

学校的理想装备

电子图书·学校专集

校园网上的最佳资源

中国科学院院士谈21世纪科学技术



## 序

当今世界正兴起一场广泛而深刻的新科技革命的浪潮。国际间的竞争，说到底还是综合国力的竞争，关键是科学技术的竞争。人类正迈向 21 世纪，不难预料，未来的世纪将是科学技术日新月异的时代，是人类学会和自然和谐相处的时代，是经济和文明继续高速发展的时代。中国既面临着新技术革命的挑战，也存在着迎头赶上的机遇。

目前，世界各国为了争夺 21 世纪世界上的有利地位，无不把发展现代科学技术作为战略重点，而且充分认识到，科学技术的领先往往意味着经济发展的优势。任何国家都难以保持在所有科学领域上的全面优势，必须根据学科发展的国际态势并结合自己的国情，选择那些意义重大，又能开拓前沿领域有应用前景的课题，作为本国科学技术发展的优先领域和重点。

江泽民总书记最近强调指出：“我们对于前沿的科技项目要有所赶，有所不赶。对于可以充分利用我们长处或我们在这一领域已有相当积累，相对来说不需要巨大投资，而一旦突破可以带动新产业革命的项目就应该赶。”就我国国情来说，哪些科学领域有所赶，哪些领域有所不赶，光凭经验和热情是不够的，必须科学决策，优中选优，才能将有限的财力投入到那些最有前途和有可能突破的领域或项目。

为了配合国家有关部门制定“九五”及“跨世纪”科技发展规划，《中国科学报》邀请部分中国科学院院士撰写有关 21 世纪科学技术发展等方面的文章，并在报纸上开设了“院士谈 21 世纪”专栏，许多高校、研究所、科研管理部门对此专栏产生了浓厚的兴趣，反应十分热烈，并希望增加学科领域后正式出版。为了弥补报纸篇幅的限制，应读者的要求，《中国科学报》的同志们又请作者修改、补充已发表的文章，并有针对性地又邀请了部分学科领域的院士撰写文章，以保持学科间的平衡，在此基础上编写成《院士谈 21 世纪科学技术》一书，此书共包括物理学、化学、天文学、力学、地球科学、生物学、农学、医学、信息科学、材料科学、能源科学、空间科学、光电科学、工程科学和人类学等领域。可以预计，此书的出版对我国制定“九五”及“跨世纪”基础和 응용科学规则，一定会有所帮助。

编写出版“跨世纪”科学技术发展的著作，在我国尚不多见。在短短几个月的时间里编辑出版这样一本书，最终完成取决于各方面的共同努力。特别是撰写文章的各位院士们，是他们在繁忙的科研、教学和社会工作中挤出时间，花费大量的精力，满腔热情地来撰写专文，向广大读者介绍本世纪末到下世纪初科学技术的发展，让大家获得新知识、开阔新思路、增加对各学科及各学科之间的交叉的认识和理解，激励全国人民为追求美好的未来而努力奋斗。同时，对科研单位和高等院校制定科研规划、选择研究方向也十分有益。

我希望《中国科学院院士谈 21 世纪科学技术》一书的出版，能引起各方面读者的兴趣，并将为繁荣我国的科学事业作出贡献！

周光召  
九五年一月十日  
1994 年 10 月

## 内容提要

21 世纪正向人类飞步而来，给人类社会带来根本变革的科学技术，在新世纪里将以怎样的面貌展现在我们面前，将给我们创造出怎样的新生活？36 位我国最高水平的科学家——中国科学院院士，向读者瞻望了科学技术主要学科的发展前景。本书内容涉及物理学、化学、天文学、力学、地球科学、生物学、农学、医学、信息科学、材料科学、能源科学、光电科学、工程科学和人类学等学科和领域。由于这是一册科普读物，因此院士们尽量用通俗易懂的笔法写来，从而把人们面对的 21 世纪的科学技术，活生生地展示给广大干部和读者。

## 中国科学院院士 谈 21 世纪科学技术

## 丁大钊



1935年生，江苏省苏州市人。中国原子能科学研究所、中国科学院高能物理所研究员。1952年毕业于上海同济大学物理系，1955年毕业于上海复旦大学物理系。

曾任中国科学院原子能科学研究所七室副研究员、物理研究部副主任、原子能科学研究所研究员、博士生导师、院科技委副主任、中科院高能所北京正负电子对撞机国家实验室（筹备）副主任等职。

丁大钊在高能物理和核物理领域从事过若干开创性的研究工作。50年代后期在基本粒子研究中曾参加发现反西格马负超 $\bar{\Sigma}^-$ 的工作，他发展了气泡室中分辨粒子的方法，为鉴别和确证 $\bar{\Sigma}^-$ 事例作出了关键性的贡献，该发现于1982年获国家自然科学一等奖；在研究高能核作用下中性奇异粒子产生规律中发现了表明基本粒子内部有结构的实验迹象。60年代从事轻核反应研究，负责截面测量小组，为我国氢弹研制所需的基础核数据测量做出了贡献。70年代负责开辟快中子核反应谱学分支学科，取得一批高质量的数据并为国内其他研究单位提供了经验。有关工作分别于1980年、1983年获国防科工委重大成果二等奖及四等奖。80年代负责串列加速器核物理实验室实验区建设，建成一个适于进行精细核反应与核结构研究的国际水平的低能核物理实验室，于1988年获部级科技进步二等奖。80年代他还领导开展热中子在轻核上辐射俘获和原子核的巨共振研究，前一项已结束的研究工作中，做出了达到国际水平的成果，于1990年获得部级科技进步三等奖。

由于他在基本粒子、轻核反应和促进核物理基础研究方面的贡献，1984年被推荐为国家级有突出贡献的中青年科学家。

他于80年代中期曾推动自由电子激光研究工作的开展，目前正负责北京正负电子对撞机同步辐射装置的应用与发展的工作，是一位具有开拓新学术领域研究工作的学术负责人。

## 同步辐射——跨世纪前沿学科 研究的强有力工具

丁大钊

科学界普遍认为，能源科学、材料科学、信息科学和生物科学将成为下世纪前期的科学前沿。

人们寄希望于实现可控的核聚变来解决人类对能源的需求。这方面的研究正沿着磁约束核聚变和惯性约束核聚变两条技术路线进行着。两者均在不同程度上取得了长足的进展。当然，从原理的论证到工程的论证，再进入运行示范、安全性、经济性的验证，科学技术界还要走很长的路。也许人类利用聚变能的理想要到下世纪中叶才会成为现实。

与能源科学发展的长周期相比较，材料科学、信息科学与生物科学的“单项”研究相对规模较小、周期短，并且一旦在某一方面有原理与技术的突破，其转化为生产力的周期也较短。现在材料科学对于功能材料、复合材料、纳米材料、团簇材料的研究；信息科学对超高密度集成、三维集成、光信息处理的研究；生物科学在基因工程、分子生物工程的研究等等领域内都以前所未有的广泛与深入程度吸引着科学技术界的注意力。

在现代科学技术的发展中，不同学科的交叉与融合往往是产生新兴学科领域的契机，而吸收其他学科的技术成果与手段作为本门学科研究的新工具与方法，则往往是深化对本门学科研究对象的了解从而推动本门学科发展的关键。

利用射线与物质相互作用，以测定研究对象在原子尺度上的结构、化学构成及内部运动状态（电子能带、原子与分子振动等等）的信息，从本世纪50年代以来已成为材料科学、生物科学以及其他一些学科的强有力的手段，并显示出有极大的应用价值。随着核科学的发展，能利用的射线的种类、强度及能谱范围不断增加与扩展，以及由于实验技术的提高，射线应用的重要性更广泛地被其他学科的研究工作者所认同。

在诸多的射线应用中，同步辐射是应用最广泛者之一。

同步辐射是高能电子做曲线运动时沿切线方向发出的辐射，它于1947年在同步加速器上首先被观察到，所以称同步辐射。它曾被作为限制高能电子加速器能量提高的一种效应进行研究。随着对其特性的深入了解，人们认识到这是一种非常优越的光源，它与X光、激光的发现和应称为人造光源的三次革命。同步辐射的基本特点是高光强，其耀度比转靶X光机强 $10^4$ 以上（耀度的定义为：单位光源面积在每秒内向单位立体弧度内在千分之一带宽内发射的光子数。）准直性好，波段广，线偏振，亚纳秒量级的脉冲结构，高稳定。波段覆盖可见光到硬X射线（光子能量从1~100千电子伏）。其波长和能量与材料内部由化学键决定的结构和电子运动能量相当。因此它为物理、化学、生物、医学及其他技术学科提供了前所未有的手段，深化了人们对研究对象的认识。

自60年代在同步加速器上开始进行同步辐射性能的研究和应用研究，70年代正式投入应用，应用范围迅速扩大。到80年代，在光源和应用两方面都得到了进一步的发展。通常，把同步辐射光源的发展历史分成三个阶段：

第一阶段是在同步加速器上对同步辐射的特性进行研究和开始应用研究。由于同步辐射应用寄生于粒子物理研究的高能加速器，称做第一代光源，

电子束流发射度为几百纳米弧度，电子能量 2 吉电子伏以上。同步辐射主要从弯转磁铁引出，其性能受到高能物理应用方面的制约，相应的光谱耀度在  $10^{13} \sim 10^{14}$  左右。如美国斯坦福直线加速器实验室的 SPEAR 正负电子对撞机，在 1974 年发现了 J/ψ 粒子以后，就开始同步辐射的应用，于 1975 年建成了一条由弯转磁铁引出的光束线。属于第一代光源的还有美国的 CESR、德国的 DORIS、法国的 DCI 及意大利的 ADONE 等。

