

预习报告		实验记录		分析讨论		总成绩	

年级、专业：	2017 级 物理学	组号：	实验班 2
姓名：	高寒	学号：	17353019
日期：		教师签名：	

实验 CA2 弗兰克-赫兹实验：原子定态能级的观测

【实验报告注意事项】

1. 实验报告由三部分组成：

- 1) 预习报告：（提前一周）认真研读**实验讲义**，弄清实验原理；实验所需的仪器设备、用具及其使用（强烈建议到实验室预习），完成讲义中的预习思考题；了解实验需要测量的物理量，并根据要求提前准备实验记录表格（由学生自己在实验前设计好，可以打印）。预习成绩低于 10 分（共 20 分）者不能做实验。
- 2) 实验记录：认真、客观记录实验条件、实验过程中的现象以及数据。实验记录请用珠笔或者钢笔书写并签名（**用铅笔记录的被认为无效**）。**保持原始记录，包括写错删除部分，如因误记需要修改记录，必须按规范修改。**（不得输入电脑打印，但可扫描手记后打印扫描件）；离开前请实验教师检查记录并签名。
- 3) 分析讨论：处理实验原始数据（学习仪器使用类型的实验除外），对数据的可靠性和合理性进行分析；按规范呈现数据和结果（图、表），包括数据、图表按顺序编号及其引用；分析物理现象（含回答实验思考题，写出问题思考过程，必要时按规范引用数据）；最后得出结论。

实验报告就是预习报告、实验记录、和数据处理与分析合起来，加上本页封面。

2. 每次完成实验后的一周内交**实验报告**。

3. 除实验记录外，实验报告其他部分建议双面打印。

实验 CA2 弗兰克-赫兹实验：原子定态能级的观测

【实验目的】

1. 学习弗兰克-赫兹实验仪的使用方法。
2. 测量氩原子的电流-加速电压关系曲线，计算第一激发电位。

【仪器用具】

弗兰克-赫兹实验仪（世纪中科 ZKY-FH-2 或博洋光电 BEX-8502），氩管，汞管及控温装置，数字示波器。

【原理概述】

该实验测量氩原子的能级。当一个能量恰为两能级间能量差的电子与原子碰撞时，原子将吸收这个电子的能量并跃迁到高能级，此时，电子的能量将被吸收。

实验的装置图如图 1。 U_{G_1K} 用于加速发散的电子，使之具有能量 eU_{G_1K} ，而

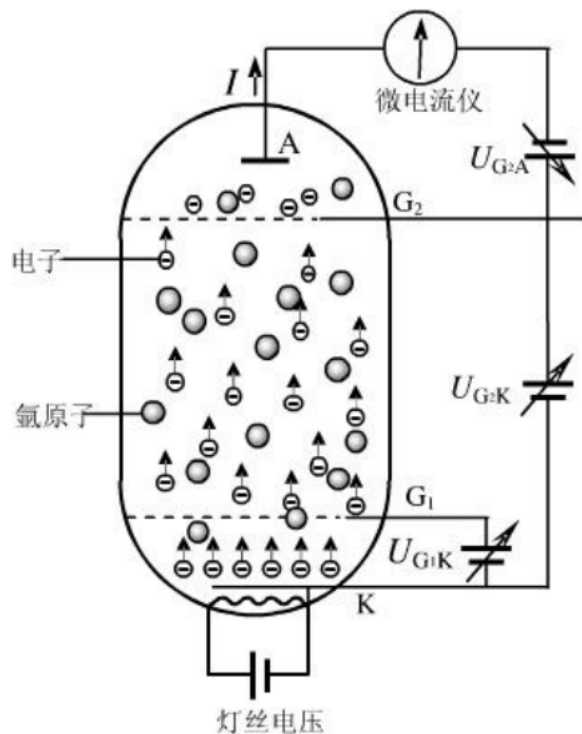


图 1: 实验装置原理图

U_{AG_1} 使得电子减速，阻止其到底极板 A。但只要

$$U_{G_1K} > U_{AG_1} \quad (1)$$

电子就可能到达极板 A，并在微电流计上显示出电流，除非电子在 G_2 区域附近与原子发生碰撞而损失能量，这一碰撞发生的条件就是

$$eU_{G_2K} = E_n - E_0 \quad (2)$$

其中 E_n 是氩原子的第 n 能级能量。这时电流计检测到的电流就会发生突变，体现为一个极小值。在 $I - U_{G_2K}$ 图像上找出各极小值点 V_n ，就可以带入 (2) 计算出氩原子各激发态与基态间的能量差。

