

预习报告		实验记录		分析讨论		总成绩	
25		25		30		80	
年级、专业：		2022 级物理学		组号：		实验组 1	
姓名：		黄罗琳		学号：		22344001	
实验时间：		2024/4/25		教师签名：			

CA2 夫兰克-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：
- (a) 预习报告：课前认真研读实验讲义，弄清实验原理；实验所需的仪器设备、用具及其使用、完成课前预习思考题；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（可以参考实验报告模板，可以打印）。（20 分）

(b) 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。（30 分）

(c) 数据处理及分析讨论：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。（30 分）
- 实验报告就是将预习报告、实验记录、和数据处理与分析合起来，加上本页封面。（80 分）

2. 每次完成实验后的一周内交实验报告（特殊情况不能超过两周）。

【实验安全注意事项】

1. 连线时务必注意，接错线路容易毁坏 F-H 管。
2. 连线时， V_{G2K} 加速电压端接高压，使用过程中请勿触碰接线端

目录

1 CA2 夫兰克-赫兹实验：原子定态能级的观测 预习报告 3

1.1 实验目的 3

1.2 仪器用具 3

1.3 原理概述 3

2 CA2 夫兰克-赫兹实验：原子定态能级的观测 实验记录 6

2.1 实验内容、步骤与结果 6

2.1.1 操作步骤记录 6

2.1.2 实验数据记录 7

2.2 实验过程遇到问题及解决办法 9

3 CA2 夫兰克-赫兹实验：原子定态能级的观测 分析与讨论 10

3.1 三组电压值实验数据分析 10

3.1.1 实验数据绘图 10

3.1.2 图像形状分析 11

3.1.3 图像高度分析 12

3.2 两组不同方式实验数据分析 12

3.2.1 实验数据绘图 12

3.2.2 两种结果对比分析 13

3.2.3 停留时间影响实验结果的讨论 13

3.3 对于实验结果定性分析 14

3.4 对于实验结果定量分析 15

3.5 实验结论 17

4 CA2 夫兰克-赫兹实验：原子定态能级的观测 结语 18

4.1 实验心得和体会、意见建议等 18

4.2 附件 18

CA2 弗兰克-赫兹实验：原子定态能级的观测 预习报告

1.1 实验目的

- 1. 从实验了解原子定态能级（量子化），更好掌握量子力学的基础知识。
- 2. 训练建立微观物理过程与宏观物理量之间关系的能力。
- 3.（选）学习分解多因素，研究独立因素影响实验现象的规律。

1.2 仪器用具

表 1 CA2-1 实验仪器用具			
编号	仪器用具名称	数量	主要参数（型号，规格等）
1	FH-Ar 实验管	1	具体见实验管上说明
2	可编程直流稳压电源	1	GWINSTEK GPP-4323 4 通道独立输出：CH1、CH2: 0~32V/0~3A； CH3: 0~5V/0~1A; CH4: 0~15V/ 0~1A 串联同步电压 0~64V； 并联同步电流 0~6A；
3	多量程直流电源	1	GWINSTEK PFR-100M; 电压 0-250V，电流 0-2A，额定输出功率 100W；
4	微电流放大器	1	BroLight BEM-5710 电流测量范围：10-8~10-13A，共分 6 档
5	NI myDAQ 数据采集器	1	提供模拟输入 (AI)、模拟输出 (AO)、数字输入和输出 (DIO)、音频、电源和数字万用表 (DMM) 功能

1.3 原理概述

弗兰克-赫兹实验通过观察电子与原子碰撞时能量的转移来研究原子的能级结构。在该实验中，原子可以通过吸收或释放特定量的能量来在不同能级之间跃迁。这种能量的改变与辐射频率 ν 相关，关系式为：

$$h\nu = E_n - E_m$$

其中， h 是普朗克常数， E_n 和 E_m 分别是原子的两个不同能级。

$$e\Delta V = E_n - E_m$$

原子发生碰撞的电子能量达到 $(E_n - E_m)$ ，原子未必会发生能级跃迁。电子与原子碰撞后，能量未必完全传递给原子，若传递的能量小于 $(E_n - E_m)$ ，原子无法发生能级跃迁。

弗兰克-赫兹实验利用一个装有氩气的三极管，称为弗兰克-赫兹管（F-H 管），来进行实验。该管由一个热阴极（K），一个栅极（G），和一个阳极（P）组成。电子从热阴极发射，并在阴极和栅极之间的电场中

被加速，电压记作 V_{G_2K} 。当电子在加速过程中与氩原子碰撞时，电子的动能可能转移给氩原子，导致氩原子从一个能级跃迁到另一个能级。同时，电子的动能降低。在这种情况下，阳极与栅极之间的反向排斥电压 V_{G_2P} 将会将能量不足的电子拉回。

图 1 显示了 F-H 管的实验原理图，其中展示了电子加速和与氩原子碰撞的过程。

$V_{G_{2k}} - V_{G_{1k}min} \leq V_{G_{2p}}$ ，电子不能抵达板极（即图 2a 点）；随着 $V_{G_{2k}}$ 逐渐加大，当 $V_{G_{2k}} - V_{G_{1k}min} \gg V_{G_{2p}}$ 时，板极电流 I_P 将随 $V_{G_{2k}}$ 的增加而增大（ab 段）；

当 $(V_{G_{2k}} - V_{G_{1k}min}) \times e > E_n - E_m$ 时，电子与氩原子发生非弹性碰撞，电子损失能量 $(E_n - E_m)$ ，电子即使穿过了 G2 也不能克服反向拒斥电场而被折回第二栅极，则板极电流 I_P 将显著减小（bc 段）；

随着 $V_{G_{2k}}$ 进一步增加，电子继续加速，能量再次随之增加，使之可以克服反向拒斥电场而达到板极 P，这时 I_P 又再次上升（cd 段），直到 $V_{G_{2k}}$ 二倍于氩原子的第一激发电位以上时，电子因二次碰撞而又失去能量，造成第二次 I_P 的下降（de 段）。

