

第八章 光的量子性和激光

第二节 光的波粒二象性和光电探测

8.2 光的波粒二象性和光电探测

8.2.1 光电效应及其解释

8.2.2 康普顿效应

8.2.3 光的波粒二象性

* 8.2.4 光电效应的应用

8.2.1 光电效应及其解释

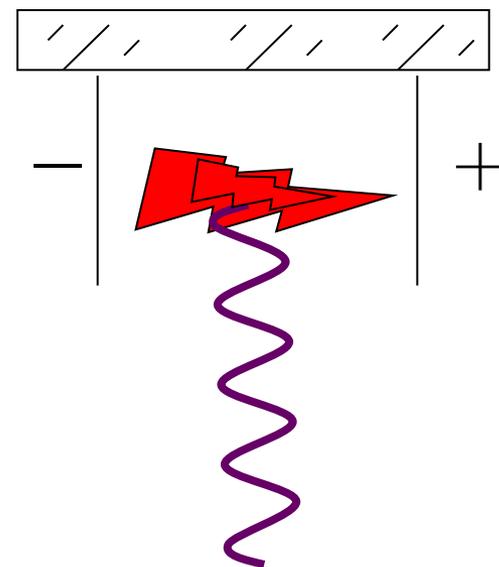
光电效应的发现

- 在光的照射下，材料的电性质发生变化
- 1839年，Alexandre Edmond Becquerel注意到了在导电液体中的电极，受到光的照射，会产生电流。
- 1873年，英国的电力工程师Willoughby Smith (1828~1891) 也发现硒在光照下会成为电的导体。
- 现代意义上的光电效应是赫兹在1887年进行电磁波实验过程中发现的。

8.2.1 光电效应及其解释

赫兹对光电效应的实验

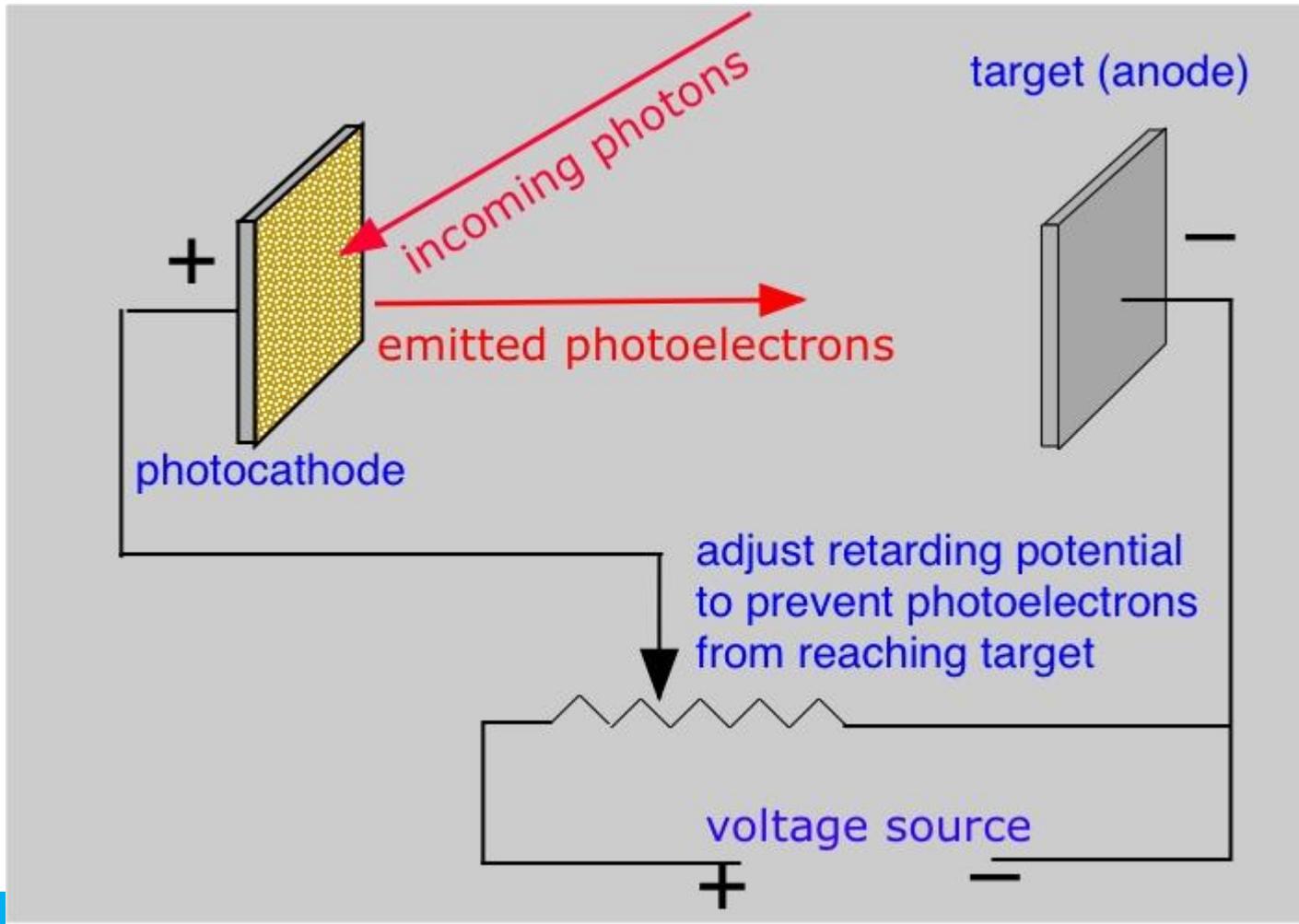
- 一对电火花隙放在一个带有玻璃观察窗的暗盒中
- 放电时，两极间火花的长度变短了，将玻璃板移开之后，电极间的火花又变长了。用石英代替普通玻璃板后，火花的长度则没有缩短。
- 赫兹认为，紫外辐射会导致电荷在电火花隙间跳跃，即会导致电荷产生



