

编者的话

在这金风送爽的时节,我们高兴地迎来了伟大祖国建国 50 周年.新中国的建立,特别是改革开放政策的实施,为我国各方面的发展,也为物理学的发展创造了良好的条件.我国近代物理学的研究,从少数先行者开始,经过艰苦的创业和发展,已逐步走向国际前沿,取得了可喜的成绩.本期“庆祝建国 50 周年”专栏刊出的文章简要介绍了在半导体物理、晶界弛豫、原子分子物理、粒子物理和加速器方面的现状和发展.在相继的两期,还会推出有关的庆祝文章,以飨读者.

在阅读本期稿件时,有两篇特别让我们感动.

冯端先生曾为本刊撰写过多篇很有影响的文章,深受读者的喜爱.这次又应邀撰写了“漫谈物理学的过去、现在与未来”作为开篇.在回答编辑部有关文章写作技巧方面问题的信中,冯端先生写道:“其实别无诀窍,勤于修改就是了.如有闲空,可将此稿和学会开会时所发打印稿对照一下,从两者的差别可以看出我修改的痕迹.这支笔是我修改以来写干的第三支笔!”多么可敬的写作精神啊!

葛庭燧先生 1947 年首先将扭摆用于金属内耗测量,不仅这种开创的意识让人赞叹,更让人敬佩的是他 50 年来的坚持不懈的精神!我们国家下一世纪物理学的发展,关键还在于要有一支立足于国内、热爱科学、有献身精神和奋斗精神的队伍!

我们的《物理》编委会于今年 5 月进行了换届,组建了新一届编委会.新一届编委会将继续致力于提高刊物文章的质量,使之既有高的学术水平,又深入浅出,具有很好的可读性;同时还将开辟一系列新的栏目,报道来自中国物理学会、国家自然科学基金委员会的消息,刊登书评和新书信息,提供即将召开的国内外与物理有关的学术会议信息,提供国内外重要物理刊物评述文章的目录,增加招收博士生、博士后等的信息服务,刊登物理实验用新产品的广告等,多方面为读者服务.

我们希望《物理》杂志在促进和推动我国物理学研究、教学以及相关的技术应用的发展上发挥更积极的作用.我们希望能更多地得到读者的支持,以全新的面貌迎接新的世纪!

漫谈物理学的过去、现在与未来*

冯 端

(南京大学物理系 固体微结构物理国家重点实验室 南京 210093)

摘 要 文章试图对物理学的发展历史作一透视,从而理解其现状,并进而窥测其未来的前景.我们

* 国家自然科学基金资助项目

1999 - 06 - 14 收到

根据作者 1999 年 5 月 8 日在中国物理学会第 7 届全国会员代表大会暨学术报告会上的邀请报告修改而成

希望这一看法对于当今从事物理学教学与科研的人士有所助益. 由于物理世界的层次化, 诸层次之间既可能存在耦合, 又可能出现脱耦. 因而大量粒子所构成的复杂体系中所涌现的各种层展性质就不能简单地还原成个别粒子所服从的规律. 我们根据这一观点并结合物理学的未来前景, 讨论了当今物理学研究的若干前沿问题. 一切迹象预示着物理学将有光明的前景.

关键词 物理学, 历史, 现状, 前景, 前沿, 物理世界的层次化, 层展性质

RAMBLING ABOUT THE PAST, PRESENT AND FUTURE OF PHYSICS

Feng Duan

(Department of Physics, Njing University; National Laboratory of Solid State Microstructures, Njing 210093)

Abstract This paper gives a historical perspective about the past developments of physics in order to understand its present status and furthermore to glimpse its future prospects. We hope that this view may be helpful for those who are engaged in teaching and research in physics. From the stratification of the physical world, it is shown that there is coupling as well as decoupling between different strata, so that complex systems composed of an enormous number of particles will show properties which can not be simply reduced to laws governing individual particles. From this viewpoint, the frontiers of research in physics are discussed in relation to its future prospects. A bright future is anticipated for physics.

Key words physics, history present status, future prospects, frontiers, stratification of physical world, emergent properties

“物理学的过去、现在和未来”是一个非常而且重要的题目, 也是一个非常难讲的题目, 特别是涉及物理学的未来, 结果往往是贻笑大方. 这里以历史的透视为主线, 提出一些个人不成熟的看法, 抛砖引玉, 希望得到大家的批评和指正.

1 历史的透视

对物理学的发展历史进行透视, 将有助于我们来理解其现状并进而展望其未来. 历史很长, 不能样样都讲到. 我想从牛顿开始, 牛顿以前还有很多先驱性的工作, 只好从略了.

1.1 经典物理学的盛世 (17 世纪至 19 世纪末)

我们不想详细讨论历史, 主要考虑那些还在用的物理学知识.

第一次综合 (统一) 是 17 世纪牛顿力学构

成了体系. 可以说, 这是物理学第一次伟大的综合. 牛顿力学实际上是将天上的行星运动与地上的苹果下坠概括到一个规律里面去了, 建立了经典力学. 至于苹果下坠启发了牛顿的故事究竟有无历史根据是另一回事, 但它说明了人们对于形象思维的偏爱. 牛顿实际上建立了两个定律, 一个是运动定律, 一个是万有引力定律. 运动定律就是在力作用下物体怎样运动的规律; 万有引力是一种特定的物体之间存在的基本相互作用力. 牛顿将两个定律结合起来运用, 因为行星的运动或者地球上的抛物体运动都离不开万有引力的影响. 牛顿从物理上把这两个重要的力学规律总结出来的同时, 也发展了数学. 他也是微积分的发明人. 他用微积分来解决力学问题. 由运动定律得出来的运动方程, 可以用数学方法把它具体解出来. 这体现了牛顿力学的威力, 它具有解决具体问题的能力. 假如你要计算行星运动的轨道, 基本上可以按照

物理

牛顿所给出来的物理规律,加上用数学方法解运动方程就行了.根据现在的轨道上行星位置,倒推千百年前或预计千百年后它们的位置都是轻而易举的,从而开拓了天体力学这一学科.海王星的发现史就充分显示了这一点.人们发现天王星的轨道偏离了牛顿定律的要求,问题在哪里呢?结果认为牛顿定律正确无误,而是在天王星轨道外面还有一颗星,对它造成影响,并估计出这个星球的位置.果然在预计的位置附近发现了这颗星,命名为海王星.这表示牛顿定律是很成功的.按照牛顿定律写出运动方程,若已知初始条件位置和速度,原则上就可以求出以后任何时刻的粒子位置.

