

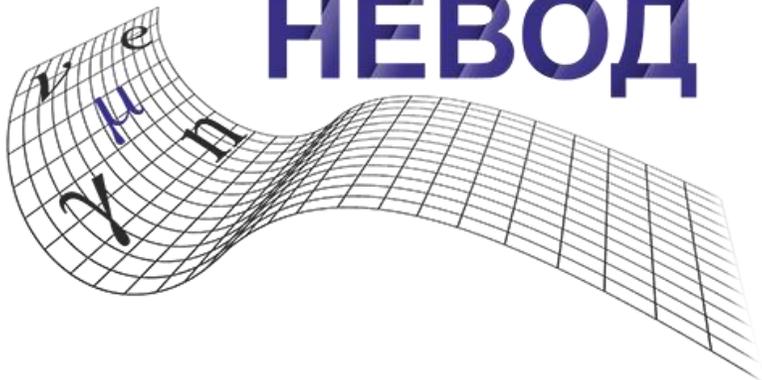
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
Кафедра №40 «Физика элементарных частиц»



Выпускная квалификационная работа
Интегральная интенсивность потока мюонов космических
лучей под большими зенитными углами

Научно-образовательный центр

НЕВОД



Работу выполнила
Пономарева Н.В., Б18-102
Научный руководитель:
к.ф.-м.н. Дмитриева А.Н.

30.06.2022

Актуальность

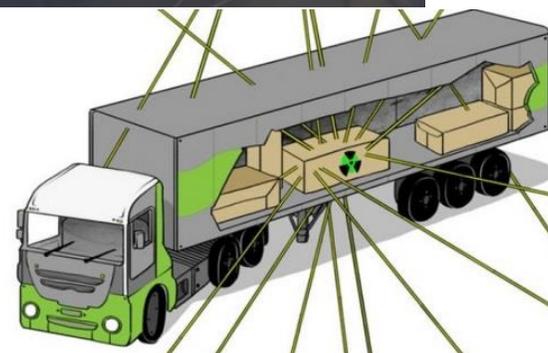
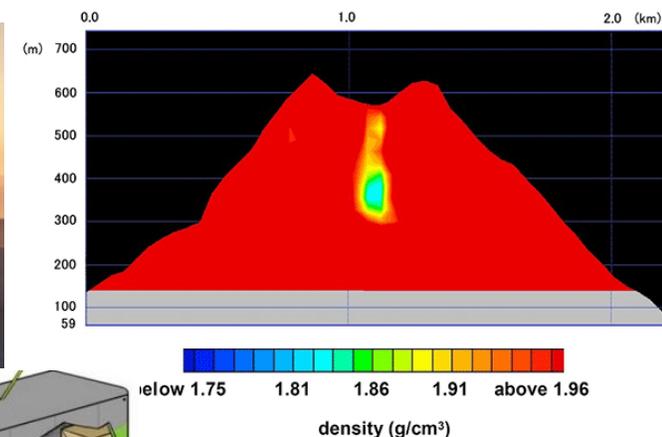
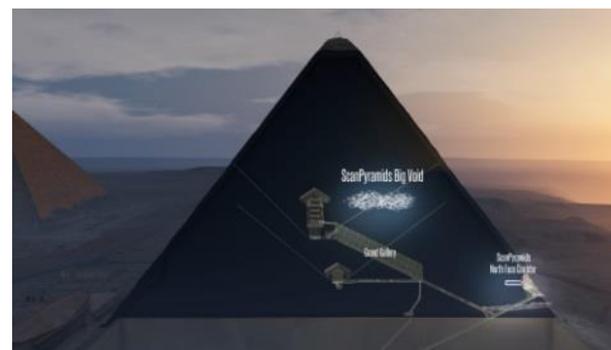
Интегральная интенсивность потока мюонов позволяет оценить, сколько времени потребуется для получения оптимального количества событий в различных экспериментах с мюонными детекторами с учетом их размеров и светосилы.



Супермодули координатного детектора ДЕКОР

В настоящее время мюонная томография применяется в различных исследованиях:

- ✓ картирование внутренней структуры вулканов,
- ✓ геологические исследования (например, мониторинг подземных вод, особенно в районах, подверженных оползням и сильным осадкам),
- ✓ поиск «тайных комнат» в древних архитектурных объектах,
- ✓ мюонография расположения ядерного топлива в реакторах,
- ✓ предотвращение несанкционированного перемещения тяжелых делящихся веществ.



Цель работы: измерить интегральную интенсивность потока мюонов околоризонтальных направлений по данным координатного детектора ДЕКОР, входящего в состав ЭК НЕВОД.

Интенсивность потока мюонов:

$$I(\theta, \varphi, E_{\text{пор}}) = \frac{N(\theta, \varphi, E_{\text{пор}})}{T \cdot \varepsilon_{\text{СМ1}} \cdot \varepsilon_{\text{СМ2}} \cdot S\Omega(\theta, \varphi, E_{\text{пор}})}$$

$N(\theta, \varphi, E_{\text{пор}})$ – число событий, зарегистрированных в данных угловых и энергетическом интервалах;

