

beta 射线在空气和铝模中衰减实验报告

本实验采用相对论实验的仪器装置,研究了空气和铝模对 β 粒子衰减的影响,使用 NaI 探测器获取能谱,从峰值,半高全宽,计数率等角度对衰减情况进行物理描述,计算了衰减长度,单位长度能损等物理量并进行了误差分析,还对一些变化规律作图并描述了其定性规律。

关键词: β 粒子, 衰减, 铝模, 空气

I. 引言

β 射线是高速运动下的电子, 计算其动能和运动状态时需要考虑相对论效应。本实验研究 β 射线穿过材料时会发生能量衰减。 β 射线在穿过物质时可以通过以下过程损失能量: 在介质内不断产生电子-离子对的电离作用消耗其部分或全部动能, 即使穿过的介质非常薄, 通常也有能量衰减; β 射线可能被原子核和电子的库仑势散射, 在损失能量的同时还将影响自身的运动方向; 当 β 射线受介质库仑场作用做减速运动时, 一部分动能会通过韧致辐射以光子的形式发射; 如果 β 射线本身的运动速度超过光在当前介质中的传播速度, 则可通过切伦科夫光的形式损失动能。本实验在物理学院原有“用 β 粒子检验相对论的动量-动能关系”的基础上进行拓展, 借助用 β 粒子检验相对论的动量-动能关系实验装置提供的准单能 β 射线, 使用多道分析器, NaI 探测器等常见辐射探测仪器, 通过数据处理方法, 建立对 β 射线在空气和铝模中衰减的数学描述。

II. 实验装置

图1是本实验使用的实验装置示意图, 放射源 ${}^{90}_{38}\text{Sr} - {}^{90}_{39}\text{Y}$ 发生 β 衰变释放出不同能量的 β 粒子, 在真空中施加匀强磁场来选择我们感兴趣能量的 β 例子。 β 粒子动量 p 与偏转半径 r 之间有关系

$$p = eBr$$

e 为电子电荷, B 为磁感应强度。 β 射线穿过真空盒的有机膜入射窗, 经过磁场偏转后从不同位置处的有机膜出射窗射出, 在 NaI 探测器前放置厚度约 10 mm 铝合金挡板, 挡板中间垂直方向有宽度为 3mm 的狭缝, 使探测器接收到射线的能量为准单能。