8.2.1 光电效应及其解释

1899年汤姆孙用克鲁克丝管观察光电效应

光照在金属上，使电子从金属中脱出的现象。



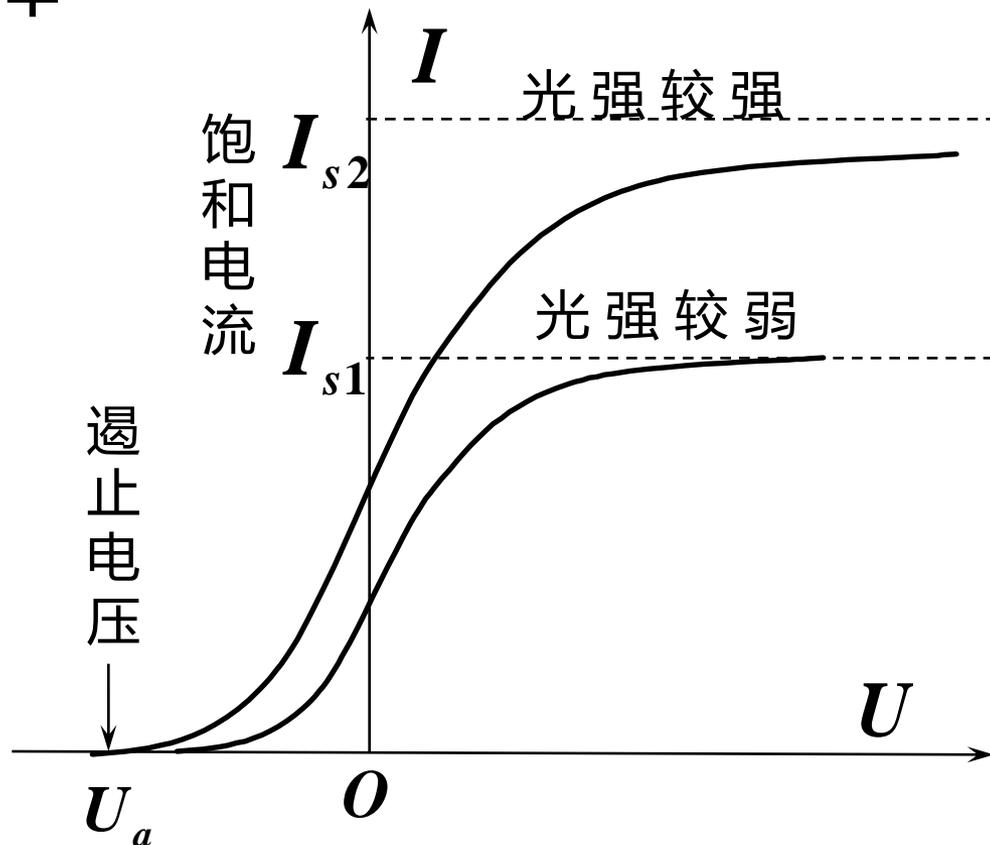
8.2.1 光电效应及其解释

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。

8.2.1 光电效应及其解释

光电效应的实验现象

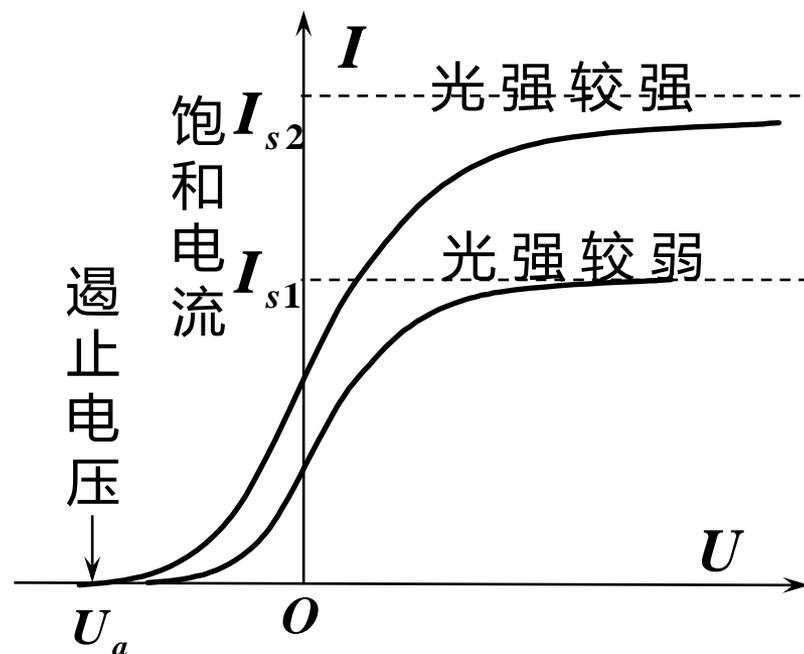
3、存在截止频率（红限）

对于给定的金属，当照射光频率 ν 小于某一数值 ν_0 （称为红限）时，无论照射光多强都不会产生光电效应。 ν_0 被称为某种金属的**红限频率**（或截止频率）， ν_0 和金属有关，不同的金属 ν_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，从光照射到光照射到电子出现只需要 10^{-9}s 的时间。

结论：光电效应的产生**几乎无需时间的累积**。



8.2.1 光电效应及其解释

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。

8.2.1 光电效应及其解释

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 $6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$

ν — 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：

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

几种金属的逸出功

逸出功与材料有关

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

8.2.1 光电效应及其解释

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。

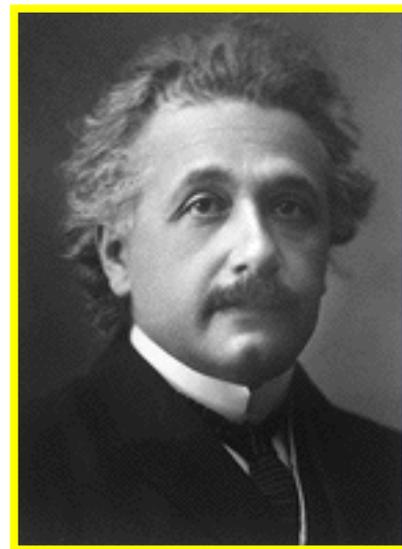
(2) 电子只要吸收一个光子就可以从金属表面逸出，所以无须时间的累积。

(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。

8.2.1 光电效应及其解释

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)

