

量子物理百年历程

Daniel Kleppner 和 Roman Jackiw 著

侯春风 译

(清华大学物理系 北京 100084)

20 世纪科学史册中最有影响的科学进展大概应当包括广义相对论、量子力学、大爆炸宇宙学、遗传密码的破译、进化生物学以及读者选择的其他一些课题。在这些进展当中,量子力学因其深奥的根本属性,而具有更加独特的地位。它促使物理学家们改变了对客观实在的认识;促使他们重新思考事物最深层次的本性;促使他们修正位置和速度的概念以及原因和结果的看法。

虽然量子力学是为描述远离我们的日常生活经验的抽象原子世界而创立的,但它却对我们的日常生活产生了无比巨大的影响。如果没有量子力学作为工具,就不可能有化学、生物、医学以及其他每一个重要学科的令人瞩目的进展。没有量子力学就没有全球经济可言,因为作为量子力学的产物的电子学的革命把我们带入了计算机时代。同样,光子学的革命又把我们带入了信息时代。量子物理的产生改变了我们的世界,为这个世界带来了科学革命的益处,也带来了科学革命的挑战。

量子力学既不像来自于对引力与几何关系的深邃洞察力的广义相对论,也不像揭开了生物学一个新的世界的神秘面纱的 DNA 破译,它的起源不是一步到位的,而是在一种历史上时而会发生但又很少见的天才云集的情况下产生的。量子概念是如此地令人困惑以至于在它被提出以后的 20 年中几乎没有什么实质性的进展,后来一小部分物理学家花了 3 年时间创立了量子力学。这些科学家被自己所做的事情所困扰,甚至有时对自己的所作所为感到无所适从。

或许用下面的一段短评能最好地概括这个至关重要但又难以理解的理论的独特地位:“量子理论是科学史上能最精确地被实验检验的理论,是科学史上最成功的理论。”然而,量子力学不但深深地困扰了它的创立者,而且直到它基本上被表述成现在的形式 75 年后的今天,一些科学界的名人大师们尽管

承认它强大的威力,却仍然对它的理论基础和基本解释感到不满意。

今年是马克斯·普朗克提出量子概念 100 周年。在他关于热辐射的原创论文中,普朗克假定振动系统的总能量不能连续地改变,而是以分立的能阶或能量子的形式从一个值跳变到另一个值。能量子的概念太激进了,普朗克后来只好把它搁置下来。随后,爱因斯坦在他非凡的 1905 年认识到了光的量子化本质。不过由于量子的观念太离奇了,以致后来几乎没有取得根本性的进展。后来,崭新的一代物理学家花了 20 余年的时间终于创立了现代量子理论。

只要看一下量子理论诞生以前的物理学就能领悟出量子物理的革命性影响。1890 年到 1900 年间的物理学杂志上刊满了关于原子光谱和物质其他一些基本的可以观测的性质的文章,如粘性、弹性、电导率、热导率、膨胀系数、折射率以及热弹性系数等。由于受维多利亚时代的工作准则的推动和精巧的实验方法的发展的刺激,知识在以巨大的速度累积着。

然而,以当代人的眼光来看最显著的事情是对于物质属性的简要描述基本上是以实验为基础的。成千上万页的光谱数据列出了元素波长的精确值,但是没有人知道为什么会存在光谱线,更不知道它们所传达的信息。用来解释热导率和电导率的示意模型仅与大约半数的实际情况相符。虽然有众多的经验定律,但都很难令人满意。例如,杜隆-珀替定律建立了物质的比热与原子重量的简单关系,它在大多数情况下是适用的,但有时却不适用。在多数情况下同体积气体的质量比满足简单的整数关系。元素周期表尽管为化学的蓬勃发展提供了关键的指导原则,但却无任何理论基础的支持。

在众多最伟大的革命性成就中,量子力学提供了一种定量的物理理论。现在,我们基本上可以理解原子结构的每一个细节;周期表也有了简单自然的解释;庞杂的光谱数据也纳入了一个精巧的理论

