

量子的基本观念

量子代表了人类认识微观世界的核心观念，它不仅是微观实物粒子存在的基本形式，而且描述了波与场所具有的粒子性特征。以量子力学为中心的现代量子理论，完整地描述了微观世界的量子行为。事至今天，虽然关于量子力学的基础及其解释还没有定论，但量子力学已成为现代科学的重要基石。在应用上，它导致了激光、半导体和核能技术的建立，深刻地影响了当代人类社会的生产力。

一． 光量子

光量子是指光波客观上具有的基本能量（动量）单元。它代表的量子观念起源于二十世纪初对黑体辐射的研究。普朗克发现，为了解释实验中发现的黑体辐射能量的频率分布，必须假设电磁场辐射只能以“量子”方式进行，即发射和吸收的能量只能是每个“量子”能量的整数倍。这是与经典力学中能量连续性不一样的革命性观念。由此，爱因斯坦进一步明确提出光量子（或光子）的概念，认为辐射场是由光量子组成。光子与电子碰撞，其行为很象一个有特定能量和动量的实物粒子。由此可以很好地解释了光电效应：光照射到金属表面，只有当光的频率足够大时，电子才能克服表面的逸出功，脱离金属表面。爱因斯坦进一步应用能量的不连续性，成功地解释了固体比热在 $T=0$ 度时的行为。

光波能量不连续的量子观念，进一步启发玻尔对于卢瑟福原子有核模型的深刻研究。他认为，原子只能存在于分立的能量定态，辐射只能发生原子在两个定态之间跃迁。这个观点克服了经典理论对原子有核模型预言（绕核电子会由于电磁场辐射损失能量、塌缩到原子核上）与现实原子基本稳定的矛盾，成功地解释了实验中总结出来的氢原子光谱 Rydberg—Ritz 组合公式。

二． 物质波

量子概念另一个重要方面是德布罗意物质波概念的引入。德布罗意把光的波粒二象性观点加以推广，认为一切微观粒子都具有波动性。一个动量为 p ，能量为 E 的自由粒子，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。许多实物粒子物质波的波长很短。例如，能量为 100 电子伏的电子，其物质波波长仅为 0.12 纳米。室温下氢原子的物质波波长更短，仅为 0.021 纳米。1927 年，美国物理学家戴维逊和革末，在进行电子散射实验时，一次意外事故使他们观测到和 X 射线衍射类似的图像。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。这些都证明了电子具有波动性。以后，物理学家还陆续证实中子、质子乃至原子、分子等等微观粒子都具有波动性。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），其波动效应通常很难观察到的。

三：不确定关系与互补（并协）原理

在经典物理中，描述质点特征的几个物理量通常可以在任意精度内加以同时测

量。当微观粒子表现为物质波，它的空间位置和动量是不能同时确定的，只会存在不确定值 Δp 和 Δx 。德国物理学家海森伯指出，动量和位置不能同时确定的程度，由普朗克常量 h 加以限定，具体结果表示为“不确定性关系”： $\Delta p \Delta x \geq h/2$ 。它是量子理论描述的微观粒子最基本特征之一。对此物理上的一种直观的解释是海森伯提出的“测量干扰”的观念。例如，为了观测电子用光去照射它，要求观测得精确（即 Δx 越小），就得用波长短的光去照射电子；光子波长越短意味着光子动量越大，电子受到碰撞后其动量偏差 Δp 越大。

在物质波的双缝干涉实验中，如果准确测量到粒子通过了哪一个缝，干涉条纹便不再存在了 - 发生量子退相干。玻尔认为，量子退相干根源在于互补性（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。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。对于量子退相干，通常也可以用海森伯“测量扰动”解释，但测量扰动并不是退相干唯一的根本原因。在不干扰冷原子空间运动的前提下，1998年的冷原子干涉实验利用内部状态记录了空间路径的信息（形成了原子束空间状态和内部状态的纠缠态），导致干涉条纹的消失。

四：量子力学

量子力学是描述微观世界运动的基本理论，它包括互为等价的矩阵力学和波动力学。为了发展玻尔思想，“以适用于更复杂的原子”，1924年，海森堡首先提出了革命性观点：在原子世界，每个可观察的实验结果（如氢原子谱线）总是与两个“玻尔轨道”有关，一个绝对的、由速度和坐标同时确定的轨道在描述原子的微观理论中是没有意义的。人们应当处处使用“两个轨道”来描述可观察的物理量。例如，原子的电磁辐射可以由电子坐标随时间的变化来描述，可能辐射的频率是其付里叶展开式中出现的频率—Rydberg—Ritz组合中有两个指标的实数。于是应当把坐标和动量等可观察物理量都看成具有两个指标元素的矩阵（或算符）。这时，坐标 Q 和动量 P 是不对易的，即 $QP \neq PQ$ 。在玻恩和约当的协作下，海森堡这个重要发现导致了矩阵力学的建立。它的诞生成功地克服了玻尔理论处理复杂原子时遇到的困难。

量子力学另一表述 - 波动力学是薛定谔在1924年建立的。其核心是用满足薛定谔方程的时空点上的波函数描述粒子的运动。根据玻恩提出的几率解释，波函数的绝对值平方代表了电子在空间的几率分布。例如，原子中的电子可以用波函数描述，形成所谓的电子云。在波动力学中，原子的定态是薛定谔方程的本征态，相应的本征值就是原子的能级。原子的电磁辐射可描述为从一个能级到另外一个能级的跃迁。狄拉克通过建立表象理论，把矩阵力学和波动力学的描述完美地结合起来，而且把它推广到狭义相对论描述的高速运动情况，成功地预言了正电子的存在。反物质粒子的发现，把量子力学理论推上科学的顶峰。