



清华大学  
Tsinghua University

# 粒子物理模拟

---

第四讲

王喆  
清华大学



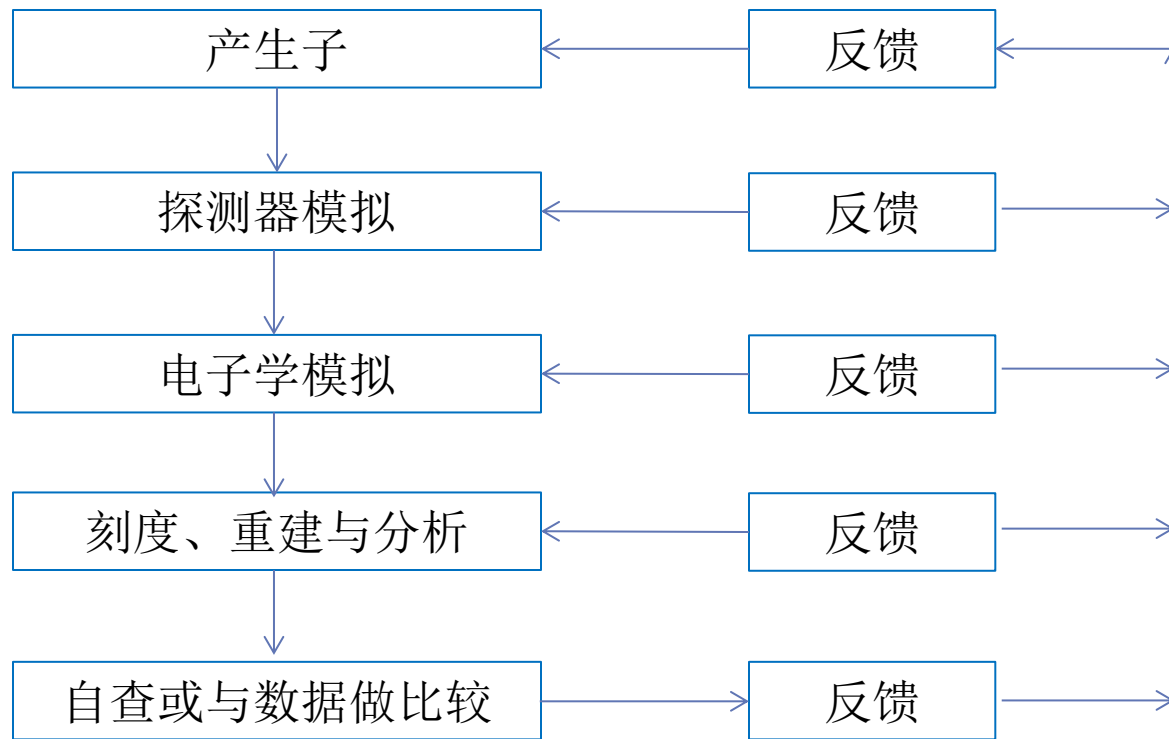
# 本节内容

---

- ▶ 一个完整的物理模拟过程
  1. 产生子
  2. 粒子输运
  3. 电子学模拟（参数化或真实化）
  4. 刻度、重建与分析

# 一个完整的物理模拟过程

# 全部过程



物理需求飞速发展，实验技术不断推进，实验精度也达到了前所未有要求，模拟过程趋于复杂，是一个不断反复的迭代过程。

产生子



# 物理产生子 Generator

产生子在很多情况下是我们最关心的内容：

- ▶ 非常关心对撞产生的截面，衰变形式，例如Higgs的产生与衰变，Z的产生与衰变。涉及到重要的新物理研究
  1. 一般都要有一个相对完善的模拟研究，来说明对新物理研究的可行性
- ▶ 有些是利用已知的粒子性质，做其他的物理研究，例如在大亚湾上的中微子的反贝塔衰变，正负电子对撞机上的Bhabha散射过程
  1. 这种同样要求说明能否达到要求的精度



# 物理产生子的内容

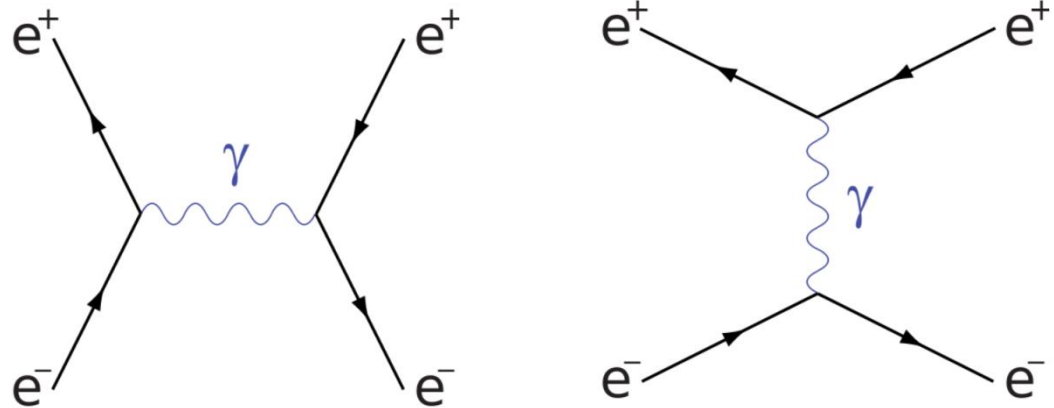
- ▶ 产生子要求给出Geant4可以接受的粒子，例如K， $\pi$ ，e等的动量大小和方向。  
如果是Higgs，胶子，则要求产生子完成强子化过程之后在输入给Geant  
反电子中微子反应截面极低，模拟他们太费时间，实际上也是按照反贝塔衰变的角分布规律直接抽样出中子和正电子能量
- ▶ 产生子由于在很多情况下涉及很多未知的待研究的内容，一般是单独给出，不属于Geant4的范畴

