

回顾与展望——纪念量子论诞生 100 周年*

周光召

(中国科学技术协会 北京 100863)

摘要 回顾了量子论和量子力学产生的过程和围绕量子力学发生的争论,论述了量子力学对人类社会的科学、哲学、技术和经济带来的巨大影响,对量子力学的进一步发展进行了讨论。

关键词 普朗克,量子论

HISTORY AND FUTURE —— IN COMMEMORATION OF QUANTUM THEORY'S CENTENARY

ZHOU Guang-Zhao

(China Association for Science and Technology ,Beijing 100863 ,China)

Abstract The history of the discovery of quantum theory and the debate around its interpretation is reviewed. The strong influence of quantum mechanics on the development of science and philosophy is emphasized and its impact on social technological and economic development is discussed. Possible directions for further development of quantum theory are also mentioned.

Key words Planck , quantum

1 前言

1900年12月14日,德国物理学家马克思·普朗克发表了一篇重要的论文,他在分析黑体辐射的能谱时,提出了光的能量和频率成正比并以不连续的量子状态辐射的新概念。量子论提出后,经过25年的时间,由许多物理学家共同努力,激烈争辩,最终才形成了量子力学。

量子力学、相对论和基因双螺旋结构是20世纪最重要的三大科学发现。量子力学在其中又占有特殊的位置,它打开了人类认识原子世界的大门,历史上没有哪一个理论的成就如此深刻地改变着人类社会的生产、生活和观念。没有量子力学的指导,就不会认识化学键,不会有高效的化学合成和化学工业,就不会认识能带结构,不会发现半导体晶体管、集成电路和激光,不会有今天的信息技术和工业,也就不会形成今天全球化的经济结构调整和信息革命。

量子力学使我们得以了解分子、原子、核子、夸克、轻子的性质和各种物态的结构,是最有预见力和精确的理论,它不仅是微观世界的理论,而且是宏观

相干量子态的理论。量子力学直到今天仍有丰富的生命力,基于它的发现始终层出不穷。在今后相当一段时间内,它仍然将居于物理学创新的中心。这可以从下面两个示意图更加简明地反映出来(见图1、图2)。

从量子力学诞生的时刻开始,尽管其数学结构严谨,但许多科学家怀疑它并不是完整的物理理论。由它产生的一系列观念和物理学的传统观念是如此相反,以致于它的许多发现者都感到迷惑和不解,并为此展开了激烈的争论。量子力学是在百家争鸣的环境下不断发展的。

在量子论发现100周年之际,回顾量子力学发现的历史,纪念为量子力学发现作出重要贡献的科学家,对于推动我国物理学在21世纪的发展,具有重要的意义。

2 量子论发现的背景

到19世纪末,已建立了三大物理理论(1)牛顿

* 2001-02-20收到

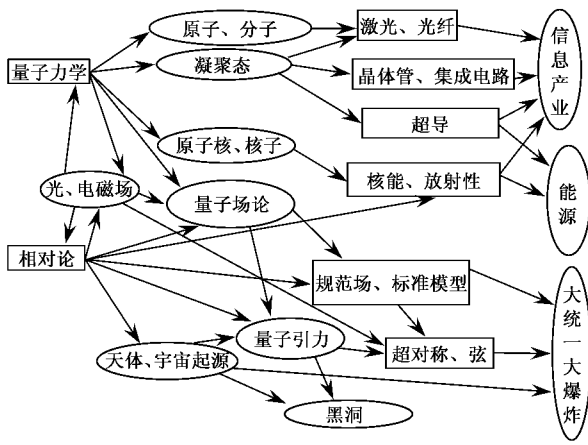


图 1

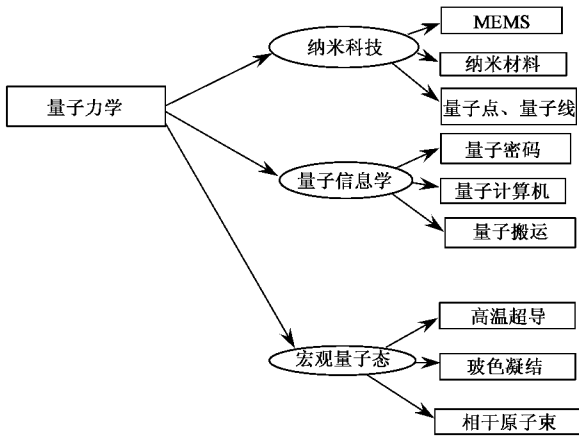


图 2 继续不断发展的量子力学及其应用

力学, 确定粒子的运动 (2) 麦克斯韦电动力学, 确定电磁场和电磁波的运动 (3) 热力学和统计物理, 确定热平衡态的物性. 这三大理论都形成了完整的数学框架, 特别是拉格朗日、哈密顿和 Jacobi 发展的分析动力学, 费马的最小作用原理给牛顿力学以崭新的形式和深刻的内涵.

