

基础物理实验

量子论实验—原子能量量子化的
观察与测量



物理国家级实验教学示范中心（复旦大学）



欢迎大家修读本课程，请注意以下事项：

1. 课程有班级群，请注意加群，以便跟老师联系；
2. 本课程为必修课，若没通过，没有补考，只有重修；
3. 课程评分由平时成绩和期末成绩组成，请出席每一次实验课并提交报告，如特殊原因无法出席，请务必请假并联系老师申请补做；
4. 实验前认真预习并完成预习报告，没有预习报告，不允许做实验；
5. 诚实守信，不允许篡改、伪造或抄袭别人的数据，不允许带着别人的实验报告来实验室做实验，一经发现，该实验为 0 分。

量子论实验—原子能量量子化的观察与测量

1900年普朗克提出了关于能量量子化的假设，圆满地解释了黑体辐射的规律，从而开创了量子论的新时代。1905年爱因斯坦提出了光量子论，解释了光电效应。1913年玻尔提出了原子结构的量子论，很好地解释了氢原子的线状光谱，为量子力学的创建起了巨大的推动作用。但玻尔理论的定态假设与经典电动力学明显对立，而频率定则带有浓厚的人为因素，故当时很难为人们所接受。正是在这样的历史背景下，1914年德国实验物理学家弗兰克（J. Frank）和赫兹（G. Hertz）采用慢电子与稀薄气体原子碰撞的方法，利用两者的非弹性碰撞将原子激发到较高能态，通过测量电子与原子碰撞时交换某一定值的能量，直接证明了原子能级的存在，并验证了频率定则，为玻尔理论提供了独立于光谱研究方法的直接实验证明。由于这项卓越的成就，这两位物理学家同获1925年诺贝尔物理学奖。

后人将这个著名的实验称为弗兰克-赫兹实验，该实验至今仍是探索原子内部结构的主要手段之一。在基础物理实验中引入这一经典的近代物理实验，有利于拓宽学生的视野。

实验目的

1. 加深对原子量子化结构的认识，加强对原子能量量子化的理解；
2. 了解电子和原子碰撞时的能量交换过程，建立电子和原子碰撞的理论模型；
3. 建立原子能量量子化的测量模型，观察氖管的发光现象和电流变化规律；
4. 测量氖原子的第一激发电位，分析物理模型中的假设对测量结果的影响。

实验原理

一、玻尔原子理论

原子的核式结构模型认为：原子由原子核和核外电子组成，电子绕核做高速运动。按照经典电磁理论，电子做圆周运动，会不断发射电磁波，由于损失能量，电子运动半径会不断地减小，最后碰到原子核，原子会坍塌。

玻尔从研究氢原子出发，提出关于原子的两个基本假设：

（1）定态假设。原子系统只能处在一系列不连续的能量状态，在这些状态中，虽然电子绕核做加速运动，但并不发射也不吸收电磁波，原子系统的这种稳定状态叫做“定态”。原子处于定态时，原子的能量不论通过什么方式发生改变，只能是原子从一个定态跃迁到另一个定态。

（2）跃迁假设。原子在各个定态时不连续的能量值可用原子能级来形象地表示，记为 E_0 、 E_1 、 E_2 ... ($E_0 < E_1 < E_2$...)。当原子从一个能级 E_m “跃迁”到另一个能级 E_n 的过程中，就要发射或吸收一个频率为 ν 的光子，从而满足能量守恒，

$$h\nu = |E_m - E_n| \quad (1)$$

式中，普朗克常数 $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ 。

电子运动的轨道离原子核愈远，原子能级就愈高。当原子中的电子处于离核最近的轨道时，原子处于最低的能级 E_0 ，称为基态。当原子从外界获得能量时，电子

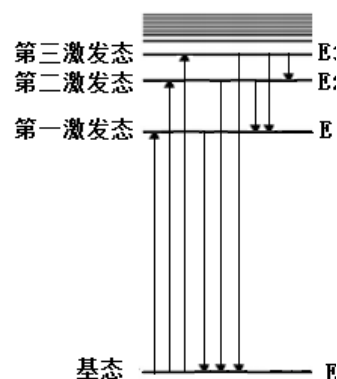


图1 原子能级示意图

可以跃迁到离核较远、能量较高的轨道上，原子的这种状态称为激发态。图 1 为一般原子的能级示意图，第一激发态、第二激发态和第三激发态等依次对应更高的能级 E_1 、 E_2 、 E_3 ...

