

Измерение остаточного потока мюонов в подземной лаборатории LSC

А. Н. Фазлиахметов

Московский физико-технический институт (государственный университет)

Институт ядерных исследований Российской академии наук

Аннотация

Описан эксперимент по исследованию остаточного потока космических мюонов высоких энергий в Зале А Подземной лаборатории в Канфранке (Laboratorio Subterráneo de Canfranc, Испания). Измерительная установка состояла из трех слоев матричных сцинтилляционных детекторов SC16. Аппаратная функция детекторной сборки была определена с помощью компьютерной симуляции. Измерения продолжались 51836385 ± 9328 секунд, значение интегрального потока мюонов оказалось равным $(5.0 \pm 0.6) \times 10^{-3} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$.

1 Введение

Экспериментальные исследования редких физических явлений, таких, например, как двойной бета-распад и детектирование нейтрино, проводят в низкофоновых подземных лабораториях глубокого залегания. Однако даже остаточные потоки мюонов высоких и сверхвысоких энергий, которые проникают под землю, остаются серьезной помехой. От таких мюонов невозможно заэкранироваться, и борьба с ними возможна только с помощью активной защиты, называемой также системой вето. Мюоны регистрируются специальными мюонными детекторами, и это позволяет отбраковать сигналы основного детектора в момент прохождения сквозь него фонового космического мюона [3], [4]. Для проектирования и оптимизации систем мюонного вето для низкофоновых экспериментов необходимо знание основных характеристик остаточного потока мюонов.

Трудность изучения мюонных потоков в подземных помещениях заключается в том, что глубоко под землей поток гамма-излучения радиоактивных примесей окружающих пород обычно на несколько порядков превосходит поток мюонов. В 2011 г. директор Подземной лаборатории в Канфранке (Laboratorio Subterráneo de Canfranc = LSC, Canfranc, Spain) Алессандро Беттини (Alessandro Bettini) инициировал исследование остаточного потока космических мюонов в LSC. Установка для детектирования мюонов была создана с использованием сцинтилляционных детекторов SC16, которые были разработаны в Институте ядерных исследований РАН (ИЯИ РАН) по заказу Центра подземной физики в Пюхасалми (Centre for Underground Physics in Pyhäsalmi = CUPP, Finland).

2 Экспериментальная установка

Экспериментальная установка состоит из сцинтилляционных детекторов мюонов и системы сбора данных (Data Acquisition System = DAQ). Для эксперимента применена система сбора данных, аналогичная DAQ эксперимента ЕММА в CUPP [2]. Схема детектирующей сборки показана на рис. 1. Матричные сцинтилляционные детекторы SC16 [1] образуют трехслойную структуру: $3 \times 3 = 9$ детекторов в нижнем и верхнем слоях, $2 \times 2 = 4$ детектора в среднем слое. Детектирующая сборка имеет квадратную геометрию. Свинцовый экран толщиной 10 см установлен сверху для защиты детекторов от мягких компонент космических лучей — электромагнитной и адронной, которые порождаются мюонами.

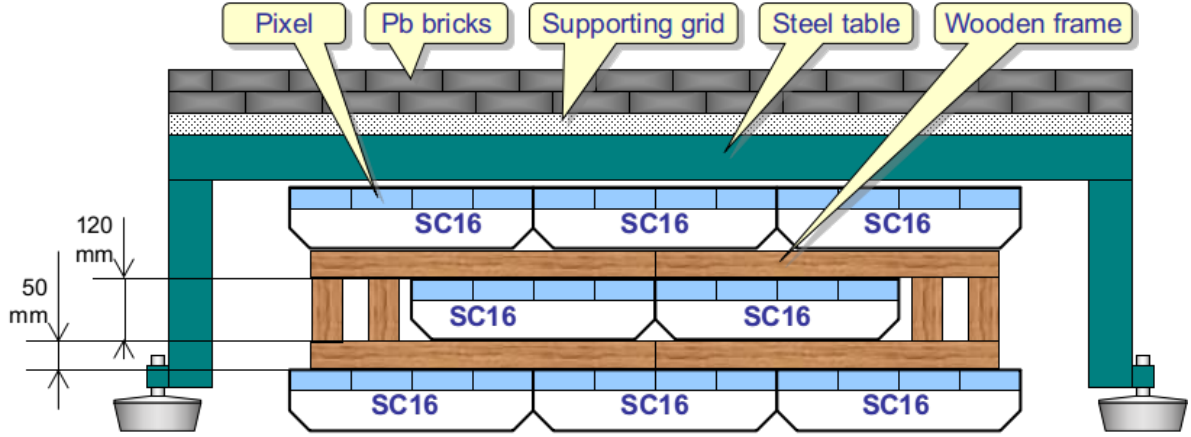


Рис. 1: Схема трехслойной сборки сцинтилляционных детекторов мюонов.