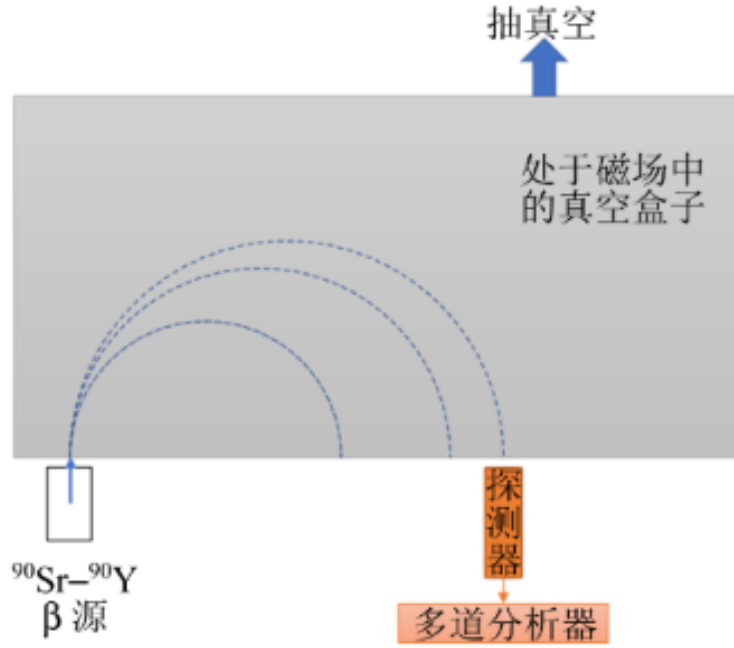


图 1. 实验装置示意图

III. 理论

对于固定的探测器位置，在出射窗与探测器之间，插入不同厚度的铝片，比较不同厚度铝片下 NaI 探测器得到能谱的变化。对计数率 R 使用指数函数

$$R = R_0 \exp(-t_{Al}/L_{Al})$$

进行拟合，得到衰减长度 L_{Al}

引入质量衰减系数 μ 表达式为

$$\mu = \frac{1}{\rho L_{Al}}$$

ρ 是铝片密度

对于同一出射窗位置，抽真空模式（真空度约 0.1Pa）及不抽真空模式下探测器测得的能谱上信号峰的计数率有明显差异，而引起该差异的唯来源是真空盒内气体含量的不同，因为入射窗和出射窗位置已知，故粒子在磁场中经过的路径 x 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 β 射线在空气中的衰减长度。

如果真空盒内充满空气，部分 β 粒子在穿过磁场的过程中会与空气发生作用，可能会偏离出既定轨道或损失较多的能量，从而穿过出射窗口探测器测得的计数率相对于抽真空的模式下测得的计数率要少，通过比较同一窗口真空模式下测得的信号计数率 R_V ，及不抽真空的情况下（1 标准，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

$$L_V = \frac{p_A}{p_V} L_A$$

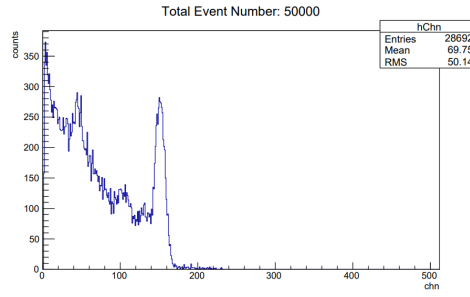


图 2. Cs137 能谱图

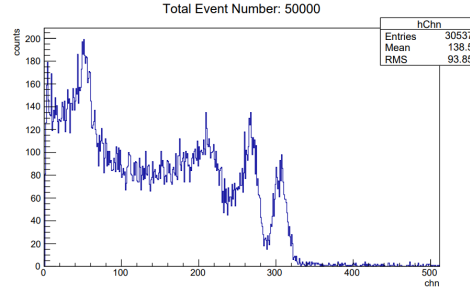


图 3. Co60 能谱图

其中 p_A, p_V 为充满一标准大气压和抽真空时的气压, L_A, L_V 为相应衰减长度. 射线刚进入真空盒计数率为 R_0 , 经过路程 x 后, 不抽真空计数率 $R_A = R_0 \exp(-x/L_A)$, 抽真空计数率 $R_V = R_0 \exp(-x/L_V)$ 得到

$$L_A = \frac{x(p_V/p_A - 1)}{\ln(R_A/R_V)}$$

由于真空气压远小于标准大气压, 所以

$$L_A \approx \frac{x}{\ln(R_V/R_A)}$$

在推导上述公式时忽略了出射窗和 NaI 探测器的影响, 但这个近似是合理的。

比较同一窗口有无抽真空时峰位的变化, 可以计算出动能差异, 根据已知的径迹长度 x , 可以算出 β 粒子在空气中单位长度的能损为

$$\frac{dE}{dx} = \frac{E_A - E_V}{x}$$

其中 E_A 和 E_V 分别是空气及真空条件下测量得到的信号峰的峰位能量。

IV. 实验及数据分析

首先使用 Cs137 的 0.662MeV 能峰与 Co60 的 1.17MeV, 1.33MeV 能峰对多道分析器进行定标。能谱图如图2和图3所示。进行回归计算得到道数 x 与对应能量 $E(\text{MeV})$ 的关系为