到19世纪,经典力学新的发展表现为一些科学家重新表述了牛顿定律.重新表述有拉格朗日(Lagrange)方程组、哈密顿(Hamilton)方程组.这些重新表述形式不一,实质并没有改变.在不改变实质的条件下,用新的、更简洁的形式来表述牛顿定律.这是一个方面.

另一个方面,就是将牛顿定律推广到连续介质的力学问题中去,就出现了弹性力学、流体力学等.在这一方面,20世纪有更大的发展,特别是流体力学、空气动力学和航空技术的发展密切相关,而气动力学的发展又和喷气技术密切相关,进而牛顿力学还构成了航天技术的理论基础.因此我们说牛顿定律到现在为止还是非常重要的,牛顿定律还是我们大学课程中不可缺少的一个组成部分.当然,其表述方法应随时代发展而有所不同.读者如果有兴趣,不妨去翻一翻牛顿当年的表述.牛顿关于力学研究的成果,写在一本叫《自然哲学的数学原理》(简称《原理》)的巨著中.只要稍微翻一下这本书,就会发现它非常难懂.牛顿的一个重要贡献是从万有引力定律和运动定律把行星运动的轨道推了出来.我们现在学理论力学时,行星运动的椭圆轨道问题是不太难的,解微分方程就可以求出来.但牛顿在《原理》里,没有用他的微积分,更没有用解微分方程的方法,他纯粹是用几何方法把椭圆轨道推出来的.现代科学家就不一定能看懂他这一套东西.举个例子来说,费曼

(R. Feynman),有名的理论物理学家,他写过一本书,他说他自己对现代数学比牛顿强得多,但对17世纪牛顿当时熟悉的几何学他就不一定能全部掌握,他花了好些时间,想用牛顿的思路把椭圆轨道全部证出来,结果,中间还是有些环节证不出来,最后他不得已调整了一下方法,没有完全依照牛顿的证法,但基本上还是用几何方法把这个问题证明出来了.科学理论的表达是随时代变化的.现在来看,牛顿运动定律的关键问题,譬如行星运动是椭圆轨道,现在应有可能在普通物理中讲了,因为简单的微分方程已经可以用计算机求解了.由于计算机的发展,也许今后在普通物理中讲牛顿定律时,就可以在课堂上把行星运动椭圆轨道的一些基本概念说清楚了.在这里也可以说,教学问题与现代科技发展是息息相关的.

第二次综合是麦克斯韦的电磁学.大家都知道,最初是库仑定律,用以表达电荷与电荷间的相互作用力,也表达磁极与磁极之间的相互作用力.然后电与磁之间的关联被发现了:奥斯特的电流磁效应,安培发现的电流与电流之间相互作用的规律,然后是法拉弟的电磁感应定律,这样电与磁就连通成为一体了.最后,19世纪中叶,麦克斯韦提出了统一的电磁场理论.电磁定律与力学规律有一个很大的不同.力学考虑的相互作用,特别是万有引力相互作用,根据牛顿的设想,是超距的相互作用,没有力的传递问题(当然用现代观点看,引力也应该有传递问题).现在从粒子的超距作用改成电磁场的场的相互作用,这在观点上有很大变化,重点从粒子转移到场.麦克斯韦考虑电磁场的相互作用,导致电磁波,电场与磁场不断相互作用造成电磁波的传播,后来赫芝在实验室中证实电磁波的发射.另外,电磁波不但包括无线电波,实际上包括很宽的频谱,很重要的一部分就是光波.光学在过去是与电磁学完全分开发展的,到了麦克斯韦的电磁理论出来以后,光学也变成了电磁学的一个分支了,在这里,电学、磁学、光学得到了统一.这在技术上有重要意义,发电机、电动机几乎都是建立在电磁感应的基础上的,电

磁波的传播导致现代的无线电技术.电磁学直到现在,在技术上还是起主导作用的一门学科,故在基础物理学中电磁学始终保持它的重要地位.

第三次综合是从热学开始的,涉及到宏观与微观两个层次.根据热学研究总结出热力学的两大基本规律:第一定律,即能量守恒律;第二定律,即熵恒增律.但科学家不满足于单纯在宏观层次上来描述,还想追根问底,企图从分子和原子的微观层次上来阐明物理规律.气体分子动理学便应运而生,用以阐述气体物态方程、气体导热性与粘滞性等物性参量的微观基础.进一步就是玻尔兹曼与吉布斯所发展的经典统计力学.热力学与统计物理的发展,促使物理学家接触到具体的物性问题,加强了物理学与化学的联系,建立了物理化学这一门交叉学科.

1.2 转折与突破(19世纪至20世纪初)

正是由于经典物理学取得了非凡的成就,给人们印象太深刻了,遂使有些科学家产生了错觉,认为巨大发现的时代业已过去.这种悲观的论点在上世纪末相当流行.具有典型意义的据称是著名物理学家迈克尔孙(A. A. Michelson)说过的一段话,“当然无法绝然肯定物理科学不再会有像过去那么惊人的奇迹,但非常可能的是大部分宏伟的基本原理业已确立,而今后的进展仅在于将这些原理严格地应用于我们所关注的现象上.在这里测量科学的重要性就显示出来了——量化的结果比定性的结果更为可贵.一位卓越的物理学家曾经说过,物理科学未来的真理将在小数点六位数字上求索”.(1898年芝加哥大学导学手册).值得注意,这类悲观论点,在20世纪科学的重大发展之后,又在本世纪末重新问世.具有代表性的是美国资深科学记者霍根(J. Horgan)访问许多知名学者之后,写出了《科学的终结》一书,在断章取义地引述若干科学家的谈话之后,得出了荒谬的结论,不仅是物理学走向了穷途末路,而是一切自然科学都到了散场的地步.堪称为上一世纪末悲观论点变本加厉的新版本,其命运必将重蹈前者的覆辙.

富有洞见的是英国著名物理学家凯尔文(L. Kelvin)于1900年所作的演说.他在对19世纪物理学的成就表示满意的同时,提出了“在物理学晴朗天空的远处,还有两朵令人不安的乌云”.这两朵乌云指的是:其一实验察觉不到物体和以太的相对运动;其二是气体多原子分子的低温比热不符合能量均分定理.这两朵乌云迅速导致倾盆大雨,即相对论和量子论的两场物理学的革命.

