

# 一、

## 1. 蒙特卡洛模拟

蒙特卡洛（MC）模拟是基于已知物理相互作用模型和探测器几何/响应特性，用计算机随机模拟大量粒子在探测器中输运、相互作用及信号产生全过程的数值方法。

在数据分析过程中，MC 是飞行数据的重要参考对象。AMS MC 基于成熟的相互作用模型和对探测器细致全面的了解，可以模拟粒子在探测器中的真实情况。在流强谱的测量过程中，以 MC 为参照可以有效减少由飞行数据统计量不足造成的效率计算偏差；同时 MC 的产生信息可以弥补分析过程中无法从飞行数据获取的信息，例如探测器的有效接收度，能量分辨对能谱形状的影响。

## 2. 探测器接受度

物理意义：表征探测器“接收”并“探测”到宇宙线粒子的能力，决定了单位时间被粒子探测器探测到的粒子数目

计算方法：AMS 利用 MC 在探测器顶部定义一个边长  $L = 3.9 \text{ m}$  的正方形产生平面（面积  $S$ ），要求从上到下通过 AMS 的粒子一定会穿过该平面 AMS 的 MC 事例即产生于从该平面上的随机投点，用来模拟穿过该平面的各向同性的宇宙线事例。

(1) 几何平面接受度  $A_{plane}$ ：对于各向同性入射的宇宙线，通过对上半球立体角积分可得：

$$\begin{aligned} A_{plane} &= \int_{\Omega} d\Omega \int_S d\vec{S} \cdot \hat{r} = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin\theta d\theta \int_0^{2\pi} d\varphi \int_S \cos\theta dS \\ &= \frac{1}{2} \cdot \int_S \int_0^{2\pi} \int_0^1 d(\sin^2\theta) d\varphi dS = \pi \cdot S \end{aligned}$$

对 AMS 该平面计算值为  $47.784 \text{ m}^2 \cdot \text{sr}$ ，也称为 AMS 的几何因子。

(2) 有效接受度  $A_{eff}$ ：考虑粒子需通过全部分析筛选条件（触发、径迹重建、电荷选择等），有效接受度为：

$$A_{eff} = A_{plane} \cdot \frac{N_{i,sel}}{N_{i,gen}}$$

其中  $N_{i,gen}$  为 MC 产生的总事例数， $N_{i,sel}$  为通过全部筛选条件的事例数。

## 二、

### 1. 筛选条件

筛选条件	适用分析	添加原因
InnerNHitY >= 5 && L2 & (L3 L4) & (L5 L6) & (L7 L8)	L1Inner / FullSpan	保证径迹重建质量：Inner Tracker 至少 5 层有击中，且特定层必须有信号，确保磁场中曲率拟合可靠，得到准确的刚度 $R=p/Z$ 。
L1XY	L1Inner / FullSpan	L1 几何约束：确保粒子穿过 L1 有效探测区域，使 L1 电荷测量可用。
L9XY	FullSpan only	L9 几何约束：确保粒子穿过 L9 有效探测区域，使 L9 电荷测量可用。
InnerNormChisqY < 10	L1Inner / FullSpan	Inner Tracker 径迹归一化 $\chi^2$ 截断：剔除噪声、多径迹重叠或散射严重的非典型事例。

总之，这些筛选是在信号效率与本底抑制之间做权衡：条件越严，纯度越高，但可能漏掉更多真实信号；条件太松，则本底污染不可接受。

### 2. 背景修正

本底估计 (Background Estimation) 与背景修正 (Background Correction) 是两个前后衔接的步骤——先“估计”本底的数量和来源，再将其从数据中“修正”。

#### (1) Below L1 本底 (TRD / UTOF 上碎裂)

来源：更高电荷数  $Z$  的原子核（如 Fe、Ca 等）在穿越辐射探测器 TRD 或上部飞行时间探测器 UTOF 时与物质发生核相互作用，碎裂成目标核（如 P、S、Ar 等）。碎裂后产生的次级核仍保持原方向，穿过 L1 进入 Inner Tracker，且通过电荷筛选。

估计方法：利用 Tracker L1 的电荷响应。由于 L1 与 L2 硬件结构相似，可用 L2-L8 的纯净信号形状作为模板，对 L1 电荷分布进行多峰拟合，从而提取 Below L1 本底占比。

#### (2) TOI (Top-of-Instrument) 本底：L1 及 L1 之上支撑结构碎裂

来源：更高  $Z$  原子核在 AMS 顶部支撑结构或 L1 本身发生碎裂，产生目标核。

特点：L1 之上无电荷测量，无法像 Below L1 那样用数据拟合直接剔除，必须依赖 MC 模拟估计碎裂概率。

修正：由于 MC 模拟的核碎裂分支比可能与真实数据存在差异，需利用数据本身计算 Data/MC 修正因子。例如，在 L1 选 Fe，在 Inner Tracker 选 P，研究 Fe→P 的碎裂分支比差异，然后将修正后的分支比代入 TOI 本底计算。

### 三、

#### 1. 刚度迁移

由于探测器对粒子刚度的测量存在有限分辨率，真实刚度为  $R_{\text{true}}$  的粒子，测得的刚度  $R_{\text{meas}}$  会围绕真值呈一定分布。这意味着一部分真实刚度在  $R_1$  区间的粒子，会被“迁移”到  $R_2$  区间被记录；能谱上的尖锐结构（如截断、精细结构）会被展宽甚至畸变。

#### 2. Unfolding（展开/反卷积）

Unfolding 是将测量到的刚度分布  $N(R_{\text{meas}})$  还原为真实物理分布  $N(R_{\text{true}})$  的数学过程。测量过程可视为真实分布与探测器响应函数的卷积

$$N(R_{\text{meas}}) = \int K(R_{\text{meas}} | R_{\text{true}}) \cdot N(R_{\text{true}}) dR_{\text{true}}$$

通过反卷积（如矩阵求逆、贝叶斯迭代、正则化展开等），从  $N(R_{\text{meas}})$  反解  $N(R_{\text{true}})$ 。AMS 在计算最终通量时，事例数  $N_i$  必须“经过背景修正以及刚度迁移影响修正”，即已完成 Unfolding。如果不做 Unfolding，高刚度区域的通量会被低刚度区域“泄漏”事例污染，导致能谱形状失真，影响对宇宙线传播、加速机制等物理规律判断。