НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»

Виртуальный генератор потока атмосферных мюонов в варьируемом диапазоне энергий до 100 ТэВ

А.В. СКОБЛЯКОВ,

Д.С. Колесников, А.С. Загоруйко, А.В. Канцырев, А.А. Голубев

НИЦ Курчатовский институт

2026

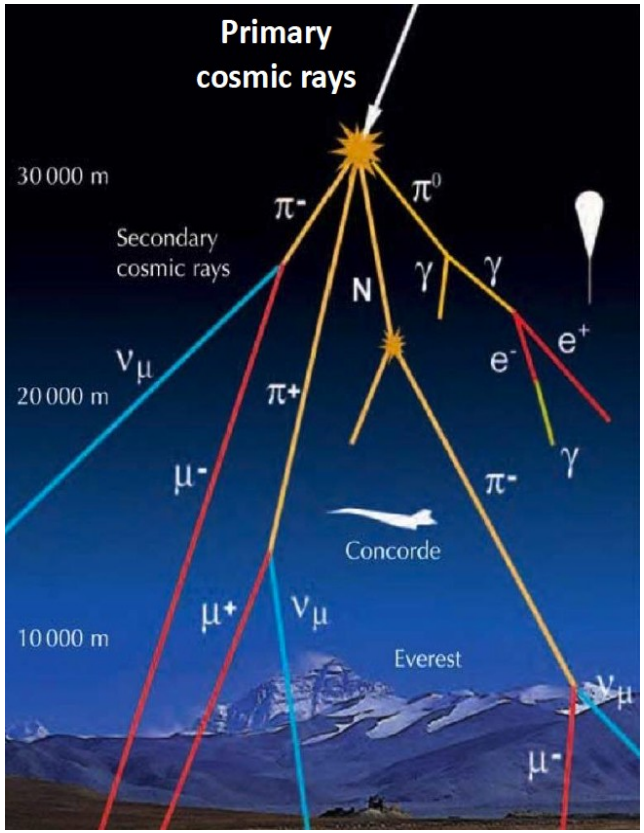
Цель: разработать универсальный генератор потока атмосферных мюонов (+электронов) над уровнем моря применимый для калибровки детекторов частиц в экспериментах в области физики высоких энергий или моделирования работы мюонных детекторов для прикладных задач, например геофизики.

Возможности:

- **Диапазон $0 < E < 10^5$ ГэВ**
- **Установка энергетической отсечки***
- **Простая интеграция в любую среду Монте-Карло моделирования**
- **Возможность расчета на суперкомпьютере***

Происхождение мюонов в результате взаимодействия космического излучения с атмосферой земли

Спектр первичных
космических протонов (>90%)



Интенсивность потока мюонов на уровне моря ~ ~7500 мюонов/мин/м²

*отсутствует в библиотеке CRY (Chris Hagmann et al., Cosmic-ray Shower Library (CRY), LLN Laboratory, 2012)

Учет высокоэнергетической части спектра потока мюонов
16 < E < 10^5 ГэВ

*

$$\frac{dI(\theta,\phi,p)}{dp}=\frac{18(p+5)}{(p\cos\theta+145)(p+2.7\,sec\,\theta)^{2.7}(p+5\,sec\,\theta)}$$

где p - момент [GeV/c];

θ - зенитный угол;

ϕ - азимутальный угол;

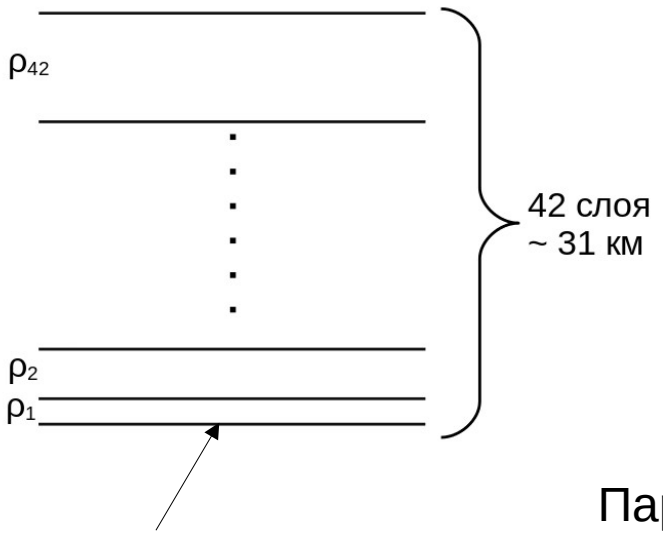
I - интенсивность.

Диапазон энергий 1 < E < 10^5 ГэВ
Диапазон углов 0° < θ < 85°

*L. N. Bogdanova et al., Cosmic muon flux at shallow depths underground, 2006, Physics of Atomic Nuclei 69(8)

Учет низкоэнергетической части спектра потока мюонов 0 < E < 16 ГэВ (+ учет электронной компоненты)

Модель атмосферы* в среде Geant4



Регистрация потока mu±, e±

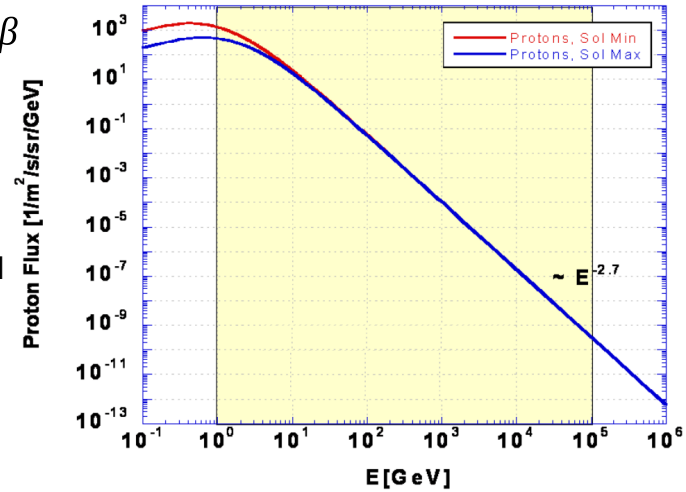
доля электронной компоненты: ~25 %

Спектр космических протонов над атмосферой**

$$I(E) = A(E+B)^{\alpha} E^{\beta}$$

где I - интенсивность [p / м^2 / стр / с / ГэВ];

E - кинетическая энергия протонов [GeV].



