



# 焦耳定律

微观透视下的电热

吕粤蒙

2025-11-22

# 冲突

---

电流为什么会产生热量？

定量分析的公式？



在无外电场时，最外层的自由电子做无规则热运动，宏观上并不产生定向电流，而产生定向电流意味着：

$$J = nev, \quad I = JS$$

我们假设存在一外电场驱动金属，阳离子同自由电子间被各个方向的作用力**均匀**地吸引着，因而外电场几乎无法直接促使阳离子位移，这种现象是微观的电磁屏蔽。通过自由电子紧密结合的链接方式被称为**金属键**。

矛盾

---

假如电子在某一方向上做定向移动，我们可知：

$$F = Ee$$

假如电子在某一方向上做定向移动，我们可知：

$$F = Ee$$

$$v \propto \frac{F}{m}t \rightarrow \infty?$$

假如电子在某一方向上做定向移动，我们可知：

$$F = Ee$$

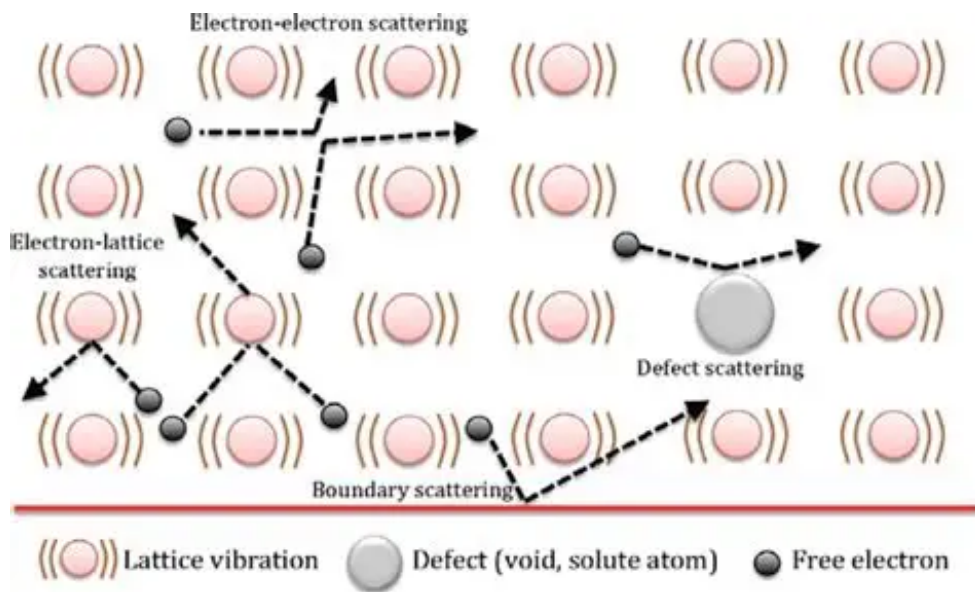
$$v \propto \frac{F}{m}t \rightarrow \infty?$$

