



# Моделирование физического эксперимента с помощью Geant4 методом Монте Карло

*В.Н. Иванченко, д.ф.-м.н.*

*14 июля 2020*

# План лекции

- Метод Монте Карло
- Пакет программ Geant4
- Примеры применения Geant4
- Как стать пользователем Geant4
- Самостоятельная работа



# Метод Монте Карло

- Предложен Буффеном в 1777 и Лапласом в 1786
  - Э. Ферми предложил его в 1930 году для исследования свойств нейтронов
- Основан на использовании датчика случайных чисел
  - Вначале это были игральные кости
- Идея состоит в моделировании развития процесса шаг за шагом
  - на каждом шаге вероятность различных событий определяются датчиком случайных чисел
  - Необходимо знать вероятности различных процессов в зависимости от начальных условий



# Метод Монте Карло

- Вместо решения многомерных уравнений используется генератор случайных чисел
- Последовательность случайных чисел определяет историю развития процесса
- **Результат статистический**
  - Статистическая ошибка уменьшается с ростом числа испытаний

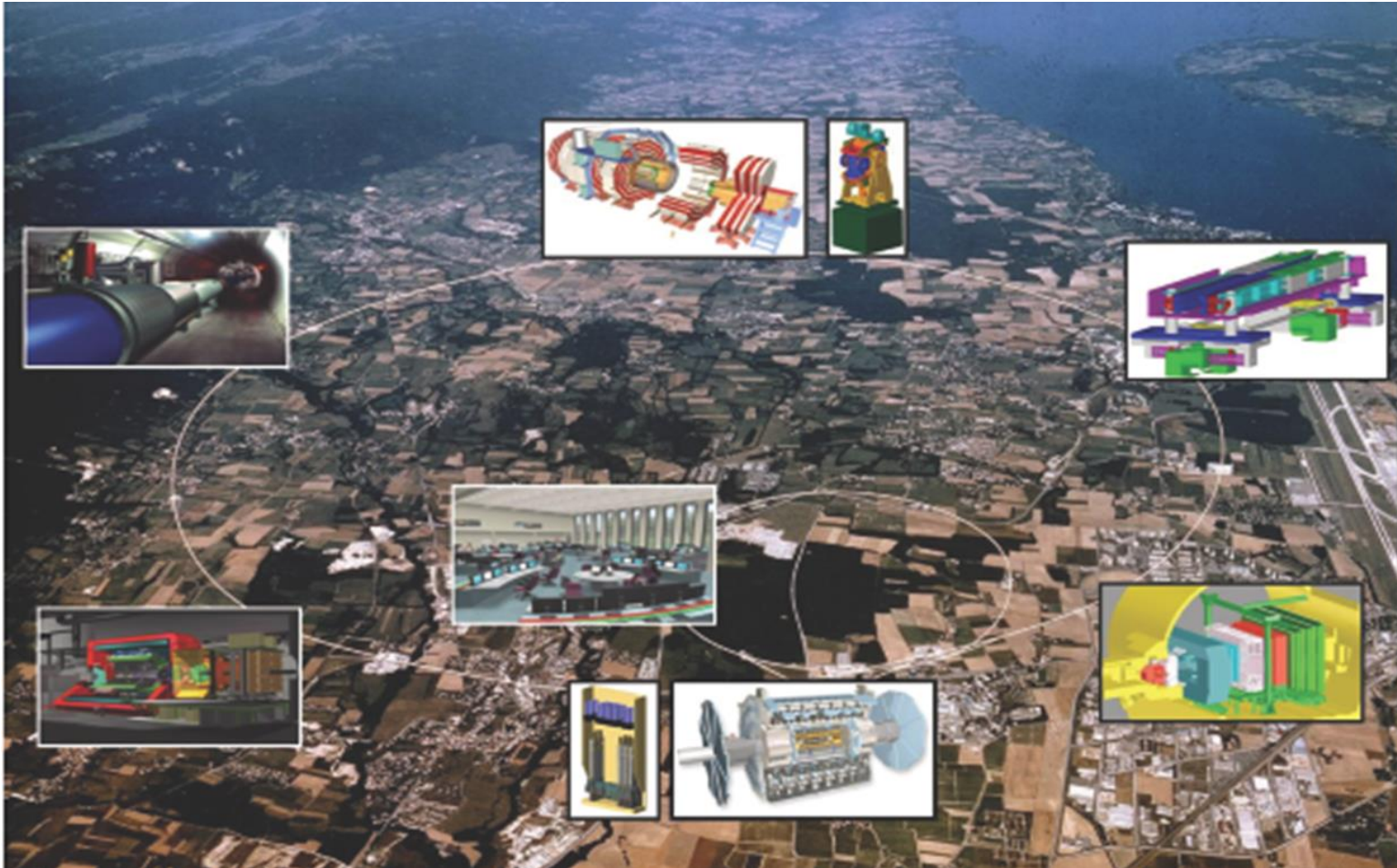
# Моделирование прохождения частиц через вещество

- На каждом шаге элементарной частицы в веществе могут происходить различные процессы
  - Фотон может поглотиться из-за фото-эффекта
  - Электрон может ионизировать атомы среды
  - .....
- Учесть процессы аналитически практически невозможно, особенно в сложной геометрии
- Метод Монте Карло позволяет осуществить детальное моделирование радиационных эффектов
  - Выделение энергии в определенном месте
  - Прохождение частиц через поглотитель
  - Ожидаемые сигналы счетчиков
  - .....
- В современной физике высоких энергий проект не может получить финансирование и даже не рассматривается, если не проведено детальное изучение методом Монте Карло



# ЛНС (БАК) эксперименты дорогостоящие и должны быть предельно оптимизированы

## Пакет программ Geant4 был создан для ЛНС



# Общее введение в пакет программ Geant4

Обсудим терминологию, принятую в Geant4, что не может обеспечить полного понимания пакета программ, но упростит чтение документации. Рассмотрим общую схему работы программы.

# Почему Geant4?

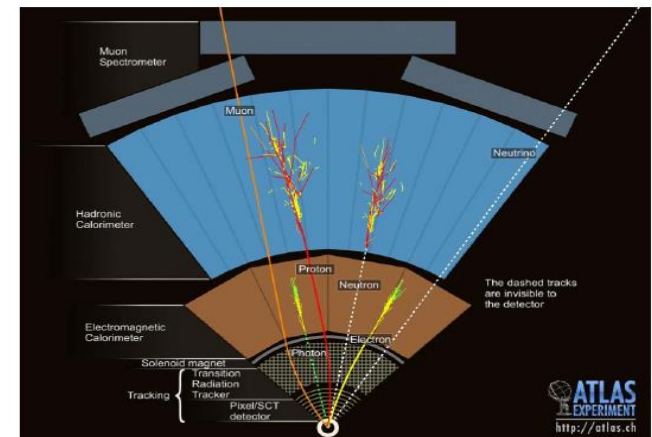
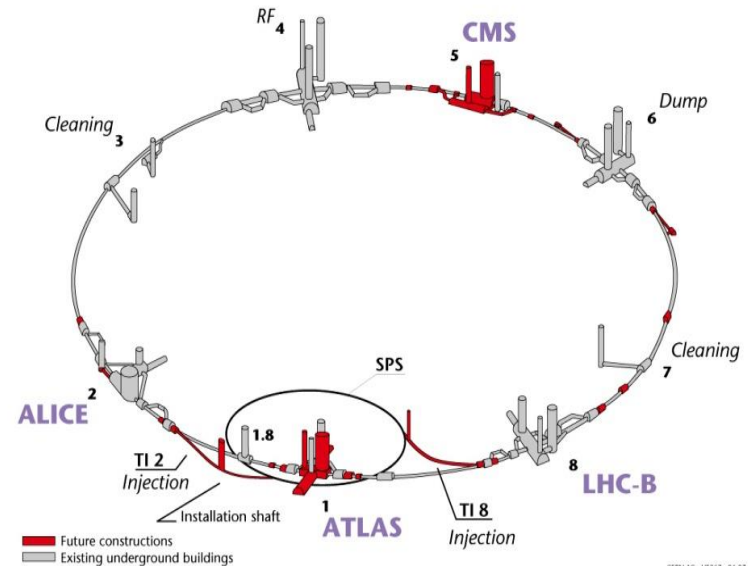
- В физике высоких энергий со временем накопились претензии к старым программам:
  - Непрозрачность алгоритмов
  - Подстраивание программ под каждый эксперимент
  - Технические трудности расширения моделей и алгоритмов
- Для подготовки экспериментов на БАК было решено создать новую программу Geant4
  - ЦЕРН запустил исследовательский проект (1994), в который вошли представители многих стран
  - Было решено использовать язык C++ и объектно-ориентированный метод программирования
- Принципиальное решение было открыть все коды и результаты валидаций для пользователей



# Geant4 History

- Dec 1994 - Project start
- Apr 1997 - First alpha release
- Jul 1998 - First beta release
- Dec 1998 - First Geant4 public release - version 1.0
- ...
- Dec 2012 - Geant4 version 9.6
- Dec 2013 - Geant4 version 10.0 – MT мода
- Dec 2019- Geant4 version 10.6
- Geant4 developments were strongly supported by HEP community
  - LHC experiments are the goal
  - CERN, SLAC, KEK, TRIUF, IN2P3, INFN....
- Space and medical user communities also contribute significantly to Geant4 developments

Layout of the LEP tunnel including future LHC infrastructures.

