

一、

1.1

蒙特卡洛模拟在 AMS 实验中不是简单的"数值计算",而是从粒子产生到数据读出的一条龙全链条复现。它的核心是用随机抽样方法,模拟单个宇宙线粒子穿越 AMS 探测器并被记录为"一个数据事例"的完整物理过程。具体可分为以下五个阶段:

(1) 事例产生:

在 AMS 探测器上方定义一个虚拟产生平面,模拟程序在这个平面上进行随机投点,位置随机,方向随机,种类与能量随机。

(2) 粒子输运与相互作用:

粒子进入探测器后,程序逐步追踪其轨迹,模拟它与探测器各子系统材料的全部相关物理过程包括:电离能损、多重散射、磁场中的偏转、核相互作用(碎裂)、穿越辐射。

(3) 探测器响应:

物理过程产生的是能量沉积、电荷等"物理量",但真实探测器输出的是电子学信号。MC 需要模拟这一步。

(4) 重建与保存:

对数字化后的模拟数据,施加与真实数据完全相同的重建算法和筛选条件:径迹重建、电荷计算、事例筛选。

1.2 为什么需要蒙特卡洛

MC 在 AMS 数据分析中承担以下不可替代的功能:

1. 计算探测器的有效接受度

真实飞行数据只能告诉你"探测到了这些粒子",但无法告诉你"有多少粒子飞进了探测器视野却被漏掉了"。MC 通过"我输入了 $N_{i,gen}$ 个,输出了 $N_{i,sel}$ 个"的方式,直接给出探测效率的比例。

2. 弥补统计量不足

宇宙线通量随能量急剧下降(近似幂律 $E^{-2.7}$ 或更陡),在高刚度区(如数百 GV 以上),真实数据的事例数极少,统计涨落极大。MC 可以生成百万、千万量级的模拟事例,精确计算筛选通过率、电荷误判率、效率修正等,避免因统计量不足导致的系统偏差。

3. 建立探测器响应矩阵

MC 同时保存 R_{true} 和 R_{meas} , 可以构建刚度测量的响应矩阵 $M(R_{meas}, R_{true})$, 这是后续 Unfolding 修正刚度迁移的数学基础。

4. 本底估计

对于在 Tracker L1 及 L1 之上发生碎裂的本底(TOI),真实数据中 L1 上方没有任何电荷测量信息,这部分本底完全无法从数据本身排除。必须依赖 MC 模拟碎裂过程,并结合数据对 MC 碎裂分支比进行修正后,才能估计其贡献。

5. 验证探测器建模

MC 的重建结果与真实数据对比,如果两者吻合,说明我们对探测器几何、材料、磁场、响应的理解是正确的,基于 MC 的所有修正才是可信的。

1.3 探测器接受度的物理意义

接受度的物理意义是:探测器对从太空入射的宇宙线粒子进行"有效接收"和"成功探测"的综合能力,包含了以下三层含义:

1.几何接收:粒子必须从探测器上方的有效立体角范围内入射,且穿过探测器的敏感体积;

2.物理探测:粒子必须产生足够强的信号(电离、闪烁、辐射等),被电子学系统记录;

3.分析存活:粒子的信号必须能够通过所有事例筛选条件(径迹重建、电荷识别、质量筛选等)。

接受度直接决定了单位曝光时间内能收集到的有效事例数，是计算绝对流强 Φ 的核心分母项之一。

1.4 计算

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

其中 A_{eff} 为有效接受度， A_{plane} 产生平面的几何接收度， $N_{i,gen}$ 在产生平面上模拟产生的总事例数， $N_{i,sel}$ 在 $N_{i,gen}$ 中，通过所有与真实数据分析相同的事例筛选条件后存活的事例数

$$A_{plane} = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\pi/2} \sin\theta d\theta \int_S \cos\theta dS$$

得到 $A_{plane} = \pi S$

$$\text{最终 } A_{eff} = \pi S * \frac{N_{i,sel}}{N_{i,gen}}$$

二、

在 AMS 重核通量测量中，原始触发数据包含大量噪声、径迹质量不佳的事件，以及来自其他核素的干扰。筛选条件的核心目的在于：在尽可能高的信号保留效率与尽可能低的本底污染之间取得平衡，确保最终进入流强计算的事例满足以下三点：

