

# 实验项目名称：铝膜及空气对 $\beta$ 射线的衰减长度测量

北京大学 王思广

## 1. 科学素养（背景知识、课程思政、与现代科学技术的结合）

$\beta$ 射线与 $\gamma$ 射线在穿过物质的时候都会衰减，但两者的在既定方向上的数目及动能衰减行为并不一样。 $\gamma$ 射线穿过物质的时候，要么不损失任何能量，要么通过光电效应、康普顿散射或电子对效应将大部分能量损失在物质中。由于 $\beta$ 射线的电离作用（原子失去外层电子），其经过物质的径迹上不断产生离子对，从而部分或全部消耗了自身的动能，故 $\beta$ 射线穿过物质的时候，即使是非常薄的物质，也总是有动能衰减； $\beta$ 射线也可引发靶材原子的核外内层电子的激发，从而损失自身动能；如果 $\beta$ 射线本身的运动速度超过光在当前介质中的传播速度，则会通过切伦科夫光的形式损失动能； $\beta$ 射线与介质的原子核的库伦场作用，会导致方向的改变，因在方向偏转的时候加速度的存在，从而也会通过韧致辐射损失一定的动能。在（准）单能 $\beta$ 射线穿过物质的质量衰减系数的测量中，除观察计数率随吸收片厚度的变化外，还有很多有意思的观察量值得让学生进行分析：峰位随吸收片厚度的改变、半高宽（FWHM）随吸收片厚度的改变等。本文所介绍的实验是在原有“用 $\beta$ 粒子检验相对论的动量-动能关系”的近代物理实验的基础上进行拓展（吴思诚 王祖铨. 近代物理实验[M]. 第三版. 北京：高等教育出版社，2005年：107-114）。借助巧妙的实验安排，也可给出空气引发的这些观察量的变化行为。在进行能谱分析过程中涉及到扣除本底、峰位拟合、双侧拟合提取半高宽的信息等一系列能谱分析操作，故本实验可对学生多方位锻炼。

## 2. 分层实验教学内容

### 1) 基础内容

掌握 NaI 探测器谱仪系统的使用，进行简单的系统刻度及能谱获取。

### 2) 提升内容

$\beta$ 衰变可以看成原子核中的一个中子衰变成 3 个粒子：一个质子、一个 $\beta$ 粒子（负电子）及一个反电子中微子的过程。因为释放出的衰变能  $Q$  在反冲核、 $\beta$ 粒子及中微子三个粒子之间分配，故每一个粒子所携带动能并不固定，从而 $\beta$ 粒子的能谱是连续的。为了得到准单能的 $\beta$ 射线，本实验用磁场对连续分布的 $\beta$ 粒子束进行偏转，根据均匀磁场中动量  $P$  与偏转半径  $R$  直接的关系： $P=eBR$ ，在不同偏转位置处可挑选出不同动量的 $\beta$ 粒子。其中  $e$  为电子电荷， $B$  为磁场的磁感应强度。具体实验装置细节可参考北京大学的“用 $\beta$ 粒子检验相对论的动量-动能关系”近代物理实验参考书。用  $^{90}_{38}\text{Sr}$ - $^{90}_{39}\text{Y}$  发出的不同动能的 $\beta$ 射线穿过有机膜窗射入真空盒，经过磁场偏转后从不同的出射窗射出，得到不同动能的 $\beta$ 射线束。因出射窗及入射窗都有一定的宽度（在我们的实验装置中探测器前放一宽度为 3mm 的狭缝铝合金挡板，挡板厚度约 10mm），故出射束中的射线的动能有一个窄的分布，从而为准单能 $\beta$ 射线束。

空气中衰减长度测量方法：该实验可以在连续抽真空（真空度约 0.1Pa）及不抽真空两种模式下运行。对于同一个出射窗位置，抽真空状态及不抽真空状态下探测器测得的能谱上信号峰的计数率有明显差异，而引起该差异的唯一来源是真空盒内有多少空气分子。因为入

射窗及出射窗位置已知，故粒子在磁场中经过的路径已知（外磁场是均匀磁场，且其磁感应强度已知），从而可以计算出该动能下空气对 $\beta$ 射线的衰减长度。另外根据抽真空及不抽真空的时候信号能量的变化，可以进行  $dE/dx$  的测量。

