# 100．如何理解波粒二象性？

光能发生干涉和衍射，并且具有偏振现象，因此光是横波，进一步研究知道光是电磁波，但在光电效应等实验中，它又具有粒子性的特点，因此光是具有波粒二象性的电磁性的物质。波粒二象性是一切微观世界物质的共有特性，电子、质子等实物粒子也同样具有波粒二象性。宏观物体的波动性目前还无法用仪器检测到。

人类对波粒二象性的认识是从光开始的。大约两百年前，从杨氏双缝干涉实验开始，人们认识了光的波动性，并最终确定了光是电磁波，大约一百年前，从光电效应等实验中，人们又认识了光的粒子性，最终认识到光具有波粒二象性。而电子衍射现象说明了微观粒子也具有波动性，从而知道了，波粒二象性是微观世界物质的共同特性。

## 一、什么是波动？

具有时空双重周期性的运动形式和能量的传输，是一切波动的基本特性，不具备这种特性的事物，不能成为严格意义下的波动（摘自赵凯华、钟锡华《光学》上册第 141 页2 ~ 4 行）。它是“运动形式和能量的传输”，并且传输过程中具有“时空双重周期性”，这是波动的基本特性。所谓“时空双重周期性”，指的就是周期 *T*（时间周期）和波长 *λ* （空间周期）。

波动过程中呈周期性变化的某个特征量的最大值称为振幅，描述搌幅的物理量如果是标量，则称为标量波，例如密度波、温度波等。光波是电磁波，它是电磁场在空间的传播，其振幅是矢量，因此是矢量波，但由于其电场矢量与磁场矢量间有确定的关系，有时候我们可以只讨论其电场分量，因此可以将其当作标量波处理。机械波与电磁波不同，它是实物粒子的振动在介质中的传播，由于介质不同，波的性质也不相同。例如，在空气中传播的声波实质上是一种密度波，而在地壳中传播的地震波则是更为复杂的张量波。

波动的特有现象包括干涉、衍射、偏振等。其中干涉和衍射是一切波动现象都具有的，而偏振则只有横波才有。因此是否能够观察到干涉和衍射现象，就成了判定是否是波动的判据，即只要观察到了某种事物能发生干涉或衍射，就能判定它是一种波动。人们正是在托马斯·杨通过双缝实验观察到了光的干涉现象后才一致承认了光是一种波，并且在观察到光的偏振现象后进一步认识到光是一种横波。

人们认识世界总是从认识宏观世界开始的。在宏观世界里，实物粒子构成的物体与波动是完全不同的，最主要的不同有两点：一是不可能有两个不同的物体（或粒子）同时占据空间的同一个位置，而波却可以，两列波相互穿过时，在交叠的区域内可以同时存在（有可能发生干涉、衍射等），而相互穿过后二者没有任何影响；二是实物粒子构成的物体在空间是分立的，而波动则是连续的。

## 二、怎么理解光的波粒二象性？

在牛顿、惠更斯时代，以他们二人为代表形成了两种不同的观点。牛顿认为光是由细微粒子构成的粒子流，称为粒子说，而惠更斯则认为光是一种波动，称为波动说。当时的人们认为这两种观点是对立的、不可调和的，只是无法证明谁对谁错。一直等到 19 世纪初，托马斯·杨通过双缝实验观察到了光的干涉现象，年轻的菲涅耳接受挑战用波动理论成功地解释了泊松亮斑之后，人们才心悦诚服地接受了波动说，认为光是一种波动，从而“理所当然”地否定了光的粒子说。但到了 19 世纪后期，一系列新的无法用波动理论解释的现彖陆续被发现（例如黑体辐射、光电效应、康普顿效应等），人们不得不重新思考：要承认光的确具有粒子性，但又不能否定光是波动的结论，最终人们认识到光是具有波粒二象性的物质。

普朗克的能量子概念可以说是把波和粒子结合起来的第一次尝试，能量子是分立的，可以认为是粒子，它的能量 *ε* = *hν*，其中 *ν* 是频率，而频率显然是波的概念，这里已经把波和粒子统一在一起了。爱因斯坦对光电效应的解释就延续了普朗克的这一思想，他提出了光量子的概念，光量子简称光子。康普顿效应表明了光子不但具有能量而且具有动量，动量 *p* = ，式中 *λ* 是其波长。光子是粒子，上面两个式子中左边的能量 *ε* 和动量 *p* 是描述粒子的物理量，但并不排斥它作为波的存在，这两个式子右边的频率 *ν* 和波长 *λ* 都是描述波的特征量。可以说，光子的粒子性和波动性通过普朗克常量 *h* 联系在一起了，*ε* = *hν* 和 *p* = 这两个式子是对光子波粒二象性的最精确、简练的数学描述。

光在有些场合表现得波动性明显，而在另外一些场合则表现得粒子性明显。具体地说，在光传播过程中，波动性表现明显；在光的发射及光与其他物质相互作用的过程中，粒子性表现明显。因此，在讨论光的传播过程中的问题时，首先应该把光看作电磁波．主要从波动的角度讨论问题，即它是弥散在空间的、连续的；而在讨论光的发射或光与其他物质相互作用的问题时，首先应该把光看作粒子（光量子），即它们是一个一个的、分立的。当然，看作波，并不排斥它同时是粒子，而看作粒子，也不排斥它同时也是波。