19世纪的科学家不满足于用麦克斯韦方程组来解释电磁现象,热衷于采用机械模型来说明问题,即使是大师麦克斯韦本人也不例外.以太被引入作为真空中传播电磁波的媒质.迈克耳孙与莫莱(Morley)设计了精巧的实验来验证物体和以太的相对运动,取得了负的结果.爱因斯坦提出了狭义相对论(1905年),其物理洞见在于摒弃了不必要的以太假设,进而肯定电磁学的规律对于一切惯性参考系都是成立的,而且具有相同的形式,真空的光速不变,不同惯性系之间的变换关系为洛伦兹变换.我们知道,牛顿力学也是对于惯性参考系才成立,而不同惯性系之间的变换关系为伽利略变换.这样经典力学和经典电磁学之间就存在矛盾.爱因斯坦肯定了经典电磁学,而对经典力学作了相应的修正,摒弃了牛顿的绝对的时空观,认为空间、时间与运动有关,并首创性地提出了质量与能量的对等关系,将牛顿力学修正后成功地应用于高速运动的情形.

牛顿力学的另一局限性表现在它不能圆满地解释强引力场中物体的运动,这从它无法定量地解释水星轨道近日点的进动问题而初露端倪.另一带根本性的问题是它对万有引力的存在没有任何理论解释.这些缺陷尚有待发展进一步的理论来弥补.1916年,爱因斯坦的广义相对论应运而生.这一理论的出发点在于肯定惯性质量与引力质量等同的等效原理(这已为实验所证实),将非惯性参考系中观测到的惯性力与局域的引力等同起来.进而提出一切参考系均有相同的物理规律这一广义相对性原理.广义相对论成功地预言了一些效应,如强引力

场中光线的弯曲,引力强度与光谱线频移的关系,并用空间的弯曲很自然地解释了引力的存在.由于广义相对论是针对强引力场和大质量物体而提出来的,因而广泛应用于天体物理学,也构成了现代宇宙论的基础.

如果说相对论消除了经典物理学的内在矛盾并推广其应用范围,那么量子论就开启了微观物理学的新天地.在19世纪,化学家道尔顿提出了原子论,物理学家也提出原子-分子微观运动的概念来构筑分子动理学和统计物理学.特别是著名物理学家玻尔兹曼在发展原子-分子运动理论,推动统计物理学的发展上作出了杰出的贡献.但是这些工作受到马赫(E. Mach)与奥斯特瓦尔德(W. F. Ostwald)等人从实证论哲学观点的质疑.按照实证论的观点,只有为人们所感知的事物是存在的.而当时由于显微术观测条件的制约,原子与分子都无法直接看到,因而有关的理论受到实证论者的否定.玻尔兹曼为捍卫原子-分子理论进行了激烈的争辩.爱因斯坦于1905年提出布朗运动的理论,为分子运动的图像提供了有力的旁证.随后,佩兰(J. B. Perrin)的实验观测提供了更加确凿的证据.

在明确了宏观世界之外存在有微观世界后,进一步的问题在于探索微观世界的物理规律.上世纪90年代中叶后,有一系列重要发现,对这方面的研究起了很大促进作用:1895年,伦琴发现了X射线,随后X射线成为揭示物质的微观结构的重要工具;1896年贝克勒尔发现了放射性,随后居里夫妇发现了强放射性元素镭,卢瑟福确认了 α 、 β 射线的本质,这些工作揭开了原子核科学研究的序幕.1897年,汤姆孙发现了电子,这是最早发现的一种基本粒子,随后也被作为重要的工具应用于研究物质的微观结构,而操纵电子的器件成为现代信息技术的基础.作出这些重大发现的科学家也都获得了新世纪初诺贝尔奖的桂冠.

如果说证实原子与分子的存在就意味着揭示物质结构在微小尺度上具有不连续性,那么早期量子论则揭示了能量在微小尺度上的不连

续性.1900年,普朗克为拟合黑体能量分布的实验数据,在经典物理学的理论无效之后,铤而走险,提出了包括作用量子 h 的量子论.随后,1905年,爱因斯坦根据光电效应存在能量阈值的规律提出了在物理上更明确的具有能量为 $h\nu$ 的光子这一种基本粒子.1911年,卢瑟福根据金箔对于 α 粒子的散射实验结果,提出了有核的原子模型:正电荷集中在原子核这一微小区域之内,而外围则为电子所环绕.1913年,玻尔提出了量子论的原子模型,认为原子中的电子处于确定的轨道上,处于定态,在定态之间的量子跃迁则导致发光.玻尔用这种半经典的量子理论相当满意地解释了氢原子的线系光谱,面对着更复杂的原子光谱问题就遇到了困难.科学家需要改弦易辙,发展更全面的量子理论.1924年,德布罗意正确地指出,正如电磁波也具有粒子性质(光子),而具有粒子性质的电子等也将具有波动性.1925—1926年,海森伯与薛定谔分别完成了量子力学的两种表述,矩阵力学与波动力学,强调了波动与粒子的二象性.电子衍射的实验结果证实了电子具有波动性,而量子力学的理论全面地解读了纷纭繁复的原子光谱实验结果,一举解决了原子结构的问题.随后狄拉克将非相对论的薛定谔方程推广到(狭义)相对论的情形,建立了狄拉克方程,为量子力学作了重要的补充.这样,微观世界的物理规律终于确立.

2 当代情景

在量子力学确立之后,物理学进入了新的时期,这里统称为当代物理学.由于当代情景错综复杂,头绪繁多,难以用甚短的篇幅来进行概括^[1].下面就以实验和理论这两条主线,对此作一粗略的介绍.