铝膜中衰减长度测量方法：在出射窗与探测器之间的缝隙中，可以塞入不同厚度的铝膜。通过分析多道能谱上信号峰下的计数率随铝膜厚度的变化，可以计算出铝膜对该窗射出的 $\beta$ 粒子的衰减长度。另外：分析信号峰位及利用  $^{60}\text{Co}$  及  $^{137}\text{Cs}$  的能量刻度线，可给出不同厚度的铝膜对该动能的 $\beta$ 粒子的动能衰减量，通过分析信号峰的半高宽（FWHM），可以给出 FWHM 的变化与铝膜厚度之接的关系。

对于多道能谱上的信号，要想得到计数率，最直接的办法是通过本底函数及信号函数进行拟合积分，给出信号峰下的积分计数，通过多道谱仪提供的活时间，可算出计数率。然而，由于实际的准单能 $\beta$ 射线的信号形状偏离高斯函数分布比较厉害，很难找到普适的峰形及本底描述函数进行拟合。

在实际数据处理中，我们利用了一种半经验模型：认为当前道  $i$  的本底计数率  $B_i$  与其右侧的事件积分总和成正比。具体做法描述如下：在图 1 所示的能谱（各道计数已经除以活时间，系计数率的分布）上信号峰的左侧找到计数率最低点第  $l$  道作为信号的左边界（图中左侧红色竖线所在的位置），利用在  $l$  的左右 3 道范围内的各道计数率求出平均高度  $h_l$ ；找到信号峰最高道所对应的道址  $M_0$ （图中中间竖线），然后在峰的右侧与距离  $M_0$  为  $|M_0-h_l|$  道的地方找到右边界  $r$  道（图中右侧竖线所对应的位置）；利用  $r$  道左右 3 道范围内的计数率求

出平均高度  $h_r$ ；然后计算出  $l$  与  $r$  之间各道的计数之和： $A_{lr} = \sum_{j=l}^r y_j$ ，其中  $y_j$  是第  $j$  道计数

率；根据半经验本底计数模型： $B_i = (h_l - h_r) \frac{A_{ir}}{A_{lr}} + h_r$ ，其中  $A_{ir} = \sum_{j=i}^r y_j$  系第  $i$  道到右边界

$r$  道的各道计数率之和，可给出本底计数率  $B_i$ ，计数率  $y_i$  减去  $B_i$  即可得到第  $i$  道信号计数率  $S_i$ 。

有了信号计数率的分布（图 1 红点部分），就可以用一高斯函数通过拟合信号峰中间部分，例如  $\pm 1\sigma$  区间范围内，给出峰位  $M$  及高度  $H$ ，实际数据处理中可以多次拟合并不断迭代峰位  $M$  及宽度  $\sigma$  给出稳定结果。峰顶部拟合曲线如图 1 上绿线所示。

对于信号峰左、右两侧，可以分别用多项式进行拟合，如图 1 蓝色粗线所示。然后利用拟合出的公式，计算出信号高度  $H$  的一半所对应的左、右侧半高处的道址  $X_l$ 、 $X_r$ （可

