

弗兰克赫兹实验测量Hg的基态能级 6^3P_0 能级的探讨

苗子齐

08300190003

Abstract

The purpose of this article is to give an explanation for why 6^3P_1 energy level is measured in conventional experiments instead of 6^3P_0 . Afterwards, the possibility of measuring the 6^3P_0 energy level will be discussed in detail.

关键词：峰值电压 谷值电压 6^3P_1 能级 6^3P_0 能级

1 引言

历史上弗兰克赫兹实验是量子论有力的证据。除此之外，实验曲线的周期性也包含了待测蒸汽的能级信息。原本的实验方案通过曲线峰间距来测量汞原子的第一激发能级，但实验结果显示峰间距对应的能量为 $4.89eV$ ，对应 6^3P_1 能级，并非汞原子的最低激发态能级。即峰间距中不包含最低激发能级的信息。以下试图建立模型，从实验曲线中找到最低激发态能级 6^3P_0 的信息，并指出准确测量该能级的可能性。本次实验使用的复旦双栅柱面型四极式弗兰克-赫兹实验管K与G1间距离为 $0.3mm$ ，G1与G2间距离为 $5mm$ 。

2 实验及理论分析

根据汞的蒸汽压与温度的关系：

$$\text{Lg}(P/Pa) = -\frac{-3200}{T} + 10.125 \quad (1)$$

和电子的平均自由程公式

$$\lambda = \frac{4KT}{\pi d^2 p} \quad (2)$$

Table 1: 温度与电子平均自由程关系

$T/^{\circ}C$	λ/nm	$T/^{\circ}C$	λ/nm
180	0.07	140	0.34
170	0.11	130	0.51
160	0.16	120	0.8
150	0.23	100	20.7

可求得温度与平均自由程的关系

由于电子在加速过程中并不是一达到第一激发能的能量后马上就能与汞原子碰撞，而是会继续加速一段距离，获得更高的能量，平均自由程越大，这样的效应越显著。但当平均自由程 远远大于加速距离的时候，碰撞发生得非常频繁，可以近似地认为电子在获得了第一激发态能量的时候马上就能激发一个汞原子。这时峰位电压与n的关系可表示为线性：

$$U_n = U_0 + nU_a \quad (3)$$

U_n 为第n个峰的电位， U_a 为第一激发电位。根据先前给出的实验仪器参数可以看出， $180^{\circ}C$ 对应的平均自由程能够符合条件，随着温度降低，平均自由程逐渐偏离该条件。在保护仪器，温度不能过高的要求下，选取 $180^{\circ}C$ 的汞蒸汽温度作为测量第一激发能的温度。