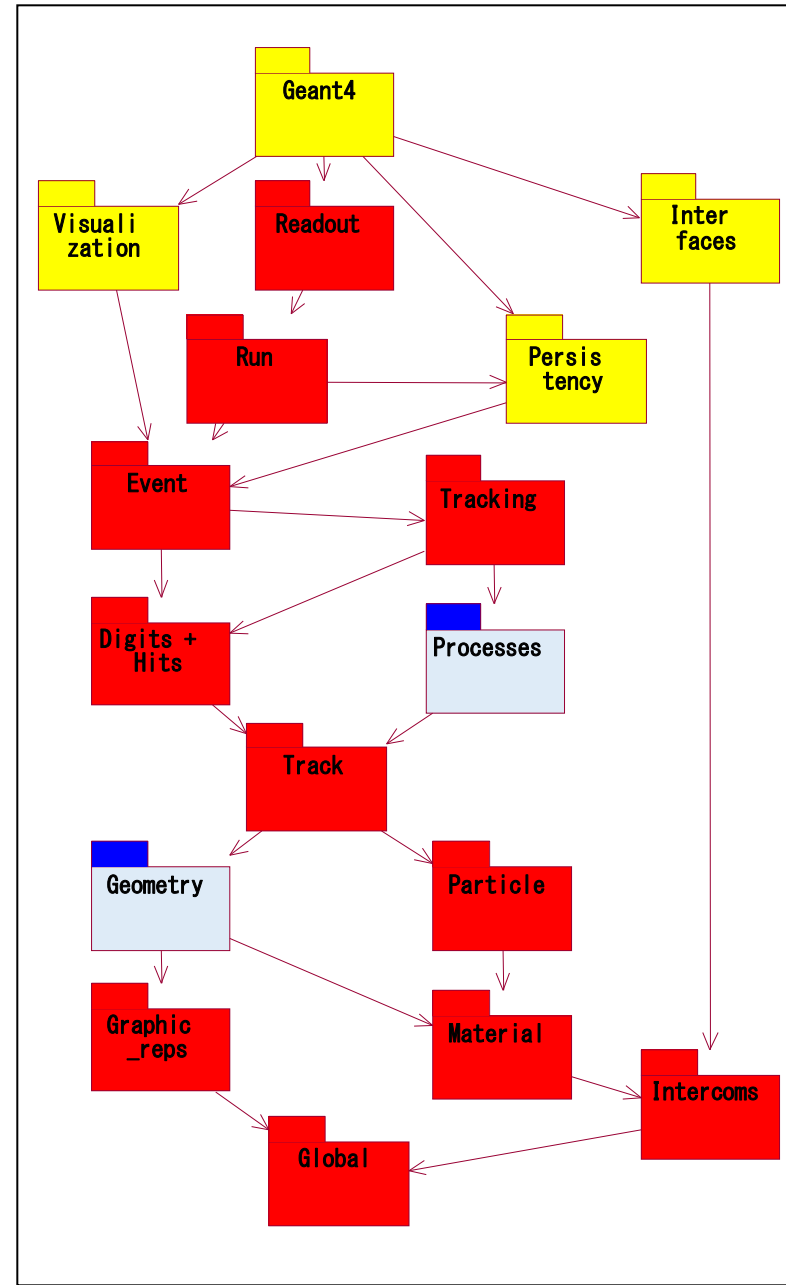


# Терминология

- **Step** – the smallest unit of Geant4 simulation, a particle is transported from one point to another
- **Trajectory and TrajectoryPoint** – collection of steps and step points
- **Process** – the physics that happens along a step
- **Track** – a snapshot of a particle at some point along its path (not the same as trajectory)
- **Event** – a collection of info from tracks and particle trajectories
- **Run** – a collection of events

# Geant4 структура

- ▶ Geant4 consists of 17 categories.
  - ▶ Independently developed and maintained by WG(s) responsible to each category.
  - ▶ Interfaces between categories (e.g. top level design) are maintained by the global architecture WG.
- ▶ Geant4 Kernel
  - ▶ Handles run, event, track, step, hit, trajectory.
  - ▶ Provides frameworks of geometrical representation and physics processes.



# Run in Geant4

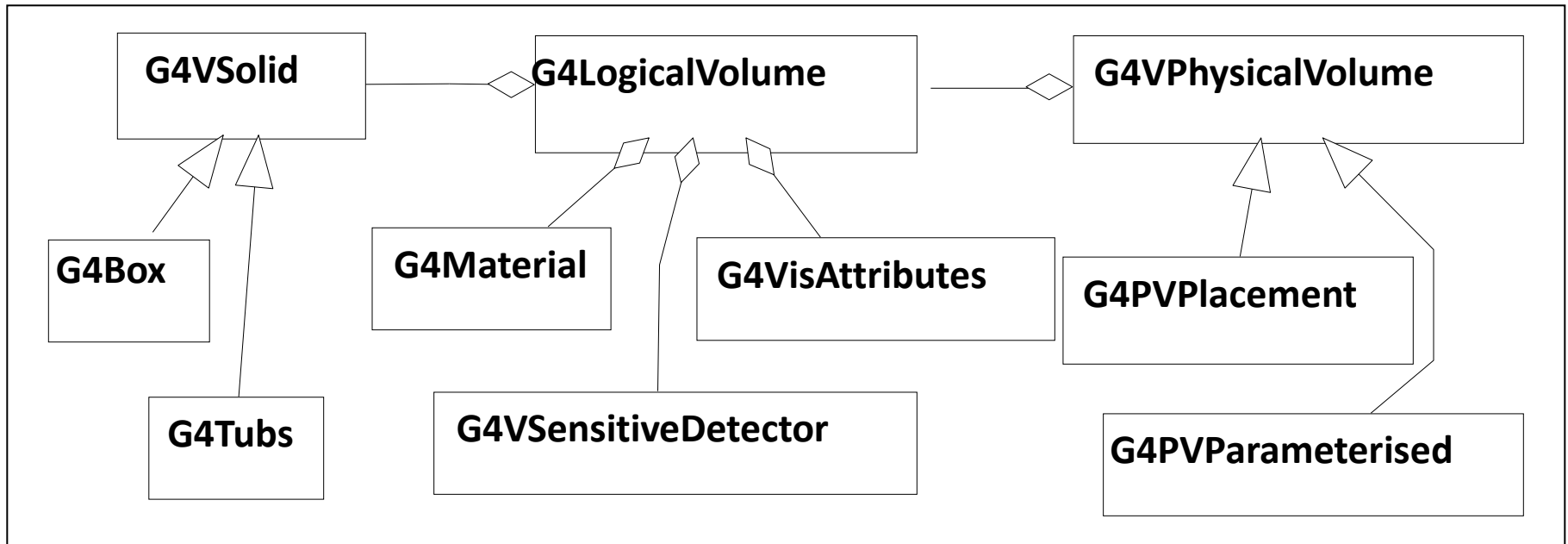
- As an analogy of the real experiment, a run of Geant4 starts with “Beam On”.
- Within a run, the user cannot change
  - detector setup
  - settings of physics processes
- Conceptually, a run is a collection of events
  - A run consists of one event loop.
- At the beginning of a run, geometry is optimized for navigation and cross-section tables are calculated according to materials appear in the geometry and the cut-off values defined.
- **G4RunManager** class manages processing a run, a run is represented by **G4Run** class or a user-defined class derived from G4Run.
  - A run class may have a summary results of the run.
- **G4UserRunAction** is the optional user hook.

# Event in Geant4

- An event is the basic unit of simulation in Geant4.
- At beginning of processing, primary tracks are generated. These primary tracks are pushed into a stack.
- A track is popped up from the stack one by one and “tracked”. Resulting secondary tracks are pushed into the stack.
  - This “tracking” lasts as long as the stack has a track.
- When the stack becomes empty, processing of one event is over.
- **G4Event** class represents an event. It has following objects at the end of its (successful) processing.
  - List of primary vertices and particles (as input)
  - Hits and Trajectory collections (as output)
- **G4EventManager** class manages processing an event. **G4UserEventAction** is the optional user hook.

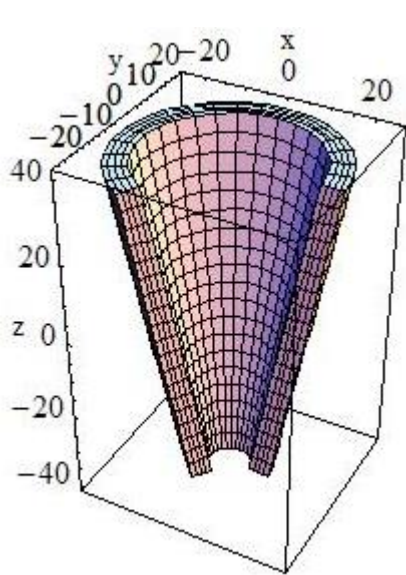
# Detector geometry

- Three conceptual layers for geometry to be defined using **G4UserDetectorConstruction**
  - **G4VSolid** -- *shape, size*
  - **G4LogicalVolume** -- *daughter physical volumes, material, sensitivity, user limits, etc.*
  - **G4VPhysicalVolume** -- *position, rotation*

