

物质结构研究方法及实验的演变

毛 多 鹭

(陕西师范大学物理系 西安 710062)

物质构成之谜是自古至今人们一直在探索的重要课题。到了近代,这个课题取得了很大的成果,这些成果的取得过程是一个曲折复杂的艰难探索过程,这些成果的取得是得益于科学知识的不断积累,更重要的是得益于实验方法的改进和实验手段的突破。对物质结构研究方法及实验的演变过程作一个回顾是非常有益的。

一、哲学思辨

早在周代,我们的祖先就提出了五行说,即万物由金、木、水、火、土 5 种物质原料构成;《周易》中有“太极生两仪,两仪生四象,四象生八卦”的以太极为世界本源的观点;在汉代出现了天地万物由“元气”组成的哲学观;古希腊人认为水、火、空气和泥土是构成万物的基本元素;古希腊哲学家德漠克利特把构成物质的最小单元叫做“原子”;中国战国时的墨翟也有“端,体之无厚,而最前者也”的原子观。由于科学技术落后,古人的研究只能停留在思辨和猜想。

二、显微技术及其演变

300 年前,英国科学家 R·玻意耳提出化学元素的概念;100 多年前,俄国科学家门捷列夫从已发现的元素中发现其规律性,制成元素周期表,并预言了未发现的元素的特性。此时人们已了解到一切物质都是由元素组成的,每一种元素都有化学性质相同的原子,不同的原子以不同的结构组成各种分子,万物由分子组成。而深入了解物质结构及分子结构,则得益于显微镜的发明和改进。

1671 年,荷兰人列文虎克发明了光学显微镜,虽然与观察分子层次的物质结构还相差很远,但为研究物质结构提供了非常重要的思想方法。1912 年德国物理学家劳厄发现 X 光在物质上的衍射现象,1913 年英国物理学家布拉格用之研究固体的微观结构,获得的 X 光衍射花纹,反映出原子的空间分布状况。1925 年法国物理学家德布罗意提出一切物质都具有波动性的理论。1927 年美国科学家

戴维逊和革末发现电子在晶体上有衍射花纹,证实了德布罗意的理论,1932 年科学家卢斯卡和克诺尔由此制造出了世界上第一台电子显微镜,成为研究分子结构的有力工具。

1978 年,瑞士苏黎世国际商用公司实验室的科学家罗雷尔和一位德国研究生宾尼格在 1981 年发明了可“看见”原子的显微镜,即扫描隧道显微镜,并于 1986 年与电子显微镜发明人卢斯卡分享了诺贝尔物理学奖。随后又发现了原子力显微镜等一系列扫描探针显微镜(SPM),最近几年各国科学家利用 SPM 揭示了一系列原子、分子世界的图像,终于使人们直观地“看”到原子、分子的庐山真面目,另外也为纳米技术的开发利用奠定了基础。

显然,“显微”的实验思想是分子层次上物质结构研究的基本方法论。但无论显微技术如何高明,也解决不了原子的内部结构问题,进一步研究原子结构,必须依赖新的实验方法。

三、“轰击”实验及其演变

自从汤姆孙发现了电子,研究原子内部结构的序幕就揭开了,1901~1908 年间虽然佩兰、开尔文、汤姆孙等人提出了多种原子结构模型,但都经不起卢瑟福 α 粒子散射实验的检验。后来,卢瑟福及其合作者根据大量 α 粒子轰击金箔后向各个方向偏转的比例,提出了原子的核式结构模型。

1919 年,卢瑟福用粒子轰击氮原子,从氮原子中打出了质子。此后,人们用同样的方法从别的原子核中也打出了质子,从而证实了原子核中有质子。用同样的实验思想,查德威克用钋放射源发射 α 粒子轰击铍板,铍板放出一种看不见的中性粒子,这种中性粒子又从石蜡中打出了质子,经过能量计算,这种未知的中性粒子正是为卢瑟福所预言的中子。质子、中子的发现为认识原子核结构奠定了基础。

