

漫谈微观粒子的波粒二象性

刘明

(湖北教育学院物理系 武汉 430060)

物质世界是由什么组成的,其最小的组成单元是什么,这些“单元”或“微粒”具有什么特点,一直是古往今来人们十分感兴趣的问题。

早在我国战国时期,哲学家公孙龙就曾说过:“一尺之捶,日取其半,万世不竭。”人们在不断地“切割木棍”的过程中逐渐进入了微观领域,并用在上世纪建立起来的、被誉为20世纪物理学两大支柱之一的量子力学来反映微观粒子特有的运动规律。微观粒子的波粒二象性就是量子力学中最基本、最重要、也是最具创新性的概念之一。对它的理解是一件既让人着迷又略感困惑的事情。

一、物质波假说的提出

20世纪初,普朗克在解释黑体辐射问题时提出了“量子”假说。他认为:黑体吸收和辐射能量时,能量不是经典的连续谱,而是一份份地被发射或吸收。在解释光电效应时,爱因斯坦在此基础上提出了“光子”假说。他认为,在这个过程中不仅光子的能量是量子化的,而且“光子”也只能整个地被吸收或发射,即光具有波粒二象性,并提出了爱因斯坦关系:

$$E = h\nu \quad (1)$$

$$p = h/\lambda \quad (2)$$

这里,等式左边的 E 和 p 是代表粒子特性的能量和动量;右边的 ν 和 λ 是代表波动特性的频率和波长; h 是普朗克常数。显见,爱因斯坦通过普朗克常数 h 巧妙地将光的粒子性和波动性联系起来。人类在认识光的问题上一度忽视了光的粒子性,是爱因斯坦的光量子假说使人们认识到了光既具波动性又具粒子性。

德布罗意在回忆他提出物质波假说的思想过程时写道:“如果说在整个19世纪讨论关于光的理论时人们过分地倾向于使用波的概念而忽略了‘微粒’概念,那么在讨论关于物质的理论时人们是不是又犯了相反的错误呢?”正是在光的波粒二象性的启示下,他运用类比及逆向思维的方式提出微观粒子也具有波粒二象性,即物质波假说。德布罗意是在1924年提交的博士论文中提出物质波假说的,他因此成为第一个因博士论文而获得诺贝尔奖的物理学家。

按照物质波假说,不仅光子,而且所有微观粒子在运动中都既表现出粒子行为,又表现出波动行为,

即具有波粒二象性。德布罗意还把爱因斯坦关系“搬”了过来,并赋予它全新的物理意义,即(1)、(2)两式同样适用于微观粒子。

二、物质波的德布罗意表示

既然有了物质波或德布罗意波假说,就自然会提出物质波如何表示的问题。

由(1)、(2)两式可知:因为自由粒子的能量、动量是常数,所以与之对应的波的频率和波长都不变,即是一个平面波。

我们知道,频率为 ν , 波长为 λ 沿波矢方向传播的平面波可用余弦或正弦函数表示为:

$$= A \cos(kr - \omega t) \quad \text{或} \quad = A \sin(kr - \omega t)$$

或者通过引入相位概念将它们统一起来,写成复数形式:

$$= A e^{i(kr - \omega t)} \quad (3)$$

式中 $k = 1/\lambda$ 、 $\omega = 2\pi\nu$ 分别是波矢和圆频率, A 为归一化常数。将(1)和(2)式代入上式,我们得到描写自由粒子的平面波为:

$$= A e^{i(p \cdot r - Et)/\hbar} \quad (4)$$

这里 $\hbar = h/2\pi$ 。显见,描写自由粒子的平面波既具有典型的“波”的形式,又包含了代表“粒子”特性的能量和动量,即物质波的波函数很好地反映了微观粒子的波粒二象性。

三、物质波波长

微观粒子具有粒子性好理解,具有波动性往往令人迷惑,要是能求出它的波长,对问题的理解就会直观得多。

我们知道,对于质量和动能分别为 m 和 E 的自由粒子,当 $v \ll c$ 时,有 $E = p^2/2m$ 。由(2)式知,其德布罗意波长应为:

$$\lambda = h/\sqrt{2mE} \quad (5)$$

下面就两个实例进行计算和分析:

例1 求动能为100电子伏的自由电子的德布罗意波长。

解:用高斯单位制, $h = 6.6 \times 10^{-27}$ 尔格·秒,
 $100 \text{ 电子伏} = 1.6 \times 10^{-10}$ 尔格

$m = 9.1 \times 10^{-28}$ 克 $1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-12}$ 尔格