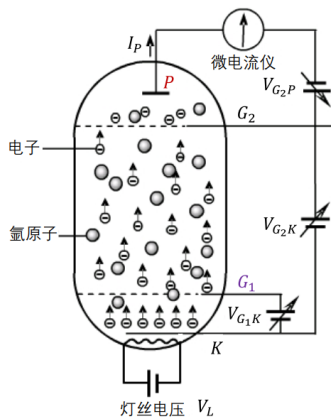


图 1: 实验原理图

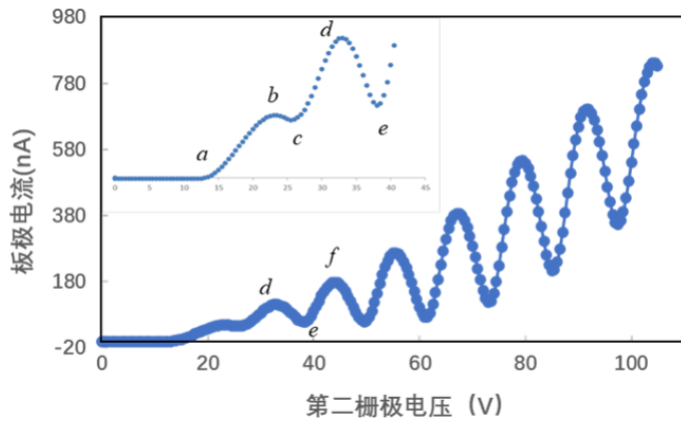


图 2: $I_P \sim V_{G_{2K}}$ 曲线

实验的预期现象：当电子在 KG 区域加速到一定动能后，它们可能会在 GP 区域与氩原子碰撞，导致部分能量损失。如果这些电子的动能小于反向排斥电压 V_{G_2P} ，它们将不会到达阳极，从而导致阳极电流减少。这一现象导致了阳极电流的周期性变化，表现为 I_P 随加速电压 $V_{G_{2K}}$ 变化的峰值和谷值。

实验测量得到的结果为散点值，为了精确得到 $I_P - V_{G_{2K}}$ 曲线的峰值和谷值，可以利用 Python 代码对实验数据进行拟合，进而找到曲线的峰值和谷值。

如果 F-H 管内没有氩气，电子将不会与原子碰撞并失去能量，因此阳极电流会随 $V_{G_{2K}}$ 单调增加，不会出现周期性的变化。

对于从阴极发射出来的，但又不能抵达板极的那些电子：当从阴极发射的电子无法抵达板极时，它们最终的去向可能有多种途径。首先，这些电子可能会在运动过程中与气体分子或其他物质发生碰撞，导致它们散射或被吸收。其次，这些电子可能会在极板之间的空间中反复运动，最终返回到阴极或其他电极上。此外，有些电子可能会由于具有足够的能量而逃逸出电场舒服，进入到器壁上。

对于为什么不测 G2 板电流，是因为阳极电流是直接反映电子与气体原子碰撞的指标。阳极电流的下降表明电子与气体原子发生了非弹性碰撞，导致能量损失。测量阳极电流可以直接观察到气体原子的激发，验证量子力学中能级的概念。G2 极电流无法直接反映这些信息，无法准确预测有多少电子最终抵达阳极。

并且测量 G2 板可能会使得实验所得数据并不明显，其主要是由于 G2 上拒斥电压的引入可以使一部分发生碰撞能量减少的电子并不能到达阳极，从而使得 I_P 减小，而若直接测量 G2 电流可能会使一些低能

量的电子也可以进入到 G2 板上, 出现较大本底电流, 这样的最直接的结果就是实验结果不明显, 甚至可能会出现反常结果的出现!

对于电子与氩原子发生弹性碰撞和非弹性碰撞的讨论。

在这个过程中, 电子的速度减小, 而氩原子的速度增加。

理想状态下, 电子在碰撞前的速度由加速电压 V 决定, 计算公式为:

$$v = \sqrt{\frac{2eV}{m_e}}$$

其中 e 是电子的电荷, m_e 是电子的质量。非弹性碰撞后, 电子损失部分能量 ΔE , 导致速度降低。碰撞后的电子速度变为:

$$v' = \sqrt{\frac{2(E - \Delta E)}{m_e}} = \sqrt{\frac{2e(V - \Delta E)}{m_e}}.$$

这种速度变化使电子的速度分布峰值向低速端移动, 并可能导致分布的宽度增加, 因为一部分电子减速, 而另一部分可能保持原始速度。

对于氩原子来说, 碰撞后获得部分电子的能量 ΔE , 这使氩原子的动能增加。氩原子的速度可以通过以下公式计算:

$$v_{Ar} = \sqrt{\frac{2\Delta E}{m_{Ar}}},$$

其中 $m_{Ar} \approx 40 \text{ amu}$ 是氩原子的质量。

氩原子的速度分布取决于其激发或离子化所需的能量, 不同的能量转移会导致不同的速度变化, 但是总体上能量增加, 并且可能出现二次碰撞。

此外对于电子在弹性碰撞下能量损失, 设电子初始速度为 v_1 , 碰撞后速度为 v_2 , 而氩原子初始时是静止的。

根据动量守恒和能量守恒

$$m_e \cdot v_1 = m_e \cdot v_2 + m_{Ar} \cdot v_{Ar}.$$

$$\frac{1}{2}m_e \cdot v_1^2 = \frac{1}{2}m_e \cdot v_2^2 + \frac{1}{2}m_{Ar} \cdot \left(\frac{m_e \cdot (v_1 - v_2)}{m_{Ar}}\right)^2.$$

$$\Delta E = \frac{1}{2}m_e \cdot v_1^2 - \frac{1}{2}m_e \cdot v_2^2.$$

$$\frac{\Delta E}{\frac{1}{2}m_e \cdot v_1^2}.$$

当 $m_{Ar} \gg m_e$ 时, 氩原子的质量比电子大很多, 电子速度的改变较小, 电子的动能损失相对值也会非常小。这表明, 弹性碰撞后电子损失的能量与其碰撞前动能相比可以忽略不计。

专业:	物理学	年级:	2022 级
姓名:	黄罗琳	学号:	22344001
室温:	23°C	实验地点:	A509
学生签名:	黄罗琳	评分:	
实验时间:	2024/4/25	教师签名:	

