

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ МИФИ»  
(НИЯУ МИФИ)

УДК 539.1.01

ОТЧЁТ  
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

**Использование RYTHIA для ядро-ядерных взаимодействий при  
моделировании широких атмосферных ливней в CORSIKA**

Научный руководитель

проф., д.ф.-м.н.

\_\_\_\_\_ А. А. Петрухин

Студент

\_\_\_\_\_ Р. В. Николаенко

Москва 2022

# Содержание

<b>1</b>	<b>Введение</b>	<b>3</b>
1.1	Программа CORSIKA в экспериментах в физике космических лучей . . . . .	3
1.2	Генератор PYTHIA . . . . .	5
1.3	Цель работы . . . . .	5
<b>2</b>	<b>Интерфейс CORSIKA-PYTHIA</b>	<b>6</b>
2.1	PYTHIA как генератор столкновений тяжелых ионов . . . . .	6
2.2	Создание интерфейса между генератором PYTHIA и программой CORSIKA . . . . .	9
2.3	Моделирование ШАЛ при помощи интерфейса CORSIKA-PYTHIA в обычном режиме . . . . .	12
2.4	Моделирование с модифицированными параметрами . . . . .	14
<b>3</b>	<b>Заключение</b>	<b>24</b>
	<b>Список использованных источников</b>	<b>25</b>

# 1 Введение

## 1.1 Программа CORSIKA в экспериментах в физике космических лучей

Программа CORSIKA [1] (COsmic Ray SIMulation for KAscade) является самым распространенным инструментом для моделирования образования и развития широких атмосферных ливней (ШАЛ) в результате взаимодействия первичных космических лучей (ПКЛ) с энергиями вплоть до  $10^{20}$  эВ с атмосферой Земли. Сопоставление результатов моделирования с данными наземных экспериментов позволяет сделать выводы об энергетическом спектре и массовом составе ПКЛ. Все расчеты, проведенные при помощи CORSIKA, сильно модельно зависимы, так как изучение характеристик адронных взаимодействий при столь высоких энергиях возможно лишь косвенным образом, и для их описания приходится экстраполировать зависимости, полученные на коллайдерных экспериментах. Программа CORSIKA обладает рядом встроенных моделей адронных взаимодействий для высоких и низких энергий. Пользователь сам выбирает, какую модель использовать в расчетах.

Особый интерес представляют первые ядро-ядерные взаимодействия, которые могут оказывать значительное влияние на развитие ливня и множественность регистрируемых вблизи поверхности Земли частиц. Каждая из применяемых в CORSIKA моделей использует индивидуальный подход для описания адронных и, в том числе, адрон-ядерных и ядро-ядерных взаимодействий.

Однако, последние данные наземных установок, направленных на регистрацию мюонную компоненту ШАЛ, указывают на наличие избытка многомюонных событий, выходящего за рамки описания, предоставляемого существующими моделями. Ввиду совершенно разных условий работы детекторов и методик, применяемых для анализа, прямое сравнение ре-

результатов мюонных исследований, осуществленных на разных установках, невозможно. Вместо этого экспериментальные данные сравниваются с моделированием, в котором воссоздаются идентичные эксперименту условия. Таким образом, результаты различных установок приводятся к так называемой z-шкале:

$$z = \frac{\ln \langle N_{\mu}^{det} \rangle - \ln \langle N_{\mu,p}^{det} \rangle}{\ln \langle N_{\mu,Fe}^{det} \rangle - \ln \langle N_{\mu,p}^{det} \rangle}, \quad (1.1)$$

где  $\langle N_{\mu}^{det} \rangle$  - величина, характеризующая поток мюонов, наблюдаемая в эксперименте,  $\langle N_{\mu,p}^{det} \rangle$  и  $\langle N_{\mu,Fe}^{det} \rangle$  - та же величина, но полученная из моделирования регистрации ШАЛ от протонов и железа соответственно. Результаты для большого количества экспериментов, в представлении разных моделей, используемых в CORSIKA, представлены на рисунке 1 [2].

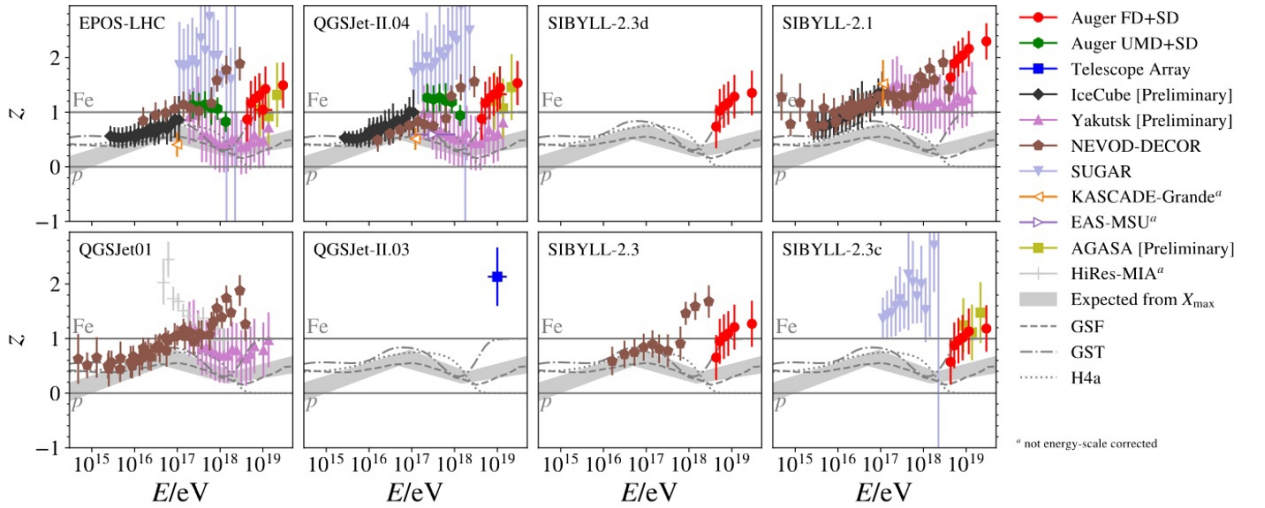


Рисунок 1 — Результаты измерений плотности мюонов, приведенные к z-шкале согласно (1.1), для разных моделей адронных взаимодействий

Видно, что практически для всех экспериментов и моделей наблюдается превышение предельного значения z-шкалы, отвечающего чисто железному составу ПКЛ. Данный феномен получил название "Мюонная загадка"[3].

Одним из возможных решений данной проблемы может служить введение новых физических процессов рождения мюонов в высокоэнергетических ядро-ядерных взаимодействиях.

## 1.2 Генератор RYTHIA

RYTHIA [4] представляет собой Монте-Карло генератор событий столкновений в физике высоких энергий. Она описывает взаимодействия на высоких энергиях между электронами, протонами, фотонами и тяжелыми ядрами. Возможность моделировать взаимодействия ядер появилась в программе относительно недавно и основана на модели Angantyr. RYTHIA позволяет детально изучать все аспекты взаимодействий, включать и выключать различные процессы и рассчитывать их вклад в общую картину события. Таким образом, данный генератор может использоваться для модифицированного описания ядро-ядерных взаимодействий, происходящих в ходе развития широкого атмосферного ливня.

## 1.3 Цель работы

Главной задачей работы является создание интерфейса CORSIKA-RYTHIA, позволяющего осуществлять моделирование образования и развития ШАЛ в программе CORSIKA с использованием RYTHIA для описания ядро-ядерных взаимодействий. Необходимо оценить пригодность подобного подхода путем сравнения результатов моделирования с применением разработанного интерфейса с результатами, полученными стандартным способом.

## 2 Интерфейс CORSIKA-PYTHIA

### 2.1 PYTHIA как генератор столкновений тяжелых ионов

Переключение на процедуры для генерации событий взаимодействий ядер происходит в программе PYTHIA автоматически при задании соответствующего идентификатора (id) для пучка первичных частиц. По умолчанию в PYTHIA заданы лишь несколько ядер и для добавления, например, азота необходимо вручную задать его командой:

```
Pythia8::Pythia pythia;  
pythia.particleData.addParticle(1000070140, "14N", "14Nbar", 3, 21, 0, 13.1448);
```

Первое число в скобках представляет собой новый id, с которым будет ассоциироваться ядро азота и который содержит информацию о массовом числе, заряде и спине ядра. Важно отметить, что при задании энергии ядра, необходимо использовать ее величину в отношении на нуклон. Для реализации столкновений, происходящих в системе детекторов ШАЛ, то есть, в системе, где ядро атмосферного газа (ядро-мишень) покоится, а ядро от космических лучей (ядро-снаряд) налетает с заданной энергией, используется опция "Beams:frameType=2", в которой задаются энергии двух налетающих друг на друга строго вдоль оси z пучков. В общем случае, было бы удобнее для моделирования ШАЛ использовать третий режим столкновений, а не второй, в котором импульсы сталкивающихся частиц задаются покомпонентно; однако, к сожалению, данная опция недоступна на данный момент для столкновений ионов.

Некоторое представление о применимости PYTHIA для расчета ядроядерных взаимодействий при моделировании ШАЛ можно получить на основе сравнения генератора с моделями [5, 6-8, 9], используемыми в CORSIKA.

