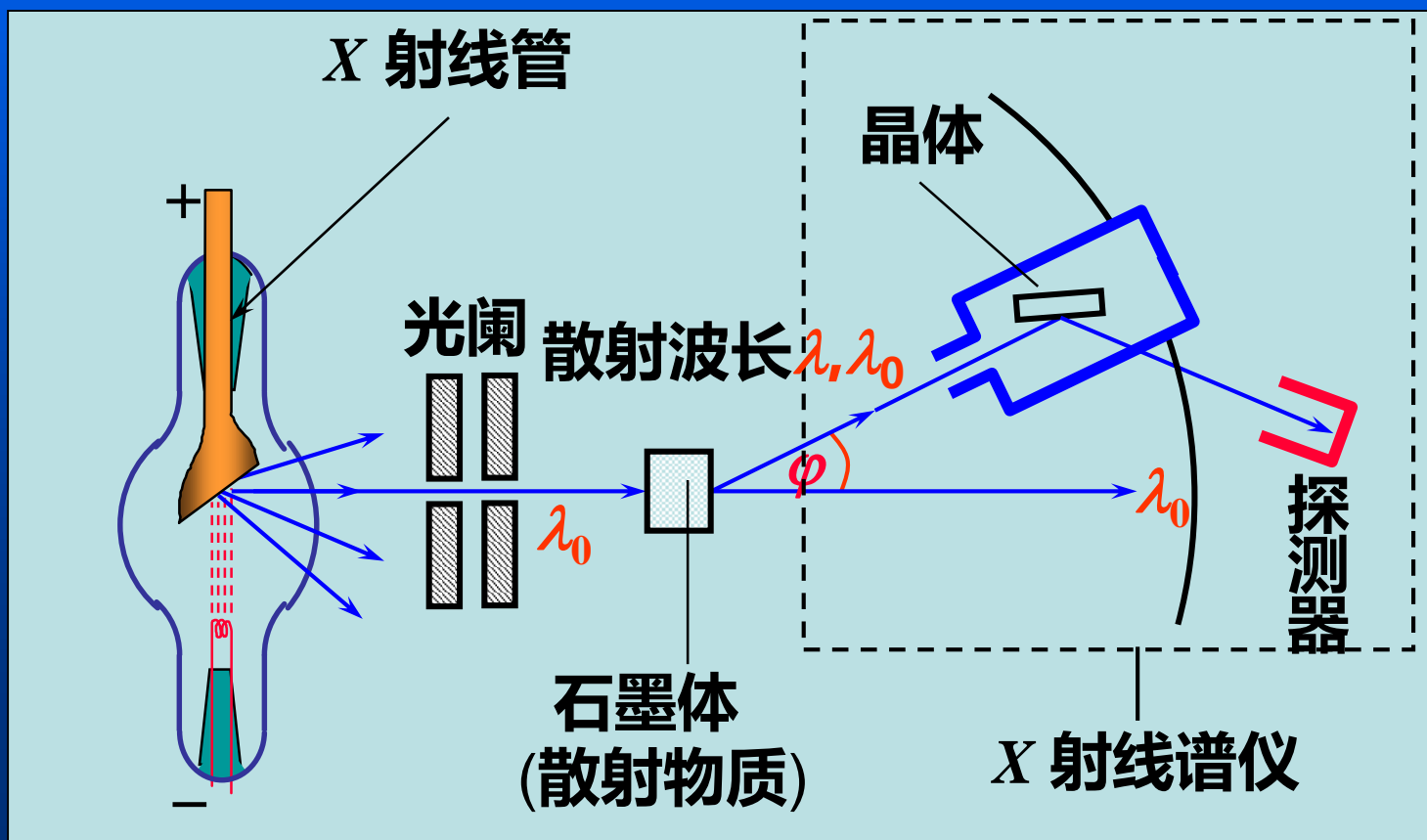
