

探测器模拟与数据分析

--探测器模拟基础

曹国富

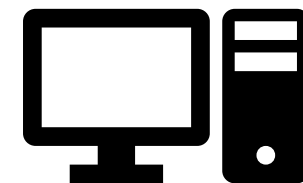
中国科学院高能物理研究所

❄ **探测器模拟原理、方法和对象 -- ~3个学时**

❄ **GEANT4模拟工具介绍和使用 -- ~8个学时**

❄ **上机演示 -- ~4个学时**

❄ 计算机基础



❄ C++

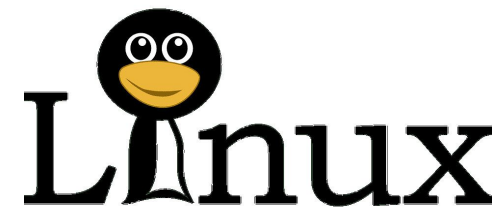
❄ Linux

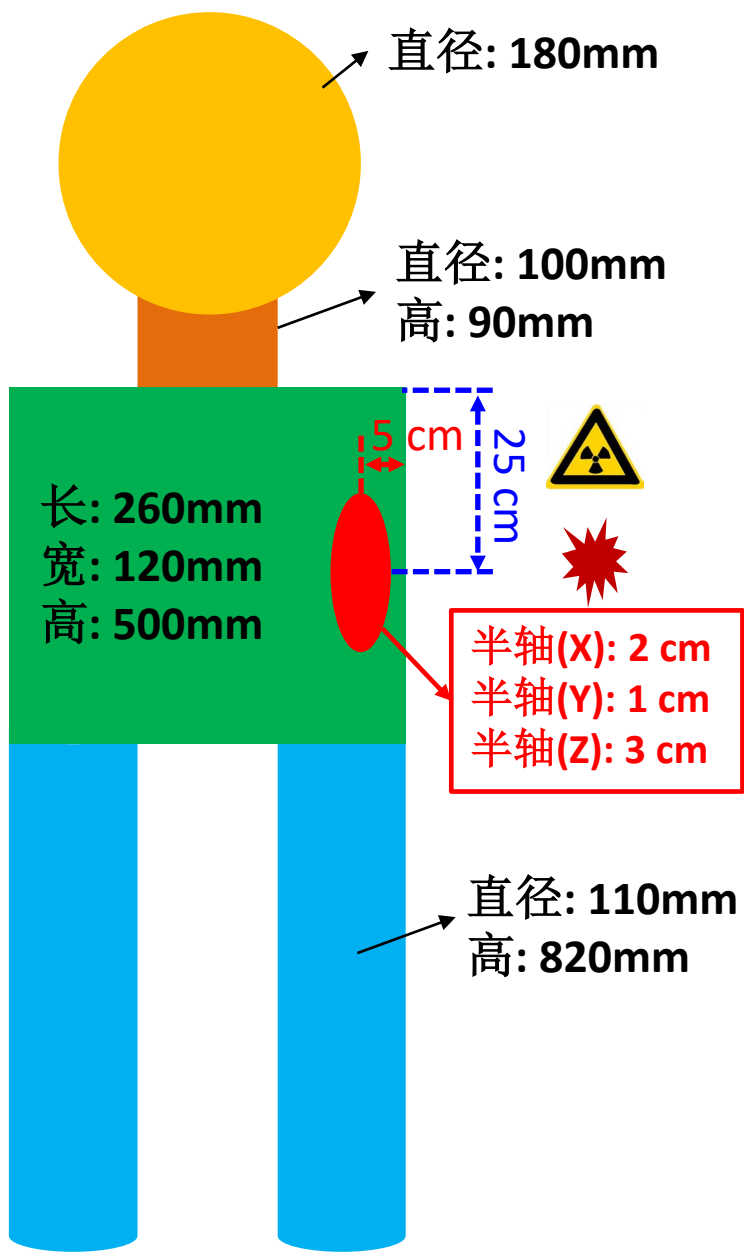


❄ 探测器基础

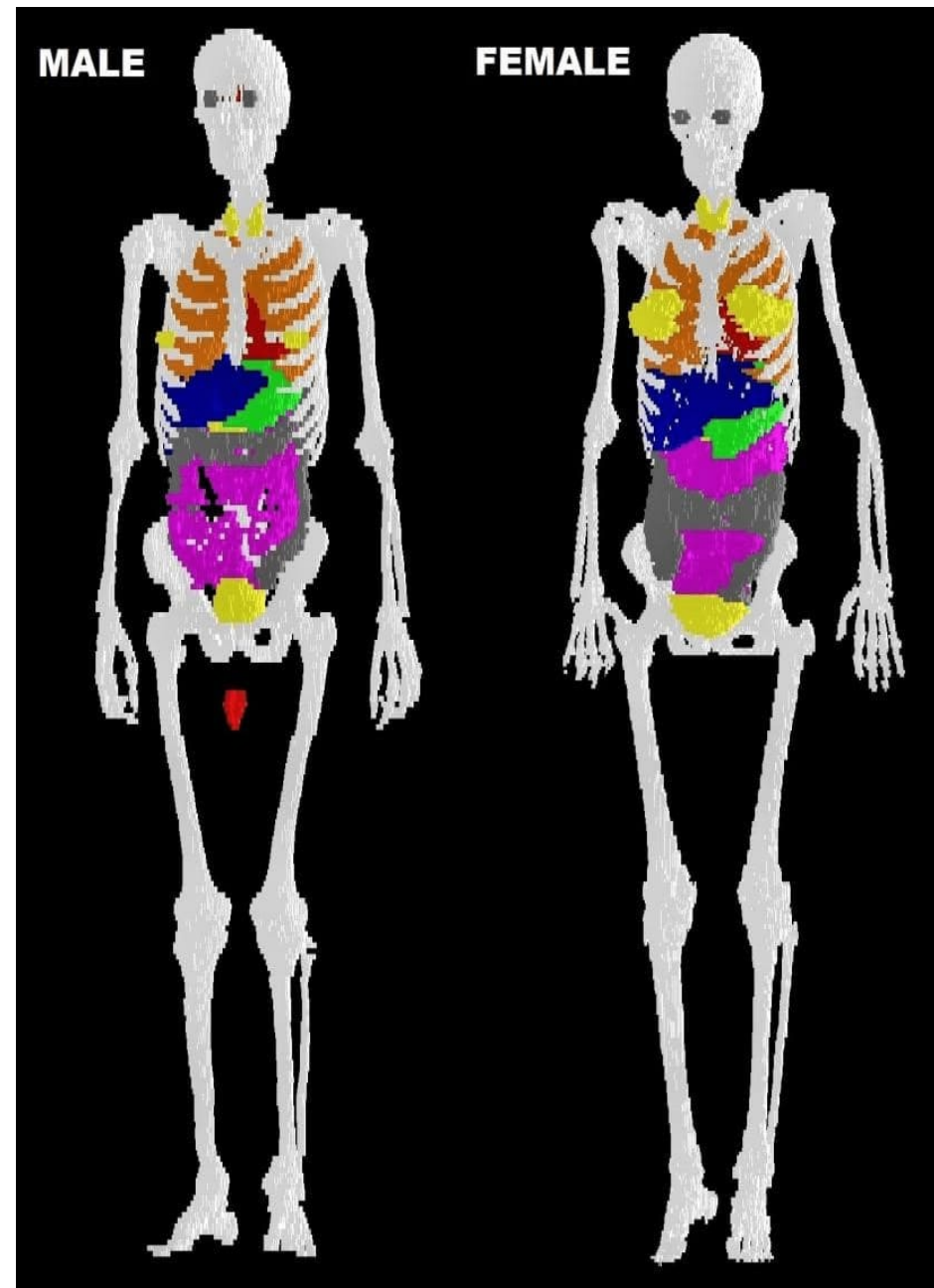
❄ ROOT基础

❄ Monte Carlo方法

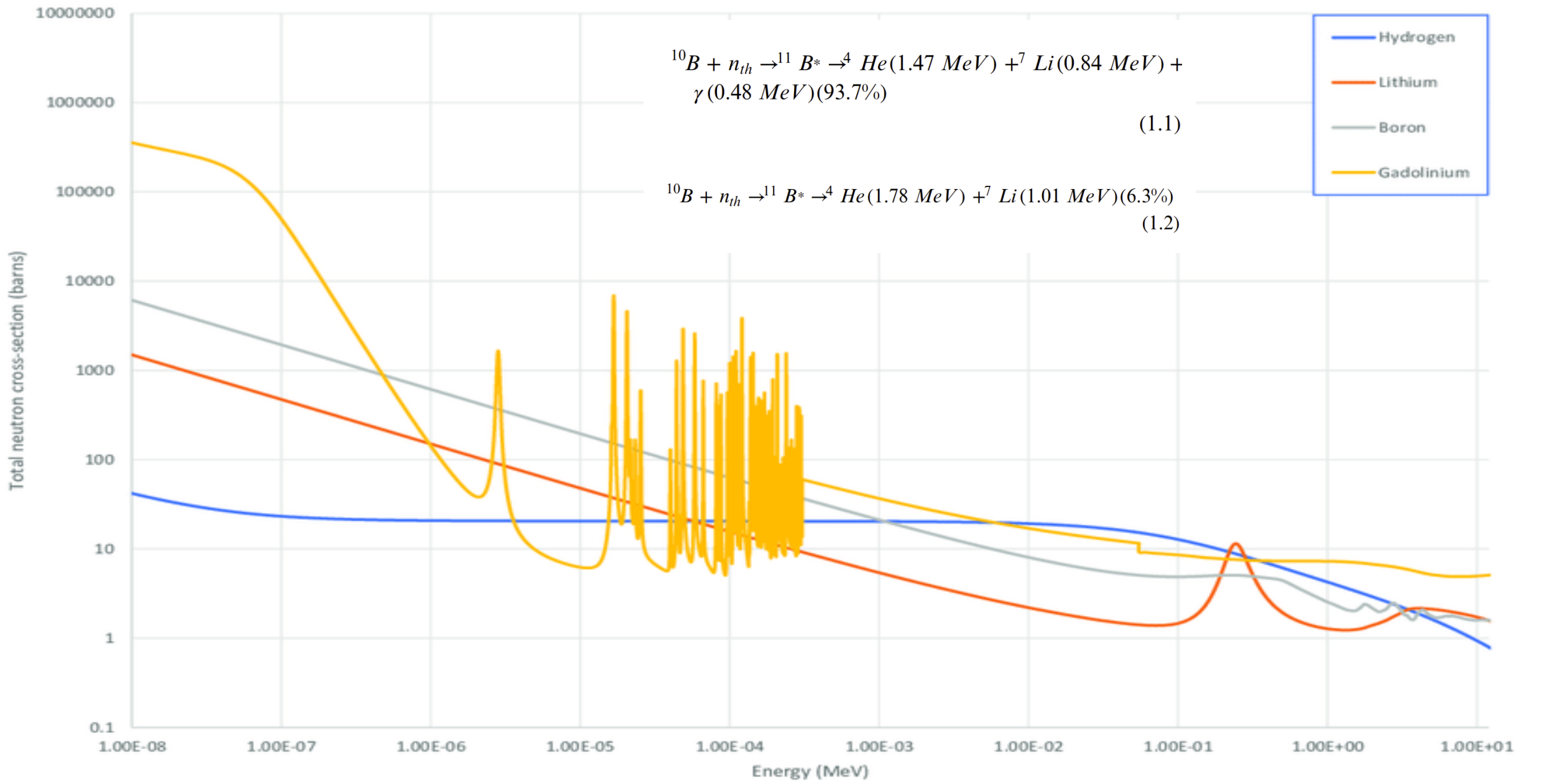


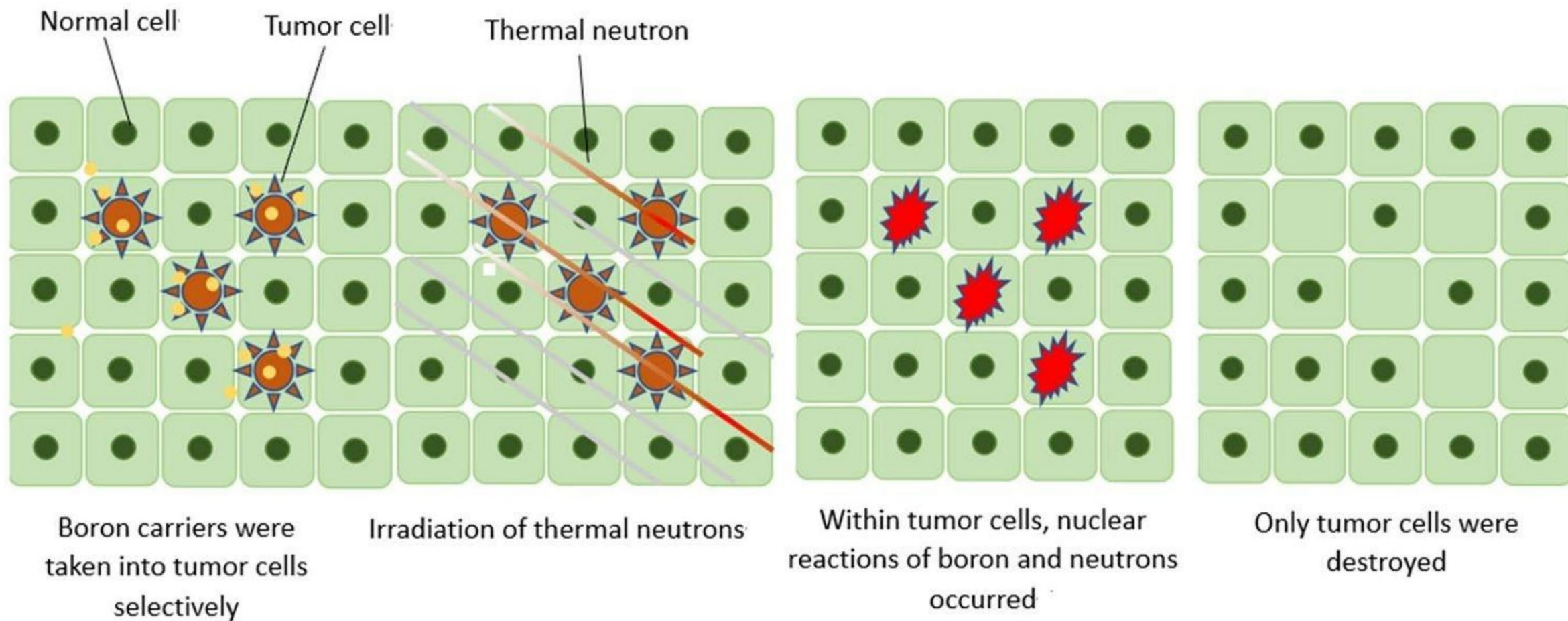


- ❖ 放疗是肿瘤治疗的一种常用手段，射线种类有伽马/质子/中子/离子等。
- ❖ 请设计并实现一个探测器模拟程序，从能量沉积的大小、尺度和位置几方面，对伽马和质子射线能量进行优化，对比使用这两种射线进行放疗的优劣。
- ❖ 硼中子俘获疗法(BNCT)是一种新的疗法，2020年全球首个BNCT设备在日本获批上市。假如使用0.5 eV的热中子束流，请研究预期治疗效果与肿瘤区内¹⁰B原子浓度的关系，以及束流截面大小的影响。最后，与其它射线的治疗效果进行对比。
- ❖ 肿瘤大小和位置如图红色区域所示。



