

1 蒙特卡洛模拟与探测器的接受度

什么蒙特卡洛模拟，为什么我们需要这个？探测器的接受度的物理意义是什么，这个是如何计算出来的？

1.1 蒙特卡洛模拟

蒙特卡洛方法是一种基于随机抽样的数值计算方法，其基本思想是通过大量随机采样来近似求复杂的数学问题或模拟物理过程。在粒子物理实验中，蒙特卡洛模拟是指利用计算机程序，根据已知的物理规律或概率分布，随机生成大量的“假想”的粒子事件，并模拟这些粒子在探测器中从入射到产生信号的全过程。

一次完整的蒙特卡洛模拟包含三个步骤：（1）事例产生——根据物理模型随机生成粒子的种类、能量、方向等信息；（2）探测器模拟——模拟粒子在探测器几何结构中的输运过程，包括与探测器材料的相互作用、能量沉积、信号产生等；（3）重建模拟——模拟电子学响应和数据处理过程，将探测器信号“重建”为可分析的物理量，如电荷、动量等。

在 AMS 实验中，蒙特卡洛模拟基于 GEANT4 软件包，该软件由 CERN 开发，是粒子物理领域最常用的探测器模拟工具。AMS 的蒙特卡洛模拟“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”。

1.2 蒙特卡洛模拟的重要性

- （1）**实验数据的解读需要参照系。**探测器记录到的原始数据只是电子学信号，物理学家需要知道这些信号对应什么样的入射粒子。蒙特卡洛模拟提供了“已知输入、已知输出”的完美参照——模拟中每个粒子的种类、能量、入射方向都是预先设定的，因此可以用来标定探测器的响应特性。“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”。
- （2）**弥补实验无法获取的信息。**在实际飞行数据中，物理学家无法知道一个被记录下来的粒子在进入探测器之前是什么、经历了什么。而蒙特卡洛模拟的“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”。
- （3）**探测器设计和优化。**在探测器建造之前，蒙特卡洛模拟可用于评估不同设计方案的性能。例如 AMS 的 L0 升级项目，就是通过模拟评估新增探测器层对接收度的提升效果后做出的决策。中科院高能物理研究所在环形正负电子对撞机 CEPC 等未来实验的预研中，也广泛采用蒙特卡洛方法来优化探测器设计。

- (4) **本底估计与系统误差研究。**实验数据中不可避免地混杂着各种本底，如高 Z 粒子碎裂产生的低 Z 粒子。蒙特卡洛模拟可以定量估计这些本底的贡献，并通过改变模拟参数来评估系统误差。
- (5) **理论与实验的桥梁。**蒙特卡洛模拟可以将理论模型的预言转化为具体的、可与实验数据直接对比的“模拟数据”，从而检验理论的正确性。

1.3 探测器接受度的物理意义

接受度表征探测器“接收”并“探测”到粒子的能力。更精确地说，接受度 A 定义为：在单位时间内、单位面积上、从单位立体角内入射的粒子中，能够被探测器有效记录的比例与几何接收面积的乘积。接受度是连接入射粒子通量与探测器记录事例数的关键纽带。接受度有两种常见形式：(1) 几何接受度：仅考虑探测器的几何结构对入射粒子的限制，不考虑探测效率和相互作用。对于理想探测器，其接受度完全由几何决定。(2) 有效接受度：在几何接受度的基础上，进一步考虑探测效率、粒子与探测器材料的相互作用、触发效率、重建效率等因素。

在通量测量的基本公式中：

$$\Phi_i = \frac{N_i}{A_i \epsilon_i T_i \Delta R_i} \quad (1)$$

其中 A_i 即为有效接受度。从公式可以看出，接受度将探测器记录到的事例数 N_i 转换为物理上感兴趣的宇宙线通量 Φ_i ——如果接受度计算不准，整个通量测量就会产生系统偏差。

1.4 接受度的计算方法

1.4.1 几何接受度的解析计算

对于结构简单的探测器，几何接受度可以通过解析方法精确计算。以 AMS 为例，其蒙特卡洛模拟在探测器上方定义一个边长为 $L = 3.9\text{ m}$ 的正方形产生平面，位于 $z = +1.95\text{ m}$ 处，要求从上方穿过 AMS 的粒子必然穿过该平面。考虑宇宙线为各向同性分布，产生平面对从上方入射粒子的几何接受度为：

