

量子力学的诞生

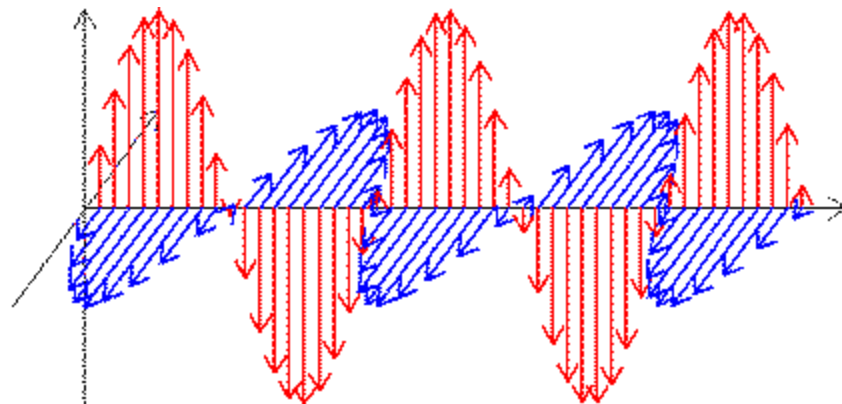
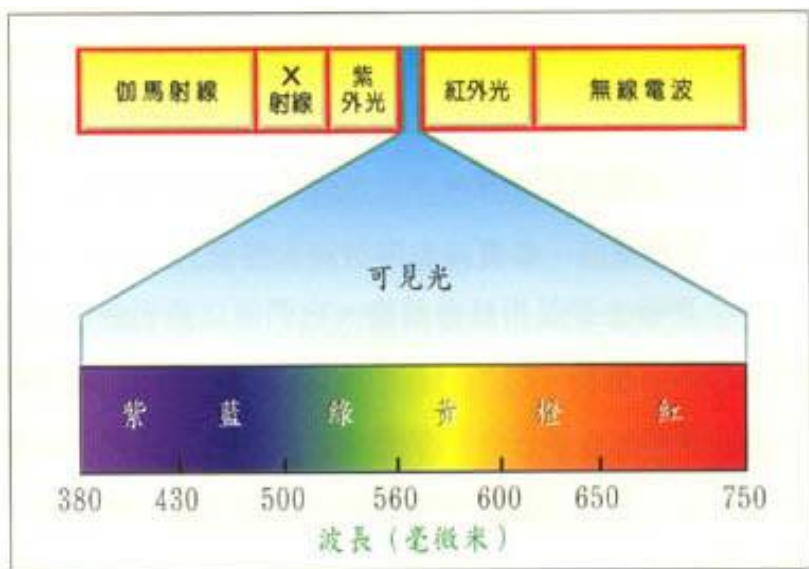
第二讲：波粒二象性

量子力学中的真正奥秘：

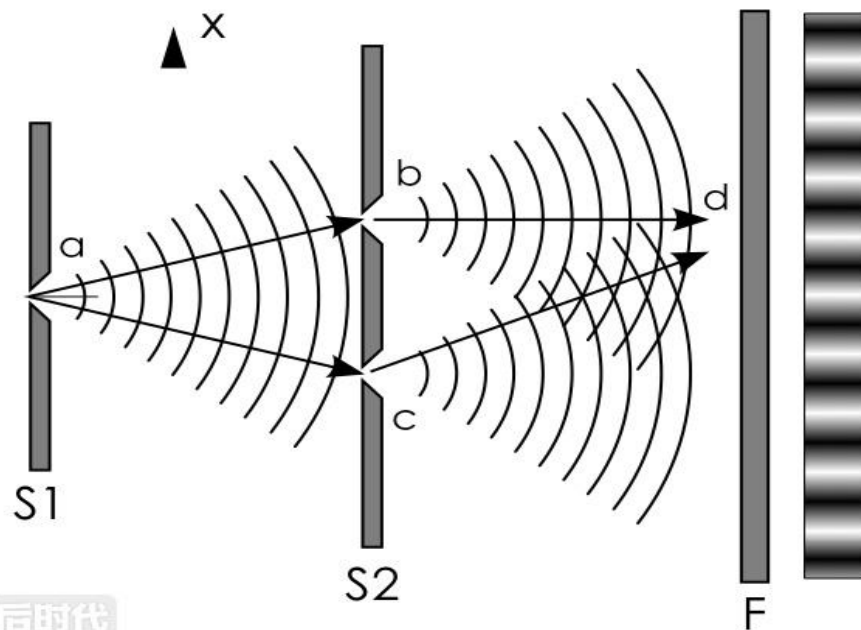
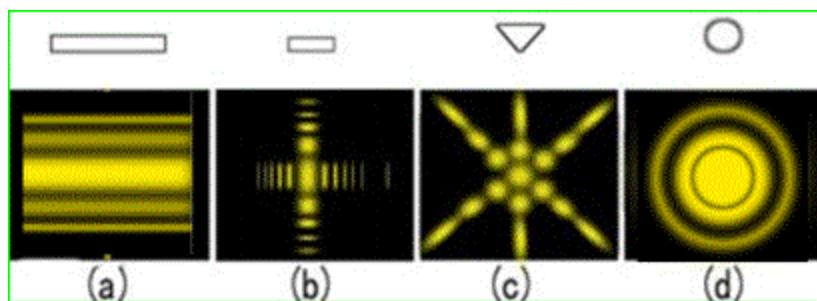
光的波粒二象性

--查德·费曼


经典物理认定：光是一种波，是一种电磁波



实验事实：光的衍射和干涉



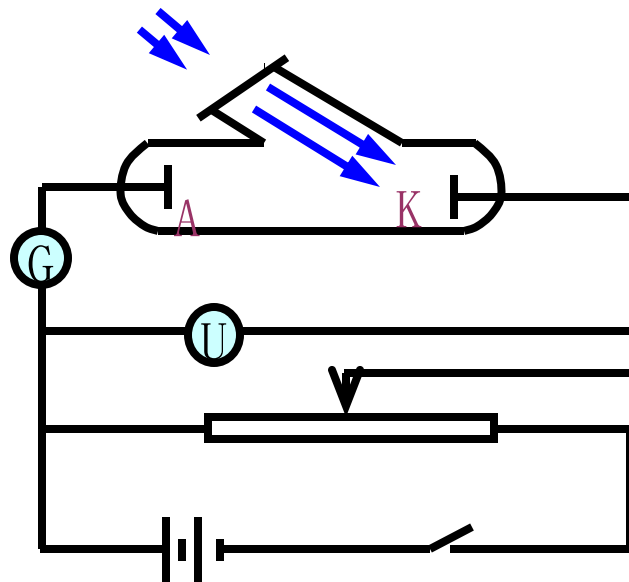
光的波动说不能解释以下光学实验

- 
- 光电效应实验
 - 康普顿效应实验
 - 氢原子光谱

1. 光电效应

指一束光照射到金属上，有电子从金属表面逸出的物理现象

在光的照射下，金属中的电子吸收光能而逸出金属表面。



G: 测量光电流

U: 测量AK电压

光电效应实验装置图

从1887年起就开始做了一系列这样的实验

光电效应具备以下几个特点（勒纳1902年总结出）：

- **1.瞬时性**：如若有光电子发出，则是瞬时的。即光一照射金属表面，就立即有光电子发出，不需要时间的积累
- **2.临界频率 ν_0** ：若照射光频率小于某值 ν_0 ，则不论光强多大，照射时间多长，都没有光电子产生。
- **3.光电子的能量只与照射光的频率有关**：与光强、照射时间等无关。光的强度只影响逸出的光电子数量

