

微观世界的波粒二象性

翁以文

在宏观世界里，“粒子”和“波动”是两个根本不同的概念。粒子是一颗一颗的，是不连续的；而波是在空间中扩展的，是连续的。但是，如果我们从宏观世界跨到微观世界中去，就会发现这两个世界不仅有量的差异，而且有质的差异。在微观世界，物质的存在形式既有粒子性，又有波动性，打破了传统的习惯的看法。一般把这种性质叫做“波粒二象性”。

一、光的波粒二象性

(1) 光的干涉现象——波动性的证据 如果向平静的水面丢一块小石头，就会出现一圈一圈的波。如果同时丢两块小石头，就会出现干涉花纹：在波峰与波峰、波谷与波谷相遇的地方，波就加强；在波峰与波谷相遇的地方，波就减弱甚至抵消。光也有这种干涉现象，例如把一面平、一面凸的透镜A放在一个玻璃平面B上，让光线垂直射向透镜，就会看到一圈一圈的亮暗相间的彩色同心环。原因是直接在透镜凸面上反射

回来的光和透过透镜在玻璃平面上反射回来的光发生了干涉。随着镜面与玻璃平面的距离 r 逐渐增加，有的地方它们相互加强，有的地方相互减弱或抵消，于是就形成亮暗相间的环。这些同心环叫牛顿环，是牛顿最早发现的。还可以举出其他的光波干涉现象。这些现象都证明了光具有波动性。

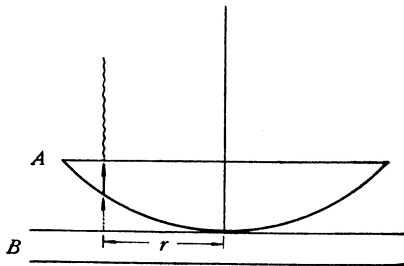


图 2

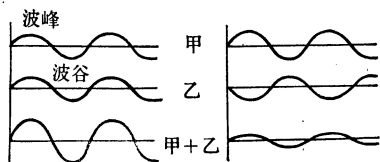


图 1(a) 波长相同的两列波，如果它们的波峰与波峰、波谷与波谷重合，就相加(图左)；而如果其中一列波的波峰与另一列波的波谷重合，就相减(图右)

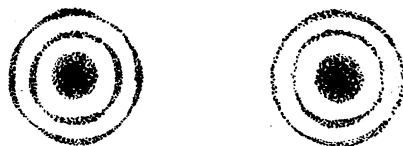


图 3 天文望远镜中看到的亮星周围有一圈一圈的亮暗相间的环，这也是光波干涉现象

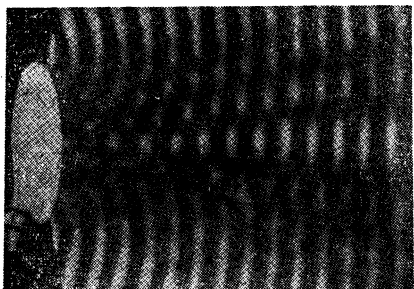


图 1(b) 两列相干声波形成的干涉图样

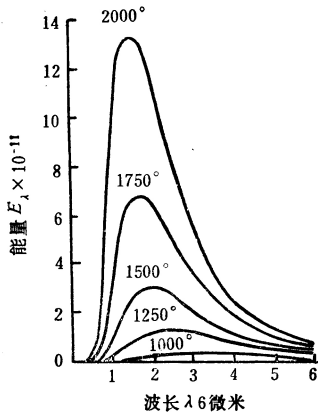


图 4 黑体辐射能量随波长的分布，说明光是一份一份的

(2) **黑体辐射、光电现象、康普顿散射——粒子性的证据** 如果一个物体可以全部吸收而不反射外界照射在它上面的光辐射,这个物体就称为黑体。黑体也可以发出光辐射,称为黑体辐射。十九世纪末,人们精确地测定了各种温度下黑体辐射的能量随波长的分布。但是经典物理学的理论却无法解释这种分布。1900年普朗克提出了量子论,认为光辐射是一份一份地发出的(也是一份一份地吸收的),每一份的能量 E 是