起始粒子的四动量是Geant4的输入量

# Bhabha产生子

起始的粒子信息是Geant4的输入量

- ▶ 在BES实验，正负电子对撞之后的产物，例如产生了正负电子——Bhabha散射，该产生子就直接产生散射后的正负电子对
- ▶ Bhabha散射过程明确已知，动力学性质清楚，有高阶的QED计算结果



- ▶ 经常被用来做对撞机亮度的刻度





# 反贝塔衰变产生子

起始的粒子信息是Geant4的输入量

- ▶ 在大亚湾实验

输入量是中微子相互作用后的产物，正电子和中子的动量信息

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

$$\left( \frac{d\sigma}{d\cos\theta} \right)^{(0)} = \frac{\sigma_0}{2} [(f^2 + 3g^2) + (f^2 - g^2) v_e^{(0)} \cos\theta] E_e^{(0)} p_e^{(0)}$$

- ▶ 该截面在 $1 \times 10^{-42}$ cm量级，如果模拟从中微子开始，意味着基本上是不可能完成的。

# 探测器模拟



# 探测器设计的研究

---

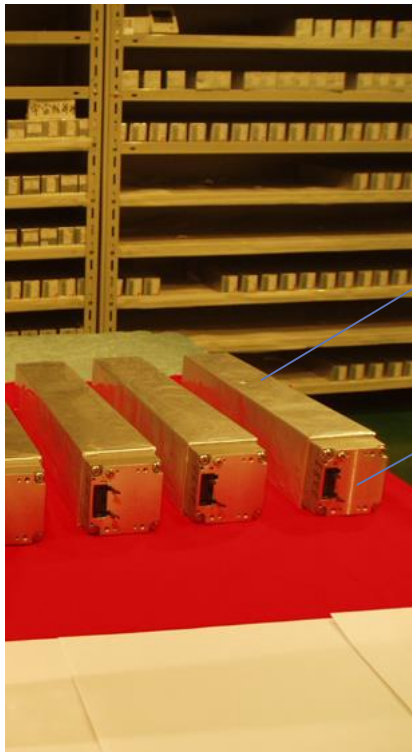
我们想回答的是：

- ▶ 探测器是否对我们的新物理敏感？
- ▶ 新型探测器是否能有期待的探测能力？
- ▶ 一段物质是否能有效的做防护？

粒子在探测器内部的输运，是Geant4的主要功能

# Geant4模拟的范围与结果

- ▶ Geant4仅仅完成了粒子的输运模拟（已经相当庞杂和丰富）
- ▶ 例如对于测量能量的晶体，将模拟完成电子光子的簇射过程，能知道有多少粒子或能量沉积在内部