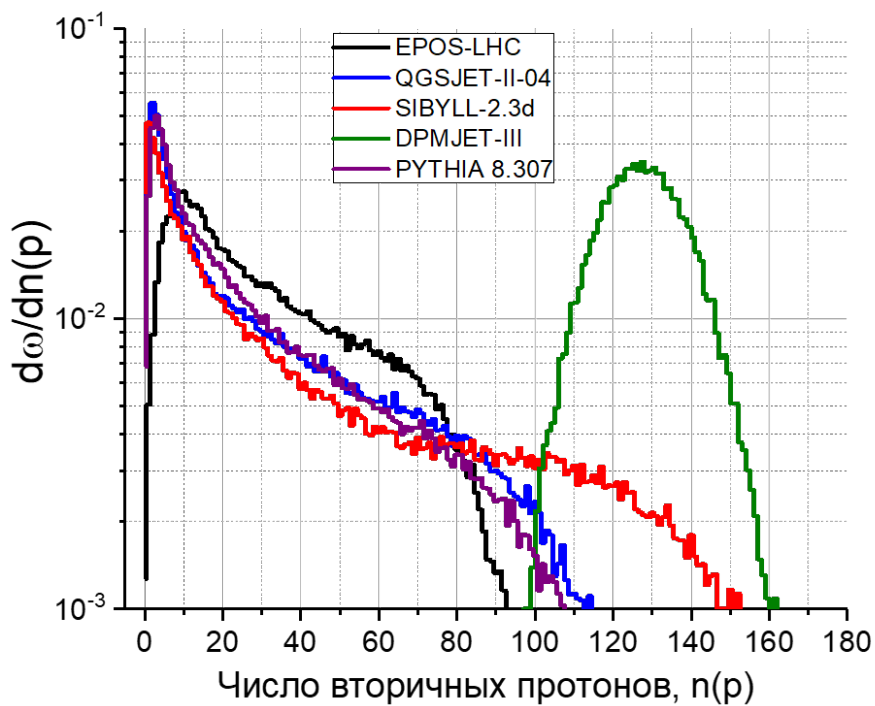
В таблице 1 представлены средние множественности некоторых типов вторичных частиц, полученные для азот-азотных взаимодействий при энергии ядра-снаряда  $E_0 = 10^{18}$  эВ. Модели программы CORSIKA рассматривались на примере первого адронного взаимодействия, для чего использовалась опция “OUTFILE”.

Таблица 1 — Средние множественности вторичных частиц различных типов, образованные во взаимодействиях азот-азот при энергии  $E_0 = 10^{18}$  эВ для PYTHIA и разных моделей в CORSIKA

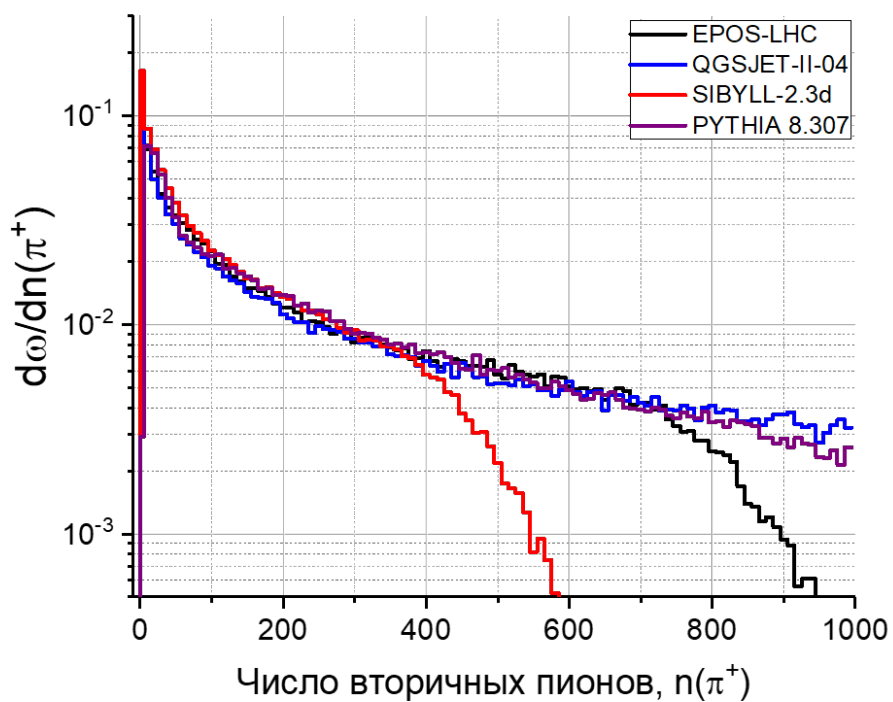
Тип частиц	Средняя множественность			
	EPOS-LHC	QGSJET-II-04	SIBYLL	PYTHIA
$\gamma$	293	592	153	437
$\pi^+, \pi^-$	295	571	137	367
$K^+, K^-$	39.7	68.1	28.9	40.1
Нуклоны	33.6	41.3	38.6	34.1
Ядра ( $A \geq 1$ )	0.37	1.42	1.03	1.96

Видно, что значения от PYTHIA близки к модели EPOS-LHC. Заметным отличием PYTHIA является сильно большее среднее число вторичных ядер, но это объясняется в предположении об исключении ядер-осколков мишени моделями CORSIKA ввиду их крайне низких энергий.

Сравнение распределений множественности вторичных нуклонов и пионов для столкновений железо-азот,  $E_0 = 10^{18}$  эВ, приведено на рисунке 2. Форма распределений для QGSJET-II-04, SIBYLL-2.3d и PYTHIA получаются схожие, у EPOS-LHC наблюдается отличное от остальных моделей распределение по числу нуклонов.



(a)



(б)

Рисунок 2 — Распределения числа вторичных нуклонов (а) и пионов (б), в столкновениях железо-азот,  $E_0 = 10^{18}$  эВ, для PYTHIA и разных моделей CORSIKA



## 2.2 Создание интерфейса между генератором PYTHIA и программой CORSIKA

Использование внешнего генератора для ядро-ядерных взаимодействий в CORSIKA без вмешательства в сам код программы возможно благодаря опции “INFILE”. Если эта опция включена, CORSIKA не разыгрывает первое взаимодействие, с которого начинается ливень, а использует список частиц, взятый из указанного файла, и моделирует дальнейшее развитие каскадов. Таким образом, в основе интерфейса лежит идея моделирования ливней от всех произошедших ядро-ядерных взаимодействий по отдельности с последующим объединением частиц, достигших поверхности, в один список. Упрощенная блок-схема интерфейса показана на рисунке 3.

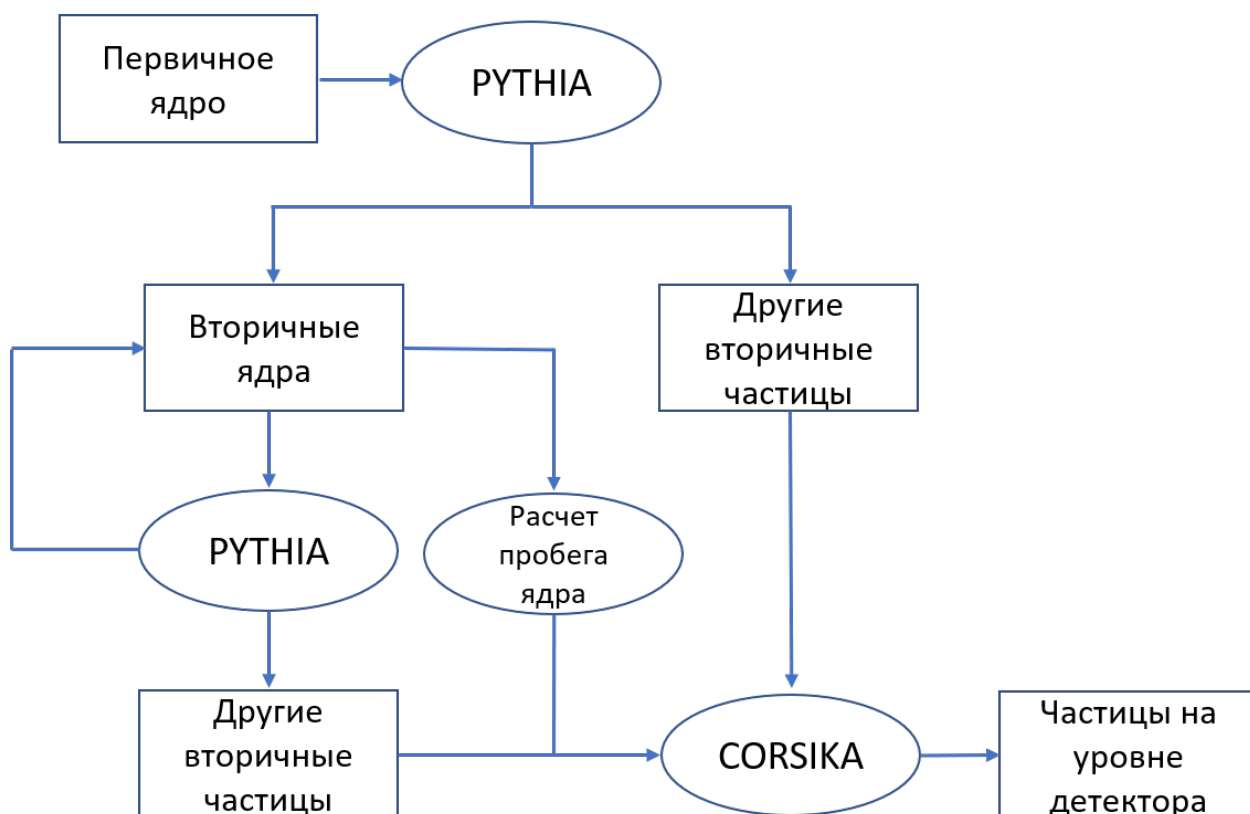


Рисунок 3 — Упрощенная блок-схема интерфейса CORSIKA-PYTHIA

Необходимым условием корректной работы интерфейса является расчет пробега образовавшихся вторичных ядер до следующего взаимодействия. Представляется разумным взять зависимости сечения от энергии ядер из самой программы CORSIKA, также как и параметризацию атмосферы. Однако явный вид зависимостей сечений не предоставляется в описании CORSIKA или ее моделей. Поэтому зависимости были получены из информации о первом взаимодействии, предоставляемой программой. Запускались ядра с массовым числом  $A$  ( $1 \leq A \leq 56$ ) и энергией от 10 ГэВ до  $10^{10}$  ГэВ. Некоторые полученные зависимости показаны на рисунке 4.

