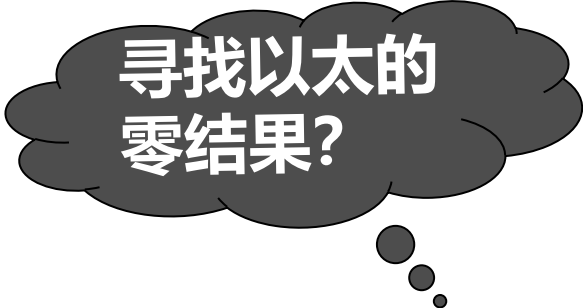


# 光的量子性(波粒二象性)



寻找以太的  
零结果?



热辐射的  
紫外灾难

## 物理世界上空的两朵乌云

经典物理无法解释的实验现象

- 黑体辐射的规律
- 光电效应

# 历史回顾

十九世纪末期，物理学各个分支的发展都已日臻完善，并不断取得新的成就。

首先在**牛顿力学**基础上，哈密顿和拉格朗日等人建立起来的分析力学，几乎达到无懈可击的地步，海王星的发现充分表明了牛顿力学是完美无缺的。

其次，通过克劳修斯、玻耳兹曼和吉布斯等人的巨大努力，建立了体系完整而又严密的热力学和统计力学，并且应用越来越广泛。

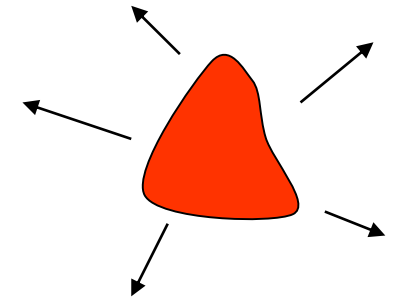
由安培、法拉第和麦克斯韦等人对电磁现象进行的深入而系统的研究，为**电动力学**奠定了坚实的基础，特别是由麦克斯韦的电磁场方程组预言了电磁波的存在，随即被赫兹的实验所证实。

后来又把惠更斯和菲涅耳所建立的**光学**也纳入了电动力学的范畴。

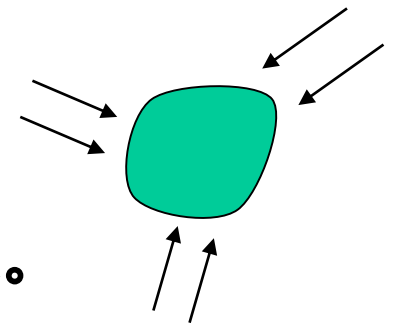
# 1.7 黑体辐射

## 热辐射

- 物体的温度与环境温度有差异时，两者之间将有能量交换，热辐射是能量交换的一种方式。



- 物体以电磁波的形式向外辐射能量，或者吸收辐射照到其表面的能量。



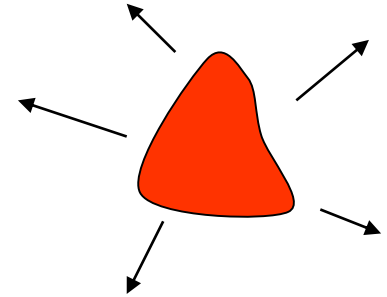
- 分子(含有带电粒子)的热运动使物体辐射电磁波。这种辐射与温度有关，**称为热辐射。**

# 辐射场

- 辐射的电磁波形成一个波场，即辐射场。
- 辐射场与波长（频率）、温度、方向等有关。
- 辐射场的物理参数：温度 $T$ ，波长 $\lambda$ 或频率 $\nu$ ，辐射场的能量密度，辐射场的谱密度  $u(T, \lambda, \theta)$ ，辐射通量，辐射通量的谱密度，辐射照度，辐射照度的谱密度，等

**辐射谱密度、辐射本领：** 温度为 $T$ 时，频率 $\nu$ 附近单位频率间隔内的辐射能量，亦称**单色辐出度**。

$$E(\nu, T)$$



**辐射通量：** 温度为 $T$ 时，频率 $\nu$ 附近 $d\nu$ 频率间隔内的辐射能量。

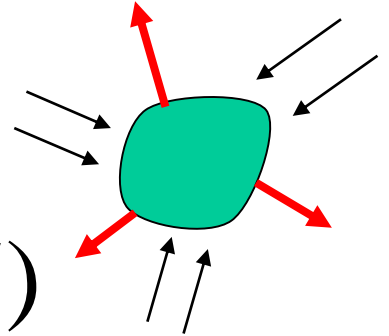
$$d\Phi(\nu, T) = E(\nu, T) d\nu$$

- **吸收本领**、吸收比：照射到物体上的通量

$$d\Phi(\nu, T)$$

其中被物体吸收的通量

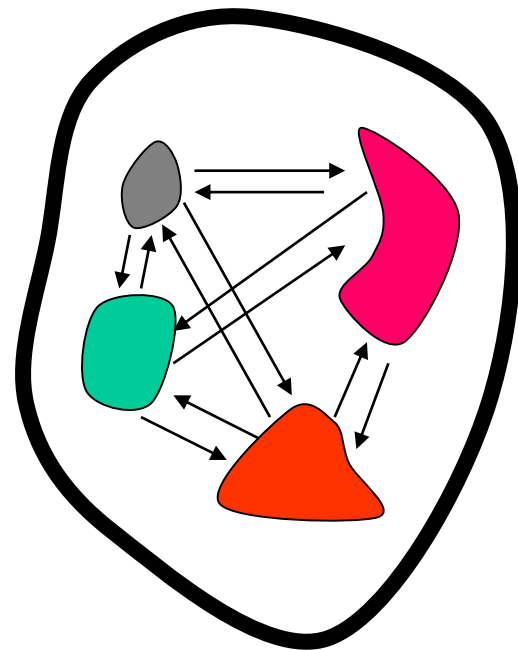
$$d\Phi'(\nu, T)$$



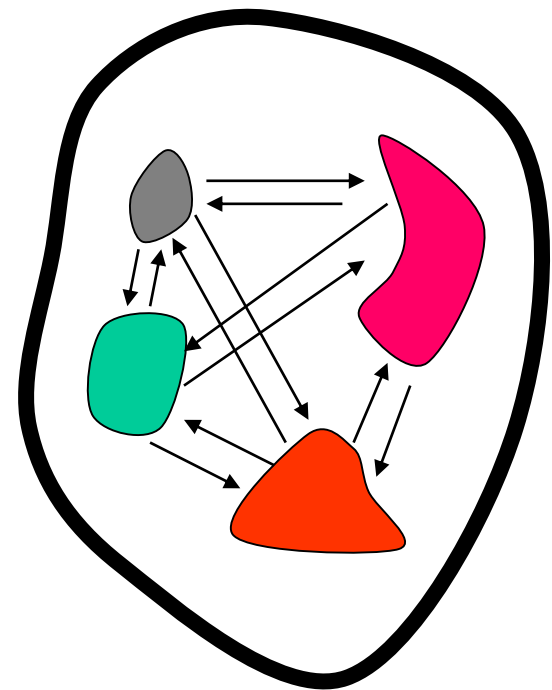
$$A(\nu, T) = \frac{d\Phi'(\nu, T)}{d\Phi(\nu, T)} \quad \text{称为吸收本领或吸收比}$$

# 物体间的热交换

- 与外界隔绝的几个物体，起初温度各不相同
- 假设相互间只能以热辐射的形式交换能量
- 每一个物体向外辐射能量，也吸收其它物体辐射到其表面的能量
- 温度低的，辐射小，吸收大；温度高的，辐射大，吸收小

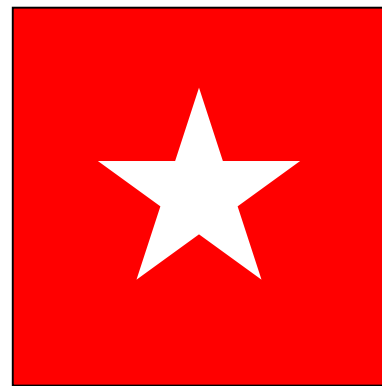
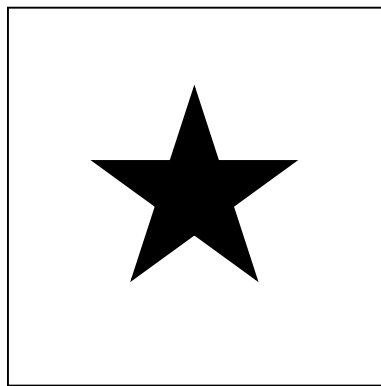


