

# 粒子物理与核物理实验中的数据分析

---

杨振伟  
清华大学

第七讲:Geant4 的探测器模拟介绍(2)

# 上讲回顾

---

## ■ Geant4 简介

### ■ 模拟粒子穿过物质的工具包

广泛应用于粒子物理、核物理、加速器物理、医学物理、空间科学等领域

### ■ 基本概念和重要的用户类

## ■ 安装Geant4

## ■ 使用Geant4：探测器几何与材料

# 本讲要点

---

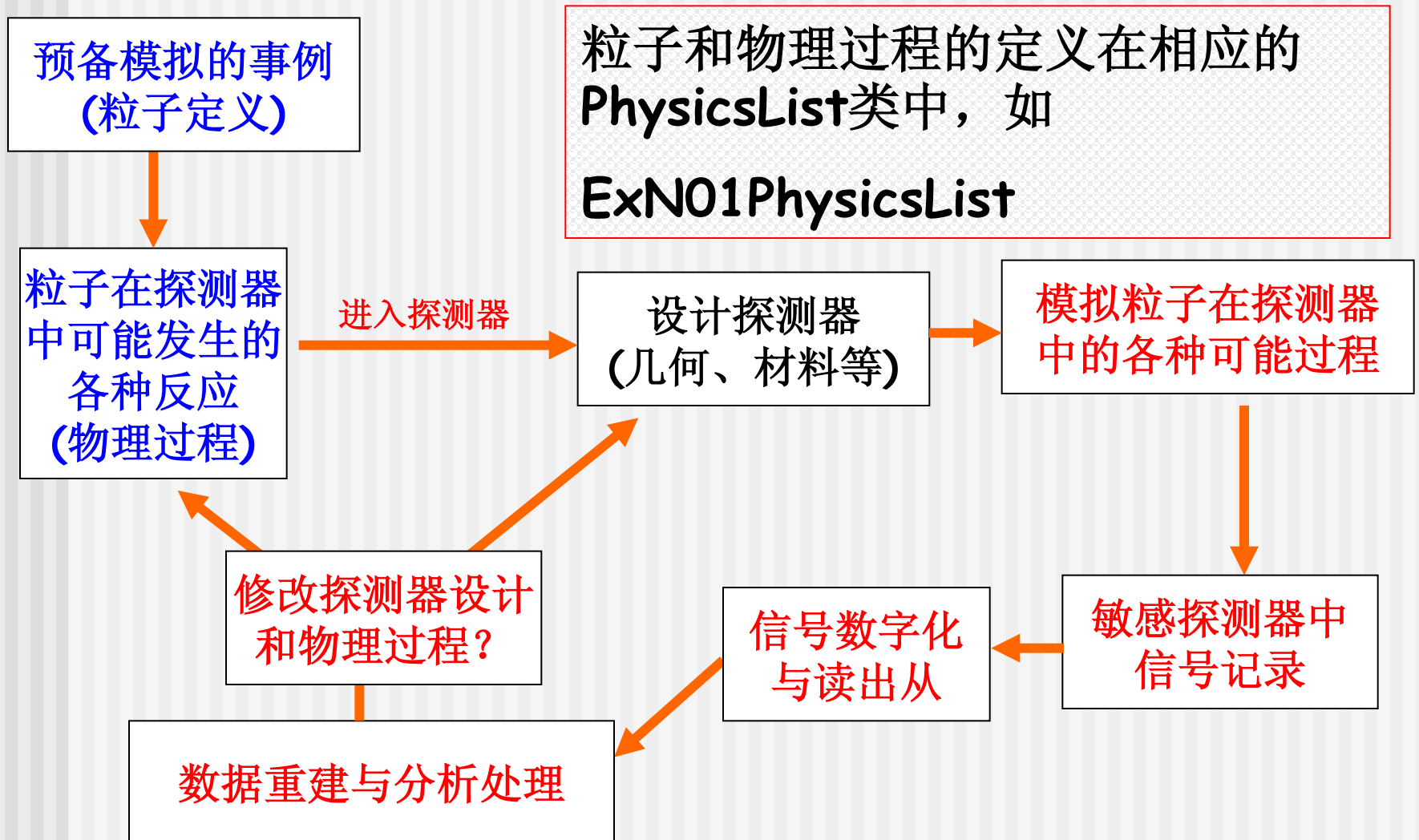
- 物理过程

- 粒子定义

- 物理过程定义

- Run和Event等基本概念

# Geant4模拟的基本流程



# Geant4 中的粒子

- Geant4 中的粒子由三层类来表示。
- G4ParticleDefinition
  - 粒子的“静态”特征量，如电荷、质量、寿命等等。
  - 没有能量、方向等信息
- G4DynamicParticle
  - 赋予粒子运动学(动态)属性，如动量，能量，自旋方向等等。
- G4Track
  - 将动态粒子放到具体环境中，给出位置，几何信息等等。

