

## О флуктуациях энерговыделения в веществе пролётных детекторов

А. М. Ажакин<sup>1\*</sup> И. А. Кудряшов<sup>2†</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,  
физический факультет, кафедра общей ядерной физики  
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.

<sup>2</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,  
Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына (НИИЯФ МГУ)  
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2  
(Поступила в редакцию 10.06.2024; подписана в печать 09.07.2024)

Рассмотрено влияние поперечного сегментирования системы кремниевых полупроводниковых детекторов и расстояния между слоями в системе на флуктуацию суммарного энерговыделения в веществе детектора при прохождении через него релятивистских ядер при помощи моделирования в программном пакете Geant4. В моделировании показано, что для релятивистских ядер энерговыделения в детекторах системы не являются статистически независимыми, а флуктуации суммарного энерговыделения существенно зависят от расстояния между слоями. Таким образом, показано существенное влияние энергичных дельта-электронов, образующихся при взаимодействии падающего ядра с веществом пролёта, на суммарное энерговыделение и, главным образом, на его флуктуации.

PACS: 29.40.Wk

УДК: 53.088.23

Ключевые слова: ионизационные потери, кремниевый полупроводниковый детектор, моделирование, дельта-электроны.

### ВВЕДЕНИЕ

Космические лучи — это частицы высоких энергий, приходящие из космоса и имеющие солнечное, галактическое или внегалактическое происхождение. Они примерно на 90% состоят из протонов, на 8% из ядер гелия, на 1% из более тяжелых ядер и на 1% из электронов, позитронов и антипротонов [1, 2]. Их суммарный энергетический спектр вне области солнечной модуляции имеет степенной характер и хорошо описывается зависимостью с показателем степени около  $\gamma = -2.7$  до энергий порядка  $10^{15}$  эВ/нуклон [3, 4].

Задача регистрации первичных космических лучей, их зарядовой и энергетической идентификации решается в течение нескольких последних десятилетий. Информация о энергетическом спектре компонент космических лучей, в том числе тяжелых ядер, необходима для исследования широкого спектра астрофизических процессов, связанных с производством, ускорением и распространением космических лучей.

Для прямого измерения заряда частиц космических лучей используются полупроводниковые кремниевые детекторы, принцип действия которых основан на измерении ионизационных потерь заряженной частицы при прохождении через вещество полупроводника [5, 6].

Удельные ионизационные потери частицы в веществе описываются формулой Бете–Блоха [7].

При прохождении через кремниевый детектор, заряженная частица в полупроводнике создает электрон-

дырочные пары. Число пар, которое может быть измерено по собранному заряду, пропорционально потерям на ионизацию в веществе детектора. Поскольку потери пропорциональны квадрату заряда частицы, это позволяет определить её заряд. Однако, поскольку потери энергии заряженной частицей представляют собой статистический процесс, они флуктуируют. Эти флуктуации фундаментально ограничивают точность определения заряда пролетевшей частицы. Флуктуации для тонких слоёв вещества впервые были описаны Л.Д. Ландау в 1944 г. Вероятностное распределение флуктуаций ионизационных потерь частицы в веществе описываются распределением Ландау [8].

Одна из основных проблем наблюдения энергичной компоненты космических лучей — низкие потоки и, следовательно, малая статистика. Особенно задача усложняется в том случае, если изучается энергетический спектр ядер с низкой распространенностью. Например распространенность ядер, по заряду близких железу и находящихся за железным пиком, на несколько порядков ниже распространенности железа. Это приводит к тому, что даже при достаточно высоком зарядовом разрешении детектора они не разрешаются [9].

Для прямых измерений энергии различных компонент первичных космических лучей необходимо использование космических детекторов, поскольку наземные детекторы могут регистрировать их только косвенно, при помощи наблюдения широких атмосферных ливней.

