Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
(НИЯУ МИФИ)

УДК 524.1

ОТЧЁТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

ИНТЕНСИВНОСТЬ ПОТОКА МЮОНОВ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ ПОД БОЛЬШИМИ ЗЕНИТНЫМИ УГЛАМИ

Научный руководитель
к.ф.-м.н. _____ А. Н. Дмитриева

Студент _____ Н. В. Пономарева

Москва 2022

СОДЕРЖАНИЕ

1 Введение **2**

1.1 Экспериментальная установка 3

2 Расчет светосилы установки **5**

2.1 Предварительные расчеты 6

2.2 Розыгрыш трека 7

2.3 Распределения моделированных треков 11

2.4 Условия срабатывания СМ при регистрации частицы 12

2.4.1 Условие BOUND 12

2.4.2 Условие прохождения трека через трубки и холдеры 12

2.4.3 Учет отключенных полукамер 16

2.5 Проверка корректности введения внутренней структуры 17

2.6 Светосила 19

3 Интегральная интенсивность **22**

Список использованных источников **24**

1 ВВЕДЕНИЕ

Мюон (μ) – это короткоживущая заряженная элементарная частица, со спином $\frac{1}{2}$, временем жизни 2.2 мкс, и массой приблизительно в 207 превосходящей массу электрона (105.7 МэВ). Существуют как положительно, так и отрицательно заряженные мюоны.

В силу короткого времени жизни мюоны не могут существовать в первичных галактических космических лучах (ГКЛ). Источник мюонов – распады π–мезонов и K-мезонов, которые интенсивно рождаются при столкновениях частиц первичного космического излучения с ядрами атомов атмосферы. Мюоны не являются ядерно-активными частицами, относительно слабо взаимодействуют с веществом и теряют свою энергию главным образом на возбуждение и ионизацию атомов воздуха.

Интерес к изучению потока мюонов обусловлен тем, что эти частицы способны донести до уровня наблюдения информацию как о первичном космическом излучении, так и о процессах в атмосфере, влияющих на генерацию мюонов и определяющих их прохождение через атмосферу. Во многих экспериментах мюоны являются фоновыми частицами и для оценки числа фоновых событий также необходимо знать поток мюонов [1].

1.1 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

ДЕКОР [2] – координатный детектор большой площади – входит в состав экспериментального комплекса (ЭК) НЕВОД [3] (рисунок 1.1) и представляет восемь супермодулей, расположенных в галереях вокруг черенковского водного калориметра НЕВОД (бассейн объемом 2000 м^3, в котором размещена пространственная решетка квазисферических модулей (КСМ), регистрирующих черенковское излучение). ДЕКОР расположен на высоте 173 м над уровнем моря.

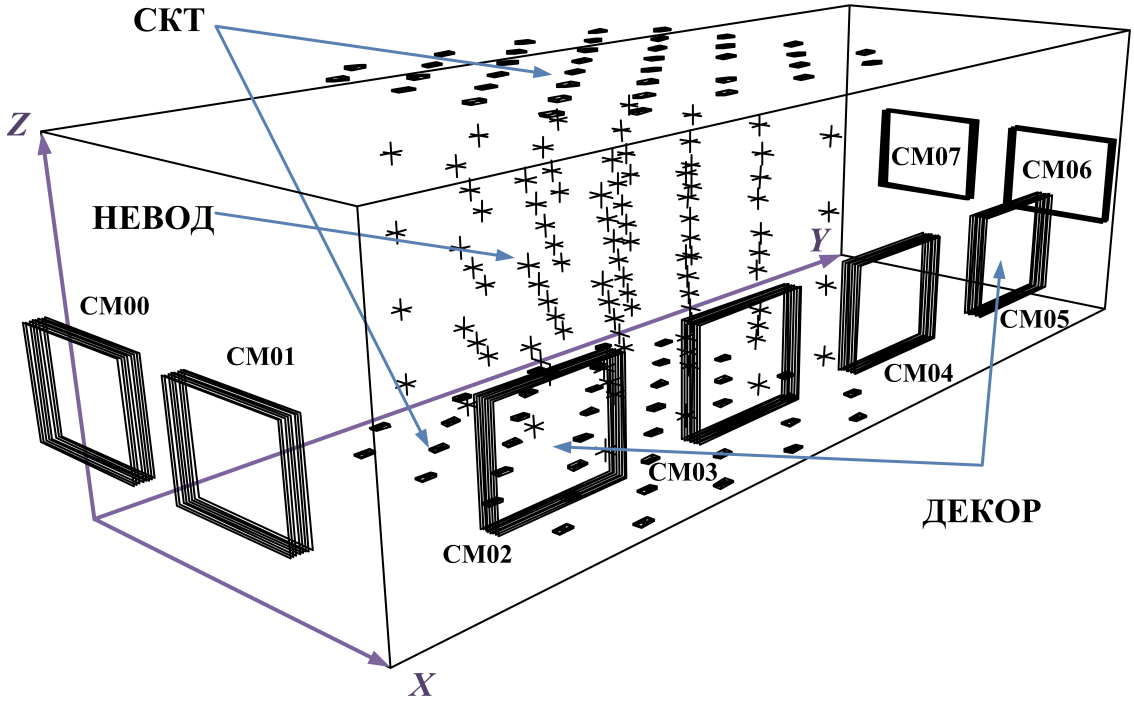


Рисунок 1.1 — Экспериментальный комплекс НЕВОД-ДЕКОР

Каждый супермодуль (СМ) (рисунок 1.2) – это восемь параллельных плоскостей с чувствительной областью размером 3.1×2.7 м^2, подвешенных вертикально на расстоянии 6 см друг от друга. Каждая плоскость состоит из 16 камер. Каждая камера включает 16 газоразрядных трубок с внутренним сечением 0.895×0.895 см^2, заполненных смесью газов Ar, CO_2, n-пентан и работающих в режиме ограниченного стримера. Внутри каждой трубки натянута анодная нить, которую удерживают от провисания пластмассовые холдеры – пластины шириной 5 мм, расположенные на расстоянии 48.5 см друг от друга и симметрично относительно центра камеры.

Съем информации производится со стрипов – алюминиевых пластинок, прикрепленных к каждой плоскости: с шагом 1 см вдоль камер – X-проекция и 1.2 см поперек камер – Y-проекция.

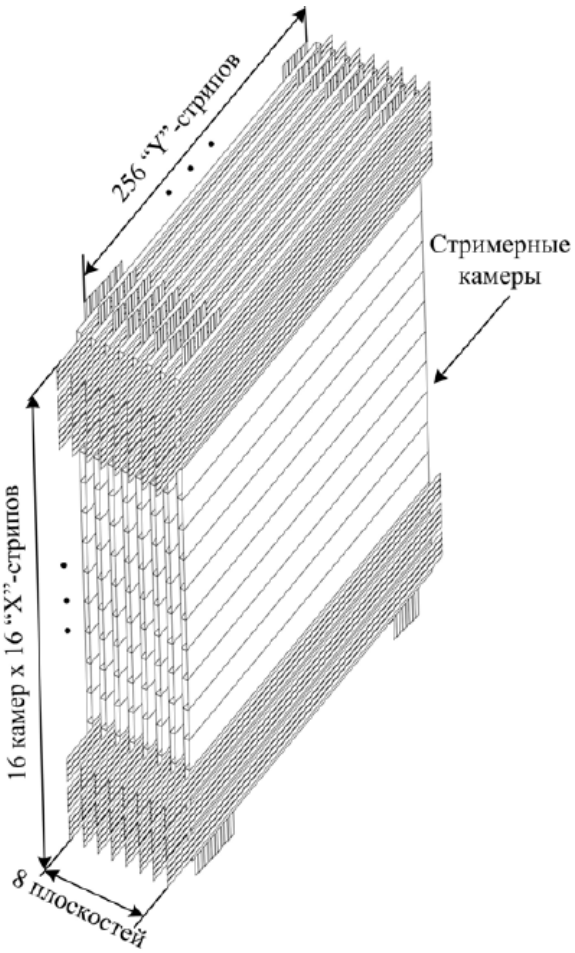


Рисунок 1.2 — Супермодуль установки ДЕКОР

ДЕКОР позволяет измерить поток мюонов при больших зенитных углах θ и рассчитать интегральную интенсивность мюонов $I(\theta, \varphi, E_{\min})$ для зенитного θ и азимутального φ углов прихода частиц, и пороговой энергии $E_{\min}$ по формуле [4]:

$$I(\theta, \varphi, E_{\min}) = \frac{N(\theta, \varphi, E_{\min})}{T \cdot \varepsilon_{\text{СМ1}} \cdot \varepsilon_{\text{СМ2}} \cdot S\Omega(\theta, \varphi, E_{\min})}, \tag{1.1}$$

где $N(\theta, \varphi, E_{\min})$ – число событий, зарегистрированных в данных угловых и энергетическом интервалах, T – "живое" время измерений. Коэффициенты $\varepsilon_{\text{СМ1,2}}$ учитывают эффективность срабатывания отдельных супермодулей пары. $S\Omega(\theta, \varphi, E_{\min})$ – светосила установки с учетом эффективности регистрации и реконструкции треков. В силу приближенной симметрии потока по азимутальному углу при фиксированных энергиях $E_{\min}$ и углах θ для получения зависимости интенсивности от зенитного угла $I(\theta, E_{\min})$ используются усредненные по азимутальному углу значения.

