

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОИЗВОЛЬНО ЗАДАНЫХ ЛИНЗ ФРЕНЕЛЯ С ПОМОЩЬЮ ПАКЕТА Geant4

*С. В. Биктемерова*¹, *М. О. Гончар*²

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Представлен обзор разработанного нами программного обеспечения (ПО) для моделирования произвольно заданных линз Френеля в пакете Geant4. Данное ПО предоставляет возможность добавлять в геометрию Geant4 цилиндрически-симметричные объекты с кусочно-гладкими поверхностями, описанными массивами точек ($z(\rho)$).

We report on creating a module for the Geant4 toolkit for a simulation of point-by-point defined Fresnel lenses and mirrors. This module provides a creation of cylindrical Geant4 shapes with one or two Fresnel surfaces, defined by the arrays of points ($z(\rho)$).

PACS: 42.79.Bh; 78.20.Bh

ВВЕДЕНИЕ

Линза Френеля — сложная линза, состоящая из отдельных колец определенной толщины (рис. 1). В зависимости от назначения, профиль линзы в среднем может быть как плоским, так и сферическим, или иметь более сложную форму. Поверхность самих колец рассчитывается исходя из требований к фокусным характеристикам линзы и в общем случае не имеет конкретного аналитического представления.

Линзы (а также зеркала) Френеля используются довольно широко как в повседневной жизни (осветительные приборы, фотовспышки, легкие лупы, оверхед-проекторы и т. п.), так и в науке, для построения космических телескопов и детекторов. При использовании линз Френеля в научных целях может потребоваться моделирование не только оптических свойств детектора, но и отклика на прохождение любых частиц в дополнение к фотонам. Для этого необходимо описать оптическую систему как часть сложного детектора в формате одного из доступных пакетов моделирования, например в Geant4 [1].

Geant4 — это набор инструментов для моделирования прохождения частиц через вещество. Основные области применения: физика высоких энергий, ядерная физика, ускорительная физика, а также медицина и дозиметрия. Данное ПО содержит код для моделирования большого числа частиц и их взаимодействий, для которых реализованы различные модели и параметризации. Кроме основного набора физических взаимодействий в Geant4 также описаны оптические процессы; таким образом, при помощи Geant4 можно описывать и моделировать сложные оптические системы.

¹E-mail: biktem@nusun.jinr.ru

²E-mail: gonchar@nusun.jinr.ru

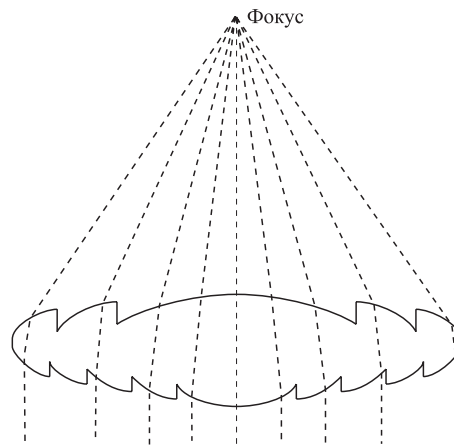


Рис. 1. Схематическое изображение линзы Френеля

Сложность моделируемых оптических систем, однако, ограничена возможностями описания геометрии в Geant4. Это ограничение можно обойти, разработав код для моделирования сложных элементов геометрии оптической системы самостоятельно. Столкнувшись со сложностями при моделировании оптической системы эксперимента JEM-EUSO [2] некоторое время назад, мы решили описать геометрию линзы Френеля для использования в Geant4. С помощью пакета, который мы разработали, можно моделировать одно- или двухсторонние линзы Френеля, зеркала Френеля, а также простые тонкие и толстые линзы, имеющие поверхность произвольной цилиндрически-симметричной формы.

1. МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛИНЗ ФРЕНЕЛЯ

1.1. Используемые термины и обозначения. Поверхность Френеля — цилиндрически-симметричная поверхность с кусочно-гладким профилем (рис. 1), одна из поверхностей линзы или зеркала Френеля.