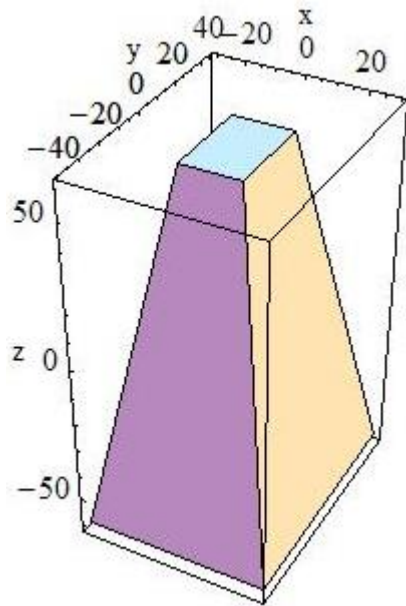




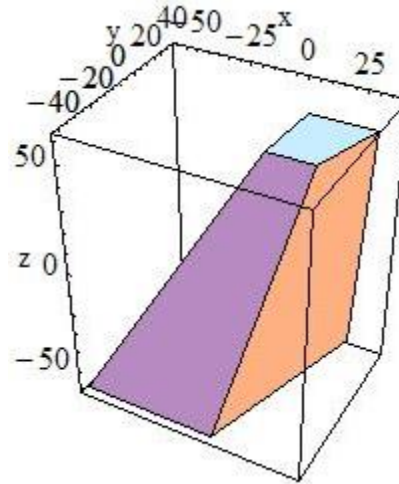
# Examples of CSG solids



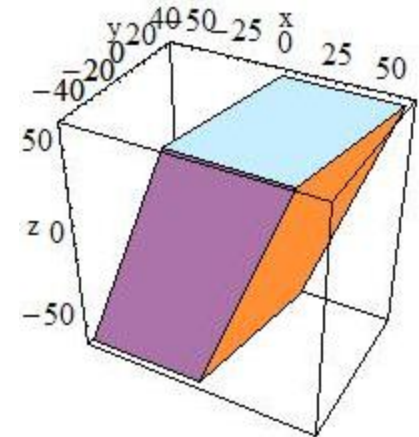
G4Cons



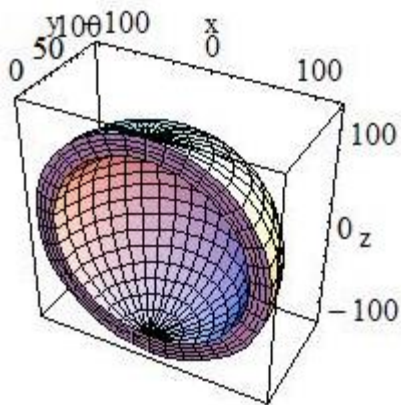
G4Trd



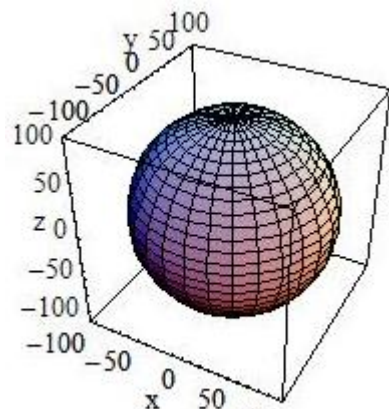
G4Trap



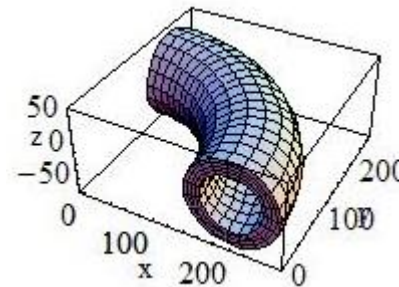
G4Para  
(parallelepiped)



G4Sphere



G4Orb



G4Torus

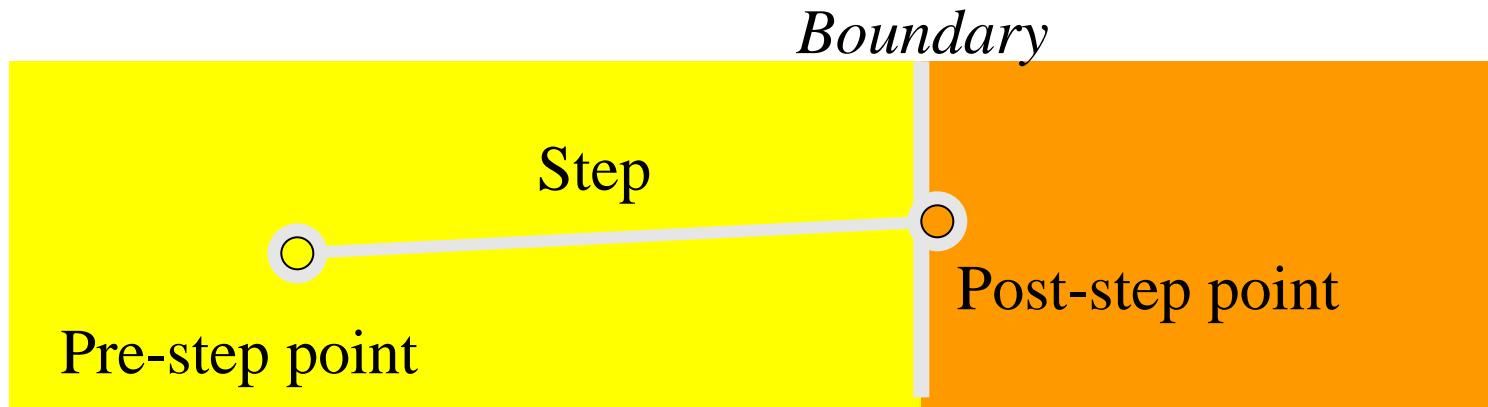
Consult to [Section 4.1.2 of Geant4 Application Developers Guide](#) for all available shapes.

# Track in Geant4

- Track is a **snapshot** of a particle.
  - It has physical quantities of **current instance** only. It does not record previous quantities.
  - **Step** is a “delta” information to a track. Track is not a collection of steps. Instead, a track is being updated by steps.
- Track object is deleted when
  - it goes out of the world volume,
  - it disappears (by e.g. decay, inelastic scattering),
  - it goes down to zero kinetic energy and no “AtRest” additional process is required, or
  - the user decides to kill it artificially.
- **No track object persists at the end of event.**
  - For the record of tracks, use trajectory class objects.
- **G4TrackingManager** manages processing a track, a track is represented by **G4Track** class.
- **G4UserTrackingAction** is the optional user hook.

# Step in Geant4

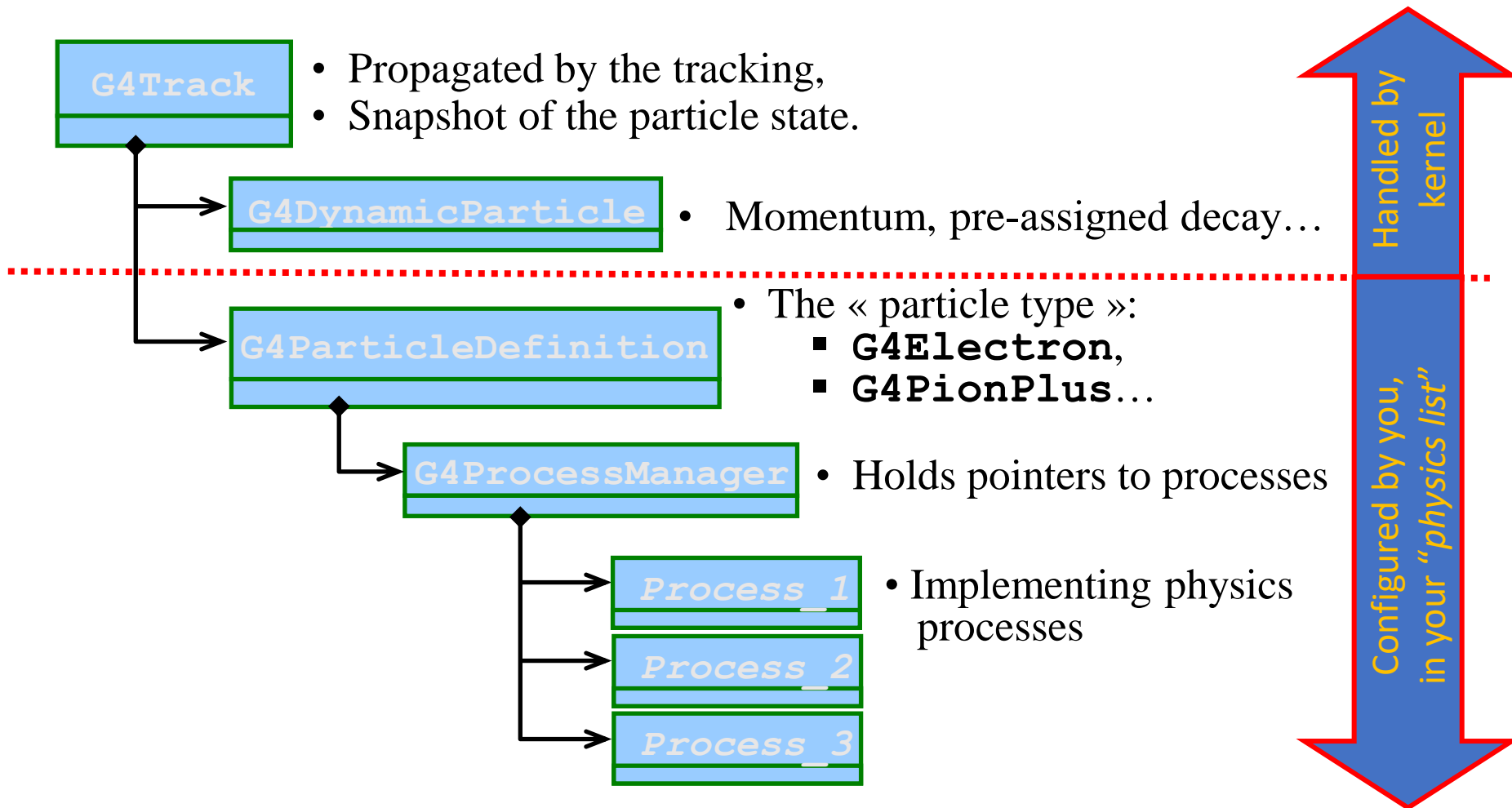
- Step has two points and also “delta” information of a particle (energy loss on the step, time-of-flight spent by the step, etc.).
- Each point knows the volume (and material). In case a step is limited by a volume boundary, the end point physically stands on the boundary, and it **logically belongs to the next volume**.
  - Because one step knows materials of two volumes, boundary processes such as transition radiation or refraction could be simulated.
- **G4SteppingManager** class manages processing a step, a step is represented by **G4Step**, and **G4StepPoint** classes.
- **G4UserSteppingAction** is the optional user hook.



