



清华大学

Tsinghua University

粒子物理模拟

第一讲

王喆

清华大学



本讲内容

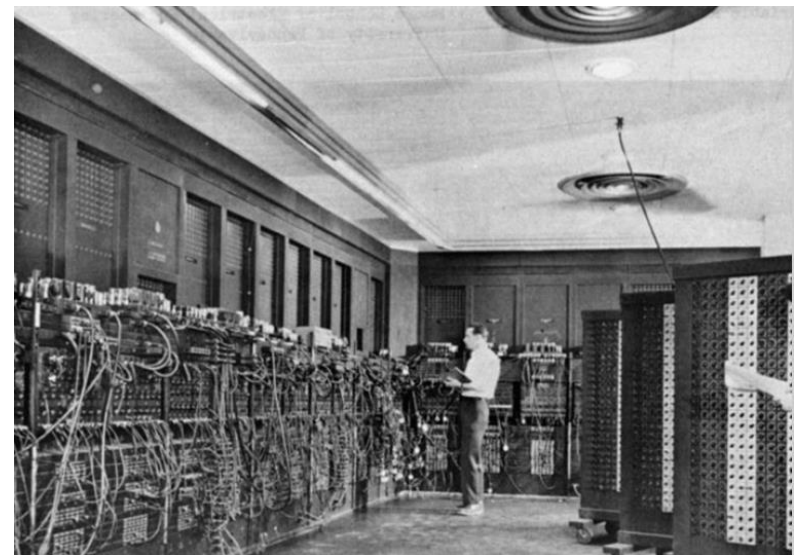
全面理解粒子物理模拟的全过程

1. 模拟在粒子物理实验中的意义
2. 截面和自由程
3. 最简单的单粒子模拟
4. 多过程选择
5. 更复杂的模拟过程

模拟在粒子物理实验中的意义

粒子模拟的起源

- ▶ 起始于Mahattan计划，为解决当时需要理解核裂变过程的急切需求
 1. 第一台电子计算机 ENIAC
(Electronic Numerical Integrator And Computer) ，
17000真空管，500000个焊点
 2. 模拟热核反应，模拟中子的扩散过程
 3. 当时还是局限于计算能力





粒子模拟的现代应用

- ▶ MCNP (Monte Carlo N-Particle)
MCNP6在2013年发布, 发展了50年, 主要是核过程模拟, 与此同时有ENDF (Evaluated Nuclear Data File)
- ▶ GEANT (GEometry ANd Tracking)
- ▶ Fluka 通用的模拟软件
- ▶ MUSIC 地下实验宇宙线缪子的模拟
- ▶ EGS 电磁相互作用的模拟
- ▶ Garfield 电磁场环境模拟, 加速器, 气体探测器

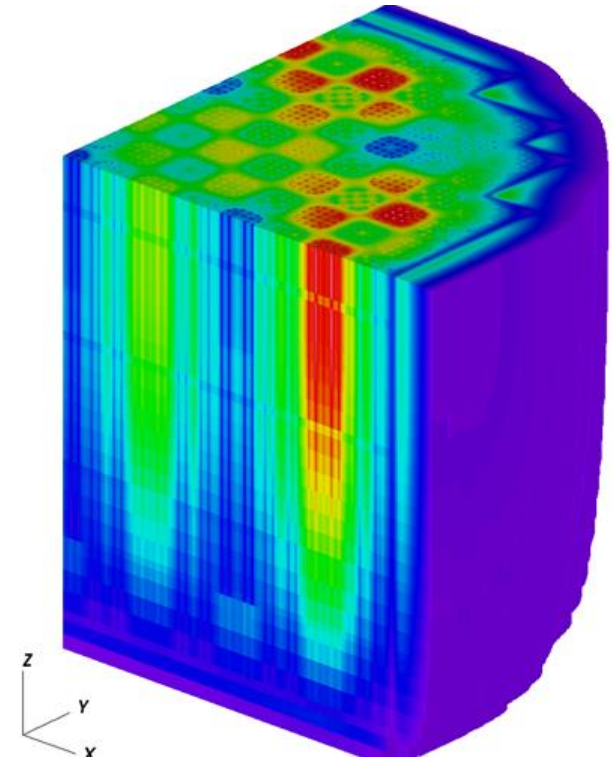
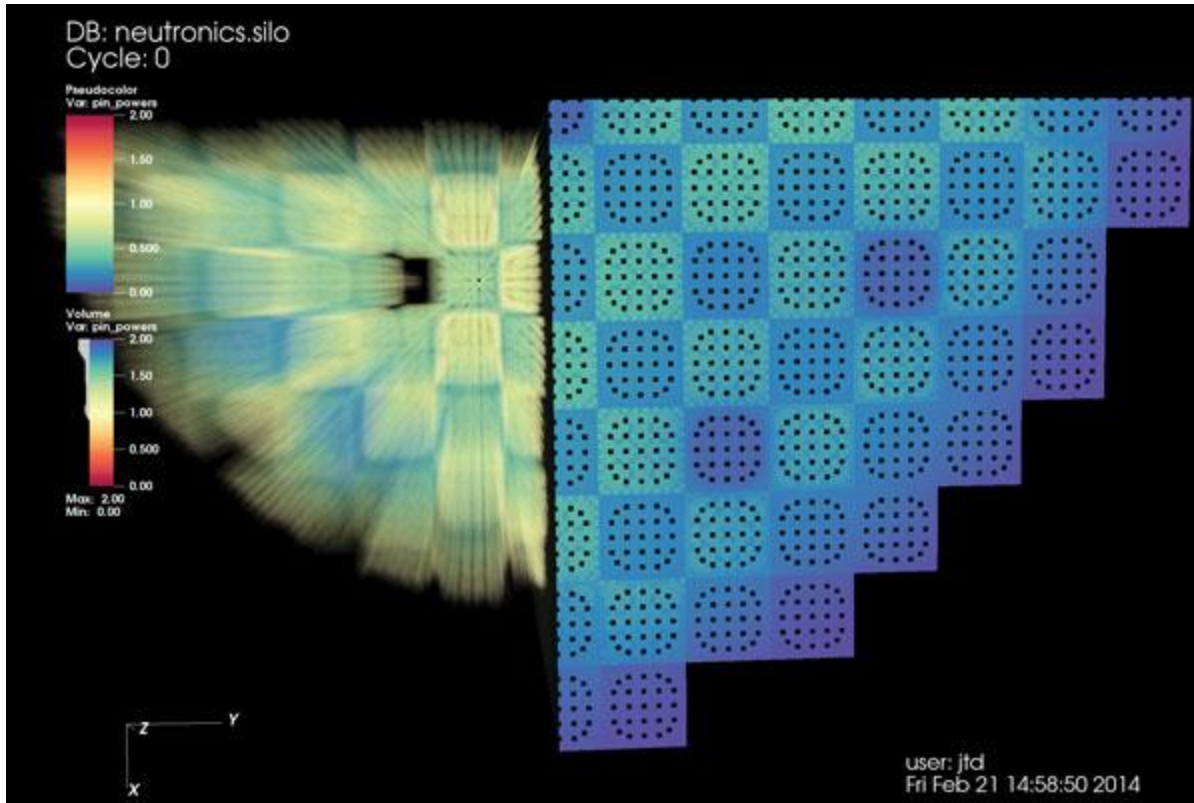
还有很多没有列出, 常常专注于某一个领域的模拟。