«Специальная поверхность» — поверхность, профиль которой описывается функцией $\rho^2 = az^2 + bz + c$. Вид функции выбран из-за простоты нахождения пересечения с прямой.

CSG — конструктивная блочная геометрия (Constructive Solid Geometry). Основным методом описания геометрии в Geant4.

CSG_U и CSG_S используются для обозначения методов создания геометрических объектов в Geant4: с логическим объединением составных частей линзы (CSG_U, «united») и без логического объединения (CSG_S, «separate»).

Own_S и Own_D используются для обозначения нашего метода моделирования линз Френеля в Geant4. Own_D («direct»): для поиска пересечения используется прямой перебор возможных решений. Own_S («smart»): используется оптимизированный перебор (поведение по умолчанию).

1.2. Проблемы описания линзы Френеля в Geant4. В рамках CSG геометрия детектора описывается при помощи элементарных блоков. Блоки могут быть как простыми (куб, сфера, конус), так и более сложными (параболоид, скрученный параллелепипед

и т. п.). Можно создавать более сложные элементы, используя операции «пересечения» блоков, «объединения» или «вычитания», однако, согласно документации Geant4, при размещении в пространстве отдельные блоки не должны не только пересекаться друг с другом, но и иметь общих поверхностей: между ними всегда должно оставаться минимальное расстояние. В противном случае блоки должны быть «объединены» в единый логический объект.

Для описания линз Френеля у такого подхода есть следующие недостатки.

- В силу сложной формы линзы Френеля, для ее описания необходимо объединить большое количество блоков. В простейшем случае на каждое кольцо линзы приходится по одному блоку. При объединении вычислительная сложность моделирования растет пропорционально N^3 от числа объединенных частей. Моделирование прохождения 10^5 фотонов через линзу Френеля с 800 кольцами может потребовать более суток¹.

- Если блоки линзы не объединять, то время моделирования растет пропорционально N и предыдущий пример займет по времени несколько минут. Однако в этом случае описание геометрии заметно сложнее, так как части линзы не должны ни пересекаться, ни отстоять друг от друга. Минимальное расстояние, которое необходимо оставить между блоками, образует пустоты в линзе, на которых фотон может отразиться. В этом случае доля неправильно рассчитанных траекторий может составить до 5 % от полного их числа. Поэтому такое решение нельзя рекомендовать для прецизионных вычислений.

- Основные элементы геометрии, которые подходят для описания линзы Френеля, — это конус и параболоид. Если кольцо линзы не может быть описано ни одним из этих элементов в пределах необходимой точности, то его надо составлять из нескольких блоков, тем самым увеличивая число отдельных частей линзы.

1.3. Новый модуль для описания линзы Френеля. Из предыдущего пункта становится ясно, что линза Френеля должна быть описана как отдельный объект, для которого алгоритм поиска пересечения реализован в явном виде. Это позволит компенсировать замедление, связанное с объединением частей линзы, и избежать ошибок, вызванных пустотами внутри линзы и отклонениями аппроксимированной поверхности от реальной.

При разработке модуля были поставлены следующие цели:

- простота описания линзы, не зависящая от сложности самой линзы и количества колец. Оптическая система эксперимента JEM-EUSO содержит линзы с числом колец, достигающим нескольких тысяч;

- высокая скорость моделирования. Необходимо моделировать события с числом фотонов $\sim 10^5-10^7$ (свет от космических лучей с $E \gtrsim 10^{20}$ эВ) за разумно короткое время.

В новом модуле линза «собирается» из отдельных частей (поверхностей), каждая из которых точно соединяется с соседними. На данный момент доступны следующие простые поверхности: плоскость, цилиндр, сфера, параболоид, «специальная поверхность», поверхность, описанная массивом точек.

Для описания линзы необходимо задать две ее поверхности. Это может быть тонкая сферическая линза, толстая линза с одной сферической и с одной параболической поверхностью, линза с одной или двумя поверхностями Френеля и т. д.

