

摘要

1914年，德国科学家弗兰克（J·Franck）和赫兹（G·Hertz）用慢电子与稀薄气体原子碰撞的方法，使原子从低能级激发到高能级。并通过对电子与原子碰撞时能量交换的研究，直接证明了原子内部能量的量子化。夫兰克和赫兹的这项工作获得了1925年度的Nobel物理学奖。

第一部分 实验目的

- (1) 通过测定氩原子等元素的第一激发电位，证明原子能级的存在.
- (2) 了解研究原子内部能量问题时所采用的基本实验方法.
- (3) 了解电子与原子碰撞和能量交换过程的微观图象.
- (4) 进一步理解玻尔的原子理论.

第二部分 实验方法

实验原理

玻尔（N·Bohr）提出了原子能级的概念并建立了原子模型理论，原子处于稳定状态时不辐射能量，当原子从高能态（能量 E_m ）向低能态（能量 E_n ）跃迁时才辐射。辐射能量满足：

$$\Delta E = E_m - E_n$$

对于外界提供的能量，只有满足原子跃迁到高能级的能级差，原子才吸收并跃迁，否则不吸收。

夫兰克-赫兹（F-H）实验原理（如图 1 所示），氧化物阴极 K，阳极 P，第一、第二栅极分别为 G_1 、 G_2 。

$K - G_1 - G_2$ 加正向电压，为电子提供能量。 U_{G_1K} 的作用主要是消除空间电荷对阴极电子发射的影响，提高发射效率。 $G_2 - P$ 加反向电压，形成拒斥电场。

电子从 K 发出，在 $K - G_2$ 区间获得能量，如果电子进入 $G_2 - P$ 区域时动能大于或等于 eU_{G_2P} ，就能到达板极形成板极电流 I 。

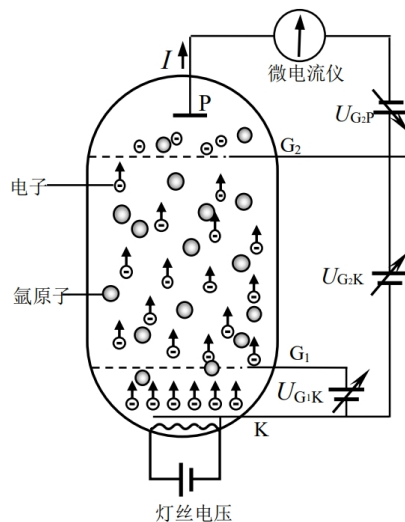


图 1: F-H 实验原理图

电子在不同区间的情况：

- (1) $K - G_1$ 区间 电子迅速被电场加速而获得能量.
- (2) $G_1 - G_2$ 区间 电子继续从电场获得能量并不断与氩原子碰撞。当其能量小于氩原子第一激发态与基态的能级差 $\Delta E = E_2 - E_1$ 时，氩原子基本不吸收电子的能量，碰撞属于弹性碰撞。当电子的能量达到 ΔE ，则可能在碰撞中被氩原子吸收这部分能量，这时的碰撞属于非弹性碰撞。 ΔE 称为临界能量.
- (3) $G_2 - P$ 区间 电子受阻，被拒斥电场吸收能量。若电子进入此区间时的能量小于 eU_{G_2P} 则不能达到板极.

由此可见，若 $eU_{G_2K} < \Delta E$ ，则电子带着 eU_{G_2K} 的能量进入 $G_2 - P$ 区域。随着 U_{G_2K} 的增加，电流 I 增加（如图 2 中 $O \sim a$ 段）。

若 $eU_{G_2K} = \Delta E$ ，则电子在达到 G_2 处刚好临界能量，不过它立即开始消耗能量了。继续增大 U_{G_2K} ，电子能量被吸收的概率逐渐增加，板极电流逐渐下降（如图 2 中 $a \sim b$ 段）。

继续增大 U_{G_2K} ，电子碰撞后的剩余能量也增加，到达板极的电子又会逐渐增多（如图 2 中 $b \sim c$ 段）。

若 $eU_{G_2K} > n\Delta E$ 则电子在进入 $G_2 - P$ 区域之前可能 n 次被氩原子碰撞而损失能量。板极电流 I 随加速电压 U_{G_2K} 变化曲线就形成 n 个峰值，如图 2 所示。相邻峰值之间的电压差 ΔU 称为氩原子的第一激发电位。

氩原子第一激发态与基态间的能级差：

$$\Delta E = e\Delta U$$

实验器材

FD-FH-C 弗兰克-赫兹（氩管）实验仪，FH-Hg-6 弗兰克-赫兹（汞管）实验仪，示波器。

第三部分 实验结果与数据分析

实验数据-汞原子激发曲线观察与测量

见附件.