由于兼用机在安装插入件和使用时间方面受到限制，因而在 70 年代中期建造了第二代同步辐射专用机。Chasman-Green 聚焦结构的出现，使束团的发射度降低到 40 ~ 150 纳米·拉德的水平，相应的光谱耀度增高了两个数量级，达到  $10^{15} \sim 10^{16}$ ，还可在直线节上加入插入件，进一步提高光耀度。第二代同步辐射装置的代表有英国的 SRS，美国的 Aladdin 及 NSLS，德国的 BESSY 及日本的 UVSOR 和 PF 等，电子能量为 0.8 ~ 1 吉电子伏和 2.5 吉电子伏两个能量段。对应于两档电子能量的光源从真空紫外到软 X 射线波段及从真空紫外到硬 X 射线波段。这些装置能力很大，有时可同时安排 50 多个实验，容纳上千名科学家工作，是目前同步辐射应用的主力机型。迄今为止，世界上已经建成并投入运行的同步辐射装置有 30 多台，分布在 20 多个实验室中。尽管如此，这些装置还不能满足各学科急剧增长的需求。因此，自 80 年代以来世界有关实验室掀起了一股建造新一代性能更好、光耀度更高的所谓第三代同步辐射光源的高潮。

第三代同步辐射光源的电子束团的发射度压缩到 5 ~ 10 纳米·拉德，更重要的是在该类机器上可安装大量的插入件，即所谓的波荡器或扭摆器。这不但可以灵活地选择不同能量的光子，而且大大提高光谱的耀度，达到  $10^{17} \sim 10^{19}$ ，同时在储存环设计中，在考虑插入件的条件下具有较大的动力学孔径，以保证有较高的电子流强。

下个世纪初同步辐射应用的主力将是第三代光源，它有更高的强度和灵活可调变的偏振性。这一代同步辐射光源电子能量所覆盖的范围可分为两段，即 2 吉电子伏和 6 吉电子伏，由弯铁引出的同步辐射的光子特征能量分别为 2.5 千电子伏和 25 千电子伏。正在拟议建造、建设及调试中的共有 15 台，有三台的能量超过 6 吉电子伏，分别为法国的 ESRF（6 吉电子伏）、美国的 APS（7 吉电子伏）以及日本的 SPring-8（8 吉电子伏）。其余的均为 1 - 2 吉电子伏内，如意大利的 ELETTRA（2 吉电子伏），美国的 ALS（1.9 吉电子伏），还有不少是属于第三世界及新兴工业化国家与地区的，如韩国的 PLS（2 吉电子伏）、印度的 INDUS（2 吉电子伏）、中国台湾的 SRRC（1.3 吉电子伏）及巴西等等。其中法国的 ESRF 已于 1992 年调试成功，台湾的 SRRC 和美国的 ALS 也于 1993 年相继建成，意大利的 ELETTRA 亦已调试成功。

在上述基础上，近一二年在设计方面又出现了一些新思想。这里值得指出的是 1993 年 9 月瑞士 PSI（Paul Scherrer Institute）建议的一台 2.0 吉电子伏的同步辐射光源，通过在每一聚焦结构中各引入一块 0.3 米长 4.7T 的超导磁铁，使该光源的光谱扩展到 50 千电子伏的硬 X 射线区域。从而使得能量为 2.0 吉电子伏的中规模机器也能产生与 6 吉电子伏大机器相当的同步辐射光谱，这就大大扩充了该机器的用途，这可以说是对当前通常的第三代光源电子储存环的一个改进。当然它的结构比较复杂，技术难度相应也较高。

光谱耀度是同步辐射光源综合性的十分重要的参数。虽然第三代同步辐射光源将成为今后相当长一段时期内的主力机型，但人们还在追求进一步的

发展，即所谓的第四代光源。同步辐射学界的科学家都认为开发真空紫外到软 X 光波段的自由电子激光将是第四代同步辐射的光源。它对电子束的品质要求更高。现在国际上已建成几台运行在 10 微米波长范围的远红外自由电子激光器，其中少数几台已成为用于其他学科研究的“用户装置”。至于软 X 射线及真空紫外波段的自由电子激光器则正在进行物理及技术可行性的研究。用作驱动器的电子加速器分别有采用储存环及直线加速器两种不同方案，例如有人估计如把 SLAC 的电子直线对撞机运行在 7GeV，使低发射度的电子束通过一台长度为 50~60 米的波荡器，可能得到波长为 2~4 纳米，峰值耀度为  $10^{31}$ 、平均耀度为  $10^{21}$  的自由电子激光。与目前已运行的远红外波段自由电子激光器不同的是，在真空紫外及软 X 光波段不能采用光学谐振腔，而将采用“自发辐射自放大”原理运行。这样高的耀度的相干辐射将开辟全新的技术及应用的可能性。同步辐射光源技术发展的另一趋势是建设小型的工业专用机器，例如为超大规模集成电路加工用的光源。加速器能量一般为 600 兆电子伏，采用超导技术。目前在日、美、德、英已建成原型机，这些设备是由有关企业出资研究开发的。

同步辐射的应用除了电子加速器的建设外，还包括光源物理、光束线技术、探测技术和电子束与光束的监测与自动控制等方面，是一项大型的综合性高新技术的科研工程。

在第三代同步辐射光源中，它的发光源更多地采用扭摆器及波荡器等插入件，引出的光束束斑应有极高的稳定性，因此要求储存环中电子束流轨道有极高的稳定性。例如它的地基及建筑物的等结构必需有极强的抗微机械振动的能力（在 1~100 赫频率内的振幅应小于 0.1 微米）以保持实验站的光斑位置稳定在 10 微米以内。对于机器本身如此小的发射度，同时又要求有几百毫安的循环电流也不是一件容易的事，而最大的发展是束流诊断系统及其反馈系统，尤其是束流位置监测（BPM）系统，它能给出高精度的、分辨率可达 10 微米的单圈束流在环内的位置，对于多圈闭轨平均值分辨率也可达 30 微米左右，这比目前对撞机的水平高得多。有了如此高的精度，当上述的机械微振动不能控制到 0.1 微米时，就可以利用 BPM 给出的讯号反馈到校正系统使闭轨的变动控制在 10 微米之内。

由于在第三代同步辐射光源中有较多的长直线节，因此除可以安放发射更高耀度的插入件外，还可以变化插入件的磁结构，得到圆偏振光、椭圆偏振光等，以满足应用中对不同光束性质的要求。

在光束线方面，高耀度光束的传输（包括光束的聚焦，特殊波长的选择）是比较困难的，为了得到高品质的光传输，可能自适应光学技术会成为束线技术的一个新内容。光束热效应的防护也有相当的难度，因为高亮度 X 射线所释放的功率密度可达 5~10 千瓦/厘米<sup>2</sup>，这已与电弧的功率密度相当，必需采用复杂而巧妙的冷却机构及快速的反馈系统，以防光束打到没有冷却回路的元件上。

同步辐射与样品的作用方式有 20 多种，因此衍生出许多实验方法与技术。每一种方法都是一门专门的学问，有其系统的理论与方法学。作为一个核物理实验工作者，此处将以核物理实验的习惯术语来描述。同步辐射作为入射射线照射在靶上（即样品，可以是晶体、非晶体、气体、生物细胞等等），与靶作用后发射的次级射线可以是透射光、散射光、荧光、光电子、离子等等。入射射线的可变量是光子光强  $I_0$ 、入射角  $\theta_0$  能量  $E_0$  和能量分辨率

$E/E_0$ ；次级射线的变量是光强  $I'$ 、散射角  $\theta'$  和  $\phi'$ （透射与弹性散射过程）、光子能量变化  $E'$ （非弹性散射过程），荧光、光电子或离子的能量及其能量分布与角分布  $E''$ 、 $dN/dE''$ 、 $dN/d\theta''$  等。测量这些不同的量就决定了各种实验技术与方法。每一种技术与方法都来源于一种电磁辐射与分子、原子、固体晶格或生物体系的相互作用。在这方面与核物理实验中习惯于观察入射射线与单个靶原子核的作用截然不同。例如辐射的衍射在晶体学中用来确定其结构，辐射的吸收与反射、激励光电子或其他粒子的发射构成显微术、元素分析和各种谱仪的方法基础等。

第三代同步辐射光源具有很高的耀度，因此为开闢新的实验方法与技术提供了可能性，使实时研究瞬变与动态的过程成为可能。这些发展都将为材料、化学、原子及分子物理、核探针、地矿、生物、医学、环境及新技术开发等多种对下世纪科技发展至关重要的学科领域提供新的实验手段，获取新的科学信息。以下仅列举几例来说明：

1. 微探针及元素 CT 术。经聚焦及限束形成微米级的微束，通过测量 X 射线激发荧光可以分析样品中的元素分布。如使样品转动，并对荧光进行分光分析，可以得到材料中元素的 CT 像。这在材料科学及地矿科学中有重要意义。