¹Моделирование производилось на компьютере с процессором Intel Core2 Quad CPU @ 2.66 MHz.

Поверхность Френеля задается как совокупность простых поверхностей. Для оптимизации вычислений необходимо также задать две дополнительные поверхности, каждая из которых совпадает по радиусу с линзой и ограничивает ее с одной стороны. Чем ближе ограничивающие поверхности прилегают к поверхности Френеля, тем быстрее происходит поиск кольца, с которым пересекается траектория частицы. Случаи со множественным пересечением обрабатываются корректно.

Основной элемент описания поверхности Френеля — это поверхность, заданная точками (численная поверхность). Для поиска пересечения с такой поверхностью разработан специальный алгоритм. Он оптимизирован и сходится за минимальное количество итераций, скорость схождения практически не зависит от положения и направления движения частицы. Кроме того, при необходимости возможно использование поиска пересечения прямым перебором массива точек.

Для описания поверхности Френеля могут использоваться и другие доступные типы поверхностей. Следует отдельно отметить «специальную поверхность», которая реализована для аппроксимации численной поверхности и хорошо подходит для описания колец линзы, так как, с одной стороны, у нее больше степеней свободы, чем, например, у параболоида, а с другой стороны, уравнение пересечения прямой с такой поверхностью решается аналитически.

В состав модуля входит набор вспомогательных функций для упрощения создания линзы Френеля и автоматической аппроксимации ее колец.

2. МОДЕЛИРОВАНИЕ

2.1. Описание тестовой линзы. Для проверки метода была параметризована плоская линза Френеля с одной фокусирующей стороной (рис. 2). Параметры линзы:

- толщина линзы (h) — 6 мм;
- толщина поверхности Френеля (T) — 3 мм;
- фокусируемая длина волны (λ) — 500 нм;
- фокусное расстояние (F) — 10 м;
- число колец (N_r) — 10;
- поперечный радиус линзы (R) — 60 см;
- шаг дискретизации поверхности по радиусу (S) — 0,5 мкм.

Поверхность линзы описывается от центра к краю с шагом S . Каждый шаг представляет собой конус $[\rho, \rho + S]$ (рис. 2), фокусирующий фотоны с длиной волны λ на расстоянии F от центра линзы. Координаты точек поверхности на каждом шаге связаны следующими соотношениями:

$$z^{\text{true}}(\rho) = \begin{cases} \rho_0 = 0, z_0 = h, \\ \rho_i = \rho_{i-1} + S, \\ z_i = z_{i-1} + S \frac{\sin \alpha}{n(\lambda) - \cos \alpha}; \end{cases} \quad (1)$$

$$\text{tg } \alpha = \frac{\rho_{i-1}}{F - z_{i-1}}, \quad (2)$$

где $n(\lambda)$ — коэффициент преломления материала линзы.

Построение одного кольца заканчивается, когда его толщина достигает T . Линза строится, пока не будут описаны N_r колец. Таким образом, для данной линзы поперечный радиус зависит от числа колец при постоянных T , F и λ . Фокусное расстояние

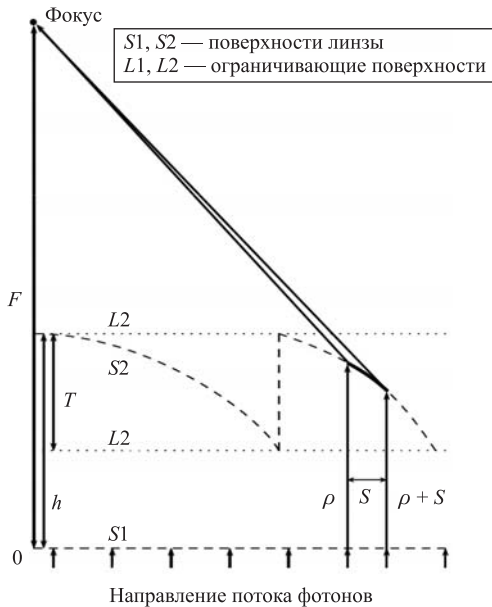


Рис. 2. Схема построения тестовой линзы

выбрано таким, чтобы сохранить отношение R/F достаточно малым. В этом случае линза близка к плоской линзе и может быть представлена сферой или параболоидом.