CA2 弗兰克-赫兹实验：原子定态能级的观测 实验记录

2.1 实验内容、步骤与结果

2.1.1 操作步骤记录

1. 控制参数及控制范围（工作点选取）

F-H 管灯丝电流电压 (CH4)、 V_{G_1K} 电压 (CH1)、 V_{G_2P} 电压 (CH2), 根据 FH-Ar 实验管上参数说明进行设置, 过压电压值 OVP(V); 过流值 OCP(A) 使用默认值。本次实验中设置 $V_{G_1k} = 2V$ $V_{G_2p} = 8V$ $V_L = 2V/1.8V/2.2V$ 实验起始电压和终止电压选用 $0 - 85V$, 步长选用 $1V$ 。

对于工作点的选取: 按照装置参数表设置各电极电压, 使得第一栅极 G_1 电压 $V_{G_{1k}}$ 能够将电子从阴极周围拉出, 使之持续发射电子又不至于过大将电子留在 G_1 , 使进入加速区的电子密度下降, 默认参数基本为最佳工作环境, 从而使得实验结果更加明显。

2. 测量记录的物理量

自动测量模式: V_{G_2K} 电压将自动加压, 计算机自动保存 V_{G_2K} 和 I_P 的数据。需要记录每次设置的 V_L 值, 其余均使用默认参数。

手动测量模式: $V_L = 2V$ 直接通过电源面板设置 V_{G_2K} , 在微电流放大器面板读电流值 I_P , 记录电流档位 ($10^{-9}A$)。

3. 实验系统连接

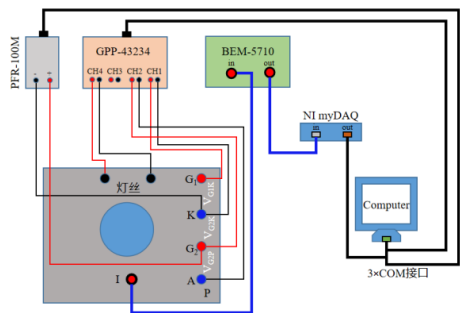


图 3: 实验系统接线

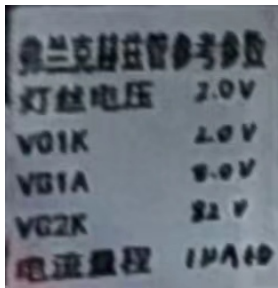
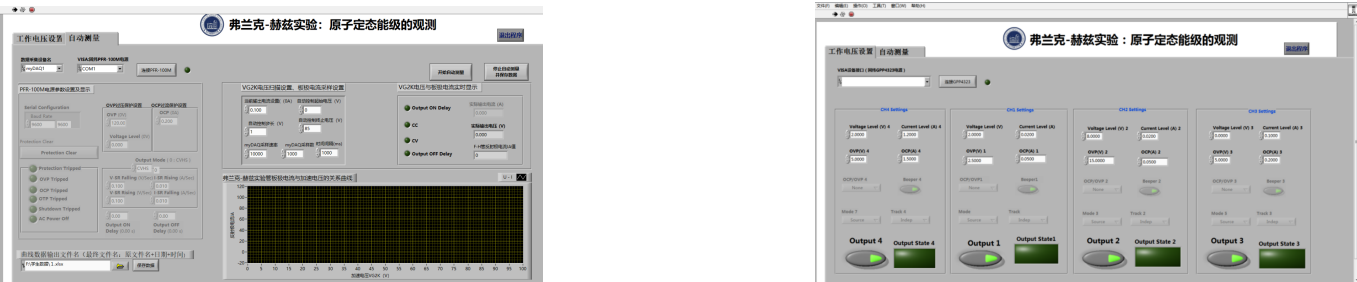


图 4: 仪器参数

F-H 管灯丝电流电压 (连 CH4)、 V_{G_1K} 电压 (连 CH1)、 V_{G_2P} 电压 (连 CH2), G_2 (连仪器 PFR + 极), K (连仪器 PFR -极)。连线示意图如图 4 所示。

4. 实验控制主界面操作

Labview 程序主界面如下图所示，分为工作电压设置和自动测量两部分。相关参数设置和记录已在第 1、2 步中说明。



2.1.2 实验数据记录

表 1: 电压与数据表

V_{G_2K}	2V	1.8V	2.2V	手动
0	-9.694749	-15.279422	-16.892639	0
1	-9.788475	-15.216847	-15.906743	0
2	-9.874208	-14.342165	-14.630174	0
3	-11.411665	-12.292222	-14.372565	0
4	-5.867502	-13.045717	-13.547887	0
5	-11.236373	-12.144871	-13.368155	0
6	-11.310698	-11.826463	-8.49961	0
7	-12.045748	-11.574046	-12.27125	0
8	-11.964387	-11.302159	-11.924082	0
9	-10.506037	-10.586988	-11.587572	2
10	-11.474718	-10.41074	-5.400376	7
11	-4.863639	-5.976256	32.078027	19
12	4.368891	0.947629	103.907385	37
13	17.560035	10.109728	206.14958	52
14	32.922515	21.551781	295.373053	64
15	41.90577	23.399995	357.257033	71
16	48.125346	25.718682	390.375276	74
17	50.884722	25.330253	390.915771	69
18	49.672231	22.384587	350.413825	56
19	40.952391	15.84838	274.427881	44

表 1: 电压与数据表

V_{G_2K}	2V	1.8V	2.2V	手动
20	27.906276	8.764505	184.330956	27
21	15.6556	2.082448	104.8318	15
22	5.742533	-2.091011	51.72757	17
23	5.96947	-2.436197	50.396624	32
24	14.509987	3.152916	122.034159	62
25	36.664029	13.64603	262.026643	91
26	65.679587	23.286937	402.970319	110
27	75.287088	30.19026	491.272452	115
28	84.308052	32.556424	517.358534	110
29	79.530568	30.233229	485.168872	92
30	70.607907	24.251246	397.075641	60
31	45.804405	15.292173	270.843555	39
32	24.288135	6.507914	146.312947	21
33	5.367904	0.97147	55.998785	11
34	-0.120311	-2.31337	15.822557	19
35	5.590605	-0.329623	43.941435	46
36	24.192428	8.053023	158.864543	89
37	59.456048	19.957966	340.891374	127
38	90.594985	35.04808	505.402971	146
39	109.353519	37.556541	603.076583	154
40	115.445555	37.342106	626.839674	145
41	108.112132	35.251312	585.531838	123
42	90.187634	30.168673	488.153954	92
43	64.477001	21.93939	352.188739	59
44	39.94115	12.767454	210.774794	32
45	18.646147	5.93504	102.364873	21
46	7.251162	2.087503	47.005693	29
47	12.214185	4.616868	69.009719	62
48	35.465747	12.294521	188.907736	105
49	70.304937	23.433195	368.587188	145
50	104.196419	34.351149	539.933044	173
51	130.472616	41.766889	659.962085	187
52	140.185593	45.351693	714.675501	183
53	139.566129	44.867284	703.966722	165
54	124.804464	40.496947	634.550665	137