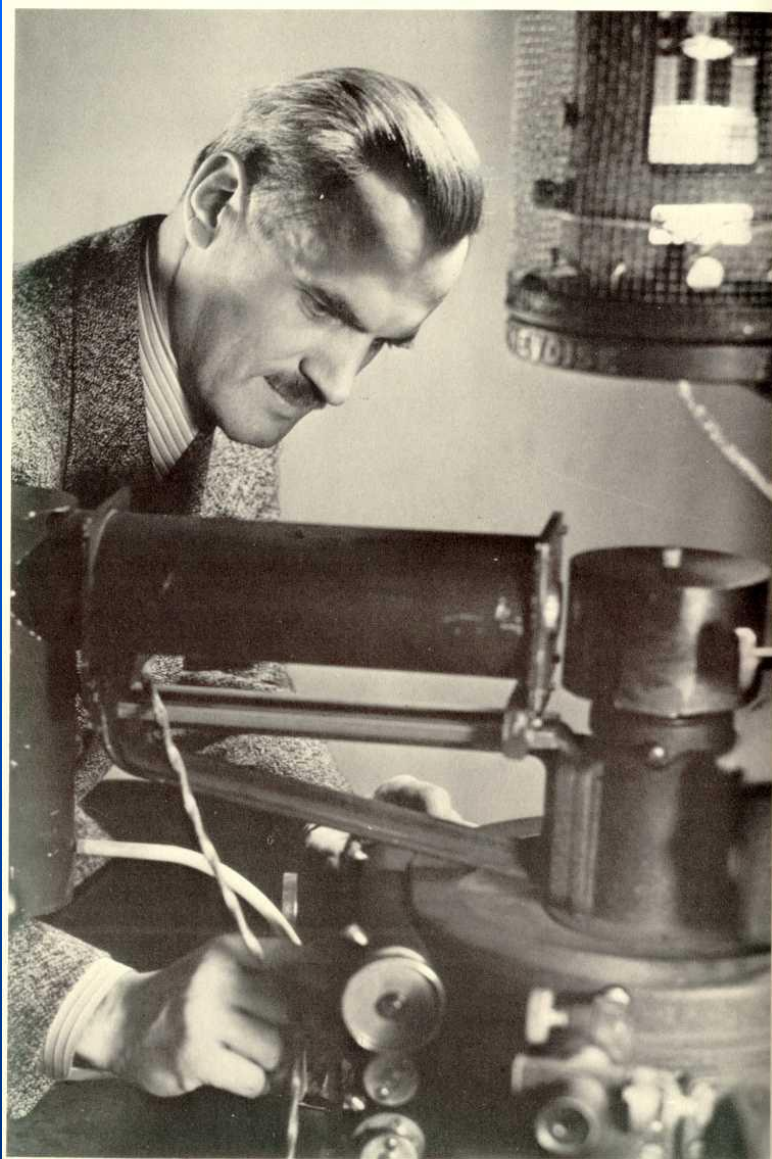