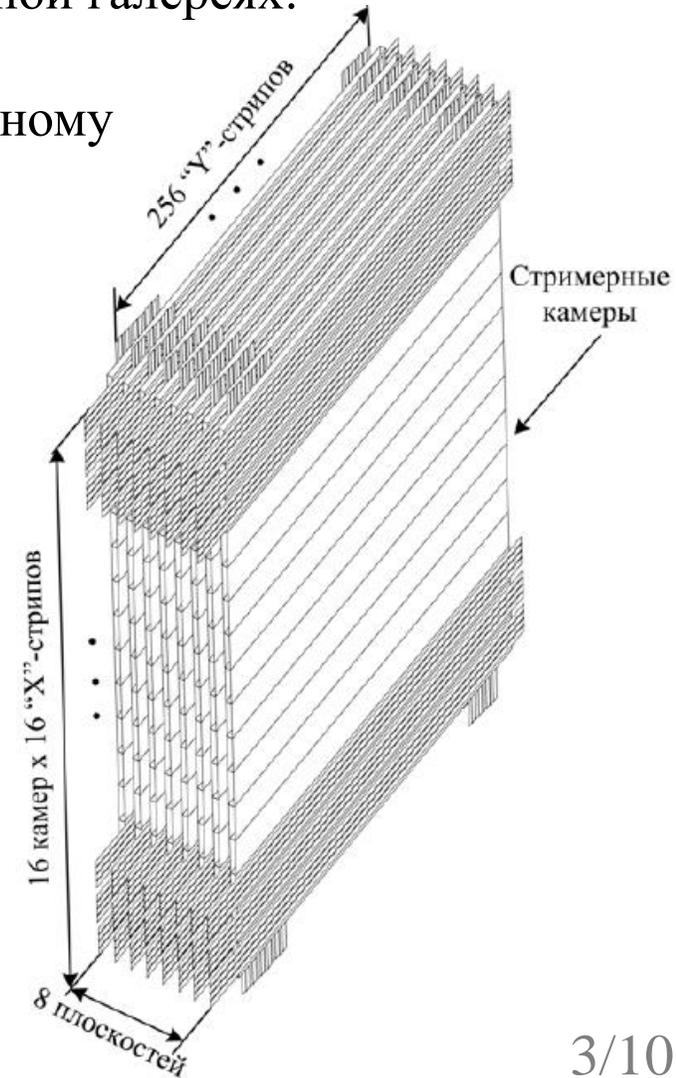
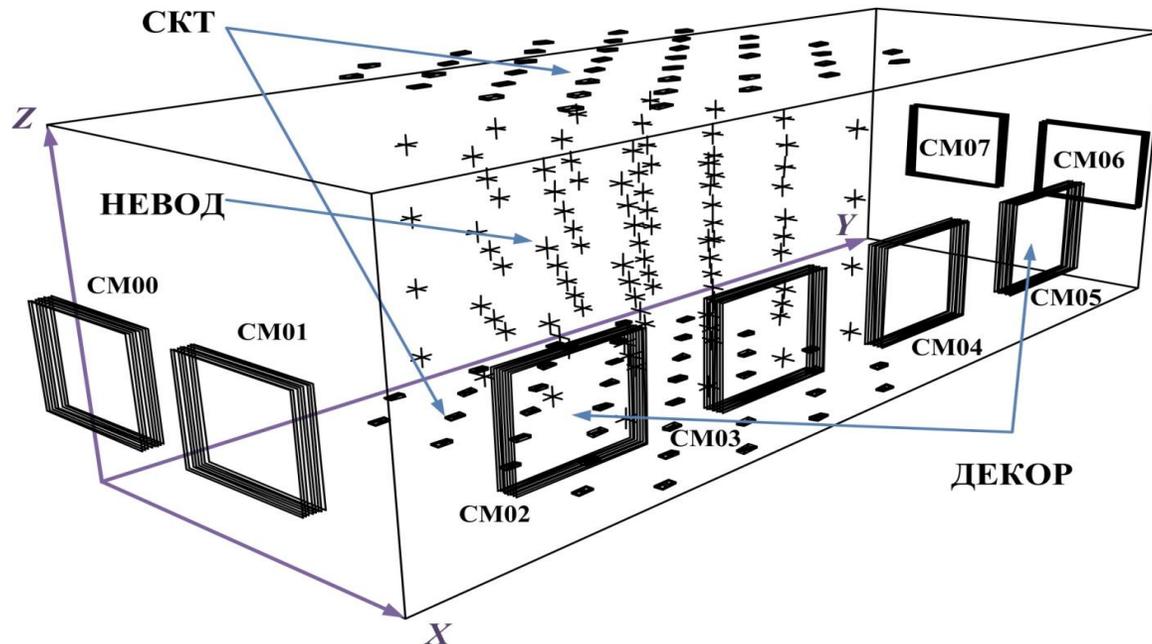
T – "живое" время измерений;

$\varepsilon_{\text{СМ1,2}}$ – коэффициенты, учитывающие эффективность срабатывания отдельных супермодулей пары;

$S\Omega(\theta, \varphi, E_{\text{пор}})$ – светосила установки, с учетом эффективности регистрации и реконструкции треков.

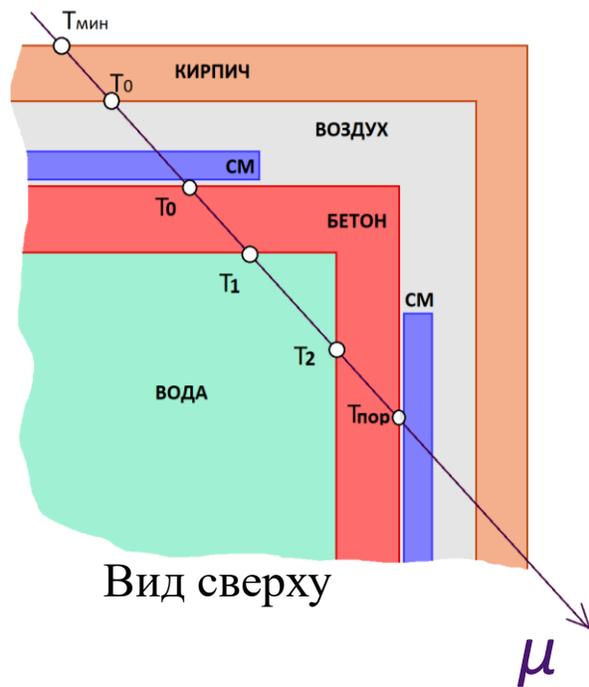
ДЕКОР – координатный детектор большой площади

- ✓ Отбор треков мюонов в эксперименте:
 - триггер №3 – срабатывание любых двух СМ в противоположных коротких галереях;
 - триггер №4 – срабатывание любого СМ в короткой и любого в длинной галереях.
- ✓ Критерий «объединения треков»: два трека, отнесенные установкой к одному событию, должны совпадать в пределах конуса с раствором 5° .
- ✓ Условие «BOUND»: трек частицы должен пройти через внешние плоскости СМ не ближе 4 см от координат крайних стрипов.



