

# F-H 实验报告

姓名：张积翔 学号：PB23020595

摘要：

本实验为弗兰克-赫兹实验的再现，利用弗兰克-赫兹实验仪及示波器，对氩原子激发曲线进行观察与测量，得到消除拟合的本底电流曲线的氩原子激发特性曲线，从而获得六个非弹性碰撞的电位，进而通过最小二乘法计算得到氩原子的第一激发电位及不确定度。

关键词：F-H 实验；氩原子第一激发电位；最小二乘法

## 1. 引言

1914 年德国物理学家弗兰克 (J. Franck) 和赫兹 (G. Hertz) 用慢电子穿过汞蒸气的实验测定了汞原子的第一激发电位，从而证明了原子分立能态的存在。后来他们又观测了实验中被激发的原子回到正常态时所辐射的光，测出的辐射光的频率很好地满足了玻尔理论。弗兰克-赫兹实验的结果为玻尔理论提供了直接证据。弗兰克与赫兹的实验于 1925 年获得诺贝尔物理学奖，弗兰克-赫兹实验与玻尔理论在物理学的发展史中起到了重要的作用。<sup>[1]</sup>

本实验通过弗兰克-赫兹实验仪 (FD-FH-C) 以及示波器对弗兰克-赫兹实验进行复现。通过插值法求得本底电流曲线，得到去除本底电流的氩原子激发曲线，利用多峰拟合并进行最小二乘法拟合，求得氩原子的第一激发电位以及自由度。

## 2. 实验原理

### 2.1 实验仪器

弗兰克-赫兹实验仪 (FD-FH-C)、示波器

### 2.2 实验原理

弗兰克-赫兹实验原理 (如图 1 所示)，氧化物阴极 K，阳极 P，第一、第二栅极分别为 G1、G2。

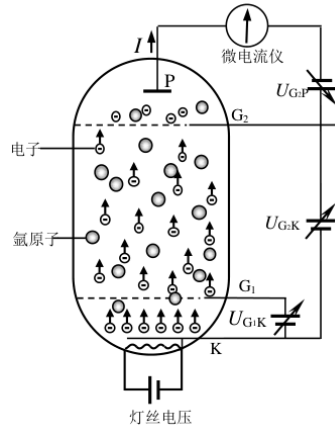


图 1：弗兰克-赫兹实验原理

K-G1-G2 加正向电压，为电子提供能量。 $U_{G1K}$  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。G2-P 加反向电压，形成拒斥电场。电子从 K 发出，在 K-G2 区间获得能量，如果电子进入 G2-P 区域时动能大于或等于  $eU_{G2P}$ ，就能到达板极形成板极电流 I。

当电子处于 K-G1 区间时电子迅速被电场加速而获得能量。当电子处于 G1-G2 区间时，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  $\Delta E$ ，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。 $\Delta E$  称为临界能量。当电子处于 G2-P 区间时，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  $eU_{G2P}$  则不能达到板极。

若  $eU_{G2K} > n\Delta E$  则电子在进入 G2-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  $U_{G2K}$  变化曲线就形成 n 个峰值。相邻峰值之间的电压差 U 称为氩原子的第一激发电位。<sup>[1]</sup>

### 2.3 各参数对激发曲线作用机制<sup>[2]</sup>

$U_F$ ：  $U_F$  影响激发曲线波峰的明显程度，即 y 方向曲线的数值。 $U_F$  越大，激发曲线的数值越大； $U_F$  越小，激发曲线数值越小。随着  $U_F$  增大，阴极 K 温度相应增加，因此从阴极发出的电子会增多，从而导致板极电流  $I_P$  增加，曲线整体上移，峰谷更为明显，这有助于提高实验的分辨率。

$U_{G1k}$ ：  $U_{G1k}$  对激发曲线波峰与波谷处的激发电压无影响，略微增大  $U_{G1k}$  会使波峰峰值略微增大。 $U_{G1k}$  越大，其对阴极附近堆积的电子云的消除作用就越明显，消除空间电荷效应对阴极电子发射的影响，于是有更多的电子可以被加速电压加速，使波峰峰值更大，曲线分辨