$$E = h\nu,$$

其中 ν 是光的频率, h 是一个常数,叫普朗克常数。

$$h = 6.624 \times 10^{-27} \text{ 尔格} \cdot \text{秒}.$$

按照这个假定,可以计算黑体辐射随各种波长的能量分布,与实验精确地符合。

这是偶然的吗?不是。当时,人们还知道有一种光电现象,就是发现用紫外光或 X 光照射金属板时,金属板上有电子放出来。奇怪的是,电子能不能打出来,

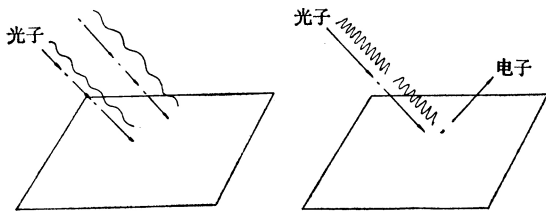


图5 频率不够大(波长不够短)的光子能量太小,不足以打出电子;频率足够高的光子,能量足以打出电子来,也说明光是一份一份的

并不在于光的强弱,而在于光的频率。光的频率如果大于一定数值,不管它是强是弱,总可以打出电子来;

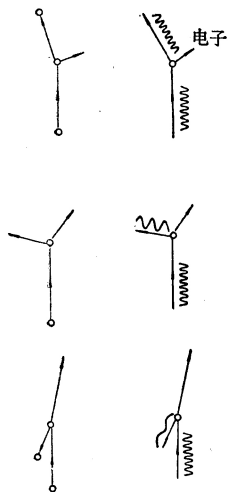


图6 小弹球打大弹球,偏转角越大,损失能量也越多,光子打电子,也是偏转角越大,损失能量也越多(频率减低,波长变长)——康普顿效应

反之,光的频率如果不够高,那末,即使光非常强,照射时间非常长,也打不出电子来。这是什么原因?1905年,爱因斯坦在普朗克量子论的基础上提出,光不仅是一种波动,而且是一种粒子——光子,频率为 ν 的一个光子的能量就是 $h\nu$ 。频率越高,光子的能量越大。只有光子的能量大到一定程度(频率高到一定程度)以上,它才能把电子打出来。否则,光子的能量如果不够大(频率不够高),就打不出电子来。就好像步枪的子弹,子弹再多,也打不穿装甲车的钢板。所以说,光电现象间接地证明了光的粒子性。

还有一个有力的证明,

就是康普顿散射(1923年)。在这个实验里是用 X 光去打电子,并观测 X 光的偏转角度与它的频率改变。发现 X 光偏转角越大,频率也越低。这正好描绘了一幅粒子与粒子碰撞的图象——(X 光的)光子打电子。譬如,用一个弹球去打另一个弹球,打出的弹球碰撞后偏转角越大,它失去的能量也越多(越是变慢),而 X 光子降低频率的多少,实际上也就代表它失去能量的多少。

二、电子的波粒二象性

(1) **德布罗意波** 既然光又是波动,又是粒子,那么,电子是不是也又是粒子,又是波动呢?当时知道,光子不但有能量 $E, E = h\nu$; 而且有动量 $P, P = h\nu/c$ (c 是光速)。从而光子的波长与动量 P 之间有如下关系:

$$\lambda = c/\nu = h/P$$

1923年,德布罗意提出,电子应该和光子一样,它又是粒子,又是波动,它的频率 ν 和能量 E 之间的关系也是 $E = h\nu$; 动量 P 和波长 λ 之间的关系也应该和光子一样 $\lambda = h/\nu$ 。这一般被称为“德布罗意波”。

(2) **电子的波动性的证实** 1927年戴维孙和革末用电子束流去打晶体,发现了电子的干涉现象,令人信服地证实了电子确实具有波动性。而且电子波的波长 λ 和动量 P 之间的确存在着 $\lambda = h/\nu$ 的关系。