§ 9.3 康普顿效应 (Compton Effect)

1922~23年的康普顿散射是光显示出其粒子性的又一著名实验。

一. 康普顿散射的实验装置与规律:





Stephen Deutch photo / Courtesy of AIP Niels Bohr Library

康普顿正在测晶体 对X射线的散射

按经典电磁理论：
如果入射X光是某
种波长的电磁波，
散射光的波长是
不会改变的！

散射中出现 $\lambda \neq \lambda_0$ 的现象，称为康普顿散射。

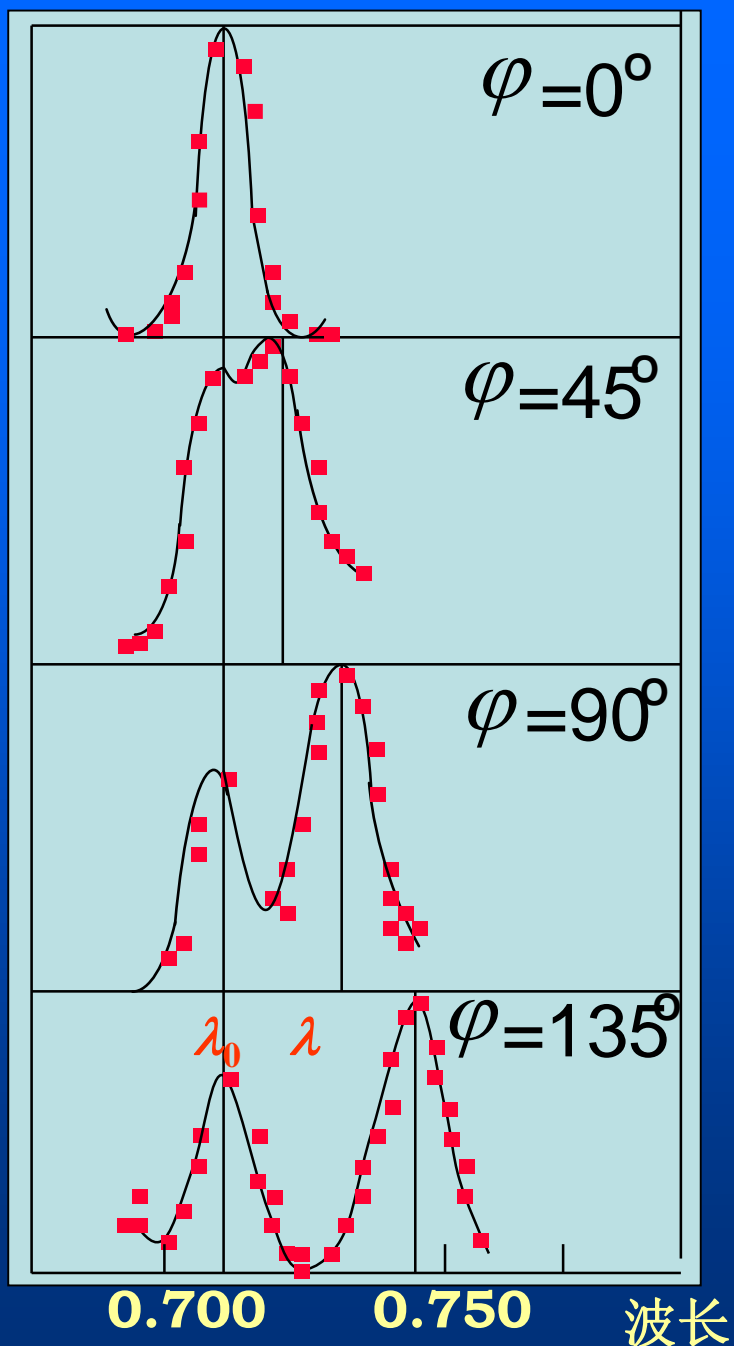
康普顿散射曲线的三个特点：

1. 除原波长 λ_0 外出现了移向长波方向的新的散射波长 λ 。

2. 新波长 λ 随散射角的增大而增大。
波长的偏移为

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

3. 当散射角增大时，原波长的谱线强度降低，而新波长的谱线强度升高。



波长的偏移只与散射角 φ 有关，而与散射物质种类及入射的X射线的波长 λ_0 无关，

$$\begin{aligned}\Delta\lambda &= \lambda - \lambda_0 \\ &= \lambda_c (1 - \cos \varphi)\end{aligned}$$

$$\lambda_c = 0.0241\text{\AA} = 2.41 \times 10^{-3}\text{nm} \quad (\text{实验值})$$

称为电子的Compton波长

只有当入射波长 λ_0 与 λ_c 可比拟时，康普顿效应才显著，因此要用X射线才能观察到康普顿散射，用可见光观察不到康普顿散射。

二. 对康普顿散射的解释

定性分析:

- X 射线光子与“静止”的“自由电子”发生碰撞。

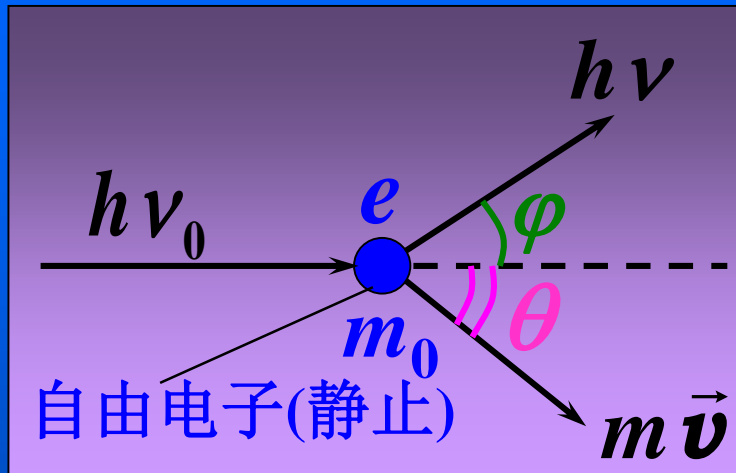
X 光的光子能量很大, 波长 1\AA 的 X 射线, $\varepsilon \sim 10^4 \text{ eV}$

石墨中的外层电子在原子中结合较弱, 束缚能 $\sim \text{eV}$,
在室温下的热运动能量 $kT \sim 10^{-2} \text{ eV}$, 可认为
这些电子是静止的自由电子。

- X 射线的光子与静止的自由电子之间是弹性碰撞,
并假设在碰撞过程中能量守恒, 动量守恒。

光子把部分能量传给了电子, 光子能量
减小, 频率变小, 因而波长变长。

定量计算：按能量与动量守恒定律应有



$$h\nu_0 + m_0c^2 = h\nu + mc^2$$

$$\frac{h}{\lambda_0} \vec{n}_0 = \frac{h}{\lambda} \vec{n} + m \vec{v}$$

解出的波长偏移
(推导见书)：

$$\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0 = \frac{h}{m_0c} (1 - \cos\varphi)$$

$$= 0.0243(1 - \cos\varphi)$$

和实验结果符合得很好！

讨论:

- ◆ 为什么 $\Delta\lambda$ 与散射物的种类无关?

散射物中的电子都看成自由电子了。

- ◆ 为什么在散射线中还观察到有与原波长的射线?

光子与石墨中和原子核束缚很紧的内层电子的碰撞，应看做是光子和整个原子的碰撞。

$$\because m_{\text{原子}} \gg m_{\text{光子}}$$

\therefore 弹性碰撞中，入射光子几乎不损失能量，
即 散射光子波长不变。

- ◆ 为什么，用可见光做散射实验，观察不到波长的偏移现象?

($\Delta\lambda$ 最大为 0.0482; 是可见光的 $\sim 10^{-5}$)

- ◆ 为什么康普顿效应中的自由电子不能像光电效应那样吸收光子而是散射光子？

因为自由电子若吸收光子，就无法同时满足能量守恒和动量守恒。若静止的自由电子吸收光子，

$$\left. \begin{aligned} h\nu_0 + m_0c^2 &= mc^2 \\ \frac{h\nu_0}{c} \hat{n}_0 &= m\mathbf{v}\hat{n}_0 \\ m &= m_0 / \sqrt{1 - v^2/c^2} \end{aligned} \right\} \Rightarrow 1 - \frac{v}{c} = \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \\ \Rightarrow \mathbf{v} = c \quad \text{不可能}$$

∴ 自由电子不可能吸收光子，只能散射光子。

◆为什么在光电效应中只考虑能量守恒，
不考虑动量守恒？

在光电效应中，入射的是可见光和紫外线，
光子能量较低，电子与整个原子的联系不能忽略，

原子也要参与动量交换，
∴ “光子—电子系统” 动量不守恒。

又因原子质量较大，能量的交换可忽略，
∴ “光子—电子系统” 能量仍可认为是守恒的。

三. 康普顿散射实验的意义

- (1) 有力地支持了爱因斯坦“光量子”假设；
- (2) 首次在实验上证实了“光子具有动量”的假设；
- (3) 证实了在微观世界的单个碰撞事件中，动量和能量守恒定律仍然是成立的。

康普顿的成功也不是一帆风顺的，在他早期的几篇论文中，一直认为散射光频率的改变是由于“混进来了某种荧光辐射”；在计算中起先只考虑能量守恒，后来才认识到还要用动量守恒。

康普顿于1927年获诺贝尔物理奖。

§ 9.4 粒子的波动性

(The Wave Nature of Matter)

