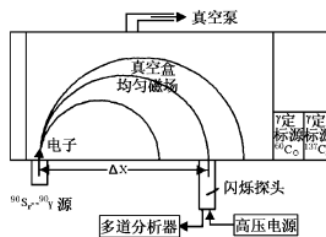
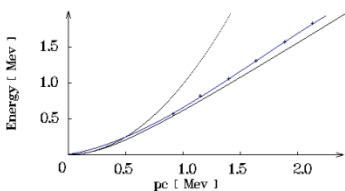


### 拟合曲线向上偏移的一些解决办法

相对论验证的实验基本原理和方法是：由 $^{90}_{38}\text{Sr}-^{90}_{39}\text{Y}$ 源出射的 $\beta$ 粒子垂直射入均匀磁场，因受到与运动方向垂直的洛伦兹力作用而作圆周运动。在磁场外距 $\beta$ 源 $\Delta X$ 处放置一事先进行过能量定标的闪烁探测器来接收从该处出射的 $\beta$ 粒子，则这些粒子的能量即可由探测器直接测出；而粒子的动量值为： $p = eB R = eB\Delta X/2$ 。由于从 $\beta$ 源 $^{90}_{38}\text{Sr}-^{90}_{39}\text{Y}$ 射出的 $\beta$ 粒子具有连续的能量分布(0~2.27MeV)，因此探测器在不同位置(不同 $\Delta X$ )就可测得一系列不同的能量值及与之对应的动量值。这样就可以确定测量范围内动能与动量的对应关系，进而验证相对论给出的理论公式的正确性。



由此我们得到了如下两张图片：



```
Magfile: 624.2
CH=82      E=0.184
CH=323     E=0.662
CH=575     E=1.170
CH=668     E=1.330
CH=222     E=0.564 X=19.8 PC=0.917 PCT=0.946 DPC=3.1%
CH=351     E=0.013 X=22.3 PC=1.151 PCT=1.221 DPC=5.7%
CH=476     E=1.050 X=25.0 PC=1.403 PCT=1.404 DPC=5.4%
CH=600     E=1.303 X=27.5 PC=1.642 PCT=1.740 DPC=5.7%
CH=732     E=1.563 X=30.2 PC=1.889 PCT=2.010 DPC=6.0%
CH=864     E=1.823 X=32.8 PC=2.133 PCT=2.277 DPC=6.3%
```

由上图我们看到实验得到的曲线比理论曲线偏高。PC为由 $\Delta X$ 算出的动量值(乘以光速C)，PCT为由E根据相对论关系式算出的动量理论值(乘以光速C)；从结果可以看出，误差在7%以内。

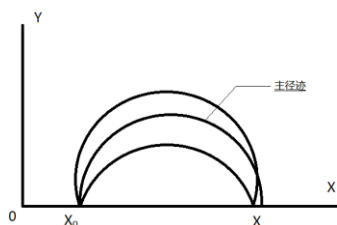
如何解决这些导致曲线向上偏移的误差呢，这里的讨论主要分为以下几个方面：磁场的均匀性；真空度不够；本底的干扰；Al膜和有机塑料薄膜及线性插值。

#### I. 讨论与修正

##### a) 磁场的均匀性

试验中所用的磁场空间(390×180×30mm)是由两块平行的永磁铁提供,这是一个近似均匀的磁场.试验中为解决磁场的均匀性,常采用三种方法:主径迹法,等效磁场法和均匀磁场法.

##### i. 主径迹法



在讨论 $\beta$ 粒子的径迹计算之前必须先定义 $\beta$ 粒子的主径迹.由于 $\beta$ 源的准直程度有限,因此以同一初始动量 $PC_0$ 出射放入 $\beta$ 粒子在方向上有一个连续分布,如右图所示.定义其中入射方向与X轴垂直的那条径迹为具有初始动量 $PC_0$ 的 $\beta$ 粒子的主径迹.

由于在具有相同初始动量的 $\beta$ 粒子的径迹中,主径迹的出射点(坐标为X)与入射点(坐标为 $x_0$ )间的距离最远,因此把闪烁探测器的接收窗口右缘对准主径迹的出射点时的窗口对这种初始动量的 $\beta$ 粒子接收效率最高.由此可以认为窗口接收到的 $\beta$ 粒子的初始动量或出射时的动量即为主径迹落在窗口右缘的 $\beta$ 粒子所具有的初始动量或出射时的动量.所以在用主径迹来推求探测器与 $\beta$ 源之间的距离 $\Delta X$ 与其接收到的 $\beta$ 粒子的动量PC之间的关系时,均

已狭缝窗口的右缘到β 原中心的距离来表征探测器与β 源之间的距离 ΔX.

要求出动量  $P=eBR=eB\Delta X/2$ , 我们还需要知道磁场 B. 但实际情况是磁场是非均匀的我们应该如何找出 ΔX(或 X) 与初始动量或出口处动量之间的正确对应关系. 实际的计算有计算机完成, 计算时在磁场上建立坐标系, β 粒子的初始位置(β 源的位置)坐标为(8. 0, 0. 0), 初始动量的变化范围为 0. 45~3. 0MeV, 径迹计算中所取步长为 1 毫米, 输出的结果为主径迹出射点的横坐标 X 以及该主径迹所对应的出射口出的动量 PC(x).

ii. 等效磁场法

简单来讲, 就是把β 粒子的运动径迹分成 N 等分, 每一份都要进行磁场  $B_i$  的测量, 然后进过一系列繁杂的计算, 有

$$P = \frac{Ne \Delta X}{\pi \sum_i^N \sin \left[ \frac{\pi}{N}(i-1) \right] / B_i}$$

iii. 均匀磁场法

这个较为容易理解. 虽然磁场是非均匀的, 但我们可以取一个比较合理的磁场强度的平均值作为整个磁场区域的磁场强度. 这个平均值可以是取任意一条β 粒子运动径迹的等效磁场, 也可以是整个磁场区域(或其中的一个区域)的磁场强度做加权平均.

b) 真空度不够

我们知道在进行相对论验证实验室, 重要的一条实验条件就是实验要保持在高真空状态下进行, 原因就是为消除空气对β 粒子运动的影响(弹性及非弹性散射). 实验室配有一套低真空系统它由一个可插入磁场的活动真空盒及一台机械泵组成. 真空系统的真空度约为 1 毛.

