

### 三、波粒二象性

“把电子当作光波处理”，这是德布罗意的建议。“虽然他们是子弹，但是它们也是波动。”这意味着可以把电子像光一样来处理。

#### (一) 波粒二象性的提出

1923年，年仅31岁的德布罗意先后发表的《波和粒子》等三篇论文，和1924年11月他的博士论文《量子论研究》都是关于波粒二象性的。如果不是第一次世界大战使他的研究中断，他可能在几年前通过博士论文的答辩，但其内容就可是别的了。正如德布罗意所说的：

“在1923年期间，经过一段长时间的独自沉思以后，我突然有了这样一个思想，爱因斯坦在1905年所作的发现应该可以推广到所有的物质粒子，明显地可以推广到电子。”

在《量子论研究》的提要中，他首先说明了他所追求的目标。他说：“光学理论的历史表明科学思想有很长一段徘徊于光的动力说和波动学解说之间，这两种解说毫无疑问并不像人们曾认为的那样是彼此对立的，量子理论的发展似乎证实了这一结论。”

在第一篇论文《辐射——波和量子》中，他认为，爱因斯坦所得出的适合于光子的方程式， $E=h\nu$  和适于实物粒子的方程式， $E=mc^2$  对于光和实物粒子都是普遍成立的。

在第二篇论文《光学——光量子、衍射和干涉》中德布罗意把他引入的这个伴随粒子运动的，由位相来定义的波称为“相波”，这就是后来所说的“德布罗意波”或物质波。提出了这个“引导着能量转移”的相波概念之后，他接着写道：“借助于受量子概念有力推动提出的一个假说，这些结果建立了运动物体的运动和波的传播之间的联系，使我隐约地看到了将这两个关于光的本性的对立的理论统一起来的可能性。”他还预言：“一束电子穿过非常小的孔，可能会产生衍射现象，这或许可以验证我的观点。”

在第三篇论文《物理学——量子、气体运动理论以及费马原理》中，德布罗意进一步阐发了几何光学与经典力学奇妙的类比。当他把几何光学中的费马原理推广应用到与粒子的运动相缔合的相波上时，他就证明了费马原理与牟培尔堆(Maictertuis)原理(最小作用量原理)各自对某些光学与力学现象所作的数学处理的类似性，因为粒子运动也能表述为牟培尔堆原理的形式。于是，“联接几何光学和动力学两大原理的基本关系，得以完全清晰”。

在《量子论研究》的博士论文中，德布罗意详细论述了相波的概念；得出了费马原理应用于相波与牟培尔堆原理应用于粒子是等同的结论；把电子波概念应用于电子的轨道，得到了定态的量子条件，即轨道的周长恰为波长的整数倍；应用相波理论推导出了康普顿公式。

他坚信相波(物质波)产生于任何物体的运动。大至一个行星、一块石头，小至一粒灰尘或一个电子，都能产生相波。相波能在真空中传播，因此它不是机械波。它可以由不带电的物体的运动产生，因此它也不是电磁波。

特别在他博士论文的第七部分，得出了计算物质波的著名的德布罗意波长公式：

$$\lambda = \frac{c^2 / v}{mc^2 / h} = \frac{h}{mv} = \frac{h}{p}$$

在结论中，德布罗意写道：“简言之，我提出了一些或许对促进必要的综合有贡献的新思想。辐射物理学在今天被奇怪地分成两个领域，而且每个领域分别为两种对立的观念——粒子观念和波动观念——所统治。我们所要做的综合就是重新将它们统一起来。”但是相波到底是一种怎样的波，德布罗意没有明确的回答。

德布罗意的新理论在物理学界掀起了轩然大波。但是，这种毫无实验证据的新理论，无人肯于接受。就连他的导师朗之万（Paul Langevin, 1872—1946）也不信他的观点，只不过爱他文章的才华，才让他取得博士学位。朗之万把论文的副本寄给爱因斯坦。

独具慧眼的爱因斯坦对论文作了很高的评价，认为“德布罗意的工作给我留下了深刻的印象，一幅巨大帷幕的一角卷起来了”。爱因斯坦一眼看出，德布罗意的工作决不仅是与自己关于光子理论的简单类比，这种物质波还包含了玻尔、索末菲量子轨道的非常卓越的几何解释。爱因斯坦还进一步指出：“看来粒子的每一运动都伴随着一个波场……这个波场（它的物理性质目前还不清楚）原则上应该能观察到。”超人的预见正是爱因斯坦本人的特征。由于德布罗意受到爱因斯坦的青睐，他的理论引起了物理学界的广泛注意。