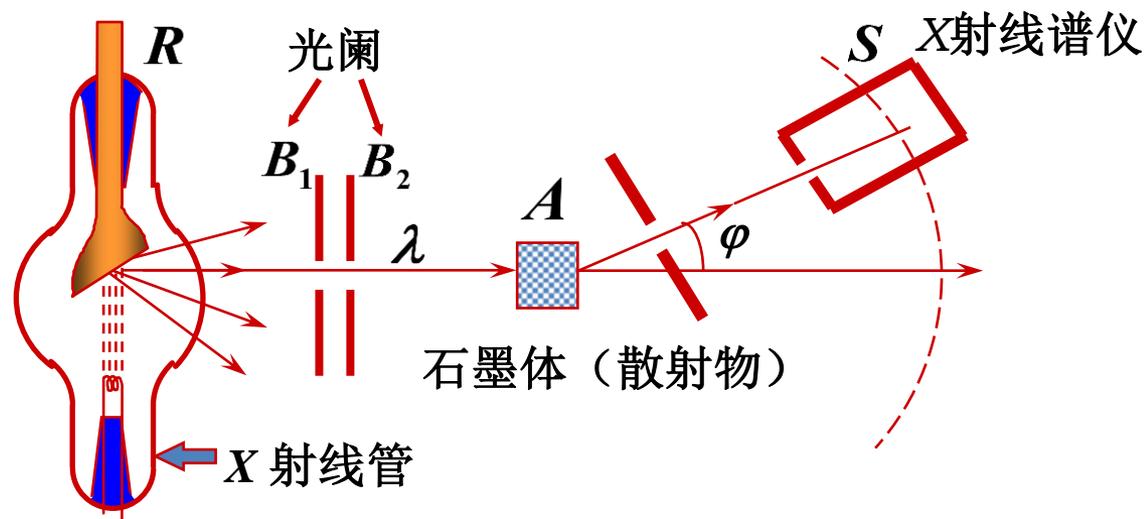
美国物理学家

1923年诺贝尔物理学奖

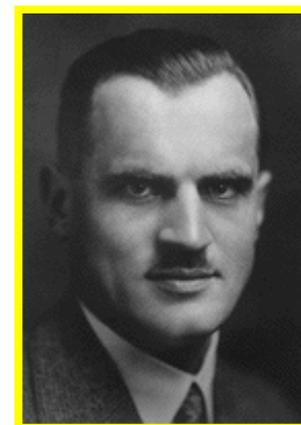
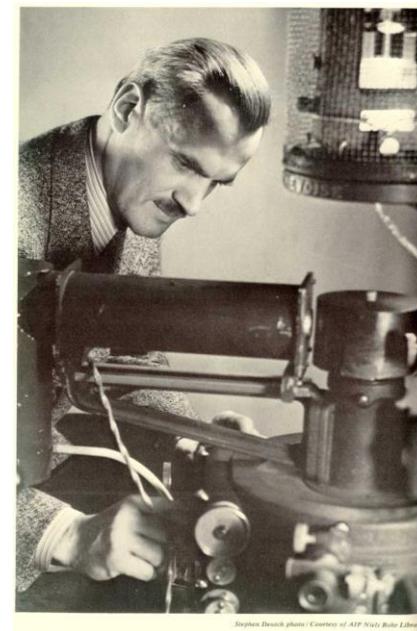
8.2.2 康普顿效应

