

量子论的建立和发展

王德云

(首都师范大学物理系)



19世纪与20世纪之交,是物理学发展史上不平凡的时期。

经典理论的完整大厦与晴朗天空的远方飘浮着两朵小小的乌云,勾画出19世纪末的画卷;20世纪初,新现象、新理论犹如雨后春笋不断涌现,物理学界思想异常活跃,堪称物理学的黄金时代。量子论和相对论的诞生驱散了乌云,使整个物理学面貌一新。

马克思有句名言:“历史上有惊人的相似之处”。当前,正处于新的世纪之交。20世纪物理学硕果累累,但也遇到两大困惑:“夸克禁闭”、“对称性破缺”,这预示着物理学正面临新的挑战。抓住机遇,迎接挑战,物理学将会出现

时被指控为共产党员。正当钱学森要出发回国之际,无端受到非法拘留。后来虽经美国友人保释,仍不断受到迫害,行动失去自由。五年后在周恩来总理亲自关怀下,借中美大使会谈之机,与美国多次交涉才得以回归祖国。钱学森后来讲这段经历时说道:“我从1935年去美国,1955年回国,在美国待了20年。20年中,前三四年是学习,后十几年是工作,所有这一切都在做准备,为了回到祖国后能为人民做点事。我在美国那么长时间,从来没有想过这一辈子要在那里呆下去……在美国期间,有人好几次问我存了保险金没有,我说一块美金也不存,他们感到很奇怪,其实没有什么奇怪的。因为我是中国人,根本不打算在美国住一辈子。”早在1935年钱学森赴美留学的前夕,他就立下了“学成必归,报效祖国”的志愿。

钱学森回国之后不久,就投入新中国的国防建设。他最重要的功绩就是为新中国的火箭

新的辉煌。本文仅就量子论的建立和发展这一侧面做些回顾与展望。重温这段历史,令人振奋,会受到新的启迪。

一、历史的孕育

经典物理学经过近三百年的发展,到19世纪末已经建立起了完整的理论体系,人们对于物质世界的认识取得了令人瞩目的成就。其主要标志是:物体的机械运动在其速度远小于光速的情况下,严格遵守牛顿力学的规律;电磁现象总结为麦克斯韦方程组;光现象有光的波动理论,最后也归结为麦克斯韦方程;热现象有热力学和统计物理的理论。在当时看来,物理学的发展似乎已经达到了颠峰。于是,多数物理学家认为物理学的重要定律均已发现,理论也

导弹以及航空航天技术的发展作出了奠基性的工作。他利用在国外积累的丰富学识和经验,使我国的火箭导弹事业很快起步,加速了我国迎头赶上世界先进水平的步伐。1960年11月5日,我国自制的近程导弹试飞成功。1964年6月29日,第一枚中近程导弹试飞成功。1966年10月27日,中近程导弹携带原子弹按预定轨道实现核爆炸。在这一系列具有历史意义的成果中,钱学森都发挥了关键性的作用。难怪当年美国海军次长金布尔曾经说过:“我宁可把这个家伙枪毙了,也不让他离开美国”,“那些对我们来说至为宝贵的情况,他知道得太多了。无论在那里,他都值五个师。”

1991年10月16日,钱学森获得了《国家杰出贡献科学家》的光荣称号。他作为全国科学技术工作者的杰出代表,得到了党和人民的高度尊敬。他的事迹成了全国人民,特别是科技工作者学习的典范。

已相当完善了。特别是用这些理论解决了当时提出的若干重大课题之后，经典理论简直到了令人崇拜的地步。海王星的发现就是一个突出的实例，是牛顿力学的巨大成功，被赞誉为“不必向天空看一眼，就发现了这颗行星”，“是在勒威耶笔尖下看到的，完全凭计算就确定了远在当时所知的太阳系之外的一个星球的位置和大小”。因此，有人毫不隐讳地认为以后物理学工作者的任务只是提高实验的精度和研究理论的应用。英国著名物理学家开尔文在一篇瞻望 20 世纪物理学的文章中，就曾谈到：“在已经基本建成的科学大厦中，后辈物理学家只要做一些零碎的修补工作就行了。”