表 1: 电压与数据表

V_{G_2K}	2V	1.8V	2.2V	手动
55	103.069934	33.594307	521.735771	104
56	75.823005	25.193012	384.953189	72
57	50.922226	17.210886	256.479678	50
58	34.052962	12.63356	167.86877	49
59	31.472703	14.264811	154.092318	71
60	47.785351	16.682006	225.759775	106
61	75.502616	24.709627	361.469908	148
62	108.100314	34.498705	520.588519	183
63	136.811604	43.449307	662.755822	207
64	157.665031	49.158788	762.403891	217
65	166.973867	52.006015	808.950326	214
66	164.108674	52.003829	797.980864	196
67	151.326795	47.364337	734.75897	170
68	134.94679	41.414461	632.146996	140
69	105.75191	34.668054	512.302059	115
70	85.022404	28.070979	405.136121	99
71	76.968481	25.001598	342.459093	103
72	76.513788	25.801409	347.31343	123
73	92.566368	30.233434	411.915866	153
74	112.799579	40.488817	524.373481	188
75	142.207118	45.131861	655.483198	218
76	169.027089	53.148348	778.624179	241
77	186.761061	58.089238	875.664528	256
78	199.612142	60.984078	932.753809	257
79	201.909037	60.365502	940.580863	248
80	194.41945	58.082338	904.641967	228
81	179.244559	53.944402	833.808	205
82	159.359062	50.180413	744.248426	185
83	142.561254	44.985534	665.73298	173
84	134.619023	42.162491	618.232415	175
85	136.027505	42.922271	616.382971	189

2.2 实验过程遇到问题及解决办法

实验中出现了接线错误的问题，为 CH1 和 CH2 的接线出现了互换，这就导致实验图像的显示并未出现峰谷交替，而是出现一个平缓的区域然后继续上升，之后通过助教老师的帮助下改正后完成了实验。

专业:	物理学	年级:	2022 级
姓名:	黄罗琳	学号:	22344001
日期:	2024/4/25	评分:	

CA2 夫兰克-赫兹实验：原子定态能级的观测

分析与讨论

3.1 三组电压值实验数据分析

3.1.1 实验数据绘图

对自动测量的三组数据，使用 Python 绘制拟合曲线，并标出峰谷点（代码见后）做出 $I_P \sim V_{G_2K}$ 曲线

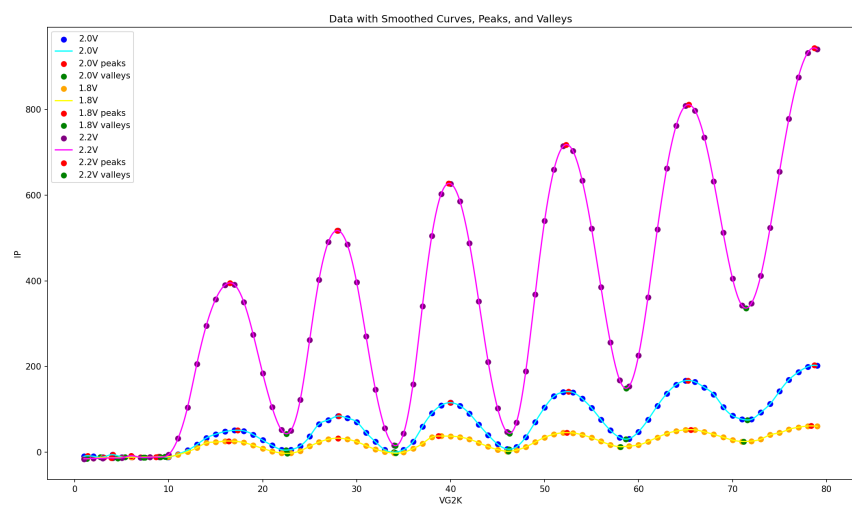


图 5: 曲线寻峰寻谷

将此拟合图像中的相关数据提取出来，生成如下数据。

表 2: 拟合图像峰谷结果

	2.0V_peaks	2.0V_valleys	1.8V_peaks	1.8V_valleys	2.2V_peaks	2.2V_valleys
0	1.390390	2.717718	3.108108	1.312312	3.888889	4.591592
1	4.045045	5.372372	9.042042	4.045045	5.996997	7.324324
2	6.153153	7.480480	16.381381	9.588589	8.651652	9.120120
3	8.885886	9.822823	28.015015	22.627628	16.537538	22.549550
4	17.318318	22.471471	38.711712	34.183183	27.936937	34.105105
5	28.093093	33.948949	52.375375	46.129129	39.804805	46.285285
6	39.960961	46.207207	65.570571	58.075075	52.297297	58.699700
7	52.531532	58.621622	78.375375	71.192192	65.336336	71.426426

此实验数据存在较低电压时的拟合误差，故删除错误数据后，得出如下实验峰谷结果：

表 3: 拟合图像修正峰谷结果

	2.0V_peaks	2.0V_valleys	1.8V_peaks	1.8V_valleys	2.2V_peaks	2.2V_valleys
1	8.885886	9.822823	28.015015	22.627628	16.537538	22.549550
2	17.318318	22.471471	38.711712	34.183183	27.936937	34.105105
3	28.093093	33.948949	52.375375	46.129129	39.804805	46.285285
4	39.960961	46.207207	65.570571	58.075075	52.297297	58.699700
5	52.531532	58.621622	78.375375	71.192192	65.336336	71.426426

计算每一组数据之间的峰-峰间距，谷-谷间距，得出如下结果，其中最后一行为各列数据取平均的结果。

表 4: 峰-峰、谷-谷间距

2.0V 峰间距	2.0V 谷间距	1.8V 峰间距	1.8V 谷间距	2.2V 峰间距	2.2V 谷间距
8.432432	12.648648	10.696697	11.555555	11.399399	11.555555
10.774775	11.477478	13.663663	11.945946	11.867868	12.180180
11.867868	12.258258	13.195196	11.945946	12.492492	12.414415
12.570571	12.414415	12.804804	13.117117	13.039039	12.726726
10.911912	12.199200	12.590590	12.141641	12.199700	12.219719