- 经过一个过程后，所有物体的温度相同，达到热平衡
- 热平衡时，每一个物体辐射的能量等于其吸收的能量
- 热平衡状态下，吸收本领大，辐射本领也大
- **基尔霍夫热辐射定律**：热平衡状态下物体的辐射本领与吸收本领成正比，比值只与 $T$ （温度）， $\nu$ （频率）有关。





$$\frac{E(\nu, T)}{A(\nu, T)} = f(\nu, T) \quad \text{吸收大, 辐射也大。}$$



$f(\nu, T)$  是普适函数, 与物质无关

应当通过实验测量  $f(\nu, T)$

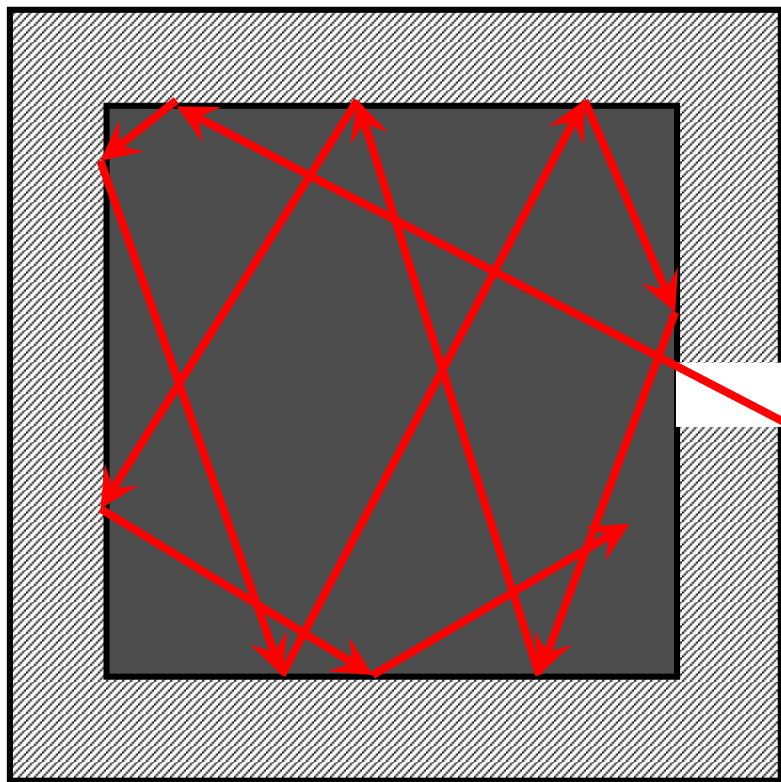
必须同时测量  $E(\nu, T)$  和  $A(\nu, T)$

如果让  $A(\nu, T) \equiv 1$  则  $f(\nu, T) \equiv E(\nu, T)$

$A(\nu, T) \equiv 1$  的物体, 称为绝对黑体

# 绝对黑体

- 一个开有小孔的空腔，对射入其中的光几乎可以全部吸收

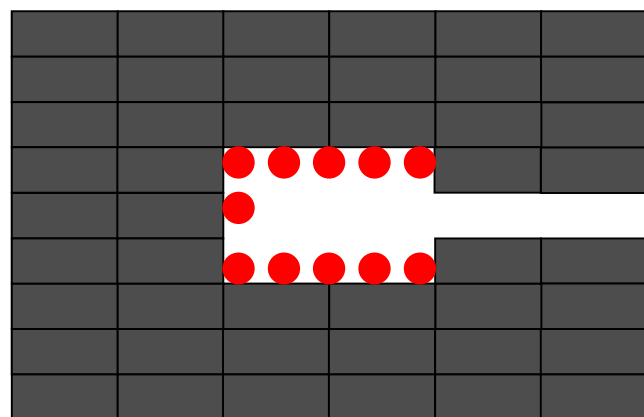


- 等效于绝对黑体

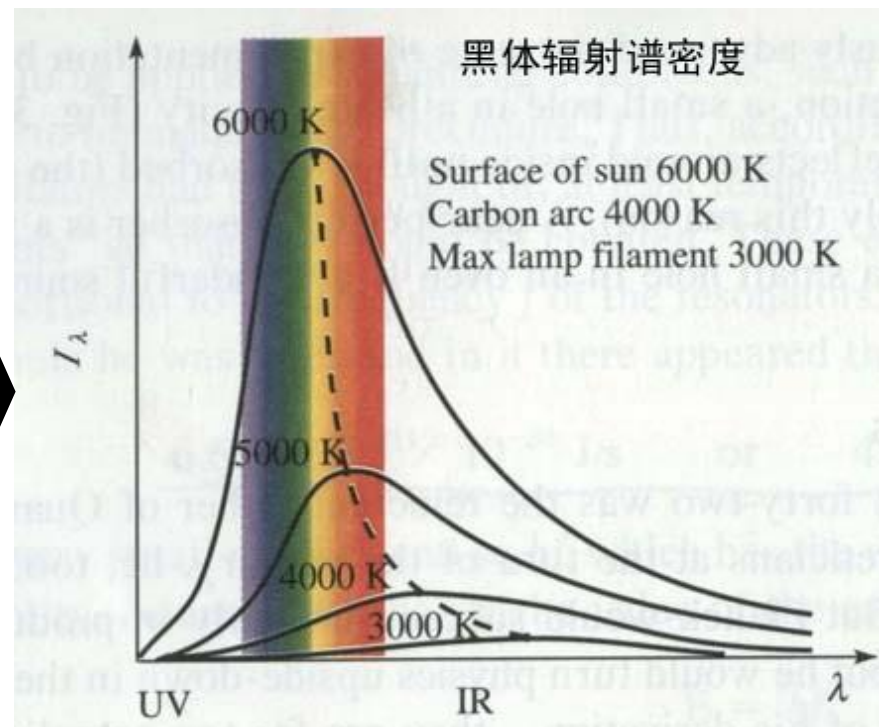
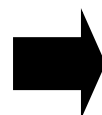
测量空腔开口处的  
辐射本领  $E(\nu, T)$

- 即可以得到

$$f(\nu, T) = E(\nu, T)$$



光谱仪



测量黑体辐射的实验装置

# 黑体辐射的定律

- 1、Stefan-Boltzmann定律（1879年、1884年）
- 2、Wien位移定律（1893年）
- 3、Rayleigh-Jeans定律（1900年，1905年）



Stefan



Wien



Rayleigh



Jeans

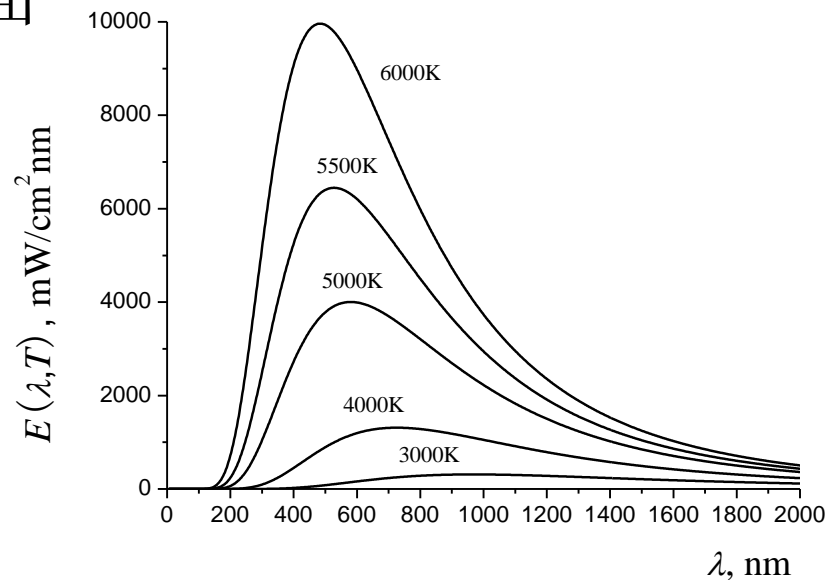
# 1、Stefan-Boltzmann定律

辐射的总能量，即曲线下的面积  
与 $T^4$ 成正比

$$\Phi(T) = \int_0^\infty E(\nu, T) d\nu = \sigma T^4$$

$$\sigma = 5.67032 \times 10^{-18} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$$