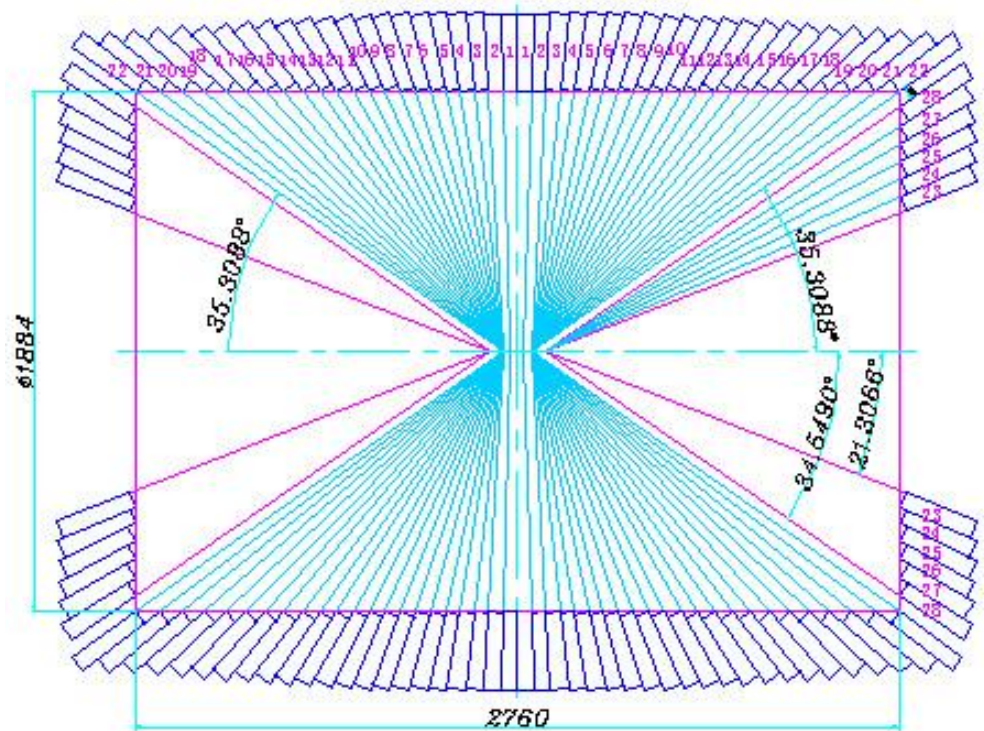
BESIII实验的量能器晶体  
晶体的主体，外部有反射膜包装

后端的电子学读出盒子，  
内有硅光二极管片

具体有多少能被硅光二极管  
片探测到多少还有很多问题

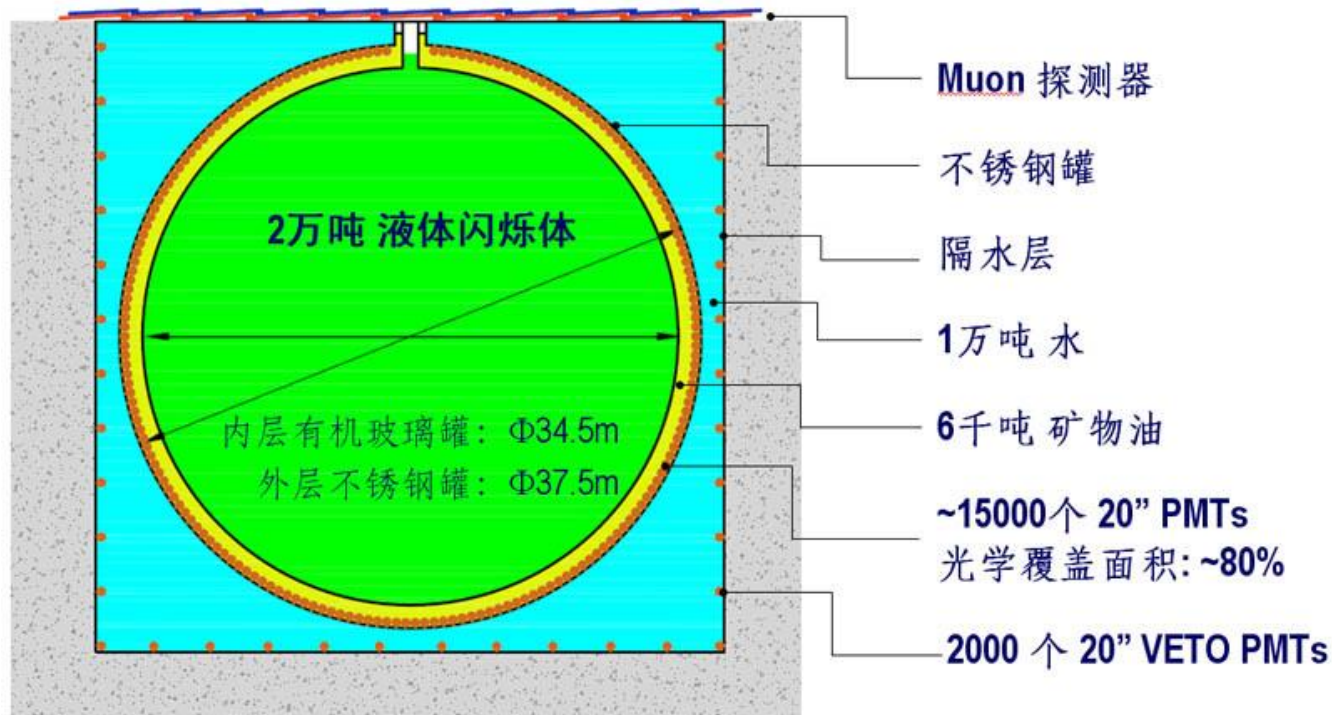
# BES的量能器

1. 立体角覆盖率
2. 晶体的长度
3. 偏心的几何设计
4. BES中 $\pi^0$ 、光子、电子的主要能区
5. 对这些粒子的能量分辨与探测效率
6. 研究对 $\tau$ , charm物理的性能, 反馈给探测器的设计方案



# 江门中微子实验的总体要求

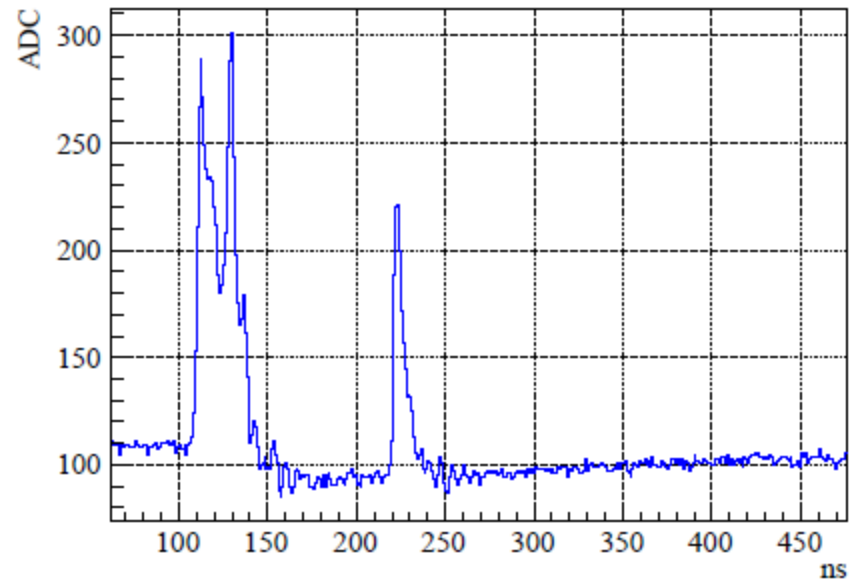
- ▶ 物理上要测量中微子质量谱排序
- ▶ 要求能达到3%的能量分辨
- ▶ 一系列的要求：液体闪烁体的光产额，透明度，PMT的量子效率，PMT光阴级的覆盖率



