Компьютерное моделирование физических процессов в детекторах с использованием пакета Geant4

А. Жемчугов, М. Демичев

2018

Содержание курса

- Цели моделирования физических процессов в детекторах
- Основы метода Монте-Карло
- Устройство и работа с пакетом Geant4
- Написание простой программы моделирования

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

Литература

Метод Монте-Карло

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)*

Документация Geant4

Geant4 User's Guide for Application Developers

Geant4 Physics Reference Manual

Geant4 User's Guide for Toolkit Developers

http://geant4.web.cern.ch/geant4/support/userdocuments.shtml

Цели моделирования физических процессов в детекторе

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

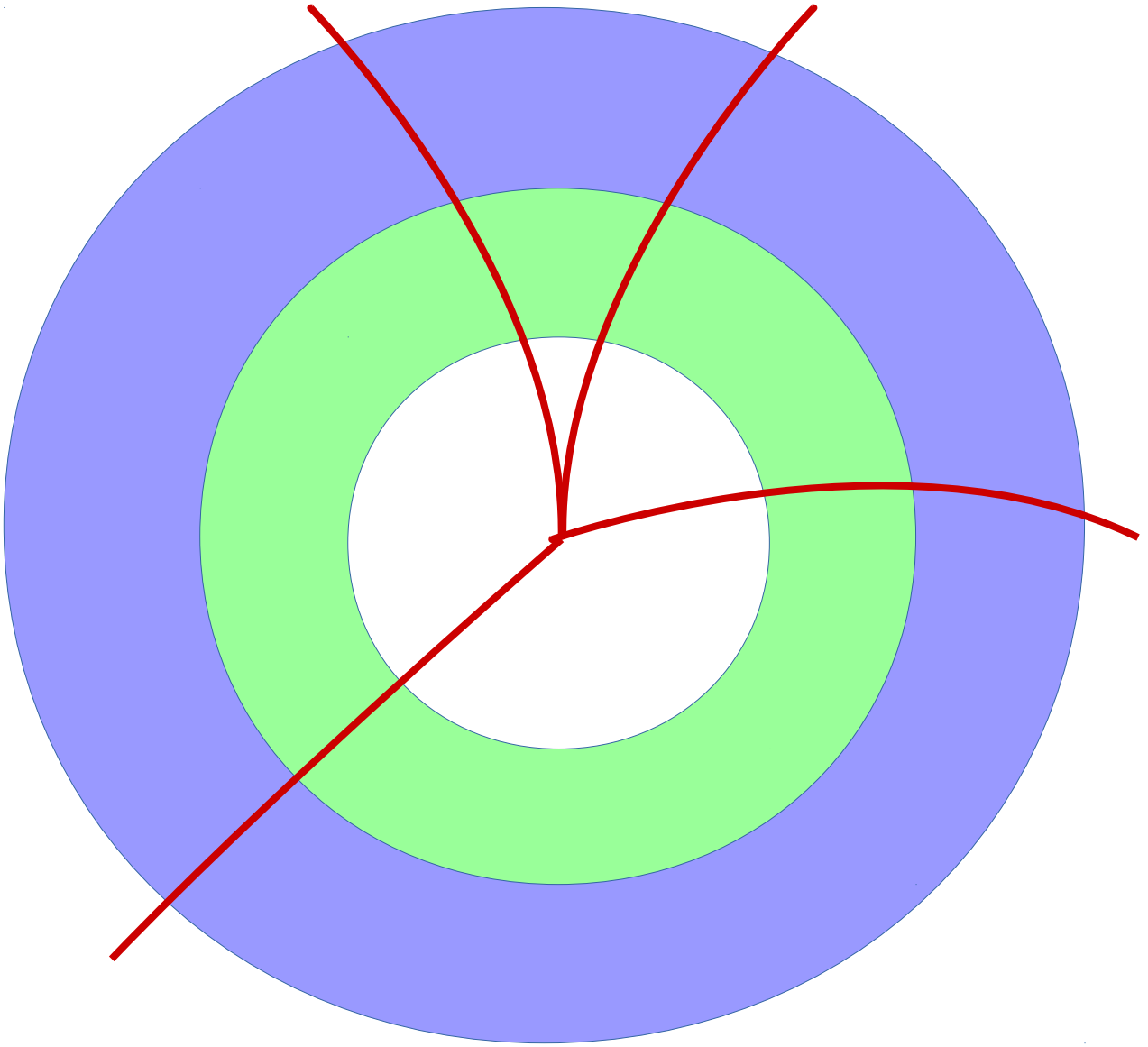
- Вопрос:

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

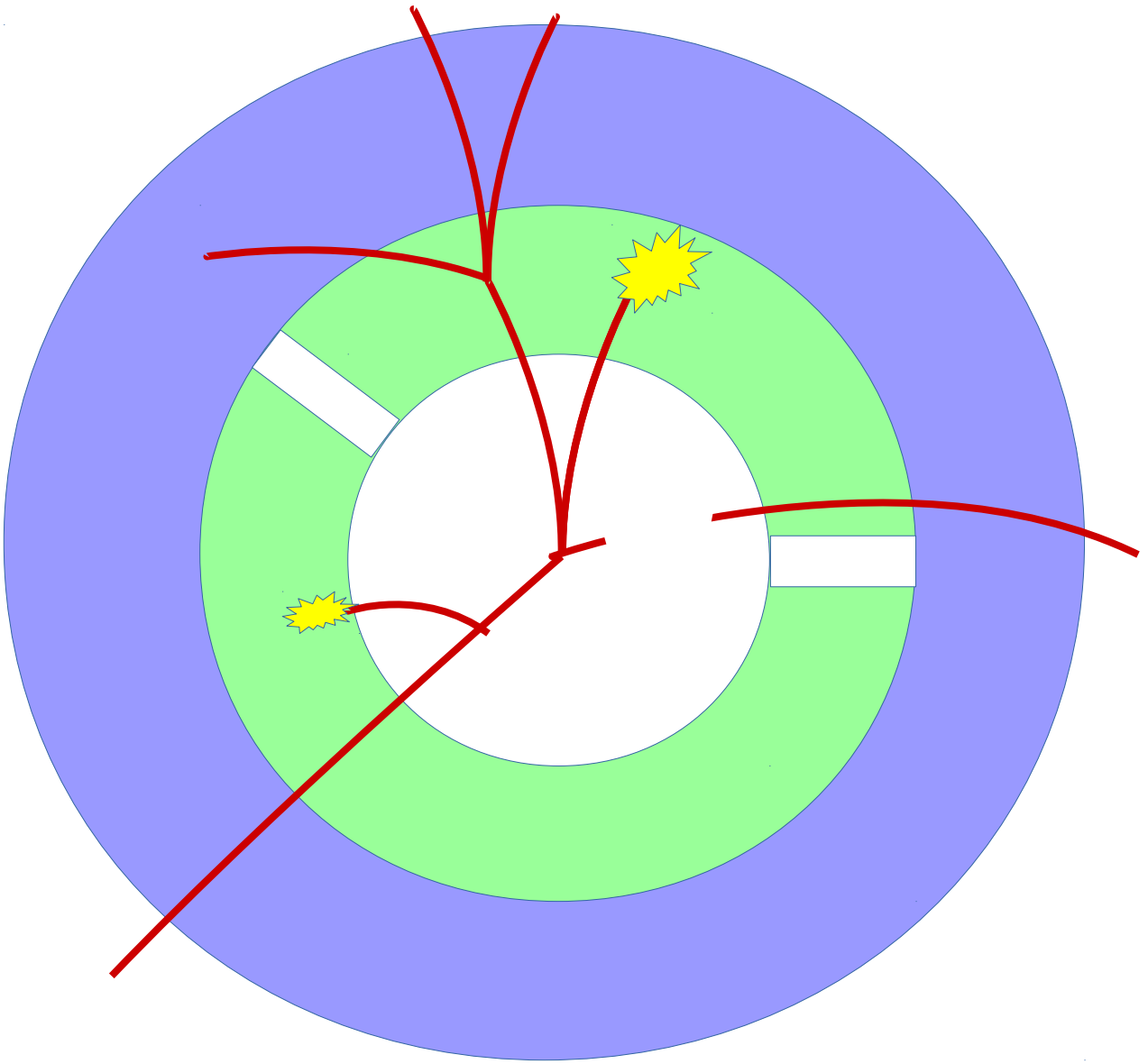
- Еще вопрос:

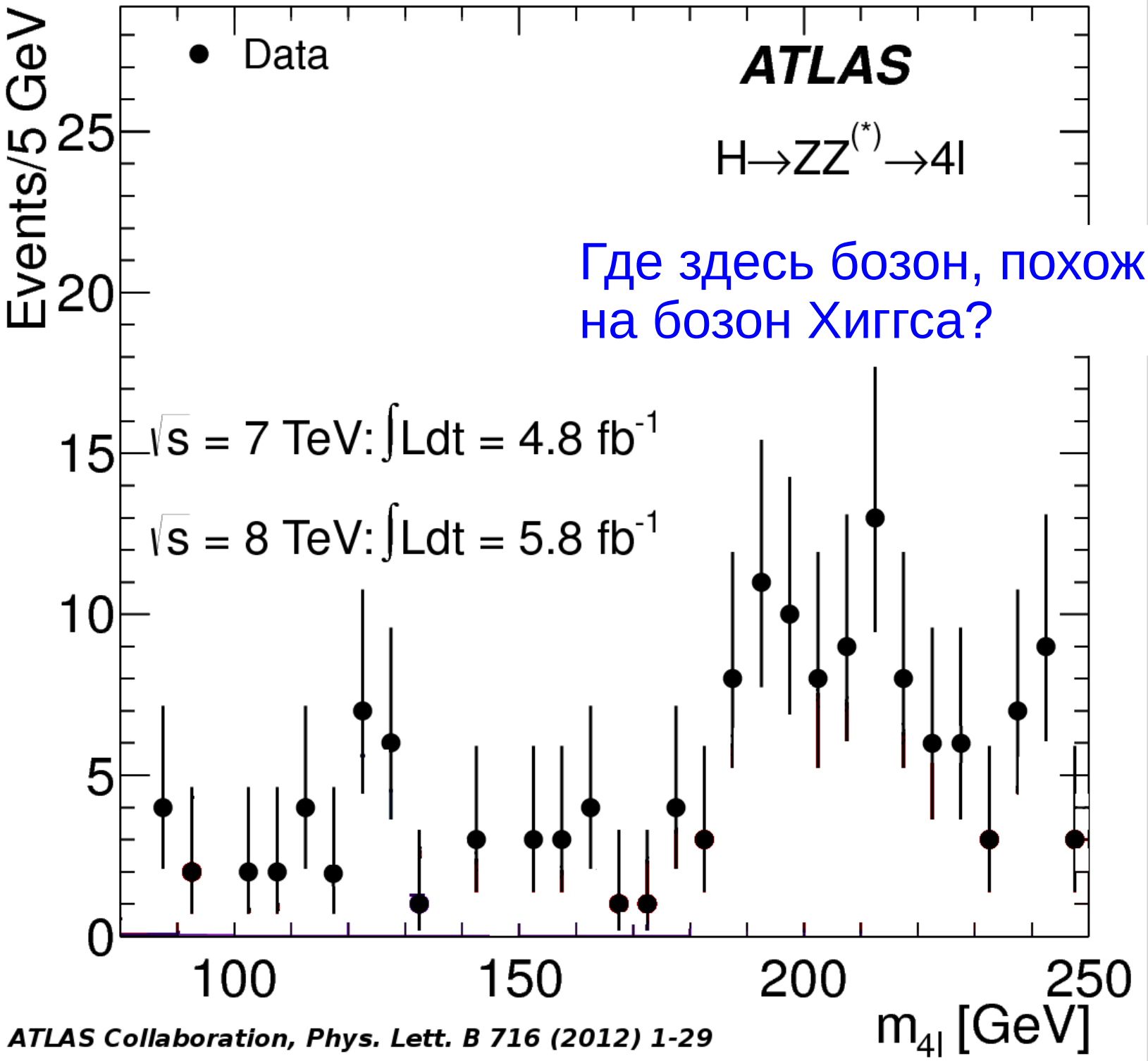
Если у нас уже есть результаты реальных измерений, зачем их моделировать?