经典理论面临的困境：经典理论无法解释光电效应

因为：按照光的电磁理论，光的能量由光强决定而与频率无关 (2)(3)。不管是什么频率的光，只要照射时间足够长，能量的积累会导致光电子的产生(1)

爱因斯坦(Einstein)的光量子概念和光电效应理论

Einstein 1905年在其论文《关于光的产生和转化的一个试探性观点》中，发展了Planck的能量子假说，提出了自己的光量子假说，成功解释光电效应

- (1) 光子概念
- (2) 光电效应理论

Einstein因发现光电效应定律获得了1921年的诺贝尔物理学奖。

1905年是26岁的Einstein的奇迹年。

- 1) 布朗运动
- 2) 狭义相对论
- 3) 光电效应



爱因斯坦(1879-1955)

(1) 光子概念

- 光辐射场由光量子（光子）组成，每一个光子的能量与辐射场的频率关系为：

$$E = h\nu = \hbar\omega, \quad \hbar = h/2\pi = 1.0545 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{S}$$

- 光子的动量与辐射场的波长有如下关系：

$$\mathbf{p} = \frac{h}{\lambda} \mathbf{n} = \hbar \mathbf{k}, \quad \mathbf{k} = \frac{2\pi}{\lambda} \mathbf{n} \text{ 为波数矢量(波矢)}$$

- 电磁辐射（光）不仅在发射和吸收时以能量子（ $h\nu$ ）的形式出现，以光速 c 在空间传播的电磁波（光）也具有这种形式。
- 光不仅具有波动性，也具有粒子性，可称之为光量子（光子）。
- 光子的能量和动量为：

$$\begin{aligned}
 E &= h\nu = \hbar\omega, \quad p = |\mathbf{p}| \\
 E &= mc^2 = \sqrt{m_0^2 c^4 + p^2 c^2} = pc \\
 \mathbf{p} &= \frac{E}{c} \mathbf{n} = \frac{h\nu}{c} \mathbf{n} = \frac{h}{\lambda} \mathbf{n}
 \end{aligned}
 \Rightarrow$$

$$\begin{cases} E = h\nu \\ p = h/\lambda \end{cases}$$

(2) 光电效应理论

用光子的概念，Einstein 成功地解释了光电效应的规律。

当光照射到金属表面时，能量为 $h\nu$ 的单个光子可能立即被一个电子吸收，电子将这部分能量的一部分用来克服金属表面势垒，剩下的部分为电子离开金属表面后的动能。因此只有当入射光频率 ν 足够大，电子才可能克服逸出功而逃离金属表面。（一个电子吸收两个和两个以上光子的概率很小，忽略不计）

$$h\nu = W + mV^2/2 \geq W = h\nu_0$$

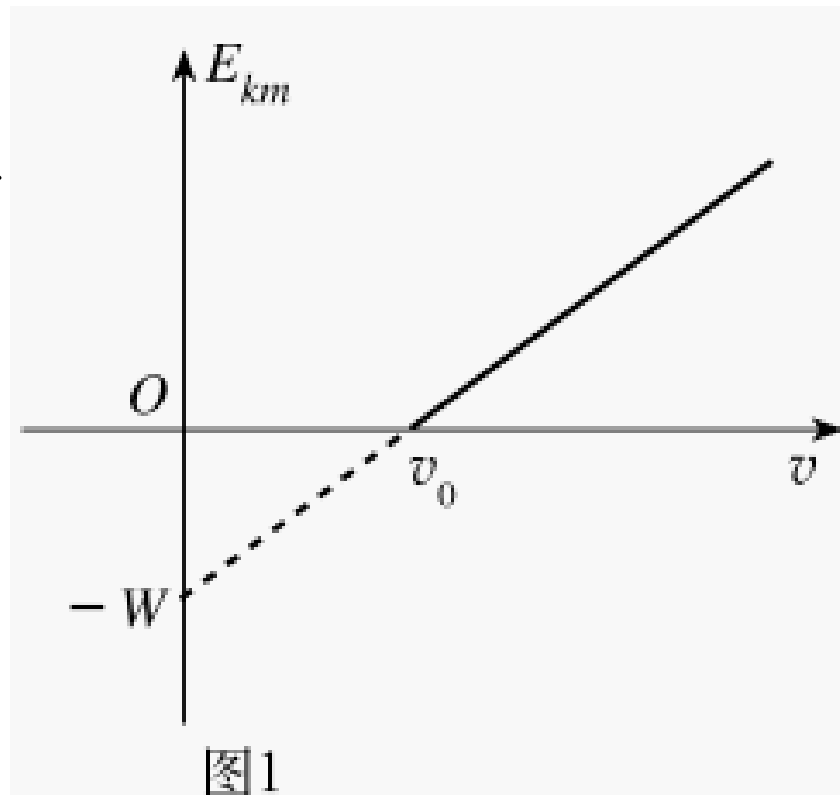
W 称为逸出功。只与金属性质有关。与光的频率无关。

当 $\nu < \nu_0 = W/h$ （临界频率）时，电子无法克服金属表面的引力而从金属中逸出，因而没有光电子发出。

利用光电效应测定普朗克常数

$$E_{km} = mV^2/2 = h\nu - W$$
$$= a\nu + b$$

普朗克常数 h 是右图直线的斜率



1916年，密立根利用光电效应实验证实了光子论的正确性，并

测得 $h = 6.63 \times 10^{-34}$ 焦耳·秒。与理论值一致！

获得了1923年诺贝尔物理学奖。

阿尔伯特·爱因斯坦

Albert Einstein, 1879.3.14 – 1955.4.18, 德国理论物理学家。虽然爱因斯坦的最重要的贡献是相对论，他是因为发现了光电效应”而获得1921年诺贝尔物理学奖。爱因斯坦被誉为“现代物理学之父”。他与牛顿是人类有史以来最伟大的物理学家，“爱因斯坦”一词成为“天才”的同义词。