2. X 射线显微术。其分辨率可达 10 纳米量级，在材料科学、微电子学研究方面有重要的意义。特别应指出的是 X 射线波长为 4 纳米时对水是透明的（所谓“水窗”），可以对活的生物体在极短的时间内观察其显微图像及其动态变化。

3. 谱学显微术。利用光电子能谱分析物质中原子化学价态的能力与显微术相结合，在真空中作具有能量分辨能力的光电子成像术，则可能描绘出材料中同一原子的不同化学状态，这将是今后很有前途的一项技术。

4. 表面分子状态研究。利用同步辐射在电子轨道平面内线极化的性质，用对样品不同入射几何条件并与 EXAFS 技术相结合，可以研究在材料表面的双原子分子的取向及其在表面上的结合状态，这将对催化剂、微电子学等的进一步研究具有意义。

5. 时间分辨谱仪。利用同步辐射激发分子，然后用特定波长的激光经一定时间延迟后去探测其化学状态，这是光化学研究的一个新方向。利用强激光激发（或电离）分子或原子，再利用同步辐射去研究离子团的电子结构将成为原子及分子物理中的一个新的领域。

6. 蛋白质晶体学。除了一般意义的晶体衍射成像研究蛋白质结构外，利用高光强的特点裁剪出可调的窄线宽的 X 射线，利用反常散射术得到特定元素在蛋白质中位置的讯息；利用快 X 射线探测器成像法，结合超短同步辐射光脉冲，用劳厄斑点成像法研究蛋白质的结构在特定条件下的变化。这种方法也可为今后药物学的研究开辟一个新途径。

7. 表面及界面分析。利用准直得极好的同步辐射光束，用掠入射衍射法及驻波法研究在材料表面 0.01 微米至几个微米范围内结晶的状态。尤其因为硬 X 射线可在非真空环境中传播，因此这种研究可以与某一反应体系相结合研究材料表面的变化。

8. X 射线核共振散射。通过核共振散射可以研究原子核的超精细相互作用，以确定材料内部的磁场及电场梯度。通过核共振散射得到能量分辨率优于  $10^{10}$  的超高分辨率硬 X 射线束，这将成为材料研究中的新的手段。

9. 投影 X 光光刻。目前所用的贴近软 X 光光刻可达到线宽为 0.2 微米。它受到紫外光光刻及相移掩膜技术的挑战。如果设计一个缩小倍率为 20<sup>-1</sup> 的 X 光光学系统, 用 1 微米线宽的透明掩膜可以刻出线宽为 50 纳米的图像, 这是光学光刻无法企及的, 成为下一代微电子学研究的方向。此外这种方法也可能为复杂结构的介观物理研究提供一个可供选择的途径。

10. 微机械加工。LIGA 技术在今后十年内必将成为微机械或机电控一体化技术应用的一个有力途径。高准直的 X 射线将满足这一技术发展的要求。

为适应这些新的实验技术与方法的发展, 要求研制新的 X 射线探测器。简言之, 新型 X 射线探测器应具有高的空间分辨率、高的时间分辨率、大的动态范围的成像能力以适应瞬变现象、动态及实时的测量。

因此第三代同步辐射光源及实验室的建设是一个综合性的高科技工程。从技术上看, 无论是地基的稳定性、温度控制、加速器磁铁设计与制造、超高真空系统的制造、高性能插入件的研究、高强度辐射的吸收及屏蔽、高亮度束线的研制及光学器件的制造、闭环控制技术、光学元件热负载的缓释、新型 X 射线探测器的研制等, 都是一种挑战, 也是一个国家科学技术总体水平的体现。

我国的同步辐射光源的建设与应用已有了良好的开端和相当的进展。从 80 年代前期动议迄今, 包括台湾地区已建成三台同步辐射光源, 分布在北京、合肥与新竹。分属第一代、第二代、第三代光源, 电子能量分别为 2.2/2.8 吉电子伏, 0.8 吉电子伏及 1.3 吉电子伏, 各自有其优化的光波段。就北京与合肥两台光源而言, 前者以硬 X 射线及软 X 射线为主, 后者以软 X 射线及真空紫外为主。因此从应用领域讲这两台光源是一组很好的配合。在美国布鲁克海文国家实验室的“国家同步光源 (NSLS)”装置是由 0.8 吉电子伏及 2.5 吉电子伏两个储存环组成, 共用一台注入器。前者称真空紫外环, 后者称 X 射线环。在建设中的印度及巴西的同步辐射光源也设计由这两个能量的储存环组成。北京同步辐射装置是北京正负电子对撞机国家实验室的一部分。目前已建成 7 条光束线, 其中 4 条是硬 X 射线束线, 2 条是软 X 射线束线, 一条是紫外光/可见光束线, 共建有 11 个实验站。自 1991 年以来陆续向用户开放, 已提供 4000 余小时专用机时, 为全国近百个单位在凝聚态、材料、表面科学、催化剂、地矿、生物、医学以及国防科研领域的 100 余个课题研究服务。发表成果 170 余篇。北京正负电子对撞机在同步辐射专用模式运行时其电子束发射度接近第二代光源水平。在今后 2 年内, 北京同步辐射装置将开发在正负电子对撞时的兼用模式, 为用户提供更多的机时, 将建造一个永磁多周期插入件发光点, 引出亮度比现有的高一个量级的硬 X 射线。

合肥的国家同步辐射实验室亦于 1993 年中投入应用, 目前已建成五条光束线及相应的实验站, 在软 X 射线显微术、光化学研究等方面具有特点。已登记的用户近 100 余家。在今后几年内将陆续扩建光束线与实验站以满足用户的需求, 同时更好地发挥专用光源的作用。

在这两台光源的建设、运行与应用中, 我国已锻炼了技术队伍, 积累了技术、组织了广泛的用户。在近期内同步辐射的应用当然以这两台设备为依托。但从发展看, 从学科深入研究的要求来考虑, 我国应该在跨世纪之际建设一个以具有优良性能、应用面广泛、容纳用户量大的同步辐射装置, 为前沿学科的研究提供强有力的手段与工具, 使我国科学技术走在世界的前列。建设这样一个“多学科”的先进装置, 要有高素质的人员组成的科技队伍和

相关学科的共同协力来承担。我们相信，只要把这建设项目列入规划，有适当的经费保证，经过国内同行及科技界的通力合作，这个计划是会实现的。

## 马大猷



原籍广东潮阳,1915 年生于北京。物理学家。北京大学理学学士(1936)。美国哈佛大学硕士(1939 年)、哲学博士(1940)。中国科学院声学研究所研究员。主要从事物理声学和建筑声学的研究,极大地发展了房间声学中的简正波理论,提出简正频率分布定律和房间混响的分析方法。50 年代设计建造了具有独创性的中国第一个声学实验室和第一个水声实验室。60 年代领导设计建造了我国第一个高声强试验室。提出了语音统计分布的理论,开创了我国语言声学的研究工作和驻极体电容传声器的研制工作。成功地领导了北京人民大会堂的音质设计。建立了电动气流扬声器理论、微穿孔板吸声结构理论、流体动力噪声的压力定律、小孔消声器和扩散消声器理论、室内声场分布理论、室内声场有源控制理论和非线性驻波理论。

## 声学的前沿

马大猷

声学差不多是近代科学中最早发展的分支，伽利略 1638 年发表的《两个新科学的讲话》中仔细讨论了物体的振动，对音调与频率的关系、振动的弦长与音调的关系，以及和声与频率比的关系等都有生动的讨论。半个世纪后，牛顿提出恒温声速的理论。17 到 19 世纪中的重要数学家和物理学家几乎都研究过声学问题，把经典物理声学发展到成熟的阶段，最后由瑞利以 1000 页的两卷《声学理论》做了总结，这部书直到 100 年后的今年仍在售卖。

从 20 世纪初开始，声学主要以外延的形式发展，与其它科学技术分支结合，建立了大量的边缘学科，声学学科图给出了一个大概的概念。这个图是 1972 年著名声学家林赛画的，当时计算技术、环境科学、空间科学等还没有像现在这样发达，这个图肯定是不完全的。但即使如此，声学的外延也是很可观。当然，物理声学还是继续发展。到本世纪下半叶，物理声学又大大发展了，这是因为在各分支学科中，不少问题如不对其中声波和振动基本特性和作用确切了解，就不能对该问题真正理解和进一步深入。所以在 20 世纪中，声学经过了发散和收敛过程，一些分支学科或其一部分已发展为工程技术，直接为生产服务，不少部分则向基础深入发展。现在主要讨论这些部分。

1. 物理声学。振动和声波的基本特性和效应是声学各个分支共同的基础，包括线性声学、非线性声学、振动理论。许多应用都涉及声波的辐射压力、声流和空化作用。声源的辐射和障碍物的散射是突出的问题。声学的研究继续发展。物理声学占声学研究论文的五分之一强。

2. 声学信号处理。信号处理在电子学中是成熟的技术，用在声学中非常重要，几乎声学各个分支中都有信号处理问题。最多的问题是空一时信号的处理方法，如水声信号、超声信号、语言信号、有源控制信号、环境声学信号、地声信号等，都须要处理，以了解或应用其有关物理过程。此外信号显示、图样识别、学习机、自适应处理、声学反问题、声学层析术、声全息处理等都非常重要。

