Моделирование физических процессов в пакете Geant4

Алексей Жемчугов
ОИЯИ
E-mail: zhemchugov@jinr.ru

Иркутский государственный университет

28-29 апреля 2015

Содержание

- Лекция 1

  Цели моделирования. Метод Монте-Карло. Доступные инструменты. Как проходит моделирование эксперимента от космической частицы до отклика детектора

- Лекция 2

  Как устроен пакет Geant4. Самая простая программа моделирования. Как запустить ее на сервере ИГУ?

- Лекция 3

  Более сложная программа моделирования. Geant4 и ROOT.

Лекции и примеры программ доступны на http://geant4.jinr.ru

Что такое моделирование?

Имитация физических процессов и отклика детекторов в проводимом или планируемом эксперименте

- Вопрос:

  Если мы умеем моделировать на компьютере все физические процессы в установке, можем ли мы совсем обойтись без проведения физического эксперимента?

- Еще вопрос:

  Если у нас уже есть результаты реальных измерений, зачем их моделировать?

Что такое моделирование?

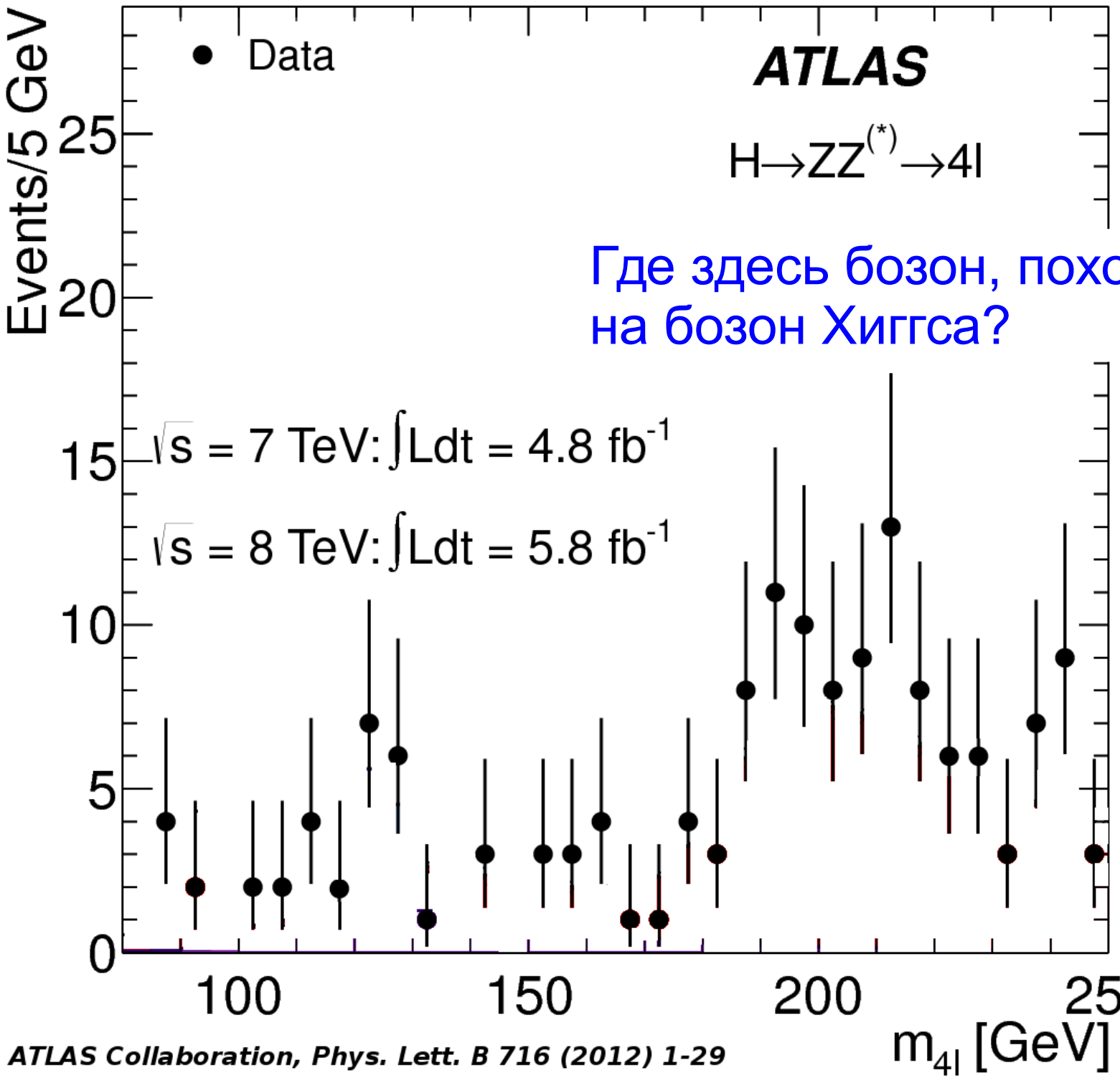
Имитация физических процессов и отклика детекторов в проводимом или планируемом эксперименте