В идеальном мире



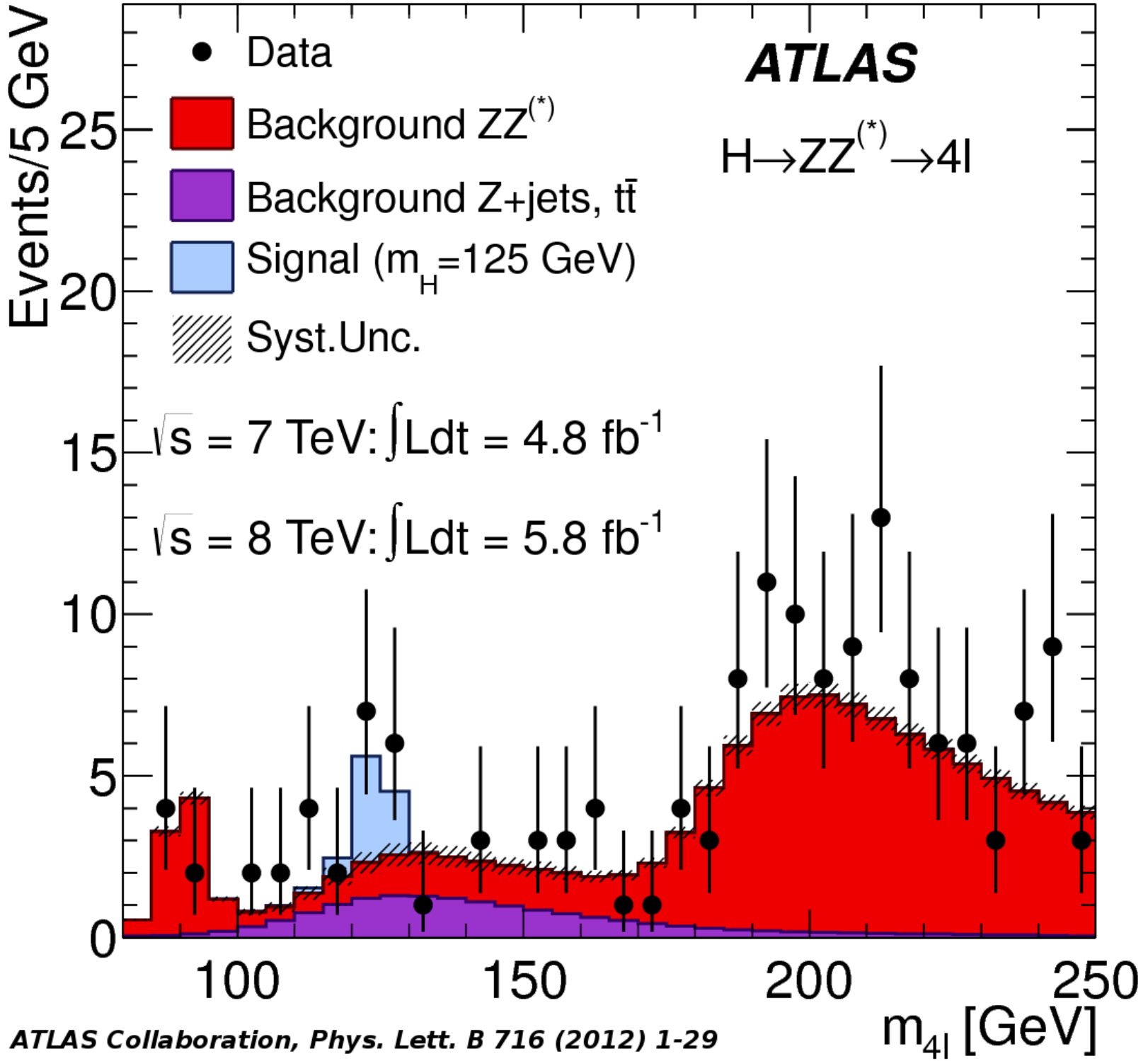
В реальном мире





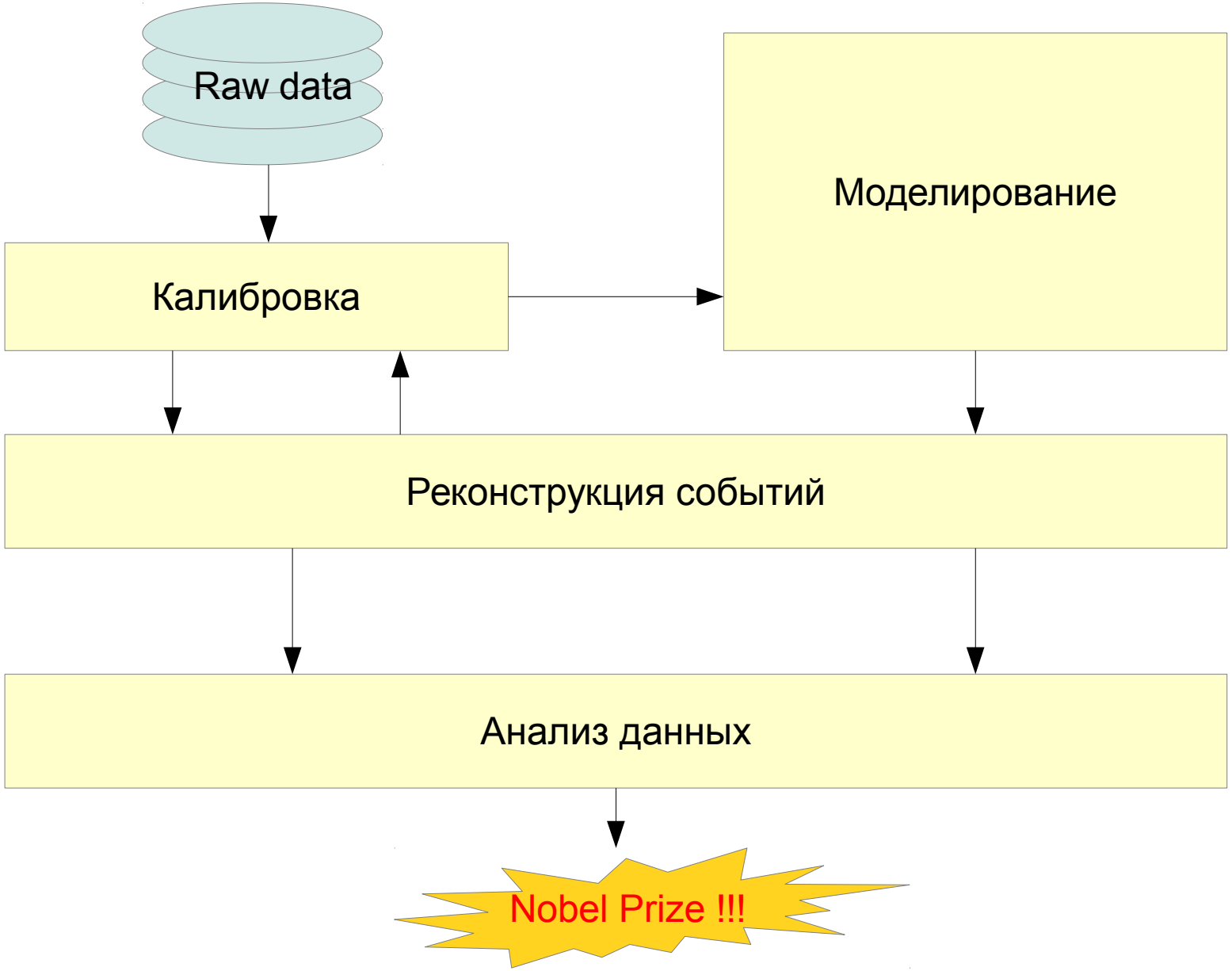
Где здесь бозон, похожий на бозон Хиггса?