$$E = 4.2744e - 3x + 0.0203$$

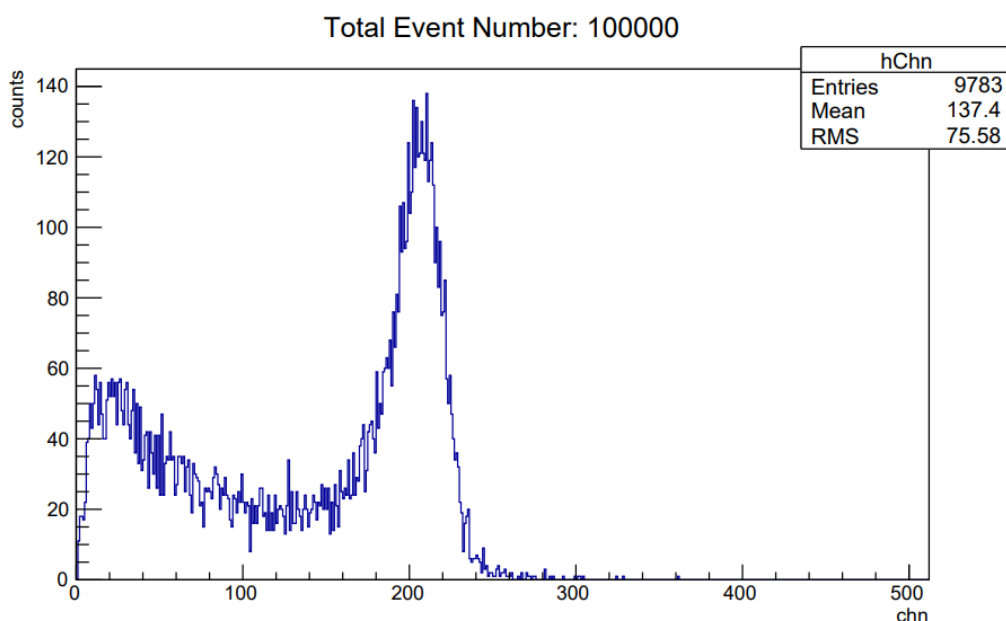


图 4. 真空盒抽真空，不加铝模时 NaI 探测器能谱

$r=0.9999$

我们先来看一下 NaI 探测器测量的 β 射线能谱特点，如图4所示，可见本实验获取的 β 射线的信号形状严重偏离高斯函数分布，多次数据分析证明很难找到普适的峰形及本底描述函数进行拟合，其原因时 β 粒子在经过真空盒、出射窗和 NaI 探测器晶体前的铝膜时，通过电离效应、库仑散射和韧致辐射等过程会损失能量，从而导致信号峰低能端拖尾比高能端拖尾长，信号峰形状左右明显不对称。另外不同能量的 p 粒子穿过不同长度的介质时损失的能量差异较大，使得找到拟合通用模型的难度较大。

随后我们探究不同厚度铝模对准单能 β 射线的吸收，（以后实验中放射源位置固定在 6mm 处）将真空盒抽到真空状态，测量加入不同厚度铝模时的能谱，如图5所示，注意插入不同厚度 Al 时获取能谱的活时间被设置为相同。

从图中我们可以看到随着吸收膜厚度的增加，谱线的峰位逐渐向左移动，这一点与 γ 射线不一致，后者峰位几乎不移动，这体现了 β 射线吸收的独特性质。

去除本底后对 Al 膜厚度与峰位能量做线性拟合，结果如图6所示，可见两者在一定范围内呈线性关系，随铝模厚度增加，峰位能量减小值逐渐增大，这是由于 β 射线在越厚的铝模中电离和韧致辐射损失的能量越多导致的。

从能谱图也可以看出，随着 Al 膜厚度增大，射线峰的线宽也逐渐变大。信号峰半高全宽随 Al 膜厚度变化如表 I 所示，由于步长比较小，测量半高全宽的误差比较大，我们只能定性看出峰宽随 Al 膜的单调递增关系。这两点可以通过增加采样数与增加步长和 Al 膜厚度得到更精确的关系。

