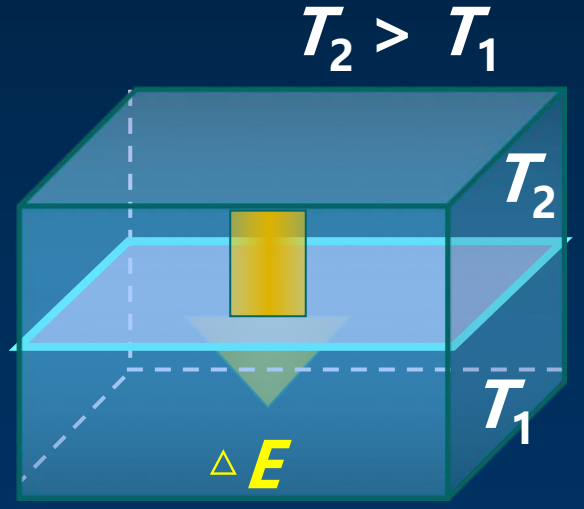
12-9 气体内的迁移现象

一、非平衡态下气体内的迁移现象（输运过程）

当系统各部分的宏观物理性质不均匀时，系统就处于**非平衡态**。不受外界干扰时，系统总要从非平衡态自发地向平衡态过渡。这种过渡过程 —— **输运过程**。



- **常见的三种气体内的迁移现象：**

1. 热传导

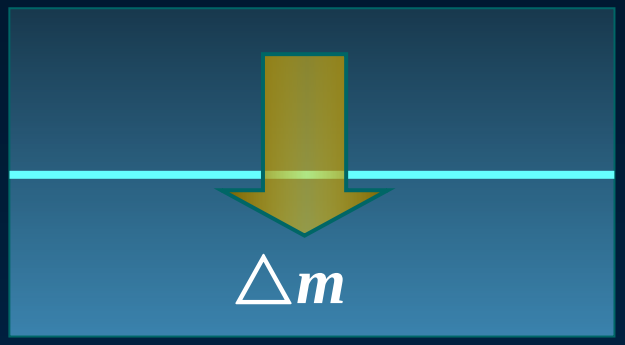
由于气体内**各处温度**不同，通过分子碰撞而产生的**能量**迁移现象。

2. 扩散

当气体内各处的**分子数密度**不同或各**部分气体的种类**不同时，分子由于热运动而相互掺合，产生的气体**质量**迁移现象。

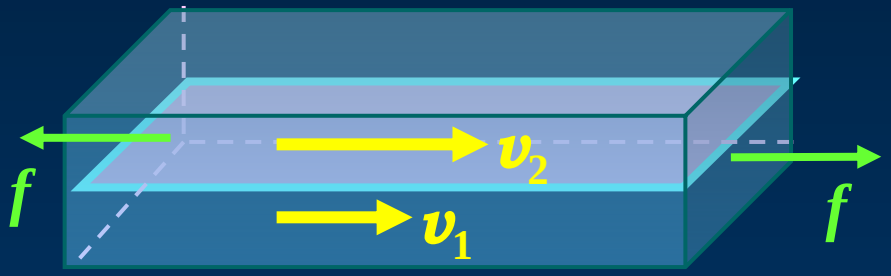
3、内摩擦或粘滞

由于气体内各层之间因流速不同而有宏观上的相对运动时，产生在气层之间的定向动量迁移现象。宏观上表现为相邻部分之间有摩擦作用。



说明

实际上，这三种迁移现象往往是同时存在的。

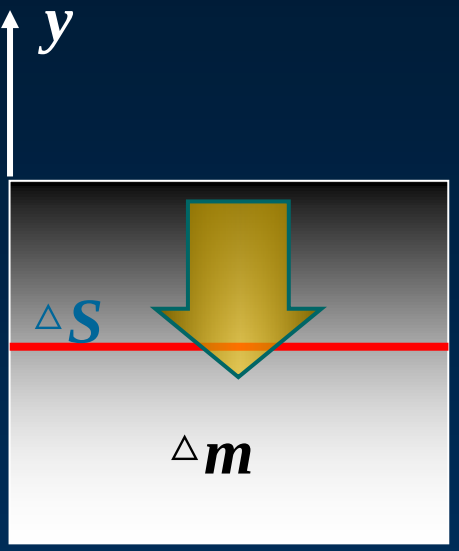


二. 扩散现象

在温度和压强均匀的情况下，仅由于气体中各处分子密度不同而引起的单纯扩散现象。

取两种**质量和大小都极为接近的分子**（如N_2与CO）组成的混合气体。假定两种气体的比例各处不同，但总的分子数密度处处相同。

只考虑混合气体中任一组分的质量迁移。其质量密度 $\rho(y)$ 沿 y 轴方向变化，



- **扩散现象的宏观规律**

实验表明，在$\triangle t$ 的时间内通过$\triangle S$ 面传递的这种组分的质量为

$$\frac{\Delta m}{\Delta t}=-D\frac{\mathrm{d}\rho}{\mathrm{d}y}\Delta S$$

D 为扩散系数，$\frac{\mathrm{d}\rho}{\mathrm{d}y}$为密度梯度，

“ - ” 表示质量的迁移方向与密度梯度方向相反。

扩散系数：$D=\frac{1}{3}\bar{v}\bar{\lambda}$

扩散现象的微观本质

由于热运动，上下两层气体不断交换分子，就混合气体的某一种组分来讲，由于密度不均匀，密度大的一方迁出的分子较迁入分子为多，因而，有净质量自上向下输运，形成气体质量的定向迁移。

说明

对于热传导现象和粘滞现象，可以依照研究扩散现象的方法进行类似讨论。

研究发现，三种迁移现象的宏观规律具有完全相似的形式，而在微观上，代替扩散现象中的质量迁移，则是热传导现象中的能量迁移和粘滞现象中的动量迁移。

气体动理论

(1) 统计方法以及对平衡态中理想气体的规律

$$\bar{v}_x = \bar{v}_y = \bar{v}_z = 0 \quad \bar{v^2}_x = \bar{v^2}_y = \bar{v^2}_z = \bar{v^2}/3$$