# 粒子定义(1)

- 首先要定义粒子，即模拟中可能产生的各种粒子
- Geant4提供了各种类型的粒子：
  1. 普通粒子：如电子、质子、光子等
  2. 共振态粒子：寿命短，如矢量介子等
  3. 核子：如氘核、氦核及重离子等
  4. 夸克、胶子等
- 定义的附帶了粒子的各种信息：如名称、质量、电荷、自旋、寿命、衰变道等

# 粒子定义(2)

---

- Geant4中粒子分以下六大类

lepton

meson

baryon

boson

shortlived

ion

# 粒子定义(3)

## ■ PhysicsList中定义粒子

在ConstructParticle()函数中定义

```
void ExN01PhysicsList::ConstructParticle()
{
    G4Geantino::GeantinoDefinition();//定义geantino
    G4Proton::ProtonDefinition();//定义质子
    G4Positron::PositronDefinition();//正电子
    G4MuonPlus::MuonPlusDefinition();// $\mu^+$ 
    G4AntiNeutrinoE::AntiNeutrinoEDefinition();//反电
    子中微子
    ...
}
```

但是如果过程复杂，需要定义的粒子非常多，  
需要有更方便的定义方法



# 粒子定义(4)

```
void ExN01PhysicsList::ConstructLeptons()
{
    // 定义所有轻子
    G4LeptonConstructor pConstructor;
    pConstructor.ConstructParticle();
}
void ExN01PhysicsList::ConstructBosons()
{
    // 定义所有玻色子
    G4BosonConstructor pConstructor;
    pConstructor.ConstructParticle();
}
...
```

```
void ExN01PhysicsList::ConstructParticle()
{
    ConstructLeptons(); //构造轻子
    ConstructBosons(); //构造玻色子
    ...
}
```

除了轻子、玻色子还包括：  
G4MesonConstructor  
G4BaryonConstructor  
G4IonConstructor  
G4ShortlivedConstructor

如果对过程中可能需要的粒子不确定，可以用这种方法把所有粒子都构造出来。

# Geant4对不同粒子的处理及截断

- Geant4对不同类型粒子的处理不同，如：
  1. 稳定/长寿命粒子：径迹模拟
  2. K0: 直接被重定义为K0\_L或K0\_S，然后模拟径迹
  3. 短寿命粒子：直接衰变，而不模拟径迹
- 有些过程需要设置截断

Geant4统一采用长度截断，内核自动将长度换算为能量，换算出的能量依赖于不同的物质。

SetCuts()函数，见ExN01PhysicsList或ExN02PhysicsList

# Geant4 的物理过程

- 要模拟真实的物理，必须首先知道粒子在物质中哪些相互作用是最主要的，或者说哪些物理过程是重要的。  
Geant4提供了7大类物理过程描述粒子与物质的相互作用。  
\$G4INSTALL/data目录存放物理模型的数据
- electromagnetic: 电磁相互作用过程 (标准的和低能的)
- hadronic: 强子相互作用过程 (纯强子、辐射衰变、光电-核)
- decay: 衰变过程
- photolepton-hadron: 光轻子与强子的相互作用过程
- optical: 光学的光子过程
- parameterization: 参数化过程 (即fast simulation)
- transportation: 输运过程

要根据事例中的粒子以及材料，指定必要的物理过程  
其中输运过程是必须添加的过程。

# 物理过程的添加

```
void ExN01PhysicsList::ConstructProcess()
{
    AddTransportation(); //添加运输过程
}
```

```
void ExN02PhysicsList::ConstructProcess()
{
    AddTransportation(); //添加运输过程
    //添加电磁过程，自定义，
    //见void ExN02PhysicsList::ConstructEM()
    ConstructEM();
    //添加一般过程(实际上是衰变过程)，自定义，
    //见void ExN02PhysicsList::ConstructGeneral()
    ConstructGeneral();
}
```