# Particle in Geant4

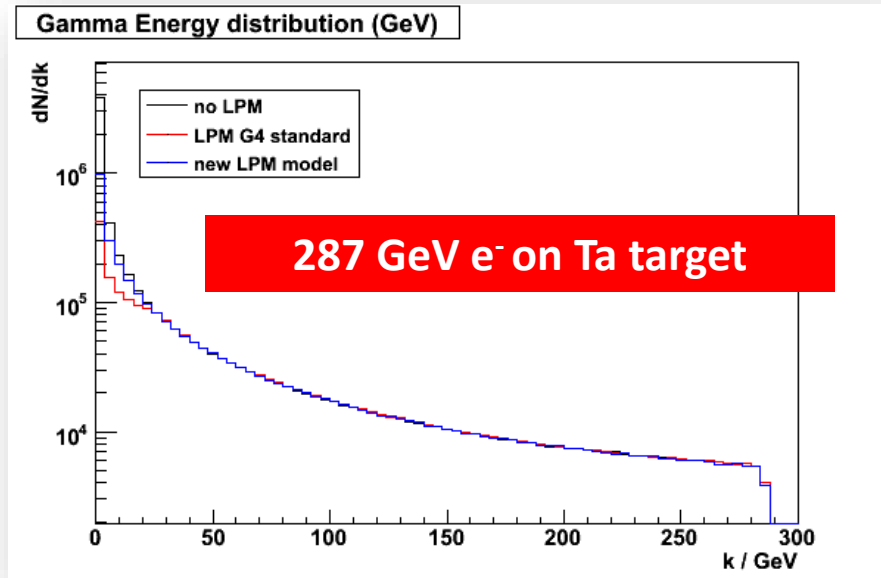
- A particle in Geant4 is represented by three layers of classes.
- **G4Track**
  - Position, geometrical information, etc.
  - This is a class representing a particle to be tracked.
- **G4DynamicParticle**
  - "Dynamic" physical properties of a particle, such as momentum, energy, spin, etc.
  - Each G4Track object has its own and unique G4DynamicParticle object.
  - This is a class representing an individual particle.
- **G4ParticleDefinition**
  - "Static" properties of a particle, such as charge, mass, life time, decay channels, etc.
  - G4ProcessManager which describes processes involving to the particle
  - All G4DynamicParticle objects of same kind of particle share the same G4ParticleDefinition.

# G4Process – main interface to physics

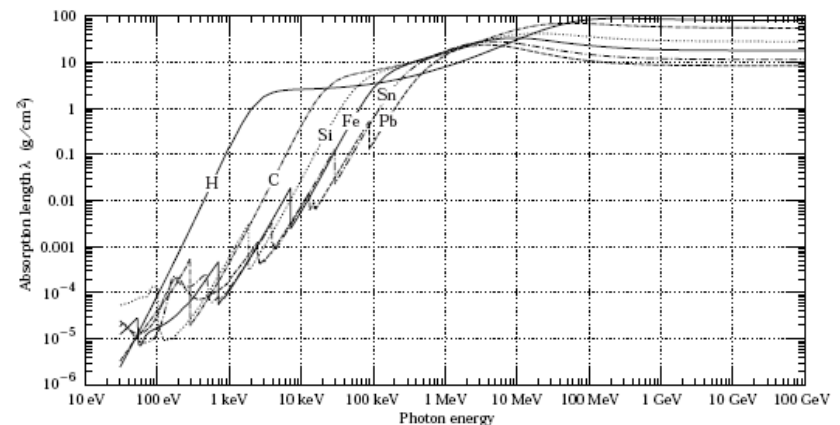


# Bremsstrahlung (тормозное излучение)

- Bremsstrahlung spectrum grows to low energy as  $1/k$ 
  - $k$  is the gamma energy
- Low energy gammas have very small absorption length
- Simulation of all low-energy gammas is non-effective
- Cuts/production threshold are used in all Monte Carlo codes
- Gamma emission below production threshold is taken into account as a continuous energy loss
- Similar approach is used for the ionisation process where spectrum of  $\delta$ -electrons is proportional to  $1/T^2$



## 22 27. Passage of particles through matter





# Cut and production thresholds for energy loss processes

- User defines cut in range expressed in units of length
- Using this range Geant4 kernel compute production threshold  $T_{cut}$  for each material during initialization
- For a typical process (G4hIonisation, G4eIonisation, ...), the production threshold  $T_{cut}$  subdivides the continuous and discrete parts of energy loss:
  - Mean rate of energy lost due to soft energy transfers
  - Total XS for discrete  $\delta$ -electron production above  $T_{cut}$
- At each step energy deposition is sampled by a fluctuation model using the computed mean energy loss
- **Optionally, energy loss may be modified :**
  - for the generation of extra  $\delta$ -electrons under the threshold when the track is in the vicinity of a geometrical boundary (sub-cutoff)
  - for the sampling of fluorescence and Auger-electrons emission
- 4-momentum balance is provided in all cases

$$\frac{dE(E, T_{cut})}{dx} = n_{at} \int_0^{T_{cut}} T \frac{d\sigma(Z, E, T)}{dT} dT$$

$$\sigma(Z, E, T_{cut}) = \int_{T_{cut}}^{T_{max}} \frac{d\sigma(Z, E, T)}{dT} dT$$

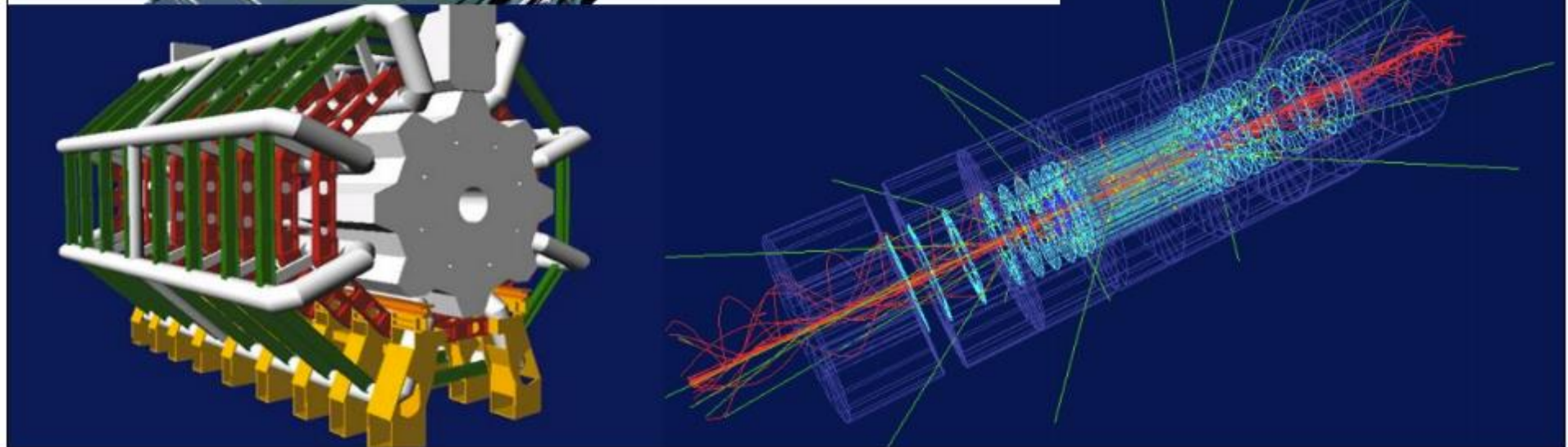
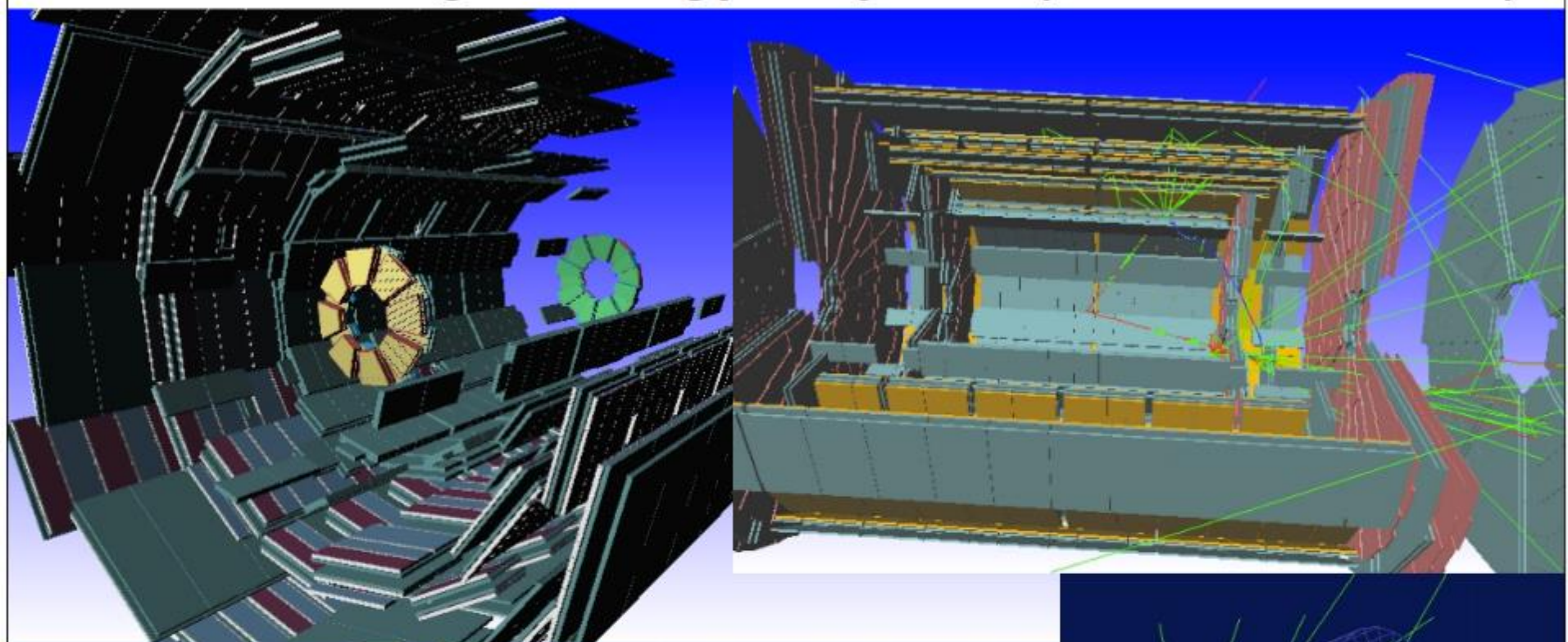
# Geant4 general references