Параметры для спектра космических протонов.

	A	B (GeV)	α	β
Максимальная солнечная активность	18000	0.92	-4.00	1.25
Минимальная солнечная активность	18000	1.61	-3.83	1.08

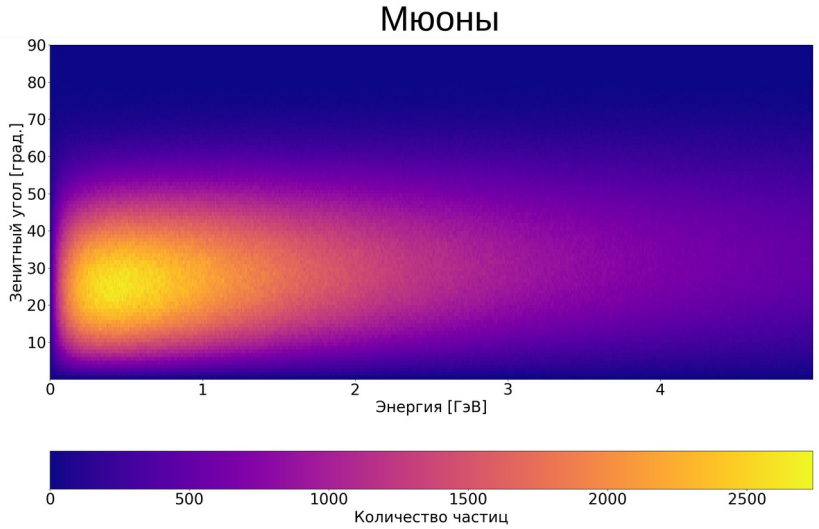
Использовались средние значения

*1976 US Atmosphere Model, URL - https://www.ngdc.noaa.gov/stp/space-weather/online-publications/miscellaneous/us-standard-atmosphere-1976/us-standard-atmosphere_st76-1562_noaa.pdf

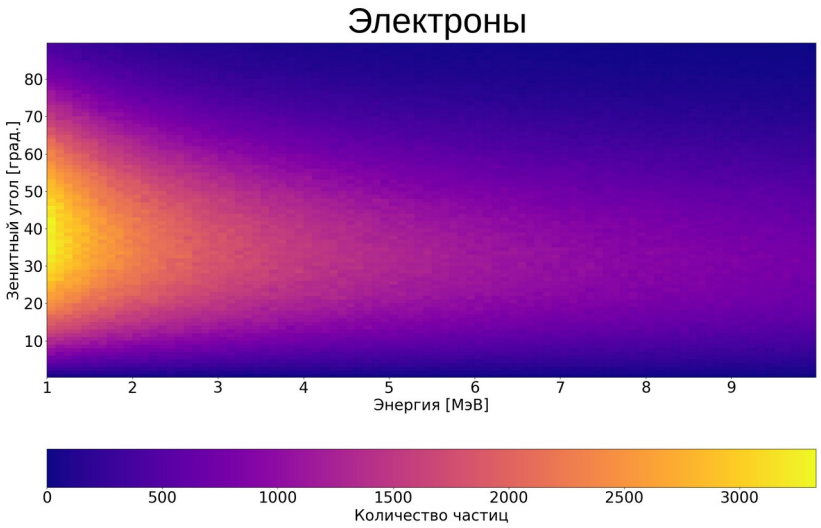
**P. Papini, C. Grimani,and S.A. Stephens, Nuovo Cim C 19, 367 (1996)

Результаты моделирования (при использовании 2000 ядер)

(a)

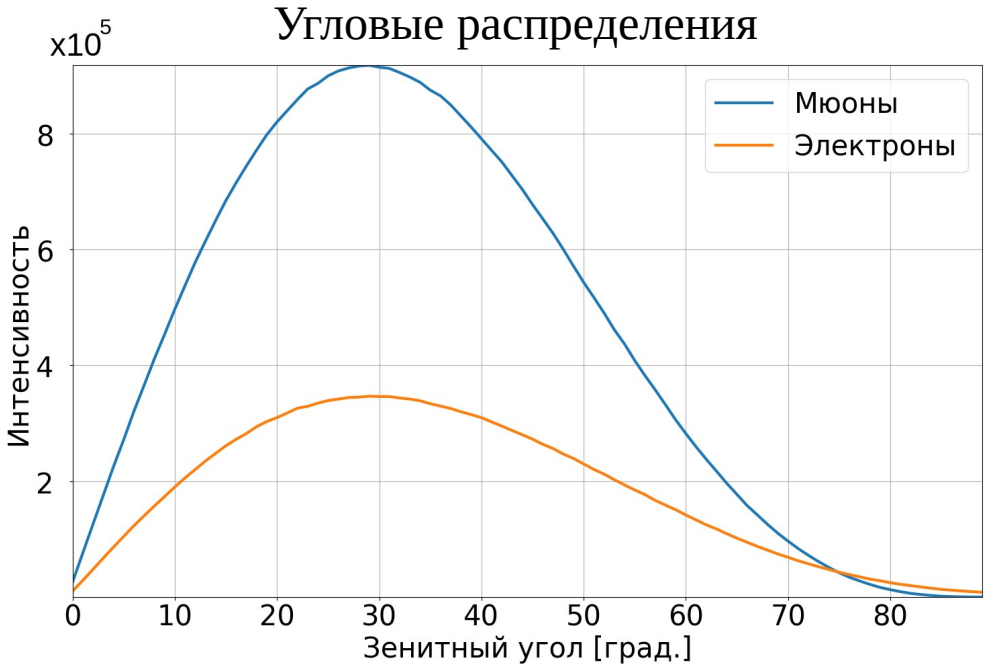


(b)