Stefan-Boltzmann常数



## 2、Wien位移定律

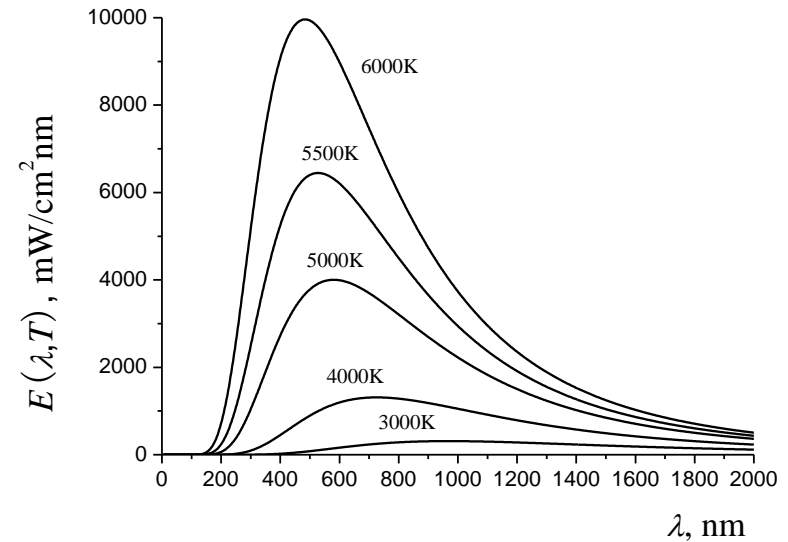
- 曲线的极大值满足

$$T\lambda_m = b$$

$$b = 2.8978 \times 10^{-3} \text{ mK}$$

$$T = b / \lambda_m \quad \text{用于测量温度}$$

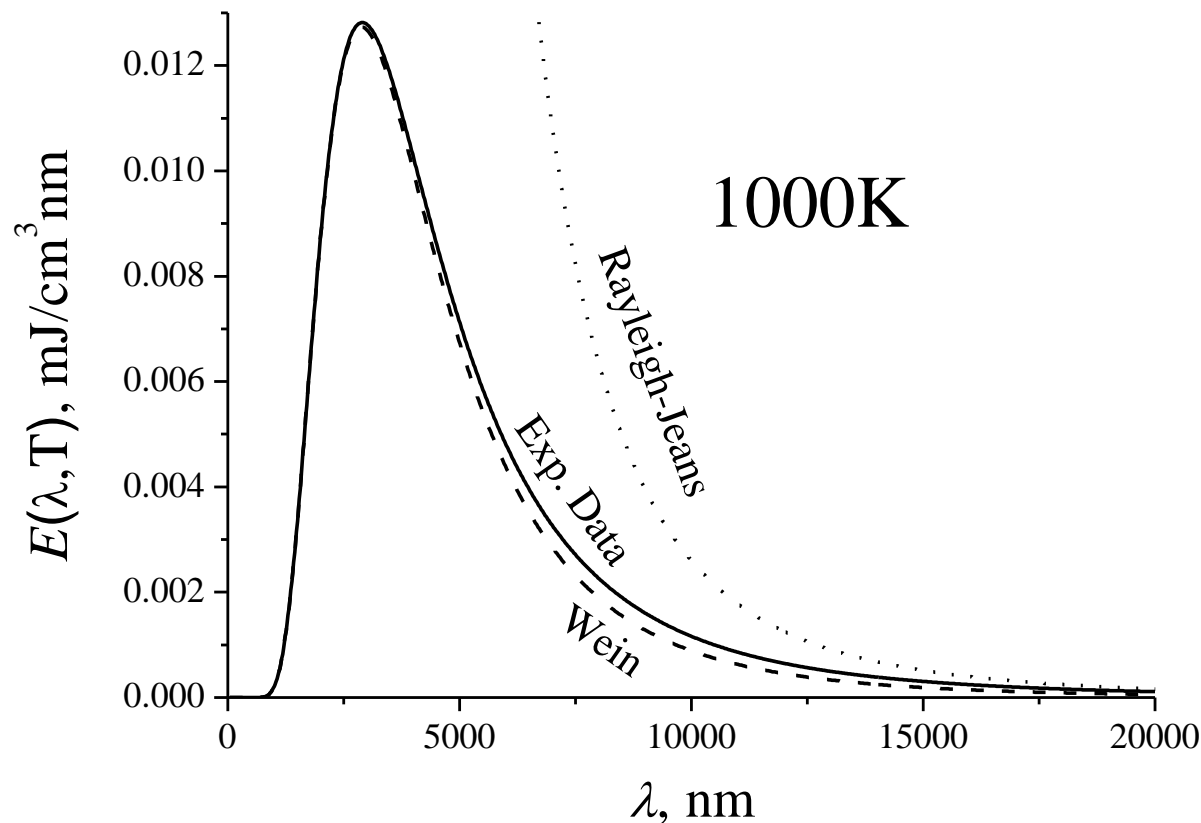
$$r_0(\lambda, T) = \frac{c_1}{\lambda^5} \exp\left(-\frac{c_2}{\lambda T}\right)$$



### 3、Rayleigh-Jeans定律（1900年，1905年）

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

紫外灾难



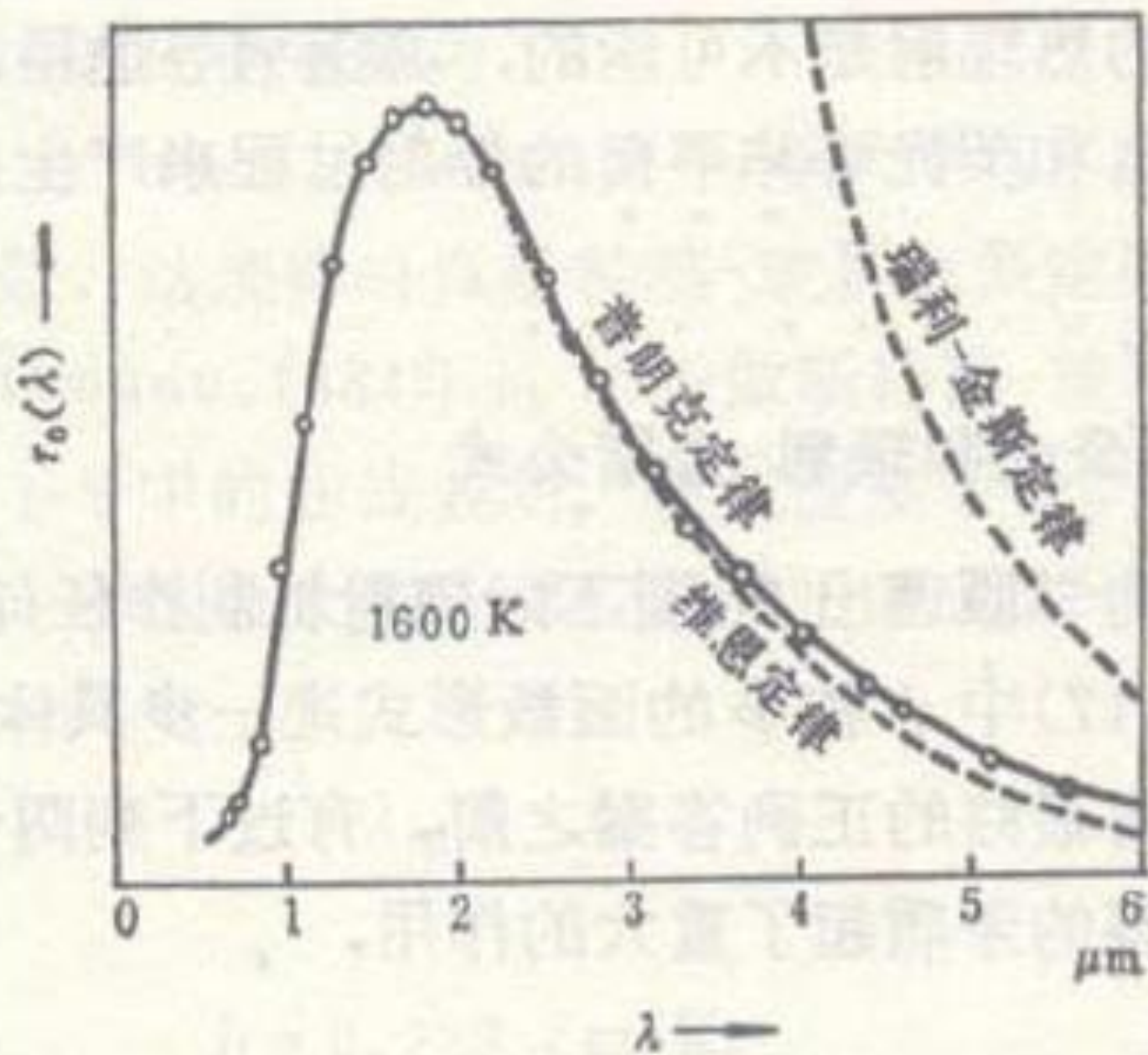
# 热辐射的紫外灾难

德国物理学家维恩建立起黑体辐射能量按波长分布的公式，但这个公式只在波长比较短、温度比较低的时候才和实验事实符合。

英国物理学家瑞利和物理学家、天文学家金斯认为能量是一种连续变化的物理量，建立起在波长比较长、温度比较高的时候和实验事实比较符合的黑体辐射公式。但是，从瑞利--金斯公式推出，在短波区(紫外光区)随着波长的变短，辐射强度可以无止境地增加，这和实验数据相差十万八千里，是根本不可能的。

所以这个失败被埃伦菲斯特称为"紫外灾难"。它的失败无可怀疑地表明经典物理学理论在黑体辐射问题上的失败，所以这也是整个经典物理学的"灾难"。





# 普朗克能量量子假说

- 1900年提出，1918年获Nobel奖
- 空腔中的驻波是一系列的谐振子，只能取一些分立的能量，即

$$\varepsilon = 0, \varepsilon_0, 2\varepsilon_0, 3\varepsilon_0, 4\varepsilon_0 \cdots$$

$$\varepsilon_0 = h\nu \quad h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ Js}$$

黑体的辐射本领为

$$E(\nu, T) = \frac{2\pi}{c^2} \nu^2 \frac{h\nu}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} = \frac{2\pi h}{c^2} \frac{\nu^3}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}$$