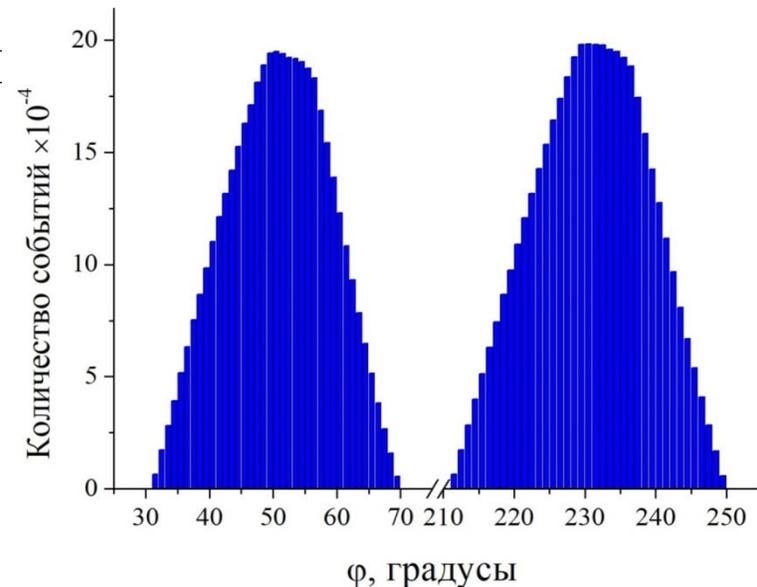
Обработка данных эксперимента и расчет пороговой энергии

Обработаны данные с июня 2013 г. по май 2018 г. ~ 33 тыс. часов работы установки.

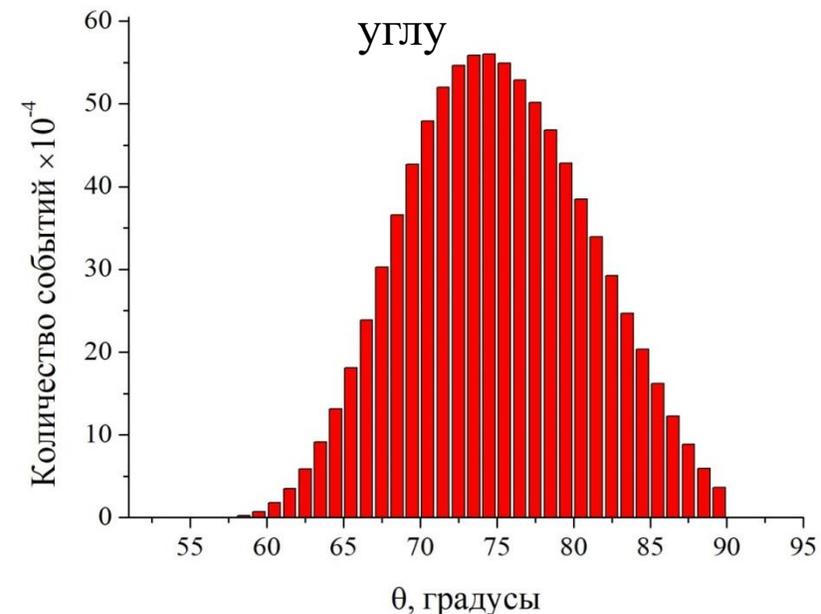


$T_{\text{мин}}$ - увеличение пороговой энергии, которого требует критерий объединения треков;
 T_0 - энергия частицы после прохождения кирпичной стены;
 T_1 - энергия частицы после прохождения бетонной стены;
 T_2 - энергия частицы после прохождения слоя воды;
 $T_{\text{пор}}$ - энергия после прохождения второй бетонной стены;
 $E_{\text{пор}} = T_{\text{пор}} + m_{\mu}c^2$ - искомое значение пороговой энергии.

Пара СМ	$\theta_{\text{мин}}$	$\theta_{\text{макс}}$	$\varphi_{\text{мин}}$	$\varphi_{\text{макс}}$	$E_{\text{мин}}$	$E_{\text{макс}}$
06	84.7	90.00	75.3	267.0	7142	7396
12	56.9	90.00	30.9	251.1	1321	2235
17	84.8	90.00	92.8	284.6	7141	7391



Распределение треков по азимутальному углу



Распределение треков по зенитному углу

Расчет светосилы установки методом Монте-Карло

Моделирование трека:

$$X_{\text{сл}} = X_{\text{мин}} - \gamma \cdot (X_{\text{мин}} - X_{\text{макс}}), \quad \theta_{\text{сл}} = \arccos(\cos(\theta_{\text{мин}}) - \gamma \cdot (\cos(\theta_{\text{мин}}) - \cos(\theta_{\text{макс}}))),$$

$$Y_{\text{сл}} = A \cdot X_{\text{сл}} + B, \quad \varphi_{\text{сл}} = \varphi_{\text{мин}} + \gamma \cdot (\varphi_{\text{макс}} - \varphi_{\text{мин}}),$$

$$Z_{\text{сл}} = Z_{\text{мин}} + \gamma \cdot (Z_{\text{макс}} - Z_{\text{макс}}), \quad \gamma - \text{базовая случайная величина.}$$

Условия срабатывания СМ:

- ✓ условие BOUND: трек должен пройти не ближе 4 см от края СМ;
- ✓ учет внутренней структуры СМ: трек регистрируется СМ, если пройдет через внутренний объем работающей трубки, а не через холдер или зазор между трубками.

Если в каждом СМ сработает не менее двух четных и не менее двух нечетных плоскостей, а в сумме – не менее пяти, тогда считается, что частица зарегистрирована установкой.

Светосила:
$$S\Omega(\theta_i, \varphi_i, E_{\text{пор}_i}) = \frac{N_{\text{рег}}(\theta_i, \varphi_i, E_{\text{пор}_i}) \cdot S_{\text{плоск}} \cdot \Delta\varphi \cdot \Delta\cos(\theta) \cdot \cos(\widehat{\vec{n}, \vec{r}})}{N},$$

$N_{\text{рег}}(\theta_i, \varphi_i, E_{\text{пор}_i})$ – количество треков частиц, зарегистрированных парой СМ с учетом выполнения условий срабатывания СМ;

$S_{\text{плоск}}$ – площадь плоскости;

$\Delta\varphi$ – разность между максимальным и минимальным азимутальными углами для каждой пары СМ;

$\Delta\cos\theta$ – разность косинусов минимального и максимального зенитных углов для каждой пары СМ;

$\cos(\widehat{\vec{n}, \vec{r}})$ – косинус угла между направлением трека и нормалью к плоскости;

N – количество промоделированных треков частиц.