19 世纪对物性做了大量观测, 得到了许多经验的规律, 如氢原子光谱线的巴耳末公式 (1885 年), 比热为常数的定律等. 对物质结构的研究已经开始, 建立了门捷列夫化学元素周期表 (1871 年).

虽然三大经典理论在解释某些自然现象时取得了很大的成功, 当时人们相信它们能解释万物运动的规律, 但经过努力, 仍不能解释上述这些物性的经验规律是如何由基本规律形成的. 在 19 世纪和 20 世纪之交, 一系列新的发现和经典理论预见的结果相左, 加剧了存在的问题, 如光速不变 (1879 年迈克尔孙 - 莫雷), 黑体辐射 (1859 年基尔霍夫, 1879 年斯特藩, 1884 年玻尔兹曼, 1896 年维恩), 光电效应

(1887 年赫兹), 放射性 (1896 年贝克勒尔), 电子轨道的不稳定性 (1899 年卢瑟福) 等等, 形成了传统物理学的危机.

3 普朗克关于黑体辐射的工作

用热力学原理讨论黑体辐射的能谱, 早在 1859 年就由基尔霍夫开始, 瑞利和金斯用经典理论推导, 将某一频率区域辐射光波的自由度乘以单位自由度的平均能量 $kT/2$, 应当得到能谱. 由于自由度数目与频率 $\nu^2 d\nu$ 成正比, 因此经典理论的能谱在紫外区发散.

普朗克于 1900 年在分析黑体辐射实验数据时, 根据斯特藩经验公式, 作出了光辐射能量与频率成正比以及按照量子的而非经典连续形式辐射的假定, 并依据玻尔兹曼的统计力学推出了和实验结果一致的能谱曲线 (见图 3, $E = h\nu$, $h = 6.625 \times 10^{-34}$, 为普朗克常数).

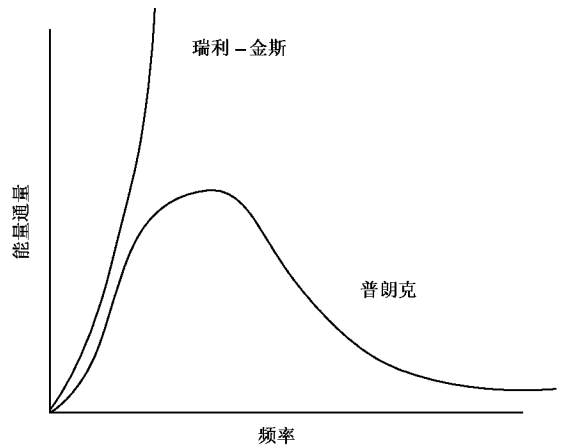


图 3

普朗克的理论虽然能符合实验结果, 但是在相当长的时间内不为人们理解和重视, 普朗克本人对量子的假定也感到迷惑不解. 1901 年他曾描述: "... the whole procedure was an act of despair because a theoretical interpretation had to be found at any price, no matter how high that might be. (... 整个过程令人绝望, 因为人们必须不惜代价找到一个合理的理论解释, 不管要付出多大代价.)" 他还写道: "I tried immediately to weld the elementary quantum of action somehow in the framework of classical theory. But in the face of all such attempts this constant showed itself to be obdurate ... My futile attempts to put the elementary quantum of action into the classical theory continued for a number of 物理

years and they cost me a great deal of effort.(我立即试图把基本的作用量子纳入经典的框架.但所有的尝试结果都是冥顽不灵的....我这种把基本作用量子放入经典理论的无效的想法持续了好几年,并花费了我大量的精力.)”

爱因斯坦最早接受了量子的观念,1905年他在其著名的讨论光电效应的文章中,提出光在传播过程中是波动,而在与物质相互作用时是粒子的看法,应用光量子的观念解释光电效应获得了成功.量子论的观念开始在物理界传播开来,但是真正理解它的物理学家仍然很少,怀疑者很多.