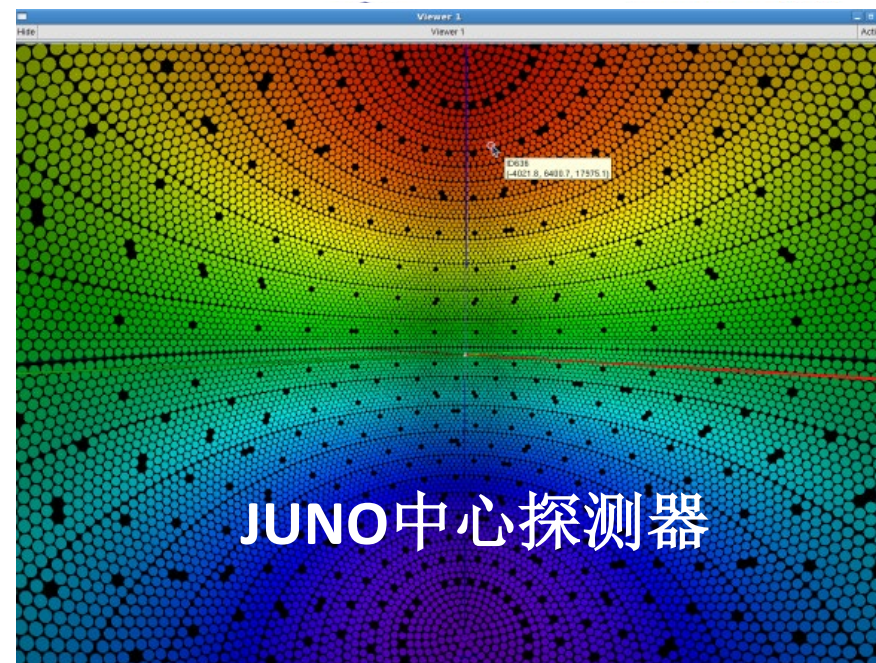
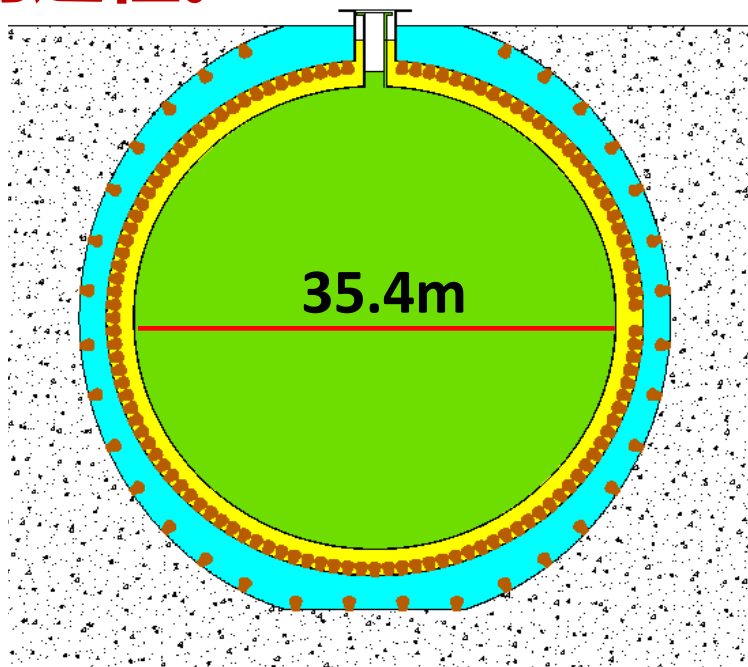
- ❄ 放疗是肿瘤治疗的一种常用手段，射线种类有伽马/质子/中子/离子等。
- ❄ 请设计并实现一个探测器模拟程序，从能量沉积的大小、尺度和位置几方面，对伽马和质子射线能量进行优化，对比使用这两种射线进行放疗的优劣。
- ❄ 硼中子俘获疗法(BNCT)是一种新的疗法，2020年全球首个BNCT设备在日本获批上市。假如使用0.5 eV的热中子束流，请研究预期治疗效果与肿瘤区内 ^{10}B 原子浓度的关系，以及束流截面大小的影响。最后，与其它射线的治疗效果进行对比。
- ❄ 肿瘤大小和位置如图红色区域所示。





探测器模拟原理、方法和对象

- ❄ 探测器模拟是把一个**真实探测器**或一个**假想探测器**在**计算机中实现**的过程。



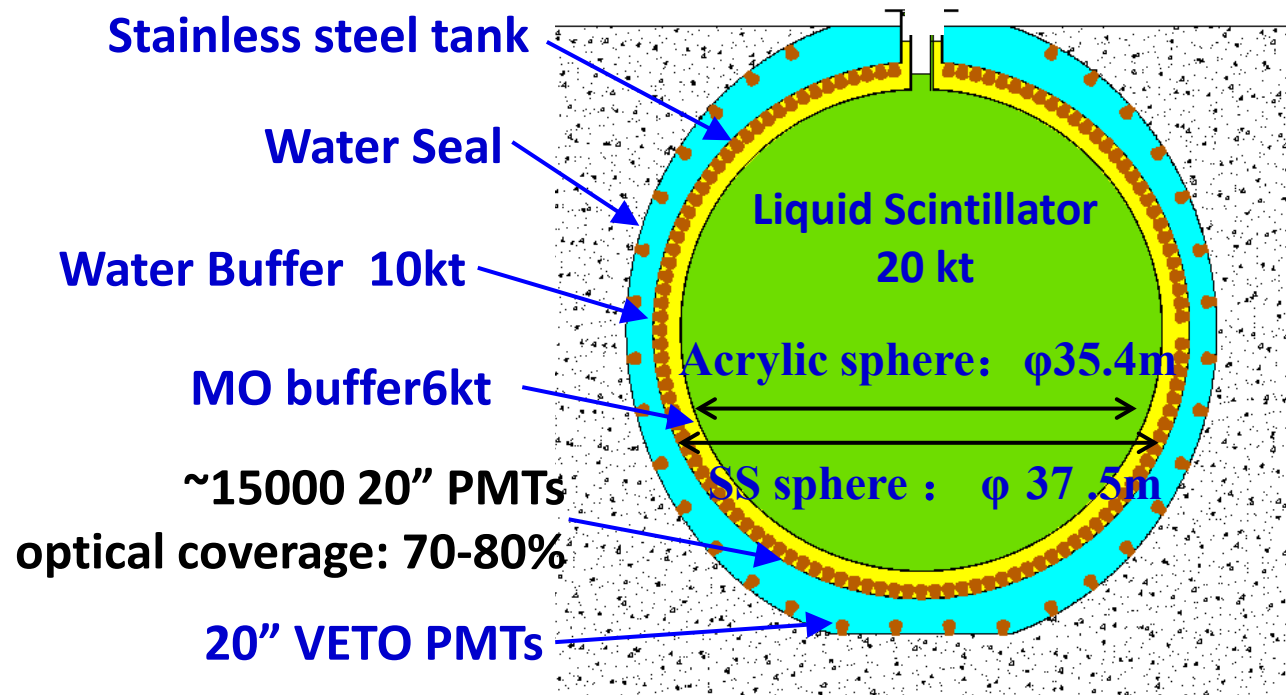
- ❄ 探测器模拟是虚拟实验，已有理论、模型、经验和实验数据是探测器模拟的基础。
- ❄ 粒子与物质相互作用是探测器模拟的核心。
- ❄ 深刻理解探测器是做好探测器模拟的关键。

- ❄ **模拟是工具、手段、方法。**
- ❄ **模拟无法替代实验，更无法替代理论。**
- ❄ **模拟结果具有指导性，是高能物理等实验中不可或缺的一个环节。**
- ❄ **高精度的模拟结果在某些领域是必需的。**
- ❄ **实验是检验模拟正确性的唯一标准。**