- Вопрос:

  Если мы умеем моделировать на компьютере все физические процессы в установке, можем ли мы совсем обойтись без проведения физического эксперимента?

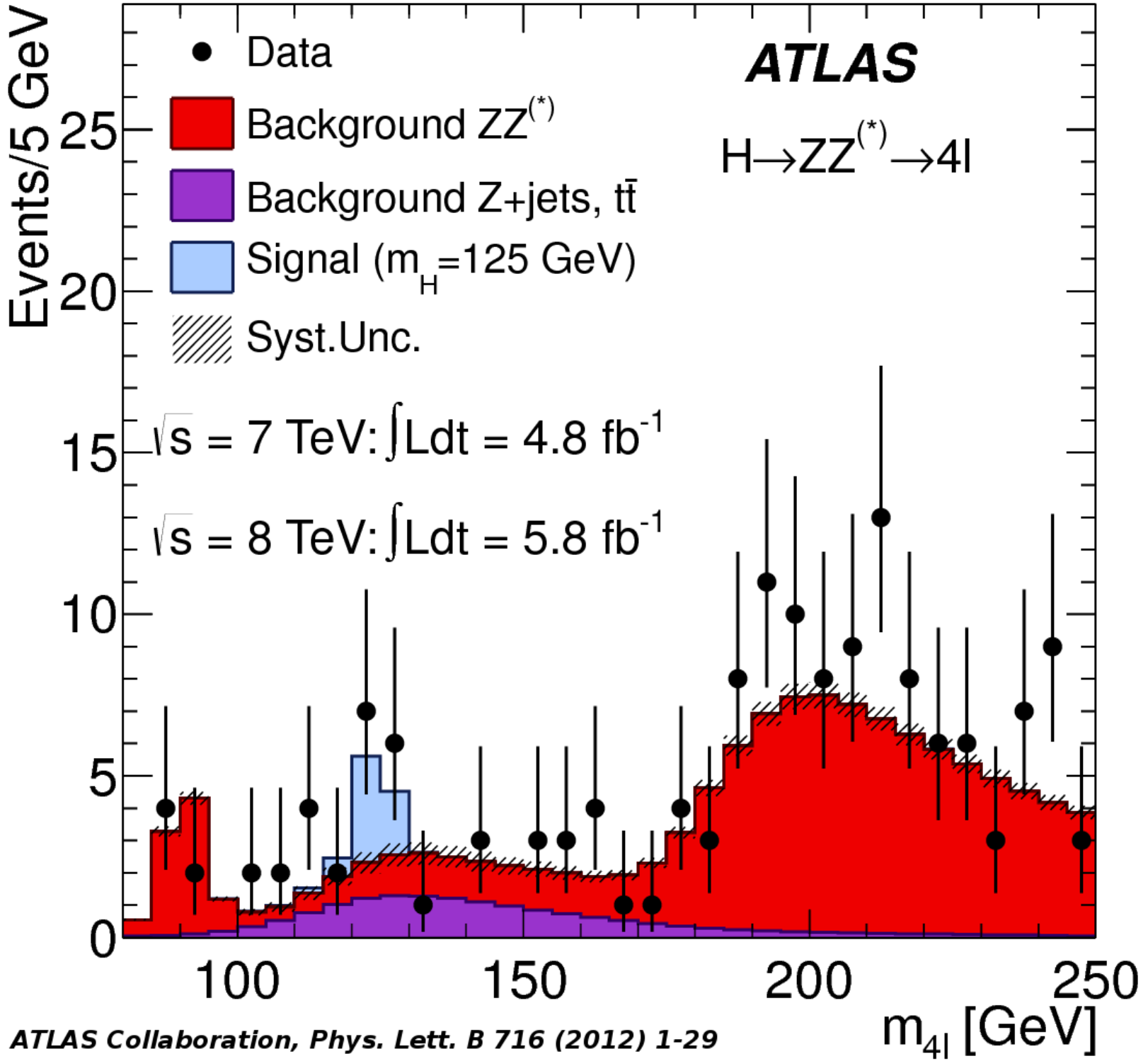
- Еще вопрос:

  Если у нас уже есть результаты реальных измерений, зачем их моделировать?



Где здесь бозон, похожий на бозон Хиггса?

ATLAS Collaboration, Phys. Lett. B 716 (2012) 1-29



ATLAS Collaboration, Phys. Lett. B 716 (2012) 1-29

Цели моделирования

- При планировании эксперимента
  - Оптимизация конструкции детектора
  - Отладка алгоритмов реконструкции событий
  - Расчет ожидаемых значений сигнала и фоновых процессов. Оценка ожидаемой точности измерений
- При анализе данных
  - оптимизация процедуры анализа данных
  - определение аксептанса установки
  - определение вклада фоновых процессов
  - оценка систематических погрешностей
  - сравнение результатов анализа с теоретическими предсказаниями

Метод Монте-Карло

Метод Монте-Карло – это численный метод решения прикладных математических задач при помощи моделирования случайных величин и статистической оценки их характеристик.

JOURNAL OF THE AMERICAN STATISTICAL ASSOCIATION

Number 247 SEPTEMBER 1949 *Volume 44*

THE MONTE CARLO METHOD

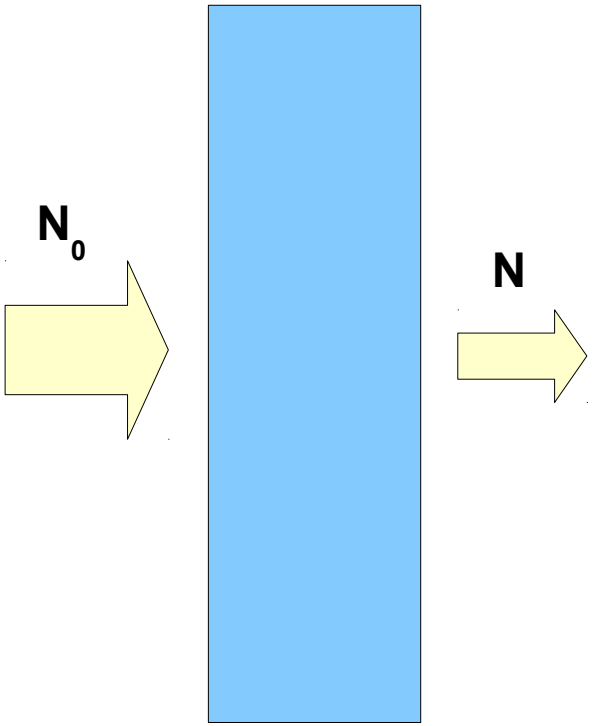
NICHOLAS METROPOLIS AND S. ULAM
Los Alamos Laboratory

We shall present here the motivation and a general description of a method dealing with a class of problems in mathematical physics. The method is, essentially, a statistical approach to the study of differential equations, or more generally, of integro-differential equations that occur in various branches of the natural sciences.