所有数据的平均值为 $\bar{V}_0 = 12.043794\text{V}.$ ，其物理意义为氩原子的第一激发电位

3.1.2 图像形状分析

分析图 5 所得实验图像，三组数据有着相似的实验图像，可以得出如实验原理概述中对于整体实验过程的描述：

1. 当 $V_{G_{2k}}$ 逐渐加大时，刚开始 $V_{G_{2k}} - V_{G_{1k}} \leq V_{G_{2p}}$ ，电子不能抵达板极，故曲线在最初一段电流非常微弱几乎为零；
2. 随着 $V_{G_{2k}}$ 继续加大，当 $V_{G_{2k}} - V_{G_{1k_{min}}} \geq V_{G_{2p}}$ 时，电子获得足够多的能量能够达到板极 P，且 $V_{G_{2k}}$ 越大，获得能量越多，故板极电流 I_P 将随 $V_{G_{2k}}$ 的增加而增大；
3. 当 $(V_{G_{2k}} - V_{G_{1k_{min}}}) \times e > E_n - E_m$ 时，电子与氩原子发生非弹性碰撞并损失能量 $(E_n - E_m)$ ，此时随着 $V_{G_{2k}}$ 继续加大板极电流 I_P 停止上升，形成第一个峰，之后由于电子不能到达极板，电流 I_P 不断减小，最终达到第一个谷。
4. 随着 $V_{G_{2k}}$ 进一步增加，电子继续加速，能量再次随之增加，使之可以克服反向拒斥电场而达到板极 P，这时 I_P 又再次上升，直到 $V_{G_{2k}}$ 二倍于氩原子的第一激发电位以上时，电子因二次碰撞而又失去能量。
5. 第二次 I_P 的下降，以此类推。当 $V_{G_{2k}}$ 的增量达到氩原子第一激发电位 V_0 整数倍时，微电流计检测出的电流都 I_P 都会开始下降，形成如图 5 所示起伏变化的 $I_P \sim V_{G_{2k}}$ 曲线。

3.1.3 图像高度分析

观察图像可知，三组图像在有着相同峰谷位置的同时，电压 V_{G_2K} 相同，灯丝电压 V_L 越大，电流 I_P 越大，更高的电压会有更多的电子进入到容器中，从而使得电流更大。

3.2 两组不同方式实验数据分析

3.2.1 实验数据绘图

对自动测量和手动测量（ $V_L = 2.0V$ ）两组数据，使用 Python 绘制拟合曲线，并标出峰谷点（代码见后）做出 $I_P \sim V_{G_2K}$ 曲线

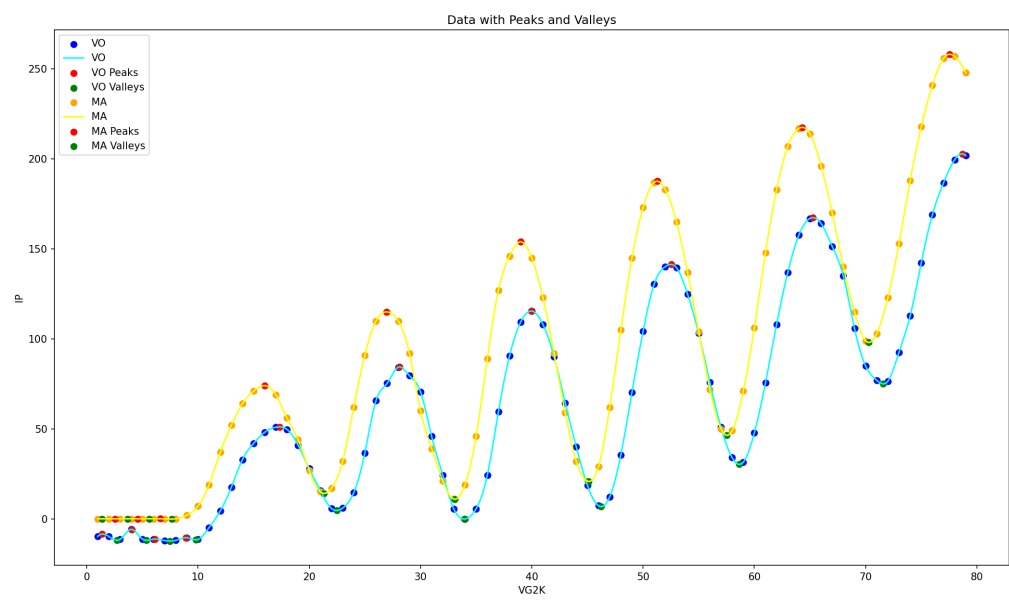


图 6: 曲线寻峰寻谷

提取图像中的峰谷数据，删除电压较小时的错误数据，得出如下实验峰谷结果。

	自动 _peaks	自动 _valleys	手动 _peaks	手动 _valleys
1	8.885886	9.822823	15.990991	7.636637
2	17.318318	22.471471	26.921922	21.300300
3	28.093093	33.948949	39.024024	33.090090
4	39.960961	46.207207	51.282282	45.114114
5	52.531532	58.621622	64.321321	57.528529
6	65.258258	71.582583	77.516517	70.255255

表 5: 拟合图像寻峰寻谷

计算每一组数据之间的峰-峰间距，谷-谷间距，得出如下结果，其中最后一行为各列数据取平均的结果。所有数据的平均值为 $\bar{V}_0 = 11.914114V$

表 6: 峰-峰、谷-谷间距

自动峰间距	自动谷间距	手动峰间距	手动谷间距
8.432432	12.648648	10.930931	13.663663
10.774775	11.477478	12.102102	11.789790
11.867868	12.258258	12.258258	12.024024
12.570571	12.414415	13.039039	12.414415
12.726726	12.960961	13.195195	12.726726
11.274874	11.952352	12.305905	12.123324

