

一、蒙特卡洛模拟与探测器接受度

1. 什么是蒙特卡洛模拟？

在 AMS 探测器顶部定义一个 3.9m x 3.9m 的方形投点平面 ($z = +1.95\text{m}$)，在该平面上随机产生从上向下入射的各向同性宇宙线粒子。每个粒子穿过虚拟的 AMS 探测器，程序用 Geant4 模拟粒子与探测器材料的相互作用（电离、核碎裂、多次散射等），对信号进行数字化处理，最终模拟出和真实飞行数据格式一致的“伪数据”。

2. 为什么需要蒙特卡洛模拟？

- 真实飞行数据的统计量有限，仅靠数据本身计算效率会引入较大统计偏差。蒙特卡洛模拟可以产生任意量的事例，消除统计量不足的问题。
- 蒙特卡洛模拟保留了粒子的“产生信息”（初始位置、方向、刚度、电荷），这些在飞行数据中无法获取。例如：粒子是否在 L1 之上发生了碎裂？它的真实刚度是多少？这些信息只有这种产生大量单个事例的模拟能提供。
- 探测器的某些响应特性（如接受度、刚度分辨函数）需要用蒙特卡洛模拟来标定。

3. 探测器接受度的物理意义

接受度表征探测器“接收”并“探测”到宇宙线粒子的能力，单位是 $\text{m}^2 \cdot \text{sr}$ 。接受度越大，单位时间内能探测到越多粒子。

4. 接受度如何计算？

AMS 的接受度通过蒙特卡洛模拟模拟计算：

$$A = A_{\text{plane}} (n_{i,\text{sel}} / n_{i,\text{gen}})$$

其中 A_{plane} 是 MC 产生平面对从上方入射粒子的接受度。考虑宇宙线各向同性，通过球坐标积分：

$$A_{\text{plane}} = 47.784 \text{ m}^2 \cdot \text{sr}$$

这个值也称为 AMS 的“几何因子”，是探测器接受度的理论上限。实际分析中还需要对蒙特卡洛模拟和数据之间的差异进行效率修正。

二、事例筛选与背景估计

1. 径迹筛选

(a) 内层 Tracker 命中层数

$$\text{InnerNHitY} \geq 5 \ \&\& \ L2 \ \& \ (L3|L4) \ \& \ (L5|L6) \ \& \ (L7|L8)$$

$\text{InnerNHitY} \geq 5$ ：内层 Tracker 至少有 5 层的 Y 方向有信号，确保径迹重建有足够的采样点。

L3/L4、L5/L6、L7/L8 成对选取：物理上每一对是间距很小的双层，至少命中一个即可保证该位置有测量。L2 被单独要求，因为 L2 紧邻 L1，对排除 L1 以下的散射事件至关重要。

(b) L1 和 L9 命中

L1XY (两个方向都必须有信号)

L9XY (仅 FS 需要)

L1 是整个径迹的最上层，没有 L1 信号就无法判断粒子是否完全穿过了 TRD/UTOF。L9 用于 FullSpan 几何以延长力臂。

(c) 径迹拟合质量

InnerNormChisqY < 10

L1InnerNormChisqY < 10 && L1InnerChisqY - InnerChisqY < 10

归一化 $\chi^2 < 10$ ：每条径迹通过各层硅微条时拟合一条直线/曲线， χ^2 衡量拟合的好坏。太大说明粒子发生了散射或核作用。

增量 $\chi^2 < 10$ ：单独检查加入 L1 后 χ^2 的增量。如果加入 L1 让 χ^2 突然跳升，说明 L1 的命中点与内层径迹不一致，可能是粒子在 L1 和 L2 之间发生了散射或碎裂。

2. 电荷筛选

所有电荷筛选的核心设计原则：窗的下界比上界紧。物理原因是核碎裂只能从高 Z 到低 Z——高于 Z 核的碎片可能伪装成目标 Z，但低 Z 核不可能伪装成高 Z。

(a) 内层 Tracker 电荷

$\text{fabs}(q_{\text{inn}} - Z) < (Z \geq 14) ? 0.5 : 0.0075 * \text{pow}(Z, 1.414) + 0.198$