# 电子学模拟

# 电子学模拟（真实化，参数化）

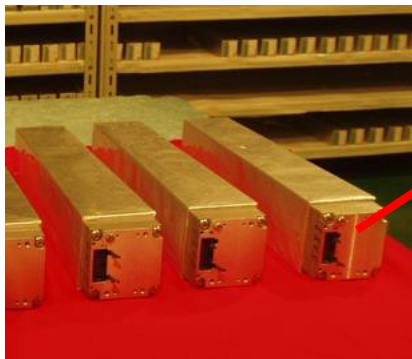
- ▶ 目标是把能量沉积转换成我们熟知的ADC，TDC或者波形（FADC）测量结果
- ▶ 测量时间，电荷，波形





# 电荷测量或模拟

- ▶ ADC（模数转化）  
Geant模拟之后只知道能量沉积，这些能量沉积有的是光信号（例如闪烁体），有些直接是电荷信号（例如阳极丝或阳极板）
- ▶ 光信号按照一定的比率转化成电信号，例如半导体探测器，PMT上的量子效率QE
- ▶ 阳极丝或者阳极板上的电荷直接可以按照有效的RC常数转化



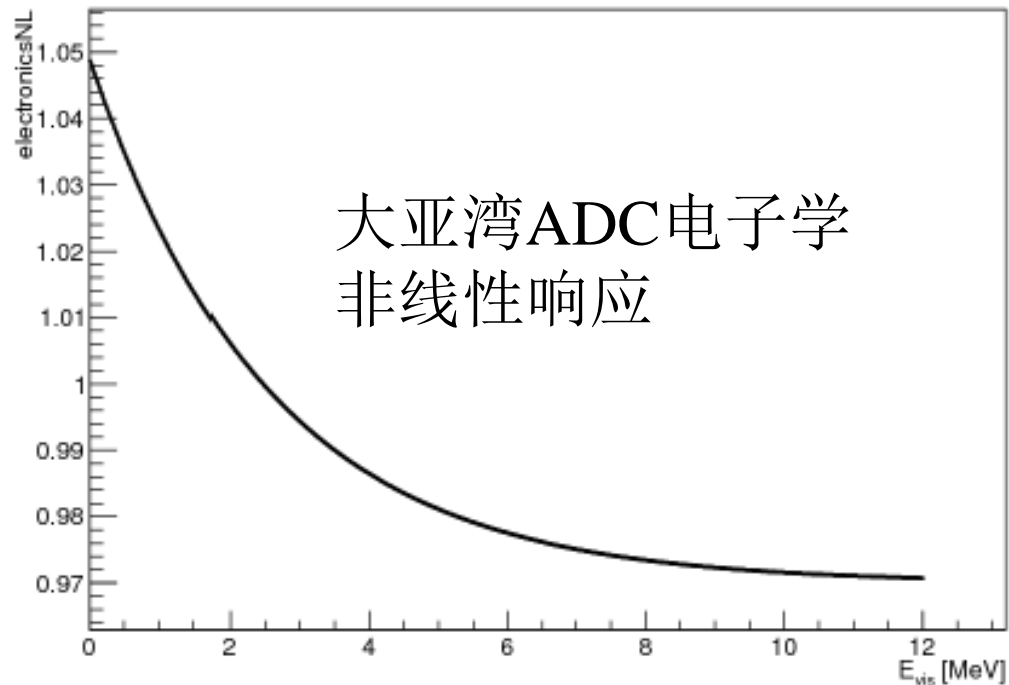
后端的电子学读出盒子，  
内有硅光二极管片

具体有多少能被硅光  
二极管片探测到？

# 电荷测量的非线性

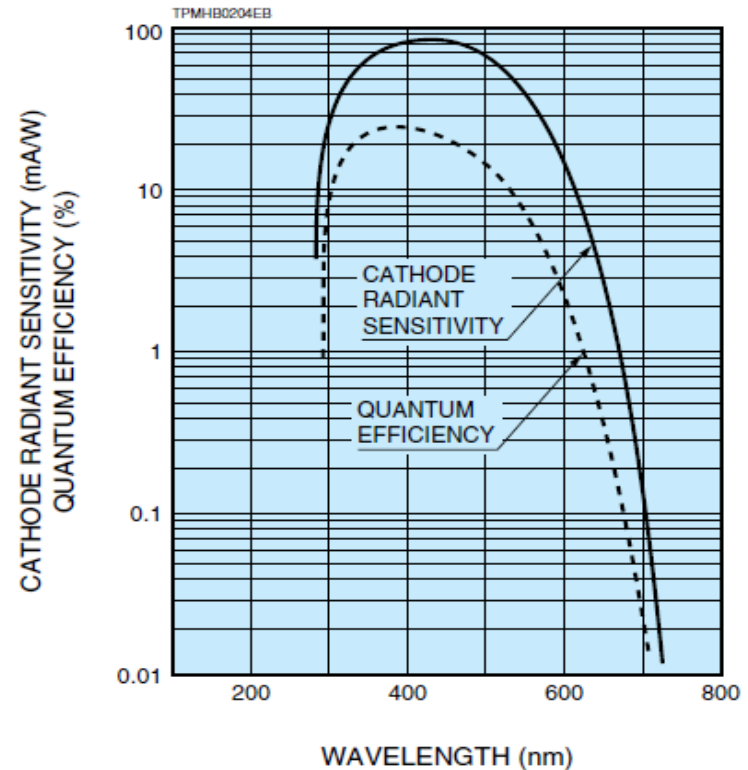
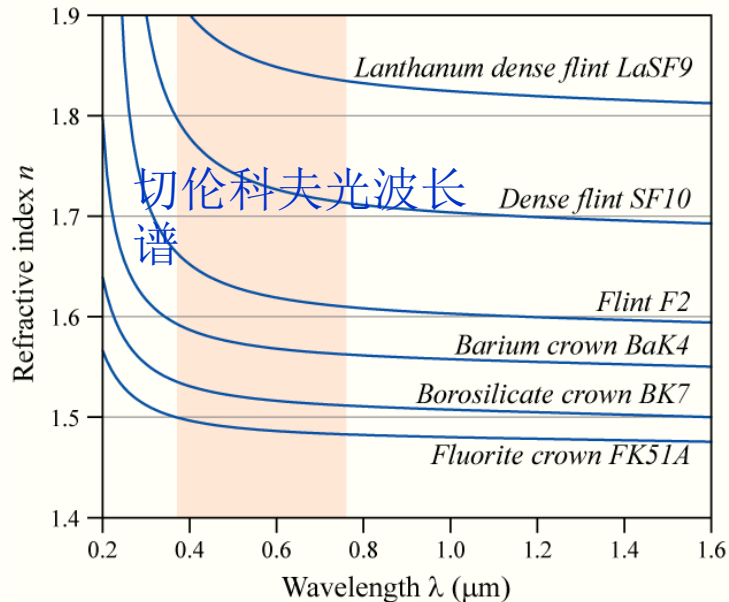
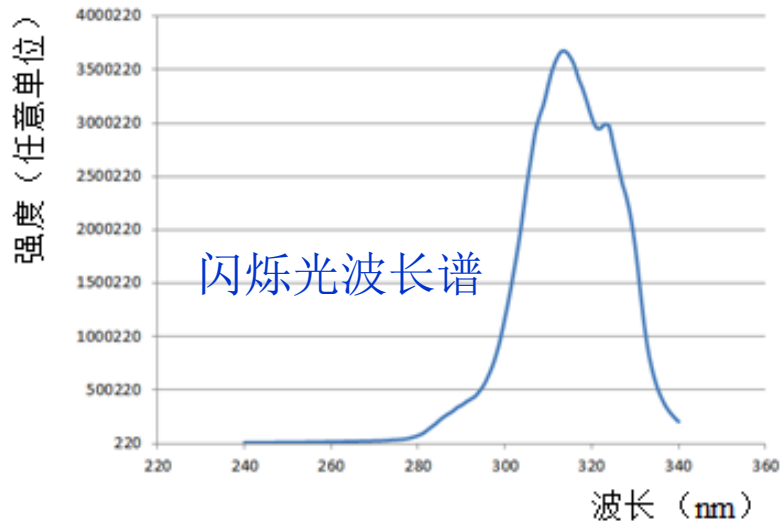
- ▶ 看起来能量沉积和读到的电荷量之间只差一个常数转换
- ▶ 非线性问题，温度问题，百分之几的误差都已近开始变得无法容忍

