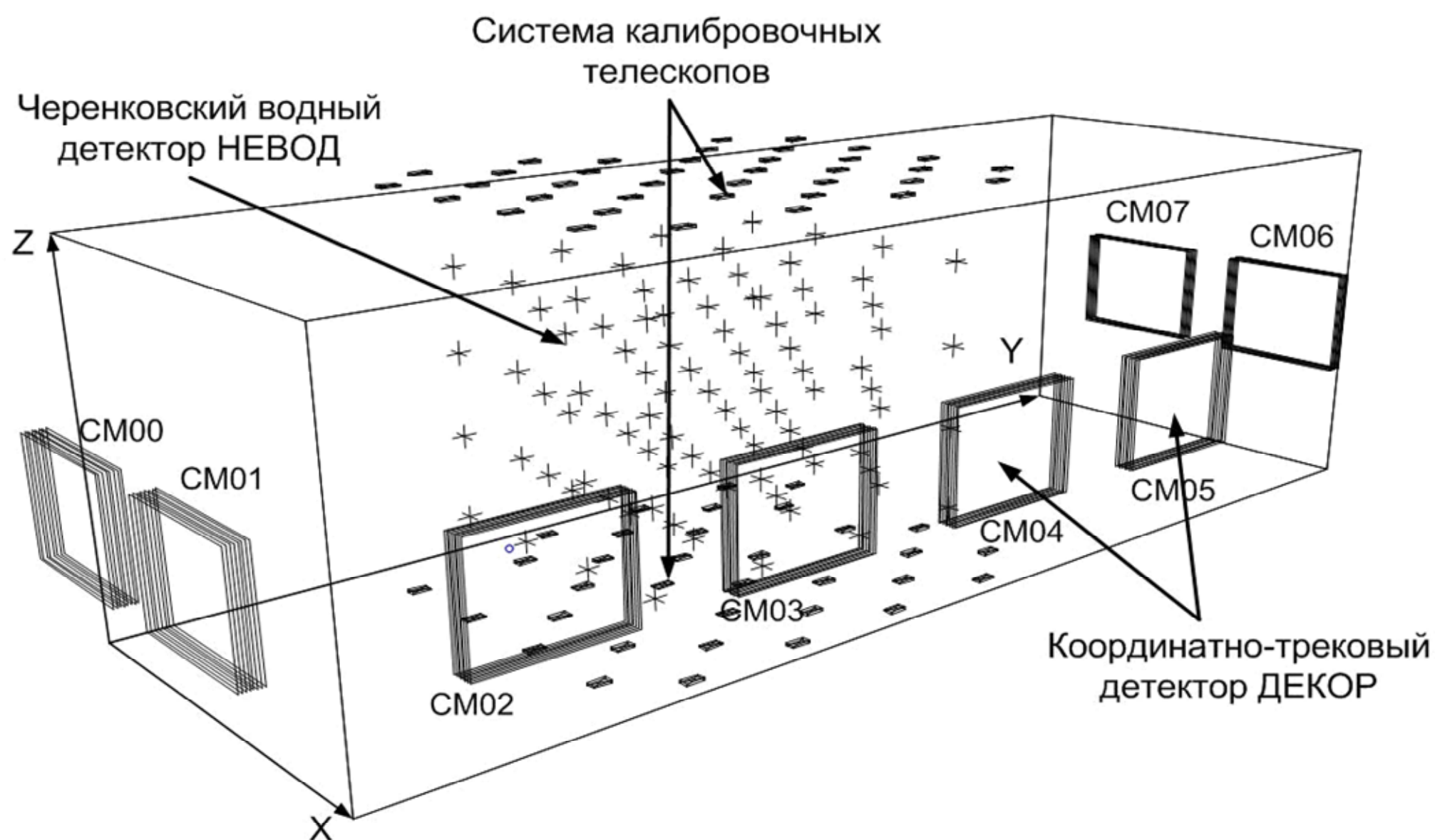


Измерение спектра локальной плотности заряженных частиц на установке СКТ

М.Б.АМЕЛЬЧАКОВ, А.Г.БОГДАНОВ, В.В.ИСАКОВ, Р.П.КОКОУЛИН, А.А.ПЕТРУХИН, С.С.ХОХЛОВ, И.А.ШУЛЬЖЕНКО, И.И.ЯШИН

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (МИФИ)

