

一、

蒙特卡洛模拟（简称 MC）是一类以概率论大数定律为数学基础，通过大量重复随机抽样求解复杂问题的数值计算方法。在粒子物理与核物理实验中，它是贯穿探测器设计、性能预研、物理分析、理论检验全流程的核心工具。

基本思想：

当一个问题无法通过解析公式精确求解时，可将其转化为某种概率分布下的随机抽样过程：通过对随机变量进行海量重复抽样，统计样本的分布特征与平均值，最终用统计结果逼近问题的真实解。

简单类比：要计算一个不规则图形的面积，可以向其外接方框内随机投点，统计落在图形内的点数占总投点数的比例，再乘以外框面积，就能得到面积近似值；投点数量越多，结果越接近真实值。

为什么需要蒙特卡洛模拟：

1. 解析计算不可行：粒子与物质的相互作用（电离、散射、簇射、核反应等）是随机过程，**物理过程复杂，无法通过解析公式精确计算**，只能通过大量随机抽样统计得到平均结果。
2. 探测器设计与性能评估：在探测器建造前，通过 MC 模拟优化几何结构、材料、参数，预估探测效率、分辨率、本底水平，**避免实物迭代的高额成本**。
3. 数据分析的基准与修正：模拟已知的信号过程，与实验数据对比以检验理论模型；**模拟本底过程**用于背景估计与扣除；同时用于计算探测器效率、接受度、响应矩阵，**为数据修正提供基准**。
4. 稀有过程研究：对于低产额的稀有物理过程，实验数据统计量不足，MC 可以生成海量模拟事例，补充统计、研究分布特征。

探测器接受度：表征探测器“接收”并“探测”到宇宙线粒子的能力，决定了单位时间被粒子探测器探测到的粒子数目
满足定量关系：

$$\frac{dN}{dt} = \int \frac{d\Phi}{d\Omega} \cdot dA(\Omega)$$

理想平面的几何因子 A_{plane} 推导

A_{plane} 是上半球各向同性入射时，一块平面的理想几何因子。推导的核心物理依据是朗伯余弦定律：倾斜入射的粒子，对应的有效探测面积是平面在入射方向上的投影，即 $d\vec{S} \cdot \hat{r} = dS \cdot \cos\theta$

可写为

$$A_{plane} = \int_{\Omega} d\Omega \int_S d\vec{S} \cdot \hat{r}$$

前面对 Ω 积分是对所有入射方向积分

后面的积分是对平面面积积分

$$d\Omega = \sin\theta \, d\theta \, d\phi$$

θ 从 0 到 $\pi/2$: 只有上半球面可以通过
 ϕ 从 0 到 2π

$$\begin{aligned}
 A_{plane} &= \int_0^{\pi/2} \sin \theta d\theta \int_0^{2\pi} d\phi \int_S \cos \theta dS \\
 &= S \cdot \int_0^{2\pi} d\phi \cdot \int_0^{\pi/2} \sin \theta \cos \theta d\theta \\
 &= S \cdot 2\pi \cdot \int_0^{\pi/2} \frac{1}{2} d(\sin^2 \theta) \\
 &= S \cdot 2\pi \cdot \frac{1}{2} \\
 &= \pi \cdot S
 \end{aligned}$$

MC 投点平面是边长 $L=3.9\text{m}$ 的正方形，平面面积： $S=3.9 \times 3.9=15.21 \text{ m}^2$ 代入公式得到理想几何因子： $A_{plane} = \pi \cdot S \approx 3.1416 \times 15.21 \approx 47.784 \text{ m}^2$ ，这个值也称为 **AMS 的标称几何因子**。

A_{plane} 仅为**理想平面的几何接收能力**，真实探测器存在多重限制，实际有效接收能力会低于理想值。因此需要通过蒙特卡洛模拟，计算真实探测的综合效率，**对理想几何因子进行修正**。

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

- $N_{i,gen}$: 在投点平面上生成的总模拟事例数，代表所有入射到该平面的粒子；
- $N_{i,sel}$: 经过完整探测器响应模拟、径迹重建、事例筛选后，最终保留的有效事例数；