3.2.2 两种结果对比分析

1. 相同点

两种方法所得的图像的形态相似，都是电流 I_P 随着电压 $V_{G_{2K}}$ 增加而不断地上升、下降，出现一系列峰和谷。并且观察实验最终数据，两种方法的峰谷间距的结果也较为接近，说明从实验结果来看，都较为准确。

2. 不同点

手动测量的数据都略大于自动测量数据，观察图像中的两条曲线的高度可以发现手动测量数据（MA 线）始终大于自动测量数据（VO 线），这可能是因为，在此实验中，灯丝的温度稳定是一个非常重要的条件，而由于自动测量的电压上升太快，导致灯丝在每一个电压值上的温度并未稳定，这就导致了灯丝热电子的发射率降低，从而使得自动测量的数据始终低于手动测量的峰值数据。

手动测量的曲线呈现一个前置的效果，即峰谷值对应的电压比自动测量曲线小，这可能是因为自动测量的每一电压值的停留时间较短，导致了电流尚未稳定，而手动测量的停留时间较长，所以所得的实验数据更为精确，对于停留时间的影响，具体讨论见 3.2.3。

3. 综合讨论

两实验方式各有优劣，自动测量胜在测量精度更高、速度更快，可以短时间内获得大量数据；手动测量则是会有足够的时间让电流稳定，实验数据总体上准确，但是由于仪器的限制，导致了实验数据的精度不高。

3.2.3 停留时间影响实验结果的讨论

3.2.2 中对于手动停留时间较长从而影响峰谷值的讨论，为了验证此项猜想，在实验过程中我进一步完成了调整时间间隔为 3s 的实验，将实验数据导出并与手动测量数据共同绘制实验图像。

观察此图像与图 6（较小时间间隔的自动测量），会发现无论是数据之间的高度差距亦或是手动曲线的前置都变小了，这说明对于自动测量来说，可以通过调大时间间隔从而保证在自动记录数据时所得到的数据是在电流稳定的情况下输出的，验证了 3.2.2 中对于两种不同测量方式数据差异的原因的讨论。

若想消除此误差，可以通过增大时间间隔的方式来消除自动测量的弊端，这样既保证了实验数据的精确，也使得实验结果符合实际。

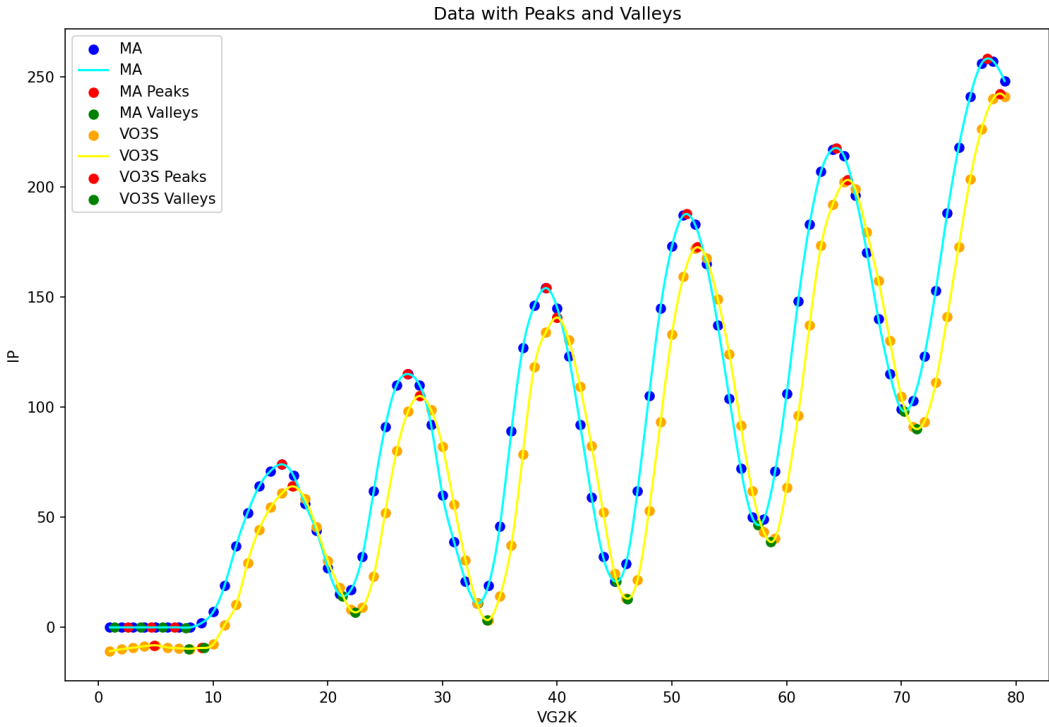


图 7: 增大时间间隔后与手动测量峰谷对比

3.3 对于实验结果定性分析

1. 实验参数定性分析

实验中存在众多参数，而本实验仅研究了灯丝电压对 $I_P \sim V_{G2K}$ 曲线的影响，下面对于此实验中根据出厂参数设置的参数进行定性分析。

灯丝电压 V_L : 灯丝电压决定了灯丝的温度，从而影响热电子的发射数量。随着 V_L 的增加，释放的电子数量增加，这导致图中峰值电流 (I_{Pmax}) 增大，同时曲线的起伏更加明显，因为更多电子会与加速区域中的气体分子发生碰撞。峰和谷之间的差值也会随着 V_L 的增大而增大。

收集电压 V_{G1K} : V_{G1K} 的作用是收集热发射电子，将它们引入加速区域。如果 V_{G1K} 增加，在相同的灯丝电压条件下，更多的电子会被收集到加速区。这使得 $I_P \sim V_{G2K}$ 曲线的起始电压降低。

拒斥电压 V_{G2P} : 抑制电压用于将通过加速区但未到达阳极的电子推回栅极，并使得 V_{G2K} 增大时 I_P 趋向饱和，但是其不可过大，否则会导致电离现象的产生

2. 对于波谷点电流定性分析

观察 $I_P \sim V_{G2K}$ 曲线可以发现谷值处的电流不会降至零，并且随着 V_{G2K} 的增大而增加。这可以用以下方式解释：

由于电子在加速区可能会与原子发生碰撞，但这种碰撞是概率事件，并不一定每个电子都会发生碰撞。因此，总有一些电子能够直接通过加速区而未发生碰撞，直接到达板极，从而形成板极电流。这是为什么即使在曲线的谷值处，电流也不会完全降至零。