2 РАСЧЕТ СВЕТОСИЛЫ УСТАНОВКИ

Для расчета интенсивности по формуле (1.1) необходимо вычислить светосилу установки:

$$S\Omega = \iiint S(\theta, \varphi) d\Omega(\theta, \varphi), \tag{2.1}$$

где $d\Omega(\theta, \varphi) = \sin(\theta) d\theta d\varphi$ - элемент телесного угла, $S(\theta, \varphi)$ – площадь, которую “видит” трек, летящий под зенитным углом θ и под азимутальным углом φ.

Вычислить светосилу аналитически, учитывая внутреннюю структуру СМ, – невозможно. Поэтому расчет светосилы был проведен с помощью моделирования.

Светосила вычисляется отдельно для каждой пары СМ. Для этого супермодули пары заключаются в параллелепипед минимального объема, в центре параллелепипеда выбирается плоскость, которая равномерно заполняется точками. Пример для пары СМ1-СМ2 представлен на рисунке 2.1.

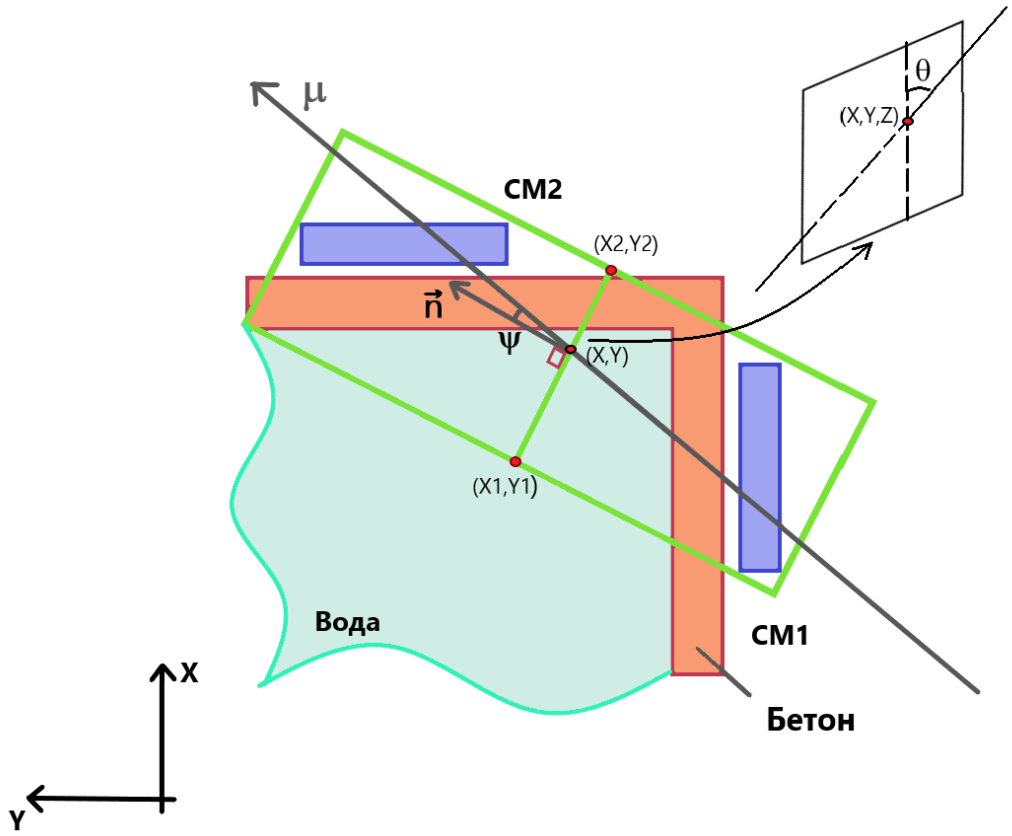


Рисунок 2.1 — Схема вычисления светосилы пары СМ1-СМ2.

Далее через промоделированную точку для выбранной пары СМ моделируется случайный трек частицы. Затем проверяются условия срабатывания СМ, а именно:

1) условие BOUND: прохождение частицы не ближе 4 см от края СМ;
2) учет внутренней структуры СМ: частица зарегистрируется плоскостью СМ, если пройдет через внутренний объем трубки, а не через холдер или зазор между трубками.

Если в каждом СМ срабатывает не менее двух четных и двух нечетных плоскостей, а в сумме – не менее пяти, тогда считается, что частица зарегистрирована установкой. Для нее рассчитывается пороговая энергия (минимальная энергия, необходимая для прохождения частицы через объемы установки и здания). Далее событие записывается в гистограмму. Подробное описание расчета пороговой энергии приведено в предыдущем отчете. Если все вышеперечисленные условия выполнены, для промоделированного трека рассчитывается светосила по формуле 2.18:

$$S\Omega(\theta_i, \varphi_i, E_{\min_i}) = \frac{N_{reg}(\theta_i, \varphi_i, E_{\min_i}) \cdot S_{plane} \cdot \Delta\varphi \cdot \Delta\cos(\theta) \cdot \cos(\widehat{\vec{n}, \vec{r}})}{N_{total}}, \tag{2.2}$$

где N_{reg} – количество треков частиц, зарегистрированных парой СМ с учетом выполнения перечисленных выше условий; $S_{plane}\cos(\widehat{\vec{n}, \vec{r}})$ – площадь, которую "видит" трек, летящий под углами θ_i, и φ_i, интервалы по зенитному и азимутальному углам равны одному градусу ($0^o - 1^o$, $1^o - 2^o$, $2^o - 3^o$ и т.д.), интервал по пороговой энергии $\Delta E_i = 50$ МэВ; $\cos(\widehat{\vec{n}, \vec{r}})$ – косинус угла между направлением трека и нормалью к плоскости; $\Delta\varphi = \varphi_{max} - \varphi_{min}$ – разность между максимальным и минимальным азимутальными углами для каждой пары СМ; $\Delta\cos(\theta) = \cos(\theta_{min}) - \cos(\theta_{max})$ – разность косинусов минимального и максимального зенитных углов для каждой пары СМ; N_{total} – количество промоделированных треков частиц.

Для расчета светосилы была написана программа на языке C++ [5].

2.1 ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РАСЧЕТЫ

Для каждой пары СМ был построен параллелепипед минимального объема, внутри выбрана плоскость по центру (рисунок 2.2).

В таблице (2.1) приведены координаты точек пересечения этой плоскости со сторонами параллелепипеда – крайние точки плоскости, а так же коэффициенты этой плоскости. Ранее из экспериментальных данных для каждой пары СМ были получены максимальные и минимальные зенитный и азимутальный углы и записаны в файл.

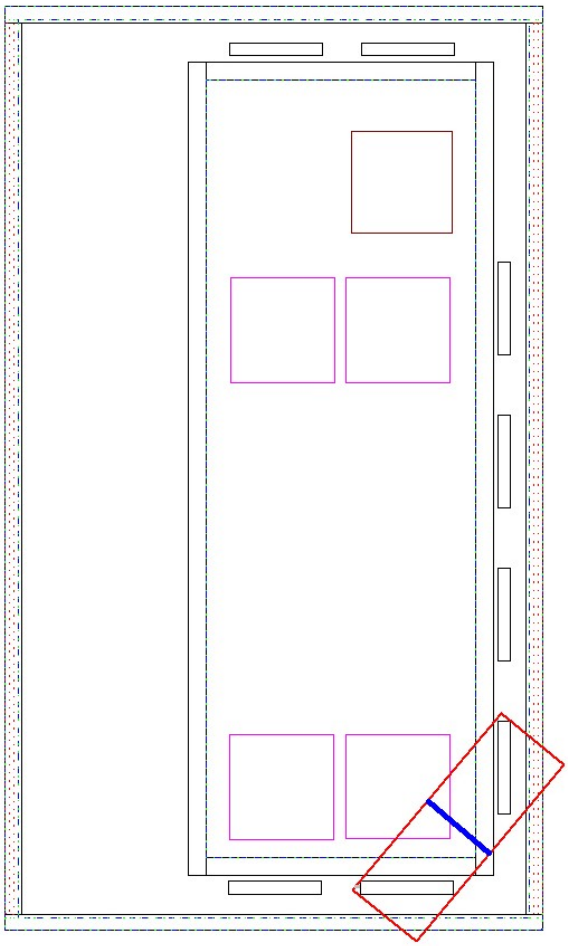


Рисунок 2.2 — Параллелепипед минимального объема для пары CM1-CM2

2.2 РОЗЫГРЫШ ТРЕКА

Рассмотрим функцию, реализующую розыгрыш случайного трека частицы. Функция получает на вход координаты крайних точек плоскости, максимальные и минимальные значения азимутального угла φ и косинуса зенитного угла $\cos(\theta)$.