框架。量子理论使人们能定量地理解分子、固体和液体、导体和半导体。它能解释超导和超流等奇特现象,能解释诸如中子星物质和玻色-爱因斯坦凝聚(在这种现象里气体中所有原子的行为像一个单一的超大原子)等奇特的物质形态。量子力学为所有的科学分支和每一项高技术提供了重要的工具。

量子物理实际上包含两个方面。一个是原子层次的物质理论——量子力学,正是利用它我们才能理解和操纵物质世界。另一个是量子场论,它在科学中起到一个完全不同的作用,我们稍后再讨论它。

量子力学

点燃量子革命的导火索不是来自对物质的研究,而是来源于辐射问题。具体的课题是理解热的物体即黑体辐射的光谱。观察过火焰的人都很熟悉这样一种现象:热的物体发光,越热发出的光越明亮。光谱的范围很广,当温度升高时,光谱的峰值从红线向黄线移动,然后又向蓝线移动(虽然我们不能直接看到光谱线的移动)。

通过结合热力学和电磁理论的概念人们似乎可以对光谱的类型做出解释,但所有的尝试均以失败告终。然而,普朗克假定振动电子辐射的光的能量是量子化的,从而得到一个与实验符合得相当完美的表达式。但是他也充分认识到,他的理论从物理意义上看是很荒谬的,就像他后来所说的那样:“量子化只不过是一个不得已而为之的做法”。

普朗克将他的量子假设应用到辐射体内壁振子的能量上,如果没有新秀阿尔伯特·爱因斯坦,量子物理恐怕要到此终结。爱因斯坦 1905 年毫不犹豫地断言:如果振子的能量是量子化的,那么它辐射的光的电磁场的能量也应该是量子化的。尽管詹姆斯·克拉克·麦克斯韦理论以及一个多世纪的权威性实验都证明光具有波动性,爱因斯坦的理论还是赋予了光的粒子性行为。随后近 10 年的光电效应实验表明只有当光的能量实际上处于一些离散的量值时才能被吸收,这些能量就像是粒子携带着一样。光的波粒二象性取决于人们观察问题的出发点,这是一个在量子物理中经常出现且令人大伤脑筋的事例之一,它成为接下来 20 年中的理论难题。

辐射困境促使人们向量子理论迈出了第一步,物质难题则促成了第二步。众所周知,原子包含带正电荷和负电荷的两种粒子。带异号电荷的粒子相互吸引,根据电磁理论,正负电荷彼此将沿螺旋线相互靠近,并辐射出光谱范围宽广的光,直至原子坍塌

为止。

接着,又是一个新秀尼尔斯·玻尔开辟了通向新进展的道路。1913 年,玻尔提出了一个大胆的假设:原子中的电子只能处于包括基态在内的定态上,电子通过在两个定态之间跃迁而改变它的能量,同时辐射出一定波长的光,光的波长取决于两个定态之间的能量差。结合已知定律和这一奇妙的假设,玻尔扫清了原子稳定性方面的障碍。玻尔的理论充满了矛盾,但却为氢原子光谱做出了定量的描述。他既看到了他的模型的成功之处也认识到了缺陷。凭借其惊人的预见力,他聚集起一批物理学家创立了新的物理学。经过 12 年的努力和一代年轻的物理学家的加盟,玻尔终于实现了他的梦想。

起初,发展玻尔的量子理论即所谓的旧量子论的尝试遭受了一次又一次的失败。接着一系列的进展完全改变了人们的思想观念。

1923 年路易·德布罗意在博士论文中提出:与光的粒子行为相对应,粒子也应该具有波动行为。他还把粒子的波长和动量联系起来:动量越大,波长越短。这是一个引人入胜的想法,但没有人知道粒子的波动性意味着什么,也不知道它与原子结构有什么联系。然而,德布罗意的假设是即将发生的事情的前奏,很多事情就要发生了。