При тестировании алгоритмов в первую очередь проверялись переменные, влияющие на производительность: число колец линзы, шаг дискретизации поверхности, угол падения фотонов.

Для методов CSG_U и CSG_S кольца линзы аппроксимированы ($z^{\text{approx}}(\rho)$) параболоидами таким образом, чтобы аппроксимация удовлетворяла условию

$$|z^{\text{approx}}(\rho) - z^{\text{true}}(\rho)| \leq 1 \text{ мкм.} \quad (3)$$

В случае, когда отклонение параболоида превышает допустимое, кольцо линзы аппроксимируется двумя параболоидами до тех пор, пока отклонения всех параболоидов не будут удовлетворять требованиям точности.

2.2. Моделирование тестовой линзы. Скорость моделирования в первую очередь зависит от числа элементов, по которым осуществляется перебор: число колец линзы и число сегментов кольца. В нашем модуле мы постарались минимизировать зависимость от N_r за счет использования ограничивающих поверхностей. На рис. 3 представлено время моделирования прохождения 10^5 фотонов через линзу как функция числа колец. Для сравнения построены графики для линзы, описанной средствами Geant4. Видно, что для случая Own_S время моделирования практически не зависит от количества элемен-

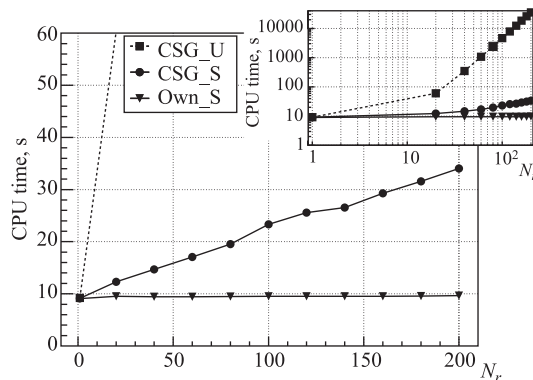


Рис. 3. Зависимость времени моделирования от числа колец линзы

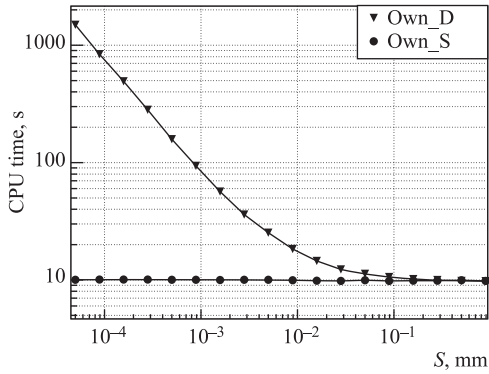


Рис. 4. Зависимость времени моделирования от шага дискретизации поверхности

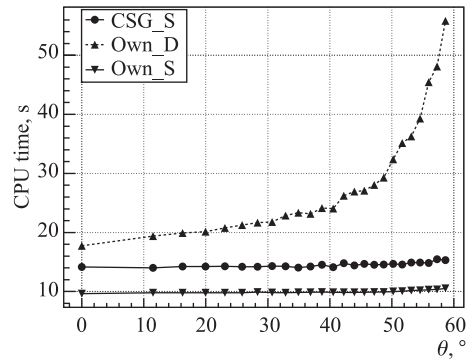


Рис. 5. Зависимость времени моделирования от угла падения фотона

тов линзы. Для случаев CSG_S и CSG_U зависимость пропорциональна соответственно первой и третьей степени числа элементов линзы, как и ожидалось.