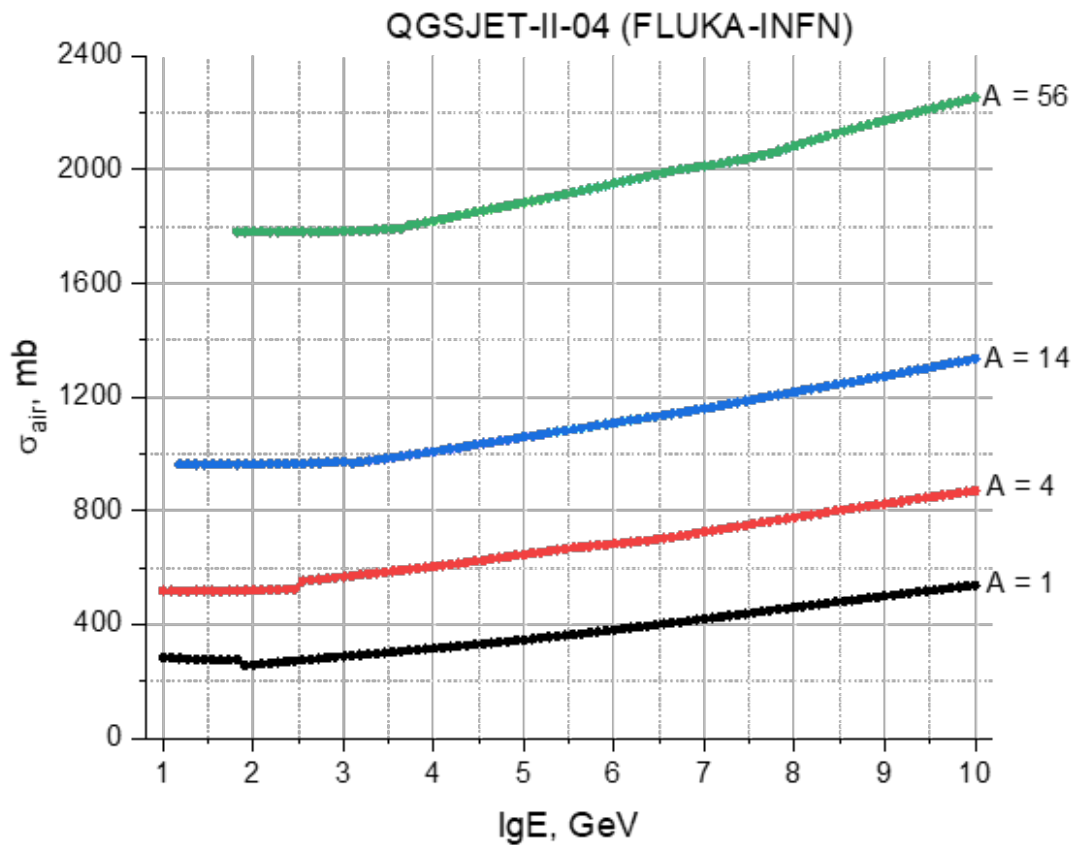


Рисунок 4 — Зависимость полного сечения взаимодействия ядра с воздухом от энергии согласно моделям QGSJET-II-04 и FLUKA-INFN2020 для нескольких значений массового числа  $A$

При вычислении пробега ядра величина сечения определяется из линейной интерполяции по двум точкам на кривой, между которыми лежит

значение энергии ядра. Атмосфера задается пятислойной параметризацией, используемой в CORSIKA (рисунок 5) - параметризацией Линсли.

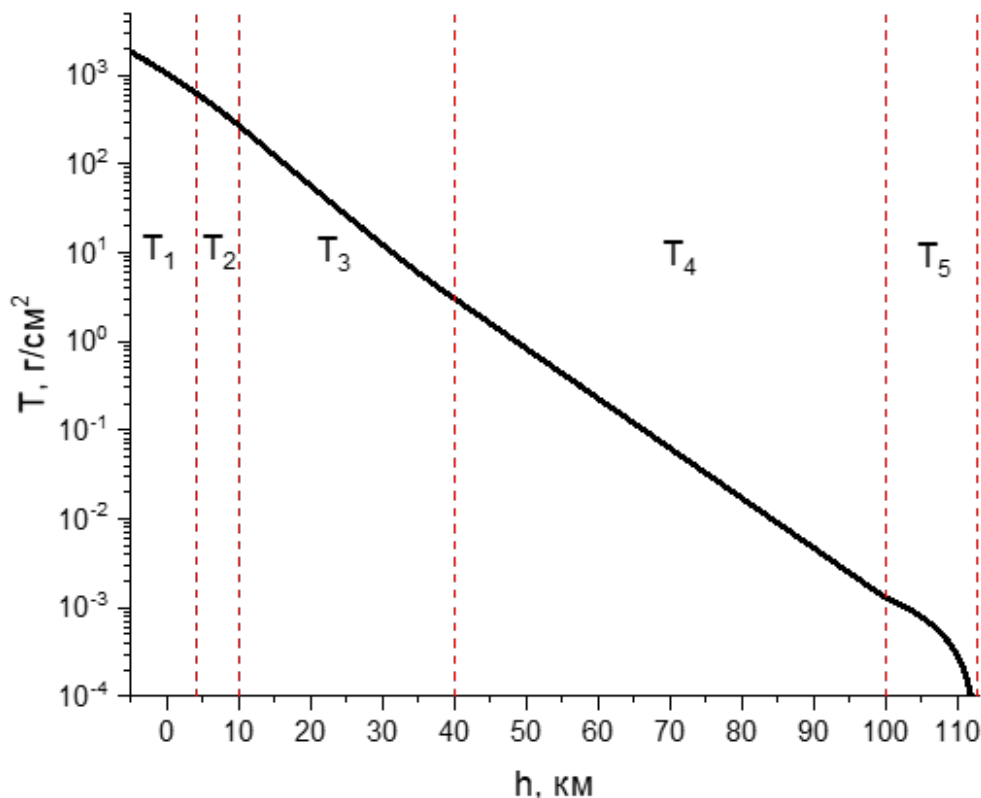


Рисунок 5 — Функция толщины атмосферы  $T$  в  $\text{г} \cdot \text{см}^{-2}$  от высоты  $h$  в км

Где

$$\begin{aligned}
 T_1(h) &= -186.556 + 1222.7 \cdot \exp(-h/9.9419), & -5.8 \leq h \leq 4, \\
 T_2(h) &= -94.9190 + 1144.9 \cdot \exp(-h/8.7815), & 4 \leq h \leq 10, \\
 T_3(h) &= 0.612890 + 1305.6 \cdot \exp(-h/6.3614), & 10 \leq h \leq 40, \\
 T_4(h) &= 540.18 \cdot \exp(-h/7.7217), & 40 \leq h \leq 100, \\
 T_5(h) &= 0.0112829 - h \cdot 10^{-4}, & 100 \leq h \leq 112.8.
 \end{aligned} \tag{2.1}$$

Используя обратные функции, можно получить средний пробег ядра по формуле

$$\lambda = h_0 - h(T), \quad T = \frac{m_{air}}{\sigma(E) \cdot N_A}, \tag{2.2}$$

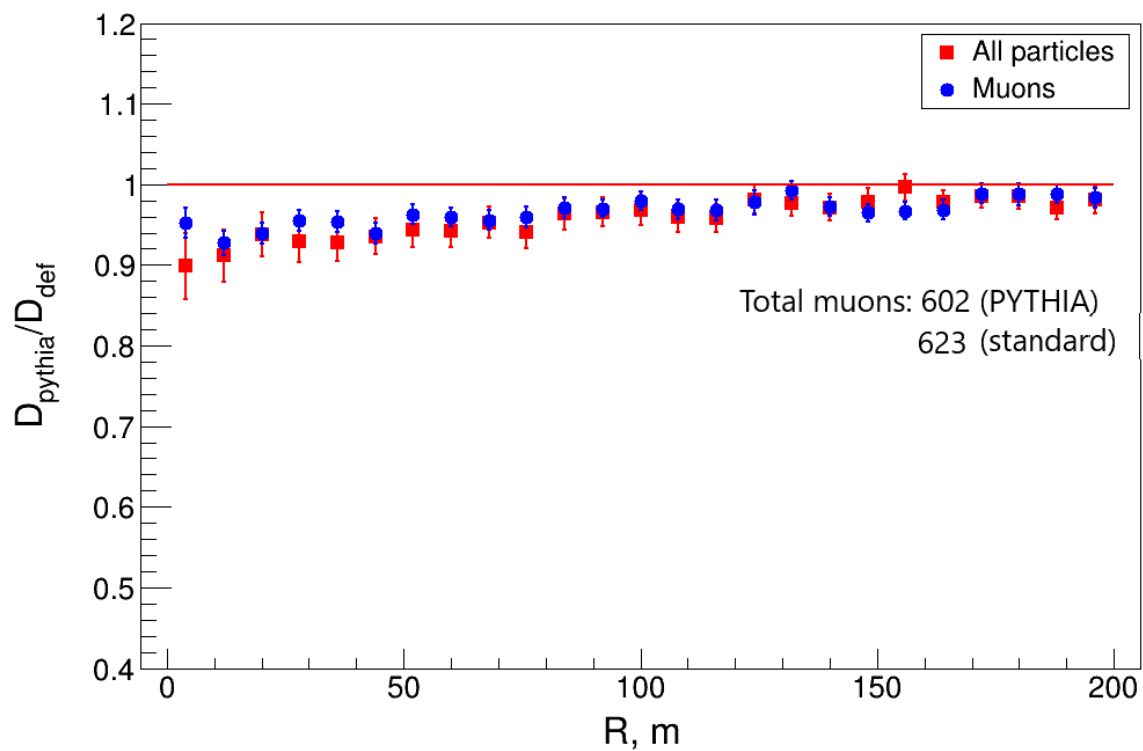
где  $h_0$  - высота, на которой образовалось ядро,  $m_{air} = 14.485$  - молярная масса воздуха в г/моль,  $E$  - энергия ядра,  $N_A$  - число Авогадро.