# 产生Primary Event

- 必须指定如何产生一个事件，才能进行模拟，在G4VUserPrimaryGeneratorAction的具体类中用G4VPrimaryGenerator的具体类来完成。
- 有两种PrimaryGenerator
  - G4ParticleGun**: 发射指定能动量的特定粒子
  - G4HEPEvtInterface**: 利用提供的接口，读取外部产生子产生的事例。外部产生子的结果按照HEPEvt的格式写成ASCII文件

# G4ParticleGun

```
//参数n_particle表示一次发射的粒子数目  
G4ParticleGun* particleGun = new G4ParticleGun(n_particle);  
  
G4ParticleGun有很多设置函数，如：  
SetParticleDefinition(G4ParticleDefinition*); //粒子类型  
SetParticleMomentumDirection(G4ThreeVector); //动量方向  
SetParticleEnergy(G4double); //能量  
SetParticlePosition(G4ThreeVector); //发射位置  
...
```

粒子枪的属性设置好之后，才调用[generatePrimaryVertex\(\)](#)函数，产生事例的主顶点。

粒子枪本身不提供随机性，发射的粒子都是指定的。如果需要按照某分布随即发射粒子，需要在调用[generatePrimaryVertex\(\)](#)之前，利用Geant4提供的随机数产生子自己写出需要的分布。

参见[ExN01PrimaryGeneratorAction::generatePrimaries\(G4Event\\*\)](#)函数

# G4Run

- **Run**是Geant4模拟的最大单元。一次Run中，探测器几何、敏感探测器、物理过程都不能改变。

G4RunManager调用BeanOn()时开始一次Run。可以包含很多Event。

G4UserRunAction类中有BeginOfRunAction()和EndOfRunAction()。

前者主要用于进行run号设定、直方图或TTree,TFile定义等，后者主要进行存储直方图或者文件等。

在调用BeanOn()的过程中，将调用5种(如存在)用户作用类：

G4UserRunAction, G4UserEventAction, G4UserStackingAction,  
G4UserTrackingAction, G4UserSteppingAction

在概念上，一个 **run** 收集的是同一个探测器条件下的事例。

# G4Event

- G4Event表示一个事例。一个event对象包含有模拟事例的所有输入和输出信息，主要是4大类：主顶点和主粒子、径迹、击中以及数字化集合。

G4UserEventAction类中有BeginOfEventAction()和EndOfEventAction()，前者可以作事例开始的预备工作，后者可以将事例的有用信息提取出来，填充到直方图或者TTree中。