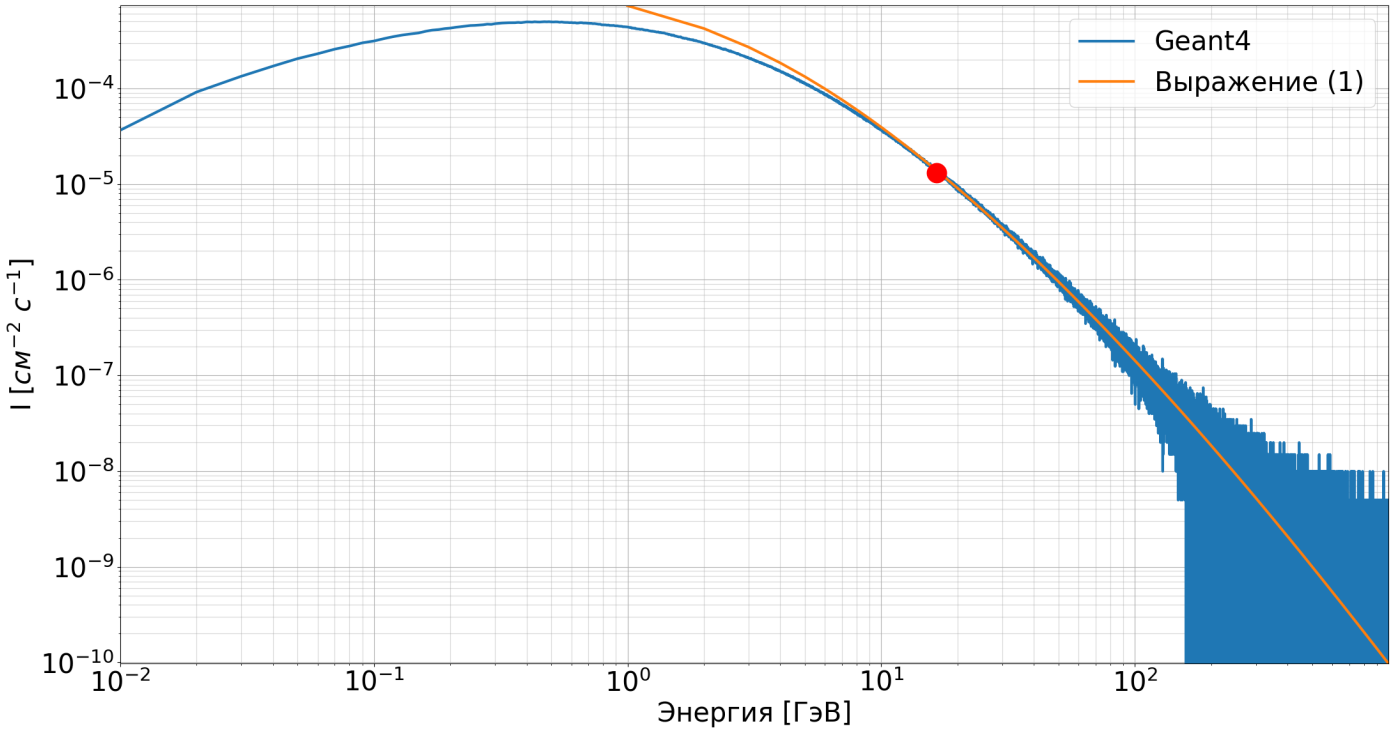
(a) - рассчитанное в модели распределение интенсивности потока мюонов в зависимости от энергии и от зенитного угла.

(b) - для потока электронов. Для лучшей визуализации распределение представлено с ограничением по энергиям.



Сшивка высокоэнергетичной и низкоэнергетичной частей спектра

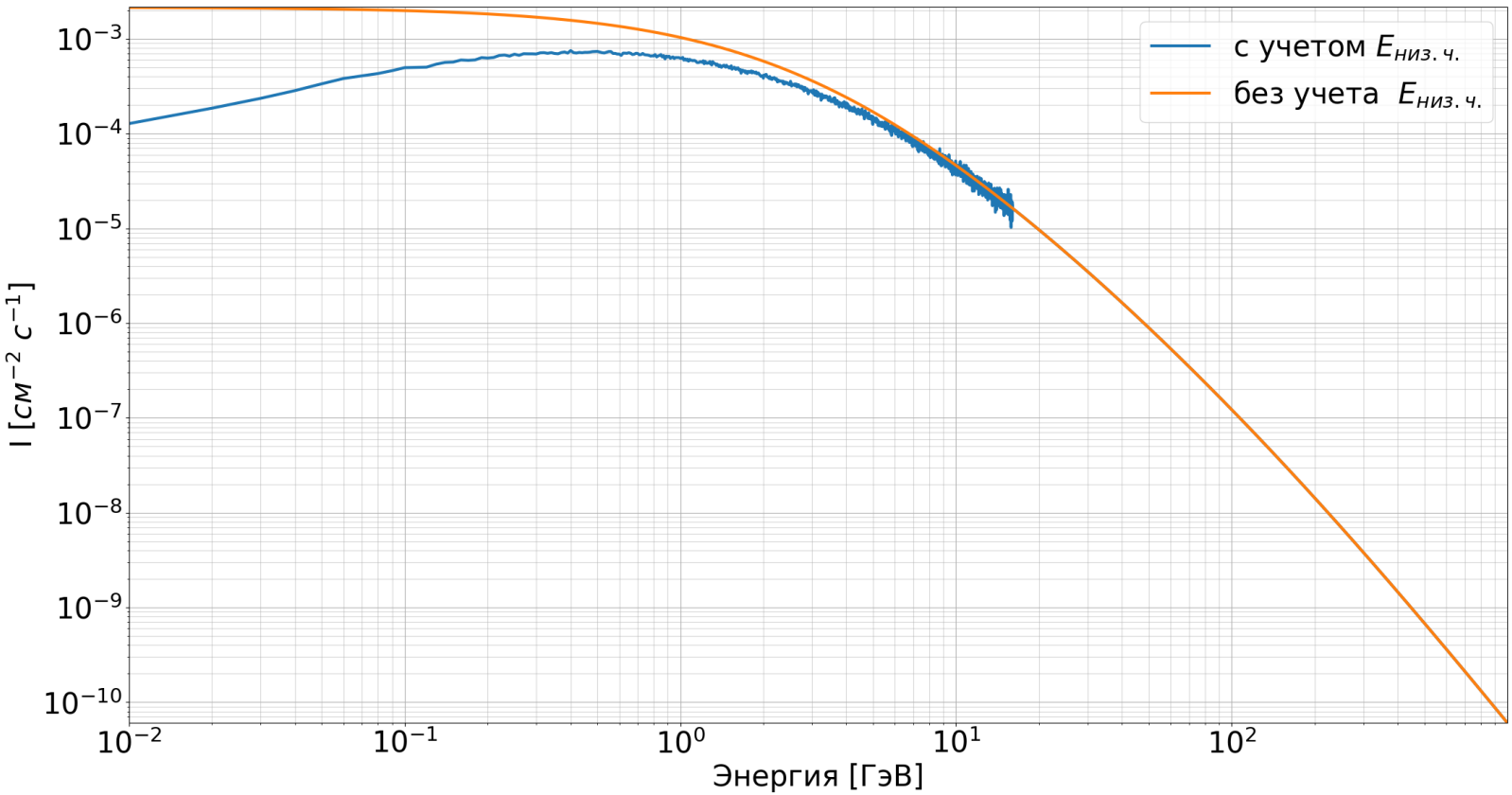
Сравнение спектра потока мюонов, полученных с помощью выражения* , и с помощью Монте-Карло модели в среде Geant4. Красной точкой обозначено начало расхождения спектров. Справа наблюдаются сильные флуктуации из-за малой статистики мюонов.