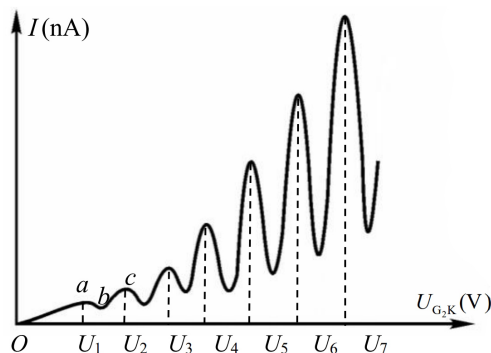


图 2: F-H 实验 $V_{G_2K} \sim I$ 曲线

附件

附件

数据分析与处理-汞原子激发曲线观察与测量

(1) 观察汞原子激发曲线

将灯丝电压 U_F 、栅极电压 $U_{G_{1K}}$ 、拒斥电压 $U_{G_{2P}}$ 缓慢调节到仪器的“出厂检验参考值”。在参考值 $\pm 50\%$ 范围内分别调节 U_F 、 $U_{G_{1K}}$ 、 $U_{G_{2P}}$ ，采用“自动”模式观察原子激发曲线,发现：
分别缓慢增大下列参数，激发曲线的变化：

U_F 曲线的峰值变得更高，且峰值之间的间隔减小。

$U_{G_{1K}}$ 曲线变得更加尖锐，峰值变得更高。

$U_{G_{2P}}$ 曲线中的峰值高度减小。

各参数对于激发曲线影响的作用机制：

U_F 随着灯丝电压的增大，阴极的温度升高，电子的平均能量也升高，这会导致更多的电子具有足够的能量来克服原子的激发能量障碍，因此激发峰值会上升。

$U_{G_{1K}}$ 增大栅极电压会增加通过栅极的电子的能量，导致更多电子能够越过栅极并与原子发生碰撞，从而增加激发的可能性。

$U_{G_{2P}}$ 增大拒斥电压会减缓通过拒斥电极的电子的速度，高的拒斥电压会阻止低能量的电子通过，只允许高能量的电子通过，导致曲线中的峰值高度减小。

其中，各参数的出厂检验参考值如下：

$$U_F = 1.0 \text{ V} \quad U_{G_{1K}} = 1.4 \text{ V} \quad U_{G_{2P}} = 1.5 \text{ V}$$

(2) 测量汞原子的第一激发电位

根据实验数据，以栅极电压 $U_{G_{2K}}$ 为横坐标，阳极电流 I_p 为纵坐标，绘制汞的 $U_{G_{2K}} \sim I_p$ 激发曲线（绘图工具：MatLab）：

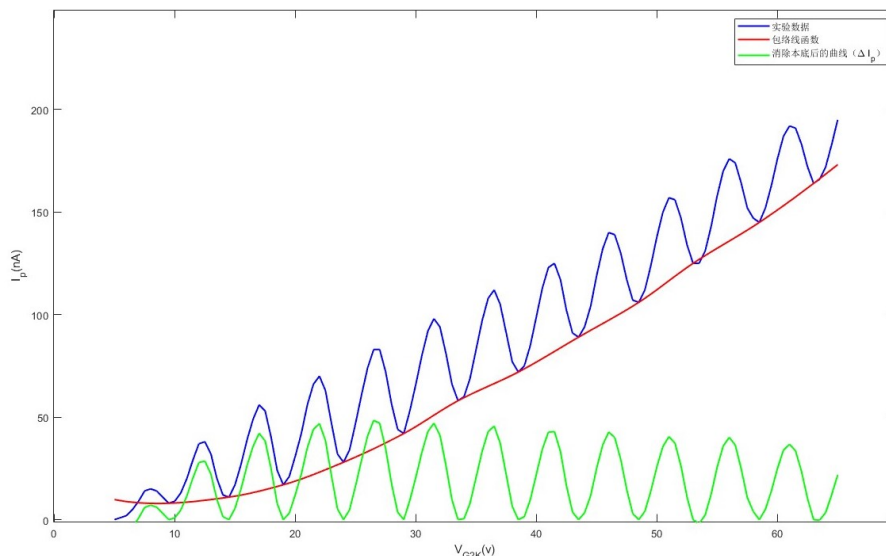


图 3: 汞原子的激发曲线

下面计算汞原子的第一激发电位：

由实验数据可得：

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
峰值电压 U (V)	12.5	17	22	26.5	31.5	46.5	41.5	46	51	56
峰值电流 I (nA)	38	56	70	83	98	112	125	140	157	176

相邻两峰之间电压差为：

$$\Delta U_i = U_{i+1} - U_i$$

得出：

$$\Delta U_1 = 4.5 \text{ V} \quad \Delta U_2 = 5 \text{ V} \quad \Delta U_3 = 4.5 \text{ V}$$

$$\Delta U_4 = 5 \text{ V} \quad \Delta U_5 = 5 \text{ V} \quad \Delta U_6 = 5 \text{ V}$$

$$\Delta U_7 = 4.5 \text{ V} \quad \Delta U_8 = 5 \text{ V} \quad \Delta U_9 = 5 \text{ V}$$

