

原子

原子是物质结构中介于分子和原子核之间的一个层次，它是构成所有化学元素的基本单元。原子的基本结构是：一个带一定数目正电荷的原子核，有一定数目的电子束缚在其周围不停地运动。由于“量子化条件”的作用，经典物理（牛顿力学和麦克斯韦电磁学）预言的电子到核的坍缩并不发生。因此，现实世界中的原子一般是稳定的。

一. 古典原子概念的发展

与哲学思辩中物质无限可分的朴素观点不同，古希腊思想家德谟克利特等人认为，物质不可能无限地分割下去，分割到最后会出现小到不能再分割的极微小的粒子——“原子”。然而，这只是一些并非科学观念的直观看法，直到19世纪，英国化学家道尔顿等人才提出了近代的原子学说。他们认为，一切化学元素都是由不能再分割的微粒——原子组成的，原子是保持元素化学性质的最小单元。两种或多种元素的原子结合而成化合物的分子，分子是保持化合物化学性质的最小单位。

1897年，作为“一位最先打开通向基本粒子物理大门的伟人”，汤姆孙（J.J. Thomson）不仅利用阴极射线在磁场中偏转成功地测出 e/m 的数值，而且大胆地承认电子作为“比原子小得多的微粒子”的存在。后来，密立根（R.A. Millikan）的著名“油滴实验”测得接近现代结果的电荷值，从而推出电子质量，导致电子的伟大发现。这个工作确立了电子作为一个物质基元的客观存在，是建立现代原子模型的第一步。电子发现以后，根据整个原子是电中性的事实，对于原子中正、负电荷分布问题，汤姆孙本人提出了所谓的原子“西瓜模型”：电子嵌在均匀分布的正电荷背景中。通过“同心环上只能安置有限个电子”的假设，这个模型能够解释元素周期表，但不能解释粒子轰击原子的散射实验。可以说，1895、1896和1897年，人们相继发现了X射线、放射性和电子，导致了正确描述微观世界的原子概念的确立，推动了量子理论发展和量子力学的诞生。

二. 原子“有核模型”和玻尔理论

1909年，卢瑟福（E. Rutherford）的学生盖革（H. Geiger）和马斯顿（E. Marsden）用粒子轰击原子时发现，有八分之一的粒子被完全反射回来，产生所谓的“大角散射”。如果基于“西瓜模型”，这种“像一颗15英寸炮弹打在纸上被反弹”（卢瑟福语）的物理现象是十分不可思议的！基于这个明显的实验事实，卢瑟福经过严密的经典散射理论分析后，于1911年提出了“原子有核结构模型”：正电荷集中在仅占原子大小万分之一的中心范围，而电子像行星、地球绕太阳运动一样，束缚在这个中心周围运动。需要指出的是，早在1903年，P. Lenard在原子吸收阴极射线实验中发现，“原子是空虚的”。1904年，年长冈半太郎（H. Nagoka）也提出了原子“行星模型”。前者没有进一步实验上的深入，后者也没

有坚实的实验基础。而卢瑟福工作的意义不仅在于首先确立了正确的原子模型，而且其重要之处还在于它启示人们用散射的方法、去探究更深层次的物质结构。今天，在现代物理学（特别是粒子物理学）的实验研究中，到处留下了“卢瑟福的影子”。但是，卢瑟福原子模型虽然能够成功地解释“大角散射实验”，但在观念上，与当时业已“大厦建成”的经典物理有着极为深刻的矛盾：根据经典力学和电磁学，绕原子核运动，电子在速度改变时要发生辐射，引起能量损失，最后塌缩到原子核上。因而，理论上卢瑟福原子是不稳定的。但现实中原子大多是稳定的。

1911年，玻尔把量子假说革命性地引入卢瑟福模型，不仅解决了原子不稳定这个困难，而且由此揭开了现代原子物理的新篇章。玻尔最早的工作动机是考虑氢原子光谱线实验的经验解释：巴尔末（J. J. Balmer）线系和赖曼（T. Lyman）线系等均可以表达为里兹组合的形式： $\nu_{mn} = \omega(n) - \omega(n')$ 与两个指标有关。针对这个问题，玻尔提出了一种基于卢瑟福“有核模型”的原子理论：其基本内容是：一、定态条件。氢原子中的电子绕原子做运动，形成一条经典轨道，但有一个“硬性规定”：它只能在分立轨道上运动，且不产生辐射。二、频率条件或量子跃迁。仅当电子从一条轨道“跃迁”到另一条轨道时辐射产生，辐射的电磁波放出能量为 $h\nu_{mn} = E(n) - E(n')$ 其中代表电子在“定态”轨道上的能量。第三，角动量量子化。宏观领域和微观范畴有各自不同的经典理论和量子理论。但微观范畴的量子理论外推到宏观领域必须得到与经典理论一样的结果。依据这个所谓的对应原理，可以推导出电子运动的角动量量子化——角动量只能是某个小量的整数倍。形式上看，基于以上三个观念的玻尔理论，只是通过定态条件假定回避了卢瑟福模型的困难，但这里形成的观念是现代物理学、至当代科学的发端。

三． 量子力学：对原子“最完美”的描述

在解释氢原子谱线方面（包括推导出里得伯常数等），玻尔理论取得了巨大成功。但把它应用到氢原子等更复杂原子体系，人们就不知道怎能利用量子条件确定定态。为了发展“玻尔轨道”的思想，“以适用于更复杂的原子”，1924年，年轻的海森堡首先取得了革命性的进展。他认为，从可观测的意义上讲，单个玻尔轨道并不是问题的关键，因为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。因此，考虑到“物理理论应集中在仅与可观测有密切关系的量上”，人们就应当处处使用“两个轨道”来描述可观察的物理量。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。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——里兹组合中由两个指标标征的实数。于是，我们就应当把坐标和动量等可观察物理量都看成矩阵（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现代量子力学的一种描述——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。

量子力学另一独立而等价的描述是薛定谔建立的波动力学。它是在德布罗意物质波假说基础上发展起来的。早在1900年，普朗克（M. Planck）提出了“光量

子假说”，成功地解释了黑体辐射：电磁辐射的能量只能是“量子化的”，即其能量 $n\hbar\nu$ 只能是某个小量 $\hbar\nu$ 的正整数倍，其中 \hbar 是普朗克常量， ν 是光的频率。爱因斯坦认为，光量子意味着电磁辐射由具有动量和能量的基本单元—光子组成。把光看成一个粒子，他成功地解释光电效应中的阈值现象。德布罗意反过来类比，认为粒子也会有波动性，具有一定的波长和频率。最后是薛定谔一般地给出了描述实物物质波动性的基本方程——薛定谔方程，建立了量子力学另一个等价描述——波动力学。根据波动力学的观点，原子中电子可以用时空点上波函数描述，它的模平方代表了电子在空间的几率分布（玻恩对波函数的几率解释），形成所谓的电子云。在波动力学中，原子的定态是由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在某种“量子”微扰作用下，从一个能级到另外一个能级的演化跃迁。

后来，狄拉克不仅通过建立表象理论、把矩阵力学和波动力学的描述完美地结合，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。这个反物质世界的发现，把量子力学理论推上科学的顶峰。事至今天，以描述原子为开端的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。虽然关于量子力学的基础及其哲学解释目前还没有定论，但其本身无疑是现代科学中最贴近人类生活、也最深刻影响人类思想的科学理论之一。