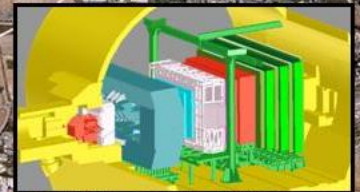
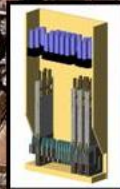
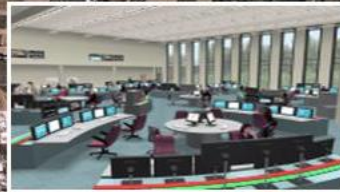
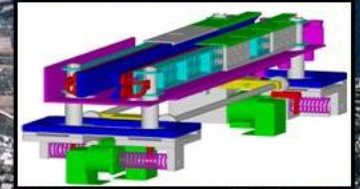
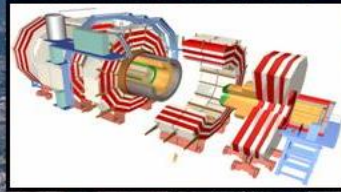
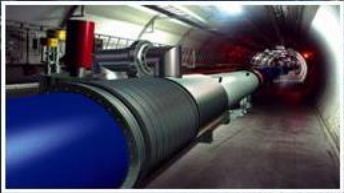
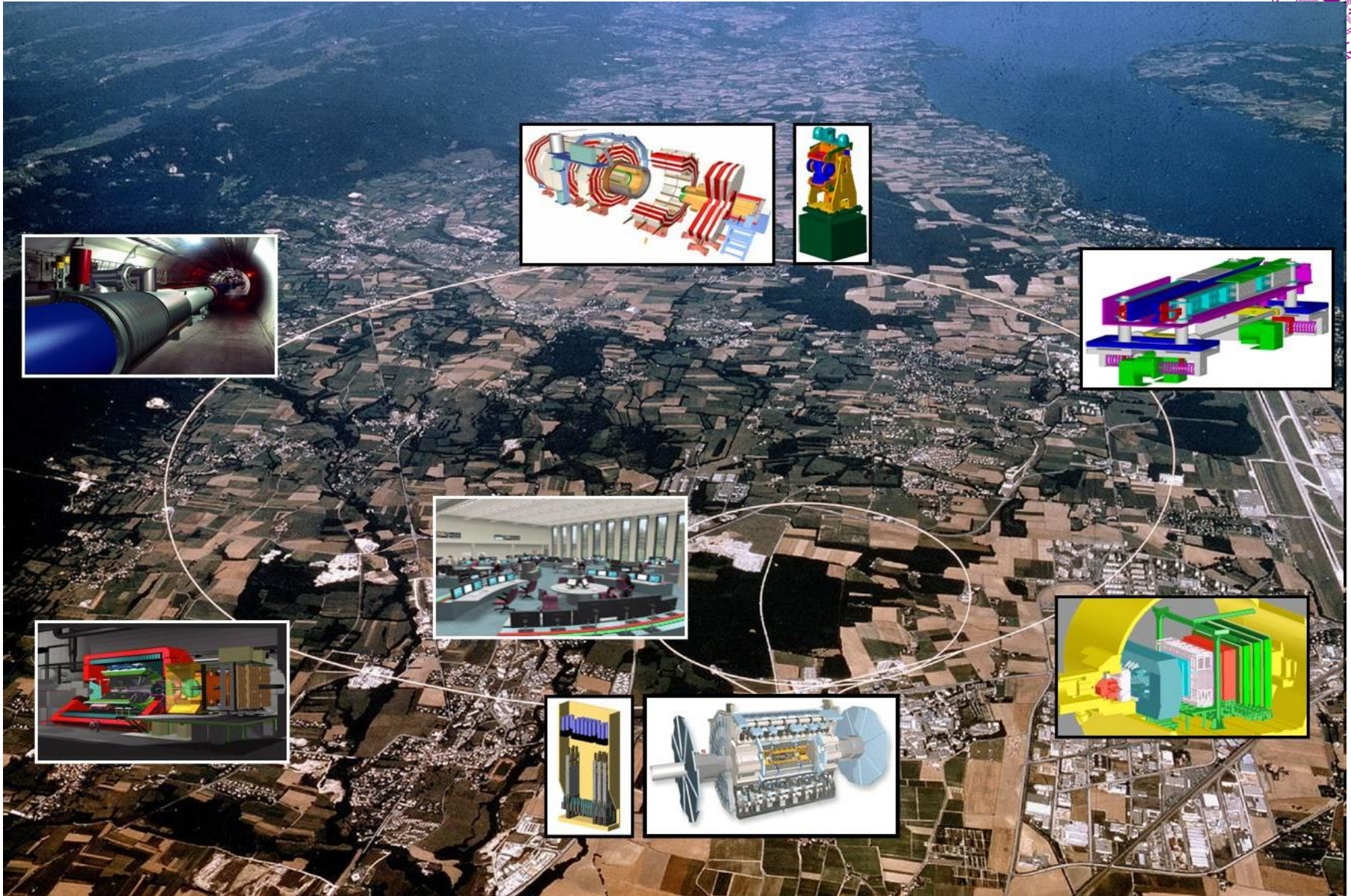


模拟研究的需求

- ▶ 探测器性能和物理过程的理解
 - 复杂的探测器几何和物质构成
 - 探测效率，探测精度，探测范围
 - 物理过程的理解：中子扩散，光子扩散

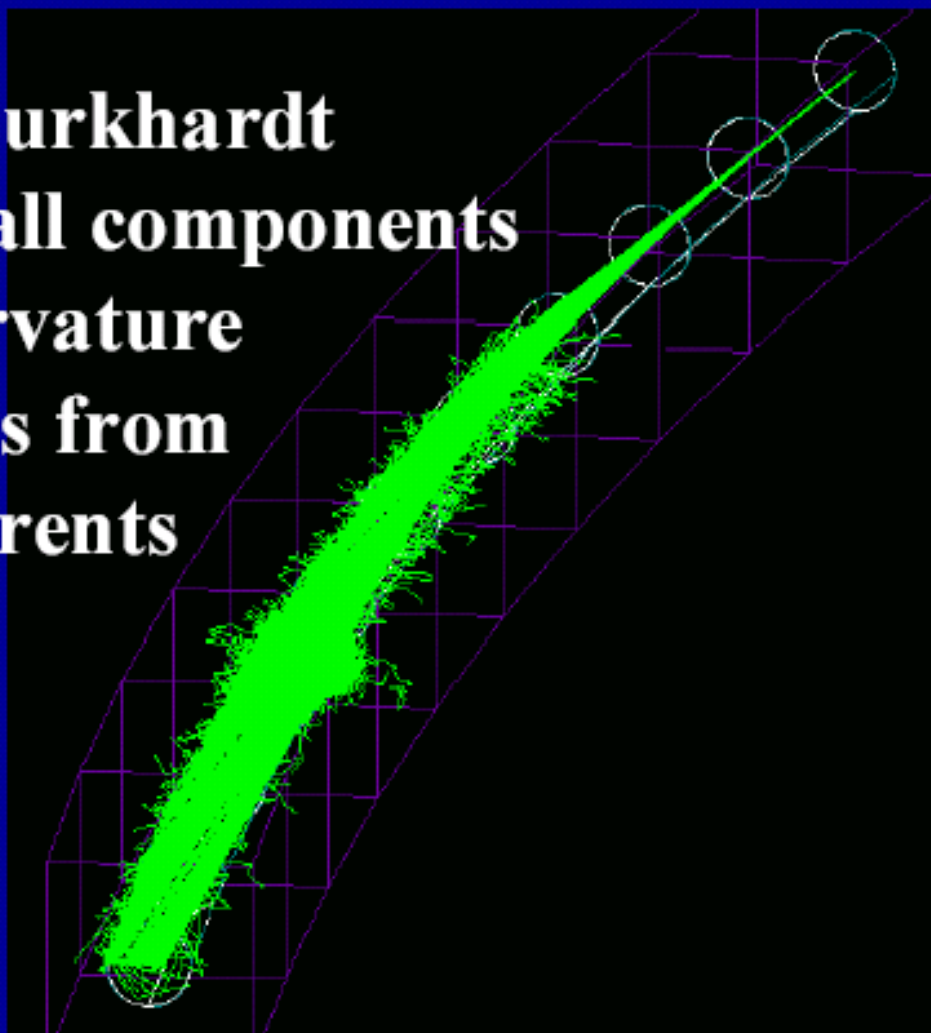
- ▶ 实际应用
 - 中微子探测器
 - 对撞机实验
 - 加速器设计
 - 反应堆模拟
 - 放射性医学应用，辐射防护





