

一、蒙特卡洛模拟与探测器接受度

1. 什么是蒙特卡洛模拟？

蒙特卡洛模拟 (Monte Carlo Simulation, MC) 是一种利用随机抽样进行数值计算的方法, 也是 AMS 宇宙线实验中最重要数据分析工具之一。模拟时, 程序首先在探测器顶部建立一个边长为 3.9 m 的正方形投点平面, 在平面上按照各向同性分布随机产生大量宇宙线粒子, 然后利用 Geant4 模拟粒子在探测器中的传播过程, 包括电离能量损失、多重散射、核碎裂、磁场偏转以及探测器电子学响应等过程。最后再完成信号数字化、径迹重建以及事例筛选, 使模拟数据与真实飞行数据采用完全相同的数据格式和分析流程。

与真实实验不同的是, 蒙特卡洛模拟能够记录每个粒子的真实信息, 例如真实刚度、真实电荷、真实入射方向以及是否发生碎裂等, 因此能够建立真实值与测量值之间的对应关系, 为后续的数据修正提供依据。

2. 为什么需要蒙特卡洛模拟？

第一, 计算探测器效率和接受度。真实飞行数据只能看到最终保留下来的事件, 而无法知道一开始有多少粒子进入探测器, 因此不能直接计算各种探测效率。利用 MC 模拟, 可以准确统计生成粒子数和最终通过筛选的粒子数, 从而计算接受度和各种效率修正。

第二, 研究探测器响应。探测器会受到空间分辨率、电子学噪声、多重散射等因素的影响, 导致测量结果与真实值存在偏差。MC 可以完整模拟这些过程, 从而研究探测器的分辨率、响应函数以及不同探测器之间的一致性。

第三, 估计背景。有很多高电荷核碎裂、次级粒子以及探测器材料中的相互作用, 仅利用实验数据难以区分。MC 可以统计不同背景产生的概率, 并计算背景进入信号区间的比例, 为背景修正提供依据。

第四, 建立响应矩阵。在后续刚度迁移修正 (Unfolding) 中, 需要知道真实刚度和测量刚度之间的对应关系, 这一响应矩阵也是利用蒙特卡洛模拟建立的, 因此 MC 是 unfolding 的基础。

3. 探测器 Acceptance 的物理意义

Acceptance (接受度) 表示探测器能够有效接收并成功重建宇宙线粒子的能力, 单位为 $\text{m}^2 \cdot$

sr。它不仅与探测器的几何面积有关，还包含触发效率、重建效率、探测效率以及事件筛选效率等因素，因此能够反映真实实验中探测器最终能够记录多少粒子。

如果 Acceptance 较大，说明探测器能够记录更多满足条件的粒子；如果 Acceptance 较小，则说明更多粒子在探测过程中因为探测效率不足或筛选条件限制而被舍弃。在计算宇宙线通量时，Acceptance 是必须进行修正的重要参数。

几何因子是理想情况下探测器能够覆盖的最大接受能力，而实际 Acceptance 一定小于几何因子，因为真实探测器还会受到探测效率、重建误差以及筛选条件等因素的影响。

4. Acceptance 如何计算？

AMS 的 Acceptance 通过蒙特卡洛模拟计算，其表达式为： $A = A_{\text{plane}} \times (N_{\text{sel}} / N_{\text{gen}})$

A_{plane} 表示投点平面的几何因子； N_{gen} 表示在投点平面产生的总模拟事例数； N_{sel} 表示经过探测器响应模拟、径迹重建以及全部筛选条件后最终保留下来的事例数。

A_{plane} 可以通过对各向同性入射粒子进行积分得到，其数值约为 $47.784 \text{ m}^2 \cdot \text{sr}$ ，也称为探测器的理想几何因子。

实际计算过程中，首先在探测器顶部建立一个面积大于探测器的投点平面，保证所有可能进入探测器的粒子都先经过该平面。随后按照各向同性方向产生大量模拟粒子，完成模拟、电子学响应以及数据重建后，再统计最终保留下来的事件数量。 N_{sel} 与 N_{gen} 的比值表示整个分析流程的综合效率，因此最终得到的 Acceptance 已经同时包含了几何因素、探测效率以及事件筛选效率，比单纯利用几何面积更加符合真实实验情况。

二、事例筛选 (Event Selection) 与背景修正

1. 内层 Tracker 命中层数

$\text{InnerNHitY} \geq 5$ 且要求 L2、(L3 或 L4)、(L5 或 L6)、(L7 或 L8) 都有击中。

这一条件要求粒子在内层 Tracker 中至少留下 5 个有效击中点，并且必须经过多个探测层。由于刚度测量依赖于粒子轨迹的重建，如果击中层数不足，轨迹拟合会变得不稳定，刚度测量误差也会明显增大。因此要求较多的命中层数可以提高轨迹重建精度，同时减少由于电子学噪声或者随机击中形成的假径迹。

其中 L2 被单独要求, 是因为 L2 紧邻 L1, 可以帮助判断粒子是否真正穿过整个 Tracker; 而 L3/L4、L5/L6、L7/L8 采用"至少命中一层"的方式, 是因为每一对探测层距离很近, 即使其中一层没有信号, 另一层仍然能够提供有效测量, 因此不会明显降低测量精度。

