

Пакет моделирования Geant4

А.С.Жемчугов
ОИЯИ
E-mail: zhemchugov@jinr.ru

15.11.2022

ПО реального времени Online software

Trigger and Event Filter

DAQ

Slow control and monitoring

ПО для автономной обработки Offline software

Reconstruction and Calibration

Monte-Carlo simulation

Analysis tools

ПО: стандартные инструменты и самоделки

- **Калибровка** и **реконструкция** очень сильно зависят от конструкции детектора – ПО обычно разрабатывается для каждого эксперимента с нуля.
- **Моделирование** основано на известных физических законах и моделях, в сочетании с индивидуальными особенностями геометрии и материалов детектора. В настоящее время для моделирования практически все используют пакет **GEANT4**.
- Методы **анализа данных** более-менее одинаковы во всех экспериментах. Сегодня фактически стандартным инструментом является пакет **ROOT**.
- **Фреймворки** широко распространены для организации ПО эксперимента и общих операций (работа с БД, хранение данных, организация цикла событий и т. д.) Фактически, есть несколько семейств фреймворков (Gaudi/Athena, Art, AliRoot/FairRoot)

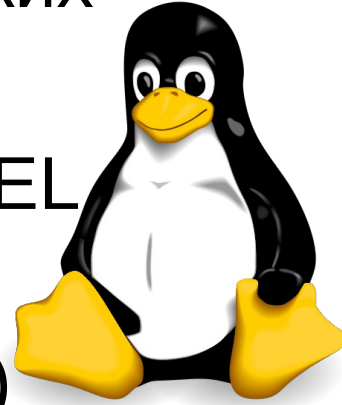
Платформа

- **Linux** — основная платформа в физике высоких энергий

- Особенно **Scientific Linux** основанный на RHEL

<http://scientificlinux.org/>

(фактически стандарт для WLCG грид-сайтов)

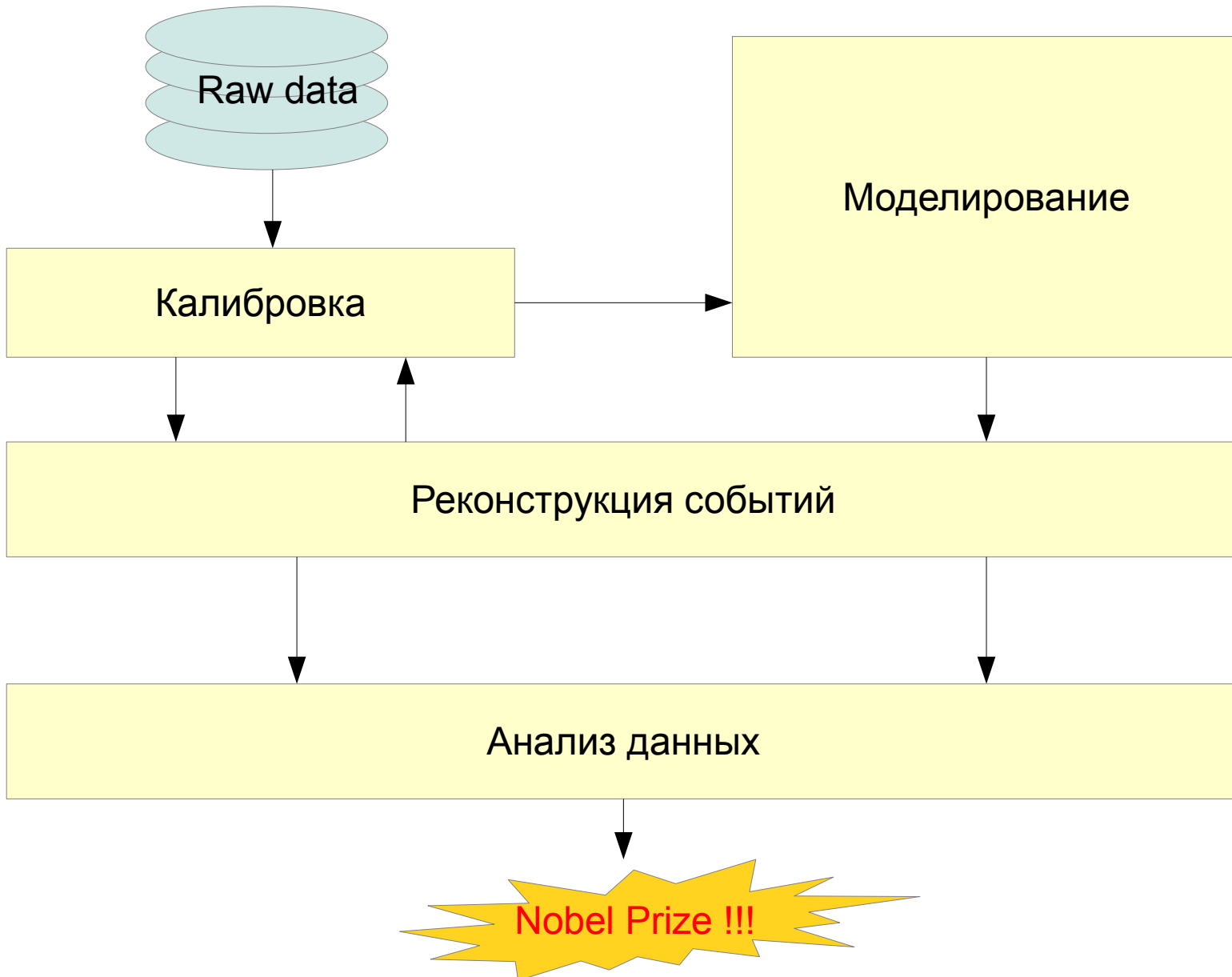


- Почему?