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

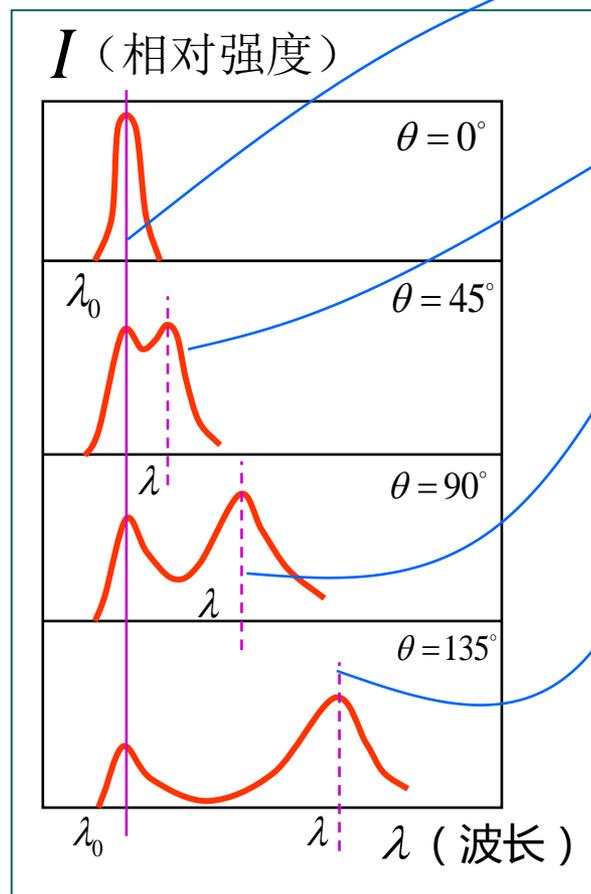


A.H.Compton

(1892-1962)美国物理学家
1927诺贝尔物理学奖

8.2.2 康普顿效应

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。

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

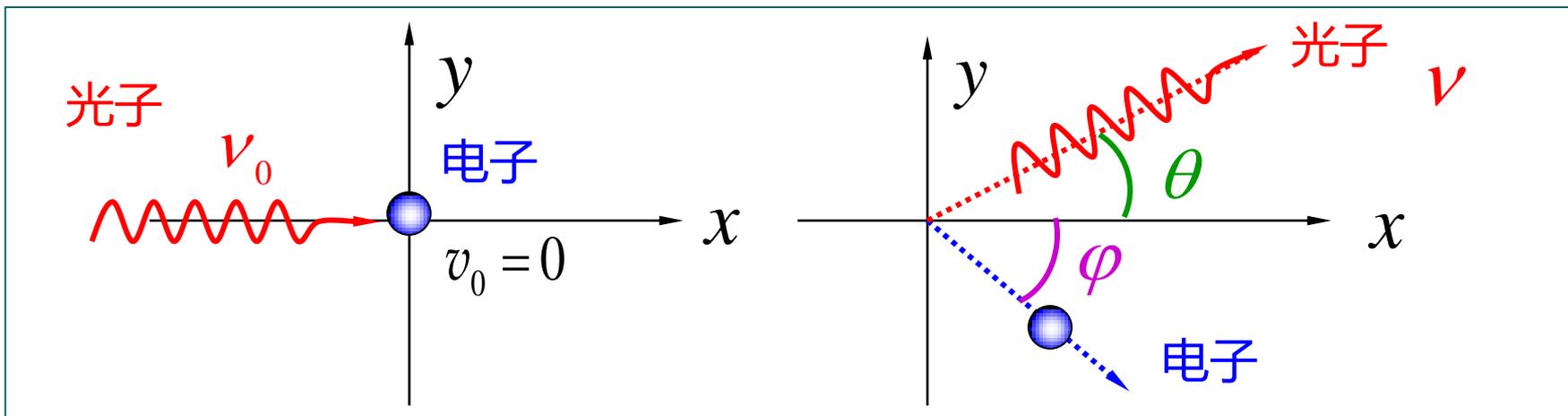
- (3) $\Delta\lambda$ 与散射物质无关，但 λ_0 (λ) 成分随散射物原子序数增加而增加 (减少)。

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。

8.2.2 康普顿效应

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 γ 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。

8.2.2 康普顿效应

康普顿散射现象的量子解释

(2) 理论分析

能量守恒

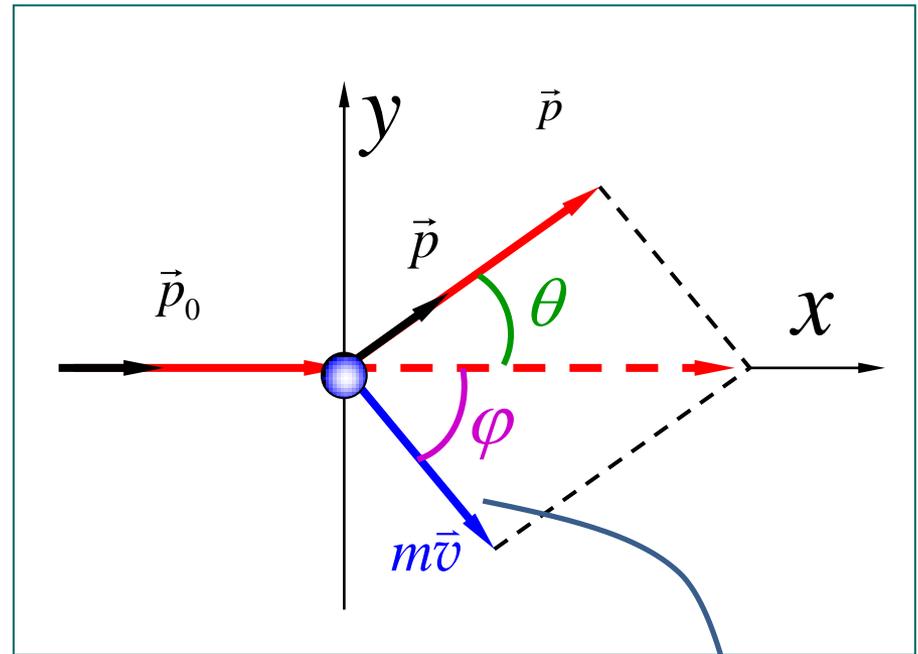
$$h\nu_0 = h\nu + \frac{1}{2}m\nu^2$$

动量守恒

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

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

令 $\Delta\nu = \nu_0 - \nu$ 可得到 $\nu^2 = 2h\Delta\nu / m$



电子的动量

8.2.2 康普顿效应

康普顿散射现象的量子解释

(2) 理论分析 (续)

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

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

8.2.1 光电效应及其解释

康普顿散射现象的量子解释

(3) 结论

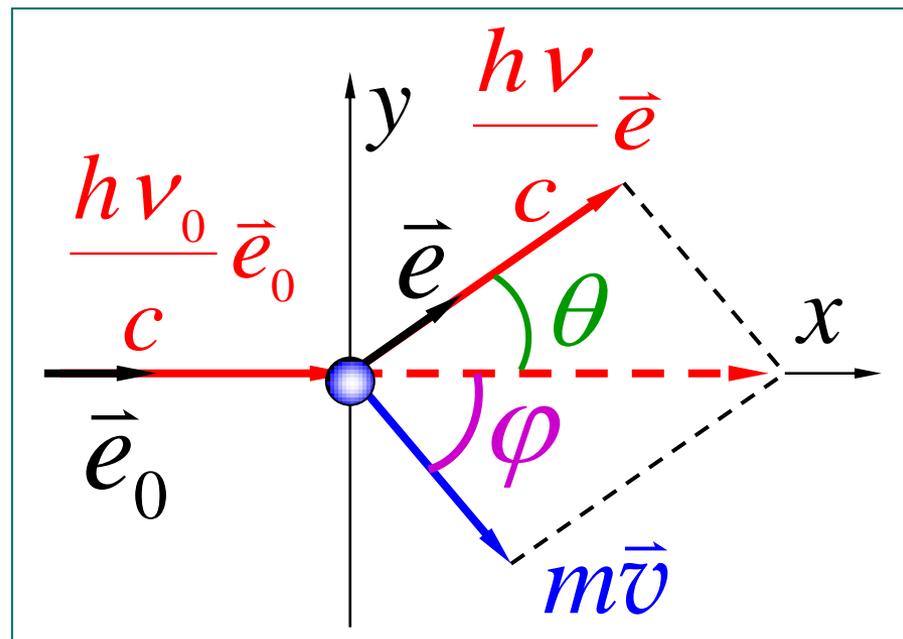
◆ 散射光波长的改变量 $\Delta\lambda$ 仅与 θ 有关

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

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

◆ 散射光子能量减小

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



8.2.1 光电效应及其解释

康普顿散射现象的量子解释

(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 θ 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.