Система калибровочных телескопов (СКТ) экспериментального комплекса НЕВОД



СКТ создавалась изначально для обеспечения калибровки оптических модулей детектора НЕВОД по черенковскому излучению от мюонов с известными треками и состоит из двух параллельных плоскостей сцинтилляционных счетчиков. Одна плоскость находится над водным объемом детектора НЕВОД, а другая на его дне. Разность высот расположения плоскостей составляет 9.45 м. В каждой плоскости, ограниченной прямоугольником с размерами 10×8 м², располагаются в регулярном порядке по 40 сцинтилляционных счетчиков. Каждая пара счетчиков (1 в верхней и 1 в нижней плоскостях) образует телескоп для регистрации мюонов с энергией более 2 ГэВ. Данная конфигурация установки образует 1600 различных телескопов, соответствующих 40 зенитным углам наклона регистрируемых треков.

В ходе модернизации экспериментального комплекса НЕВОД в СКТ были добавлены спектрометрические каналы, что позволило проводить амплитудный анализ сигналов от счетчиков.

Триггерными условиями для регистрации событий в СКТ являются:

1. Срабатывание более 2-х счетчиков в верхней плоскости.
2. Срабатывание более одного счетчика в нижней плоскости.
3. Одновременное срабатывание любого числа детекторов в обеих плоскостях. Из этого триггера программно выделяются телескопные события, в которых в каждой плоскости сработало только по одному счетчику. Триггер СКТ включен в общую триггерную систему экспериментального комплекса НЕВОД.

1. Восстановление спектра плотности заряженных частиц по кратности срабатывания счетчиков

Учитывая небольшую площадь установки (80 м²) по отношению к размерам ШАЛ, в первом приближении можно считать, что плотность частиц, попадающих в детекторы, одинакова по всей плоскости установки.

Предполагаемый спектр плотности заряженных частиц имеет степенной вид:

$$\frac{dF_0}{dD} = A_0 (D/D_0)^{-(\beta+1)} [c^{-1} M^2]$$

Для расчета темпа счета с кратностью срабатывания счетчиков равной m можно использовать формулу:

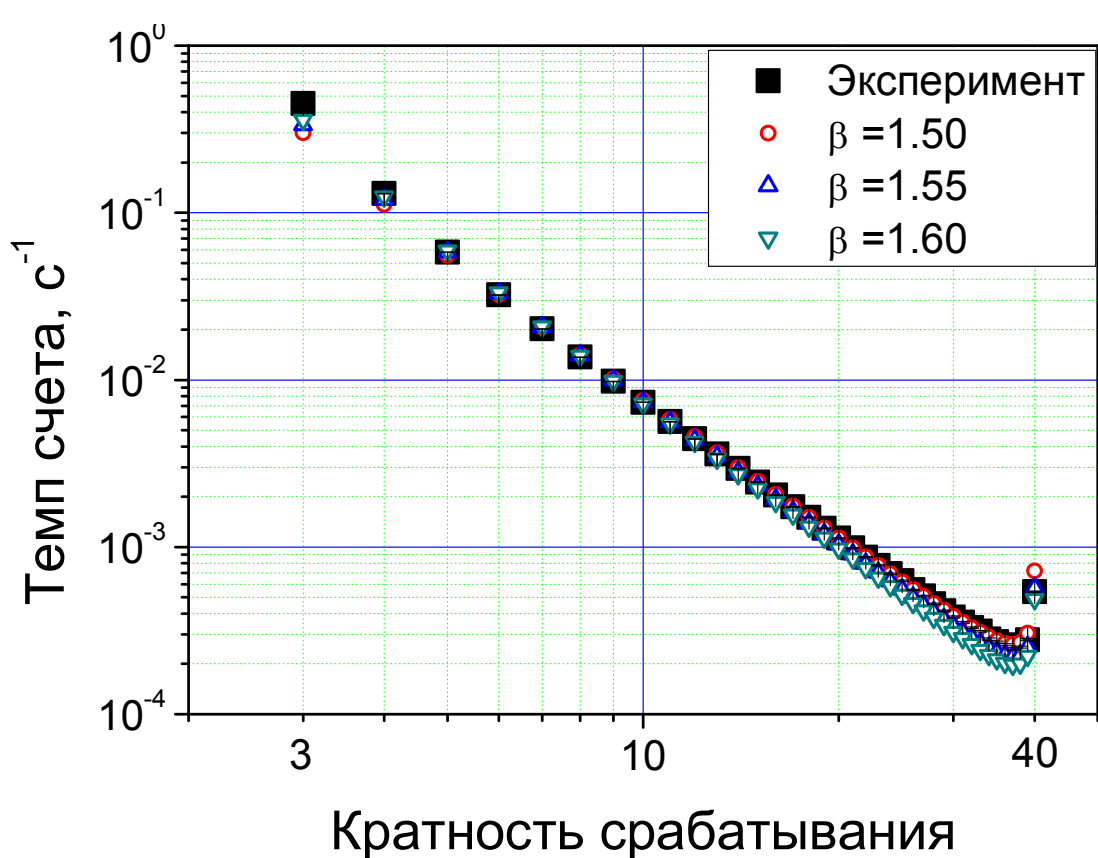
$$\langle v_m \rangle = \int_0^\infty P(m, n, D) \frac{dF_0}{dD} dD$$