- 用作输入的原初顶点和粒子列表
- 所收集的各种在探测器的击中或响应
- 所收集的各种运动轨迹信息（可选项）
- 所收集的各种数字化信息（可选项）

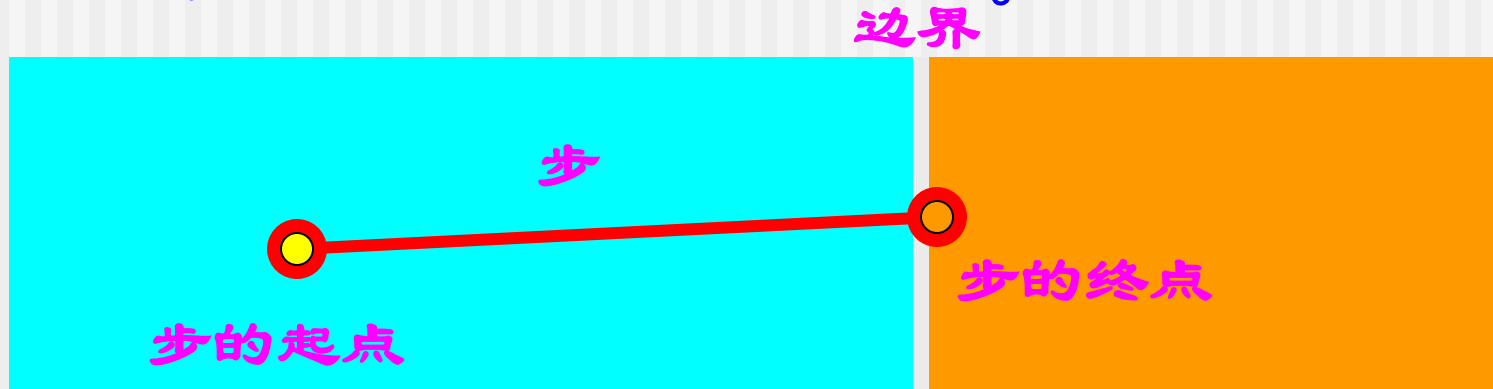


# 在 Geant4 中的迹

- 迹是粒子在探测器中留下的痕迹。
  - 只体现出当时粒子的位置和物理量。
- 步是粒子径迹的一小段“ $\Delta$ ”信息。
  - 粒子径迹并不是步的集合。
- 在下列情况下，迹要被删除：
  - 迹离开广义中的大体积
  - 迹消失（例如发生了衰变）
  - 粒子动能为零，在 (AtRest) 时也无其它物理过程的要求。
  - 用户决定要将其删除。
- 在每个事例结尾，不保留迹的目标模块。
  - 用运动轨迹的类目标模块来记录粒子的径迹。
- G4TrackingManager 负责管理处理迹的进程，迹由 G4Track 类表示。

# 在 Geant4 中的步

- 每一步都有两个点和粒子的“ $\Delta$ ”信息（在该步的能损，所需的飞行时间，等等）。
- 在每一点上，都应该知道其所处在的体积（与材料）内。如有一步跨越边界，该步的截止点物理上就设在该边界上，逻辑上该点属于下一个体积。
- 由于一步能知道两个体积的物质材料，因此可以模拟在边界发生的跃迁辐射或折射过程。



- `G4SteppingManager` 类负责管理步的处理，步由 `G4Step` 类表示。

# 跟踪与物理过程处理

## ■ Geant4 迹跟踪是很普遍的。

### ■ 它无关于

- 粒子的种类
- 粒子所涉及的物理过程

### ■ 它给所有物理过程提供了

- 帮助确定步的长度的机会
- 帮助对任何可能对迹的物理量进行改变的机会
- 对迹状态改变给出建议的机会
  - 例如，中止，搁置或删除。

# 物理过程与步

- 每个物理过程有着下列一个或几个结合的性质。

- AtRest

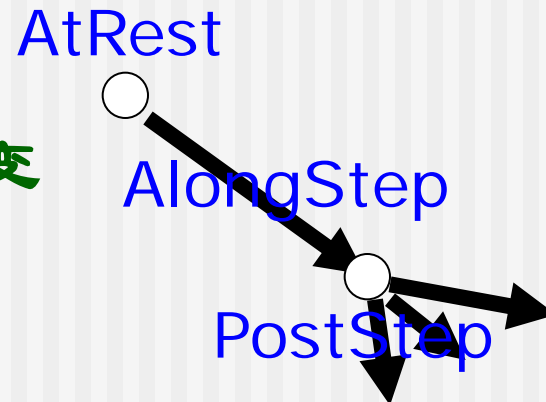
- 例如 muon 在静止时衰变

- AlongStep

- 例如 期仑科夫过程

- PostStep

- 例如 在飞行中衰变



物理过程需要指明发生在AtRest, AlongStep, 或PostStep上, 且需要给出顺序。如下面函数调用后面的3个参数分别表示这三个状态下该物理过程是否发生以及顺序:

```
pmanager->AddProcess(new G4MultipleScattering, -1, 1, 1);
```