当加速电压 V_{G_2K} 增大时，这些电子的能量也随之增加。因此，电子以更高的能量通过加速区，直接到达板极的概率增加。这种情况下，即使在碰撞的最小点，电子仍然可能以足够的能量到达板极，导致谷值处的电流上升。

总之，谷值电流不为零的原因在于，电子通过加速区时，有一定概率未发生碰撞而直接到达板极。而随着加速电压的增大，电子的能量也增加，这种直接到达板极的电子数量会增加，因此谷值电流会随之增大。

3. 对于原子对电子的弹性散射的讨论

正如在实验原理部分，对于电子与氩原子发生弹性碰撞和非弹性碰撞的讨论，在弹性碰撞下，由于原子比电子的质量大得多，所以电子的速度的该变量较小，动能损失也较小，会继续在电场中获得能量。

但是由于弹性碰撞会导致电子运动方向的改变，这可能会降低到最终测量电流得到强度，可能会有一部分电子最终飞向器壁。

3.4 对于实验结果定量分析

1. 误差分析

实验测得最终该数据为 $\bar{V}_0 = 12.043794V$ ，其物理意义为氩原子的第一激发电位 V_0

而氩原子的第一激发电位的标准值为 $13.08V$ ，相对误差 $\delta = \frac{12.043-13.08}{13.08} \times 100\% \approx 7.92\%$

经过查找资料显示，氩原子基态与第一激发态之间存在两个亚稳态。其中，基态的电势为 $U_0 = 15.76V$ ，两个亚稳态的电势分别为 $U'_1 = 4.21V$ ， $U''_1 = 4.04V$ ，第一激发态的电势为 $U_1 = 2.68V$ 。[1]

基态与两个亚稳态之间的电势差为 $\Delta U'_1 = 11.55V$ ， $\Delta U''_1 = 11.72V$

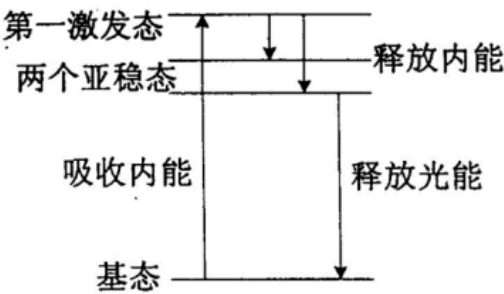


图 8: 氩原子存在亚稳态示意图

而这两个亚稳态的电势差的数值就很接近实验所测的数值，误差更小，所以可以初步判断实验所测得 $V_0 = 12.043794V$ 为亚稳态与基态之间的电势差。

但是仍存在一定的实验误差，这可能是因为，在实验中采用了 Python 代码进行拟合运算得出的峰值，并没有进行实际测量到峰值，此外在 3.2.2 中已经讨论了较短的停留时间的影响，这些都可能会引入实验误差，而可以通过减小测量的步长，增大停留时间来进行多次测量，可能会得到更加精确的数值。

2. 建模计算

对于按照出厂参数设置的实验数据进行讨论，绘制图像，并对图像的峰点和谷点进行拟合。



图 9: 直线拟合图像

其中峰点拟合直线的相关系数 $R^2 = 0.99535$ 谷点拟合直线的相关系数仅有 $R^2 = 0.79083$ 这说明电流峰值与电压存在线性关系，现对此进行推导。

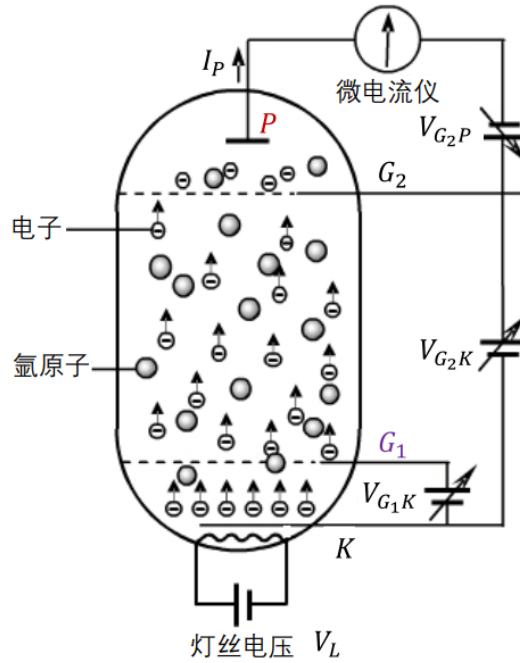


图 10: F-H 管

如图 10 所示以灯丝中心为原点，建立平面直角坐标系电子从灯丝射出，受加速电压加速后到达 P。

$$I = neSv_y$$

$$v_y = \sqrt{\frac{2eV}{m}} \propto \sqrt{V}$$

n 为电子数密度， e 为电子的电荷量， S 为极板横截面积， v_y 为电子的纵向速度。

对于 v_x ，其满足麦克斯韦-玻尔兹曼分布一维形式

$$f(v_x) = \left(\frac{m}{2\pi k_B T} \right)^{\frac{1}{2}} \exp \left(-\frac{mv_x^2}{2k_B T} \right)$$

室温下指数项可忽略，故最终得出 $v_x \propto \sqrt{\frac{1}{V}}$

并且 v_x 对于 n 属于反比关系（速度过快就会飞到器壁上），所以 $n \propto \sqrt{V}$

最终得出

$$I = neSv_y \propto V$$

而峰点拟合直线的相关系数 $R^2 = 0.99535$ ，证明模型正确。

对于谷点的拟合曲线，尚未有较好的思路判断碰撞氩原子后对于电流的影响，但至少已经确定并不是简单一次直线关系。

3. 实验参数定量分析

相关理论公式参照建模计算中的模型。

对于灯丝电压 V_L ：电压越高，数密度 n 越高，故电流 I 越高。

对于收集电压 V_{G_1K} ：由于模型计算中所用的电压是指整个腔体内的电压，故根据收集电压的方向可知，其越高则总体电压 V 越高，则电流 I 越高。

对于拒斥电压 V_{G_2P} ：判断其方向可以说明，其越高则总体电压 V 越低，则电流 I 越低

只需要将相关数据代入到模型计算中的公式中，便可计算出相关理论数值。

当然由于此模型存在很多理想化假设，还需要更多的实验数据进行完善和优化。

4. 激发态退回基态的计算

由 $E = \frac{hc}{\lambda}$ 可知，对于第一激发态的电子，返回基态时发射的光子波长

$$\lambda = \frac{hc}{E} = \frac{3 \times 10^8 \times 6.626 \times 10^{-34}}{13.08 \times 1.6 \times 10^{-19}} \approx 94.98 \text{nm}$$