3. 声学海洋学（海洋声学）。海洋是世界上的巨大未知数。海洋变化非常大，海流、涡流等可大到若干公里，并不断变化。影响气候变化，食物链以及矿产，即使远离海洋的人也要受影响。用船或卫星可以取得大量信息，但船只限于一时一地，而卫星只能观察海面。用声学方法可以大大推动海洋研究，一个重要问题是海底的研究（当前也许限于技术条件只是浅海的海底），用反射研究可以推出海底表面和表面下的物理特性。用声学层析术，以单频声源和简正波测量为基础，可求得声速分布的截面图。频率低的声波在海洋中可传到很远距离（SOFAR 系统）。在南印度洋设的赫德发射站（57 赫）可在 18000 公里外收到，因而可算出声道内的平均声速。用这个系统可测每年水温变化准到 0.01。这个监测水温变化的办法还要推广，因为水温变化影响气温，影响海洋生物的繁殖。海洋中浮游生物密度的研究也是一方面，这影响海洋中整个的食物链。

4. 光声学和声致发光学。用脉冲激光照射固体或液体表面以在后者中产生声波，和在液体中用声波产生空化而发光是声光互相转换的两种方式，广泛用于物质研究中。用激光束照射水面产生高频声一般转换效率较低，传播距离也较短。有人试验，使激光束照射到水面上的点以略高于声速移动，这

就可以不断加强声束，估计可使高频率声波传到 5 公里、10 公里的距离，有广阔应用的前途。光声在无损检测方面也很重要。声致发光所需声场能量很小，由于空化气泡破碎而发射光量子可能放大了 11 个数量级，很是惊人。这些现象的机理、频谱等很值得研究。

5. 扫描声学显微镜。1949 年，索柯罗夫在《超声显微镜》一文中说：“超声显微镜可以在不透明的媒质中取得小物体的像，和这种媒质中不纯的质点或杂质的像。”他虽然从 1936 年提出超声显微镜的概念起，几十年中并未能实现他提出的两项重要的应用，因为他无法产生较高的频率。一直到本世纪 60 年代中叶，薄膜换能器出现了，这才有了可能。从 1974 年制出第一架扫描声学显微镜起，现已有很大发展，在室温下分辨率可达到 0.2 微米，在低温下到 0.02 微米，理论上还可能高得多。所用频率在水中为 3 兆赫，在流氦中 8 吉（千兆）赫。扫描声学显微镜还将有较大的发展，它在物质结构和器材（如集成电路）的研究中将越来越重要。

6. 医疗和生物声学。超声诊断现在已是成熟的技术，在与 CT 及核磁共振竞争中处于有利地位。这是由于计算机的应用，使传输、接收和显示过程都达到最佳状态，改进了超声成像质量和其中细节的显示。这都是几年前不能比的。三维超声显示正在发展。利用计算机重建三维图像，须要一组距离已知的截面图和各種组织可区别的特征。但后者是不存在的，软组织的特征无法分辨。因此，CT 与核磁技术不能移植到超声。但各组织和液体间的界面是很明显的，所以超声三维成像多以此为基础，微动的部分可以用多普勒方法分辨，这方面发展很快。体外激波碎石术用于肾结石也比较成熟，但还在发展。换能器、各种生物和生物体的声学特性，声波对生物体的影响等的研究工作还是大量的。

7. 噪声和噪声控制。噪声控制主要是工程技术问题，但声源和发声机理的研究是关键问题，受到注意。噪声和噪声控制的研究目的是保证适合人们的工作和生活条件，保证人们的健康。但噪声降低产生的后果是改进生产，发展工业，这却往往不被一般人注意。本世纪 40 年代发展的喷气飞机载客不过二十多人，噪声和振动却几乎令人不能忍受（110 分贝）。几十年降低噪声和振动的结果，1988 年鉴定的空中客车 B320，载 300~400 人，机舱中的噪声只是和热闹的大街上差不多（84 分贝）。在一般铁路系统上稍加改造，行车速度可提高到每小时 200 公里，而噪声并不提高（92 分贝），磁悬浮列车开到 400 公里，噪声也只到这个程度。现在噪声研究最热烈的部门是航空、铁路和汽车。大到重工业设备，小到家用电器，噪声和噪声控制的研究也都是重要问题。

8. 室内音质。如果噪声控制的目的是使人不受噪声伤害，音质的研究则是使人们的声环境舒适，有利于思考、学习和开展各种活动。这是在提高人们“生活质量”的总趋势下越来越重要的问题。学校建筑中的音质问题影响儿童、少年的成长，会越来越受到重视。报告厅、音乐厅等的音质问题比较复杂，虽然混响时间早被承认是主要的参数，其他有影响的参数还有不少。这些包括亲切感、声音的响度、室内声波的扩散、空间感和明晰度。此外还要求在舞台上能听得清楚。这些因素的衡量和平衡还是研究的课题。

9. 有源振动和噪声控制。产生一个相位相反的振动或噪声以消除或降低原有的振动或噪声的方法已发展了 20 年，在换能器、控制理论、计算机软件等方面都有巨大的发展。现在对室外声源、通风管道和小尺寸的空腔等的噪

声控制已比较成熟，室内噪声的控制由于简正波抵消原理的应用也有了良好的开端。这个原理用于振动控制也很有前途。有人用圆筒模拟飞机，在其上适当一点加力以激发在某一频带内的简正振动，去抵消其上原有的振动，效果很好，圆筒振动所辐射的噪声也降低不少。飞机内部噪声用有源噪声控制（用多个声源和传声器）的飞行试验也正在进行。有源控制的关键问题是振动方式和控制策略。

10. 听觉问题。听觉问题研究的一大特点是心理—物理实验的成就，突出的例子是亥姆霍兹，他用简单设备得到的斗蜗共振理论在 100 年后得到贝凯西的解剖学证明，后来在声音响度，音调等方向的研究也取得重要成果。近 20 年中已证明斗蜗接收声音后要引起机电正反馈（能量来源是新陈代谢），使信号加强并增加共振的锐度，并发出神经脉冲。以后神经系统和大脑如何处理这些信息还是在研究中。听觉研究可能是研究大脑的一条路。目的是建立完整的听觉理论。此外，听觉研究还包括听觉器官的构造和作用原理、耳鸣、耳聋、耳声发射、测听、助听、以及仪器设备等。

11. 自动语言识别。这是人类长久的梦想，只有计算机，大规模集成电路出现后才可能认真向这方向努力。70 年代初，美国国防部 ARPA 任务以数百万美元资助四个单位发展认人、有限词汇的识别系统。只有 Harpy 成功。以后试过不同方案，水平基本相同。80 年代末有了突破美国李凯夫完成不认人，识别以 1000 词的词汇组成的连续语言系统，正确率达 94%。所用的是隐藏马尔柯夫模型（HMM）。于是 HMM 系统大量出现，水平并未提高。近年一些国家决定以发展“口语系统”（SLS）为目标，要求对数据库中的问题高水平地理解，并作出反应。人们期待进一步突破。

12. 热声学。1982 年，Wheatley 发现在驻波管内近一端四分之一波长内放一擦薄片，在声波作用下，薄片两端产生温度差，这就是热声现象，给不用氟利昂的冷藏系统提出前景。这方面进展很快，已制成热声致冷器，热声低温发生器，热声发声器和利用液钠运动于磁场中的磁流体动力发电机，并建立了相应的理论，这些设备的功率小，离实用尚远，但有些可以直接在卫星上使用。深入研究，可期望重大成果。

13. 空间声学。在空间研究空气中的液滴、液体中的气泡以及固体的特性和运动有很大意义。液滴的研究结果可用在从水滴直至原子核的各种对象。液滴和气泡是比较简单的非线性动力系统，对它们的运动作理论和实验研究可得到对混沌现象的演变过程的确切了解。此外，大气中的水滴和海洋中的气泡对世界气候也是重要因素。在空间研究液滴，气泡和固体可避免容器的影响，并对纯金属、特殊合金和玻璃的冶炼提供条件，所以在理论上和实际应用上都非常重要。声悬浮和操纵是地面上和空间实验的最好手段，用声波不但可以使小滴悬浮和固定在一点，还可以使它旋转、移动、振动，以研究它的运动特性、形状变化、光学性质、凝聚时的详细过程等。在地面上曾用声波使直径 1 厘米的钢球在空中悬浮，可见这方面潜力之大。

14. 声模拟的应用。声波、电磁波和固体中的电子（以波看待）都满足同样的波动方程，所以可互相模拟。用声模拟固体物理现象很有潜力。用一组质点（例如铅块）和弹簧可制成声模型，而且可以直接测量其特征值、特性函数和其它性质，在凝聚态物质系统直接测量却很难，甚至不可能测。Anderson 局限的非弹性效应和准晶华性质的声模拟研究是有名的例子。这方面的可能性还没有充分发掘。

除物理声学没有具体目标外，其余目标都很明确，有的是学术上的，有的则是实际应用的，但都不是短期生效的。声学是一门应用物理学，其中相当部分已成为工程技术。近年来我们提倡科学工作者支援国民经济建设第一线，这在国家建设中完全是正确的、必要的。声学工作者由于学科性质，很容易走向工程方面，甚至于简单应用方面，而忽略不能即时见效的基础性研究工作。这很不利于我国科学发展，从长期说也不利于国家建设。因此，声学，我想其他应用科学也相似，特别需要对其基础性研究工作给予提倡、支持和鼓励，这包括国家给予较长期的有目标的研究任务，而不仅是出产品的任务。

## 马宗晋



1933年1月出生于吉林省长春市。原籍吉林省吉林市。地质学家。1955年北京地质学院普查系毕业后留校任助教。1957~1961年在中国科学院地质研究所读研究生。1961年毕业后任该所助理研究员。