В корпусе детектора SC16 расположены 16 единичных сцинтилляционных детекторов SC1, или пикселей. Сцинтилляционные блоки изготовлены из допированного полистирола и имеют размеры $122 \times 122 \times 30 \text{ мм}^3$. Они образуют матрицу 4×4 и оптически разделены между собой. В каждый сцинтилляционный блок вклеен спиральный спектросдвигающий световод, который передает свет на свой фотосенсор APD (Avalanche Photo Diode = микроматрица лавинных кремниевых фотодиодов). Временное разрешение детектора составляет около 1.5 нс. Этого оказалось достаточно для эффективного выделения мюонных сигналов из гамма-фона.

3 Определение интегрального потока мюонов

3.1 Симуляция и предварительный отбор событий

Для определения аппаратной функции детектирующей установки симулировалась ее реакция на мюоны, которые приходят из верхней полусферы с равномерным распределением по азимутальному и зенитному углам (программа была написана на языке Kotlin). Пиксель считался сработавшим, если трек мюона проходил внутри объема сцинтилляционного блока и длина его пути в сцинтилляторе была больше 1 см. При этом энергетические потери мюона больше 2 МэВ (2 МэВ — энергетический порог детектора). При симуляции были учтены индивидуальные эффективности срабатывания пикселей, ранее измеренные в CUPP. Статистика симуляции ($\approx 10^7$) на полтора порядка больше числа зарегистрированных событий ($\approx 3 \cdot 10^5$), поэтому считалось, что комбинации пикселей, которые присутствовали в экспериментальных данных, но которых не оказалось в результатах симуляции, не соответствуют мюонным событиям. Для дальнейшей обработки отбирались только те события, комбинации пикселей которых встречались как в симуляции, так и в экспериментальных данных.

3.2 Описание методики

Суммарное число мюонов, зарегистрированных установкой, можно записать в виде

$$G = \int \varepsilon(\Omega) f(\Omega) d\Omega, \quad (1)$$

где ε — полная функция отклика монитора, f — полный поток, который надо измерить, и Ω — телесный угол. Функцию ε можно представить в виде суммы функций отклика для каждой комбинации пикселей. В этом случае

$$\int \varepsilon(\Omega) f(\Omega) d(\Omega) = \sum_i \int \varepsilon_i(\Omega) f(\Omega) d(\Omega) = \sum_i g_i. \quad (2)$$

Здесь g_i — это число частиц, зарегистрированных комбинацией детекторов с индексом i , а ε_i — функция отклика соответствующей комбинации пикселей. Если поток f равномерный (на телесный угол), уравнение придет к виду

$$\int \varepsilon_i(\Omega) f(\Omega) d(\Omega) = \int \varepsilon_i(\Omega) d(\Omega) = R_i, \quad (3)$$

где R_i — эффективность данной комбинации пикселей.

Эта эффективность может быть вычислена с помощью симуляции с равномерным распределением, как отношение числа симулированных частиц, прошедших через комбинацию пикселей с индексом i , к полному числу симулированных частиц:

$$R_i = \frac{N_{sim,i}}{N_{sim}}. \quad (4)$$

В неравномерном случае, поскольку поток мюонов не сильно изменяется в пределах угловой апертуры одной комбинации пикселей, интегрирование потока по телесному углу можно заменить эффективным значением полного потока для данной комбинации пикселей:

$$\int \varepsilon_i(\Omega) f(\Omega) d(\Omega) = f_i \int \varepsilon_i(\Omega) d(\Omega). \quad (5)$$