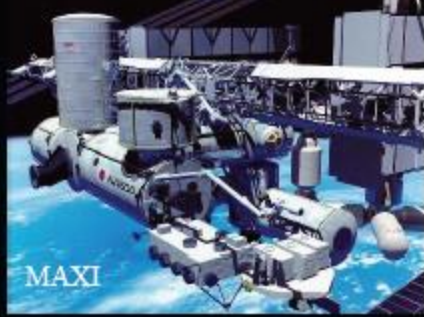
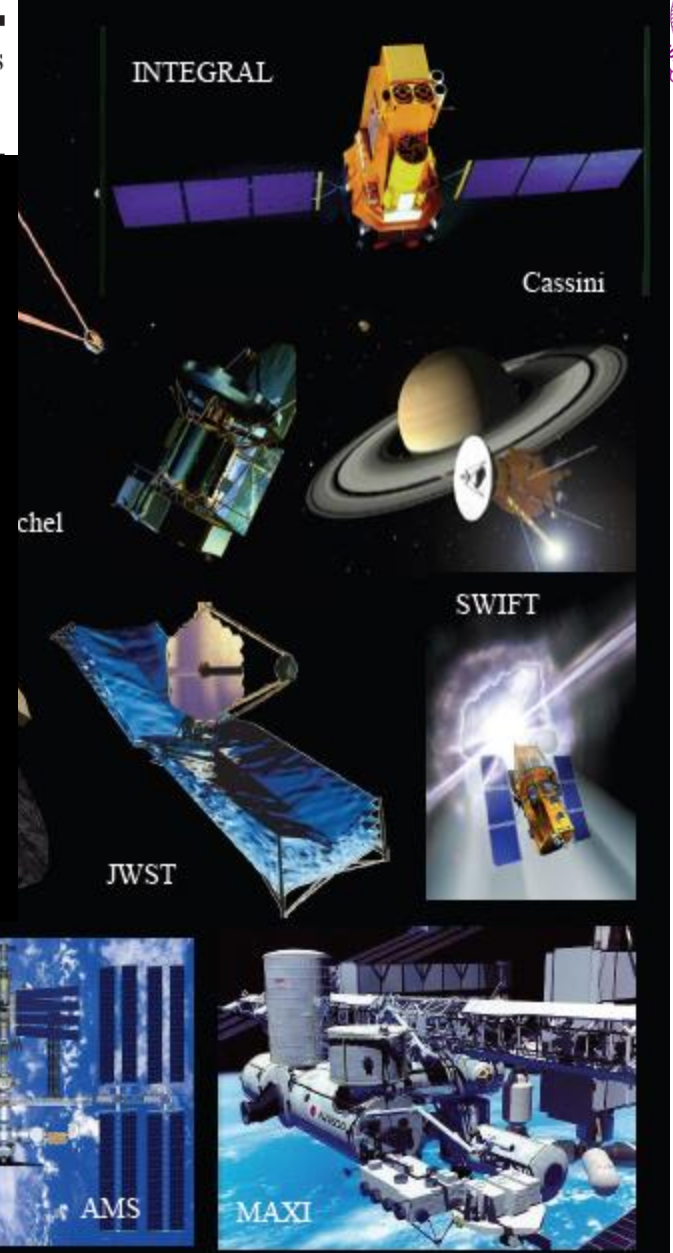
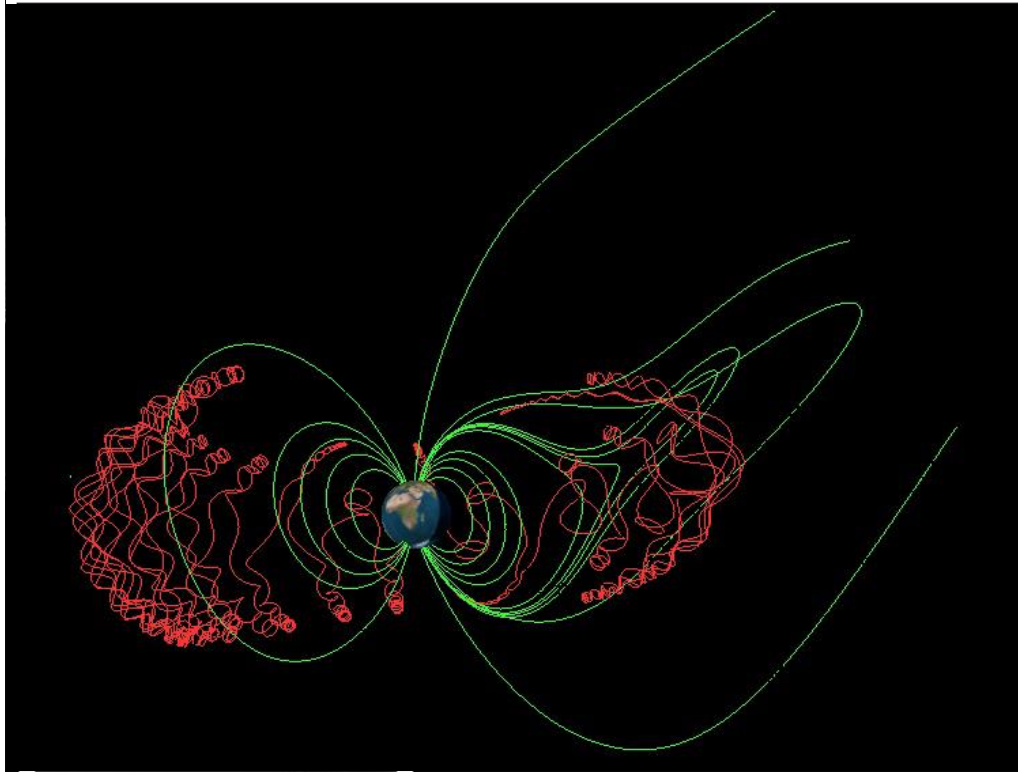
Synchrotron Radiation

Generator of H. Burkhardt
Implemented for all components
Based on local curvature
Individual photons from
individual parents



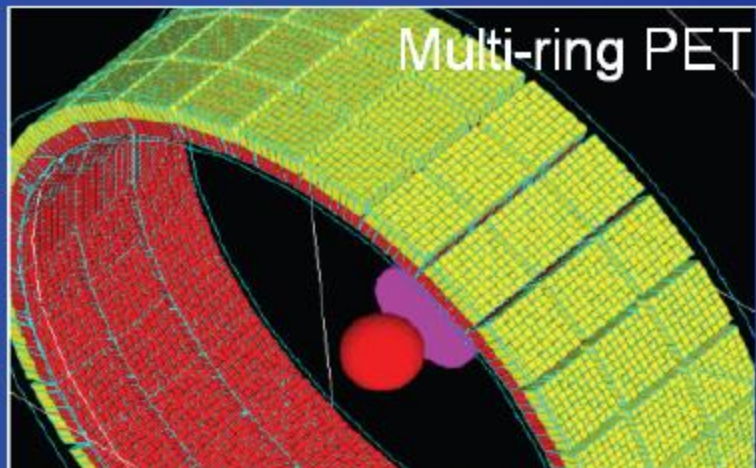
G. Blair (CERN)

Geant4 Simulation of the Propagation of Cosmic Rays through the Earth's Atmosphere



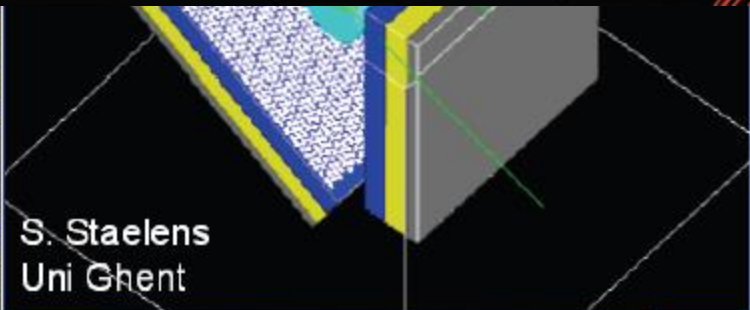
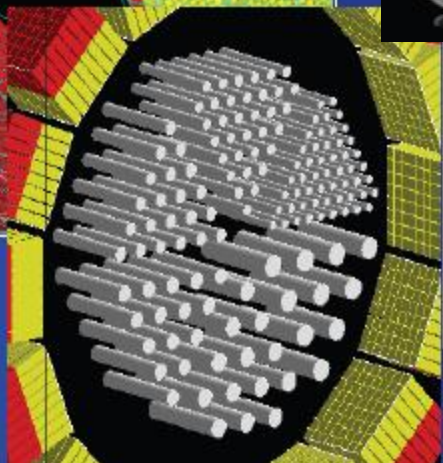
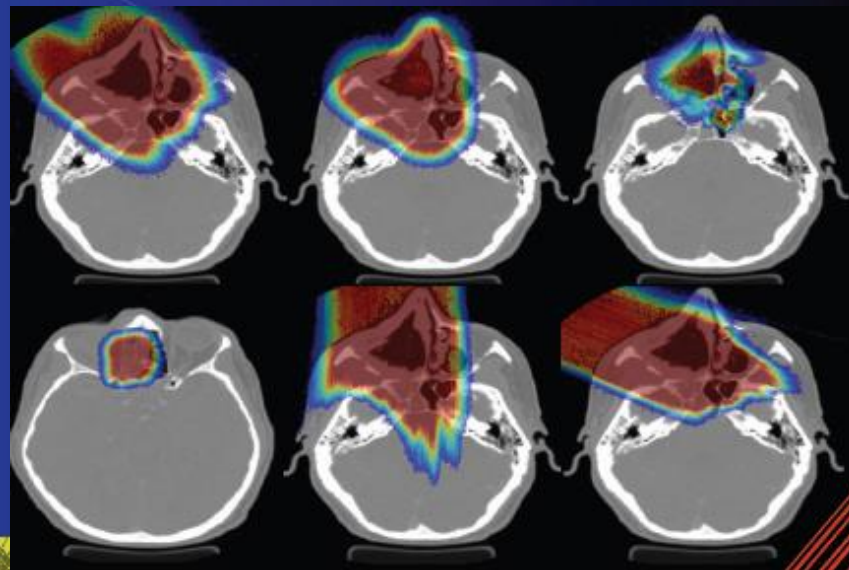