现代物理知识

由(5)式:

$$= h / \sqrt{2m} = 1.2 \times 10^{-8} (\text{厘米}) = 1.2 (\text{埃})$$

即能量为 100 电子伏的自由电子的德布罗意波长是 1.2 埃。

既然物质波可求出波长,那么为什么长久以来未被发现呢?这是因为 1.2 埃与可见光波长相比太小,人们不易观察到。1.2 埃相当于晶格的尺寸,当人们选择用晶格作光栅时,才能观察到它的衍射花样,从而证明其波动性的存在。电子衍射现象就是最早发现微观粒子具有波动性的例证之一。

另外,我们注意到电子的经典半径为:

$$r_e = e^2 / mc^2 = 2.8 \times 10^{-5} \text{埃} \ll 1.2 \text{埃}$$

可见,电子的德布罗意波波长远大于电子的经典半径,这表示波动性很明显,不可忽视。人们正是利用电子的波动性制造了分辨本领比光学显微镜高出很多倍的电子显微镜。

例 2 求质量为 20 克、速度为 1000 米/秒的子弹的德布罗意波波长。

解:用高斯单位制, $v = 1000 \text{米/秒} = 10^5 \text{厘米/秒}$

$$= mv^2 / 2 = 10^{11} (\text{尔格})$$

$$= h / \sqrt{2m} = 3.3 \times 10^{-33} (\text{厘米})$$

$$= 3.3 \times 10^{-25} (\text{埃})$$

这就是说,子弹的德布罗意波波长比电子的小 25 个数量级。而子弹的尺度大约为 5 厘米, 10^{-25} 埃 \ll 5 厘米。显见,子弹的德布罗意波波长与子弹的尺度相比实在微乎其微,故其波动性完全可以忽略不计,完全可以把它看作“粒子”。事实上,在经典力学中我们就是这样做的。

由上面的讨论可知,物质波的波长是客观存在的,但就某个体系而言,波动性是否明显与具体研究的对象密切相关,却不可一概而论。

四、物质波实验验证——戴维孙和革末实验

众所周知,要想证明微观粒子在运动中确实具有波动性,就应该在实验观测中能够看到波的干涉或衍射效应。而按照光学理论,只有当波长等于或略大于干涉或衍射实验中所用的孔或屏的特征尺度时,才能观察到波的干涉或衍射现象。

对于宏观粒子,由于其能量、动量太大,波长极短,难以找到合适的孔或屏,因而观察不到它们的波动性。在德布罗意时代,人们找到了固体中相邻原子平面之间的距离(晶格)作为光栅,其特征尺度约为 1 埃,而前面提到的电子的德布罗意波波长约为

1.2 埃,于是观察电子束的干涉或衍射现象有了可能。1927 年,戴维孙和革末把电子束垂直入射到镍单晶上,观察散射电子束的强度与散射角的关系,结果发现:散射电子束的强度随散射角而改变,当取某些确定值时,强度有最大值。这现象与 X 射线的衍射现象十分相似,说明了电子具有波动性,从而证实了物质波的存在。

五、微观粒子波粒二象性的解释

微观粒子既具有波的特性,又具有粒子的特性,那么微观粒子究竟是什么?如何理解微观粒子的波粒二象性呢?

首先,让我们以对月亮的认识为例作个类比。月初时,月亮看来像是“钩子”;月圆时,月亮看来像是“盘子”。其实,它既不是“钩子”,也不是“盘子”,而是像地球一样的球体。这一点直到“阿波罗”号载人飞船成功登月以后才得到了确认。可见,在没有找到恰当的概念去理解新现象时,人们总希望借助旧有的概念去描述它,因而往往难以描述得很确切。

对微观粒子的认识也是一样:它既不是“弹丸”似的粒子,也不是“波浪”似的波。以电子为例,它通过晶体时产生干涉或衍射现象——表现出波动性(即叠加性);而当它通过威尔逊云室时又留下径迹——表现出粒子性(即整体性)。这就是说,人们要认识肉眼看不到的微观粒子,只能像“瞎子摸象”一样用仪器去“摸”:在某种条件下,“摸”出来的“象”是“波”;在另一种条件下,“摸”出来的“象”是“粒子”。微观粒子是新东西,用旧概念去反映它必然会感到蹩扭,这是不足为奇的。但是,科学毕竟是严谨的、客观的。研究表明:微观粒子既不是经典的波,也不是经典的粒子,它是具有波动和粒子双重特性的第三种客体,是波粒二象性的矛盾统一体。

封底照片说明

这是计划在澳大利亚建造的太阳能发电装置,它不同于一般的太阳能发电装置,常见的太阳能发电站是把太阳能直接转化为电能,而这座太阳能发电装置是利用上升的热空气为发电机提供动力的。在地面上铺设的巨大温室,使空气在高 900 多米的混凝土大烟囱内形成一股不断上升的热气流推动涡轮机的叶片,使之发电。该装置还有一套热水管道系统,白天被阳光加热,夜晚反过来加热温室玻璃下面的空气,从而保证发电系统昼夜不停工作。(李博文)