定义原子的第一激发电位为，

$$U_1 = (E_1 - E_0) / e \quad (2)$$

式中， e 是电子的电量。由式 (2) 可知，原子从基态跃迁至第一激发态，需要获得大小为 eU_1 的能量。同理，原子的第二激发电位、第三激发电位...分别为，

$$U_2 = (E_2 - E_0) / e, U_3 = (E_3 - E_0) / e, \dots \quad (3)$$

式 (3) 同样表明，原子从基态跃迁到第二、第三激发态，则需要获得 eU_2 、 eU_3 的能量。

二、电子与原子碰撞时的能量转移

为了使原子从低能级向高能级跃迁，可以通过让具有一定能量的电子与原子相碰撞进行能量交换的办法来实现。电子的能量可以从电场中加速而获得，初速度为零的电子通过电势差为 U 的加速电场，获得的动能为 eU 。加速后的电子与稀薄气体的原子（如氩、氙或汞原子）发生碰撞时，可能会发生三种情况：

(1) 当 $U < U_1$ 时， $eU < E_1 - E_0$ ，电子的动能小于原子第一激发态与基态能量之差。这种电子在与原子碰撞时，不能使原子从基态跃迁到激发态，原子内部的能量不发生变化。由于电子质量远小于原子质量，电子的动能损失极小，电子与原子的碰撞可以看作“弹性碰撞”。

(2) 当 $U = U_1$ 时， $eU = E_1 - E_0$ ，电子的动能恰好等于原子第一激发态能量与基态能量之差。于是，电子在与原子碰撞时，它的动能可以完全转移到原子内部，使原子从基态跃迁到第一激发态。由于这种碰撞伴随着电子动能转变为原子激发能（内能）的过程，因而是“非弹性碰撞”。原子处于激发态的寿命非常短，会自发地跃迁回基态，同时辐射出光子，光子的频率由式 (1) 确定。

(3) 当 $U_1 < U < U_2$ 时， $eU > E_1 - E_0$ ，此时电子和原子发生非弹性碰撞，但原子吸收的能量仍是 eU_1 ，碰撞后电子还具有部分动能 $eU - eU_1$ 。

电子在加速电场中运动，当动能增至 eU_1 时，电子也不一定碰到原子，则电子的动能继续增加。因此，必定有一些电子在能量超过 eU_1 而达到 eU_2 、 eU_3 ... 时才和原子发生碰撞，从而使原子可能被激发到更高的激发态。这些处于更高激发态的原子当然也会自发跃迁到能量较低的激发态，直到返回基态，跃迁的过程中也会辐射出光子，光子的频率仍由式 (1) 确定。如果这些光子的波长在可见光范围 390~770nm 之间，人眼就可在电子和原子发生非弹性碰撞的区域观察到发光现象。

三、弗兰克—赫兹管（F-H 管）中的物理过程

实验采用的四极 F-H 碰撞管是一个充有氖气的玻璃管，如图 2 所示。管中四个电极依次为阴极 K、控制栅极 G、阳极 A 和收集电极 E。阴极 K 有一定的形状，尺寸较小，外有保护圆筒。控制栅极 G 和阳极 A 为圆形平面网筛状电极，收集电极 E 为圆形平板电极，G、A 和 E 三个电极共轴且互相平行。