$$^{*}\frac{dI(\theta,\phi,p)}{dp}=\frac{18(p+5)}{(p\cos\theta+145)(p+2.7\,sec\,\theta)^{2.7}(p+5\,sec\,\theta)}$$

Сравнение с *

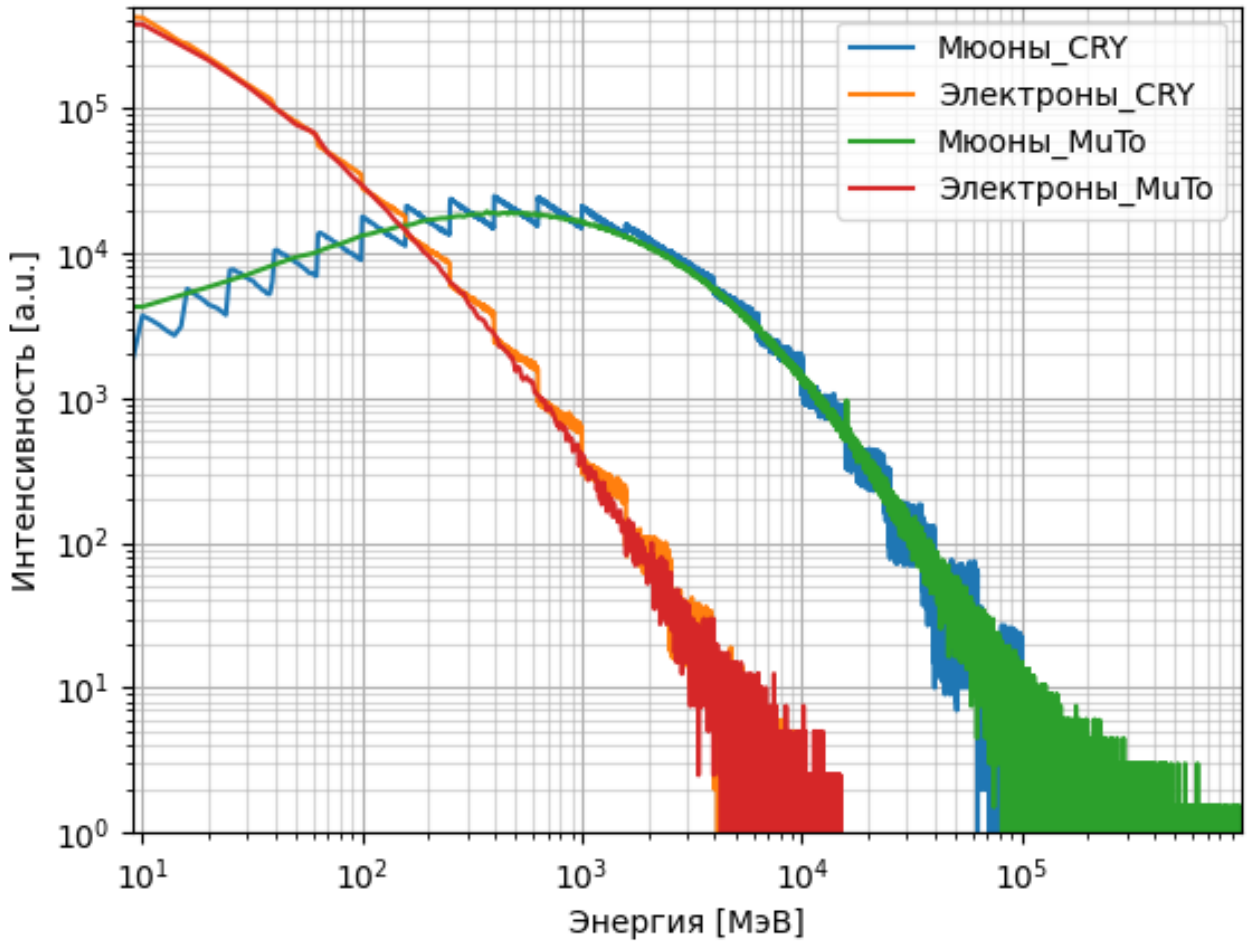
Сравнение спектра потока мюонов при зенитном угле 30 градусов при учете низкоэнергетичной части и при отсутствии данного учета.



$$^{*}\frac{dI(\theta,\phi,p)}{dp}=\frac{18(p+5)}{(p\cos\theta+145)(p+2.7\,sec\,\theta)^{2.7}(p+5\,sec\,\theta)}$$

Сравнение с генератором CRY*

Сравнение спектров потоков мюонов и электронов, полученных с помощью генератора CRY и MuTo.



*See https://nuclear.llnl.gov/simulation/main.html for CRY.

Учет энергетического порога

1. Вычисляется кумулятивная функция распределения F(E) путём численного интегрирования распределения потока мюонов I(E)* методом трапеций. В данном случае в созданном генераторе она представляет собой массив для каждого зенитного угла:

$$F(E)=\left[\int_{E_{порог}}^{E_{порог}+1} I(E)\,dE,\ \int_{E_{порог}}^{E_{порог}+2} I(E)\,dE,\ \ldots,\ \int_{E_{порог}}^{E_{max}} I(E)\,dE\right]$$

где $E_{порог}$ - задаваемый энергетический порог [от 0 до 10^5 ГэВ], E_{max} - максимальная задаваемая энергия в потоке мюонов (до 10^5 ГэВ).