率更明显。

$U_{G2K}$ :  $U_{G2K}$  越大, 曲线横向区间越大, 显示波峰数越多。因为若  $eU_{G2K} > n\Delta E$ , 则电子在进入 G2-P 区域之前可能  $n$  次被氩原子碰撞而损失能量, 从而产生  $n$  个波峰, 因此  $U_{G2K}$  越大, 显示的激发曲线波峰越多。

$U_{G2P}$ : 增大  $U_{G2P}$ , 波峰与波谷数值均减小, 且曲线向右移动。当  $U_{G2P}$  增大时, 其对电子的筛选作用增大, 更多的电子被筛选掉, 更少的电子到达阳极形成电流, 使得波峰与波谷数值减小, 且电子需要更高的能量才能到达阳极, 因此曲线整体右移。

### 3. 实验结果与分析

#### 3.1 实验原始数据

实验中首先手动增大  $U_{G2K}$  进行粗测, 得到的波峰波谷数据如下表 1。

表 1: 粗测得到的波峰波谷数据

波峰 $U_{G2K}$ (V)	19.1	29.8	41.4	53.3	65.8	78.3
波峰 $I_P$ ( $\mu A$ )	0.260	0.468	0.627	0.754	0.852	0.954
波谷 $U_{G2K}$ (V)	24.5	35.2	46.5	58.7	71.1	84.5
波谷 $I_P$ ( $\mu A$ )	0.161	0.131	0.141	0.216	0.348	0.560

然后手动细测氩原子激发曲线, 根据粗测时的数据, 在波峰波谷附近以 0.5V 为步长, 其他区域以 1V 为步长进行测量, 得到细测数据如下表 2。

表 2: 细测氩原子激发曲线

$U_{G2K}$ (V)	10.0	11.0	12.0	13.0	14.0	15.0	16.0	17.0	18.0
$I_P$ ( $\mu A$ )	0.057	0.064	0.084	0.097	0.128	0.145	0.166	0.188	0.212

18.5	19.0	19.5	20.0	20.5	21.0	21.5	22.0	23.0	23.5
0.221	0.230	0.235	0.237	0.234	0.225	0.212	0.195	0.162	0.154

24.0	24.5	25.0	26.0	27.0	27.5	28.0	28.5	29.0	29.5
0.160	0.186	0.218	0.290	0.362	0.386	0.413	0.433	0.452	0.466

30	30.5	31.0	32.0	33.0	34.0	34.5	35.0	35.5	36.0
0.467	0.455	0.437	0.352	0.245	0.157	0.144	0.164	0.203	0.252

37.0	38.0	39.0	40.0	40.5	41.0	41.5	42.0	43.0	44.0
0.352	0.458	0.544	0.620	0.643	0.652	0.649	0.630	0.529	0.386

45.0	45.5	46.0	46.5	47.0	47.5	48.5	49.5	50.5	51.5
0.227	0.173	0.164	0.187	0.240	0.290	0.405	0.516	0.638	0.724

52.0	52.5	53.0	53.5	54.0	55.0	56.0	57.0	57.5	58.0
0.753	0.777	0.783	0.776	0.748	0.650	0.487	0.331	0.261	0.240

0.258

58.5	59.0	59.5	60.5	61.5	62.5	63.5	64.0	64.5	65.0
0.258	0.300	0.348	0.468	0.583	0.705	0.802	0.840	0.871	0.881

65.5	66.0	66.5	67.0	68.0	69.0	69.56	70.0	70.5	71.0
0.887	0.878	0.854	0.816	0.685	0.519	0.453	0.409	0.387	0.393

71.5	72.0	73.0	74.0	75.0	76.0	76.5	77.0	77.5	78.0
0.418	0.457	0.558	0.671	0.788	0.884	0.917	0.953	0.978	0.993

78.5	79.0	79.5	80.0	81.0	82.0	83.0	83.5	84.0	84.5
0.996	0.985	0.958	0.927	0.809	0.681	0.599	0.585	0.587	0.604