将不同厚度铝膜下获得铝模的计数率与铝模厚度关系作图，如图7所示

通过公式

$$R = R_0 \exp(-t_{Al}/L_{Al})$$

进行拟合求出衰减长度为 $L_{Al} = (496.9 \pm 5.0)\mu m$ ，值得注意的是这里求出的衰减长度仅

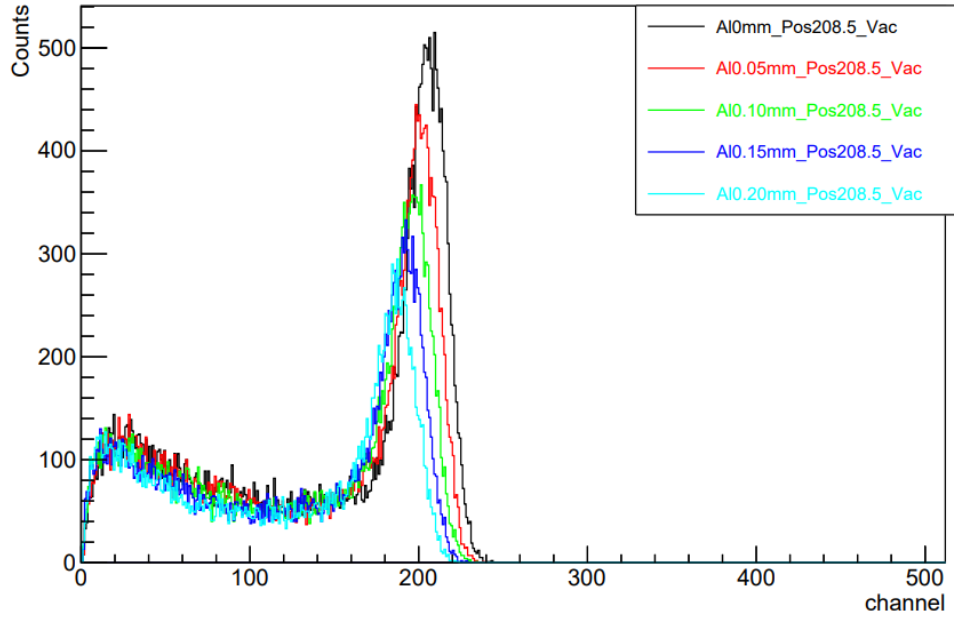


图 5. NaI 探测器测量的同一测量位置加入不同厚度铝模时探测得到的 β 射线能谱图

表 I. 信号峰半高全宽随 Al 膜厚度变化

tAl(um)	半高全宽 (MeV)
0	0.122
50	0.132
100	0.138
150	0.141
200	0.143

为在当前大小磁场下 (646.3gauss) 探测器在 208.5mm 位置时筛选的 β 粒子在铝模中衰减长度，不排除其随粒子能量变化的可能。

随后我们对比在真空盒中充满空气与抽成真空得到的射线能谱差异。

如图8和图9所示，为不同出射窗口测量的能谱，每个能谱获得方式为抽真空与不抽真空，磁感应强度为 655.5Gauss，比较两种模式下信号强度，可以看出计数率差异，并计算出衰减长度。