2. L1 和 L9 命中要求

对于 FullSpan 分析, 还要求粒子同时命中 L1 和 L9。

L1 是 Tracker 最上层探测器, 如果没有 L1 信号, 就无法确定粒子是否完整穿过 TRD 和 UT0F, 也无法判断粒子是否在进入 Tracker 前已经发生碎裂。L9 位于最下方, 加入 L9 后可以明显增加轨迹测量的力臂, 使刚度测量更加准确, 特别是在高刚度区域, 较长的测量距离能够有效提高刚度分辨率。因此, 对于 FullSpan 分析通常要求 L1 和 L9 同时参与轨迹重建。

3. 径迹拟合质量

$\text{InnerNormChisqY} < 10$

χ^2 用于衡量轨迹拟合结果与实际击中位置之间的一致程度。 χ^2 越小, 说明拟合轨迹越接近真实轨迹; 如果 χ^2 很大, 则说明击中点之间偏差较大, 可能是粒子发生了较强散射, 也可能是不同粒子的击中点被错误组合成一条轨迹。

实验中要求归一化 χ^2 小于 10, 就是为了去除拟合质量较差的轨迹。这类事件如果继续参与分析, 会导致刚度测量误差增加, 并影响最终通量测量结果。

此外, 还会比较加入 L1 前后的 χ^2 变化。如果加入 L1 后 χ^2 明显增大, 说明 L1 的击中点与内层轨迹不一致, 粒子可能已经在 L1 与 L2 之间发生了散射或核碎裂, 因此一般也会将这类事件去除。

4. 电荷筛选

电荷筛选是核素分析中最重要的筛选条件之一, 其目的是只保留目标电荷对应的粒子, 去除其他核素产生的背景。

AMS 中, Tracker、TOF 等多个子探测器都能够独立测量粒子电荷, 因此分析时会分别对各个探测器施加电荷窗口要求。只有所有探测器测得的电荷均满足要求时, 该事件才会被认为是真正的目标核。电荷窗口通常设计成下界比上界更严格, 这是因为高电荷原子核发生碎裂

后,其电荷只能减小,不可能增大。因此,更高 Z 核碎裂后产生的碎片更容易落入目标核区域,需要通过更严格的下界限制进行排除,而上界主要用于抑制电子学噪声,因此可以适当放宽。

多个探测器共同进行电荷判断,相当于对同一粒子进行了多次独立测量,可以明显降低误判概率,提高目标样本纯度。

本底类型

(1) Below L1 本底

Below L1 背景主要来源于高电荷原子核在 TRD 或 UTOF 中发生核碎裂。碎裂后产生的碎片电荷可能刚好等于目标核,因此能够通过内层 Tracker 的电荷筛选,最终混入目标样本。这一部分背景通常利用 L2 获得不同核素较纯净的电荷模板,再对 L1 电荷分布进行拟合,从而估计背景比例,并从最终结果中扣除。

(2) Above L1 (TOI) 本底

TOI (Top Of Instrument) 背景是指高电荷核在 L1 或 L1 上方支撑结构发生碎裂后产生的背景。由于碎裂发生在 L1 以上,实验已经无法获得碎裂前粒子的真实电荷,因此仅利用飞行数据不能直接区分信号与背景。这类通常依赖蒙特卡洛模拟进行估计,再结合飞行数据对碎裂概率进行修正,提高背景估计的准确性。

三、刚度迁移修正 (Unfolding)

1. 什么是刚度迁移?

刚度 (Rigidity) 定义为粒子的动量与电荷之比,即 $R = p/Z$ 。在 AMS 中,刚度主要通过粒子在磁场中的偏转程度进行测量。有些粒子的刚度会被测得偏高,有些则会偏低,因此原本属于某一个刚度区间的粒子可能会被分到相邻区间,这种现象称为刚度迁移 (Rigidity Migration)。

2. 什么是 Unfolding?

Unfolding 其目的就是根据探测器的响应特性,把受到探测器分辨率影响后的测量结果恢复到更接近真实情况的分布。真实刚度分布经过探测器测量以后,会由于分辨率有限而产生展宽,因此实验中直接测得的是经过探测器响应后的分布,而不是粒子的真实分布 Unfolding

就是利用数学方法对这种情况进行反演，从测量谱中恢复真实谱。

3. Unfolding 是如何实现的?

Unfolding 的第一步是利用蒙特卡洛模拟建立探测器响应矩阵。响应矩阵中的每一个元素表示：真实位于第 i 个刚度区间的粒子，有多大概率会被测量到第 j 个刚度区间。由于蒙特卡洛模拟同时保存了粒子的真实刚度和测量刚度，因此能够统计不同刚度区间之间发生迁移的概率，并建立完整的响应矩阵。

得到响应矩阵后，再将实验测得的刚度谱与响应矩阵结合，利用数学方法反推出真实刚度谱。

4. Unfolding 在 AMS 数据分析中的作用

完成 Acceptance 修正、背景扣除以及各种效率修正之后，还需要进行 Unfolding，才能尽可能恢复真实的宇宙线刚度分布。为了评估这一修正带来的系统误差，实验中通常还会改变响应矩阵参数，例如适当调整刚度分辨率或非高斯尾部大小，观察最终通量变化，从而估计 Unfolding 对测量结果造成的不确定性。