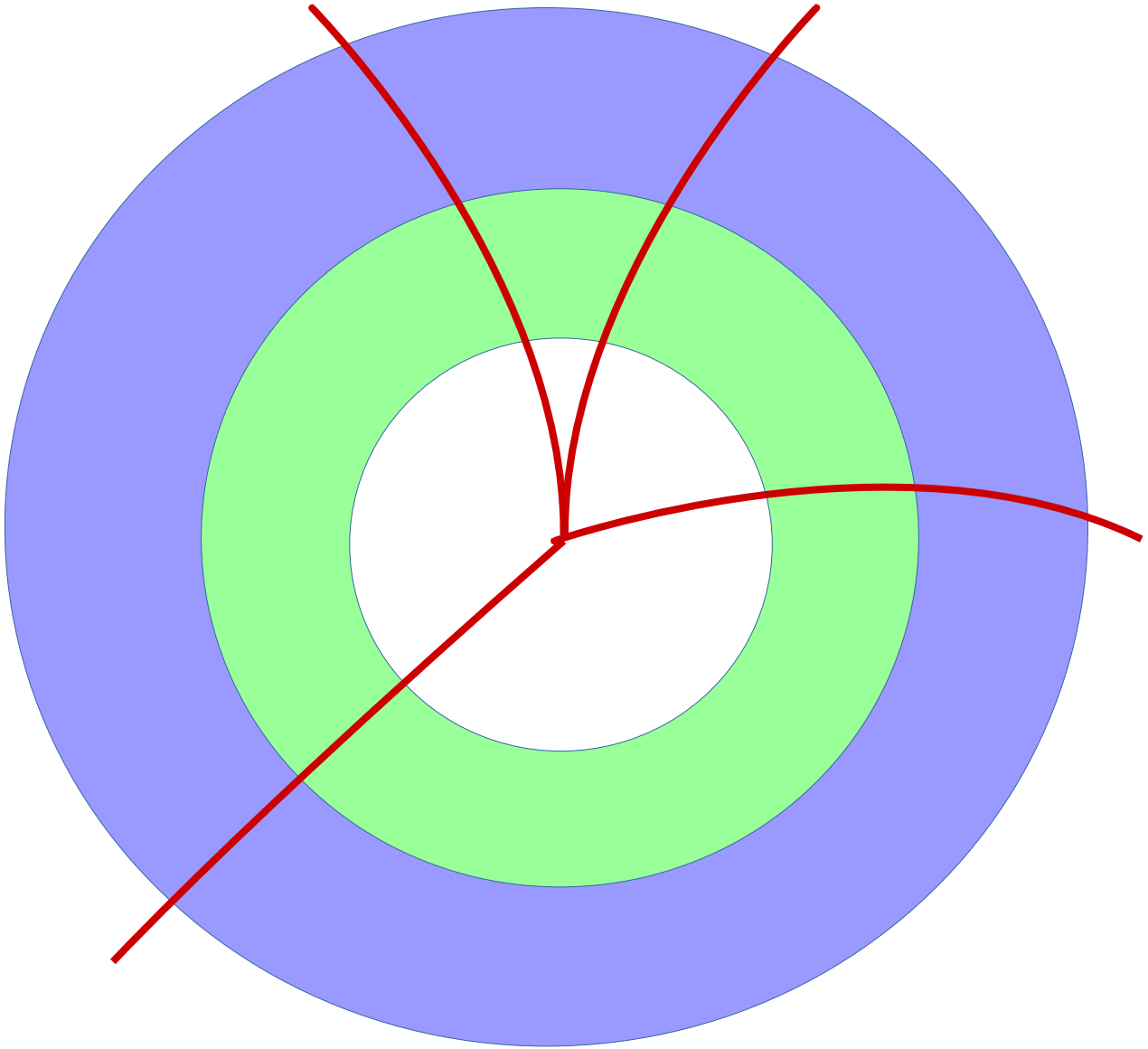
- хорош для программ реального времени (быстрый, надежный и стабильный)
- хорош для автономной обработки (удобный для пользователя, стабильный, хорош для пакетной обработки)
- есть много готового ПО для физики частиц со времен UNIX
- он свободный!

- Текущая версия SL7 (x86_64)

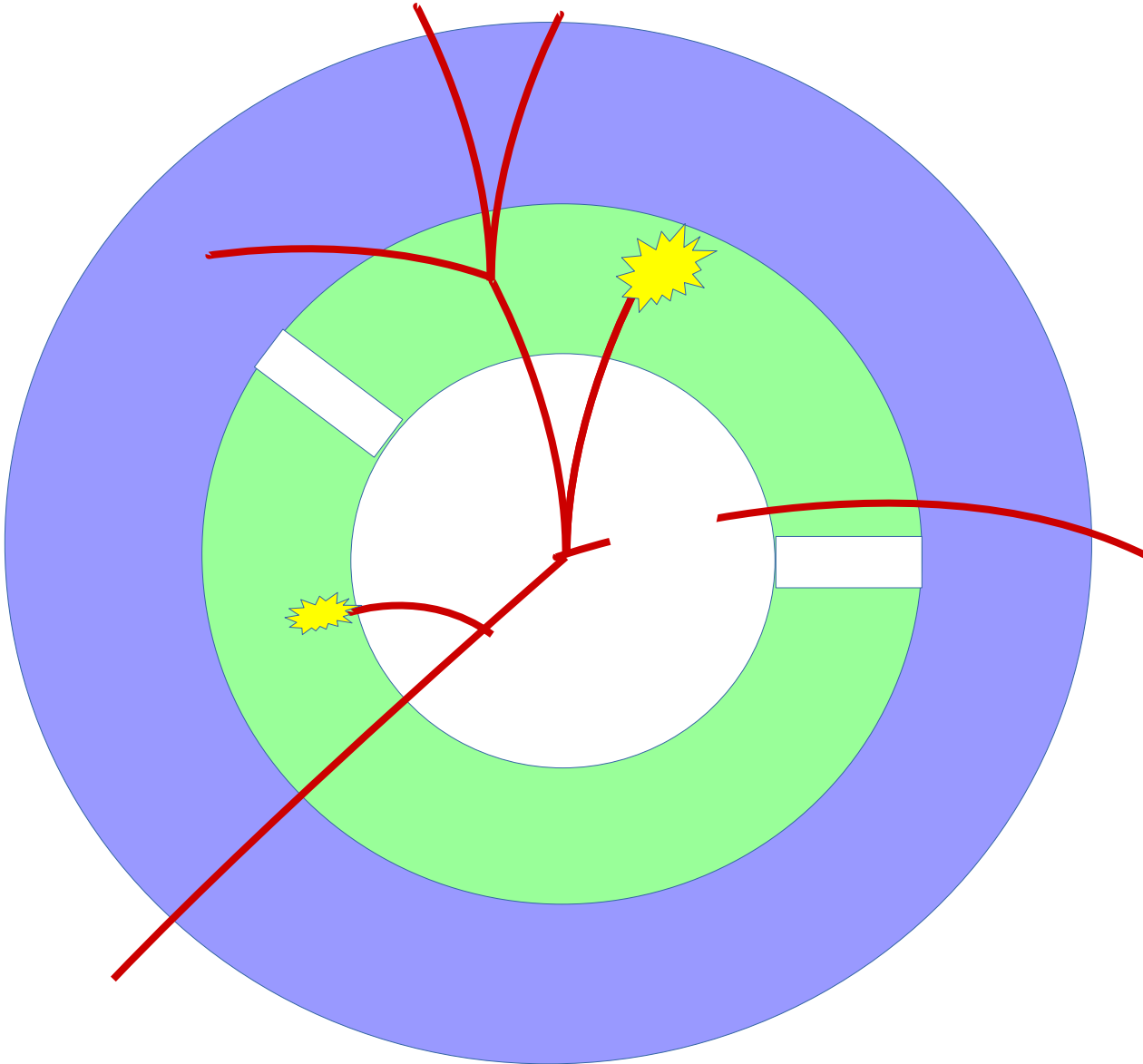
Обработка данных в физике высоких энергий