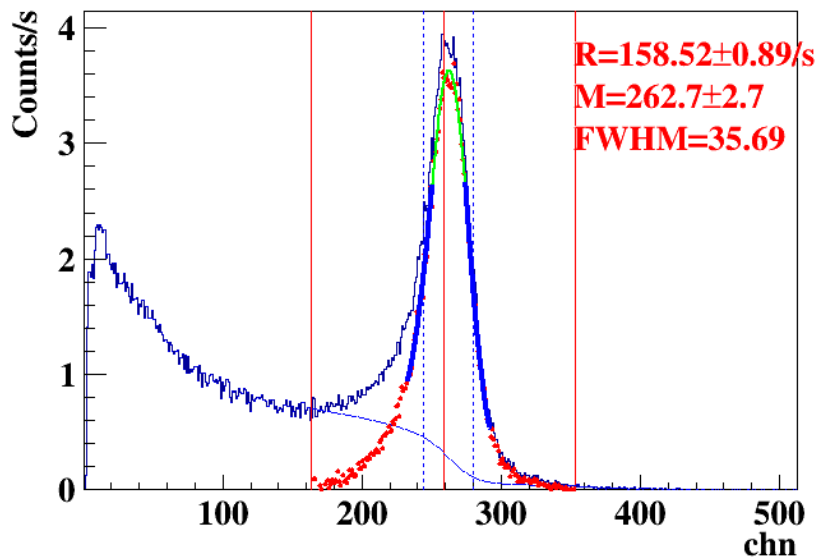


图 1. 利用 NaI 探测器测量的一个 $\beta$ 射线能谱。图中各道计数已经除以活时间。蓝色细线代表本底计数率的分布，信号峰左右蓝色粗线是多项式拟合线，用于寻找半高处的位置以给出 FWHM，信号峰顶部绿色细线为高斯函数拟合线。分析所得的信号计数率  $R$ 、峰位  $M$  及半高宽 FWHM 示于图上。

用数值扫描找出), 从而可计算出半高处的宽度, 即:  $FWHM=|X_l-X_r|$ 。计数率、峰位等拟合量的误差在拟合过程中评估给出。如果用数值扫描方法给出左、右侧半高处的道址  $X_l$ 、 $X_r$ , 其误差很难计算, 建议用峰位的误差评估。具体做法可以用 MC 的办法产生同样统计量的数据然后进行相同的数据处理, 多次重复看峰位的误差分布与用该方法计算出来的 FWHM 的分布之间的比例关系。

### 3) 进阶内容

#### 不同厚度的铝吸收膜获取的数据处理:

在出射窗前加入不同厚度的铝膜进行能谱获取, 例如: 不加吸收片, 加 100 $\mu\text{m}$ 、200 $\mu\text{m}$  及 300 $\mu\text{m}$  后的铝膜时的能谱。每一道计数都除以了能谱获取的活时间。能量刻度用  $^{137}\text{Cs}$  (反散射峰 184.323keV 和其特征 $\gamma$ 射线峰 661.660keV) 及  $^{60}\text{Co}$  (特征 $\gamma$ 射线峰 1173.237keV 和 1332.501keV) 给出。可以让学生给出至少以下 3 项数据处理结果:

1) 随着吸收膜厚度的增加,  $\beta$ 射线峰的峰位逐渐向左移动(作为比较, 也可让学生测量观察  $^{137}\text{Cs}$  或  $^{60}\text{Co}$  源的特征 $\gamma$ 射线峰的峰位是否随着吸收膜的增加其峰位有移动的现象), 参考根据以上“进阶内容”所介绍的能谱分析方法, 扣除本底后可以拟合出峰位  $M$  随吸收片厚度的变化(可以给出绝对峰位随厚度的值, 也可给出不同吸收片厚度对应的峰位与无吸收片时的峰位的差值)并拟合。

2) 随着吸收片的增加,  $\beta$ 射线峰的峰宽也逐渐变大, 扣除本底后可以拟合出峰的 FWHM 随吸收片厚度的变化, 给出结果变化图并拟合。

3) 最明显的是计数率随吸收片厚度的变化。可以让学生利用指数函数  $R = R_0 e^{-x/l}$  进行拟合, 给出衰减长度  $l$ 。其中  $R_0$  为没有加吸收片的时候的计数率,  $x$  为吸收片厚度,  $R$  是不同  $x$  对应的计数率。如果引入质量衰减系数  $\mu$ , 根据  $R = R_0 e^{-x/l} = R_0 e^{-\mu \rho x}$ , 由衰减长度  $l$  可

推导出  $\mu$  为:  $\mu = \frac{1}{\rho l}$ 。其中  $\rho$  为吸收膜的密度。

#### 空气及真空下准单能 $\beta$ 射线能谱的分析:

对于真空盒子, 可以抽真空也可以不抽真空。抽真空的状态下真空度可以达到约 0.1Pa。不抽真空时, 在 $\beta$ 粒子穿过磁场的过程中会与空气发生作用而散射出既定轨道, 从而穿过窗口打在探测器上的计数率相对于抽真空的状态要小。通过测量比较同一窗口真空状态下的计数率  $R_v$  及不抽真空的情况下 (1 个大气压下) 的计数率  $R_A$ , 并假设衰减长度与真空盒中的气压成反比, 即:  $L_v = \frac{P_A}{P_v} L_A$ , 其中  $P_A$ 、 $P_v$  分别表示真空盒充满空气的时候的气压及抽真空