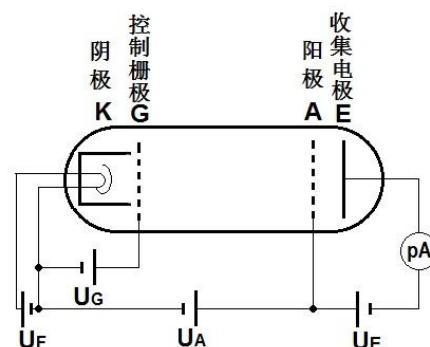


图 2 充氖 F-H 管实验线路图

阴极 K 由灯丝 F 加热而发射电子，控制栅极 G 的电位比阴极 K 略高以利于从阴极拉出电子。

实验中控制电压在几伏以内，控制电压 U_G 越大，则拉出的电子越多。阳极 A 的电位最高，实验中阳极 A 和控制栅极 G 之间的电位差 $U_A - U_G$ 能达到几十伏，产生的加速电场使电子获得动能。若不考虑电子和碰撞管中氖原子的碰撞，电子从阴极 K 出来时动能近似为零，电子动能在 KG 之间增加很小，在 GA 之间增加很快，靠近阳极 A 时增至最大值 eU_A 。收集电极 E 的电位比阳极 A 低，AE 之间的反向电场使电子减速，到达收集电极时电子动能降为 $e(U_A - U_E)$ 。在 $U_A > U_E$ 时，到达阳极的电子，能克服反向电压 U_E 到达收集电极，开始形成电流 I_E 。继续增加 U_A ，到达收集电极 E 的电子动能随之增大，电流 I_E 也逐渐增大。

然而碰撞管中，电子在向阳极运动的过程中，会不断地和氖原子进行碰撞。当电子动能在阳极 A 附近增至 eU_1 时（ U_1 为氖原子的第一激发电位），电子和氖原子发生非弹性碰撞，电子的动能几乎全部转移给氖原子。此时，失去动能的电子，将不能克服反向电压 U_E 到达收集电极 E，于是电流 I_E 迅速减小，形成 $I_E - U_A$ 曲线的第一个峰。F-H 管设计的巧妙之处，正是用电流 I_E 极大极小的变化来反应电子与原子碰撞的情况。随着越来越多的电子不能到达收集电极，电流 I_E 将持续下降；到达收集电极的电子数量降到最少时， $I_E - U_A$ 曲线则到达第一个谷底。

继续增加 U_A ，管内电场增大，电子获得动能 eU_1 的位置往阴极方向移动，电子和氖原子发生非弹性碰撞损失动能后，依然处在加速电场之中并往阳极运动。当到达阳极 A 附近的电子能量再次增加到能克服反向电压 U_E 而到达收集电极 E 时，电流 I_E 从极小值开始增加。直到电子在阳极 A 处动能再次增加到 eU_1 时，电子和氖原子也再一次发生非弹性碰撞，电流 I_E 再次开始下降， $I_E - U_A$ 曲线出现第二个峰。依此类推，随着 U_A 的增加，电子在加速电场中多次和氖原子发生非弹性碰撞，从而引起电流 I_E 多次出现极大极小的变化， $I_E - U_A$ 曲线形成多个峰和谷。

实验前应回答的问题

（本实验报告不需要写实验原理，只需回答下列问题，计算要有过程）

1. 什么是基态？什么是激发态？什么是原子能量的量子化？
2. 画出实验线路图，标出各电极的名称。

3. 通过预习，你认为如何在实验上“观察”到原子能量的量子化？（提示：1. 你预期应在哪两个电极间观察氖管发光，若改变加速电压，发光区会如何变化？2. 加速电压与收集到的电流之间有什么关系？可以反映出什么物理问题？）
4. 某原子从高能级跃迁到低能级时发射的光子波长为 600nm ，则这两个能级差 ΔE 为多少电子伏特？某原子的第一激发电位为 16.0V ，则该原子从第一激发态跃迁回基态时发射的光子波长是多少？

实验仪器

弗兰克-赫兹实验仪、氖碰撞管、示波器。

实验内容

按照图 2 所示线路，连接 F-H 实验仪和氖管。

一、观察氖管发光现象

1. 先将控制电压 U_G 和加速电压 U_A 的旋钮左旋到底，打开 F-H 实验仪背后电源开关，液晶显示屏有数据显示。
2. 将灯丝电压 U_F 设为 8.5V ，实验中控制电压 U_G ： $0.5\sim 3.5\text{V}$ ，反向电压 U_E ： $1\sim 8\text{V}$ 。为了仪器安全， U_G 初始设为最小值 0.5V ， U_E 初始设为最大值 5V 。
3. 观察氖管中的发光现象，确定控制电压 U_G 的工作范围：（如果你不太确信该如何记录实验现象，请参阅实验桌告示牌上的提示）