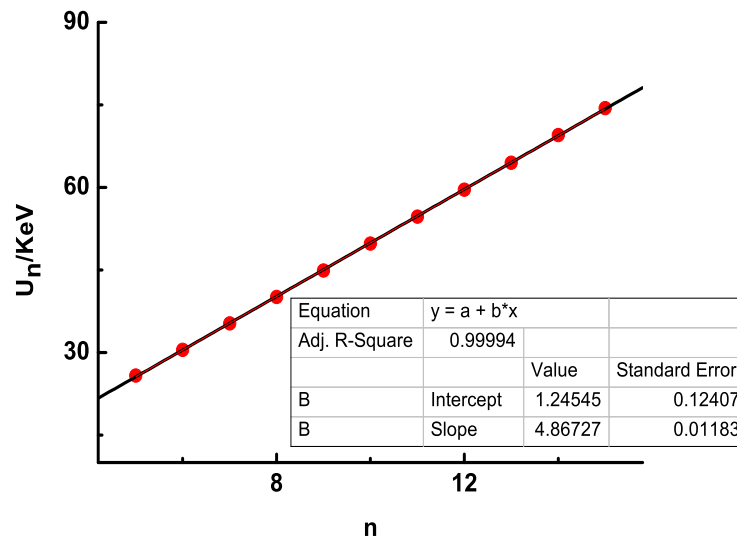


Figure 1: $180^{\circ}C$ 下峰位 U_n 关于n的直线拟合

从拟合的结果可以看出，线性良好，与参考第一激发能级4.89eV相比，实验相对误差为0.61%。
可见在 λ 很小时，这样的近似是合理的。

弗兰克赫兹实验测出的第一激发能并非汞原子的最低激发能级， 6^3P_0 能级比 6^3P_1 能级更低一些，但根据电子相对汞原子的激发截面与电子能量的关系曲线可以看出， 6^3P_0 态对应能量为4.67eV，但电子在该能量时相对于汞原子的激发截面为0，当电子能量为4.8eV时，电子与汞原子激发截面开始增加，但 6^3P_1 的激发截面要远大于 6^3P_0 态，所以汞原子可以被激发到 6^3P_0 态，但概率比较小，这就是测到的第一激发能级为4.89eV而不是4.67eV的原因。 $I_P - V_{G_2K}$ 曲线中的峰对应的事件并不是大多数电子失去能量，而是失去能量的电子与加速电子对电流的贡献相消除了。随着电压升高电子逐渐失去能量的过程当中，激发态 6^3P_1 的影响如上所述占主导地位，因此峰的位置当中并不含有最低激发态 6^3P_0 的信息。反观曲线极小值对应电压与 n 的关系曲线，为了使模型分析简单，先对曲线去本地，消去少部分使汞原子电离的电子的影响。这时电流极小值为0，对应所有几乎所有电子都发生了非弹性碰撞并失去了足以通过反向电压的能量

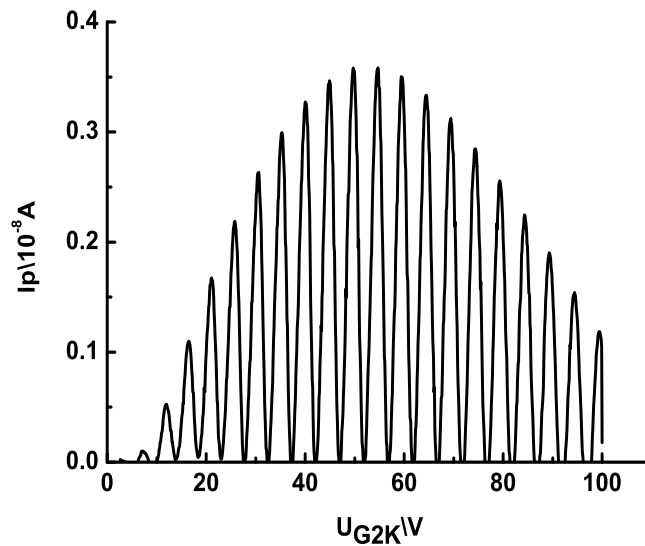


Figure 2: 去本地后180°C下 $I_P - V_{G_2K}$ 曲线

数据显示极小值间距不断变大，拟合直线显示斜率对应 6^3P_0 能级的激发电位4.67eV。

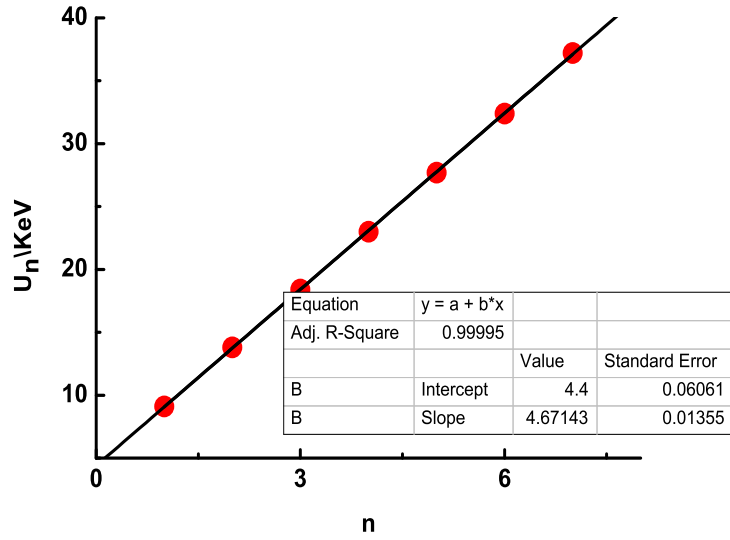


Figure 3: 去本地后180°C下电流极小值与n的拟合关系

对谷间距增加的实验事实建立如下模型，假定汞原子的最低激发能级是 E_a ，则当电子运动过程中当其积累了能量 E_a 之前，只可能与汞原子发生弹性碰撞，不交换能量。这样的碰撞将不会使电流下降。当其积累了能量 E_a 之后，当平均自由程相对加速至 E_a 的距离很小时，它大约经过一个平均自由程 λ 后将与汞原子碰撞。碰撞时电子具有高于 E_a 的能量，但由于存在略高于 E_a 的激发能级存在，所以假定电子仍然失去所有能量（考虑反向电压和0点能的话，实际上可以相差一个固定常数C）这时从平均效果来看电流极小。如果电子平均总共经历了n次碰撞，设一个平均自由程内电子获得能量 δ_n ，则电子获得的总能量为