1967年起先后任国家科委京津地震办公室分析预报组组长、国家地震局分析预报中心副主任。1988年起任国家地震局地质研究所研究员、所长。

从事地质构造、地震预报、地球动力学方面的研究。1964年完成节理定性分期配套等小构造研究，在国内构造地质教学中广为选用；“湖北中新生代构造力学分析”60年代以来成为区域构造、基底与盖层不协调变形、褶皱联合等力学研究的重要参考。提出长中短临渐进蕴震模式，成为全国预报强震的主要思想和工作程序；在海城等强震成功预报中，发挥了指导和实际作用。提出震史学、震兆学和震因学划分，分别进行了基础工作，现已全面展开。提出现今地球动力学，建立了3个全球级的现今构造系统，论证了地球变动的韵律性和非对称性，从而提出以壳、幔、核细分层角差运动为基础的地球自转与热、重流联合的动力模式构想，它逼近于结构非均匀、运动非平稳、非对称、热柱非连续和板壳复杂变形的近年观测；对全球构造动力模式进行了新概括，为灾害和矿产研究提供了部分基础。1989年以来任国家科委组织的全国重大自然灾害综合研究组负责人，提出了全国7大类自然灾害减轻的系统工程设计。

1991年11月当选为中国科学院（地学部）学部委员。

# 地球整体动力学是领导 21 世纪 地学的主干

马宗晋

地球动力学的目标是了解地球变动的过程和给出动因的理解，不过此类研究的起点多从动力学范畴入手，所以名为地球动力学。

地球动力学是在地球众多基础学科发展的基础上形成和发展起来的高层次综合研究，它反映并引导着人类地球观的形成与演变，带动着众多基础学科的发展，特别是近一二十年在高技术应用推动下，已经开始实测性探索地球各圈层相互作用的整体行为，有力地促进了学科大跨度的交叉，它以其高度综合的思维推理和理论模型为特征，紧密结合社会持续发展的资源、环境与灾害等三大主题，所以地球动力学将是领导 21 世纪地球科学发展总趋向的重要组成，是建立中国地学理论框架的重要支柱。

## 一、地球动力学的发展

地球动力学的研究由古至今可分为四个认识层次<sup>[1]</sup>，随之地球动力学的学科形态和结构也逐步深化和完整。

### 1. 地球形状动力学

从地球被认定为球体开始，人类首先对地球的形状提出了圆球、扁椭球、长椭球、四面体等等认识和相应的动力学推论，发展至今，据卫星重力资料反演的大地水准面作为扩展地球形状动力学研究的基本主题。

### 2. 地球表壳动力学

18 世纪中期至本世纪中期，针对全球海陆升降、分布格局及地表山系的展布，曾提出地球胀、缩，自转、大陆漂移、潮汐、热对流等等构造动力学假说；与此同时，从弹性到塑性基础力学的发展，也不断引深对地球介质力学行为的理解，并正式提出了地球动力学的概念，涉及了地球表壳变动的过程和动力。

上述直觉性的各种动力观，因立论之局限或单一，缺乏有力证明，逐渐为以地壳升降、地层、沉积、构造变动和岩浆活动为基础的地槽构造论和后来发展为泛地槽论的大地构造观所隐没。

本世纪开始，大气动力学和海洋动力学已获得独立快速的发展。

### 3. 地球岩石圈（层）动力学

二次世界大战后，地学向海洋和深部全面进军，促成了 60 年代提出囊括全球岩石圈的板块运动学观点，打开了地球表壳变动与地球内部动力过程相关研究的通道，建立了一批新的全球构造概念和理论模式，从而使地球动力学作为一门具有广泛带动能力的多学科高层次综合的理论形态更趋完整和系统，但是这一层次的动力学主要还是以岩石圈层板状体的几何、组成、演化和变动过程为基本对象，其深部的动力过程主要还只是在实验或理论参数假定下的动力学推论和反演推算，尚无确定结论。

### 4. 地球整体动力学

近二十余年，由于卫星探测和深部探测以及实验技术和信息处理等方面的快速发展，取得一大批描述地球各圈层的组成、结构以及动态信息的数据，提供了地球科学进行整体的相互作用过程的解析，并探求其多种动力因子联

合作用系统的必要和可能，所以，一个行星地球多圈层耦合整体行为动力学过程的研究阶段已经到来，它将集历史之大成，融地球之解析于地球统一过程之自然。

## 二、面向 21 世纪

地学面向 21 世纪可以想象有两大特征：一是地学信息量的巨大增长，推进地学的理论范畴向更广泛的综合方向发展，对少信息量条件下形成的概念、理论和方法提出新的深化或新的挑战；二是地学 21 世纪的使命是贡献于社会的持续发展，针对资源、环境和灾害三大主题。

地球动力学的理论，如果认为 60 至 80 年代是“板块生消循环理论可以解释一切地球变动基本问题”的局面，那么近十年已呈现出理论多样化发展的局面，因为新的资料 and 知识，一部分在进一步证实和深化着板块生消理论；一部分对岩石圈板块的物性、结构、运动模型以及动力的内容和作用的方式都提出了重要的质疑与反证<sup>[2]</sup>；还有一部分涉及地球整体系统的资料则超出了板块学说所论及的范畴，如地球的体积<sup>[3]</sup>、对称性、运动的定位坐标系<sup>[4]</sup>、壳幔核整体的运动体制<sup>[5]</sup>、地气耦合与日地相互作用的多级韵律性<sup>[6]</sup>壳幔等。

美国国家研究委员会发表的《固体地球科学与社会》<sup>[7]</sup>较全面地阐明了固体地学发展的范畴与前沿，并鲜明地以高度综合的形态指出了四个研究目的：了解过程、提供资源、协调环境、减轻灾害。把了解过程这一基础研究分为五个综合学科性的领域，其中包括岩石圈动力学和核幔动力学，并以目的与领域经纬纺织的矩阵提出了全盘的研究计划。这些认识与我国固体地学家的观点基本相同。美国“大陆动力学”研究计划的提出，标志着大陆动力学与大洋动力学的分解，这是基于大陆区与大洋区的地壳与上地幔在结构、构造、运动、变形等方面一系列重要差异的新发现和新认识，如所提出的大陆根、结构的分层与物质组成、陆区变形样式的复杂性、应力场、软流圈层的非均匀与非普遍的分布等。同时，大陆动力学的提出，也是为了把地球动力学这一高层次基础理论研究更好地贡献于社会的持续发展。但在理论趋向上，无疑已隐含着对现行的板块理论将提出某些重大的、甚至是原则性的改造。日本以超板块的理论思考<sup>[8]</sup>，直接提出地球各圈层相互作用的整体研究计划，并着重提出对各圈层相互作用过程的韵律性进行研究，这一思想虽然不无与其国土特点有关，但它的立论层次和所强调的韵律性动态，都是颇具超前意识的，这也是世界上许多地学同行的共识。

总之，地球动力学正面临着向非均匀、非平稳、非对称、非单一和非封闭的理论趋向上发展的必要和可能。

## 三、中国地球动力学研究的现状

1. 对中国大陆区岩石圈已探得粗结构图像<sup>[9]</sup>，对少数地区和剖面的细结构有所认识<sup>[10]</sup>；但对岩石圈和上地幔的一些重要的结构界面和结构分区的边界带，还缺少系统的探测研究，综合地球物理分析薄弱。

2. 主要在板块构造的生消理论指导下，开展了对造山带、高原、盆地、边缘海等一系列层域性地球动力学研究<sup>[11-13]</sup>，目的是解析再造岩石圈构造

变动过程，建立相应尺度的运动或构造模型。由于我国历来构造活动频繁与强烈，从中取得了关于板块往复运动和定向迭加运动及其变形样式的一些重要认识，不足之处是对过程的深部条件和动力环境认识不够深刻，理论总结不够，对中国及邻区总体的动力学研究不够。

3. 主要是以了解大陆地震的蕴育发生条件为目的，对地壳中上部多震层及其底边界条件进行了广泛探测与高温压实验研究<sup>[14]</sup>，获得了对低速高导层广泛的了解，开展了以地震活动、震源机制、活动构造、地形变、应力场等为依据的板内与板缘现今动力学研究<sup>[15]</sup>。由于中国是大陆地震活动最强烈的多发区，所以取得了具有世界性基本序列剖面意义的地壳非稳态韵律性变动的一系列资料和研究结果<sup>[16]</sup>，但区域动力过程与全球过程的协调尚缺少研究。

4. 关于全球构造、全球岩石圈运动模型及全球动力作用的分析，开展很少，有些工作也较零散，不过其中也不乏某些高层次创新性的研究探索和发现，如全球三个一级构造系统的确立<sup>[17]</sup>，地球整体非对称性问题<sup>[4]</sup>，自转变化的多圈层差异响应，大地水准面与地幔运动<sup>[18]</sup>，天文地球动力作用<sup>[6]</sup>等等。

总之，我们已打下了开展大陆区域地球动力学研究的基础，开始了对某些具有典型意义的，甚至是全球意义的区域地球动力学问题的研究，也作了一些闯入全球动力学研究的准备和探索，所以，我们已具备了系统推进我国地球动力学研究的条件。但总体上分析，科学目标仍较分散，层次尚不够清晰，综合研究的素质和能力尚薄弱。面对 21 世纪，我国的地球动力学研究应作怎样的新思考和新的行动呢？我们应当在九五期间对以往的工作作一番系统的总结，形成我国的理论框架，迎接 21 世纪的新发展。

