

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТКЛИКА ДЕТЕКТОРОВ КОСМИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО

Н.П. Чирская^{1,2}, Л.С. Новиков¹, И.А.Рубинштейн¹

¹ Научно-исследовательский институт ядерной физики МГУ;

² Московский государственный университет, физический факультет.

E-mail: novikov@sinp.msu.ru

Данная работа посвящена использованию программного комплекса Geant4 [1], основанного на методе Монте-Карло, для расчета параметров детекторов электромагнитного и корпускулярного излучения. Комплекс Geant4 позволяет создавать подробные геометрические модели детекторов и проводить детальные расчеты параметров взаимодействия построенной модели детектора с излучением. В связи с большим объемом вычислений расчеты проводились на суперкомпьютере «Ломоносов» МГУ имени М.В. Ломоносова.

Для измерения мощности дозы фотонного излучения в космических и наземных экспериментах применяются графитовые калориметры. Детектор состоит из нескольких элементов, разделенных вакуумными зазорами (рис. 1). Толщина чувствительного элемента калориметра выбирается в зависимости от диапазона измеряемых энергий фотонного излучения. В данной работе были исследованы две конфигурации детектора: с чувствительным элементом толщиной 120 мкм – для измерений в диапазоне от 10 до 50 кэВ и с чувствительным элементом толщиной 2 мм - для регистрации излучения с энергией квантов выше 50 кэВ.

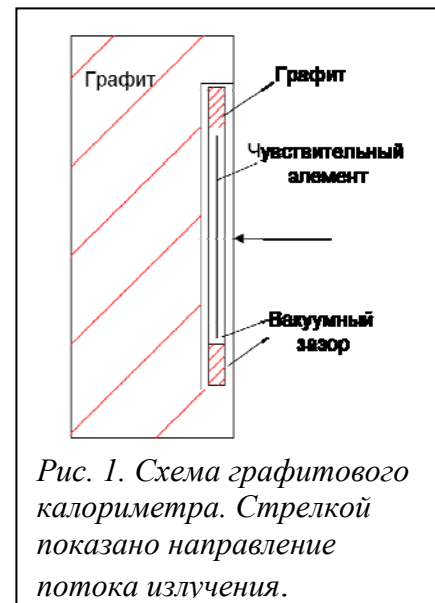


Рис. 1. Схема графитового калориметра. Стрелкой показано направление потока излучения.

Величина мощности дозы излучения измеряется в чувствительном элементе, отделенном от графитового блока детектора вакуумными зазорами. Наличие вакуумных зазоров приводит к искажению мощности дозы относительно однородного графитового блока. Измеренное значение превышает значение мощности дозы в однородном графитовом блоке за счет рассеяния вторичных электронов в вакуумных зазорах. Для точного измерения мощности дозы фотонного излучения используются поправочный коэффициент K_{gap} , учитывающий влияние вакуумных зазоров [2]. Поправочный коэффициент K_{gap} определяется следующим образом:

$$K_{gap} = \frac{I_0}{I_{gap}},$$

где I_0 – значение мощности дозы в сплошном (гомогенном) калориметре, I_{gap} – величина мощности дозы в реальном калориметре.

На рис. 2 приведен график зависимости сечения взаимодействия фотонов с углеродом от энергии фотонов (данные получены из [3]). В диапазоне энергий от 10 до 15 кэВ преобладает фотоэффект, при энергиях выше 20 кэВ основную

роль играет Комптон-эффект. Таким образом, с ростом энергии фотонов уменьшается роль вторичных электронов, обуславливающих искажение мощности дозы в чувствительной области калориметра.