8.2.2 康普顿效应

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° 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

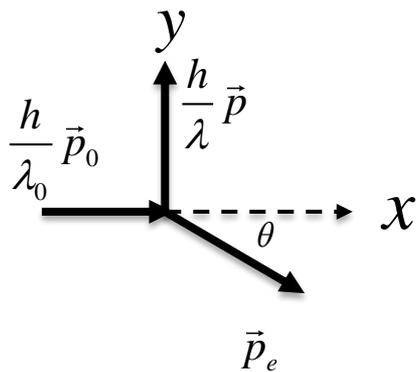
$$E_k = h\nu_0 - h\nu = hc \left(\frac{1}{\lambda_0} - \frac{1}{\lambda} \right) = \frac{hc\Delta\lambda}{\lambda_0\lambda}$$

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

8.2.2 康普顿效应

例题

设电子动量为 P_e ，根据动量守恒定律 $\frac{h}{\lambda_0} \vec{p}_0 = \frac{h}{\lambda} \vec{p} + \vec{p}_e$



已知 \vec{p}_0 与 \vec{p} 夹角为 90° ，设 P_e 与 \vec{p}_0 夹角为 θ ，则

$$\frac{h}{\lambda_0} \vec{p}_0 = \frac{h}{\lambda} \vec{p} + \vec{p}_e$$

两式平方相加并开方，得

$$\frac{h}{\lambda_0} \vec{p}_0 = \frac{h}{\lambda} \vec{p} + \vec{p}_e = \frac{\left[(0.1 \times 10^{-10})^2 + (0.124 \times 10^{-10})^2 \right]^{1/2}}{0.1 \times 10^{-10} \times 0.124 \times 10^{-10}} \times 6.63 \times 10^{-34} = 8.5 \times 10^{-23} \text{ kg.m/s}$$

$$\cos \theta = \frac{h}{p_e \lambda_0} = \frac{6.63 \times 10^{-34}}{8.5 \times 10^{-23} \times 0.1 \times 10^{-10}} = 0.78 \quad \theta = 38^\circ 44'$$

8.2.2 康普顿效应

吴有训先生对研究康普顿效应的贡献

- ◆ 1923年,参加了发现康普顿效应的研究工作。
- ◆ 1925—1926年,吴有训用银的X射线 ($\lambda_0 = 5.62\text{nm}$) 为入射线, 以15种轻重不同的元素为散射物质, 在同一散射角 ($\varphi = 120^\circ$) 测量各种波长的散射光强度, 作了大量 X 射线散射实验, 对证实康普顿效应作出了重要贡献。



吴有训

(1897-1977)

1924年与康普顿合作发表《经过轻元素散射后的钨Ka射线的波长》

8.2.2 康普顿效应

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 γ 射线波段。

8.2.3 光的波粒二象性

光的波粒二象性

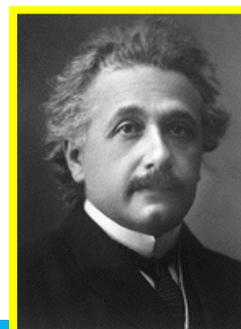
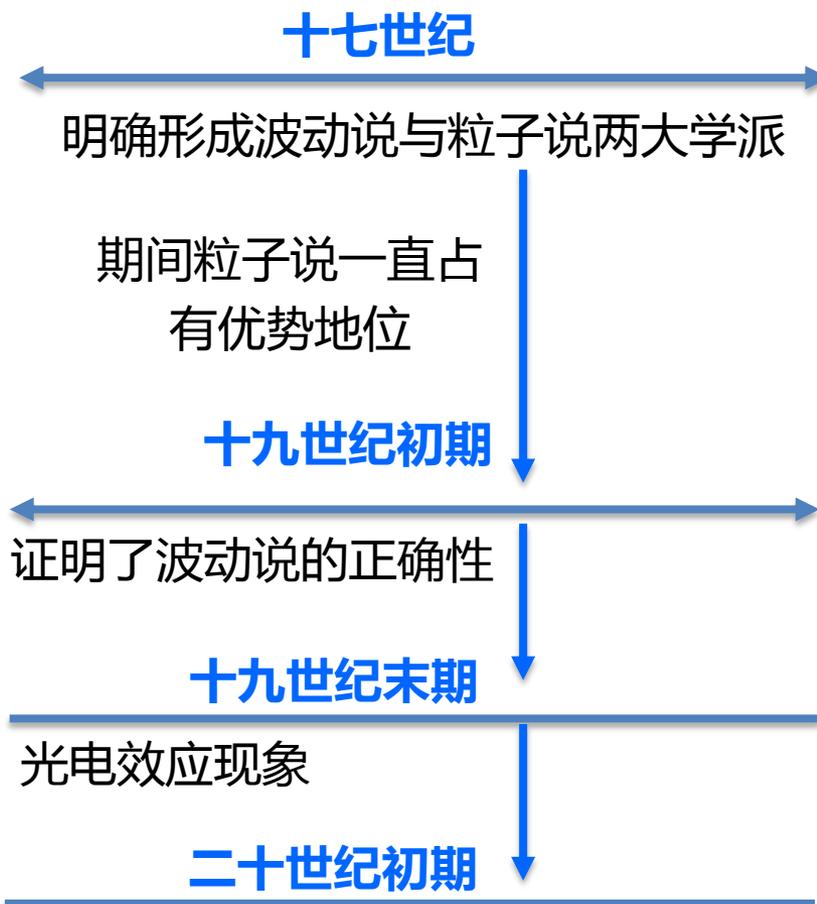
回顾光的粒子性与波动性的发展



牛顿
粒子说



惠更斯
波动说



爱因斯坦
光子说

爱因斯坦提出光子说：光具有粒子特性
(此“粒子”非彼“粒子”)