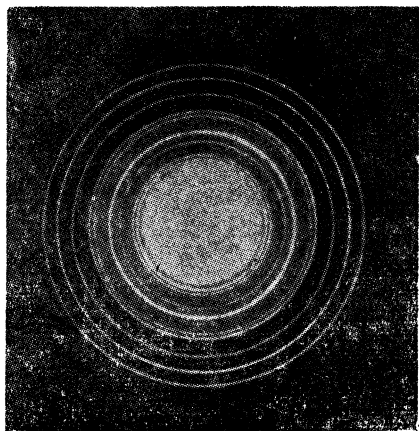


图7 电子在晶体上衍射——电子的波动性

不仅电子有波动性,其他的微观粒子也都有波动性,例如质子、中子就都有波动性。电子显微镜是利用电子的波动性,质子显微镜是利用质子的波动性,中子的晶体衍射实验是利用中子的波动性,……等等。

(3) **电子的粒子性** 电子的发现本身就说明了电子具有粒子性,在径迹探测器(如云室、泡室)中,可以看到一条一条的电子径迹,也说明了电子具有粒子性。为什么电子在径迹室里没有显出波动的面貌来呢?原来电子的能量即使低到 1 个电子伏,它的波长也比云室、泡室中的径迹宽度小好几个量级(如果能量越高,波长就更短),所以在径迹室里电子的波动性并不明显

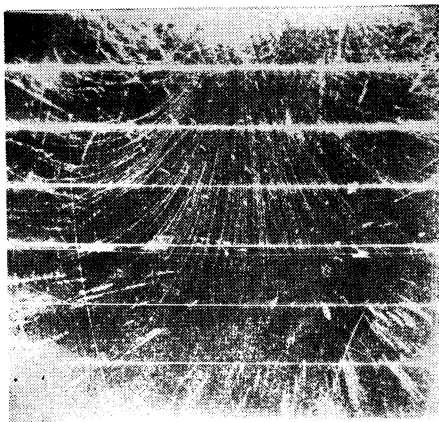


图8 云室中电子的径迹——电子的粒子性

表现出来。

三、测不准关系

(1) 一个理想的测量 假定有一个电子，我们想同时测量它的位置和动量。为了看到这个电子，我们用光线去照射它。假定我们用的光的波长是 λ ，波长为 λ 的光当然无从分辨比 λ 更小的东西，所以，在这个理想的测量里，位置测量的误差(Δx)不会小于一个波长，也就是： $\Delta x \geq \lambda$ 。

在这同时，光子的动量是 $P = h/\lambda$ ，与电子相碰时，它可能把动量全部传递给电子，也可能传递给电子很

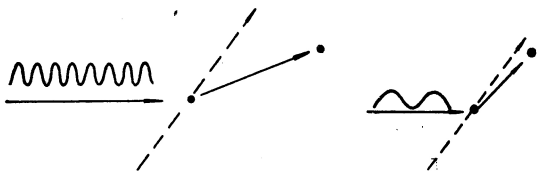


图9 波长越短的光子动量越大，对电子的动量(和速度)的干扰就越大，电子动量测量的误差也越大

少的动量，所以，动量测量的误差(ΔP)不会小于 h/λ ，也就是

$$\Delta P \geq h/\lambda.$$

总起来得到：

$$\Delta x \cdot \Delta P \geq h,$$

这就是最早由海森伯提出的测不准关系—— x 测得越准(Δx 越小，光波波长 λ 越短)，动量就越不准；反之动量测得越准，位置就越不准。

不过，测不准关系在宏观物体的测量中是完全显不出来的。即使一个微小沙粒，只有千分之一克重，原则上也可以同时使它的位置测量的误差小到 10^{-12} 厘米(这是原子核的大小)，而速度测量的误差小到 10^{-12} 厘米/秒(相当于每世纪百分之三毫米)。

(2) 测不准关系反映了波粒二象性 在宏观世界，一个粒子走到任何地点，它都有确定的速度 v ，确

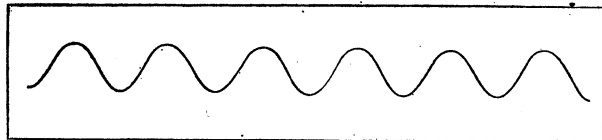


图10 一个有确定波长的波必定是扩展到整个空间的，这个波所代表的粒子没有确定的位置

定的动量 $P = m v$ 。所以，对于宏观的粒子来说，它的位置 x 和动量 P 是可以同时确定的。但是微观粒子具有波粒二象性，它的动量由它的波长决定($P = h/\lambda$)，因此，如果有确定的动量，波长就是确定的，而位置就完全不能确定了(因为波并不是只在一个点上)；反之，