将加速电压 U_A 的调节方式设为“手动扫描”，将 U_A 从 0V 逐渐增加到 65V ，观察氖管是否有发光现象？（发光现象出现在哪两个电极之间？什么形状？什么颜色？随 U_A 的增大，发光现象如何变化？）如果看不到发光，可以将 U_A 固定在 65V ，缓慢增加 U_G ，直至能清楚地看到发光现象（发光区亮度适中、没有弯曲、间隔明显），记录刚好能看到发光区时和发光区略有弯曲时 U_G 的值，我们分别将其称为 U_G 的下限值和上限值。改变反向电压 U_E 的大小，观察它对发光区（形态、位置、亮度、数目）有何影响？注意记录实验过程中你观察到的实验现象和相应的实验条件。你观察到的发光现象是否符合你的预期？你看到的发光是氖原子从第一激发态返回基态时所发出的光吗？（提示：在观察发光现象时，注意记录 U_A 的大小，尝试大致估计一下氖原子的第一激发电位大小。）

注意：

- ① 若发光区中心明显向阴极凸出，甚至出现大片连续发光区，这是气体被击穿的现象，应立即调低 U_A 至击穿现象消失。将控制电压 U_G 设置到安全范围内，再做实验。
- ② 当加速电压 U_A 太高时，电子动能太大也可能使气体原子电离而发生击穿现象，实验中 U_A 的最大值建议不要超过 65V 。
- ③ 观察时注意眼睛要水平正视发光区。若用手机拍照，手机镜头应正对发光区。

二、用示波器观察电流曲线

F-H 实验仪的信号输出说明：

F-H 实验仪有两个信号输出端口： $U_X=U_A \cdot \frac{1}{10}$ 和 $U_Y=I_E \cdot V$ 。

1) U_X 是加速电压 U_A 的 1/10。

2) U_Y 是由电流 I_E 转换成的电压信号， U_Y 和电流 I_E 成正比。转换器 V 除了电流到电压的转换功能外，还提供几十倍的电流增益功能。实验中将转换器右旋到底，使电流增益最大。

采用同轴电缆将 F-H 实验仪的 U_X 输入示波器的“X”通道， U_Y 输入示波器的“Y”通道。

1. 示波器的电压信号观察：

1) 将加速电压 U_A 设为“自动扫描”，扫描下限为 0V，上限为 65V，观察示波器屏幕上两通道的波形，“X”通道的 U_X-t 线是加速电压扫描线，“Y”通道的 U_Y-t 线是电流曲线。

2) 调节示波器的电压档位、时间档位、移位旋钮，使加速电压扫描线和电流曲线大小适中，并位于屏幕中央。

3) 加速电压是怎样扫描的？从扫描下限增加到扫描上限需要多少时间？（零输出时间不计）

2. 调整控制电压、反向电压以及加速电压（控制变量法），获得最佳的电流曲线，并测定氖原子的第一激发电位：

1) 反向电压 U_E 设为 5-8V 左右，选择合适的控制电压 U_G （注意避免将氖管击穿），观察屏幕上的电流曲线（要求有三个峰、二到三个谷，且峰、谷明显）。得到最佳的曲线后，按下示波器“STOP”键锁定示波器屏幕，将 U_A 降至 0V 后，再进行测量与记录。（ U_F 、 U_E 、 U_G 各电压对电流曲线有何影响？具体记录方式可参照告示牌上的提示。）

2) 测量加速电压 U_A 随时间的变化率：

按下示波器的“光标”按钮，选择光标的手动模式。将两对互相垂直的光标线分别相交于加速电压扫描线上尽量远离的两点。读取两点之间的电压差 ΔV 和时间差 Δt ，计算加速电压 U_A 的扫描速率 s 。（ $s=10\Delta V/\Delta t$ ）

3) 测量电流曲线上各个峰处的加速电压值：

将一根竖直光标线固定于电流曲线的起点处，移动另一根竖直光标线，依次对准电流曲线的三个峰，并记录两根光标线之间的时间差 ΔT_1 、 ΔT_2 、和 ΔT_3 、即加速电压从零增至出现相应电流峰时所需要的扫描时间。计算三个电流曲线峰处对应的加速电压 U_{A1} 、 U_{A2} 、 U_{A3} 。（ $U_A=s \cdot \Delta T$ ）