8.2.3 光的波粒二象性

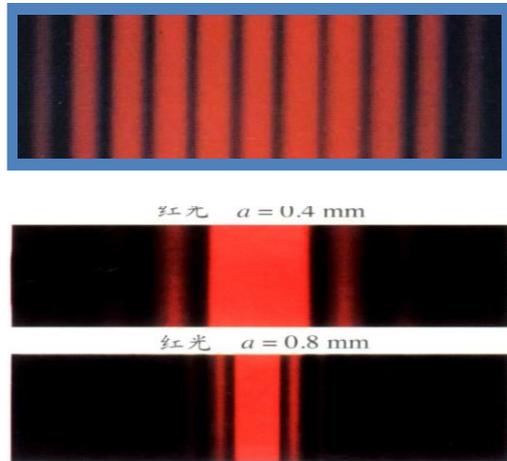
光的波粒二象性的描述和特点

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。

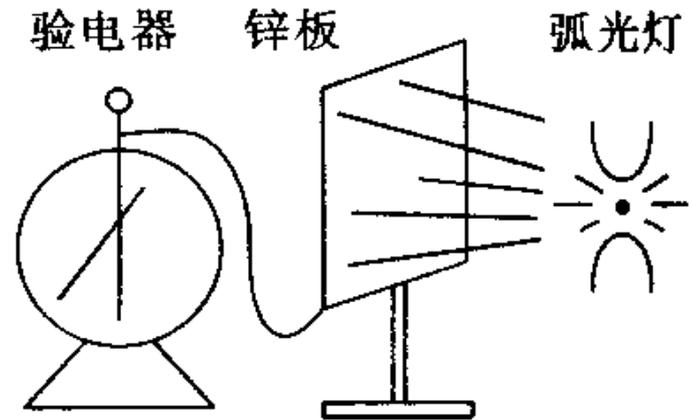
波动性：干涉、衍射、偏振。

粒子性：光电效应、康普顿散射。

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



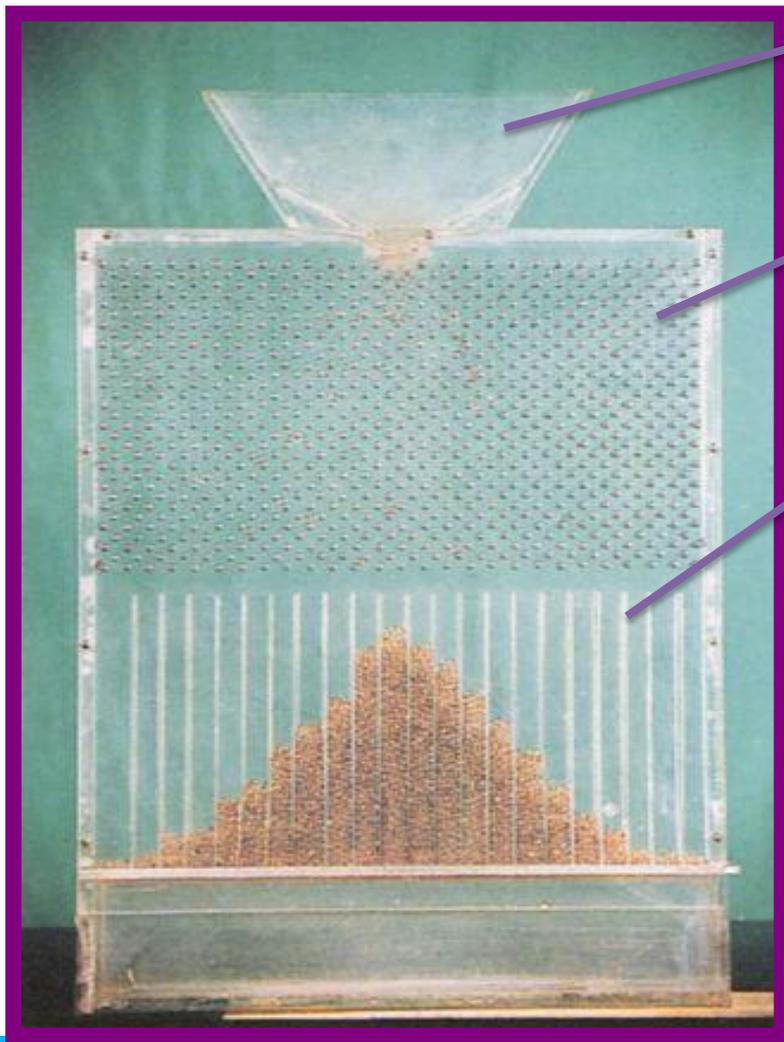
频率低波长长的光波动性较明显



频率高波长短的光粒子性较明显

8.2.3 光的波粒二象性

伽尔顿板实验



漏斗

分布均匀的铁钉

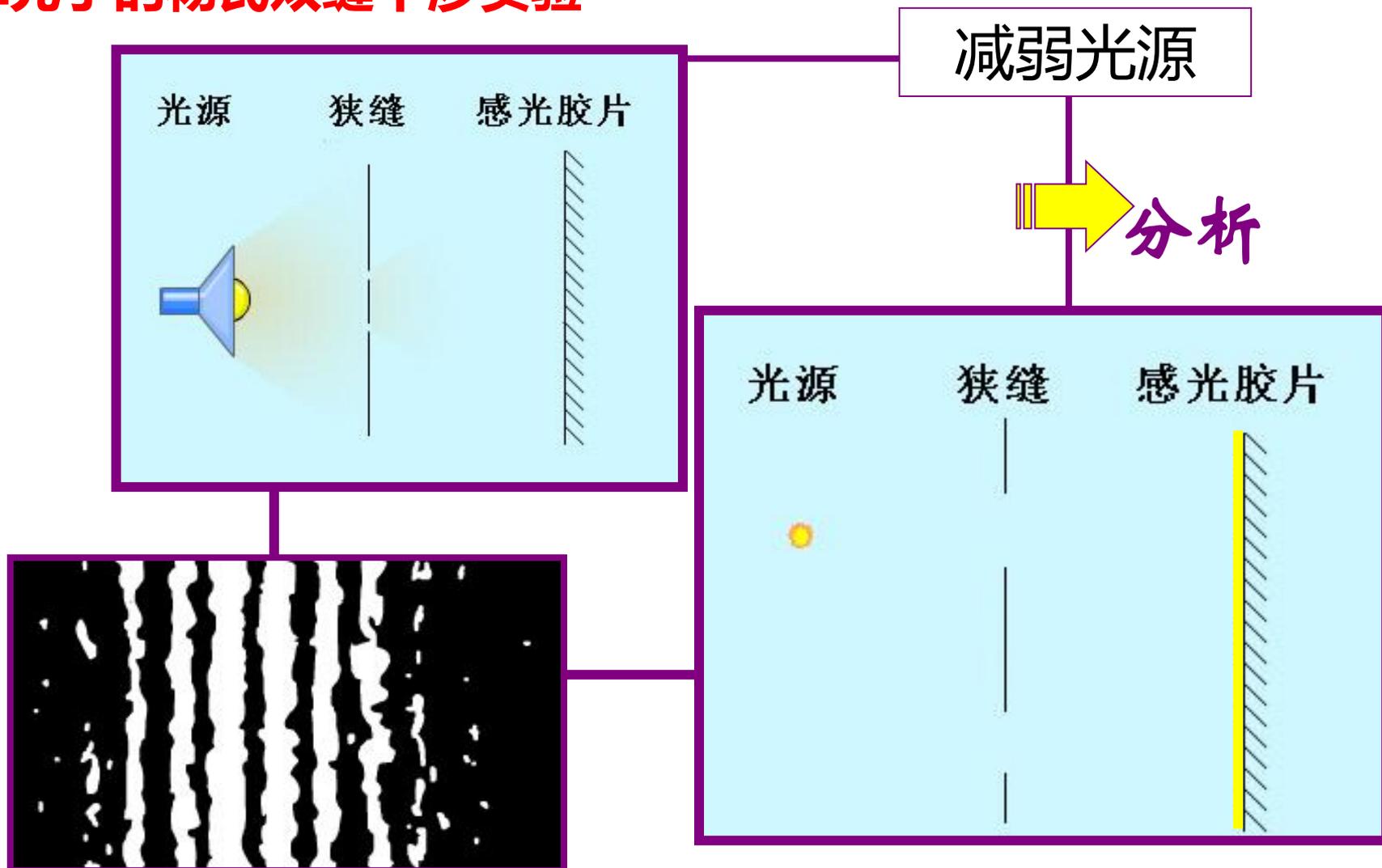
用竖直隔板隔成的等宽狭槽

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**。

