

# 杨氏模量数据处理

数据处理:

1. 金属丝原长  $L$ , 1次,  $u_L = \Delta L = \sqrt{\Delta a^2 + \Delta b^2} = \sqrt{0.5^2 + 0.5^2} = 0.71 \text{ (mm)}$ ,  $L = 1505.00 \pm 0.71 \text{ mm}$

2. 光杠杆常数  $b$ , 1次,  $u_b = \sqrt{\Delta a^2 + \Delta b^2} = \sqrt{0.02^2 + 0.02^2} = 0.03 \text{ (mm)}$

3. 平面镜到标尺的距离  $s = \frac{|x_{\text{上}} - x_{\text{下}}|}{2} \times 100 = \frac{|273 - 603|}{2} \times 100 = 1550 \text{ (mm)}$

$u_s = u_{\text{上}} = u_{\text{下}} = \Delta b = \sqrt{\Delta a^2 + \Delta b^2} = \sqrt{0.5^2 + 0.5^2} = 0.71 \text{ (mm)}$

$u_s = 50 \sqrt{u_{\text{上}}^2 + u_{\text{下}}^2} = 50 \sqrt{2} \Delta b = 100 \Delta b = 0.71 \text{ (mm)}$ , 则  $s \pm u_s = (1550 \pm 0.71) \text{ (mm)}$  ( $P=95\%$ )

4. 金属丝直径  $d$ , 6次

$\bar{d} = \frac{1}{6} \sum d_i = \frac{1}{6} (0.611 + 0.611 + 0.612 + 0.613 + 0.612 + 0.612) = 0.612 \text{ (mm)}$

$u_{dA} = \frac{1}{\sqrt{6}} \sqrt{\sum (d_i - \bar{d})^2}$ ,  $k=6$ ,  $P=0.15$ ,  $t_{P,k}=2.57$

此时  $u_{dA} = 2.57 \sqrt{\frac{1}{6} (0.001^2 + 0.001^2 + 0.001^2 + 0.001^2 + 0.001^2 + 0.001^2)} = 0.001 \text{ (mm)}$

$u_{dB} = \sqrt{\Delta a^2 + \Delta b^2} = \sqrt{0.001^2 + 0.004^2} = 0.0041 \text{ (mm)}$

则  $u_d = \sqrt{u_{dA}^2 + u_{dB}^2} = \sqrt{0.001^2 + 0.0041^2} = 0.0042 \text{ (mm)}$

# 杨氏模量数据处理

数据处理:

5. 中国叉丝的变长  $\Delta x$  (逐差法)

$$\Delta \bar{x} = \frac{1}{4} [(x_5 - x_1) + (x_6 - x_2) + (x_7 - x_3) + (x_8 - x_4)] = \frac{1}{4} (65.25 + 70.6 + 76.25 + 80.5 + 44.5 - 49.1 - 54.55 - 59.8)$$

$$= 21.2 \text{ (mm)}$$

$$u_x = u_{\Delta x} = \sqrt{\Delta x^2 \cdot P} = \sqrt{0.51^2} = 0.51 \text{ (mm)}$$

$$u_{\Delta \bar{x}} = \frac{1}{4} \sqrt{8 u_x^2} = \frac{\sqrt{2}}{2} u_x = \frac{1}{2} \sqrt{8} u_x = \frac{\sqrt{2}}{2} u_x = 0.09 \text{ mm}$$

$$u_A = t_P \sqrt{\frac{1}{n} \sum (\Delta x_i - \Delta \bar{x})^2}, \text{ 令 } k=4, P=0.95, t_P=3.18.$$

$$\text{则 } u_A = 3.18 \sqrt{\frac{1}{4} \sum (\Delta x_i - \Delta \bar{x})^2} = 3.18 \sqrt{\frac{1}{4} [(65.25 - 54.5)^2 + (70.6 - 54.5)^2 + (76.25 - 54.5)^2 + (80.5 - 54.5)^2]} \\ = 0.22 \text{ (mm)}$$

$$\text{则 } u_{\Delta \bar{x}} = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} = 0.56 \text{ (mm)}$$

$$\text{则 } \Delta \bar{x} \pm u_{\Delta \bar{x}} = (21.20 \pm 0.56) \text{ mm } (P=95\%)$$

$$\text{计算 } \bar{E} = \frac{8mg\Delta L}{\pi b \Delta x d^2} = 1.95 \times 10^{11} \text{ (N/m}^2\text{)}$$

$$E_r = \frac{u_E}{\bar{E}} = \sqrt{\left(\frac{u_g}{\bar{g}}\right)^2 + \left(\frac{u_L}{\bar{L}}\right)^2 + \left(\frac{u_d}{\bar{d}}\right)^2 + \left(\frac{u_b}{\bar{b}}\right)^2 + \left(\frac{u_{\Delta x}}{\bar{\Delta x}}\right)^2} = \sqrt{0.00051^2 + \dots} = 0.023$$

$$u_E = E_r \bar{E} = 1.95 \times 10^{11} \times 0.023 = 4.5 \times 10^9 \text{ (N/m}^2\text{)}$$

$$\text{则 } E = \bar{E} \pm u_E = (1.95 \times 10^{11} \pm 4.5 \times 10^9) \text{ (N/m}^2\text{)} (P=0.95)$$

$$\text{则 } \eta = \frac{|\bar{E} - E_{\text{标}}|}{E_{\text{标}}} \times 100\% = \frac{|2.01 \times 10^{11} - 1.95 \times 10^{11}|}{2.01 \times 10^{11}} \times 100\% = 3.0\%$$

