

М. В. Рутарева

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ В ПАКЕТЕ GEANT4

Статья посвящена разработке на базе пакета GEANT4 модели электромагнитного калориметра методом Монте-Карло типа «шашлык» с заменой кристалла ГаГГ на LYSO с такой же конфигурации калориметра для изучения прохождения мягких фотонов через вещество калориметра и последующей регистрации их энерговыделения. Получены распределения по энерговыделению в кристаллах LYSO (ГаГГ) при прохождении через калориметр фотонов с $E < 50 \text{ MeV}$, вычислено энергетическое разрешение для кристаллов при этих энергиях.

В настоящее время в экспериментальной физике высоких энергий применяют все более сложную технику, увеличивая количество элементов в каждой новой установке, занимающей порой огромное пространство. Расширяется тематика исследований, наряду с проверкой стандартной модели, проводятся эксперименты по поиску носителей темной материи, сигналов нарушения стандартной модели и другие.

На ускорителях изучаются свойства элементарных частиц. Эксперименты проводят на ускорителях LHC (CERN), RHIC (BML), Tevatron (FNAL), на которых энергии после столкновения частиц достигают нескольких ТэВ. Также строятся и работают ускорители с более низкими энергиями пучков элементарных частиц и релятивистских ионов. В ОИЯИ в г. Дубна строится ускоритель коллайдерного типа, на котором будут сталкиваться тяжелые ионы (установка MPD) и поляризованные протоны и/или дейтроны (установка SPD).

Для изучения значительного превышения выхода прямых мягких фотонов в ЛФВЭ предложена большая физическая программа, для выполнения которой необходимо изготовить специальный электромагнитный калориметр с низким порогом регистрации.

Кристаллы гадолиний-галиевые гранаты (ГаГГ) были выбраны в качестве сцинтиллятора, которые обладают большим световыходом и радиационной стойкостью. В целях экономии для калориметра была выбрана гетерогенная структура, а именно два типа такой структуры: «спагетти» и «шашлык». Однако экспериментальное тестирование показало, что необходимого энерго разрешения при регистрации мягких фотонов на калориметре типа «спагетти» достигнуто не будет.

Поэтому решили изготовить калориметр по типу сэндвича, с использованием в качестве сцинтиллятор те же кристаллы ГаГГ.

Оптимальные размеры калориметра, чтобы в нем полностью помещался электромагнитный ливень, развиваемый фотонами низких энергий, можно оценить используя Монте-Карло моделирование.

Для выполнения моделирования работы такого калориметра был использован пакет программного обеспечения GEANT4, разработанный в CERN. Он удобен и относительно прост в использовании и хорошо описывает процессы взаимодействия элементарных частиц с веществом.

Была поставлена цель – разработать на базе пакета GEANT4 модели электромагнитного калориметра методом Монте-Карло типа «шашлык» с заменой кристалла ГаГГ на LYSO с такой же конфигурации калориметра для изучения прохождения мягких фотонов через вещество калориметра и последующей

регистрации их энерговыделения.

Для достижения поставленной цели было необходимо в первую очередь создать компьютерную модель гетерогенного калориметра на базе программного модуля GEANT4, далее спроектировать и собрать электромагнитный калориметр типа

«шашлык» и обработать полученные данные [10].

В ходе работы для определения энергетического разрешения при регистрации мягких фотонов было выполнено МК моделирование процессов электромагнитного взаимодействия элементарных частиц в калориметре.

Geant4 – это набор программ, библиотек, написанных на языке C++, для моделирования прохождения элементарных частиц и ядре через вещество [3–8]. Исходный код пакета распространяется свободно по открытой лицензии на программное обеспечение [1].

Объектно-ориентированный пакет программ Geant4 предназначен для моделирования прохождения частиц в объеме детектора. Встроенные средства Geant4 позволяют описать проведение физического эксперимента: геометрию детектора, химический состав его материалов, типы частиц, участвующих в эксперименте, с учетом возможных физических процессов.