Функция моделирует координаты точки на центральной плоскости, азимутальный угол φ и косинус зенитного угла угла $\cos(\theta)$.

Рассмотрим расчет координаты Z. Точки должны быть распределены по плоскости равномерно. Воспользуемся общим методом моделирования непрерывной величины. Для равномерного распределения плотность вероятности не зависит от Z и равняется константе $\rho(z) = C$. Константу можно найти из условия нормировки:

$$\int_{Z_{min}}^{Z_{max}} \rho(z)dz = \int_{Z_{min}}^{Z_{max}} Cdz = Z_{max} - Z_{min} = 1,$$

Пара СМ	A	B	X_{min}	X_{max}	Y_{min}	Y_{max}	Z_{min}	Z_{max}
02	-1.679	10839	5315	6792	1915	-563	2570	5275
03	-0.859	8918	5238	7234	4416	2700	2570	5275
04	-0.576	9936	5213	7728	6931	5481	2570	5275
05	-0.434	11719	5209	7978	9457	8255	2570	5275
06	-0.158	13722	2981	6078	13250	12760	2570	5275
07	-0.001	13008	775	3883	13007	13003	2570	5275
12	-0.854	8222	7446	9450	1860	147	2570	5275
13	-0.437	7578	7418	10181	4333	3125	2570	5275
14	-0.293	9038	7420	10395	6861	5988	2570	5275
15	-0.221	11042	7427	10478	9401	8727	2570	5275
16	-0.001	13011	5184	8291	13006	13004	2570	5275
17	0.156	12297	2988	6087	12763	13247	2570	5275
26	0.180	12960	7442	10526	14296	14850	2570	5275
27	0.353	12404	5229	8125	14250	15272	2570	5275
36	0.225	15168	7438	10486	16841	17527	2570	5275
37	0.442	14472	5229	7984	16784	18002	2570	5275
46	0.301	17148	7430	10396	19384	20277	2570	5275
47	0.592	16215	5233	7719	19313	20785	2570	5275
56	0.455	18522	7429	0162	21904	23148	2570	5275
57	0.895	17112	5261	7195	21821	23552	2570	5275

Таблица 2.1 — Коэффициенты плоскостей и координаты точек пересечения

$$C = \frac{1}{Z_{max} - Z_{min}} = \rho(z).$$

Пусть на плоскости выбрана случайная точка $Z_{\text{сл}}$. Её можно промоделировать общим методом:

$$\int_{Z_{min}}^{Z_{\text{сл}}} \rho(z)dz = \frac{Z_{\text{сл}} - Z_{min}}{Z_{max} - Z_{min}} = \gamma,$$

где γ – базовая случайная величина, которая равномерно принимает значения из интервала (0;1). В программе γ разыгрывается отдельно для каждой случайной величины с помощью генератора “Вихрь Мерсена” [6].

Тогда координата случайной точки:

$$Z_{\text{сл}} = Z_{min} + \gamma \cdot (Z_{max} - Z_{min}). \tag{2.3}$$

На рисунке 2.3 показано, как происходит расчет координат X и Y случайной точки. Пусть L – длина от точки $(X_{min}; Y_{min})$ до точки $(X_{max}; Y_{max})$, $L = \sqrt{(X_{max} - X_{min})^2 + (Y_{max} - Y_{min})^2}$, тогда расстояние от точки $(X_{min}; Y_{min})$ до точки $(X_{\text{сл}}; Y_{\text{сл}})$ равно γL или

$$\gamma^2 L^2 = \gamma^2 \cdot ((X_{max} - X_{min})^2 + (Y_{max} - Y_{min})^2). \tag{2.4}$$

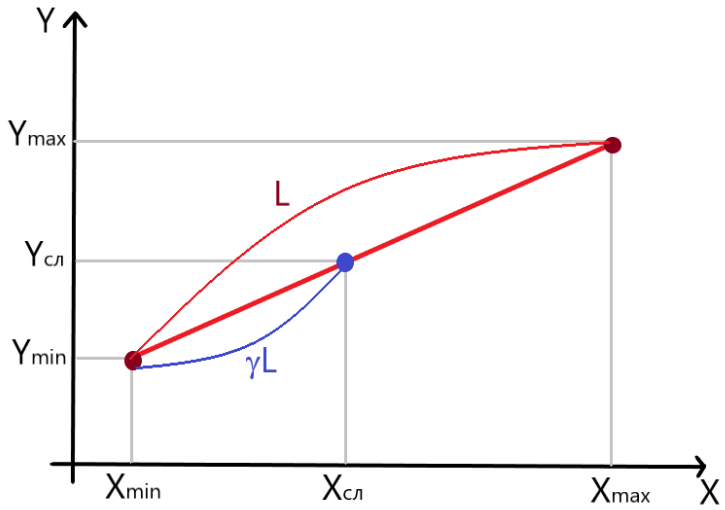


Рисунок 2.3 — Расчет координат случайной точки на прямой

С другой стороны,

$$\gamma^2 L^2 = ((X_{\text{сл}} - X_{min})^2 + (Y_{\text{сл}} - Y_{min})^2). \tag{2.5}$$

Связь между X и Y: $Y = A \cdot X + B$, коэффициенты A и B приведены в таблице (2.1). Из (2.5) мы получили квадратное уравнение на $X_{\text{сл}}$, учтя, что

$$\begin{aligned} Y_{\text{сл}} &= A \cdot X_{\text{сл}} + B, \\ Y_{min} &= A \cdot X_{min} + B, \\ Y_{max} &= A \cdot X_{max} + B. \end{aligned}$$

$$X_{\text{сл}}^2 \cdot (1+A^2) - X_{\text{сл}} \cdot 2X_{min}(1+A^2) + (1+A^2)((1-\gamma^2)X_{min}^2 + 2X_{min}X_{max}\gamma^2 - X_{max}^2\gamma^2) = 0. \tag{2.6}$$

Дескриминант уравнения:

$$D = 4(1 + A^2)^2\gamma^2(X_{min} - X_{max})^2. \tag{2.7}$$

Координата случайной точки:

$$X_{\text{сл}}^{\pm} = \frac{2X_{min}(1 + A^2) \pm 2(1 + A^2)\gamma(X_{min} - X_{max})}{2(1 + A^2)} = \cdots = X_{min} \pm \gamma(X_{min} - X_{max}), \tag{2.8}$$

$$\begin{aligned} X_{min} - X_{max} &< 0, \\ X_{\text{сл}} &> X_{min}. \end{aligned}$$

Следовательно, нужно использовать решение (2.8) со знаком минус:

$$X_{\text{сл}} = X_{min} - \gamma(X_{min} - X_{max}). \tag{2.9}$$

Координата Y:

$$Y_{\text{сл}} = A \cdot X_{\text{сл}} + B. \tag{2.10}$$

Угол φ разыгрывается как непрерывная случайная величина на отрезке длины $\varphi_{max} - \varphi_{min}$:

$$\varphi_{\text{сл}} = \varphi_{min} + \gamma \cdot (\varphi_{max} - \varphi_{min}). \tag{2.11}$$

