

#### 关键人物与新理论 ➤ 普朗克能量子理论

- > 爱因斯坦光量子理论
- ① 光是以光速运动的光子流
- ② 每个光子能量  $E = hv = \frac{hc}{\lambda}$ ,  $p = mc = \frac{E}{c} = \frac{h}{\lambda}$
- ③ 光强即光的能流密度 I = Nhv

N:单位时间通过垂直于 $\vec{c}$ 单位面积的光子个数

光与物质相互作用的基本形式

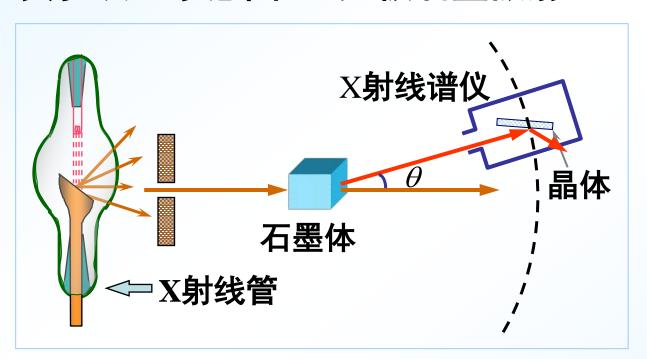
光电效应——光子理论的提出康普顿效应电子偶效应
光子理论的应用和检验

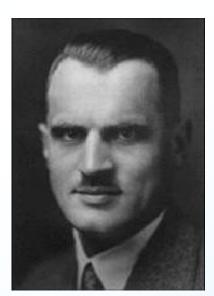


### 康普顿效应(康普顿散射)

#### 一、康普顿效应 (Compton effect)

实验装置示意图: X光被石墨散射





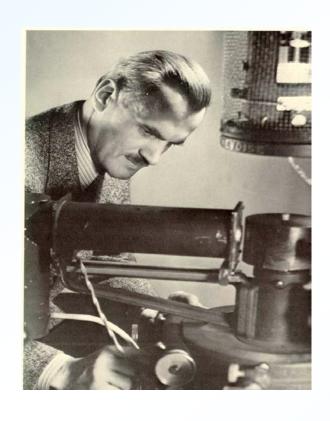
Arthur H. Compton 1892-1962

散射光谱中除有波长 $\lambda_0$ 的射线(瑞利散射)外, 还有  $\lambda > \lambda_0$  的射线(康普顿散射)

The Nobel Prize in Physics 1927

#### 经典理论无法解释康普顿效应

》据经典电磁波理论,当电磁波通过物质时,物质中带电粒子将作受迫振动,其频率等于入射光频率,即它所发射的散射光频率应等于入射光频率:  $\Delta \lambda = 0$ 



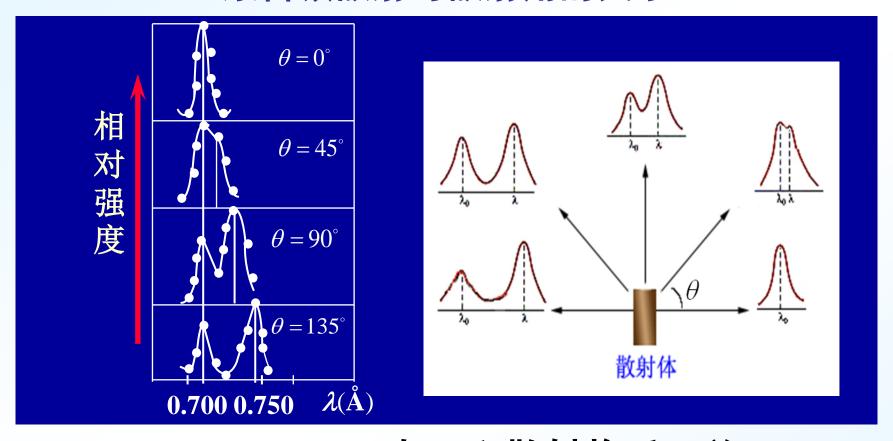
#### 实验规律:

① 散射光

原波长心成分一瑞利散射

 $\lambda > \lambda_0$ 成分 — 康普顿散射

#### 康普顿散射与散射角的关系



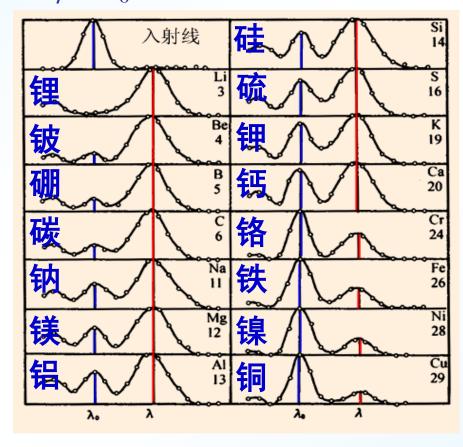
② 波长改变量  $\Delta\lambda$   $\left\{ \begin{array}{ll} 5\lambda_0 & \text{和散射物质无关} \\ -2 & \text{只与散射方向} \theta \end{array} \right.$ 

 $\theta \uparrow : \Delta \lambda \uparrow ; I_{\lambda_0} \downarrow, I_{\lambda} \uparrow$ 

# 同一散射角下 $I_{\lambda}/I_{\lambda_0}$ 随散射物质的变化



吴有训 (1897-1977) 1926年发表



③ 原子量越小的物质, 康普顿散射强度越大  $\theta$ 一定,  $\Delta\lambda$ 一定, 轻元素散射  $\frac{I_{\lambda}}{I_{\lambda}}$  较大

#### 二、康普顿效应的光量子解释(1923年)

- 1. 基本思想
- : X射线(光子流)和散射物质相互作用情况与散射物质种类无关
- · 光子 电子 碰撞 非弹性碰撞 相互作用 完全非弹性碰撞

完全非弹性碰撞:光子被电子吸收,电子能量增加; 当电子能量足够大时,成为光电子逸出. 即光电效应 > 弹性碰撞

光子 → 内层电子 束缚强 光子 → 原子

m < < M 光子能量不变  $\Delta \lambda = 0$  瑞利散射

光子→ 外层电子 束缚弱 光子→"自由电子"

 $\mathcal{L}$ 子能量减少  $\nu \downarrow, \lambda \uparrow$  康普顿散射 电子反冲

原子量越小,物质发生第二种碰撞概率越大,康普顿效应显著.

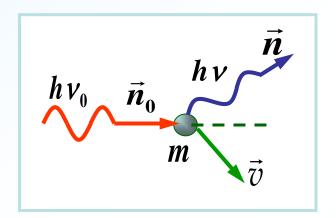
#### 2. 定量计算

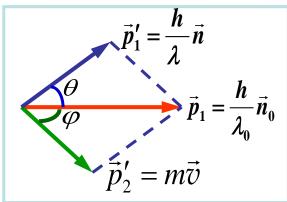
光子能量 >> 自由电子热运动能量,近似按静止自由电子处理

光子 弹性碰撞

静止自由电子

能量守恒 动量守恒

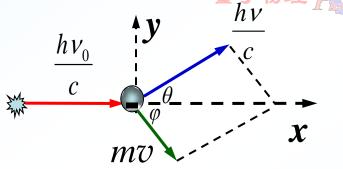




	撞前	撞后
光子	$E_1 = h v_0 = \frac{hc}{\lambda_0} \qquad \vec{p}_1 = \frac{h}{\lambda_0}$	$F_1' = \frac{hc}{\lambda}$ $\vec{p}_1' = \frac{h}{\lambda}\vec{n}$
电子	$E_2 = m_0 c^2 \qquad \vec{p}_2 = 0$	$E_2' = mc^2  \vec{p}_2' = m\vec{v}$

#### 能量守恒:

$$h v_0 + m_0 c^2 = h v + m c^2$$



$$\Delta \lambda = \lambda - \lambda_0 = \frac{h}{m_0 c} (1 - \cos \theta)$$
 **康普顿散射公式**

#### 电子的康普顿波长 (Compton wavelength):

$$\lambda_c = \frac{h}{m_0 c} = \frac{hc}{m_0 c^2} = \frac{1.24 \text{KeV} \cdot \text{nm}}{0.511 \text{MeV}} = 2.43 \times 10^{-12} \text{m}$$
 能量与电子的静能相等的光子的波长

$$\Delta \lambda = \lambda - \lambda_0 = 2\lambda_c \sin^2 \frac{\theta}{2}$$

$$\Delta \lambda = \lambda - \lambda_0 = 2\lambda_c \sin^2 \frac{\theta}{2}$$

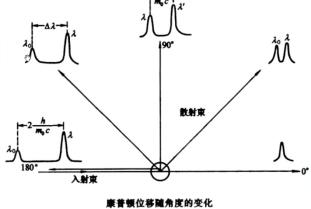
$$\lambda_c = \frac{h}{m_0 c} = 2.43 \times 10^{-3} \text{ nm}$$