广义相对论

狭义相对论

布朗运动

光电效应

爱因斯坦引力场方程

玻色-爱因斯坦统计

玻色-爱因斯坦凝聚

EPR悖论

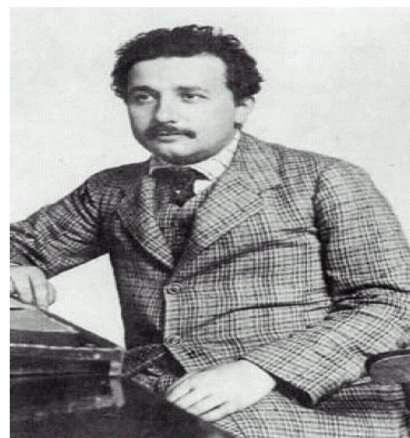
第一个支持德布罗意物质波假设

爱因斯坦的**光量子假说**发展了普朗克的能量量子假说。

在普朗克的假说中，坚持电磁波在本质上是连续的，只是假定当它们与器壁发生能量交换时，其能量显示出量子化特征。

爱因斯坦对旧理论不是采取改良的态度，而是要求彻底解决问题。他看出能量量子化不是一个数学方法，它揭露了光的物理本质。他克服了普朗克量子假说的不彻底性，把量子化从电磁辐射机制引伸到光的本质，认为光本身就是量子化的。

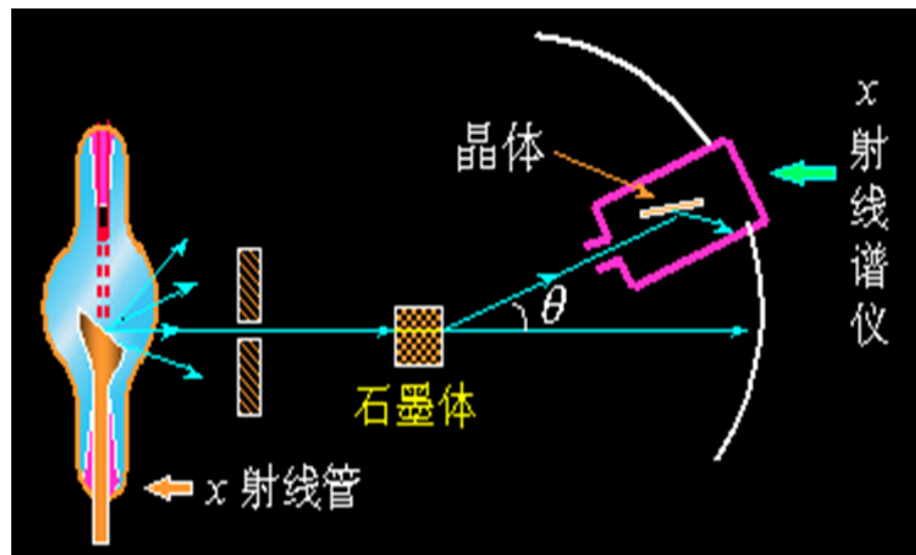
爱因斯坦的光量子假说恢复了光的粒子性，使人们终于认清了**光的本质**。



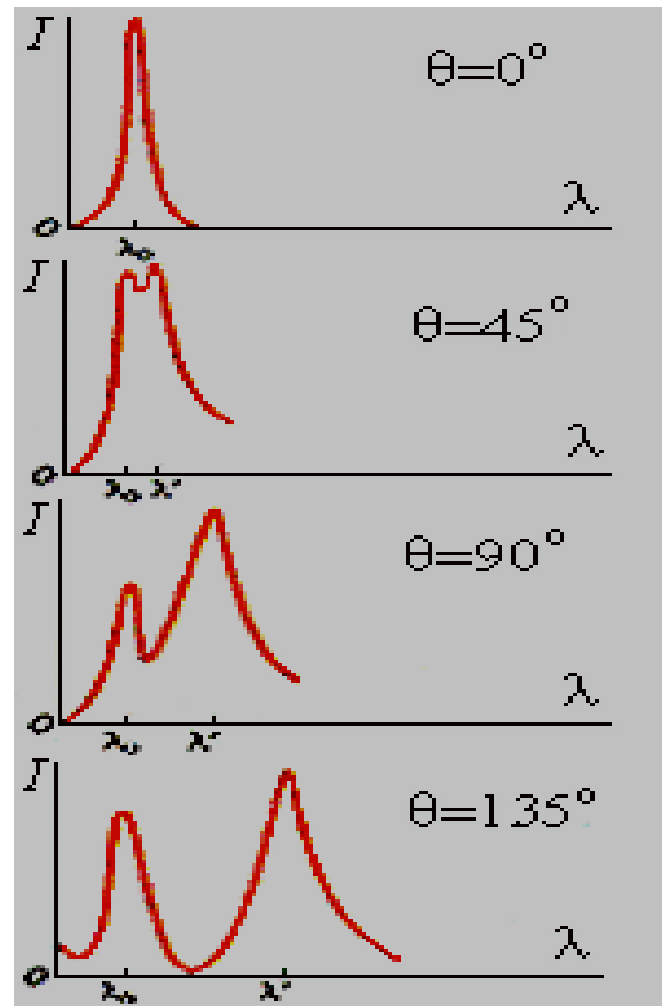
虽然**爱因斯坦**对光电效应的解释是对**普朗克**能量子假说的极大支持，但是**普朗克**不同意**爱因斯坦**的光子假设，这一点流露在**普朗克**推荐爱因斯坦为普鲁士科学院院士的推荐信中。

“总而言之，我们可以说，在近代物理学结出硕果的那些重大问题中，很难找到一个问题是**爱因斯坦**没有做过重要贡献的，在他的各种推测中，他有时可能也曾经没有中标的，例如，他的光量子假设就是如此，但是这确实并不能成为过分责怪他的理由，因为即使在最精密的科学中，也不可能不偶尔冒点风险去引进一个基本上全新的概念”

2. 康普顿效应实验 (1922年)