自然界在许多方面都是明显对称的。既然光具有波粒二象性，那么实物粒子，如电子，是否也应具有波粒二象性？

一. 德布洛意假设

1. 德布洛意假设（1924年）

从自然界的对称性出发, 认为: 既然光(波)具有粒子性, 那么实物粒子也应具有波动性。

11月29日德布洛意把题为“量子理论的研究”的博士论文提交巴黎大学

实物粒子具有波动性



L.V. de Broglie

(法, 1892-1986)

1929年获诺贝尔物理奖

和光子一样，实物粒子的能量 ϵ 和动量 p 跟和它相联系的波的频率 ν 和波长 λ 的关系为：

$$\left. \begin{aligned} E &= h\nu & \nu &= \frac{E}{h} = \frac{mc^2}{h} \\ p &= \frac{h}{\lambda} & \lambda &= \frac{h}{p} = \frac{h}{mv} \end{aligned} \right\} \text{爱因斯坦—德布罗意关系式}$$

与粒子相联系的波称为物质波或德布罗意波，

λ — 德布罗意波长

朗之万把德布洛意的文章寄给爱因斯坦，爱因斯坦称赞说：

“揭开了自然界巨大帷幕的一角”

“瞧瞧吧，看来疯狂，可真是站得住脚呢”

经爱因斯坦的推荐，物质波理论受到了关注。

答辩会上有人问：

“这种波怎样用实验来证实呢？”

德布洛意答：

“用电子在晶体上的衍射实验可以做到。”

估算电子的波长： $\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{\sqrt{2mE}}$

设电子动能由 U
伏电压加速产生

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{\sqrt{2meU}} \quad \lambda = \frac{12.25}{\sqrt{U}} (\text{\AA})$$

若 $U=100$ 伏 $\lambda=1.225\text{\AA}$ — X射线波段

2. 实验验证

革末—戴维逊电子散射实验(1927年)，汤姆逊实验（1927年），都观测到电子衍射现象。

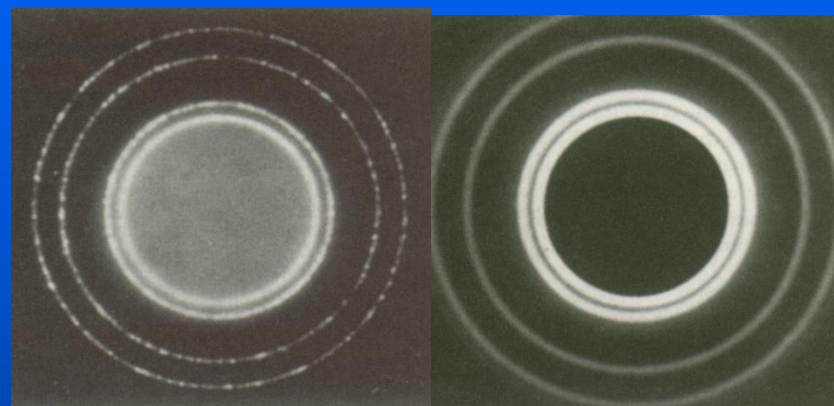
1937年 戴维逊 与
G.P.汤姆逊获诺贝尔
物理奖。

1929年 斯特恩氢分
子衍射

1936年 中子束衍射

最新实验：Zeilinger小
组的 C_{60} 的双缝干涉实
验 (Nature, 401 (1999)
680)

电
子
束



X
射
线

衍射图样 (波长相同)



电子双缝干涉图样



杨氏双缝干涉图样

★一颗子弹、一个足球有没有波动性呢？

质量 $m=0.01\text{kg}$ ，速度 $v=800\text{m/s}$ 的子弹的德布洛意波长为

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv} = \frac{6.63 \times 10^{-34}}{0.01 \times 800} = 8.28 \times 10^{-35} \text{m}$$

因普朗克常数极其微小，子弹的波长小到实验难以测量的程度(足球的波长也是如此)，它们只表现出粒子性，并不是说没有波动性。

$c \rightarrow \infty$: 相对论  牛顿力学

$h \rightarrow 0$: 量子物理  经典物理

$(\lambda \rightarrow 0$: 波动光学  几何光学)