#### 四、基本观点

##### 1. 地球动力学研究的整体观

地球动力学问题的研究现状需作系统的整理与归纳，否则不同时空尺度的问题和地球动力问题研究过程不同步骤的问题往往混杂在一起，很不利于问题研究效率的提高和认识地球本体变动规律的系统性。

无论那一个时空尺度的地球动力学问题，理论上都可以按四个步骤展开：第一，明确本问题的时空边界，并研究边界的动力学属性和演变；第二，从本问题边界内的地质、地球物理、地球化学等资料、现象的综合分析中提出必要的要素，即变动要素的几何框架和介质，研究它们的现状和力学属性，这不只是单纯的几何学研究；第三，变动过程中力学属性的变化，反演解析和正演再造，这也不只是简单的运动学研究；第四，变动过程的动力学求解，包括主次动力因子及其组合作用方式的判定和定性、定量的验证。以上这四个步骤都有其必要的研究内容和需要解决的问题，都要求以学科交叉的综合研究观念为指导，尽管我们目前还多半是以单学科的动力学姿态参与地球动力学研究的“系统工程”，如地质构造动力学，地球物理动力学，地球化学动力学等等，这种状况应予改善。

空间上，可能需要划分四个尺度，即全球级、半球级、区域级和局部级的地球动力学问题。按深度又可分为表层的、地壳或岩石圈的、地幔的、地核的和地球整体的地球动力学问题，如果要强调大陆动力学的特殊性，那么

它空间上是对岩石圈地球动力学的分解，它是要强调从陆核形成以来的全部地史过程的地球动力学问题。半球级动力学之所以是必要的，正像大气动力学已客观地分出了南半球和北半球环流系统一样，因为它们有各自的重要特点，固体地球从地表到地核，已初步认识到南/北半球和 $0^{\circ}/180^{\circ}$ 半球（即大西洋半球/太平洋半球）的某些重大的差异<sup>[19]</sup>。区域级的是指由全球构造框架中某些明确边界划定的区域，它可以是板块边界或者是板块的组合边界，也可以是重要的地球物理异常带边界，目的是划定一个有比较明确的边界动力条件的动力学研究单元。区域动力单元之内，则可能需要按某种需求划分局部的地球动力学研究小区或小带。

时间上，地球动力学可能分出众多的研究时段，不过原则上建议分成前寒武纪的、古生代的、中生代以来的、新生代以来的和现今的地球动力学问题。前寒武纪的动力学问题主要是围绕陆壳及其增生、裂化过程的动力学。古生代地球动力学问题主要是围绕陆核裂解、拼合，古造山和同造山的陆沉和陆升以及上述的反复过程的再造及其地球深层次的动力学解析。中生代以来或晚近期地球动力学问题主要围绕全球陆海格局的形成、陆海今造山和伸展、以及作为动力表现的岩石圈和地球深部的运动与演化，最后是动力学求解。新生代是造就地球现今环境和现今地球物理场环境的最后时段，是人类得以滋生和繁衍的地史阶段，有其特殊的以环境为主的动力学问题，如冰期与温度的振荡、海面的升降、水土的资源、磁电空间的跃变等等的地球表层动力学问题，涉及气、水、生、壳等圈层及行星地球天文因子的耦合作用。现今动力学问题则是地球现在正在进行的或刚刚过去的变动，包括微动态暂态信息问题的动力学研究，它是认识灾害、环境和成矿机理现今时段，涉及地球整体系统的动力学。

## 2. 突出非平衡态地球动力学的研究

地球变动过程的研究以往多是从总结果，按平稳过程求其平稳的变动速率，但精细研究表明，无论是造山、隆起、伸展、滑移，还是环境转型、成矿成灾，都表现出长期平衡变动之中短期剧变的非平稳性，而占总过程时间很小的短暂过程对总结果的贡献却是巨大的。为了认识地球变动剧变过程的重大意义，更是为了更好地把动力学研究贡献于资、环、灾，应突出非平稳动力学的研究。

## 3. 建立联合动力作用系统

地球动力学研究系统涉及的时空尺度变化很宽，而不同地球动力问题的针对性也差别很大，特别是各种地球动力因子的能量、作用方式和力能的转换方式更是各有特点，所以必需探索大、小能量的动力、不同作用方式的动力、不同力能转换机制的动力，通过定性选择和定量验算，探求联合作用的总体力学效能，摆脱以单一动力作用面对极其复杂的多层次变动过程的困境。

# 五、地球晚近期整体动力学的研究要略

## 1. 全球板块构造与全球三大构造系统

把全球岩石圈划分为大小几十个板块，以其作为独立的构造运动单元，这是 60 年代以来“新地球观”把局部的大地构造过程推向全球构造协调运动的巨大前进。但这里忽视了对板块边界形成机制依据的更深探索；增生、消

减、转换三类边界以及主动型与被动型大陆边缘为什么在全球坐标系中如此经纬分明地展布？针对这一基本问题，我们提出了串连以大西洋半球为主要分布区的增生型边界为洋脊构造系统，串连以太平洋半球为主要分布地带的消减型边界为深俯冲构造系统，并全新地提出了北半球  $20^{\circ} \sim 50^{\circ} \text{N}$  的大陆强构造变动系统<sup>[19]</sup>，这三个全球尺度的、各有丰富构造动力学内涵的系统在全球的分布还揭示了全球构造非对称性的客观存在和质心偏移的可能，这些重要线索和新的概念，预想将是导向建立全球整体统一动力模型的第一组主要根据，需要进一步论证与分析。

## 2. 板块运动的生消循环模式和差速自转模式

威尔逊提出的板块运动生消循环模式是二维的、典型化的、非全球协调的运动学假说，它以地幔热对流为动力学背景。Minster (1974, 1978) 和 Demets (1990) 提出的板块运动模型 (Rm-1, 2 和 NUVEL-1) 客观地反映了板块的相对运动，与近 10 年空间大地形变测量结果基本相符<sup>[20,21]</sup>。但从 NUVEL-1 模型所提供的板块相对热点参考系的运动矢量图中可以看出，北半球各板块总体上都是向西运动，快—慢之间出现裂谷，慢—快之间出现碰撞俯冲，由此可提出板块运动另一种规律性构想，即北半球板块相对地幔整体向西漂移，但不同板块漂移速度不同，或相当于板块自转速度的差异，这是完全不同于地幔对流模式的构想<sup>[22]</sup>。南半球板块运动矢量场情况略显复杂，可以引出板块差速自转与地幔对流驱动的联合作用，以及南北半球之间的相对扭转。上述认识需要进一步论证和矢量场的动力学定量分析，以打下板块运动学规律性的实证基础。

## 3. 大地水准面的构造表现及其动力学显示

大地水准面作为地球整体质量分布的地面表现，其不同阶次展开的球面畸形已引起动力学研究的广泛关注，例如大地水准面形态与地幔非均匀结构的相关性研究，即有许多报导<sup>[23]</sup>。我们注意到低阶大地水准面的经向梨形剖面所显示的南胀北缩状态与环南极洋脊和  $20^{\circ} \sim 50^{\circ} \text{N}$  纬向大陆构造系统之间有很好的空间相关，还注意到大地水准面赤道剖面是个椭圆<sup>[24]</sup>，长轴正好指向大西洋脊的中线和太平洋中心，这预示着全球三大构造系统与低阶大地水准面在定位坐标系内的动力学联系<sup>[19]</sup>。SE 型重力大地水准面的平面图内所显示的一系列北西向隆起与拗陷，是否可以旁证南北半球之间的左型扭转。美国俄亥俄大学 360 阶 OSU91A15 模型重力大地水准面经、纬向一系列剖面组还显示了多种扭转运动和球非对称现象。总之，不同阶组的重力大地水准面可能展示多种有规律性的构造表现，从而提供探求重力等动力学求解的途径。

## 4. 上地幔分层及软层构造涌流构想

上地幔地震波速分层和岩石高温高压实验指明：100~150 公里是低速带；220 公里可能是复杂的构造界面；400 公里是化学或相变界面；400~500 公里是矿物相变带，550 公里和 670 公里面是化学还是相界面也待判明<sup>[25]</sup>。近年地幔 CT 结果也旁证上地幔的分层性和同层的横向非均匀。此外，从环太平洋深俯冲带内震源深度集中在 0~220 公里、300~400 公里、550~670 公里等三个层次的现象也可推想上地幔分层可能具有硬软相间的力学性质。上地幔的分层结构及其物理化学性质的判定直接决定上地幔可能的运动方式，如果 670 公里是化学界面，则全地幔对流即不可能进行，如上地幔分层结构是清晰稳定的，那说明上地幔没发生过整体的对流。从大陆内部的与俯冲带

无关的岩浆活动、洋脊开裂的被动性和热根不超过 400 公里，洋脊的跳位和变格等等现象，需要探索一种新的地幔物质运动的模式。以“硬”层的模式构造活动所提供的通道，驱动“软”层物质的上涌和横流，形成局部的循环运动，这是一种全新的构想，它对全球、对大陆内部的动力学研究都是至关重要。