历史上曾经对光是波动还是粒子有过长期的争论.牛顿主张的光的粒子说和惠更斯(Huygens)主张的光的波动说进行了激烈的争论,由于牛顿的学术地位,粒子说在18世纪前一直占据统治地位,直到1801年杨(T. Young)以双缝干涉实验证明了波动说,争论方告一段落.以后麦克斯韦导出电磁波,并由光速和电磁波速度相等说明光也是电磁波,光的波动说得到了电磁场理论的支持.爱因斯坦在1924年指出:“现在有两种光的理论,正如人们今天必须承认,这两种理论都是不可缺少的.尽管一部分理论物理学家经过了二十多年的巨大努力仍没有找到两者之间的逻辑联系.”

在解释物性的经验规律中,虽然发展很慢,量子论仍然逐步取得进展.固体比热在室温以上是一常数,由声波每一自由度的平均能量与 kT 成正比所决定,但低温的比热与此偏离.1912年,德拜根据爱因斯坦在1907年的一个想法计算了固体的比热,假定声波的能量也和其频率成正比,比率常数也为普朗克常数,得到在低温和高温下都符合实验的结果.德拜的工作暗示了不仅光波带有量子的性质,物质的波动也同样带有量子的性质.波的频率和能量的关系是普适的.可惜这一发现未得到当时人们的重视,可见不相信量子论的思想在那时的物理界仍然占据统治地位,使得物质波的思想晚了11年才被再次提出.1913年,玻尔将量子论应用于原子结构,假定原子内电子的角动量和轨道是量子化的,电子在不同能量的轨道上跃迁产生或吸收具有与能量差相同能量的光子.玻尔的原子模型给出的谱线符合实验的巴耳末经验公式,又解决了电子运动的稳定性问题,取得了成功.以后许多人应用玻尔模型讨论各种物质的光谱,取得了部分的成功.玻尔模型的成功大大推动了量子论的发展,但是玻尔模型假定的正确性一直是受关注的重要问题,同时它也不能解

释光谱的强度.

到20世纪20年代,一批在量子论提出前后出生的年轻物理学家成长起来,从1922年开始,量子论才有一个飞速的发展,短短三四年内就奠定了量子力学的基础和数学框架.正如普朗克指出:“一个重要的科学发现并不是经过慢慢地说服和改变它的反对者们而被承认,而是随着反对者们慢慢地死去后被得到公认”.

4 1923年后的10年内量子力学获得飞速发展

1923年,德布罗意在其博士论文中提出了电子也具有波动性的建议;1924年,泡利提出了不相容原理;1924年,玻色和爱因斯坦引进了玻色-爱因斯坦(Bose-Einstein)统计;1925年,乌伦贝克(G. E. Uhlenbeck)和古德斯密特(S. A. Goudsmit)提出了电子自旋的建议;1925年,海森伯、玻恩和约尔丹(E. P. Jordan)发表量子矩阵力学;1926年,薛定谔提出波动方程,发表量子波动力学;1926年,薛定谔证明量子矩阵力学和量子波动力学在数学上等价;1926年,克莱因(O. B. Klein)和戈登(W. Gordon)提出相对论波动方程;1926年,费米发现自旋和统计的联系;1926年,狄拉克引进费米-狄拉克统计;1927年,戴维孙(C. J. Davission)、革末(L. H. Germer)和汤姆孙(G. P. Thomson)的实验证明电子的波动性;1927年,海森伯提出测不准关系式;1927年,玻恩提出波函数的统计解释;1928年,狄拉克发表电子的相对论方程;1930年,狄拉克引进电子空穴;1931年,泡利提出中微子假说;1931年,泡令(L. C. Pauling)发现化学共振键;1932年,查德威克(J. Chadwick)发现中子;1932年,海森伯引进同位旋概念,提出原子核的核子模型;1932年,安德森(C. D. Anderson)发现正电子.

值得指出的是,量子力学的发现者们多数虽然年轻,但都具有深厚的理论和实验的知识.他们了解光谱和各种物性的实验进展和状况,对分析动力学、电磁场理论、热力学和统计物理都有深刻的领会.他们还掌握了数学的最新发展,如希尔伯特(Hilbert)空间.这说明,只有掌握人类创造的全部知识财富,才能产生革命性的创新.