1. 径迹重建质量可靠：带电粒子在永磁体磁场中的偏转径迹必须被 Tracker 各层精确测量，以保证刚度 (Rigidity) $R=p/Z$ 的重建精度；
2. 电荷识别无误：利用多个独立子探测器的电荷测量相互印证，排除邻近核素的电荷误判；
3. 几何接受度明确：根据分析需求选用 InnerL1 或 FullSpan 几何，确保事例落在已标定的接收度范围内。

1. 径迹选择

径迹筛选是后续所有物理量的基础。以 Y 方向（弯曲方向）为例：

$$(1) \text{ InnerNHitY} \geq 5 \ \&\& \ \text{L2} \ \& \ (\text{L3}|\text{L4}) \ \& \ (\text{L5}|\text{L6}) \ \& \ (\text{L7}|\text{L8})$$

该条件要求带电粒子在 Inner Tracker (L2-L8) 的 Y 方向至少产生 5 个有效击中点，且在各层均有符合逻辑与 (AND/OR) 组合的击中记录。其物理意义在于：重建刚度需要粒子在多层硅微条上留下连续的电离信号；若击中点过少，径迹拟合的自由度不足，将导致刚度分辨严重退化，甚至无法重建径迹。

$$(2) \text{ L1InnerNormChisqY} < 10 \ \&\& \ \text{L1InnerChisqY} - \text{InnerChisqY} < 10$$

此条件将 L1 的测量纳入径迹拟合，并与 Inner Tracker 独立拟合结果比较。若两者差异过大，可能表明 L1 上的信号并非来自同一粒子（例如 L1 上发生了碎裂，或存在噪声击中），从而排除径迹不连续的事件。

$$(3) \text{ L1InnerL9NormChisqY} < 10 \ \&\& \ (\text{L1InnerL9ChisqY} - \text{InnerChisqY})/2 < 10$$

在 FullSpan 几何中，径迹贯穿 L1 至 L9。该条件确保长基线径迹 (L1-L9) 与短基线径迹 (L2-L8) 在统计学上自洽，防止因 L9 噪声或碎裂导致的伪径迹进入分析。

2. 电荷选择

AMS 利用多个子探测器独立测量电荷 Z，通过冗余判选提高纯度：

$$(1) \text{ abs}(q_{inn} - Z) < \text{threshold}$$

Inner Tracker (L2-L8) 具有最优的电荷分辨能力 ($\Delta Z/Z \sim 1\%$ 量级)。将 q_{inn} 限制在目标核素 Z 的窄窗口内，是排除相邻核素本底（如 ^{28}Si 对 ^{31}P 的污染）的最有效手段。

$$(2) Z - 0.0585 \cdot Z^{1.15} - 0.35 < q_{L1} < Z + 0.0334 \cdot Z^{1.15} + 0.20$$

L1 的电荷分辨率相对较差（且位于最顶端，碎裂概率高），因此窗口较宽。但通过对 X、Y 方向电荷读数的一致性检验（ $\frac{fabs(q_{L1x} - q_{L1y})}{(q_{L1x} + q_{L1y})} < 0.2$ ），可以剔除在 L1 上发生侧向碎裂、导致两维电荷读数显著不对称的事件。同时，状态字筛选排除探测器死通道或饱和通道的误读。

背景修正

经过上述筛选，最终样本中仍混有不可忽略的本底，主要来自以下

1. Below L1 本底（TRD 与 UTOF 上的碎裂）

更高原子序数的宇宙线核（如 Fe、Ca 等）在穿过 L1 后，于 TRD 或 UTOF 的较厚物质中发生碎裂（fragmentation），产生目标核素（如 P、S）。这些碎裂产物继续向下飞行，由于 L1 的电荷测量记录的是原始重核，而 Inner Tracker 记录的是碎裂后的轻核，此类事件会穿透电荷筛选。

修正方法：利用 L2-L8 纯净的电荷分布作为模板，对 L1 的电荷分布进行多峰拟合（Template Fit），从而提取 Below L1 本底在总样本中的占比，并从信号中扣除。

2. TOI 本底（Top-of-Instrument, L1 及上方支撑结构碎裂）

部分重核在 L1 传感器本身或 L1 之上的 AMS 支撑结构（机械支架、热控层等）中发生碎裂。由于 L1 之上无电荷测量，原始重核信息完全丢失，碎裂产物从 L1 开始即被误判为信号核。