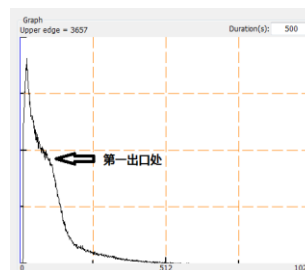
当然由于电子的能量一般都在几十 MeV 以下, 所以能量损失以电离为主(非弹性碰撞), 实验中β 粒子的能量在 3MeV 以下. 真空的影响到底有多大? 这一点可以查到, 随着真空度的提高, β 粒子的能量损失呈指数减少, 也就是说, 随着真空度的提高, 空气对β 粒子的影响将越来越小, 而且这种影响减小的幅度也会越来越小. 所以在低真空 1 毛或接近 1 毛时, 对实验的影响几乎可以忽略不计.

c) 本底的干扰

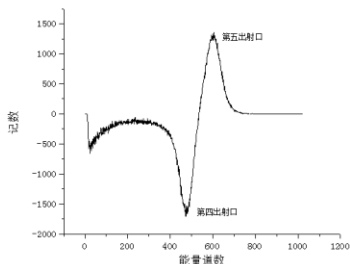
在测量β 粒子的能谱时, 要计算不同出射位置β 粒子全能峰的峰位与面积, 但在最近的第一出射口得到的全能峰(如右图)受到本底的干涉较为严重, 使峰位和峰的面积难以用正常的方法来准确测量, 所以必须合理地扣除本底的干扰.

本底干扰的来源主要是β 粒子打在各种物体上的韧致辐射.

去除本底的方法可以采用已经测量的实验数据: 比如把第五出射口处全能峰范围能谱与第四



出射口全能峰范围能谱相减, 就可以去除本底, 得到全能峰的形状分为上下两部分(如左图), 每一部分近似高斯分布, 这里我们认为第四出射口和第五出射口的本底干扰近似相等. 这种方法比较粗糙, 但结果比修正前准确的多, 而且简单易行. 当然使用这种方法要注意, 最好是临近的两个出射口之间进行相减, 这样可以尽可能的减少误差, 并同时得到两个出射口的能量道数.



d) Al 膜和有机塑料薄膜及线性插值

在计算粒子动能时, 粒子需要穿过 Al 膜, 此时的动能要予以修正, 计算方法如下.

设已知的两组入射和出射能量  $(E_{i1}, E_{o1})$ 、 $(E_{i2}, E_{o2})$ , 则对于已知出射能量  $E_o$  来求出入射能量  $E_i$ :

$$\frac{E_i - E_{o1}}{E_{i1} - E_{o1}} = \frac{E_o - E_{o1}}{E_{i2} - E_{o1}}$$

下面是线性插值所用到的数据表格,

$E_i(\text{Mev})$	$E_f(\text{Mev})$	$E_i(\text{Mev})$	$E_f(\text{Mev})$	$E_i(\text{Mev})$	$E_f(\text{Mev})$
0.317	0.200	0.887	0.800	1.489	1.400
0.360	0.250	0.937	0.850	1.536	1.450
0.404	0.300	0.988	0.900	1.583	1.500
0.451	0.350	1.039	0.950	1.638	1.550
0.497	0.400	1.090	1.000	1.685	1.600
0.545	0.450	1.137	1.050	1.740	1.650
0.595	0.500	1.184	1.100	1.787	1.700
0.640	0.550	1.239	1.150	1.834	1.750
0.690	0.600	1.286	1.200	1.899	1.800
0.740	0.650	1.333	1.250	1.936	1.850
0.790	0.700	1.388	1.300	1.991	1.900
0.840	0.750	1.435	1.350	2.038	1.950

此外,实验表明封装真空室的有机塑料薄膜对粒子存在一定的能量吸收,尤其对小于 0.4MeV 的 $\beta$  粒子吸收近 0.02MeV. 由于塑料薄膜的厚度及物质组分难以测量,可采用实验的方法进行修正. 实验测量了不同能量下入射动能  $E_i$  和出射动能  $E_f$  (单位均为 MeV) 的关系,采用分段插值的方法进行计算. 具体数据见下表,

$E_i(\text{Mev})$	0.382	0.581	0.777	0.973	1.173	1.367	1.567	1.752
$E_f(\text{Mev})$	0.365	0.571	0.770	0.966	1.166	1.360	1.557	1.747

## II. 参考文献

- 郭慧敏、周会,等.  $\beta$  粒子验证相对论动量-能量关系试验中的一些问题[J]. 北京师范大学学报(自然科学版). 2002. 38:1
- 陈玲燕、秦树基、张哲,等. 该进行验证相对论效应实验装置[J]. 工程物理. 1998. 8:5
- 相对论验证实验. 近代物理实验讲义. 复旦大学物理教学中心
- 附录五. 近代物理实验讲义. 复旦大学物理教学中心