4) 分析实验模型，计算氖原子的第一激发电位：

标出电流曲线第 1、2、3 峰处的加速电压值 U_{A1} 、 U_{A2} 、 U_{A3} 。计算氖原子的第一激发电位 U_1 。（应如何计算 U_1 ？）

参考文献

1. 沈元华, 陆申龙.基础物理实验[M].北京: 高等教育出版社, 2003: 326~332.
2. 杨福家.原子物理学(第二版)[M].北京: 高等教育出版社, 1990.
3. 戴乐山, 戴道宣.近代物理实验[M].上海: 复旦大学出版社, 1995: 45~68 .
4. 苏卫锋, 乐永康.充氖夫兰克-赫兹管的发射光谱研究[J]. 物理实验, 2011, 31
(4) .

附件 1: 量子论实验记录和报告要点

一、观察氖管发光现象

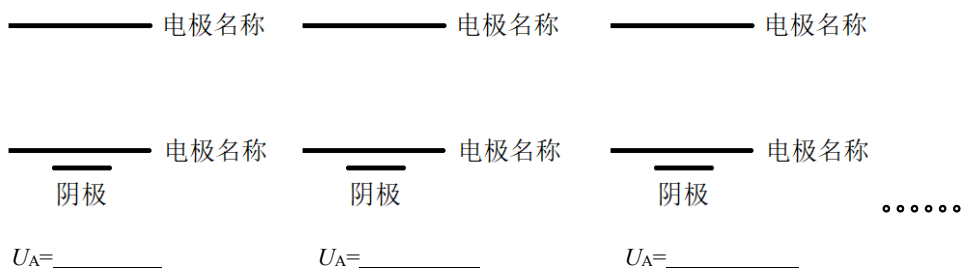
1、**找 U_G 的上限和下限** 初始设置 $U_F=8.5V$, $U_E=5.0V$, $U_G=0.5V$, 将 U_A 从零慢慢增到 **65V**, 保持 $U_A=65V$, 缓慢增加 U_G , 记录刚刚可以看到发光现象时 U_G 的值, 此值为 U_G 的下限值; 继续增加 U_G , 发光区中心更亮, 略有突起时, 记录 U_G , 此值为 U_G 的上限值。(整个实验过程中, U_G 只能在下限和上限之间变化, **不可以超出上限值**)

2、**观察并记录发光** 从上限慢慢降低 U_G , 直到发光区亮度适中、没有弯曲、间隔明显。将 U_A 从零慢慢增到 65V, 观察并记录发光区从哪里出现, 什么形状, 什么颜色? 随实验条件变化发光区如何变化?

如何描述你观察到的现象? 建议画示意图描述现象, 记录刚好看到 1 片、2 片、3 片发光区时的 U_A , 大致估计一下氖原子第一激发电位的大小, 思考观察到的发光是不是氖原子从第一激发态返回基态时发出的光。(可以先用手机拍照, 再根据照片画示意图, 手机拍照时要注意拍摄角度, 正对发光区)

可参照以下提示画发光区(先画电极, 再画发光区, 发光区的形状和位置不要画错)。

$U_F=$ _____ V, $U_E=$ _____ V, $U_G=$ _____ V



注: 每片发光区的中心位置用横线标出来

二、用示波器观察电流曲线, 测量氖原子的第一激发电位

1、**找电压曲线和电流曲线** 将 U_A 和电流信号分别输入示波器 CH1、CH2 通道, 调节示波器看到大小适中, 清晰的 U_A 扫描线和电流曲线。

2、 **U_G 对电流曲线的影响** 画出 U_G 取下限、中间值、上限的三条电流曲线(示波器档位勿变)。这三条电流曲线有何不同, 原因是什么?

3、 **U_E 对电流曲线的影响** 画出 U_E 取 1V、5V、9V 的三条电流曲线。(U_E 减小时, 电流曲线上升迅速, 可增大示波器档位观察; 若电流曲线出现平台, 说明此时电流太大已超量程, 此时停止减小 U_E 。) 电流曲线有何不同, 原因是什么?