1924 年夏天,又一个前奏出现了。萨提扬德拉·N·玻色提出了一种用来解释普朗克辐射定律的全新方法。他把光看做是一种由无质量的粒子(现在被称为光子)组成的气体,这种气体不服从经典的玻耳兹曼统计规律,而遵循一种基于粒子不可区分的性质的一种新的统计理论。爱因斯坦立即把玻色的推理应用于实际的有质量的气体从而得到一种描述气体中粒子数关于能量的分布规律,即著名的玻色-爱因斯坦分布。然而,在一般情况下新老理论对气体中的原子预言出相同的行为。爱因斯坦在这方面不再感兴趣,因此这些结果也被搁置了 10 余年。但是,它的关键思想——粒子的全同性,却是极为重要的。

突然,一系列事件接连发生,最终使一场科学革命达到顶峰。从 1925 年 1 月到 1928 年 1 月这 3 年间发生的重要事件有:

- 沃尔夫刚·泡利提出了不相容原理,为元素周期表奠定了理论基础。
- 沃纳·海森伯、马克斯·玻恩和帕斯考·约当提出了量子力学的第一种形式——矩阵力学。人们终于

现代物理知识

放弃了理解原子中电子运动的历史目标,而采用量子力学的系统方法对可观测的光谱线进行整理。

- 欧文·薛定谔提出了量子力学的第二种形式——波动力学。在波动力学中,体系的状态用薛定谔方程的解——波函数来描述。矩阵力学和波动力学貌似矛盾,而实质上是等价的。

- 电子被证明遵循一种新的统计规律,费米-狄拉克统计。人们进一步认识到所有的粒子要么遵循费米-狄拉克统计,要么遵循玻色-爱因斯坦统计,这两类粒子具有根本不同的属性。

- 海森伯阐述了不确定原理。

- 保罗·A·M·狄拉克建立了电子的相对论性的波动方程,解释了电子的自旋并且预言了反物质的存在。

- 狄拉克通过对电磁场进行量子描述,为量子场论打下了基础。

- 玻尔提出互补原理——一个哲学原理,以解决量子理论中的一些明显的矛盾,尤其是波粒二象性。

量子理论的主要创立者都很年轻。1925年,泡利25岁;海森伯和恩里科·费米24岁;狄拉克和约当23岁。薛定谔是一个大器晚成者,36岁。玻恩和玻尔年龄更大一些,值得注意的是他们的贡献大多是解释性的。爱因斯坦的反应展现出量子力学这一智力成果深奥而激进的特性:他在提出许多导致量子理论的重要概念后,却拒绝了量子力学。他关于玻色-爱因斯坦统计的论文是他对量子物理的最后一项贡献,也是对物理学的最后一项重要贡献。

需要由新一代物理学家创立量子力学并不令人惊讶,开尔文爵士在祝贺玻尔1913年关于氢原子的论文的一封信中表达了个中缘由。他说,玻尔的论文中有很多真理是他所从来都不能理解的。开尔文认为新物理学必将出自无拘无束的头脑。

1928年,革命完成了,量子力学的基础基本上已经建立起来了。后来,亚伯拉罕·派斯在《Inward Bound》中以轶事的方式记录了这场以狂热的节奏发生的革命。其中有这样一段:1925年,萨默尔·古兹米特和乔治·乌仑贝克提出了电子自旋的概念,玻尔对此深表怀疑。当年12月玻尔乘火车前往荷兰的莱顿出席亨德里克·A·洛伦兹的50岁生日庆典,泡利在德国的汉堡车站和玻尔会面并探询玻尔对电子自旋可能性的看法,玻尔以他那著名的低调措词回答说,自旋这一提议是“非常,非常有趣的”。后来,爱因斯坦和保罗·艾伦费斯特在莱顿车站迎接玻尔

并讨论了自旋问题。玻尔说明了自己的反对意见,但是爱因斯坦用另一种方式说明了自旋并使玻尔转变成自旋的支持者。玻尔在返程中,遇到了更多的讨论者。当火车经过德国的哥廷根时,海森伯和约当接站并询问他的意见,泡利也特意从汉堡赶到柏林接站。玻尔告诉他们自旋的发现是一项重大进展。