Как правило, зарядовая система детектора представляет из себя несколько слоёв полупроводниковых кремниевых детекторов, сегментированных на крупные пиксели или стрипы. Один из вариантов, позволяющий улучшить зарядовое разрешение - увеличение суммар-

\* [azhakin.am21@physics.msu.ru](mailto:azhakin.am21@physics.msu.ru)

† [ilya.kudryashov.85@gmail.com](mailto:ilya.kudryashov.85@gmail.com)

ной толщины кремния путём добавления дополнительных слоёв вещества, в первую очередь поскольку увеличивается число рождённых электрон-дырочных пар. Однако, как показывает моделирование, относительные флуктуации энерговыделения в веществе при толщинах свыше 2.5 мм достаточно слабо зависят от неё (см. рис. 1). Кроме того, часть событий пролёта частицы через детектор может сопровождаться ядерным каскадом, вероятность которого тем выше, чем больше вещества находится на пути частицы. Событие с ядерным каскадом оказывается значительно менее информативным, чем пролёт частицы без него, что ещё сильнее уменьшает статистику.

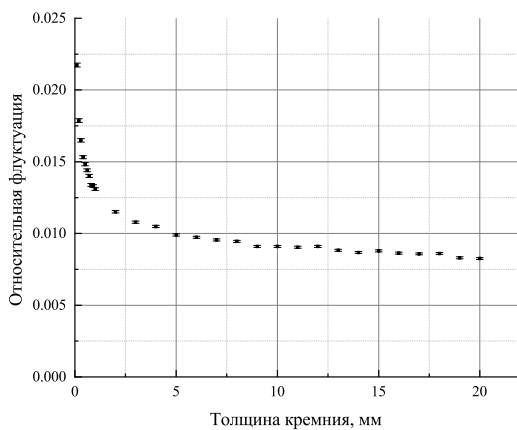


Рис. 1. Зависимость относительных флуктуаций энерговыделения от толщины кремния для ядра железа с  $E = 200$  ГэВ/нуклон

Таким образом, даже без учёта стоимости каждого дополнительного слоя, задача получения максимального зарядового разрешения при минимальной толщине вещества на пути частицы является актуальной.

В настоящей работе в моделировании при помощи программного пакета Geant4 рассмотрено влияние поперечного сегментирования зарядовой системы и расстояния между слоями кремния на значение относительных флуктуаций суммарного энерговыделения.

Заметим, что энергия, потерянная частицей в детекторе, больше энерговыделения в нём, поскольку часть потерянной энергии идёт на рождение дельта-электронов, самые энергичные из которых практически беспрепятственно покидают детектор. Важнее отметить, что эти величины также имеют разные распределения. Если расстояние между слоями зарядовой системы достаточно велико, то большая часть этих вторичных частиц не попадёт в следующие слои. Поскольку вторичных частиц высокой энергии достаточно мало, их число значительно флуктуирует. Кроме того, относительные флуктуации потерь единичного высокоэнергичного дельта-электрона в веществе оказываются значительно выше относительных флуктуаций потерь

частицы, поскольку электрон имеет малую массу, что позволяет ему эффективно рассеиваться в веществе, и единичный заряд. Таким образом, увеличение расстояния между детекторами (или, что эквивалентно, уменьшение размеров сегментов детектора) может приводить к уменьшению флуктуаций энерговыделения.

## 1. МОДЕЛИРОВАНИЕ

### 1.1. Используемые физические модели

Моделирование процессов происходило с использованием программного пакета Geant4 [10]. Был использован пакет физических моделей QBBC [11]. Энергетический порог рождения вторичных частиц, устанавливаемый в Geant4 через пробег в веществе, который должен быть значительно меньше толщины детектора для обеспечения корректности моделирования, был установлен на уровне 1 мкм. Для нескольких событий была проверена независимость результатов от значительных изменений порога рождения (от 0.1 до 10 мкм).

### 1.2. Характеристики падающих частиц

Рассматривалось нормальное центральное падение ядер железа ( $Z = 26$ ) и кислорода ( $Z = 8$ ) с несколькими различными энергиями от  $E = 0.2$  ГэВ/нуклон до  $E = 200$  ГэВ/нуклон.

### 1.3. Геометрия моделируемой системы

Была рассмотрена следующая геометрия: 10 слоёв кремния толщиной 400 мкм каждый, расположенные на варьируемом расстоянии  $l$  друг от друга. Каждый слой представляет из себя крупный квадрат варьируемого размера  $d \times d$ . Пространство между ними заполнено вакуумом (см. рис. 2).

При варьировании расстояния  $l$  размер пикселя  $d$  фиксировался на типичном для подобных детекторов уровне  $d = 2$  см. При варьировании размера  $d$  расстояние  $l$  также фиксировалось на типичном для подобных детекторов значении  $l = 10$  мм.