В идеальном мире

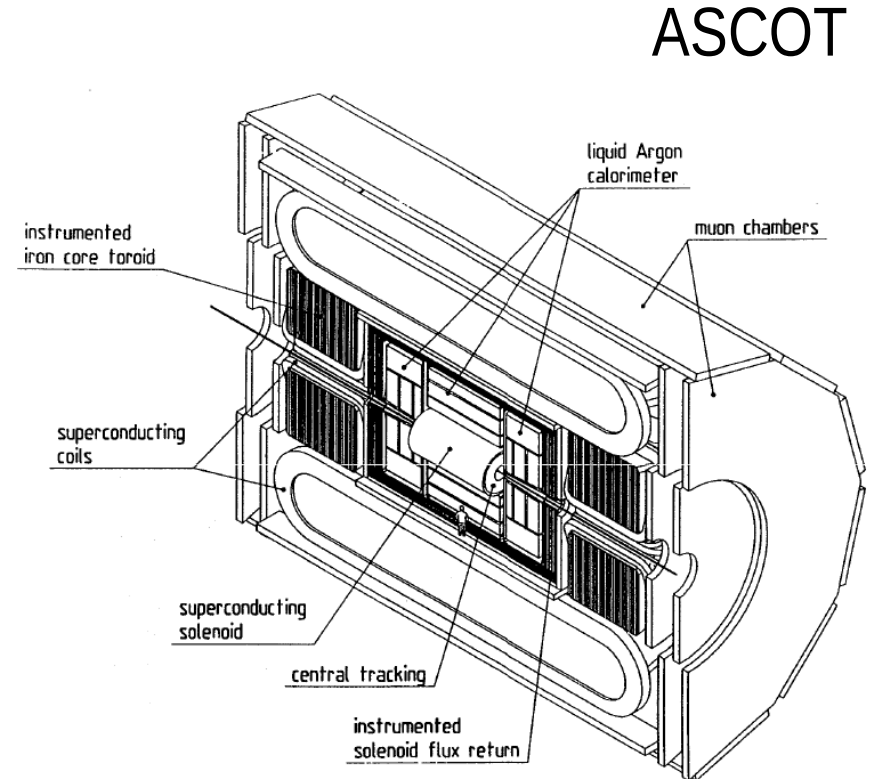
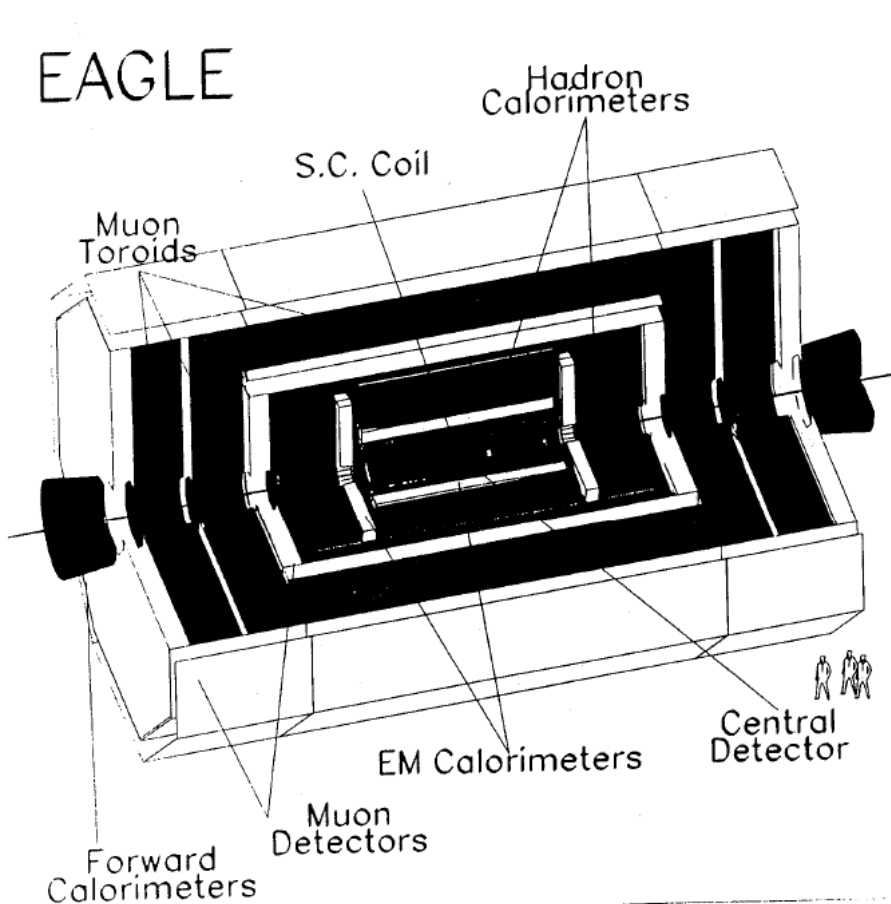