根据两图整理出的数据表格如表

β 射线动能通过磁感应强度以及偏转半径计算，于是我们得到了衰减长度随 β 粒子动能的变化关系，如图10所示。发现能量越大的 β 粒子穿透能力越强，即衰减长度越大

比较同一窗口是否抽真空的峰位变化，可以计算出动能差异，由公式

$$\frac{dE}{dx} = \frac{E_A - E_V}{x}$$

可以计算出粒子在空气中单位长度的能损，如图11所示

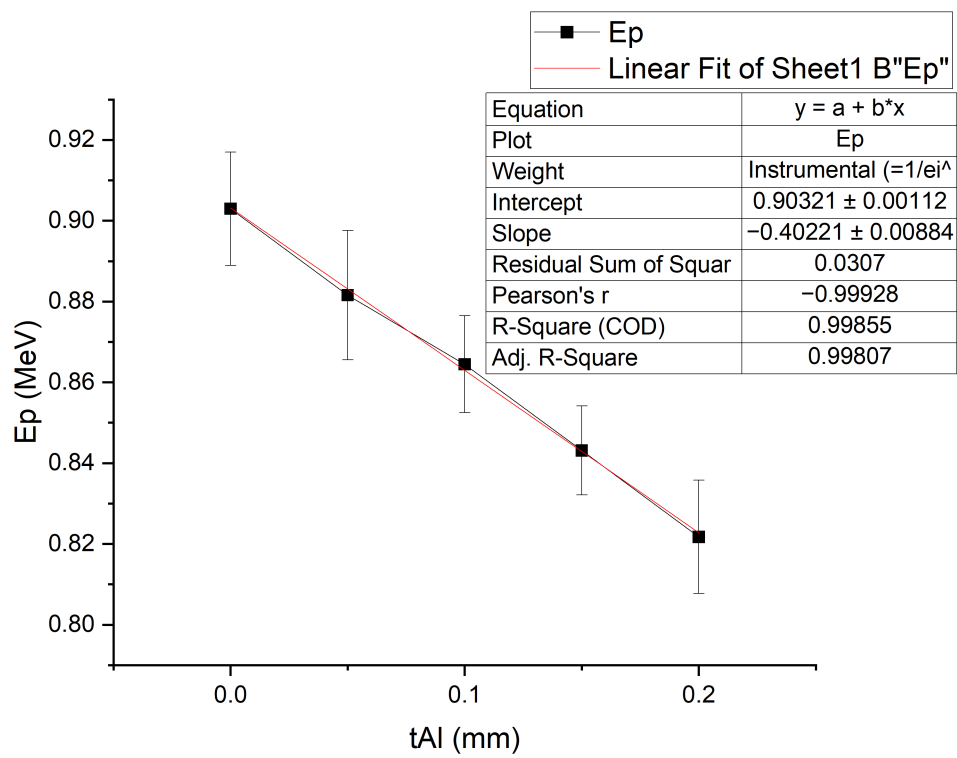


图 6. 信号峰位能量随 Al 膜厚度变化

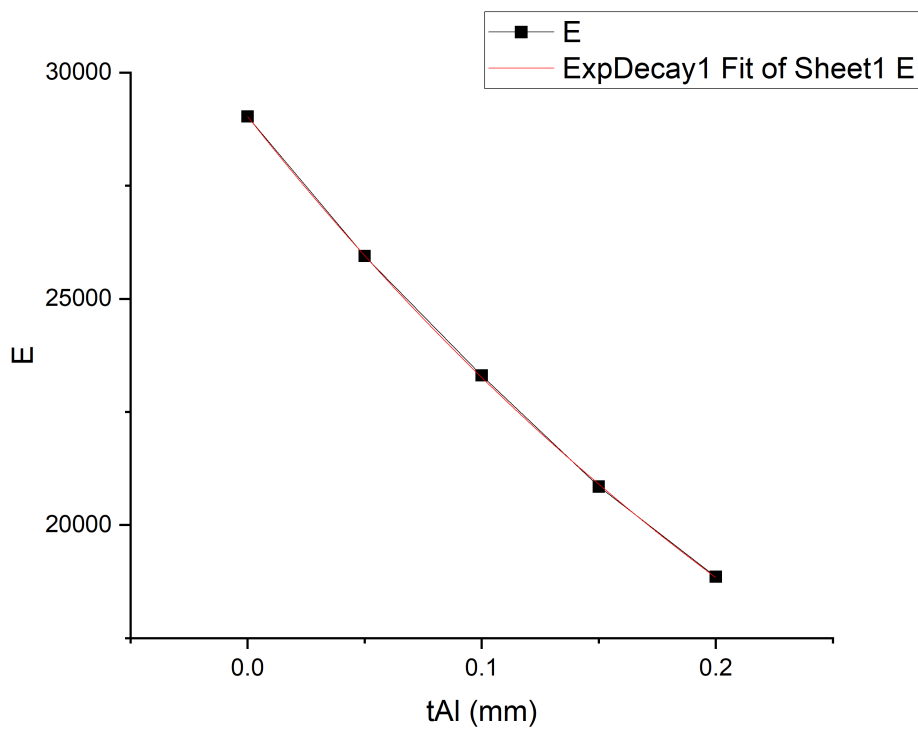


图 7. 计数率随 Al 膜厚度变化

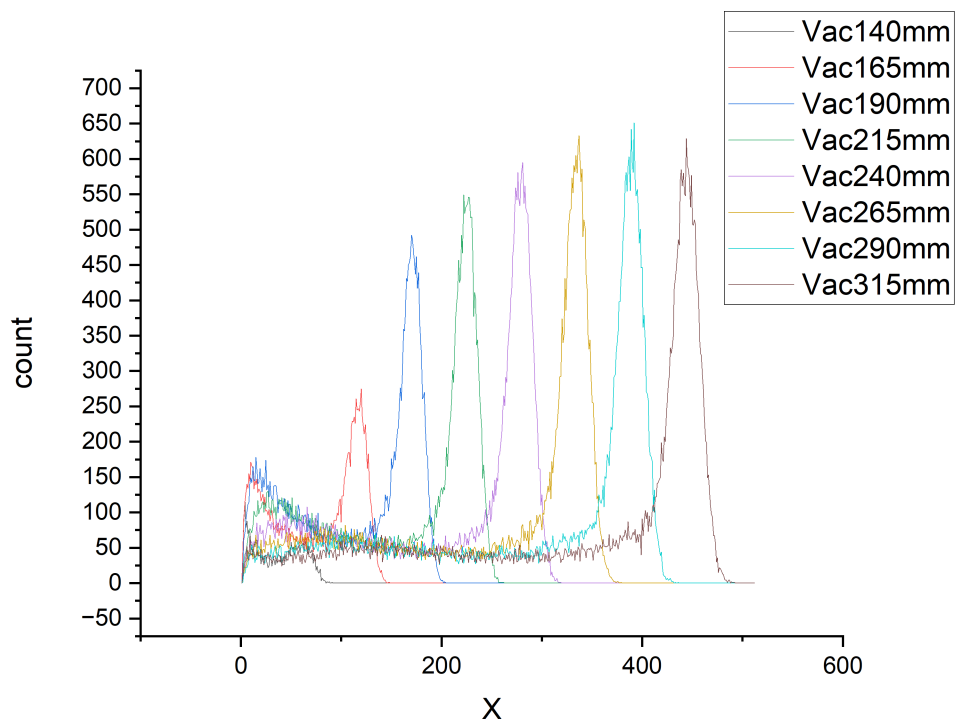


图 8. 真空盒抽真空下不同出射窗能谱分布

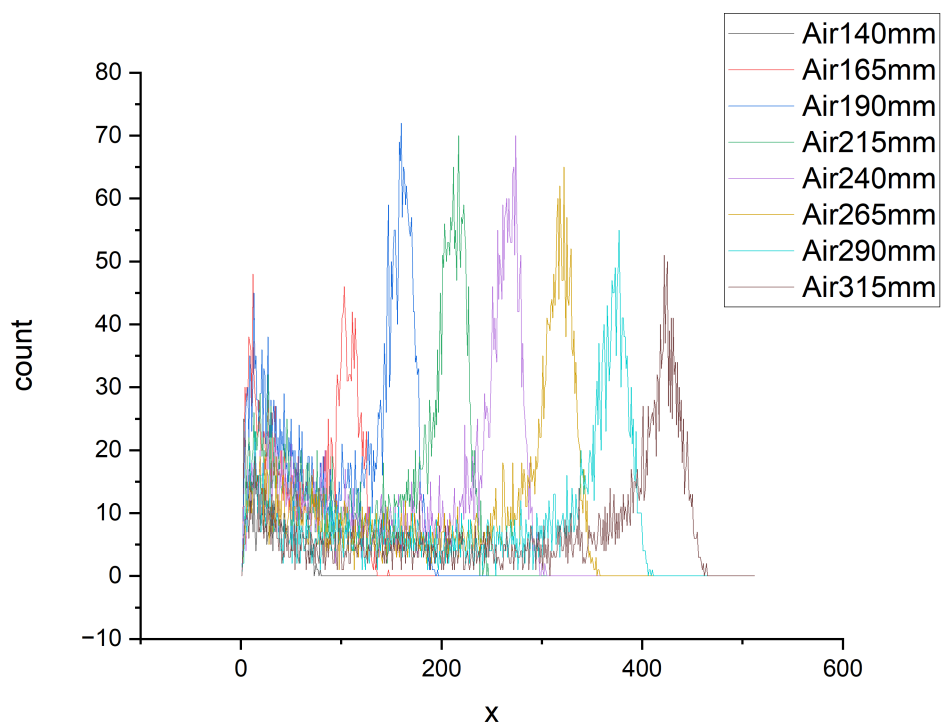


图 9. 真空盒充满空气下不同出射窗能谱分布