2. Генерируется случайное число X на интервале [a,b], где b=max(F(E)).

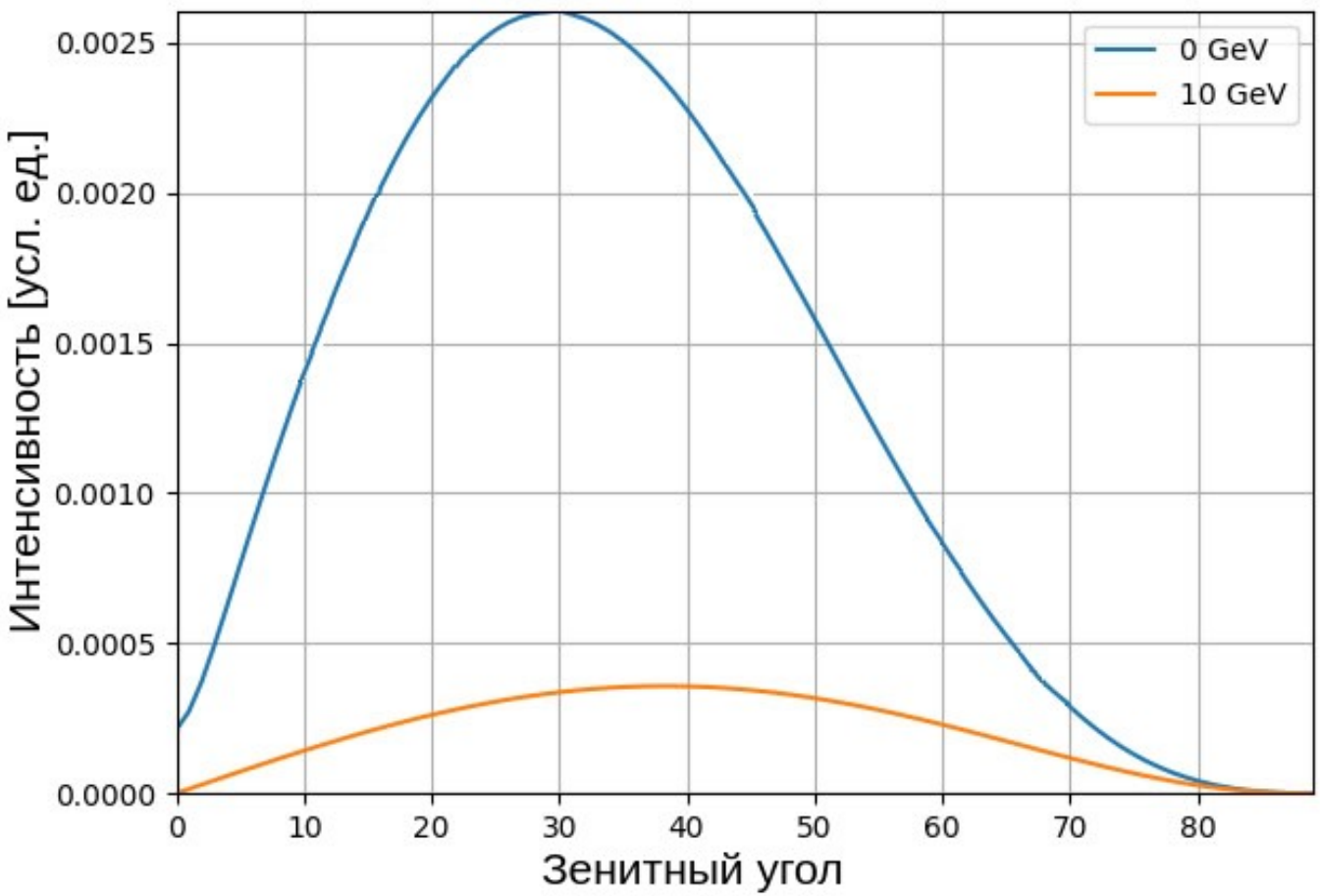
3. Находятся два соседних значения x_1 и x_2 в массиве кумулятивной функции, между которыми лежит X.

4. С помощью линейной интерполяции определяется искомая энергия.

$$^{*}\frac{dI(\theta,\phi,p)}{dp}=\frac{18(p+5)}{(p\cos\theta+145)(p+2.7\,sec\,\theta)^{2.7}(p+5\,sec\,\theta)}$$

