

预习    操作记录		实验报告    总评成绩	

# 《大学物理实验》课程实验报告

专业：实验人姓名：学号：

参加人姓名：

日期：        年    月    日        室温：相对湿度：

## 实验 11    电子荷质比实验

### [一、实验前思考题]

1. 能否利用磁场对带电粒子的作用力来增大粒子的速度或者动能，为什么？
2. 一根载流长直导线周围会产生非均匀磁场，现有一带正电粒子平行于导线方向射入该磁场中，它此后的运动如何，轨迹如何，大致定性说明即可。

## [二、实验目的]

1. 学习带电粒子在磁场中的运动规律；
2. 掌握利用电子在磁场中偏转的性质测定电子荷质比；
3. 通过实验加深对洛伦兹力的认识。

## [三、仪器用具]

编号	仪器名称	数量	主要参数（型号，测量范围，精度）
1	可调恒流源		BEM-5003
2	可调电压源II		BEM-5002
3	电子束发射管		BEM-5703
4	电子荷质比基座		含亥姆赫兹线圈、镜面标尺（BEM-5017）
5	摄像头		
6	微型计算机		

## [四、原理概述]

### 1. 前言

19 世纪 80 年代英国物理学家 J·J 汤姆逊做了一个著名的实验：将阴极射线受强磁场的作用发生偏转，显示射线运行轨迹的曲率半径，并采用静电偏转力与磁场偏转力平衡的方法求得粒子的速度，结果发现了“电子”，并测出电子的电荷量与质量之比，对人类科学做出了重大的贡献。

电子荷质比  $e/m=1.7\times 10^{11}$  C/kg,  $e/m$  是一个常用的物理常数，它的定义是电子的电荷量与其质量的比值，经现代科学技术的测定电子荷质比的标准值是： $1.759\times 10^{11}$  C/kg。当然测量电子荷质比的方法在物理实验中有许多种，本实验仪是以当年英国物理学家汤姆逊的思路，利用电子束在磁场中运动轨迹发生偏转的方法来测量。通过该实验的操作不仅可以测量出电子荷质比还能加深对洛伦兹力的认识。

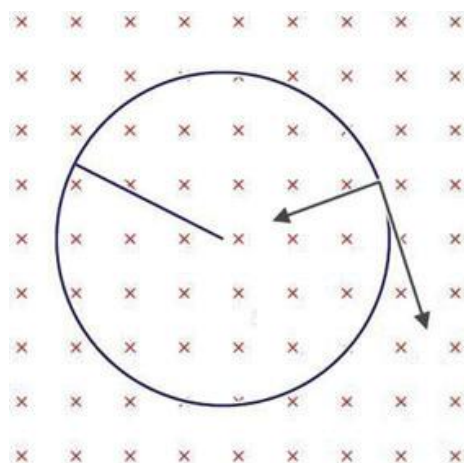
电子荷质比测试仪的中心器件是三维立体的威尔尼氏管，通过它可以生动形象地显示出电子束的运行轨迹，当将威氏管放于亥姆霍兹线圈产生的磁场中时，用电压激发它的电子枪发射出电子束，进行实验操作。

### 2. 电子荷质比测量原理

当一个电荷以速度  $v$  垂直进入均匀磁场时，电子要受到洛伦兹力的作用，它的大小可由公式(1)：

$$\vec{F} = e \cdot \vec{v} \times \vec{B} \quad (1)$$

所决定，由于力的方向是垂直于速度的方向，如右图所示，则电子的运动的轨迹是一个圆，力的方向指向圆心，完全符



合圆周运动的规律，所以作用力与速度又有公式(2)：

$$F = \frac{m \cdot v^2}{r} \quad (2)$$

其中， $r$  是电子运动轨迹圆周的半径，由于洛伦兹力就是使电子作圆周运动的向心力，因此：

$$e \cdot v \cdot B = \frac{m \cdot v^2}{r} \quad (3)$$

由公式转换可得：

$$\frac{e}{m} = \frac{v}{r \cdot B} \quad (4)$$

实验装置是用一个电子枪，在加速电压  $U$  的驱使下，射出电子流，因此  $e \cdot U$  全部转变成电子的输出动能，因此又有：

$$e \cdot u = \frac{1}{2} m \cdot v^2 \quad (5)$$

通过公式(4)，(5)可得：

$$\frac{e}{m} = \frac{2u}{(r \times B)^2} \quad (6)$$

实验中可采取固定加速电压  $U$ ，通过改变不同的偏转电流，产生出不同的磁场，进而测量出电子束的运动轨迹圆半径  $r$ ，就能测试出电子的荷质比  $e/m$ 。