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

其中 $S = L^2 = 15.21\text{ m}^2$ ，因此：

$$A_{\text{plane}} = \pi \times 15.21 \approx 47.78\text{ m}^2 \cdot \text{sr} \quad (2)$$

这个值也被称为 AMS 的几何因子。对于更复杂的多探测器望远镜系统，几何因子的解析计算可能相当复杂。Sullivan 在 1971 年的经典论文中给出了圆形和矩形探测器组合的几何因子精确公式。

1.4.2 有效接受度的蒙特卡洛计算

在实际中，有效接受度 A_{eff} 通过蒙特卡洛模拟计算：

$$A_{\text{eff}} = A_{\text{plane}} \cdot \frac{N_{i,\text{sel}}}{N_{i,\text{gen}}} \quad (3)$$

其中 $N_{i,\text{gen}}$ 是 MC 投点平面产生的总事例数， $N_{i,\text{sel}}$ 是经过事例筛选后得到的事例数。比值 $N_{i,\text{sel}}/N_{i,\text{gen}}$ 实际上包含了所有探测效率因素——几何限制、粒子在探测器材料中的相互作用损失、探测器的响应效率、触发效率、重建效率等。

MC 产生平面上的投点是各向同性的，这保证了模拟的入射粒子分布与真实的各向同性宇宙线分布一致。通过这种方式，蒙特卡洛模拟可以将复杂的探测器响应“编码”进一个简洁的接受度数值中。由于真实情况下探测器对飞行数据的探测效率和 MC 模拟存在稍许差别，还需要根据各个子探测器的筛选条件对两者的差异进行修正。这些修正包括 L1 重建效率、UTOF 电荷选择效率、Inner Tracker 重建和电荷筛选效率等。中科院高能物理研究所参与 AMS 合作的多项研究正是围绕这些探测器效率的精确标定展开的。

2 筛选条件与背景修正

我们可以通过一些基础的电荷筛选等，可以得到一个核子的事例数，参考下列筛选条件，Event Selection for data analysis 部分，思考我们为什么要加这些筛选条件（不一定每个条件都要写，自己任选）？背景修正是这里主要有哪些背景？

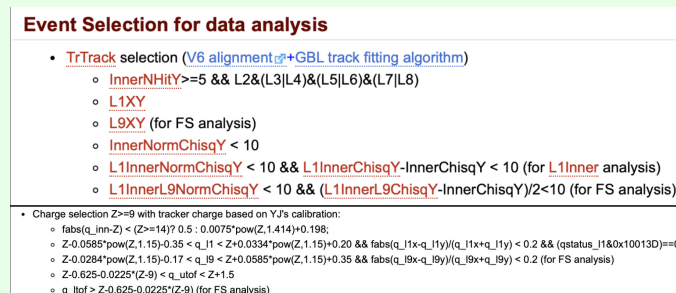


图 1: 数据分析筛选条件

2.1 AMS 硅微条径迹探测器的几何布局

要理解这些筛选条件，首先需要明确 AMS Tracker 的几何结构。AMS 的硅微条径迹探测器共包含 9 层，其空间分布如下：

- L1: 位于探测器最顶部, TRD 之下
- L2: 位于磁铁上方
- L3–L8: 共 6 层, 位于磁铁孔径内部
- L9: 位于最底部, 电磁量能器 ECAL 之上

每一层均由双面硅微条探测器构成, 可独立测量 x 和 y 两个方向的坐标。其中, L1 和 L9 位于磁铁外部, 被称为“外部径迹层”。L2 至 L8 构成所谓的“Inner Tracker”, 即内部径迹室。AMS 的坐标系中, y 方向为磁场弯曲方向, 即刚度测量的敏感方向, x 方向平行于磁场主分量, z 轴竖直向上。