❄ 探测器R&D阶段

- 从物理上比较探测器不同设计方案优劣的重要手段
- 确定探测器的各项设计参数的重要途径
- 研究探测器的预期性能指标

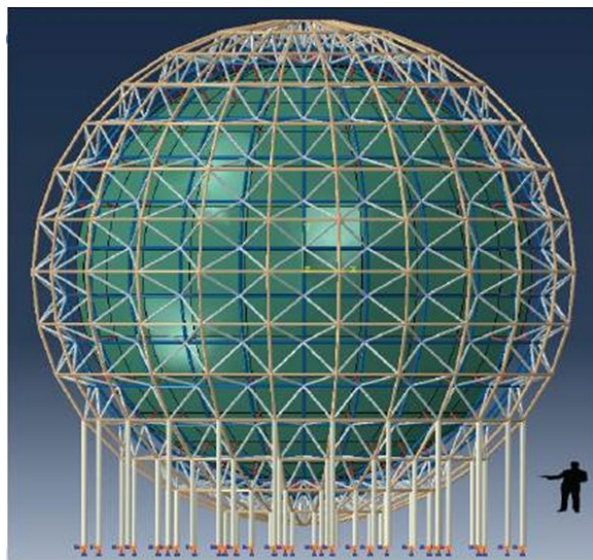
江门中微子实验(JUNO)探测器概念图



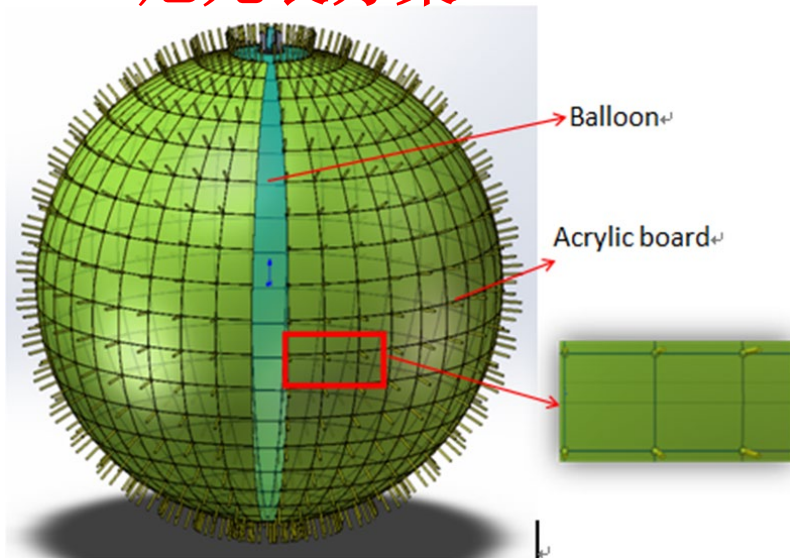
主要物理目标：
确定中微子质量等级

探测器主要性能指标：
能量分辨率 $< 3\%/\sqrt{E}$ ，
这对应于1MeV能量沉积
产生1200个光电子。

有机玻璃球方案



尼龙袋方案



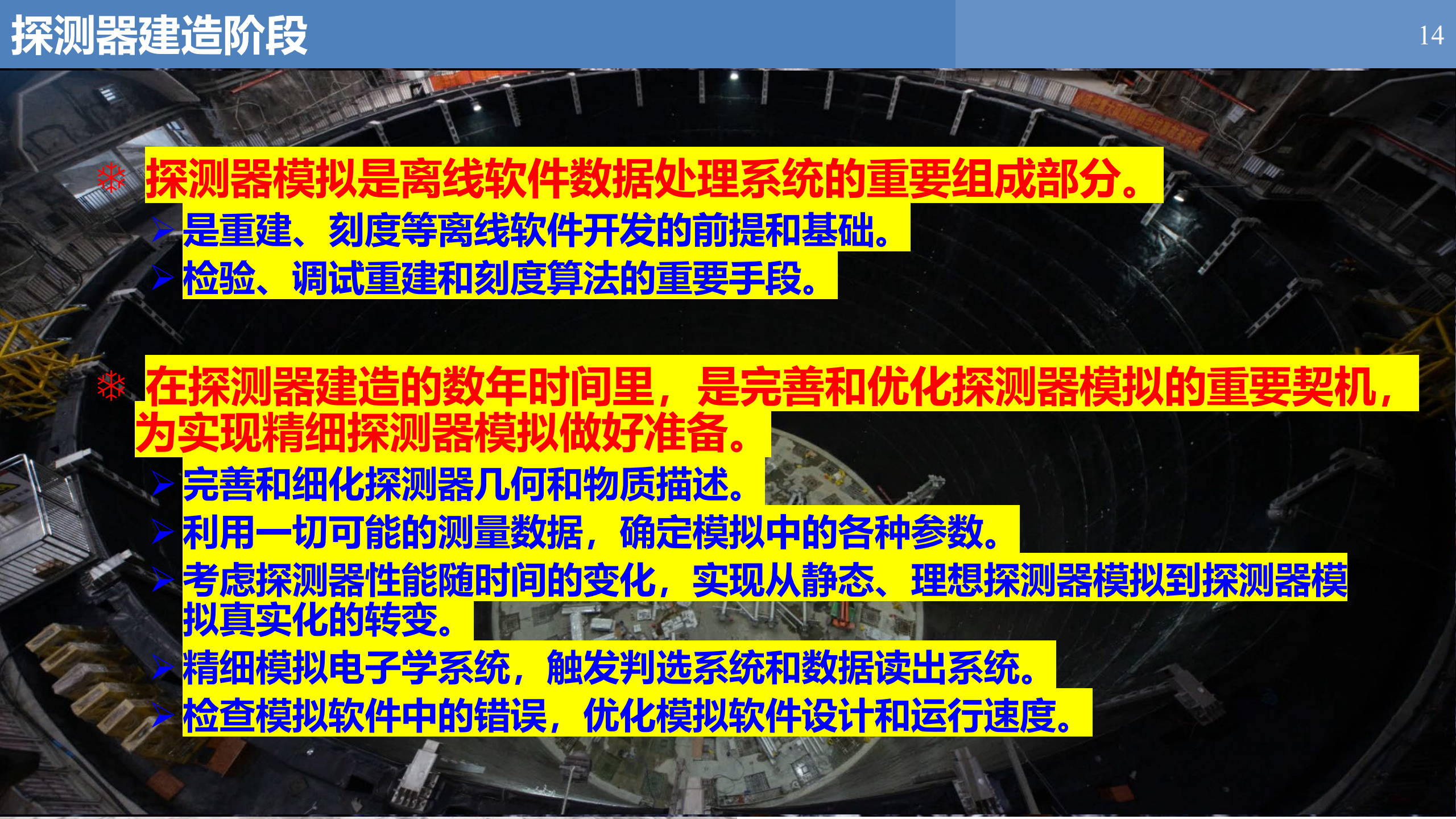
选哪个好那?

探测器模拟结果显示:

1. 有机玻璃球方案的能量分辨率稍差。
2. 尼龙袋方案的本底略高。

最后，综合考虑模拟结果，机械设计和实验风险等因素，选择了有机玻璃球方案。

- ❄ **满足物理目标是探测器性能指标确定的基本要求。**
- ❄ **达到探测器性能指标是设计探测器各项参数的前提。**
- ❄ **以JUNO为例，通过探测器模拟确定了很多探测器设计参数：**
 - 液闪衰减长度
 - 液闪光产额
 - PMT覆盖率
 - PMT探测效率
 - 水屏蔽层的厚度
 -
- ❄ **所有设计参数的确定必须综合考虑模拟结果，机械设计，成本，风险等因素。**

- 
- ❄ **探测器模拟是离线软件数据处理系统的重要组成部分。**
 - 是重建、刻度等离线软件开发的前提和基础。
 - 检验、调试重建和刻度算法的重要手段。
 - ❄ **在探测器建造的数年时间里，是完善和优化探测器模拟的重要契机，为实现精细探测器模拟做好准备。**
 - 完善和细化探测器几何和物质描述。
 - 利用一切可能的测量数据，确定模拟中的各种参数。
 - 考虑探测器性能随时间的变化，实现从静态、理想探测器模拟到探测器模拟真实化的转变。
 - 精细模拟电子学系统，触发判选系统和数据读出系统。
 - 检查模拟软件中的错误，优化模拟软件设计和运行速度。

- ❄ **模拟调节 (MC tuning), 目的是减少模拟与数据间的差别。**
 - **模拟调节 \leftrightarrow 模拟与数据对比**
- ❄ **借助探测器模拟理解探测器响应。**
- ❄ **在实验数据分析中, 模拟在事例选择条件优化, 本底分析, 绝对探测效率确定和变量形状描述等方面起着关键性作用。**
- ❄ **探测器模拟在物理成果的发现中扮演者非常重要的角色。**



信号：黄瓜

本底：其它蔬菜、水果

通过模拟研究信号事例和本底事例的特征。

a) 绿色

b) 细长

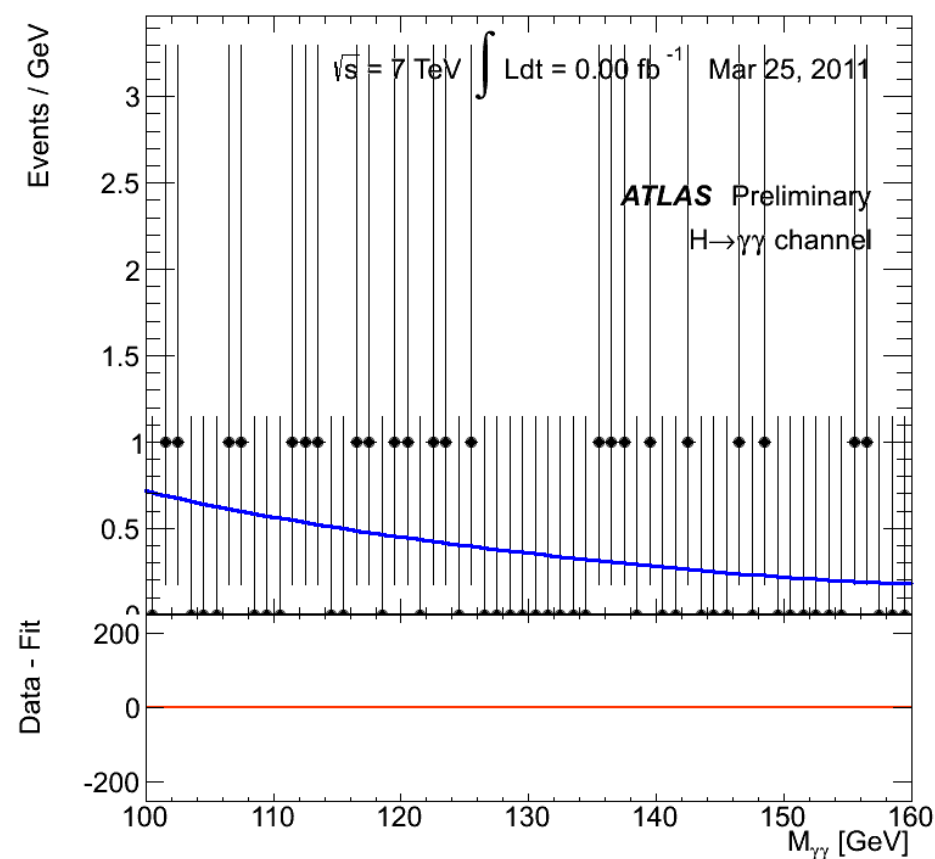
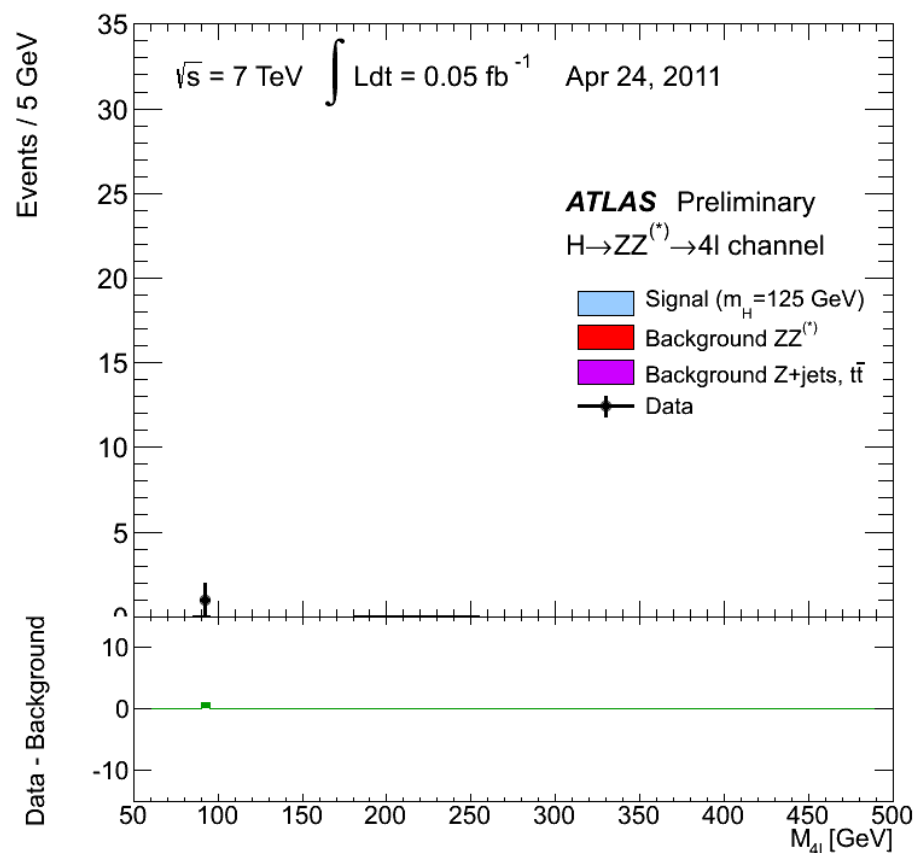
c) 瓜皮较厚

d) 表皮有刺

通过以上选择条件优化以后，黄瓜(信号)+
少量丝瓜(本底)