按本实验的要求，必须仔细地调整管子的电子枪，使电子流与磁场严格保持垂直，产生完全封闭的圆形电子轨迹。按照亥姆兹线圈产生磁场的原理：

$$B = K \cdot I \quad (7)$$

其中  $K$  为磁电变换系数，可表达为：

$$K = \mu_0 \left(\frac{4}{5}\right)^{\frac{3}{2}} \cdot \frac{N}{R} \quad (8)$$

其中  $\mu_0$  是真空导磁率，等于  $4\pi \times 10^{-7}$ ， $R$  为亥姆兹线圈的平均半径， $N$  为单个线圈的匝数，由厂家提供的参数可知  $R=158\text{mm}$ ， $N=130$  匝，因此公式(6)可以改写成：

$$\frac{e}{m} = \left(\frac{125}{32}\right) \times \frac{R^2 \cdot u}{\mu_0^2 \cdot N^2 \cdot I^2 \cdot r^2} = 2.474 \times 10^{12} \times \frac{R^2 \cdot u}{N^2 \cdot I^2 \cdot r^2} (\text{C/kg}) \quad (9)$$

## [五、实验装置]

### 1. 实验设备安装与维护



**警告:为了防止电击，更换灯管前请先断开所有电源。**

#### 1.1 安装汤姆逊管

把汤姆逊管插入底座的灯座里，注意对准灯头和灯座之间的凹槽。

◆ 注意：汤姆逊管是玻璃管，插拔时请小心，防止打破玻璃。

#### 汤姆逊管参数

- 充 气: 氦气
- 气 压:  $10^{-1}\text{Pa}$
- 灯丝电压: 6.3VAC
- 加速电压:  $\leq 250\text{V}$

注意：更换汤姆逊管请使用相同的型号，或者请在原厂购买。



图1 汤姆逊管

#### 1.2 安装亥姆赫兹线圈

- 用螺丝把亥姆赫兹线圈固定在底座上，注意接线端朝外面。
- 固定 2 个线圈之间的 3 个支柱。

#### 1.3 安装镜面标尺

- 松开镜面标尺两端的 2 个夹紧螺栓。
- 把镜面标尺卡在线圈的两侧。
- 旋紧 2 个夹紧螺栓。



图 2 亥姆赫兹线圈



图 3 完成镜面标尺和汤姆逊管安装

### 2. 实验准备

#### 2.1 面板介绍

##### 可调直流电源 II (Tunable DC (Constant Voltage) Power Supply II)

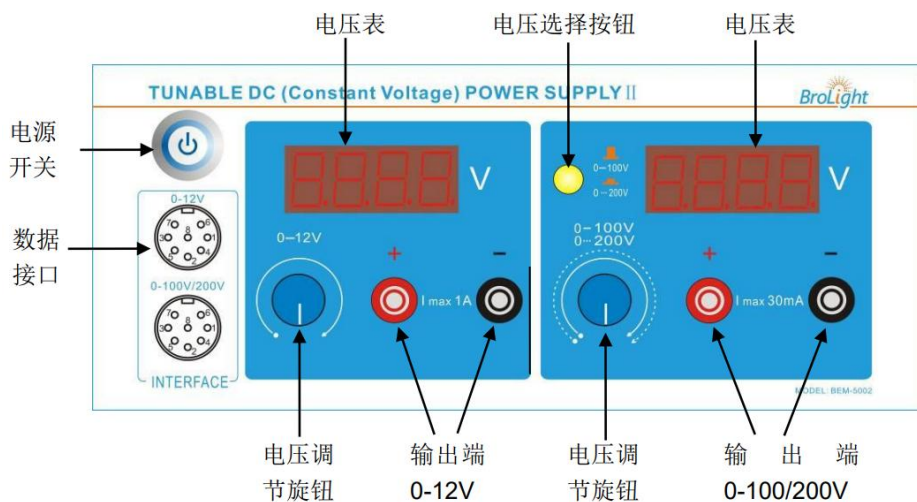


图4 可调直流电源 II

- 电压表: 显示输出端口电压值.
- 电压选择按钮: 设置电压输出范围: 0—12V & 0—100/200 V.
- 电源开关: 开启或者关闭设备电源.
- 电压调节旋钮: 调节输出电压的大小.
- 输出端: 输出工作电源.
- 数据接口: 连接数据处理设备 (PASCO 850 通用接口).