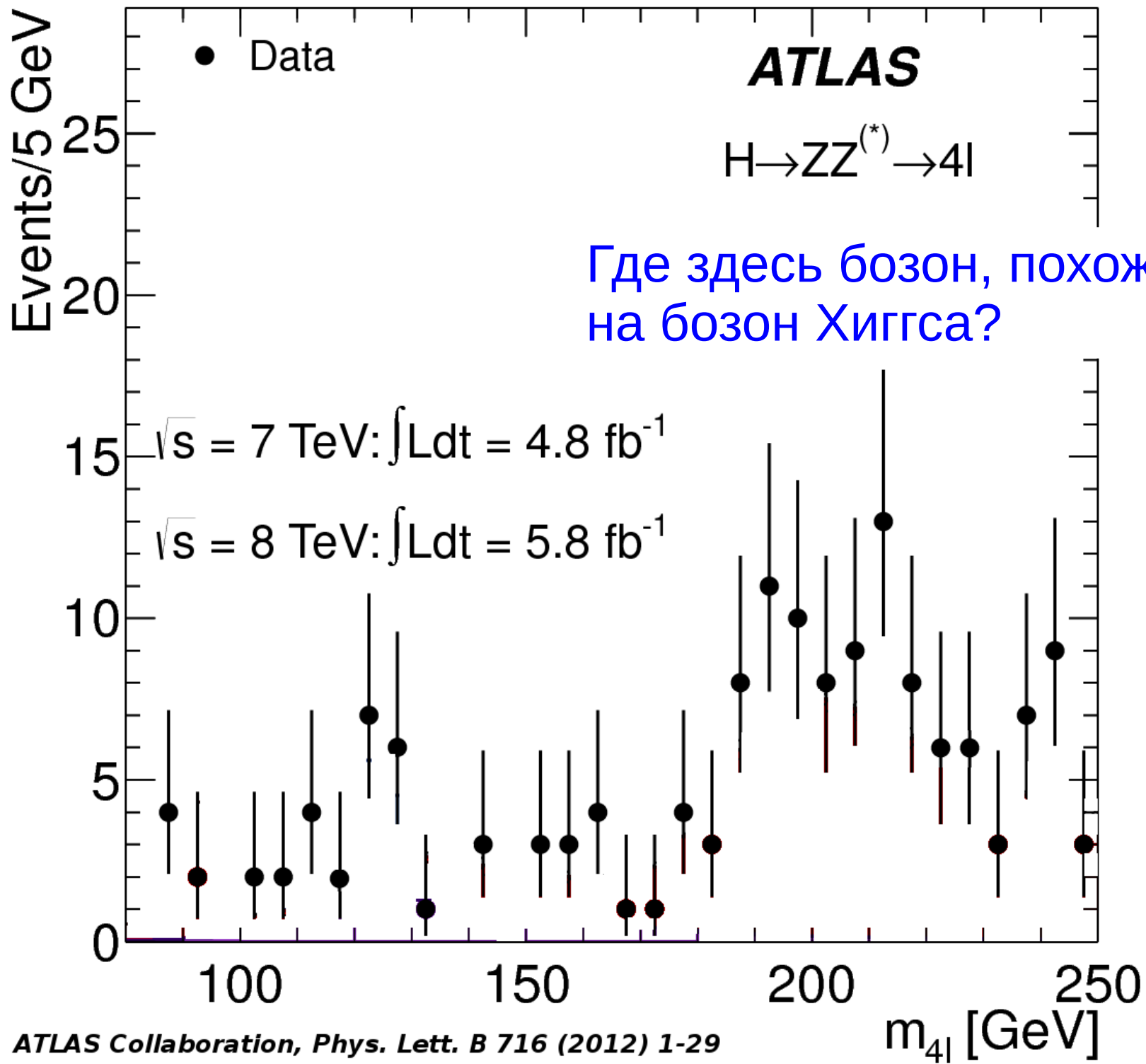
В реальном мире

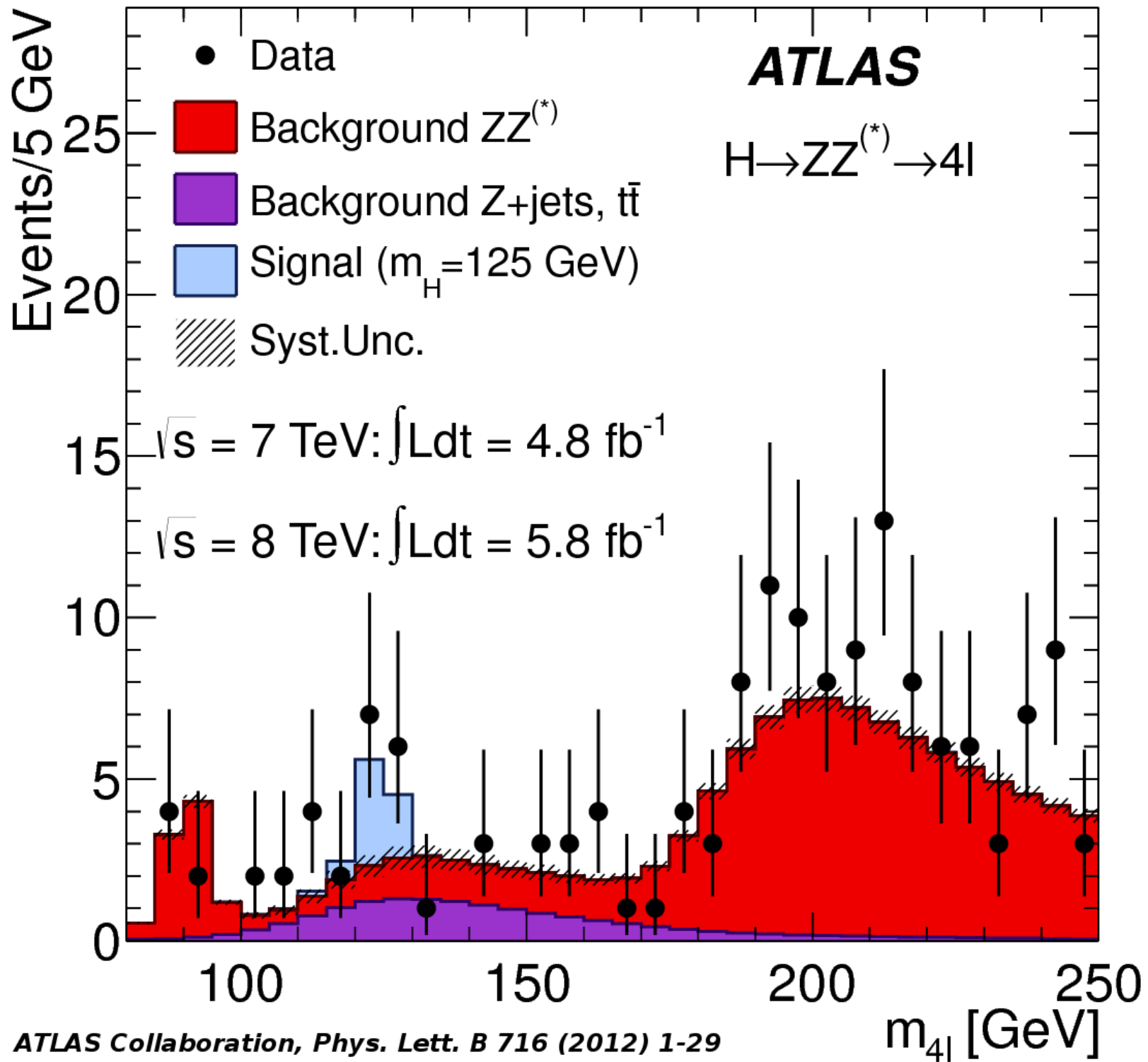


Планирование эксперимента

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

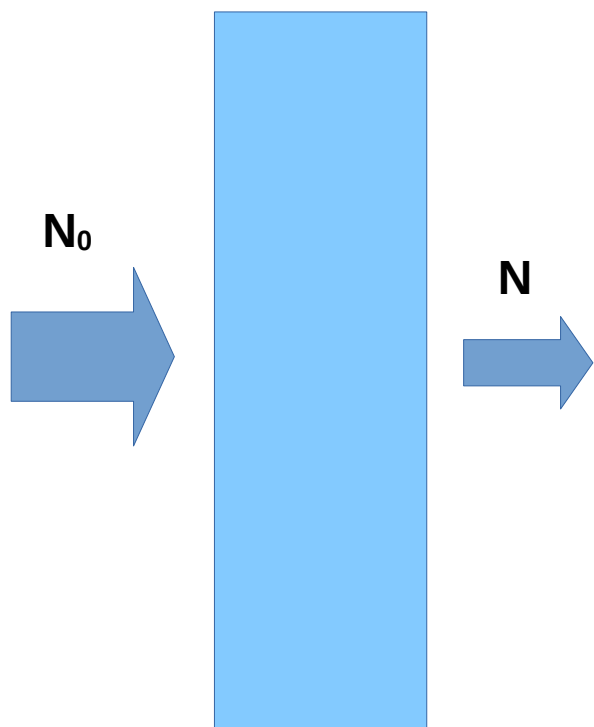
Los Alamos Laboratory

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:

$$dN = -\mu N dx$$

$$N = N_0 \exp(-\mu x)$$

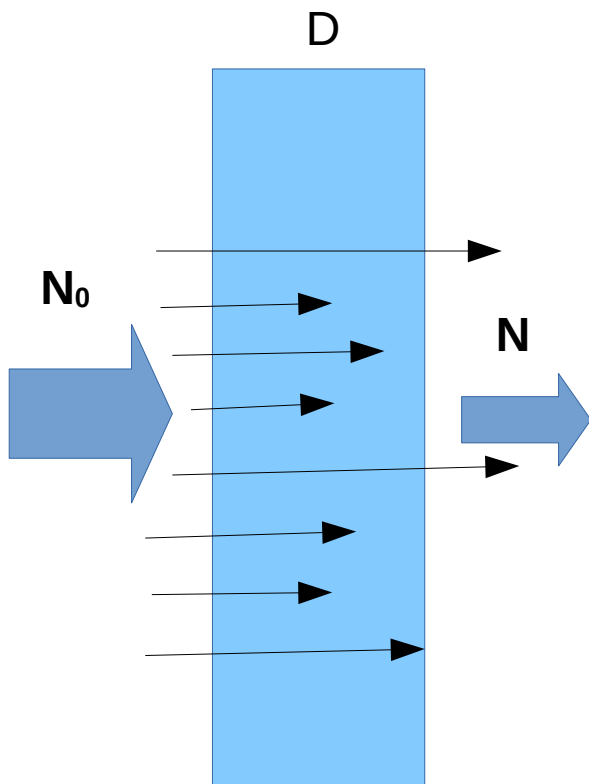
Если μ зависит от (x, y, z, E) ??

Если N зависит от (E, \bar{r}) ???

Если учесть рассеяние ?????