(a) 压强公式（会推导，统计解释）

(b) 温度公式（会推导，统计解释）

} 统计结果

(2) 麦氏速率分布律

$$f(v) = dN / N dv$$

其中包括：

① 物理意义：

$$f(v)dv,\ Nf(v)dv,\ \int_{v_1}^{v_2} f(v)dv,$$

$$\int_0^{\infty} vf(v)dv \cdots\cdots$$

② 分布曲线的意义和变化

③ 三种典型速率的数值与用途

注意：① 用归一化条件解题

$$\int_0^{\infty} f(v)dv = 1$$

② 由速率分布律求能量分布律 $\varepsilon_P = \frac{1}{2}kT$

(3) 能量均分原理

其核心：$\frac{1}{2}kT$ →平均平动动能，平均动能，内能

$3kT/2$　　$ikT/2$　　$\nu iRT/2$

注意：① 内能公式的应用　$\Delta E=\frac{i}{2}\nu RT$

② 内能不同于机械能

③ 应用能量均分原理的条件 —— 平衡态

(4) 玻氏能量分布律　$\Delta N \propto \exp(-\frac{E}{kT})=\exp(-\frac{E_k+E_P}{kT})$

★重力场中的规律：

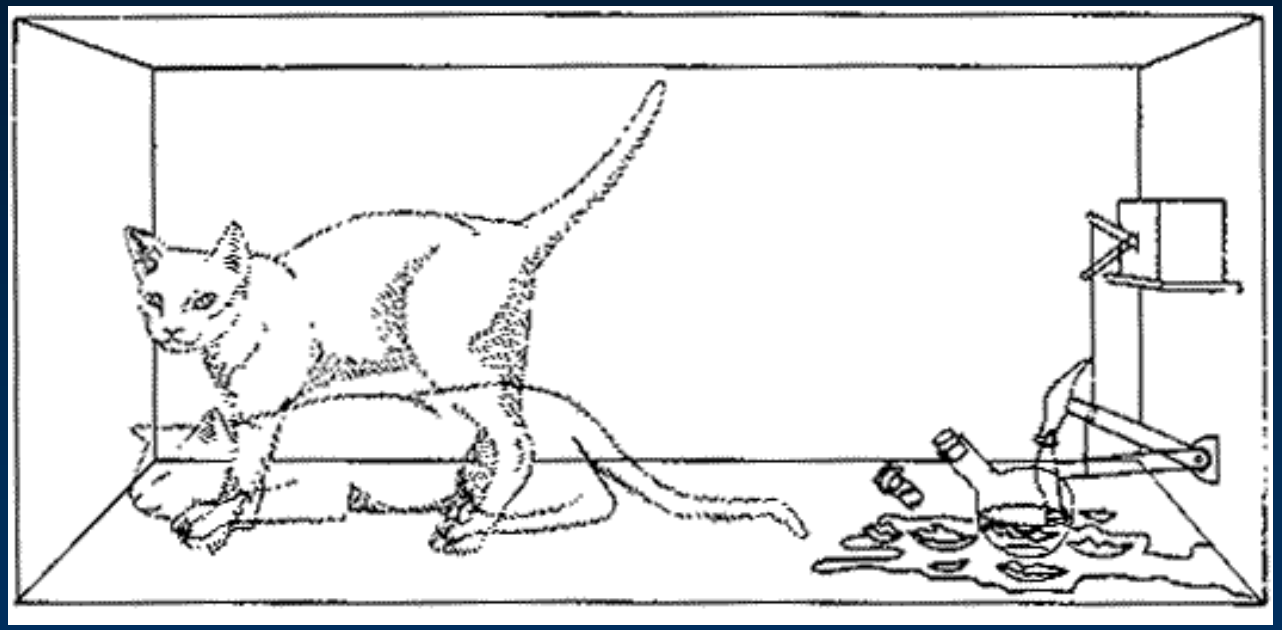
$$n=n_0\exp(-\frac{mgh}{kT}) \qquad P=P_0\exp(-\frac{mgh}{kT})$$

(5) 碰撞规律

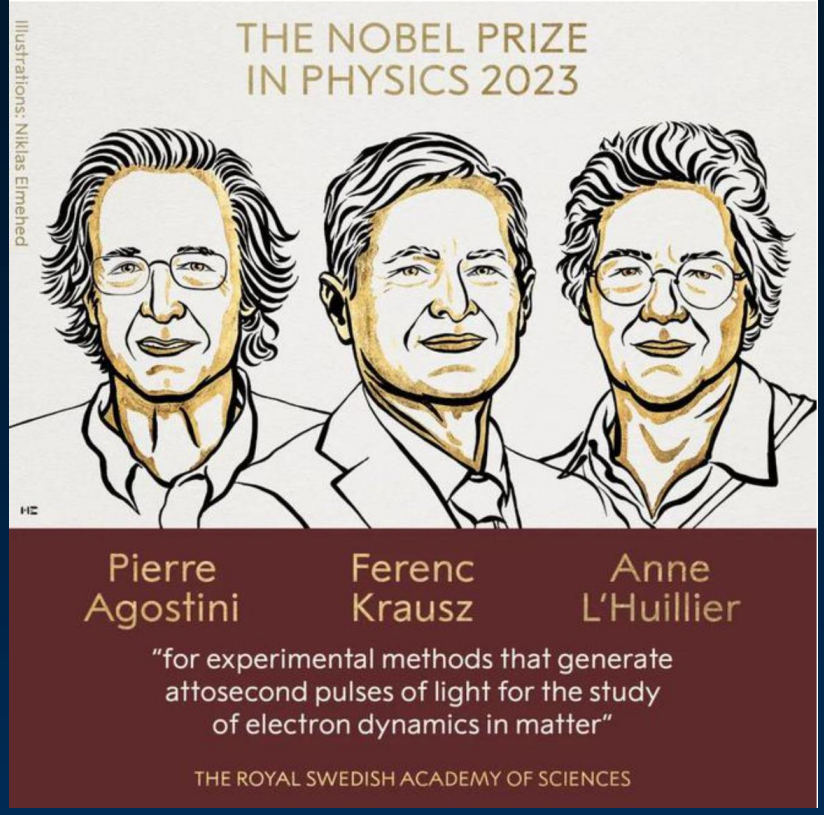
① 平均碰撞的规律

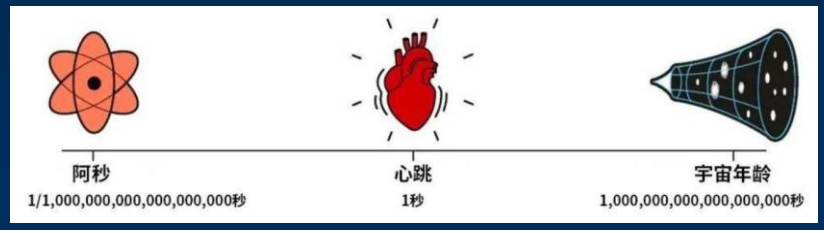
② 平均自由程　$\bar{\lambda}=\frac{1}{\sqrt{2}\pi d^2 n}=\frac{kT}{\sqrt{2}\pi d^2 P}$