## 2.2 可调恒流电源 (Tunable DC (Constant Current) Power Supply)

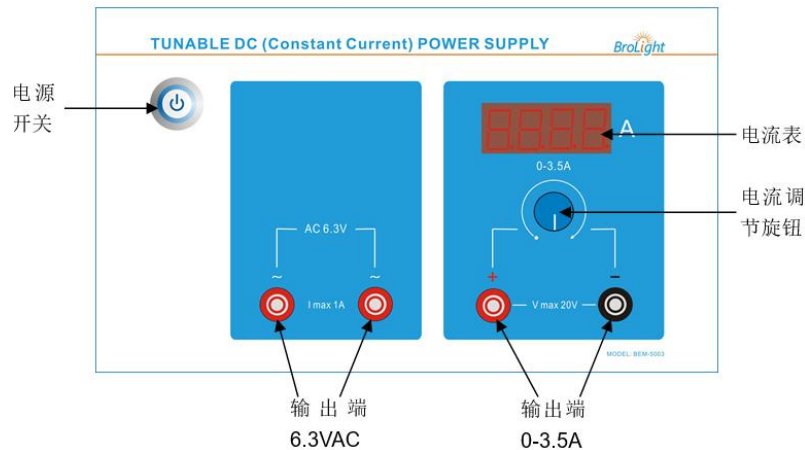


图5 可调恒流电源

- 电源开关: 开启或者关闭设备电源.
- 电流调节旋钮: 调节输出电流大小.
- 输出端: 输出工作电源.
- 电流表: 显示输出端口的电流值.

## 2.3 导线连接



图6 电源为市电220V

**注意: 在您连接任何导线之前, 请确认所有电源开关都处于关闭状态, 所有的电压调节旋钮都逆时针旋到底。**

**注意: 电源电压可以设置为 115VAC or 230VAC. 产品默认设置电源电压为 230V. 请确认你所使用的地区电源电压, 以便正确设置产品输入电源。**

BEM-5002电源 0-200V 输出“+”端 (红色端) 连接到底座加速电压 “Accelerating Voltage” “+”端 (红色端), 0-200V 输出“-”端 (黑色端) 连接到“Accelerating Voltage”“-”端 (黑色端)。

- BEM-5003电源 6.3VAC输出端连接到底座灯丝电压 “Filament”端。
- BEM-5003电源 0-3.5A 输出端串联输出到两个亥姆赫兹线圈 (注意: 2个线圈相反组装, 连线时应该将端口“红-黑-黑-红”串联连线)。
- 连接各个设备的电源线, 用电源线连接设备后面的 “AC POWER CORD, AC 110-120V~/220-240V~, 50/60Hz”插口和市电插座。

(注意: 请选择正确的输入电压, 110-120V~ OR 220-240V~)。

**危险:****电子荷质比管工作电源有高压, 在工作状态下禁止用身体的任何部位去触摸。****[六、实验内容及步骤]****一、测量电子荷质比 ( $e/m$ )****注意: 在开启电源前, 请确认所有调节旋钮都左旋到底。**

1. 按要求连接导线。
2. BEM-5002 可调电压源 II, 设置为 0—200V 档。
3. 打开所有设备的电源。
4. BEM-5002 可调电压源 II, 加速电压调到 **140V**, 耐心地等待, 直到电子枪射出翠绿色的电子束。
5. 调节加速电压, 使得电子束最为聚焦和明亮 (100-120V 左右)。注意: 如果加速电压太高或偏转电流太大, 都容易引起电子束散焦。
6. 增加 0-3.5A 电流, 使电子束向上偏转。
  - 6.1 如果电子束没有偏转或者偏转幅度非常小 (2 个线圈磁场方向相反, 磁场抵消), 则需要改变其中一个线圈的电流方向, 使得 2 个线圈磁场方向一致。
  - 6.2 如果电子束向下偏转, 则需要交换 0-3.5A 电流输出端的插线。
7. 继续增加励磁电流, 直到电子束形成一个封闭的圆。
 

如果电子束不能形成一个封闭的圆, 则需要轻轻的左右旋转灯管底座。
8. 调节固定在线圈后面反光镜的位置和高度, 以方便观察为准, 对准电子束与反射镜中的像, 测出电子轨迹圆的直径, 记录数据。
9. 改变加速电压或者励磁电流, 重复测试记录多组数据。(加速电压  $U$  从 70V~140V, 励磁电流  $I_H$  从 0.5A~1.4A)

**[七、实验数据记录]****表 1 (电压为120 V, 改变电流)**

	$U(V)$	$I_H(A)$	$r(mm)$	$e/m(C/kg)$	$Error\ (%)$
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					



表 2 (电流为1A, 改变电压)