Метод появился при работе над Манхэттенским проектом:

- **S.M. Ulam, J. von Neumann, “On combination of stochastic and deterministic processes”. Bull. Amer. Math. Soc. 53 1120 (1947)**
- **S.M. Ulam, N. Metropolis, “The Monte-Carlo method”, J. Amer. Statist. Assoc. 1949 , 44 Vol 247, 335-341**

- Математический смысл: эффективный способ вычисления многомерных интегралов со сложными пределами интегрирования
- Пример:



Поглощение излучения в веществе:

$dN = -\mu N\, dx$ $\qquad$ $N = N_0 \exp(-\mu x)$

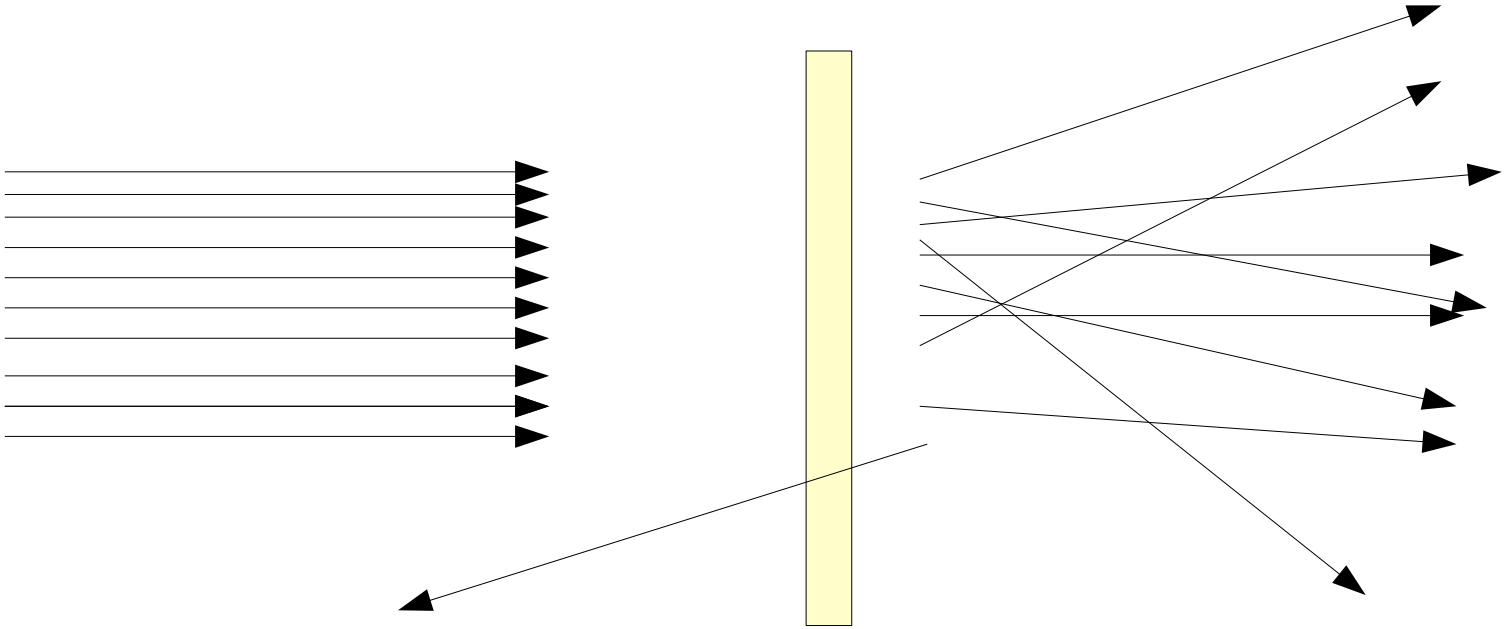
Если μ зависит от (x,y,z,E) $\qquad$ **??**

Если N зависит от (E, $\bar{r}$) $\qquad$ **???**

Если учесть рассеяние $\qquad$ **????**

Если μ нельзя задать аналитически ?????

