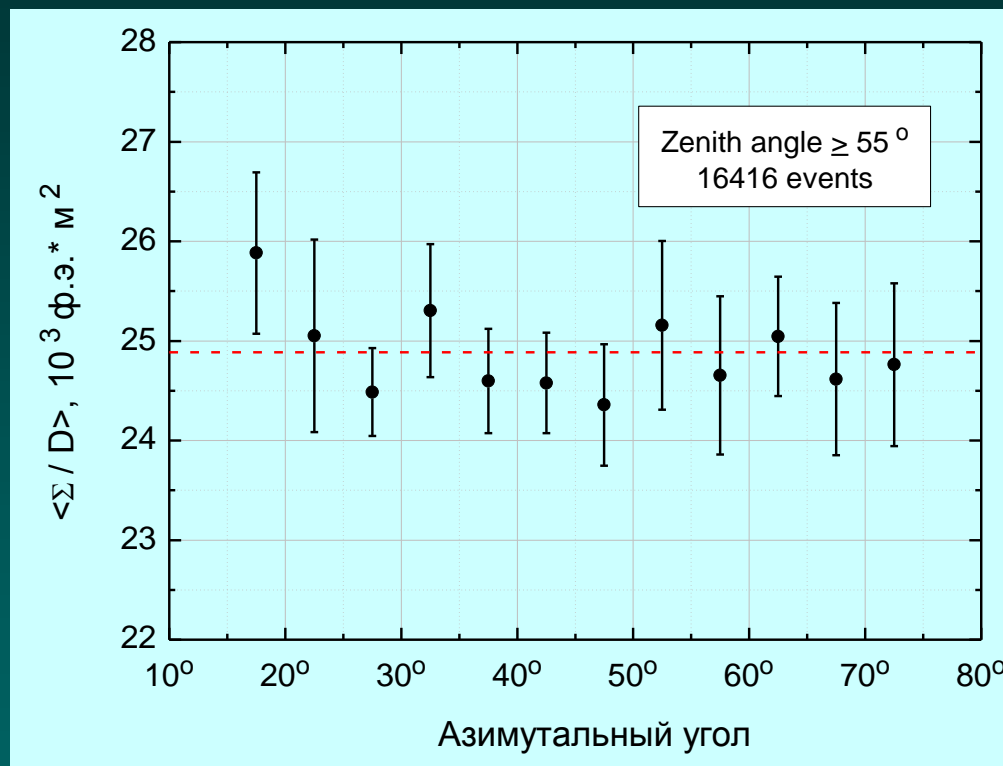


Средняя энергия мюонов в группах (моделирование в CORSIKA).



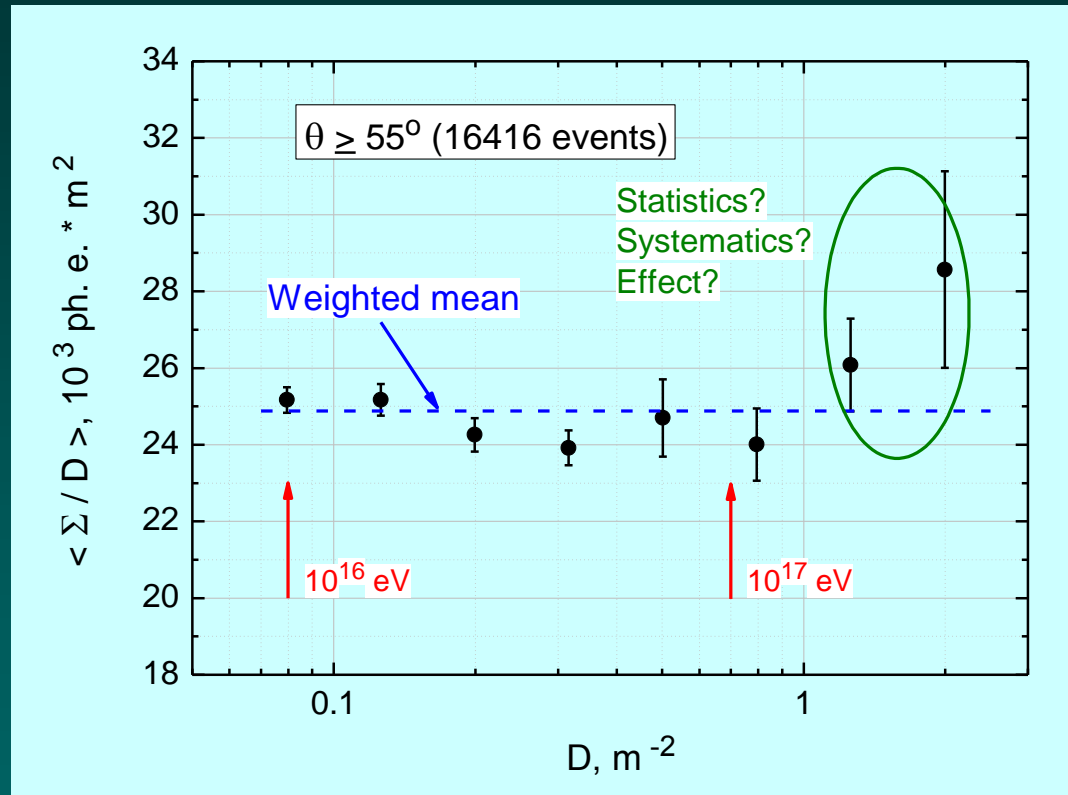
При малых углах существенен вклад электронно-фотонной и адронной компонент ШАЛ. При $\theta \geq 60^\circ$ практически чистые мюоны. Рост удельного энерговыделения с увеличением зенитного угла отражает возрастание средней энергии мюонов, регистрируемых в составе групп.

Зависимость удельного энергосодержания от азимутального угла



Неидеальная изотропность измерительной решетки НЕВОД не сказывается на измерениях угловой зависимости отклика на прохождение мюонных групп.

Зависимость удельного энерговыделения от плотности мюонов ($\theta \geq 55^\circ$)



Фактически (для фиксированного диапазона зенитных углов) это измерение зависимости $\langle \Sigma / D \rangle$ от первичной энергии.

Заключение

На комплексе НЕВОД-ДЕКОР проводится эксперимент по измерению энерговыведения групп мюонов в наклонных ШАЛ.

В результате обработки данных, полученных в первых сериях измерений (9673 ч), выявлена существенная зависимость среднего удельного энерговыведения (нормированного на плотность мюонов) от зенитного угла.

Полученная зависимость удовлетворительно согласуется с ожидаемой, рассчитанной на основе моделирования по программе CORSIKA.

Накопление экспериментальных данных, их обработка и анализ продолжаются.

Спасибо за внимание