### 1.4. Аппроксимация смоделированных распределений

Каждое моделирование состояло из  $10^4$  запусков частицы. Для каждого из них строилась гистограмма распределения суммарной выделившейся во всех слоях энергии (см. рис. 3). Для рассмотренной толщины детектора, энергии и заряда частицы рассматриваемое распределение было близко к нормальному.

Пролёты частицы, вызывающие ядерный каскад, исключались и не учитывались при обработке.

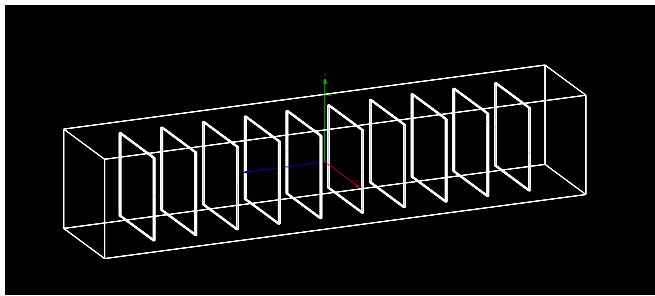


Рис. 2. Геометрия детектора

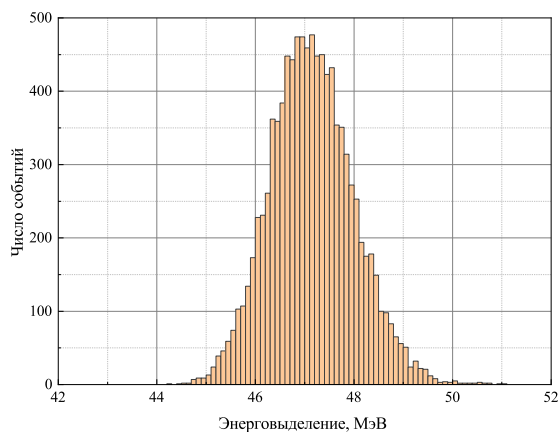


Рис. 3. Распределение суммарного энерговыделения во всех слоях системы

Каждая гистограмма аппроксимировалась нормальным распределением, параметры и ошибки параметров которого использовались при дальнейшем построении графиков.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

### 2.1. Зависимость от расстояния между слоями

В соответствии с ожиданиями, увеличение расстояния между слоями полупроводниковых детекторов приводит к уменьшению флуктуаций суммарного энерговыделения. Для иллюстрации этого факта ниже представлен график, демонстрирующий зависимость относительной величины среднеквадратичного отклонения энерговыделения от расстояния между слоями детектора при падении ядра железа с энергией  $E = 200$  ГэВ/нуклон.

Из графика следует, что при расстоянии  $l_0 = 10$  мм между детекторами флуктуации приблизительно на 15% больше, чем при расстоянии  $l_1 = 20$  мм.

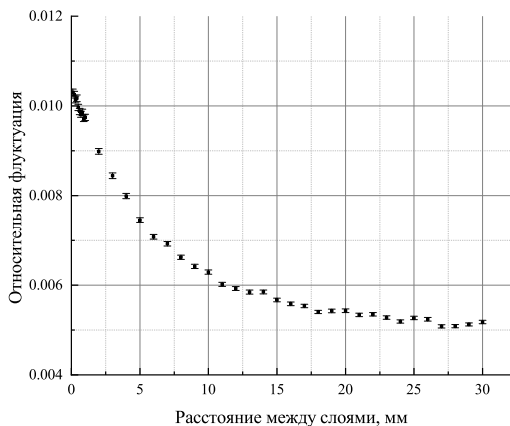


Рис. 4. Зависимость относительных флуктуаций энерговыделения от расстояния между слоями

### 2.2. Зависимость от сегментации

Уменьшение размеров пикселя при фиксированном расстоянии между детекторами за счёт уменьшения доли вторичных частиц, попадающих в следующий слой в геометрическом смысле эквивалентно увеличению расстояния между слоями детекторов. График этой зависимости представлен ниже. Рассматривалось нормальное падение ядра железа с энергией  $E = 200$  ГэВ/нуклон.