2.1 实验技术

20世纪是实验技术突飞猛进的时期.早期卢瑟福的 α 粒子散射实验为随后的核物理与粒子物理的研究树立了样板.但技术上的改进是多方面的.轰击的粒子束有质子、中子、电子和

各种离子等。30年代初,中子被发现后,由于其散射截面大,容易引起核反应,受到学术界的重视。费米及其合作者系统地用中子来轰击周期表中不同元素,发现了一系列的核反应和新的放射性元素。1938年,哈恩(O. Hahn)与迈特纳(L. Meitner)终于发现和确认铀的裂变。随后原子核裂变的链式反应得以实现,导致了裂变反应堆的问世。它为实验技术提供了新的手段,又为裂变能的军事与和平利用鸣锣开道。随后,轻元素的聚变提供了另一种核能源。聚变能的爆炸式的军事应用于50年代初即已实现,但可控的和平利用却经历了漫长的发展过程。两种方法,磁约束与惯性约束,虽则取得不少科学成果,但作为能源,尚处于得失相抵(breakeven)的前夕,要点火尚需继续努力。

到30年代,科学家开始认识到天然放射性元素发射的粒子能量太低,束流也不够强,不能适应实验物理学的要求。在这种情况下,加速器技术就应运而生。早期有高压倍加器和静电加速器,主流是劳伦斯开创的回旋加速器及其变型。以后加速器的能量愈做愈高,技术愈来愈精。能量已从早期的MeV量级升高到如今的TeV量级。一代代的加速器为核物理和粒子物理的研究立下了汗马功劳,发现了几百种粒子。与之并行发展的还有粒子检测技术,从早期的盖革计数器、云雾室,到照相乳胶、气泡室、火花室和闪烁晶体列阵等。虽然技术的进展十分引人注目,但许多物理实验的基本思路,例如通过质子对高能电子的深度非弹性散射来论证质子具有夸克结构,仍然和卢瑟福的原型实验十分相似。值得注意,加速器与反应堆也被用于非核物理学以至于其他科学的研究,同步辐射和高通量中子源就是例证。

另一高速发展的物理科学领域是天体物理学。光学望远镜愈做愈大,射电望远镜是在第二次世界大战中由雷达技术推动而发展起来的,也朝向巨型发展;而依据射电望远镜发展起来的综合孔径技术也反馈到光学望远镜的技术中去了。新波段,如红外、X射线和射线的望远技术得到了发展,还有新的检测技术如CCD列

阵。为了超越大气层的吸收和干扰,还将望远镜放到太空中去,如哈勃、爱因斯坦、康普顿望远镜等。可以说当代也是天体物理学的黄金时代。大量天体谱线红移的数据为宇宙膨胀提供证据,3K微波背景、脉冲星、类星体及射线爆等重大发现,为理论天体物理和宇宙论提供了大量数据,使星体和宇宙成为检验物理理论的庞大实验室。

现代高能物理学(包括部分核物理)及天体物理学已经成为大科学主宰的领域。其特征在于设备庞大,人员众多,经费数额巨大,计划实施时间漫长。

到30年代,光谱学研究已有盛况不再之感。但第二次世界大战中雷达技术的发展又为微波波谱及磁共振的研究提供机遇。50年代初,首先在微波频段实现了受激发射,随后转移到光学频段,导致激光器的问世。激光技术引起了光学和光谱学的一场革命,导致量子光学的诞生,影响十分深远。应该指出,早在1917年,爱因斯坦就提出了受激发射的理论,而实验室中的实现却延迟到40年之后。激光技术引入物理实验室,为小型精巧的实验研究提供了机会。

X射线和由之衍生的电子衍射与中子衍射,导致了晶体结构分析的发展。它为凝聚态物理和材料科学奠定基础,而且大大地促进了化学、生物学和矿物学的研究。出自这一领域的科学家获得了诺贝尔奖多达十几次。电子显微术超越了光学显微术的分辨极限,并实现了原子尺度的成像。80年代以后,扫描隧道显微术发展成为花样繁多的显微探针技术,不仅实现了原子尺度的成像,还实现了多种原子尺度的测量和操纵技术,充分显示了小规模精巧创新的实验技术仍然富有生命力。

为了消除热运动对固体中许多现象的干扰,将试样冷却到低温下进行研究成为重要的手段。现代低温技术始于氦的液化(4.2K),进一步采取稀释致冷机可以达到mK的温度,再进行核退磁致冷,可以达到 μK 的量级。近年来发展起来的激光冷却,再加上蒸发致冷,可以使原子气体达到 μK 以下的温度。低温物性的研

究取得许多重要的成果:金属与合金的超导电性,⁴He 液体的超流动性,³He 液体的超流动性,多种非常规的超导性(如有机化合物、重费米子、铜氧化物超导电性,其中最后一种已经超出低温的范围)。1995年起,又在 μK 温度以下观测到碱金属气体的玻色-爱因斯坦凝聚,随后,相位相干的原子束得到了实验演示,即所谓原子波激射(atomic laser)。

晶体纯度和完整性对物性有重要的影响,促使固体制备技术有了较大的发展:单晶拉制、区熔提纯、控制掺杂等技术成功地应用于半导体的制备。1947年,晶体管的发明也许是20世纪中物理学家所作出的取得最大经济与社会效益的一项成就。70年代后,超高真空技术成为实验室中的常规手段,在超高真空下的结构与能谱测试手段相继问世,开拓了表面物理的新领域。以分子束外延为代表的当代薄膜与异质结制备技术的开发,引起量子纳米结构(量子阱、量子线与量子点等)的热潮,并向磁性材料(巨磁阻效应)和超导体方面延伸。许多新的物理效应的发现,诸如整数与分数量子霍尔效应、介观量子输运等,显示了凝聚态物理尚大有可为。

2.2 理论与计算

在量子力学建立之后,理论发展就分道扬镳,其中一条道路是深入到更加微小尺度的微观世界中去。首先发展的是原子核结构与动力学理论。虽然核子之间存在强相互作用,但基于平均势场中作有效单粒子运动的壳模型也取得成功。还有强调核的集体行为的液滴模型和复合核模型,也有将单粒子运动和集体运动结合起来的综合模型,核子配对的相互作用玻色子模型等,颇成功地说明原子核的某些性质。

进入更深层次的物质结构就到达了粒子物理学研究领域。50和60年代,除核子以外,又发现大量的强子(具有强相互作用的粒子),其中多数是不稳定的。1964年,盖尔曼(M. Gell-Mann)等提出了强子的夸克模型,认为强子并非基本粒子,而是由具有分数电荷($\frac{1}{3}$ 或 $\frac{2}{3}$ 电

子电荷)、还具有色荷(红、蓝、绿三种颜色之一)的夸克所构成的。质子的夸克结构已为实验所证实。理论所预言三色六味的各种夸克,一一被实验所揭示,最后一种顶夸克是到1995年才发现的。夸克虽然存在于强子结构中,但独立存在的自由夸克却一直没有观测到。科学家又提出夸克禁闭模型来说明这一事实。