Рассмотрим розыгрыш треков по зенитному углу. Из формулы для светосилы (2.1) и формулы для элемента телесного угла $d\Omega$ следует, что плотность вероятности пропорциональна синусу зенитного угла $f(\theta) = G\sin(\theta)$. Из условия нормировки находим константу:

$$\int\limits_{\theta_{min}}^{\theta_{max}} f(\theta)d\theta = \int\limits_{\theta_{min}}^{\theta_{max}} G\sin(\theta)d\theta = -\cos(\theta)\Big|_{\theta_{min}}^{\theta_{max}} = \cos\theta_{min} - \cos\theta_{max},$$

$$G = \frac{1}{\cos\theta_{min} - \cos\theta_{max}},$$

$$f(\theta) = \frac{\sin(\theta)}{\cos\theta_{min} - \cos\theta_{max}}.$$

Тогда для случайного угла $\theta_{\text{сл}}$:

$$\int\limits_{\theta_{min}}^{\theta_{\text{сл}}} \frac{\sin(\theta)d\theta}{\cos\theta_{min} - \cos\theta_{max}} = \gamma,$$

$$\gamma = \frac{\cos(\theta_{min}) - \cos(\theta_{\text{сл}})}{\cos\theta_{min} - \cos\theta_{max}}.$$

Величина косинуса случайного угла и сам угол:

$$\cos(\theta_{\text{сл}}) = \cos(\theta_{min}) - \gamma(\cos(\theta_{min}) - \cos(\theta_{max})), \tag{2.12}$$

$$\theta_{\text{сл}} = \arccos(\cos(\theta_{min}) - \gamma(\cos(\theta_{min}) - \cos(\theta_{max}))). \tag{2.13}$$

Для построения трека необходимо знать две точки. Вторую точку можно взять на любом расстоянии R от точки на центральной плоскости, например, $R = 1000$ мм.

$$X_{\text{сл}_1} = X_{\text{сл}}, \quad Y_{\text{сл}_1} = Y_{\text{сл}}, \quad Z_{\text{сл}_1} = Z_{\text{сл}},$$

$$X_{\text{сл}_2} = X_{\text{сл}_1} + R \cdot \sin(\theta_{\text{сл}})\cos(\varphi_{\text{сл}}), \tag{2.14}$$

$$Y_{\text{сл}_2} = Y_{\text{сл}_1} + R \cdot \sin(\theta_{\text{сл}})\sin(\varphi_{\text{сл}}), \tag{2.15}$$

$$Z_{\text{сл}_2} = Z_{\text{сл}_1} + R \cdot \cos(\theta_{\text{сл}}). \tag{2.16}$$

2.3 РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МОДЕЛИРОВАННЫХ ТРЕКОВ

По описанному выше методу получены распределения промоделированных треков по азимутальному углу (рисунок 2.4) и зенитному углу (рисунок 2.5). Распределения построены для пары СМ1-СМ2, всего смоделировано 10 000 000 треков. Распреление по

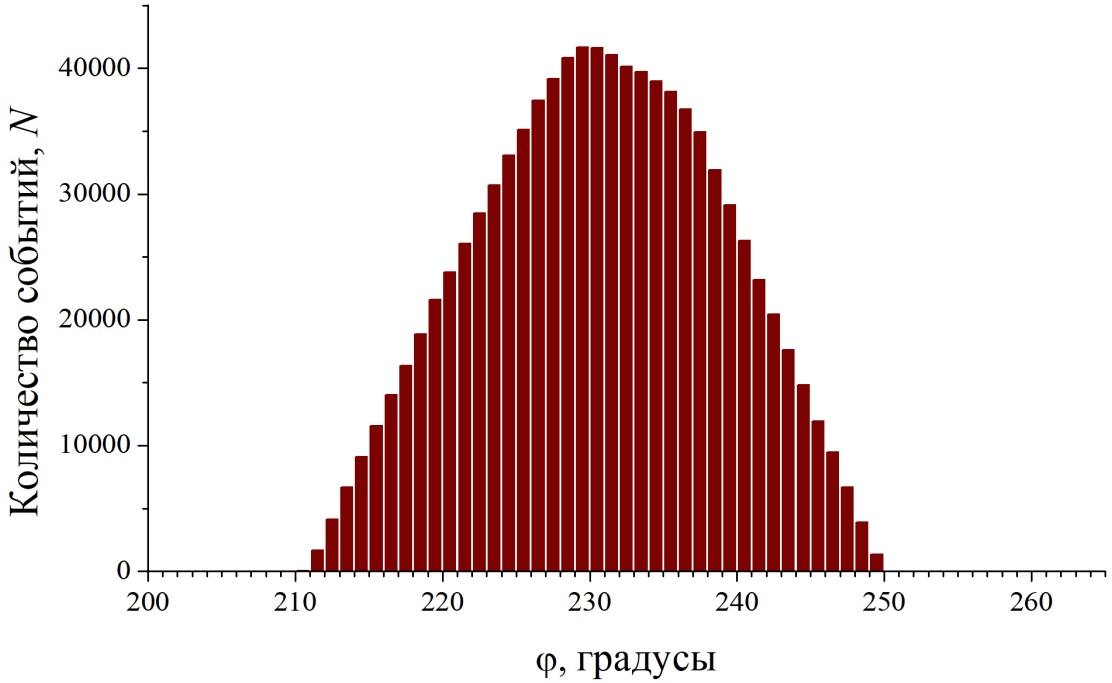


Рисунок 2.4 — Распределение промоделированных треков по азимутальному углу

азимутальному углу получено для направления движения частиц от СМ1 к СМ2. Максимум рапределения примерно совпадает с максимумом распеделения, построенному по экспериментальным данным.

Из рисунка 2.5 видно, что максимум распределения достигается при $\theta \approx 90^o$, то есть при окологоризонтальных зенитных углах. В этом случае треки "видят" максимально возможную площадь детектора, то есть зарегистрируется наибольшее количество треков.

Таким образом, характер распределний говорит о том, что моделирование случайных треков проведено корректно.

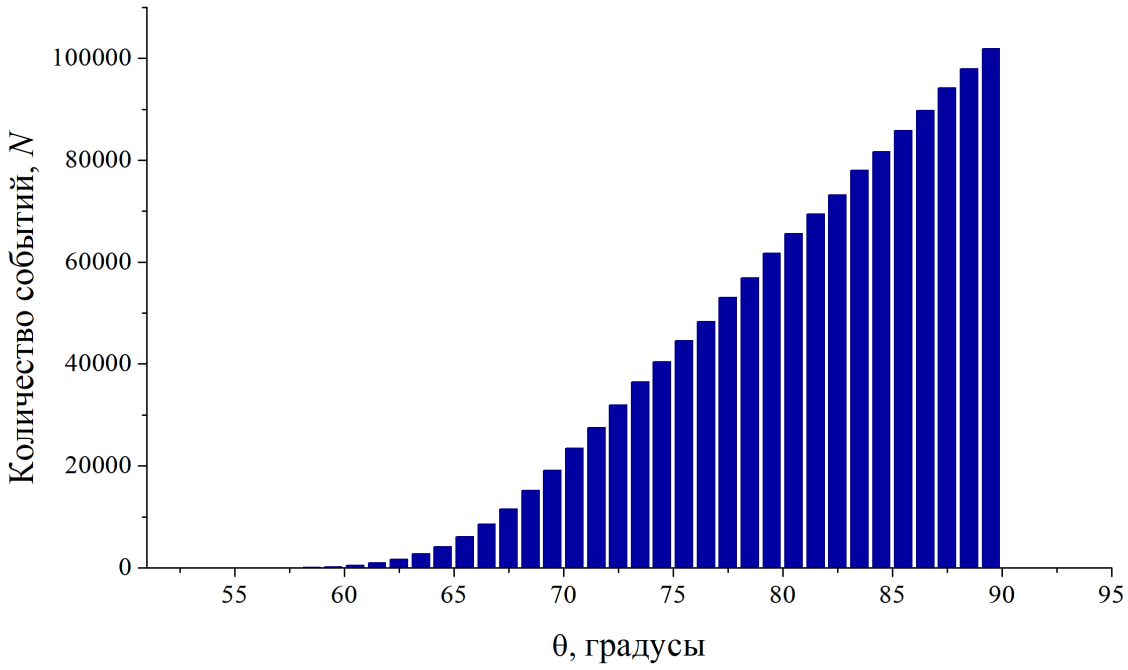


Рисунок 2.5 — Распределение промоделированных треков по зенитному углу

2.4 УСЛОВИЯ СРАБАТЫВАНИЯ СМ ПРИ РЕГИСТРАЦИИ ЧАСТИЦЫ

2.4.1 УСЛОВИЕ BOUND

Для уменьшения влияния краевых эффектов была написана функция на языке C++, которая осуществляет проверку прохождения промоделированных треков через внешние плоскости СМ не ближе 4 см от координат крайних стрипов – условие “BOUND”. Последние были рассчитаны для каждого СМ относительно его опорной точки путем добавления размеров плоскостей и расстояния между нулевой и седьмой плоскостями. За опорную точку принимается нижняя правая (вид изнутри бассейна) точка ближайшей к бассейну плоскости.