Пример: опыт Резерфорда



$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \left(\frac{Z_1 Z_2 e^2}{2mv^2}\right)^2 \frac{1}{\sin^4 \frac{\Theta}{2}}$$

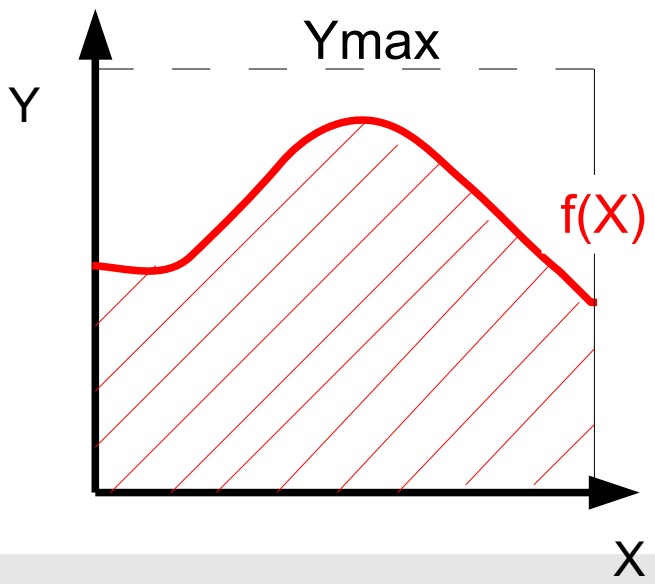
~ вероятность рассеяния на угол Θ

Шаги моделирования:

1. Генерируется пучок из N частиц
2. Для каждой частицы вычисляется случайный угол рассеяния Θ в соответствии с известным распределением и заданной скоростью частиц
3. Для каждой частицы вычисляется случайный азимутальный угол φ, который разыгрывается равномерно в интервале $[0,2\pi]$
4. Рассеяние частиц смоделировано

Как смоделировать произвольное распределение?

- Равномерные распределения случайных чисел получаются при помощи программ - генераторов псевдослучайных чисел (алгоритмы l'Ecuyer, Marsaglia-Zaman, Mersenne Twister и др.)
- Метод выбраковки (“Hit-and-miss”) - наиболее простой способ моделирования произвольного распределения f(x) при помощи равномерно распределенных случайных чисел



1. Выбирается случайное X в интервале [0, Xmax]
2. Выбирается случайное Y в интервале [0, Ymax]
3. X принимается при условии Y< f(X)

Литература

И.М.Соболь Численные методы Монте-Карло. Наука, М. 1973

Е.Бюклинг, К.Каянти Кинематика элементарных частиц, Мир, М. 1975

С.М.Ермаков, Метод Монте-Карло и смежные вопросы, Наука, М., 1975

Г.И.Копылов, Основы кинематики резонансов, Наука, М., 1970

В электронном виде доступны на сайте http://geant4.jinr.ru (Библиотека)

Программы для моделирования

Существует большое количество уже написанных программ и программных пакетов для моделирования физических процессов с участием элементарных частиц с помощью метода Монте-Карло:

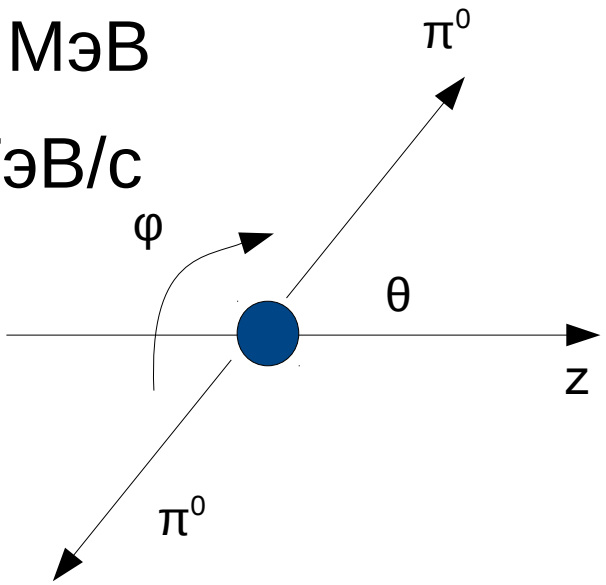
- Генераторы событий
- Специализированные программы
- Универсальные программы

Генераторы событий

- Позволяют моделировать наблюдаемые величины (импульс, энергия, точка рождения ...) на основе теоретических предсказаний.
- Искажение наблюдаемых величин, связанное с прохождением частиц через вещество, не учитывается
- Генератор событий - это «мост» между теоретиками и экспериментаторами.
- Генераторов существует великое множество. Только на LHC применяются несколько десятков генераторов. Самый известный, пожалуй, PYTHIA.
- Давайте напишем свой генератор?