Число перебираемых элементов кольца обратно пропорционально величине шага, с которым линза построена. Для того чтобы минимизировать зависимость от этих переменных, для поиска пересечения с кольцом линзы разработаны специальные алгоритмы. На рис. 4 продемонстрировано, что время моделирования практически не зависит от шага дискретизации поверхности. По этой же причине практически отсутствует зависимость времени моделирования от угла падения фотона на линзу (рис. 5). Для сравнения на обоих рисунках представлена зависимость для поиска пересечения прямым перебором (Own_S), скорость работы которого напрямую связана с величиной шага.

На рис. 6 представлена эффективность фокусировки фотонов, падающих под углом 0° , для данной линзы. Эффективность фокусировки определяется как отношение числа фотонов, находящихся в круге радиуса $r < \rho$ ($N(\rho)$), к полному числу фотонов на

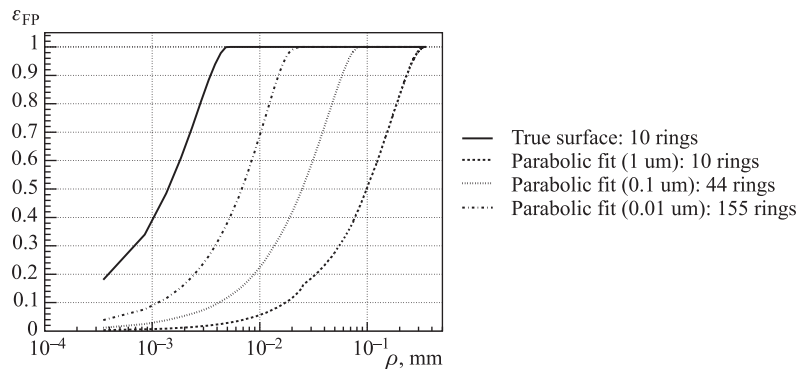


Рис. 6. Эффективность фокусировки фотонов как функция радиуса круга на фокальной поверхности

фокальной поверхности ($N(\text{FP})$):

$$\varepsilon_{\text{FP}}(\rho) = \frac{N(\rho)}{N(\text{FP})}. \quad (4)$$

Так как эффективность нормируется на число фотонов на фокальной поверхности, она не учитывает потери, связанные с отражением, поглощением и особенностями описания геометрии в Geant4 (см. п. 1.2), которые мы не обсуждаем в данной работе. Представлены результаты моделирования точной поверхности, а также ее аппроксимаций, сделанных с разной точностью.

Как видно из графиков, при увеличении точности эффективность CSG-фокусировки приближается к эффективности нашего метода, однако число составных блоков линзы тоже растет. Так, линза, описанная в CSG-геометрии с точностью 0,01 мкм, состоит из 155 параболоидов и еще около 140 связующих цилиндров, что приводит к увеличению времени моделирования относительно нашего метода приблизительно в 100 раз для CSG_U и в 4 раза для CSG_S.

2.3. Использование. Представленное ПО используется в программе моделирования ESAF эксперимента JEM-EUSO [3] в качестве дополнительного модуля, используемого для моделирования оптической системы детектора с учетом второстепенных элементов и поддерживающей конструкции. Модуль используется для моделирования не только оптических фотонов, но и фона от прохождения космических лучей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе описано новое ПО для моделирования линз и зеркал Френеля в среде Geant4. Приведены графики скорости моделирования и эффективности фокусировки. Представленное ПО распространяется свободно и доступно для использования по запросу.

Работа выполнена в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг., ГК №02.740.11.5220 при частичной поддержке гранта РФФИ №10-02-00395-а.

Благодарности. Мы хотим выразить благодарность Д. В. Наумову за помощь в работе над данным ПО и подготовке статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Agostinelli S. et al.* Geant4 — a Simulation Toolkit // Nucl. Instr. Meth. A. 2003. V. 506, No. 3. P. 250–303.
2. *Takahashi Y. et al.* The JEM-EUSO Mission // New J. Phys. 2009. V. 11.
3. *Berat C. et al.* ESAF: Full Simulation of Space-Based Extensive Air Showers Detectors // Astropart. Phys. 2010. V. 33. P. 221–247.