3. 对波粒二象性的理解

如何对波粒二象性正确理解？

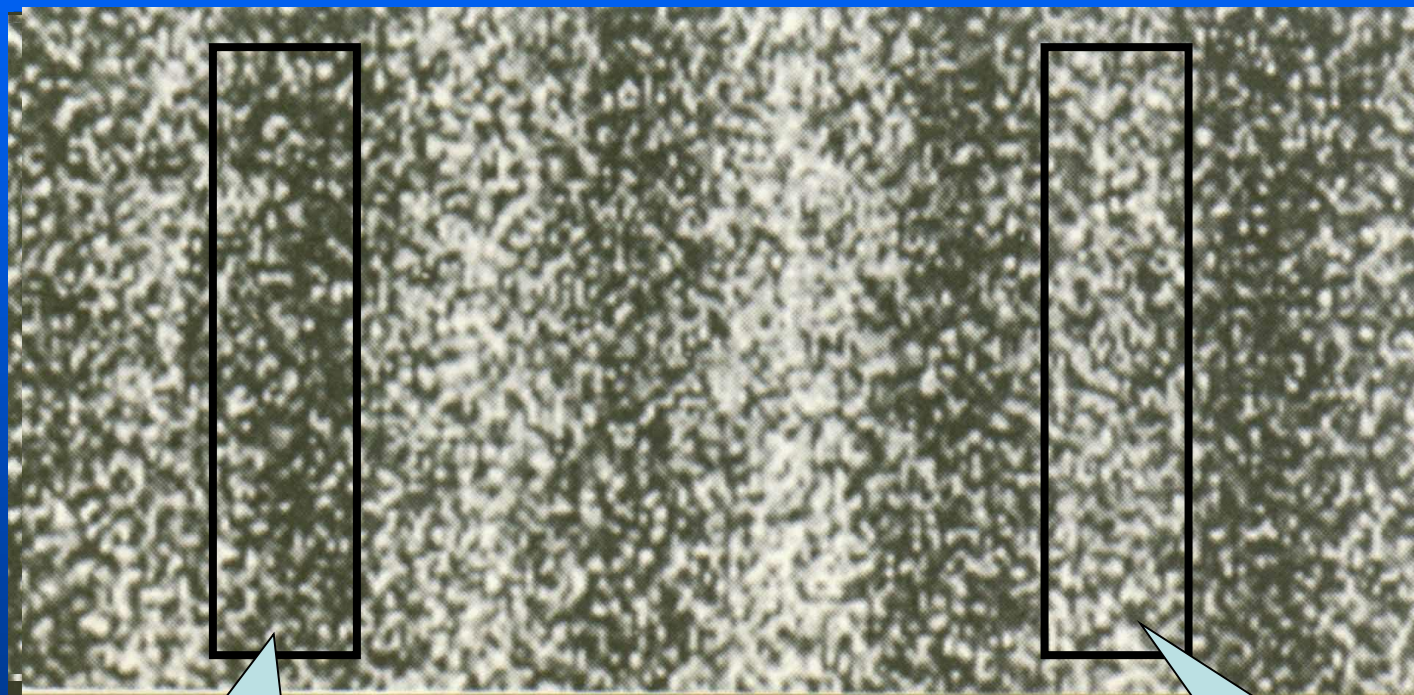
1949年，前苏联物理学家费格尔曼做了一个非常精确的弱电子流衍射实验。

电子几乎是一个一个地通过双缝，
底片上出现一个一个的点子。
(显示出电子具有粒子性)