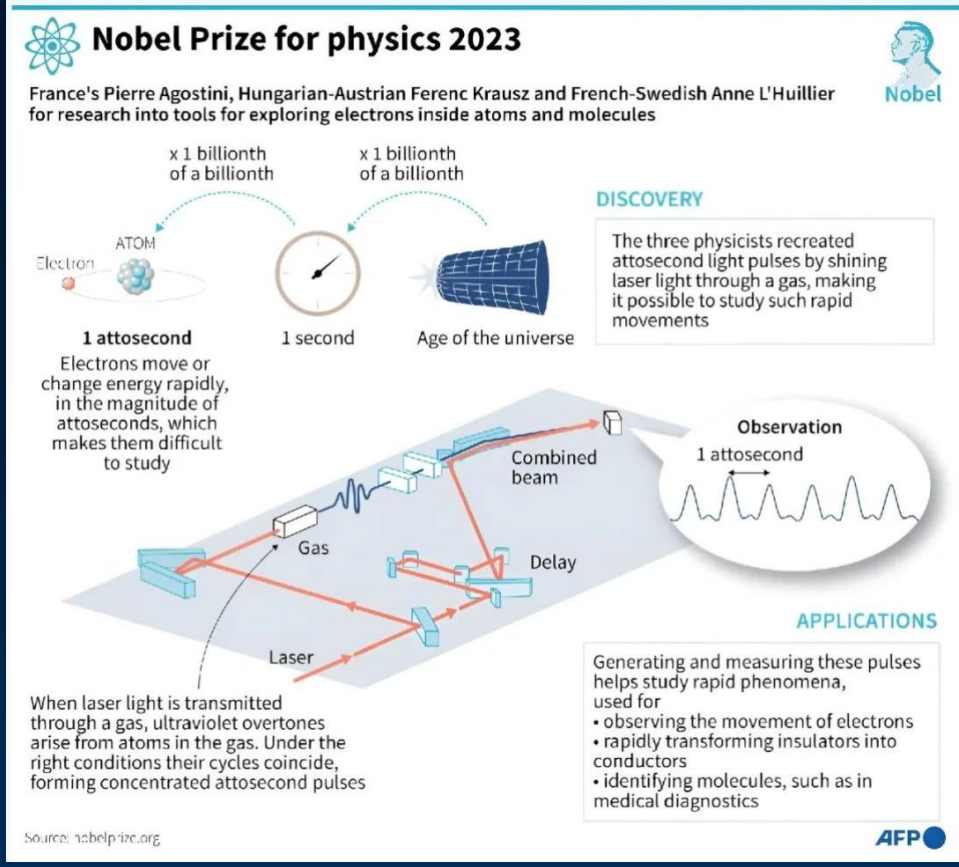
Schrodinger Cat [Naturwissenschaften **23**, 807(1935)]

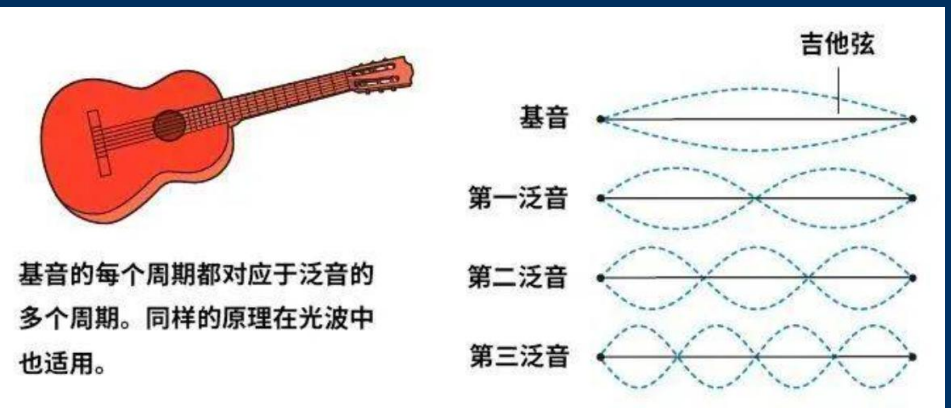


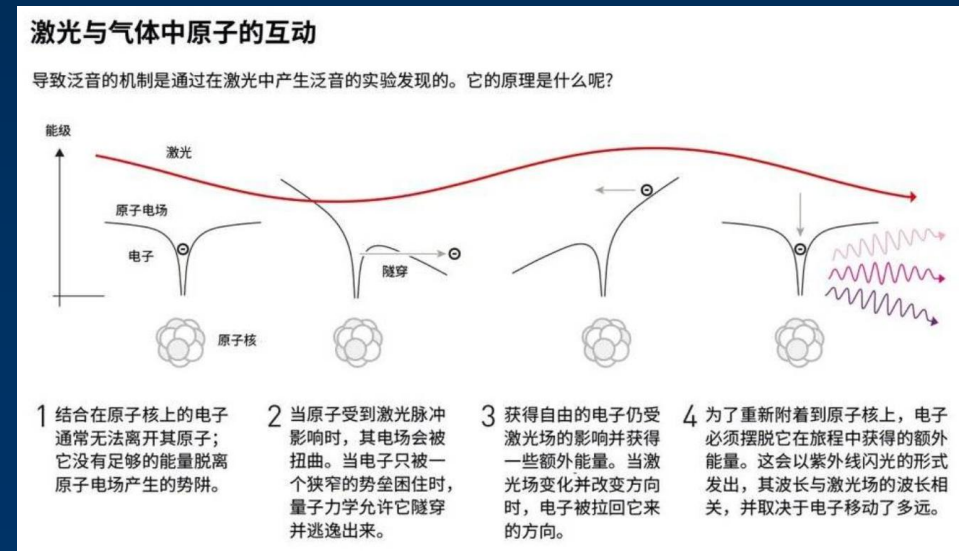
$$\left|\Psi\right\rangle = \alpha \left|\text{未衰变}\right\rangle\left|\text{活猫}\right\rangle + \beta \left|\text{衰变}\right\rangle\left|\text{死猫}\right\rangle$$


THE NOBEL PRIZE
IN PHYSICS 2023
Illustrations: Niklas Elmehed
Pierre Agostini
Ferenc Krausz
Anne L'Huillier
"for experimental methods that generate attosecond pulses of light for the study of electron dynamics in matter"
THE ROYAL SWEDISH ACADEMY OF SCIENCES


