

连续和不连续

李 炳 安

在我们日常所接触的宏观世界里,物质存在的形态有连续的和连续的两种:例如砂粒、石块、陨石、人造卫星……,都是有一定大小的物体,并不是连续地弥漫于空间之中,因此它们的形态是不连续的。又例如引力场,电磁场,以及电磁场中的电磁波,可见光波,以及广播用无线电波,它们都连续地弥漫于空间之中,同那些有确定大小的物体不一样,因此它们的形态是连续的。

不连续形态的东西在运动的时候,所经过的路径可以用一些有确定形状的曲线来代表它们。例如一颗流星坠入大气,由于摩擦生热而发出光来,于是,在天空中就出现一个移动的亮点,这个亮点在天空中描绘出一条曲线。又例如人造卫

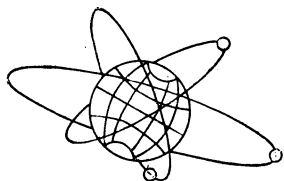


图1 人造卫星的坠道可以任意选取星,它运动的路径叫做轨道。人造卫星的轨道的形状由一些参数来决定,包括离地球的远近,与地球赤道的交角,转一圈所需时间等等。这些参数都可以根据需要而任意挑选,随着参数的连续变化,人造卫星的轨道也连续变化。因此,可以归纳出这样一条:就是宏观世界中不连续的物质形态(砂粒、石块、陨石、人造卫星等等)的运动方式是可以连续改变的。

反之,连续形态的物质的运动形式,例如电磁波的运动形式,在一

定条件下,却又会呈现出不能连续改变的特性。例如,在一个边长为 L 的立方金属空腔内(一般称为谐振腔),由于金属表面对电磁波有强烈的反射作用,电磁波几乎完全被约束在金属腔内。在这种条件下,理论上可以算出来,凡是能够在这个腔内稳定地存在(发生谐振)的电磁波的波长只能是:

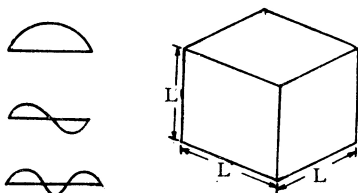


图2 稳定存于金属空腔内的电磁波的频率不能任意选取

$$\lambda = \frac{2L}{\sqrt{m^2 + n^2 + h^2}}$$

频率只能是:

$$\nu = \frac{c}{\lambda} = \frac{c}{2L} \sqrt{m^2 + n^2 + h^2}$$

m 、 n 、 h 是三个可以任意选取的正整数。换句话说, m 、 n 、 h 不能取分数,也不能连续地换成别的任意正数。因此, λ 和 ν 是不能连续地改变的,只能随着 m 、 n 、 h 从一组正整数跳跃到另一组正整数而跳跃式地改变。这又可以归纳出一条:就是宏观世界连续的物质形态(例如电磁波)的运动方式在一定条件下不能连续地改变,而只能跳跃式地改变。

进入微观世界后,情况是不是有改变呢?十九世纪末,物理学家发现黑体辐射的频率分布很难用理论来解释。1900年,普朗克引入了量子假说,认为电磁波在被吸收和放出时,能量是不连续的,换句话

说,是由一份一份的光子组成的,每份光子的能量为 $h\nu$, h 是普朗克常数, ν 是频率。按照量子假说,黑体辐射的频率分布就可以得到很好的解释,理论和实验符合得很好。

1902年,里纳德进行光电效应实验,他用紫外光照射各种金属的表面,发现只要频率超过一定数值,就可以从金属表面上打出电子。反

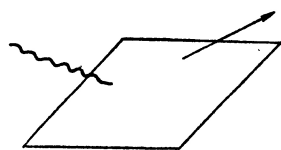


图3 紫外光频率超过一定数值时,就可以从金属表面打出电子

之,如果频率不够高,那末,即使紫外光光线再强,照射时间再长,也打不出电子来。这个现象怎么解释呢?为什么光线再强,照射时间再长也打不出电子呢?1905年爱因斯坦给出了回答:

原因仍旧是由于光的量子性。电子吸收的紫外光的能量是 $h\nu$;只有当 $h\nu$ 足够大,即频率足够大时,电子才能从光子获得足够多的能量,挣脱金属表面对它的束缚。显然,里纳德的光电实验为普朗克的光量子假说提供了新的事实证据。

以后,又有了越来越多的事实证明一切电磁波(包括可见光)都是一份一份的,而且频率越高,电磁波就越像是一颗一颗的粒子(例如硬 γ 射线)。这是一个很重要的发现,说明宏观世界的连续的物质形态(例如电磁波)到了微观世界(我们把涉及原子以及比原子更小的东西的各种现象叫做微观现象)以后却兼有了连续性(仍旧弥漫于空间,仍旧有波动性)和不连续性(像粒子那样,是一份一份的)。

那么,宏观世界的不连续的物质形态到了微观世界又会怎样呢?当然即使小到微尘,依然是不连续的。但是,如果继续小下去,小到比原子还小,那末,到了一定程度也会发生质的变化。就以电子来说吧,在二十世纪二十年代,先是德布