Скачать документацию, исходный код, базу данных и набор бинарных библиотек пакета Geant4 можно с официального сайта Geant4 [2].

В пакете есть инструменты для гибкого описания геометрии. В нём содержится множество физических моделей взаимодействия частиц с веществом: а) электромагнитные процессы; б) адронные процессы; в) фотон-адронные и лептон-адронные процессы; г) процессы с участием оптических фотонов; д) моделирование распадов; е) параметризация ливней; ж) методики использования статистических весов. Процессы, моделируемые пакетом, включают в себя широкий интервал энергий.

Фиксируются треки следующих частиц: лептоны, адроны, фотоны и ионы. От пользователя требуется только описать геометрию детектора, список физических процессов, учитываемых при моделировании, и генерация первичной вершины.

Сначала составляется план эксперимента, направленного на изучение свойств и характеристик экспериментальных частиц. Затем строится программа на объектно-ориентированном языке C++, использующая библиотеки, входящие в структуру Geant4. Исходные тексты программ компилируются, и создается программа. Программа многократно (несколько тысяч испытаний) разыгрывает случайным образом основные характеристики исходных частиц, налетающих на мишень, и создает файлы данных, позволяющих выполнить проведенный анализ полученных моделированием распределений.

Основными преимуществами GEANT4 являются инструменты для гибкого описания геометрии, наличие нескольких драйверов для визуализации и множество физических моделей взаимодействия частиц с веществом:

- электромагнитные процессы;
- адронные процессы;
- фотон-адронные и лептон-адронные процессы;
- процессы с участием оптических фотонов;
- моделирование распадов;
- параметризация ливней;
- методики использования статистических

весов. Компьютерная модель калориметра состоит из:

- 1) пучка мягких фотонов с энергией меньше 50 МэВ;

2) мишени, состоящая из чередующихся кристаллов и поглотителя;

3) детектора, который измеряет энерговыделение мягких фотонов.

Первичные фотоны взаимодействуют с мишенью. В результате электромагнитных взаимодействий в калориметре они создают при прохождении LYSO (сцинтиллятора) электромагнитный ливень, теряя при этом энергию в виде излучения (рисунок 1). Собирая фотоумножителями выделенную в результате взаимодействия в сцинтилляторе световую энергию, можно оценить энергию падающего фотона.

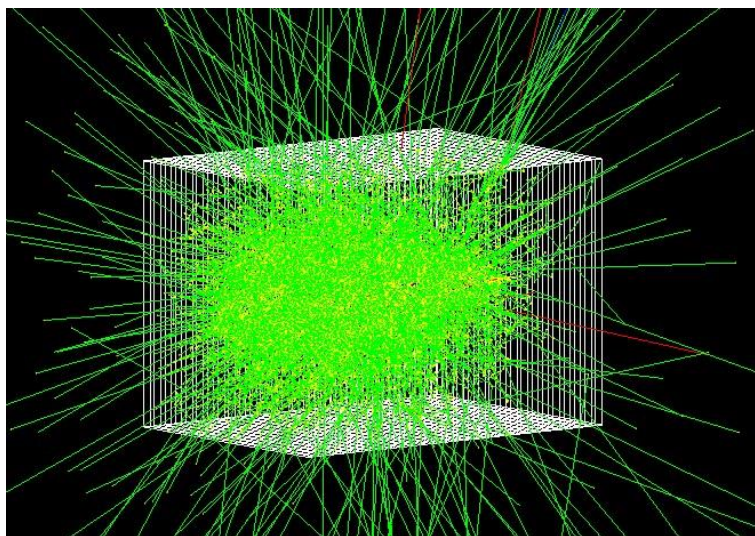


Рисунок 1 – Компьютерная модель

Программное обеспечение (ПО) позволяет для каждого разыгрываемого события просуммировать энергию, выделяемую при каждом шаге рассеяния специальными счетчиками, а также измерить длину пробега фотона в этом калориметре. Многократные испытания, разыгрываемые случайным образом, позволяют накопить необходимую статистику и выполнить анализ данного эксперимента.