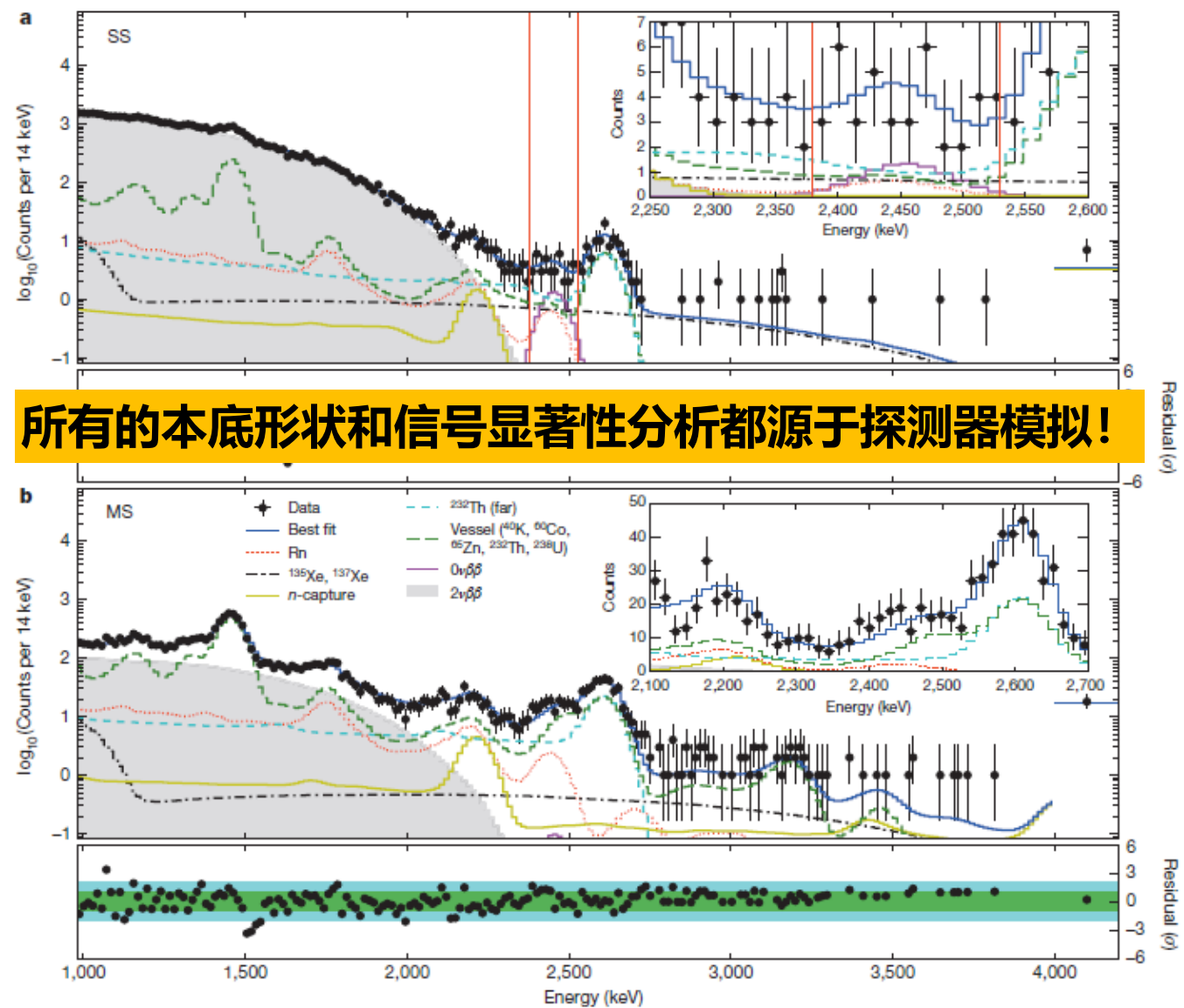
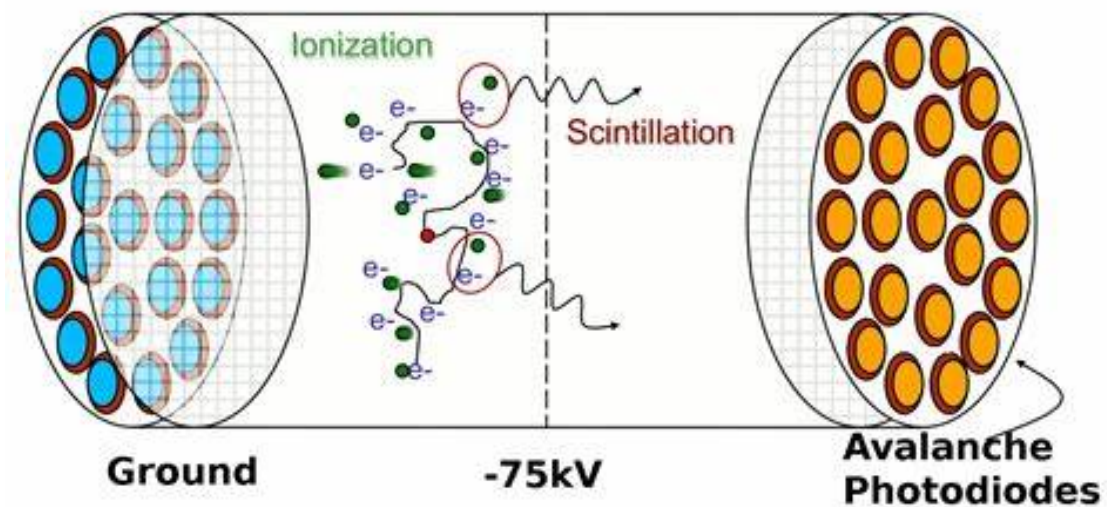
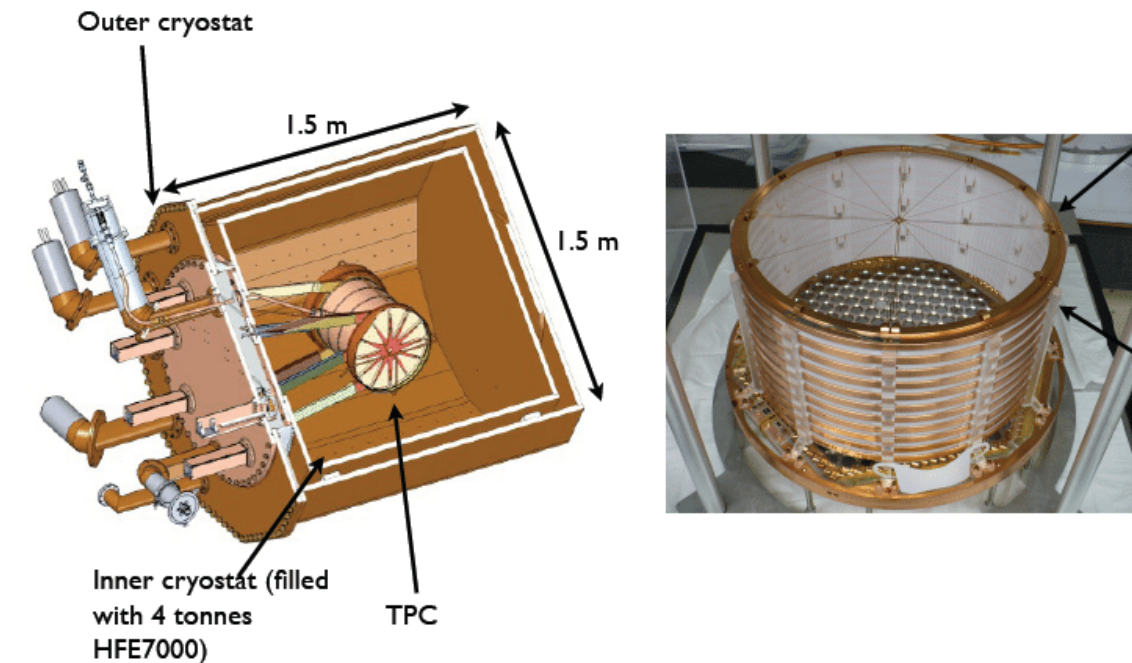
通过模拟纯信号事例，得到选择效率。

通过模拟本底事例，分析通过选择条件的本底成分。



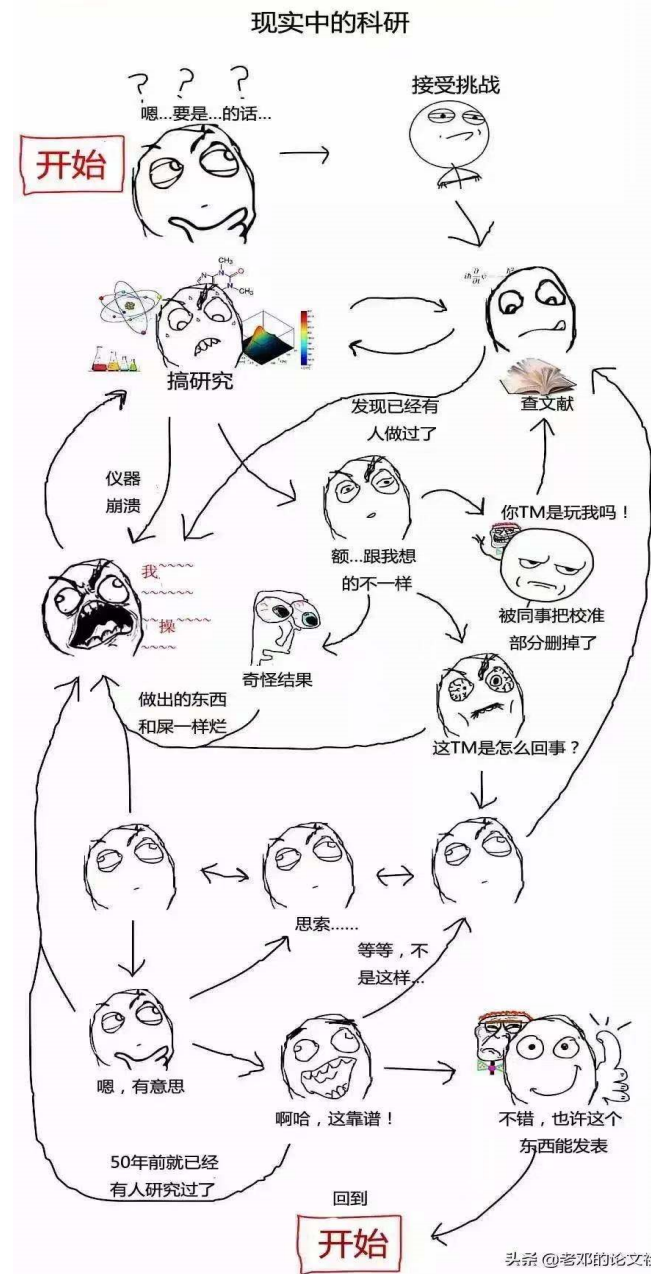
探测器模拟用于确定Higgs衰变到 $\gamma\gamma$ 末态的不变质量谱形状。

探测器模拟用于分析Higg寻找中的本底。



所有的本底形状和信号显著性分析都源于探测器模拟!