【实验前思考题】

1. 何为 F-H 的最佳工作点，实验中如何确定？

F-H 的最佳工作点是使得电流大小适当，实验曲线清晰光滑的灯丝电压 U_F 、第一级电压 U_{G_1K} 和拒斥电压 U_{AG_2} 的那组值。可以通过前面的提到的判断依据确定最佳工作点的大致值¹，根据注释 1， $U_F = 3.1V$ ， $U_{G_1K} = 1.4V$ 和 $U_{AG_2} = 6.0V$ 的实验结果较为理想。

2. 为什么其 $I(V)$ 曲线不是断崖式的下落？为什么电流不会下降为零？

由于灯丝发射的电压具有一定的初动能，且在一定范围内分布，这使得电子的能量有微小的差别，不同的电子在不同电压值发生碰撞，但总体而言曲线峰值依然在理论值附近。由于不是所有电子都能与氩原子发生碰撞，电流不可能骤降为零。

¹王杰, 司嵘嵘. 确定弗兰克-赫兹实验最佳工作参数的方法改进 [J]. 大学物理实验, 2018, 第 31 卷 (5):87-91.

专业：	2017 级 物理学	年级：	实验班 2
姓名：	高寒	学号：	17353019
室温：		实验地点：	珠海教学楼 A5
学生签名：	高寒	评分：	
日期：		教师签名：	

