

# 相对论验证试验 小论文

凌春 08300300087

## 摘要：

This investigation is performed to verify the relativity of Einstein. In order to do this, we suspect the kinetic energy of certain electrons in the magnetic field by EDS and calculate the momentum of the circular path of certain electrons. Drawing the relation schema of energy and momentum of these electrons, it comes out to be very close to the results of the relativity.

## 关键词：

物理，相对论，磁场，高速电子

## 0 引言：

爱因斯坦在 1905 首次提出了相对论理论，解释了高速运动的物体的运动规律。相对论彻底颠覆了人们关于时间和空间的概念，它和量子力学是现代物理学的两大基本支柱。

关于相对论的验证，前人做了很多相关的实验，我们本次实验通过研究高速运动的电子在磁场中的运动规律，以求验证相对论。

## 1 理论/实验部分：

### 1.1 实验原理：

当电子在垂直于均匀磁场的平面中运动时， $mV^2/R=eVB$ ，进而可变形为  $P=mV=eBR$ ，其中  $P$  为电子的动量， $R$  为电子运动轨道的曲率半径，基于上式中  $P$  和  $BR$  值来表示电子的动量。

根据爱因斯坦的相对论，电子的相对论质量为  $m=m_0/\gamma$ ， $m_0$  为电子的静止质量，在高速情况下， $m$  与  $m_0$  相差很大， $\beta$  粒子的速度接近光速，因而要用相对论关系：

$$Ek=mc^2-m_0c^2 = E_k=(p^2c^2+m_e^2c^4)^{1/2}-m_e c^2$$

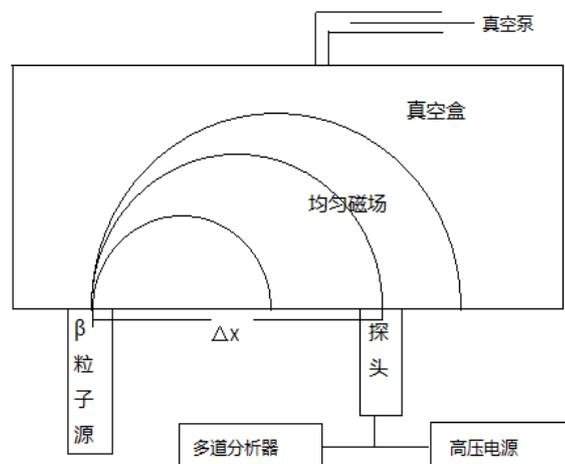
### 1.2 实验装置：

实验装置如下图所示，从  $\beta$ -源射出的  $\beta$ -粒子经准直后射入以均匀磁场，粒子因受到与运动方向垂直的洛伦兹力的作用而作圆周运动，这时粒子的动量  $P$  和它作圆周运动的轨道半径  $R$  有如下关系：

$$P=BeR$$

在磁场边放置能量探测器，其接受窗口狭缝距  $\beta$ -源为  $\Delta x$ ，则探测器接收到的  $\beta$ -粒子的动量为  $P=Be\Delta x$ ，而这些粒子的能量可由探测器直接测定。

放射源 有三个放射源，分别是两个  $\gamma$  放射源  $^{137}\text{Cs}$  和  $^{60}\text{Co}$ ，以及  $\beta$ -粒子源  $^{90}\text{Sr}$ 。



能量探测器 实验室用 Al 窗 NaI (TI) 闪烁体探头配合微机多道分析器组成  $\gamma$  能谱仪来测定  $\beta$ -例子的能量。

磁场 实验上用铁氧体永磁材料构成空间为  $390 \times 180 \times 30\text{mm}$  的近似均匀磁场。

真空系统 为了消除气体对  $\beta$ -粒子的影响，本实验配有一套低真空系统，它由一个可插入磁场的活动的真空盒和一台机械泵组成，真空系统的真空度约为 1torr。