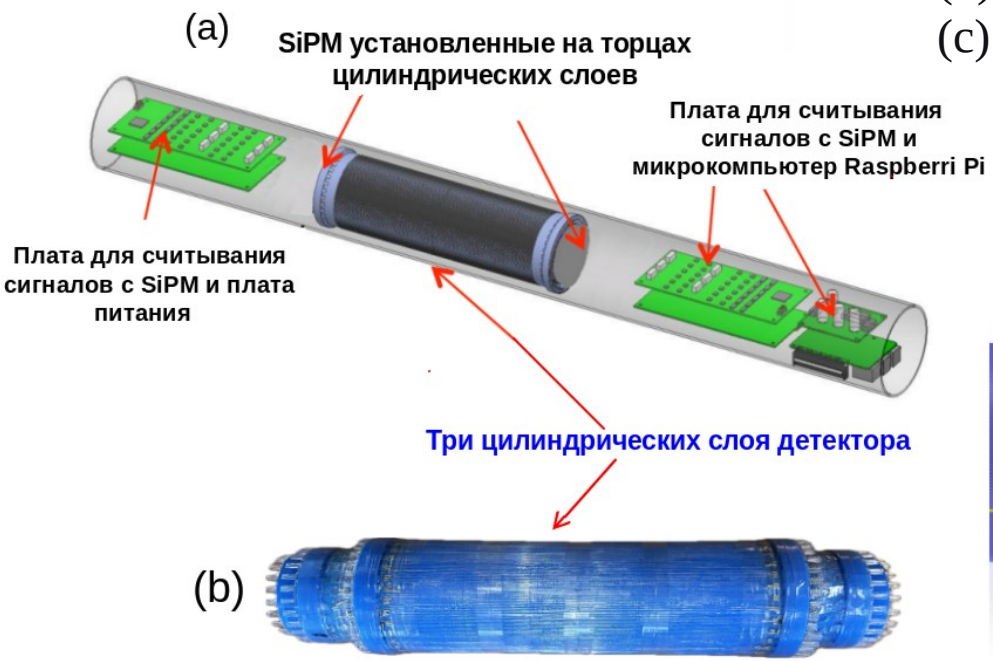
Учет энергетического порога

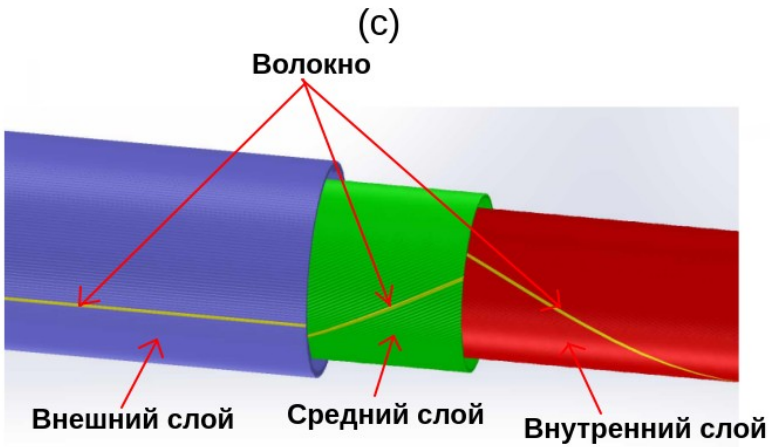
Сравнение углового распределения потока мюонов при различных энергетических порогах.



Компактный мюонный томограф* (валидация генератора)

(a) -схема мюонного детектора.
(b) - фотография активносй части детектора.
(c) - схема расположения волокон





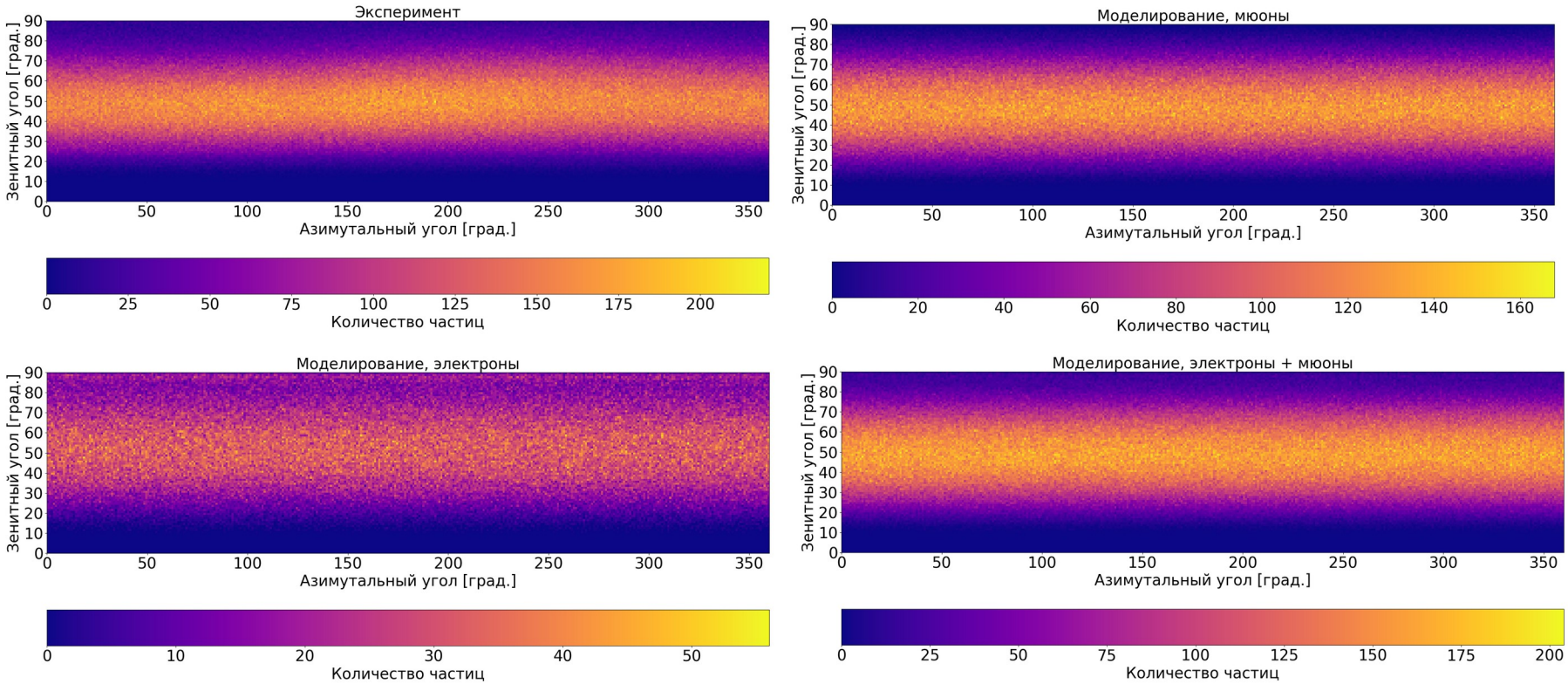
Параметры (2026):

- **Длина – 1 м (длина детектирующей части 250 мм)**
- **Диаметр детектора – 10 см**
- **Масса ~ 5 кг**
- **Площадь регистрации ~ 0.04 м^2**
- **Сцинтиллирующее волокно диаметром – 1 мм**
- **Угловое разрешение ~ 20 мрад**
- **Диапазон регистрации по азимутальному углу – 360°**
- **Диапазон регистрации по зенитному углу – 20-90°**

***A.V. Kantsyrev и др, Compact cylindrical muon detectors for geophysical researches and industrial applications, конференция ЯДРО-2025**