Geometry examples of GATE applications



Multi-ring PET

D. Strul
IPHE Lausanne

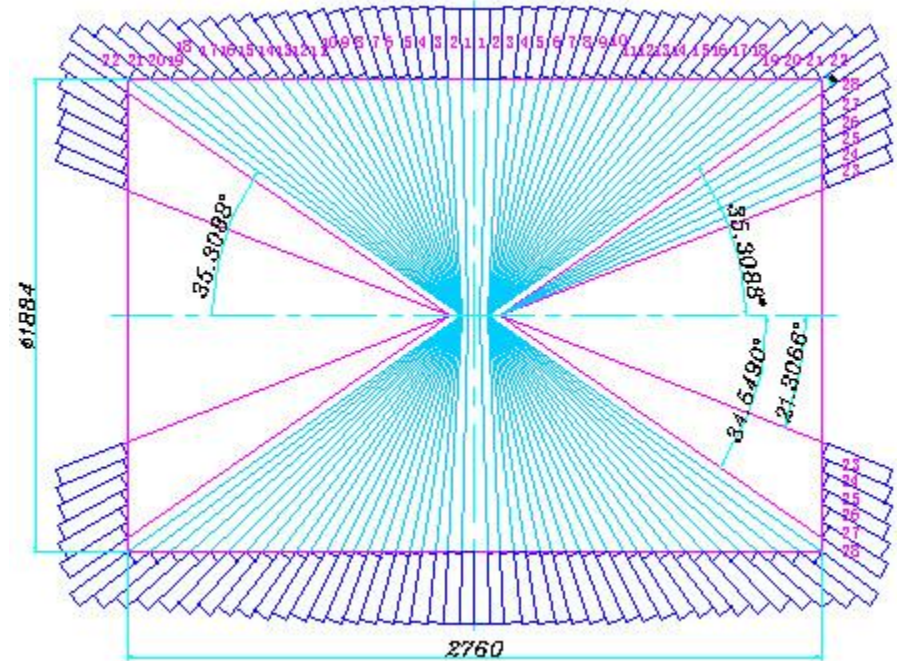


S. Staelens
Uni Ghent

讨论一个实际模拟问题

► 假如我们正在研究BESIII探测器对某一衰变过程的探测效率

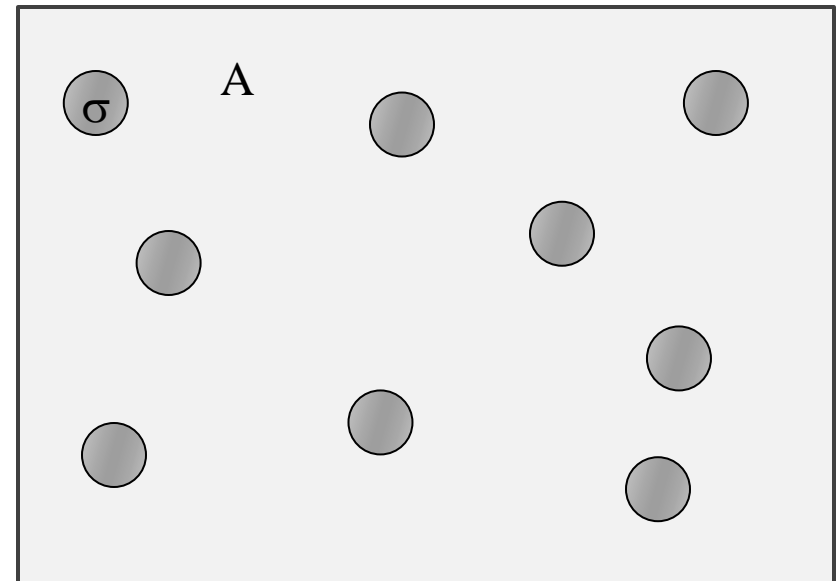
1. 问题1，桶部量能器对单个光子的探测效率是多少？
2. 问题2，如果是一对背对背的光子呢？
3. 问题3，对 π^0 衰变出的光子呢？
4. 问题4，为什么需要模拟研究呢？



相互作用截面与平均自由程

相互作用截面

- ▶ 粒子和物质的相互作用
对微观粒子来讲，物质无非是许许多多小颗粒的集合。
- ▶ 粒子与粒子的相互作用用截面表示 σ ，面积量纲
- ▶ 我们讨论一个薄层物质
薄层： $N \times \sigma \ll A$
 N 该物质中总的粒子数
 A 该物质的总面积
- ▶ 当一个粒子穿过该物质时，相互作用的概率为 $N\sigma/A$



平均自由程

- ▶ 考虑一个薄层，厚度 dx ，面积为 A ，微观粒子数体密度 n ，相互作用截面仍为 σ
- ▶ 入射粒子束，流强用 I 表示，起始值为 I_0 （可假想该束流截面 S 积小于 A ）

- ▶ 该束流经过该薄层后将减少：

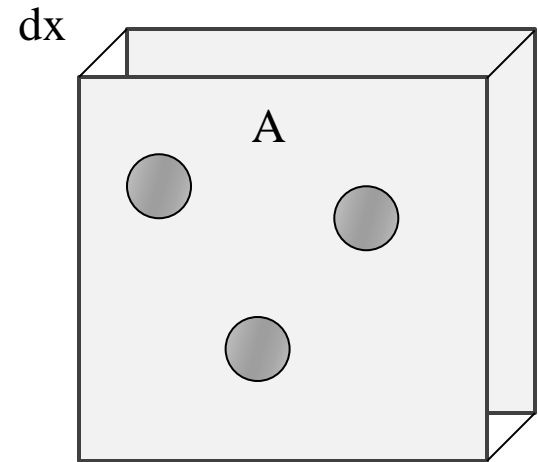
$$dI = -I \times n \times \sigma \times dx$$

- ▶ 得到微分方程：

$$dI/dx = -I \times n \times \sigma = -I/l$$

(l 平均自由程 = $1/(n \times \sigma)$)

- ▶ 求解为： $I = I_0 e^{-x/l}$





平均自由程

- ▶ 在一个薄层中损耗掉的概率为

$$dP(x) = [I(x) - I(x+dx)] / I_0 = 1/L e^{-x/L} dx$$

- ▶ 计算一下粒子的发生散射的平均距离

$$\langle x \rangle = \int_0^{\infty} x dP(x) = \int_0^{\infty} x/L e^{-x/L} dx = L$$

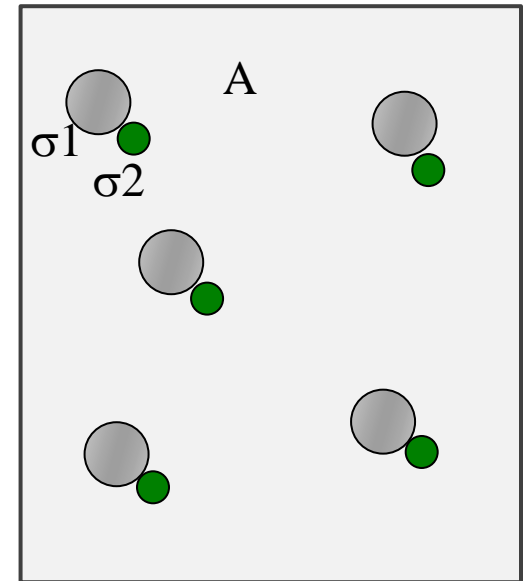
- ▶ 经过距离 x 后的存活概率为：

$$P(x) = e^{-x/L}$$

可见平均自由程 L 的确是表述了其定义的概念

多种相互作用的叠加

- ▶ 前面只考虑了一种相互作用，对应截面 σ ，平均自由程 L 为 $1/(n \times \sigma)$
- ▶ 可以考虑多种相互作用不同的散射、吸收过程
- ▶ 总截面为 σ 为各个子截面 σ_i 的求和
- ▶ 每个过程对应自己的平均自由程 L_i
- ▶ 也可以计算出总的平均自由程 $L = 1/(n \times \Sigma \sigma_i)$
- ▶ 我们可以看到，截面最大的过程对应的平均自由程最小.