Для данной компьютерной модели в качестве материала для калориметра был выбран кристалл LYSO. В таблице 1 представлены характеристики кристалла.

Таблица 1 – Сравнение свойств сцинтиллятора

Характеристики	BGO	LYSO
Световыход, фотон/кэВ (%)	8–10(20)	32(75)
Температурный коэффициент световыхода, %/°C	-1.2	0.04
Плотность, г/см ³	7.13	7.1
Радиационная длина, см	1.12	1.1
Постоянная времени спада, нс	300	41
Коэффициент преломления в максимуме спектра эмиссии, нм	2.15	1.81
Энергетическое разрешение на линии 622 кэВ, %	9.5–12	7–11

Мы использовали для «шашлыка» 28 пластин LYSO ($100 \times 100 \times 3$ мм³) и 27 пластин поглотителя 1-мм, который представляет композит, с выбранным соотношением между компонентами вольфрам/медь (W/Cu) и таким же поперечным сечением, как и кристаллическая пластина. Чередую пластины кристалла и поглотителя, общая толщина прототипа составила 111 мм.

Для числа испытаний выбираем 1000 фотонов и определяем по их взаимодействиям в калориметре энергоразрешение кристалла при разных энергиях.

В результате проделанной работы было освоено моделирование в пакете Geant4 на Linux; изучены правила построения модели; описание материалов и геометрии установки и взаимодействие первоначальных частиц с материалами детекторов и окружающей среды; построены графики распределения по энергосодержанию в кристаллах LYSO (ГаГГ) при прохождении через калориметр фотонов с $E < 50$ MeV; вычислено энергетическое разрешение для кристаллов при этих энергиях.

Литература

- 1 Geant4 software license [Electronic resource]. – Mode of access : <http://geant4.web.cern.ch/geant4/license/LICENSE.html>. – Date of access : 20.02.2021.
- 2 Geant4: A toolkit for the simulation of the passage of particles through matter [Electronic resource]. – Mode of access : <http://geant4.cern.ch>. – Date of access : 22.02.2021.
- 3 Демичев, М. Компьютерное моделирование физических процессов в детекторах с использованием пакета Geant4 : тез. лекции / М. Демичев, А. Жемчугов. – Дубна : ОИЯИ, 2008 г. – 32 с.
- 4 Physics Reference Manual [Electronic resource]. – Mode of access : <https://geant4-userdoc.web.cern.ch/UsersGuides/PhysicsReferenceManual/fo/PhysicsReferenceManual.pdf>. – Date of access : 20.02.2021.
- 5 Geant4 [Electronic resource]. – Mode of access : <http://GEANT4.cern.ch/>. – Date of access : 01.02.2021.
- 6 Geant4 – a simulation toolkit / S. Agostinelli [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. – 2003. – Vol. 506. – P. – 250–303.
- 7 Introduction to Geant4 [Electronic resource]. – Mode of access : <http://geant4userdoc.web.cern.ch/geant4userdoc/UsersGuides/IntroductionToGeant4/html/index.html>. – Date of access : 01.02.2021.
- 8 Geant4 User's Guide for application developers [Electronic resource]. – Mode of access : <https://mirror.yandex.ru/gentoodistfiles/distfiles/BookForAppliDev-4.10.0.pdf>. – Date of access : 01.02.2021.
- 9 Исследование мягких фотонов в адронных и ядерных взаимодействиях [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://interest.jinr.ru/uploads/report_files/report_student_53_project_78.docx. – Дата доступа : 10.12.2020.
- 10 Компьютерное моделирование физических процессов в детекторах с использованием пакета Geant4 [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://clck.ru/UYoVc>. – Дата доступа : 10.12.2020.
- 11 Моделирование прохождения частиц через вещество средствами программного комплекса Geant4 [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://clck.ru/UYp28>. – Дата доступа : 24.12.2020.