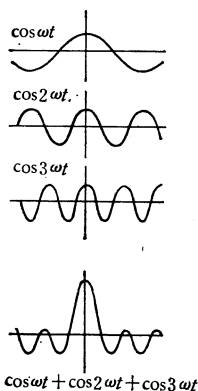


图11 缩到一点的波是由一切波长的波叠加而成的，所以相应的动量($P = h/\lambda$)完全不能确定

如果有确定的位置，(波压缩到一个点上)，就必须是一个波长极短的波包，这样的波包只能是由一切波长的波叠加而成，波长就完全不能确定了，从而动量也完全不能确定了。以上是两个极端的情况。在一般情况下，假定波包的大小是 Δx ，那末，它就不可能是单一波长的波，换句话说，动量是不确定的。根据 $\lambda = h/P$ ，可以在数学上证明，动量的不确定性 ΔP 与波包的大小 Δx 的乘积为 $\Delta P \cdot \Delta x \geq h$ 。由此可见，测不准关系的根源并不在于测量，而是在于波粒二象性。

四、原子核周围的电子

(1) 氢原子光谱与原子的玻尔模型 1885年巴尔末发现了氢原子的一系列的光谱线，这些光谱线总称为巴尔末系。后来又发现了紫外区光谱线的赖曼系，红外区光谱线的帕兴系。1913年玻尔提出了玻尔模型，认为原子中的电子轨道不是任意的，它们必须符合一定的条件。按照这种条件，氢原子周围的电子的最小可能轨道与原子核的距离为 0.53×10^{-8} 厘米，其他可能的轨道跟原子核的距离依次是 0.53×10^{-8} 厘米的 $2^2, 3^2, 4^2, \dots$ 倍。这就是说，电子的轨道、电子的运动状态是量子化的。在每一个轨道上运转的电子都有一定能量。轨道离原子核越近，电子的能量也越低。电子还可以从一个轨道跃迁到另一个轨道。从能量较低的轨道跃迁到能量较高的轨道，需要吸收能量；从能量较高的轨道跃迁到能量较低的轨道，则要放出能量，一般都是放出光子，放出光子的频率决定于两个轨道的能量的差。巴尔末系是电子从第三条轨道、第四条轨道……跃迁到第二条轨道所造成的；赖曼系是

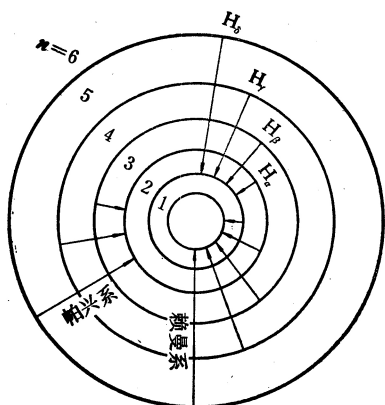


图 12 氢原子玻尔模型与氢原子光谱系

电子从第二条轨道,第三条轨道,第四条轨道……跃迁到第一条轨道所造成的;帕兴系是电子从第四条轨道,第五条轨道……跃迁到第三条轨道造成的。玻尔模型虽然能算出光谱线的频率,但不能算出光谱线的强度,它也没有把电子的波动性反映出来。

(2) 驻波花样——电子云 在最靠近氢原子核的玻尔轨道上运转的电子的速度约为每秒两千多公里。具有这样速度的电子的波长大致是 10^{-8} 厘米的数量级,恰好和氢原子的大小差不多。由此可见,玻尔模型认为电子像粒子一样在一条一条轨道上绕圈的图像是不对的。应该说,在原子内部,电子的运动状态更像是波。在这种情况下,电子完全不像宏观的颗粒,倒更像振荡着的一种东西,人们把这种东西称为电子云。

