

面向 21 世纪的物质科学

Matter Science Toward the 21st Century

冯 端
(南京大学物理系, 固体微结构物理国家重点实验室, 中国科学院院士 南京 210008)

物质世界, 从最微小的基本粒子一直延伸到囊括一切的宇宙, 构成了物质科学的研究对象。物质科学是以物理学与化学为主的学科群并向地球物理与化学、空间科学和天文学延拓。

一、物质世界的层次化

在本世纪初出现了两大理论的突破, 即相对论与量子论。相对论可视为经典物理学的登峰造极之作, 因为狭义相对论无非是经典电动力学的延伸, 但同时带来了高速运动物体的力学和普遍的质能关系, 并且改变了人们对于时—空的概念; 而广义相对论实质上是引力的几何理论, 对于现代天文学, 特别是宇宙论, 产生了深远的影响。量子论则开启了微观世界科学的序幕, 终于在 1925 ~ 1927 年间完成了量子力学表述。量子力学问世之后, 遂一举而澄清了原子系统的疑谜, 为基于经验规律上的化学周期表奠定了坚实的理论基础。

随后科学家就分道扬镳。一条道路向更加微观的层次进军, 逐步深入探测原子核粒子的新世界。为了追索难于捉摸的“基本粒子”, 科学家建造了一代代能量越来越高的加速器, 发现或推证了一系列的轻子、夸克及胶子, 构成了微观世界的前沿。另一条道路在于将量子力学应用于物质结构的更高层次: 用之于分子, 建立了量子化学; 用之于固体, 建立了固体物理。化学家特别关注分子这一层次, 虽则不同的物态, 固体、液体、气体、等离子体以及固体与液体之间的若干中介相, 如液晶、胶体等, 均有其物理与化学上的问题, 但正如著名化学家赫许巴赫所指出: “典型的化学家高于一切的愿望是想理解为什么一种物质和其它物质的行为不同; 而物理学家则通常期望寻找出超出特定物质的规律”。这样对于物质世界的研究, 物理学与化学的研究正好是互补的, 特别是研究领域开拓到愈来愈错综复杂的物质(诸如氧化物、复杂流体、聚合物等)时, 两者的相互配合就是不可缺少的。

从宏观的物体继续上升, 就进入地球物理与化

学的范围。大气、海洋和地壳、地幔的动力学规律的揭示掀开了物质科学的新篇章。航天技术又开拓了空间科学与行星科学的新领域, 而现代天文学使人类更加深入地了了解广漠的宇宙、观测到宇宙的膨胀、3K 的微波背景 and 不同元素的丰度数据, 建立了大爆炸宇宙论。星体和宇宙无疑是一个无比庞大的实验室, 为人类提供了地球上无从实现的实验条件来检验各种理论。值得注意的是, 早期的宇宙是高能的世界, 正好和粒子物理的研究衔接起来, 辩证地体现了微观与宏观的合一。

物理学在发展过程中, 逐步加深了对相互作用的认识, 现归结为 4 种基本的相互作用, 即引力相互作用、电磁相互作用、弱相互作用、强相互作用。引力与电磁相互作用是大家都熟知的; 而弱相互作用和强相互作用是短程的, 基本上就是在原子核的尺度内表现出来。在大块物质里, 一般来说, 看不到弱相互作用与强相互作用的痕迹。相互作用有强度上的差异, 如果以强相互作用为 1, 那么比强相互作用稍弱一点的电磁相互作用是 10^{-2} , 弱相互作用是 10^{-3} , 超弱是 10^{-10} , 引力相互作用是非常弱的, 仅为 10^{-39} 。物理学家一直试图将电磁相互作用与引力相互作用进行统一, 例如爱因斯坦晚年一直致力于这方面的工作, 但没有取得实质性的成果。真正取得进展的是 70 年代所谓弱相互作用与电磁相互作用的统一, 就是温伯格·萨拉姆的弱电统一理论, 这是相互作用统一理论成功的第一步。也有人希望把强相互作用统一起来, 现在叫大统一理论, 但到现在为止还缺乏实验证据。物理学家最终的愿望是企图将 4 种相互作用都统一起来。

图 1 表示物质结构的不同层次, 图的左边是长度标尺, 右边是能量标尺(GeV, 10^9ev)。从图 1 可见, 随着长度尺度的减小, 能量越来越高。这里长度尺度从 10^{-8}cm 开始, 而 10^{-8}cm 正好是原子的大小。有一个弱电统一, 对应这个尺度的能量是 10^2Gev 左右, 还是在现有加速器力所能及的范围, 因此这个理论得到了证实。大统一所需要的能量几乎是不可企及的, 再大的加速器似乎也达不到那么