正当物理学界沉浸在满足的欢乐之中的时候，人们又发现了一系列新的物理现象，如气体比热、黑体辐射、光电效应、原子结构……这些新现象都涉及物质内部的微观过程，用已经建立起来的经典理论进行解释显得无能为力。特别是关于黑体辐射的实验规律，运用经典理论得出的瑞利-金斯公式，虽然在低频部分与实验结果符合得比较好，但是，随着频率的增加，辐射能量单调地增加，在高频部分趋于无限大，即在紫色一端发散，被埃伦菲斯特称为“紫外灾难”；对迈克尔逊-莫雷实验所得出的“零结果”更是令人费解，实验结果表明，根本不存在“以太漂移”。这引起物理学家的震惊，反映出经典物理学面临着严峻的挑战。这两件事被当时物理学界的权威称为“在物理学晴朗天空的远处还有两朵小小的、令人不安的乌云”。然而就是这两朵小小的乌云，给物理学带来了一场深刻的革命。为了解决这些困难和矛盾，迫使人们冲破原有理论的框架，摆脱经典理论的束缚，在微观理论方面探索新的规律，建立新的理论。

二、旧量子论的建立

1900 年德国物理学家马克斯·普朗克为了解释黑体辐射的实验规律，大胆地提出了振荡偶极子能量量子化的假设，并提出了能量子的新观念。以这些思想为基础，建立了与实验结果相符合的黑体辐射经验公式。能量子思想

的提出不仅在解决热辐射问题中起了巨大的作用，而且在物理学的发展史上也具有划时代的意义。自从 17 世纪以来，“一切自然过程都是连续的”这条原理，似乎被认为是天经地义的。莱布尼兹和牛顿创立的无限小数量的演算，微积分学的基本精神正体现了这一点；而普朗克的新思想是与经典理论相违背的，它冲破了经典物理传统观念对人们的长期束缚，这就为人们建立新的概念、探索新的理论开拓了一条新路。在这个假设的启发下，许多微观现象得到了正确的解释，并在此基础上建立起一个比较完整的，并成为近代物理学重要支柱之一的量子理论体系。许多物理学家认为：1900 年不仅是历书上一个新世纪的开始，也是物理学发展史上一个新纪元的开端，它标志着人类对自然的认识，对客观规律的探索从宏观领域进入了微观领域的物理学新时代。

在普朗克的理论中，只考虑器壁上振子的能量是量子化的，而对空腔内电磁辐射依然运用麦克斯韦理论来处理，认为电磁场在本质上还是连续的波，只有当它们与器壁振子进行能量交换时，其能量才显示出不连续性，至于电磁波在空间传播过程中能量如何分布亦未予以说明。

1905 年爱因斯坦针对经典理论解释光电效应实验规律所遇到的困难，在普朗克能量子假说的基础上提出了光量子的假设。他明确指出，光的能量不仅在辐射时是一份一份的，即量子化的，而且在传递和吸收过程中也是一份一份的。这就是说，电磁场能量本身是量子化的，辐射场也不是连续的，而是由一个个集中存在的、不可分割的能量子组成的。爱因斯坦把这个能量子称为“光量子”，1926 年被美国的物理学家刘易斯定名为“光子”。爱因斯坦并从对维恩辐射公式有效范围内的辐射熵的讨论中，得到了光量子的能量表式 $E = h\nu$ ；他还运用光量子的思想讨论了光电效应问题，得到了著名的爱因斯坦光电方程 $E_k = h\nu - W$ (W 为功函数)，依据爱因斯坦的光量子假说和光电方程，便可成功地解释光电效应的实验结果。

1923年美国物理学家康普顿通过x射线与物质散射的实验,进一步证实了爱因斯坦假设的正确性。如果说,在1905年爱因斯坦提出光量子说后,还有不少人怀疑的话,那么在康普顿散射实验得到光量子说的圆满解释之后,怀疑光量子说的人就只是个别的了。