Работа интерфейса продолжается, пока не перестанут образовываться энергичные ядра-осколки. В процессе исследования наблюдались ядра 7-8 поколения, уносящие значительную ( $\geq 10\%$ ) долю всей энергии взаимодействия. Для описания других адронных взаимодействий во всех дальнейших случаях используются модели QGSJET-II-04 для высоких энергий и FLUKA-INFN2020 для низких.

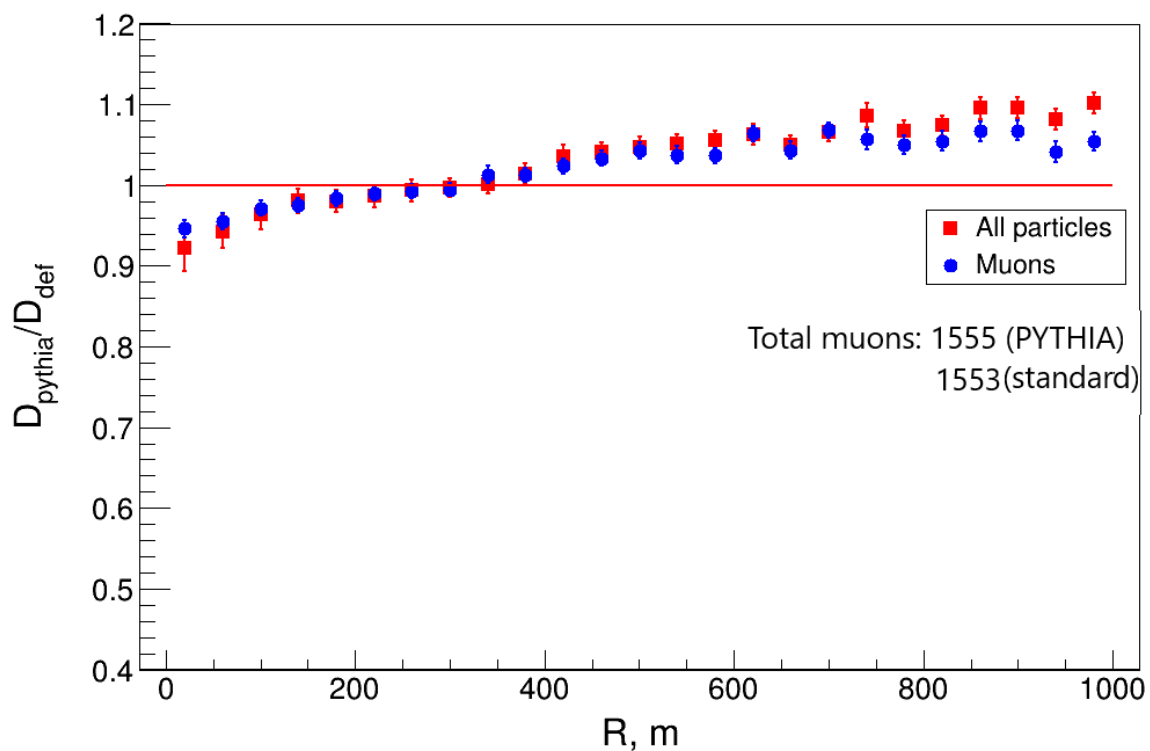
## 2.3 Моделирование ШАЛ при помощи интерфейса CORSIKA-PYTHIA в обычном режиме

Чтобы убедиться в корректности работы интерфейса и окончательно подтвердить возможность использования PYTHIA для ядро-ядерных взаимодействий при моделировании ШАЛ, проведено сравнение результатов расчета ливней согласно стандартной модели адронных взаимодействий QGSJET-II-04 с результатами при условии применения PYTHIA. Первичной частицей было выбрано ядро азота, акт первого взаимодействия фиксировался на высоте 20 км для уменьшения влияния флуктуаций развития ливня. Энергия первичного ядра выбиралась  $E_0 = 10^{14}$  эВ и  $E_0 = 10^{17}$  эВ. Использовались пороговые значения для энергии отслеживаемых частиц в 50 МэВ, 10 МэВ, 1 МэВ и 50 МэВ для адронов, мюонов, электронов и гамма-квантов соответственно. Для сравнения результатов определяется зависимость отношения плотности частиц, полученной при использовании интерфейса, к плотности, полученной из стандартного моделирования, от расстояния до оси ливня. В первую очередь интерес представляют мюоны, поэтому строятся также зависимости отношения плотностей мюонов, полученных в разных подходах к моделированию.

На рисунке 6 представлены результаты для энергии первичного ядра азота  $E_0 = 10^{14}$  эВ, а на рисунке 7 - для энергии  $E_0 = 10^{17}$  эВ.



(a)



(б)

Рисунок 6 — Зависимости отношения плотности частиц на поверхности Земли согласно расчету с использованием интерфейса CORSIKA-PYTHIA и без него для расстояния от оси ШАЛ до 200 метров (а) и до 1000 м (б),  $E_0 = 10^{14}$  эВ

Величина отношения отклоняется не более, чем на 10% от единицы на всем расстоянии от оси, а среднее полное число мюонов совпадает с точностью до 3% на расстоянии до 200 метров и с точностью 0.1% на расстоянии до 100 метров от оси. Таким образом, моделирование с использованием PYTHIA для ядро-ядерных взаимодействий приводит к схожим результатам.

## 2.4 Моделирование с модифицированными параметрами

Генератор PYTHIA позволяет выборочно включать и отключать процессы, а также менять их характеристики, например ширину распада. В предположении о повышенном сечении образования тяжелых кварков в ядро-ядерных взаимодействиях на столь высоких энергиях, проведено исследование влияния рождения топ-кварка на развитие ливня. В результате распада  $t \rightarrow W + b \rightarrow \dots$  может значительно возрасти число мюонов. Включение процессов с t-кварком осуществляется командой

```
Pythia8::Pythia pythia;  
pythia.readString("Top:all = on");
```

В этом режиме рассматриваются только события с t-кварком, поэтому отличие от стандартного моделирования должно быть хорошо заметно (см. рисунок 7, множественность  $\pi^+$  в событиях с t-кварком больше на 38%).