# 今日实验

## 密立根油滴法测定基本电荷

下次实验：光电效应

地点：DS1317

# 实验目的

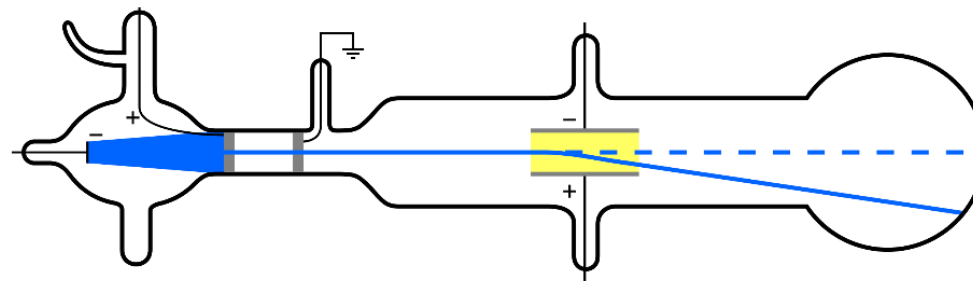
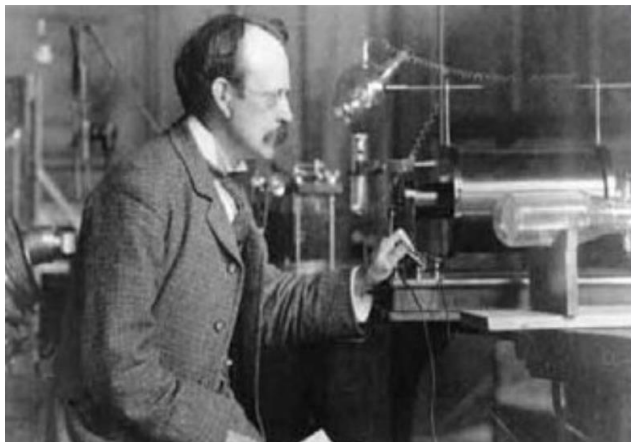
- (1) 通过密立根油滴实验验证电荷的不连续性;**
- (2) 测定基本电荷;**
- (3) 了解油滴实验的方法与特点;**
- (4) 了解CCD图像传感器的原理与应用, 学习电视显微的测量方法。**

# 什么是电子?

- 发现: J. J. Thomson
- 组成: 基本粒子
- 电荷:  $-1.602176634 \times 10^{-19} \text{ C}$
- 质量:  $-9.1093837015(28) \times 10^{-31} \text{ kg}$
- 自旋:  $\frac{1}{2}$
- 磁矩:  $-1.00115965218091(26) \times 10^{-31} \mu_B$

# 汤姆逊发现电子

汤姆逊 1856~1940



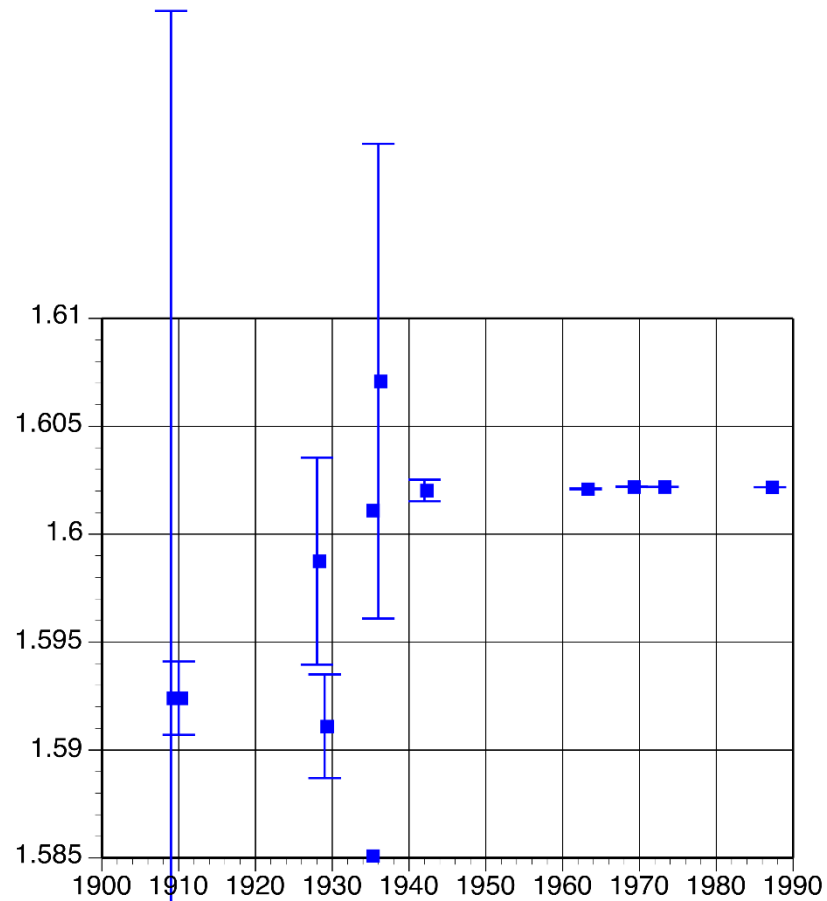
约瑟夫·约翰·汤姆逊在1897年发现电子，测定了电子的荷质比 $\frac{e}{m}$