在这些新思想的启迪下,针对卢瑟福原子模型存在的困难,依据氢原子光谱的实验规律,1913年丹麦物理学家玻尔冲破了经典理论的框架,提出了原子模型新理论。他把已经建立起来的量子论第一次应用于原子内部,成功地解释了卢瑟福原子模型无法解释的一些问题,如原子的稳定性、原子的线状光谱等。不仅如此,更重要的是玻尔依据这些思想建立起来的氢原子理论,很好地解释了氢原子光谱的实验规律,并揭示了原子内部的一些量子特性,诸如定态假设、量子跃迁频率假设、量子化条件等。这些均具有普遍意义,反映出微观客体的基本特征。普朗克在十年后赞扬玻尔的原子理论时说:“玻尔原子机理理论之标新立异,以及这种原子机理同根深蒂固的传统观念决裂之彻底,在物理科学史上是无与伦比的。因此,玻尔被誉为现代微观物理学的先驱者。”

普朗克、爱因斯坦和玻尔是旧量子论的奠基者。他们的物理思想是旧量子论的重要组成部分,称为旧量子论的“三部曲”,而玻尔理论是其核心内容。旧量子论的建立有成功的一面,也有它的局限性。就其成功的方面而言,它准确地表达了部分的客观事实,揭示了部分微观客体的内在联系,它代表了量子论的一个发展阶段,并为新量子论的建立奠定了基础。然而,由于旧量子论并没有摒弃经典理论,只是在经典理论的基础上加上一些量子化的条件,因而是半经典半量子的理论,是不成熟的。另外,在解释原子现象时受到了限制,对于谱线强度、多电子问题等显得无能为力。表明这个理论有待于进一步完善和发展。

三、量子力学的诞生

1924年,法国物理学家德布罗意把光具有

的波粒二象性推广到一般实物粒子,从而提出了一切实物粒子也都具有波动性的新观念。1924年11月间德布罗意向巴黎大学理学院递交了题为“量子理论的研究”的博士论文。他在论文中指出:“整个世纪以来,在光学上比起波动的研究方法,是过于忽略了粒子的研究方法;在粒子的理论上是否发生了相反的错误呢?是不是我们把关于粒子的图象想得太多,而过分地忽略了波的图象呢?”他认为“任何物体伴随以波,而且不可能将物体的运动和波的传播分开。”这就是说,波-粒二象性并不只是光才具有的特性,而是一切粒子共有的属性,这种与粒子相联系的波称为德布罗意波或物质波。粒子的这种波-粒二象性由德布罗意关系式 $\lambda = h/p$ 可被进一步揭示。这个关系式将长期以来被认为性质完全不同的两个物理概念——动量与波长用普朗克常数 h 有机地联系起来,从而将粒子性与波动性融为同一客体中。

德布罗意关于物质波假设的提出,运用了几何光学中费马原理与经典力学莫培多变原理的类比,以及爱因斯坦关于光的二象性的启示。这种新观念的建立,表现出大自然具有的和谐和对称性质。同时,它为量子力学的建立提供了重要的依据。

德布罗意假设提出以后,人们希望建立一种新的原子力学理论,用以描述微观客体的运动规律。1925年末,薛定谔怀着极大的兴趣对德布罗意假设进行了仔细的研究,并于1926年的1月、2月、5月和6月相继发表了四篇论文,完成了波动力学的创立工作,提出了薛定谔方程,讨论了与时间无关和含时的微扰理论,用之解决氢原子问题得到了与实验相符的结果。薛定谔方程在原子物理的世界文献中属于应用最广泛的公式之一,它的地位相当于经典力学中的牛顿方程。爱因斯坦称赞薛定谔的构思具有真正的独创性。玻恩也赞扬说,在理论物理学中,关于波动力学的几篇论文是非常出色的。