Простой генератор: распад каона $K^0 \rightarrow 2\pi^0$

- Масса каона 498 МэВ, масса пиона 135 МэВ
- Для определенности, импульс каона 5 ГэВ/с
- Перейдем в СЦМ:
  - $E_\pi = M_K/2$
  - $P_\pi = \mathrm{sqrt}(E_\pi^2 - M_\pi^2)$



- Разыграем направление одного из пионов (изотропно)
  - $\cos(\theta) = \mathrm{RNDM}[-1,1]$
  - $\varphi = \mathrm{RNDM}\ [0, 2\pi]$
- Зададим направление второго пиона противоположно первому
- Перейдем в лабораторную систему при помощи преобразования Лоренца

Как это выглядит на C++

```
{

  double mkaon = 498; // MeV
  double mpion = 135; // MeV
  double pkaon = 5000; // MeV/c
  double beta = pkaon/sqrt(pkaon*pkaon+mkaon*mkaon);

  int i;
  for (i=0; i < 100000 ; i++) // 100000 events
    {
      // calculate kinematics
      double epion = mkaon/2.;
      double ppion = sqrt(epion*epion - mpion*mpion);
      double costheta = 2*gRandom->Rndm() - 1; // [-1,1]
      double sintheta = sqrt(1-costheta*costheta);
      double phi = gRandom->Rndm()*2*3.14159;  // [0,2pi]

      // calculate momentum of the 1st pion
      double px1 = ppion*sintheta*cos(phi);
      double py1 = ppion*sintheta*sin(phi);
      double pz1 = ppion*costheta;

      // calculate momentum of the 2nd pion
      double px2 = -px1;
      double py2 = -py1;
      double pz2 = -pz1;

      // make 4-vectors
      TLorentzVector pion1 (px1, py1, pz1, epion);
      TLorentzVector pion2 (px2, py2, pz2, epion);
      // Lorentz boost
      pion1.Boost(0., 0., beta);
      pion2.Boost(0., 0., beta);
    }

}
```

Пример kaon.C на http://geant4.jinr.ru

Добавим сохранение в дерево ROOT

```
{
  double mkaon = 498; // MeV
  double mpion = 135; // MeV
  double pkaon = 5000; // MeV/c
  double beta = pkaon/sqrt(pkaon*pkaon+mkaon*mkaon);
  int i;
  for (i=0; i < 100000 ; i++) // 100000 events
   {
     // calculate kinematics
     double epion = mkaon/2.;
     double ppion = sqrt(epion*epion - mpion*mpion);
     double costheta = 2*gRandom->Rndm() - 1; // [-1,1]
     double sintheta = sqrt(1-costheta*costheta);
     double phi = gRandom->Rndm()*2*3.14159;  // [0,2pi]

     // calculate momentum of the 1st pion
     double px1 = ppion*sintheta*cos(phi);
     double py1 = ppion*sintheta*sin(phi);
     double pz1 = ppion*costheta;

     // calculate momentum of the 2nd pion
     double px2 = -px1;
     double py2 = -py1;
     double pz2 = -pz1;

     // make 4-vectors
     TLorentzVector pion1 (px1, py1, pz1, epion);
     TLorentzVector pion2 (px2, py2, pz2, epion);
     // Lorentz boost
     pion1.Boost(0., 0., beta);
     pion2.Boost(0., 0., beta);

   }
}
```

```
// open ROOT file
TFile fout("kaon.root","RECREATE");
TTree* tree = new TTree("kaon","kaon");

 // initialize ROOT tree
double p1[4], p2[4];
tree->Branch("p1",p1,"p1[4]/D");
tree->Branch("p2",p2,"p2[4]/D");
```

```
// Fill the tree
p1[0] = pion1.Px();  p2[0] = pion2.Px();
p1[1] = pion1.Py();  p2[1] = pion2.Py();
p1[2] = pion1.Pz();  p2[2] = pion2.Pz();
p1[3] = pion1.E();   p2[3] = pion2.E();
tree->Fill();
```

```
// Save file
tree->Write();
fout.Close();
```