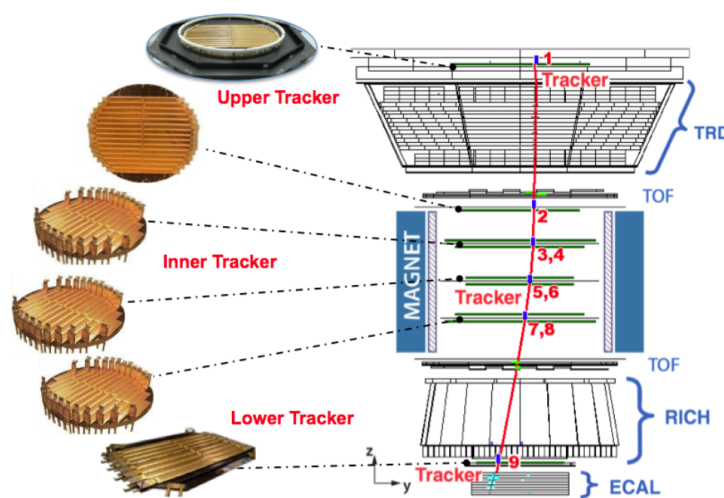


图 2: AMS 硅微条径迹探测器的几何布局结构示意图

2.2 筛选条件

2.2.1 $\text{InnerNHitY} \geq 5 \ \&\& \ L2 \& (L3|L4) \& (L7|L8)$

InnerNHitY 表示在 L2–L8, 共 7 层的 Inner Tracker 的 y 方向上, 被该粒子击中的探测器层数。要求 $\text{InnerNHitY} \geq 5$, 即粒子至少在 Inner Tracker 的 5 层中留下了 y 方向的击中信号。这里强调 y 方向的原因是刚度的测量依赖于粒子在磁场中轨迹的弯曲程度, 而弯曲发生在 y - z 平面内。 y 方向的击中点越多, 径迹拟合的参数越精确, 刚度测量的分辨率就越高。

$L2 \& (L3|L4) \& (L7|L8)$ 是对 Inner Tracker 中击中模式的进一步约束, 该逻辑表达式解释如下:

- L2: 必须在 L2 层有 y 方向击中
- (L3|L4): 在 L3 或 L4 中至少有一层有 y 方向击中
- (L5|L6): 在 L5 或 L6 中至少有一层有 y 方向击中

- (L7|L8): 在 L7 或 L8 中至少有一层有 y 方向击中

综上, 该条件要求粒子的径迹在 Inner Tracker 中满足特定的纵向覆盖模式: 从 L2 开始, 经过 L3/L4、L5/L6、L7/L8 四个“区段”时, 每个区段都至少有 1 层被击中。加上 InnerNHitY ≥ 5 的最低层数要求, 两者共同确保了径迹在 Inner Tracker 中既有足够的击中点数, 又在纵向上分布均匀, 覆盖从顶部 L2 到底部 L7/L8 的各个区段。

2.2.2 L1XY

L1XY 要求径迹在探测器最上层 L1 同时有 x 和 y 两个方向的击中信息。具体而言, 这一条件确保 L1 层有击中信号; x 和 y 双向都有信号。在 AMS 的 Pass8 数据处理流程中, L1XY 被明确定义为“unbiased external HitPos within L1”, 即 L1 内无偏的外部击中位置, 并作为效率计算的分子条件之一。

2.2.3 L9XY (for FS analysis)

L9XY 要求径迹在探测器最下层 L9 同时有 x 和 y 两个方向的击中信息。具体而言, 这一条件确保: L9 层有击中信号; x 和 y 双向都有信号。

FS, 全称 Full Span, 即全跨度。FS 分析是指同时利用探测器的全部九层进行径迹重建的分析模式。与之相对的是 L1Inner 分析, 仅要求 L1 + Inner Tracker, 不要求 L9。Full Span 模式的核心优势在于: L1 到 L9 之间的垂直距离约为 3 米, 构成了 AMS 最长的径迹测量力臂。在这一力臂上, AMS 的永久磁铁可提供约 0.14 T 的磁场。更长的测量力臂意味着粒子在磁场中的偏转被更多的探测点采样, 从而获得更高的刚度测量精度和更大的最大可测刚度。

2.2.4 InnerNormChisqY < 10

NormChisq, 全称为 Normalized Chi-Square, 即归一化卡方, 是粒子物理实验中衡量径迹重建质量的核心统计量。在 AMS 的径迹重建过程中, 探测器各层的击中点位置是已知的, 径迹拟合算法会根据这些测量点拟合出一条最可能的粒子轨迹。NormChisq 就是用来量化测量值与理论拟合值之间偏离程度的指标。其计算公式为:

$$\chi_{\text{norm}}^2 = \frac{1}{\text{NDF}} \sum_i \frac{(y_i - y_{\text{fit},i})^2}{\sigma_i^2} \quad (4)$$