我们发现电子的速率将会趋于无穷，那么电流不是**无穷大**吗？

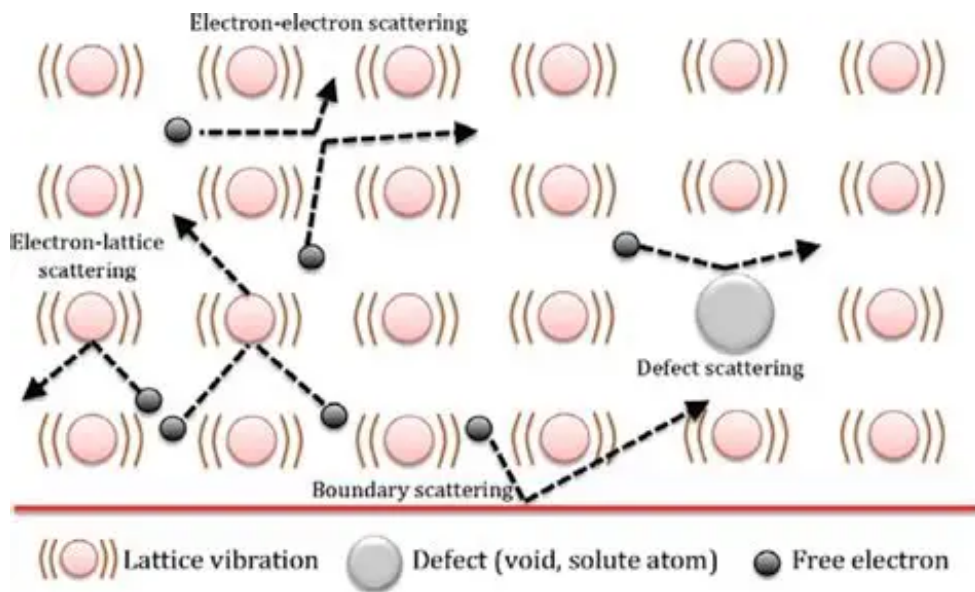
答案是**碰撞**(能量转移)！

自由电子在同金属阳离子所形成的势场间运动，但是金属阳离子并非真正牢固不动，而是发生振动，同电子间碰撞产生能量交换。

**电子加速 -> 撞上晶格 -> 速度归零 -> 再次加速...**



- 电子同阳离子发生碰撞;
- 电子同电子发生碰撞;
- 电子同杂质发生碰撞;



- 电子同阳离子发生碰撞;
- 电子同电子发生碰撞;
- 电子同杂质发生碰撞;

电子的运动受到阻碍！产生**电阻**！其中绝大部分热量贡献来自于阳离子振动的传递！

# 数学处理

---

我们设定 $\tau$ 为电子碰撞的**平均**时间间隔, 则碰撞下

$$m\Delta v_d = eE \cdot \tau$$

我们设定 $\tau$ 为电子碰撞的**平均**时间间隔, 则碰撞下

$$m\Delta v_d = eE \cdot \tau$$

由此电流和电阻为:

$$J = ne\bar{v}_d = \frac{ne^2\tau}{m}E = \sigma E$$

我们设定 $\tau$ 为电子碰撞的**平均**时间间隔, 则碰撞下

$$m\Delta v_d = eE \cdot \tau$$

由此电流和电阻为:

$$J = ne\bar{v}_d = \frac{ne^2\tau}{m}E = \sigma E$$

$$P_V = n(eEv_d) = JE$$

我们设定 $\tau$ 为电子碰撞的**平均**时间间隔, 则碰撞下

$$m\Delta v_d = eE \cdot \tau$$

由此电流和电阻为:

$$J = ne\bar{v}_d = \frac{ne^2\tau}{m}E = \sigma E$$

$$P_V = n(eEv_d) = JE$$

$$P_V = \frac{J^2}{\sigma} = J^2\rho$$

我们由此得到了**电阻**的表达式:

$$V = EL = \rho J L$$

$$I = JA$$

$$R = \frac{V}{I} = \rho \left( \frac{L}{A} \right)$$

我们由此得到了**电阻**的表达式:

$$V = EL = \rho J L$$

$$I = JA$$

$$R = \frac{V}{I} = \rho \left( \frac{L}{A} \right)$$

由此宏观的焦耳定律表达式为**单位体积的功率**乘以**体积**:

$$P = P_V \cdot V = \left( \left( \frac{I}{A} \right)^2 R \frac{A}{L} \right) \cdot AL = I^2 R$$

# 回顾

---

实际上对于相当多的电器，焦耳定律并不能用于计算总功率。焦耳定律仅仅处理了**热能**的来源。而许多电器将能量转化为了**其他形式**。

例如电灯中电子跃迁释放光子，这部分能量转移**并非**由焦耳定律决定！

**感谢！**

---