- **Recent Developments in Geant4.** *J. Allison et al., by the Geant4 Collaboration., [Nucl. Instrum. Meth. A 835, 186-225, 2016.](#)*
- **Recent Improvements in Geant4 Electromagnetic Physics Models and Interfaces.** V. Ivanchenko et al., Progress in NUCLEAR SCIENCE and TECHNOLOGY, Vol. 2, pp.898-903, 2011.
- **Geometry and physics of the Geant4 toolkit for high and medium energy applications.** J. Apostolakis et al., Radiation Physics and Chemistry 78: 859-873, 2009.
- **Geant4 developments and applications.** J. Allison et al., IEEE Trans. Nucl. Sci. 53 (1): 270-278, 2006.
- **Geant4: A Simulation toolkit.** By GEANT4 (S. Agostinelli et al.), Nucl. Instrum. Meth. A506 (3): 250-303, 2003.
  - Более 10000 цитирований – одна из наиболее цитируемых работ в мире

# Примеры применения Geant4

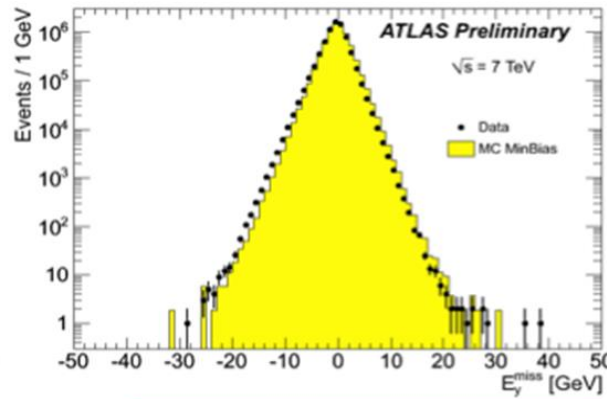
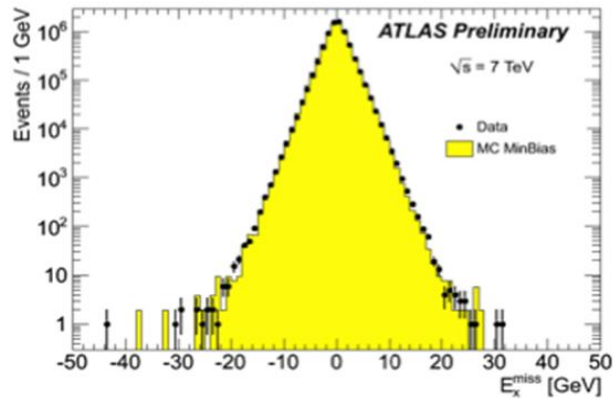
Коллекция наиболее заметных приложений Geant4ю  
Общее количество приложений намного больше

# Geant4 in High Energy Physics (ATLAS at LHC)

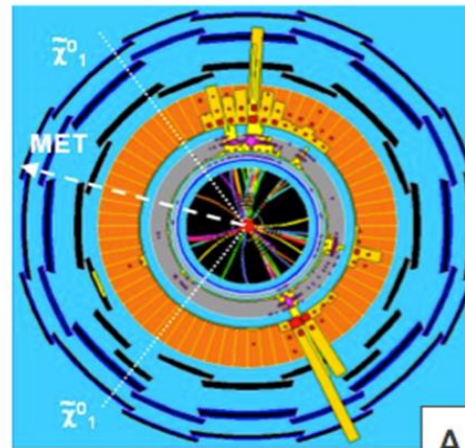
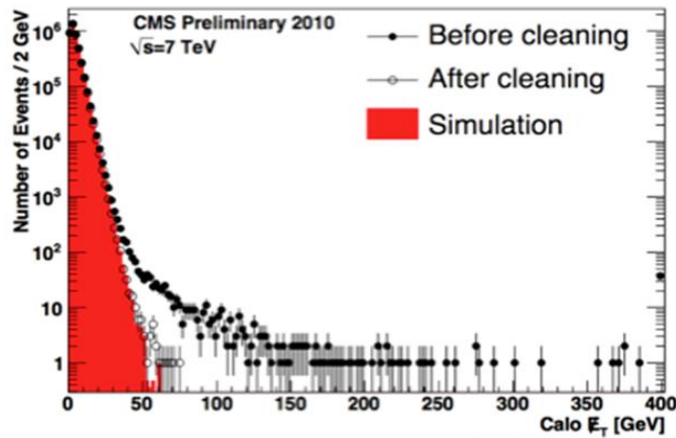




# Анализ данных в эксперименте ATLAS



This is one of the hardest things to get right. MET incorporates everything measured in the detector and attempts to identify non-interacting particles, such as neutrinos or dark matter.



A GEANT4 event.

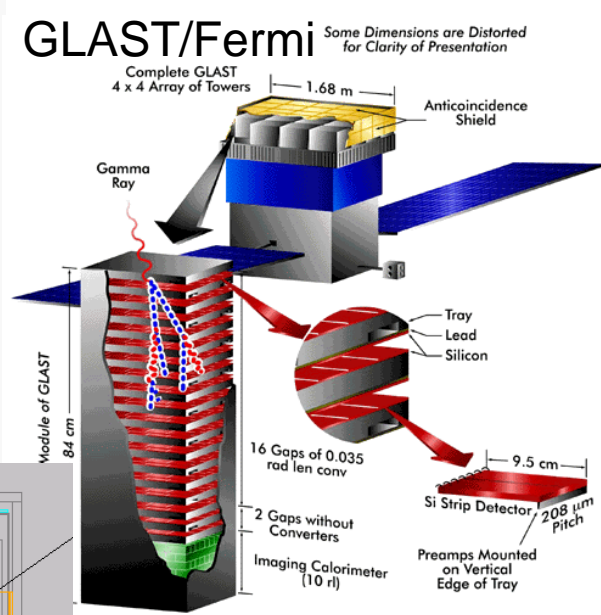
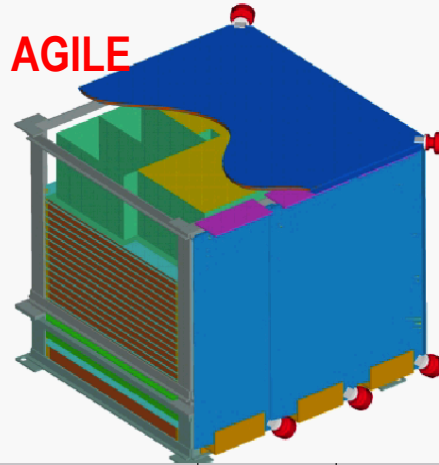
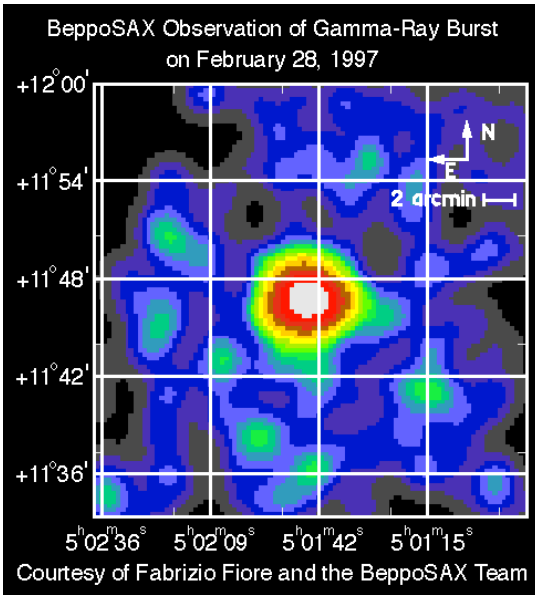
Agreement is astounding.

You can even see that the ATLAS detector is not quite centered – in both data and MC.

Both ATLAS and CMS plots are made from a tiny piece of the very earliest data.

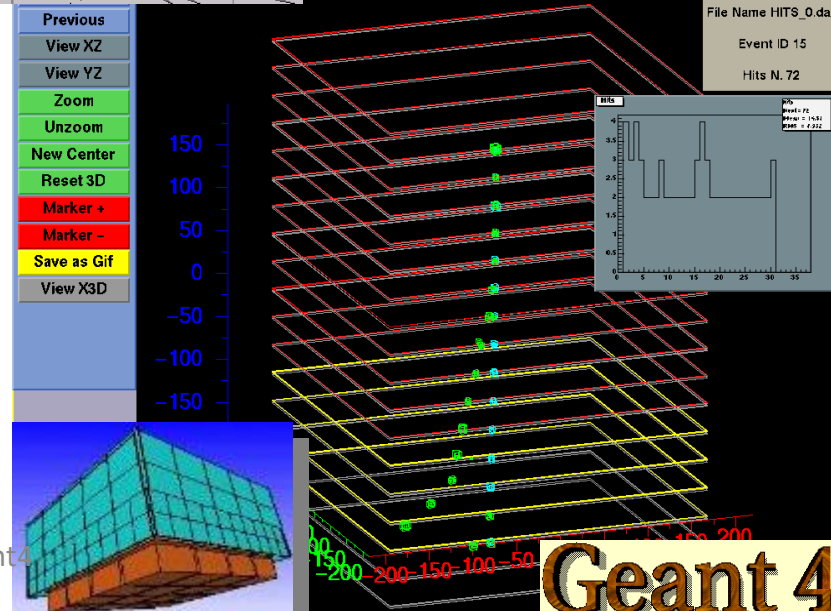
# $\gamma$ astrophysics

## $\gamma$ -ray bursts



## GLAST / Fermi

### GLAST Hits Display



Typical telescope:  
*Tracker*  
*Calorimeter*  
*Anticoincidence*

- $\gamma$  conversion
- electron interactions
- multiple scattering
- $\delta$ -ray production
- charged particle tracking