得出汞原子的第一激发电位为：

$$\Delta U = \frac{1}{9} \sum_{i=1}^9 \Delta U_i = 4.83 \text{ V}$$

误差分析

根据所测数据，算得 ΔU 的 A 类不确定度为：

$$\Delta U_A = s = \sqrt{s^2} = \sqrt{\frac{1}{8} \sum_{i=1}^9 (\Delta U_i - \Delta U)^2} = 0.198 \text{ V}$$

可能的误差原因

- 测量误差：在实验中，测量仪器可能会引入一定的误差。例如，电压测量设备的精度、稳定性和分辨率可能限制了精确测量电压的能力。测量误差可以导致实际测量值与理论值之间存在差异。
- 温度和压力变化：温度和压力的微小变化可能会影响汞蒸汽的性质，从而影响实验结果。这些变化可能导致峰值位置的微小变化。
- 仪器校准：仪器校准不准确或失效可能导致测量不确定性。确保测量设备的准确性和定期校准非常重要。
- 汞蒸汽浓度变化：汞蒸汽浓度的微小变化可能会影响电子与汞原子的碰撞频率和能量损失。这可以导致激发峰的位置发生变化。
- 电子能量分布：理想情况下，电子的能量应该分布在一个狭窄的能量范围内。然而，实际情况下，电子的能量分布可能会有一定的宽度，这会影响激发峰的形状和位置。
- 测量时间和数据处理：测量时间的选择以及数据处理方法也可能对实验结果产生影响。较长或较短的测量时间可能会导致不同的结果。

(3)测量汞原子较高能级的激发曲线

汞原子较高能级激发曲线有如下特征：

- **峰数增加：**随着能级的增加，激发曲线上会出现更多的峰值.
- **峰间距减小：**随着能级的增加，相邻峰之间的电压差值通常会减小.
- **峰的相对强度变化：**高能级激发曲线中的峰显示出了不同的相对强度.
- **峰的宽度变化：**高能级激发曲线中的峰变得更宽.
- **峰的位置：**高能级激发曲线中的峰的位置会随着能级的增加而变化.

课间计算

根据公式：

$$\lambda = \frac{kT}{\pi r^2 p}$$

查表带入数据：

T=80

$$\lambda = \frac{kT}{\pi r^2 p} = \frac{1.38 \times 10^{-23} \times (273.15 + 80)}{\pi \times (0.176 \times 10^{-9})^2 \times 11.8} = 4.24 \times 10^{-3} \text{ m}$$

T=90

$$\lambda = \frac{kT}{\pi r^2 p} = \frac{1.38 \times 10^{-23} \times (273.15 + 90)}{\pi \times (0.176 \times 10^{-9})^2 \times 21.1} = 2.44 \times 10^{-3} \text{ m}$$

T=100

$$\lambda = \frac{kT}{\pi r^2 p} = \frac{1.38 \times 10^{-23} \times (273.15 + 100)}{\pi \times (0.176 \times 10^{-9})^2 \times 36.4} = 1.45 \times 10^{-3} \text{ m}$$

T=160

$$\lambda = \frac{kT}{\pi r^2 p} = \frac{1.38 \times 10^{-23} \times (273.15 + 160)}{\pi \times (0.176 \times 10^{-9})^2 \times 558.5} = 1.10 \times 10^{-4} \text{ m}$$

T=170

$$\lambda = \frac{kT}{\pi r^2 p} = \frac{1.38 \times 10^{-23} \times (273.15 + 170)}{\pi \times (0.176 \times 10^{-9})^2 \times 817.0} = 7.69 \times 10^{-5} \text{ m}$$

T=180

$$\lambda = \frac{kT}{\pi r^2 p} = \frac{1.38 \times 10^{-23} \times (273.15 + 180)}{\pi \times (0.176 \times 10^{-9})^2 \times 1172.7} = 5.48 \times 10^{-5} \text{ m}$$

思考题

I. $U_{G_2K} \sim I_p$ 曲线电流下降并不十分陡峭，主要原因是什么？

答：因为 K 极发出的热电子能量服从麦克斯韦统计分布规律，因此极电流下降不是陡的，而是在极值附近出现“峰”和“谷”，有一定的宽度.

II. I 的谷值并不为零，而且谷值依次沿 U_{G_2K} 轴升高，如何解释？

答：该实验中电流是阴极射线的电子产生的，与原子发生碰撞后损失能量，电流下降；但是并非所有原子都会与原子碰撞，因此电流不为零。

III. 第一峰值所对应的电压是否等于第一激发电位？原因是什么？

答：不等于；实验中观察到的峰值对应的电压是电子与汞原子发生弹性碰撞的电压，而不是电子跃迁到第一激发态所需的电压。

IV. 写出氩（或汞）原子第一激发态与基态的能级差。

答：根据实验所得数据有：

$$\Delta E = e \cdot \Delta U = 1.69 \times 10^{-19} \times 4.83 = 8.1627 \times 10^{-19} \text{ J}$$

致谢

感谢大学物理实验教学中心王中平、代如成老师和杨硕助教。