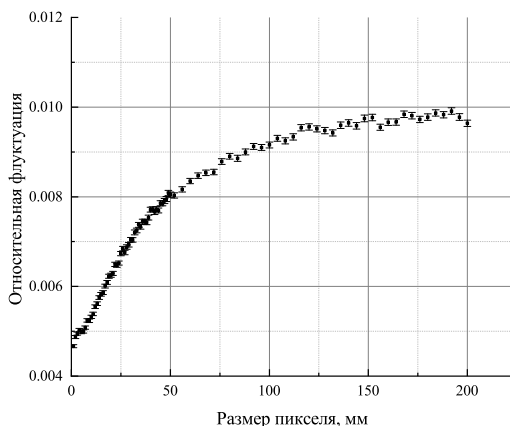


Рис. 5. Зависимость относительных флуктуаций энерговыделения от размера пикселя

Из графика следует, что уменьшение размера сегментов приводит к значительному уменьшению относительных флуктуаций энерговыделения. Так, при уменьшении размера пикселя с  $d_0 = 2$  см до  $d_1 = 1$  см относительная ошибка уменьшается примерно на 15%.

### 2.3. Зависимость эффекта от энергии частицы

При уменьшении энергии налетающей частицы всё меньшая доля вторичных частиц оказываются в области энергий, допускающих пролёт через несколько слоёв детектора. Эффект ослабевает, энерговыделения в разных слоях оказываются всё более независимы друг от друга. В предельном случае малых энергий, при условии что система остаётся пролётной, даже самые энергичные вторичные частицы полностью поглощаются в детекторе и флуктуации перестают зависеть от расстояния между слоями. Это может быть проиллюстрировано модельной зависимостью относительных флуктуаций энерговыделения для нормального падения ядер железа нескольких различных энергий от расстояния между детекторами фиксированного размера  $d = 2$  см (см. рис. 6). Статистические ошибки меньше размера точек.

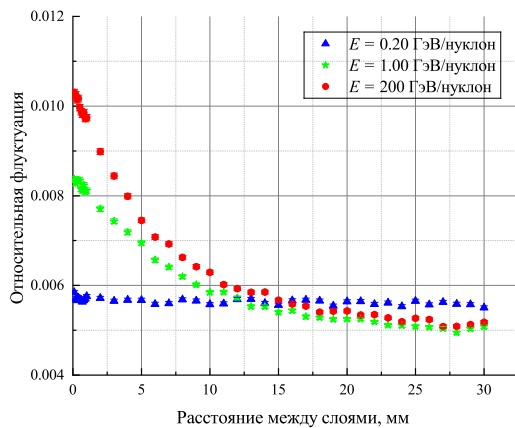


Рис. 6. Зависимость относительных флуктуаций энерговыделения от расстояния между слоями для различных энергий налетающего ядра железа

### 2.4. Зависимость эффекта от заряда частицы

При уменьшении заряда частицы относительные флуктуации возрастают за счёт уменьшения числа образующихся электрон-дырочных пар. Поскольку число электронов каждой энергии  $\propto Z^2$ , то относительные флуктуации числа появившихся вторичных частиц каждой энергии оказываются  $\propto Z^{-1}$ . Однако, поскольку эти пропорциональности не зависят от энергии электронов, рассматриваемый эффект от заряда не зависит, что может быть проиллюстрировано результатами моделирования для нормального падения ультрарелятивистских ядер железа и кислорода  $E = 200$  ГэВ/нуклон при фиксированном размере детектора  $d = 2$  см (см. рис. 7). Статистические ошибки меньше

размера точек.

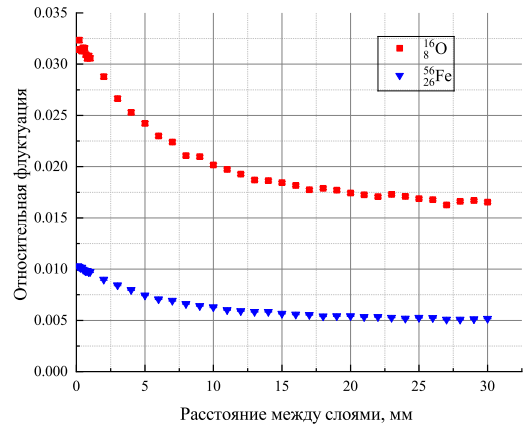


Рис. 7. Зависимость относительных флуктуаций энерговыделения от расстояния между слоями для ядер железа и кислорода с энергией 200 ГэВ/нуклон

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе было промоделировано влияние поперечной сегментации серии полупроводниковых кремниевых детекторов и геометрического расстояния между слоями на флуктуации энерговыделения в веществе. Для простейшего случая нормального падения рассмотренные параметры значимо влияют на флуктуации. Из моделирования следует корреляция энерговыделений в слоях, вызванная образующимися при пролёте частицы дельта-электронами, а следовательно необходимость учёта этого эффекта при выборе размеров сегментации и расстояния между слоями детекторов.