量子力学的创立激发了一场科学的淘金热。早期的成就有:1927年海森伯得到了氢原子薛定谔方程的近似解,奠定了原子结构理论的基础;约翰·斯莱特,道格拉斯·瑞讷·哈垂和弗拉第米尔·福克后来又给出了原子结构的一般计算方法;弗里兹·伦敦和沃特·海特勒解决了氢分子的结构问题;林纳斯·泡令在此基础上创立了理论化学;阿诺德·索末菲和泡利奠定了金属电子理论的基础,费莱克斯·布洛赫提出了能带结构理论;海森伯解释了铁磁性的起因。1928年乔治·伽莫夫解释了 α 放射性衰变的随机性之谜,他证明 α 衰变起因于量子力学中的隧道效应。在随后几年中,汉斯·贝特建立了核物理的基础并解释了恒星的能量来源。随着这些进展,原子物理、分子物理、固体物理和核物理进入了现代物理的时代。

争论与迷惘

然而,伴随着这些进展,在量子力学的诠释和正确性上发生了剧烈的争论。起初,争论的主角,一方是玻尔和海森伯,他们信奉新理论;另一方是爱因斯坦和薛定谔,他们对新理论不满意。为了理解这些混乱的原因,我们需要了解一下量子理论的基本要点,现总结如下:(为了简明,我们只描述薛定谔形式的量子力学,它有时也被称为波动力学。)

基本描述:波函数。系统的行为用薛定谔方程描述,方程的解称为波函数。系统的全部信息都用它的波函数来描述,利用波函数可以计算出任意可观察量的可能值。在空间中一个给定的体积内找到一个电子的概率正比于波函数幅值的平方,因此,粒子的位置将“分散”在波函数所在的体积内。粒子的动量依赖于波函数的斜率,波函数越陡,动量越大。由于斜率是变化的,因此动量也是分散的。这样,就需要放弃位置和速度可被确定到任意精度的经典图象,而采用一种模糊的概率图象,这正是量子力学的核心思想。

对同一系统进行同样仔细的测量不一定能得到同样的结果,相反,结果将分散在波函数描述的范围

内,因此,电子的特定位置和动量的概念将失去意义。这可由不确定原理表述如下:如果要使粒子精确定位,那么它的波函数就必须是尖峰型的即不是分布型的,然而,尖峰必然具有很陡的斜率,因而动量就会分布在很大的范围内;相反,如果动量具有很小的分布,那么波函数的斜率就一定很小,因此波函数就会弥散在一个大的体积内,这样粒子的位置就更加不确定了。

波可以干涉。波的幅度是相加还是相减取决于它们的相对相位,振幅同相时相加,反相时相减。当波沿着几条路径从波源到达接收器时,将像光的双缝干涉一样,一般会产生干涉图样。粒子遵循波动方程,应有类似的行为,如电子衍射。因此,类推似乎是合理的,除非要考察波的本性。波通常可以被认为是介质中的一种扰动,然而在量子力学中没有介质,从某种意义上说根本就不存在波,波函数本质上只是我们对系统的认识的一种表述。

对称性和全同性。氦原子由一个原子核和两个围绕着核运动电子构成的。氦原子的波函数描述了每一个电子的位置,然而没有办法区分究竟是这个电子还是那个电子,因此,电子交换后体系看上去与原来完全相同,也就是说在给定位置找到电子的概率保持不变。由于概率依赖于波函数的幅值的平方,因而粒子交换后体系的波函数与原始波函数的关系只可能是下面两种情况中的一种:或者与原波函数相同,或者是简单地改变符号,即乘以因子 -1 。究竟是哪种情况呢?

量子力学中的一个非常惊人的发现是电子的波函数经常变号。其后果是惊人的,如果两个电子处于相同的量子态,而其波函数符号相反,因此总波函数为零,也就是说在同一状态上发现两个电子的概率是零,这就是泡利不相容原理。所有具有半整数自旋的粒子,包括电子,都遵循这一原理,并被称为费米子。自旋为整数的粒子,包括光子,其波函数不变号,被称为玻色子。由于电子是费米子,因而在原子中分层排布;由于光由玻色子组成,所以出现于单一超强光束中的激光本质上处于一个量子态。最近,气体原子被冷却到量子状态而形成玻色-爱因斯坦凝聚,这时体系可发射超强物质束,形成原子激光。