Задание на дом

- Смоделировать влияние импульсного разрешения детектора:

  в лабораторной системе для каждого пиона

  импульс = gRandom->Gaus(импульс, разрешение)

- Проверить как изменятся распределения импульса пионов и инвариантной массы системы двух пионов
- Повышенной сложности: Написать программу - генератор распада $K^0 \rightarrow 3\pi^0$

Специализированные программы

- Оптимизированы под конкретную задачу
- Узкий набор физических моделей
- Как правило, очень ограниченные возможности в описании геометрии установки
- Примеры:
  - Моделирование ШАЛ: CORSIKA, AIRES
  - Моделирование пробега частиц низкой энергии в веществе (ионная имплантация и т.д.): SRIM, MARLOWE
  - Моделирование защиты: MARS, SHIELD, PHITS
  - Моделирование задач радиационной медицины: EGSnrc, BEAMnrc, PEREGRINE

Есть отдельный набор программ для расчета реакторов

Моделирование ШАЛ

- Количество частиц в ливне может достигать 10^{10}-10^{15}
- Развитие ливня зависит от свойств атмосферы, магнитного поля Земли и т.д.
- Требуются модели физических взаимодействий ориентированные на сверхвысокие энергии
- Требуется смоделировать развитие ЭМ и адронного каскадов частиц, черенковское излучение
- Расчет с помощью универсальных программ требует огромных затрат времени ЦПУ

CORSIKA, AIRES

- Специализированные программы для моделирования ШАЛ
  - оптимизация скорости расчетов за счет введения статистических весов (моделирование 1000 частиц с близкими свойствами заменяется моделированием одной частицы с весом 1000)
  - встроено описание атмосферы и магнитного поля Земли
  - большой набор адронных моделей для сверхвысоких энергий (DPMJET, SYBILL, QGS). Непонятно, как проверить их правильность? Одно из решений - посчитать с разными моделями и сравнить ответ.
  - в результате работы программ получается список частиц на поверхности детектора (без моделирования его отклика)
- CORSIKA https://web.ikp.kit.edu/corsika/
- AIRES http://www2.fisica.unlp.edu.ar/auger/aires/

Универсальные программы

- Широкий набор физических моделей для всех диапазонов энергий
- Богатый инструментарий для описания геометрии установки
- Хорошо подходят для моделирования процессов в детекторе и его отклика
- Встроенные генераторы событий довольно простые, поэтому универсальные пакеты обычно применяют в связке с внешними программами-генераторами
- Примеры: MCNP, FLUKA, Geant3, Geant4
  - MCNP, FLUKA - программы, требующие составления конфигурационного файла
  - Geant3, Geant4 - пакеты-конструкторы, предоставляющие набор библиотек и требующие написания своей программы

FLUKA (FLUktuirende KAskade)

- Первоначально разрабатывалась для расчета защиты в проекте SPS в ЦЕРН (1962-1978)
- В настоящее время универсальная программа расчета взаимодействия частиц с веществом
- Написана на языке Фортран.
- Хорошее моделирование адронных ливней
- Сложность описания геометрии
- Лицензионные ограничения

MCNP (Monte-Carlo N-particle transport code)

- Разработана в Лос-Аламосе для расчета реакторов
- В настоящее время универсальная программа расчета взаимодействия частиц с веществом
- Написана на языке Фортран.
- Хорошее моделирование нейтронных процессов, и процессов при низких энергиях
- Лицензионные и экспортные ограничения
- После выхода версии 4 разделилась на две ветви: MCNP5 и MCNPX (MCNP+LAHET)

GEANT3
(GEometry ANd Tracking)

- Первая версия появилась в 1974 году в ЦЕРН
- Описание физических процессов основано на программах EGS (э/м ливни) и GHEISHA (адронные ливни)
- Пакет GEANT3 появился в 1982 году и был использован для моделирования детекторов в экспериментах на LEP
- Написан на языке Фортран
- Основной инструмент моделирования в физике частиц на протяжении 30 лет

GEANT4

- Объектно-ориентированная программа с функциональностью GEANT3
- Первая версия пакета появилась в 1995 году
- Написана на языке C++
- Первое “боевое” применение – эксперимент BaBar
- С 2004 года – основная программа моделирования в экспериментах на LHC (кроме ALICE)
- Широкое и растущее применение в физике частиц, космонавтике (ESA), радиационной медицине.