# 基本电荷量测量主要方法

- 阿伏伽德罗常数与法拉第常数推算,  $e = \frac{F}{N_A}$
- 密立根油滴实验
- 约瑟夫森效应和量子霍尔效应
- 作为导出单位,  $e^2 = \frac{2h\alpha}{\mu_0 c} = 2h\alpha\epsilon_0 c$

● From the 2019 redefinition of SI base units, which took effect on 20 May 2019, its value is exactly  $1.602176634 \times 10^{-19} \text{ C}$

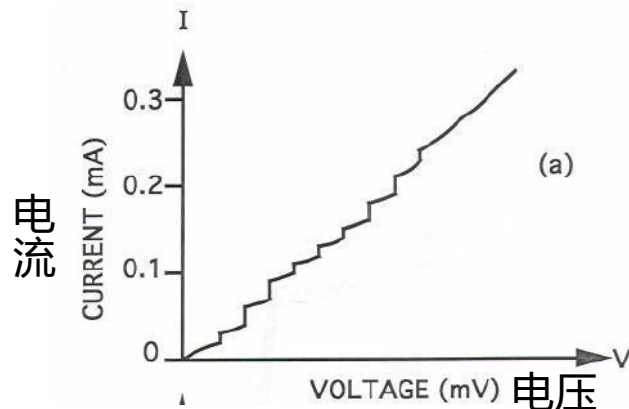
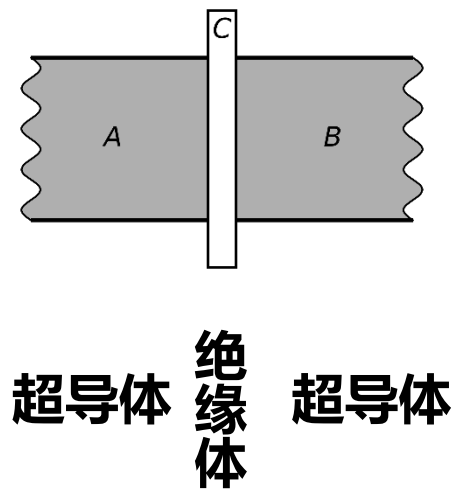




Millikan (notebooks)  
Millikan (published)  
Erik Backlin, Nature 1929  
[Birge, 1929]  
Backlin and Flemberg, Nature 1936  
Backlin and Flemberg, cited in HR Robinson RPP 1937  
Gunnar Kellström PR 1936  
[Birge, 1942]  
[Dummond and Cohen, 1963]  
[Taylor et al, 1969]  
[Cohen and Taylor, 1973]  
[Cohen and Taylor, 1987]



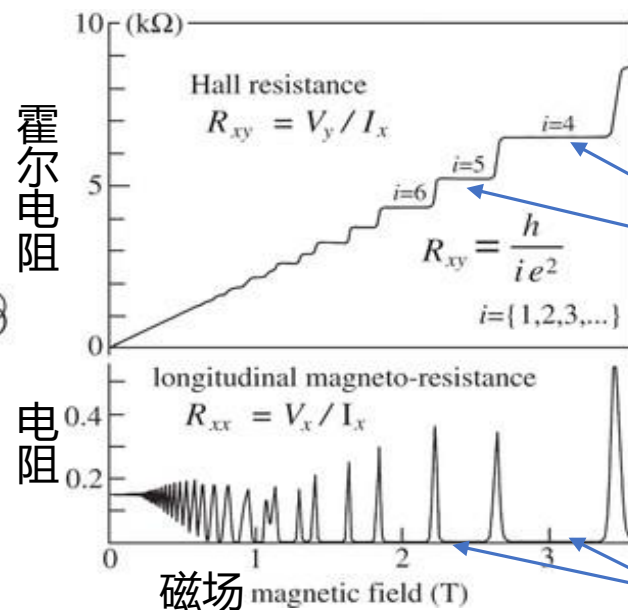
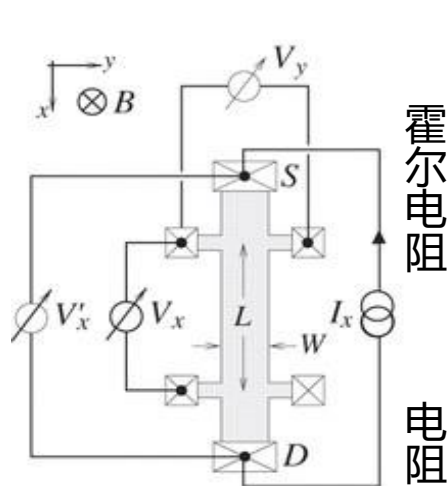
# 约瑟夫森效应和量子霍尔效应