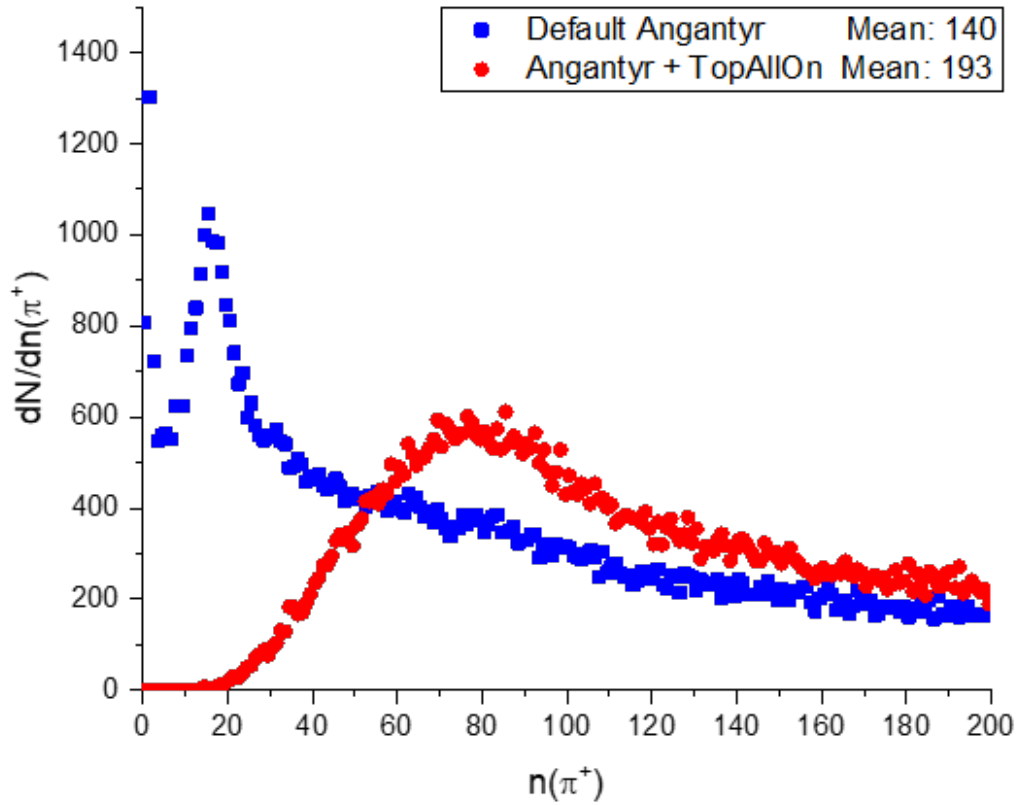
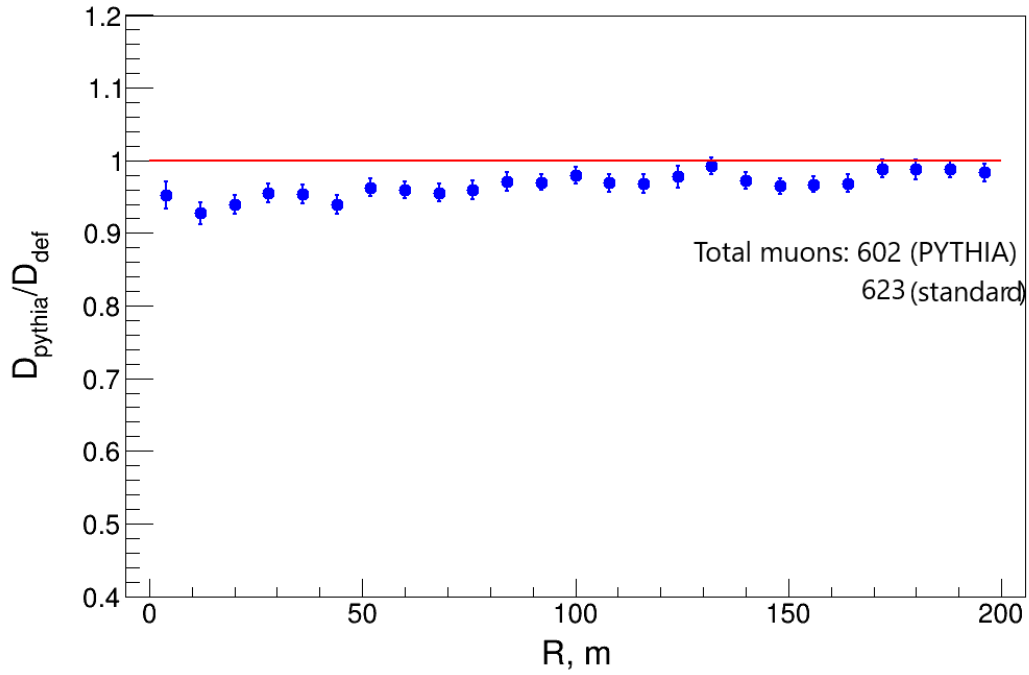
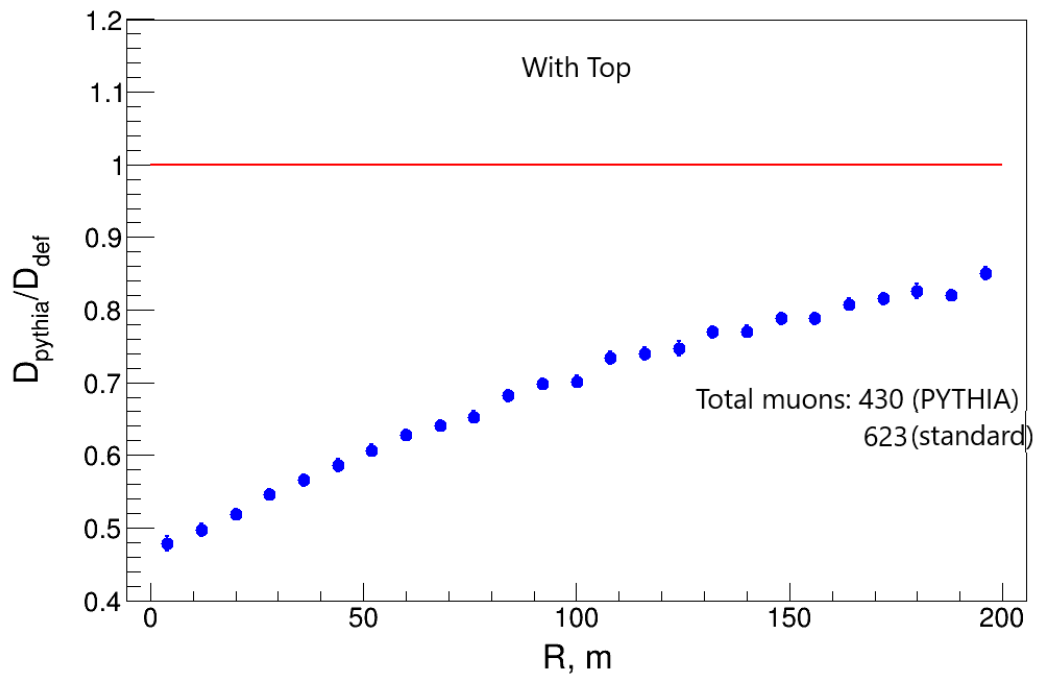


Рисунок 7 — Распределения множественности положительных пионов, образованных во взаимодействиях азот-азот,  $E_0 = 10^{17}$  эВ, согласно генератору РYTHIA

На рисунках 8-14 приведены результаты сравнения моделирования ШАЛ по стандартным моделям CORSIKA, с интерфейсом CORSIKA-РYTHIA в обычном режиме и с рождением  $t$ -кварков в ядро-ядерных взаимодействиях. Везде рассматривалось отношение плотностей мюонов в зависимости от расстояния от оси ливня. Сравнение без дополнительных условий приведено на рисунке 9 для энергии  $E_0 = 10^{14}$  эВ и рисунке 11 для  $E_0 = 10^{17}$  эВ. Сравнение с отбором по энергии (более 1 и более 10 ГэВ для  $E_0 = 10^{14}$  эВ и более 1, 10 или 100 ГэВ для  $E_0 = 10^{17}$  эВ) показано на остальных рисунках. На них также указаны средние полные числа мюонов в ливне в пределе до 200 метров от оси.



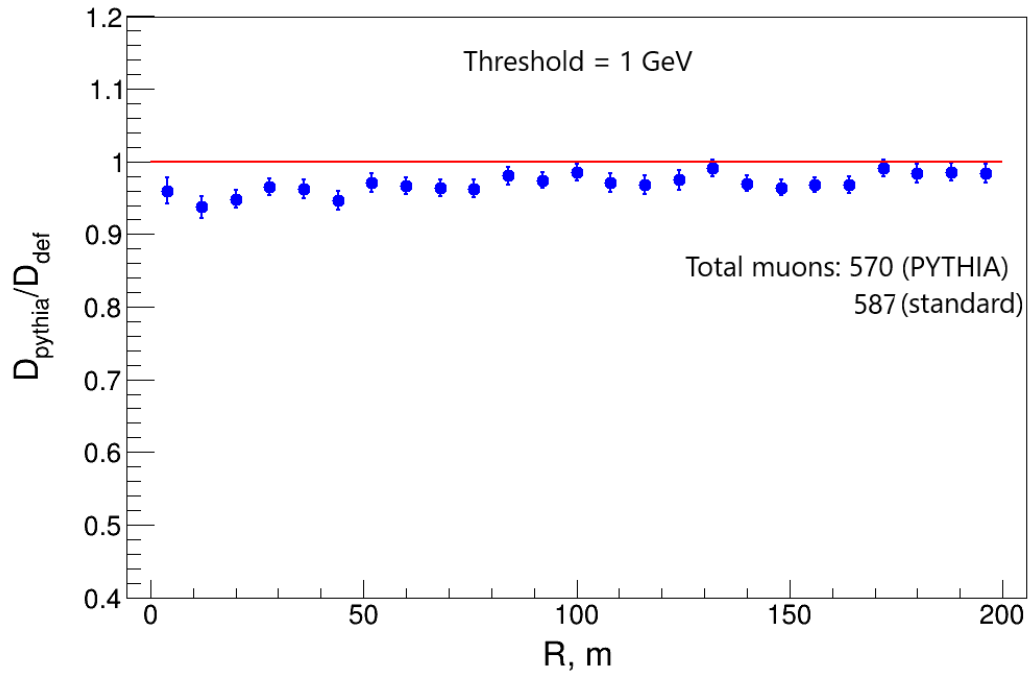
(a)



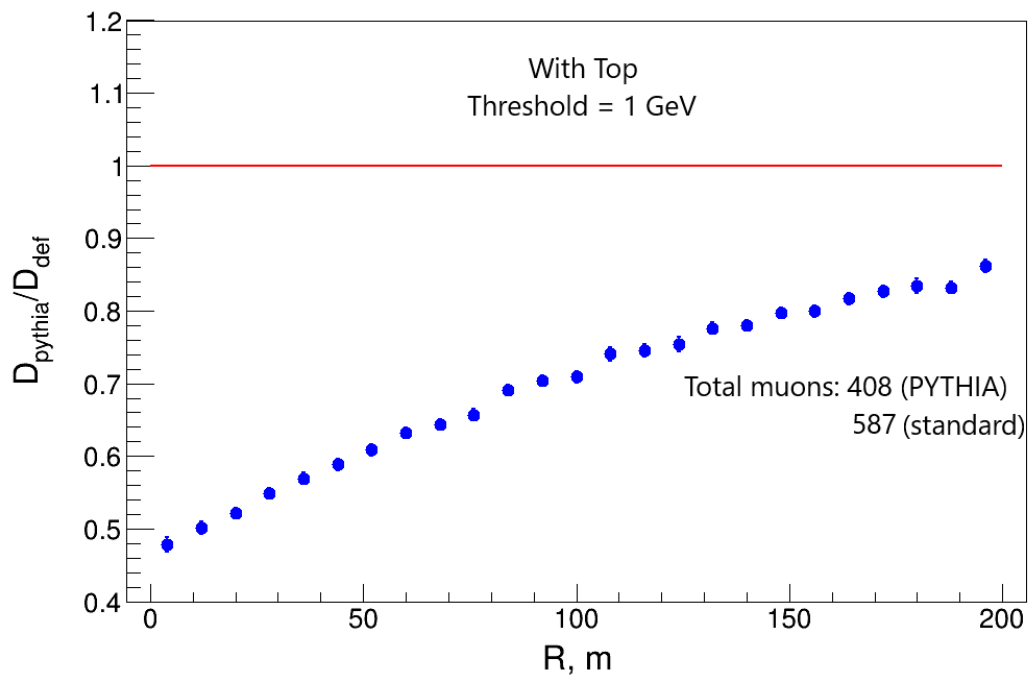
(б)