Introduction to Geant4

# Geant 4



# Geant4 in space



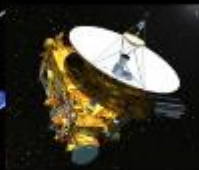
Akebono



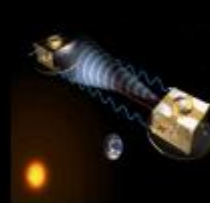
RHESSI



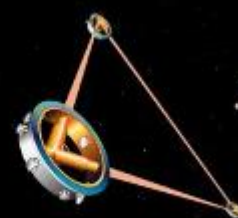
ACE



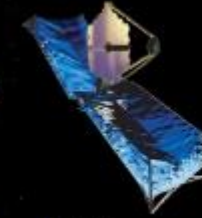
New Horizons



LISA Pathfinder



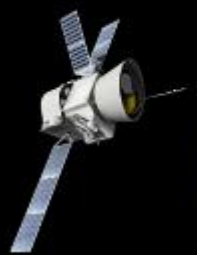
LISA



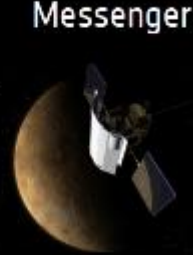
JWST



INTEGRAL



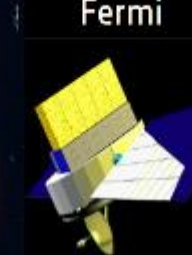
BepiColombo



Messenger



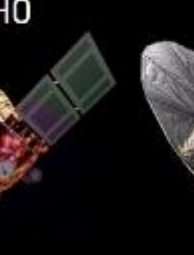
Astro-H



Fermi



SOHO



GAIA



Herschel



Cassini



Suzaku



SWIFT



XMM-Newton



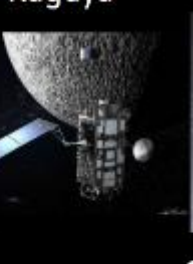
JUICE



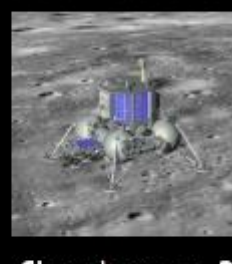
JUNO



Kaguya



Chandrayaan-1



Chandrayaan-2



Columbus



EUSO



AMS



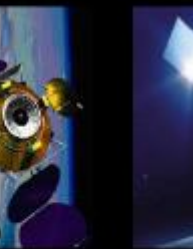
MAXI



ConeXpress



Chang'e-1

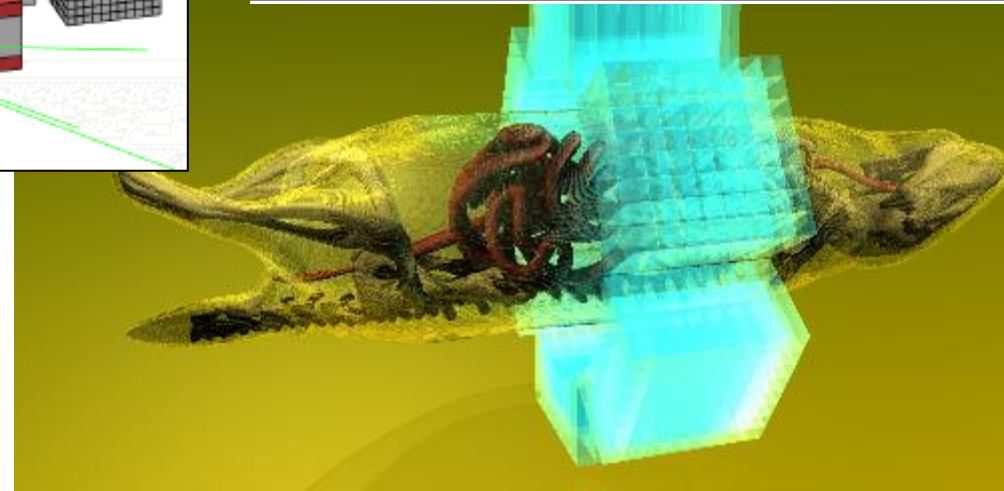
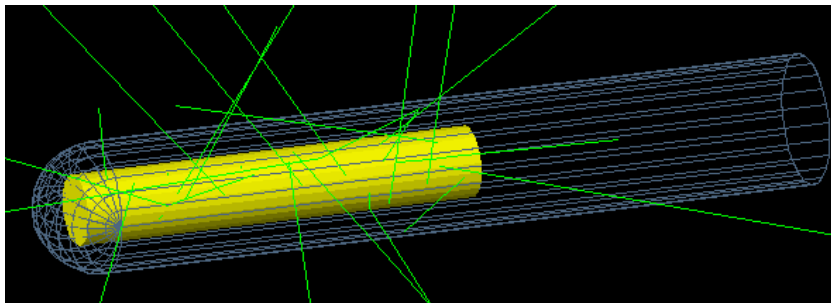
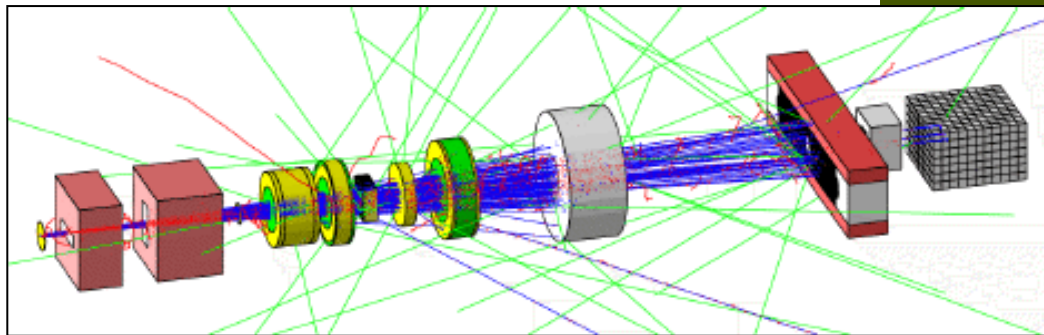
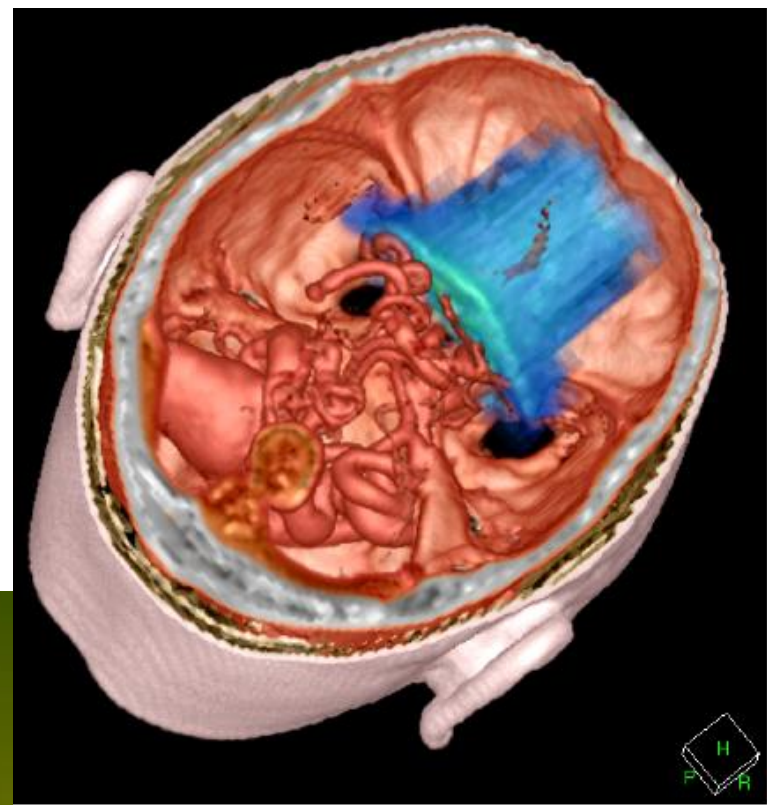