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



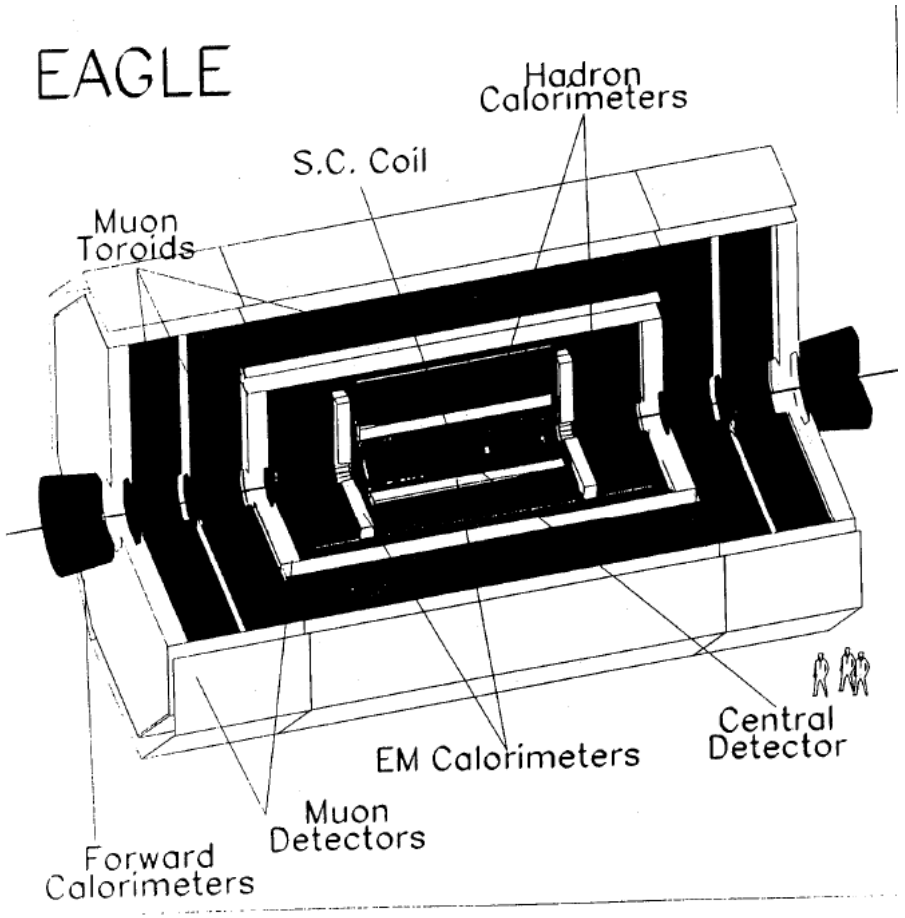
ATLAS Collaboration, Phys. Lett. B 716 (2012) 1-29