其中 y_i 为第 i 层探测器测得的实际击中位置, $y_{\text{fit},i}$ 为根据拟合径迹预测的位置, σ_i 为该层的位置测量误差, NDF 为击中层数减去拟合参数个数。

归一化卡方值越小, 表示拟合出的径迹与各层探测器的实际测量点越吻合, 径迹重建质量越高。InnerNormChisqY 特指在 Inner Tracker 的 Y 方向上进行径迹拟合所得到的归一化卡方值。条件 InnerNormChisqY < 10 要求该值小于 10, 即剔除那些归一化卡方值过大的事例。

2.2.5 $L1InnerNormChisqY < 10 \ \&\& \ (L1InnerChisqY - InnerChisqY) < 10$ (for L1Inner analysis)

L1Inner 几何表示使用 L1 和 Inner Tracker 的击中点，L1InnerNormChisqY 表示在 L1Inner 几何下在 y 方向下进行轨迹拟合所得到的归一化卡方值，与之前的计算公式一致。而 L1InnerChisqY 表示在 L1Inner 几何下在 y 方向上进行轨迹拟合所得到的非归一化卡方值。两者的差值 $L1InnerChisqY - InnerChisqY$ 量化了将 L1 层的击中点纳入径迹拟合后，对整体拟合质量带来的额外偏离程度。

不同于 FS 分析，L1Inner 分析是仅使用 L1+Inner Tracker 进行径迹重建，不要求 L9 层的击中信息。这种模式具有更高的几何接受度，但其刚度测量上限较低。

2.2.6 $L1InnerL9NormChisqY < 10 \ \&\& \ (L1InnerL9ChisqY - InnerChisqY)/2 < 10$ (for FS analysis)

该筛选条件与第五条筛选条件类似，区别在于 L1InnerL9NormChisqY 和 L1InnerL9ChisqY 所涉及的几何范围扩大并包含了 L9，即为整个 AMS 的硅微条径迹探测器。

2.3 筛选条件的意义

在以上六种筛选条件中，第一条 $InnerNHitY \geq 5 \ \&\& \ L2 \& (L3|L4) \& (L5|L6) \& (L7|L8)$ 和第四条 $InnerNormChisqY < 10$ 使用频率较高并且效果好，就这两条说明其意义。

2.3.1 $InnerNHitY \geq 5 \ \&\& \ L2 \& (L3|L4) \& (L5|L6) \& (L7|L8)$

- (1) 多 y 方向的击中点保证径迹拟合的精确参数和刚度测量的高分辨率。刚度是宇宙线能谱测量的核心物理量，其测量依赖于粒子在磁场中轨迹的弯曲程度。 y 方向是磁场弯曲方向，因此 y 方向的击中点数量和质量直接决定了刚度测量的精度。径迹重建需要多个击中点来确定粒子在磁场中的轨迹参数。击中点越多，拟合的统计精度越高，刚度测量的分辨率越好。AMS Inner Tracker 的电荷分辨已达到极高水平：对碳核素为 0.1 电荷单位，对硅核素为 0.15 电荷单位，对铁核素为 0.3 电荷单位。这一优异性能的前提正是高质量的径迹重建，而高质量的径迹重建又依赖于充足的击中信息。
- (2) 确保径迹的纵向覆盖完整性。如果击中点都集中在 Inner Tracker 的某一段，则径迹的外推和弯曲测量将不可靠。要求径迹贯穿 Inner Tracker 的各个区段，确保了粒子确实穿过了整个磁铁孔径，其弯曲轨迹被充分采样。L2 至 L8 跨越了 AMS 磁铁的全部有效区域。只有径迹在各个区段都有击中，才能完整记录粒子在磁场中的偏转过程，从而精确测量其刚度。
- (3) 排除碎裂与散射事件。高 Z 粒子在探测器材料中发生碎裂后，碎片可能只在局部产生击中；或者粒子在穿过磁铁时发生大角度多次散射，导致部分层没有击中。这