В подынтегральную функцию входит формула, определяющая биномиальный закон вероятности срабатывания m счетчиков из p установленных:

$$P(m, n, p) = C_n^m p^m (1-p)^{n-m}$$

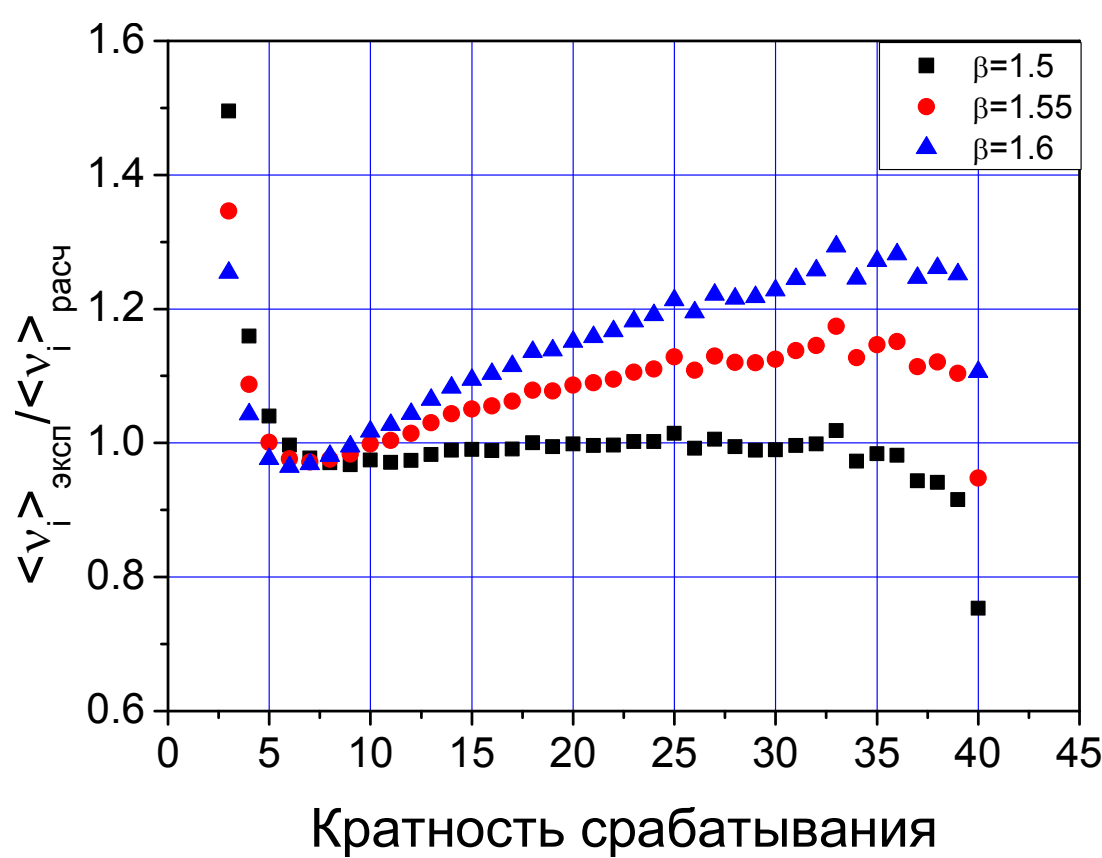
Здесь вероятность срабатывания отдельного счетчика зависит от среднего числа попавших в него частиц:

$$p = 1 - \exp(-s_{эфф} D)$$



Кратность срабатывания

Без учета событий с 3-х и 4-кратными срабатываниями наилучшее согласие достигается при $\beta=1.5$.



Кратность срабатывания

2. Восстановление спектра по амплитудным данным счетчиков СКТ

В этом случае плотность заряженных частиц оценивалась по суммарной амплитуде всех сработавших счетчиков SumAmp:

$$D = \frac{SumAmp}{Amp(MIP) \times 40 s_0} = \frac{\text{число "частиц"}}{\text{суммарная площадь детекторов}}$$

1 «частица» = 4.10 МэВ (MIP)

Экспериментальные спектры локальной плотности зарегистрированных частиц, восстановленные с помощью двух методов, представлены точками на рисунке справа.

Заключение

СКТ дает возможность исследования ШАЛ в слабо изученном диапазоне энергий 10¹⁴–10¹⁵эВ.

Показана возможность восстановления спектра заряженных частиц ШАЛ двумя методами на сравнительно небольшой по площади (80 м²) установке из сцинтилляционных счетчиков. Разработанные методы восстановления спектра плотности заряженных частиц позволяют проводить исследование ШАЛ с плотностями частиц в диапазоне 0.5 – 200 м⁻². Имеется возможность расширения диапазона за счет увеличения числа детекторов в плоскости и расширения амплитудного диапазона регистрации на каждом счетчике.