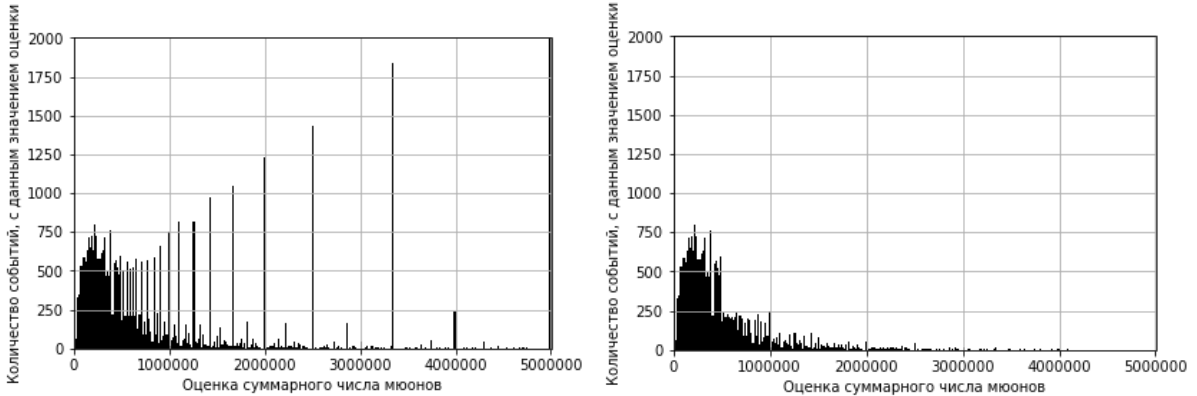
Сравнивая (3) и (5), получим

$$f_i = \frac{g_i}{\int \varepsilon_i d(\Omega)} = \frac{g_i}{R_i}. \quad (6)$$

Следует заметить, что каждое значение f_i является оценкой всего потока, проходящего через установку. Простое усреднение дает устойчивую оценку даже в случае существенно неравномерного потока.

Более реалистична оценка потока с помощью взвешенного среднего, где в качестве весов выступают значения апертуры каждой комбинации. Поскольку R_i является достаточно хорошей оценкой апертуры, получим

$$\langle f_i \rangle = \frac{\sum_i f_i R_i}{\sum_i R_i} = \frac{\sum_i g_i}{\sum_i R_i}. \quad (7)$$



(a) без отбраковки,

(b) после отбраковки, $C = 20$.

Рис. 2: Распределение оценок полного потока, f_i

Распределение значений f_i , т. е. оценок общего числа мюонов, для различных комбинаций пикселей показано на рис. 2а. Пики связаны с «аномальными» событиями, у которых число хитов в симуляции сравнимо или много меньше числа хитов в реальных данных. Следовательно, их значение f_i будет очень большим (см. (4) и (6)). Такие события возникают в результате того, что при проходе мюона в некоторых случаях загорается не только тот пиксель, который должен, но

и соседний. Результирующее событие оказывается теоретически возможным мюонным треком, но имеет неоправданно маленькую геометрическую вероятность R_i .

