

# 高能所第八次科创作业

## 第 1 题：

### 一、蒙特卡洛模拟的定义

蒙特卡洛模拟（简称 MC），就是用计算机来模拟真实的实验过程。没法真的把无数个粒子打到探测器上做实验，但是可以用电脑程序来模拟粒子穿过探测器时会发生什么，比如和探测器材料发生相互作用、产生信号这些过程。

AMS 的 MC 模拟原子核与探测器的各种相互作用，然后把模拟出来的结果数字化，就跟真实探测器测到的数据一样。在分析真实数据的时候，MC 模拟就像一个参照物，可以帮我们理解很多东西。

### 二、为什么需要蒙特卡洛模拟

主要有这几个原因：

1. **减少效率计算偏差。**真实数据有时候统计量不够，这时候用 MC 模拟可以生成大量的模拟数据，来计算效率什么的，就不会因为数据太少算不准。
2. **补充无法直接获取的信息。**有些信息从真实数据里根本得不到，比如探测器的接受度，还有能量分辨对能谱的影响，这些东西没法直接从测到的数据里算出来，但是 MC 模拟里知道粒子是怎么产生的，所以就能算。
3. **用来估计本底。**有些本底粒子混在信号里，没法直接区分开，但是用 MC 模拟可以知道大概有多少本底，然后从数据里扣掉。

4. **研究探测器的响应和效率。**比如探测器每层的探测效率，还有各种筛选条件的效率，这些都可以用 MC 来研究。

### 三、探测器接受度的物理意义

接受度 (Acceptance)，就是探测器能“看到”多少粒子的能力。就好比一个望远镜，它能看到多大范围的天空，这个范围的大小就类似接受度。

接受度决定了单位时间里探测器能探测到多少个粒子。接受度越大，能测到的粒子就越多，统计量就越好。在测宇宙线通量的时候，接受度是一个很重要的参数，因为通量等于事例数除以(接受度 × 时间)。

### 四、接受度的计算方法

因为 AMS 的探测器结构比较复杂，里面还有磁场，直接用几何方法算接受度不太好算，一般是用 MC 模拟来算的。

大概的方法是这样的：

1. 先在探测器上面定义一个很大的平面，叫 MC 产生平面。这个平面足够大，保证凡是能从上到下穿过整个探测器的粒子，都一定会先穿过这个平面。
2. 然后在这个平面上随机投点，产生很多粒子，模拟从各个方向入射的宇宙线。因为宇宙线是各向同性的，所以产生的时候要考虑角度分布。
3. 然后模拟这些粒子穿过探测器的过程，看看哪些粒子最后通过了所有的筛选条件，被探测到了。
4. 有效接受度的公式：

$$A_{\text{eff}} = A_{\text{plane}} \times (\text{筛选后的事例数} / \text{产生的总事例数})$$

其中  $A_{\text{plane}}$  是那个产生平面对入射粒子的接收度，考虑宇宙线各向同性的话， $A_{\text{plane}} = \pi \times S$  ( $S$  是平面面积)。

5. AMS 的 MC 产生平面是一个边长 3.9 米的正方形，算出来的几何因子是  $47.784 \text{ m}^2 \cdot \text{sr}$ 。

## 第 2 题：

### 一、为什么要加这些筛选条件

Event Selection 里的筛选条件，主要就是为了把想要的信号粒子挑出来，把那些本底和噪声去掉。选几个条件说明一下：

6. **径迹重建层数的条件** ( $\text{InnerNHitY} \geq 5$  之类的) 这个条件是为了保证粒子确实在探测器里留下了足够多的信号，这样才能把粒子的运动轨迹重建出来。如果只在很少的几层探测器上有信号，那径迹就重建不准，甚至可能根本就不是一个真实的粒子，而是噪声。所以要求至少有 5 层击中，而且各层之间要有合理的组合，这样重建出来的径迹才靠谱。

7.  **$\chi^2$  的条件** ( $\text{InnerNormChisqY} < 10$ )  $\chi^2$  是用来衡量拟合好不好的。如果  $\chi^2$  太大，说明拟合出来的径迹和实际的击中点差得很远，那这个径迹可能就有问题，说不定是本底粒子，或者好几个粒子叠在一起了，或者重建的时候出错了。所以要求  $\chi^2$  小于某个值，把那些拟合不好的事例都去掉。

8. **电荷筛选条件** 这个是最重要的筛选条件之一。因为要研究的是特定电荷的核子，但是探测器里还有很多其他电荷的粒子。所以要求各个探测器测出来的电荷都在目标电荷附近，这样才能保证这个粒子就是要研究的那个核子。而且不是只用一个探测器测电荷，是用好几个探测器（Inner Tracker、L1、TOF 这些）一起测，这样更准，不容易把别的电荷的粒子误判进来。