到本世纪中叶,已经明确了自然界只有四种基本相互作用,即引力、电磁力、弱力与强力。其中引力和电磁力是长程的,而弱力与强力是短程的,限于原子核的范围之内。爱因斯坦晚年致力于统一场论,试图将引力和电磁力统一起来,未取得成功。量子力学建立之后,处理量子体系与相互作用场的理论(量子场论)得到了发展。首先发展的是处理电磁相互作用的量子场论,即量子电动力学。在40年代末,利用重正化消除了发散的困难,使量子电动力学的理论预言得到了高精确度的实验证实(有效数字高达十几位)。随后,处理强相互作用的量子场论、量子色动力学得到了发展。弱相互作用的理论始于费米的衰变理论,60年代末,温伯格(S. Weinberg)与萨拉姆(A. Salam)成功地将电磁相互作用与弱相互作用统一起来。在量子场论中,一些粒子被理解为场的激发态,而另一些粒子则成为传递相互作用的玻色子。

进一步探索各种相互作用的统一理论尚在进行之中。大统一理论企图将统一的范围包括强相互作用,尚有待实验的证实。进而将引力包括在内的超大统一理论的设想也被提出。

三代夸克与轻子的粒子模型,量子色动力学与电-弱统一理论,被统称为粒子物理学的标准模型,在概括和预言实验事实取得了非凡的成功。它预言了62种基本粒子,其中60种已被发现,只剩下希格斯玻色子与引力子尚待发现。

但标准模型仍带有唯象性质,它包含十几个参量,而且对粒子的质量不提供理论解释。如何超越标准模型,并从更根本的微观模型来解释粒子物理,就成为对理论物理学家的重大挑战。在这方面的努力以超弦理论最引人注目。这

一理论极其精巧,也推动了相关数学问题的研究.但最终如何评价这一理论尚有待于实践来检验.

当代天文学研究总结出来的大爆炸理论被称为宇宙论的标准模型.按此理论设想,宇宙起源于一百数十亿年前的一次大爆炸:原先是时空奇点(密度和曲率却无限大),各种相互作用统一在一起.到 10^{-44} s,发生了引力与其他相互作用分离的对称破缺,到 10^{-36} s,发生强力与其他相互作用分离,到 10^{-10} s 又发生弱力与电磁力的分离,成为如今四种相互作用并存的世界.到 10^{-6} s 时,开始合成强子,到 3min 后形成原子核,再逐步形成各种原子及各种星体与星系.大爆炸宇宙论是建立在若干天文学观测的结果上的:哈勃定律所描述的宇宙膨胀,3K 宇宙背景辐射的发现,星体一些元素的丰度数据,是一种行之有效的物理学理论,当然还有许多问题尚有待于澄清.值得注意的是,早期的宇宙(3min 之前)是粒子物理学的天下.著名物理学家温伯格的有名科普著作《最初三分钟》即以此而命名的.

量子力学建立之后,另一条发展道路在于进入较大尺寸的物质体系.将量子力学应用于分子,建立了量子化学;将量子力学与统计物理学应用于固体,建立了固体物理学,随后发展为凝聚态物理学.涉及了这些问题,就需要明确区分量子力学和经典物理学的各自适用的范围.通常的提法是量子力学适用于微观体系,而经典物理学适用于宏观体系,这显然不够精确,因为也存在宏观量子体系.对于特定粒子构成的系统,可以采用量子简并温度(即粒子的德布罗意波长等于粒子的平均间距对应的温度)

$$T_0 = \frac{h^2}{3 m k_B a^2}$$

来区分.这里 h 是普朗克常数, m 为质量, k_B 为玻尔兹曼常数, a 为平均间距.如果温度远大于 T_0 ,则可以放心采取用于经典物理学的理论方法来处理这一体系,否则,就得用量子力学的方法.至于 T_0 的高低则取决于粒子的质量 m 和体系的平均间距 a (或密度).对于固体和液

体, a 约为 0.3nm,对电子系统而言, $T_0 \sim 10^5$ K,从而表明处理电子系统的问题,离不开量子力学.对于原子核或离子而言, $T_0 \sim (50/A)$ K, A 为原子质量数,对于轻元素(如氦与氢),在低温下要考虑量子力学的效应.因而在通常情况下处理大量原子核(或离子)与电子的混合体系,对于电子这一子系统,必须采用量子力学的理论方法,而对于原子核这一子系统,则不妨采用经典物理学的理论方法.凝聚态物理学和量子化学由于大量采用这种混合的处理方案而取得了成效.但应该指出,这类的电子理论涉及了相互作用粒子的多体问题.基于有效场单电子近似的固体能带理论显然很有成效;引入适度的相互作用而发展起来的费米液体理论、巡游电子铁磁性理论和 BCS 超导理论也成绩斐然;但是强关联电子体系(包括高温超导体)仍然是一根硬骨头,对理论物理学家提出了强有力的挑战.

如果仅关注原子(或离子)与分子常温下的位形与动力学问题,那么采用经典物理学的方法是无可非议的,正如当代液体物理学和软凝聚态物理学所作的那样.当然,如果涉及键合的细节和电子的跃迁,还是需要量子力学.低温下的量子流体(^4He 与 ^3He)突出地体现了量子力学效应.在气体中要体现这种效应,由于原子间距,简并温度要压得很低.在进入 90 年代后,方始观测到这类理论预期的效应,原子束光学和玻色-爱因斯坦凝聚都是例证.特高密度下的物质,如中子星,使简并温度高达 10^{10} K,可能使这些星体内部呈现超流性等量子力学效应.

应该指出,当代也是经典物理学复兴的时代.在相变与临界现象领域,研究了具有长程涨落的经典统计体系,呈现了普适性和标度律,发展了重整化群理论.经典动力学系统理论和非线性物理学都取得了长足的进展,像混沌、分形、孤子等概念,在交叉科学中获得了广泛的应用,成为理解复杂性的钥匙,也为解决湍流这个长期悬而未决的难题提供了有意义的线索.

电子计算机的突飞猛进,对于当代物理学产生了异乎寻常的影响.量子化学与凝聚态电

子理论的从头 (ab initio) 计算方案变得切实可行,从而促进了计算材料科学这门新的交叉学科的发展. 分子动力学、蒙特卡罗方法,乃至元胞自动机为物理学的各个分支提供了鲜明生动的物理图像和信息. 以至于有些科学家认为计算和计算机模拟已成为可与实验和理论并立的科学研究的第三个支柱.