Рисунок 8 — 8а - зависимость отношения плотности мюонов согласно стандартному расчёту в CORSIKA к плотности мюонов при использовании интерфейса CORSIKA-PYTHIA от расстояния до оси,  $E_0 = 10^{14}$  эВ; 8б - аналогичная зависимость, но в моделировании ядро-ядерных взаимодействий в PYTHIA используется опция TopAllOn



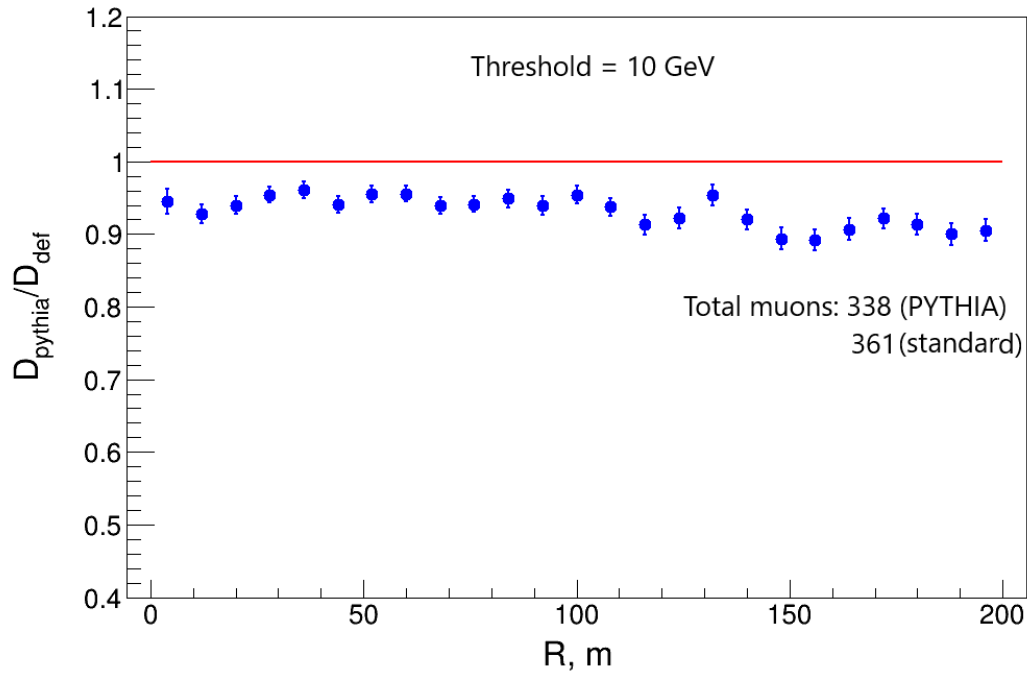


(a)

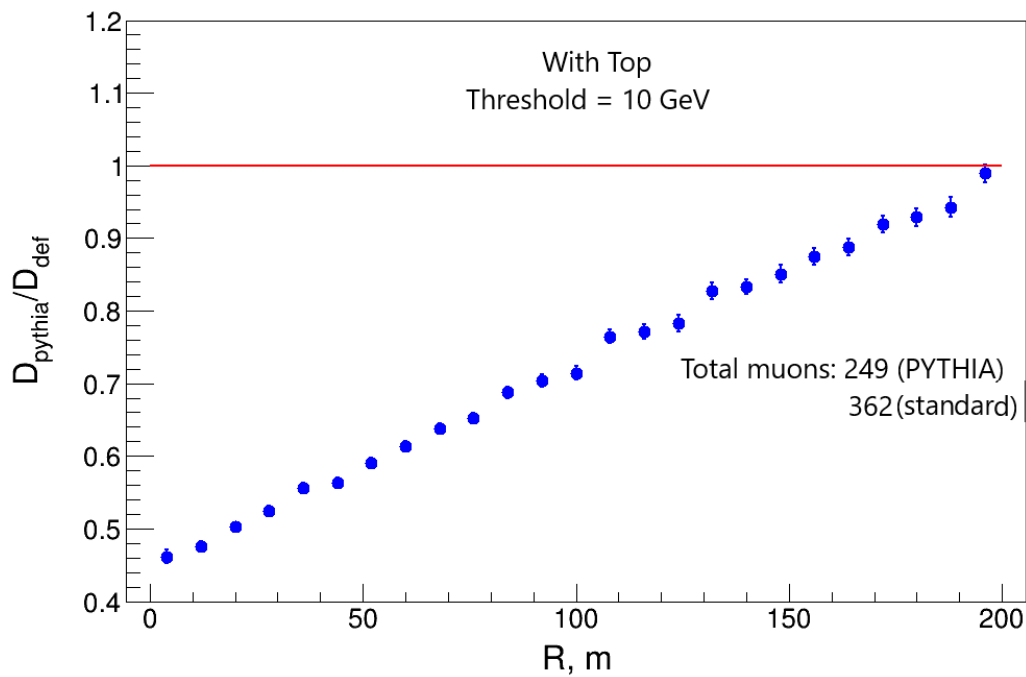


(б)

Рисунок 9 — 9а - зависимость отношения плотности мюонов с энергией более 1 ГэВ согласно стандартному расчёту в CORSIKA к плотности мюонов при использовании интерфейса CORSIKA-PYTHIA от расстояния до оси,  $E_0 = 10^{14}$  эВ; 9б - аналогичная зависимость, но в моделировании ядерных взаимодействий в PYTHIA используется опция TopAllOn

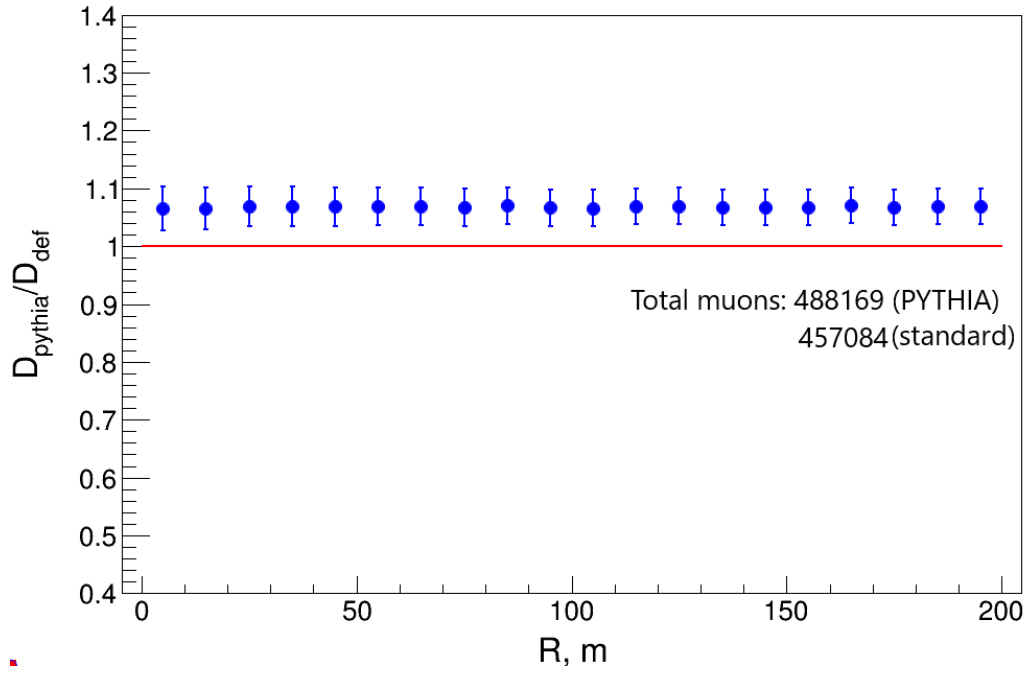


(a)

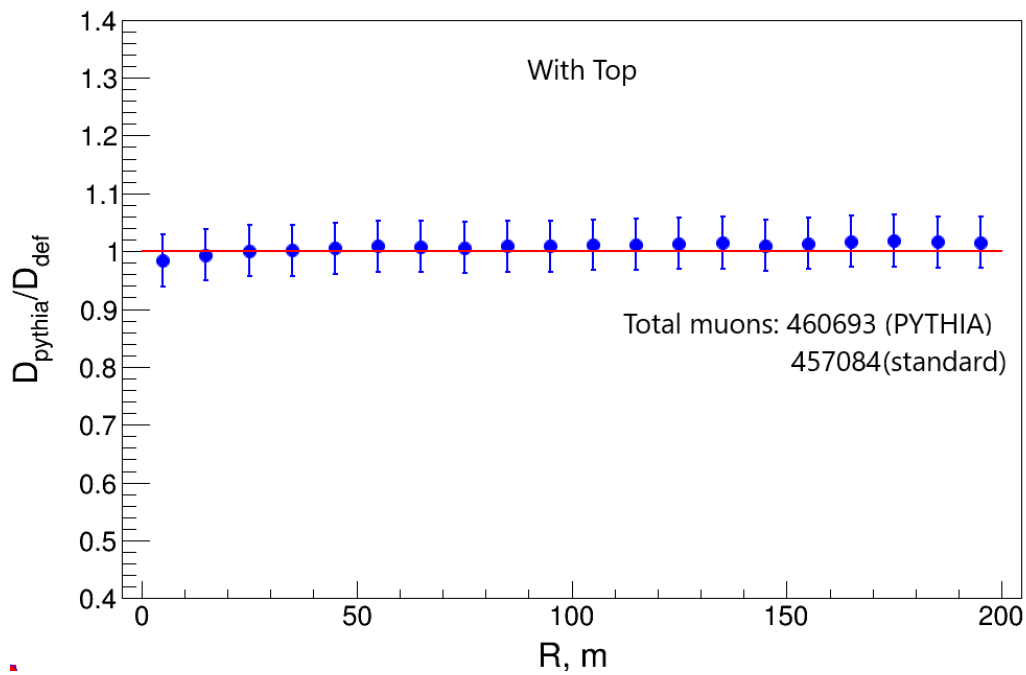


(б)

