

一、 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？

蒙特卡洛模拟是一种基于随机抽样和概率统计理论的数值计算方法。在 AMS 实验的物理分析中，蒙特卡洛模拟通过大量产生虚拟的宇宙线事例，并基于对探测器几何结构、物质分布以及粒子与物质相互作用物理过程的精确建模，逐一模拟每个虚拟粒子在穿过 AMS 各子探测器（包括穿越辐射探测器、飞行时间探测器、硅微条径迹探测器等）时所发生的电离能损、多次库仑散射、韧致辐射、核相互作用等物理过程，以及探测器电子学系统的信号响应与数字化过程，最终生成与真实飞行数据格式完全相同的模拟数据。

蒙特卡洛模拟在数据分析中具有不可替代的作用。首先，在真实飞行数据中，我们只能获得被探测器成功记录的事例信息，而无法获知有多少粒子未被记录，也无法获知每个被记录粒子的真实种类和能量。蒙特卡洛模拟则提供了“已知真相”的样本，即每个虚拟粒子的真实核素种类、入射能量和方向均是预先设定的，这为后续分析提供了可靠的参照基准。其次，探测器的一些关键性能参数，如有效接收度、电荷分辨和刚度分辨等，无法直接从飞行数据中独立提取，必须借助蒙特卡洛模拟进行估算。第三，在背景事例的估计中，例如更高电荷数原子核在探测器上层发生碎裂后所产生的低电荷数碎片被误判为信号事例的情况，由于真实数据无法区分信号与背景，必须依赖蒙特卡洛模拟对不同碎裂过程的分支比及其通过事例筛选的概率进行计算，并通过数据与模拟的对比进行修正。最后，通过将蒙特卡洛模拟的预期结果与真实飞行数据的测量结果进行对比，可以验证我们对探测器响应的理解是否准确，从而确保数据分析方法的可靠性。

探测器的接受度是表征探测器对宇宙线粒子“接收并记录”能力的一个综合物理量。其物理意义在于：在单位时间内，对于从探测器上方各向同性地入射的宇宙线粒子，探测器能够成功重建并使其通过所有事例筛选条件的概率与几何接收面积的乘积。接受度的单位通常为平方米·立体角 ($\text{m}^2 \cdot \text{sr}$)，它综合了探测器的几何尺寸、视场角覆盖范围以及内部物质对粒子造成的损失和探测效率等多重因素。接受度越大，意味着在相同的曝光时间内探测器能够积累更多的事例统计量。

AMS 探测器有效接受度的计算完全依赖于蒙特卡洛模拟，具体流程如下。首先，在探测器顶部定义一个人工的虚拟产生平面，该平面位于 $z = +1.95$ 米高度处，为边长 $L = 3.9$ 米的正方形，其面积 $S = L^2 = 15.21 \text{ m}^2$ 。该平面的尺寸足够大，确保任何从上方向下穿过该平面的粒子必定会进入 AMS 探测器。假设宇宙线粒子在方向上是各向同性的，则产生平面对上方入射粒子的纯几何接收能力可由几何因子 A_{plane} 描述，其计算公式为对上半球立体角和平面面积进行积分：

$$A_{\text{plane}} = \int_{\Omega} d\Omega \int_S d\vec{S} \cdot \hat{r} = \int_0^{\pi/2} \sin\theta d\theta \int_0^{2\pi} d\phi \int_S \cos\theta dS = \pi \cdot S$$

代入 $S = 15.21 \text{ m}^2$ ，得到 $A_{\text{plane}} = \pi \times 15.21 \approx 47.78 \text{ m}^2 \cdot \text{sr}$ ，该值即为 AMS 探测器的几何因子。

在此基础上，蒙特卡洛程序从该产生平面上随机投点，产生大量方向各向同性的虚拟宇宙线事例，设其总数为 $N_{i,\text{gen}}$ 。这些虚拟粒子随后被送入完整的 AMS 探测器模拟程序，经历与真实粒子完全相同的物理过程和探测器响应过程，并生成模拟数据。随后，将这些模拟数据输入与真实飞行数据分析完全相同的径迹重建程序和事例筛选条件，记录最终通过所有筛选条件的事例数 $N_{i,\text{sel}}$ 。则有效接受度 A_{eff} 定义为几何因子与通过筛选概率的乘积：