洛意在理论上推测，后来格默等又在电子衍射的实验中证实了电子也有波动性。不但电子有波动性，以后的一系列实验又相继证实了质子、中子等等也都有波动性。这又是一个很重要的发现，说明宏观世界的不连续的物质形态(例如粒子)到了微观世界以后也就兼有了连续性(运动起来像是弥漫于空间的波动)和不连续性(电子、质子、中子都是一份一份的，是具有粒子性的)。

因此，在宏观世界截然相反两种物质形态——连续和不连续的——到了微观世界竟统一了起来，它们都是既具有连续性，又具有不连续性，具体来说就是既具有粒子性，又具有波动性。这又叫做微观世界的物质形态的波粒二象性。波粒二象性的发现是二十世纪物理学中的一个有深远意义的重大发现。由于这个重大发现，人们对微观世界的物质形态的认识深化了。

事情还不止于此。上面讲到，宏观世界的连续形态的物质的运动形式，例如电磁波的运动形式，在一定条件下，呈现出不能连续改变的特性，现在，到了微观世界，不但电磁波在一定条件下仍旧具有这种特性，而且电子在一定条件下也具有了这种特性。原子光谱线的实验事实就是一个很好的证明。

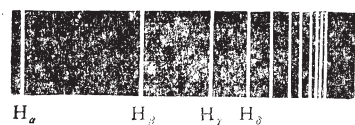


图4 原子的光谱线

起初，人们并不理解为什么原子有确定的光谱线，为什么不是发出连续光谱。1913年，玻尔正确地解释了这个问题，提出了玻尔模型。按照这个模型，原子中的电子的运动轨道决不能连续地改变，而只能取一些特殊的整数参数。后来，在1925年和1926年，薛定格和海森伯发展了量子力学，给出了更确切的解释，原来原子中的电子的波动必定是驻波，就好像琴弦的振动

必定是驻波一样。驻波都有一定的驻波花样，都有一定的频率。从一种驻波花样改变成另一种驻波花样，只能是跳跃式的改变，决不能连续地变过去。因此，驻波的频率也只能跳跃式地改变，而不能连续地改变。这就说明了为什么原子光谱线都是有确定频率的，说明了为什么原子不发出连续光谱。事实上每一条光谱线的频率都等于电子的两个不同的驻波花样之间的频率之差。电子从一种驻波花样跳跃地变化到另一种驻波花样叫做电子的“跃迁”。具体地说，电子从频率较

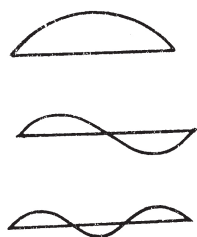
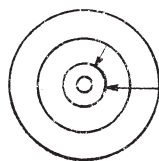


图5 从零弦的振动可以看到驻波都有一定的驻波花样

高的驻波花样跃迁到频率较低的驻波花样时，要放出一个光子，光子的频率就等于前一个驻波花样的频率减去后一个驻波花样的频率。电子从频率较低的驻波花样跃迁到频率较高的驻波花样，要吸收一个光子，光子的频率等于后一个驻波花样的频率减去前一个驻波花样的频率。

总之，原子光谱线的实验事实和玻尔模型(以及量子力学)的研究，又进一步揭示出来了微观世界的另一个特点：就是在微观世界里，不但物质存在的形态统一了起来——它们都既具有连续性，又具有不连续性，而且运动形式也统一了起来。在一定条件下(例如电子被束缚在原子内部的情况)，运动形式不能连续地改变，而只能跳跃式地改变(例如电子从一种驻波花样跃迁到另一种驻波花样)。这样，人们对微观世界物质运动规律性的

图6 氢原子中电子的玻尔轨道和跃迁示意



认识也就深化了。

现在，人们对物质形态及其运动规律的认识又处在一个新的阶段。所谓的“基本”粒子已发现了几百种，它们可以通过相互作用而相互转化。大量的实验事实还表明，“基本”粒子也有内部结构。目前是用量子场论去描述粒子及其运动转化规律的。在量子场论中，认为光子、电子……等都是粒子，同时也是各自的“场”的激发态，是“场”这种连续形态的物质的量子。事实上，量子场论既反映了连续性，又反映了不连续性(粒子性)。在解释轻子的电磁现象方面，量子场论是成功的。在解释低能弱相互作用现象方面，量子场论也得到了与实验相符的理论结果。但是对于强相互作用还没有取得重要进展。目前人们正在进行将各种不同的相互作用统一起来的尝试。

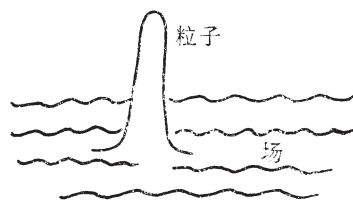


图7 粒子是量子场的激发态

随着科学实验的发展，人们将越来越深入地探索更深层次的物质形态及其运动转化规律，不断地对连续性和不连续性获得新的认识，建立新的物理图景，从而为人类改造自然提供更加强有力的手段。