类事件无法满足上述模式要求，从而被有效排除。AMS 的蒙特卡洛模拟精确模拟了原子核与探测器材料的各种相互作用，验证了这一筛选条件的有效性。

- (4) **保障电荷测量的可靠性。** AMS 的硅径迹探测器通过测量带电粒子穿过硅传感器时的能量沉积来确定粒子电荷。Inner Tracker 联合多层探测器的信号，可以获得极其优异的电荷分辨。充足的击中层数是实现这一优异电荷分辨的前提——只有足够多的独立测量，才能通过统计平均压低测量误差。

2.3.2 InnerNormChisqY < 10

条件 InnerNormChisqY < 10 要求该归一化卡方值小于 10，设置这一阈值，其根本目的在于剔除那些径迹拟合质量极差的事例。归一化卡方值过大通常意味着以下几种物理情况：

- **多次散射。** 粒子在穿过探测器材料时，会与原子核发生多次库仑散射，导致实际轨迹不断偏转，偏离理想的平滑曲线。AMS 探测器包含大量物质，粒子穿过时不可避免会遭受多次散射。多次散射越严重，各层测量点与拟合轨迹的偏差就越大，归一化卡方值也就越高。
- **粒子碎裂。** 高 Z 核子在探测器材料中发生碎裂后，碎片可能继续在后续层中产生击中，但这些击中的位置与原始粒子的预期径迹不再一致。这种不一致会导致拟合卡方显著增大。
- **径迹错误组合。** 径迹重建算法可能错误地将不同粒子的击中点组合成一条“伪径迹”。例如，在事例率较高时，不同粒子的击中可能被误认为属于同一条径迹。
- **探测器噪声或故障。** 探测器某层可能出现异常信号（如噪声引起的假击中），导致测量点严重偏离真实轨迹。

以上情况都会导致基于径迹导出的刚度测量不可靠。因此，InnerNormChisqY < 10 的作用就是剔除这些低质量径迹，确保进入物理分析的样本具有高精度的径迹重建质量。

2.4 背景修正

在 AMS 的宇宙线通量测量中，经过事例筛选后获得的信号样本不是 100% 纯净，其中仍然混杂着各种本底事件。这些本底如果不加以修正，将直接导致通量测量结果偏离真实物理值。以下从物理来源、影响机制和修正方法三个层面，介绍 AMS 数据分析中最主要的几类背景。

2.4.1 碎裂本底

(一) **物理来源** 碎裂本底是 AMS 重核通量测量中最主要、最棘手的背景来源。其物理机制是：高电荷的宇宙线核子在进入 AMS 探测器后，与探测器材料中的原子核发生非弹性碰撞，碎裂成电荷数更低的碎片。这些碎片如果电荷数恰好等于目标核子，并且通过了后续的事例筛选，就会被误认为是目标核子，造成通量测量的“虚高”。根据碎裂发生的位置，碎裂本底可进一步分为两类：

- **Below L1 本底**：碎裂发生在 Tracker L1 层之下，主要在 TRD 和 Upper TOF 中。由于 L1 以下各子探测器仍能对碎片进行电荷测量，这部分本底可以通过电荷模板拟合的方法进行估计和扣除。
- **Above L1 本底**：碎裂发生在 Tracker L1 层及 L1 以上的 AMS 支撑结构中。由于 L1 之上没有电荷测量信息，无法从数据中直接判断粒子在进入 L1 之前是否已经碎裂，因此这部分本底主要依赖蒙特卡洛模拟进行估计。

(二) **影响程度** 随着 AMS 将测量扩展到更重、更稀有的核素，碎裂本底的影响日益突出。以 AMS 对磷核通量的测量为例，Above L1 本底的贡献在 2.15 GV 时约为 10%，在 10 GV 时约为 14%，在 100 GV 时约为 13%，在 1.2 TV 时约为 10%。对于 Cl、Ar、K、Ca 等其他核素，这类本底在全刚度范围内小于 8%。

(三) **修正方法** 对于 Below L1 本底，AMS 采用电荷模板拟合的方法：利用 Inner Tracker 的高电荷分辨能力，在 L2 层获取纯净的信号核素电荷分布模板，然后对 L1 层的电荷分布进行拟合，从而分离出碎裂本底的贡献。对于 Above L1 本底，AMS 采用蒙特卡洛模拟进行估计。由于 AMS 的 MC 模拟基于 GEANT4 等成熟工具，能够精确模拟核子与探测器材料的各种相互作用。但考虑到 MC 对核子碎裂分支比的模拟可能与真实数据存在差异，AMS 还利用 Tracker L1 作为“束流”、TRD 和 TOF 作为“靶”，用实际数据测量特定核子的碎裂分支比，对 MC 模拟进行修正。近年来，AMS 合作组还积极探索基于机器学习的方法来压制碎裂本底，例如多模态域对抗神经网络（MDA）等方法。

