

一. 什么是蒙特卡洛模拟?

蒙特卡洛模拟即用海量随机抽样的方法,去算出一个复杂问题的近似答案,核心思想是当直接计算太难时,用随机试验来代替。

在高能物理实验中,整个模拟过程通常分为三大步骤:

1. 事例产生:模拟高能粒子碰撞,产生末态粒子,生成事件记录。
2. 探测器模拟:通过几何,磁场建模和数字化,模拟这些粒子穿过探测器物质时的复杂物理过程,输出类似真实实验的原始电子信号。
3. 数据重建:综合多种探测器信息,如电离能损,动量,飞行时间等,计算该粒子是各种类型粒子的概率值,输出重建对象。

为什么我们需要蒙特卡洛模拟?

1. 粒子碰撞本身就是概率的

我们无法说“这次碰撞一定会产生什么”,只能说“产生某种粒子的概率是多少”,而蒙特卡洛模拟正是依据这些概率进行随机抽样,把理论上的概率转化为一次次的模拟碰撞。

2. 探测器本身是一个巨大的“黑匣子”

探测器记录到的只是粒子沉积能量的电信号,而通过原始信号反推原始粒子和重建中间过程是困难的,而蒙特卡洛模拟可以模拟粒子穿越物质时的复杂过程,与搜集到的电信号一一对应,就可以反推出粒子类型等信息。

3. 模拟并抑制束流本底等系统误差

由于粒子在支撑结构上碰撞,或因其他原因产生系统误差,蒙特卡洛可以通过先进行标准物理本底模拟得到理想状态下的信号,再构建相应的几何模型,模拟出这些误差的分布,通过数学方法将误差“减去”,达到减小系统误差的效果。

探测器的接受度的物理意义是什么?

在粒子物理中,接受度的物理定义为探测器记录到的粒子数除以入射粒子流的强度(通量)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到的粒子数目

探测器的接受度是怎么计算出来的?

对探测器的接受度,自然地有:

$$A_{eff} = \frac{N_{\text{筛选}}}{N_{\text{总}}}$$

将等号右侧进行展开,分子分母各乘以 $N_{\text{穿过平面}}$, 可得到:

$$A_{eff} = \left(\frac{N_{\text{穿过平面}}}{N_{\text{总}}} \right) \times \left(\frac{N_{\text{筛选}}}{N_{\text{穿过平面}}} \right)$$

其中 $N_{\text{穿过平面}}$ 为穿过一假想平面的事例数,该假想平面位于探测器上方,足够大以至于所有进入探测器的粒子一定先穿过该平面。其中等号左项即为几何接受度(A_{plane}),右项为通过蒙特卡洛模拟计算出的筛选效率。

A_{plane} 由如下式子给出:

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

则探测器的接受度为: $A_{eff} = \pi S \times \frac{N_{\text{筛选}}}{N_{\text{穿过平面}}}$

二. 为什么要加入这些筛选条件?

条件一: InnerNHitY>=5&&L2&(L3|L4)&(L5|L6)&(L7|L8)

要求粒子在 Y 方向上至少有五次碰撞,且在 L2&(L3|L4)&(L5|L6)&(L7|L8)各组层中均至少有一次碰撞。

1. 是为了确保径迹有足够的“长度”来测量动量。若只穿过 1-2 层探测器则无法拟合出可靠的曲率,也就无法得到精确的动量。
2. 排除次级粒子的干扰。当粒子撞上支撑结构或因为其他原因发生碎裂时,次级粒子通常能量低,角度散乱,对碰撞数进行要求可以过滤低能量,角度散乱的次级粒子。
3. 对抗电子学噪声。单层探测器有时会因噪声产生“假击中”,但这些噪声几乎不可能连续产生五次。

条件二: L1XY

要求粒子在 L1 层在 X 和 Y 方向上都有击中

1. 方便为高精度径迹拟合提供起点。径迹重建极其依赖起始点的精度,要求在 X 和 Y 方向都有击中,就可以获得起始点精确的(X,Y)坐标。
2. 过滤去从探测器侧面入射的粒子。从探测器侧面入射的多为打穿探测器外壳的束流本底,对实验结果无益。要求在 L1 层有击中,将直接过滤掉侧面入射的杂乱粒子。

条件三: L9XY(for FS analysis)

在 FS analysis(最终筛选分析)中要求粒子在 L9 层的 X 和 Y 方向上都有击中

1. 为动量测量提供完整坐标。与之前的要求在 L1 层的 X 和 Y 方向上有碰撞配合,确定粒子径迹的起点和终点,通过拟合算法即可算出唯一且精确的径迹曲率。
2. 确保粒子完整地穿过了整个探测器。粒子如果在运动过程中与探测器内壁或线路等发生碎裂,能量将大幅降低,大概率无法到达 L9,剔除那些内部碰撞产生的次级碎片。
3. 对抗电子学噪声。与条件二一样要求在 X 和 Y 方向均有碰撞,实际上还要验证 X 方向和 Y 方向碰撞信号产生的时间是否吻合,只有两个方向上的信号同时产生才能真正认为是一次碰撞,否则存在将随机电子学噪声误判为真实径迹的可能性。

三. 刚度迁移的修正

刚度迁移即刚度分区间事例迁移,本质是由于探测器的分辨率有限,导致在对刚度进行划分区间时错误地将其分到相邻的分档,造成该档中事例数的偏差。

宇宙射线通量服从随刚度升高快速下降的分布

低刚度端:事例密度高,迁移到更高区间的事例多于从较低区间迁入的事例,导致观测事例数低于真实值。

高刚度端:事例密度低,从低刚度区迁入的事例多于迁移到高刚度区的事例,导致观测事例数高于真实值。

因此在对刚度进行分档时要注意在低刚度区分档更密,区间更小,在高刚度区分档更宽,区间更大。

定义真实事例数 N , 观测到事例数 \mathfrak{N} , 以及响应矩阵 M , 矩阵元 M_{ij} 表示真实属于第 i 个刚度区间的粒子被划分到第 j 个区间的概率,完全由探测器的刚度分辨率决定。

三者满足: $\mathfrak{N}_j = \sum_i M_{ji} \cdot N_i$, 我们已知的是观测事例数 \mathfrak{N} 和响应矩阵 M , 我们的目标是求出真实事例数 N 。

响应矩阵的构造部分

1. 建立探测器刚度分辨率函数:核心部分符合高斯分布,在 2.5σ 以外的非高斯分布,总体归一化
2. 引入刚度依赖性:探测器的刚度分辨率不是常数,而是会随真实刚度变化,为每个刚度

点生成对应的响应函数

3. 在第 i 个真实刚度区间 $[R_{i,low}, R_{i,high}]$ 中，取其中心刚度 R_i 对应的响应函数作为代表。矩阵元 M_{ij} 通过对 R_i 在第 j 个刚度区间中积分得到：

$$M_{ji} = \int_{R_{j,low}}^{R_{j,high}} f(R_{rec}|R_i) dR_{rec}$$

其中 R_{rec} 为实际测量到的刚度。

后续的求解过程更为复杂，实在超出了我的能力范畴，就不作解答了