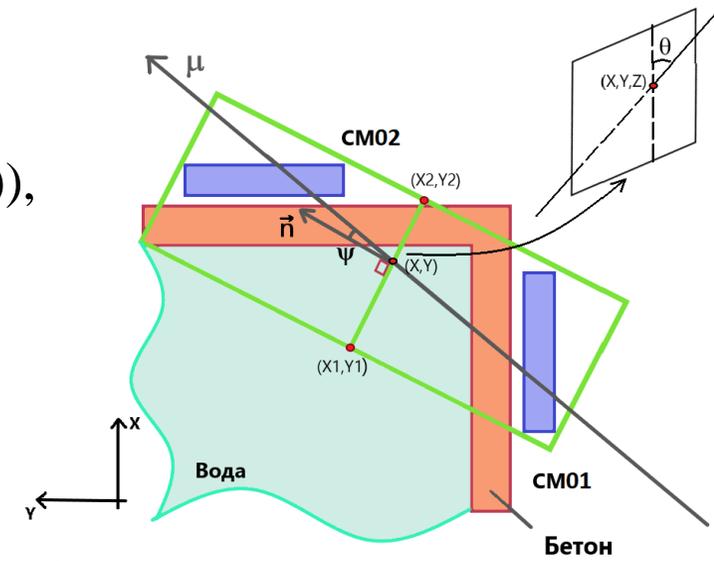


Схема вычисления светосилы пары СМ01-СМ02

Внутренняя структура

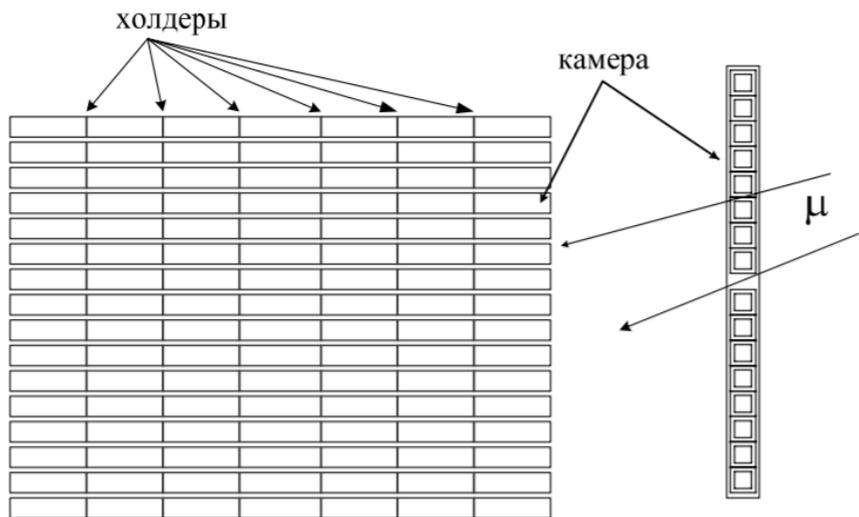
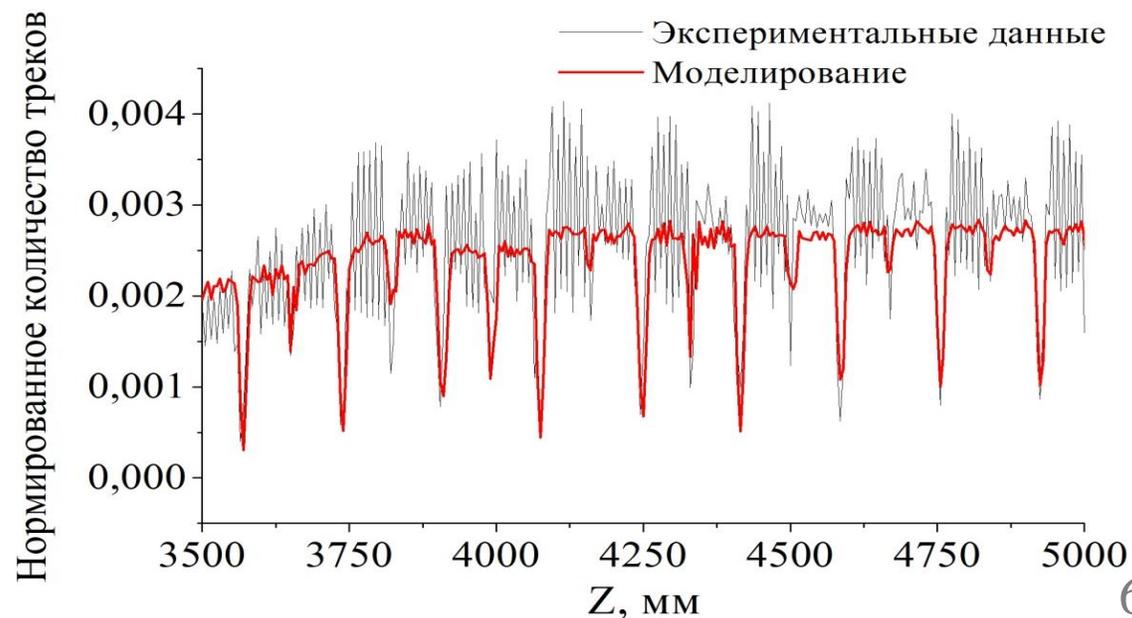
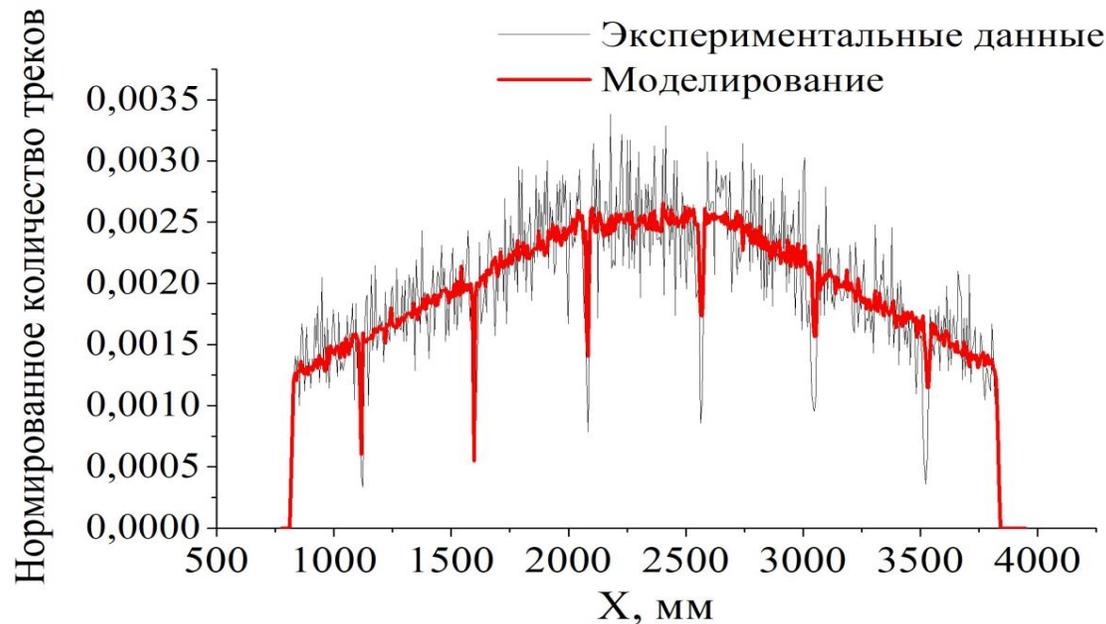