5 不同意见的争论是发展科学的重要推动力

尽管量子力学的数学结构严谨,在解释一系列

实验现象上取得了完全成功,但是从它诞生的时刻开始,对它的物理解释和理解就存在不同的意见和争论.一批为量子力学的发展作出过重要贡献的物理学家,如爱因斯坦、薛定谔等始终怀疑量子力学,认为它不是最终的理论,而另一批物理学家,以玻尔、海森伯为首则持完全相反的意见.

5.1 争论的焦点

争论的焦点在于波函数的解释,它是不是物理的实在?如何理解玻恩提出的波函数的统计解释?量子力学能否对物理事件的状态和运动过程作完整的描述?量子力学是最终的物理理论还是阶段性的现象性理论?这些问题在历届 Solvay 会议上双方的争论都进行得很激烈.玻尔在 1927 年的 Solvay 会议上指出:“任何人如果他没有被量子物理所震惊,那么他就不理解量子物理.”

5.2 两种态度

5.2.1 反对者的意见

爱因斯坦在 1926 年 12 月 4 日给玻恩的信中写道:“The theory yields a lot, but it hardly brings us any closer to the secret of the old one. In any case I am convinced that he does not throw dice.[尽管这个理论(量子理论)给出很多结果,但它几乎没有使我们更接近上帝的秘密.在任何情况下,我坚信,他不会掷骰子.]”薛定谔在 1926 年指出:“I knew of (Heisenberg's) theory, of course, but I felt discouraged, not to say repelled, by the methods of transcendental algebra, which appeared difficult to me, and by the lack of visualizability.(我当然知道海森伯的理论,但那令人难懂的超凡的代数以及那缺乏形象性的方法使我感到泄气,虽说还不是完全排斥.)”

5.2.2 支持者的回答

海森伯和玻恩在投给 1927 年 Solvay 会议的论文中指出:“We regard quantum mechanics as a complete theory for which the fundamental physical and mathematical hypotheses are no longer susceptible of modification.(我们把量子力学看作是一个完整的理论,它基本的物理和数学前提不容再被修改.)”

海森伯指出:“I had no faith in a theory that ran completely counter to our Copenhagen conception.(我不相信一个完全与哥本哈根概念相抵触的理论.)”

1926 年海森伯在给泡利的信中写道:“The more I think about the physical portion of Schrödinger's theory, the more repulsive I find it... What Schrödinger writes about the visualizability of his theory is probably not quite

right, in other words it's crap.(我对薛定谔理论的物理部分想得越多,发现它越让人感到不满意...薛定谔所写的关于他的理论的直观形象性也许不是那么正确,换句话说,那是胡说八道.)”

5.3 两种基本观点

爱因斯坦的观点:“Physics is an attempt conceptually to grasp reality as it is thought independently of its being observed. In this sense one speaks of 'physical reality' (物理是试图在概念上去抓住事物的真实性,而这个真实性应被认为是与观察没有关系的.在这个意义上,人们称之为物理的真实性.)”

玻尔的观点:“There is no quantum world. There is only an abstract quantum description. It is wrong to think that the task of physics is to find out how nature is. Physics concerns what we can say about nature.(这里没有量子世界,只有一个抽象的量子描述.认为物理要做的事就是弄清楚自然界是怎样的,那是错误的观点.物理关心的只是我们对自然界能说些什么.)”

海森伯的观点:“What we observe is not nature itself, but nature exposed to our method of questioning.(我们所观察到的不是自然界本身,而是在我们探讨问题所用的方法下所显现的自然界.)”

玻恩的观点:“We have sought for firm ground and found none. The deeper we penetrate, the more restless becomes the universe; all is rushing about and vibrating in a wild dance.(我们试图寻找到更坚实的基础,但没有找到任何东西.我们钻研得越深刻,宇宙就显得越不安宁,所有事物就像在狂欢舞会上,那么激动和摆动.)”“No language which lends itself to visualizability can describe quantum jumps.(没有任何语言可以用来形象地描述量子跃迁.)”

这样的争论即使在同一阵营内也是非常激烈的.海森伯回忆说:“Since my talks with Bohr often continued till long after midnight and did not produce a satisfactory conclusion, ... both of us became utterly exhausted and rather tense.(我与玻尔的讨论经常进行到深夜以后很久,还没有得到一个满意的结论, ... 我们俩人都完全变得筋疲力尽,并且气氛相当紧张.)”据说在 1927 年最初的几个月,海森伯与玻尔的争论变得相当剧烈,以致于在某一点上海森伯争论得都要流出眼泪,甚至想用尖锐的语言去伤害玻尔.