2.4.2 电荷混淆本底

(一) **物理来源** AMS 各子探测器对粒子电荷的测量存在固有的分辨率限制。当两个相邻电荷数的核子在电荷测量分布上发生重叠时，就可能出现“电荷混淆”——例如， $Z = 15$ 的磷和 $Z = 16$ 的硫，由于电荷测量的统计涨落，可能被误判为对方。这种本底在电荷分辨较差的低 Z 区域或低能区更为显著。

(二) **影响程度** 得益于 AMS 多子探测器独立电荷测量的冗余设计，电荷混淆本底已经被压制到很低的水平。例如，在 AMS 对 P、Cl、Ar、K、Ca 等核素的测量中，非相

互作用核素的电荷混淆在全部刚度范围内小于 2%（对 P）和小于 1%（对 Cl、Ar、K、Ca）。

（三）修正方法 电荷混淆本底的修正主要依靠多探测器联合电荷测量。AMS 的 Tracker 联合多层探测器的信号，可以获得极其优异的电荷分辨；TOF 系统提供独立的电荷测量；TRD 也可以通过电离能损测量电荷。多个独立的电荷测量值相互印证，可以极大压低电荷混淆的概率。此外，还可以通过分析电荷测量分布的模板，定量估计电荷混淆的贡献并将其扣除。

2.4.3 地磁截止效应

（一）物理来源 地球具有磁场，带电宇宙线粒子必须具有足够的磁刚度才能穿透地磁场到达 AMS 所在的高度和位置。这一最小刚度值称为该方向上的地磁截止刚度。低于地磁截止刚度的宇宙线受到了地磁场的显著调制，其原始能谱信息已经部分丢失。如果将这些被调制过的事例直接用于宇宙线本征能谱的测量，将导致能谱形状的扭曲。

（二）影响程度 地磁截止效应主要影响低刚度区域。在不同的地磁纬度和不同的入射方向上，截止刚度值各不相同。对于低于截止刚度的事例，AMS 虽然可能记录到它们，但不能将其用于宇宙线本征能谱的测量。

（三）修正方法 在计算曝光时间时，AMS 会排除地磁截止刚度以下能区的事例。具体做法是：根据国际地磁参考场模型和 AMS 的轨道位置，计算每个时刻、每个入射方向的地磁截止刚度，只有刚度高于截止刚度的事例才被纳入通量测量。这一修正确保了用于能谱分析的事例保留了原始的宇宙线能谱信息。

2.4.4 探测器效应相关的本底与修正

（一）探测器死时间 当宇宙线粒子通过 AMS 探测器并触发后，探测器需要对信号进行处理并将数据传输到地面。信号处理和数据传输需要时间，因此在一个粒子触发后的一段时间内，探测器无法再触发另一个粒子——这段时间称为探测器的死时间。死时间导致部分真实事例被丢失，造成通量测量偏低。AMS 通过精确测量死时间的长度，计算死时间导致的触发效率损失，并在通量公式中以效率修正项 ϵ_i 予以扣除。

（二）触发效率 并非所有穿过 AMS 探测器的粒子都能成功触发数据采集系统。触发效率取决于触发逻辑的设计和粒子的物理特性。AMS 的 TOF 系统提供了快速触发信号，其触发效率优于 99.9%。但即便如此，仍然有少量事例未能被触发记录。“离线触发”样本，即未被触发但被其他方式记录的事例，AMS 通过分析这些样本与正常触发样本的比值，精确测量触发效率，并在通量计算中进行修正。

(三) **各子探测器效率** 不同子探测器对粒子的探测效率并非 100%。例如, Tracker L1 对高电荷核子的击中效率和电荷重建效率、UTOF 的电荷选择效率、Inner Tracker 的径迹重建效率和电荷筛选效率等, 都需要逐项修正。AMS 采用数据与蒙特卡洛对比的方法。对于每个子探测器的效率, 分别从飞行数据和蒙特卡洛模拟中计算, 两者的比值用于修正 MC 的接受度, 从而得到精确的有效接受度 A_i 。