非常数截面

- ▶ 经过距离 x 后的存活概率为:

$$P(x) = e^{-y}$$

- ▶ $y = \int_0^x \frac{dx}{l(x)}$

- ▶ 这里的 y 中包含一个随距离变化的平均自由程，当然很多物理量可能是距离的函数，例如飞行时间，能损
- ▶ 但关键问题是存活概率仍可以有指数来表示



微分截面

我们这里只为了从形式上理解：

▶ 例如： $a + b \rightarrow c + d$

$$\frac{d\sigma}{dE d\theta d\phi}(p, s) = \dots$$

其中 E, θ, ϕ 分别为末态粒子c的能量，方位角和极角， p 和 s 非别描述了初态粒子的动量和自旋

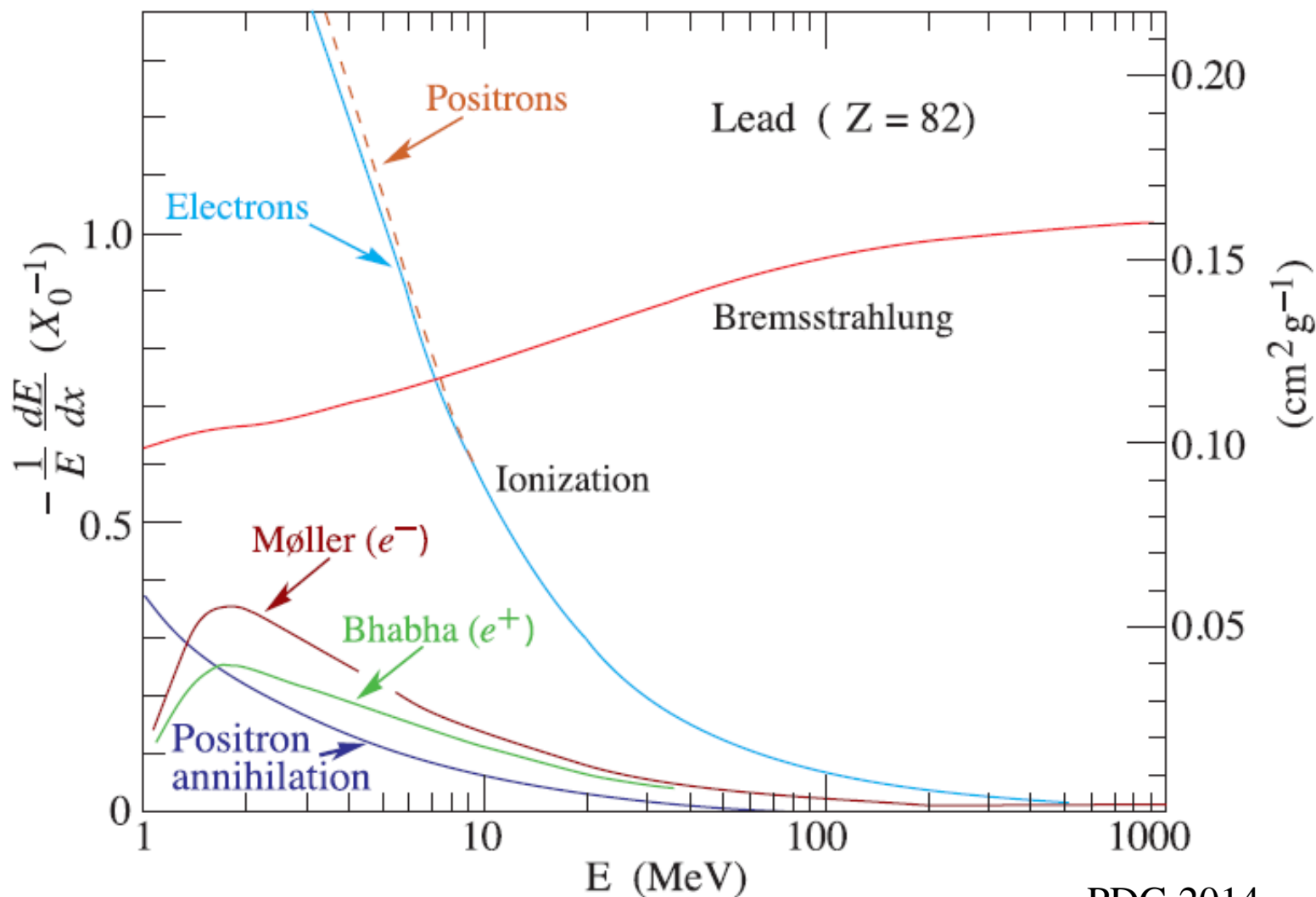
▶ 该截面公式描述了反应过程概率对这些运动学变量的依赖性，即可能是他们的函数



讨论负电子、正电子、和光子的电磁过程

- ▶ 负电子在物质中的相互作用
韧致辐射，电离，Moeller散射
- ▶ 正电子
韧致辐射，电离，正负电子湮灭，Bhabha散射
- ▶ 光子
Compton散射，正负电子对产生

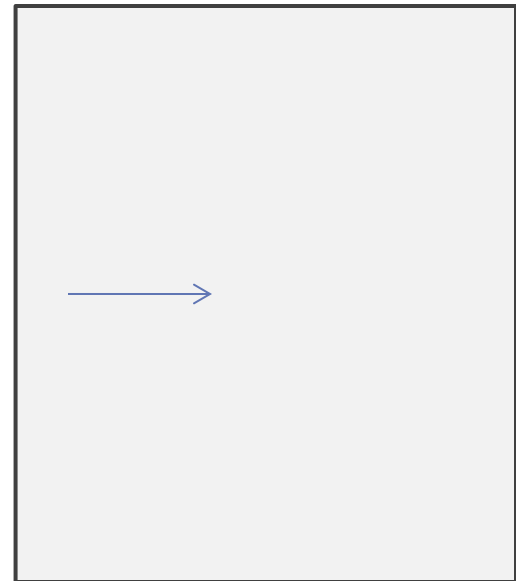
- ▶ 问题：谁的截面大一些？谁的平均自由程长一些？



单粒子模拟过程

最简单的单粒子模拟

- ▶ 只有一种相互作用——湮灭
(即只有直线运动)
- ▶ 考虑一大块物质，非常大，远远超过其平均自由程
- ▶ 粒子在物质中产生
- ▶ 该过程我们是可以解析计算的
- ▶ 但我们看看如何模拟





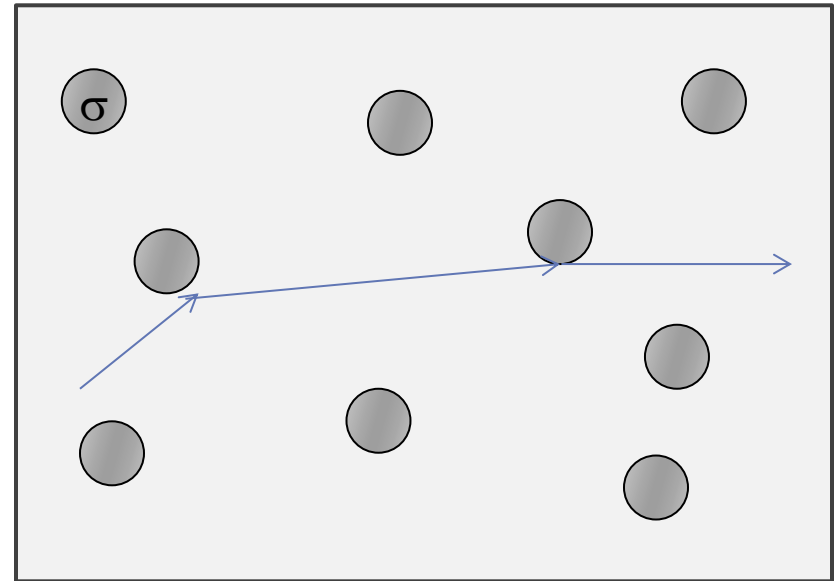
最简单的单粒子的模拟流程

- ▶ 问题为：利用模拟方法计算湮灭的位置分布

- ▶ 步骤如下
 1. 循环N个粒子
 2. 对每个粒子根据其平均自由程进行随机抽样
 $I = I_0 e^{-x/l}$ ，得到湮灭的位置x
 3. 模拟结束