平面投点法的技术优势

这是宇宙线探测器计算接受度的标准蒙特卡洛方法：

1. 投点平面设置得足够大，保证所有能进入探测器的粒子，必然先穿过这个平面，不会出现漏算；
2. 仅在平面上生成粒子，无需在全空间随机抽样，大幅提升模拟效率，降低计算资源消耗；
3. 平面上均匀投点、入射方向按各向同性抽样，完美匹配空间宇宙线的入射分布特征。

二、

筛选条件的作用

事例筛选的核心目的是压低本底、提纯信号样本，剔除假事例、坏事例、非目标事例，保证最终分析的样本以目标物理信号为主，提升信噪比。

InnerNHitY >=5 + 多层击中要求 (L2&(L3|L4)&(L5|L6)&(L7|L8))

含义：要求重建径迹在内层探测器 Y 方向有至少 5 个击中，且必须穿过多层探测单元。

作用：保证径迹是真实粒子穿过探测器形成的，而非电子学噪声、随机击中偶然符合形成的假径迹。击中层数越多、击中数越多，径迹真实性越高，重建动量 / 电荷的精度也越好，可大幅压低假径迹本底。

InnerNormChisqY < 10

含义：径迹拟合的归一化卡方值小于 10，卡方值衡量径迹拟合曲线与实际击中位置的符合程度。

作用：剔除拟合质量极差的径迹。这类径迹要么是假径迹，要么是发生了多次散射、轨迹严重畸变的粒子，其刚度、电荷测量误差极大，会污染信号样本、展宽测量谱，保留拟合优度高的径迹可以保证测量精度。

电荷筛选条件 (fabs(q_inn-Z)、q_Tot 相关阈值)

含义：要求探测器测量的粒子电荷，与目标核的预期电荷在误差范围内一致。

作用：通过电荷鉴别粒子种类，剔除电荷不符的本底粒子（如质子、轻强子、其他电荷的原子核），只保留目标核事例，是核物理实验中粒子鉴别的核心筛选手段。

主要的本底来源（背景来源）

1. 物理本底：其他核反应过程产生的、与目标核特征相近的事例，比如不同电荷 / 质量的原子核、轻强子等，它们的径迹、电荷信号与信号相似，会混入样本。

2. 束流本底：束流与真空管道、残余气体、靶材边缘散射产生的粒子，并非目标反应产生的事例，是固定靶 / 对撞实验的主要本底之一。

3. 探测器本底

电子学噪声：探测器读出电路的随机噪声被误判为真实击中，凑出假径迹；

随机符合：多个不相关的粒子击中，在时间、空间上偶然匹配，被重建为一条假径迹；

次级粒子：粒子在探测器材料中发生核反应、散射产生的次级粒子，形成额外假径迹，或歪曲原粒子的测量结果。

4. 宇宙线本底：穿过探测器的宇宙射线缪子等粒子，并非实验束流产生的事例，会混入离线数据。

三：

刚度迁移修正 (Unfolding, 展开 / 解谱)

1. 什么是刚度迁移

粒子的刚度 $R=p/q$ (动量 / 电荷)，由探测器中径迹的偏转程度测量得到。由于探测器存在有限的位置分辨率、多重散射等效应，真实刚度为 R_{true} 的粒子，测量得到的刚度 R_{meas} 可能偏大或偏小，即事例从真实的刚度区间“迁移”

到了其他测量区间。这种效应会让测量得到的刚度谱被展宽、畸变，无法直接代表真实的物理谱。

2. Unfolding (展开) 是什么

Unfolding 是一类数学反演方法，核心目标是：从被探测器分辨率展宽、畸变的测量谱中，反推出不受探测器效应影响的真实物理刚度谱。可以简单理解为：探测器对真实谱做了一次“卷积模糊”，unfolding 就是做反卷积，消除探测器分辨率的影响，还原真实的物理分布。

3. 核心原理

1. 首先通过蒙特卡洛模拟构建响应矩阵 M : 矩阵元 M_{ij} 表示“真实处于第 i 个刚度区间的粒子，被探测器测量到第 j 个区间的概率”。
2. 测量得到的分布满足: $y_j = \sum_i M_{ij} \cdot x_i$, 其中 y_j 是测量谱, x_i 是待求的真实谱。
3. Unfolding 就是已知测量谱 y 和响应矩阵 M , 反解真实谱 x 的过程。常用方法包括迭代法 (D'Agostini 法)、正则化展开、矩阵逆法等, 核心是在抑制统计涨落的前提下, 尽可能还原真实谱形。