详见ExN02PhysicsList.cc中ConstructEM()部分。

# 物理过程的顺序

- 有的物理过程的顺序很重要

如果包含这三个过程，则它们必须以如下顺序放在所有其它过程的后面

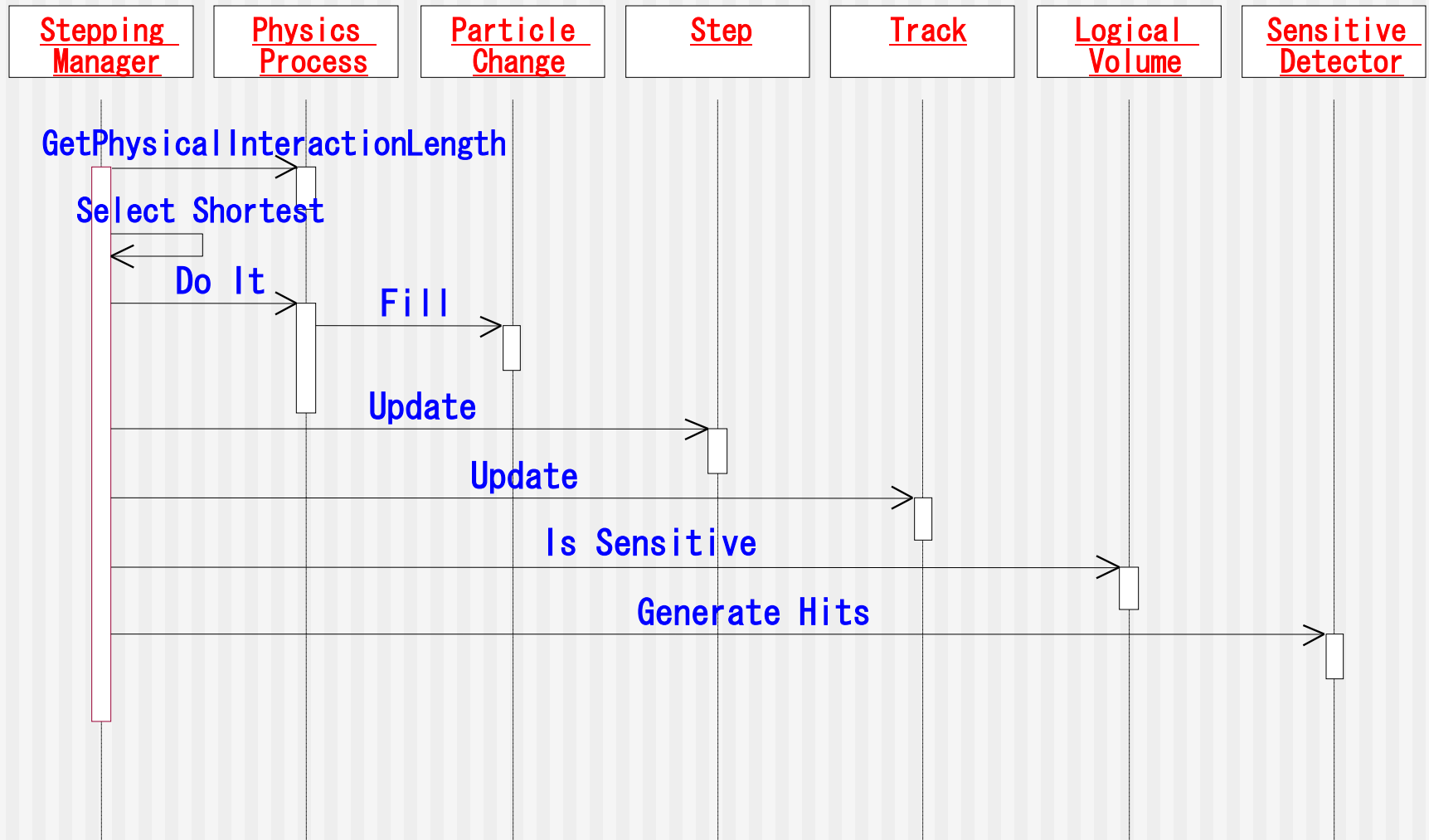
...

multiple scattering

ionization

transportation

# Geant4 是如何运行的



# Geant4 的切割点

- 在Geant4切割点指的是**产生阈**。
  - 只对于有红外发散的物理过程。
  - 不存在粒子迹的切割
- 能量阈必须确定在由代替分立值能损的连续值上
  - 过去的处理方法：
    - 跟踪原初粒子直到其达到了切割能量值，计算连续能损并赋予对应的点，然后停止跟踪原初粒子
    - 只在切割能量值上产生次级粒子，对于低能次级粒子则叠加到原初粒子的连续能损上。
  - Geant4 的处理方法：
    - 在连续能损开始那一点，指定射程（转换到每个材料对应的能量）跟踪原初粒子直到射程为零。
    - 只在给定的射程上产生次级粒子，能量低于所在物质要求射程的次级粒子，其能损叠加到原初粒子上。