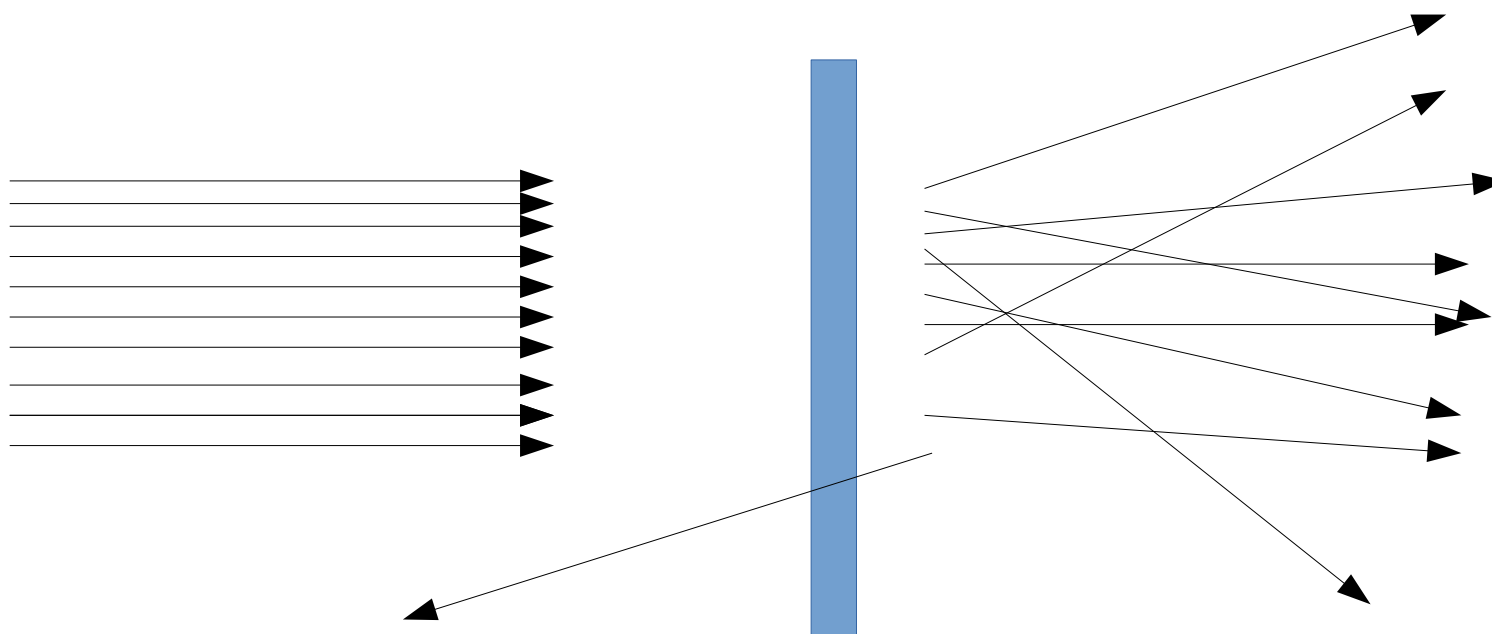
Если μ нельзя задать аналитически ??????

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



$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \left(\frac{Z_1 Z_2 e^2}{2mv^2} \right)^2 \frac{1}{\sin^4 \frac{\Theta}{2}} \sim \text{вероятность рассеяния на угол } \Theta$$

Шаги моделирования:

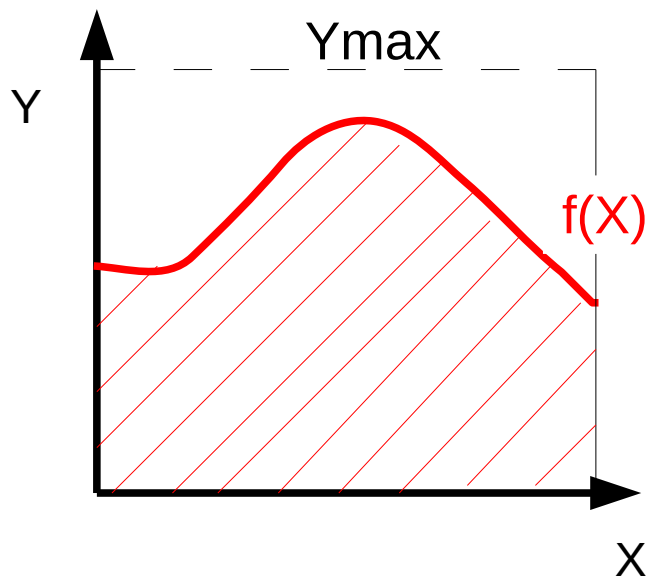
1. Генерируется пучок из N частиц
2. Для каждой частицы вычисляется случайный угол рассеяния Θ в соответствии с известным распределением и заданной скоростью частиц
3. Для каждой частицы вычисляется случайный азимутальный угол ϕ , который разыгрывается равномерно в интервале $[0, 2\pi]$
4. Рассеяние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

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 $5 \cdot 10^{171}$
 - RANECU (алгоритм L'Ecuyer см. l'Ecuyer, *Commun. ACM* 31(1988) 742) — период $2 \cdot 10^{18}$
 - RANMAR (алгоритм Marsaglia-Zaman-Tsang, см. G. Marsaglia, A. Zaman and W.-W. Tsang, *Stat. Prob. Lett.* 9 (1990) 35.) — период $2^{144} = 2 \cdot 10^{43}$
 - 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

Как смоделировать произвольное распределение?

- Равномерные распределения случайных чисел получают 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 $[0, X_{\max}]$
2. Выбирается случайное Y в интервале $[0, Y_{\max}]$
3. X принимается при условии $Y < f(X)$

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 (Geant4, FLUKA, MCNP, MARS)

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.

Пакет GEANT4

Исходный код GEANT4

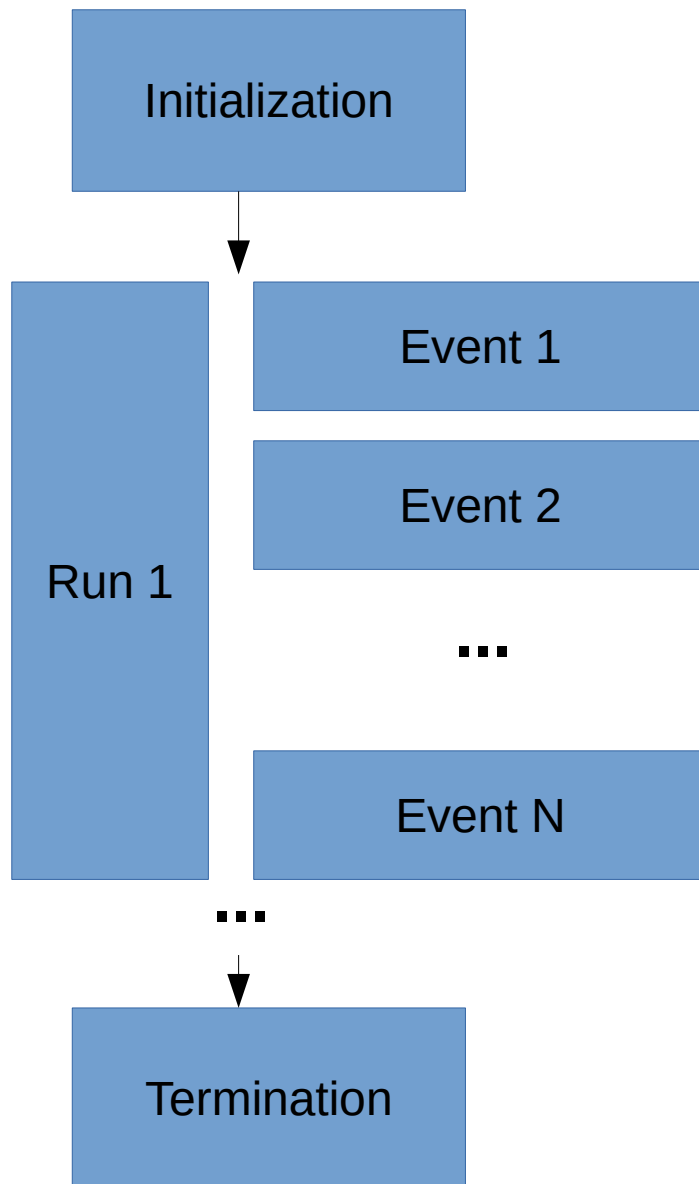
- GEANT4 разрабатывается международной коллаборацией GEANT4
- Это открытое ПО, которое свободно распространяется по лицензии GEANT4
- Исходный код, сборки и документация доступны на <http://cern.ch/geant4>
- Написан на C++
- Собирается и работает на Linux, Windows and MacOS
- ССЫЛКИ:

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

- GEANT4 - это набор инструментов. Вы должны сами написать программу моделирования, используя методы и библиотеки, имеющиеся в пакете GEANT4 .
- GEANT4 содержит мощный инструментарий для описания геометрии и материалов детектора
- GEANT4 содержит библиотеки для моделирования практически всех известных взаимодействий элементарных частиц с веществом
- GEANT4 имеет развитый интерфейс для взаимодействия с пользователем, управления циклом моделирования и средствами визуализации.