Схема внутренней структуры плоскости СМ и примеры треков, которые не будут зарегистрированы плоскостью

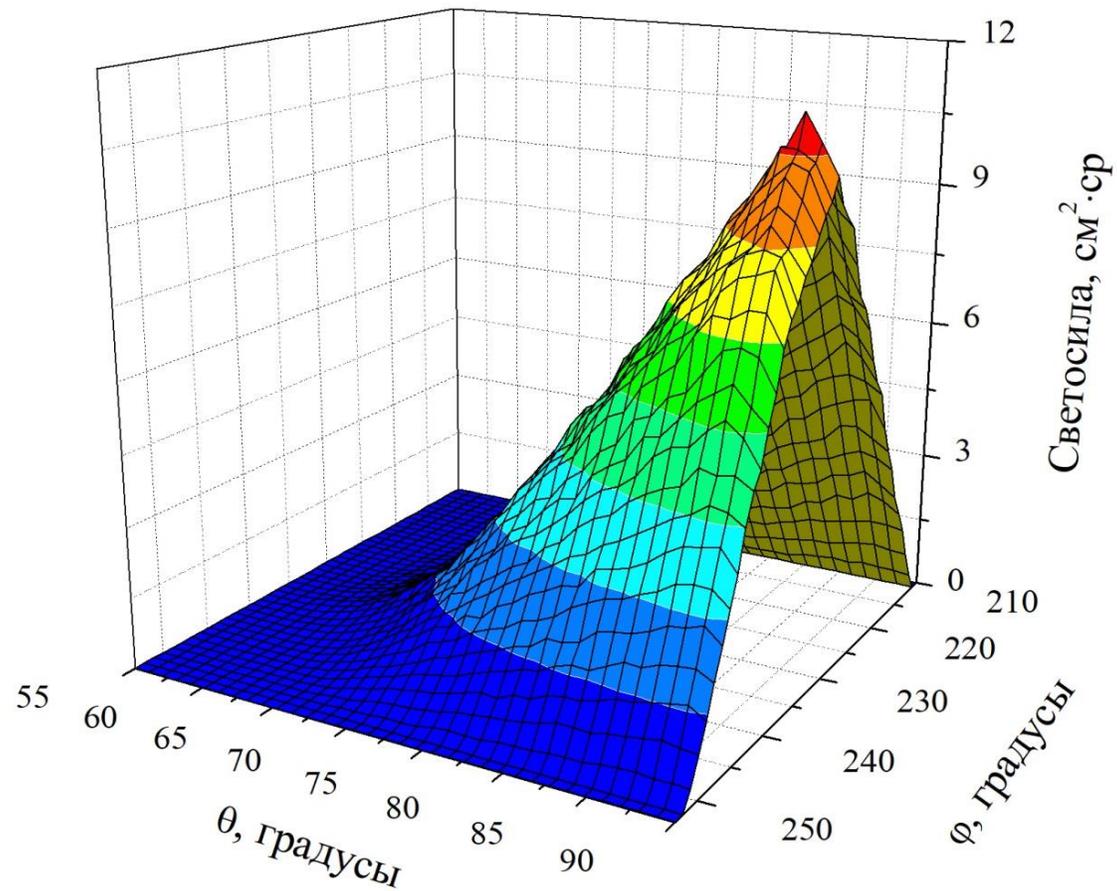


Учет отключенных полукамер

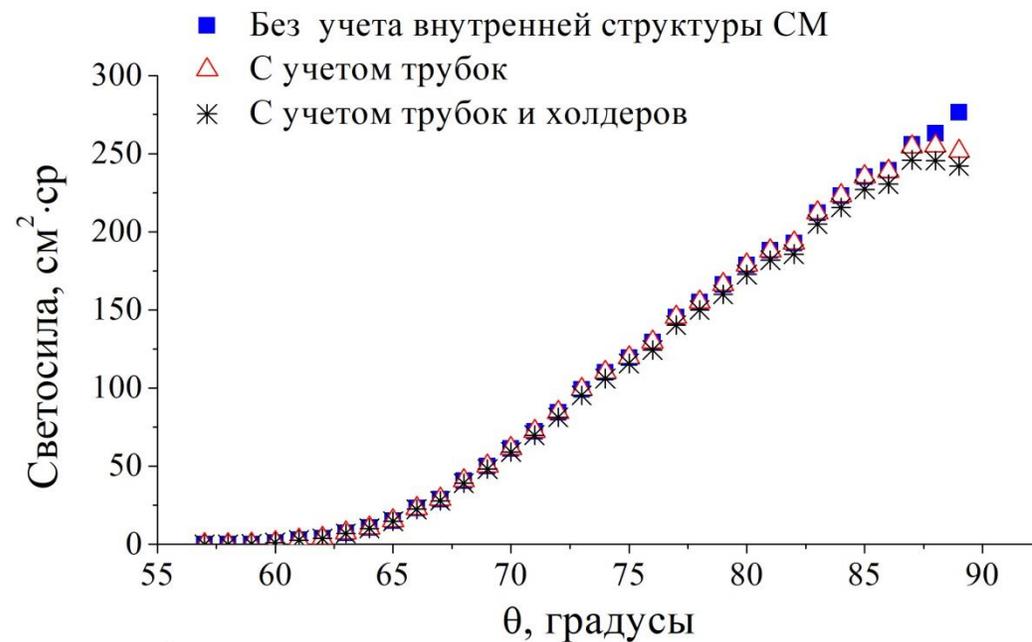
Проверка учета внутренней структуры