85.0	86.0	87.0							
0.636	0.715	0.803							

### 3.2 实验数据处理

根据原始实验数据绘制 $I_P \sim U_{G2K}$ 特性曲线如下：

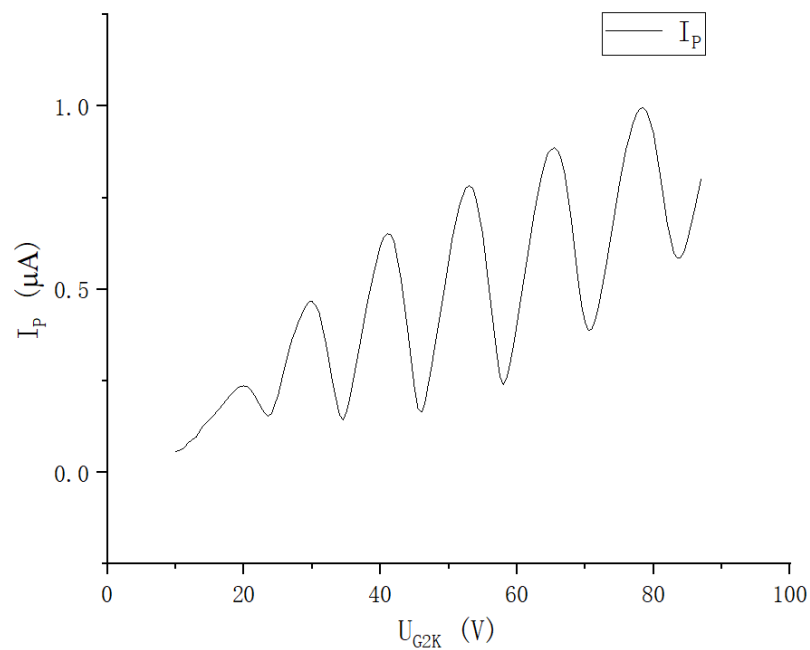


图 2:  $I_P \sim U_{G2K}$  特性曲线

利用 origin 中的拉格朗日插值法得到  $I_P \sim U_{G2K}$  特性曲线的下包络线，即为拟合的本底电流曲线（图 3）。

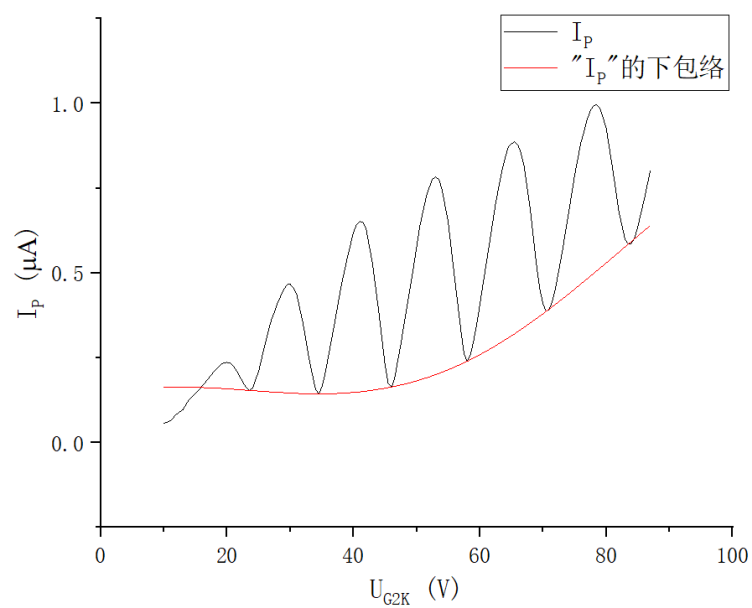


图 3:  $I_P \sim U_{G2K}$  特性曲线及本底电流曲线

用  $I_P \sim U_{G2K}$  特性曲线的数据减去拟合本底电流曲线的数据得到消除本底电流后的  $I_P \sim U_{G2K}$  特性曲线（图 4）。