$$E_n = n(E_a + \delta_n) + C \quad (4)$$

其中

$$\delta_n = n \frac{\lambda}{L} E_a \quad (5)$$

从而有

$$\Delta E = E_n - E_{n-1} = \left[1 + \frac{\lambda}{L}(2n - 1) \right] E_a \quad (6)$$

在这样的模型下，注意到当 λ 趋向于0时， $\Delta E_n = E_a$ ，因此温度很高时，的合谷的电位 U_n 关于n直线拟合，其斜率应该为 $6^3 P_0$ 态的电位,回到先前的拟合结果。为了检验这套模型的可行性，注意

Table 2: 查表与计算自由程对照表

$T/^\circ C$	150	160	180
$\frac{L}{2E_a} \frac{d\Delta E(n)}{dn} / mm$	0.05	0.04	0.02
λ/mm	0.09	0.05	0.03

到 $\Delta E(0.5) \equiv E_a$ ，通过拟合 $\Delta E(n)$ 关于 n 的曲线，不同温度下的拟合直线应在 $n = 0.5$ 交于一点。拟合结果如图(figure 4)所示。

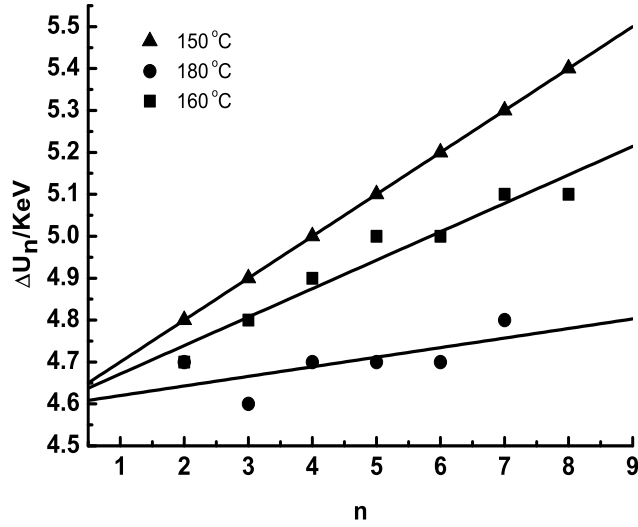


Figure 4: 180°C, 160°C和150°C下谷位 ΔU_n 关于 n 的直线拟合

注意到经典理论下的弹性碰撞平均自由程是与电子能量无关的，可以通过式(1)给出，这是因为散射截面不随电子能量变化的原因。但量子力学理论中，非弹性碰撞的散射截面与波函数波矢有关，这样就与能量有关，因此激发的平均自由程与电子的能量有关。通过上述模型，可以反过来由式(7)确定电子的激发平均自由程。

$$\lambda = \frac{L}{2E_a} \frac{d\Delta E(n)}{dn} \quad (7)$$

计算结果与参考结果比较见表(2)

由于 $\Delta E(n)$ 的变化范围非常小，受限于电压的有效数字，这项拟合一定比较粗糙。如果实验上电压能有更精确的测量，则该模型能得到更严格的验证。

3 结论

从弗兰克赫兹实验中 $I_P - V_{G_2K}$ 曲线的峰间距数据中可以得到 6^3P_1 能级的电位，而谷间距的数据中则可以得到最低激发能级 6^3P_0 能级的电位。

4 致谢

感谢白翠琴老师和搭档徐迪飞同学的帮助和努力。

5 参考文献

Gerald Rapior, Klaus Sengstock, and Valery Baev " New features of the Franck-Hertz experiment" Am. J. Phys., Vol. 74, No. 5, May 2006

《近代物理实验》，高等教育出版社