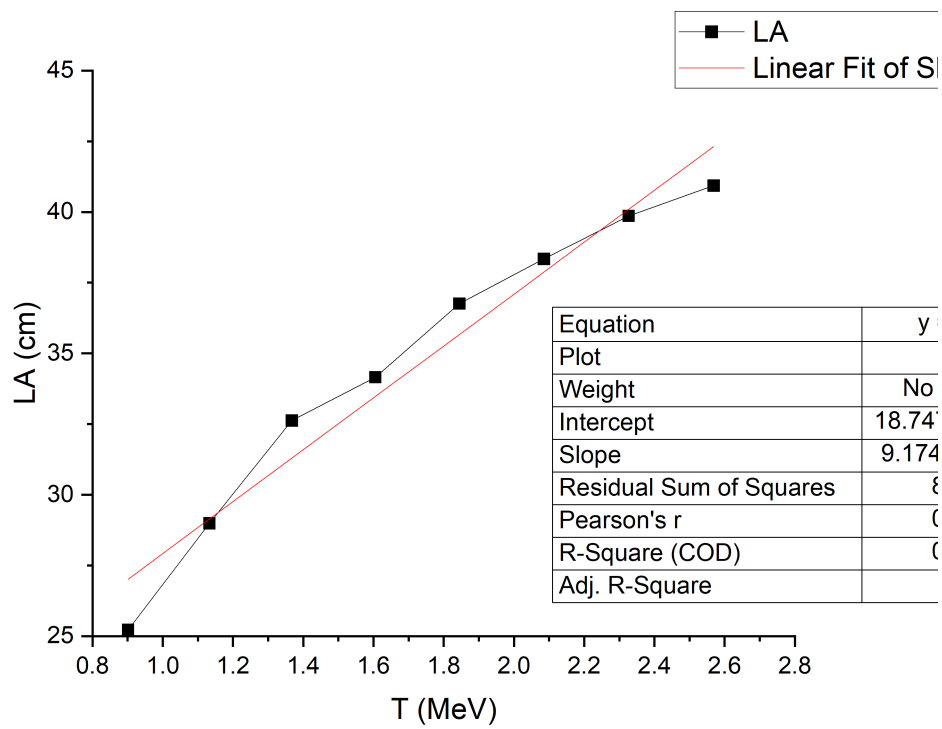


图 10. 在空气中的衰减长度随粒子动能变化关系

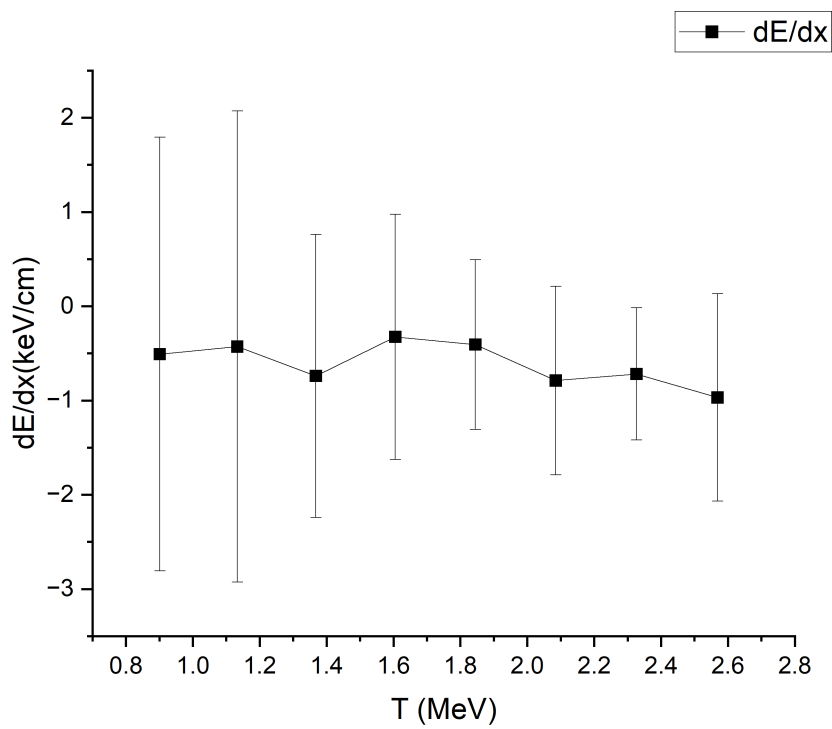


图 11. 在空气中不同能量的 β 粒子单位长度能量损失

表 II. 探测器在不同位置对应的 β 粒子动能, 计数率, 径迹长度, 峰位, 和在空气中的单位长度能损

pos(mm)	T(MeV)	Vaccoun	Aircoun	x(cm)	LA(cm)	peakAir	peakVac	dE/dx(keV/cm)	err(keV/cm)
140	0.90129	3438	648	42.09734	25.2268	57	62	-0.50768	2.3
165	1.1328	15038	2685	49.95132	28.99259	115	120	-0.42786	2.5
190	1.36794	26319	4474	57.8053	32.62135	160	170	-0.73945	1.5
