

物质波(Matter Wave)

亦称德布罗意波，通常它描述了微观实物粒子的波动特性。在量子理论中，光波粒子性的发现，促使物理学家逆向思考这样一个问题：通常认为是粒子的物质，会不会也呈现出干涉、衍射等波动特征？研究结果表明，所有微观粒子(电子、原子等)都具有波动和粒子的二重属性，即波粒二象性。微观物理中这种被叫做物质波的奇异现象，后来为许多实验所证实，成为量子力学建立的重要基础之一。

物质波的基本概念

通常，人们自然地会把电子、质子这样的微观粒子看成与经典力学中的质点相同，具有轨道或确定的动量和坐标。然而，在 1924 年，法国青年博士研究生德布罗意 (de Broglie) 指出：“在辐射理论上，比起波动的研究方法来，过去的研究忽略了粒子的研究方法；那么，在实物理论上是否发生了相反的错误，是不是我们关于‘粒子’的图像想得太多，而过于忽略了波动的图像呢？”他的这一考虑，主要是基于普朗克(Planck)和爱因斯坦(Einstein)关于光量子的重要物理发现：电磁辐射的能量是不连续的，电磁场的发射和吸收，只能以“量子”的方式进行；在这个意义下，辐射场可以看成是由许多“光量子”组成，而每个光量子象实物粒子一样，具有特定的能量和动量。这个观念成功地解释了黑体辐射、光电效应、固体比热和康普顿散射等物理实验。

德布罗意是把光的这个波粒二象性的事实加以推广，提出一切微观粒子都具有波动性的大胆假设，并论证了一个动量为 $p=mv$ ，能量为 E 的自由的粒子，相当于一个波长为 $\lambda=h/p$ 、频率为 $\omega=E/h$ 、沿粒子运动方向传播的平面波 ($h=6.6260755 \times 10^{-34}$ Js 是普朗克常量)。由此可见，粒子的波长与其质量和速度成反比。各种实物粒子的速度是有限的(小于光速)，对于给定的质量，许多粒子物质波的波长是很短的。例如，动能为 100 电子伏特的电子，其物质波波长仅为 0.12 纳米，这一波长已落在硬 X 射线波段。在室温(17)下的氢原子的物质波波长更短，仅为 0.021 纳米，处于硬 X 射线波段的短波的一端。其他原子的物质波波长更短。对于宏观物体而言，由于其物质波波长极短，远远小于宏观物体的尺度，其波动效应通常是无法观察的。例如一颗质量为 10 克的子弹，当它以 $v=300$ 米/秒的速度射出时，它的波长是 2.21×10^{-34} 米。由于原子核的线度约为 10^{-15} 米(飞米)的数量级，相比之下子弹的波长小到实验难以测量的程度。这时，人们可以不考虑子弹的物质波效应，用轨道这样的经典概念，就可以相当准确地描述像飞行中的子弹这样的宏观物体的运动。

物质波实验验证

在提出物质波假设时，德布罗意并没有任何直接的实验证据。1927 年，美国贝尔实验室的物理学家戴维逊 (Davisson) 和革末(Germer)，研究了电子在普通镍靶上的散射。由于一次意外事故，镍靶被氧化。在将氧化物还原时，他们将多晶的镍处理成几个大的单晶。再进行电子散射时，竟观测到和 X 射线衍射相类似的图像。X 射线衍射图像的发现是 X 射线具有波动性的有力证明，电子散射时也发现了类似的图像，这就证明了电子具有波动性。同年，英国物理学家 G. P. 汤姆逊完成了电子束穿过多晶薄膜的衍射实验，也得到了和 X 射线衍射图像极其相似的照片。这两个著名的实验得出的电子的物质波波长和德布罗意公式计算的结果相符合，使德布罗意的假设得到了强有力的支持。除电子外，物理学家还陆续用实验证实中