Что установлено на сервере ИГУ?

hep@S5500BC:~$ ls /opt/hep/

aires - AIRES версия 2.8.4a

corsika - CORSIKA версия 7.4005

geant4 - Geant4 версия 4.10.01.p01

root - ROOT версия 6.02.05

setup.sh - скрипт задания переменных окружения:

hep@S5500BC:~$ source /opt/hep/setup.sh

Пакет программ GEANT4

Geant4 – это набор инструментов

• GEANT4 представляет собой набор программ для моделирования прохождения частиц через вещество

• Включает в себя инструменты для гибкого описания геометрии

• Содержит 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**
  - **Методы использования статистических весов**

- **Не учитывает гравитацию, акустические сигналы, взаимодействие нейтрино**

Системные требования

Основные платформы и компиляторы

- Linux + gcc
- Windows + VisualC++
- MacOSX + gcc

Внешние пакеты

- CLHEP (начиная с версии 4.9.5 встроен в Geant4)
- cmake
- Xerces-C (опционально, при использовании GDML)
- графические библиотеки OpenGL, Qt и другие (опционально, но желательно)

Требует около 1.2 Гб дискового пространства (полная установка)

Требует минимум 128 Мб оперативной памяти для работы

Документация и исходный код

http://cern.ch/geant4

Основные публикации

S. Agostinelli et al.,
Geant4: a simulation toolkit, NIM A 506 (2003) 250-303

J. Allison et al.,
Geant4 developments and applications
IEEE Trans. Nucl. Sci. 53 No. 1 (2006) 270-278

Основные типы переменных

•Для достижения переносимости кода в Geant4 переопределены основные типы переменных

G4int, G4long, G4float, G4double,

G4bool, G4complex, G4String

•Лучше использовать переопределенные типы

Ввод и вывод в коде Geant4

Можно использовать обычные printf() и cout

Однако более правильно использовать переопределенные потоки Geant4:

G4cout << *“test”* << *G4endl;*

G4cerr << *“error”* << *G4endl;*

При этом будет корректно обрабатываться ввод-вывод в случае, если интерфейс пользователя отличен от командной строки

Библиотека CLHEP
Class Library for High Energy Physics

- Содержит описание стандартных математических объектов, часто используемых в ФВЭ
  - 3-векторы и 4-векторы
  - действия с матрицами
  - геометрические объекты и преобразования
  - генераторы случайных чисел
  - система единиц и основные физические константы
- Широко используется в коде Geant4
- Подробное описание

http://cern.ch/clhep

- **G4ThreeVector**
  - трехкомпонентный (x,y,z) вектор и действия с ним
- **G4LorenzVector**
  - четырехкомпонентный (x,y,z,t) вектор
- **G4RotationMatrix**
  - матрица 3x3, определяющая вращение 3-вектора
- **G4LorenzRotation**
  - матрица 4x4, определяющая вращение 4-вектора
- Геометрические объекты и преобразования
  - **G4Plane3D, G4Transform3D, G4Normal3D, G4Point3D, G4Vector3D**

Система единиц Geant4

•Любое число, имеющее размерность, должно быть умножено на соответствующую единицу для перевода во внутреннюю систему единиц Geant4

length = 10.0 * cm;

kinetic_energy = 5.0 * GeV;

•Для получения величины в желаемых единицах следует делить число на единицу

G4cout << eDep / MeV << "[MeV]"<< G4endl;

•Все общеупотребительные единицы описаны в Geant4 (CLHEP). При необходимости можно определить свои единицы