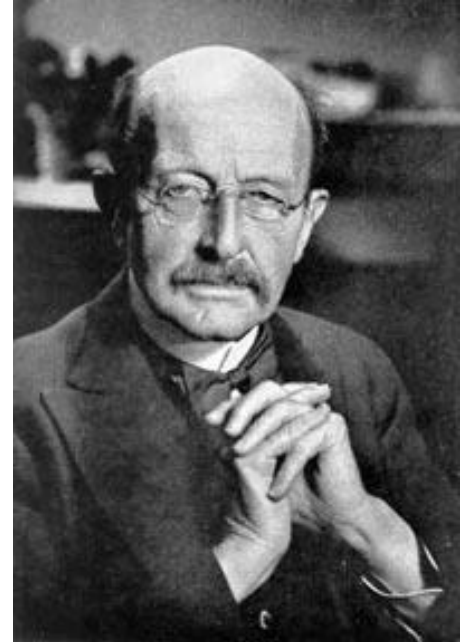
$$E(\nu, T) = \frac{2\pi h}{c^2} \frac{\nu^3}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}$$

长波段  $h\nu \ll kT$   $\frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} \approx \frac{1}{1 + \frac{h\nu}{kT} - 1} = \frac{kT}{h\nu}$

$E(\nu, T) = \frac{2\pi}{c^2} \nu^2 kT$  与Rayleigh-Jeans定律符合

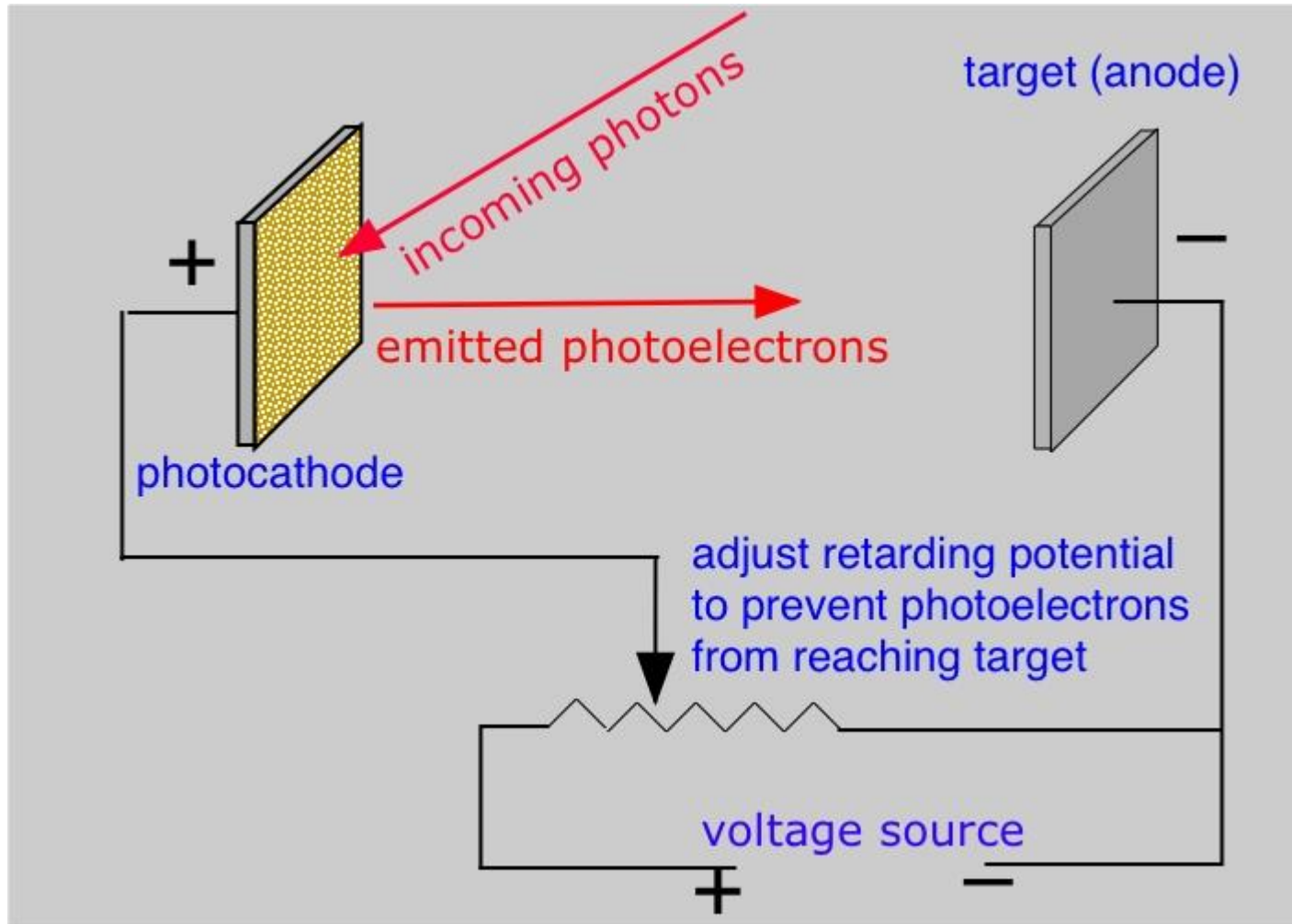
短波段  $h\nu \gg kT$   $\frac{\nu}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} \approx \nu \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}}} = \nu e^{-\frac{h\nu}{kT}}$

$E(\nu, T) = \frac{2\pi}{c^2} h\nu^2 \frac{\nu}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} = \frac{2\pi}{c^2} h\nu^3 e^{-\frac{h\nu}{kT}}$  与实验结果一致



# 1.8 光电效应

光照在金属上，使电子从金属中脱出的现象。

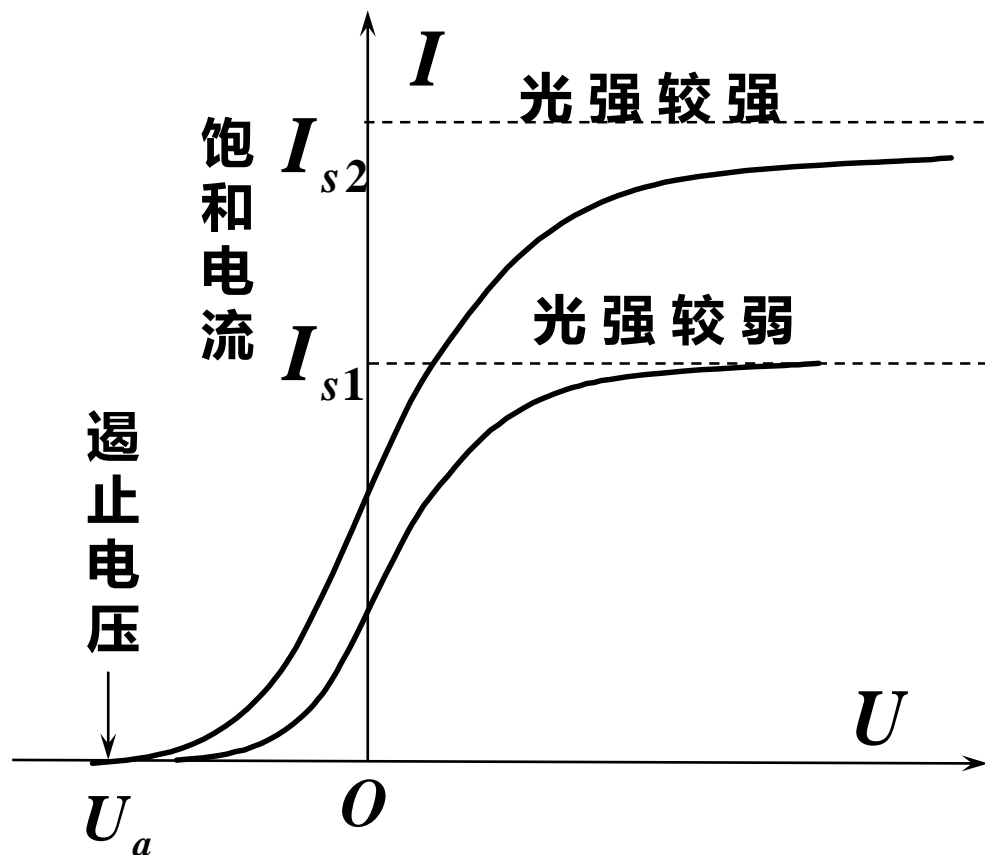


# 光电效应的实验现象

1、单位时间内从阴极逸出的光电子数(光电流)与入射光的强度成正比。当光电管电压为零时，光电流并不为零。

2、光电子的初动能与入射光频率成正比，与入射光的强度无关。遏止电压的存在说明光电子具有初动能，其关系为：

$$\frac{1}{2}mv^2 = |eU_a|$$



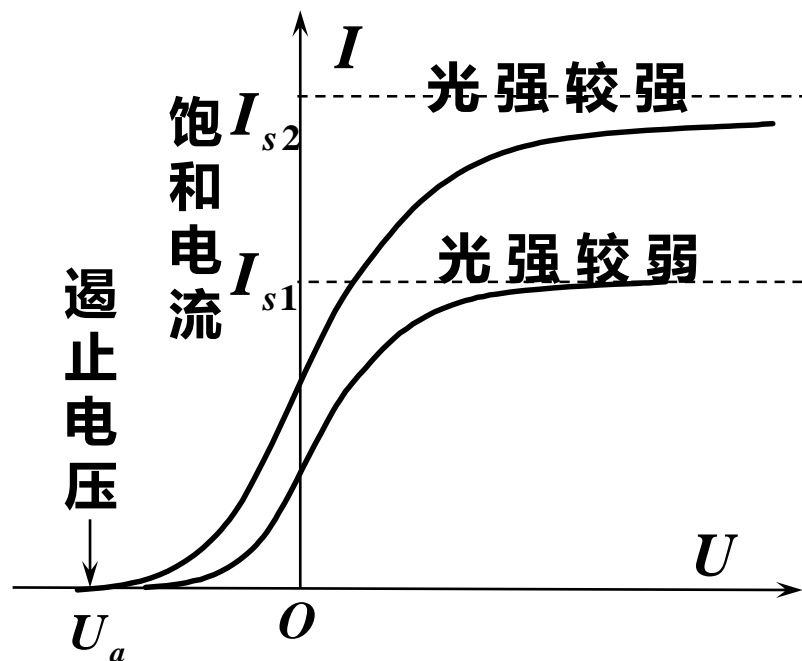
光电效应伏安特性曲线

当反向电压加至  $U_a$  时光电流为零，称  $U_a$  为遏止电压。

# 光电效应的实验现象

## 3、存在截止频率（红限）

对于给定的金属，当照射光频率 $\nu$ 小于某一数值 $\nu_0$ （称为红限）时，无论照射光多强都不会产生光电效应。 $\nu_0$ 被称为某种金属的**红限频率**（或截止频率）， $\nu_0$ 和金属有关，不同的金属 $\nu_0$ 不同。