子、质子乃至原子、分子等等微观粒子都具有波动性。

物质波既是一种波动它应当产生干涉现象，早期的中子实验干涉证实了这一点。氦原子双缝干涉实验亦为其一例。让氦原子发生器出来的氦原子束通过一条窄缝膨胀，再让其通过有两条缝的板，变成波长一样的两束氦原子，然后在观察屏上汇合，在两束氦原子相聚的地方出现了干涉条纹。由于氦原子物质波波长比光波波长短得多，所以对这一类双缝实验装置的要求更高，例如，两条缝的缝宽仅 2 微米，相距 8 微米，它们是在厚度仅为 1 微米的金箔上用特殊方法加工出来的。1999 年，人们甚至看到了更大的实物粒子的波动现象：维也纳大学研究小组利用热的 C_{60} 分子进行了量子干涉的实验，观察到了联系于 C_{60} 质心运动物质波波长的干涉条纹。它表明，在特定的条件下，具有丰富内部自由度的较大粒子（甚至宏观物体）也具有实验上可观察的物质波特性。

利用物质波的干涉现象，可以制作干涉仪。干涉仪是测量精度和灵敏度都非常高的精密仪器，干涉仪测量时使用的波长越短，测量精度和灵敏度就越高。用物质波替代光波做成的干涉仪，如用在宇宙飞船导航的陀螺仪上，其灵敏度比现在的激光陀螺仪还高出 10 亿(10^9) 倍。到 20 世纪 70 年代时，人们已分别研制出电子和中子物质波干涉仪，在 20 世纪 90 年代又研制出原子物质波(波长更短)干涉仪。

不确定关系与概率波

德布罗意提出物质波假设后不久，奥地利物理学家薛定谔(Schroedinger)提出了用波函数来描述粒子的运动，并建立了相应的波动方程--薛定谔方程。之后，德国物理学家玻恩考虑波函数究竟是什么的基本问题，提出物质波是概率波的意见：波函数的绝对值的平方就是微观粒子在某一时刻出现在某处的概率。人们可以从光子的概念出发，理解概率波的观点。如果想象光束是由大量光子组成的，光的强度就是光子到达屏幕上各处的概率。按照玻恩的想法，电子在衍射时落在空间的哪一点是有一定概率的。在衍射时，成千上万的电子落点的分布是一种概率分布，电子衍射图像正是这种概率分布的体现。人们也可以在动量空间中理解这种概率分布。

微观粒子具有波动性且由概率波来描述的这一特点，会在测量上导致与经典观念不一样的结果。在经典物理中，描述其特征的几个物理量通常可以在任意精度内加以同时测量。但就概率波描述的微观粒子而言，它的空间位置和动量是不能同时确定的，概率波只能同时给出粒子在各处出现的概率以及粒子具有某一动量的概率。这样，动量 p 和位置 x 的平均值会有内在的不确定值 Δp 和 Δx 。德国物理学家海森伯指出，动量 p 和位置 x 不能同时确定的程度，由普朗克常量 h 加以限定，具体结果的关系式 $\Delta p \Delta x \geq h/2\pi$ ，叫做“不确定性关系(uncertainty relation)”，(过去中文翻译为“测不准关系”)。不确定性关系是描述微观粒子的量子力学最基本的特征之一。

不确定性关系是微观粒子波粒二象性的体现，正是因为微观粒子所具有的波动性，使得粒子原本在任何一个时刻所具有的确定的位置和动量，变得不确定起来；使得粒子运动轨道模糊成一片“电子云”。物理上的一种直观的解释来自海森伯本人提出的“测量干扰”的观念(这正是当初中文译为“测不准关系”的理由)：不确定关系来源于在单次测量中仪器对被测量的微观系统的不可控制和不可预计的扰动。举一个简单的例子，为了观测电子的运动就得用光去照射它，越是要求观测得精确(Δx 越小)，越就得用波长越短的光去照射电子，波

长越短意味着光子的动量越大，光子与电子碰撞的康普顿效应越显著，电子受到碰撞后其动量偏差 Δp 越大。这种事与愿违的结果，正是对微观系统(电子)进行观测所造成的。

其实，这种情况在宏观世界中也出现，只是经典物理现象可以忽略不确定性关系的影响。例如，用温度计去测一盆热水的温度，把温度计插进热水中时，温度计要吸收一点热量，使得热水中的总热量少了一些。因而，测得的实际温度比温度计插进去之前热水的实际温度低了一点。然而，因为温度计本身所吸收的热量相对于总热量来讲是很少的，可以忽略不计，从而可以把温度计测得的温度当作热水的实际温度。如果去测一支很小的玻璃试管里的热水温度，温度计本身所吸收的热量可能占总热量的几分之一，测量对被测系统的干扰再也不能忽略不计了。这正是测量微观系统的状态时所遇到的矛盾。需要指出的是不确定性是物质波的内禀特性，它只是在测量中得以体现，而不是测量本身带来的。上述例子只是表明，具体的测量会直接反映这一内禀的量子特性。