二维的散射过程

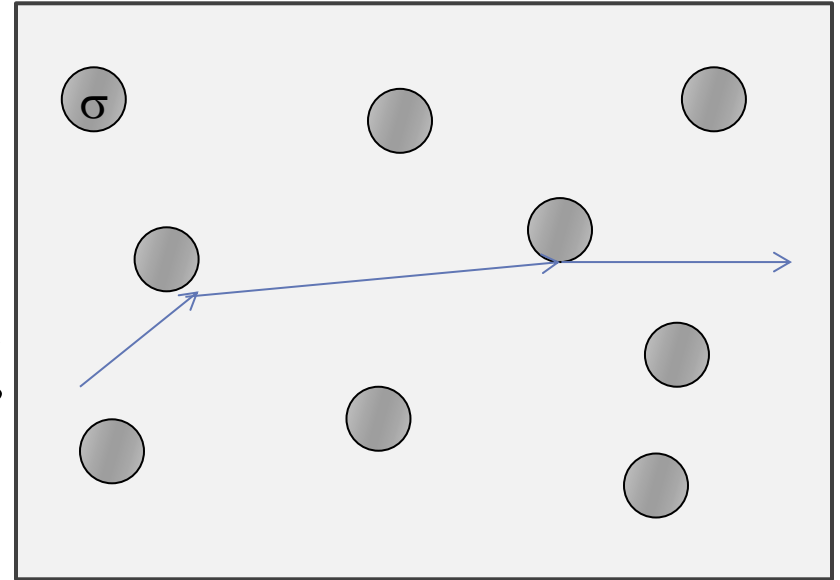
- ▶ 只有一种相互作用——二维散射
- ▶ 每次散射后要调整粒子动量大小和方向
- ▶ 考虑一大块物质，非常大，远远超过其平均自由程
- ▶ 粒子在物质中产生，我们只模拟一段时间即结束



二维的散射过程模拟

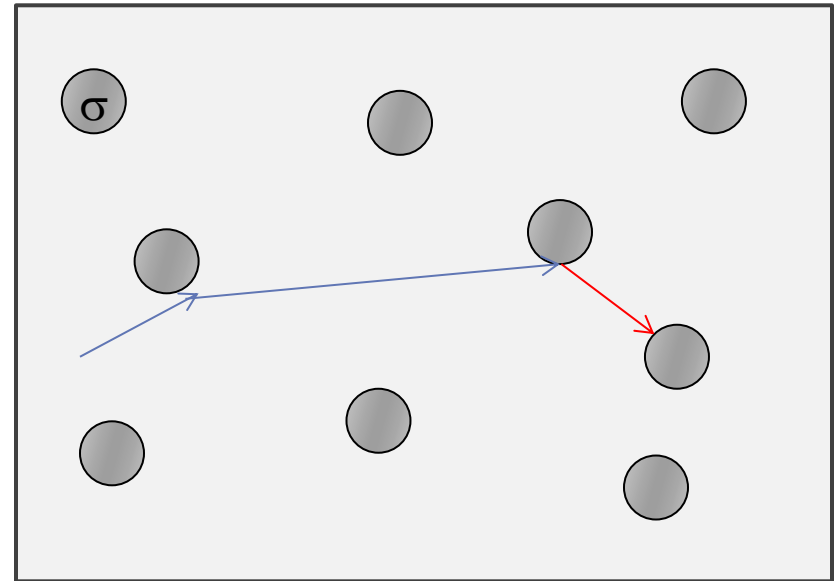
▶ 步骤如下:

1. 循环N个粒子
2. 针对其中一个粒子，按照散射截面即平均自由程，抽样发生散射的距离
3. 执行该散射过程，改变粒子方向及大小
4. 回到第二步，直到达到要求的模拟完成时间



二维散射加湮灭的模拟

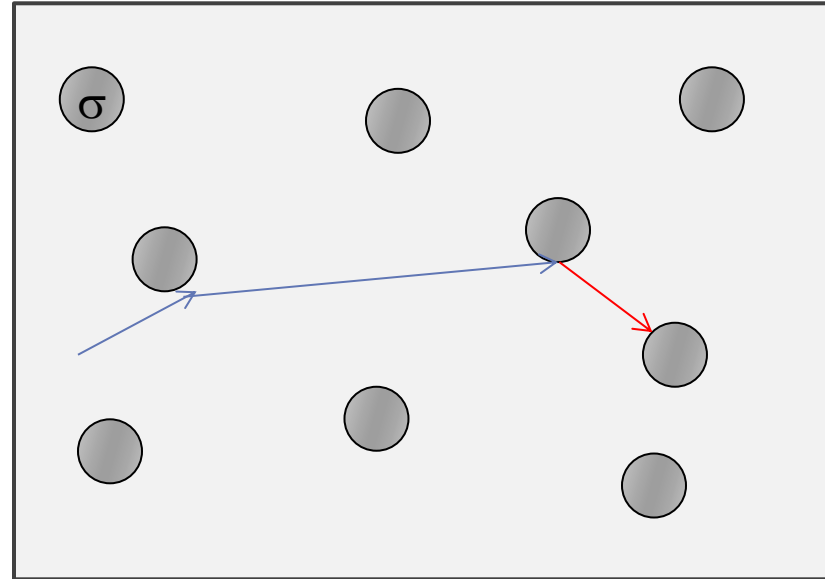
- ▶ 包含两个过程：
散射和湮灭
- ▶ 散射是二维的散射
- ▶ 散射截面为 σ_s ，湮灭截面为 σ_a
- ▶ 这个二维的物质还是足够大的



二维散射、湮灭联合过程的模拟

▶ 步骤如下:

1. 循环N个粒子
2. 针对其中一个粒子，抽样两个 $[0,1]$ 随机数，分别对应两个过程的概率，然后按照各自的平均自由程，将他们转化成各自对应的飞行距离
3. 采用飞行距离较短的那个
4. 如果是散射大，则变化粒子方向，动能等
5. 如果湮灭大，则停止
6. 回到第二步，直到全部都已湮灭结束





实际做法

- ▶ $P_{\text{scatter}} = \text{Random}[0,1]$
 $P_{\text{annih}} = \text{Random}[0,1]$

$$P(x) = e^{-x/l}$$

- ▶ $D_{\text{scatter}} = -\ln(P_{\text{scatter}}) \times L_{\text{scatter}}$
 $D_{\text{annih}} = -\ln(P_{\text{annih}}) \times L_{\text{annih}}$
- ▶ 选 D_{scatter} 和 D_{annih} 中较小者为下一步的步长，并确定对应的物理过程
- ▶ 持续上面的操作，直到湮灭发生



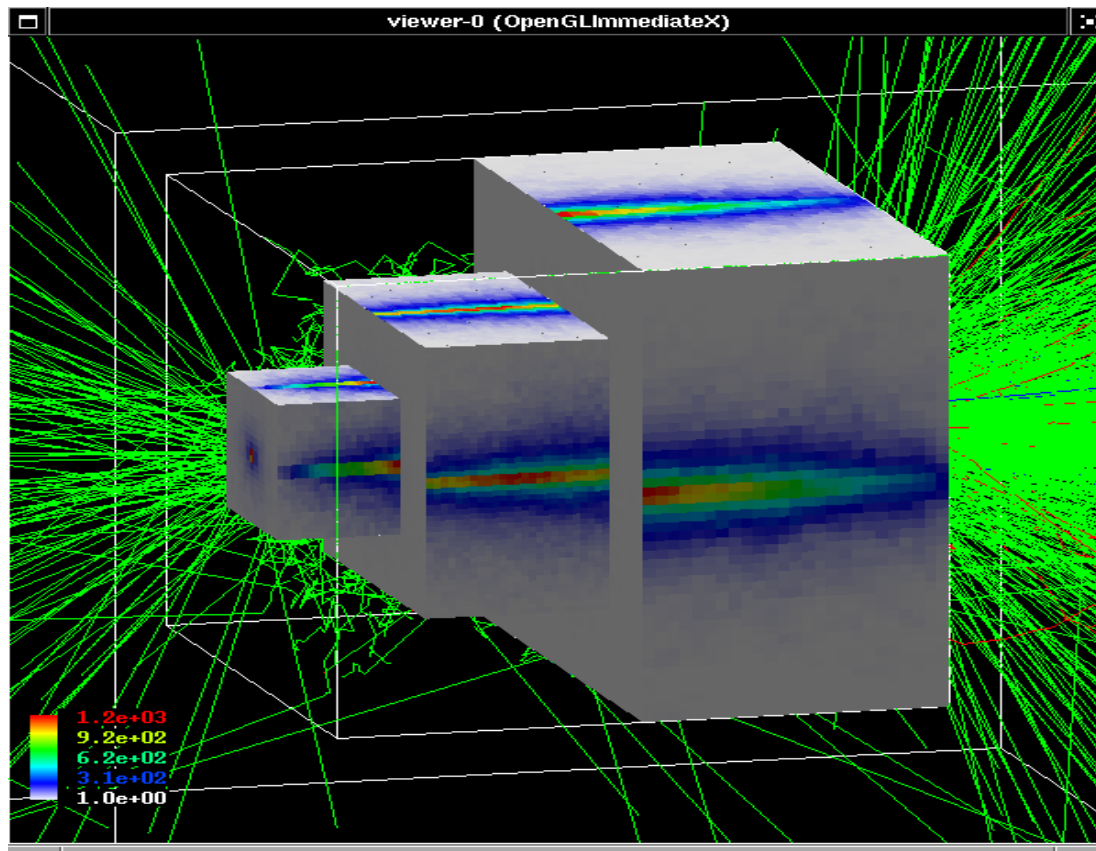
最小步长问题

在这样的模拟中

- ▶ 两种物理过程有干扰吗？
- ▶ 会使粒子的平均湮灭距离变长吗？
- ▶ 这个最小距离的计算可以有别的选择吗？
更长些？更短些？
- ▶ 对随距离变化的平均自由程有影响吗？