所以，模拟会助力你的科研工作



努力做个“三好”学生：

好好听课，好好练习，好好交作业！

❄ 一个完整的探测器模拟系统通常包括以下几部分：

- **事例产生子**：产生进入探测器的粒子。
- **物质与几何**：构建探测器的几何结构。
- **粒子与物质相互作用**：粒子在探测器中的传输和反应过程。
- **电子学系统模拟**：实现各种物理量到电信号的转换，模拟电子学系统的响应。
- **触发判选系统模拟**：以电子学系统的输出为输入，模拟触发判选系统的触发逻辑，触发算法等。
- **数据读出系统模拟**：实现数据从电子学系统输出后的事例组装，数据存盘等过程。

基于模拟工具完成, 如Pythia, GEANT4, FLUKA等

一般由用户自己开发

❄ 除以上部分，通常探测器模拟系统还具备以下功能：

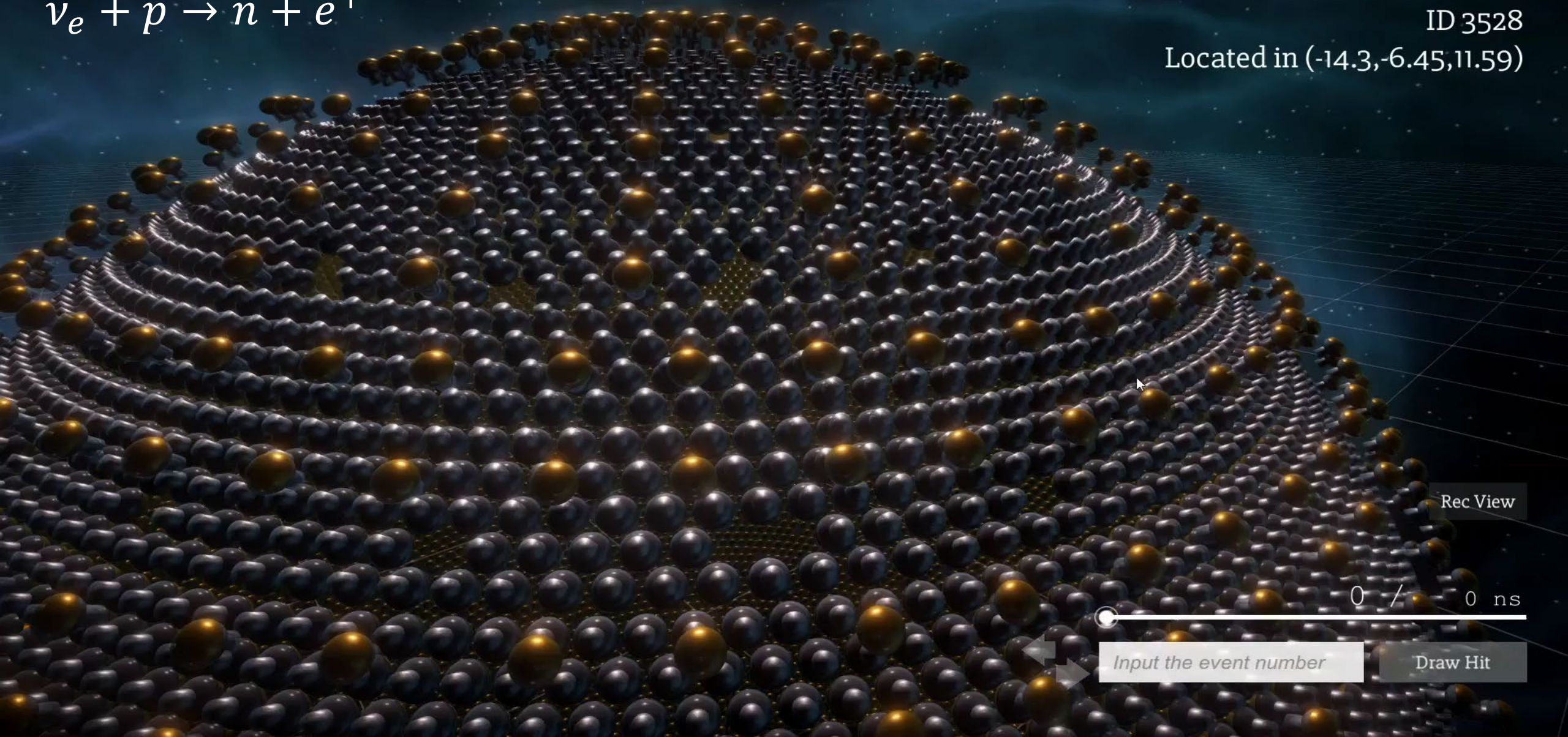
- 图形显示
- 信息获取
- 模拟控制与干预
-

$$\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$$

PMT

ID 3528

Located in (-14.3,-6.45,11.59)



Rec View

0 / 0 ns

Draw Hit



❄ 事例产生子用于产生每个物理事例的原初粒子，并给出这些原初粒子的衰变模式和末态。

❄ 事例产生子的输出是探测器模拟的输入，通常

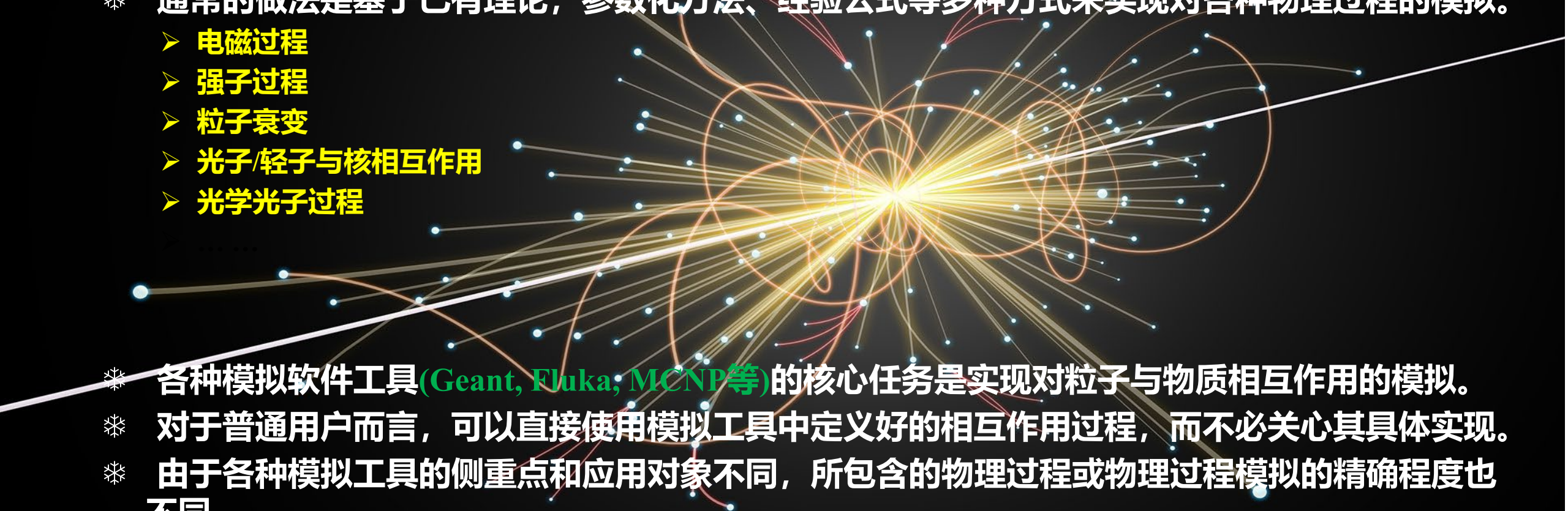
- 探测器模拟工具，如GEANT4等，都已定义好和事例产生子间的接口。
- 模拟工具本身会提供一些简单的事例产生子，如GEANT4中的粒子枪等。

❄ 更多有关事例产生子的细节，请参考平荣刚老师的课件。

- ❄ **原则上，模拟中所构建的探测器几何和物质与真实探测器一致性越高，模拟结果越精确。**
 - 在保证模拟精度的同时，也要保证模拟具备良好的计算性能。
 - 仔细构建灵敏探测器的几何和物质，对模拟结果影响小的复杂探测器区域通常采用等效的处理方法，如前端电子学，电缆，死区等。

- ❄ **探测器模拟工具(GEANT4, FLUKA等)提供基本的几何、物质及其属性、光学界面的定义方法。**
 - **几何**：形状，尺寸，位置，转动，几何间逻辑关系，物质设定，电磁场设置和灵敏探测器定义等。
 - **物质**(分子、化合物和混合物)由**元素**组成，元素由其各种**同位素**组成。
 - **物质属性**：密度，状态(气体/液体/固体)，光学属性(折射率，吸收长度，散射长度，光产额，发光时间等)，温度和压力等。
 - **光学界面**：定义光学光子在该界面上的反射，吸收等过程。

- ❖ **粒子与物质相互作用过程是探测器模拟的核心。**
- ❖ 开发一种通用的物理模型来描述不同粒子、不同能量区间的物理过程是不现实的。
- ❖ 通常的做法是基于已有理论，参数化方法、经验公式等多种方式来实现对各种物理过程的模拟。
 - 电磁过程
 - 强子过程
 - 粒子衰变
 - 光子/轻子与核相互作用
 - 光学光子过程
- ❖ 各种模拟软件工具(Geant, Fluka; MCNP等)的核心任务是实现对粒子与物质相互作用的模拟。
- ❖ 对于普通用户而言，可以直接使用模拟工具中定义好的相互作用过程，而不必关心其具体实现。
- ❖ 由于各种模拟工具的侧重点和应用对象不同，所包含的物理过程或物理过程模拟的精确程度也不同。
- ❖ 蒙特卡罗方法是关键！



❄ 几种常用的物理相互作用

➤ 不稳定粒子

- 飞行中衰变

➤ 光子

- 光电效应
- 康普顿散射
- 对产生

➤ 带电粒子

- 电离过程
- 多次散射
- 强相互作用

❄ 几种常用的物理相互作用

➤ 不稳定粒子

- 飞行中衰变

➤ 光子

- 光电效应
- 康普顿散射
- 对产生

➤ 带电粒子

- 电离过程
- 多次散射
- 强相互作用

Unstable particle

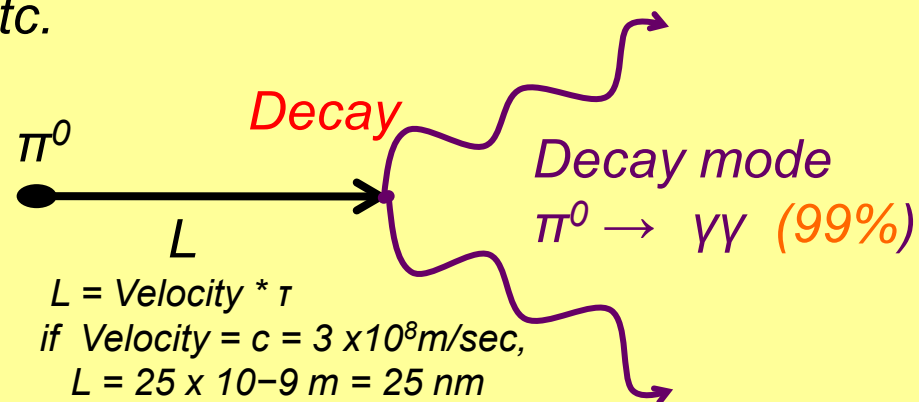
Decay in flight

Life time τ , for example,

$$\pi^0 \quad \tau = 8.4 \times 10^{-17} \text{ sec.}$$

$$\mu \quad \tau = 2.2 \times 10^{-6} \text{ sec.}$$

etc.