修正方法：此类本底无法通过数据中的电荷拟合直接分离，必须依赖蒙特卡洛（MC）模拟估计碎裂概率。为进一步提高精度，还需利用真实数据与 MC 的碎裂分支比差异（如 Fe→P、Fe→Cl 等）对 MC 估计进行 Data/MC 修正。

3. 电荷误判本底

由于 Tracker L1 的电荷分辨有限，邻近核素的电荷分布存在交叠（如 Si 与 P、P 与 S 之间）。即使粒子未发生碎裂，也可能因 Landau 涨落或电子学噪声导致电荷读数落入目标窗口。此类本底通过 Inner Tracker 的窄窗口可大部分排除，但在 L1 层面仍需在系统误差中予以考虑。

三、

刚度迁移的物理起源

在 AMS 实验中，带电宇宙线核的刚度 $R=p/Z$ 是通过 Tracker 多层击中位置的径迹拟合，结合永磁体磁场强度反演得到的。然而，由于探测器分辨率有限及粒子与物质相互作用的固有涨落，真实刚度 R_{true} 与测量刚度 R_{meas} 之间并非一一对应，而是存在统计性的偏移与展宽：

1. 多重库仑散射：粒子穿过 Tracker 各层硅传感器及支撑结构时发生多次小角度散射，导致径迹偏离理想圆弧，拟合刚度产生随机偏差；

2. 能量损失涨落：粒子在探测器物质中的电离能损存在 Landau 涨落，导致动量 p 并非严格守恒，低能区尤其显著；

3. 磁场不均匀性与探测器对准误差：永磁体磁场存在微小空间不均匀性，加之各硅微条层的机械对准存在微米级误差，引入系统性的刚度偏差；

4. 有限位置分辨：硅微条的位置分辨（约 $7.6 \mu m$ ）使得径迹拟合存在固有不确定性，经磁场转换后表现为刚度分辨的展宽。

上述效应导致：一个具有单一真实刚度 R_{true} 的粒子群，在测量端会呈现以 R_{true} 为中心的展宽分布（近似高斯，但伴有非高斯拖尾）；同时，不同 R_{true} 的分布相互交叠，使得观测到的刚度谱 $g(R_{meas})$ 是真实谱 $f(R_{true})$ 经探测器响应“模糊化”后的结果。

在 AMS 数据分析中，Unfolding 通常遵循以下步骤：

1. 构建响应矩阵 A

利用大规模蒙特卡洛（MC）模拟，对已知真实刚度 R_{true} 的样本进行完整的探测器数字化与重建，统计 R_{true} 与 R_{meas} 的二维关联分布。由于 AMS MC 对径迹重建、散射模型、能量损失等物理过程有精细描述，该矩阵可较准确地刻画探测器的刚度响应。

2. 选择 Unfolding 算法

常用的算法包括：

Bayesian 迭代法 (D'Agostini Unfolding)：基于贝叶斯定理，利用先验分布（通常取测量谱或平坦谱）迭代更新真实谱估计，收敛后得到满足测量数据的最大似然解，同时通过正则化抑制统计涨落；

SVD Unfolding：对响应矩阵进行奇异值分解，通过截断小奇异值实现正则化，适用于统计量较大的情况；

Matrix Inversion with Regularization：在最小二乘框架下加入 Tikhonov 正则化项，平衡拟合优度与解的光滑性。

3. 传播统计与系统误差

Unfolding 不仅修正了能谱的中心值，还会改变各能区的统计误差关联结构（协方差矩阵）。因此，在流强计算中需将 Unfolding 后的协方差矩阵完整纳入误差传播，确保最终通量结果的误差估计准确。

4. 与 MC 的交叉验证

将 Unfolding 后的能谱与 MC 的输入能谱对比，验证修正的线性度与偏差；同时利用束流测试（Test Beam）数据独立检验刚度分辨模型，确保 Unfolding 结果的可信度。

刚度迁移修正（Unfolding）是一种利用探测器响应矩阵，将受分辨率展宽、散射等效应扭曲的测量刚度分布，反演回物理真实刚度分布的数学方法。它是 AMS 精确测量宇宙线能谱的关键环节之一，其可靠性直接依赖于 MC 对探测器响应的建模精度以及算法对统计涨落的抑制能力。未经 Unfolding 的刚度谱在峰值处会被“抹平”，在高端端会因迁移效应出现虚假的事例数增减，从而歪曲宇宙线流强的幂律指数。