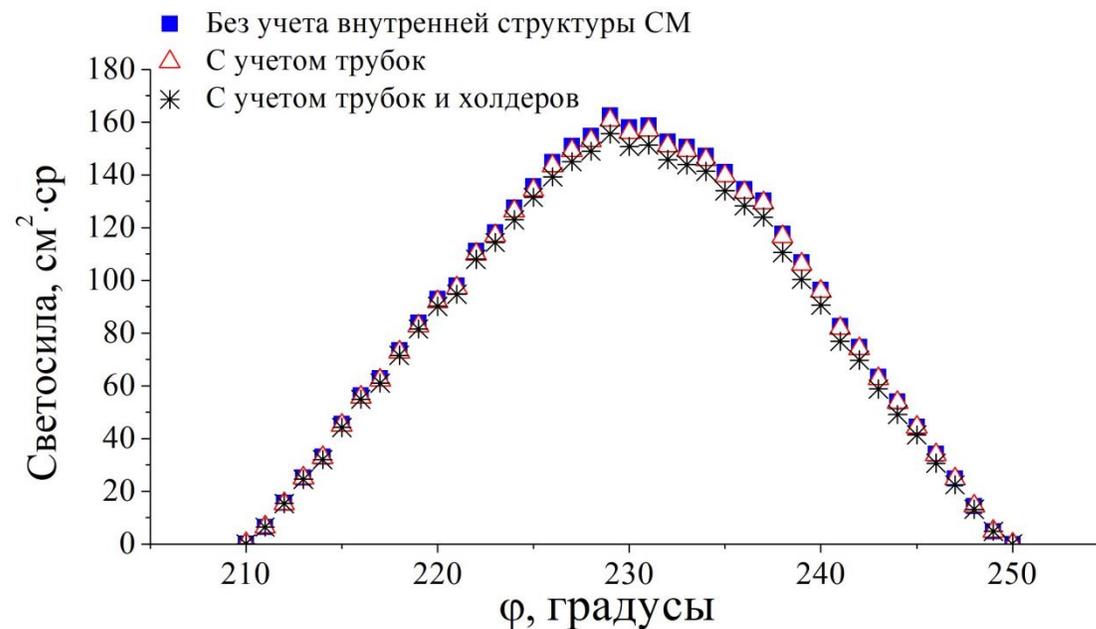
Светосила установки



Светосила пары СМ01-СМ02



Зависимость светосилы от зенитного угла



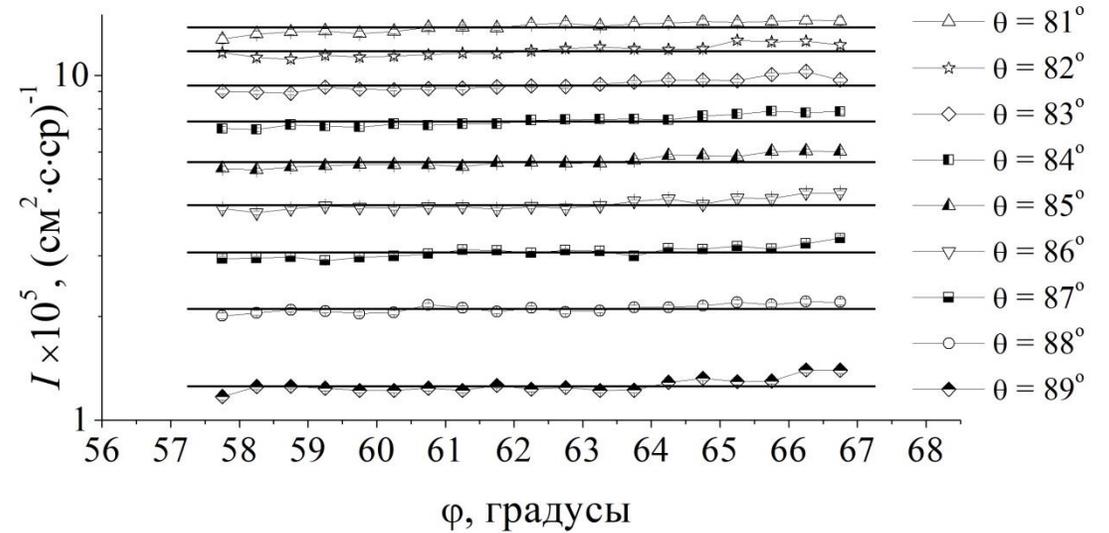
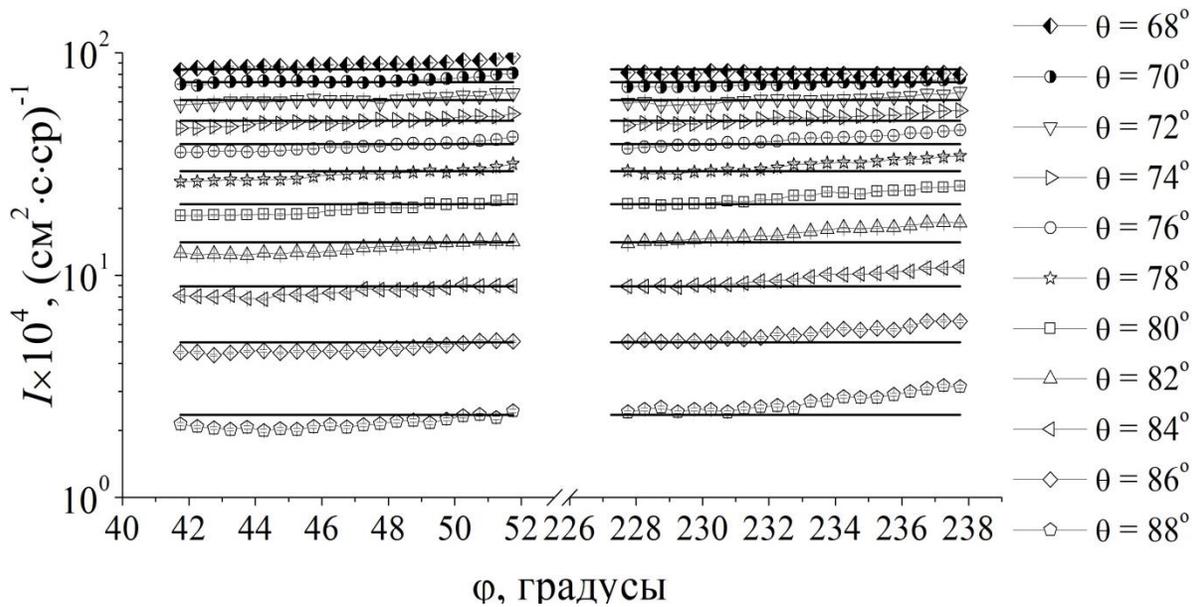
Зависимость светосилы от азимутального угла 7/10