三维过程该如何模拟？

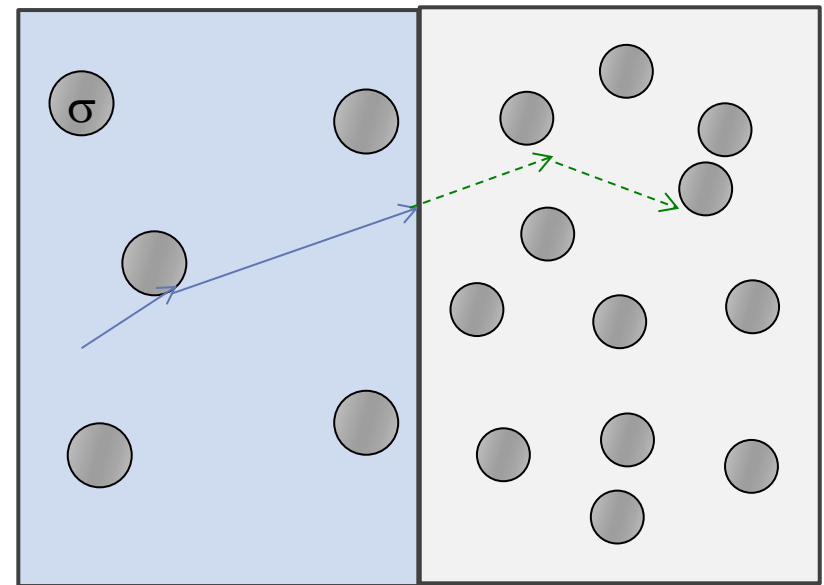
- ▶ 所需的只剩下粒子散射过程中，增加三位的方位抽样问题了



更复杂的模拟过程

边界问题

- ▶ 首先两种物质中的相互作用截面是不一样的，而且可能有新的相互作用
- ▶ 当粒子穿过两种物质时，前面的最短相互作用距离很有可能就是无效的了，要重新计算
- ▶ 我们通常的做法就是把该步骤的截止点强制限定在交界面上





产生子粒子

- ▶ 刚刚没有新粒子产生
- ▶ 如果有新粒子产生该怎么办？
例如：光子的正负电子对产生
不稳定K粒子的衰变
- ▶ 原则上这已经是一个纯计算机编程问题了
只需要把新产生的粒子放入堆栈当中，一一模拟就好了，如果再有新产生就一直堆进去，然后一一模拟，每模拟完成一个，就从堆栈中清除一个记录，直到迭代结束。



连续过程与分立过程

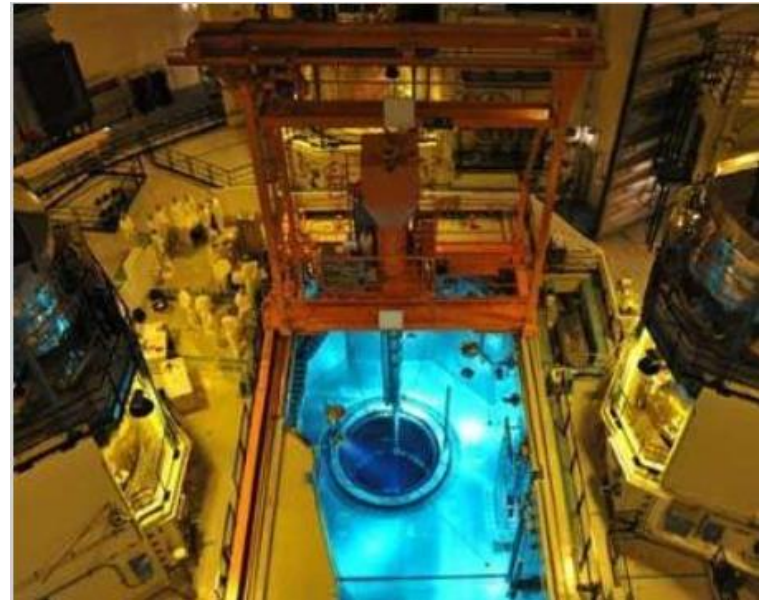
- ▶ 分立过程
散射，湮灭
- ▶ 连续过程
Chernekov 光产生，电离过程，在磁场中的偏转
- ▶ 问题：
如何安排他们的模拟？
- ▶ 答案是先模拟分立过程，每一步之后根据总的能量损失，路程，飞行时间等，再完成连续过程的模拟。
(很好的解决该问题，偶尔会有瑕疵)

两个连续过程的模拟方案实例——Cherenkov光



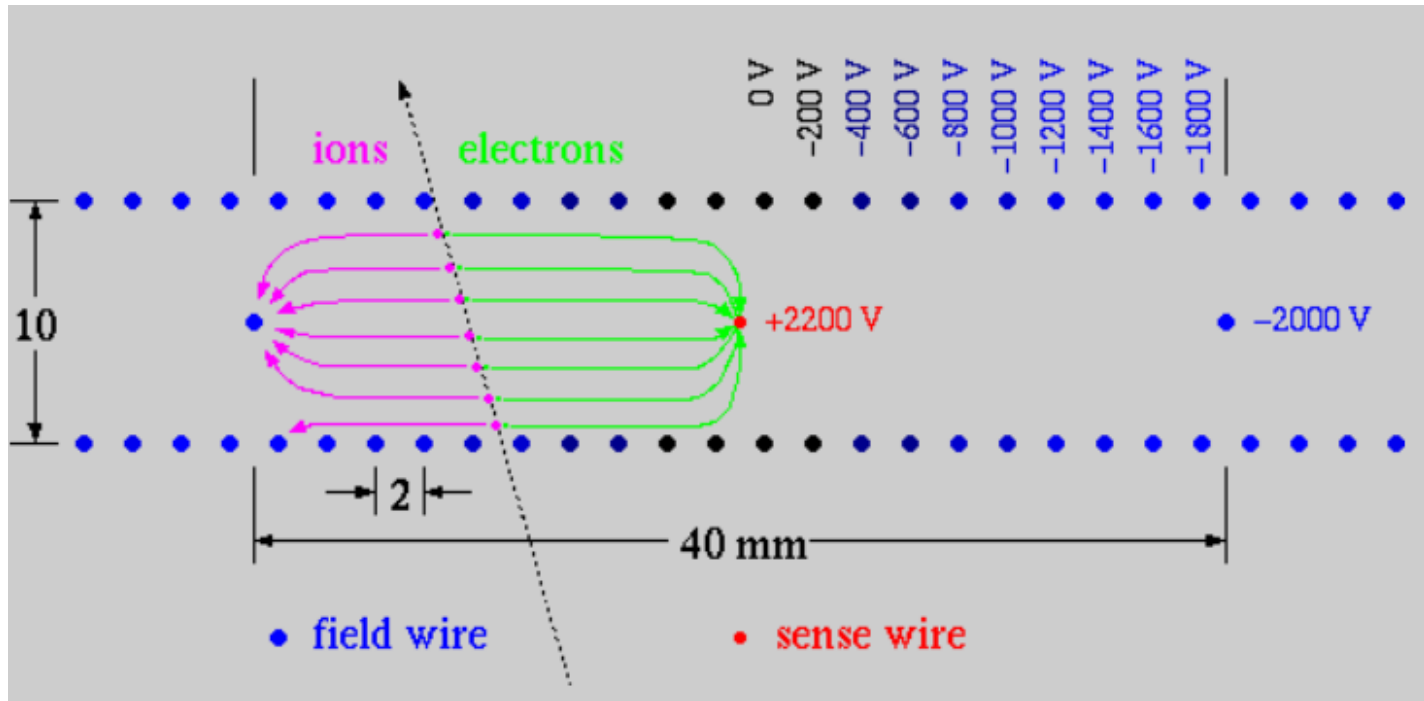
- ▶ 当带电粒子在介质中的速度超过了光速，Cherenkov光就会产生
- ▶ 认为Cherenkov光是连续产生的
- ▶ 光产额为：

$$\frac{d^2 N}{dx d\lambda} = \frac{2\pi\alpha z^2}{\lambda^2} \cdot \sin^2(\theta_c) \quad \cos(\theta_c) = \frac{1}{n\beta}$$