约瑟夫森效应

$$K_J = \frac{2e}{h}$$

量子霍尔效应



$$R_k = \frac{h}{e^2}$$

平台

$$e = \frac{2}{R_k K_J}$$

电阻为零

**密立根油滴实验的核心思想**

**微观粒子宏观化**

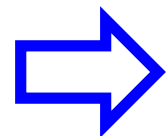
**给微观粒子穿上马甲**

# 密立根

1868-1953

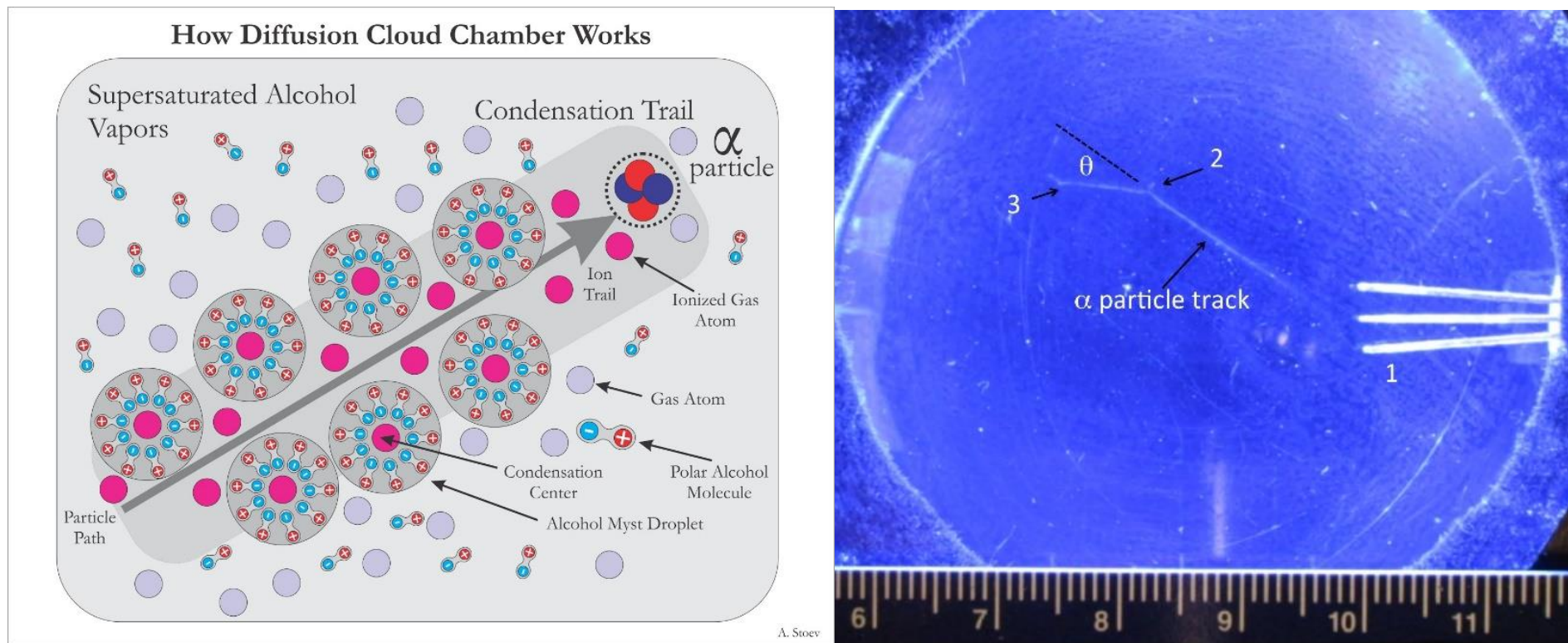


- 密立根油滴实验
- 光电效应实验



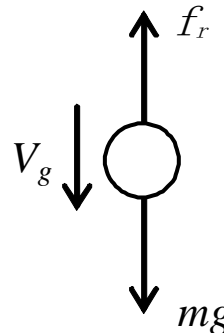
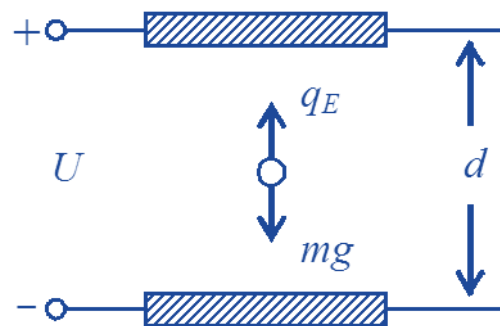
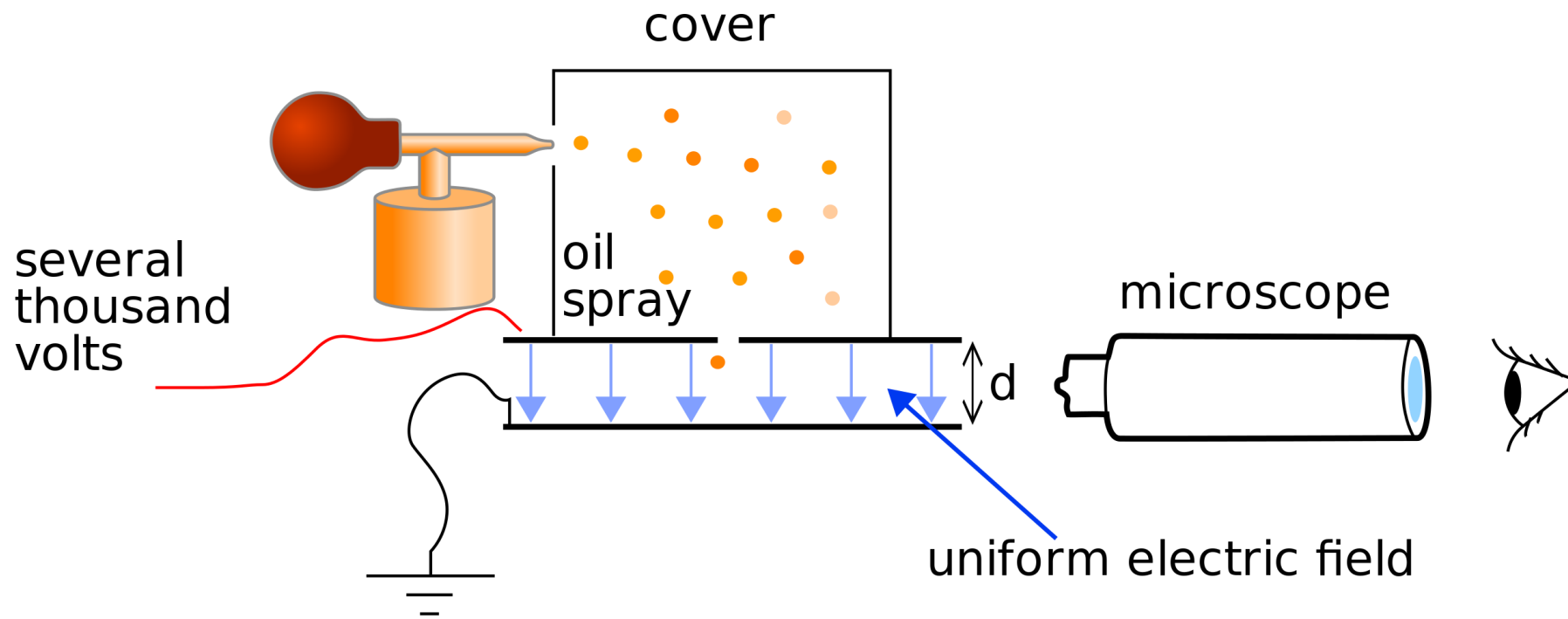
1923年诺贝尔奖