这些概念只适用于全同粒子,因为不同粒子交换后波函数显然不同。只有当粒子体系是全同粒子时,粒子才显示出玻色子或费米子的行为。同类粒子的

全同性是量子力学中一个最不可思议的方面,量子场论的成就之一就是对上述神秘现象做出了解释。

量子力学意味着什么?波函数到底是什么?“进行一次测量”是什么意思?这些问题在早期都激烈争论过。然而直到1930年,玻尔和他的同事给出了量子力学的大致标准的诠释,即哥本哈根解释,其关键要点是利用玻尔的互补原理对物质和事件进行统计描述,调和物质波粒二象性的矛盾。爱因斯坦从未接受过量子理论,他一直就量子力学的基本原理同玻尔进行争论,直至1955年去世为止。

关于量子力学争论的中心问题是:波函数是否包含了体系的所有可能的信息,还是有潜在的因素即隐变量决定着特定测量的结果。20世纪60年代中期约翰·S·贝尔证明,如果存在隐变量,那么实验观测到的概率应该低于一个特定的界限值,此即贝尔不等式。很多研究组开展了这方面的实验研究,所得结果与贝尔不等式相反,他们收集到的实验数据明确地否定了隐变量存在的可能性。这些结果消除了大多数科学家对量子力学正确性的怀疑。

然而,由于“量子怪物”的神奇魅力,量子物理的本质仍然吸引着人们的注意力。量子体系的怪异性质起源于所谓的纠缠态,简言之,一个量子体系,例如原子,不仅能处于一系列定态中的任何一个态上,而且还可以处于它们的叠加态,叠加态即指那些定态之和。如果我们测量处于叠加态的原子的某种性质例如能量,则一般说来,结果有时是这一个值,有时是另一个值。至此还没有出现任何怪异的事情。

但是人们还可以构造双原子体系的纠缠态,在纠缠态中每个原子都将分享两个原子的共同性质。当这两个原子分开后,一个原子的信息将被共享于或纠缠于另一个原子态中。这一行为只有用量子力学的语言才能做出解释。这种效应是如此地出人意料以至于只有少数精干的理论和实验研究单位在集中精力研究它,研究内容并不限于原理问题,因为纠缠态还具有实际的用途。纠缠态已经被应用于量子通讯系统,成为量子计算机的基础。

二次革命

在20世纪20年代中期量子力学正在创建的狂热年代里,也在进行着另一场革命,量子物理的另一个分支——量子场论的基础正在建立。不像量子力学的创立那样如疾风骤雨般地一举成功,量子场论的创立经历了一段一直延续到今天的曲折的历史。尽管量子场论存在着很多困难,但它所预言的结果

现代物理知识

却是所有物理学科中最为精确的,同时,它还为一些最高深的理论探索提供了工具。

激发出量子场论的问题是电子从激发态跃迁到基态时原子如何辐射光。1916年,爱因斯坦研究了这一过程,并称其为自发辐射过程,但他无法计算自发辐射系数。解决这个问题需要彻底发展电磁场的相对论量子理论——一种关于光的量子理论。量子力学是关于物质的理论,而量子场论正如其名所指,是研究场的理论,不仅是电磁场,还包括后来发现的其他场。

1925年,玻恩、海森伯和约当发表了关于光的理论的初步想法,但重要的一步是当时尚默默无闻的青年物理学家狄拉克迈出的,他于1926年独立地提出了他的场论。狄拉克的理论存在很多缺陷:棘手的计算复杂性、出现无穷大量即结果发散、并且明显和对应原理相矛盾。

20世纪40年代后期,量子场论出现了新的进展,理查德·费恩曼、朱利安·施温格和朝永振一郎为量子场论开辟了新的道路,他们提出了量子电动力学——简称QED。他们通过重整化的办法避开了无穷大量即发散问题,实质上就是通过减掉一个无穷大量来得到有限的结果。由于无法找到该理论的方程的精确解,所以通常用级数来给出近似解,不过级数项越来越难算。虽然级数项逐次减小,但在某项后却开始增大,致使近似过程失败。尽管存在这一危险,QED仍被列为物理学史上最成功的理论之一,实验表明,用它预测电子和磁场的作用强度精度可达 $2/1,000,000,000,000$ 。