$$L = \text{Velocity} * \tau$$

$$\text{if Velocity} = c = 3 \times 10^8 \text{ m/sec,}$$

$$L = 25 \times 10^{-9} \text{ m} = 25 \text{ nm}$$

The other decay mode

$$\pi^0 \rightarrow e^+e^-\gamma \text{ (1\%)}$$

Branching ratio

❄ 几种常用的物理相互作用

➤ 不稳定粒子

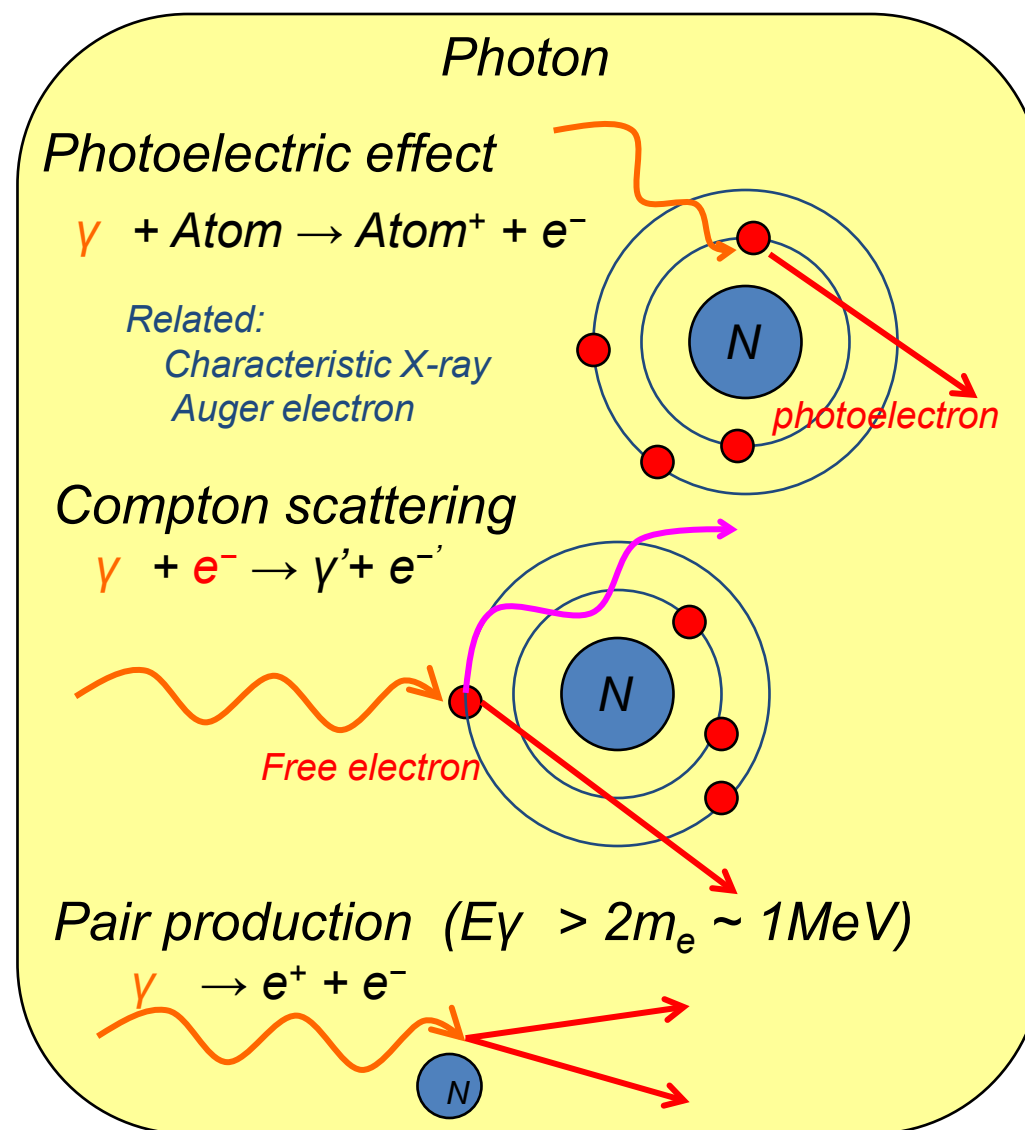
- 飞行中衰变

➤ 光子

- 光电效应
- 康普顿散射
- 对产生

➤ 带电粒子

- 电离过程
- 多次散射
- 强相互作用



❄ 几种常用的物理相互作用

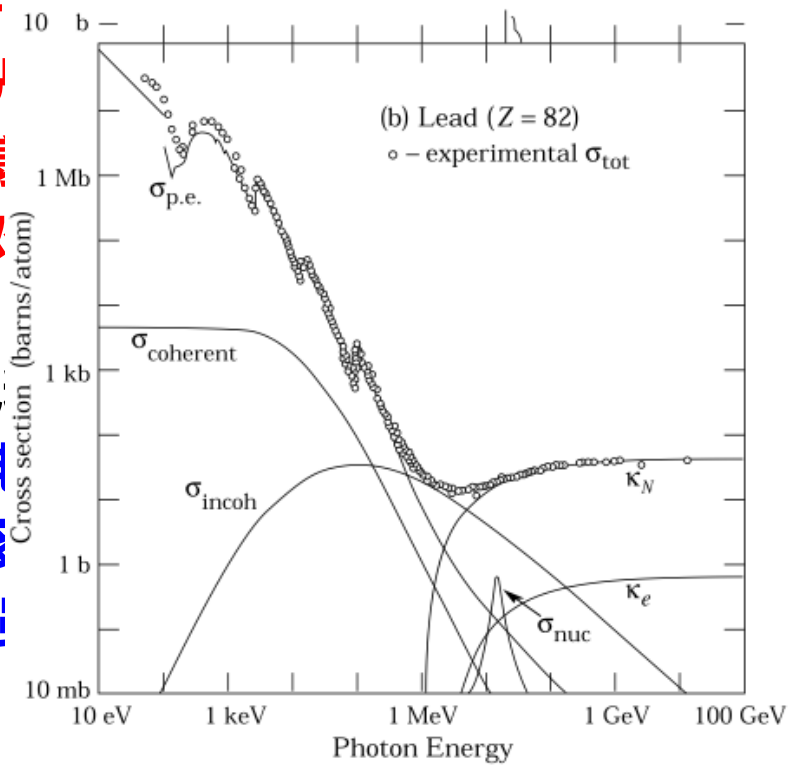
- 不稳定粒子
 - 飞行中衰变

➤ 光子

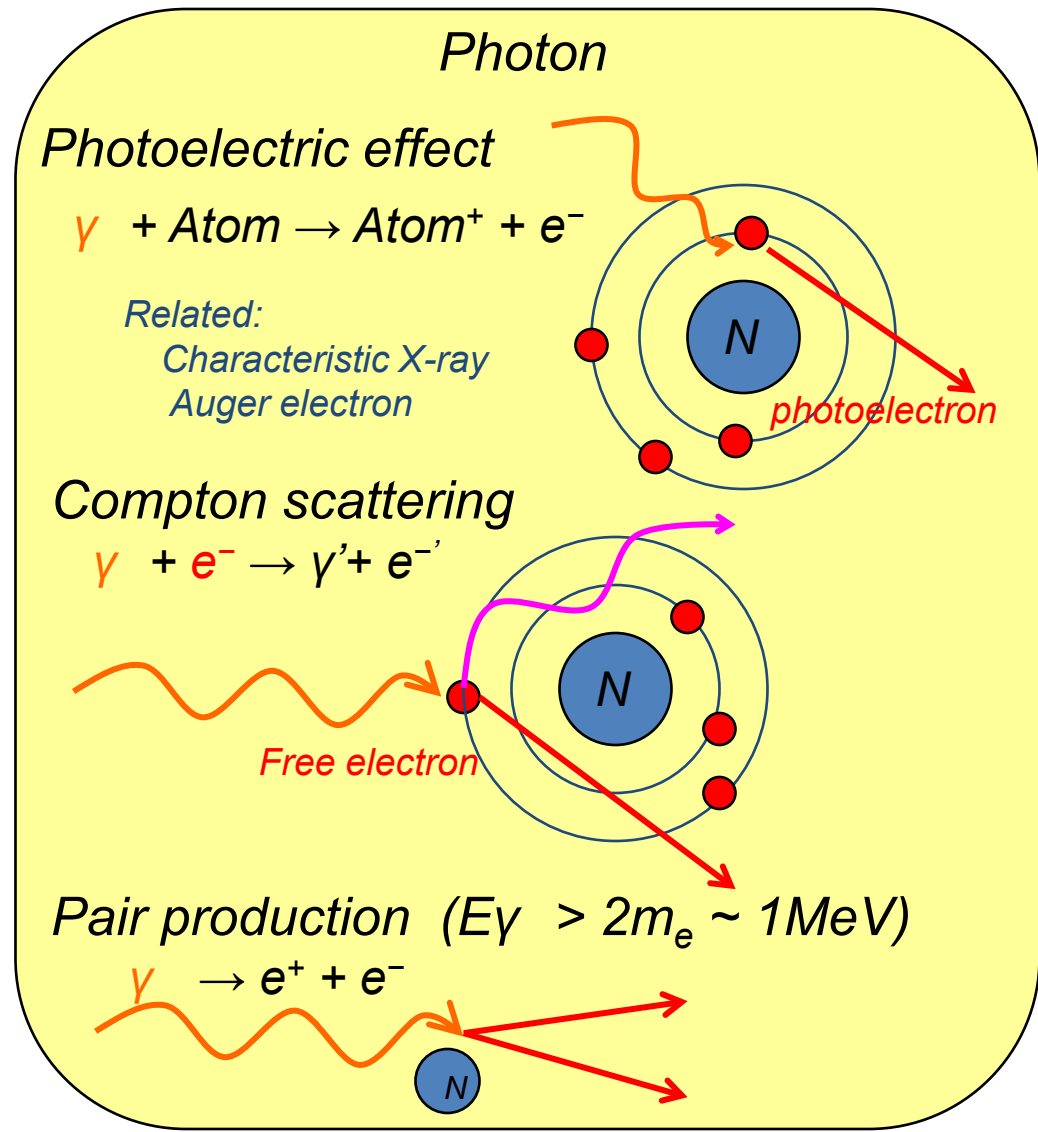
- 不带电
- 静止质量为零
- 以光速运动
- 能量与频率成正比
- 动量与波长成反比

➤ 带电粒子

- 有静止质量
- 速度小于光速
- 能量与速度有关
- 动量与速度有关



Photon Energy



❄ 几种常用的物理相互作用

➤ 不稳定粒子

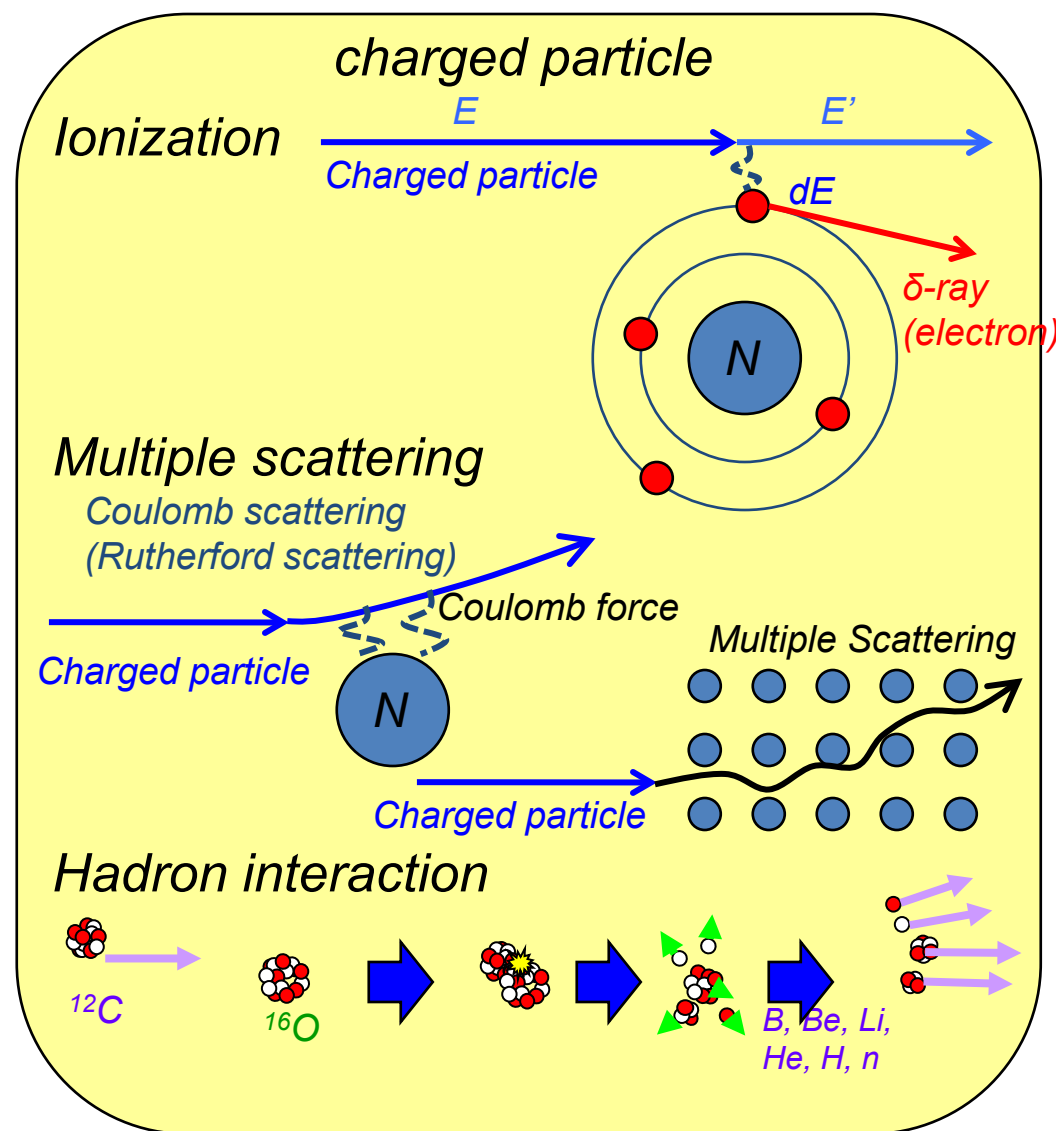
- 飞行中衰变

➤ 光子

- 光电效应
- 康普顿散射
- 对产生

➤ 带电粒子

- 电离过程
- 多次散射
- 强相互作用



❄ 指数定律 (The exponential law)

$P(x)$: 在 x 距离内没有发生相互作用的几率。

ωdx : 在 x 和 $x+dx$ 内发生相互作用的几率。

其中, $\omega = N \times \sigma$, N : 单位体积内靶粒子数; σ : 相互作用截面。

$$P(x + dx) = P(x)(1 - \omega dx)$$

dx 内没有相互作用的几率
 x 距离内不发生相互作用的几率

两边积分后, 得到:

$P(x) = \exp(-\omega x)$, 概率分布函数是指数分布。

- ❄ 基于上一页的讨论，在 $[x, x+dx]$ 内发生相互作用的几率 $P_{int}(x)$ ，可以表示为：

$$P_{int}(x)dx = P(x)\omega dx \quad P_{int}(x): \text{概率密度函数(Probability Density Function, PDF)}$$