# 能量切割与射程切割之比较

- 500 MeV/c 质子液态 Ar (4mm) / Pb (4mm) 取样量能器中的输运过程

- Geant3 (能量切割)

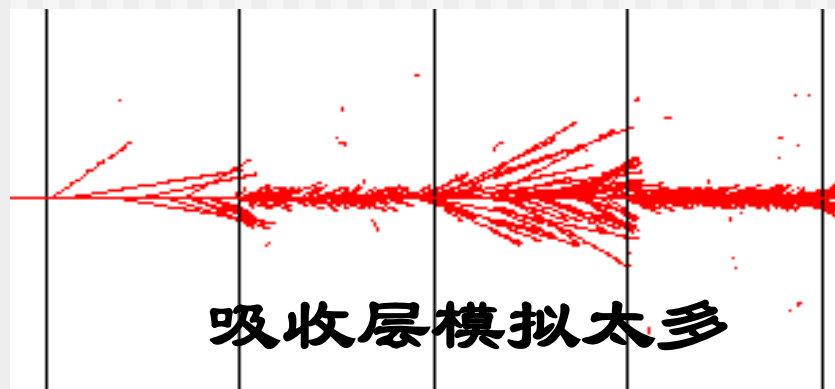
- $E_{\text{cut}} = 450 \text{ keV}$

- Geant4 (射程切割)

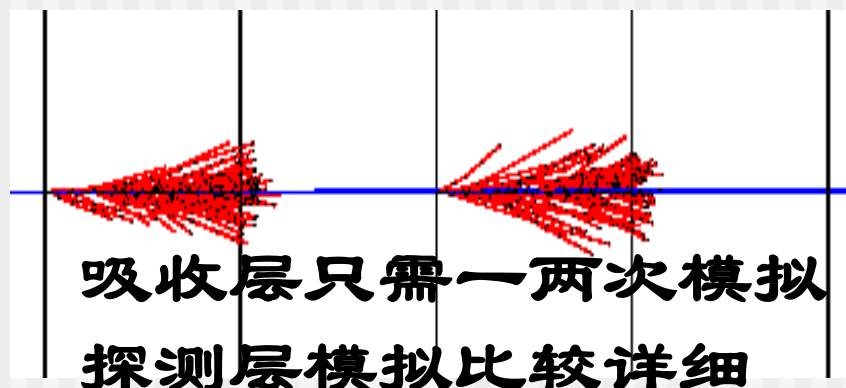
- $R_{\text{cut}} = 1.5 \text{ mm}$

- 对应于

$E_{\text{cut}}$  in liq.Ar =  
450 keV,  $E_{\text{cut}}$  in  
Pb = 2 MeV



liq.Ar Pb liq.Ar Pb





# 小结

- Geant4的中粒子的定义(6大类):  
lepton meson baryon boson shotlived ion
- Geant4的几种物理过程(7大类):  
electromagnetic  
hadronic  
decay  
    photon-lepton-hadron  
    optical  
    parameterization (fast simulation)  
    transportation
- Run/Event等基本概念

# 练习

- 1) 利用N02例子，改变入射粒子为 $e^+$ ,  $e^-$ , pion0, proton, neutron，改变粒子能量为10MeV, 100MeV, 500MeV

查看探测器中显示有什么不同。

改变探测器材料为塑料闪烁体，查看 $e^+$ ,  $e^-$ 以及 $\mu^+$ ,  $\mu^-$ 的结果

- 2) N02例子只添加了电磁作用，尝试加入hadronic作用。

- 3) water例子给出了添加切伦科夫光的方法。

首先在探测器构造中为水加上光学属性，然后在物理过程中加入切伦科夫过程。尝试读懂程序的这两部分。

(<http://hep.tsinghua.edu.cn/~yangzw/CourseDataAna/examples/Lec7.tgz>)

hints: a) 添加光学属性在RangeDetectorConstruct.cc中100-171行。

b) 在RangePhysicsList.cc中查找Cerenkov关键字

# 参考资料

---

- Geant4 User's Guide (For Application Developers)  
2.4-2.6,  
3.4-3.5,  
5.1-5.7,  
6.1-6.3
- <http://geant4.cern.ch/bin/SRM/G4GenDoc.csh?flag=1>