## 4、光电效应瞬时响应性质

实验发现，无论光强如何微弱，从光照射到电子出现只需要  $10^{-9}\text{s}$  的时间。

结论：光电效应的产生**几乎无需时间的累积**。

## 光电效应的实验现象与经典理论的矛盾

**(1) 按照经典电磁理论，光电子的初动能应决定于入射光的光强，而不是决定于光的频率。**

**(2) 经典理论认为，只要光照射时间足够长，电子的能量会充分累积，最后一定能产生电子。因此无法解释红限的存在。**

**(3) 电子需要能量累积过程，一定会存在一个滞后的时间。对于弱光来说，需要积累的时间可能达到小时量级，因此无法解释光电效应的产生几乎无须时间的积累的现象。**

# 光电效应的解释

## 爱因斯坦的光子假说 《关于光的产生和转化的一个启发性观点》 1905

光子是以光速  $c$  运动的微粒流，把这些微粒流称为光量子（光子），每个光子的能量为：

$$\varepsilon = h\nu$$

$h$  — 普朗克常数  $6.626 \times 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s}$

$\nu$  — 光子的频率

金属中的自由电子吸收一个光子能量  $h\nu$  之后，一部分用于电子从金属表面逸出所需的逸出功  $A$ ，另一部分转化为光电子的动能，即：

$$h\nu = \frac{1}{2}mv^2 + A \quad \text{—— 爱因斯坦光电效应方程}$$

逸出功与  
材料有关

几种金属的逸出功

金属	钠	铝	锌	铜	银	铂
A/eV	2.28	4.08	4.31	4.70	4.73	6.35



# 光电效应的解释

## 爱因斯坦对光电效应的解释

(1) 光强大，单位体积光子数多，单位时间内释放的光电子也多，所以光电流也大。

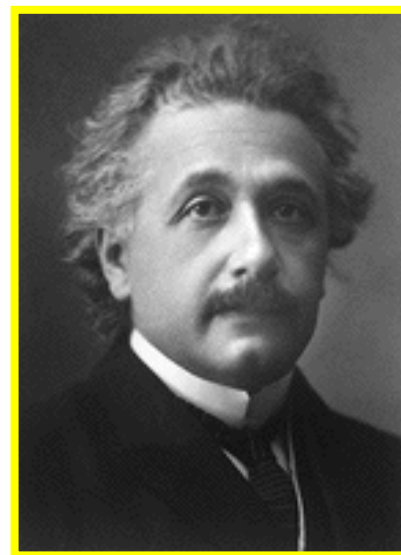
(2) 电子只要吸收一个光子就可以从金属表面逸出，所以无须时间的累积。

(3) 从光电方程可以看出光电子初动能和照射光的频率成线性关系。

$$h\nu = \frac{1}{2}mv^2 + A$$

(4) 从光电效应方程中，当初动能为零时，可得到红限频率：

$$\nu_0 = \frac{A}{h}$$



爱因斯坦  
(1879-1955)

## 1921诺贝尔物理学奖

“在昨天举行的会议上，皇家科学院决定授予您去年度（1921）的诺贝尔物理学奖，这是考虑到您在理论物理学尤其是您对光电效应定律的发现，但没有考虑您的相对论和引力场论在未来获得证实以后将应有的价值。”——诺贝尔委员会的来信。

## 密立根对于光电效应的验证工作

爱因斯坦曾经说过：“倘若光电方程正确无误，取直角坐标系将遏止电压表征为入射光频率的函数，则**遏止电压必定是一条直线，他的斜率与金属材料性质无关。**”

但是在当时条件下，实验是很难实现的。直到1916年美国物理学家密立根（R. A. Millikan ,1868-1953）经过非常仔细的实验，证实了爱因斯坦光电效应方程的正确性。

密立根由于研究基本电荷和光电效应，特别是通过著名的油滴实验，证明电荷有最小单位。获得1923年诺贝尔物理学奖。

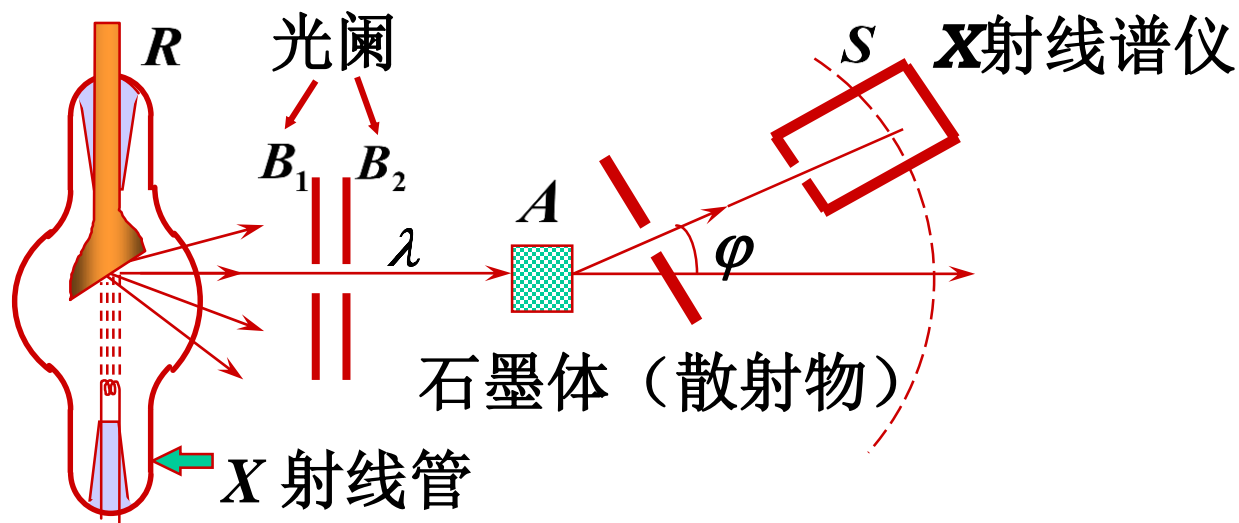


密立根(1868-1953)

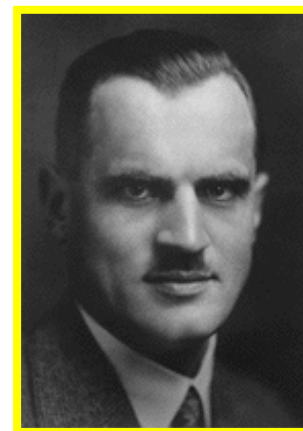
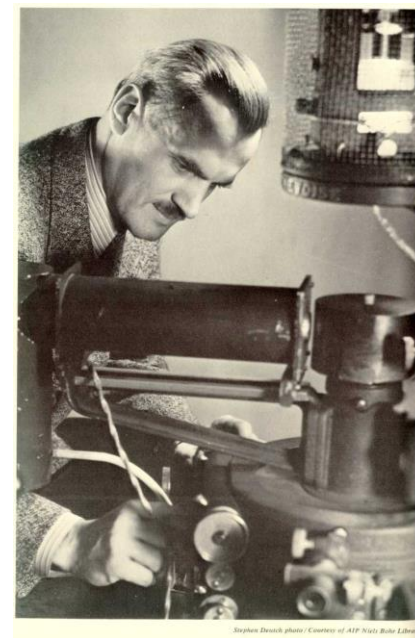
美国物理学家  
1923年诺贝尔物理学奖