5.4 物理学家普遍的困惑

著名理论物理学家、诺贝尔奖获得者费恩曼指出:“There was a time when the newspapers said that only

twelve men understood the theory of relativity. I do not believe there ever was such a time. There might have been a time when only one man did, because he was the only guy who caught on, before he wrote his paper. But after people read the paper a lot of people understood the theory of relativity in some way or other, certainly more than twelve. On the other hand, I think I can safely say that nobody understands quantum mechanics. (在某个时候报纸上曾报道过只有 12 个人理解相对论. 我不相信有这样的时代, 可能有一人发现了相对论, 写论文时, 只有他一个人理解相对论. 以后当人们读了他的文章, 许多人就以不同方式理解了相对论, 当然多于 12 个人. 另一方面, 我认为我能保证地说, 没有人理解量子力学.)”

著名理论物理学家、诺贝尔奖获得者盖尔曼指出: “All of modern physics is governed by that magnificent and thoroughly confusing discipline called quantum mechanics... It has survived all tests and there is no reason to believe that there is any flaw in it... We all know how to use it and how to apply it to problems; and so we have learned to live with the fact that nobody can understand it. (现代物理的一切都是由所谓的量子力学这个美妙惊人而完全令人迷惑的原理支配的... 它从所有的实验检测中幸存下来. 没有理由认为量子力学存在任何缺陷. 我们都知道如何使用它以及如何应用它来解决问题. 尽管有人能理解量子力学, 我们已经适应这种情况了.)”

在量子力学看来, 相互不对易的物理量是不可能同时准确测量的. 海森伯测不准关系是量子力学特有而不能违背的关系. 在同一时刻, 位置测量得越精确, 所测动量就越不精确, 反之亦然. 爱因斯坦曾设计了许多假想的实验, 希望同时准确测定粒子的位置和动量, 但是和玻尔争论以后都找到了实验不能成立的原因.

6 EPR 佯谬

为了说明量子力学的不完备性, 1935 年, 爱因斯坦、波多尔斯基 (B. Podolsky) 和罗森 (Nathan Rosen) 提出 EPR 佯谬 (见图 4). 在彼此缠绕而空间分开的两个量子态之间, 会出现非局域的相互作用或超光速的信息传递. 同年, 薛定谔也提出了“薛定谔猫”的假想试验. 将猫和放射源放入密室中, 一旦放出射线, 猫将死. 猫和放射源是一整体, 放射源处于衰变

和未衰变态的叠加, 因而猫也处于死亡与活着状态的叠加. 这和日常经验相矛盾. 薛定谔猫和 EPR 佯谬是两个非常有名而且重要的工作, 对它们的研究一直持续到今天. 虽然根据这些设想设计的试验都证明了量子力学的正确, 没有达到原提出人的目的, 但是沿着这个方向的研究取得了意料之外的新进展, 并与信息科学相结合开辟了量子力学应用的新领域, 如量子密码、远程量子信息传递、量子计算等.

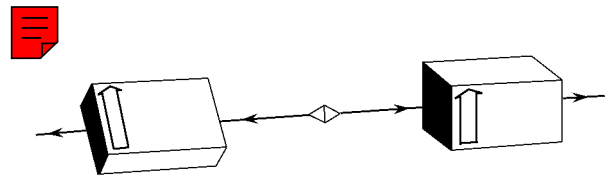


图 4

7 贝尔 (J.S. Bell) 定理

1964 年, 贝尔提出了一个重要的定理, 能够判别量子力学的背后是不是存在定域的、能同时描述不对易物理量状态的、包含隐匿参数的类似经典力学的理论. 他指出, 若这种理论存在, 在 EPR 佯谬中的两个彼此缠绕而空间分开的状态之间的关联将小于由量子力学所预计的数值. 对贝尔定律的实验检验 (1982 年) 证实了量子力学的正确, 量子力学背后不可能存在定域的、含有隐匿参数的类似经典的理论.