尽管QED取得了惊人的成功,但它背后却隐藏着谜团。对于虚空空间即真空,理论给出了近乎荒谬的结果,它表明真空不空,而是到处充斥着小的电磁涨落。这些小的电磁涨落是解释自发辐射的关键所在,并且,它们还可使原子能量和诸如电子等粒子的性质发生小的但却可观测到的变化。虽然这些效应看上去很奇怪,但他们已经被许多已有的最精确的实验所证实。

对于我们周围的低能世界,量子力学是相当精确的;但对于高能世界,相对论效应开始起作用,需要更全面的处理办法,量子场论的创立调和了量子力学和狭义相对论的矛盾。

量子场论的杰出贡献在于它提供了一些关于物质本性的深奥问题的答案。它解释了为什么存在玻色子和费米子这两类基本粒子,它们的性质与内禀

自旋有什么关系;它描述了粒子,包括光子、电子、正电子即反电子,是如何产生和湮灭的;它解释了量子力学中神秘的全同性,全同粒子之所以是绝对相同的是因为它们来自于相同的基本场。它不仅解释了电子,还解释了 μ 子、 τ 轻子等被称为轻子的粒子及其反粒子。

由于QED是一个关于轻子的理论,所以它不能描述被称为强子的更为复杂的粒子,这些粒子包括质子、中子和大量的介子。对于强子,人们提出了一个比QED更一般的理论,称为量子色动力学或简称为QCD。QED和QCD之间存在非常多的类似:电子是原子的组成要素,夸克是强子的组成要素;在QED中,带电粒子之间的作用力是由光子来传递的,而在QCD中,夸克之间的作用力由胶子传递。尽管QED和QCD之间存在很多类似之处,但它们之间仍存在巨大的差别。与轻子和光子不同,夸克和胶子永远被幽禁在强子内部,它们不能被解放出来而独立存在。

QED和QCD是大统一理论的标准模型的基石。标准模型成功地解释了至今所有的粒子实验,然而许多物理学家认为它是不完善的,因为基本粒子的质量、电荷以及其他属性的数据还要来自实验,一个理想的理论应该能预言出这一切。

今天,寻求对物质终极本性的理解成为严肃的科学研究的焦点,它使人们不自觉地回想起量子力学创立时期那段狂热的奇迹般的日子,其成果的意义将更加深远。人们必须努力寻求引力的量子描述,虽然经过了半个世纪的努力,但在QED中大显身手的电磁场的量子化过程对于引力场却无能为力。这一问题是严重的,因为如果广义相对论和量子力学都成立的话,那么它们最终对同一事件一定能提供实质上是一致的描述。在我们周围的常规世界里不存在任何矛盾,因为与电磁力相比引力是如此之弱以至于其量子效应可以忽略,经典描述已足够完美。但对于黑洞这种引力非常强的体系,我们尚无可靠的办法预知其量子行为。

一个世纪以前,人们对物理世界的理解是经验性的。量子物理为我们提供了一个物质和场的理论,它改变了我们的世界。展望新世纪,量子力学将继续为所有的科学提供基本原理和重要的工具。我们之所以敢作这样自信的预言是因为量子力学为我们周围的世界提供了精确而完整的理论。然而,今日的物理学与1900年的物理学仍有很大的共同之处:它仍旧

保留了最基本的经验性,我们不能彻底预知组成物质的基本要素的属性,而仍然需要测量它们。

也许,超弦理论或某种目前尚处于设想中的理论将能揭开这一谜团。超弦理论是量子场论的推广,它用有空间尺度的物体取代诸如电子的点状物体消除了所有的无穷大量。无论结果如何,对自然的终极理解之梦将一如科学萌芽时期一样继续成为新知识的推动力。在从现在开始的一个世纪里,对这个梦想的不断追求,终将使我们梦想成真。