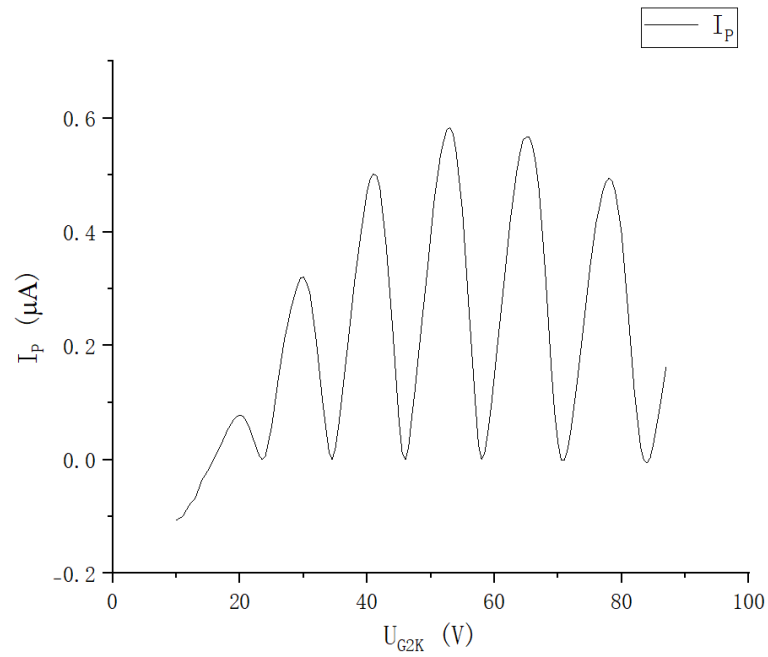


图 4：消除本底电流后的 $I_P \sim U_{G2K}$ 特性曲线

利用 origin 对消除本底电流后的 $I_P \sim U_{G2K}$ 特性曲线进行多峰拟合得到峰值电压如下：

表 3：多峰拟合得到的峰值电压

峰值电压 (V)	19.596	29.418	40.638	52.477	64.814	77.764
----------	--------	--------	--------	--------	--------	--------

利用 origin 通过最小二乘法对这六个峰值点进行线性拟合

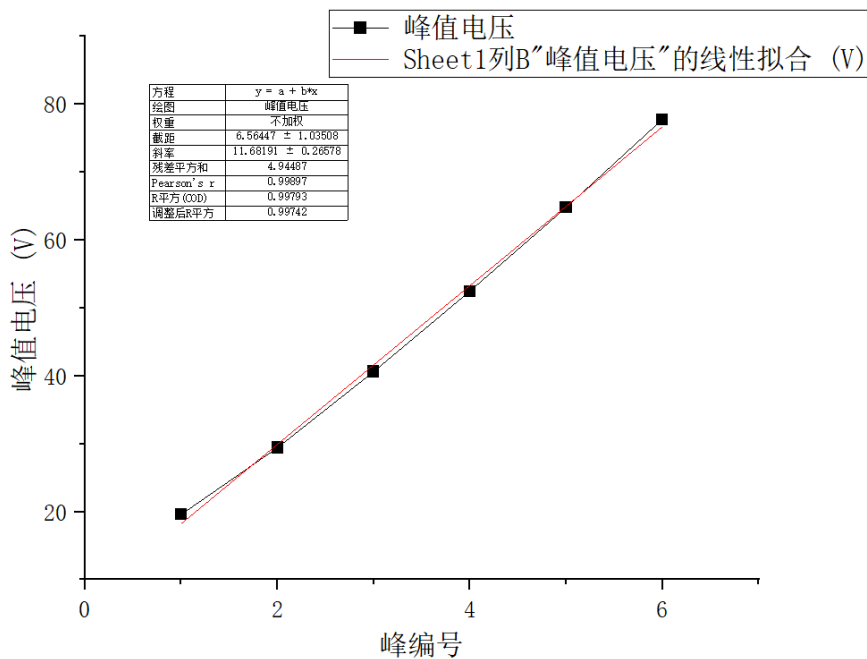


图 5：最小二乘法对峰值电压线性拟合

最小二乘法的拟合直线斜率为：

$$k = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - n \bar{x} \bar{y}}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - n \bar{x}^2} = 11.682V$$

拟合直线截距为:

$$b = \bar{y} - k \bar{x} = 6.564V$$

即得到的拟合直线方程为:

$$U = 11.682 \times n + 6.564$$

最小二乘法的相关系数 R 平方为:

$$R^2 = \frac{(\sum_{i=1}^n x_i y_i - n \bar{x} \bar{y})^2}{(\sum_{i=1}^n x_i^2 - n \bar{x}^2)(\sum_{i=1}^n y_i^2 - n \bar{y}^2)} = 0.99793$$