- ▶ 不只依赖于径迹长度，如果粒子速度变化不大，或者说步长很小，这种每步结束后模拟的办法是可行的

两个连续过程的模拟方案实例——Quenching

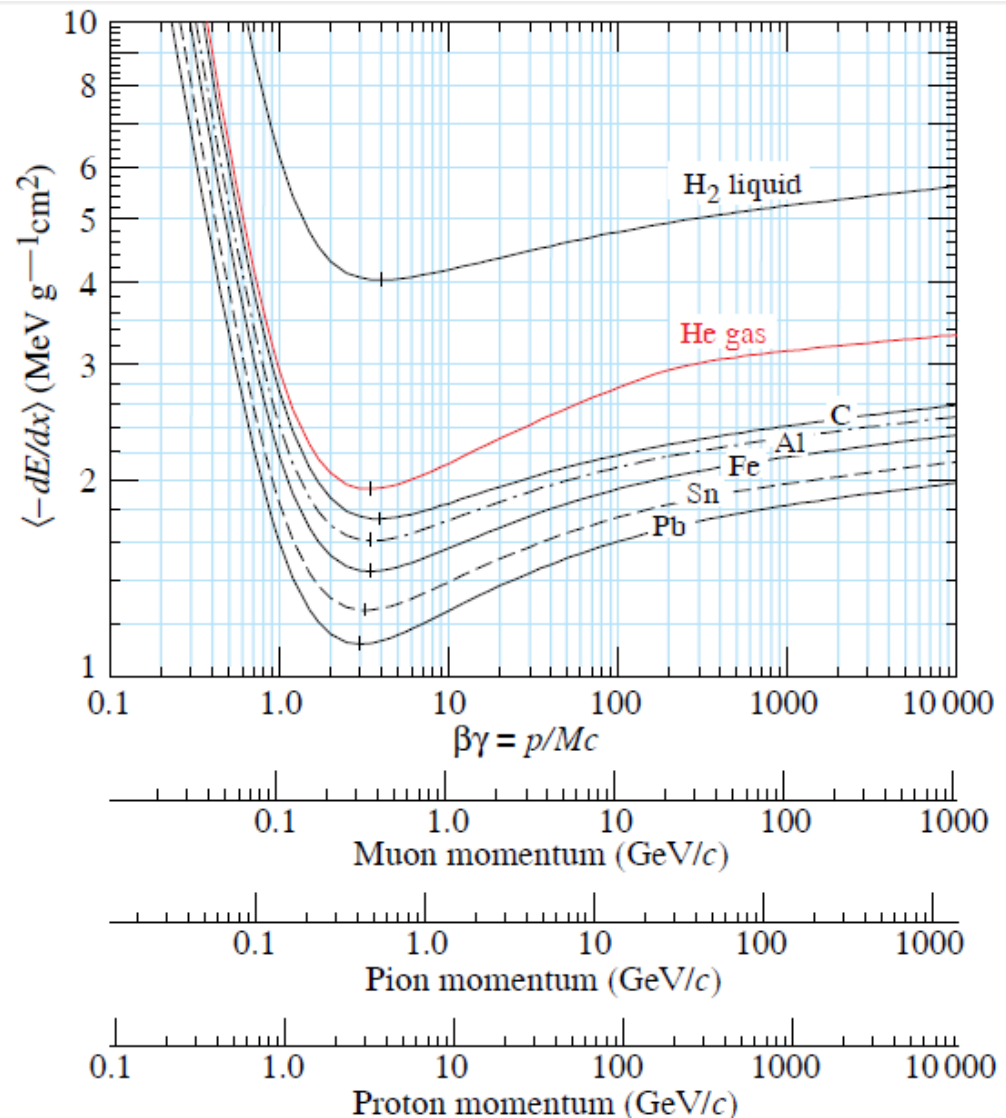


- ▶ 带电粒子在介质中穿过时会有能损 dE/dx
- ▶ 我们收集该能损以确定粒子位置等信息
- ▶ 原则上只要知道一步的长度和总能量损失就足够了模拟了

▶ 但该能损会有 Quenching 效应（淬灭），即有一部分能量沉积测不到了，并且是 dE/dx 绝对值的函数

- ▶ 带电粒子的能损在低能变化剧烈
- ▶ 在大亚湾上，关于淬灭效应的模拟还是待解决的

（图片源于PDG）



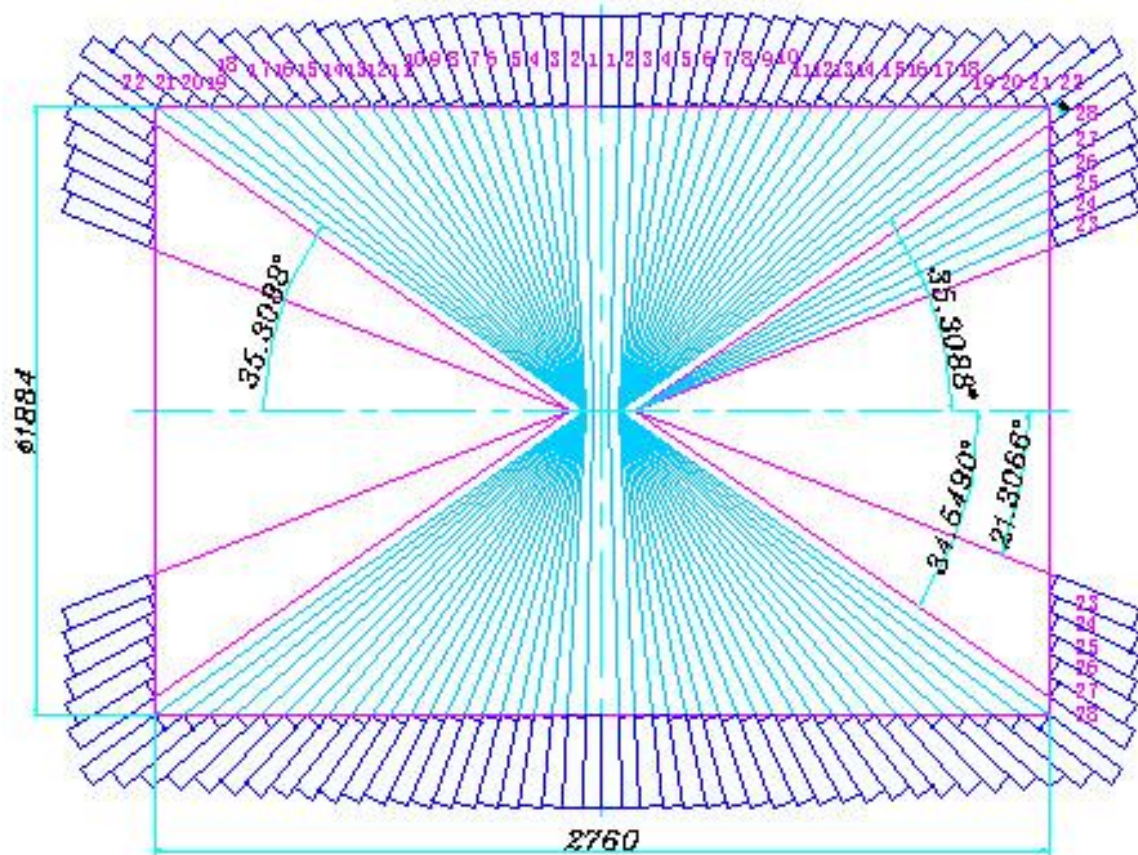


总结

- ▶ 截面
- ▶ 平均自由程
- ▶ 单粒子，单一过程，无限大物质中的运输和模拟
- ▶ 单粒子，多过程的选择
- ▶ 三维情况
- ▶ 有限大物质，物质边界处理
- ▶ 子粒子产生
- ▶ 分离过程与连续过程

最后的一个课堂讨论

- ▶ 假定该模型的均匀单光子模拟的探测效率为80%，请问该从哪几个方面考虑该模拟结果的正确性？
- ▶ 统计误差是多少？





作业题

- ▶ 模拟一个二维散射+湮灭的过程
散射过程的平均自由程为0.1米，湮灭的平均自由程为5米，散射后粒子角度在 $[-30^\circ, +30^\circ]$ 间均匀变化
- ▶ 物质为一个无限大的平面，粒子均匀分布
- ▶ 描绘出该粒子在二维平面内的径迹
- ▶ 画出100条粒子的径迹叠加图
- ▶ 做平均路程分布，并利用模拟结果估计平均路程