# 威尔逊云室



带电粒子会使过饱和水蒸气在其路径上凝结  
从而可以直接显示带电粒子路径

# 油滴实验的实验装置



**电场力  $\gg$  重力**

在不改变电荷大小的情况下增大电子重量

# 测量原理

极板间的电场强度

$$E = U/d$$

油滴在极板中受到的电场力

$$qE = qU/d$$

当油滴在空中静止时，电场力与重力平衡

$$mg = qE = qU/d \Rightarrow q = mg \frac{d}{U}$$

U=0 时

$$f_r = mg$$

斯托克斯定律

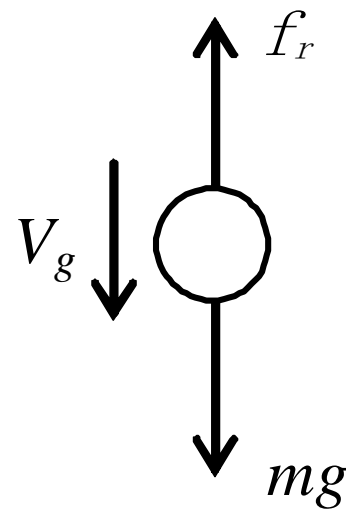
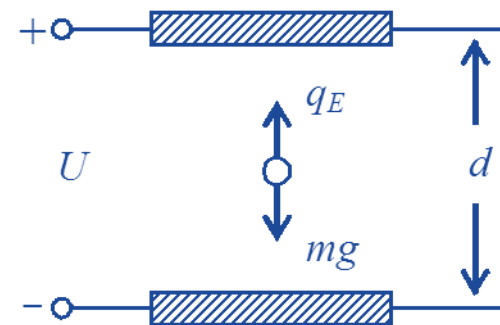
$$f_r = 6\pi a\eta V_g \Rightarrow 6\pi a\eta V_g = mg$$

微小的油滴呈小球状，其质量为

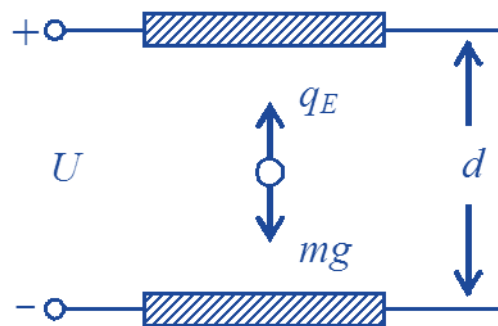
$$m = 4\pi a^3 \rho / 3$$

$$a = \sqrt{\frac{9\eta V_g}{2\rho g}}$$

$$m = 6\pi \sqrt{\frac{9\eta^3 V_g^3}{2\rho g^3}}$$



# 测量原理



$$q = mg \frac{d}{U} \quad m = 6\pi \sqrt{\frac{9\eta^3 V_g^3}{2\rho g^3}}$$

由于油滴非常小，空气已不能看成连续的介质，而斯托克斯定律只适用于连续的介质，所以空气的粘滞系数 $\eta$ 应修正为：

$$\eta' = \frac{\eta}{1 + \frac{b}{pa}}$$

设油滴匀速下落的距离为 $l$   $V_g = l/t_g$

$$q = \frac{18\pi}{\sqrt{2\rho g}} \left[ \frac{\eta l}{t_g \left(1 + \frac{b}{pa}\right)} \right]^{3/2} \cdot \frac{d}{U}$$

空气粘滞系数  $\eta$     下落距离  $l$     平行极板间距离  $d$

钟油的密度  $\rho$     重力加速度  $g$     下落时间  $t_g$     大气压强  $p$     修正常数  $b$     平衡电压  $U$



# 实验仪器

CCD调焦手轮

油雾室

电压调节

测量确认按钮

平衡法

计时器计时按钮

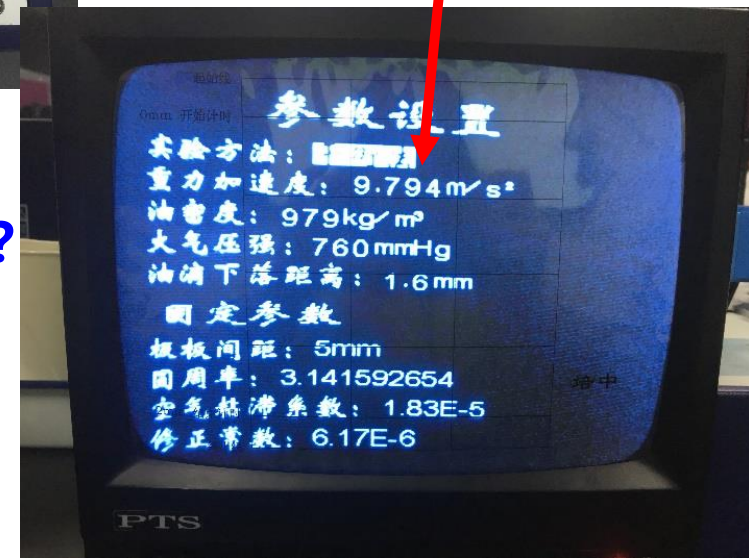
电压控制:

工作: 预设电压 400-450V?