X射线通过实物发生散射时，其波长会发生改变的现象称为康普顿效应。

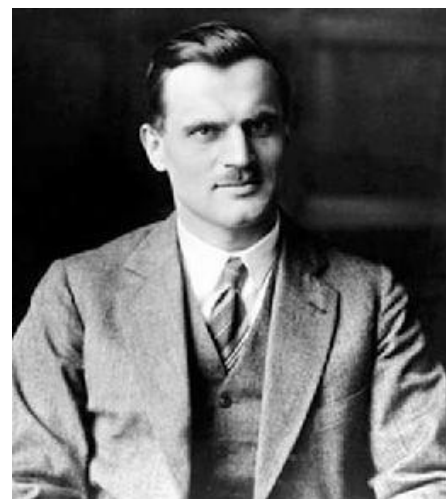


总之，光子与电子发生康普顿散射时，由于光子与电子之间存在能量与动量交换，散射之后光子的频率发生变化，其中频移公式为

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{m_0 c} (1 - \cos \theta) = \frac{2h}{m_0 c} \sin^2 \frac{\theta}{2} = 2\lambda_c \sin^2 \frac{\theta}{2}$$
$$\lambda_c = \frac{2\pi\hbar}{m_0 c} = \frac{h}{m_0 c} \approx 2.4 \times 10^{-12} \text{ m} \text{ --- 电子的康普顿波长}$$

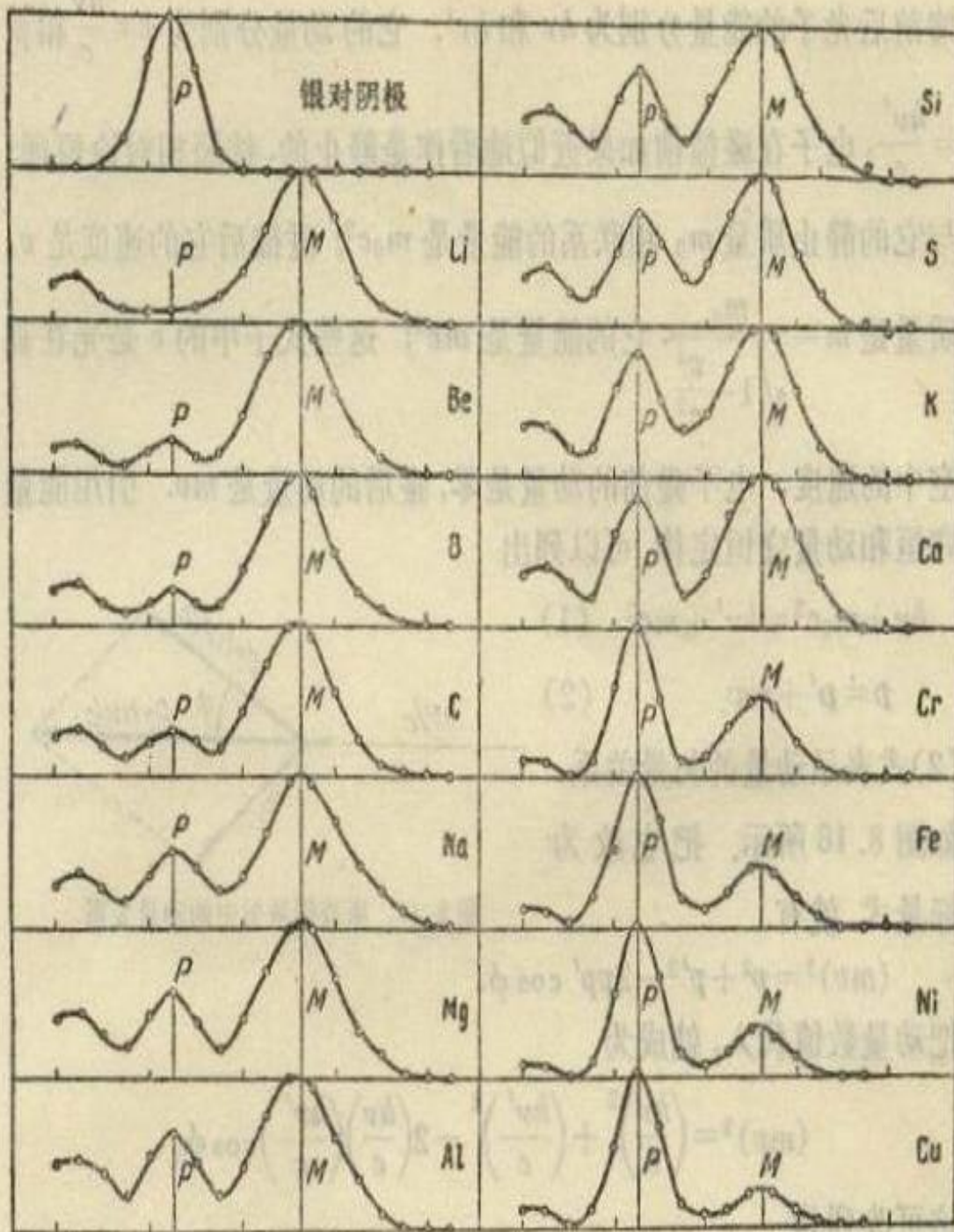
康普顿效应比光电效应更进一步，证明光子像一般实物粒子那样与其他粒子之间产生碰撞，碰撞过程中满足能量与动量守恒。