阿秒
1/1,000,000,000,000,000,000秒
心跳
1秒
宇宙年龄
1,000,000,000,000,000,000秒


Nobel Prize for physics 2023
France's Pierre Agostini, Hungarian-Austrian Ferenc Krausz and French-Swedish Anne L'Huillier for research into tools for exploring electrons inside atoms and molecules
Nobel
x 1 billionth of a billionth
x 1 billionth of a billionth
ATOM
Electron
1 attosecond
Electrons move or change energy rapidly, in the magnitude of attoseconds, which makes them difficult to study
1 second
Age of the universe
DISCOVERY
The three physicists recreated attosecond light pulses by shining laser light through a gas, making it possible to study such rapid movements
Observation
1 attosecond
Combined beam
Gas
Delay
Laser
When laser light is transmitted through a gas, ultraviolet overtones arise from atoms in the gas. Under the right conditions their cycles coincide, forming concentrated attosecond pulses
APPLICATIONS
Generating and measuring these pulses helps study rapid phenomena, used for
• observing the movement of electrons
• rapidly transforming insulators into conductors
• identifying molecules, such as in medical diagnostics
Source: nobelprize.org
AFP


吉他弦
基音
第一泛音
第二泛音
第三泛音
基音的每个周期都对应于泛音的多个周期。同样的原理在光波中也适用。


激光与气体中原子的互动
导致泛音的机制是通过在激光中产生泛音的实验发现的。它的原理是什么呢？
能级
激光
原子电场
电子
隧穿
原子核
1 结合在原子核上的电子通常无法离开其原子；它没有足够的能量脱离原子电场产生的势阱。
2 当原子受到激光脉冲影响时，其电场会被扭曲。当电子只被一个狭窄的势垒困住时，量子力学允许它隧穿并逃逸出来。
3 获得自由的电子仍受激光场的影响并获得一些额外能量。当激光场变化并改变方向时，电子被拉回它来的方向。
4 为了重新附着到原子核上，电子必须摆脱它在旅程中获得的额外能量。这会以紫外线闪光的形式发出，其波长与激光场的波长相关，并取决于电子移动了多远。

第16章 量子物理基础

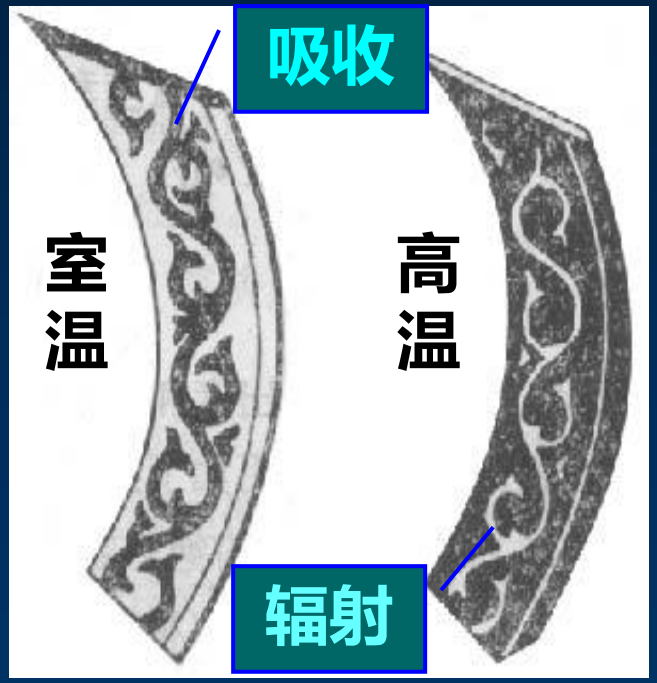
热辐射? 光电效应? 原子光谱系?