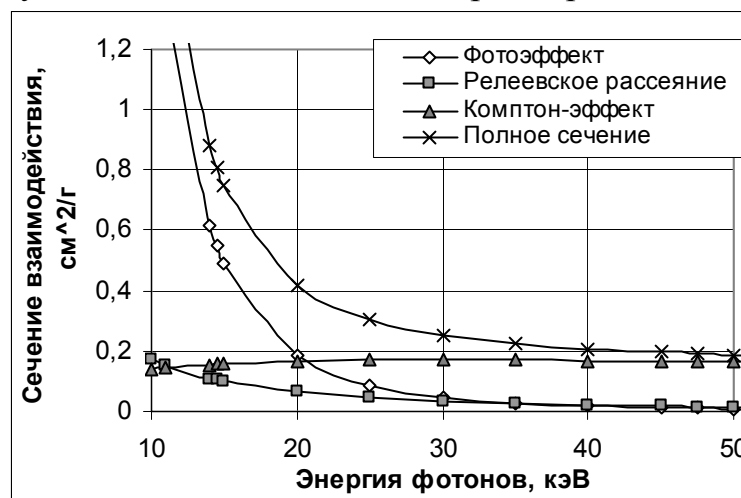


Рис. 2. Зависимость сечения взаимодействия углерода с фотонным излучением от энергии фотонов.

Коэффициент K_{gap} может быть определен экспериментально. Для этого проводится серия экспериментов в плоскопараллельной камере с различной толщиной зазоров между графитовым блоком и чувствительным элементом детектора. Затем зависимость мощности дозы от величины зазора экстраполируется к зазору нулевой толщины. Однако в эксперименте, в отличие от математического моделирования, невозможно учесть все геометрические особенности детектора.

Расчет мощности дозы в чувствительном элементе калориметра был проведен для двух вариантов каждого детектора. В первом случае геометрия расчетной модели соответствовала реальной геометрии детектора, во втором случае расчет проводился для гомогенной модели. Толщина графитового слоя перед чувствительным элементом в обоих случаях оставалась одинаковой. Полученные значения мощности дозы были использованы для расчета поправочного коэффициента K_{gap} .

Зависимость рассчитанных с помощью Geant4.9.4 значений коэффициентов K_{gap} от энергии фотонов для детектора, предназначенного для измерений в диапазоне энергий от 50 до 250 кэВ, приведена на рис. 3. Толщина чувствительного элемента калориметра – 2 мм. Расчеты проводились при статистике $N = 2 \cdot 10^7$ событий. С увеличением энергии фотонов коэффициент K_{gap} уменьшается, что связано с уменьшением вклада в значение измеренной мощности дозы вторичных электронов, рассеянных в вакуумных зазорах калориметра.

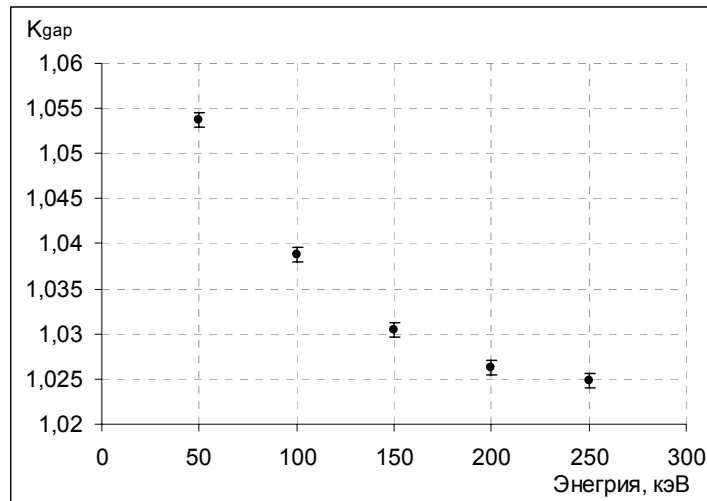


Рис. 3. Зависимость величины коэффициента K_{gap} от энергии фотонов в диапазоне энергий 50 - 250 кэВ.

Результаты аналогичных расчетов для фотонного излучения в диапазоне энергий 10 – 50 кэВ показаны на рис. 4. Для уменьшения влияния флуктуаций потерь энергии на результаты расчетов была выбрана статистика $N = 10^8$ событий.