# 康普顿效应的实验

1920年，美国物理学家康普顿在观察X射线被物质散射时，发现散射线中含有**波长发生变化**的成分。这一工作进一步验证了爱因斯坦的光子理论。



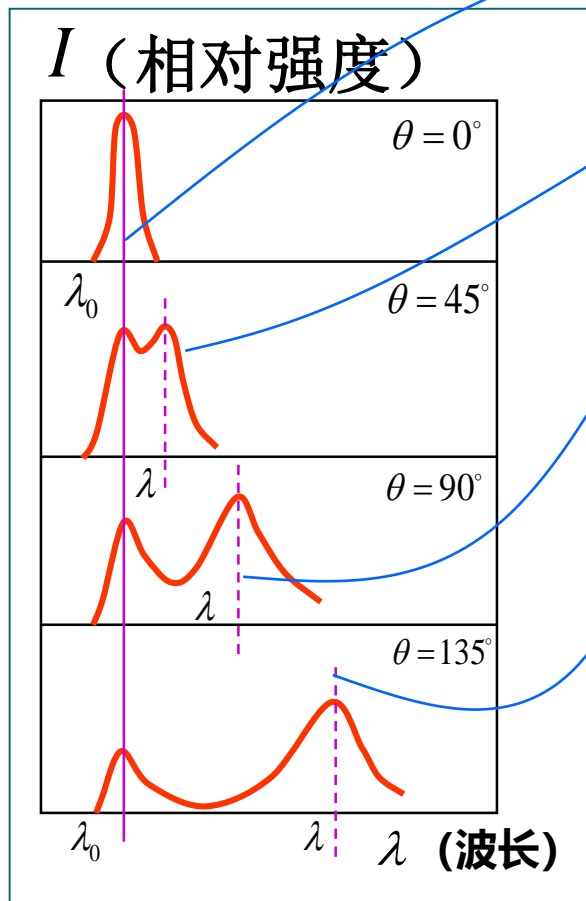
康普顿散射实验装置



A.H.Compton

(1892-1962)美国物理学家  
1927诺贝尔物理学奖

# 康普顿效应



康普顿散射的实验现象

波长不变的散射称为正常散射。

散射谱线中，除了波长不变的射线外，还有波长变长的射线。这些波长变长的散射被称为**康普顿散射**。

实验证明：

- (1) 散射  $X$  射线的波长中有两个峰值；
- (2) 波长的偏移与散射角有关。

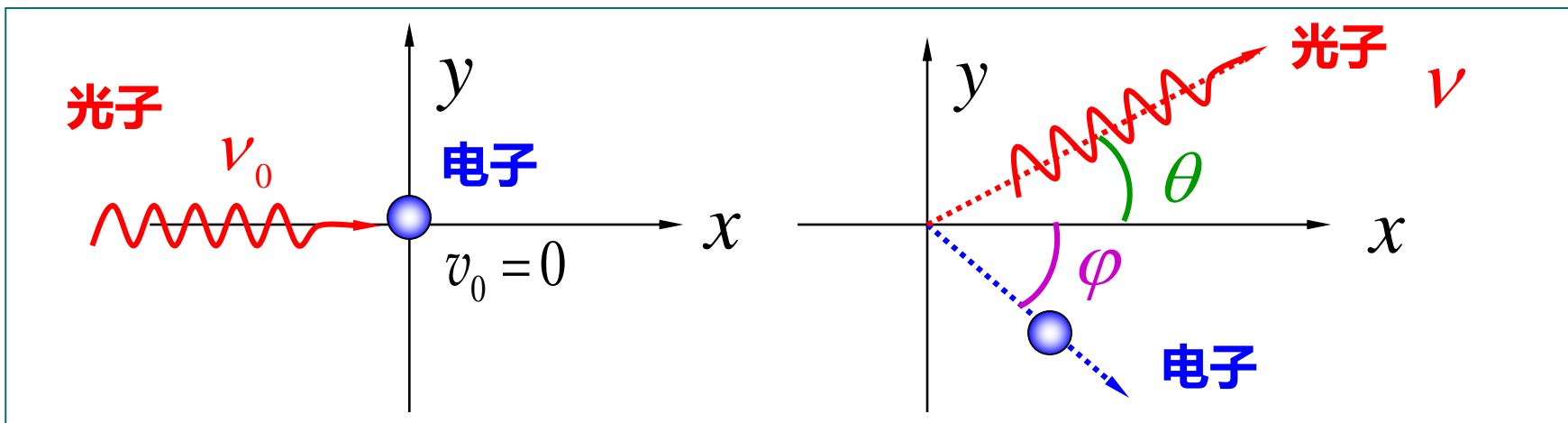
$$\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0$$

(3)  $\Delta\lambda$  与散射物质无关，但  $\lambda_0$  ( $\lambda$ ) 成分随散射物原子序数增加而增加（减少）。

经典电磁理论预言，散射辐射具有和入射辐射一样的频率。**光的经典电磁理论不能解释新的波长的出现，以及波长改变和散射角之间的关系。**

# 康普顿散射现象的量子解释

## (1) 物理模型



◆ 入射光子（ $X$ 射线或 $\gamma$ 射线）能量大.

$$E = h\nu \quad \text{范围为: } 10^4 \sim 10^5 \text{ eV}$$

◆ 固体表面电子束缚较弱，可视为近自由电子。

◆ 电子热运动能量  $\ll h\nu$ ，可近似视为静止电子。

◆ 电子反冲速度很大，严格说来，需用相对论力学来处理。

**模型：** 散射过程是光子与散射体中的电子进行弹性碰撞的过程。

(1) 与自由电子碰撞——康普顿散射

(2) 与紧束缚电子碰撞，瑞利散射。

# 康普顿散射现象的量子解释

## (2) 理论分析

能量守恒

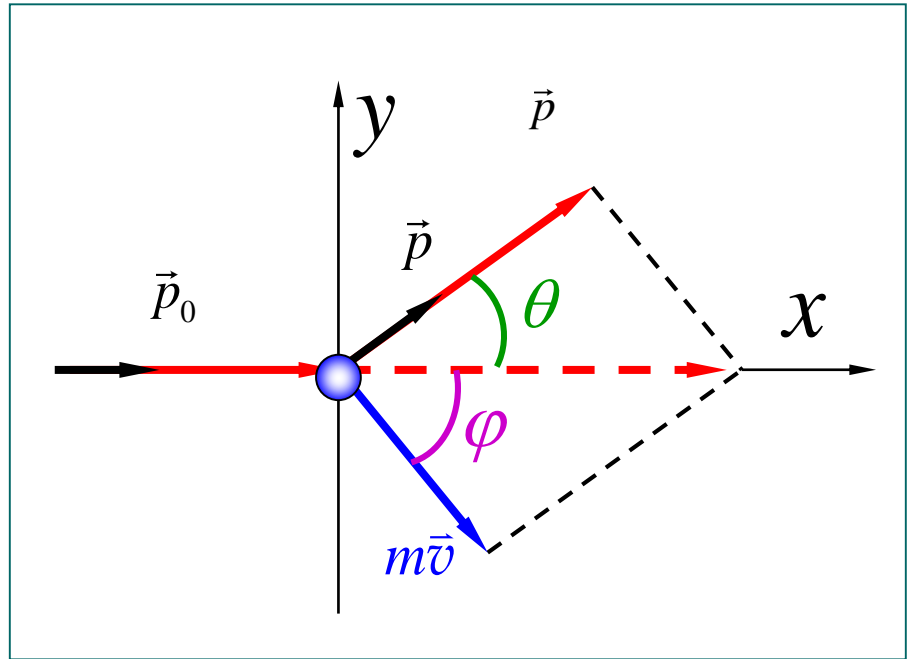
$$h\nu_0 = h\nu + \frac{1}{2}m\bar{v}^2$$

动量守恒

$$\frac{h\nu_0}{c} \vec{p}_0 = \frac{h\nu}{c} \vec{p} + m\vec{\bar{v}}$$

$$m^2\bar{v}^2 = \frac{h^2\nu_0^2}{c^2} + \frac{h^2\nu^2}{c^2} - 2\frac{h^2\nu_0\nu}{c^2} \cos\theta$$

令  $\Delta\nu = \nu_0 - \nu$  可得到  $\bar{v}^2 = 2h\Delta\nu / m$




## (2) 理论分析 (续)

可得到

$$\frac{\Delta\nu}{\nu\nu_0} \approx \frac{\Delta\nu}{\nu^2} = \frac{h}{m_0c^2}(1 - \cos\theta) = (\lambda - \lambda_0) / c = \Delta\lambda / c$$

◆ 康普顿公式 
$$\Delta\lambda = \frac{h}{m_0c}(1 - \cos\theta) = \frac{2h}{m_0c}\sin^2\frac{\theta}{2}$$

◆ 康普顿波长 
$$\lambda_C = \frac{h}{m_0c} = 2.43 \times 10^{-12} \text{ m} = 2.43 \times 10^{-3} \text{ nm}$$



◆ 康普顿公式 
$$\Delta\lambda = \frac{h}{m_0c}(1 - \cos\theta) = \lambda_C(1 - \cos\theta)$$