16-1 热辐射 普朗克能量子假设

一、热辐射 —— 与其温度有关的电磁辐射 —— 热辐射。

注意

- 温度不同，物体发出光的波长不同
- 一般温度下，物体热辐射主要处在红外区



物体有温度辐射，也从外界吸收辐射；

辐射和吸收达到动态平衡，温度恒定。

—— 平衡热辐射

理论和实验表明，物体的吸收本领越大，其辐射本领越大。

- **辐射出射度**

对给定物体，其表面上单位面积在单位时间的辐射的能量

任一物体的辐出度是其温度的函数 $M(T)$

与物体的材料、大小、形状、表面状况等因素有关。

- **单色辐射出射度**

一定温度 T，物体单位表面在单位时间内辐射的波长在

$\lambda \rightarrow \lambda + d\lambda$ 范围内辐射能与波长间隔的比值

$$M_\lambda(T) = \frac{\mathrm{d}M_\lambda}{\mathrm{d}\lambda}$$

与波长、温度、物体表面性质等有关。

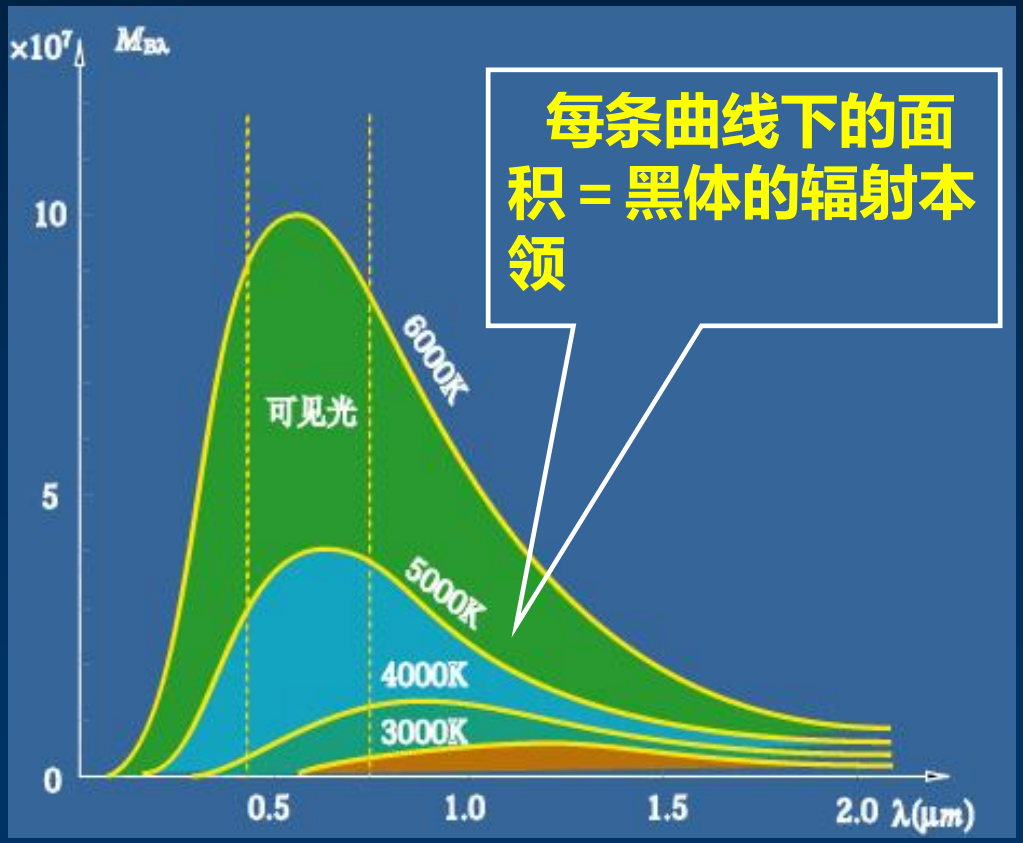
- **辐出度与单色辐射出射度的关系**

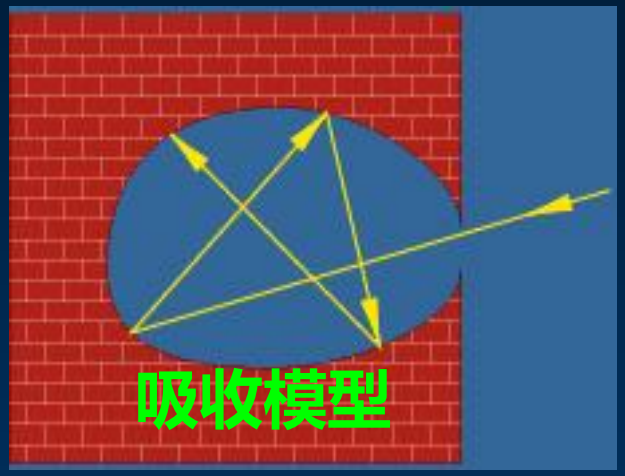
$$M(T) = \int_0^\infty M_\lambda(T)\,d\lambda$$

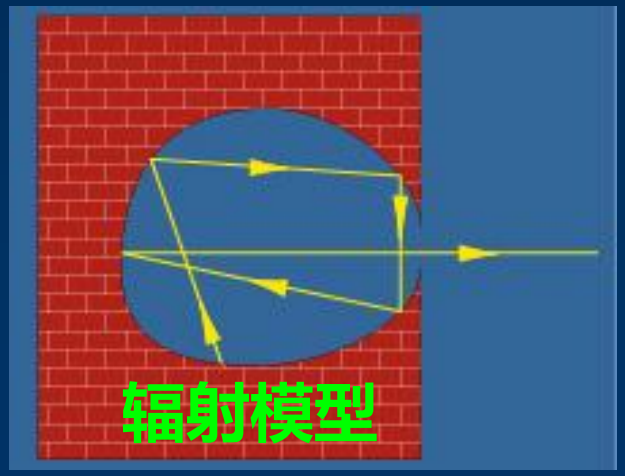
- **黑体辐射**

定义：**绝对黑体（黑体）** —— 能够全部吸收各种波长的辐射能量而完全不发生任何反射和透射的物体。

二、黑体辐射的实验定律





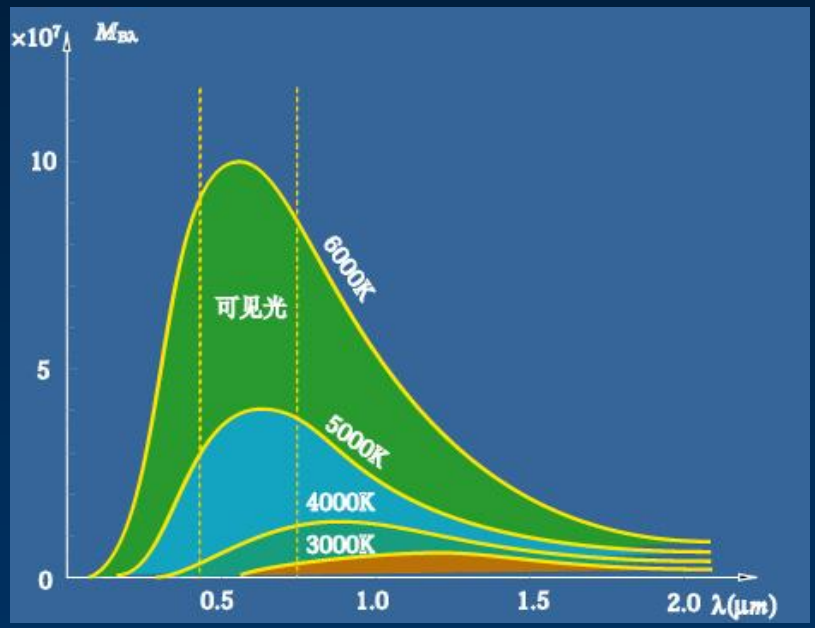


- 一定温度，辐射本领有一最大值（峰值波长）。
- 温度升高，峰值波长的波长值变小。
- 波长很大或很小的区域内，辐射本领较弱。

1．维恩位移定律

峰值波长 λ_m 与温度 T 成反比

$$T\lambda_{\mathrm{m}} = b \qquad b = 2.897 \times 10^{-3}\ m \cdot K$$



2．斯特藩——玻耳兹曼定律

$$M_B(T) = \int_0^{\infty} M_{B\lambda}(T)\mathrm{d}\lambda = \sigma T^4$$

$$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} W / m^2 K^4$$

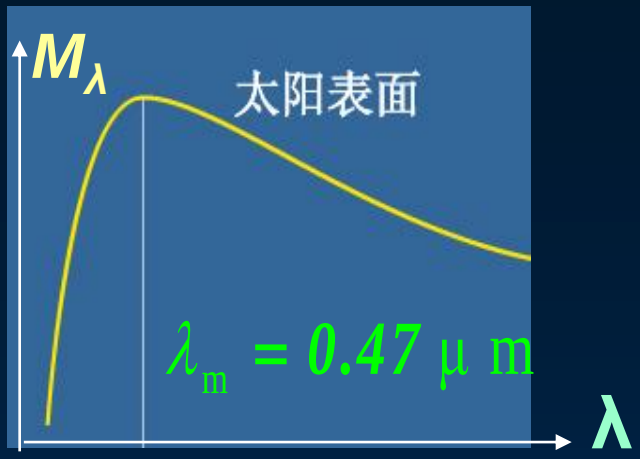
结论： 黑体辐射本领与温度T 四次方成正比，辐射能量随温度增加而增加。

例：太阳表面温度的计算

$$T_s = \frac{2.9\times10^{-3}}{\lambda_m} = \frac{2.9\times10^{-3}}{0.47\times10^{-6}} = 616\,6\mathrm{K}$$