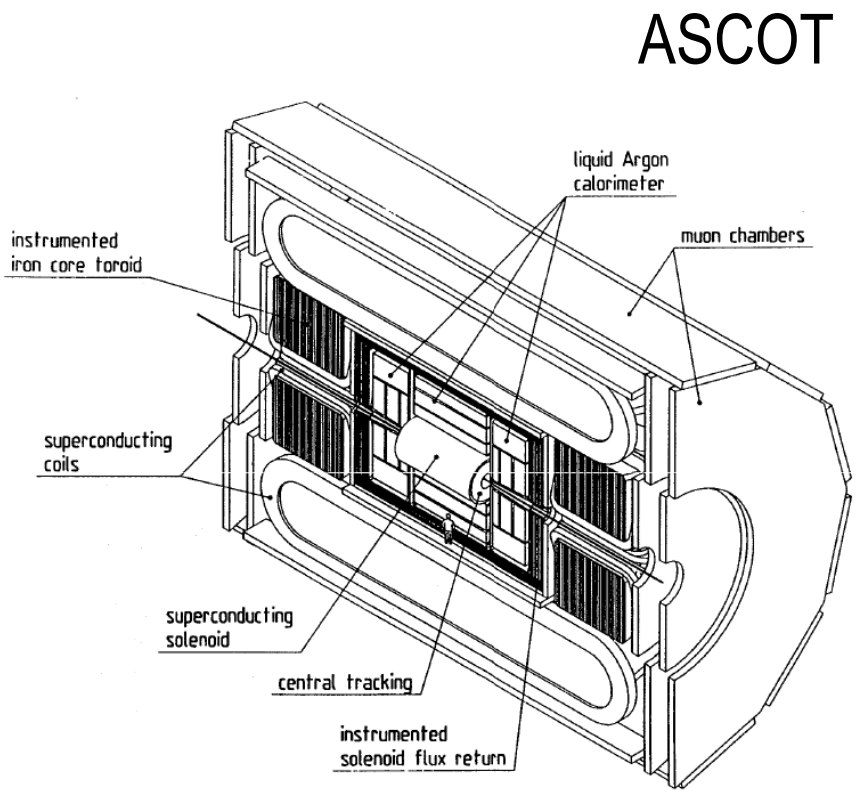
Обработка данных в физике высоких энергий



Планирование эксперимента

Какой детектор лучше подходит для поиска бозона Хиггса?





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

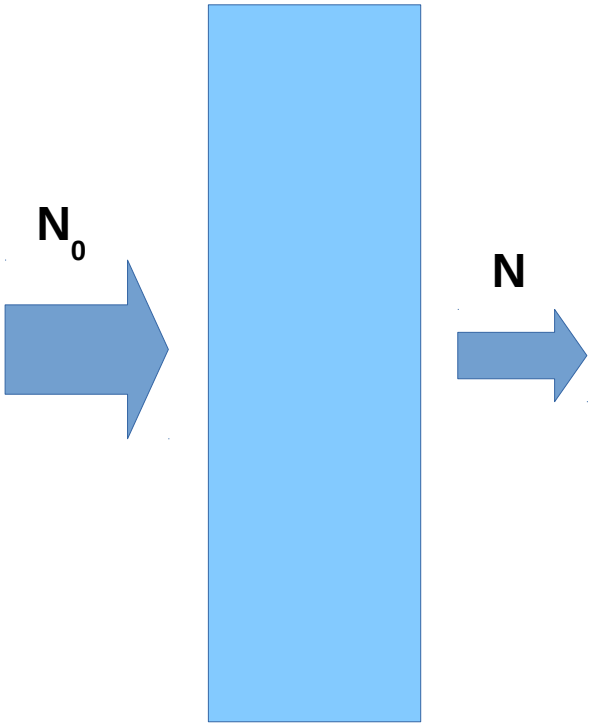
NICHOLAS METROPOLIS AND S. ULAM
Los Alamos Laboratory

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:

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

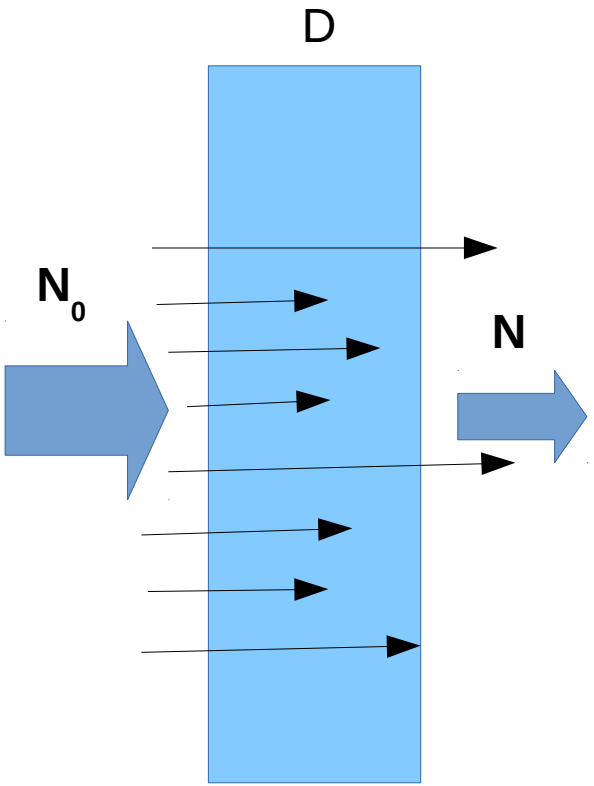
Если μ зависит от (x,y,z,E) $\qquad$ **??**

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

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

Если μ нельзя задать аналитически ?????

Решение методом Монте-Карло

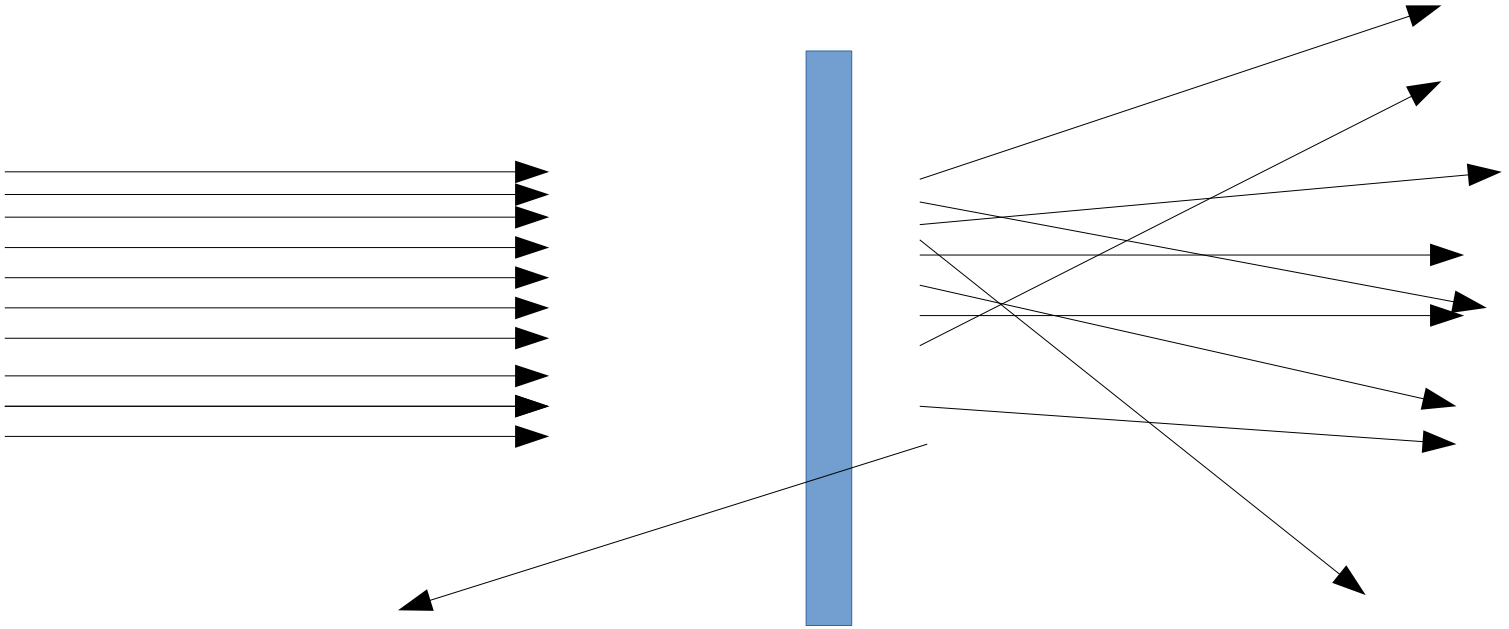


- По определению полного сечения, вероятность взаимодействия на пути dx равна σdx
- Рассмотрим пробег частицы в веществе как случайную величину, распределенную с плотностью вероятности $p(x)$:

$$p(x)dx = \{1 - \int_0^x p(y)dy\}\ \sigma dx$$

- Решение: $p(x) = \sigma \exp(-\sigma x)$
- Разыграем N траекторий частиц, для каждой вычислим пробег x согласно известной $p(x)$
- Если $x>D$, частица прошла через вещество