### 1.3 实验数据：

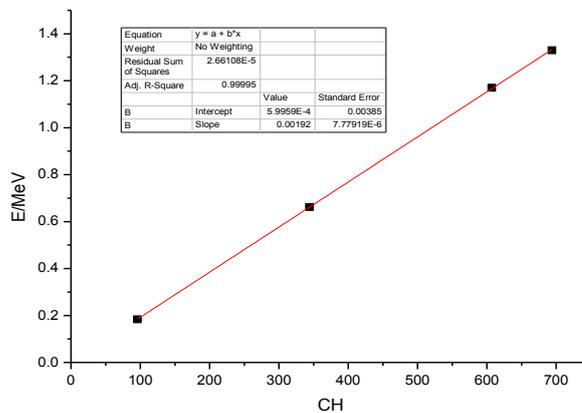
#### 1.3.1 能谱仪定标

因  $\gamma$  射线的穿透能力非常强，所以可以直接把  $^{137}\text{Cs}$  和  $^{60}\text{Co}$  放置在探头前面测量得到能谱。找到能谱上四个峰位置，能量和测得的峰道址列成表格如下：

	$^{137}\text{Cs}$		$^{60}\text{Co}$	
CH	344	96	607	694
E/MeV	0.662	0.184	1.17	1.33

以 CH 为横坐标，对应的 E 值为纵坐标，把测量点都标注在坐标轴上，用 origin 线性拟合得到谱仪的能量与道址的对应关系：

$$E = 0.00192 \times \text{CH} + 0.0006 \quad (\text{MeV})$$

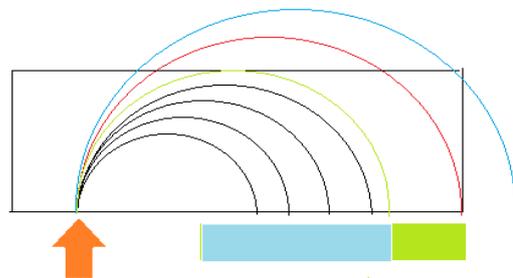


#### 1.3.2 $\beta$ -粒子能量测量

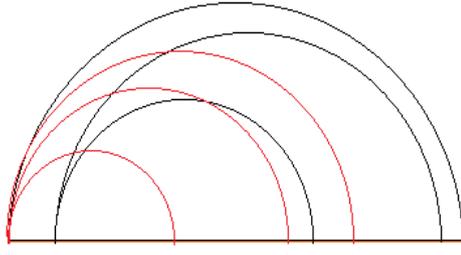
在  $X=10\text{cm}$  的位置放上  $\beta$ -放射  $^{90}\text{Sr}$ ，将探头分别置于不同的位置，在相应的位置测量能谱，找到光电峰的位置并记录，结果列表如下：

X/cm	32.5	30.0	27.5	25.0	22.5	20.0
CH	821	712	591	466	348	231

试验讨论：实验提供的磁场是一块长方形的区域， $\beta$ -粒子从长方形区域边长较长的那一边垂直入射，以这一边上的一段作为直径在长方形的磁场内作半圆周运动后从这一边的另外一个位置射出。因为长方形的另一边比较的短，所以不一定能够在其中划出一个直径较大的圆， $\beta$  粒子可能会撞在另外一面上，整个磁场测量  $\beta$  粒子能量是有一个极限值的，测量需要在这个极限值以内进行。图中蓝色的部分为可测量部分，而绿色的部分则测量不到电子的能量。



实测的过程中，探头放置到  $X=35\text{cm}$  的位置测量时，发现找不到峰，所以，我们在实验之前先使用了试测的方法找到了比较  $X=20-32.5\text{cm}$  的范围再分别测量。



如果可以对实验的设备加以改进，希望可以把真空室的形状改为半圆，电子从半圆的半径垂直入射，这样，在半径上的任何一点都可以测的相应的 $\beta$ 粒子的能量了，这样就可以省去试测的过程了。相应的示意图如左：

### 1.3.3 软件数据处理

打开相对论实验处理软件，在真空状态下，分别选择主经迹法，等效磁场法和均匀磁场法输入并处理数据得到结果如下表：

CH	X /cm	E /MeV	PCT /MeV	主经迹法		等效磁场法			均匀磁场法 B=647.3Gs	
				Pc/MeV	DPc/%	B/Gs	Pc/MeV	DPc/%	Pc/MeV	DPc/%
821	32.5	1.674	2.124	2.166	2	651.4	2.196	3.4	2.182	2.7
712	30	1.464	1.908	1.921	0.7	650.8	1.95	2.2	1.94	1.7
591	27.5	1.231	1.666	1.675	0.6	650.3	1.705	2.4	1.697	1.9
466	25	0.991	1.412	1.43	1.3	649.1	1.459	3.3	1.455	3
348	22.5	0.766	1.171	1.184	1.2	647.8	1.213	3.7	1.212	3.6
231	20	0.547	0.926	0.937	1.2	644.3	0.966	4.2	0.97	4.7