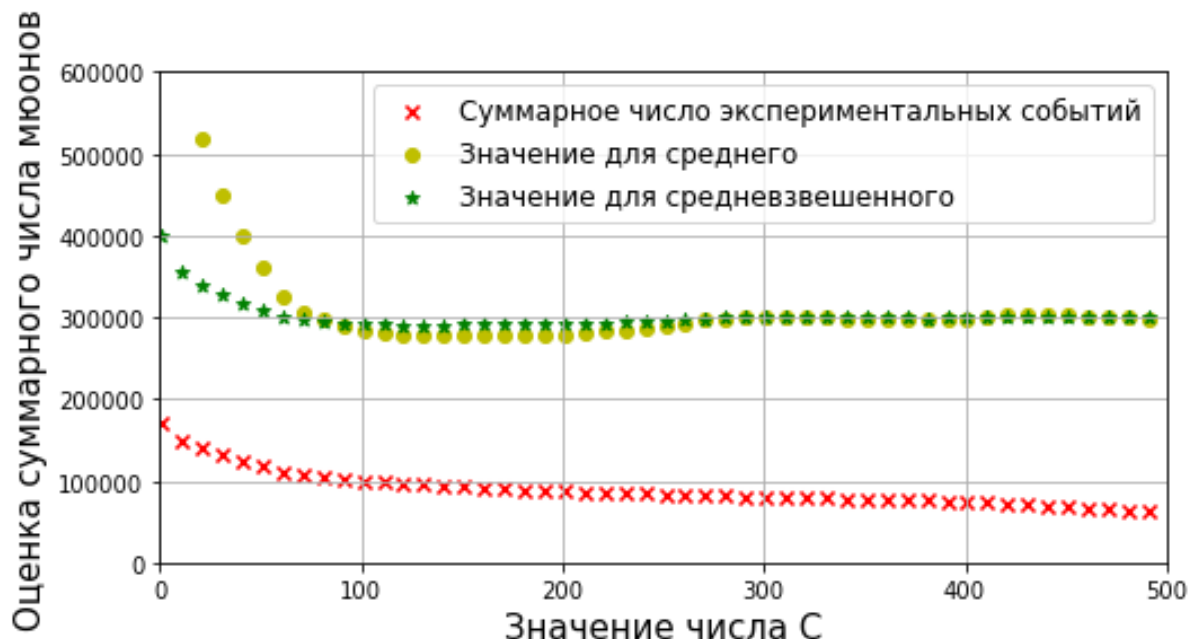


Рис. 3: Результат усреднения в зависимости от количества отбракованных событий.

Для избежания смещения результата, связанного с такими событиями, отбраковывались все комбинации, для которых число симулированных хитов меньше некоторого числа C . Результат отбраковки показан на рис. 2b.

4 Результаты

Значение оценки суммарного числа мюонов для среднего и средневзвешенного в зависимости от отбраковки событий с данным значением числа C показаны на рис. 3. Видно, что оба метода усреднения дают стабильный результат по отношению к параметру обрезания. То есть отбраковка «аномальных» событий не влияет на результат при достаточно больших C .

Для каждого азимута существует максимальный зенитный угол, при котором установка детектирует мюоны, этот угол достигает $\approx 75^\circ$ для диагональных направлений. Оценить вклад мюонов, которые не попадают в угловую апертуру установки, можно тройким образом. Если считать, что поток мюонов с зенитными углами, превышающими максимальный, равен потоку с максимальным углом, а восходящих мюонов нет, то итоговое значение полного числа мюонов получается равным $G_0 = 3 \cdot 10^5$. Если положить поток мюонов за пределами угловой апертуры установки равным нулю, то $G_{zero} = G_0 (1 - \cos(\theta_{max})) = 2.3 \cdot 10^5$. Наиболее правдоподобно допущение, что поток нерегистрируемых мюонов равновероятно может принять любое значение от 0 до своего значения при максимальном угле, если зенитный угол больше максимального и меньше 90° и равен 0 для восходящих мюонов. Тогда число мюонов равно

$$G_{uni} = G_0 \left(1 - \frac{\cos(\theta_{max})}{2} \pm \frac{\cos(\theta_{max})}{2\sqrt{3}} \right) = (2.6 \pm 0.2) \cdot 10^5. \quad (8)$$

Если использовать последнее допущение, то, с учетом эффективной площади установки, полного времени экспозиции и систематических неопределенностей, получается следующее итоговое значение суммарного потока:

$$\Phi_\mu^1 = (5.0 \pm 0.6) \times 10^{-3} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}. \quad (9)$$

Коллектив проекта — международный. Испанию и Италию представляют сотрудники LSC: I. Vandas, A. Bayo, A. Bettini, A. Ianni. Российские участники: Л. Безруков, Б. Лубсандоржиев, А. Нозик (ИЯИ РАН), а также Л. Инжечик, М. Нелюбина, А. Фазлиахметов (Московский физико-технический институт = МФТИ). Финляндию и Польшу представляют: Т. Enqvist, J. Joutsenvaara, P. Kuusiniemi, K. Loo, M. Slupecki (CUPP).

Список литературы

- [1] E.V. Akhrameev et al. Multi-pixel geiger-mode avalanche photodiode and wavelength-shifting fibre-optics readout of plastic scintillator counters for the emma underground experiment. *Nucl. Inst. Meth. in Phys. Res. A*, 610(1):419 – 422, 2009.
- [2] P Kuusiniemi et al. Muon multiplicities measured using an underground cosmic-ray array. *J. Phys.: Conf. Ser. 718 052021*, 718:052021, 2016.
- [3] T. Enqvist et al. Measurements of muon flux in the pyhasalmi underground laboratory. *Nucl. Inst. Meth. in Phys. Res. A*, 554:286 – 290, 2005.
- [4] D.-M. Mei and A. Hime. Muon-induced background study for underground laboratories. *Physical Review D*, 73, 2006.