差不多同一时期,海森堡、玻恩、约当等人以微观客体的波动性为出发点,运用代数方法,借助于对应原理的思想创立了矩阵力学,引入

了正则变换、建立了定态微扰与含时微扰,运用这种理论可以讨论角动量、谱线强度、选择定则等有关方面的问题。不久,海森堡又提出了著名的“测不准原理”,进一步揭示了微观客体的波-粒二象性。

波动力学与矩阵力学都是以微观客体的二象性为基础,通过与经典物理对比,运用不同的数学手段而建立起来的。1926年初玻恩和维纳引入算符,从而建立起算符与矩阵之间的对应关系;尔后,狄拉克运用数学变换理论,建立了严密的理论体系,把两种力学统一了起来,并作了普遍推广,建立了相对论量子力学。狄拉克的理论,是描述微观客体运动规律的基本理论,与相对论一起称为本世纪物理学发展史上带有革命性的理论。

按照量子力学的观点,具有波动性的微观客体,由于动量与位置无法同时准确确定,轨道概念失去了意义。因此,其运动状态的描述截然区别于经典方式,是用一个状态波函数来描述。玻恩对波函数的物理思想赋予了一种统计解释。微观粒子的运动状态不再受经典规律的支配,不再遵从“决定论”或严格的“因果律”,而是服从一种统计性的规律。因此,量子力学的建立使人们对原子微观结构的认识又一次产生了飞跃。这种理论更符合于微观客体的实际,是迄今为止人们对微观客体运动规律描述中比较成功的理论。

四、量子力学的发展

量子理论建立至今已近一个世纪,在这一

(上接第22页)

1932—1933年间,物理学家泡里鉴于在 β 衰变现象里“出现”了能量“不守恒”,角动量“不守恒”,因而提出了中微子假说。但有很长一段时期,没有认真对待这一假说,只是到了1942年才由王淦昌教授提出了一个如何核验中微子是否存在的方案,而在后来的阿伦的实验中才证实了它们的存在。中子之所以发现,也是由于在 α 粒子对 Be^9 核的轰击中,似乎“看到”了

时期中,量子理论有了突飞猛进的发展。主要表现在以下几个方面:

1. 量子理论的内容丰富多采。本世纪30年代建立了量子场论;40年代发展了重整化方法,部分地克服了发散困难;50年代以后发展起来一种非线性场论——规范场理论。按照量子场论的方法研究带电粒子与电磁场之间相互作用的理论有“量子电动力学”。由于重整化技术的发展,量子电动力学已成为最精密的理论之一。此外,电弱相互作用统一理论是统一描述夸克参与的电磁相互作用和弱相互作用的规范理论;在描述强相互作用的理论方面,由于耦合强度大,在理论的建立中遇到了困难。近20年来发展起来的“量子色动力学”,是可重整化的非阿贝尔规范场理论。目前这些理论随着科学技术的进步、实验条件的不断完善,仍在不断地发展创新。

2. 量子理论不断地向自然学科各个领域进行着广泛的渗透,形成了许多交叉学科,诸如“量子化学”、“量子生物学”、“量子磁学”……

3. 量子理论广泛地应用到各个研究领域。小到原子核、基本粒子的研究,大到宇宙起源的探索,都离不开量子理论的基本原理。

4. 量子理论为近代科学技术的发展提供了理论基础。原子能技术的开发、激光的问世、超导的研究、光源的更新换代、大规模集成电路的建成,这些都是与量子理论密切相关的。

如今,量子理论已经发展成为一棵参天大树。随着时间的推移和困惑的逐渐解决,它正逐渐成为一门具有广泛应用的基础理论。

能量高达几十 MeV 的高能光子,也是由于对能量平衡问题提出了疑问。现在在云南站事例以及“存疑 Kolar 事例”上,又出现了类似的质疑。只不过这一次不是从衰变产物,而是要在源、亦即入射粒子里假设存在某个中性的,也是仅有弱相互作用的粒子,但这一次却是质量甚重而不是质量极轻的新粒子!

未来的实验是否会证实这一重粒子的存在?历史会再度重演吗?