Рисунок 10 — 10а - зависимость отношения плотности мюонов с энергией более 10 ГэВ согласно стандартному расчёту в CORSIKA к плотности мюонов при использовании интерфейса CORSIKA-PYTHIA от расстояния до оси,  $E_0 = 10^{14}$  эВ; 10б - аналогичная зависимость, но в моделировании ядро-ядерных взаимодействий в PYTHIA используется опция TopAllOn

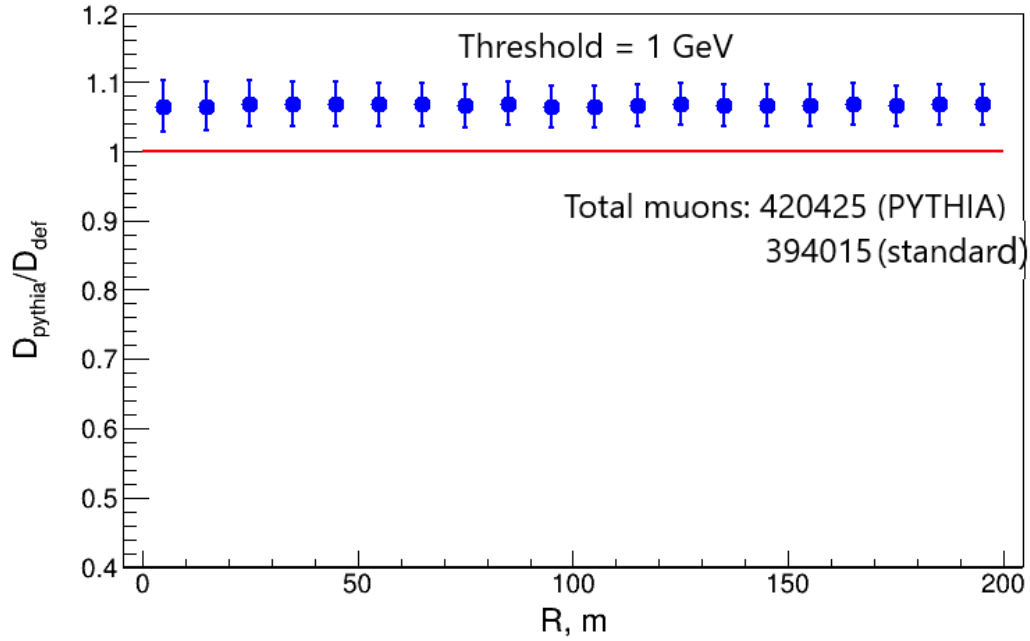


(a)

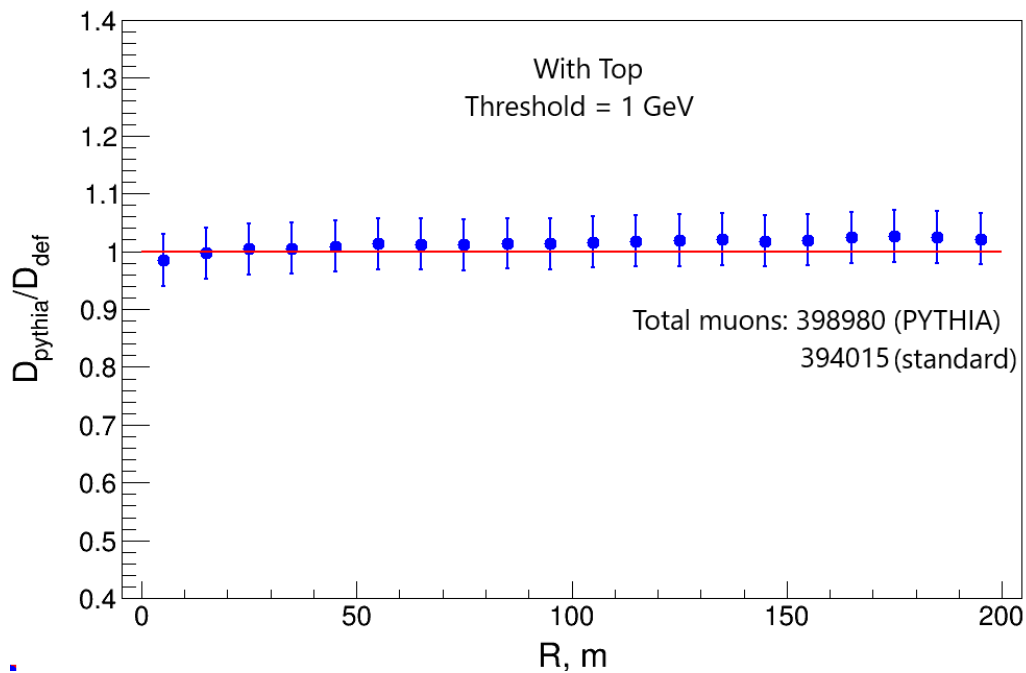


(б)

Рисунок 11 — 11а - зависимость отношения плотности мюонов согласно стандартному расчёту в CORSIKA к плотности мюонов при использовании интерфейса CORSIKA-PYTHIA от расстояния до оси,  $E_0 = 10^{17}$  эВ; 11б - аналогичная зависимость, но в моделировании ядро-ядерных взаимодействий в PYTHIA используется опция TopAllOn

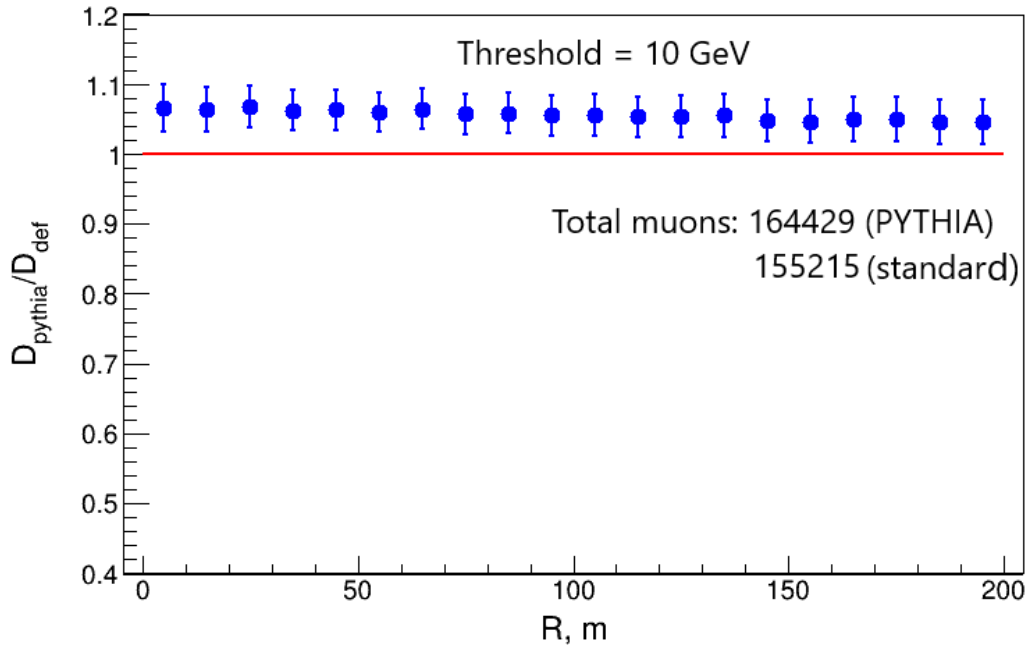


(a)