Цикл моделирования



Необходимо описать:

- Распределение вещества в детекторе и поля
- Генератор первичной вершины
- Список физических процессов, учитываемых в моделировании

Кроме того, по желанию:

- Чувствительные элементы и способы моделирования отклика
- Способы визуализации
- Графический интерфейс
- Пользовательские расширения

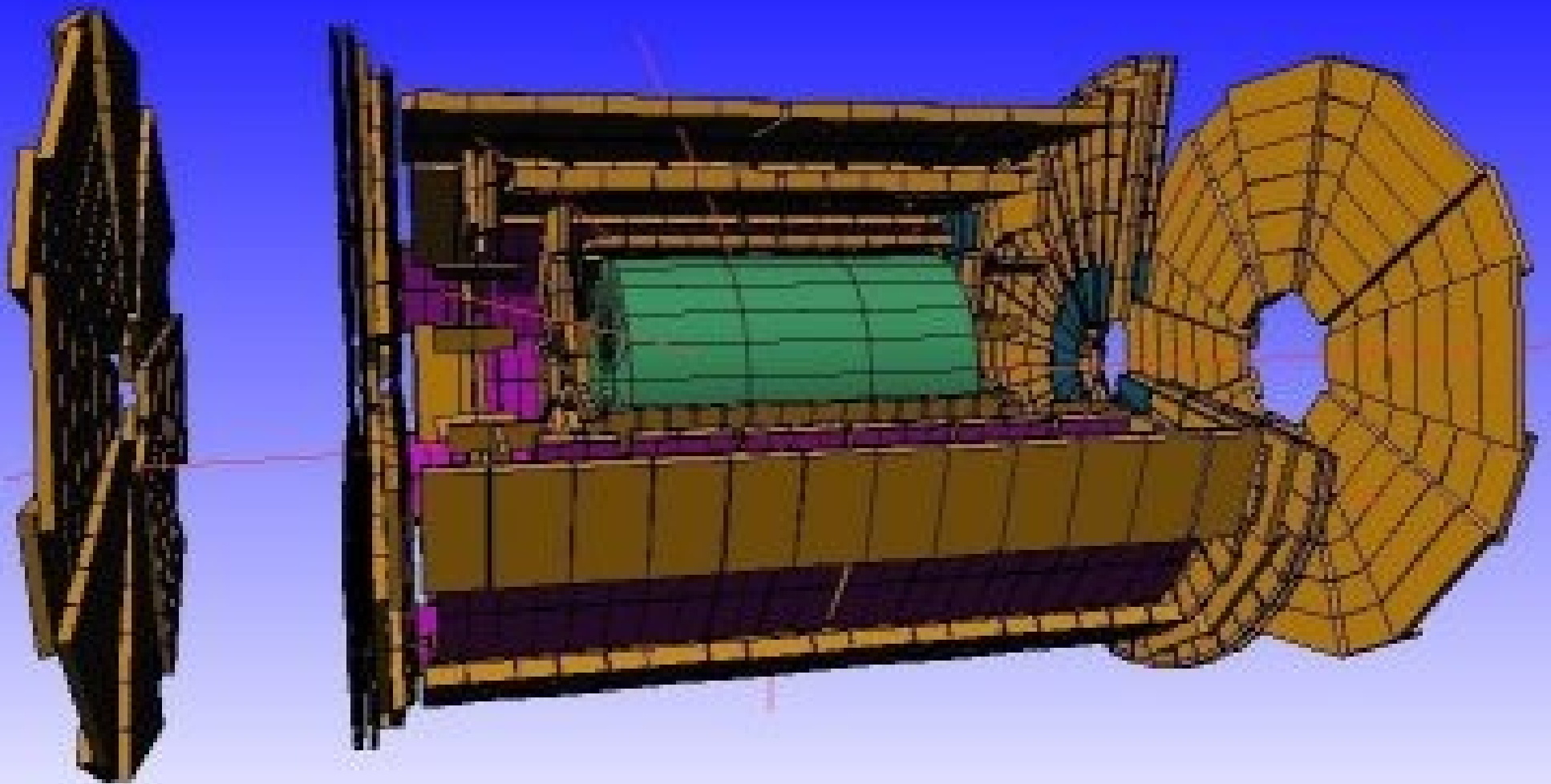
Простая программа моделирования

```
#include "G4RunManager.hh"  
#include "G4UImanager.hh"  
#include "DetectorConstruction.hh"  
#include "PhysicsList.hh"  
#include "PrimaryGeneratorAction.hh"
```

```
int main()  
{  
    // construct the default run manager  
    G4RunManager* runManager = new G4RunManager;  
  
    // set mandatory initialization classes  
    runManager->SetUserInitialization(new DetectorConstruction);  
    runManager->SetUserInitialization(new PhysicsList);  
  
    // set mandatory user action class  
    runManager->SetUserAction(new PrimaryGeneratorAction);  
  
    // initialize G4 kernel  
    runManager->initialize();  
  
    // start a run  
    int numberOfEvent = 3;  
    runManager->BeamOn(numberOfEvent);  
  
    // job termination  
    delete runManager;  
    return 0;  
}
```

Описание геометрии детектора

- В отличие от САПР, для физического моделирования помимо формы элементов конструкции нужно знать распределение вещества и задать физические факторы (электрические и магнитные поля, температуру, оптические свойства ...)
- Любое вещество в GEANT4 задается как смесь атомов, используя Z, A и плотность. Можно задавать разные фазовые состояния (газ, жидкость, твердое тело). Можно задавать любые электрические и магнитные поля, в том числе изменяющиеся во времени.
- Для описания геометрии применяется 'принцип матрешки' (сложный для разработчиков пакета, но удобный для пользователей):
 - все элементы конструкции разбиваются на простые объемы (кубики, цилиндры, пирамиды и т.д.)
 - для описания структуры внутренние (дочерние) объемы содержатся во внешних (материнских) объемах и положение их задается в локальной системе координат (Инкапсуляция!) Пересечение объемов не допускается.
 - существует самый большой объем (мир или экспериментальный зал), который содержит все элементы геометрии
- Каждый объем описывается через цепочку трех объектов C++: '**Solid** (форма) → **Logical Volume** (форма+вещество) → **Placement** (объем+положение в пространстве)'



ATLAS

Интерфейс пользователя

- **пакетный режим**

- **интерактивный режим:**

```
jemtchou: ~/geant4/bin/Linux-g++$ ./prog01
```

```
*****
```

```
Geant4 version Name: geant4-08-00-patch-01 (10-February-2006)
```

```
Copyright : Geant4 Collaboration
```

```
Reference : NIM A 506 (2003), 250-303
```

```
WWW : http://cern.ch/geant4
```

```
*****
```

```
Idle>
```

```
Idle> /tracking/verbose 1
```

```
Idle> /control/execute run01.mac
```