- ❄ 累积分布函数(The cumulative distribution function, CDF)为：

$$\begin{aligned} \int P_{int}(x)dx &= \int P(x)\omega dx = \int \omega \exp(-\omega x)dx \\ &= 1 - \exp(-\omega x) \end{aligned}$$

- ❄ 连续并严格递增的累积分布函数是 $[0, 1]$ 的均匀分布。

- ❄ 采用逆变换的方法产生一个相互作用，

$$\eta = 1 - \exp(-\omega x) \quad \eta \text{是} 0 \text{到} 1 \text{之间的均匀分布。}$$

$$x = -\ln(1 - \eta)/\omega$$

$$x = -\ln(1 - \eta)/\omega$$

x是长度、距离，其依赖于物质。因此，对**x**的抽样过程同样依赖于物质。

通过如下变换，可使抽样过程与物质无关。

$$x\omega = -\ln(1 - \eta)$$

引入平均自由程(mean free path) -- λ ，并定义为：

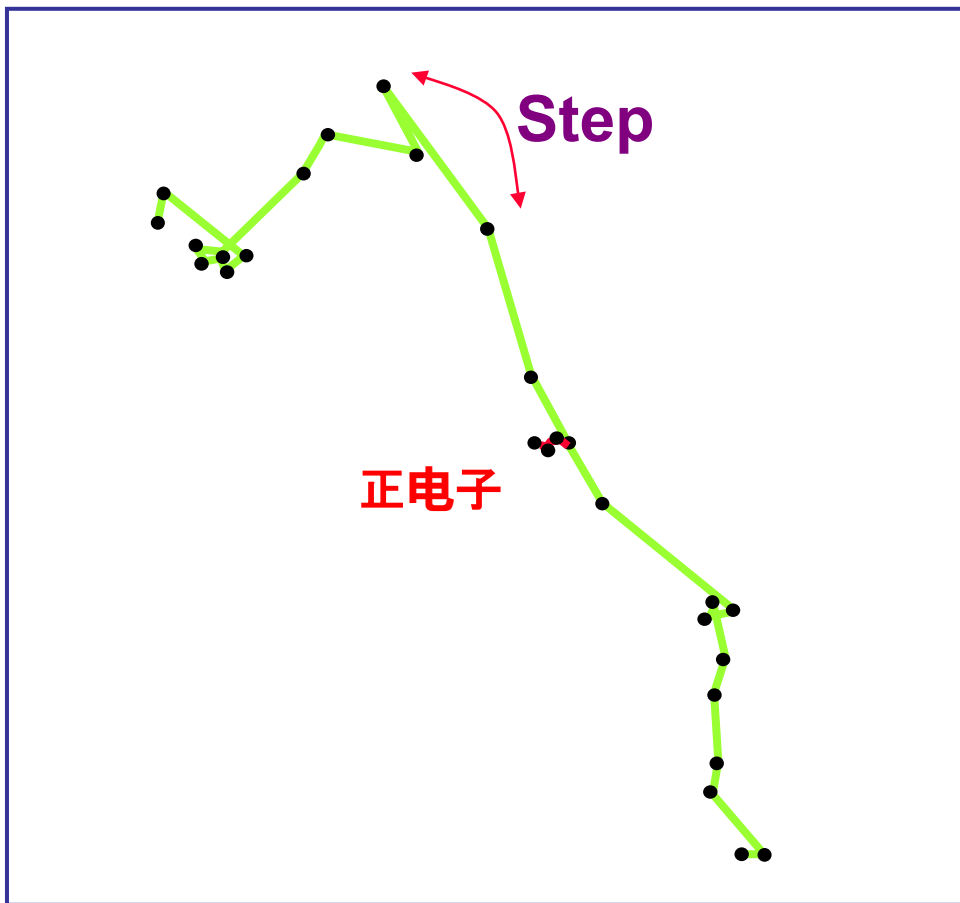
$$\lambda = \int xP(x)dx / \int P(x)dx = 1/\omega$$

抽样过程以 λ 为单位，并不依赖于物质。

$$x/\lambda = -\ln(1 - \eta)$$

x/λ: 平均自由程数 (Number of Mean Free Path, NMFP)

粒子在物质中的运输过程是一步一步进行模拟的，一步为一个step。



8MeV正电子在水中的湮灭过程

如何确定每一步的步长？

1. 在每个step的开始，对该粒子每一物理过程的NMFP进行抽样，这一抽样过程不依赖于物质。

例如：正电子具有下面的物理过程，对每一过程都应用指数定律进行抽样，分别得到NMFP：

Bremsstrahlung

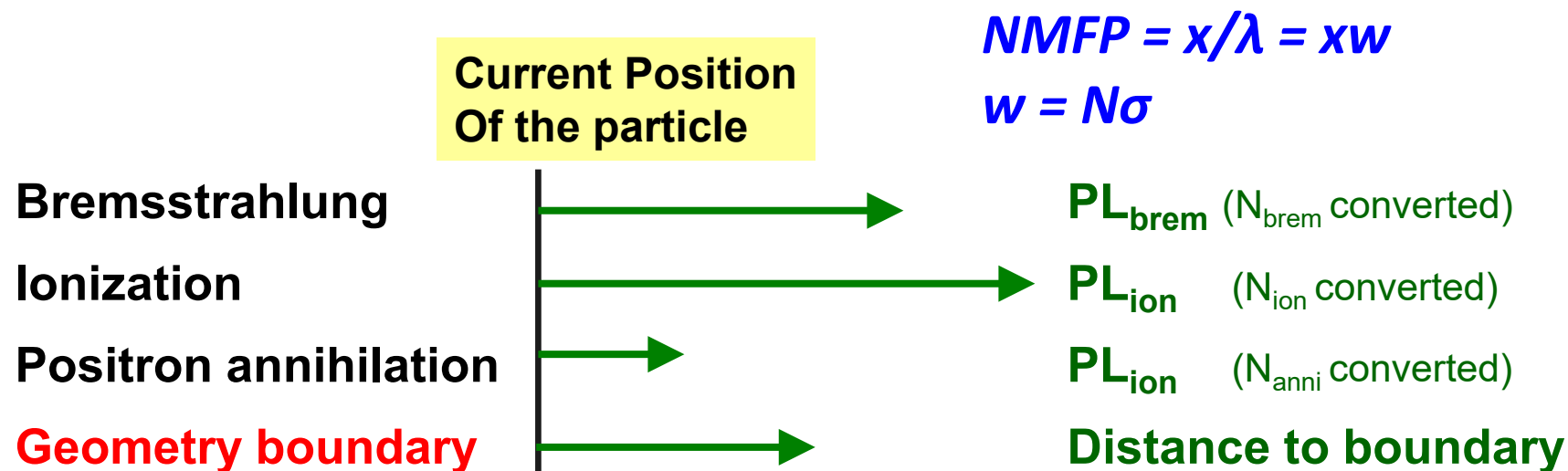
$$\text{NMFP} = N_{\text{brem}}$$

Ionization

$$\text{NMFP} = N_{\text{ion}}$$

Positron annihilation $\text{NMFP} = N_{\text{anni}}$

2. 利用粒子与物质的相互作用截面，将NMFP转换为相互作用长度 (physical length, PL)。



3. 具有最小长度的物理过程或几何边界决定当前step的长度。

- 在上例中，step长度由正电子湮灭这一过程决定。

4. 完成该粒子在这一step的运输模拟。

5. 如果在完成相互作用以后，该粒子仍然处于存活状态，那么对所有的NMFPs重新做抽样，进行下一个step的模拟。

6. 如果在完成相互作用以后，该粒子消失，那么该粒子模拟结束

❄ 粒子衰变过程

- 具有寿命 τ 的粒子衰变概率密度函数:

$$f(t) = \frac{1}{\tau} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad t \geq 0 \quad \Rightarrow \quad f(x) = \frac{1}{v\tau} \exp\left(-\frac{x}{v\tau}\right)$$

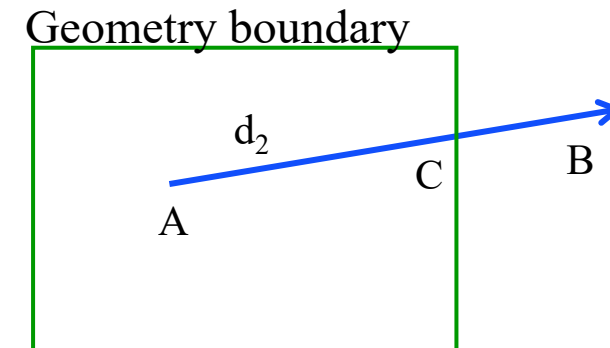
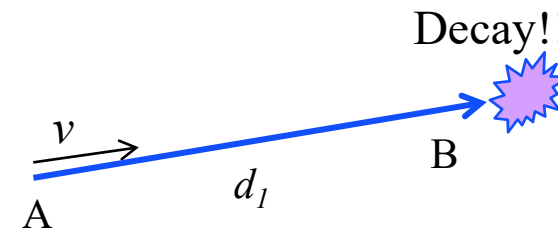
τ is the mean life of the particle

v is the velocity of the particle

$$W = 1/(v\tau)$$

(non relativistic)

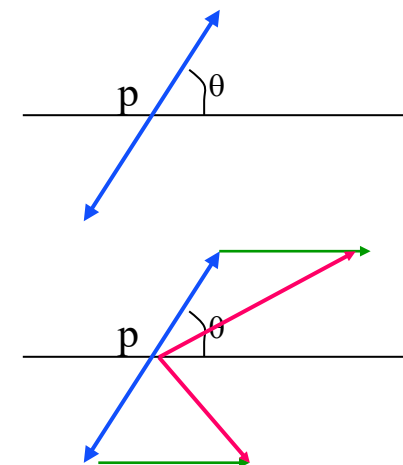
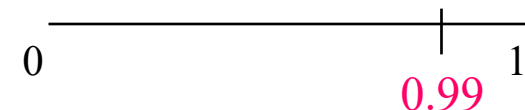
- 抽样**NMFP**, $x = -\ln(1 - \eta) \cdot v\tau$
- 衰变前运动距离, $x = AB = d_1$
- 粒子处于A位置, 计算AC距离 d_2 。
- Step长度取决于 $\min(d_1, d_2)$ 。
- 如果 $B < C$, 粒子发生衰变。
如果 $B > C$, 不做任何事情, 但计算A到C的飞行时间。



❄ 粒子衰变过程

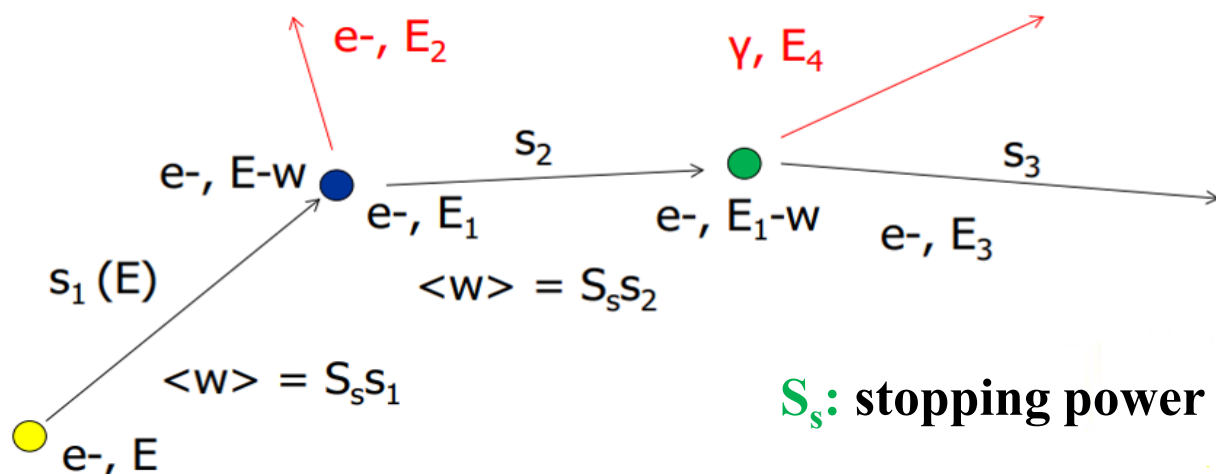
- 当粒子发生衰变。
例如, $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ (~99%)
 $\rightarrow \gamma e^+ e^-$ (~1%)
- 根据分支比确定衰变末态, $[0, 1]$ 之间随机选取 r 。
- 产生末态粒子
 - 在 π^0 质心系中确定末态粒子4动量, $\delta\Omega = \sin\theta \, d\theta \, d\varphi$ 。
 - 通过Lorentz变换回到实验室系。

思考: 在上述过程中共使用了几次随机数?