	$U(V)$	$I_H(A)$	$r(mm)$	$e/m(C/kg)$	$Error\ (%)$
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					

## 二、 计算( $e/m$ )

$R=158mm$ ,  $N=130$ 匝,  $B=(4/5)^{3/2} \times \mu_0 \cdot N \cdot I_H / R$ ;

$e/m=2U \cdot (5/4)^3 \cdot R^2 / (N \cdot \mu_0 \cdot I_H \cdot r)^2$ ;

参考标准值  $e/m=1.76 \times 10^{11} C/kg$ 。

## 三 、 电子束在电场中的偏转

可以用灯管中的上下偏转板来观察电子束在电场中的偏转（电偏转）。



图7 手动测量 $e/m$



图8 自动测量 $e/m$

1. 按要求连接导线，只需 6.3VAC 灯丝电压和 120-150V 加速电压，0-3.5A 励磁电流不用连接到线圈。
2. 打开电源，耐心地等待，直到电子枪射出翠绿色的电子束。
3. 连接 0-100VDC 直流电压到底座的“Deflection Plates (Upper and Lower)”，如图 7 所示。先不要调节电压，直接观察电子束的偏转及其偏转的方向，然后慢慢增加电压值，观察电子束的偏转及其偏转的方向，所加偏转电压  $V_d$ ，电子束到设定的 X 轴距离  $V_d$ 。连接 0-100VDC 直流电压到底座的“Deflection Plates (Upper and Lower)”，慢慢增加电压值，观察电子束的偏转

及其偏转的方向。

注：若是没有 0-100VDC 直流电源，也可以把 BEM-5002 直流电源上的加速电压连接到底座的“Deflection Plates (Upper and Lower)”上，不要调节电压，直接观察电子束的偏转及其偏转的方向。

增加电子束在电场中的偏转也可以在图 1 的基础上增加一个 BEM-5002 型直流电压源如图 2 所示，然后用量角器和刻度尺手动测量电偏转高度，也可以再增加 850 数据采集器、摄像头以及用 Pasco Capstone 软件和计算机辅助测量电偏转，两种方法后一种更准确。步骤是按要求连接导线，在原手动测电子荷质比的实验设备基础上加的 6.3V AC 灯丝电压和 0-120-150V 加速电压不变，0-3.5A 励磁电流不用连接到亥姆霍兹线圈或者励磁电流调为 0。打开电源，耐心等待直到汤姆孙管电子枪射出翠绿色电子束，如下表 3 和图 9 所示，可计算电子束偏转情况，作出拟合曲线，也可以在汤姆孙管中直接观察电子束在电场中的偏转（电偏转）。

表 3 加速电压为120 V和150 V的电偏转数据

加速电压V2=120 V		加速电压V2=150 V	
偏转电压Vd（V）	电子束到X轴距离Vd（mm）	偏转电压Vd(V)	电子束到X轴距离Vd（mm）
0		0	
20		20	
40		40	
60		60	
80		80	
100		100	
120		120	
140		140	
160		160	

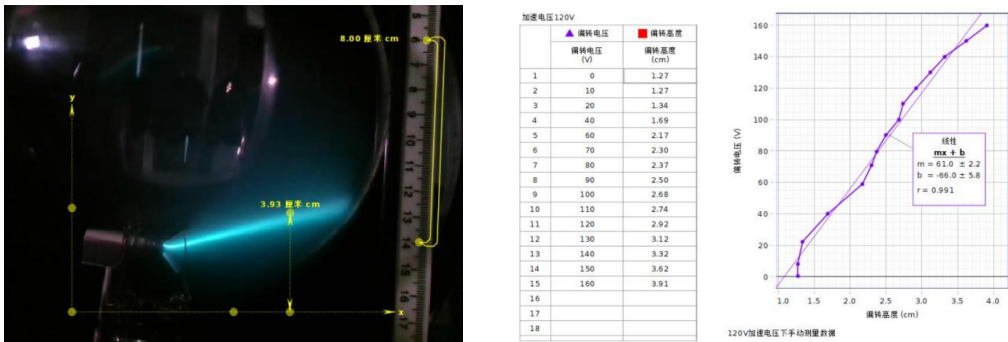


图9 加速电压 V2=120 V时，偏转效果图和拟合图

- 四、 观察电子荷质比实验几种效果图
1. 在下述参数下：灯丝电压: 6.3VAC；加速电压: 80- 150VDC。  
当电子束出现后，可以使用永久磁铁来靠近电子束，观察电子束的偏转方向。