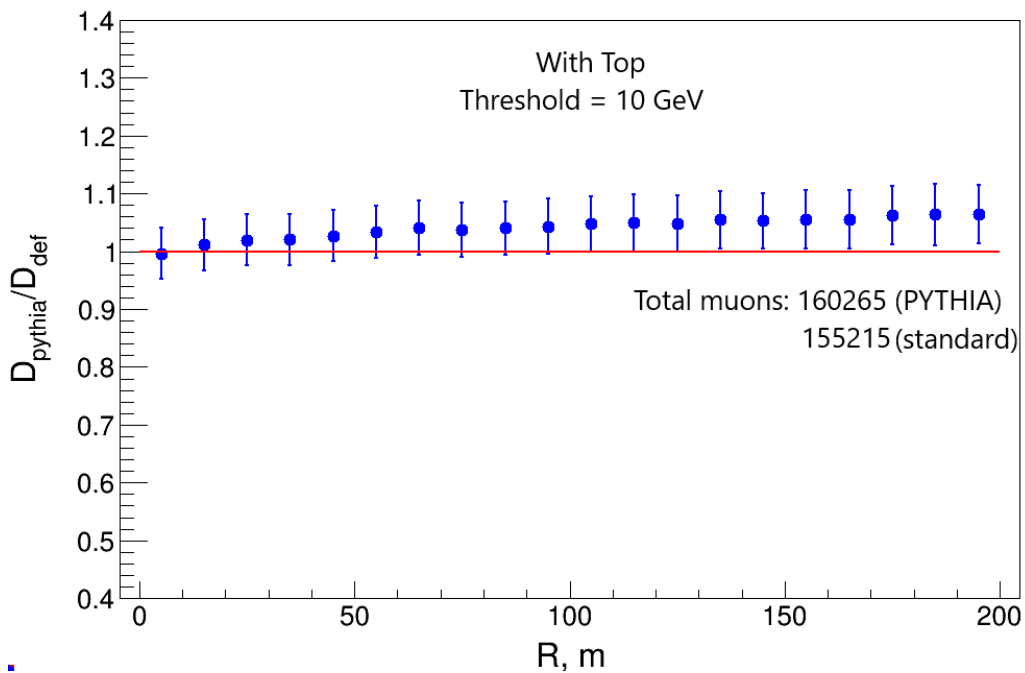


(б)

Рисунок 12 — 12а - зависимость отношения плотности мюонов с энергией более 1 ГэВ согласно стандартному расчёту в CORSIKA к плотности мюонов при использовании интерфейса CORSIKA-PYTHIA от расстояния до оси,  $E_0 = 10^{17}$  эВ; 12б - аналогичная зависимость, но в моделировании ядро-ядерных взаимодействий в PYTHIA используется опция TopAllOn

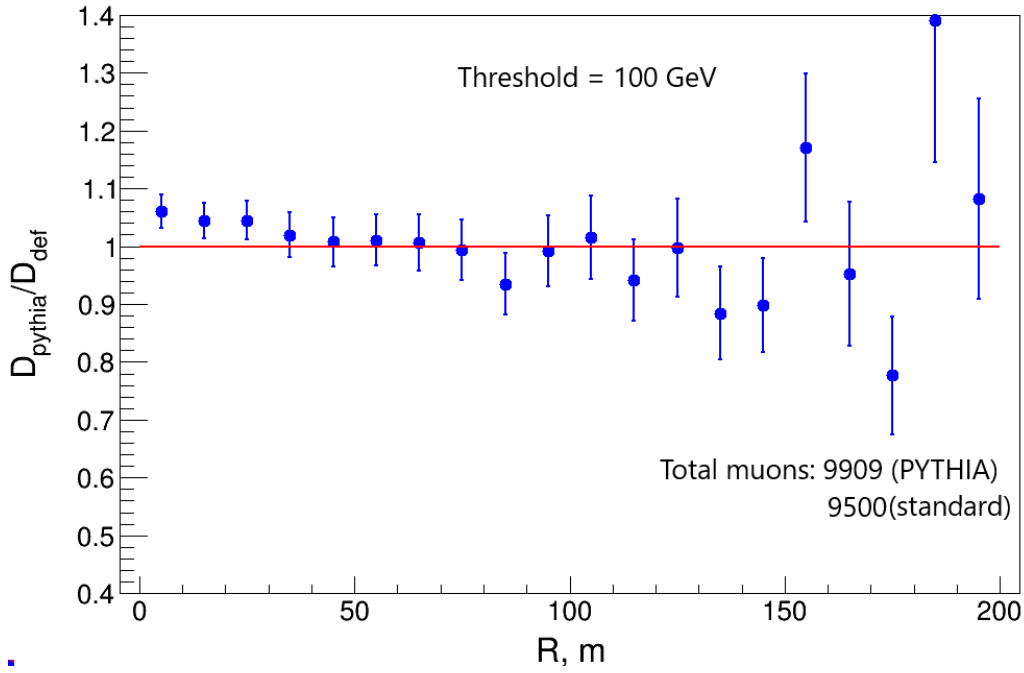


(a)

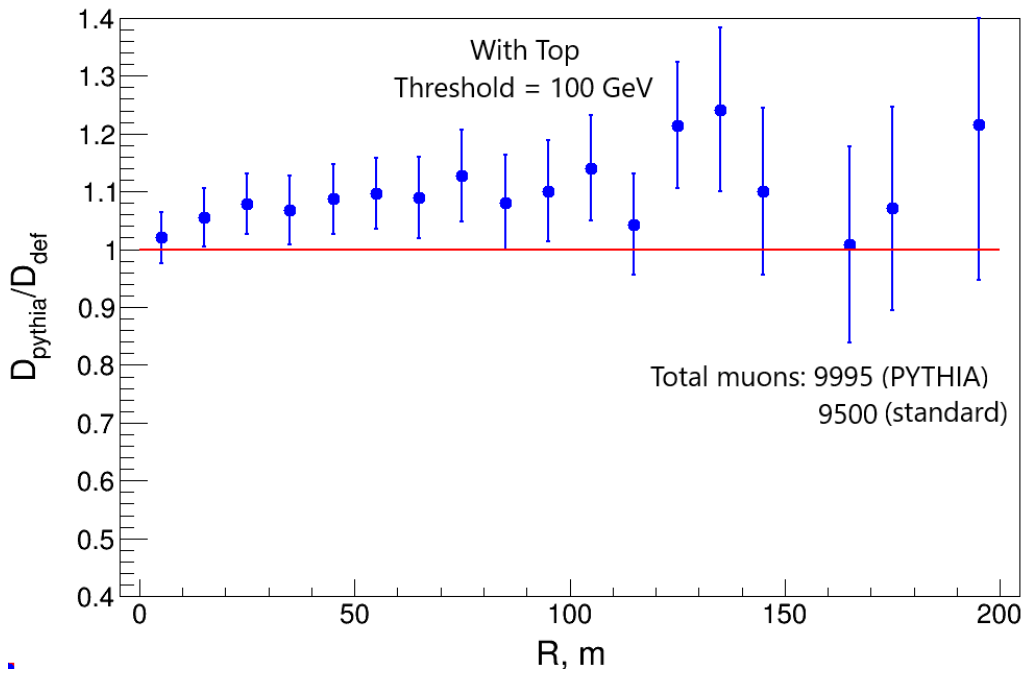


(б)

Рисунок 13 — 13а - зависимость отношения плотности мюонов с энергией более 10 ГэВ согласно стандартному расчёту в CORSIKA к плотности мюонов при использовании интерфейса CORSIKA-PYTHIA от расстояния до оси,  $E_0 = 10^{17}$  эВ; 13б - аналогичная зависимость, но в моделировании ядро-ядерных взаимодействий в PYTHIA используется опция TopAllOn



(a)



(б)

Рисунок 14 — 14а - зависимость отношения плотности мюонов с энергией более 100 ГэВ согласно стандартному расчёту в CORSIKA к плотности мюонов при использовании интерфейса CORSIKA-PYTHIA от расстояния до оси,  $E_0 = 10^{17}$  эВ; 14б - аналогичная зависимость, но в моделировании ядро-ядерных взаимодействий в PYTHIA используется опция TopAllOn

Видно, что образование  $t$ -кварков в ядро-ядерных взаимодействиях действительно влияет на распределение частиц у поверхности. Изменение физики процессов в столкновениях ядер в генераторе RYTHIA была затронута поверхностно, и, вероятно, более точное использование возможностей программы позволит получить ожидаемое возрастание числа мюонов.

## 3 Заключение

На основании сравнения характеристик вторичных частиц, образованных в столкновениях ядер в Монте-Карло генераторе PYTHIA, с моделями, используемыми в программе CORSIKA, сделан вывод о применимости PYTHIA для расчета ядро-ядерных взаимодействий при моделировании широких атмосферных ливней в CORSIKA.

Создан интерфейс для осуществления совместного моделирования, включающий алгоритмы для расчета пробегов вторичных ядер. Проведенное моделирование показало, что функции распределения частиц вблизи поверхности Земли, полученные с использованием интерфейса, мало отличаются от результатов обычного моделирования.

Проведено пробное моделирование с добавлением процессов образования  $t$ -кварков в событиях, генерируемых PYTHIA.



## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- [1] D. Heck et al. // Report FZKA 6019 1998.  
(<https://www.iap.kit.edu/corsika/>)
- [2] D. Soldin // PoS. V. ICRC2021. P. 349
- [3] A.A. Petrukhin // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A. 2014. V. 742. P. 228.
- [4] T. Sjöstrand, S. Mrenna, P. Z. Skands, A brief introduction to PYTHIA 8.1, Comput. Phys. Commun. 178 (2008) 852, arXiv:0710.3820 [hep-ph].
- [5] S.S. Ostapchenko, Phys. Rev. D83 (2011) 014018; S. Ostapchenko, Phys. Rev. D89 (2014) 074009
- [6] R.S. Fletcher, T.K. Gaisser, P. Lipari, and T. Stanev, Phys. Rev. D50 (1994) 5710; J. Engel, T.K. Gaisser, P. Lipari, and T. Stanev, Phys. Rev. D46 (1992) 5013
- [7] R. Engel, T.K. Gaisser, P. Lipari, and T. Stanev, Proc. 26 th Int. Cosmic Ray Conf., Salt Lake City (USA), 1 (1999) 415
- [8] F. Riehn, Diss. University Karlsruhe (2015); F. Riehn et al., Proc. 34 th Int. Cosmic Ray Conf., The Hague (The Netherlands), (2015) contr. 1313
- [9] K. Werner, F. M. Liu, and T. Pierog, Phys. Rev. C74 (2006) 044902; T. Pierog and K. Werner, Nucl. Phys. (Proc. Suppl.) 196 (2009) 102