有一种波是行波,它是会跑走的,还有一种波是驻波,它是不会跑走的。自由电子的波是行波,它可以自由跑走;但氢原子中的电子是不会自动跑走的,它的波必定只能是一种驻波。凡是驻波都有特定的驻波花样。原子中的电子的波动也有驻波花样。每一个驻波花样反映原子中的电子的一个运转状态,每一个运转状态有一定的能量。有的驻波花样与原子核平均距离较近,相当于玻尔模型中比较靠近原子核的轨道,能量较低。有的驻波花样与原子核平均距离较远,相当于玻尔模型中离原子核比较远的轨道,能量较高。在一定条件下,必定有一定的驻波花样,所以原子中电子的运转状态和电子的能数不是任意的。现在,跃迁的概念也要改变,跃迁不是从一条轨道跳到另一条轨道,而是从一个驻波花样变成另一个驻波花样。但是为了方便起见,通常仍用玻尔模型的轨道来代表电子的驻波花样。

现在,因为微观世界的事物与宏观世界的事物很不相同,所以,适用于宏观世界的牛顿力学在微观世界不适用了。必须建立一个新的力学来描述微观现象,这就是量子力学。量子力学是从波粒二象性出发来研究微观粒子的运动规律。在量子力学里,粒子的波(包

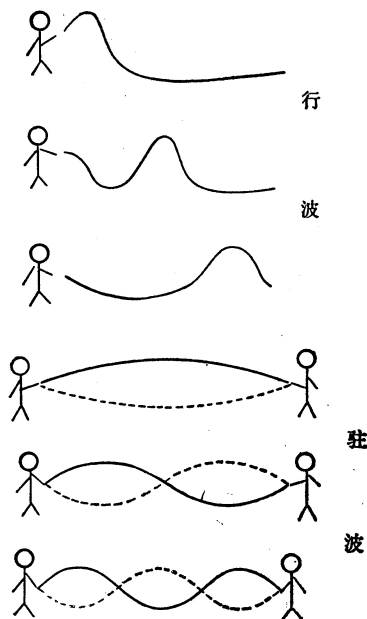


图 13 行波和驻波的例子,行波是要跑走的,驻波是不跑走的,但它有一定的花样

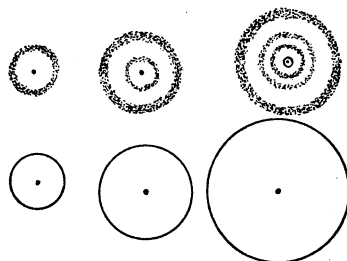


图 14 氢原子中的电子的三个驻波花样的例子,下面是分别与这些驻波花样对应的玻尔模型的轨道

括行波和驻波)都用波函数(它反映波的振幅随位置和时间变化)来描述;在测量粒子位置时,粒子在某一点出现的可能性(几率),则用波函数在这一点绝对值的平方来描述。量子力学就这样把粒子性和波动性统一起来。

(3) 不相容原理和原子的电子壳层 那么,原子中的电子是不是都会跃迁到能量最低的运转状态——驻波花样中去,从而使能量最低的玻尔轨道(它代表能

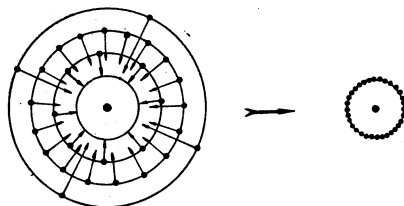


图 15 泡利原理是一条客观规律,如果没有泡利原理,每个原子中的最低能量的玻尔轨道就都会挤满了电子,一些重原子的体积就会小得多,这与事实不符

量最低的运转状态——驻波花样)挤满了电子呢?事实说明是不会的. 为了解释这个事实, 泡利提出了电子的不相容原理, 认为原子内部任何两个电子都不能处于相同的运转状态. 按照这个原理, 每一个驻波花样中只能有两个电子. (它们的驻波花样虽然相同, 但它们的自旋方向相反, 所以运转状态也是不相同的). 按

照这个原理, 原子内部的电子云的分布基本上是一层一层的, 这叫做原子中的电子壳层. 后来知道凡是自旋为 $\hbar, 3\hbar/2, 5\hbar/2, \dots$ 的粒子都服从不相容原理, 这种粒子叫费米子, 凡是自旋为 $0, \hbar, 2\hbar, \dots$ 的粒子都不服从不相容原理, 这种粒子叫玻色子.

(题头: 牛枢学)