基本上小于金属的极限波长，故这些光子可以产生光电效应。

通过此项计算也可以使用光谱仪对氩原子的第一激发态的发光光谱进行测量，光谱仪的频段保证涵盖计算所得结果即可。

而汞原子的第一激发电位为 $4.9V$ ，故可以计算得出，返回基态时波长约为 253nm ，选取涵盖此频段的光谱仪即可。

3.5 实验结论

$I_P \sim V_{G_2K}$ 曲线所展示的峰谷图像显示出原子至吸收特定能量的电子，从而确定原子的定态能级。

实验的结果与理论值存在一定误差，这可能是由于氩原子亚稳态的存在，此外仪器与测量方式可能引入一定的误差。

对于手动和自动两种测量方式，手动时间更长，精度较低，但是总体数据更准确，自动效率高，精度较高，但是可能存在较大误差，通过进一步分析，可以增大停留时间来减小自动测量的误差。

通过对于实验的建模和实验结果的拟合，进行定量分析，总结出峰值电流的线性关系。

CA2 夫兰克-赫兹实验：原子定态能级的观测 结语

4.1 实验心得和体会、意见建议等

- 1. 实验过程较为简单，实验仪器的完善度比较成熟，可以更加系统的对于实验结果进行分析。
- 2. 可以运用相关知识进行推导，实验总体的理解程度较深。
- 3. 本实验报告采用 LATEX 编辑，实验所有要求内容均包含于本实验报告中

感谢您对于此篇实验报告的阅读与批改，祝您工作顺利！

4.2 附件

参考文献

[1] 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].

```
# 读取 excel 文件，从第二行开始，读取第二列的数据
filename = '实验数据.xlsx' # 替换为实际的 excel 文件名
data = pd.read_excel(filename, skiprows=1, nrows=79, usecols=(0, 4, 5)) # 第1列为x，第2列和第3列为y

# 提取x轴和y轴数据
x = data.iloc[:, 0].values # x 轴数据
y1 = data.iloc[:, 1].values # y1 为第一列数据
y2 = data.iloc[:, 2].values # y2 为第二列数据

# 使用三次样条函数进行平滑
x_fine = np.linspace(min(x), max(x), 1000)
cs1 = CubicSpline(x, y1)
cs2 = CubicSpline(x, y2)

# 寻找峰和谷
peaks_y1 = signal.find_peaks(cs1(x_fine))[0]
valleys_y1 = signal.find_peaks(-cs1(x_fine))[0]
peaks_y2 = signal.find_peaks(cs2(x_fine))[0]
valleys_y2 = signal.find_peaks(-cs2(x_fine))[0]

# 创建一个空 DataFrame
results = pd.DataFrame()

# 保存所有列名，并创建列索引
max_len = max(len(peaks_y1), len(valleys_y1), len(peaks_y2), len(valleys_y2))

# 填充缺失的部分为 None
results['y1_peaks'] = np.nan * np.ones(max_len)
results['y1_valleys'] = np.nan * np.ones(max_len)
results['y2_peaks'] = np.nan * np.ones(max_len)
results['y2_valleys'] = np.nan * np.ones(max_len)

# 填充数据
results.loc[peaks_y1-1, 'y1_peaks'] = x_fine[peaks_y1]
results.loc[valleys_y1-1, 'y1_valleys'] = x_fine[valleys_y1]
results.loc[peaks_y2-1, 'y2_peaks'] = x_fine[peaks_y2]
results.loc[valleys_y2-1, 'y2_valleys'] = x_fine[valleys_y2]

print("Peaks and Valleys Table:")
print(results)

# 绘制数据分布直方图，并标注峰和谷
plt.figure(figsize=(12, 8))

# 绘制 y1 数据
plt.scatter(x, y1, label='y1', color='blue') # 2.0V
plt.plot(x_fine, cs1(x_fine), label='y1', color='cyan')

# 标注 y1 的峰和谷
if not pd.isna(results['y1_peaks']).all():
    plt.scatter(results['y1_peaks'], cs1(results['y1_peaks']), color='red', label='y1 Peaks')
if not pd.isna(results['y1_valleys']).all():
    plt.scatter(results['y1_valleys'], cs1(results['y1_valleys']), color='green', label='y1 Valleys')
```

图 11: 拟合参考代码

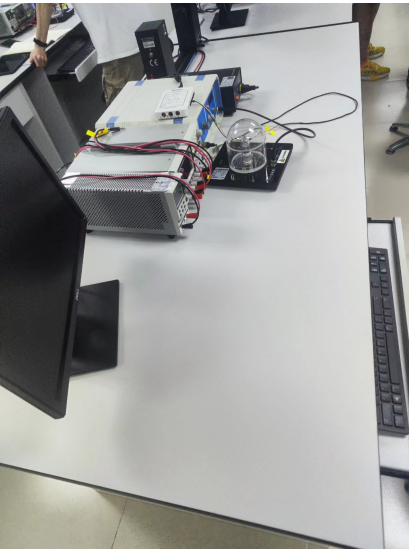


图 12: 整理桌面

DATE

DATE

PAGE

PAGE

$V_{G1} = 2.0V$ $V_{G2} = 1.1V$ $V_{G3} = 2.1V$
 $V_{peak} = 0 \sim 85V$

$V_{G1} = 2V$ $V_{G2} = 2V$ $V_{G3} = 8V$ $x/10^{-9}A$

$V_{peak}(V):$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$I_{sp}(A):$	0	0	0	0	0	0	0	0	2	7	19	
	12-17											
	37	52	64	71	69	56	44	27	15	17		
	18											
	32	62	91	110	113	110	91	60	29	21	11	
	19	40	89	127	146	154	145	123	92			
	59	121	169	182	185	165	133	107				
	100	149	183	207	217	214	196					
	170	240	275	299	302	283	252					
	198	278	291	287	257	249	228					
	205	276	272	250	215	187						

图 13: 实验原始数据