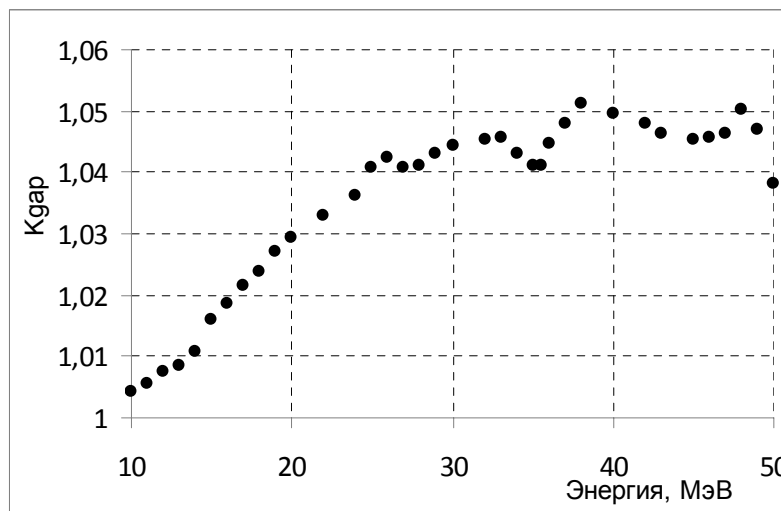


Рис. 4. Зависимость величины коэффициента K_{gap} от энергии фотонов в диапазоне энергий 10 - 50 кэВ.

Чувствительный элемент calorиметра для регистрации излучения в этом диапазоне энергий имеет толщину 120 мкм. С ростом энергии фотонов уменьшается вероятность их взаимодействия с материалом чувствительной области calorиметра, что приводит к росту флуктуаций потерь энергии и неравномерности зависимости K_{gap} от энергии при расчетах.

Второй тип детекторов, рассмотренных в рамках данной работы – телескопические спектрометры, предназначенные для регистрации заряженных частиц в космических и наземных экспериментах [4]. Данный детектор предназначен для регистрации электронных и протонных спектров на геостационарной орбите. Спектрометр представляет собой телескопическую систему, состоящую из двух полупроводниковых детекторов (рис. 4). Первый пролетный детектор (Д1) имеет толщину 0,3 мм, частица теряет в нем малую часть энергии dE . Основная часть энергии E выделяется частицей во втором детекторе (Д2), который имеет толщину 1,6 мм. Разделение частиц по сорту происходит благодаря различию их потерь энергии dE в пролетном детекторе Д1. Для приведенного на рис. 5 телескопа при величине потерь энергии $dE < 0,4$ МэВ в детекторе Д1 зарегистрированное событие относится к электронным, при $dE > 0,4$ МэВ – к протонным.

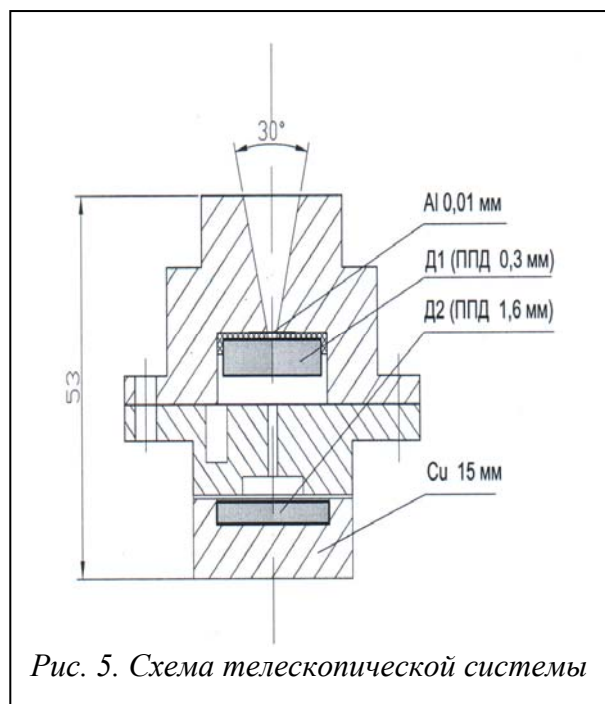
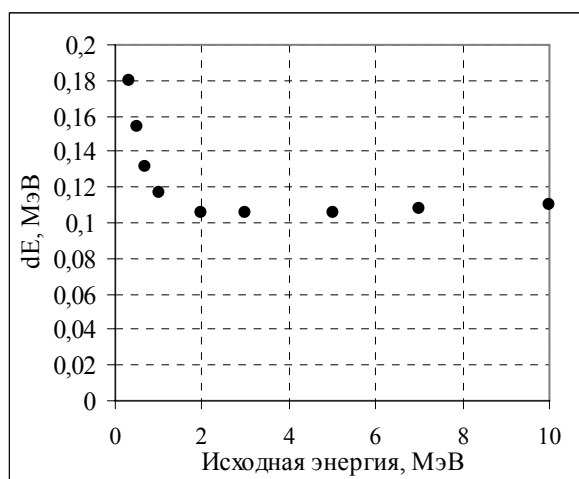