Настоящий результат указывает на возможность улучшить разрешение зарядовой системы при той же толщине вещества за счёт увеличения расстояния между слоями или более мелкого сегментирования детектора. Кроме того, учёт корреляций между сигналами в слоях уже существующих детекторов при обработке может позволить улучшить результат по сравнению с обработкой, в которой предполагается статистическая независимость сигналов.

Проведённая первичная оценка роли вторичных частиц в суммарном энерговыделении и его флуктуациях также указывает на возможность их учёта для уточнения результатов измерений заряда. Это также указывает на необходимость построения более точной модели восстановления заряда частицы, учитывающей энерговыделение дельта-электронов.

Для дальнейшего изучения перспектив использования этого эффекта необходимо как минимум учесть в моделировании случайную точку входа и случайные углы падения частиц, а также точность восстановления угла падения координатной системой, что будет выполнено в следующей работе.

- [1] Гинзбург В.Л. // Астрофизика космических лучей. М., 1990.
- [2] Березинский В.С., Буланов С.В., Догель В.А. и др. // Астрофизика космических лучей. М.: Наука, 1990.
- [3] *Rapov A.* et al. // Proceedings of the 35th International Cosmic Ray Conference. PoS(ICRC2017), 2017.
- [4] *Yoon Y.S.* et al. // The Astrophysical Journal **831**. 5 (2017).
- [5] *Altomare C.* et al. // Proceedings of the 38th International Cosmic Ray Conference. PoS(ICRC2023), 2023.
- [6] *Park I.H.* et al. // Proceedings of the 28th International Cosmic Ray Conference. 2003.
- [7] Мухин К.Н. // Экспериментальная ядерная физика. Кн. 1. Ч. 1. М., 1993.
- [8] Кольчужкин А.М., Учайкин В.В. // Введение в теорию прохождения частиц через вещество. М., 1978.
- [9] *Ahn H.S.* et al. // The Astrophysical Journal **707**. 593 (2009).
- [10] Geant4 v. 11.1.3, <https://geant4.web.cern.ch/download/all>
- [11] Geant4 v. 11.1.3 QBBC Physics list, <https://geant4-userdoc.web.cern.ch/UsersGuides/PhysicsReferenceManual/BackupVersions/V11.1b/fo/PhysicsReferenceManual.pdf>

## On fluctuations of energy release in the substance of passing detectors

A. M. Azhakin<sup>1,a</sup>, I. A. Kudryashov<sup>2,b</sup>

<sup>1</sup> Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia

<sup>2</sup> Lomonosov Moscow State University, Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Moscow 119991, Russia

E-mail: <sup>a</sup>azhakin.am21@physics.msu.ru, <sup>b</sup>ilya.kudryashov.85@gmail.com

The influence of the transverse segmentation of the silicon semiconductor detector system and the distance between the layers in the system on the fluctuation of the total energy deposition in the detector material during the passage of relativistic nuclei through it has been considered using modeling in the Geant4 software package. The modeling has shown that for relativistic nuclei, the energy depositions in the detectors of the series are not statistically independent, and the fluctuations of the total energy deposition significantly depend on the distance between the layers of the system. Thus, a significant influence of energetic delta electrons, formed during the interaction of the nucleus with the passage medium, on the total energy deposition, and mainly on its fluctuations, has been demonstrated.

PACS: 29.40.Wk.

*Keywords:* ionization losses, silicon semiconductor detector, modeling, delta electrons.

*Received 2024.*

### Сведения об авторах

1. Ажакин Андрей Максимович — студент; e-mail: azhakin.am21@physics.msu.ru.

2. Кудряшов Илья Анатольевич — канд. физ.-мат. наук, науч. сотр; e-mail: ilya.kudryashov.85@gmail.com.