实验 CA2 弗兰克-赫兹实验：原子定态能级的观测

【实验内容、步骤、结果】

该实验自动采集数据。按照步骤连线、初始化后，输入参数即可开始自动采集数据。重复测量，得到氩原子的能级关系。

改变灯丝电压，探究灯丝电压设置对曲线的影响。

【实验过程中遇到问题记录】

专业：	物理学	年级：	2017 级
姓名：	高寒	学号：	17353019
日期：			
评分：		教师签名：	

实验 CA2 弗兰克-赫兹实验：原子定态能级的观测

【分析与讨论】

实验时由于仪器问题，与莫宗霖共用仪器，使用同一套数据。

1. 对实验现象的初步讨论

实验时设定灯丝电压为 3 V，第一段加速电压为 1.4 V，拒斥电压为 10 V，每隔 1 V 手动记录一个电流值，得到的实验曲线如图 2 定性上，曲线的形状符

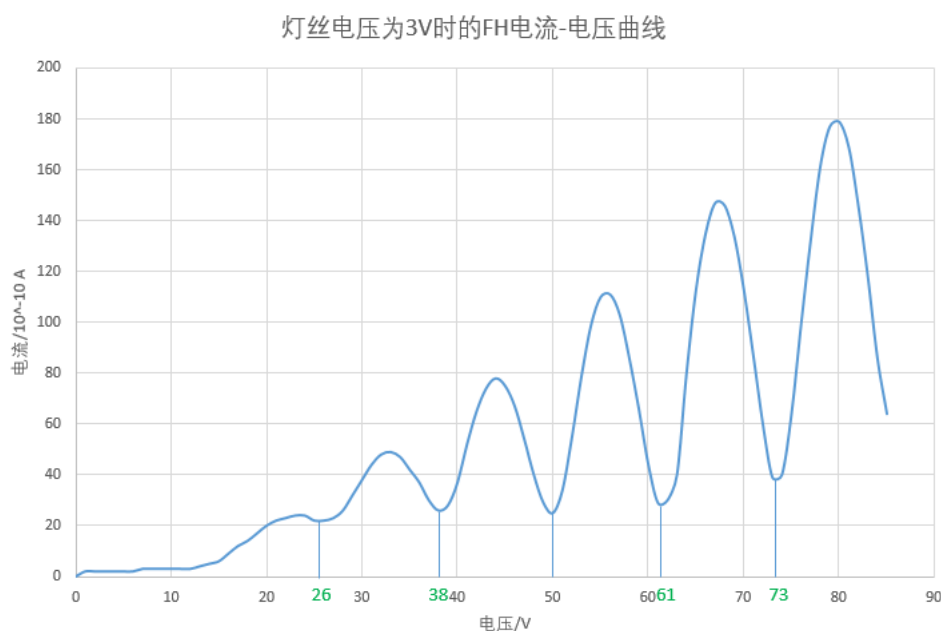


图 2: 灯丝电压为 3 V 时的电压-电流关系曲线

合预期。通过各个电流极小值对应的电压值可以给出氩原子的各能级能量与基态能量的差。计算公式为

$$E_n = (1 + V_n/V) \text{ eV} \quad (3)$$

其中 1 为第一段加速电压的数值，由于电压测量的精度限制，这里只能对其保留

到一位有效数字。于是我们得到能量差

$$E_1 = 27 \text{ eV} \quad (4)$$

$$E_2 = 39 \text{ eV} \quad (5)$$

$$E_3 = 51 \text{ eV} \quad (6)$$

$$E_4 = 62 \text{ eV} \quad (7)$$

$$E_5 = 74 \text{ eV} \quad (8)$$

有趣的是，我们发现 E_n 与 n 之间似乎有很良好的线性关系。作出散点图并进行线性拟合，得到的回归直线如图 3，其方程为

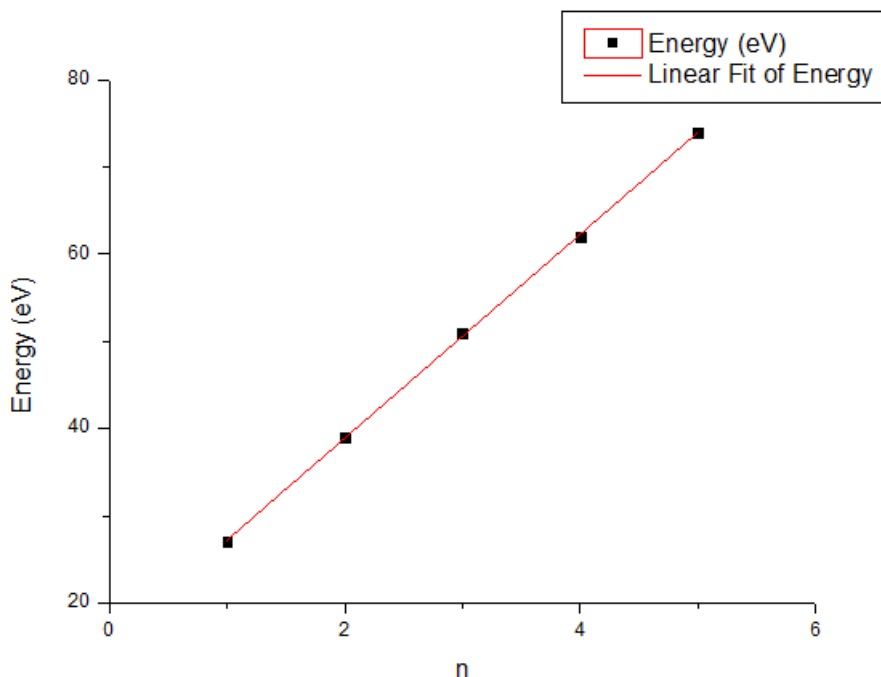


图 3: 灯丝电压为 3 V 时，测得能级能量差与序号间的近似线性关系

$$E(n) = 11.7n + 15.5 \text{ eV} \quad (9)$$

其中斜率的不确定度为 0.1，截距的不确定度为 0.4。根据这一近似的线性关系，我们猜测可能在 $\sim 15 \text{ eV}$ 附近存在一个被漏测的激发态。查询相关文献²证实了这一观点，氩原子的第一激发能事实上在 $\sim 13 \text{ eV}$ 附近，实验测得的 E_1 可能事实上对应氩的第二激发态。