2. 通过旋转汤姆逊管的管座，可以改变电子束与磁场的角度，观察电子束在不同角度下在磁场中的运动轨迹。

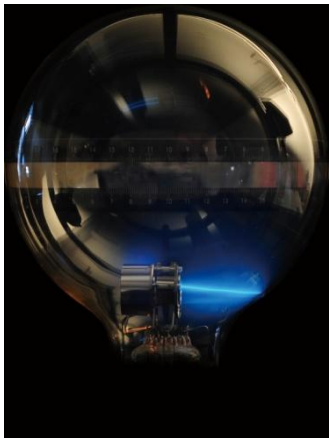


图10

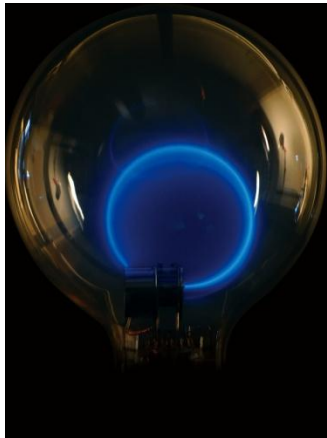


图11

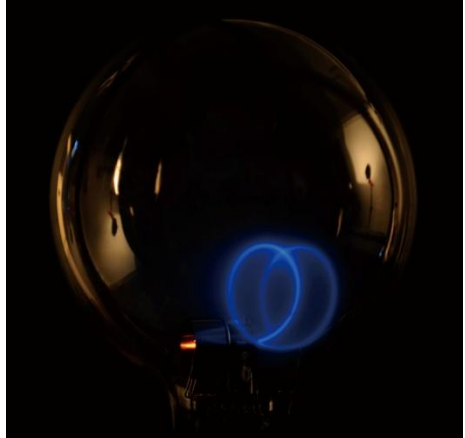


图12

图 10: 在没有外加磁场的情况下，电子束的轨迹。  
图 11: 在外加磁场与电子束出射方向垂直的情况下，电子束的轨迹是一个封闭的圆。  
图 12: 在外加磁场与电子束出射方向不垂直的情况下（偏转一定的角度），电子束的轨迹是一个螺旋线。






五、自动测量电子荷质比实现

调节加速电压，使电子束为聚焦和最明亮（100-120V 左右），继续增加励磁电流，直到电子束形成一个封闭圆（加速电压太高或偏转电流太大，都容易引起电子束散焦。）将高倍数摄像头接入计算机 USB 口，摄像头对准汤姆逊管电子束圆环和刻度尺，运行计算机上电子荷质比模板 Capstore 软件，摄像头选取 1920x1080 分辨率。把标准尺子竖着放在与电子束同一平面的位置旁边。调整摄像头画面直至电子束圈和尺子都在画面中间如图 13。从实验视频中选取刻度尺的长度作为电子束圆环的标尺单位长度，采用三点为一个圆，获取电子束圆环半径值  $r$ ，读取加速电压  $U$  和励磁电流  $I$ ，设置  $e/m$  计算公式，将  $U$ 、 $I$  和获取的  $R$  代入表格中就自动计算  $e/m$  和误差百分比，如图 13 所示，自动测量电子荷值比值误差不超过 10%，精度大大高于手动测量的值，同时也拓展了学生实验的思路，如表 4 所示。



图13 加速电压 V2=120 V时，偏转效果图和拟合图

表 4 摄像头测得的e/m值和误差百分比

	 voltage	 current	 radius	 e/m	 error
	U (伏 V)	I	r (毫米 mm)	"e/m" (c/kg)	error (百分比 %)
1	105	1.00	46.50	1.78E+11	0.92
2	140	1.00	54.00	1.76E+11	0.22
3	115	1.00	49.00	1.75E+11	0.46
4	125	1.00	51.00	1.76E+11	0.12
5	90	1.00	42.50	1.82E+11	3.55
6	95	1.00	44.50	1.75E+11	0.30
7	100	1.00	45.50	1.77E+11	0.39
8	110	1.00	48.50	1.71E+11	2.81
9	120	1.00	50.50	1.72E+11	2.21
10	130	1.00	51.00	1.83E+11	3.87
11	100	0.80	56.50	1.79E+11	1.72
12	100	0.87	53.50	1.69E+11	4.07
13	100	0.93	48.50	1.80E+11	2.15
14	100	1.00	45.50	1.77E+11	0.39

### [八、实验后思考题]

1. 叙述英国物理学家 J·J 汤姆逊做的电子荷质比实验。
2. 为什么电子束在旋转过程中，轨迹变得越来越粗、越来越发散，试分析原因。