太阳表面辐射本领：

$$M_B(T) = \sigma T^4 = 8.20\times10^7\ \mathrm{W/m^2}$$



维恩定律 —— 测各物体表面温度

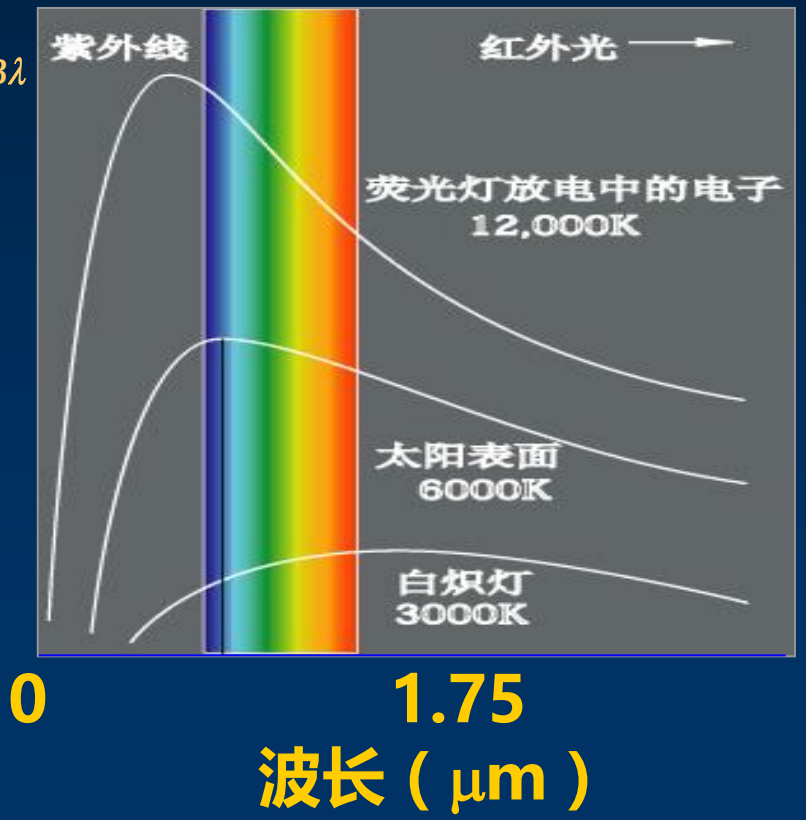
三、经典理论遇到的困难

- **维恩公式**

从麦克斯韦速率分布规律解释：

$$M_{B\lambda}(T) = \frac{C_1}{\lambda^5}\exp(-\frac{C_2}{\lambda T})$$

—— 适用于短波区。



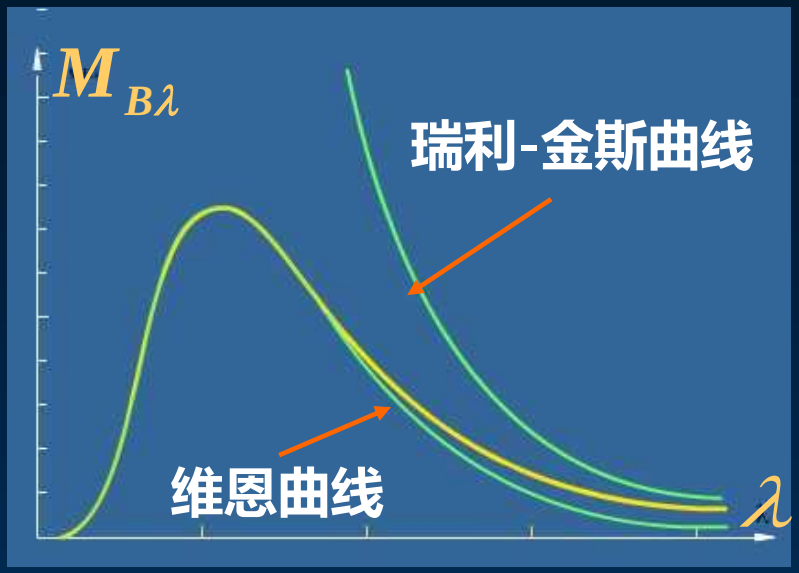
• **瑞利——金斯公式**

从统计物理能量按自由度均分原理解释：

$$M_{B\lambda}(T)=2\pi c\frac{kT}{\lambda^4}$$

—— 适用于长波区。

在短波区出现“紫外灾难”。

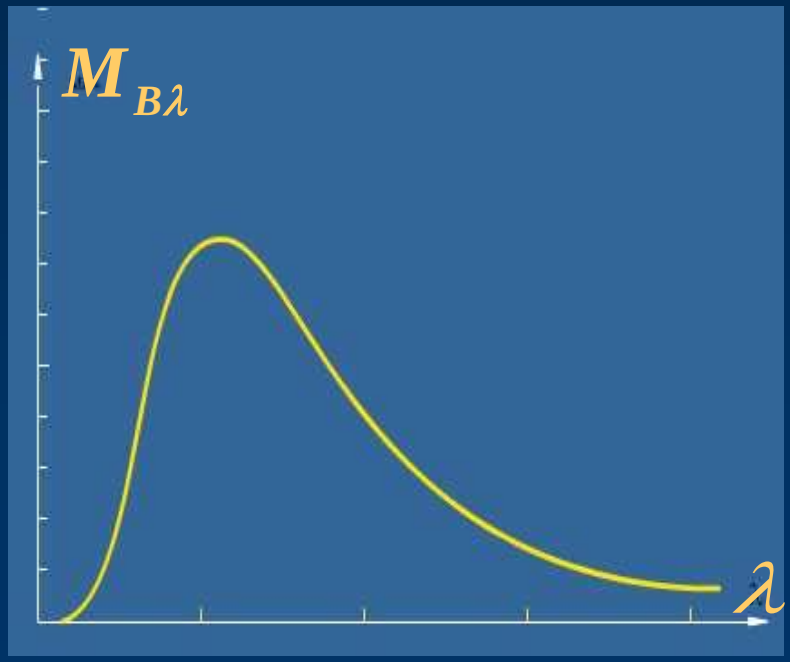


四、普朗克公式 量子化假设 ☆

1900年，普朗克以维恩、瑞利公式为基础，提出试探性公式：

$$M_{B\lambda}(T)=\frac{1}{\lambda^5}\cdot\frac{2\pi hc^2}{e^{hc/\lambda kT}-1}$$