Интегральная интенсивность потока мюонов

Среднее арифметическое взвешенное:

$$\langle I \rangle = \frac{\sum_{\varphi} I_{\varphi} / \Delta I_{\varphi}^2}{\sum_{\varphi} 1 / \Delta I_{\varphi}^2},$$

I_{φ} – значение интенсивности для азимутального угла φ ;
 ΔI_{φ} – его погрешность.

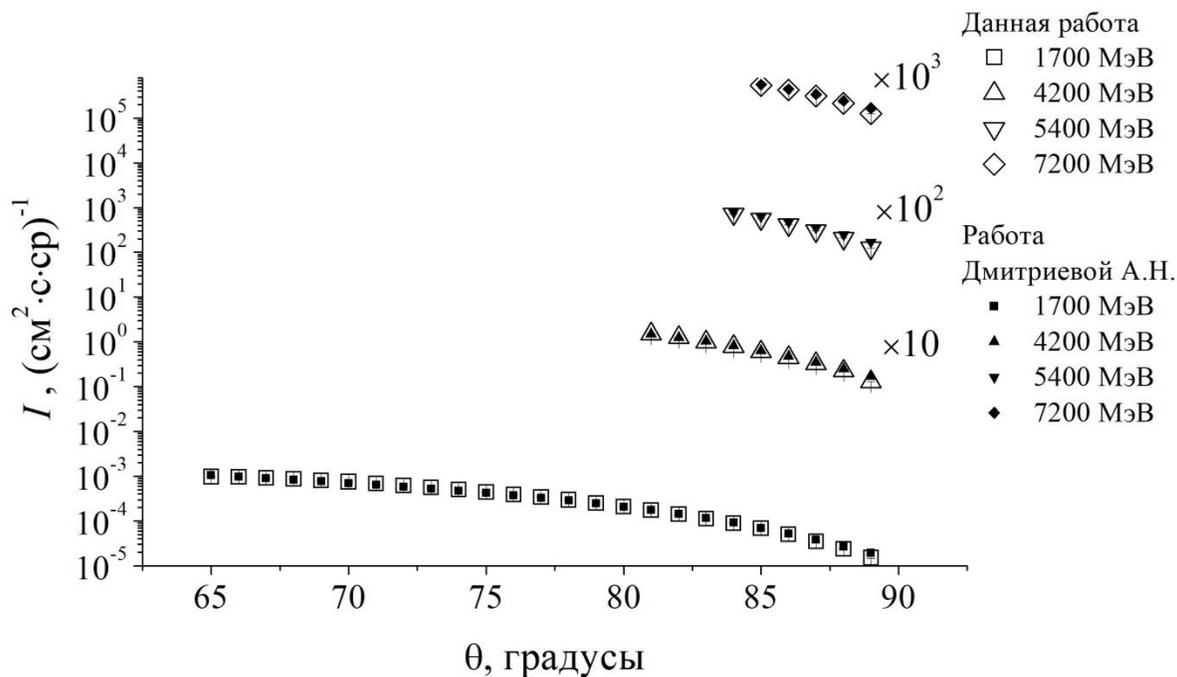


Интегральная интенсивность для $E_{\text{пор}} = 1.7$ ГэВ

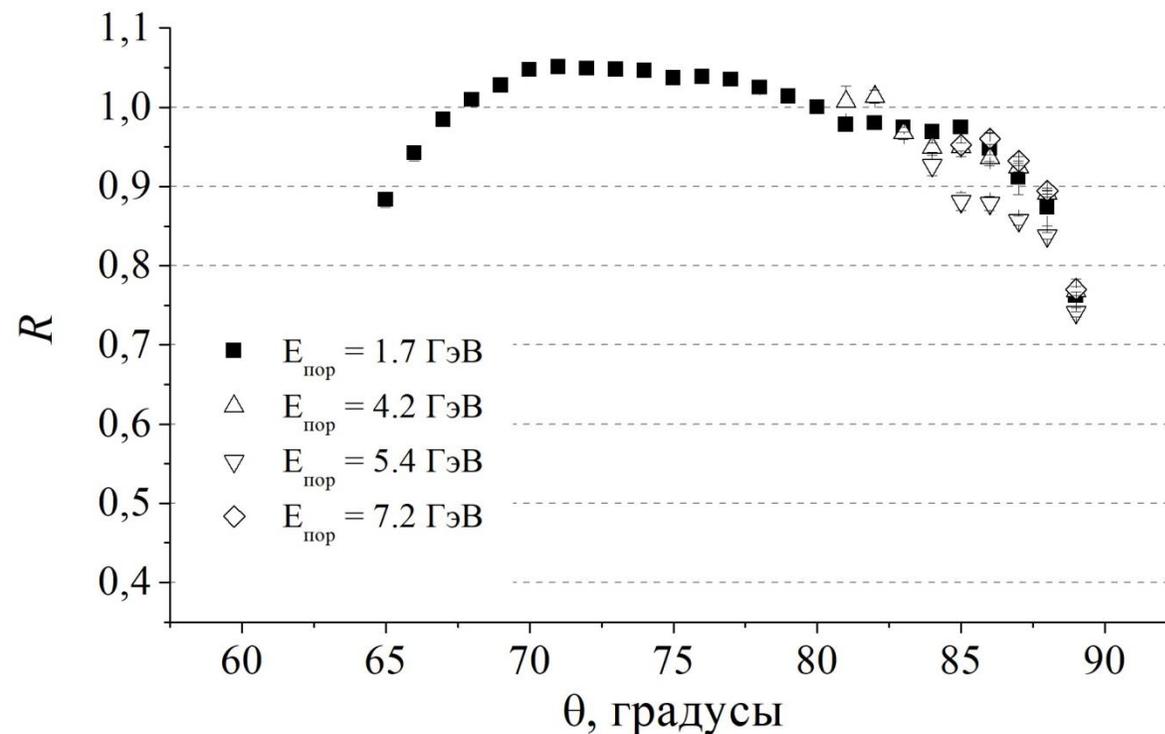
Интегральная интенсивность для $E_{\text{пор}} = 5.4$ ГэВ