### (3) 结论

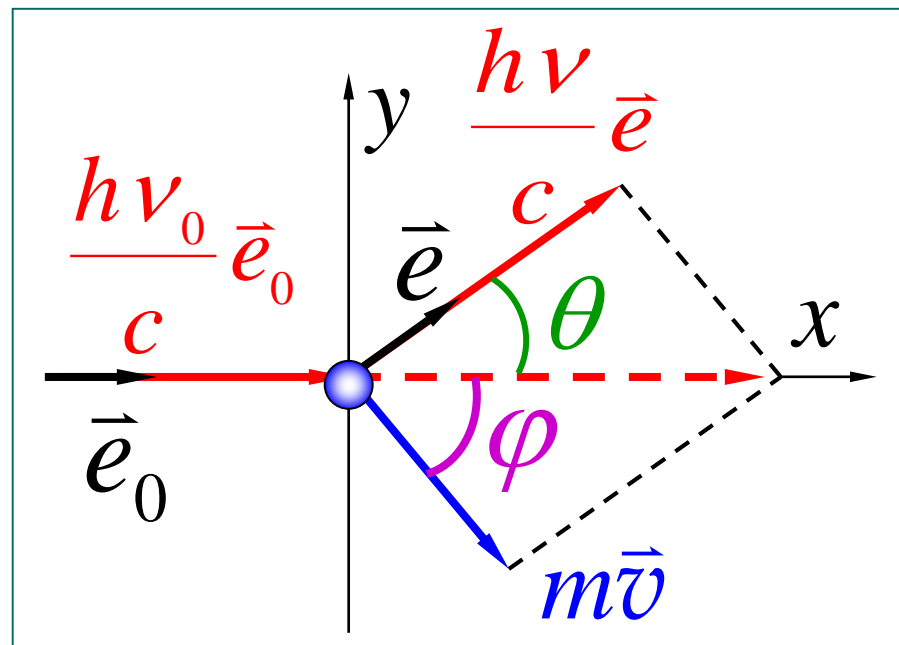
◆ 散射光波长的改变量  $\Delta\lambda$  仅与  $\theta$  有关

$$\theta = 0, \Delta\lambda = 0$$

$$\theta = \pi, (\Delta\lambda)_{\max} = 2\lambda_c$$

◆ 散射光子能量减小

$$\lambda > \lambda_0, \nu < \nu_0$$





## (4) 讨论

- ◆ 若  $\lambda_0 \gg \lambda_c$  则  $\lambda \approx \lambda_0$ , 可见光观察不到康普顿效应.
- ◆  $\Delta\lambda$  与  $\theta$  的关系与物质无关, 是光子与近自由电子间的相互作用。
- ◆ 散射中  $\Delta\lambda = 0$  的散射光是因光子与金属中的紧束缚电子（原子核）的作用.

## (5) 物理意义

- ◆ 光子假设的正确性, 狭义相对论力学的正确性 .
- ◆ 微观粒子也遵守能量守恒和动量守恒定律.

## 例题

波长  $\lambda_0 = 1.00 \times 10^{-10} \text{m}$  的X射线与静止的自由电子作弹性碰撞, 在与入射角成  $90^\circ$  角的方向上观察, 散射X射线的波长多大? 反冲电子的动能和动量各为多少?

解: 将  $\theta = 90^\circ$  代入康普顿散射公式

$$\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0 = \frac{h}{m_0 c} (1 - \cos 90^\circ) = \frac{h}{m_0 c} = \lambda_c = 0.024 \times 10^{-10} \text{m}$$

$$\text{所以 } \lambda = \lambda_0 + \lambda_c = (0.1 + 0.024) \times 10^{-10} = 0.124 \times 10^{-10} \text{m}$$

在这一方向还有波长不变的射线。

对于反冲电子, 所获得的动能  $E_k$  等于入射光子损失的能量

$$E_k = h\nu_0 - h\nu = hc\left(\frac{1}{\lambda_0} - \frac{1}{\lambda}\right) = \frac{hc\Delta\lambda}{\lambda_0\lambda}$$

$$= \frac{6.63 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8 \times 0.024 \times 10^{-10}}{0.1 \times 10^{-10} \times 0.124 \times 10^{-10}} = 3.8 \times 10^{-15} \text{J} = 2.4 \times 10^4 \text{eV}$$

# 康普顿效应与光电效应的联系与区别

**联系：**康普顿效应与光电效应在物理本质上是相同的，它们研究的都不是整个光束与散射物体之间的作用，而是个别光子与个别电子之间的相互作用，在这种相互作用过程中都遵循能量守恒定律。

## 区别：

(1) 光电效应是指金属内部电子吸收了光子全部能量而脱出金属表面，电子处于原子中的束缚态，遵守能量守恒定律。康普顿效应则是光子与自由电子的弹性碰撞，同时遵守能量和动量守恒定律。

(2) 两者入射光子能量不同，当光子能量与电子的束缚能同数量级时，主要表现为光电效应。电子的束缚能一般为几个电子伏特，故入射光波长一般在可见光和紫外光波段。

(3) 当光子能量远远大于电子的束缚能时，相对而言，电子被原子核束缚的比较松，电子可视为自由电子。则主要表现为康普顿效应，入射光波长越短，光子能量越大，康普顿效应越明显，故入射光波长主要在 $x$ 射线或 $\gamma$ 射线波段。

# 光的波粒二象性

## 回顾光的粒子性与波动性的发展

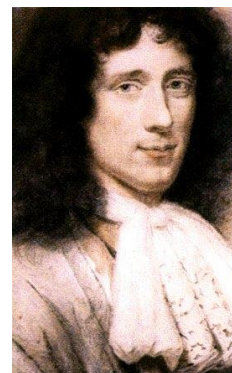


牛顿  
粒子说

十七世纪

明确形成波动说与粒子说两大学派

期间粒子说一直  
占有优势地位



惠更斯  
波动说

十九世纪初期

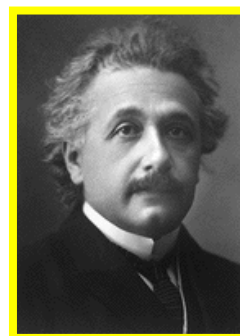
证明了波动说的正确性

十九世纪末期

光电效应现象

二十世纪初期

爱因斯坦提出光子说：光具有粒子  
特性（此“粒子”非彼“粒子”）



爱因斯坦  
光子说

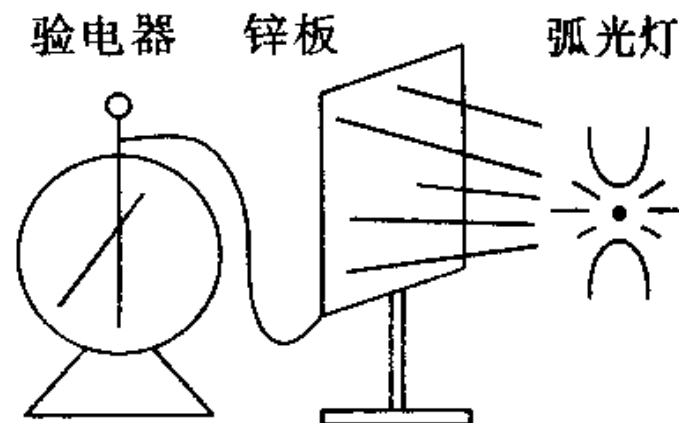
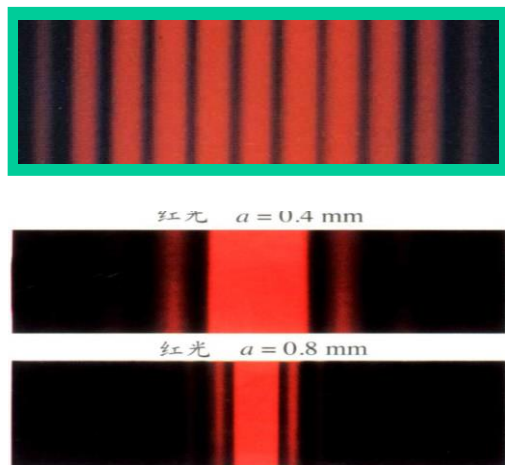
# 光的波粒二象性的描述和特点