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

该有效接受度反映了 AMS 探测器在实际运行条件下，综合考虑了几何接收范围、粒子与探测器物质的相互作用损失以及重建和筛选效率之后，对宇宙线粒子的真实记录能力。在实际的通量计算中，该有效接受度将作为分母中的一个关键因子，用于将观测到的事例数转换为物理上的绝对通量。

二、

径迹重建质量筛选 (TrTrack Selection)

径迹筛选的根本目的是保证径迹拟合的几何完整性和统计质量，确保刚度测量的分辨率和准确性，同时排除因散射、碎裂或探测器响应异常导致的低质量径迹。

1.InnerNHitY>=5 && L2&(L3|L4)&(L5|L6)&(L7|L8)

InnerNHitY>=5: 要求粒子在硅微条径迹探测器的 Y 视向上至少有 5 个击中点。径迹重建的精度随击中点数量的增加而提高，至少 5 个击中点是确保径迹参数具有足够统计精度的基本要求。若击中点过少，径迹拟合的自由度过低，刚度测量的分辨率和可靠性将严重下降。

L2&(L3|L4)&(L5|L6)&(L7|L8): 要求径迹必须同时穿过 L2 层，并且分别在 L3/L4 组、L5/L6 组、L7/L8 组中至少穿过一层。这一条件强制径迹在探测器的不同纵向位置均有测量点，从而在磁场区域中获得足够长的径迹长度。较长的径迹长度意味着粒子在磁场中的偏转更充分，刚度测量的相对分辨率更高。同时，该条件排除了仅在探测器局部产生信号的事例（如次级碎片），确保所记录的是穿过整个探测器主体的高能宇宙线。

2. L1XY

要求径迹能够外推至 Tracker L1 层并在 X 和 Y 两个视向上都有击中信息。L1 层是 Tracker 的最顶层，包含该层信息可以约束径迹在探测器入口处的方向和位置，从而更精确地重建粒子在磁场中的入射状态。对于 L1Inner 几何分析，L1 信息是必需的；对于 Full Span 分析，L1 信息同样有助于提高径迹外推至 L9 的精度。

3.L9XY (仅用于 Full Span 分析)

Full Span 几何包含 Tracker L1 至 L9 的所有层，L9 是 Tracker 的最底层。要求径迹延伸至 L9 且两视向均有信号，确保粒子完整穿过了整个径迹探测器的纵向范围。这使得径迹更长、弯曲更充分，从而能够测量更高的刚度（最高可达约 2 TV），代价是几何接受度降低，事例数减少。

4.InnerNormChisqY < 10

该条件要求内层径迹（L2 至 L8）在 Y 视向上拟合的归一化卡方值小于 10。归一化卡方值是衡量径迹各测量点与拟合曲线之间偏离程度的统计量，其值过大表明各层测量点之间存在显著的不自洽。这种不自洽可能源于粒子的多次库仑散射、在探测器内发生的次级核相互作用、或者探测器电子学噪声导致的错误击中点。设定该阈值为 10，可以有效排除这些质量较差的径迹，确保最终用于能谱分析的径迹具有平滑、真实的曲率，从而提高刚度测量的可靠性。

5.L1InnerNormChisqY < 10 && L1InnerChisqY - InnerChisqY < 10 (用于 L1Inner 分析)

L1InnerNormChisqY < 10: 要求包含 L1 层在内的整体径迹（L1 至 L8）在 Y 视向上的归一化卡方值小于 10，确保 L1 层的测量点与内层径迹在几何上一致。

L1InnerChisqY - InnerChisqY < 10: 该条件要求添加 L1 层后径迹卡方值的增量小于 10。其物理意义在于：如果 L1 层的击中点与内层径迹的预期位置高度吻合，则加入 L1 层后卡方值不会显著增加；反之，若增量过大，则表明 L1 层的测量点与内层径迹不一致，可能是由于 L1 层发生了信号误匹配、粒子在 L1 层发生散射或碎裂等。该条件确保了 L1 层与内层径迹的平滑连接，从而保证外推至 L1 的径迹信息准确可靠。

6.L1InnerL9NormChisqY < 10 && (L1InnerL9ChisqY - InnerChisqY)/2 < 10 (用于 Full Span 分析)

L1InnerL9NormChisqY < 10: 要求包含 L1、内层 (L2-L8) 和 L9 在内的完整长径迹在 Y 视向上的归一化卡方值小于 10, 确保整条长径迹的各层测量点总体自洽。