Еще пример: опыт Резерфорда



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

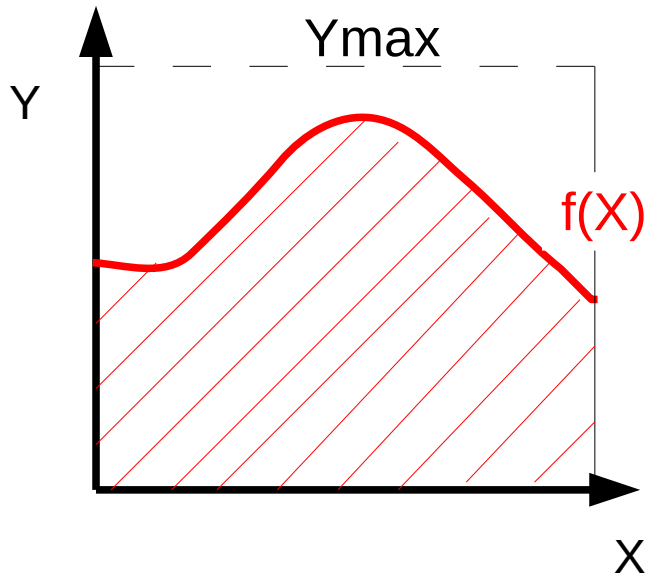
~ вероятность рассеяния на угол Θ

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
- 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)

Генераторы псевдослучайных чисел

- Программы, генерирующие последовательность чисел, похожих на случайные.
- Последовательность однозначно определяется начальным значением (seed) и полностью повторяется через определенный период
- Основные алгоритмы
  - RANLUX (алгоритм Marsaglia & Zaman, см. M. Lüscher, Comp. Phys. Comm. 79 (1994) 100) — период $5*10^{171}$
  - RANECU (алгоритм L'Ecuyer см. l'Ecuyer, Commun. ACM 31(1988) 742) — период $2*10^{18}$
  - RANMAR (алгоритм Marsaglia-Zaman-Tsang, см. G. Marsaglia, A. Zaman and W.-W. Tsang, Stat. Prob. Lett. 9 (1990) 35.) — период $2^{144}=2*10^{43}$
  - Mersenne Twister (M. Matsumoto and T. Nishimura, ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation, Vol. 8, No. 1, January 1998, pp 3-30) - период $(2^{19937}-1)$, медленнее RANECU и намного быстрее RANLUX

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:

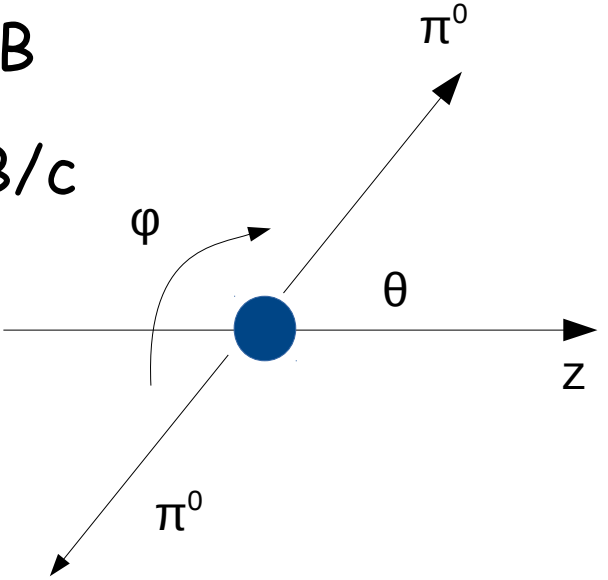
- Генераторы событий
- Специализированные программы
- Универсальные программы

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 $K^0 \to 2\pi^0$

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



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

Как это выглядит на C++

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

```
{

  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);
   }

}
```

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? Одна из проверок - 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 ~~бомбы~~ 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), микроэлектронике, радиационной и ядерной медицине.