获1927年诺贝尔物理学奖

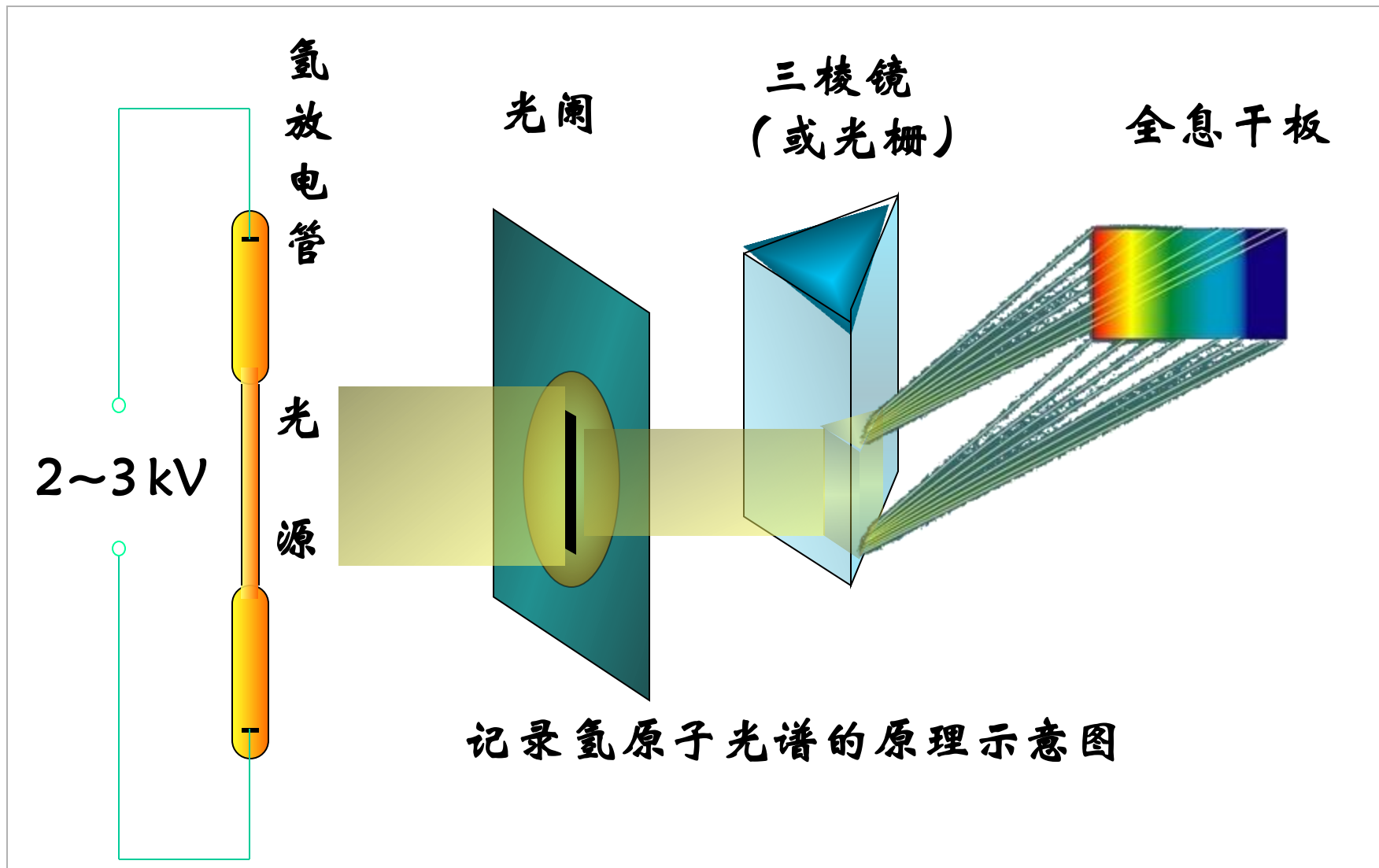


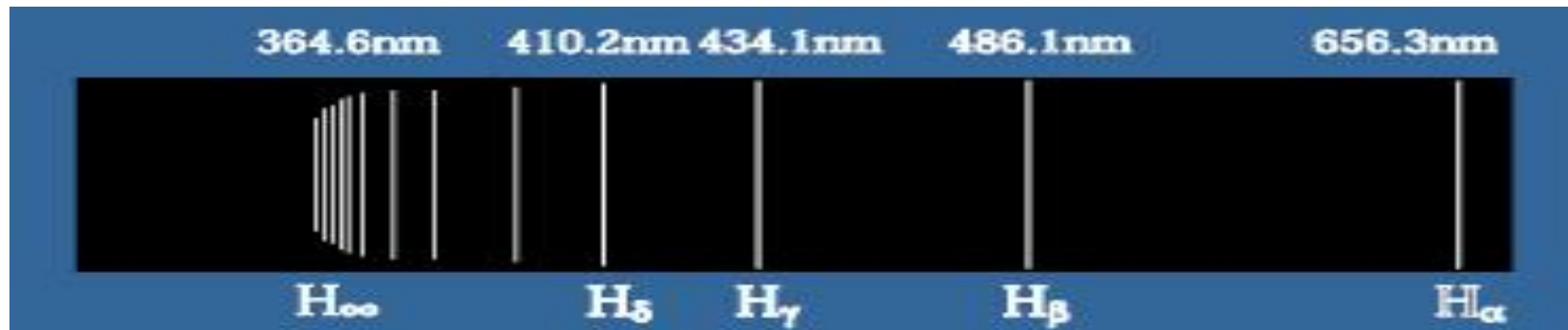


吴有训全面验证了康普顿效应



3. 氢原子光谱与玻尔理论





氢原子的巴耳末线系照片

(1) 分立线状光谱

(2) 谱线的波数可表示为
$$\nu = R_H c \left(\frac{1}{k^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

R_H 是氢原子光谱的里德伯常量

(3) $k = 2$ ($n = 3, 4, 5, \dots$) 谱线系 —— 赖曼系 (1908年)

$k = 1$ ($n = 2, 3, 4, \dots$) 谱线系 —— 巴耳末系 (1880年)

为什么氢原子光谱会是分立的？

这么漂亮的一经验公式
为什么不能从现有物理理论导出？

早先的原子模型问题

1、汤姆逊（J.J. Thomson）的原子模型：

正电荷均匀分布在原子中，而电子则以某种规律镶嵌其中。
——局限在于无法解释原子散射实验中的大角度偏转现象。

2、卢瑟福（E. Rutherford）的有核原子模型：

卢瑟福于1911年用 α 粒子对原子的散射，提出了有核原子模型：

原子的正电荷及大部分质量都集中在很小的原子中心，形成原子核，而电子则围绕原子核旋转，该模型能很好地解释 α 粒子的大角度偏转问题，但不能解释原子的稳定性问题和原子的大小问题。

二、原子的稳定性问题

电子围绕原子核旋转的运动是加速运动，按照经典电动力学原理，电子不断辐射能量，而其轨道半径不断缩小，最后电子将会湮没在原子核中，原子就会“崩溃”。同时按照经典理论，原子将发射连续辐射谱。而与客观世界中的原子稳定地存在自然界，以及原子的线状光谱相矛盾。

三、原子的大小问题

按照经典理论来考虑卢瑟福模型，却找不到一个合理原子的特征长度。

爱因斯坦1905年提出光子的概念后，不受名人们的重视，甚至到1913年德国最著名的四位物理学家(包括能量子名人普朗克)还把爱因斯坦的光量子概念说成是“迷失了方向”。

1913年，当时年仅28岁的玻尔，却创造性地把光子概念用到当时人们持怀疑态度的卢瑟福原子结构模型上，成功破解了迷惑了人们近30年的氢原子光谱的问题。



1922年获得了诺贝尔物理学奖

玻尔（Bohr）原子理论

1、电子在原子中不可能沿着经典理论所允许的所有轨道运动，而只能在一些特殊的轨道上运动，这些分立的轨道与分立的能量（ E_1, E_2, E_3, \dots ）相对应，电子在这样的轨道上运动是处于稳定状态，即定态（Stationary state）。当电子处在这种状态时，它们不吸收也不发生辐射，只有当电子从一个定态跃迁到另一个定态时，才会吸收能量或发生辐射。