内层 Tracker 的电荷分辨最好，是电荷判选的核心。Z >= 14 时窗口固定；Z < 14 时窗口随 Z 增大。

(b) Tracker L1 电荷

$Z - 0.0585 * \text{pow}(Z, 1.15) - 0.35 < q_{\text{l1}} < Z + 0.0334 * \text{pow}(Z, 1.15) + 0.20$

下界系数 0.0585 > 上界系数 0.0334，即下界更紧。因为：高 Z 核在 TRD/UTOF 碎裂后，碎片进入 L1 时电荷已变为目标 Z，需要紧下界排除。上界只需排除噪声，可以宽松。

$\text{fabs}(q_{\text{l1x}} - q_{\text{l1y}}) / (q_{\text{l1x}} + q_{\text{l1y}}) < 0.2$

L1 的 X 面和 Y 面独立测量电荷。两个面测出的电荷不一致说明信号质量差（粒子击中传感器边缘或噪声干扰）。

$(q_{\text{status}}_{\text{l1}} \& 0x10013D) == 0$

L1 电荷测量的硬件状态标志位必须全部为零。0x10013D 是位掩码，每一位对应一种异常（饱和、死通道、噪声等）。"&"按位与操作提取异常位，==0 要求全部正常。

(c) UTOF / LTOF 电荷

$$Z-0.625-0.0225*(Z-9) < q_{\text{utof}} < Z+1.5$$

$$q_{\text{ltof}} > Z-0.625-0.0225*(Z-9) \text{ (for FS analysis)}$$

TOF 的电荷分辨不如 Tracker，上界非常宽松（Z+1.5），主要靠下界排除碎片本底。

(d) 筛选条件的总体逻辑

每一层子探测器独立测量电荷并施加筛选，多个子探测器（L1、Inner Tracker、UTOF、LTOF、L9）交叉验证。只有所有条件都满足的事例才被接受为信号。这种"多层独立验证"的设计最大程度排除了本底。

3. 本底类型

(a) Below L1 本底

物理来源：更高 Z 的核在 TRD 或 UTOF 上发生碎裂，碎片电荷恰好等于目标 Z，通过了 L1 和内层 Tracker 的电荷筛选。

估计方法：利用 Tracker L2 获得不同核的纯净电荷响应模板，然后在 L1 上用这些模板拟合数据，分离出信号和本底。

(b) TOI (Above L1) 本底

物理来源：更高 Z 的核在 Tracker L1 及其上方的支撑结构上碎裂，产生的碎片通过全部筛选条件。由于 L1 之上没有电荷测量信息，无法从数据中直接区分。

估计方法：用 MC 模拟产生符合 AMS 实测通量的事例，计算碎裂后进入信号区间的比例。MC 模拟的核碎裂分支比需要与飞行数据进行对比修正，以保证本底估计的准确性。

三、Unfolding 刚度迁移修正

1. 问题的来源

AMS Tracker 的刚度测量有有限的分辨率：对于真实刚度为 R 的粒子，Tracker 测出来的刚度 R_{meas} 是一个以 R 为中心但有展宽的分布（高斯核心 + 非高斯尾部）。这意味着不同真实刚度的粒子可能被测到同一个 bin 里，同一个真实刚度的粒子也可能散落到不同 bin。

如果用测到的刚度 R_{meas} 直接画通量谱，会和真实能谱有偏差——这就是"刚度迁移"。

2. Unfolding 的数学本质

探测器观测到的分布 = 真实分布 * 探测器响应矩阵（卷积）。Unfolding 就是反卷积——已知观测到的分布和探测器响应矩阵，反推真实分布。

3. 在 AMS 分析中的应用

论文中，Unfolding 修正量在低刚度区域可达+25~30%，在高刚度区域变为负值。具体方法采用了迭代贝叶斯方法，通过变化分辨函数的高斯宽度（+/-5%）和非高斯尾部幅度（+/-10%）来评估系统误差。