1925年，在纽约贝尔电话实验室的研究人员戴维逊（Davisson/Clinton Joseph, 1881—1958）和他助手杰默（Germer/Lester）在实验中发生了一次事故，意外地获得一张电子在晶体中的衍射照片。英国物理学家小汤姆逊（Thomson/sir George Paget, 1892—1975）则从另一条途径获得一张电子衍射照片。衍射是波动的典型特征。所以这是电子波存在的确实证据。德布罗意的理论终于得到证实，他因此而获得了1929年诺贝尔物理学奖金，而戴维逊和小汤姆逊则合得了1937年诺贝尔物理学奖金。顺便提及，小汤姆逊是那位发现电子的老汤姆逊的儿子。老子发现电子是粒子，而儿子则证实电子是波，这被传为物理学史上的一段佳话。

那么，微观粒子所表现的波动性，究竟如何来解释呢？1926年，M·玻恩（Born/Max, 1882—1970）对物质波作了正确解释。他认为，粒子的波动性并不指粒子真的像波那样弥散到整个空间，而只是一种几率波。物质波振幅的平方，是该粒子在某一点上出现的几率。

德布罗意提出的概念不仅启发了显示电子、中子等的波动性的实验，给玻尔模型增添了奇异的光彩，而且还推动了现代原子理论的巨大发展。

## （二）波动和玻尔原子

德布罗意对玻尔关于允许轨道的不可思议的规则  $mv \cdot 2\pi r = nh$  提出了令人振奋的解释：在这种轨道上运动的电子具有波长  $\lambda = h/mv$ ，因此

$$mv = h/\lambda \quad \text{。于是，玻尔规则变成} \left(\frac{h}{\lambda}\right) \cdot 2\pi r = nh \text{ 或 } 2\pi r = n\lambda \quad \text{。}$$

按照这种观点，稳定的唯一允许的轨道是这样的一些轨道，在这些轨道上运动的电子，它的波长的  $n$  倍恰好等于圆周长： $2\pi r_1 = \lambda_1$ ， $2\pi r_2 = 2\lambda_2$ ， $2\pi r_3 = 3\lambda_3$  等等。电子必须以其波动方式围绕轨道迂回曲折前进，从而形成

其周长等于其波长整倍数的驻波。我们不再看到具有向心加速度  $v^2/r$  的实物粒子会产生辐射，而只看到在轨道上的振动图样。对许多物理学家来说，玻尔这个人人为的规则现在终于有了令人宽慰的解释：“允许的轨道”就是那些可能的驻波。

现在我们把德布罗意波看作一种图象，它告诉我们电子可能所处的位置：当我们寻找电子时，哪个区域有较强（强度用波的振幅的平方来衡量）的波动，我们就有较大的可能在那里找到电子。这些波动——对于在空间自由运动的电子来说是一个行波，而对束缚在原子中的电子来说是一个驻波——不是运动实物的波动，而是“几率”波。最先用来表示玻尔轨道的环形波可以将电子的可能位置安排在围绕着环的区域，或者它们可以等效于围绕沿相反方向传播的行波。这样，我们问电子到底位于环的那一点，就不再具有意义。但是我们现在用其他的波动图象来确定各种状态下的位置几率：径向驻波和圆周驻波。对于氢原子，玻尔最内层的环变成直接通过核的径线。但是，在大部分时间内，电子呆在该线之外的符合玻尔早先预言的某一平均距离处。因此，当该线沿各方向摆动时，由于对称关系，它的电子描绘为包围核的模糊的几率球。对于较复杂的原子和激发态的某些波动图象给出一种更为复杂的模糊的几率形状。每个图象仅仅表示电子位置的一种几率分布；但是在图象中，波动的频率是充分确定的，因而可以预言电子的一个确定的能级。

特别是，这种观点指出，为什么原子不会随着电子的运动轨道无限地变小、收缩而瓦解。假如每个电子的位置是用驻波来描述，那末最小轨道的周长必须恰好等于一个波长——可以想象，在环形驻波中不存在几分之几的波长——而且一定是原子可能具有的最小图象。

于是，泡利不相容原理就有了根据：把几个完全相同的电子放在同一个“轨道”上，它们的驻波图象将叠加为单个图象，因而我们只能在那里找到一个电子！