LRO



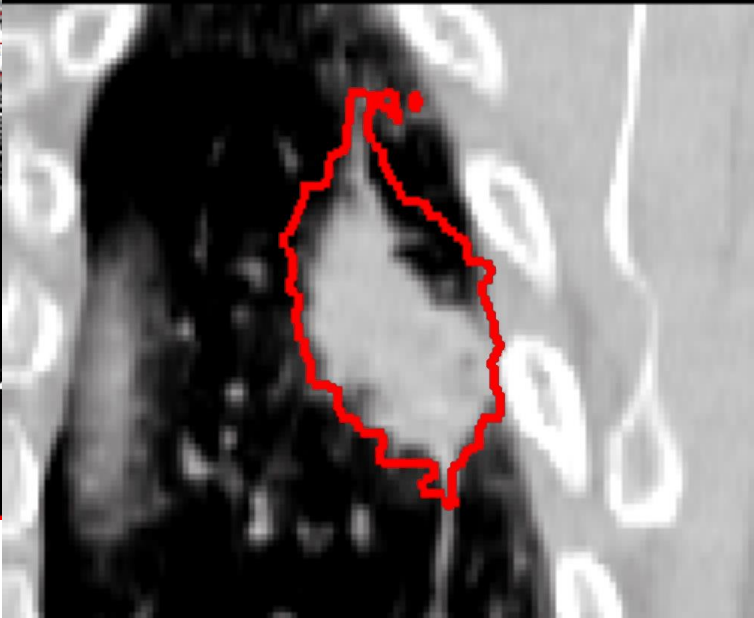
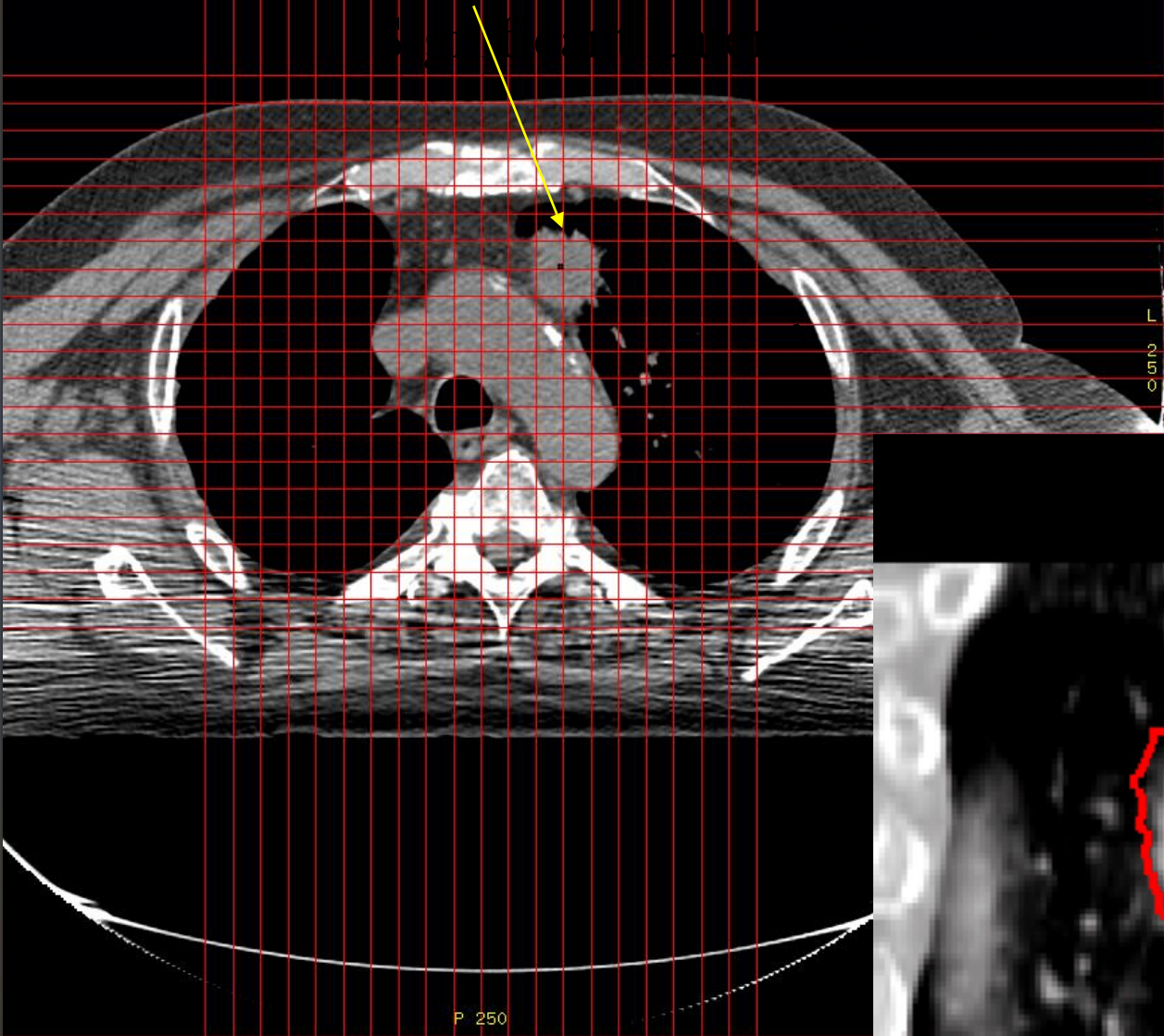
# Geant4 in Medical Science

- Beam therapy
- Brachytherapy
- Imaging
- Irradiation study



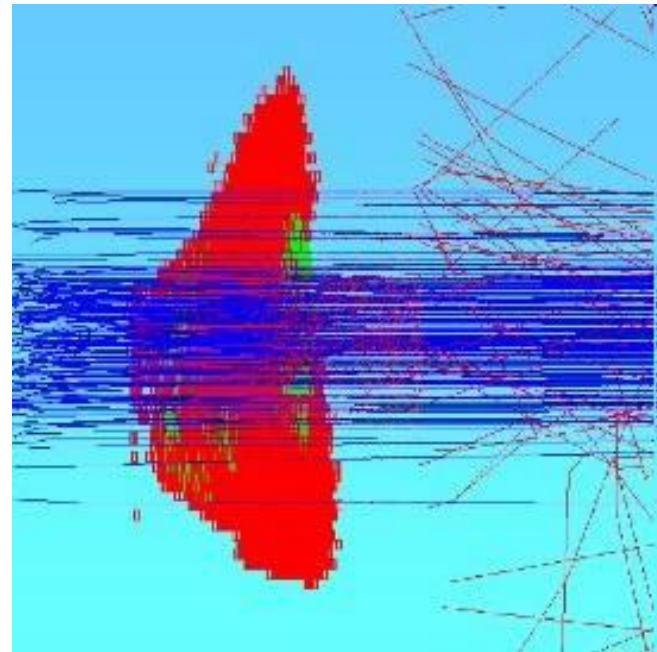
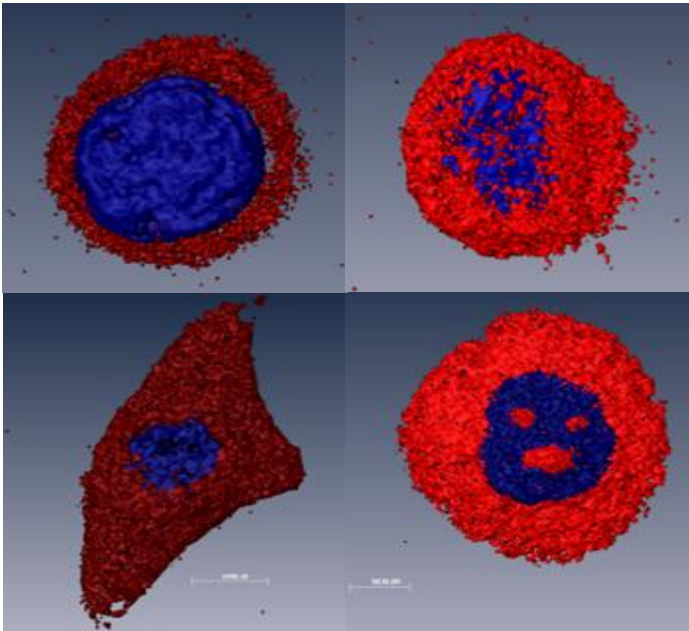


# Lateral Motion of Lung Tumor



# Single cell irradiation

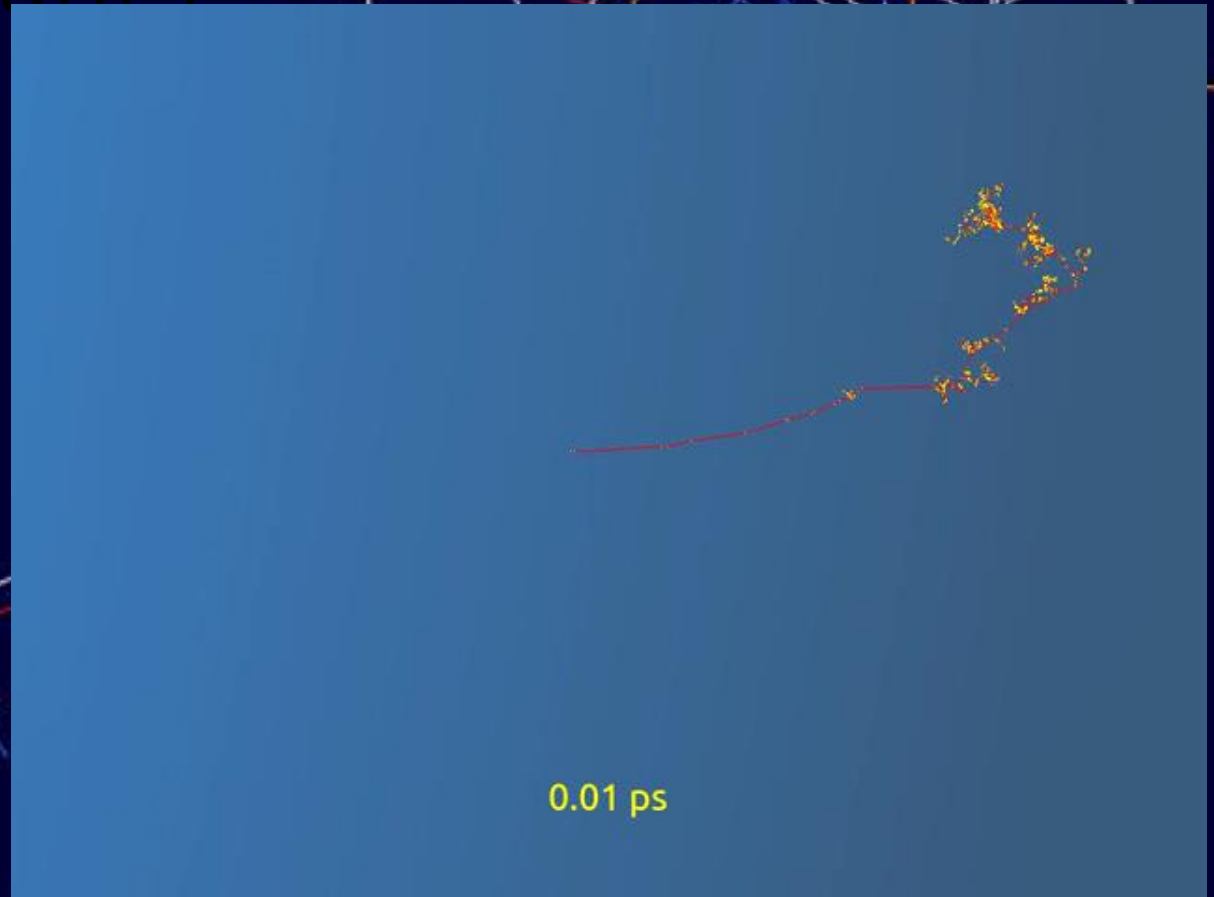
- Example of single cell irradiation by 3 MeV alpha particles in a high-resolution cellular phantom
  - 4h or 24h incubated cell
  - 64 x 64 x 60 resolution
  - 0.36 x 0.36 x 0.16  $\mu\text{m}^3$  voxel size
- Full CENBG microbeam irradiation setup simulated