(L1InnerL9ChisqY - InnerChisqY)/2 < 10: 该条件限制了添加 L1 和 L9 两层后卡方值的平均增量。由于添加了两层, 卡方自由度的增加量约为 2, 因此除以 2 进行归一化。若该增量过大, 表明 L1 或 L9 层的击中点与内层径迹不匹配, 可能源于端层探测器的噪声、粒子在端层发生相互作用或重建外推误差。该条件确保长径迹的两端均与内层径迹良好衔接, 从而保证 Full Span 分析中高刚度测量的准确性。

电荷筛选 (Charge Selection)

电荷筛选的根本目的是利用不同子探测器对电离能损的独立测量, 通过多重交叉校验, 精确筛选出目标原子核, 同时排除其他核素的背景以及电荷重建异常的事例。

1. 基于 Inner Tracker 的电荷筛选 (q_{inn})

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

Inner Tracker (L2 至 L8) 具有极高的电荷分辨能力, 是 AMS 中测量电荷最精确的子探测器。该条件要求 Inner Tracker 测得的电荷值 q_{inn} 与目标原子核的理论电荷 Z 之差小于一个容许范围。

对于高 Z 核子 (Z ≥ 14), 电荷测量的绝对涨落较大, 因此采用固定容差 0.5, 确保高 Z 事例有足够的接受效率。

对于低 Z 核子 (Z < 14), 容差随 Z 呈幂律增长, 其具体形式 (0.0075·Z^{1.414} + 0.198) 基于实验数据的电荷分辨标定得到, 反映了电离能损涨落随 Z 变化的物理规律。该条件能够排除绝大多数非目标核素, 并对电荷重建异常的事例进行截断。

2. 基于 Tracker L1 的电荷筛选 (q₁₁)

条件:

$$Z - 0.0585 \cdot pow(Z, 1.15) - 0.35 < q_{11} < Z + 0.0334 \cdot pow(Z, 1.15) + 0.20$$

$$fabs(q_{11x} - q_{11y}) / (q_{11x} + q_{11y}) < 0.2$$

$$(qstatus_{11} \& 0x10013D) == 0$$

L1 层位于 Tracker 的最顶层, 其电荷测量精度低于 Inner Tracker, 因此容许区间更宽, 且上下限不对称, 反映了 L1 层探测器响应的系统特性。包含 L1 的电荷信息可以与 Inner Tracker 构成独立的交叉校验, 排除那些在内层电荷测量正常但在顶层测量异常的事例。

条件 $fabs(q_{11x} - q_{11y}) / (q_{11x} + q_{11y}) < 0.2$ 要求 L1 层 X 视向和 Y 视向的电荷测量值相一致。若两者偏差过大, 表明粒子在 L1 层的击中可能靠近条边缘或发生了电荷分享异常, 该类事例的电荷重建不可靠。

条件 $(qstatus_{11} \& 0x10013D) == 0$ 是基于 L1 层重建状态标志位的筛选, 要求事例在 L1 层中不包含特定的误匹配或噪声标志。该位掩码对应的状态通常表示电子学饱和、相邻条信号异常或径迹外推位置与击中位置的匹配失败等情况, 排除这些事例可确保 L1 层电荷信息的质量。

3. 基于 Tracker L9 的电荷筛选 (q₁₉, 仅用于 Full Span 分析)

条件: $Z - 0.0284 \cdot pow(Z, 1.15) - 0.17 < q_{19} < Z + 0.0585 \cdot pow(Z, 1.15) + 0.35$ 和 $fabs(q_{19x} - q_{19y}) / (q_{19x} + q_{19y}) < 0.2$

L9 层是 Tracker 的最底层, 其电荷筛选仅在 Full Span 分析中使用。由于 Full Span 径迹需要延伸至 L9, 加入 L9 的电荷信息可以确保整条长径迹在电荷测量上的一致性, 排除那些在探测器中后段发生碎裂或能量损失异常的事例。

L9 的电荷容许区间与 L1 类似但参数略有不同，反映了其作为底层探测器的具体响应特性。同样要求 X 与 Y 视向的电荷测量一致，以确保电荷重建质量。

4. 基于飞行时间探测器 (UTOF) 的电荷筛选 (q_{utof})

条件:

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

在 Full Span 分析中，增加条件 $q_{\text{utof}} > Z - 0.625 - 0.0225 \cdot (Z - 9)$

UTOF (上层飞行时间探测器) 位于 Tracker 上方，其信号大小同样正比于 Z^2 ，可用于独立的电荷测量。UTOF 的时间分辨和电荷分辨相对 Tracker 较弱，因此容许区间较宽，且上限为固定值 $Z+1.5$ ，下限随 Z 线性变化。

包含 UTOF 的电荷信息可以作为辅助校验，尤其对于 L1Inner 分析而言，UTOF 是 L1 之上唯一具有电荷测量能力的子探测器，有助于排除在 TRD 或 TOF 上层发生碎裂后产生的不匹配事例。在 Full Span 分析中，进一步要求下限截断，增强了低电荷端本底的排除能力，以减少低电荷杂散事例对高刚度测量的污染。

主要背景

1. Below L1 本底 (L1 探测器之下发生的碎裂)

Below L1 本底是指：更高原子序数 Z 的宇宙线原子核 (例如硫 S、氯 Cl、氩 Ar 等) 在穿过探测器上层区域——包括穿越辐射探测器 (TRD)、上层飞行时间探测器 (UTOF) 以及 Tracker L1 层本身——的过程中，与探测器材料发生非弹性核相互作用，碎裂产生一个电荷数较低的目标原子核 (如磷 P)。这个新产生的目标核随后继续向下穿过 L1 层及其下方的内层径迹探测器 (Inner Tracker, L2 至 L8)，其径迹和电荷测量均满足所有事例筛选条件，最终被记录为一个信号事例。由于碎裂发生在 L1 层之上或 L1 层内部，而 L1 层本身具有电荷测量能力，因此这类本底可以通过 L1 层的电荷响应特征与真实信号进行区分。

2. Above L1 / TOI 本底 (L1 探测器及其之上支撑结构上发生的碎裂)

Above L1 本底 (在 AMS 内部也称为 TOI 本底，即 Tracker Outer Integration，指 L1 层及其之上的整体结构) 是指：更高 Z 的宇宙线原子核在到达 Tracker L1 层之前，已经在 L1 层之上 (包括 TRD、UTOF 以及 AMS 的支撑结构，如碳纤维蜂窝板等) 发生了碎裂，产生了一个目标原子核。由于碎裂发生在 L1 层之上，该目标核在到达 L1 层时已经存在，L1 层测量到的正是这个碎片核的电荷，因此 L1 层的电荷信息无法提供任何区分能力。这一本底无法通过数据驱动的方法 (如模板拟合) 进行估计，必须完全依赖蒙特卡罗模拟。

三、由于探测器分辨率有限，测到的刚度可能偏大或偏小，这种测错导致的刚度迁移需要用数学方法修回来 (即 Unfolding)，这种刚度迁移的修正 (unfolding) 是什么？

在 AMS 宇宙线能谱测量中，由于探测器分辨率有限，粒子真实刚度与测量刚度之间并非一一对应关系，而是存在一个由多次库仑散射、径迹位置测量误差等因素导致的概率分布，称为探测器响应函数或迁移矩阵。这意味着一个真实刚度为某一值的粒子，其测量值可能偏大或偏小，这种现象称为刚度迁移。

由于宇宙线能谱近似为快速下降的幂律谱，低刚度区的大量事例通过向上迁移会显著污染高刚度区的测量计数，从而扭曲能谱的真实形状。Unfolding (反折叠) 正是用于修正这一效应的数学方法，其基本思路是将测量谱视为真实谱与迁移矩阵的卷积，通过数学反演从观测到的测量谱中反推出真实的物理能谱。然而，由于迁移矩阵通常是病态的，直接求逆会导致统计涨落被极度放大而产生非物理震荡，因此必须采用正则化方法进行处理。

AMS 实验中常用的算法包括贝叶斯迭代方法和奇异值分解方法，两者均在偏差与方

差之间寻求最优平衡，从而给出稳定可靠的 Unfolding 结果。在实际分析中，迁移矩阵完全由蒙特卡洛模拟构建，Unfolding 在本底扣除之后进行，且其结果的不确定性需作为系统误差纳入最终通量的误差预算。未经 Unfolding 修正，高能端能谱将因低能事例的污染而严重偏离真实物理规律，因此这一步骤对于精确测量宇宙线能谱而言不可或缺。