- ▶ 江门中微子实验：  
能量分辨3%  
非线性分辨1%



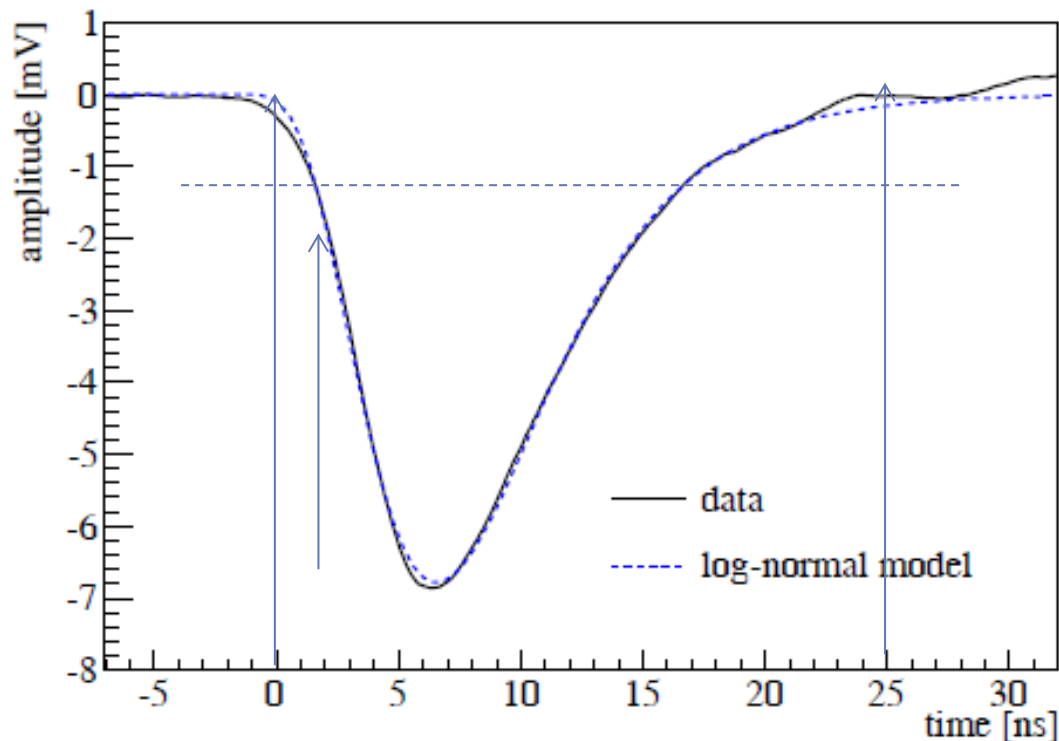
# 电荷测量波长匹配

- ▶ PMT上的波长匹配问题
- ▶ 探测到电荷和波长相关，很明确，不仅是一个常数的问题，需要频谱相乘。



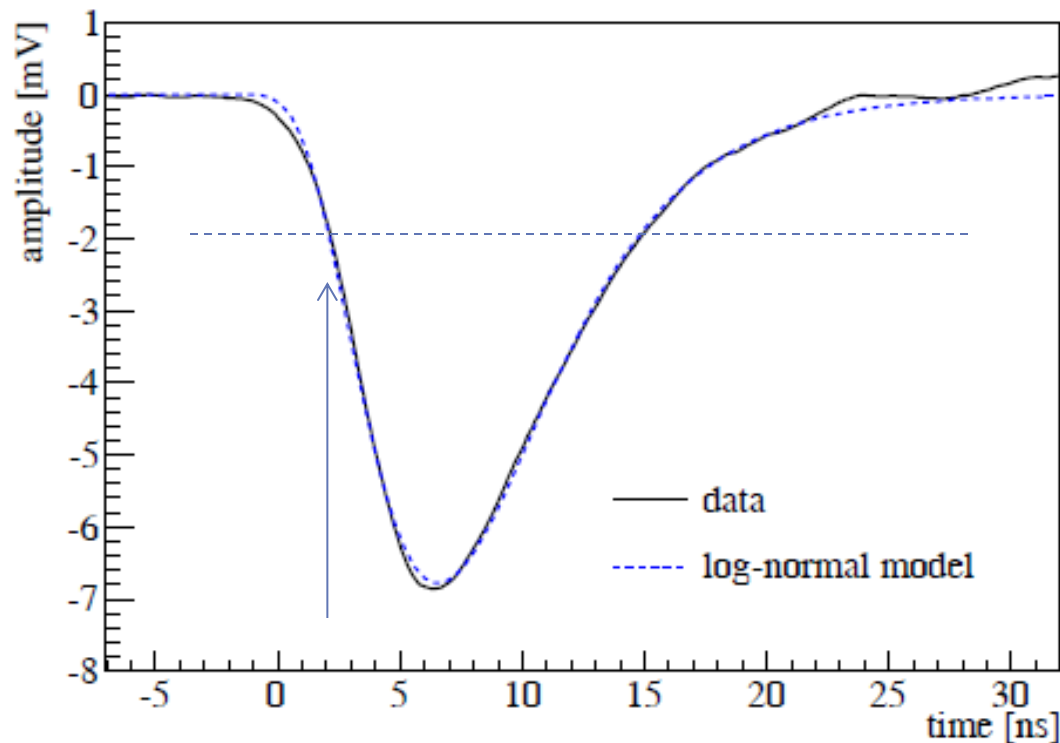
# 各种ADC采样特性

- ▶ 如下面的波形，一般的ADC测量过域后的脉冲面积
- ▶ 但很明显，根据阈值的特性，会漏掉一些
- ▶ 也和积分区间有关量，比如只有25 ns积分窗口
- ▶ 或者测量峰高，但峰高和面积之间的关系呢？



# 时间测量或模拟

- ▶ 时间测量：脉冲的过域时间
- ▶ 但我们明确的知道过域时间是随着总电荷变化的
- ▶ 时间经常用来测量位置，需要sub nano second精度





# 大亚湾上的电荷脉冲模拟

1. Geant4模拟了全部光子，直到光子到达PMT光阴级表面，所以已知全部光子的时间谱。
2. 当每个光子达到PMT时，对每个电子做了波形模拟，每个波形被替代为一个高斯函数，有典型的宽度，然后全部的单电子脉冲相叠加
3. 模拟了电子学电路的测量过程，给出了ADC与TDC