- **графический интерфейс**

G4UI Session

viewer-1 (OpenGLStoredQt)

Vis parameters

Viewer components

Help

Search :

Command

- ▶ /vis/filtering/
- ▶ /vis/geometry/
- ▶ /vis/scene/
- ▶ /vis/sceneHandler/
- ▼ /vis/viewer/
 - ▼ /vis/viewer/set/
 - /vis/viewer/set/all
 - /vis/viewer/set/autoRefresh
 - /vis/viewer/set/auxiliaryEd...
 - /vis/viewer/set/background
 - /vis/viewer/set/culling
 - /vis/viewer/set/cutawayMo...
 - /vis/viewer/set/edge
 - /vis/viewer/set/explodeFac...
 - /vis/viewer/set/globalLine...
 - /vis/viewer/set/globalMark...
 - /vis/viewer/set/hiddenEdge
 - /vis/viewer/set/hiddenMar...
 - /vis/viewer/set/lightsMove
 - /vis/viewer/set/lightsTheta...
 - /vis/viewer/set/lightsVector
 - /vis/viewer/set/lineSegme...
 - /vis/viewer/set/picking
 - /vis/viewer/set/projection
 - /vis/viewer/set/sectionPlane
 - /vis/viewer/set/style
 - /vis/viewer/set/targetPoint
 - /vis/viewer/set/unThetaPhi

Command /vis/viewer/set/hiddenMarker
 Guidance :
 If true, closer objects hide markers.
 Otherwise, markers always show.

Parameter : hidden-marker
 Parameter type : b
 Omittable : True
 Default value : 1

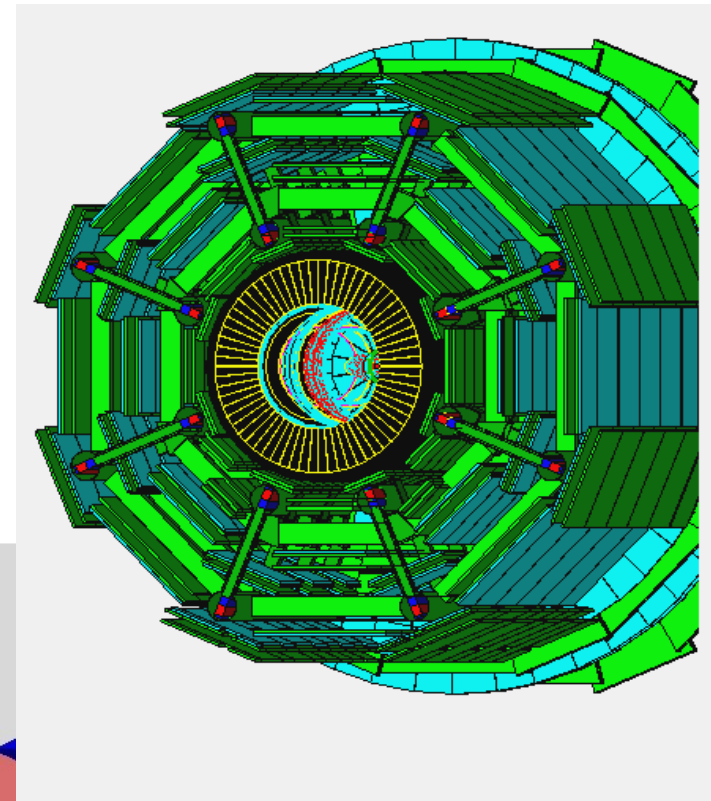
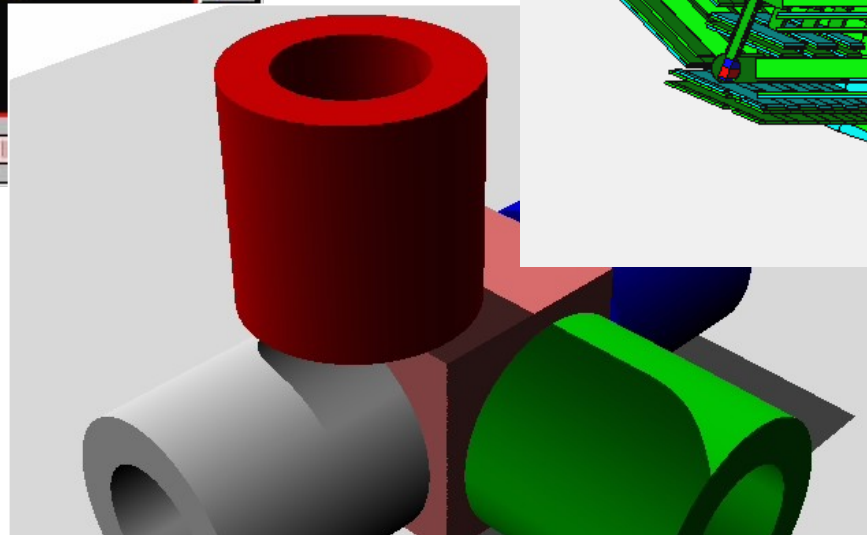
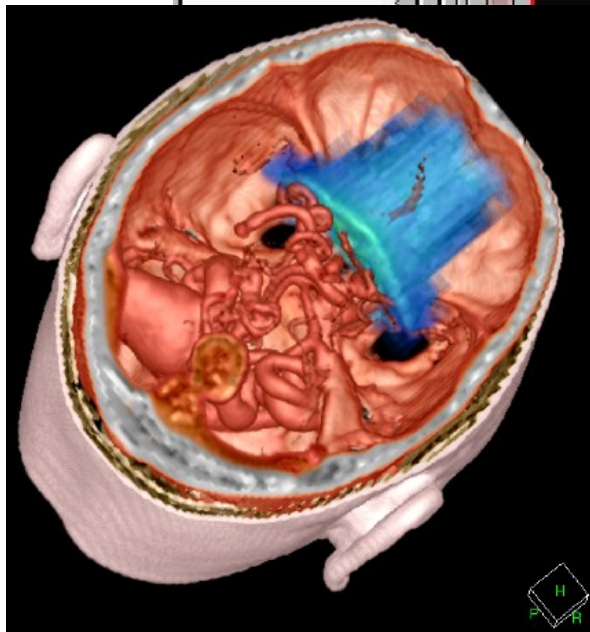
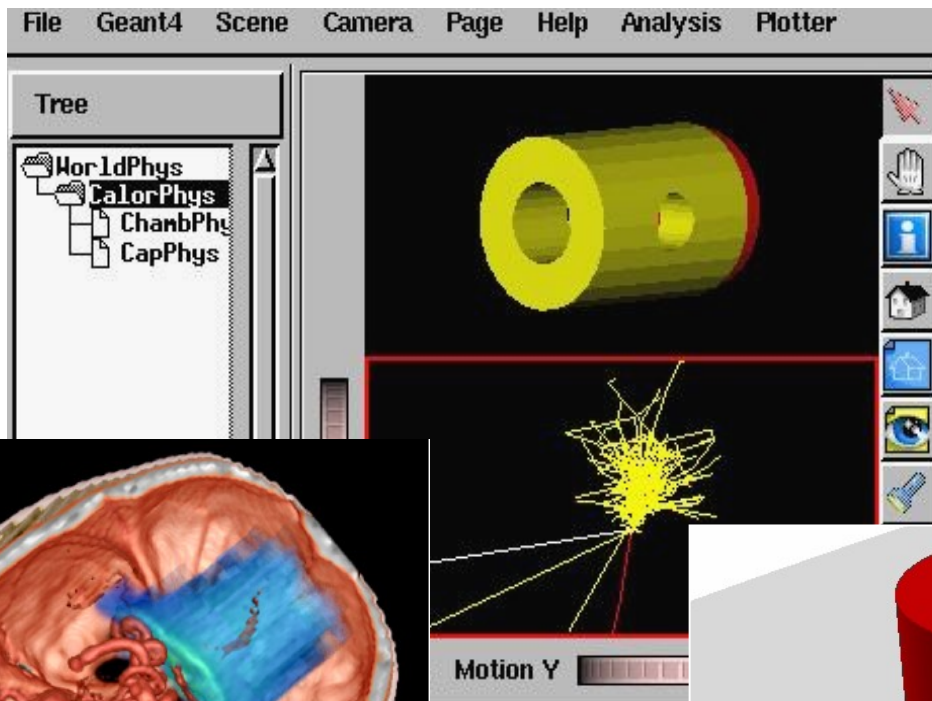
Cout