$$h=6.626\times10^{-34}\ \mathrm{J\cdot s}$$

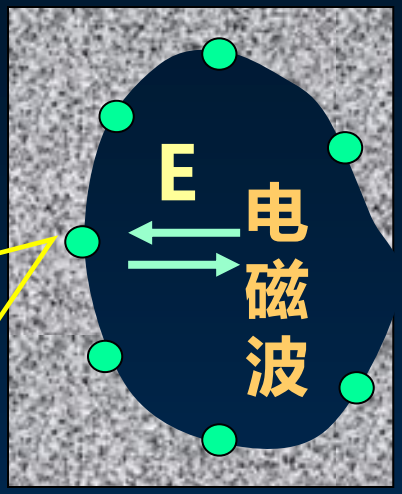


♣ 普朗克的量子假设

• 原子振动能量不是连续取值，而取一系列分立值；

• 若谐振子频率为 ν，则其能量是最小能量 $h\nu$

腔壁上振动原子视为振荡电偶极子，发射或吸收腔内的电磁波



的整数倍,即 $h\nu, 2h\nu, 3h\nu, \cdots, nh\nu, \cdots$

当它们与腔内交换能量时，能量变化只能是 $h\nu$ 的整数倍。

说明

1. 首次提出微观粒子能量是量子化的，打破经典物理关于能量连续的观念。

2. 能量量子化 $\varepsilon = nh\nu$ $n = 1, 2, 3, \cdots$

例：试由普朗克公式导出维恩定律

解： $M_{B\lambda}(T)=\dfrac{1}{\lambda^5}\cdot\dfrac{2\pi hc^2}{e^{hc/\lambda kT}-1}$　　令 $x=\dfrac{hc}{k\lambda T}$

$$=\frac{2\pi k^5T^5}{h^4c^3}x^5\cdot\frac{1}{e^x-1}$$

求极值，得 $\dfrac{dM(T)}{dx}=0$

$$5e^x-xe^x-5=0 \Rightarrow x_m=4.965$$

$$\lambda_m T=hc/x_m k=2.897\times10^{-3}\,m\cdot K=b$$ **维恩系数**

The Nobel Prize in Physics 1918



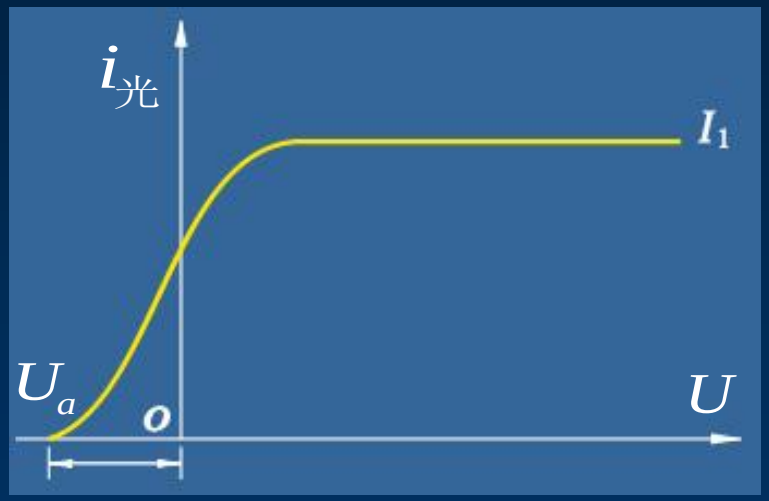
“ in recognition of the services he rendered to the advancement of Physics by his discovery of energy quanta "

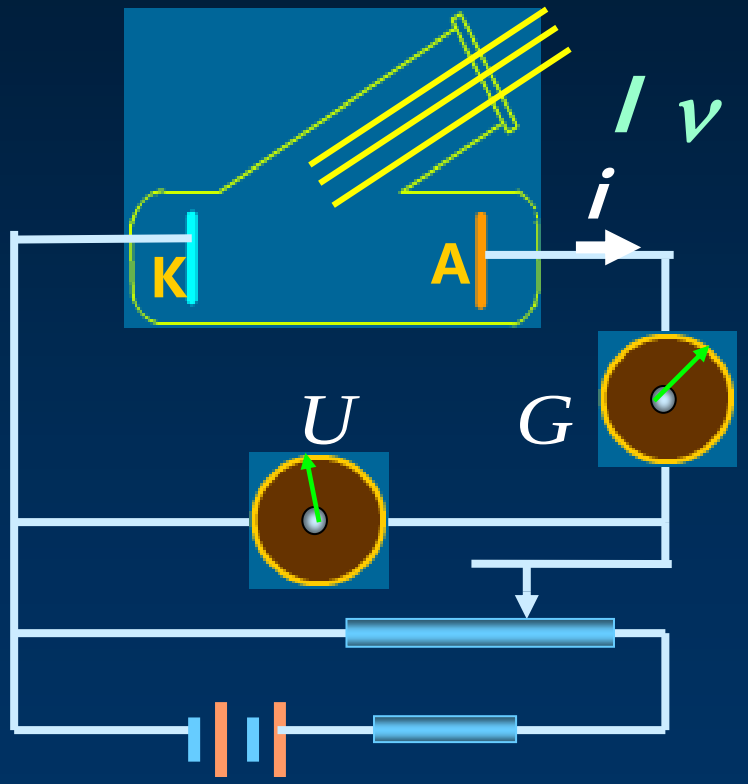
16-2 光电效应　爱因斯坦光量子假设

实验：当光照射到金属表面时，电子从金属表面逸出来的现象

—— 光电效应

一、光电效应





- 光强一定、电压足够大时，光电流达到饱和状态 —— 光电子全部到达阳极。

单位时间内，由阴极逸出的光电子数正比于入射光强度

光强不同，光电流不同　　$i_{光} \propto$ 光电子数 $\propto I$ (光强)