U=0: 油滴下降

平衡: 油滴平衡

提升: 油滴提升



参数设置

实验方法: 平衡法

重力加速度:  $9.794 \text{ m/s}^2$

油密度:  $979 \text{ kg/m}^3$

大气压强:  $760 \text{ mmHg}$

油滴下落距离:  $1.6 \text{ mm}$

固定参数

极板间距:  $5 \text{ mm}$

圆周率:  $3.141592654$

空气粘滞系数:  $1.83 \text{ E-}5$

修正常数:  $6.17 \text{ E-}6$

# 实验操作与要求

1. 调节仪器水平，打开实验仪和显示器开关调节监视器（亮度、对比度）。
2. 按“确认”，屏幕显示“平衡法”，再点一次“确认”，进入测量界面。
3. 右起第二个按钮打到“工作”状态，预设平衡电压400-450V左右。
4. 喷油，显微镜调焦
5. 降低平衡电压值，选择油滴。要求：
  - ① 平衡电压在100V-350V左右
  - ② 匀速下落1.6mm(注意：是看屏幕左边的标识)的时间在8-30s左右
  - ③ 油滴的直径(屏幕上尺寸)不要太大，也不要太小。
6. 按“提升”使油滴到“起始线”之上，并再度微调平衡电压，使油滴完全静止。
7. 按“0V”，当油滴运动到“起始线”时，按下“计时开始”按钮，开始计时，运动到1.6mm“结束线”按下“计时结束”按钮，停止计时，测下落时间。并将电压按钮恢复到“平衡”状态（双手联动，注意别丢失油滴！）
8. 确认测量无误后，点“确认”按钮，完成选中油滴的一次测量。
9. 按“提升”，把油滴提升到起始线以上，重复刚才的测量，每颗油滴**测量5次**。仪器自动计算平均的平衡电压，下落时间以及带电量，把数据记录到表格中。
10. 至少选择5颗油滴进行测量（不能选择平衡电压和下降时间都相近的油滴）。

# 实验操作要点

## 选择合适油滴：

- 平衡电压在100V-350V左右
- 带电多的油滴迅速上升出视场，不带电的油滴下落出视场
- 选择上升缓慢的油滴作为暂时的目标油滴

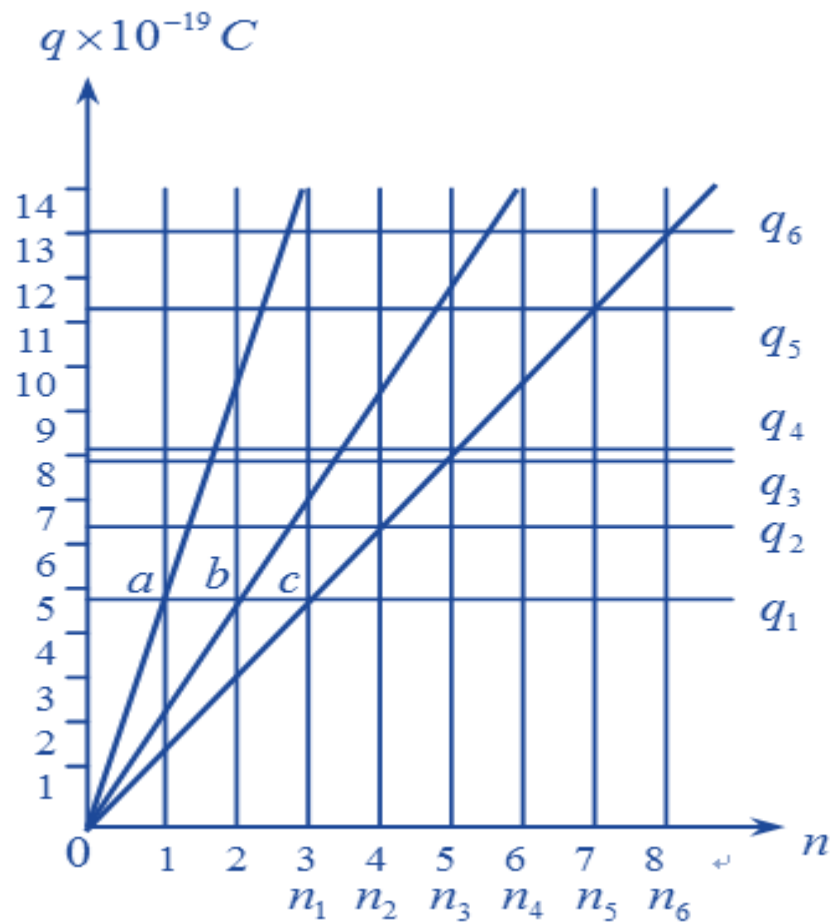
# 数据记录和处理要求

利用作图法，找出最佳的连线；再利用斜率求出基本电荷。

	第一颗油滴		第二颗油滴		第三颗油滴		第四颗油滴		第五颗油滴	
	平衡 电压 $U/V$	下落时 间 $t/S$	平衡 电压 $U/V$	下落时 间 $t/S$	平衡 电压 $U/V$	下落时 间 $t/S$	平衡 电压 $U/V$	下落时 间 $t/S$	平衡 电压 $U/V$	下落时 间 $t/S$
平均										
$q/C$										
$n$										