尽管由于物质结构层次化的结果,使得当今的物理学家很难精通、也不必精通物理学的各个分支. 但是物质结构在概念上是有其统一性的. 相同的概念会在不同的层次上出现. 著名物理学家巴丁 (J. Bardeen) 的一段话很有启发性:“处在这日益专业化的时代之中,得以认识到基本物理概念可能应用于一大批看起来五花八门的问题,是令人欣慰的. 在理解某一领域所获得的进展常常可以应用于其他领域. 这不仅对材料科学的众多领域是确实的,对广义而言的物质结构亦复如此. 作为阐述的例证,为理解磁性、超流性和超导性所发展的概念也被推广应用于众多的领域,如核物质,弱与电磁相互

作用,高能物理学的夸克结构与众多的液晶相^[2]. 这值得我们深思.

3 学科的前沿与展望

下面我们来讨论有关学科前沿与展望这方面的问题.

3.1 物质结构层次化的结果

当代物理学的研究表明,物质结构在尺度上和能量上都呈现不同的层次(见图1). 明确了物质结构的不同层次之后,当代物理学的分支学科如何划分的问题,也就迎刃而解了(见图2). 最微小(也是能量最高)的层次是粒子物理学(也称为高能物理学),然后是原子核物理学,再上去就是原子物理学和分子物理学. 原子或分子聚集起来构成了不同的聚集相:气相、液相和固相,乃至固液之间的中介相,如液晶、复杂流体与聚合物等软物质. 另一类气相(由宏观中和的正负带电粒子所构成的)就是等离子体,相应的是等离子体物理学. 大尺度的固体与

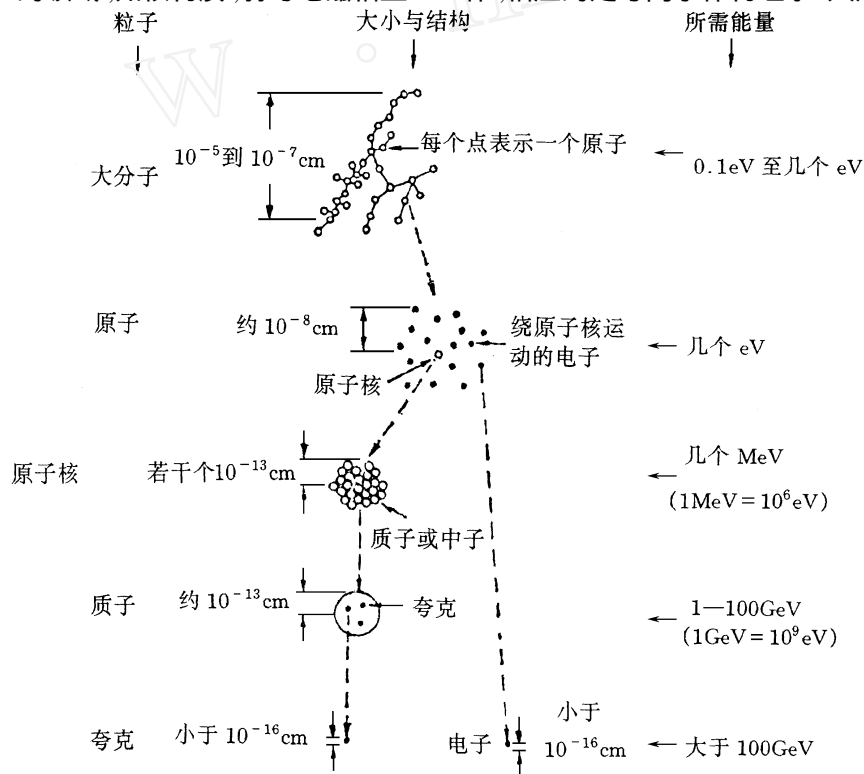


图1 物质结构的不同层次

流体运动的研究归结为固体力学与流体力学。聚集相的复杂组合构成了岩石、土壤、河流、山脉、湖泊、海洋及大气等,成为地球物理学的研究对象;而细胞、器官、植物、动物及人体构成了生物物理学研究对象。继续扩大物质研究的空间尺度,就引导到空间物理学和行星物理的领域。进而包括太阳、恒星、星系、星系团,乃至整个宇宙,都构成了天体物理学和宇宙论的

内容。在这里似乎遗漏了一些传统物理学的分支学科,如光学与声学。目前的情况是,它们的部分内容正在朝向偏重技术的工程学科转化,而另一部分则和某些结构层次的物理学相结合。例如光物理学就和原子与分子物理学密不可分,也和凝聚态物理学关系密切;而物理声学则与凝聚态物理学及固体与流体力学密切相关。

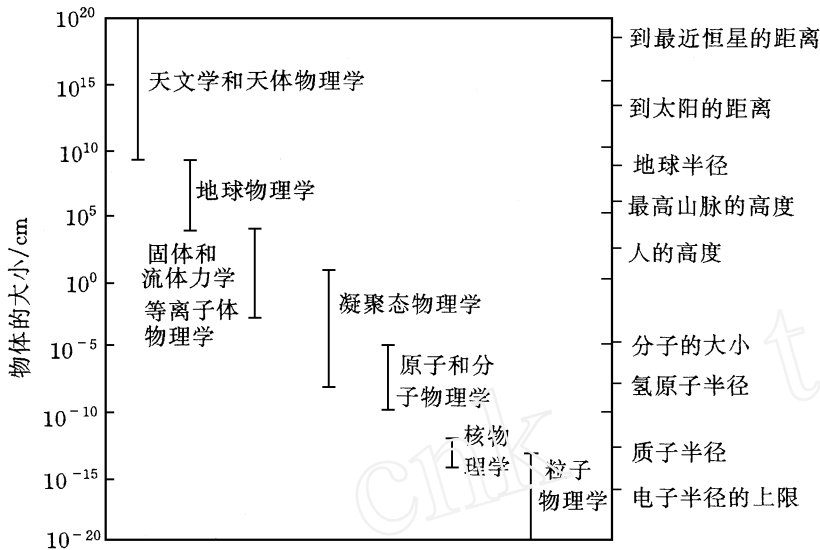


图2 物理学不同分支学科与所研究结构的尺度

从物质结构层次化的图表来看,物理学的主要空白区域突出地显示为图表的底部和顶部。其一是尺度上最最微小但能量最高的世界,对应的学科为粒子物理学(亦称高能物理学);其二是最最宏大的世界,即天体与宇宙,对应的学科为天体物理学与宇宙论。这两者,表面上看来,南辕北辙,结果却殊途同归,有合二为一的趋向,奇妙地体现了大与小辩证的统一。粒子物理学所面临的挑战在于探索更加细微尺度下,也就是更高能区物质结构的规律,希望能够超越现有的标准模型,追求相互作用的进一步统一。而宇宙大爆炸的标准模型则表明早期的宇宙是处于超高能的状态。因而高能物理学的研究,从某种意义上来说,是对宇宙进行考古学的研究。提高研究的能量范围,就等于追溯到更早期的宇宙。高能物理和天体物理的实验研究都