Courtesy of Sebasien Incerti (IN2P3-CNRS / CENBG)

most common DNA conformation in cells

DNA in Geant4



**Conversion of ProteinDataBank-format file ► Geant4**

Courtesy of Sebasien Incerti (IN2P3-CNRS / CENBG)

Introduction to Geant4

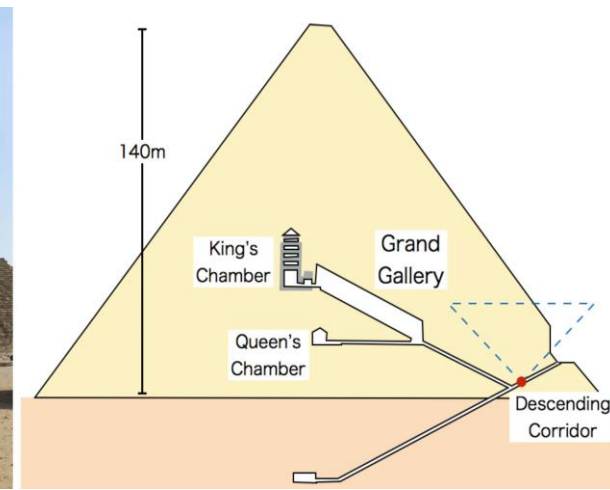


# Мюонная Томография

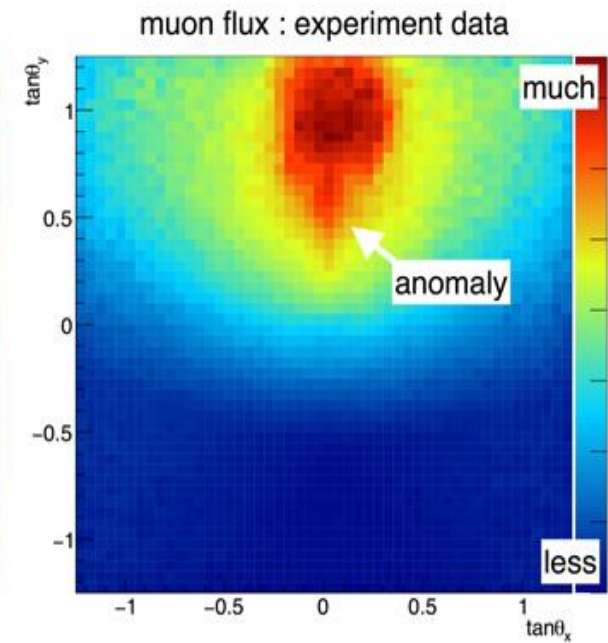
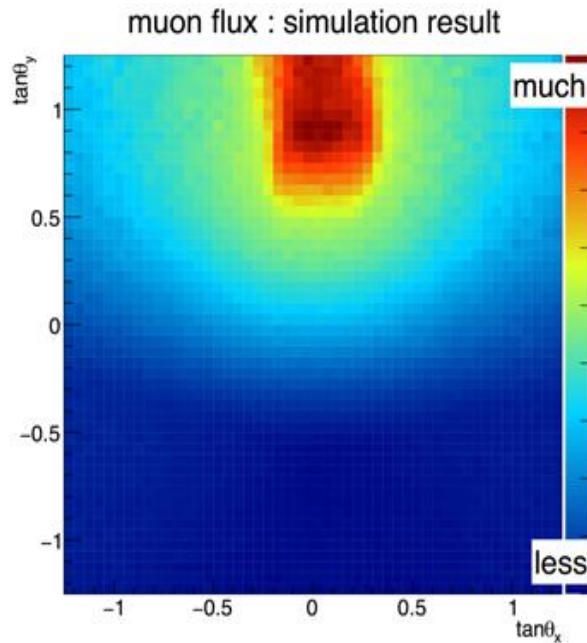
- Постоянный поток мюонов на поверхности Земли позволят изучать внутреннее строение объектов

- Вулканы
- Пирамиды
- Радиационные отходы
- Covid-19

- Geant4 обеспечивает моделирование



M. Kuno et al., 2017. Development of Analysis Method using GEANT4 for Cosmic Ray Radiography



# Как стать пользователем Geant4?

Пакет программ полностью открыт, для загрузки не требуется регистрации. С самого начала проекта было декларировано, что пользователь Geant4 может стать разработчиком. В настоящее время это технически проще благодаря тому, что Geant4 развивается под git

# Как найти ответы на вопросы и получить помощь?

- Главная страница: <http://geant4.cern.ch/index.shtml>
- Инструкции (включая инструкции по установке): <http://geant4.cern.ch/support/userdocuments.shtml>
- Форум пользователей:  
<https://geant4-forum.web.cern.ch/>
  - Можно задавать вопросы, разработчики и другие пользователи ответят
  - Нужно выбирать правильный форум, чтобы ответ пришел быстрее
- Сообщить об ошибке: <https://bugzilla-geant4.kek.jp/>
- Просмотреть код: <http://www-geant4.kek.jp/LXR/>



# Как начать?

- Нужно установить Geant4 (see Installation guide)
- Рекомендуется запустить «примеры»
  - Examples are in the directory: \$G4INSTALL/examples
  - Лучше всего начать с basic examples
  - Возможны как интерактивная так и batch моды
  - В зависимости от своей задачи можно выбрать определенный **extended example**
  - Возможно скопировать один из примеров и на его основе приготовить своё приложение
    - Для очень сложных задач скорее всего надо разрабатывать новое приложение
    - Примеры помогут сделать это более оптимально и быстрее
- Для специфических задач разработаны пакеты программ на основе Geant4

# Известные приложения на основе Geant4

- **GATE** (Франция) – позитронная томография и другие применения в радиационной медицине
- **GAMOS** (Испания) – медицинская физика и другие применения
- **TOPAS** (США) – медицинские применения
- **GRAS** (Европейское Космическое Агенство) – радиационные эффекты в космосе
- И много других, большая часть обеспечивают готовое приложение, но не показывают свой код
  - Во некоторых случаях требуется оплата лицензии

# How Geant4 may be to used?

- **Computer platforms for Geant4 10.6**
  - Linux, gcc-4.9.3, 5.4.X, 6.3.X, 7.4.X, 8.3.X, 9.2.X 64 bits
  - MacOSX10.15, llvm/clang-8.0 (XCode 11.x), 64 bits
  - Windows 10, Visual C++ 14.23 (Visual Studio 2019)
  - Also tested (sequential/MT):
    - Linux CentOS7, icc-19, clang-5.0/8.0–Linux Ubuntu 18, gcc-7.4–MacOSX10.13/10.14, clang-7.0
  - **For these platforms follow download manual**
- **Other computer platforms may be used with extra user efforts**
  - Docker images and Virtual machines may be a solution
- **In many computer centers Geant4 is preinstalled**

# Самостоятельная работа

Пакет программ Geant4 установлен на Линокс кластере ТГУ, что обеспечивает возможность исполнения отдельных задач.

# Geant4 примеры для выполнения самостоятельной работы

- [geant4/examples/extended/electromagnetic/TestEm0](#)
  - В примере показано как получить информацию о сечениях реакций, коэффициентах поглощения в среде, ионизационных потерь
- [geant4/examples/extended/electromagnetic/TestEm5](#)
  - Базовый пример для демонстрации электромагнитных взаимодействий частиц с веществом
  - Простейшая геометрия – параллелепипед, который имеет толщину и ширину
  - Пучек частиц направлен по нормали
  - В результате моделирования подсчитывается энергосодержание в поглотителе, доля частиц прошедших поглотитель, энергия прошедших частиц, отраженные частицы и их энергии
  - Средние значения этих параметров выводятся на печать

# Кластер ТГУ

- Для самостоятельной работы на Linux кластере ТГУ установлен пакет программ Geant4
- Метод доступа
  - MacOS/Linux
    - `chmod 600 id_rsa_school && ssh -i id_rsa_school -L 8888:localhost:8888 -p 10023 school@92.63.70.26`
  - Windows
    - `putty -i school.ppk -L 8888:localhost:8888 -P 10023 school@92.63.70.26`
- Geant4 настроен и активирован, находится в директории `/opt/geant4`
- Проекты создаются в директории `~/geant4`
  - Приготовлены примеры TestEm0, TestEm5

# Batch Mode

- A Geant4 simulation can be executed in a batch mode.

- A macro file consists of a series of UI commands
- A macro file can be specified as an argument.

```
$ task2a myrun.mac >& myrun.log (csh)
# task2a myrun.mac > myrun.log 2>&1 (bash)
```

- To enable batch mode

- In your main(),

```
G4UImanager* UI = G4UImanager::GetUIpointer();
G4String command = “/control/execute ”;
G4String fileName = argv[1];
UI-> applyCommand(command+fileName);
```



# Задание

1. С помощью TestEm0 определить коэффициент поглощения фотонов рентгеновской трубки (энергия 20 кэВ) в алюминии и в свинце
  - Можно использовать готовый исполняемый файл, но нужно подготовить масро-файлы с начальными данными
2. Используя эти результаты, оценить толщину слоя алюминия и свинца, требуемых для ослабления пучка в 1000 раз
3. Подтвердить расчетный результат с использованием моделирования по TestEm5
  - Можно использовать готовый исполняемый файл, но нужно подготовить масро-файлы с начальными данными