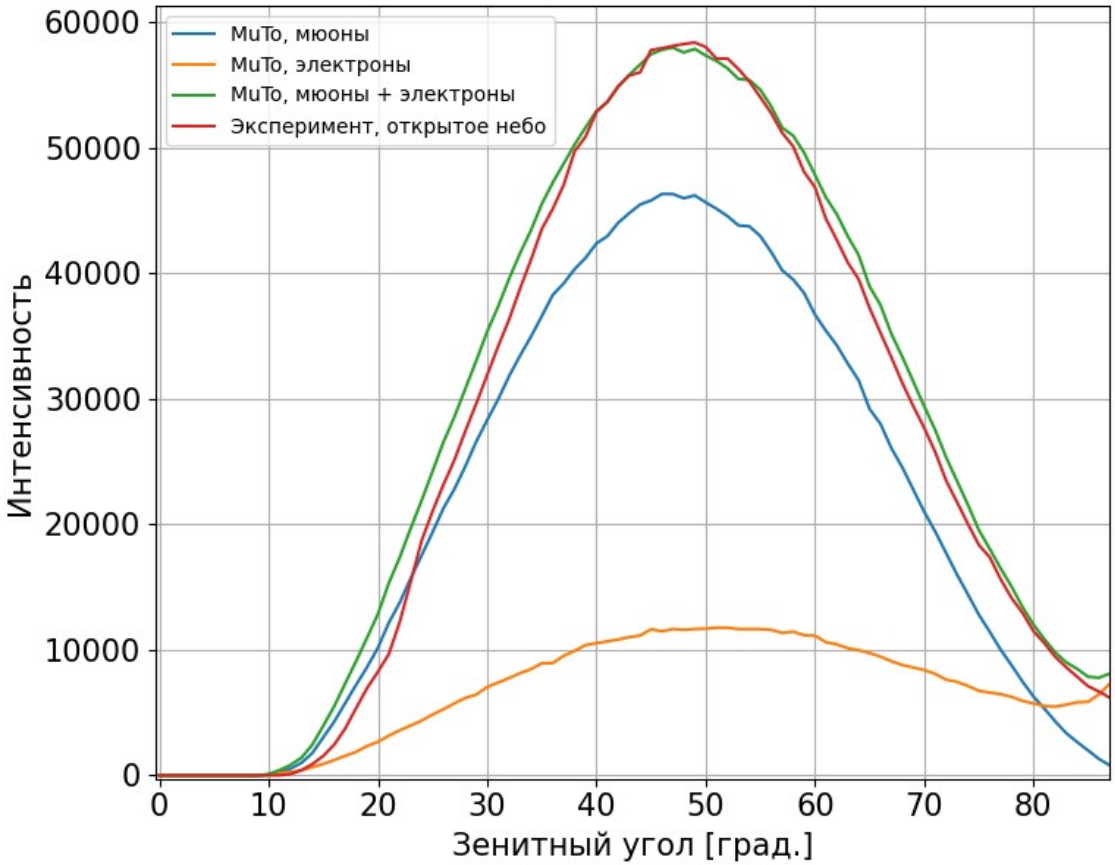
Сравнение с экспериментом

Модельное и экспериментальное распределения числа мюонов и электронов в зависимости от зенитного и азимутального углов



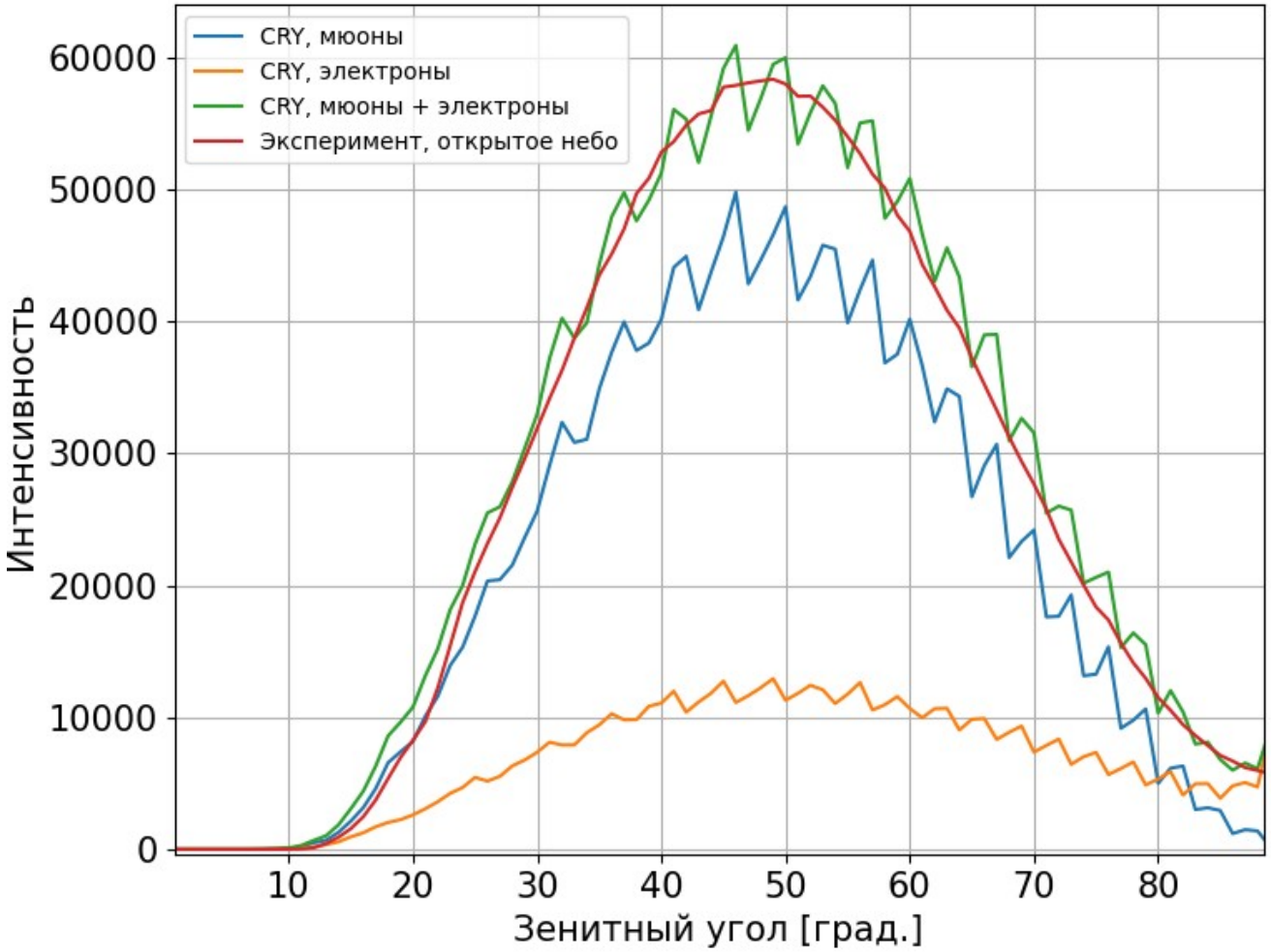
Сравнение CRY с экспериментом

Модельное (MuTo) и экспериментальное распределения числа мюонов и электронов в зависимости от зенитного и азимутального углов