#### 5. 地幔结构的非均匀及冷、热运动的推想

随着震波 CT 技术描述地幔结构能力的提高，对其复杂性的认识将更突出。但大尺度的结构非均匀可能更便于认识地幔整体的热运动，如美国 Lay 等人<sup>[5]</sup>提出的，以核幔边界复杂结构点为加热源而向上驱动的巨大热柱，认为这是地幔运动并推动岩石圈运动的主要方式，这些巨型热柱似乎已由巨大的重力水准面的拗陷区所描述；相反，如日本 Ma ruyama 等人<sup>[26]</sup>提出以俯冲带的冷物质的聚集加密为依据的巨型冷沉运动，进而激起地幔的热扰上涌运动。我们认为，无论是地幔的热升运动还是冷沉运动，都是对地幔结构非均匀的一种动力学的解释，但都没有说明为什么恰恰在那些位置发生了热柱或“冷柱”，现象表明冷热柱的分布显示了某种全球级或半球级的对称或反对称现象，不同深度层地幔结构的平面图像从顶到底已明显地表明太平洋半球与大西洋半球存在半球区内的相似性，所以，地幔运动的研究，不应被束缚于结构异常的本身，更要注意它们的全球分布，以追索产生如此地幔运动的动力学根源。

#### 6. 壳、幔、核差速自转体制下联合动力作用的探求

如果说上述五个问题的研究是组成一个全球整体统一动力模型的一些必不可少的部件，那么如何把它们组装成一个整体，实现一个全新地球动力模型的建立呢？首先要认识地球整体各部分的运动关系。

地球是在不停的转动之中，其中地壳（或岩石圈）相对地幔整体向西运动，大约在 10~1 厘米/年的量级，但地核磁场的西向漂移相对地面的不动点却达到近 100 公里/年的量级。壳、幔、核之间的差速自转，必须在核幔边界和壳幔边界形成耦合动力作用带，从而导致一系列异常结构点的出现，由此提供地幔运动的非均匀动力边界条件。如果追索地球自转的非平稳运动，追索岩石圈三大构造系统的非平稳运动，必须考虑在地球热动力和重力均衡等基本动力作用的基础上，迭加某些来自大气、海洋、固体地球自身的火也、地震、岩浆涌动，以及种种天文动力因素（潮汐力、陨击力、太阳活动）的联合作用，这将随着研究问题的尺度变化，筛选分析不同动力作用因子的组合，形成一个开放性的地球动力作用系统，以使不断深化的地球整体变动过程问题，引导地球动力学的求解研究逼近各类地球动力学问题的真实。

### 参考文献

- [1] 马宗晋，地球为什么是这般模样，科技日报，1994 年 6 月 29 日。
- [2] Keith, M.L., 地球动力学与地幔对流——一个备选的地球袈 P 停斑 arth-Science Reviews, Feb.1993.
- [3] 伊万金, B.P., 地球质量和体积随时间增大是地质发展的主要因素，地震地质译丛, 13(6) 53~57, 1991.
- [4] 马宗晋、陈强，全球地震构造系统与地球的非对称性，中国科学，B 辑，10 期，1092~1099 页，1990.

- [ 5 ] Lay , T. , et al. , Studies of the Earth ' s deep interiors : goals and trends , Physics today , 43 44-51 , 1990 .
- [ 6 ] 任振球 , 全球变化 , 科学出版社 , 1990 .
- [ 7 ] 美国国家研究委员会 , 固体地球科学与社会——概要和基本论点 , 刘树臣等译 , 中国地质矿产信息研究院 , 1993 .
- [ 8 ] 浅田敏 , 推进地球科学的建议 , 学术月报(日) , 42 卷 5 期 , 396 ~ 407 页 , 1989 .
- [ 9 ] 宋仲和等 , 中国大陆和边缘海的上地幔 P 波速度结构 , 地震学报 , 8 卷 3 期 , 263 ~ 274 页 , 1986 .
- [ 10 ] 刘国栋等 , 华北地区壳内高层及其与地壳构造活动的关系 , 中国科学 , B 辑 839 ~ 848 页 , 1984 .
- [ 11 ] 崔军文等 , 青藏高原岩石圈变形及其动力学 , 地质出版社 , 1992 .
- [ 12 ] 许志琴等 , 东秦岭复合山链的形成——变形、演化及板块动力学 , 中国环境科学出版社 , 1988 .
- [ 13 ] 李思田等 , 中国东北部晚中生代裂陷作用和东北亚断陷盆地系 , 中国科学 , B 辑 , 2 期 , 185 ~ 195 页 , 1987 .
- [ 14 ] 马宗晋、薛峰 , 中国大陆地震深度分布与“易震层”初探 , 地震科学研究 , 3 期 , 43 ~ 46 页 , 1983 .
- [ 15 ] 马杏垣主编 , 中国岩石圈动力学纲要 , 1 400 万中国及邻区海域岩石圈动力学说明书 , 地质出版社 , 1987 .
- [ 16 ] 马宗晋等 , 地球变动的韵律性和反对称性 , 天文地质学进展 , 海洋出版社 , 23 ~ 31 页 , 1986 .
- [ 17 ] 马宗晋 , 论全球构造系统 , 武汉地质学院院报 , 3 期 , 1 ~ 15 页 , 1982 .
- [ 18 ] 傅荣珊 , 地球大地水准面异常及地幔对流物理数学模型 , 地球物理学报 , 32 卷 , 1989 .
- [ 19 ] 马宗晋等 , 现今全球构造特征及其动力学解释 , 第四纪研究 , 4 期 , 293 ~ 305 页 , 1992 .
- [ 20 ] Minster , J. B. and Jordan , T. H. , Present-day plate motion , J. Geophys. Res. , 83 5331-5345 , 1978 .
- [ 21 ] Gripp , A. E. and Gordon , R. G. , Current plate velocities , relative to the hotspots incorporating the NUVEL-1 global plate motion model , Geophys. Res. Let. , 17 ( 8 ) 1109-1112 , 1990 .
- [ 22 ] Doglioni , C. , The global tectonic pattern , J. Geodynamics , 12 21-38 , 1990 .
- [ 23 ] Hager , B. H. et al. , Lower mantle heterogeneity , dynamic topography and the geoid , Nature , 313 541 ~ 543 , 1985 .
- [ 24 ] 李瑞浩 , 重力学引论 , 地震出版社 , 117 ~ 125 页 , 1988 .
- [ 25 ] Dziewonski , A. M. and Anderson , D. L. , preliminary reference earth model , Phys. Earth Planet Inter. , 25 297 ~ 356 , 1981 .
- [ 26 ] Maruyama , S. , Plume tectonics , J. Geol. Soc. Japan , 100 ( 1 ) 24 ~ 49 , 1994 .

## 王启明



福建泉州人，1934年7月生，1956年毕业于复旦大学物理系。中国科学院院士。

1985年起至今一直担任中国科学院半导体研究所研究员、博士生导师、所长，中国电子学会半导体与集成技术学会及中国通信学会光通信委员会副主任、中国光学学会理事，集成光电子学国家重点联合实验室及国家光电子工艺研究中心学术委员会主任。先后在中国科学院物理所、半导体所工作38年。

他还是浙江大学、厦门大学、东南大学、华南师范大学及北京交通大学的兼职教授和顾问教授。中国科学院院刊、《半导体学报》及国际高速电子学杂志编委。参与筹建我国半导体材料测试基地，创新发展了交变场光磁效应差频测试法，建立了相移寿命与稳态寿命的理论关系。1958年第一次在国内获得超纯级半导体锗材料。

70年代初以来，致力于半导体电子器件的研究，主持完成多项国家重点科技攻关和“863”高技术研究任务，率先在国内研制成功短波长及长波长半导体激光器和硅雪崩光电探测器，获得国家“六五”攻关重奖，二次国家科技进步二等奖及两项中国科学院重大成果二等奖。

80年代初，他领导系统深入开展半导体双稳态激光器研究，受到国内外学者的重视，他的论文曾获通信学会优秀论文一等奖，阶段研究成果获中科院自然科学二等奖。

1986年他又致力于量子光电子学的研究，参与组织实施我国“863”计划光电子主题研究工作的开展，曾担任信息领域专家委员会委员，光电子主题专家组成员。

王启明与我国信息光电子学的发展关系密切，国内外同行公认他是中国信息光电子事业的主要开拓者之一。

## 光电子技术是 21 世纪信息高技术的关键支柱

王启明

21 世纪后的社会将会是一个物质、精神文明高度发达的信息化社会，社会的生产、管理和人们的生活、社交、娱乐活动所需求的信息量及其加工处理的速度都将会有惊人的数量级上的提高，单元时间的观念将会从纳秒（ $10^{-9}$  秒）进入皮秒（ $10^{-12}$  秒）的阶段。

尽管微电子技术依然仍会是信息技术的主要支柱，但是，由于电子在回路中的传输受到回路分布参数延迟效应的局限，难以突破纳秒的门槛，因而，承受不了更高速率信息流的传输。光无论在自由空间或在波导回路中，却能保持以光的速度传播，因此在高速运行的信息系统接口部分，用光子作为信息的载体就会大大提高信息系统容量的承受度。就从这点来说，光电子技术（或光子技术）在未来信息高技术领域中将占据极为重要的地位，甚至会成为推动一次信息技术革命的生力军。