History

Session :

Визуализация

- Набор встроенных и внешних инструментов для визуализации: OpenGL, gMocren, JAS, HepRep, RayTracer, VRML, DAWN ...



Частицы и взаимодействия

Известные частицы

все стабильные и долгоживущие частицы, каоны, оптические фотоны, ядра и тяжелые ионы

Известные физические процессы

- **Электромагнитные взаимодействия ($0.1 \text{ keV} - 10 \text{ TeV}$)**

ионизация, комптоновское рассеяние, многократное кулоновское рассеяние, тормозное излучение, рождение пар, фотоэффект, аннигиляция, фотоядерные и электроядерные процессы, синхротронное излучение, переходное излучение, излучение Вавилова-Черенкова, сцинтилляция, оптические процессы

- **Адронные взаимодействия ($0 \text{ eV} - 100 \text{ TeV}$)**

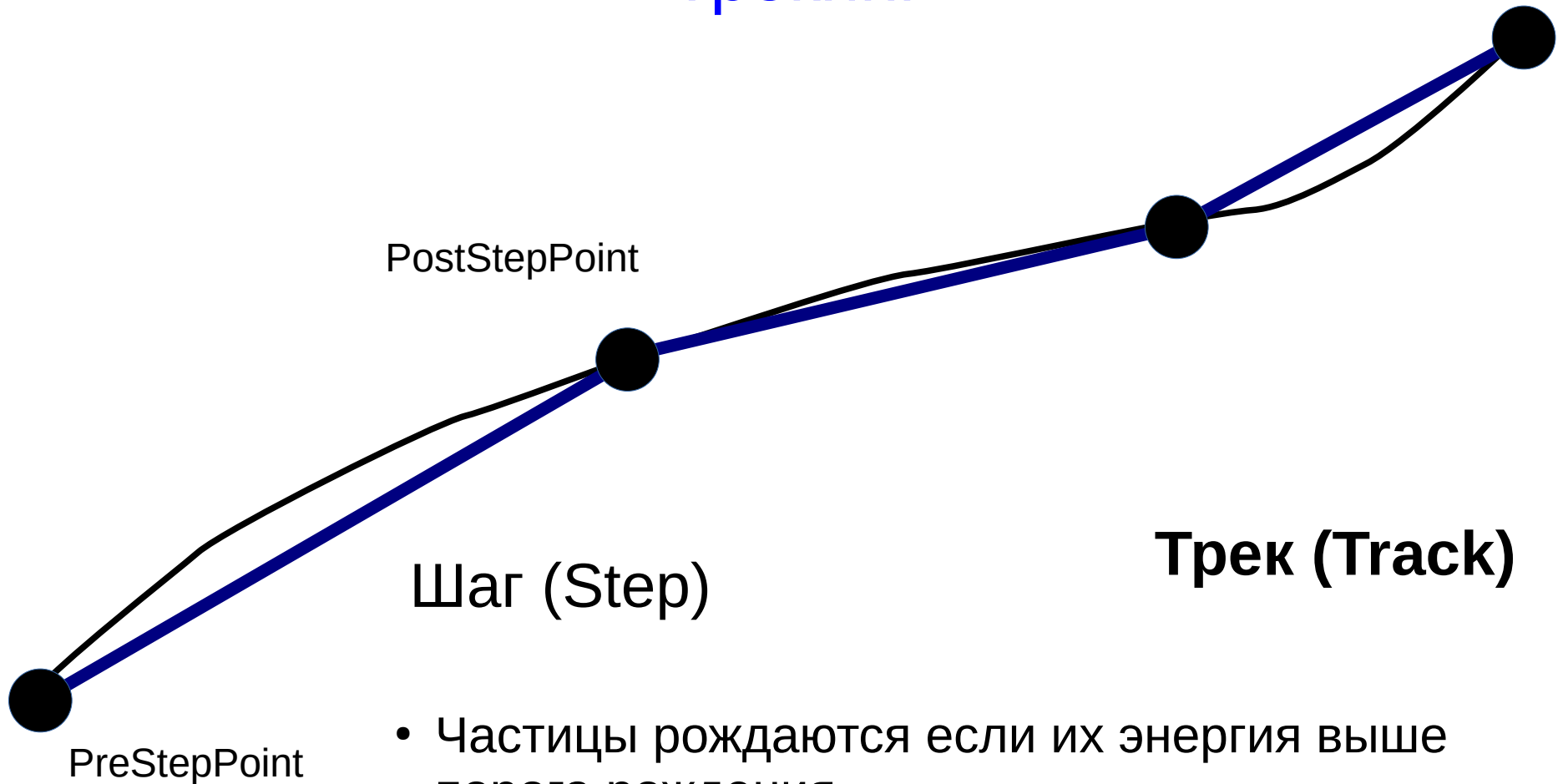
упругое и неупругое рассеяние, захват, деление, снятие возбуждения ядер

- **Транспорт частиц**

- **Распады**

- **Параметризация и «быстрое» моделирование**

Трекинг



- Частицы рождаются если их энергия выше порога рождения
- Новые частицы попадают в стек
- История частиц из стека моделируется до гибели частицы во взаимодействии, достижения нуля кинетической энергии или выхода из мира₃₅

Применение Geant4

- Физика высоких энергий
- Медицина
 - дозиметрия и расчет защит
 - КТ, ПЭТ, ОФЭКТ (проект GATE <http://www.opengatecollaboration.org>)
 - ядерная и радиационная терапия
 - радиобиология (проект Geant4-DNA <http://www.geant4-dna.org>)
- Исследование космоса <http://geant4.esa.int>
 - PLANETOCOSMICS is a simulation framework based on Geant4 that allows to compute the hadronic and electromagnetic interactions of cosmic rays with the Earth, Mars and Mercury.
 - MULASSIS: MULti-LAyered Shielding Simulation Software (MULASSIS)
 - ESA ConeXpress: Radiation analysis for the ESA ConeXpress mission

Перспективы GEANT4

- GEANT4 имеет ряд преимуществ:
 - универсальное моделирование практически всех известных взаимодействий элементарных частиц с веществом
 - мощный инструментарий описания геометрии
 - преимущества объектно-ориентированного подхода: гибкость, модульность, возможность расширения функциональности пользователем
 - открытый код и минимум лицензионных ограничений
- Останется основным инструментом моделирования в физике высоких энергий по меньшей мере в течение 10-15 лет
- Начал широко применяться в ядерной физике и прикладных задачах (медицина, исследование космоса, материаловедение и т.д.)