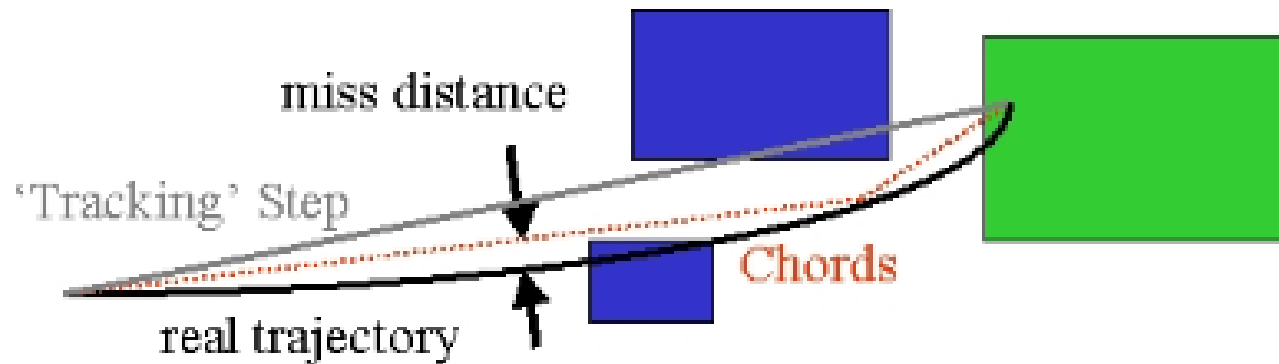


虽然粒子衰变模拟是一个简单的过程, 但它清楚地展示了 **analogue Monte Carlo (“honest” simulation)** 的基本思想。

- ❄ **Geant4没有tracking cut**
 - 追踪粒子直至其能量为零或离开探测器。
- ❄ **Step的长度取决于最短相互作用长度，但对带电粒子需要特殊处理**
 - 电离过程的截面很大，导致step长度很小，每个step的能量沉积很小 → 对计算性能是极大的挑战。
- ❄ **只模拟沉积能量(运动方向改变)大于特定阈值 W_0 的相互作用。**
 - W_0 越小，模拟结果越精确，运行速度越慢。
- ❄ **对能量沉积小于 W_0 的相互作用，采用统计的办法近似模拟。**



- ❄ 带电粒子在电磁场中的运动轨迹一般为曲线。
- ❄ 通过对粒子的运行方程进行数值积分完成对粒子输运过程的模拟。
 - 通常使用Runge-Kutta (RK)方法
- ❄ 真实径迹由多个弦(linear chord)来近似。
- ❄ 几个重要的参数用来控制模拟精度
 - miss distance (chord distance), delta intersection, delta one step



❄ 物理方法

- 计算机固有噪声
- 放射性物质的放射性
- 随机数序列无法重复，给验证结果带来很大困难。

❄ 数学方法 (伪随机数)

- 初值确定后，随机数序列唯一确定。
- 随机数序列会重复出现。
- 有利于验证结果。
- MC模拟中的主要应用

一般来说，模拟软件工具和ROOT等分析工具所提供的随机数产生器基本能够满足我们的需求，大家可以放心使用。

- ETRAN (Berger, Seltzer; NIST 1978)
- EGS4 (Nelson, Hirayama, Rogers; SLAC 1985) www.slac.stanford.edu/egs
- EGS5 (Hirayama et al; KEK-SLAC 2005) rcwww.kek.jp/research/egs/egs5.html
- EGSnrc (Kawrakow and Rogers; NRCC 2000) www.irs.inms.nrc.ca/inms/irs/irs.html
- Penelope (Salvat et al; U. Barcelona 1999) www.nea.fr/lists/penelope.html
- Fluka (Ferrari et al; CERN-INFN 2005) www.fluka.org
- Geant3 (Brun et al; CERN 1986) www.cern.ch
- **Geant4** (Apostolakis et al; CERN++ 1999) geant4.web.cern.ch/geant4
- MARS (James and Mokhov; FNAL) www-ap.fnal.gov/MARS
- MCNPX/MCNP5 (LANL 1990) mcnpx.lanl.gov

尝试安装 Geant4.10.7

<http://geant4-userdoc.web.cern.ch/geant4-userdoc/UsersGuides/InstallationGuide/html/> **安装手册**

Geant4安装前准备**❑ 操作系统**

- Linux (例如: CentOS 8, 虚拟机), 推荐使用
- macOS
- Windows 7+

❑ 编译器

- C++11, 例如: GCC 4.8.5+, clang 3.6+, Visual C++ 14.0

❑ CMake

- 从www.cmake.org下载
- unzip cmake-*.zip/tar.gz/Z
- ./bootstrap, make, make install

❑ 外部库

- Xerces-c, X11, OpenGL, ...

❄ **虚拟机中已经安装了Geant4和ROOT等软件，可以直接使用。**

➤ /usr/local

❄ **下载虚拟机 (10G左右), VMware player和安装说明文件。**

➤ **虚拟机文件(11GB):**

<https://ihepbox.ihep.ac.cn/ihepbox/index.php/s/IENNKTpzBAntlKM>

➤ **VMware player:**

<https://ihepbox.ihep.ac.cn/ihepbox/index.php/s/fd8RBVElPbV86Sr>

➤ **Readme (说明文档):**

<https://ihepbox.ihep.ac.cn/ihepbox/index.php/s/tzQyur1A4OQIw6i>

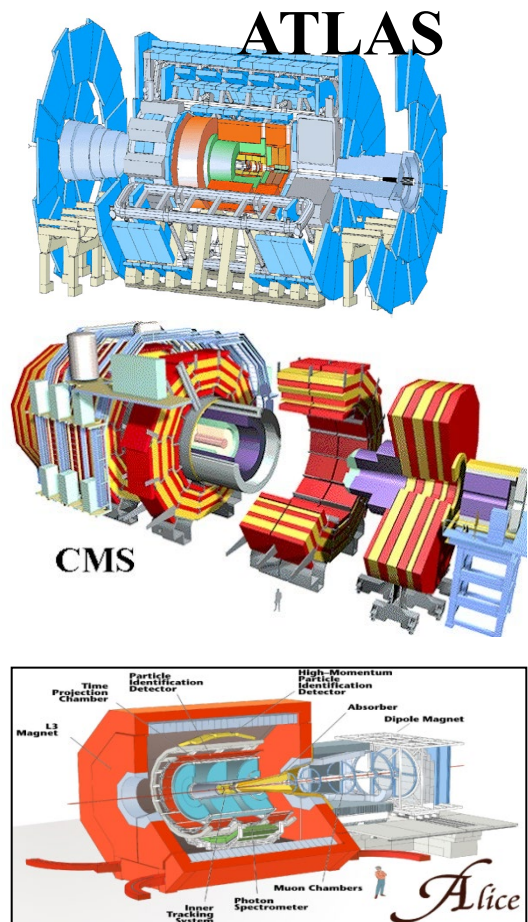
❄ **推荐这种方式。**



GEANT4介绍和使用

- ❄ **Geant4 (GEometry ANd Tracking)**是一个用来模拟粒子在物质中运输的**工具包**。
- ❄ **Geant4**提供了探测器模拟中所需要的一系列工具：**几何/物质、粒子运输、相互作用、run/event/track管理、可视化、用户接口**等。
- ❄ **Geant4**提供了非常丰富的物理过程，涵盖了**不同粒子种类和较宽能量范围**。通常对于一个特定的物理过程，具有多种物理模型可供选择。
- ❄ 用户需要基于**Geant4**所提供的工具包完成自己模拟程序的开发任务。
- ❄ **Geant4**基于**C++**语言开发，采用**面向对象**的软件技术。
- ❄ **Geant4**是**开源**的。

- ❄ **基于Geant4的探测器模拟广泛应用于，**
 - 高能物理 (探测器设计，刻度/重建，数据分析)
 - 核物理
 - 宇宙线物理
- ❄ **此外，还应用于很多其它领域，**
 - 空间科学
 - 放射科学
 - 医学 (束流治疗，放疗，成像，辐射研究)
 - 背景辐射计算
 -



Storage

raw recording rate 0.1–1 GByte/s
accumulating at 5-8 PBytes/year

Processing

200,000 of “today’s” fastest PCs

1000 person-years

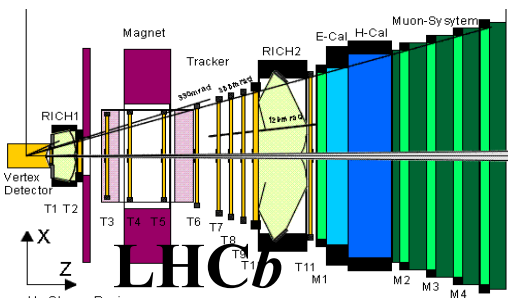
“Offline” software effort per experiment

~5000 physicists

around the world, around the clock

20 years

software life-span



➤ Pre-R&D阶段

- 1993 — 在CERN和KEK，开始对GEANT3采用面向对象的技术进行重新设计。

➤ R&D阶段

- 1994年12月 — R&D计划书递交到CERN - *Geant4诞生!*
- 1995年12月 — 完成原型的基本设计和实现。R&D人员发展到~100多位科学家。
- 1997年4月 — 第一个 α 版本发布。
- 1998年7月 — 第一个 β 版本发布。
- 1998年12月 — 版本1发布，R&D阶段结束。

➤ Geant4合作组成立

- 1998年12月 — Geant4合作组成立，基于“MoU” (Memorandum of Understanding)。
- ...
- 2012年11月30日 — Geant4 9.6版本发布。
- 2013年12月06日 — Geant4 10.0版本发布。
- 2014年12月05日 — Geant4 10.1版本发布。
- 2015年12月04日 — Geant4 10.2版本发布。
- 2016年12月09日 — Geant4 10.3版本发布。
- 2021年12月10日 — Geant4 11.0版本发布。
- 2022年12月09日 - Geant4 11.1版本发布 ← *当前版本*

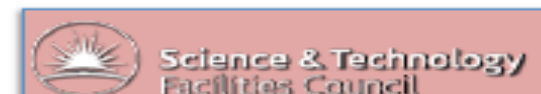
目前, Geant4合作组每年会发布一个版本。

Geant4 – A Simulation Toolkit

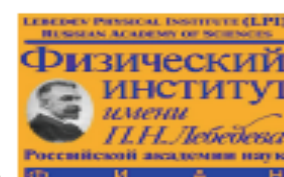
Geant 4



<http://www.geant4.org/>



S. Agostinelli et al.
Geant4: a simulation toolkit
NIM A, vol. 506, no. 3, pp. 250-303, 2003



J. Allison et al.
Geant4 Developments and Applications
IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 53, no. 1, pp. 270-278, 2006



<http://geant4.cern.ch/support/userdocuments.shtml>

❄ Geant4合作组提供

- Geant4介绍 (Introduction to Geant4)
- 安装指南 (Installation guide)
- 用户手册 (User's guide: For application developers)
- 高级用户手册 (User's guide: For Toolkit developers)
- 物理参考手册 (Physics reference manual)
- 源代码浏览器 (LXR source code browser)
- Doxygen -- classes and members reference guide

❄ 用户反馈

- 用户论坛 (HyperNews -- bug reports and fixes)
- FAQ

- ❄ **在Geant4中，用户可以为任何的变量选择和使用合适的单位。**
- ❄ **在基本单位的基础上， Geant4使用一套内在的、自治的单位集：**
 - millimeter (mm)
 - nanosecond (ns)
 - Mega electron Volt (MeV)
 - Positron charge (eplus)
 - Degree Kelvin (kelvin)
 -
- ❄ **所有的单位都可以通过基本单位进行定义。**
 - millimeter=mm=1;
 - meter = m = 1000*mm;
 -
 - m3 = m*m*m;
 -
- ❄ **单位的定义包含在下面的文件中：**
 - Geant4/global/management/include/G4SystemOfUnits.hh

❄ **每一个数字都必须乘以其合适的单位。**

- `double Radius = 10.0*cm;`
- `double kineticE = 1.0*GeV;`

❄ **为了得到一个变量的值，必须要除以相应的单位。**

- `G4cout << eDep/MeV << “ [MeV]” << G4endl;`
- `G4cout <<G4BestUnit(eDep, “Energy”) <<G4endl;`

❄ **如果需要，你可以定义一个新的单位。**

❄ **注意单位的使用是否正确：**

- `G4double radius=10.*m; // internally converted: radius=10000`
-
- `G4double xposition = (radius*cos(alpha*rad))*cm; // is this really what you want to do??`
- `G4double yposition = (radius*sin(alpha*rad))*cm;`