- 1) 波长的改变量 $\Delta\lambda$ 与散射角 $\theta$ 有关, 散射角 $\theta$ 越大,  $\Delta \lambda$ 也越大.  $\theta = 0$ 度, 90度, 180度…
  - 2) 波长的改变量 $\Delta\lambda$ 与入射光的波长无关.
- ΔE 与λ紧密相关

$$\begin{cases}
\gamma = \frac{h v_0}{m_0 c^2}; & h v = \frac{m_0 c^2}{1 - \cos \theta + \frac{1}{\gamma}} \\
\Delta E = h v_0 - h v = h v_0 \frac{\gamma (1 - \cos \theta)}{1 + \gamma (1 - \cos \theta)}
\end{cases}$$

#### 4) 康普顿散射与基本常数

$$\Delta \lambda = \frac{h}{m_0 c} (1 - \cos \theta) \Rightarrow h, c, m_\theta$$
 已知两个,可测另一个



#### 理论结果与实验相符

- > 证明了爱因斯坦光子理论的正确性.
- > 证明了能量守恒、动量守恒定律的普适性.
- > 证明相对论效应在宏观、微观均存在.



# 比较用X光( $\lambda_1 = 0.5$ Å)和紫光( $\lambda_2 = 4000$ Å) 入射, $\theta = \pi$ 时康普顿散射的情况。

解: 波长改变量相同 
$$\Delta \lambda = 2\lambda_c \sin^2 \frac{\theta}{2} = 0.048 \text{ Å}$$

对X光 
$$\frac{\Delta \lambda}{\lambda_1} = \frac{0.048}{0.5} = 9.6 \%$$

对紫光 
$$\frac{\Delta \lambda}{\lambda_2} = \frac{0.048}{4000} = 0.0012 \%$$

: 入射光能量较低( $\lambda >> \lambda_c$ ) 时, 康普顿效应不显著,

将主要观察到光电效应  $(\nu > \nu_0)$ .

例1. 在康普顿效应中,入射光子的波长为3×10<sup>-3</sup>nm, 反冲电子的速度为光速的60%,求散射光子的波长和散射角.

解: 
$$hv + m_0c^2 = hv' + mc^2$$
 
$$\frac{hc}{\lambda} + m_0c^2 = \frac{hc}{\lambda'} + \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}c^2$$

$$\lambda' = 4.34 \times 10^{-12} \,\mathrm{m}$$

$$\Delta \lambda = \lambda' - \lambda = \frac{2h}{m_0 c} \sin^2 \frac{\theta}{2}$$

$$\theta = 65.7^{\circ}$$

例2. 波长为  $\lambda_0 = 0.01$ nm的X射线与自由电子发生碰撞, 若从与入射线成90°角的方向观察散射线, 求: (1)散射线的波长; (2) 反冲电子的动能; (3) 反冲电子的动量.

解: (1) 在 $\theta = 90^{\circ}$ 方向观测到的散射光波长有:

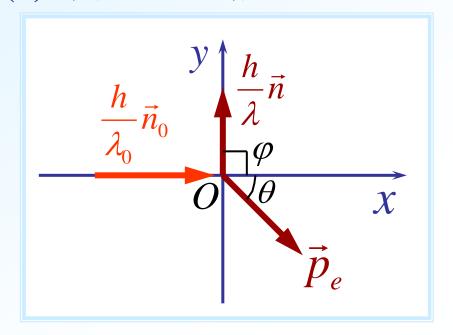
$$\lambda_0 = 0.1 \text{ A}$$

$$\lambda = \lambda_0 + \Delta \lambda = \lambda_0 + 2\lambda_c \sin^2 \frac{\theta}{2} = 0.124 \text{ Å}$$

(2) 反冲电子动能即光子损失的能量

$$E_{k} = hc(\frac{1}{\lambda_{0}} - \frac{1}{\lambda}) = \frac{hc\Delta\lambda}{\lambda\lambda_{0}} = 3.8 \times 10^{-15} J$$
$$= 2.4 \times 10^{4} eV$$

#### (3) 反冲电子动量



#### 由动量守恒定律:

$$\begin{cases} p_e \cos \theta = \frac{h}{\lambda_0} \\ p_e \sin \theta = \frac{h}{\lambda} \end{cases}$$

$$\begin{cases} p_e = 8.5 \times 10^{-23} & \text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1} \\ \theta = 38^{\circ} 44' \end{cases}$$

思考:在康普顿散射实验中,自由电子能不能只吸收入射光子而不发射散射光子?