Сцинтилляционный счетчик СКТ

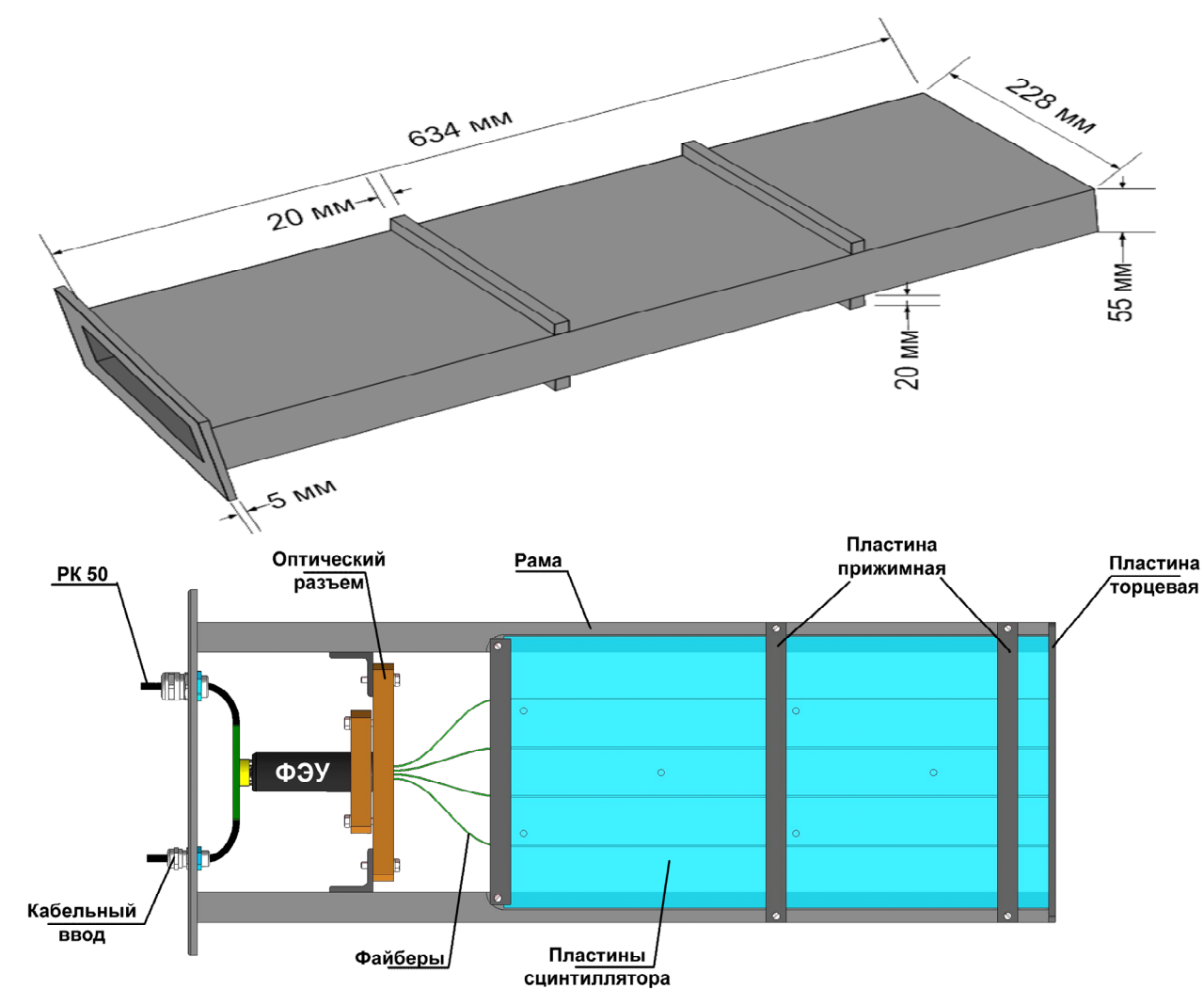
Счетчик СКТ включает сцинтилляционный (ПС-121) блок (40×20×2 см³), размещенный внутри металлического корпуса (АМГ-3). Со всех сторон сцинтиллятор обернут диффузно отражающим материалом (тайтек). Свет на фотокатод ФЭУ-85 собирается с помощью спектросмещающего оптического волокна (Kugaгау Y11) сечением 1 мм². Для питания ФЭУ и съема сигнала используется специальная плата высоковольтного преобразователя напряжения и усилителя сигналов спектрометрического канала, разработанная в ООО «Высоковольтные системы» г. Дубна. Питание счетчика (+12 В) и съем сигнала осуществляются по двум кабелям РК-50, подведенным через гермоводы.

Неоднородность светосбора со всей площади счетчика не превышает 18%.