光既是一种波，也是一种粒子，同时具有波动性和粒子性两种特性。

波动性：干涉、衍射、偏振。

粒子性：光电效应、康普顿散射。

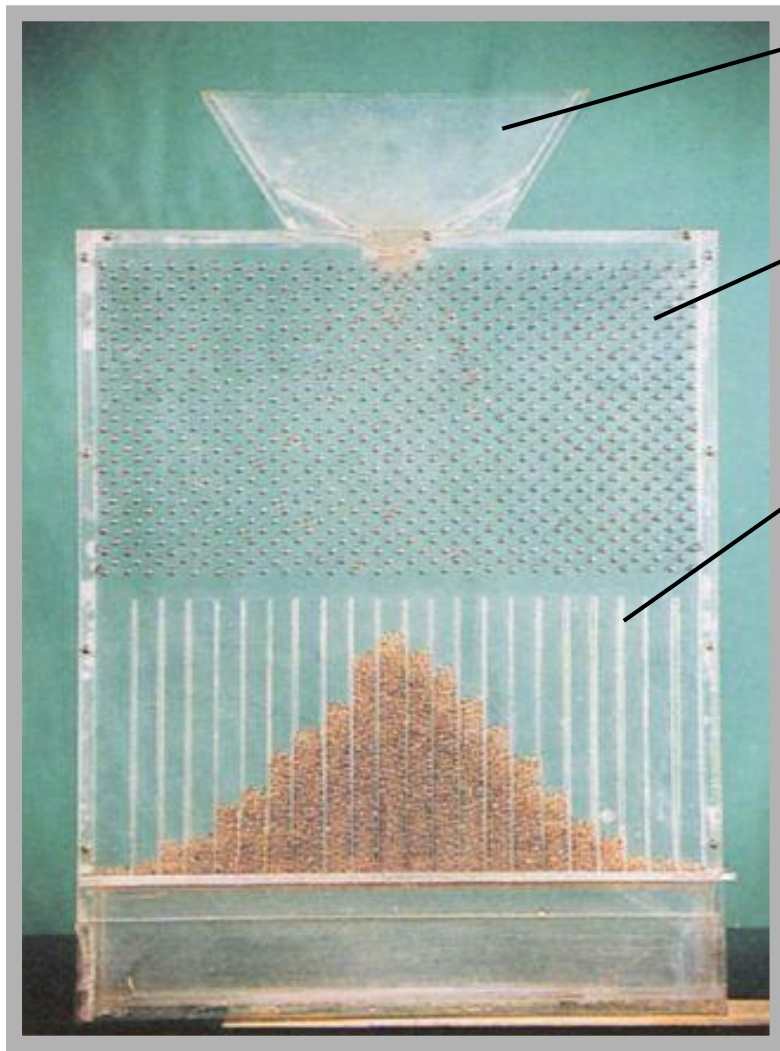
$$\begin{array}{ccc} \lambda & \swarrow & E \\ & h & \\ \nu & \searrow & P \end{array} \quad \begin{array}{l} E = h\nu \\ P = h / \lambda \end{array}$$



频率低波长长的光波动性较明显

频率高波长短的光粒子性较明显

## 伽尔顿板实验



漏斗

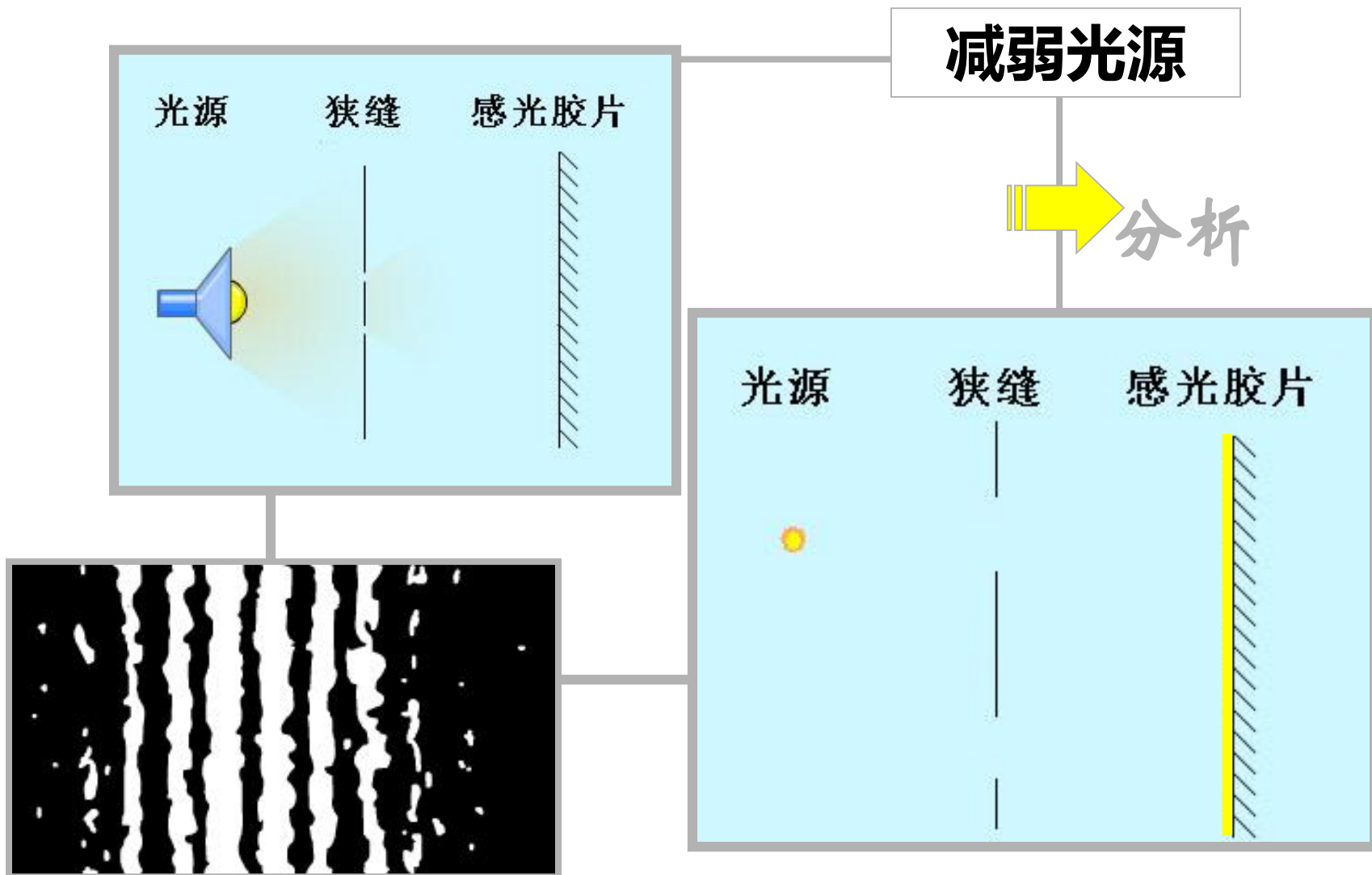
分布均匀的铁钉

用竖直隔板隔成的等宽狭槽

**实验现象：**单个小球下落的位置是不确定的,但是它落在中间狭槽的可能性要大一些，即小球落在中间的概率较大。

**伽尔顿板实验**演示了大量偶然事件的统计规律和涨落现象，阐述了物理学中统计与分布的概念。该演示实验是个理想模型，可以演示**单个粒子随机性**，伽尔顿板也可以演示**大量粒子的统计规律**。

# 单光子的杨氏双缝干涉实验



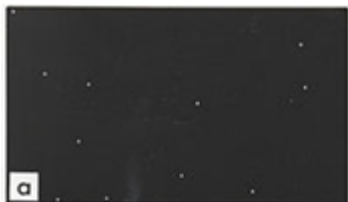


# 单光子的杨氏双缝干涉实验

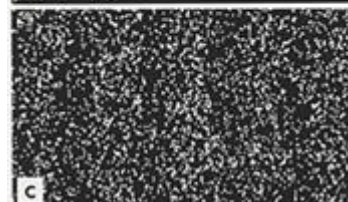
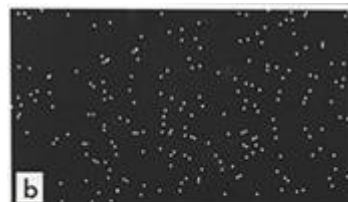
短

曝光时间

长



显示了光的粒子性



光子落在某些条形区域内的可能性较大（干涉加强区），说明光子在空间各点出现的可能性的概率可以用波动规律进行解释。



当光源和感光胶片之间不可能同时有两个和多个光子时，长时间曝光得到的照片仍然和光源很强、曝光时间较短时一样，则光的波动性不是光子之间的相互作用引起的。



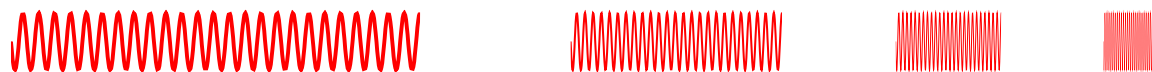
# de Broglie的物质波

- de Broglie将Einstein的光量子概念推广，提出了物质波的概念(1924年)
- 所有的波都具有粒子性
- 所有的粒子都具有波动性
- $\lambda = h / p$
- $p = mv / (1 - v^2/c^2)^{1/2}$
- 不能将物质的运动和波的传播分开。



Prince Louis-victor de  
Broglie  
1892-1987

- 宏观粒子的波动性
- 如果波长太小，用现有仪器无法分辨物理量的周期性变化



宏观微粒

$$p = mv = (1 \times 10^{-6} \text{ kg})(1 \times 10^{-6} \text{ m/s}) = 1 \times 10^{-12} \text{ Js/m}$$
$$\lambda = h / p = 6.63 \times 10^{-34} \text{ Js} / (1 \times 10^{-12} \text{ Js/m}) \approx 10^{-22} \text{ m}$$

22. 热核爆炸中火球的温度可达 $10^7\text{K}$ ,

(1) 求辐射最强的波长;

(2) 这种波长的光子能量是多少?

24. 铝的脱出功是  $4.2\text{eV}$ , 用波长为  $200\text{nm}$  的光照射铝表面,

(1) 求铝的截止波长。

(2) 光电子的最大初动能。

(3) 求截止电压。

(4) 如果入射光强是 $2.0\text{W/m}^2$ , 阴极面积是 $1\text{m}^2$ , 光束垂直照射阴极, 那么饱和电流最大是多少?

25. 能量为  $0.41\text{MeV}$  的 X 射线光子与静止的自由电子碰撞, 反冲电子的速度为 $0.6c$ , 求散射光的波长和散射角。