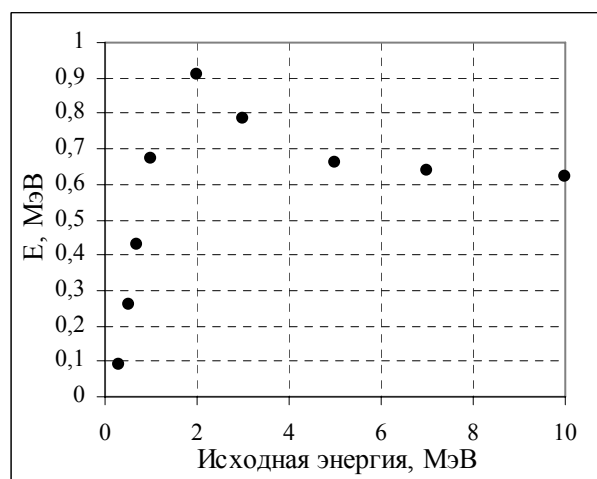
Рис. 5. Схема телескопической системы

В расчетах учитывались процессы ионизации, включая образование δ -электронов, тормозное излучение электронов и многократное кулоновское рассеяние. Был использован пакет библиотек Livermore [5], предназначенный для описания физических процессов электромагнитных взаимодействий в диапазоне энергий от 250 эВ до 100 ГэВ. Данный набор библиотек обеспечивает лучшую точность, чем стандартный (Standard) набор библиотек электромагнитных взаимодействий.

Для электронов с энергиями в диапазоне от 0,1 до 10 МэВ с помощью Geant4.9.4 были рассчитаны средние величины переданной энергии в каждом детекторе спектрометра. Для каждой энергии электронов расчет средних потерь энергии в каждом детекторе проводился при статистике $N = 100\,000$ событий. Рассчитанная диаграмма средних потерь энергии электронов в детекторах Д1 и Д2 в зависимости от исходной энергии падающих электронов представлена на рис. 6.



а



б

Рис. 6. Диаграмма потерь энергии электронов в детекторах телескопа:
а – в детекторе Д1; б – в детекторе Д2

При исходной энергии электронов от 5 МэВ до 10 МэВ не менее 98% зарегистрированных событий определяются как электронные, т.е. выбранный критерий выделения электронных событий ($dE < 0,4$ МэВ) не приводит к существенному искажению результата измерения спектра электронов.

Выводы

Для двух конфигураций графитового калориметра рассчитаны значения поправочных коэффициентов, учитывающих влияние вакуумных зазоров на измеренные величины мощности дозы фотонного излучения. Проведены расчеты зависимости средних потерь энергии от исходной энергии электронов в детекторах телескопического спектрометра. Подтверждена корректность критерия разделения электронных и протонных событий.

Полученные данные могут быть использованы для корректировки результатов экспериментов.

1. S. Agostinelli, J. Allison, A. Forti, et al. GEANT4 – A simulation toolkit. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2003. Т. 506. № 3. p. 250-303.
2. A. Baumgartner, A. Steurer, W. Tiefenbock et. al. Re-evaluation of correction factors of a primary standard graphite calorimeter in ^{60}Co gamma ray beams as a basis for the appointment of the BEV absorbed dose rate to water reference value. Radiation Protection Dosimetry. 2011, April, 145(1), pp. 3-12.
3. P. Bandyopadhyay and C.U. Segre, <http://www.csrrri.iit.edu/mucal.html>.
4. Ю.К. Акимов и др. Полупроводниковые детекторы в экспериментальной физике. Атомиздат. Москва, 1967.
5. V. Ivanchenko et al. Recent Improvements in Geant4 Electromagnetic Physics Models and Interfaces., Progress in Nuclear Science and Technology, Vol. 2, pp.898-903, 2011.