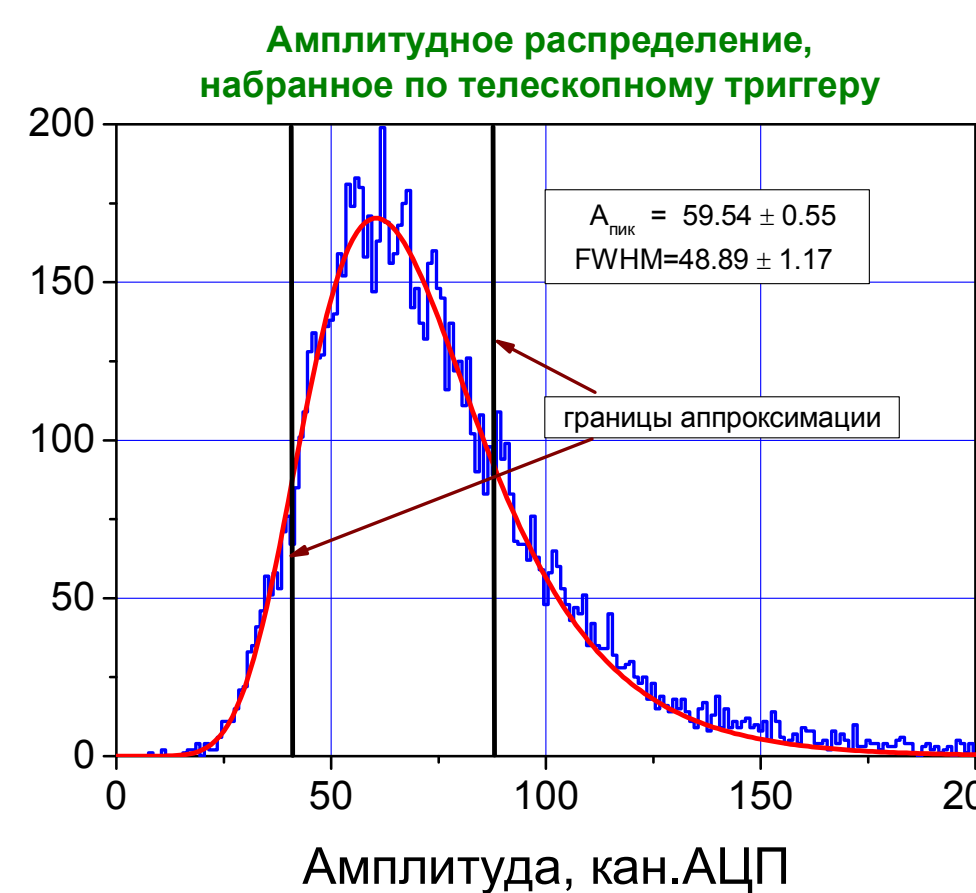
Расчетные значения ионизационных потерь при прохождении мюона через 2 см сцинтиллятора:

1. Наиболее вероятные – 3.49 МэВ
2. Средние потери минимально ионизирующей частицы (MIP) – 4.10 МэВ

Динамический диапазон работы счетчика до ~50 MIP



Калибровка счетчика СКТ



Для амплитудной калибровки счетчиков СКТ используется телескопный триггер (1+1). Набранный спектр аппроксимируется в отмеченном на рисунке диапазоне (до половины высоты) с помощью функции:

$$f(x) = A \cdot \exp(-e^{-z} - z + 1),$$

$$z = \frac{x - x_c}{w}$$

где x_c – наиболее вероятное значение, w – среднеквадратичное отклонение, A – максимальная амплитуда функции.

$$FWHM = 2.425 \cdot w$$

Полученное значение наиболее вероятной амплитуды обеспечивает калибровку счетчика по ионизационным потерям.

Моделирование спектра локальных плотностей заряженных частиц

Функции пространственного распределения (ФПР) частиц рассчитывались с помощью программы CORSIKA 7.40. В качестве моделей адронных взаимодействий использовалась комбинация SIBYLL-2.1 и FLUKA2011, а для расчета электронно-фотонной компоненты ШАЛ использовалась подпрограмма EGS. Пороговые энергии вторичных частиц составляли 100 МэВ для адронов и мюонов и 1 МэВ для электронов и гамма-квантов. Розыгрыш ливней проводился для вертикального направления и набора фиксированных энергий первичных частиц космических лучей (протонов и ядер железа) в диапазоне от 10¹² эВ до 3·10¹⁶ эВ. Аппроксимация спектра первичных частиц космических лучей была выбрана в виде:

$$\frac{dN}{dE} \approx 5 \times 10^4 \times (E, \text{ГэВ})^{-2.7} [m^{-2} c^{-1} \text{cp}^{-1} \text{ГэВ}^{-1}],$$

который удовлетворительно (в пределах 10-20%) согласуется с большинством экспериментальных результатов в области до излома (~10¹⁵ эВ) спектра. Ослабление потока ливней, приходящих в направлении, отличающемся от вертикали, учитывалось при расчете спектров локальной плотности с помощью функции углового распределения ШАЛ. Несмотря на то, что вклад в события с фиксированной локальной плотностью заряженных частиц дают ливни с различными энергиями, регистрируемые на разных (случайных) расстояниях от оси, результаты моделирования показали, что интервал энергий первичных частиц оказывается относительно узким вследствие круто падающего спектра космических лучей. Среднегарифмические энергии первичных частиц отмечены стрелками на рисунке.

Спектры плотности заряженных частиц