的时候的残余气体的气压。 $L_A$ 、 $L_v$  分别表示 $\beta$ 射线在空气及抽真空时的衰减长度。计数率为  $R_0$  的 $\beta$ 射线束经过路程  $x$  后, 不抽真空时的计数率  $R_A = R_0 e^{-x/L_A}$  及抽真空时的计数率

$R_v = R_0 e^{-x/L_v}$ , 故  $L_A$  可表示为:  $L_A = \frac{x(\frac{R_v}{R_A} - 1)}{\ln(\frac{R_A}{R_v})}$ 。当  $P_v$  约为 0.1Pa 时, 与标准气压  $P_A$  相比,

$\frac{P_v}{P_A}$  非常接近于 0, 可以忽略, 故  $L_A \approx x \ln(\frac{R_v}{R_A})$ 。

根据同一测量窗口真空盒抽真空时的信号计数率  $R_V$  及不抽真空时测量得到的信号计数率  $R_A$ ，以及已知在均匀磁场中 $\beta$ 粒子束所经过的径迹长度  $x$ ，就可计算出  $L_A$ 。做图示出空气对于不同动能的 $\beta$ 射线的衰减长度，应该可以明显看出，动能越大其穿越能力越强。

比较同一窗口有无抽真空的时候峰位的变化，可以计算出动能差异，径迹长度  $x$  已知，故可以算出 $\beta$ 粒子在空气中单位长度的能损  $\frac{dE}{dx} = \frac{E_A - E_V}{x}$ ，其中  $E_A$ 、 $E_V$  分别是空气及真空条件下测量得到的信号峰的峰位。

画出不同动能的 $\beta$ 射线在空气中的  $dE/dx$  具体测量结果图。应该可以清晰看到在观测的动能范围内， $\beta$ 射线穿过单位长度的空气后损失的动能随射线动能的增加而增加（损失为负值，绝对值越大表示经过单位长度的空气 $\beta$ 粒子损失的能量越大）。图中可以有两种数据数据，一种是考虑 NaI 探测器结构自身的铝膜及真空盒窗对射线能量影响的修正后（Corrected）的数据计算出来的  $dE/dx$ ，另一种是直接用 NaI 探测器测量出的  $dE/dx$ ，即没有进行能损修正（Uncorrected）计算的  $dE/dx$ 。铝膜及有机膜的修正所用的数据见参考文献（吴思诚 王祖铨. 近代物理实验[M]. 第三版. 北京：高等教育出版社，2005年：107-114），从图中应该可以看出，是否修正探测器结构本身的铝窗及真空盒的有机膜窗对  $dE/dx$  的数值影响不大。其原因是无论是否抽真空，如果修正，抽真空及不抽真空时获得的能谱的峰位同时修正，对绝对值影响大，但因向同一个方向偏移峰位能量值，相对变化不大。

#### 4) 高阶内容

可以用 Geant4 进行模拟本实验并进行相关数据处理，比较理论模拟值与实验值之间的差异。

### 3. 能力培养

利用既有的“用 $\beta$ 粒子检验相对论的动量-动能关系”实验装置，在不添加任何材料即可引导学生进行空气对 $\beta$ 准单能束衰减长度的数据分析，也可给出不同能量的 $\beta$ 粒子在空气中单位长度的能损  $dE/dx$  的测量结果。制作几种不同厚度的铝膜或其它材料的薄片，也可以开展不同吸收材料对准单能 $\beta$ 粒子的衰减系数的测量、吸收片厚度对峰位、FWHM 的影响的测量。通过实际测量及数据处理，学生得到科研能力锻炼的同时对 $\beta$ 粒子与物质相互作用的性质应有一深刻的了解。

### 4. 知识点

多道能谱的解谱技术，数据处理及拟合， $\beta$ 射线穿过物质的能损与 $\gamma$ 射线穿过物质能损之间的差异。

### 5. 学科关联

真空、计算机、数学、放射源、数据获取。

### 6. 延伸实验

用 $\beta$ 粒子检验相对论的动量-动能关系。