因此实验测得的氙原子第一激发电位为 11.682V。

### 3.3 不确定度分析

因为实验仪器自身误差所导致的不确定度难以考证, 故在此仅计算统计不确定度, 即将 A 类不确定度作为结果的不确定度。

最小二乘法不确定度为:

$$S_k = k \sqrt{\frac{1}{n-2} \left( \frac{1}{R^2} - 1 \right)} = 11.682 \times \sqrt{\frac{1}{6-2} \left( \frac{1}{0.99793} - 1 \right)} = 0.266V$$

因此实验测得的氙原子第一激发电位为  $11.682 \pm 0.266V$ 。<sup>[4]</sup>

查阅资料知, 氙原子第一激发电位理论值为 13.08V, 之所以实验值与理论值差距较大, 是因为在氙原子的基态和第一激发态之间还存在两个亚稳态, 电势分别为 11.55V 和 11.72V, 实验过程中, 氙原子的电子吸收能量从基态激发到第一激发态, 由于第一激发态寿命很短, 氙原子迅速释放能量从第一激发态跃迁至亚稳态。因此, 实验测得的氙原子第一激发电位应在基态与两个亚稳态的电势差之间, 即 11.55V 和 11.72V 之间。<sup>[3]</sup>

实验结果  $11.682 \pm 0.266V$  完全处于区间 11.55V 至 11.72V 之间, 测量值与两个亚稳态电势的相对误差分别为  $\frac{11.682-11.55}{11.55} \times 100\% = 1.14\%$  和  $\frac{11.72-11.682}{11.72} \times 100\% = 0.32\%$ 。因此认为测量值与理论值较为吻合。

## 4. 计算电子平均自由程

汞蒸气中电子平均自由程  $\lambda$  与温度 T、蒸汽压 P 的关系为:

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

其中  $k = 1.38 \times 10^{-23} J/K$ , 汞原子半径  $r=0.176nm$ 。

计算 80、90、100、160、170、180℃时电子在汞蒸气中的平均自由程 $\lambda$ 如下：

表 4：不同温度下汞蒸气电子平均自由程

温度 T (K)	蒸汽压 P (Pa)	平均自由程 $\lambda$ (mm)
353.15	11.8	4.24
363.15	21.1	2.44
373.15	36.4	1.45
433.15	558.5	0.110
443.15	817.0	0.0769
453.15	1172.7	0.0548

## 5. 思考题

5.1  $I_P \sim U_{G2K}$  曲线电流下降并不十分陡峭，主要原因是什么？

理论上，当电子能量大于氙原子第一激发能时，电子与氙原子发生非弹性碰撞使电子进入氙原子轨道而无法到达阳极，因此当  $U_{G2K}$  达到峰值后，到达阳极的电子应迅速减少，即曲线下降陡峭。但是由于部分电子与氙原子仅发生了非正碰导致其能量无法使氙原子达到第一激发态而到达阳极，另一部分电子未与氙原子发生碰撞而到达阳极。这两部分电流使得  $I_P \sim U_{G2K}$  曲线电流下降并不陡峭。

5.2 I 的谷值并不为零，而且谷值依次沿  $U_{G2K}$  轴升高，如何解释？

与第一题原因类似，因为存在与氙原子发生非正碰而未进入氙原子轨道的电子和未发生碰撞的电子，因此 I 的谷值并不为零。随着  $U_{G2K}$  增大，从阴极射出的能到达阳极的电子数目增多；另一方面，电子需要与氙原子碰撞次数增多，因而与氙原子发生多次碰撞进入氙原子轨道的概率略有减小，到达阳极概率增大。因此，I 的谷值沿  $U_{G2K}$  轴升高。

5.3 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？

不等于。因为有本底电流的存在，而减去本底电流前后第一峰值有所偏移，对应电压不同，因此不等于第一激发电位；又因为实验装置在阳极前有一段遏止电压，电子需克服遏止电压才能到达阳极，因此第一峰值对应的电压还需减去遏止电压。