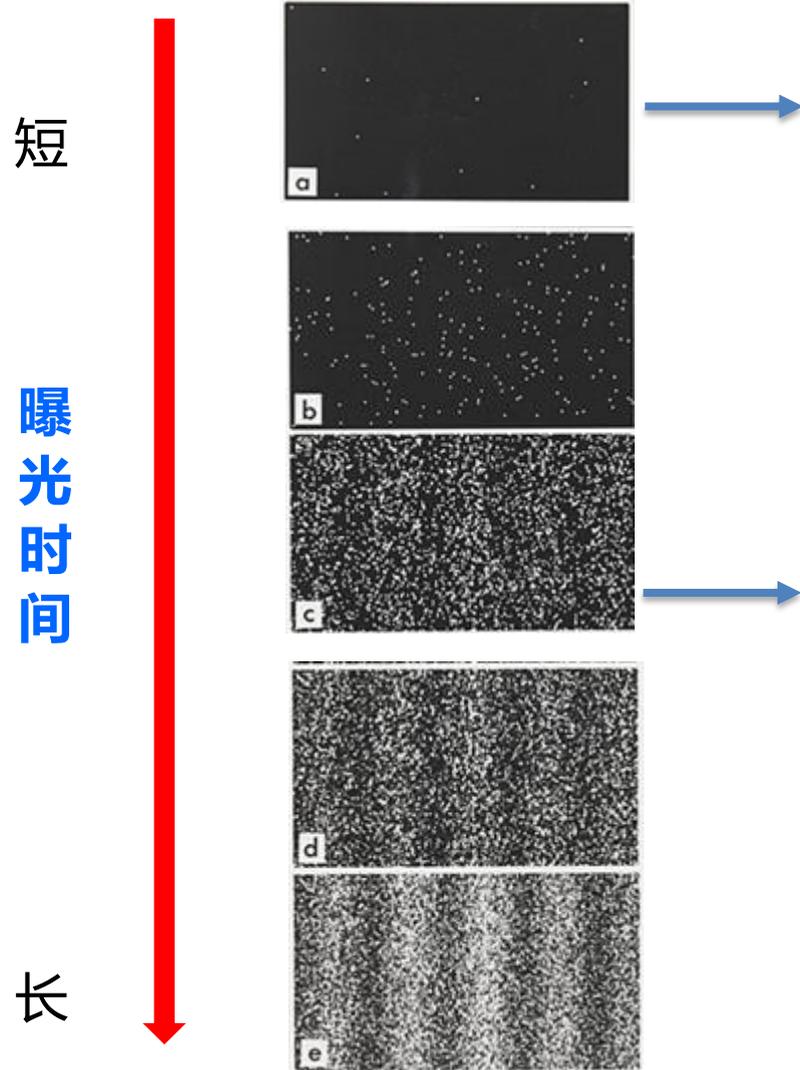
8.2.3 光的波粒二象性

单光子的杨氏双缝干涉实验



8.2.3 光的波粒二象性

单光子的杨氏双缝干涉实验



显示了光的粒子性

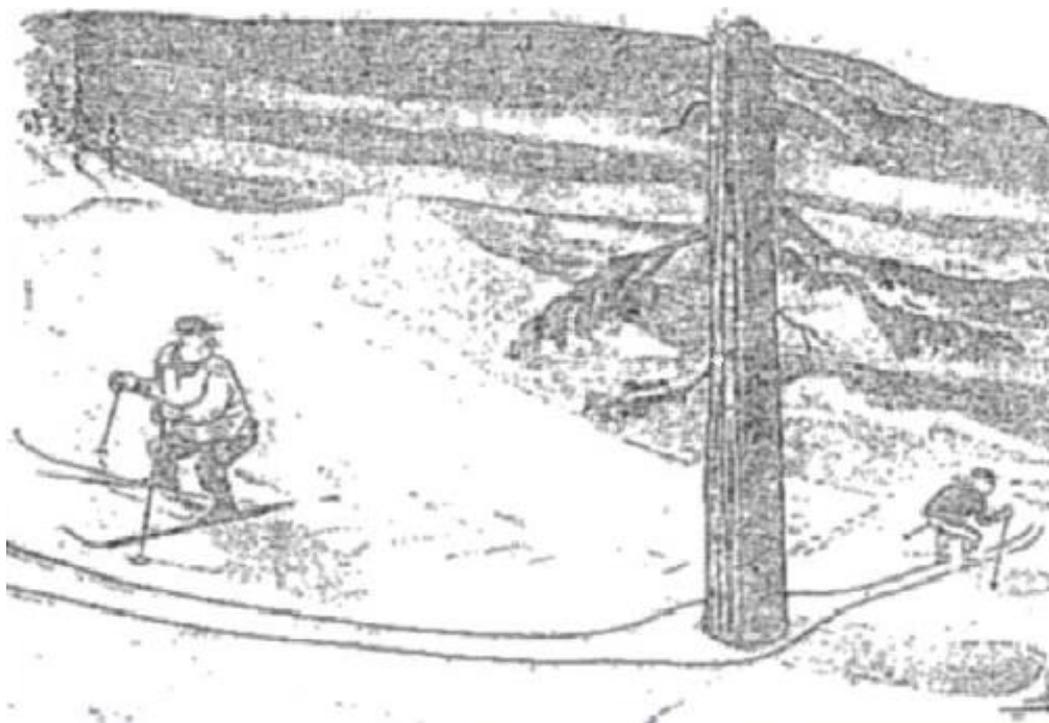
光子落在某些条形区域内的可能性较大（干涉加强区），说明光子在空间各点出现的可能性的概率大小（概率）可以用波动规律进行解释。

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。

8.2.3 光的波粒二象性

单电子的杨氏双缝干涉实验的解释

几率波—微观粒子的位置不确定性。

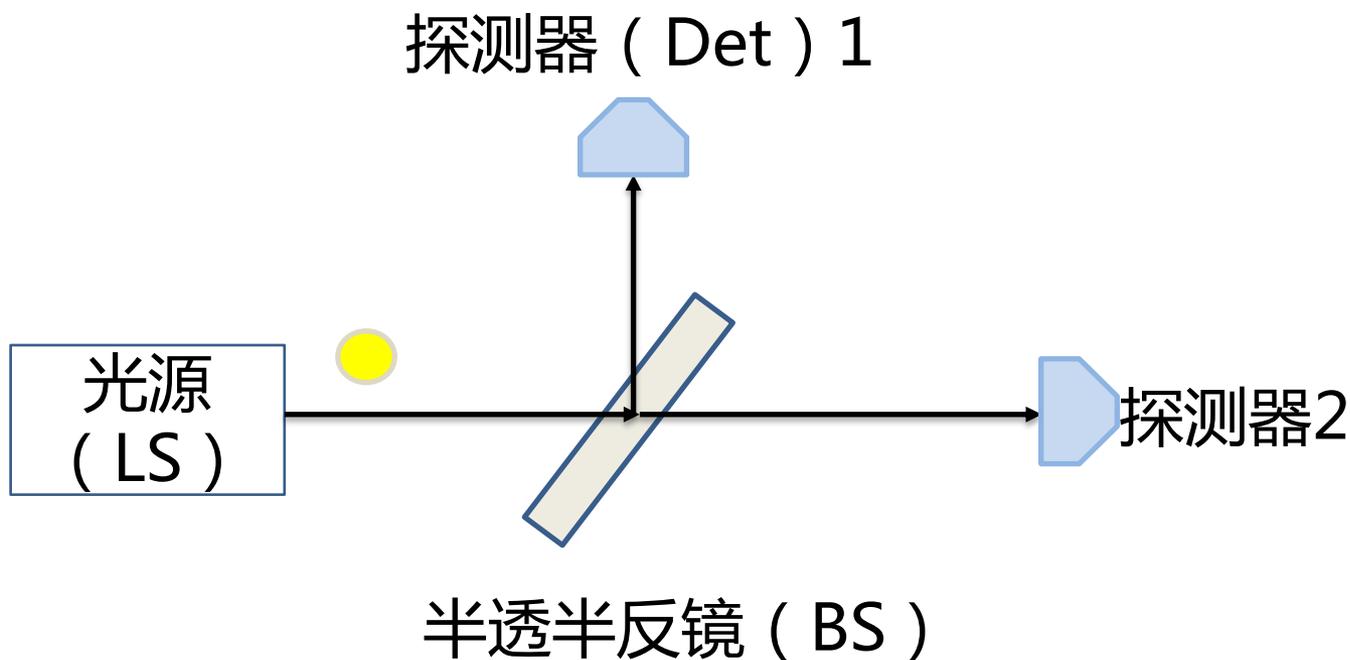


干涉是振幅的相干叠加。

几率幅—几率的振幅。

8.2.3 光的波粒二象性

对于单个光子叠加特性的进一步实验



实验装置1：一个光子通过半透半反镜

8.2.3 光的波粒二象性

德布罗意波

德布罗意波（物质波）：德布罗意的假设实物粒子也具有波动性，其波长为

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv} \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

微观粒子的德布罗意波用波函数来描述。

德布罗意在诺贝尔奖颁奖典礼的演讲中说： 1929年获诺贝尔物理学奖

“我的研究始终围绕着这个思想，对于物质和辐射（尤其是光），必须同时引入粒子的概念和波的概念，即在任何情况下粒子的存在必然伴随着波动，因此，必须首先建立起粒子运动和波动传播之间的对应关系。”



Louis Victor de Broglie
法国物理学家（1892-1987）

8.2.3 光的波粒二象性

1927年第五届索尔维会议



海森堡

布拉格

狄拉克

薛定谔

泡利

波恩

波尔

德拜

普朗克

居里夫人

洛伦兹

爱因斯坦

朗之万

本节重点

- (1) 光电效应的现象及其解释（理解、计算）
- (2) 康普顿效应及其解释（理解、计算）
- (3) 光的波粒二象性（理解）

作业

p290-1,2,3,5,7

重排版

p.470: 1,2,3,5,7