2.4.2 УСЛОВИЕ ПРОХОЖДЕНИЯ ТРЕКА ЧЕРЕЗ ТРУБКИ И ХОЛДЕРЫ

На рисунке 2.6 представлена внутренняя структура одной из восьми плоскостей СМ. Каждая плоскость состоит из шестнадцати камер, которые расположены на расстоянии 7.44 мм. Ширина камеры 169.79 мм.

На рисунке 2.6 справа представлено поперечное сечение камеры: она состоит из

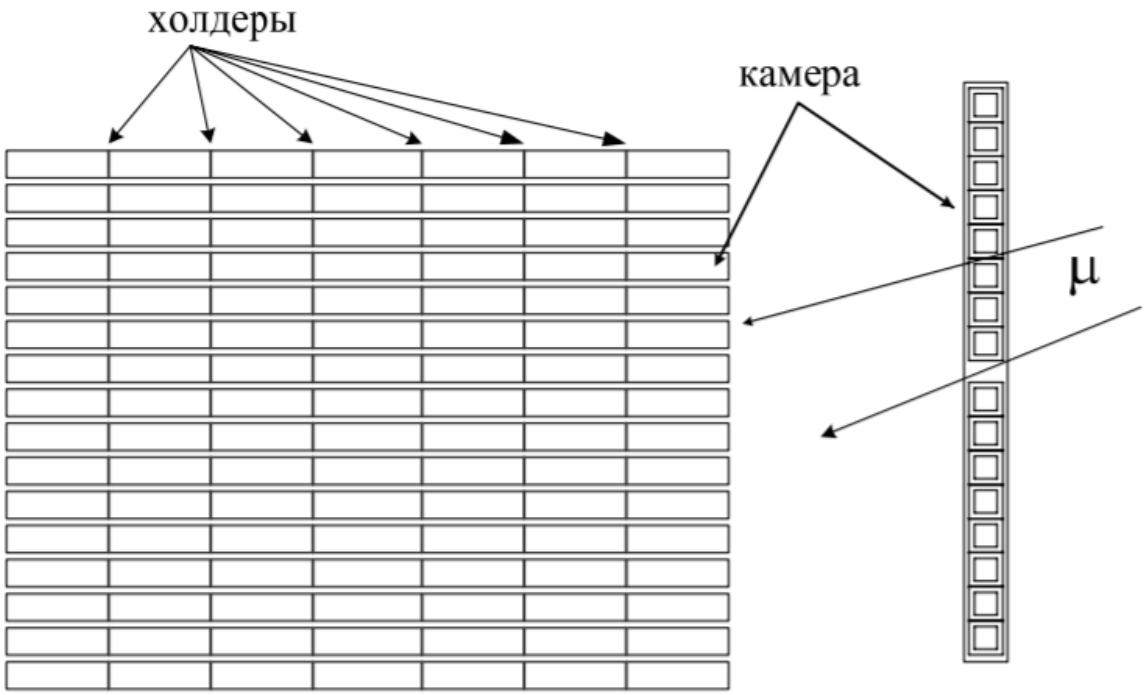


Рисунок 2.6 — Схема внутренней структуры плоскости СМ и примеры треков, которые не будут зарегистрированы плоскостью

Номер СМ	X_0	Y_0	Z_0
00	756	-801	2577
01	5173	-801	2574
02	9750	1448	2571
03	9751	6561	2567
04	9748	11689	2565
05	9750	16808	2574
06	8303	26812	2567
07	3903	26812	2570

Таблица 2.2 — Координаты опорных точек

шестнадцати трубок, объединенных в две группы – полукамеры. Расстояние между полукамерами внутри камеры – 3.15 мм, между трубками в полукамере – 1 мм. Трубки имеют квадратное сечение (8.95 мм × 8.95 мм).

Расчет координат элементов внутренней структуры идет от опорной точки ближайшей к бассейну плоскости каждого СМ. Координаты опорных точек, заложенные при установке детектора, представлены в таблице (2.2).

При расчете координат элементов внутренней структуры необходимо учесть смещения плоскостей СМ относительно номинальных положений (“SmeshDCR”). Оно обусловлено тем, что невозможно установить плоскости абсолютно параллельно друг другу. Поэтому реальные координаты опорных точек каждой плоскости были определены после начала работы детектора путем анализа экспериментальных данных. В таблице (2.3) представлены смещения опорных точек каждой плоскости каждого СМ отно-

Плоскость	CM00	CM01	CM02	CM03	CM04	CM05	CM06	CM07
1	-11.21	-3.54	-14.59	-2.03	-6.97	-1.32	-8.18	2.11
2	-2.96	-2.20	-7.69	9.63	-14.93	7.48	-6.54	-2.45
3	-0.27	-3.55	-1.66	9.04	-7.90	-4.10	-8.87	0.33
4	-9.51	-1.07	3.03	9.86	-5.67	-3.41	-6.39	-0.46
5	-4.75	-2.11	3.69	3.71	-5.33	5.89	-4.00	0.89
6	-4.52	0.37	-4.25	6.57	-6.88	-3.52	-2.65	3.15
7	-7.23	-2.01	-9.94	-0.24	-6.41	-0.36	-1.13	1.38
8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
9	-1.51	1.01	-0.14	-0.37	-0.87	-5.18	0.23	-2.67
10	-4.83	-1.23	-1.83	4.20	0.77	-1.15	-0.21	-2.38
11	-5.59	-1.35	-0.88	2.50	0.07	-3.11	0.90	-5.85
12	-3.78	-0.21	-0.39	-0.49	0.52	-1.29	-0.86	-4.42
13	-4.66	2.54	-0.05	4.53	-1.64	-0.50	0.85	-3.70
14	-4.55	-2.55	-2.89	0.89	-1.59	-2.57	0.15	-3.47
15	-4.33	-1.84	0.29	-2.22	0.44	-2.81	-2.28	-3.18
16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Таблица 2.3 — Смещения опорных точек плоскостей CM

сительно номинальных положений.

В строках 1 - 8 таблицы записаны смещения опорных точек каждой плоскости каждого CM по координате "Z" – $Z_{\text{смещ}}$. В строках 9, 10 и 15, 16 записаны смещения по координате "X" ($X_{\text{смещ}}$) для CM00, CM01, CM06, CM07 соответственно. В строках 11 - 14 – смещения по координате "Y" ($Y_{\text{смещ}}$) для CM02, CM03, CM04 и CM05. Тогда координаты опорных точек преобразуются следующим образом:

Для CM00, CM01, CM06 и CM07:

$$X'_0 = X_0 + X_{\text{смещ}},$$
$$Z'_0 = Z_0 + Z_{\text{смещ}},$$

Для CM02, CM03, CM04 и CM05:

$$Y'_0 = Y_0 + Y_{\text{смещ}},$$
$$Z'_0 = Z_0 + Z_{\text{смещ}},$$

Ниже приведены формулы для расчета координат вершин трубок. Сначала были определены координаты центров трубок.

Для CM00-CM01:

$$X_{\text{центр}} = X'_0,$$
$$Y_{\text{центр}} = Y_0 - 60.00 \cdot t, \quad t = 0 \div 8,$$
$$Z_{\text{центр}} = Z'_0 + 9.95 \cdot i + 3.15 \cdot \left[\tfrac{i}{8}\right] + 4.29 \cdot \left[\tfrac{i}{16}\right], \quad i = 0 \div 255,$$

здесь t – номер плоскости, i – номер трубки в плоскости.