量子力学互补性（并协）原理

从原理上讲，物质波的干涉现象由来自于描述波函数的薛定谔方程是线性的。如果 Φ_1 和 Φ_2 是物理体系的两个可能状态，它们的相干叠加 $\Phi = \Phi_1 + \Phi_2$ 也代表物理体系一个可能状态。依据波函数的玻恩解释，其空间表示的模平方 $|\Phi|^2 = |\Phi_1|^2 + |\Phi_2|^2 + \Phi_1\Phi_2^* + \Phi_1^*\Phi_2$ 代表了在某空间点发现粒子的几率密度。对一个量子相干叠加态而言，其模平方中包含了不同分量的交叉项 $\Phi_1\Phi_2^* + \Phi_1^*\Phi_2$ ，它们代表了量子干涉，意味着态的量子相干性。仅就数学结构而言，这与经典光束的干涉是一样的。然而，量子干涉或量子相干性有不同于经典干涉的十分奇妙的基本量子特性。一个典型例子是物质波的双缝干涉实验：实验中，如果测量粒子通过了哪一个缝，干涉条纹便不再存在了。这种由于测量或其它影响导致相干性消失的现象称之为量子退相干（quantum decoherence）。仅就测量而言，人们称之为波包塌缩(wave packet collapse)。

为什么量子测量会引起量子退相干呢？玻尔认为，其根源在于所谓的量子力学互补性(并协)原理：物质存在着波粒二象性，但在同一个实验中波动性和粒子性是互相排斥的。这可以很好地解释为什么在双缝干涉实验中探知粒子通过哪一条缝，干涉条纹会部分和完全消失(图 x)：知道粒子走哪一条缝，等于强调粒子性(只有“粒子”才具有确定位置，而波则

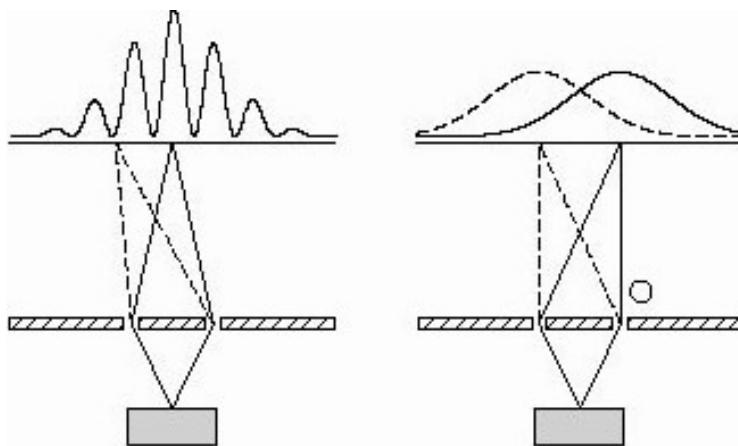


图 x：双缝干涉实验中的量子退相干

弥散于整个空间)。根据互补性原理，波动性被排斥了，干涉条纹便消失了。而量子力学的创立者海森堡提出了比较直观解释：知道粒子过哪一条缝，等于说要准确地测量（垂直于相应路径的方向上）粒子位置，由不确定性原理，这个测量不可控制地干扰了（垂直于相应路径的方向上）粒子的动量，从而干扰到达屏上粒子的位置，造成干涉条纹的模糊，甚至抹平了最后形成的干涉条纹。1998年，德国 Rempe 小组的冷原子干涉实验进一步表明，坐标-动量的测不准关系不是导致干涉条纹消逝的唯一原因。在不干扰冷原子空间运动的动量的前提下，他们的实验利用冷原内部状态有效地记录了空间路径的信息。做为内部状态（“仪器”）与原子束空间态相互作用的结果，干涉条纹消失的本质是因为形成了原子束空间状态和内部状态的纠缠态。这类新型物质波的干涉实验，直接检验互补性原理相关的量子力学基本问题，大大加深了人们对物质波奇妙特性的理解。