丹麦物理学家玻尔(1885-1962)
因在研究原子结构和原子辐射方面的贡献，荣获1922年诺贝尔物理学奖

2、原子在两定态之间跃迁时，吸收或发射辐射的频率由下列关系式确定：

$$h\nu = \hbar\omega = |E_n - E_m|$$

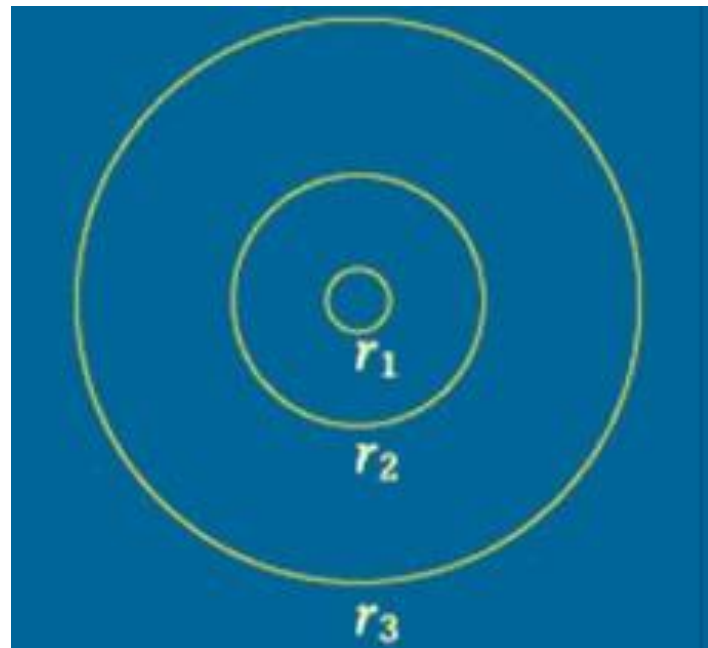
玻尔的氢原子理论

1. 定态假设

- 电子在核外作圆周运动
- 角动量量子化的轨道是定态

$$L = n \frac{h}{2\pi} = n\hbar, n=1,2,3,\dots$$

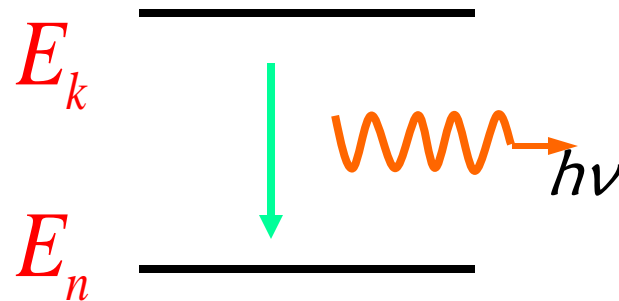
- 定态轨道上的电子不辐射电磁波



2. 量子跃迁假设

电子从一个定态跃迁到另一定态，原子会发射或吸收一个光子，频率

$$\nu = \frac{|E_k - E_n|}{h}$$



对氢原子线光谱的解释：

1) 轨道半径

向心力是库仑力

$$m \frac{v^2}{r} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r^2}$$
$$L = mvr = n\hbar, \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

上两式中消去 v , 得轨道半径

$$r_n = n^2 \left(\frac{\epsilon_0 h^2}{\pi m e^2} \right) = n^2 r_1, \quad r_1 = \frac{\epsilon_0 h^2}{\pi m e^2} = 0.529 \text{ \AA}$$

2) 定态能级

$$E_n = T + U = \frac{1}{2} m v^2 - \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r_n} = \frac{1}{n^2} \left(-\frac{m e^4}{8\epsilon_0^2 h^2} \right) = \frac{E_1}{n^2}$$
$$E_1 = -\frac{m e^4}{8\epsilon_0^2 h^2} = -13.6 \text{ eV}$$

3) 光谱

$$\nu = \frac{E_n - E_m}{h} = \frac{m_e e^4}{4\pi\hbar^3} \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

$$\nu_{\text{exp}} = R_H c \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

$$R_{H\text{理论}} = \frac{m_e e^4}{4\pi\hbar^3 c} = 1.097\ 373\ 1 \times 10^7\ \text{m}^{-1}$$

$$R_{H\text{实验}} = 1.097\ 016\ 5 \times 10^7\ \text{m}^{-1}$$

实验误差范围内符合的很好！

Bohr量子论的局限性:

- (1)、该理论只能解释氢原子光谱的规律性，而不能合理解释其余原子。
- (2)、不能系统解决谱线的强度。
- (3)、只能处理简单的周期运动而不能处理非束缚态问题。
- (4)、并没有从根本上解决能量不连续性的本质。

●玻尔(1885-1962)

1885年10月7日,出生于丹麦哥本哈根。由于对原子结构和辐射研究的贡献,他于1922年获得了诺贝尔物理学奖。

1913年,玻尔发表了三篇论文,把核式结构模型与量子论结合起来,解释了许多已知的实验现象,如氢原子光谱问题,正确预言了原子中电子的“壳层”形式,还指出是最外层电子的个数决定了元素的化学性质。

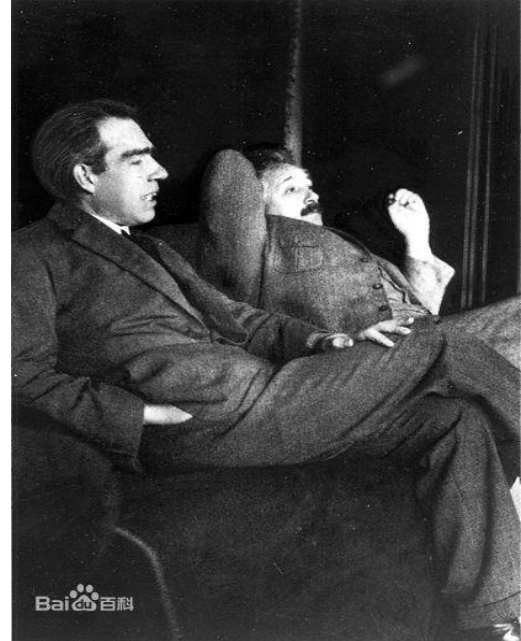
玻尔的预言以及他的理论与经典理论的矛盾强烈地扰动着物理界。之后众多科学家与他一起创造出全新的量子力学。

玻尔在近代物理发展史上的地位是**极其崇高**的,他不仅对量子力学的发展作出了开创性贡献,而且在国际物理界创立了一种独特的学术气氛,人们称之为“**哥本哈根精神**”。他还创立了玻尔研究所,是“**物理学圣地**”