Сравнение CRY с экспериментом

Модельное (CRY) и экспериментальное распределения числа мюонов и электронов в зависимости от зенитного и азимутального углов



- **Интеграция в любую среду Монте-Карло моделирования**

Импортировать библиотеку
#include "Generator.hh"

Задать сам генератор мюонов
R - радиус исследуемой области в см. cut_E - энергетический порог, ниже которого генерация потока мюонов будет запрещена, что значительно уменьшает время расчета.
Generator *gen = new Generator(R, cut_E);

Генерация вектора направления мюона.
vector <double> vec_dir = gen->get_dir();

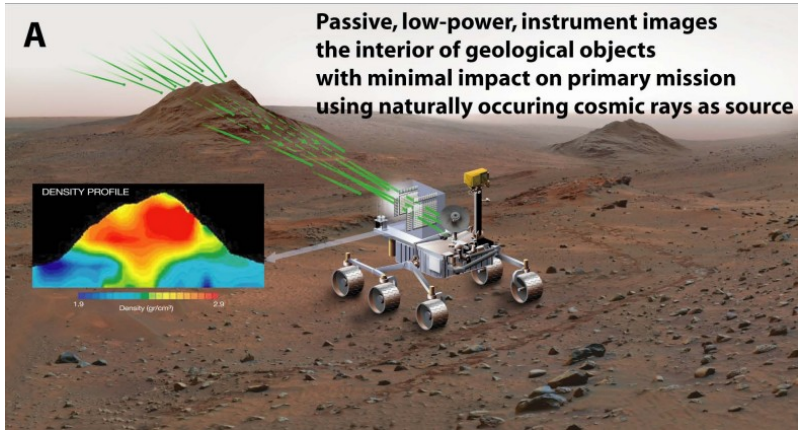
Генерация начального положения мюона на круге с заданным радиусом R
vector <double> vec_pos = gen->get_pos();

Расчет энергии мюона
double E = gen->get_E();

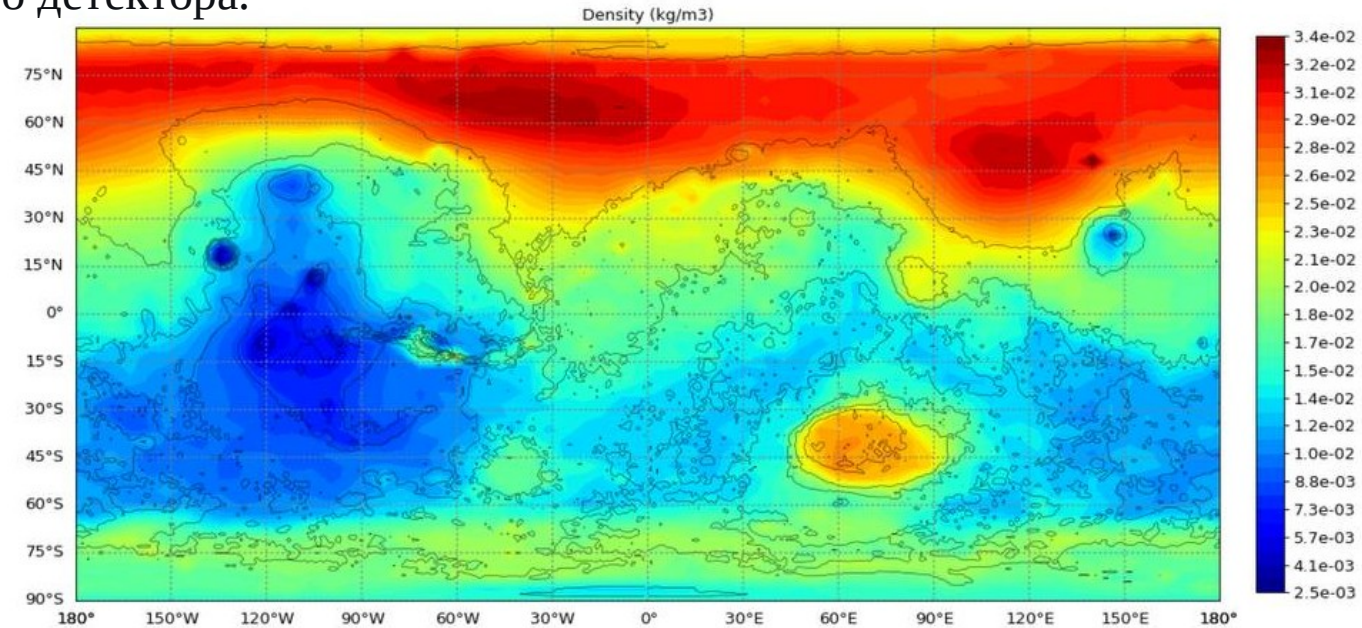
Рассчет полного времени, прошедшего с начала генерации первого мюона
double time = gen->get_time();

Планы

1. Создание виртуального генератора потока мюонов и заряженных частиц (в том числе электронов, протонов, пионов и каонов) на поверхности Марса.



2. Количественные оценки пространственного и плотностного разрешения мюонной радиографии для геологических объектов Марса при использовании цилиндрического компактного мюонного детектора.



• Выводы

Разработан универсальный виртуальный генератор потока мюонов и электронов MuTo над уровнем моря применимый для калибровки детекторов частиц в экспериментах в области физики высоких энергий или моделирования работы мюонных детекторов для прикладных задач, в том числе геофизики. Созданный генератор обладает простой интеграцией в любую среду Монте-Карло моделирования. Отличительной особенностью созданного генератора является возможность моделировать поток мюонов в варьируемом диапазоне энергий от E_0 до 10^5 ГэВ, где E0 - варьируемый энергетический порог, что значительно сокращает время моделирования и калибровки детекторов на больших глубинах в сравнении с традиционными генераторами. Была проведена валидация созданного генератора MuTo при сравнении модельного углового распределения потока мюонов и электронов с экспериментальным, а также при сравнении с генератором CRY.