改变灯丝电压为 4 V，重复实验，得到的电流-电压关系如图 4 曲线的形状与图 2 几乎相同，但电流增大了 1 ~ 2 个量级。这可能是因为灯丝电压增大使得温度升高，发射的电子数目显著增大。得到的曲线有 5 个极小值，但由于灯丝电

²朱筱玮. 氩原子的第一激发电位 [J]. 西北大学学报: 自然科学网络版, 2006, 4(6): 0245[2006-11-10]. <http://jonline.nwu.edu.cn/wenzhang/206187.pdf>

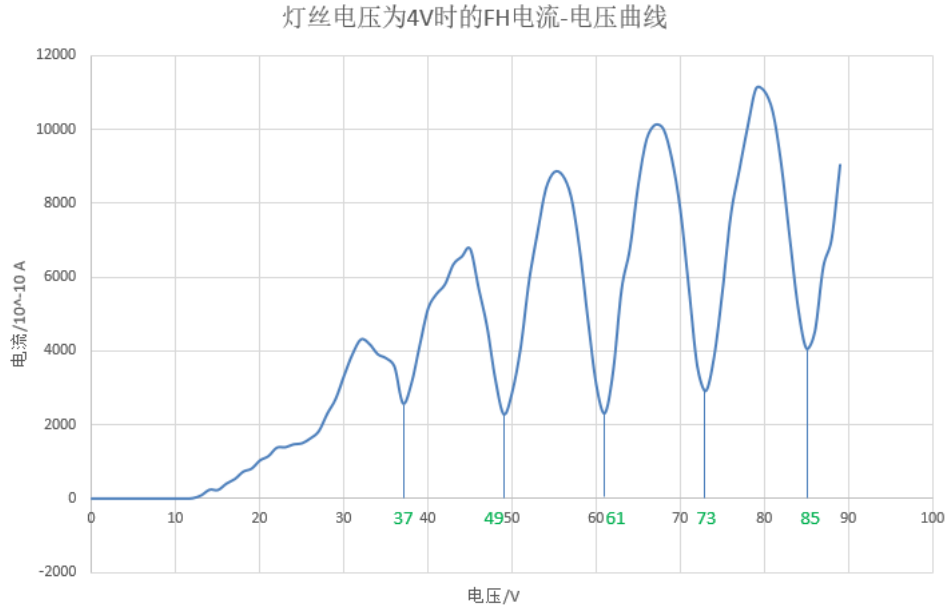


图 4: 灯丝电压为 4 V 时的电压-电流关系曲线

压的增大，图 2 中的第二个峰消失了。沿用 (4) 中的记号，按 (3) 得到

$$E_2 = 38 \text{ eV} \quad (10)$$

$$E_3 = 50 \text{ eV} \quad (11)$$

$$E_4 = 62 \text{ eV} \quad (12)$$

$$E_5 = 74 \text{ eV} \quad (13)$$

$$E_6 = 86 \text{ eV} \quad (14)$$

得到的数值与之前大同小异。由于延伸了测量范围，我们又得到了一个能级。 E_n 与 n 之间依然有很好的线性关系，我们将两组灯丝电压不同时得到的各能级值联合在一个作回归分析，得到的散点图与回归直线如图 5。其方程为

$$E(n) = 11.8n + 15.0 \text{ eV} \quad (15)$$

将 $n = 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6$ 代入上式，就是本次实验对氩原子各激发态能量的测量结果（第一激发态对应 $n = 0$ ）。