Для CM02-CM05:

$X_{\text{центр}} = X_0 + 60.00 \cdot t, \quad t = 0 \div 8,$
$Y_{\text{центр}} = Y_0',$
$Z_{\text{центр}} = Z_0' + 9.95 \cdot i + 3.15 \cdot \left[\frac{i}{8}\right] + 4.29 \cdot \left[\frac{i}{16}\right], \quad i = 0 \div 255,$

Для CM06-CM07:

$X_{\text{центр}} = X_0',$
$Y_{\text{центр}} = Y_0 + 60.00 \cdot t, \quad t = 0 \div 8,$
$Z_{\text{центр}} = Z_0' + 9.95 \cdot i + 3.15 \cdot \left[\frac{i}{8}\right] + 4.29 \cdot \left[\frac{i}{16}\right], \quad i = 0 \div 255.$

Далее были рассчитаны координаты вершин трубок.
Для CM00-CM01:

$X = X_{\text{центр}} + 3108.75 \cdot \left[\frac{q}{2}\right], \quad q = 0 \div 3,$

$Y = Y_{\text{центр}} + \frac{8.95}{2} \cdot (-1)^{\left(\left[\frac{q}{2}\right] - q \mod 2\right)}, \quad q = 0 \div 3,$

$Z = Z_{\text{центр}} + \frac{8.95}{2} \cdot (-1)^{p+1}, \quad p = 0 \div 1,$

здесь q – номер точки в плоскости, $p = 0$ – нижняя плоскость трубки, $p = 1$ – верхняя плоскость трубки. Для CM02-CM05:

$X = X_{\text{центр}} + \frac{8.95}{2} \cdot (-1)^{\left(\left[\frac{q}{2}\right] - (q \mod 2) + 1\right)}, \quad q = 0 \div 3,$

$Y = Y_{\text{центр}} + 3108.75 \cdot \left[\frac{q}{2}\right], \quad q = 0 \div 3,$

$Z = Z_{\text{центр}} + \frac{8.95}{2} \cdot (-1)^{p+1}, \quad p = 0 \div 1,$

Для CM06-CM07:

$X = X_{\text{центр}} - 3108.75 \cdot \left[\frac{q}{2}\right], \quad q = 0 \div 3,$

$Y = Y_{\text{центр}} + Y_0 + \frac{8.95}{2} \cdot (-1)^{\left(\left[\frac{q}{2}\right] - (q \mod 2) + 1\right)}, \quad q = 0 \div 3,$

$Z = Z_{\text{центр}} + \frac{8.95}{2} \cdot (-1)^{p+1}, \quad p = 0 \div 1.$

На рисунке 2.7 показано, как пронумерованы точки в трубке.

Внутри трубок анодная нить поддерживается шестью холдерами (рисунок 2.6 слева) – пластмассовыми пластинами толщиной 5 мм. Холдеры разнесены на расстояние 485 мм друг от друга, первый и последний холдеры находятся на расстоянии 341 мм от края трубки.

Если трек частицы проходит между трубками или между камерами, тогда плоскость не регистрирует его. Аналогично с холдерами: если трек проходит через холдер, плоскость его не регистрирует.

Для учета внутренней структуры CM было написано две функции на языке C++. Первая рассчитывает координаты вершин всех трубок и холдеров с учетом смещения

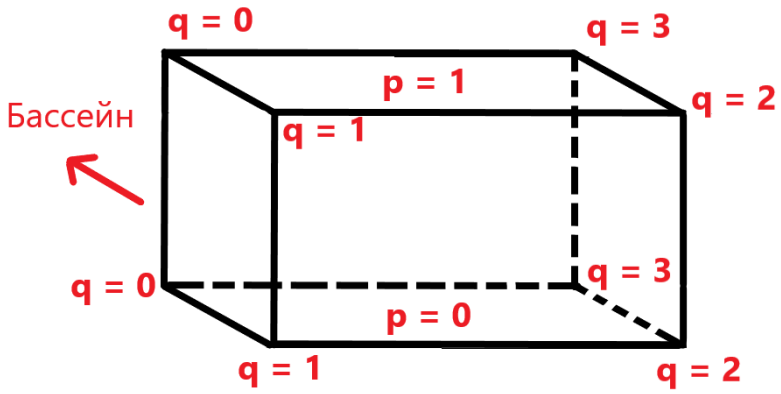


Рисунок 2.7 — Номера вершин трубки

плоскостей относительно номинальных положений и сохраняет эти координаты в соответствующие массивы. Вторая определяет, через какую камеру проходит трек частицы в каждой плоскости, и поочередно проверяет пересечение треком трубок и холдеров. Для каждого СМ функция запускается отдельно.

Считается, что СМ зарегистрировал частицу, если сработало не менее двух четных и двух нечетных плоскостей, а в сумме – не менее пяти. Если условие выполнено функция возвращает значение “true”, если нет – “false”.

2.4.3 УЧЕТ ОТКЛЮЧЕННЫХ ПОЛУКАМЕР

С течением времени некоторые трубки выходят из строя из-за утечки газа или неисправности электроники. Полукамеры, в которых много неработающих трубок, отключают. По окончании каждого текущего экспериментального набора в специальные файлы записывается информация о количестве срабатываний стрипов каждой плоскости для всех СМ – N_{LAM}. Обработав эти файлы, можно построить график числа срабатываний Y-стрипов. На рисунке 2.8 представлен пример такого графика для нулевой плоскости СМ00 для одного набора.

Для проверки работоспособности полукамер была написана специальная программа. Для каждой плоскости СМ вычисляется среднее значение числа срабатываний стрипов ($\langle N_{\mathrm{LAM}} \rangle$). Значение N_{LAM}, соответствующее каждой трубке, сравнивается с половиной среднего значения. Если N_{LAM} меньше, то считается что трубка не работает, если больше – работает. Если в полукамере не работают все 8 трубок, считается, что полукамера отключена. Информация о состоянии полукамер записывается в специальный массив в виде нулей и единиц:“0” – полукамера отключена, “1” – полукамера работает, массив содержит информацию по всем обрабатываемым сериям и наборам.

Учет неработающих трубок в программе расчета светосилы реализован следующим образом: задается номер набора, который считается основным, далее для моделированного трека определяется номер полукамеры в каждой плоскости. Перед проверкой



Рисунок 2.8 — Число срабатываний стрипов N_{LAM}

срабатывания плоскости СМ, описанной в предыдущем пункте, проверяется, является полукамера работающей или нет. В первом случае проверяется срабатывание плоскости с учетом внутренней структуры, во втором – плоскость считается несработавшей.

2.5 ПРОВЕРКА КОРРЕКТНОСТИ ВВЕДЕНИЯ ВНУТРЕННЕЙ СТРУКТУРЫ

Необходимо проверить корректность введения внутренней структуры СМ.

Для проверки корректности учета промежутков между полукамерами, камерами и отключенных полукамер в моделировании можно построить зависимость нормированного количества моделированных треков, отобранных по зенитному углу в интервале $87.5^o < \theta < 90^o$, от координаты "Z" и сравнить с аналогичной зависимостью для экспериментальных событий. Гистограмма записана с шагом 5 мм по "Z". Сравнение представлено на рисунке 2.9.

Проверить правильность введения холдеров можно построив аналогичную зависимость от координаты "X", отобрав треки во азимутальному углу в интервале $87.5^o < \phi < 92.5^o$. Результаты сравнения представлены на рисунке 2.10. Гистограмма записана с шагом 5 мм по "X".

Данные проверки проводятся на парах СМ0-СМ7 и СМ1-СМ6, так как они да-

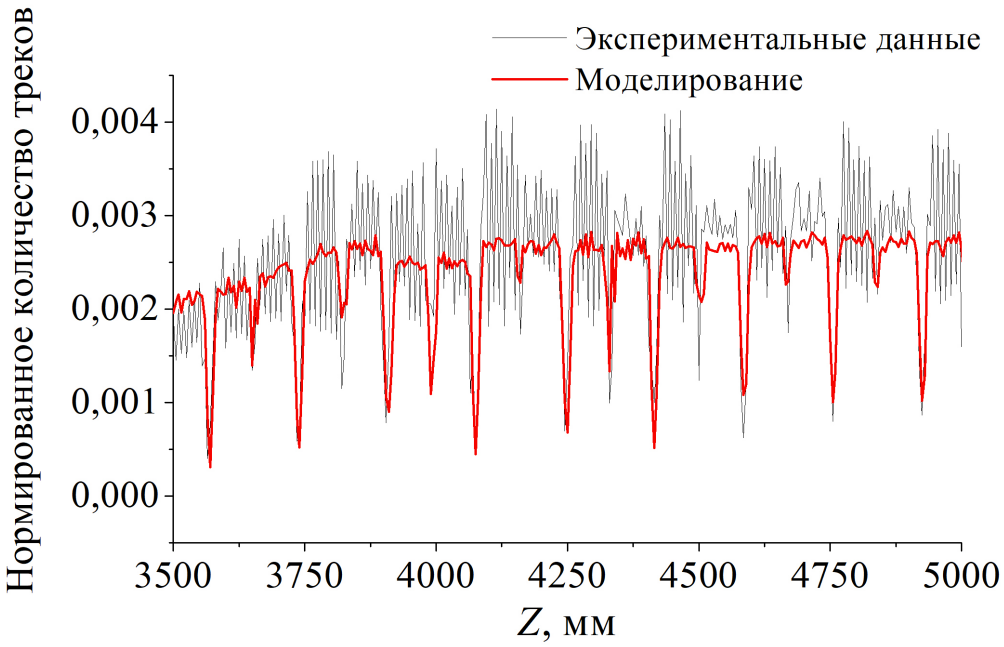


Рисунок 2.9 — Сравнение количества моделированных и экспериментальных треков по координате Z для СМ00