- U_a 遏止光电子到达阳极的反向电压

　　—— 遏止电压

遏止电压 U_a 与光强无关

$$eU_a = E_{k\max} = \frac{1}{2} m v_m^{\ 2}$$

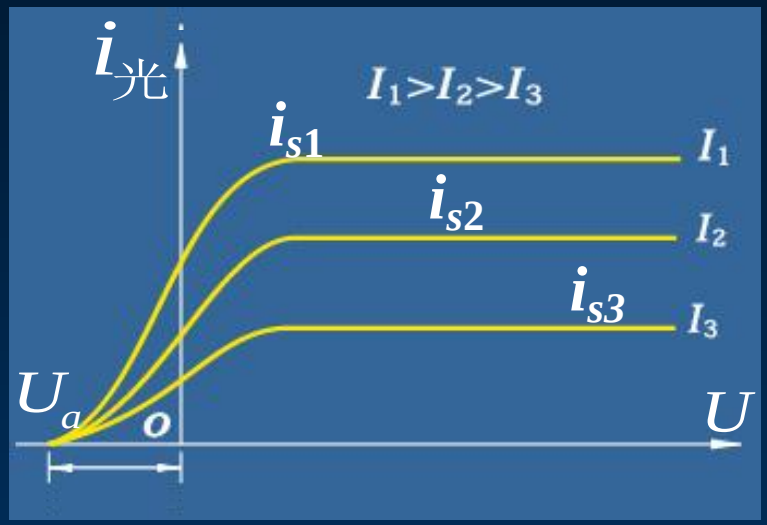
$E_{k\max}$ —— 最大初动能

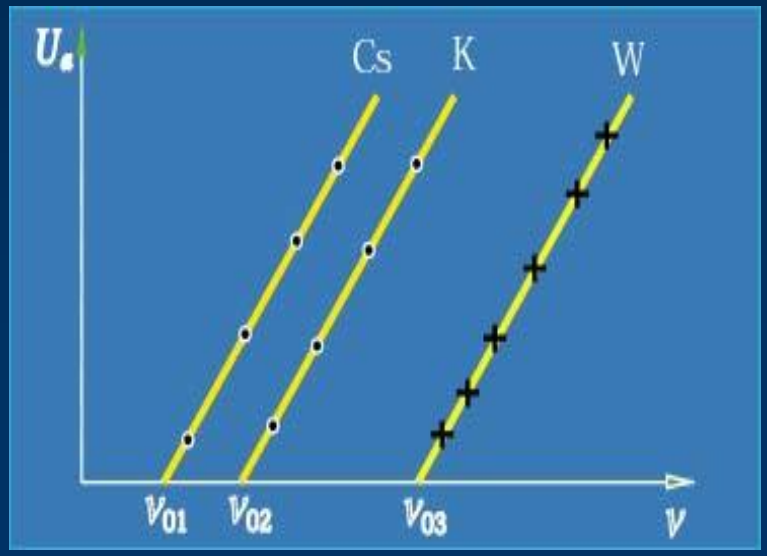
- 光电子初动能与入射光频率相关

$$U_a = K\nu - U_0$$

K 普适恒量

U_0 —— 与金属种类有关的恒量

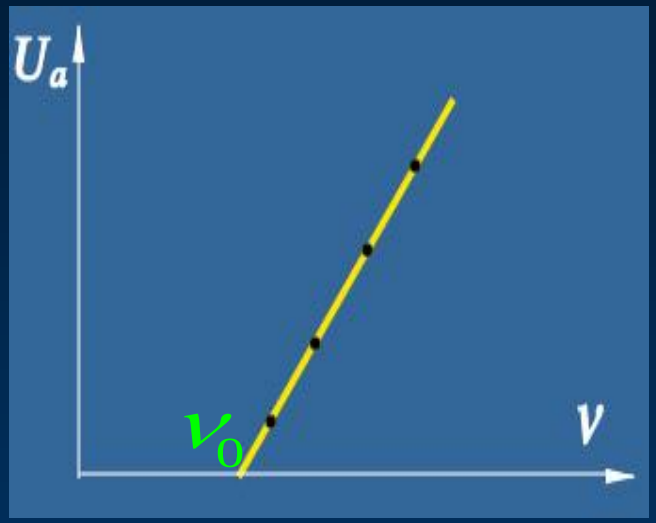




- **截止频率**

$$E_{k\max} = \frac{1}{2} m v_m^{\ 2} = eU_a = eK\nu - eU_0$$ 有 $\nu \geq \frac{U_0}{K}$

$$\nu_0 = \frac{U_0}{K}$$ ν_0 —— 与材料有关的光电效应**红限**。



入射光频率小于红限时，光电子的动能为负，不可能释放出光电子。

- **瞬时响应**

光电子即时发射，效应经历时间约为 $10^{-9}\,s$

二、经典物理遇到的困难

❖ 只要光强足够大，物质中电子在强电磁波作用下，总能获得足够能量而逸出，与光频率无关；

❖ 逸出光电子的初动能应随光强增大而增大，而与入射光频率无关；

❖ 若光强很小，电子须经较长时间的能量积累才能逸出，因而光电子的发射不可能即时。

三、光子假说　光电效应方程

1905年 A.Einstein：

一束光 ⇒ 一束粒子流 ⇒ 一束光子 $E = Nh\nu$

光电效应 ⇐ 一个电子整个吸收一个光子

光电效应方程

$$h\nu = A + \frac{1}{2}mv_{\mathrm{m}}^2$$

A —— 逸出功

—— 能量守恒关系

说明

❖ 光子能量大于逸出功，即 $h\nu \geq A$

❖ 电子接受一个光子即可逸出，滞后时间极短。

❖ 光频与电子最大初动能成线性关系

$$\begin{cases} \dfrac{1}{2}mv_{\mathrm{m}}^2 = h\nu - A \Longrightarrow \nu \geq \dfrac{A}{h} \Longrightarrow \text{红限} \quad \boxed{\nu_0 = \dfrac{A}{h}} \\ \dfrac{1}{2}mv_{\mathrm{m}}^2 = eK\nu - eU_0 \Longrightarrow U_0 = \dfrac{A}{e} \qquad K = \dfrac{h}{e} \end{cases}$$

❖ 照射光强 I 是单位时间到达被照物单位垂直面积的能量，

单位时间到达单位垂直面积的光子数为 N

$\boxed{I = Nh\nu}$　I 越大，N 越多，逸出光电子数也越多。

四、光的波粒二象性

$E = mc^2 = h\nu$

- 光子质量 $m = \dfrac{h\nu}{c^2} = \dfrac{h}{c\lambda}$
- 光子动量 $p = mc = \dfrac{h\nu}{c} = \dfrac{h}{\lambda}$

粒子性　　波动性