大的能量。将4种相互作用都统一起来的标准是达到普朗克尺度,用人工方法是无法实现的。但是现在已从现代宇宙学的发展提出一个理论,即认为宇宙最初是处在一个高能的状态,所有能量集中在一点上,然后产生大爆炸,大爆炸的瞬间,应该是能量最高的瞬间。从理论上估计,大约在大爆炸后 10^{-43} 秒时出现普朗克尺度,即超大统一的情况,四种相互作用都统一;大约在大爆炸后 10^{-35} 秒,就变成大统一;然后大统一解体,到弱电统一;最终,大约在大爆炸以后3分钟开始形成原子核。对于大爆炸理论,应该说有它的实验依据,当然也还存在不少问题。它的依据有几方面:一是,现在看到的宇宙是在扩张的,测量表明,距我们越远的天体向外跑得愈快,整个宇宙是膨胀的;二是,根据大爆炸理论

预测,存在一个所谓3K的微波宇宙背景,这已被实验观察所证实;三是,由大爆炸理论计算出的各种化学元素的丰度分布,部分已得到实验证实。因此,这个理论基本上是一个物理学理论,认为最初是一个高能量世界,逐步变成原子核存在的世界,直到最后,就形成我们现在的常温世界。这个理论叫宇宙的标准模型。在粒子物理领域,也有一个标准模型。从70年代以后,就是弱电统一成立以后,和现在的所谓色动力学理论结合起来,也有一个粒子的标准模型,这个标准模型到现在为止,与所有的实验事实都相吻合。但是如果能量再提高,也许就会开始出现偏差。这就是粒子加速器为什么越造超大的背景,即希望在更高的能量状态下对标准模型进行检验。

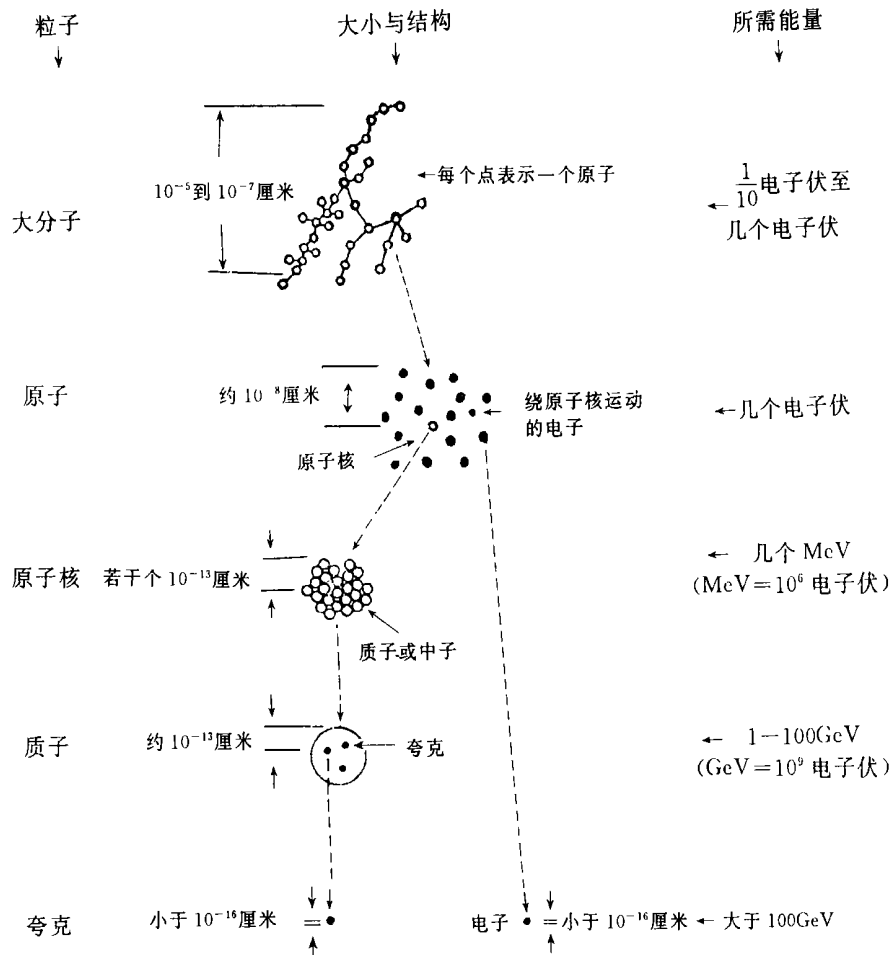


图1 物质结构的层次

二、学科的前沿

物质结构有不同的层次,从宏观的物体到大分子、分子、原子、原子核,一直到夸克等基本粒子。根据物质结构层次,相应的物质科学也可以分成许多学科:粒子物理学,原子核物理学与化学,原子与分