玻尔与爱恩斯坦

玻尔的爱恩斯坦结有深刻的友谊。但是，他们自从初次见面，即唇枪舌剑。这种论战长直至爱恩斯坦去世。但是，这丝毫不影响他们深厚的情谊，他们一直互相关心，互相尊重。比如：爱恩斯坦本早该获得诺贝尔奖，但由于当时有不少人对相对论持有偏见，直到1922年秋才在回避相对论争论的情况下，决定授予爱恩斯坦上一年度（1921）诺贝尔物理奖，并决定把本年度（1922）的诺贝尔物理奖授予玻尔。这两项决定破例地同时发表。

玻尔对爱恩斯坦长期未获得诺贝尔奖深感不安，怕自己在爱恩斯坦之前获奖。因此，当他得知这一消息后非常高兴。立即写信给爱恩斯坦，说爱恩斯坦能在他之前获得诺贝尔奖，对他是“莫大的幸福”。爱恩斯坦接信后，当即回信。信中说：“我可以毫不夸张地说，它象诺贝尔奖一样，使我感到快乐。您担心在我之前获得这项奖金。您的这种担心我觉得特别可爱——它显示了玻尔的本色。



玻尔与爱恩斯坦

小结:

光的干涉实验

光的衍射实验

光具波动性

$(\nu, \omega, \lambda, k)$

光电效应实验

康普顿效应
实验

氢原子光谱验

光具粒子性

(ε, p)

光具有
波粒二象性

普朗克常数 h
 $h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$

总之：光集波动性和粒子性于一身。公式上：由普朗克常数把这两种根本不同的特性联系在一起：

$$\begin{cases} \varepsilon = h\nu = \hbar\omega \\ p = h / \lambda \end{cases}$$

实物粒子的波粒二象性

量子论的伟大接力者：德布罗意

1929年诺贝尔物理学奖

德布罗意于1923年9月10日在《法国科学院通报》上发表了有关物质波的第一篇论文《波与粒子》。在这篇文章中他作了一个大胆的设想，认为就如光子一样，“一般的”实物粒子也具有波粒二象性。

他认为：“在光学上,比起波动研究方法,是过于忽略了粒子的研究方法;在实物微粒上,是否发生了相反的错误?是不是把粒子的图像想得太多,而过于忽略了波的图像?”

基此,他开创了量子力学之波动力学。



法国物理学家，波动力学的创始人，量子力学的奠基人之一。

德布罗意波：

一个能量为 E ，动量为 P 的**实物粒子**与一个频率为 ν ，波长为 λ 的**波**相当：

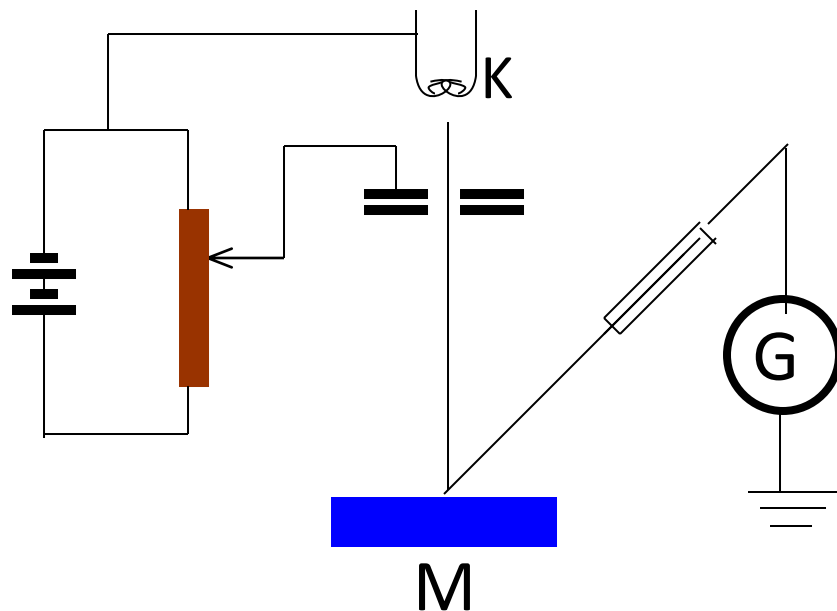
$$\begin{cases} \nu = E/h \\ \lambda = h/p \end{cases}$$

实验验证：

1、戴维逊-革末实验

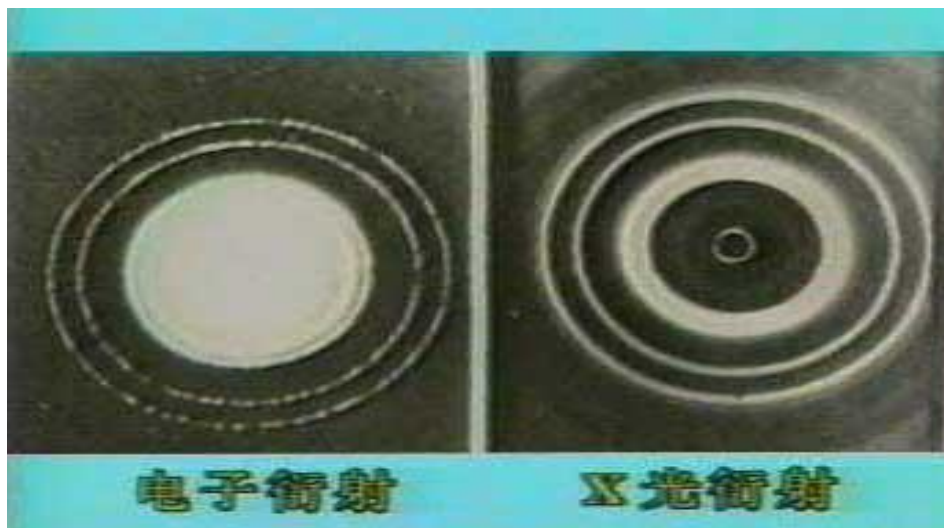
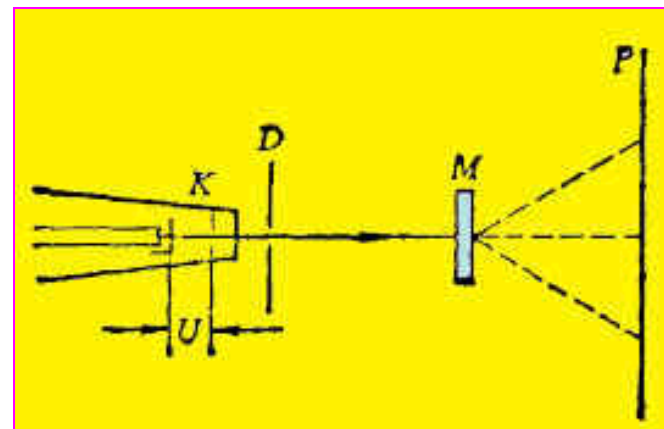
1937年Nobel物理学奖