# 数据处理

1. 分别计算每颗油滴所带的电荷 $q_i$ ;
2. 画坐标轴, 横轴代表整数 $n$ , 纵轴代表油滴电荷量 $q$ ;
3. 在横轴上等间距的标出各坐标点 (1, 2, 3, ... 整数);
4. 在纵轴上标出各测得电荷量 ( $q_1, q_2, q_3, \dots$ ) 的坐标位置, 在 $n - q$  坐标系中形成一个网状的图;
5. 现在假设电荷量最少的油滴中的电荷量子数 $n = 1$ , 那么按照 $q = ne$  的假设, 连接 $oa$  两点画出一条直线(  $o$  为坐标原点,  $a$  为测得最小电荷值), 检查与其余几条水平线各相交点, 它们应该分别落在 (或非常逼近) 其中任意一条垂直线上, 如果不满足, 说明电荷量子数不为1, 图中 $oa$  连接的直线就不满足;
6. 接着就再假设 $n = 2, 3, \dots$ , 然后依次连接 $ob, oc, \dots$ , 再检查各个相交点分别与垂直线重合的情况。由实验表明, 总会画出这样一条直线, 它与各条水平线都有一个交点, 这些交点与各水平线和垂直线的交点非常逼近或重合。从该线上可直接读出各电荷值所对应的电荷的量子数。
7. 求 $e_{\text{测}}$ , 并求相对误差 $E_r$ 。



# “挑战式”研究性实验方案



# 实施过程

(类似于科研项目流程：立项选题-调研-确定方案项目实施-结果讨论评价-完成项目报告)

## (1) 分组

- ① 全班分为6组
- ② 每组组长1名（负责协调、沟通和组织组内评分）



# 日程安排

- **第13周**

布置任务、分组

- **第14周**

查阅资料、设计方案，完成基础实验。

- **第15-16周**

(第15周课堂汇报——5分钟每组)，开展实验研究。

- **第17周**课堂开展挑战式答辩;

- **第18周**星期一之前提交研究性实验报告。

# 密立根油滴实验高阶研究性实验

需增加的仪器与器材：

信号转换器（CVBS转VGA/HDMI）、视频采集卡（dhmi、USB信号）

视频处理软件：obs，potplyser，handbrake，tracker，matlab、Python、origin等

## 研究内容：

1. 实验方法：平衡法，动态法测量，比较测量的结果；
2. 测基本电荷：作图法、分组法、最小二乘法、平均值最小整数法等处理数据（至少2种方法），比较实验结果并分析；
3. 视频处理法测电荷
  - （1）设计方案，采用采集卡导出油滴运动视频，利用软件录制；
  - （2）利用钢尺（0.5mm）拍照，画图工具定标，或MATLAB、Python图像处理法定标；
  - （3）利用tracker软件分析油滴运动轨迹，或MATLAB、Python图像处理法，计算油滴下落速度和电荷Q；
  - （4）利用tracker视频分析或MATLAB、Python图像处理，分析水平方向的运动情况，研究电极板未调水平的误差影响；
4. 布朗运动，误差分析
  - （5）利用tracker视频分析或MATLAB、Python图像处理，分析油滴运动，研究布朗运动；
  - （6）分析不同方法测量油滴电荷量的误差。

## 研究内容：

### 4. 布朗运动，误差分析

- (5) 利用tracker视频分析或MATLAB、Python图像处理，分析油滴运动，研究布朗运动；
- (6) 分析不同方法测量油滴电荷量的误差。

### 5. 实验讲课/视频/动画/软件仿真（MATLAB、Python、unity等）

- (1) 实验仿真（最简单情况：可喷油滴，调节电压参数，调节显微镜焦距，得到显示器上油滴运动动画）；
- (2) 油滴实验过程演示动画
- (3) 拍摄实验操作视频
- (4) 讲课

### 6. 用落球法测液体粘滞系数

设计实验方案，结合CCD成像系统捕捉油滴状态和视频采集卡对油滴运动过程的视频拍摄，利用tracker软件对视频进行分析，测量油滴半径及油滴运动过程中相关物理量，将数据代入公式计算气体粘滞系数。

参考文献：杨厚发, 沈云才, 陈壮壮, 等. 利用密立根油滴实验仪测定空气粘滞系数[J]. 大学物理实验, 2023, 36(01):12-14.

## 任务要求：

研究内容中 1-3 必做；

研究内容中4-6 选做1个，尽量有深度和创新。

# 答辩方案

- 地点：DS1321
- 时间：第17周上课时间
- 答辩过程

- 正方陈述，6-8分钟
- 反方提问并答辩，6-8分钟。
- 成绩评价（2分钟）：

每位同学都要对正反双方(包括自评)的表现评定成绩。对正方主要综合实验完成质量、报告陈述水平、回答提问等方面。对反方主要综合所提问题质量（从相关度、深度、新意等方面）、答辩过程中反映出来的对正方实验的理解程度、答辩中的表现等方面。

评委对6个正方、6个反方评分，最后教师按名次统一赋分。

组长负责组织组内评分（给定组内系数），据此调整后可得每位同学的研究性实验最终成绩。

加油