子的物理学与化学,凝聚态物质的物理学与化学,固体力学,流体力学,地球科学,空间科学,天体学;凝聚态物理旁边还有等离子体物理。经典物理学遗留下来的是光学、声学等,这些学科除了和应用科学结合外,也成为研究物质结构的有力方法。目前,似乎更重要的是依照物质结构层次来分类;研究对象应从最小的基本粒子——夸克,一直到最大的整

个宇宙。

有两个发展前沿是很明显的,即最微小的粒子和最大的宇宙。这两个前沿现在逐步结合在一起。研究愈小的粒子,就愈要提高它的能量。非常高的能量状态存在于宇宙的早期,因此,目前以及将来对基本粒子的研究,在某种意义上涉及到宇宙考古学的问题。通过更高能量粒子的研究,也许可以澄清有关宇宙早期状况的一部分问题。这两个前沿的发展,可说机遇与困扰并存。譬如粒子物理的研究,受到加速器的限制,加速器越造越大,大到社会经济负担不起。最明显的例子就是美国的超级超导对撞机最后不得不下马。经济最发达的美国况且如此,更何况其他国家,看来这一类研究将来唯一的出路是国际合作。粒子研究是要花大钱的,天文研究同样也是要花大钱的,如愈造愈大的光学望远镜和射电望远镜。为了把地球上的一些干扰去掉,就必须把哈勃望远镜放置到空间去观察。这些领域是大科学的领域,只有走国际合作的道路。

除了这两个很明显的前沿外,还存在一个前沿,就是朝复杂物质发展。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凝聚态物质,当中蕴含有许多尚待发展、挖掘的物性。复杂氧化物高温超导体发展就需要物理学家与化学家的相互合作。以半导体为例,最简单的硅研究得最清楚,应用得最广泛;其次是复杂一点的砷化镓这类化合物半导体(Ⅲ-Ⅴ族与Ⅱ-Ⅵ族);更进一步的是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,聚合物晶体管与发光管已经研制出来。当然,聚合物的集成电路在当前还不能与硅片竞争,但它具有廉价、容易制备的优点,因而可以在其他方面发展。由聚合物联想到人的大脑,在大脑里并没有硅片,但大脑思维的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,物理学与化学应该是大有用武之地的。

应该说物理学与化学这两个学科,本来就有千丝万缕的联系。19世纪的吉卜斯就是跨这两个学科的大师,20世纪的德拜与昂萨加亦是如此。原子核裂变的发现,也是化学家哈恩与斯特拉斯曼和物理学家梅特纳和弗理希的通力合作的结果。近来轰动一时的C60的发现,课题的来源在于企图鉴定星际空间的一些含碳的微波谱线,采用的是激光蒸发加上质谱测量的物理方法,而主持该课题研究的科学家如斯摩莱与克洛多则是物理化学家或化学物理学家。著名的物理学家德冉纳及爱德华兹等在液晶和高分子等化学家世袭领域中取得了优异成果,开辟了软凝聚态物质研究的新道路,可以预期他们将在物质科学与生命科学的交叉领域中取得进一步的突破。而近年来以量子点为基础的人工原子、人工

分子及人工固体已经得到了实验的演示,它将为下一世纪物理学与化学进一步融合提供契机。

这一前沿的重要性还体现在它的基础性研究对于当代高新技术发展具有很大的推动力。正如美国科学家布什强调的那样:“我们需要许多有活力的新企业。然而,新产品和新工艺过程并不是生来就完善的。它们依赖于新的原理与新的观念,而这些新原理与新观念本身又是来自基础研究的,基础科学研究是科学的资本”。