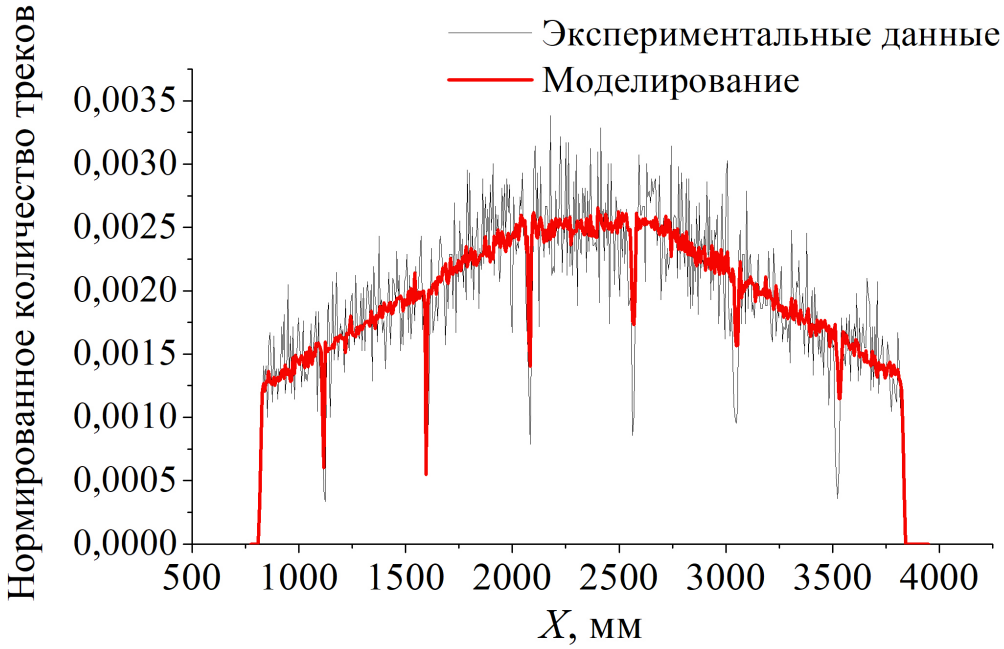


Рисунок 2.10 — Сравнение количества моделированных и экспериментальных треков по координате X для СМ00

ют возможность отобрать треки мюонов, практически перпендикулярные к плоскостям СМ. По представленным графикам видно, что моделирование корректно отражает внутреннюю структуру СМ.

2.6 СВЕТОСИЛА

По формуле (2.18) была рассчитана светосила пары СМ01-СМ02. На графиках 2.11 и 2.12 представлены полученные значения светосилы с интервалом 1^o по азимутальному и зенитному углам как с учетом внутренней структуры СМ, так и без .

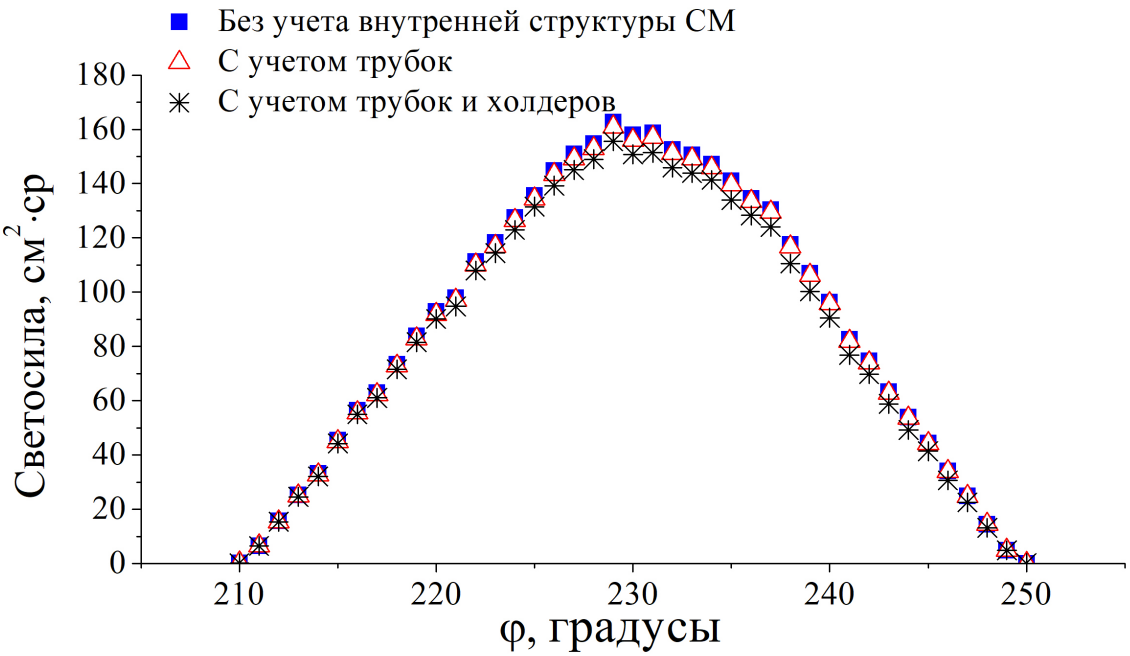


Рисунок 2.11 — Зависимость светосилы от азимутального угла

Погрешность светосилы вычислена по формуле:

$$\Delta S\Omega(\theta_i,\varphi_i,E_{\min_i}) =$$

$$C\sqrt{\left(\frac{\partial S\Omega(\theta_i,\varphi_i,E_{\min_i})}{\partial N_{\text{рег}}(\theta_i,\varphi_i,E_{\min_i})}\right)^2 N_{\text{рег}}(\theta_i,\varphi_i,E_{\min_i}) + \left(\frac{\partial S\Omega(\theta_i,\varphi_i,E_{\min_i})}{\partial N_{\text{нерег}}}\right)^2 N_{\text{нерег}}} = \ldots$$

$$\ldots = C\frac{\sqrt{N_{\text{мод}}\cdot N_{\text{рег}}(\theta_i,\varphi_i,E_{\min_i})(N_{\text{мод}}-N_{\text{рег}}(\theta_i,\varphi_i,E_{\min_i}))}}{(N_{\text{мод}})^2}, \quad (2.17)$$

так как

$$S\Omega(\theta_i,\varphi_i,E_{\min_i}) = C\frac{N_{\text{рег}}(\theta_i,\varphi_i,E_{\min_i})}{N_{\text{мод}}} = C\frac{N_{\text{рег}}(\theta_i,\varphi_i,E_{\min_i})}{N_{\text{нерег}}+N_{\text{рег}}(\theta_i,\varphi_i,E_{\min_i})}, \quad (2.18)$$

где $N_{\text{рег}}(\theta_i,\varphi_i,E_{\min_i})$ – количество треков частиц, зарегистрированных парой СМ с учетом выполнения перечисленных выше условий в данных угловых и энергетических интервалах; $N_{\text{нерег}}$ – количество незарегистрированных треков; $N_{\text{мод}}$ – общее количество