# 刻度、重建及分析



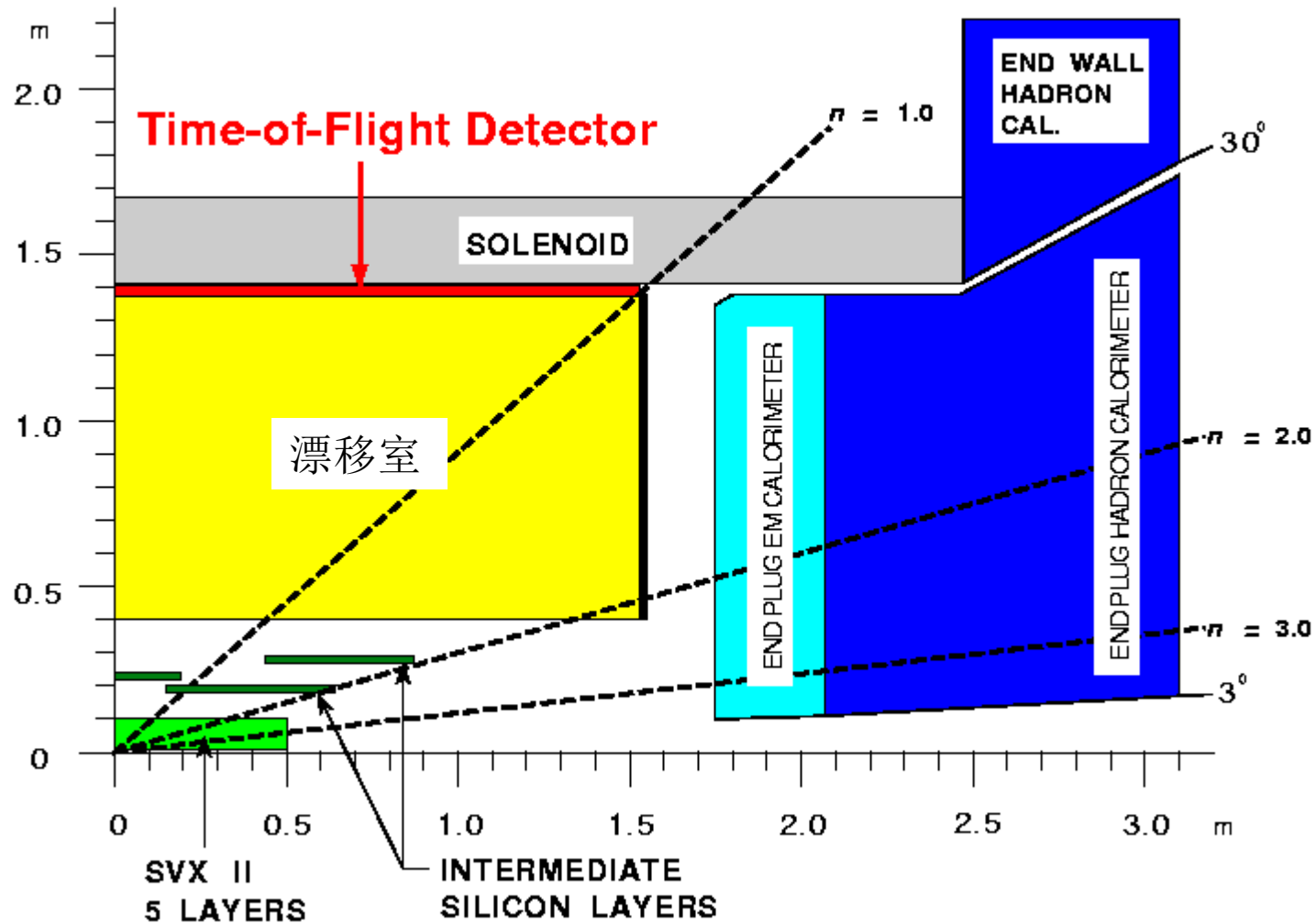
# 刻度、重建及分析

- ▶ 刻度: ADC- $\rightarrow$ PE或者电荷, TDC- $\rightarrow$ 时间, 或者是利用采集到的波形信息得到电荷和时间
- ▶ 重建: 利用电荷, 时间, 波形信息, 重建出原始粒子的方向, 动量, 及粒子类型
- ▶ 分析: 利用粒子的类型和动量信息研究期待的物理内容
- ▶ 这几个步骤应该分开详细讨论, 这里一起讨论。