材料技术无非是凝聚态物质科学的具体应用,下面以信息技术为例作少许阐述。

信息技术在现代工业中的地位日趋重要。计算机技术、通信技术和控制技术已经从根本上改变了当代社会的面貌。如果说第一次工业革命是动力或能量的革命,那么第二次工业革命就是信息或负熵的革命。物质科学的研究提供给信息技术以必不可少的硬件。1947年贝尔实验室的巴丁、布拉顿和肖克莱发明了晶体管,标志着信息时代的开始。实际上,晶体二极管早就被应用了,如早期收音机中的矿石检波器、氧化亚铜硒整流器,乃至第二次世界大战中雷达用的锗、硅检波器。但是,这些是单凭经验凑合起来的器件,原理不明,也缺乏可靠性。而贝尔实验室的发现则是在固体物理学理论指导下进行的,又有冶金学家与化学家参与的材料研究作为基础,所以一问世,就不同凡响,随即开发了一系列半导体器件,建立了半导体工业。对于基础研究投资的效益,安德森有“无限磊乘零”的说法,即每一项基础研究取得实际效益的几率几乎为零,但它一旦有所突破,就可能取得“无限大”的效益。显然,贝尔实验室对于晶体管的研究,就是取得“无限大”效益的实例,目前它的半导体工业的年产值已经达到上千亿美元。从离散的半导体器件到将有源器件和无源元件合为一体,即集成电路,又是一个飞跃,这是50年代末实现的。而后集成电路向微型化方向发展,集成度约以每18个月扩大1倍的速度(近年来略有降低)增长。在40年代中建成的第一台大型电子计算机ENIAC,使用了18000个真空管、1500个继电器、几十万枚电阻与电容,重达30吨,耗电200千瓦。而在今天,一台笔记本个人计算机的性能完全可以超过它,这显示了半导体技术对电子计算机发展的决定性的影响。

目前商用的芯片的刻线宽度已达到0.25微米,估计到2015年左右,器件的尺寸将小到纳米尺度,达到传统晶体管工作原理所容许的物理极限。用何种技术来取代之有效的传统工艺,这对于物质科学家的聪明才智和创新能力,将提出强有力的挑战。目前,基于细微尺度的纳米科技受到世界的普遍重视,新型纳米材料与器件原型的试制已成为当今物质科学的热点,对其理论规律的探索一旦有

所突破,其经济和社会效益将难于估量。

三、多样性与统一性

复杂的多样性与简单的统一性问题,牵涉一些哲学的观点。因为物质科学所研究的是一些最基本的问题,所以探索和深入到一定程度后,某些哲学观点就会呈现出来。

物理学家惯用还原论的观点。所谓还原论,就是将世界分成许多小的部分,如果每一部分研究清楚了,最后拼起来问题就解决了。物理学家过去基本上都接受这一观点。支持这个观点的有很多著名的科学家,如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”。就是说,如果我们把世界基本规律搞清楚了,那么就一切问题都解决了。在量子力学初步建立之后,著名的理论物理学家狄拉克说:“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抱有这类观点,但现在来看问题不这么简单。基本规律知道了,具体规律是不是就一定能够推导出来?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,他也是个哲学家。他认为物理学家只需要用感官去直接察觉和寻求宏观物体之间的规律,无必要搞清微观的东西,而且他一概否定微观的分子、原子的存在。显然这种观点是错误的。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,这是生命现象的一个基本问题,可以从生物现象上寻求规律。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。这个规律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和晶体学家克里克在英国卡文迪许实验室辨认出DNA分子结构(在某种意义上是猜出来的)。这使我们明白了遗传规律与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密码存在,是密码规定了遗传情况,如果密码改变,遗传情况也就改变了。由此可看到,分子结构层次与遗传物质,这两个不同层次之间存在耦合现象,理解了分子层次的结构,就有助于把遗传规律基本上搞清楚。再如,固体的导电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,那么就可以解释固

体为什么会导电,为什么有的是半导体,有的是超导体等一类的问题。这有利于推动我们去研究导电现象,以及利用这些现象研制出晶体管、集成电路、超导的约瑟夫逊结。另一方面,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,三四年之前发现了顶夸克,这对于粒子物理学是件大事,因为设想的6种夸克,最后一种顶夸克也发现了,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?到现在为止,似乎一点影响也没有。这表明,层次之间,在某些情况下存在脱耦现象。粒子物理的进一步发展,对理解粒子的性质乃至宇宙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却丧失了重要性。再如,原子核的结构对遗传一般说来也看不出太大的影响。这说明层次之间既存在耦合现象,又存在脱耦现象,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。著名的凝聚态理论物理学家安德森说:“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,当面对尺度不等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”。也就是说,知道两三个或四五个粒子的规律,并不能说明 10^{30} 或 10^{24} 个粒子的集体的规律,每一种复杂的层次上,会有完全新的性质出现。