不同频率或不同波长的光，表现也不相同。频率越低，或者说波长越长的光，波动性越明显，这体现在波长越长的光的干涉和衍射现象越容易被观察到；而频率越高或波长越短的光，粒子性越明显，这表现在光电效应实验中，波长越短的光照射在金属上越容易发生光电效应。把上面结论推广到范围更为广泛的电磁波：波长较长的波段，例如红外线、微波，它们的波动性更强，很容易观察到干涉和衍射现象，其粒子性则较难被观察到，而波长更长的无线电波，则几乎无法观察到它的粒子性；波长很短的电磁波，例如 γ 射线，粒子性特别明显，基本上观察不到它的干涉、衍射现象。

我们今天所认识的光具有粒子性和波动性，与牛顿、惠更斯所说的粒子性和波动性有了本质区别：牛顿说光是一种粒子流，他认为光是一种实物粒子，而我们今天说光是一种粒子，指的是“能量粒子”，并不排斥光也是一种波，光的频率越高，光子的能量越大，光的粒子性越明显；惠更斯说光是一种波，他认为是一种机械波，需要依赖介质传播，而我们今天说的波，是电磁波，传播不需要介质。光具有粒子性，也具有波动性，个别光子的传播可能会表现出“偶然性”，大量光子的行为会表现出波动性的规律，这可纵理解为概率波。

## 三、波粒二象性是微观世界的共性

被公认是波动的光（电磁波）同时具有粒子性，反过来，被公认是粒子的电子、原子、质子、中子等微观粒子，是否也具有波动性呢？最早认真思考这个问题的是法国物理学家德布罗意，他根据类比的方法推断，微观粒子应该也具有波动性，并提出每一个运动的粒子都具有能量 *ε* 和动量 *p*，它们都与一个对应的波相联系，该波的频率 *ν* 和波长 *λ* 分别为

*ν* = 和 *λ* =

后来人们把这种与实物粒子联系的波称为德布罗意波，也称物质波，相应由上面两个式子计算得出的频率 *ν* 和波长 *λ* 分别称为德布罗意波的频率和波长。

光具有波动性，是由于人们在实验中观察到了光的干涉和衍射现象，而这都是波的特有现象；光具有粒子性，是由于黑体辐射、光电效应和康普顿效应等实验现象的发现。这也就是说，光具有波粒二象性是建立在实验事实基础之上的，而德布罗意在 1924 年提出实物粒子也具有波动性，并没有实验事实作为基础，因此如果不能得到实验验证，他的学说永远只能算作假说。

幸运的是，仅仅过了三年时间，1927 年戴维孙和汤姆孙就分别用电子束照射晶体得到了电子衍射图样，它与伦琴射线经过晶体得到的衍射图样类似，从而使得德布罗意的假说得到了窦验的验证，又过了两年，1929 年德布罗意就因此获得了诺贝尔物理学奖。

戴维孙和汤姆孙实验的成功并非偶然，而是得益于德布罗意的“指导”。电子经过 100 V 电压加速，能量 *ε* 和动量 *p* 分别为 *ε* = 100 eV = 1.6×10−17 J，*p* = = 5.4×10−24 kg·m/s，代入德布罗意公式计算其波长，*λ* = = 1.2×10−10 m = 0.12 nm。这个波长恰好在伦琴射线（X 射线）的波长范围之内，而用伦琴射线照射晶体发生衍射的实验早在 1912 年已经做成功，于是戴维孙和汤姆孙二人想到，既然经 100 V 电压加速后的电子的德布罗意波长与伦琴射线的波长相近，那么是否可以用同样的方法获得电子衍射的图样呢？按照这个思路，实验很快就得到了预期的结果。因此可以说，德布罗意的理论“指导”了戴维孙和汤姆孙二人的实验，而二人实验的成功又给德布罗意的理论以决定性的支持，真是“配合”得天衣无缝，戴维孙和汤姆孙也在 1937 年获得了诺贝尔物理学奖。

除了电子以外，其他微观粒子，例如质子、中子以及原子、分子等，也陆续被证实具有波动性。那么，由这些微观粒子组成的宏观物体，是否也具有波动性呢？理论上说，德布罗意的这两个公式 *ν* = 和 *λ* = 对于宏观物体同样适用，它们也具有波动性，只是它们的德布罗意波长太短了，要想观察到衍射现象，衍射“屏”或“缝”的线度必须要与其波长可以相比拟。戴维孙做电子衍射实验时使用的“衍射屏”是镍晶体，镍原子规则、整齐地排列着，形成了一个衍射光栅，其原子间距，即衍射光栅的“缝”宽的数量级是 10−10 m，它与经过 100 V 电压加速的电子的德布罗波波长处在同一个数量级，因此观察到了明显的衍射现象。而对于宏观物体而言，其德布罗意波长要小得多，因此无法通过实验证实其具有波动性。

20 世纪以前，人们还认为宏观世界与微观世界遵循相同的运动规律。在宏观世界中，波动性与粒子性是对立的，不可能同时存在波动性和粒子性。但到了 20 世纪以后，人们才认识到微观世界具有区别于宏观世界的特性，例如在宏观世界中对立的波动性和粒子性在微观世界中可以统一起来，这是人类对现实世界认识的一大进步。