## 2 结果与讨论：

### 2.1 软件结果比较

从实验软件的结果可以看出，测量 Pc 值与理论值相差很小，而且通过横向的对比可以看出，对于同一组值，用主经迹法得到的结果优于等效磁场法的结果，等效磁场法结果优于均匀磁场法。

因实验中的磁场事实上并不是均匀的，因此在计算时，软件提供了三种不同的计算方法，用主经迹法应该是所有方法当中磁场值最准确的一组，而等效磁场法和均匀磁场法对于磁场都存在一定的近似，而且从结果可以推断等效磁场法的近似比均与磁场法更小因而更准确。所以，磁场的近似导致了不同的方法得到的结果微小差别。

### 2.2 能量修正：

#### 2.2.1 空气对能量的损失：

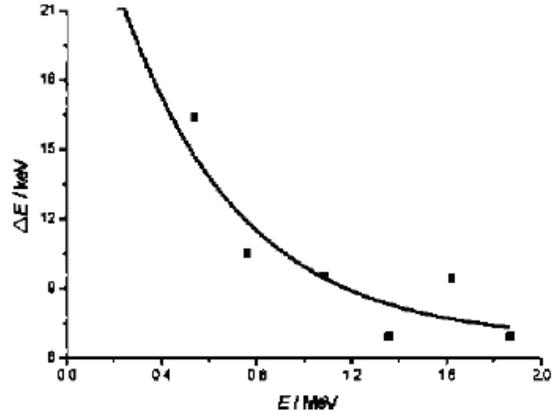
抽真空过程结束，因机械泵本身的极限和真空室漏气的问题，实际情况真空室只能达到粗真空，仍然有能量损耗。<sup>[2]</sup>但在减小压强的过程中，电子的平均自由程不断地增大。达到粗真空时，在电子运动的路径上，电子与气体分子碰撞的次数已经很少，能量损耗已经非常有限，所以在近似的范围内已经可以测量了并作为结果了。

#### 2.2.2 Al 膜能量的损失：

由于探测器使用的闪烁体 NaI (Tl) 极易潮解，故在其表面包有约 0.02cm 厚的金属 Al 膜，因此需要对穿过 Al 膜而造成的能量损失予以修正，计算时，<sup>[1]</sup>采用插空法对能量进行修正，具体见附表 1。

### 2.2.3 有机薄膜能量损失：

实验中真空室是由有机薄膜包裹的， $\beta$  粒子在穿过薄膜的过程中存在动能的损失，通过查找文献<sup>[3]</sup>得到 $\beta$  粒子通过有机塑料膜的能量损失与入射有机塑料膜前动能值的关系图如右所示：



通过对比数据可以发现，实测过程中我们在低能区测量的粒子非常少，实验数据比较偏向高能区，这样使得损失明显的低能区被忽略掉了。

<sup>[1]</sup>仍然根据经验表格，采用插空法修正能量数据，具体见附表 2。

### 2.3 数据计算和结果：

上面已经提到，磁场值在本实验当中是不均匀的，而要计算电子的动量值就必须要知道磁场值。在实验过程中软件提供了等效磁场法和均匀磁场法两种方法的磁场，在计算的过程中，磁场值用软件提供的值代入计算。因为主径迹法各点的磁场值无法知道，所以计算时未采用主径迹法。