属于大科学的范畴。大科学威风凛凛,但大也有大的难处,正如《红楼梦》中王熙凤所说的。大科学所面临的问题在于如何持续地获得社会的支持。在冷战时期,巨型加速器成为国力的象征,理所当然地得到了国家的支持。冷战以后,情况显然有所不同,需要考虑这类基础科学研究的社会效益问题。美国超级超导对撞机的下马似乎暗示了:即使像美国那样的富裕发达国家,对大科学项目的支持还是有条件的。看来今后的出路在于走国际合作的道路。对这两个前沿而言,目前是机遇和挑战并存。

除了这两个很明显的前沿外,应该还存在一个前沿问题,即存在于结构层次之间,总的说来,就是朝复杂物质展开:固体物理早期所研究的多半是简单的物质。在进一步研究中,方始接触到比较复杂的物质,当中蕴含有许多尚待发

展、挖掘的物性。下面以半导体为例作些说明。最简单的硅,研究得最清楚,应用得最广泛;然后是复杂一点的砷化镓这类化合物半导体(-族与-族);更进一步就涉及结构更加复杂的聚合物半导体。近年来,聚合物半导体研究十分引人注目,已能做出聚合物晶体管来。当然,聚合物的集成电路在当前还不能与硅片竞争,但它有廉价、容易制备的优点,因而可以在其他方面发展。由聚合物,我们想到人的大脑问题,大脑里头并没有硅片,但大脑思维复杂程度远远超过现代大型计算机。故从简单物质的研究到复杂物质的研究的发展过程中,物理学应该是大有用武之地的。所以我们可以认定,除了前面两个(实际上已经合二而一的)前沿外,应该还存在另一个物理学前沿,即探讨复杂物质的结构与物性。

3.2 复杂与简单的辩证关系

下面讨论一下复杂与简单的辩证关系问题,这里牵涉一点哲学观点的问题。因为物理学所研究的是一些最基本的问题,所以在探索和深入到一定程度后,某些哲学观点就会呈现出来了。

物理学家惯用的一个观点往往是还原论。所谓还原论,就是将世界分成许多小的部分,每一部分研究清楚了,最后拼起来问题就解决了。这个观点是很自然的,物理学家过去受到的是这个训练,基本上就接受这一观点。有很多著名的科学家支持这个观点,鼎鼎大名的爱因斯坦就讲过:“物理学家的无上考验在于达到那些普适性的基本规律,再从它演绎出宇宙”。这可以说是爱因斯坦的雄心壮志,也是几代物理学家抱有的看法,就是说,如果我们把世界基本规律搞清楚了,那么就一切事情都解决了。下面是著名理论物理学家狄拉克讲的话,他讲这一段话的时候正好是在量子力学初步建立之后,他说:“现在量子力学的普遍理论业已完成,作为大部分物理学与全部化学的物理定律业已完全知晓,而困难仅在于把这些定律确切应用将导致方程式太繁杂而难以求解”。他的意思是基本的物理规律已经知道了,下面似乎就是一个求解

的问题,至于求解,由于方程过于复杂,似乎有些问题还解不出来。

尽管有许多物理学家是抱有这类观点,但现在来看问题似乎不这么简单,基本规律知道了,具体规律是不是就一定能够推出来,这个问题一直是有争议的。19世纪有一种极端的意见,就是所谓实证论的观点,以奥地利科学家马赫为代表,马赫也是个哲学家。他认为物理学家只要追求宏观物体之间的规律,去搞清微观的东西似乎没有用处,且微观是否存在,分子、原子是否存在,他一概采取否定的态度。显然这类观点过于极端。实际上应该看到,物质结构存在不同的层次,层次与层次之间是有关联的,有耦合的,因此,我们需要理解更深层次的一些规律。譬如遗传问题(这当然不是纯粹物理学问题),可以从生物现象上求规律。早在19世纪,门德尔就总结了豌豆的遗传规律,这是个非常重要的基本规律,但为什么造成这个规律呢?显然跟遗传物质的结构有关。最关键的一步在于,1952年左右,生物学家华森(J. Watson)和晶体学家克里克(F. Crick)在英国卡文迪什实验室把DNA分子结构辨认了出来(在某种意义上是猜出来的)。这使我们晓得,遗传规律与DNA分子结构中某些单元的排列顺序有关,也就是说,在分子结构中有个密码存在,这密码规定了遗传情况,如果密码改变,遗传情况也就改变了。由此可以看到,分子结构与遗传物质这两个不同层次之间存在耦合的问题,理解了分子层次的结构,就把遗传规律基本上搞清楚了。再如,固体的导电问题,牵涉到电子在固体中的行为问题,如果我们把电子在固体中的行为搞清楚了,那么对固体为什么导电,为什么有的是半导体,有的是超导体这一类问题就都可以给出一个解释来。这就有利于推动我们去研究导电现象,以及利用这些现象做出晶体管来,做出集成电路来,做出超导体来,做出超导的约瑟夫森结,来为人类服务。这就说明层次与层次之间存在耦合现象。另一方面,层次与层次之间也存在脱耦现象。所谓脱耦现象,就是下一个层次的现象对上个层次未必有重要关系。例如,近年来粒子物理有一个

重要的发现,就是 1995 年发现了顶夸克,这在粒子物理是件大事,因为设想的几种夸克,包括最后一种顶夸克也都发现了。但是顶夸克的发现对固体物理或凝聚态物理有没有可以观察到的影响呢?没有,到现在为止,似乎一点影响也没有。这表明,层次跟层次之间,在某些情况下,存在脱耦。我们说粒子物理的进一步发展,对本身,对理解粒子的性质和宇宙早期的问题,具有极大的重要性,但是,它的发展,对理解相隔了好几个层次的物质,就丧失了重要性。再如,原子核的壳结构对遗传有没有影响呢?一般说来看不出太大的影响。这就是层次之间既存在耦合,又存在脱耦,而且大量粒子构成的体系往往有新的规律。