戴维逊和他的助手革末的实验(1927-1928年)是用电子束垂直投射到镍单晶，**电子束被散射**。其强度分布可用德布罗意关系和衍射理论给以解释。



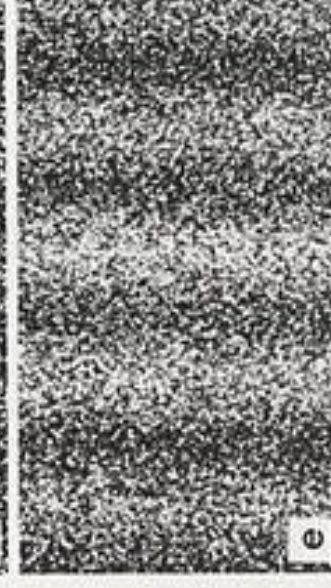
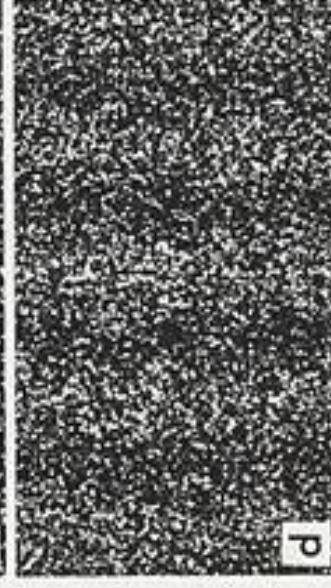
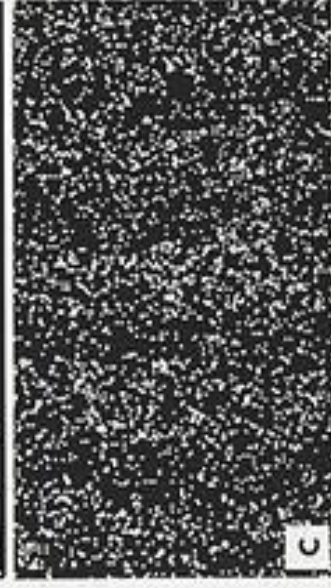
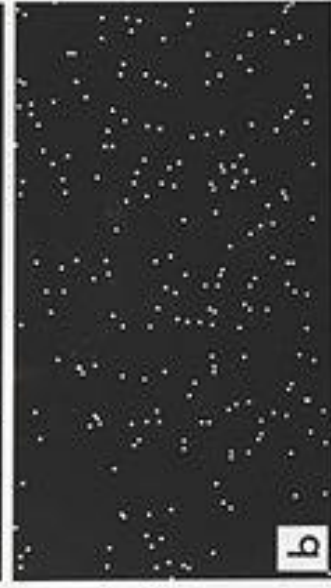
2、汤姆逊实验

1927年，汤姆逊在实验中，让电子束通过薄金属膜后射到照相底片上，结果发现，与X射线通过金箔时一样，也产生了清晰的电子衍射图样。



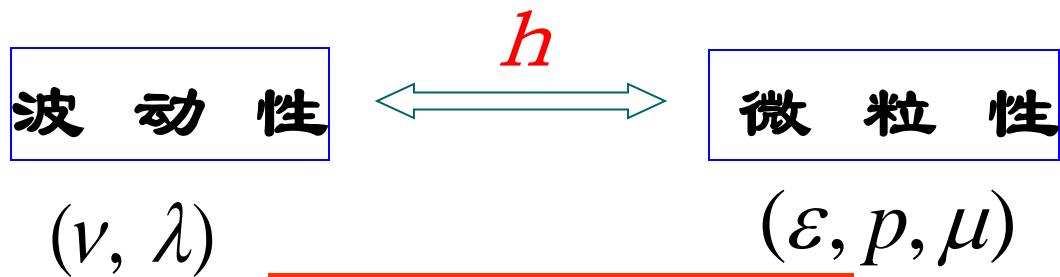
3、电子通过狭缝的衍射实验：

1961年，约恩孙 (Jonsson) 制成长度为50mm，宽为0.3mm，缝间距为1.0mm的多缝。用50V的加速电压加速电子，使电子束分别通过单缝、双缝等，均得到衍射图样。



总结

早期量子论证实：光具有波粒二象性



$$\varepsilon = h\nu = \hbar\omega$$

$$\vec{p} = \frac{h}{\lambda} \vec{n} = \hbar \vec{k}$$

后来的量子论进一步证实实物粒子具有波粒二象性

德布罗意关系

$$\begin{cases} \nu = \frac{E}{h} \\ \lambda = \frac{h}{p} \end{cases}$$

作业：1. 求经电势差为50V伏特的电场加速后的电子的波长。

能量 $E = eV = p^2 / 2\mu$

$$\therefore \lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{\sqrt{2\mu eV}} = \frac{12.25}{\sqrt{V}} (\text{\AA})$$

2. 求飞行的子弹 $m = 10^{-2} \text{ kg}$, 速度 $V = 5.0 \times 10^2 \text{ m/s}$ 时的德布罗意波长

3. 一个He-Ne激光器发射波长为633nm的激光, 假若该激光器的功率是1mW, 激光器每秒发射的光子数是多少?

量子力学形成过程

经过20多年的时间，在许多物理学家的共同努力下，量子力学这一门理论体系才最终形成。主要的贡献有：

时间	科学家	科学贡献
1923 年	德布罗意	电子也具有波动性
1924 年	泡利	不相容原理
1924 年	玻色&爱因斯坦	引进了玻色- 爱因斯坦统计
1925 年	乌伦贝克&古德斯密特	提出了电子自旋
1925 年	海森伯、玻恩和约尔丹	发表量子矩阵力学
1926 年	薛定谔	发表量子波动力学
1926年	薛定谔	证明量子矩阵力学和波动力学等价

时间	科学家	科学贡献
1926年	克莱因&戈登	提出相对论波动方程
1926年	费米	发现自旋和统计的联系
1926年	狄拉克	引进费米-狄拉克统计
1927年	戴维孙、革末&汤姆孙	实验证明电子的波动性
1927年	海森伯	提出测不准关系式
1927年	玻恩	提出波函数的统计解释
1928年	狄拉克	发表电子的相对论方程
1930年	狄拉克	引进电子空穴
1931年	泡利	提出中微子假说
1931年	泡令	发现化学共振键
1932年	查德威克	发现中子
1932年	海森伯	引进同位旋概念,提出原子核的核子模型
1932年	安德森	发现正电子