4、找到合适的实验条件, 在示波器上可以观察到有三个峰且峰谷明显的电流曲线。记录: $U_G=$ _____, $U_E=$ _____, U_A 的扫描范围。

请老师检查电流曲线, 检查后 按下示波器“STOP”, 加速电压 U_{Amax} 转到零。

5、打开示波器的光标测量功能，两对横竖光标线的交点，分别定位到电压扫描直线的两端，记录两点的电压差 $\Delta V = \underline{\hspace{2cm}}$ ，时间差 $\Delta t = \underline{\hspace{2cm}}$ 。得出 U_A 的扫描速率 $s = \underline{\hspace{2cm}}$ (计算过程) $10 * (\Delta V / \Delta t)$ 。

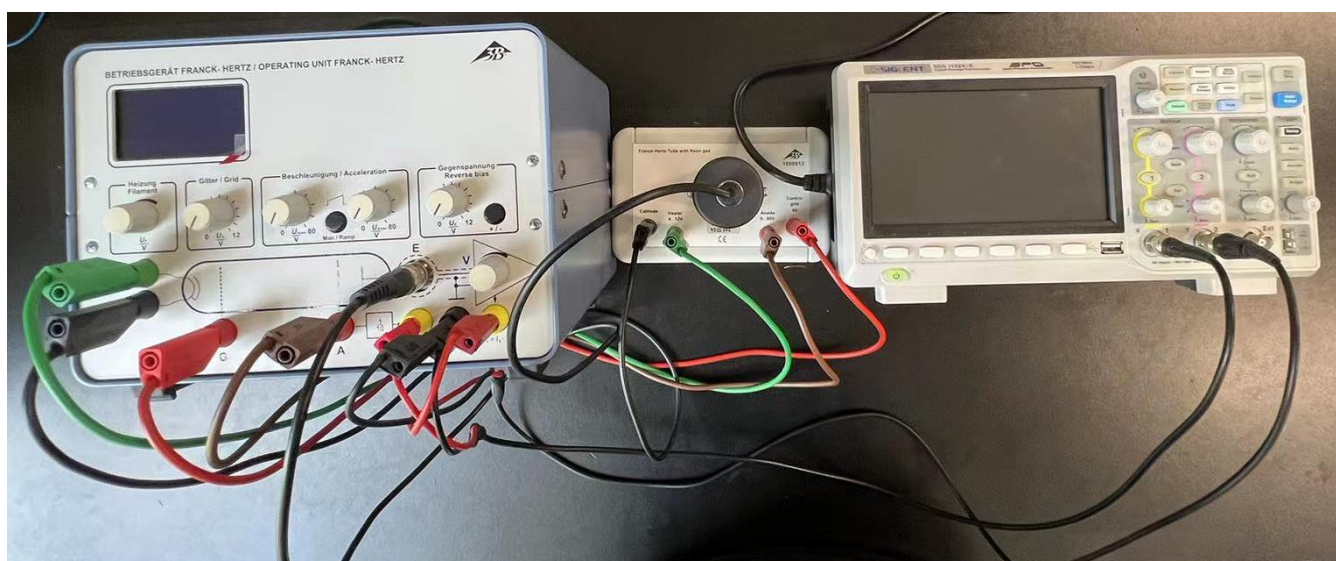
6、一根竖光标线始终放在电流曲线起点，移动另一根竖光标线分别到电流曲线的三个峰处，求出第一激发电位。(如何求取第一激发电位?)

	第一峰	第二峰	第三峰
扫描时间 ΔT			
加速电压 $U_A = s * \Delta T$	U_{A1}	U_{A2}	U_{A3}
相邻峰电压差值 ΔU_A		一二峰 ΔU_{A1}	二三峰 ΔU_{A2}

附件 2:

有关接线

请务必按照电路图接线，检查无误后才可以打开电源，实验时若看到氖管中发光区突然变亮，请立即降低扫描电压 U_A 。



附件 3:

有关示波器的使用

如下图，找到最佳的电流曲线后，按下示波器的“RUN/STOP”按键，此时示波器将冻结当前测量界面。将弗兰克-赫兹实验仪电源上 U_{Amax} 调到 0V。

按下示波器的“CURSOR”光标测量按键，然后按屏幕下方对应的按键选择测量方式为“手动”，选择要测量的信号，以及测量 X 轴信号、Y 轴信号，还是同时测量两个轴的信号。下图所示测量界面是对 CH1 通道的 X 轴、Y 轴同时测量。用示波器旋钮将光标移动到要测量的位置，在屏幕上即可实时显示测量结果。