我们来看看另外一个观点,所谓层创论的观点。这里是著名凝聚态理论学家安德森(P. W. Anderson)讲的一段话:“将一切事物还原成简单的基本规律的能力,并不意味着我们有能力从这些规律来重建宇宙,当面对尺度与复杂性的双重困难时,构筑论的假设就被破坏了。大量的复杂的基本粒子的集体,并不等于几个粒子性质的简单外推^[31]。也就是说我们知道两三个或四五个粒子的规律,并不能说明 10^{20} 或 10^{24} 个粒子的集体的规律,在每一种复杂的层次上,会有完全新的性质出现,而且对这些新的性质的研究,其基本性并不亚于其他研究。也就是说物质结构存在不同的层次,而层次跟层次之间,往往到上一个层次就有新的规律出现,对这些新的规律的研究,本身也具有基本性。

另外,要引一段卡达诺夫(L. P. Kadanoff)的讲话。他说:“我在这里要反对还原论的偏见,我认为已经有相当的经验表明物质结构有不同的层次,而这些不同层次构成不同群落的科学家研究的领域,有一些人研究夸克,另外一些人研究原子核,还有的研究原子、分子生物学、遗传学,在这个清单中,后面的部分是由前面部分构成的,每一个层次可以看成比它前面的好像低一些,但每一个层次都有新的、激动人心的、有效的、普遍的规律,这些规律往往不能从所谓更基本的规律推导出来。从最不基本的问题向

后倒推,我们可以看到一些重要的科学成果。像门德尔的遗传律与 DNA 的双螺旋结构,量子力学与核裂变,谁是最基本的?谁推导谁?要将科学上的层次分高低的话,往往是愚蠢的,在每一层次上都有的普遍原则中,都会出现宏伟的概念^[41]。重要的是要认识到各个层次之间既有耦合,也存在脱耦。并非是探究清楚最微观层次的规律,就可以把世界上的问题全部解决。近年来有一种提法,说粒子物理面临新的挑战,要建立一种所谓“万事万物的理论”。有些科学家说粒子理论现在已经建立了标准模型,然后下一步就希望建立万事万物的理论。进行这类尝试是完全应该的,要向未知领域再推进!但一定要采取辩证的观点来对待这一问题。即使这个理论取得进展,也并不意味着万事万物的问题就可以迎刃而解了。应该说物理学现在还是很有生命力的科学,但并不意味着要把它的全部命运都跟万事万物理论联系在一起,而是有很多新的发展余地。

3.3 物理学的开放性

物理学一直是一门生气勃勃的学科,这和它具有高度的开放性是密切相关的。它和技术并没有截然的分界线,它和其他的自然科学也没有截然的分界线。它的门户总是开放的,鼓励跨学科的交流与沟通。

物理学和技术关系密切。当今的许多工程学科都是植根于经典物理学的某一支,而 20 世纪的物理学进而诱发许多新兴的技术科学,如原子能技术、微电子技术、光电子技术等。即使像高能物理学那样的以基础研究为主的学科,由于它采用了大量和高技术有关的研究手段,因而并不出人意料之外,它会对当代信息、网络技术作出重要的贡献。

另外,在促进交叉学科方面,物理学也大有可为。物理学是严格的定量科学。卢瑟福有句戏言,“一切科学,要么是物理学,要么就是集邮术”,显然已经不适合当代的情况。其他的自然科学早已摆脱了类似于集邮术的情况,在量化方面,向物理学靠拢。20 世纪的化学是巩固地建立在量子力学基础上的,和物理学已密不

可分,有许多共同的研究对象.当然在观点上的差别还是有的,正如著名化学家赫许巴赫(D. Herschbach)所指出的,“典型化学家高于一切的愿望是理解为什么一种物质和其他物质行为不同;而物理学家则通常期望寻找出超出特定物质的规律”,正好使双方的研究互相补充.现代生物学早已面目一新,将它的基础建立在分子生物学上.而分子生物学本身就是诞生在卢瑟福的后继者主持的剑桥大学卡文迪什实验室.生物学的面貌显然已大为改观.正如著名生物学家吉尔勃特(S. W. Gilbert)所说的,“传统生物学解决问题的方式是完全实验的.而正在建立的新模式是基于全部基因都将知晓,并以

电子技术可操作的方式驻留在数据库中,生物学研究模式的出发点应是理论的.一个科学家将从理论推测出假定,然后回到实验中去,追踪或验证这些假定”^[5].看来物理学家在交叉科学方面尚大有可为.

参 考 文 献

- [1] 美国物理学评述委员会著,伍长征等译. 90 年代物理学(共 9 册,原文于 1986 年出版,中译本). 北京:科学出版社,1992—1994
- [2] Bardeen J. Ann. Rev. Mat. Sci.,1980,10:1
- [3] Anderson P W. Science,1972,177:393
- [4] Kadanoff L P. From Order to Chaos. World Scientific, Singapore,1993. 399
- [5] Gilbert S W. Nature,1991,347:99

我国半导体物理研究进展 *

夏建白 黄 昆

(中国科学院半导体研究所 超晶格国家重点实验室 北京 100083)

摘 要 简单地回顾了近年来我国半导体物理研究的进展.它包括三个方面:半导体超晶格、微结构;半导体表面、界面和杂质、缺陷;以及半导体新材料、新结构.这些进展说明,半导体物理研究在当代物理学和高技术的发展中都占有突出的地位,它仍是一门年轻的、富有生命力的学科,预期在将来有更大的发展.

关键词 半导体,超晶格,微结构

RECENT DEVELOPMENTS OF SEMICONDUCTOR PHYSICS

Xia Jianbai Huang Kun

(National Laboratory for Superlattices and Microstructures, Institute of Semiconductors,
The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083)

Abstract Recent developments of semiconductor physics in China are briefly reviewed, mainly with in the following three areas: 1. Semiconductor superlattices and microstructure; 2. Surfaces and interfaces, impurities and defects; 3. New materials and structures. We show that semiconductor research plays an outstanding role in the development of physics and advanced technology. It is still a vigorously growing subject, with even more important future advances to be expected.

Key words semiconductor, superlattice, microstructure

半个世纪以来,半导体的研究在当代物理学和高技术的发展中都占有突出的地位.这是因为半导体不仅具有极其丰富的物理内涵,而且其性能可以置于不断发展的精密工艺控制之

下.传统的晶体管、集成电路以及很多其他半导

* 国家攀登计划资助项目

1999 - 04 - 09 收到初稿,1999 - 05 - 14 修回