215	1.60551	30604	4476	65.65929	34.15483	217	222	-0.3255	1.3
240	1.84477	33508	4536	73.51327	36.76144	274	281	-0.40701	0.9
265	2.08525	35752	4282	81.36725	38.34124	322	337	-0.78798	1
290	2.32664	37189	3966	89.22123	39.86196	377	392	-0.71862	0.7
315	2.56874	38763	3618	97.07521	40.93332	422	444	-0.9687	1.1

由于本实验是模拟实验, 所以受到时间和计算机算力的限制, 导致误差比较大, 因为相同时间下计算机无法模拟与正常实验相同的那么多粒子数。就比如峰值位置受到了很大的随机性的影响, 导致相关数据参考价值不是很大。但从物理直觉上可以简单分析得到, β 粒子在空气中单位长度损失的能量随着其动能的增加而增加。

V. 思考题

(b) 因为我们使用公式

$$L_A = \frac{x(p_V/p_A - 1)}{\ln(R_A/R_V)}$$

时将 p_V 近似成 0 当 p_V 不为 0 时将对 L_A 产生 $p_V/p_A \approx 0.01\%$ 的影响

VI. 结论

本实验采用相对论实验的仪器装置, 用狭缝和偏转磁场对 β 粒子的能量进行筛选, 并用 NaI 探测器进行能谱探测。做了两组对比试验, 第一组是在探测器前加入不同厚度的铝片, 研究能谱峰位, 半高全宽, 计数率随加入铝片厚度的变化, 并计算了衰减常数。

第二组实验是研究将探测窗放在不同位置, 对比真空盒充满空气和抽成真空的能谱变化, 研究空气对 β 粒子衰减的影响, 判断出 β 粒子在空气中衰减长度和单位长度能损随其动能的变化关系。并对相关物理量进行了误差分析。

VII. 致谢

wsg老师在实验中的耐心辅导, 以及他提供的充分资料对于我对实验的领悟有重要帮助, 在此致谢。