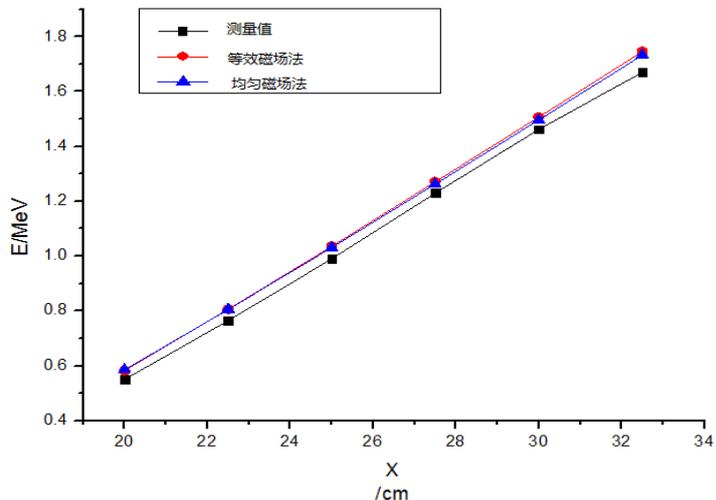
#### 2.3.1 表格结果：

下表当中  $E_f$  为能谱仪测量的值，而  $E_i$  为考虑了两个修正之后的能量值。

CH	X /cm	$E_f$ /MeV	$E_i$ /MeV	等效磁场法				均匀磁场法 B= 647.3Gs		
				B /Gs	Pc /MeV	$E_i$ 相对论理论 /meV	相差 /%	Pc /MeV	$E_i$ 相对论理论 /MeV	相差 /%
821	32.5	1.576	1.671	651.3	2.198	1.7454	4.48	2.184	1.732	3.68
712	30	1.367	1.462	650.7	1.952	1.5064	3.00	1.941	1.496	2.32
591	27.5	1.135	1.229	650.3	1.707	1.2703	3.29	1.699	1.262	2.67
466	25	0.895	0.990	649.1	1.4605	1.0358	4.06	1.456	1.031	4.21
348	22.5	0.6686	0.765	647.7	1.214	0.8062	5.26	1.213	0.805	5.15
231	20	0.444	0.550	644.3	0.966	0.5818	5.71	0.970	0.585	6.42

#### 2.3.2 数据比较：

在同一张图像中分别画出用等效磁场法和均匀磁场法得到的相对论的理论值和实测值如下：



### 3 结论/小结：

#### 3.1 实验结论：

从表格中看出，实验中，高速电子的动量和动能的实测值比较满足关系式：

$$E_k = mc^2 - m_0c^2 = E_k = (p^2c^2 + m_e^2c^4)^{1/2} - m_e c^2$$

即满足相对论，相差在很小的范围内。

从上图中可以看出，用等效磁场法和均匀磁场法得到的结果与相对论的理论结果吻合得比较好。从表格和图像两方面基本就可以验证相对理论了。

#### 3.2 实验结果分析：

实验所测量的值的数量只有 6 组，因为实验器材的设计问题只能测量这么多组的数据，如果可以多增加数据的量应该可以使结论更加的肯定。

从图表中可以明显看出，测的值都是在理论值以下，说明测量的能量值偏小，分析这个结果，可能有多种原因：

A 真空室的气体抽得不够完全，穿过其中的电子仍存在很小的能量衰减。

B 峰位读数的误差。

C 磁场的近似和能量修正带来一定的误差。

D 实验中使用的  $\beta$  源封存在小容器当中并从一个非常小的点出射，根据波粒二象性的理论，从孔内出射的电子必然是存在衍射角的，因而粒子并非完全的垂直于直径，而是以很多不同的角度入射到磁场中的，因而造成了能谱的展宽，峰位的不确定。

以上各种因素共同作用导致了测量结果相对于理论结果的偏移。

### 4 致谢：

感谢指导老师姚红英在实验中的指导和帮助。

### 5 参考文献：

- [1] 近代物理实验补充讲义 复旦大学物理教学实验中心
- [2] 真空技术 王欲知等 北京航空航天大学出版社
- [3] 改进型验证相对论效应实验装置 2 陈玲燕等

### 6 附录：

表 1 Al 膜的能量修正

$E_{ib}$	0.497	0.545	0.74	0.79	0.937	0.988	1.184	1.239	1.44	1.489	1.638	1.685
$E_{fb}$	0.4	0.45	0.65	0.7	0.85	0.9	1.1	1.15	1.35	1.4	1.55	1.6
$E_f$	0.444		0.67		0.895		1.135		1.37		1.577	
$E_i'$	0.539		0.76		0.983		1.222		1.45		1.663	

单位：MeV

表 2 有机薄膜能量修正

$E_{ib}$	0.382	0.581	0.78	0.97	1.173	1.367	1.567	1.752
$E_{fb}$	0.365	0.571	0.77	0.97	1.166	1.36	1.557	1.747
$E_i'$	0.539	0.758		0.98	1.222	1.454	1.663	
$E_i$	0.550	0.766		0.99	1.229	1.462	1.671	

单位：MeV