2. 结合资料对实验结果的进一步讨论

能量与指标 n 呈线性关系事实上是一个不平凡的事实，因为对单电子原子，第 n 激发态的能量与基态的能量差有如下关系

$$E_n \propto \left(1 - \frac{1}{n^2}\right) \quad (16)$$

而对于氦原子，其外层电子被全部填满，这可能使得它的能级行为与单电子原子迥然不同。

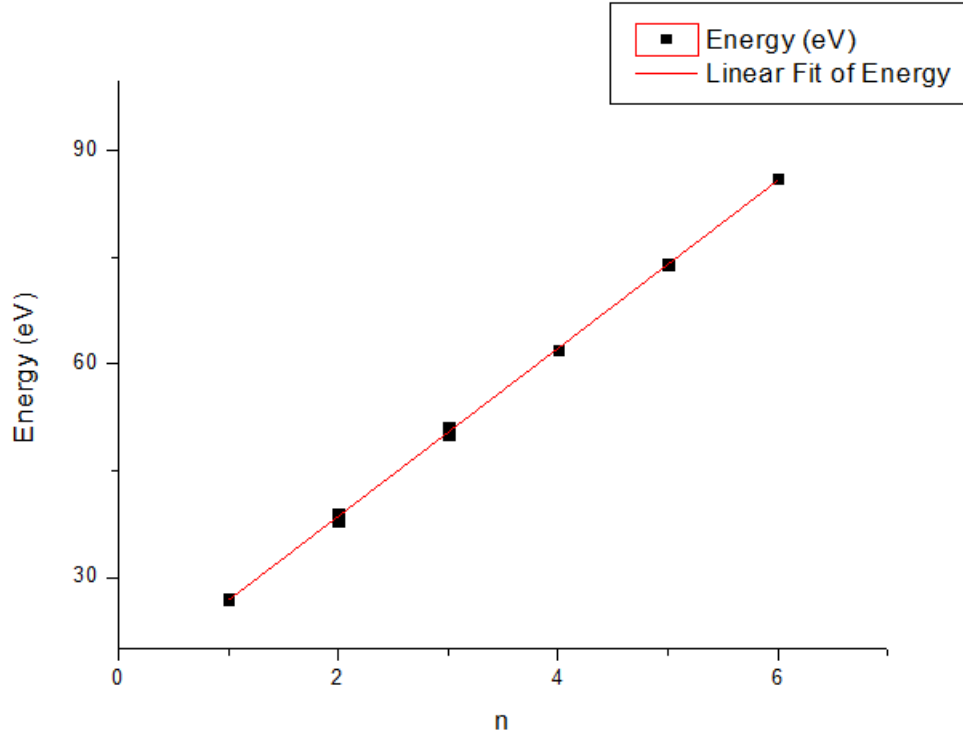


图 5: 所有数据点的回归分析

我们在 nist 数据库³查询 Ar-I 的激发态能量数据⁴, 发现可能的能级达到上千个, 但它们很多是大同小异的。在内层电子的分布为 $3s^23p^5$ 时, 主要的两种激发态能量数值与对应的电子分布位形 (只考虑能级, 其他对能量影响较小的量子数)。

$$E(3s^23p^54\cdots) \simeq 12 \text{ eV} \quad (17)$$

$$E(3s^23p^53d) \text{ 以及其他构型} \simeq 15 \text{ eV} \quad (18)$$

这两组位形对应的能量值对应我们根据实验数据猜出的可能存在的激发态 $E_0 \sim 15.0 \text{ eV}$ 。在内层电子离开 $3s^23p^5$ 进入 $3s^13p^6$ 分布时, 能量发生突变

$$E(3s^13p^6\cdots) \simeq 28 \text{ eV} \quad (19)$$

这组能量对应实际测得的第一个激发态 $E_1 \sim 27.8 \text{ eV}$ 。

这之后, 氩的第一个电子被电离, 形成 Ar-II。再次查询 nist 数据库, 得到 Ar-II 的各能级数据⁵, 发现可能的能级依然非常之多, 但它们依然可以根据电子

³https://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/levels_form.html

⁴Kramida, A., Ralchenko, Yu., Reader, J., and NIST ASD Team (2018). NIST Atomic Spectra Database (ver. 5.6.1), [Online]. Available: <https://physics.nist.gov/asd> [2019, March 13]. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD. DOI: <https://doi.org/10.18434/T4W30F>