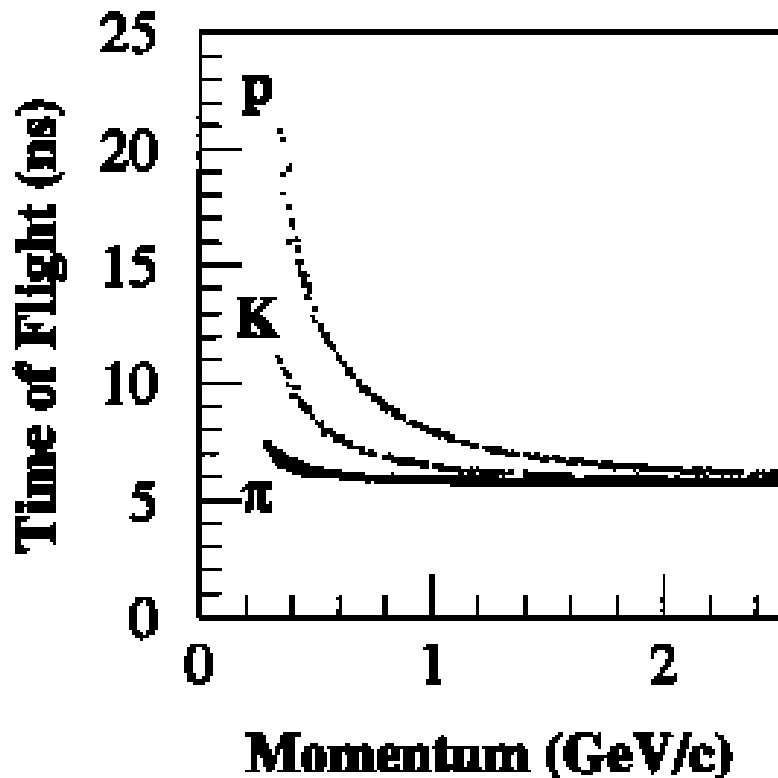


# 飞行时间探测器 (TOF) 的研究

CDF Detector

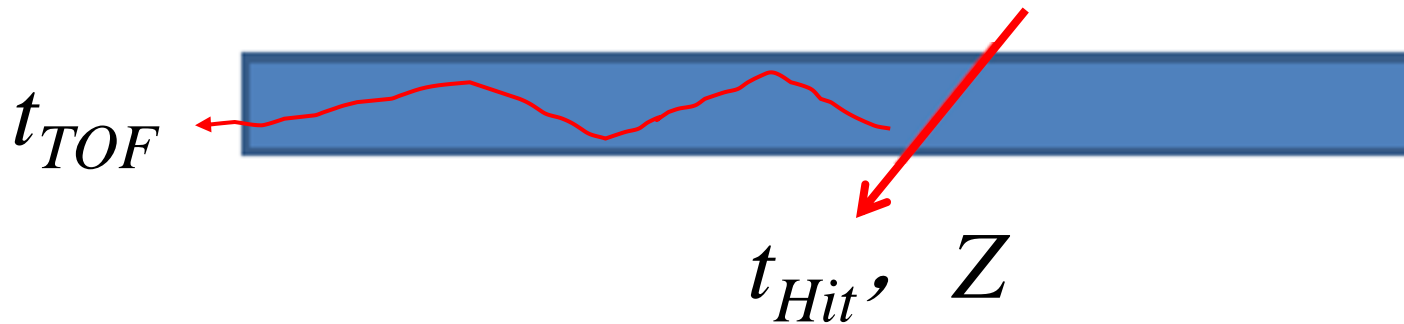


# 飞行时间探测器 (TOF) 用来做粒子鉴别



- ▶ 先用内部的漂移室重建出粒子的动量
- ▶ 在同样动量的条件下，不同粒子到达TOF的时间不同
- ▶ TOF探测器一般由塑料闪烁体，RPC等制造，有很快的时间响应
- ▶ 对TOF探测器时间响应的模拟在更多时候是对探测器的理解

# 塑料闪烁体TOF探测器-重建与分析

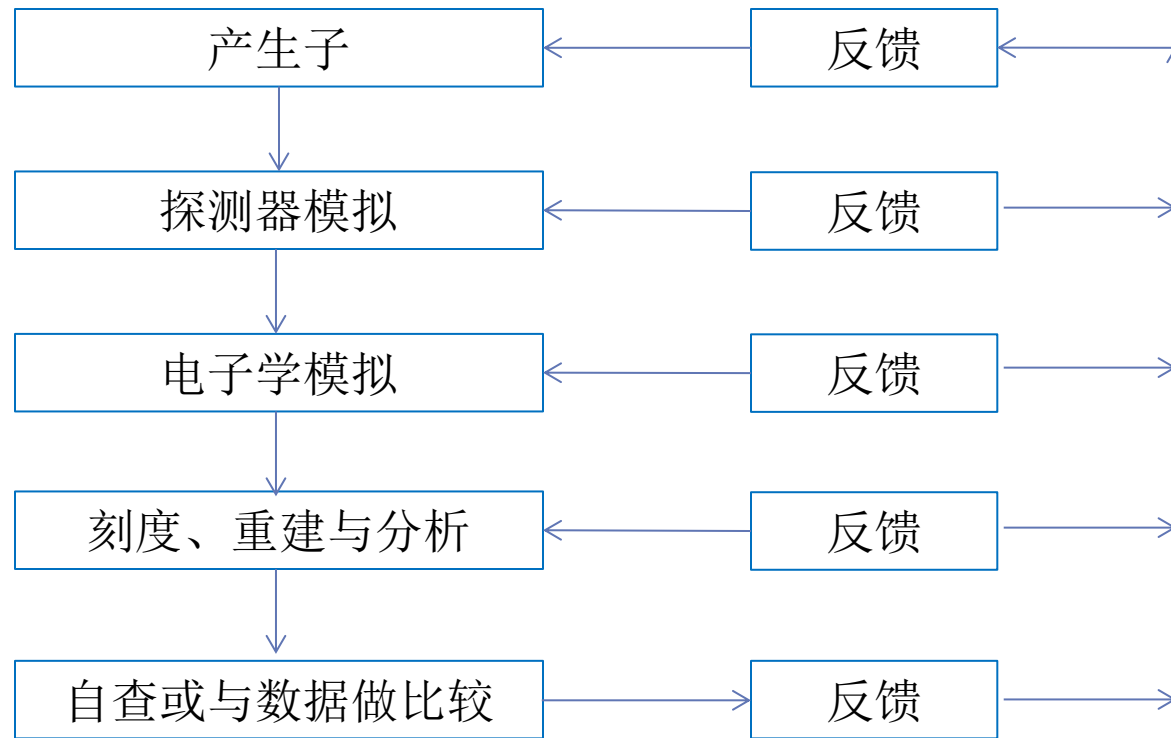


$$t_{Hit} = t_{TOF} - t_{Cor}$$

$$t_{cor} = P_0 + \frac{P_1 + P_2 \cdot Z}{\sqrt{Q}} + \frac{P_3}{Q} + P_4 \cdot Z + P_5 \cdot Z^2 + P_6 \cdot Z^3$$

$P_0$ : 时间延迟, 例如电缆长度;  $P_1$ : 时幅修正;  $P_2$ ,  $P_3$ : 时幅修正辅助项;  $P_4$ ,  $P_5$ ,  $P_6$ , 修正光在闪烁体中的有效速度

# 反馈过程



请举几个反馈的过程的例子



## ► 完整的模拟过程