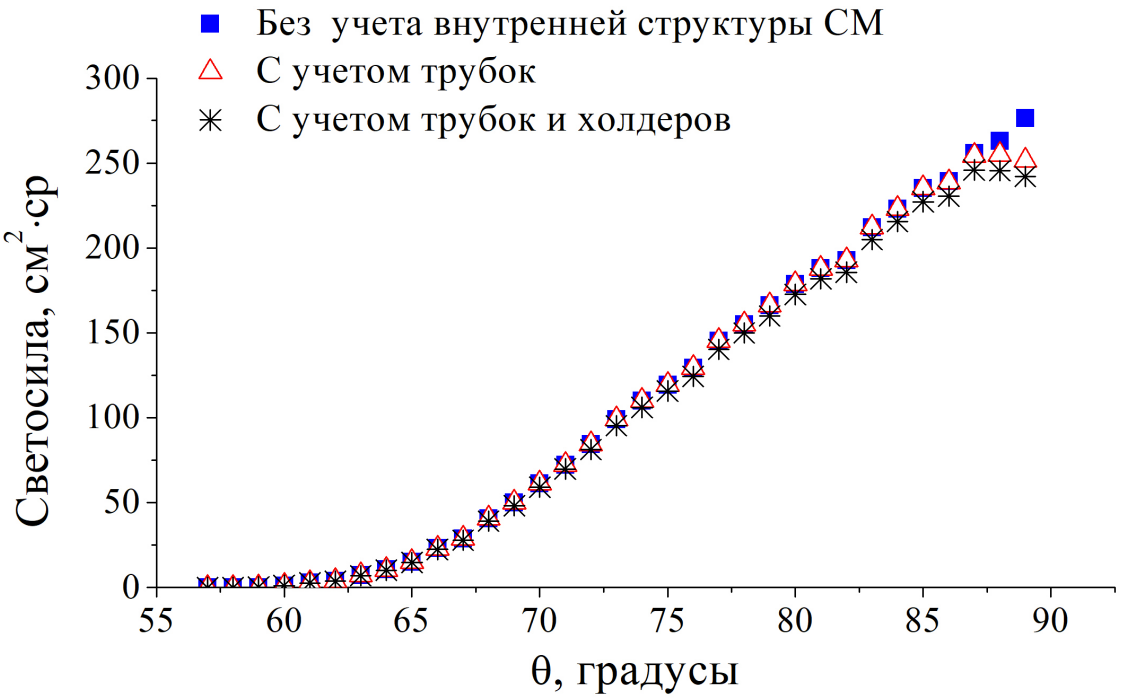


Рисунок 2.12 — Зависимость светосилы от зенитного угла

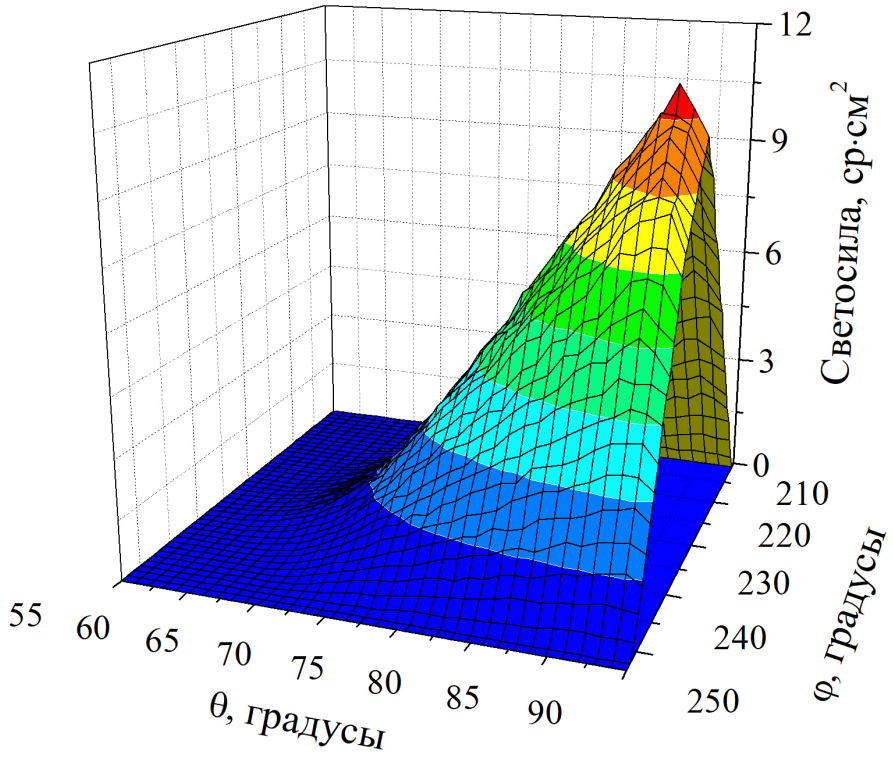


Рисунок 2.13 — Зависимость светосилы от зенитного и азимутального углов

моделированных треков. $C = S_{plane} \cdot \Delta\varphi \cdot \Delta\cos(\theta) \cdot \cos(\widehat{\vec{n}, \vec{r}})$.

На графиках представлены значения светосилы с погрешностью, она укладывается в размеры точек.

3 ИНТЕГРАЛЬНАЯ ИНТЕНСИВНОСТЬ

Проанализировав экспериментальные данные и рассчитав светосилу установки, удалось измерить интегральную интенсивность потока мюонов для пары CM01-CM02. Интенсивность посчитана по формуле (1.1). На графике 3.1 представлена зависимость интегральной интенсивности от зенитного угла для пороговой энергии $E_{\min} = 1.55$ ГэВ, погрешность интенсивности укладывается в размеры точек. Линиями обозначены средние арифметические взвешенные значения. Они рассчитываются для каждого зенитного угла по формуле:

$$\langle I \rangle = \frac{\sum_\varphi I_\varphi / {\Delta I_\varphi}^2}{\sum_\varphi 1 / {\Delta I_\varphi}^2}, \tag{3.1}$$

где I_φ – значение интенсивности для азимутального угла φ; ΔI_φ – его погрешность.

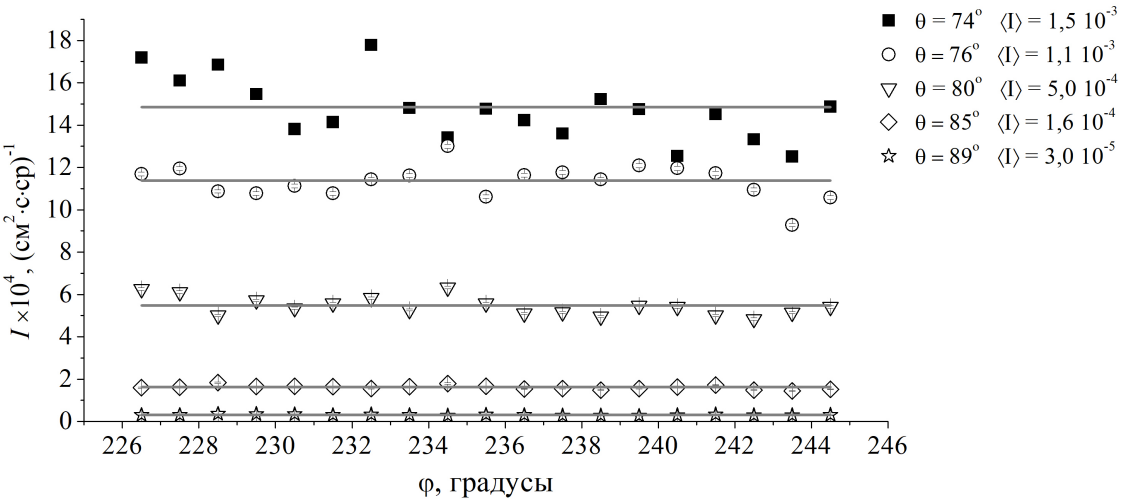


Рисунок 3.1 — Зависимость интегральной интенсивности от зенитного угла для пороговой энергии 1,55 ГэВ

На данном этапе выполнен предварительный расчет интенсивности и ее погрешности, в дальнейшем эти значения будут уточнены.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе получены следующие результаты.

- Написана функция, моделирующая случайный трек частицы.
- Написана функция, рассчитывающая координаты всех объемов, составляющих внутреннюю структуру СМ, с учетом смещений относительно номинальных положений “SmeshDCR”.
- Проверена корректность введения внутренней структуры в моделирование детектора.
- Написана функция, проверяющая, может ли СМ зарегистрировать трек с учетом внутренней структуры СМ, условия BOUND и отключенных полукамер.
- Рассчитана светосила пары CM01-CM02, построены распределения светосилы по зенитному и азимутальному углам.
- Измерена интенсивность потока мюонов для пары CM01-CM02.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *В.В.Борог.* Основы мюонной диагностики: Учебное пособие. — М.: МИФИ, 2008.
2. Координатный детектор для исследования горизонтального потока космических лучей / Н.С.Барбашина [и др.] // Приборы и техника эксперимента. — 2000. — № 6. — С. 20—24.
3. Уникальная научная установка «Экспериментальный комплекс НЕВОД». — 2021. — Дата обращения 24.05.2021. http://ununevod.mephi.ru/ru/.
4. *А.Н.Дмитриева.* Интенсивность потока и энергетический спектр мюонов космических лучей под большими зенитными углами. Кандидатская диссертация, НИЯУ МИФИ / А.Н.Дмитриева. — НИЯУ МИФИ, 2008.
5. *В.В.Подбельский.* Язык C++. — М.: Финансы и статистика, 2001.
6. *Matsumoto M., Nishimura T.* Mersenne Twister: A 623-Dimensionally Equidistributed Unifor Pseudo-Random Number Generator // ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation. — 1998. — Т. 8, № 1. — С. 3—30.