#### 光与物质相互作 用的基本形式

光电效应 康普顿效应 电子偶效应

#### 三、电子偶效应

1.高能光子与重元素原子核相撞,转变为电子偶

实验: 
$$\gamma + Ze \rightarrow Ze + e^+ + e^ \gamma \rightarrow e^+ + e^-$$

条件:  $h\nu > 2m_0c^2 = 1.02 \text{MeV}$ 

$$\lambda_{\text{max}} = 0.012 \text{ Å (硬 X 射线,} \gamma 射线)$$

2. 正负电子相遇时湮没、产生两个光子

实验: 
$$e^+ + e^- \rightarrow \gamma_1 + \gamma_2$$

1956年,美国的柯温、赖因斯用电子偶湮没过程成功证实中微子的存在,获诺贝尔物理奖1995年

## 光与物质三种相互作用比较

		<u>,                                      </u>		
	사라차다	康普顿效应	电子偶效应	
	光电效应		产生	湮 没
光子	$h \nu \geq A$	$hv \ge 10^5 \text{eV}$	$h\nu \ge 1.02 \text{MeV}$	$h \nu \ge 0.51 \text{MeV}$
	可见光、紫外线	软 X 射线 0.1-10nm	硬 X 射线、 0.01-0.1nm、	γ 射线 <0.01nm
物质粒子	束缚电子	自由电子、弱束缚电子	重原子核	自由正负电子
物理过程	完全非弹性碰撞;光子被吸收,电子逸出.	弹性碰撞; 光子被散射, 电子反冲	光子转化为 电子偶	电子偶转化为光子对

#### 四、光的波粒二象性 (wave-particle dualism)

#### 爱因斯坦《论我们关于辐射本质和组成观点的发展》

"象人们已经知道的那样,光的干涉、衍射现象表明对于把光看成是一种波动,看来是难以怀疑的.而不容否认的是有这样一类关于辐射的事实表明,光具有某些基本属性,这些属性用光的发射论点比光的波动观点好得多."

"两种特性结构,波动结构和量子结构都应当适合于辐射,而不应当认为彼此不相容.理论物理发展的随后一个阶段将给我们带来这样一种光学理论,它可以是光的波动论和发射论的某种综合,需要建立一个既能描述辐射的波动结构,又能描述辐射的量子结构的数学理论."

光的性质 不同侧面 波动性: 突出表现在传播过程中

(干涉、衍射)

粒子性:突出表现在与物质相互作用中 (光电效应、康普顿效应、电子偶效应)

单纯用

波动

均不能完整地描述光的性质

无法用经典语言准确建立光的模型

光: 既不是经典波,又不是经典粒子

光子: 用量子力学描述

#### 光子的量子力学模型

能量: 
$$E = hv = \frac{hc}{\lambda} = mc^2$$

动量: 
$$p = mc = \frac{E}{c} = \frac{hv}{c} = \frac{h}{\lambda}$$

质量: 
$$m = \frac{E}{c^2} = \frac{h}{c\lambda}$$

静质量:  $m_0 = 0$ 

#### "波粒二象性"

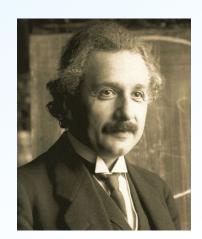
借用经典"波"和 "粒子"术语,但 既不是经典波,又 不是经典粒子.

$$\left\{ \begin{array}{l} I \propto A^2 \\ I \propto N \end{array} \right\} N \propto A^2$$

振幅越大,表示光子数越多, 光子到达该处概率越大

—— 概率波

关键人物 历史贡献



爱因斯坦 光量子→光电效应 验证光量子理论



康普顿 吴有训

1. 实验规律 2. 经典电磁波理论的困难

3. 光子理论成功解释光电效应、康普顿效应

复习: § 13.3

练习: 思考题 14-7、8, 习题 14-9~ 14-11

预习: §13.4