Сравнение результатов

В 2007 г. была опубликована работа А.Н. Дмитриевой, в которой приведены результаты измерения интегральной интенсивности потока мюонов в диапазоне зенитных углов $20^\circ < \theta < 90^\circ$ и пороговых энергий от 1.5 ГэВ до 7.2 ГэВ по данным координатного детектора ДЕКОР. Было обработано около 3 тыс. часов работы установки, причем экспериментальные данные были набраны только за зимние месяцы.



Зависимость интегральной интенсивности от зенитного угла при разных значениях пороговой энергии



Отношение R значений интенсивности, полученных в этой работе, к значениям, полученным в работе А.Н. Дмитриевой

Заключение

Обработаны экспериментальные данные установки ДЕКОР за период с июня 2013 г. по май 2018 г. Построены распределения экспериментальных треков по зенитному и азимутальному углам.

Для обработки эксперимента написаны функции, осуществляющие:

- ✓ проверку условия BOUND;
- ✓ расчет пороговой энергии мюона.

Для расчета светосилы написаны функции, осуществляющие:

- ✓ моделирование случайного трека частицы;
- ✓ расчет координат всех элементов внутренней структуры CM, с учетом смещений относительно номинальных положений «SmeshDCR»;
- ✓ проверку возможности регистрации трека супермодулем с учетом его внутренней структуры, условия BOUND.

Рассчитана светосила всех пар.

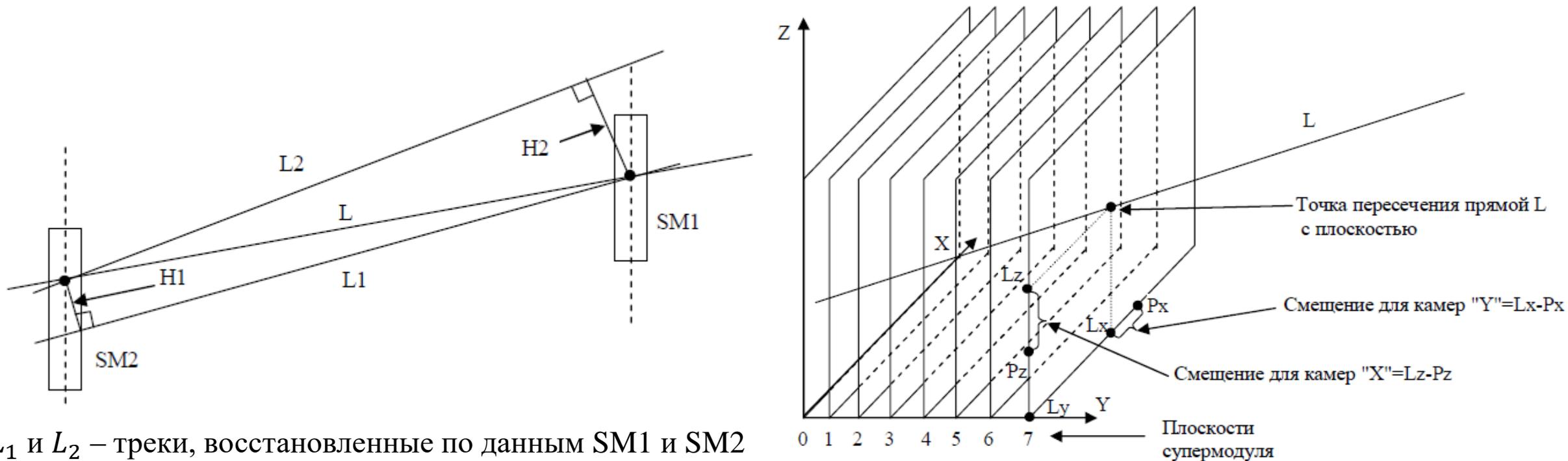
Измерены интегральные интенсивности для нескольких значений пороговой энергии:

$$E_{\text{пор}} = 1.7 \text{ ГэВ}, E_{\text{пор}} = 4.2 \text{ ГэВ}, E_{\text{пор}} = 5.4 \text{ ГэВ} \text{ и } E_{\text{пор}} = 7.2 \text{ ГэВ}.$$

Результаты данной работы были представлены на IX Международной молодежной научной школе-конференции «Современные проблемы физики и технологий» (2022 г.).

Спасибо за внимание!

Определение смещений камер ДЕКОР



L_1 и L_2 – треки, восстановленные по данным SM_1 и SM_2 соответственно;

углы $\psi_1 = \text{atan}(H_1/L_1)$ и $\psi_2 = \text{atan}(H_2/L_2)$ меньше 5° , H_1 и H_2 – перпендикуляры от точки пересечения реконструированного трека с плоскостью проходящей через центр супермодуля до трека найденного по другому супермодулю.

L – трек, восстановленный по данным двух супермодулей.