5.4 写出氙原子第一激发态与基态能级差。

氙原子第一激发态与基态能级差为  $11.682 \pm 0.266V$ 。



## 6. 结论

本实验利用弗兰克-赫兹实验仪 (FD-FH-C)，通过插值拟合及最小二乘法拟合，测得氩原子基态与第一激发态之间的能级差为 $11.682 \pm 0.266V$ 。

## 7. 参考文献

- [1]. 弗兰克-赫兹实验. 实验讲义. 2024
- [2]. 刘芬芬. 弗兰克赫兹实验最佳参数的探究[J]. 内江科技, 2015, 36(04):85-86.
- [3]. 朱筱纬. 氩原子的第一激发电位[J]. 西北大学学报, 2006, 11(4)
- [4]. 测量的不确定度与数据处理方法. 实验讲义. 2024

附录：老师签字的原始数据



张积翔 PB23020595  
中国科学技术大学

UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY OF CHINA  
Hefei, Anhui. 230026 The People's Republic of China

粗测:

峰:	$U_{G2K}$	19.1V	29.8V	41.4V	53.3V	65.8V	78.3V
	$I_P$	0.260 $\mu$ A	0.468 $\mu$ A	0.627 $\mu$ A	0.754 $\mu$ A	0.852 $\mu$ A	0.954 $\mu$ A
谷:	$U_{G2K}$	24.5V	35.2V	46.5V	58.7V	71.1V	84.5V
	$I_P$	0.161 $\mu$ A	0.131 $\mu$ A	0.141 $\mu$ A	0.216 $\mu$ A	0.348 $\mu$ A	0.560 $\mu$ A

细测:

$U_{G2K}(V)$	10.0	11.0	12.0	13.0	14.0	15.0	16.0	17.0
$I_P(\mu A)$	0.057	0.064	0.084	0.097	0.128	0.145	0.166	0.188
	18.0	18.5	19.0	19.5	20.0	20.5	21.0	21.5
	0.212	0.221	0.230	0.235	0.237	0.234	0.225	0.212
	22.0	23.0	23.5	24.0	24.5	25.0	26.0	27.0
	0.195	0.162	0.154	0.160	0.186	0.218	0.290	0.362
	27.5	28.0	28.5	29.0	29.5	30.0	30.5	31.0
	0.386	0.413	0.433	0.452	0.466	0.467	0.455	0.437
	32.0	33.0	34.0	34.5	35.0	35.5	36.0	37.0
	0.352	0.245	0.157	0.144	0.164	0.203	0.252	0.352
	38.0	39.0	40.0	40.5	41.0	41.5	42.0	43.0
	0.458	0.544	0.620	0.643	0.652	0.649	0.630	0.529

11.11 金秋实

张积翔 PB23020595



中国科学技术大学

UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY OF CHINA  
Hefei, Anhui. 230026 The People's Republic of China

$U_{G2K}(V)$	44.0	45.0	45.5	46.0	46.5	47.0	47.5	48.5
$I_P(\mu A)$	0.386	0.227	0.173	0.164	0.187	0.240	0.290	0.405
	49.5	50.5	51.5	52.0	52.5	53.0	53.5	54.0
	0.516	0.638	0.724	0.753	0.777	0.783	0.776	0.748
	55.0	56.0	57.0	57.5	58.0	58.5	59.0	59.5
	0.650	0.487	0.331	0.261	0.240	0.258	0.300	0.348
	60.5	61.5	62.5	63.5	64.0	64.5	65.0	65.5
	0.468	0.583	0.705	0.802	0.840	0.871	0.881	0.887
	66.0	66.5	67.0	68.0	69.0	69.5	70.0	70.5
	0.878	0.854	0.816	0.685	0.519	0.453	0.409	0.387
	71.0	71.5	72.0	73.0	74.0	75.0	76.0	76.5
	0.393	0.418	0.457	0.558	0.671	0.788	0.884	0.917
	77.0	77.5	78.0	78.5	79.0	79.5	80.0	81.0
	0.953	0.978	0.993	0.996	0.985	0.958	0.927	0.809
	82.0	83.0	83.5	84.0	84.5	85.0	86.0	87.0
	0.681	0.599	0.585	0.587	0.604	0.636	0.715	0.803