9. **L1 电荷 x-y 一致性条件** 这个条件是说 L1 探测器在 x 方向和 y 方向测出来的电荷要差不多一致。因为如果是一个真实的粒子打在 L1 上，那 x 和 y 方向测出来的电荷应该是一样的，毕竟是同一个粒子。如果两个方向差得很多，那可能就不是一个粒子，或者有噪声什么的，所以就把这种事例去掉。

## 二、主要有哪些背景

虽然加了很多筛选条件，但是还是会有一些本底粒子混进来，主要有这几种：

1. **Below L1 本底** 就是在 TRD 或者 UTOF 上发生碎裂的本底。比如说，一个电荷更高的原子核，它先通过了 L1 的筛选，然后在往下走的时候，在 TRD 里发生了核反应，碎裂成了一个电荷比较小的粒子，然后这个次级粒子又通过了下面所有探测器的筛选。这样就会把它误认为是一个从上面进来的目标核子，但其实它是在探测器中间才产生的。这种本底是用电荷模版拟合的方法来算的，就是用不同核子在 L1 上的电荷分布形状，去拟合数据，算出本底有多少。

2. **TOI 本底 (Top-of-Instrument)** 这个是在 L1 上面或者 L1 本身那里发生碎裂的本底。就是更高  $Z$  的原子核在 L1 上面的支撑结构上，或者在 L1 里就碎裂了，产生的次级粒子通过了后面的所有筛选。因为 L1 上面没有电荷测量的探测器，所以没法直接知道进来的粒子原来是什么电荷，这种本底就只能用 MC 模拟来估计。不过用 MC 估计的时候，还要考虑 MC 里的碎裂概率和真实数据是不是一样，需要用数据来修正一下。

3. **邻近电荷的核子污染** 这个是因为探测器的电荷分辨率是有限的，不是说电荷是多少就测出来正好是多少，而是有一个分布。比如硫核测出来的电荷可能在 15.5 到 16.5 之间分布，那它就可能和磷核或者氯核的分布重叠。这样的话，就会有一些邻近电荷的粒子被误判成目标核子。这种本底也是用电荷模版拟合的方法来扣除的。

### 第 3 题：

#### 一、什么是 Unfolding

Unfolding 翻译叫“解谱”或者“反演”。因为探测器的分辨率是有限的，所以测出来的粒子刚度（或者说能量）不是完全准确的，可能偏大也可能偏小。比如一个真实刚度是 100GV 的粒子，测出来可能是 90GV，也可能是 110GV。这样的话，测出来的能谱就不是真实的能谱，而是被“展宽”了的。Unfolding 就是把这种展宽的效应修正回去，从测量出来的谱反推出真实的谱。

## 二、为什么需要 Unfolding

主要是因为：

1. 探测器的分辨率不可能无限好，任何探测器都有误差。比如刚度测量，测出来的值总是围绕真实值有一个分布，不是一个确定的数。
2. 如果不修正的话，测出来的能谱形状就不对。特别是在能谱变化比较陡的地方，比如能谱突然下降的地方，展宽效应会让谱的形状变得更平缓，这样就得不到真实的物理结果了。
3. 做物理实验，最终是想知道真实的宇宙线能谱是什么样的，而不是探测器测出来的那个被扭曲了的谱。所以必须把探测器的影响去掉，才能得到真实的物理结果。

## 三、Unfolding 的基本原理

大概的原理是这样的：

1. 首先要有一个“响应矩阵”，就是说，真实刚度是  $R_{\text{true}}$  的粒子，被测量成  $R_{\text{meas}}$  的概率是多少。这个响应矩阵可以用 MC 模拟来得到，因为 MC 里知道粒子的真实刚度，也知道测出来的刚度是多少。
2. 测量出来的谱，其实等于真实的谱和探测器响应函数做卷积。就好像真实谱是原图，探测器响应是一个模糊滤镜，测出来的谱就是被模糊了的图。
3. Unfolding 就是反过来，从模糊了的图，还原出原来的清晰图。不过这个过程挺麻烦的，是一个数学上的“反问题”，不能直接倒

过来算，不然结果会很不稳定，会有很多波动。所以要用一些专门的算法，比如贝叶斯方法、迭代法什么的，来得到一个比较合理的真实谱。

#### 四、在 AMS 分析里的体现

举个例子： $Z=16$  的核子，本来是 10GV 的，但是因为碎裂还有探测器分辨率的影响，最后可能测出来是 8GV。所以在计算本底的时候，也要考虑这种刚度迁移的影响。

在最终测宇宙线通量的时候，肯定也是要做 unfolding 修正的，不然得到的能谱就不是真实的能谱了。