开始时底片上的点子“无规”分布，随着
电子增多，逐渐形成双缝衍射图样。

单电子双缝衍射实验：

说明衍射图样不是电子相互作用的结果，它来源于单个电子具有的波动性。



电子双缝衍射图样

出现概率小

电子数 $N=70000$

出现概率大

衍射图样对一个电子来说，每个电子到达屏上各点有一定概率，衍射图样是一个电子出现概率的统计结果。

德布洛意波（物质波）也称为**概率波**。

(1) 粒子性

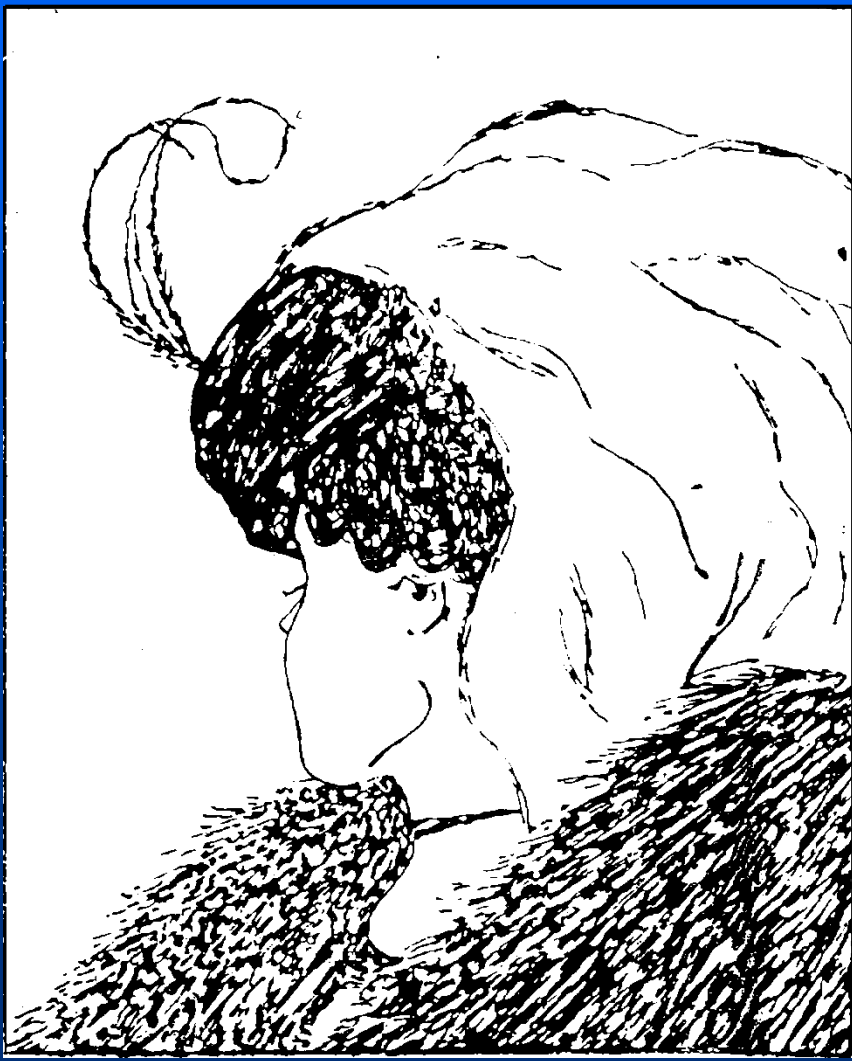
应抛弃“轨道”的概念！

- ◆ 指它与物质相互作用的“颗粒性”或“整体性”。
- ◆ 但不是经典的粒子！因为微观粒子没有确定的轨道

(2) 波动性

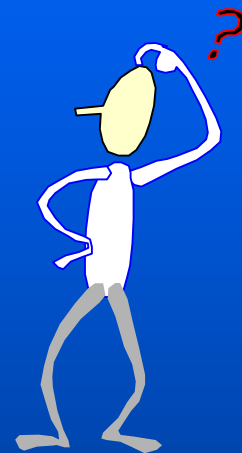
- ◆ 指它在空间传播有“可叠加性”，有“干涉”、“衍射”、“偏振”等现象。
- ◆ 但不是经典的波！因为它没有某种实际物理量（如质点的位移、电场、磁场等）的波动。

微观粒子在某些条件下表现出粒子性，在另一些条件下表现出波动性，而两种性质虽寓于同一体中，却不能同时表现出来。



少女？

老妇？



两种图象不会同时出现在你的视觉中。