8 测量带来的困惑

测量是量子力学最令人不解的过程. 如何区分测量仪器对被测量对象的影响一直困惑物理学家, 并引起具有不同哲学观点的物理学家之间的激烈争论. 将观察对象和观测仪器作为一个量子系统, 测量过程引起波函数相干性的破坏和坍塌, 是一个突变的过程, 同时测量过程尊重物理的守恒定律. 从经典物理知道, 突变过程 (如冲击波) 必须加入耗散因子方能研究其结构, 否则只能根据守恒定律对冲击波波前及波后的物理量建立相应的关系. 我认为, 对量子测量过程, 必须在量子力学方程中加入类似耗散的消相干因子, 才可能研究消相干过程. 最近用原子相干态组成的薛定谔猫有可能从实验上研究消相干过程, 值得引起重视.

9 量子力学和相对论

有人从测量过程的突变性推论相对论遭到破坏,认为这预示量子力学和相对论存在冲突,发掘这种冲突是发展量子力学的前提.但需要指出的是,测量过程的理论可能在现有量子力学的能力范围之外.其次,相对论和量子力学在量子场论中已得到很好的结合,如量子电磁场理论已是当今世界最精确的理论,理论预测和实验结果高度符合.很难想象在低能区相对论和量子力学二者之间存在矛盾.当然两者都需要进一步发展,他们在极高的普朗克能区会统一在新的理论之中.

10 量子力学发展的历史带给我们的启示

物理学研究的是自然界的运动规律和物质的结构,判定物理学的发现和理论作为客观科学真理的唯一依据是,正确预见并为不同科学家在相同条件下所重复验证的实验事实.对量子现象的观察实验尽管出现许多出乎常情的结果,但我们的认识必须依据真实可靠的实验结果加以修正,而不是相反.

和其他科学理论发展的不同在于,量子力学是在激烈的争论下由一批科学家共同努力而产生的.之所以是这样,是因为量子现象十分奇特,用经典逻辑和日常经验无法理解和接受,需要丰富的想象力,需要理论和实验的紧密结合,需要不同观点的交锋和争论.反对的意见,如薛定谔猫和 EPR 佯谬,尽管未达到原提出者的目的,但是对量子力学的发展起到了重要的推动作用,开辟了全新的研究和应用领域.

量子力学尽管从观念上完全脱离了经典理论,但它同时继承和发展了经典理论中最精华的部分,如拉格朗日、哈密顿和 Jacobi 的分析动力学.对量子效应不显著的宏观现象,量子力学的预言也自动趋向牛顿力学.因此创新要在继承的基础上进行,只有

掌握人类创造的全部知识财富,又不受其拘束,才能从新的实验事实出发,产生革命性的创新.虽然我们还未完全懂得量子力学,但是在量子力学中蕴含着丰富的辩证思维,粒子与波动、连续与分立、对称与破缺、真空与场等等对立统一观念到处可见.只有通过量子逻辑才能理解从一个时空奇点可以创造整个宇宙,理解单个量子可以实现自身的干涉.

在历史的长河中,任何理论都是相对真理,都有其适用范围,都有在新的条件下改进的可能.量子力学和相对论的结合已经创造了量子场论,得到了很大的成功,量子场论本身也在继续发展.但是任何想改进量子力学基本观点的尝试都必须建立在实验的基础上.现代数学无疑在发展量子力学和量子场论中发挥了重要作用.我认为,单纯从数学和逻辑出发,有可能找到若干有用的关系,但经过实验的检验、指导和修正,不可能创造出新的理论.

11 不断发展的量子理论和应用

当前创建新理论的探索在向两个方向进行,一个方向围绕宇宙的起源、发展、标准模型的拓展和相互作用力的统一.由于实验困难,耗资巨大,进展缓慢.另一个方向围绕量子力学测量和解释问题进行,设计并进行了一批新的薛定谔猫和 EPR 佯谬实验,实验的成功证实了量子力学的预言,同时开辟了量子信息的新研究领域.第二个方向费钱不多,有重要的应用背景,会有较快的发展.

量子力学应用的领域将随着人类对物质结构认识的深入而不断扩大.由于人类对单个原子操纵能力的增加,应用量子力学会设计出越来越多的按照人的要求,具有特殊功能的人造微结构和具有新奇性质的宏观量子态,会在 21 世纪继续对经济、军事、科技和社会进程产生重大的影响.物理学将在 21 世纪继续发展,并发挥重要作用.我国科学家应当在 21 世纪为物理学的新进展作出重要的贡献.