⁵Kramida, A., Ralchenko, Yu., Reader, J., and NIST ASD Team (2018). NIST Atomic Spectra Database (ver. 5.6.1), [Online]. Available: <https://physics.nist.gov/asd> [2019, March 13]. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD. DOI: <https://doi.org/10.18434/T4W30F>

分布位形归类。注意，这里的能量零点是 Ar-II 的基态 $3s^23p^5$ 对应的能量，也就几乎是 (18) 中的能量值。第一激发态为

$$E(3s^13p^6) = 13.48 \text{ eV} \quad (20)$$

对应 (19) 中指示的 Ar-I 最高能量，也就是其电离能。内层电子位形为 $3s^23p^4$ 的能级非常之多，几乎呈连续分布，但大多数分布在 $\sim 25 \text{ eV}$ 附近。将这个数值与 Ar-I 的电离能相加，大概结果就是 $\sim 38 \text{ eV}$ ，是实验测得的第二激发态 $E_2 = 38.6 \text{ eV}$ 。

根据以上讨论，我们可以对氩原子各激发态的能量与 n 大致呈线性关系作如下定性解释：

1. 对氩原子的每个电子而言，它大致上有两类激发态。第一类激发态的能量在 $12 - 15 \text{ eV}$ 间，第二类激发态的能量在 $26 - 28 \text{ eV}$ 间。这两类激发态的能量几乎是 1:2 的关系；
2. 第二类激发态与电离能几乎相等；
3. 当氩原子吸收能量时，第一个电子先吸收能量，发生跃迁。当第一个电子吸收足够多的能量以至于它发生电离时，若原子吸收的能量仍有剩余，第二个电子再次发生相同过程，从基态到达第一类激发态或完全电离，若有剩余，第三个电子继续发生类似反应，这种过程一直进行直至原子吸收的能量耗尽。
4. 由于两类激发态间的比例关系，使得无论有多少电子发生跃迁，原子的总激发能量都近似是某个整数的倍数。

我们举例阐释上面模型对实验事实的解释。例如，氩原子的 3 个电子发生电离的对应能量是

$$E(\text{Ar} - \text{IV}) \simeq 27 \times 3 = 51 \text{ (eV)} \quad (21)$$

这几乎就是实验测得的第三个极小值点。再例如，氩原子的 3 个原子发生电离且有第 4 个电子跃迁到第一类激发态时，对应的能量是

$$E(\text{Ar} - \text{IV}, \text{excited}) \simeq 27 \times 3 + 13 = 64 \text{ (eV)} \quad (22)$$

这与实验测得的第四个极小值点相差无几。

上面的唯象模型的适用范围为前几个电子的激发/电离过程。可以想象，当电离的电子数进一步增多，外层电子感受到的势场将发生较大变化，使得两类激发态的能量 1:2 的比例关系减弱甚至出现更多的激发态类别，模型失效。但在实验的能量范围内，这个模型较好地解释了实验现象。

3. 实验的改进建议

结合当天做实验的各类情况，我对这个实验有如下改进建议：

1. 因为使用了与测量仪器不同厂家的 FH 管，电流计指示的电流始终是一个负值，也就是说，由于仪器的不匹配，电流计事实上是反接进电路的，这可能存在一些潜在问题，并且，由于仪器的改造，讲义需要更新；
2. 不需要苛求实验测量得过于精确，特别是对电流的测量不需要等到示数完全稳定后再读数，只需要找到电流的极小值对应的加速电压值就能很好地得出实验结果；
3. 当天实验无法使用计算机自动测量，但在这个实验中，自动测量事实上是很重要的，它可以使搜寻电流极小值点的精度大大提高，也可以减小人为读数（示数不稳定）带来的误差；
4. 实验现象，特别是能量与指标间的线性关系非常有趣，值得进一步探究；
5. 实验要求在 $< 85 \text{ V}$ 范围内调整加速电压，但事实上在 85 V 附近恰好有一个吸收峰，因此应该适当扩大测量范围。

【实验思考题】

见【实验前思考题】。