附:量子物理大事年表

1897年,彼德·塞曼证明光是由原子中带电粒子运动辐射出来的。同年,约瑟夫·约翰·汤姆逊发现电子。

1900年,马克思·普朗克用量子化能量辐射观点解释了黑体辐射——量子理论诞生。

1905年,阿尔伯特·爱因斯坦提出,具有波动特性的光也是由分立的、量子化的能量子组成的,构成光的这种能量子后来被称为光子。

1911年,欧内斯特·卢瑟福提出了原子的核式模型。

1913年,尼尔斯·玻尔提出了原子的行星模型以及定态概念,解释了氢原子光谱。

1914年,詹姆士·夫兰克和古斯塔夫·赫兹通过电子散射实验证实了定态的存在。

1923年,阿瑟·康普顿观测到X-射线与电子相互作用的行为类似于弹性小球,进一步证实了光的粒子性。

1923年,路易·德布罗意提出实物粒子也具有波动性,进而推广了波粒二象性。

1924年,萨提扬德拉·纳什·玻色和爱因斯坦,发现了一种后来被称为玻色-爱因斯坦统计的计算量子粒子行为的新方法,他们预言超冷原子可以凝聚到一个单一的量子态上,即后来人们所称的玻色-爱因斯坦凝聚态。

1925年,沃尔夫冈·泡利提出了不相容原理。

1925年,沃纳·海森伯、马克思·玻恩和帕斯考·约当创立了量子力学的第一种形式——矩阵力学,并向量子场理论迈出了第一步。

1926年,欧文·薛定谔建立了量子物理的第二种表述——波动力学。其中的一个方程成为自然科学中最著名的方程之一,后来被称为薛定谔方程。

1926年,恩里科·费米和保罗·A·M,狄拉克发现了量子力学所要求的另一种计算粒子行为的方

法——费米-狄拉克统计,开辟了固体物理研究之路。

1926年,狄拉克发表了一篇关于光的量子理论 的开创性论文。

1927年,海森伯表述了他的不确定关系原理,即不可能同时精确地测量出粒子的位置和动量。

1928年,狄拉克给出了电子的相对论理论,预言了反物质的存在。

1932年,卡尔·戴维·安德森发现了反物质,即电子的反粒子——正电子。

1934年,汤川秀树提出核力是由叫做介子的质量较重的粒子来传递的,这与光子传递电磁力相类似。

1946~1948年,埃斯道·I·拉比、韦利斯·兰姆和泡雷卡普·库什的实验表明狄拉克的理论存在缺陷。

1948年,理查德·费恩曼、朱利安·施温格和朝永振一郎创立了关于光子和电子相互作用的第一个完备的理论——量子电动力学,解释了狄拉克理论的缺陷。

1957年,约翰·巴丁、利昂·库珀和罗伯特·施里弗证明电子可形成电子对,电子对的量子特性使它们在运动中不会受到阻力作用,由此解释了超导体的零电阻现象。

1959年,亚西尔·阿哈若诺夫和戴维·玻姆预言磁场可以以一种经典物理所不允许的方式影响电子的量子特性。阿哈若诺夫-玻姆效应于1960年被人们观测到,并显示出许多意想不到的宏观效应。

1960年,基于查尔斯·汤斯、阿瑟·肖洛以及其他一些人的工作,西奥多·梅曼研制出第一台实用激光器。

1964年,约翰·J·贝尔提出了一个验证量子力学是否可对一个体系进行最完备的描述的实验判据——贝尔不等式。

20世纪70年代,粒子物理的标准模型奠基,该模型认为物质是由通过4种力发生相互作用的夸克和轻子组成的。

1982年,阿莱恩·埃斯派克特对贝尔不等式进行了实验检验,证实了量子力学的完备性。

1995年,艾里克·康奈尔、卡尔·维曼和沃尔夫冈·凯特勒把冷却到绝对温度低于百万分之一度的金属原子陷获起来,形成了早在70年前就被预言了的玻色-爱因斯坦凝聚体。这一进展导致了原子激光和超流气体的诞生。

(译自2000年8月11日 Science)