之后,卢瑟福、查德威克、布拉开特等人用 α 粒子轰击的方法使很多原子核发生了人工转变,使人

类对原子核结构的认识又前进了一大步。

为了击破更多的原子核,以研究原子核的内部结构,卢瑟福曾宣称需要更大能量的轰击粒子。由此人们开始认识到利用实验条件加速粒子,向各种原子轰击是进一步实现核转变以认识核结构的关键所在。1925年美国的布赖特、托夫、达耳首先建造了一个可以产生几百万伏高压的变压器,并且把这个电压加在可用于加速粒子的管道上,形成了高压加速器的雏形。1931年,美国普林斯顿大学的范德格拉夫发明了一种能有稳定输出的高压发生器,建造了第一个加速器。1932年欧内斯特·劳伦斯在美国伯克利大学建造了第一台回旋加速器。其后在许多先驱者艰苦卓绝的探索中各种加速器应运而生,比如静电加速器、微波加速器、同步加速器的变形和发展。借助于加速粒子轰击(或对撞)的方法及与之相配套的各种粒子探测器等手段,科学家基本上认识到了原子结构、原子核的结构,发现了许多新粒子,提出了强子结构的夸克模型及物质结构的标准模型。

加速器现在广泛应用于医学、工业及科学研究的许多领域,但最初的开发动机在于轰击原子核以研究其内部结构,而它的思想方法却源于粒子轰击实验。由此,我们可以这样认为, α 粒子散射实验的意义不仅仅在于发现了原子的核式结构,更重要的是提供了一种研究物质微观结构的思想方法,在物质结构探源的历程中具有划时代的意义。

四、新的困惑及相应的探索

粒子物理学取得了很大的进展,标准模型也有了很大的成功之处,但仍存在着许多尚待解决的问题。特别是夸克“禁闭”、基本力的统一等问题。对这些问题的研究,要求有更高能量的粒子去轰击或碰撞,亦即需要更高能量的加速器和对撞机。但随着对能量要求的提高,加速器的造价也越来越昂贵,如建造利用超导磁体的 Tev(太电子伏)级的加速器,其直径达 27 千米,建造费用需几十亿美元。美国曾打算建一台超级超导对撞机(SSC 计划),这台加速器的粒子运行轨道有 87 千米长,造价预计达百亿美元,由于美国政府不堪重负,计划破产。可以想象,其他国家更是望尘莫及。

70 年代中期提出的物理大统一理论(GUT)激起了人们寻求突破标准模型、检验 GUT 的强烈兴趣。而加速器的能量远远小于大统一所要求的 $\sim 10^{16}$ Gev,这预示着,在物质探源的道路若要取得进一

步突破,则需要实验思想方法上的突破。

为了解决高能粒子问题,人们正从两个方面进行着努力。其一是对加速器的原理和技术进行根本性改革,现已有了不少改革方案和设想。例如利用集体相干场来加速,加速率可达到每米 100Gev;利用激光加速可达每米几百 Gev;利用晶格内部的场加速可达每米 1Tev。当然这些方法尚在探索中。其二是返回非加速器实验。非加速器实验就是不使用加速器手段进行的粒子物理实验。如果从 1912 年发现宇宙射线算起,非加速器实验的确有过一段辉煌时期。50 年代出现的加速器,一直成为粒子物理实验研究的主流。但是,当加速器在“高能区”研究失效后,非加速器实验研究开始复兴。特别是美国超级超导对撞机建造计划下马后,一批在加速器实验上卓有建树的物理学家,包括几位诺贝尔奖得主,也转向应用非加速器实验,如利用极低宇宙线本底环境中进行的地下实验和核谱学实验来研究质子衰变、无中微子双 β 衰变、大气中中微子振荡及寻找磁单极子等,取得了一定的成果。另外,人们也在期待有更适宜的实验方法以支持物质结构的更深层次的研究。根据以上分析可以看出,人们对物质结构及本源的探索由浅入深经历了 4 个阶段,每个阶段都有相应的方法和实验的支持。

知识的积累是实验方法创新的前提,而实验方法的创新又是物理研究突破的前提,物理学是一门实验科学,实验方法的创新是物理学每一步发展所依赖的必要条件。

封底照片说明:

火星是太阳系第四颗行星,因为它是太阳系中与地球最相似的行星,长久以来一直是人类关注的对象。随着科学技术的迅猛发展,特别是从 70 年代开始多个火星探测器飞抵火星,使得火星神秘的面纱慢慢打开。目前世界各国竞相研制出多种探测火星的仪器设备,其中火星探测车便是探测火星活动中最为引人注目的。封底照片上的火星探测车是由北京航空航天大学研制的,它采用悬架式结构以保证车轮在不同的路况条件下与地面可靠接触。在火星探测车的前后部各装有机机械臂,其中后部还装有摄像系统,就像人类的眼睛,通过计算机可以对地形进行识别、分析,从而做出最佳的路径选择。相信不久的将来,由我国自己设计制造的火星探测车将驰骋在火星广袤的原野上。

(李博文)