著名的科学家卡达诺夫指出:“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,但每一层都有新的、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,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”。重要的是要认识到各个层次之间既有耦合现象,也存在脱耦现象。并非是弄清最微观层次的规律,就可以将世界上的问题全部解决。近年来有一种观点,认为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,下一步就希望建立万事万物的理论。要进行这类尝试是完全应该的,但一定要采取辩证的观点来对待这一问题。即使这个

数学的趋势——选择我们各自的方向

Trends in the Profession of Mathematics, Choosing Our Own Direction

David Mumford
(美国 Brown 大学, 教授、1994 ~1998 年度 IMU 主席)

在 4 年的任期中, 身为国际数学联盟(IMU)的主席却没有一个发表“主席演讲”的机会。这实在不是个特殊显要的或具有影响力的职位。我们的主要职能只不过是组织下一届国际大会。因此我很高兴有机会在这里来表达对于当前数学趋向中我强烈感受到的一些信念。在刚刚欢享了我的 60 岁生日之际, 我也抗拒不了普遍的生物学上的冲动, 不禁要对与数学缠绕的一生进行反思, 作出范围广泛的概括, 对于较为年轻的一代, 这是他们乐于搁置一旁的话题。

数学是单一的领域?

在全世界的数学界中, 国际数学家大会(ICM)有什么作用呢? 乘飞机旅行的花费相对于我们的工资变得愈加便宜, 因而可以邀请其他国家的数学家们去参加在世界上任何一个国家召开的专业会议。我甚至于知道一对“特月票”夫妇, 一方住在以色列而另一方则住在纽约附近。在数学的每个领域都有常规性的会议, 对每个热门的新问题也有国际性的研讨会。当你可能会从这类会议上得到更多更直接的讯息时, 为什么还要去参加 ICM 呢? 我相信, 答案就是: 在具有共同的工具和洞察力这个意义上说, 数学仍然是一个单一的学科。如果我们丧失掉这个深刻洞察和理解数学的思想交流机会和能力, 我们的领域远不会取得如此实质性的进步。对数学家们来说, ICM 是少数几个机会之一, 得以对包括所有数学领域的广大听众提出他们专业的发展远景。另外, ICM 的会议记录“Proceedings”一直总是界定我

们领域状态的主要来源, 从中也可选取最好、最深刻的思想使数学界的其他同仁能在自身努力下与其他领域中进行的研究并驾齐驱。

现在的问题在于: 我们能否在数学的所有不同领域间保持我们的交流传统, 并能否抵御住愈变愈烈的专门化趋势?

由于数学的成长壮大, 我们中的任何一个人必定越来越难于处在一个以上领域的最新思想顶峰, 更不用说囊括全部数学了。然而这并不意味着我们不能对此有所作为或者不能使其变得更容易一些。最近当了解到大学一年级的化学课中从一开始就引进了量子力学的思想时, 实在使我为之一振: 化学家们正在重建其教程以使其内容能被接受。

数学 ≠ 物理学或者计算机科学

认识到国际数学家大会是个非常珍贵的传统, 对数学家来说是重要的。譬如在我们的近邻物理学和计算机科学那里就没有这个传统。物理界确有一个国际联盟(IUPAP), 但它并不负责组织一个国际大会。实则, 物理界长期以来已经分裂: 实验家与理论家之间, 基本粒子与凝聚态、统计力学的研究者之间, “数学的”物理学家与那些以“真正”的物理学家(不管其含意如何)自居的人们之间, 他们没有一个明确规定的重要事件用来汇集各个领域的报告, 并说一说他们认为的当今关键的新思想。同时, 正在从事工作的物理学家们很少阅读 10 年以前的文章。在我的印象中这是因为他们觉得他们正在驯服西部蛮荒而没有时间顾及这些繁琐小事。

理论取得进展, 也不意味着万事万物的问题就可以迎刃而解了。物质科学现在还是很有生命力的, 它有很多新的发展余地。切不可把它的命运都跟囊括

万事万物的“理论”联系在一起。我们应该强调的是, 物质科学跟技术以及跟生命科学等其他学科的联系, 是极端重要的。
(责任编辑 肖庆山)

重要更正: 本刊今年第 2 期第 3 页第 6 行注明作者单位中的“.....重点实验室”, 应改为“.....试点实验室”——编者