光电子技术是在 60 年代激光器（尤其是 70 年代室温连续运行的半导体激光器）问世之后，电子技术与光子技术（或光波技术）的自然结合与扩展，它不仅拓展了传统电子技术的功能，并使之有更强的适应性。光电子技术的发展是由社会从需求提出的，因此，它与其他技术的结合已在社会各个领域发挥出越来越大的作用，其应用领域包括通信、信息处理、信息存储、图文显示、自动控制、军事监测、光电对抗、武器制导等等。

广义的光电子技术包括光子与物质（电子）的相互作用所引发的诸多物理效应及其应用，例如激光加工，激光测量，外光电效应，光阴极甚至激光分离同位素等。

然而，当前发展最为迅速，其影响之最为深远的要算信息光电子技术，信息光电子技术所指的就是它在信息载入、传输、交换、存储、处理与读出再现的完整过程中的体现与应用。

光通信是当今光电子技术最具代表性的重大成就，人们曾乐观地估计，随着波分复用、码压缩等技术的应用，一根光缆所荷载的容量就足以满足全球的话音通信，未来的信息化社会人们如何工作、生活，现在还难以想像得到，但诸如可视电话会议，全自动化无人操作工厂，全球信息联网必将到来。一台个人计算机加上一台电视机甚至就能做到“秀才不出门，全知天下事”、对股票行情、商品应市、娱乐节目和天下大事都了如指掌。

正在迅速发展的多媒体光通信技术就是这种超大容量的信息联网的基础，美国克林顿政府最近提出的信息高速公路计划，就是要实现这一宏大的目标。

由于光纤对不同波长折射率存在差异，因而组成光脉冲的不同谱份就表现出具有不同的传播速度，这个结果导致了光脉冲码型展宽，如在很高脉冲频率下传输的相邻光脉冲波，就可能互扰，造成误码，即使用单色激光传输由于谱线本身有一定宽度，在长距离传输中也会产生这种效应。当前人们已提出发展一种新的光孤子传输技术，用一定宽度（10 皮秒）功率密度高的光脉冲在光纤中传输，利用光纤非线性效应对色散的自补偿，能够保持光脉冲的自调准整形。决定光孤子取得发展的重大因素，则是由于大功率半导体量子阱激光器作泵浦源的光纤放大器的成功。使它能够在长途传输干线上，沿途补充传输光孤子损失掉的能量，以保持自调准整性的光功率需求，这种光

孤子系统传输容量的目标将是/秒。预计 21 世纪初它将会在洲际跨洋干线上进入工程使用。

巨大的信息流量要求极高速的处理技术，电子计算机运算速度的大幅度提高将期望光子互连技术的应用，由于光互连延迟将由光子的传播速度所决定，至少可以提高三个量级达到皮秒（ $10^{-12}$  秒）的水平，接近电子逻辑的开关速度的局限，单机运算速度有可能达到每秒 1000 亿次。

激光互连技术的采用，不仅在于大大缩小了互连延迟，由于激光具有的相干性以及光在空间的可并行及交叉传输的特性，无疑它将会大大促进计算机实时并行处理技术的发展。例如利用预制的全息反射片，就能够把一束传输光分解为一个二维光斑矩阵，以实现多路分解并行处理，光互连技术的引入还有可能发展成功三维立体光互连。尤其值得指出的是当前正在发展的神经网络计算技术，它是未来人工智能的硬件基础，神经网络的特点就是诸多神经元间有极高密度的交叉互连，因而具有广泛的联想、对比和模仿、学习功能。如何实现互不干扰的高密度交叉互连，这在电子技术上难度极大，而光互连则提供了易行的途径。

由于光互连技术的采用，人们就可以把全息存储、光学变换等光学技术引入到电子计算机的信息处理过程中，这将大大拓展电子计算的功能。

目前，通过光纤传输的中心处理机与子机和终端的光互连，早已商品化，现在的主攻目标是实现插板之间的光互连，而下一步自然是芯片之间的光互连。普通的水平腔的端面发射激光器结构，要实现高密度光互连是困难的，必须发展功耗低、速度快的微型化垂直腔面发射激光器，半导体量子阱入构材料的成功，已使这种垂直腔面发射激光器成为现实。例如，现在它的工作电流可低至 0.2 毫安，响应速度可达 40 吉赫，10 位集成度的面阵，总电流为 2 安培，功耗不到 10 瓦，因而已更接近实用的水平。

硅基微电子芯片仍然会是超高速计算机的心脏部件，光子互连如能立足于硅基材料上实现，无疑对光电子产业化将会带来革命性的突破，现在的半导体发光器件，都用化合物材料，如砷化镓、磷化铟做成，化合物材料及器件工艺都远比硅昂贵，硅基微电子今天已是相当成熟的规模产业，因此发展硅基光电子学意义重大。关键问题是硅属间接带材料，发光效率比化合物砷化镓要低三个量级，人们正从多方面探索制备高效率硅基发光器件的途径，如利用硅、锗合金构成量子阱材料，或是人工改变带结构，或是提供对注入载流子的空间局域度，从而达到提高电子发光跃迁的效率，已经发现  $\text{FeSi}_2$  硅化物是一种直接带材料，有希望获得高效率发光。近来有人考虑如果能找到一种与硅匹配的高带隙材料，做成变宽度级联式量子阱结构，有可能绕开带结构的局限，而在导带（或价带）内实现电子跃迁高效率发光。无疑这是人们关注的一个重大的课题，有可能在 21 世纪初得到突破，那时全硅光电子单片集成将会应运而生，光电子芯片将会进入规模化的产业阶段，其对信息技术发展的影响意义深远。

光盘技术在信息存储上的应用已经相当成熟，家用音频、视频光盘已进入家庭用户。但作为信息高技术的要求，存储密度仍需进一步提高，记录介质和写入光源是关键，越短波长的光源会聚光斑的尺寸将越小；存储密度也就随之提高。现在已用氮化镓、硒化锌等材料成功地研究出蓝光半导体激光器件，并有可能用宽带隙材料研制出紫光甚至紫外光半导体激光器，那时，存储密度就可能提高到 100 亿字节的水平，逐渐逼近人的大脑的存储密度。

蓝、绿光半导体激光器的问世，在水下传输和全固化全色图像显示等方面也将开拓出新的局面来。

光逻辑技术的发展现在已经有了基础，例如利用量子阱材料的非线性光学效应，人们已经成功研制出自电光效应 SEED 双稳态光开关，甚至做出 256 位集成面阵，为光逻辑运算的发展奠定了基础。

光学双稳态技术不仅用在发展光计算技术方面，首先考虑的是把这种光逻辑门面阵用于光信息传输网络的高密度交换系统中，这种器件功耗只有皮焦（ $10^{-12}$  焦）256 × 256 位集成规模的芯片，总功耗还不到 1 毫焦。

综上所述，可见光子和光电子技术对推动 21 世纪信息技术的发展至关重要，光通信、光盘技术的成就虽然已充分揭示出光子技术的巨大潜力，但它还刚刚崭露头角，它如同一处女地期待着人们去开发。海湾战争中光电子技术的采用起了重大的作用，从某种意义上来说是一场以光电子为主导的高技术战争。

当今工业化的世界各国无不把发展光电子技术列为国家高技术重点发展目标，日本早在 1981 年通产省就雄心勃勃地组织 13 家大公司投入 1.5 亿美元组建了二代的光技术研究所，日本科技厅也一再把量子波光技术列为重大项目，予以支持。光技术的研究虽源出于美国，但直至 1984 年美国觉察到日本已悄悄获得重大进展之后，急切直追组织了若干大学，建立了光技术研究中心，实际上当前 AT&T Bell 实验室有相当比重的研究开发工作是倾注在光子器件与技术的研究与应用，IBM 公司则在瑞士建立了从事光电子技术开拓的研究中心。

正是在这种发展背景下，“863”高技术计划的制定把光电子技术列为 13 个主题项目之一，“863”计划光电子主题专家组为集中力量发挥优势，创建了“863”光电子器件工艺研究中心，依托在中科院半导体所内，向全国“863”主题开放使用，为新一代量子阱光电子器的发展创造了优越的条件。

1991 年“863”计划实施五周年时，小平同志题词“发展高科技，实现产业化”，及时指出在当今开放性的国际竞争社会中，经济实力的发展至关重要，而高科技产业又是未来国际实力竞争的龙头产业，因此，在我们立题开展光电子高技术研究的同时，必须提高市场意识，并尽快部署应用开展工作的起步。基于这种指导思想，国家计委于 1992 年底又批准在中科院半导体所内立项建立一个光电子器件工程研究中心，目标是要建成一个发展光电子器件产业化的工程试验环境，为光电子高技术研究成果就地向产品转化，创造了条件。以上决策说明我国对发展光电子高技术予以极大的重视，相信只要组织得力，路线正确，条件保证，通过全体科研人员的团结努力和一定的时间的艰苦奋斗，我国光电子技术的发展一定会走到国际发展的行列。为我国 21 世纪世界信息高技术产业的发展做出贡献。

## 王淦昌



1907 年出生于江苏常熟。中国科学院院士，中国核工业总公司科技顾问，我国实验原子核物理、宇宙射线及基本粒子物理研究的奠基人之一。1929 年毕业于清华大学物理系。1930 年赴德国柏林大学，在迈物纳教授指导下从事 衰变能谱研究，1933 年获得博士学位。1934 年回国担任山东大学教授，1936 年后任浙江大学教授。在其科学研究的历程中，他独具卓见地提出了验证中微子存在的实验方案；在美国，他利用宇宙线研究了  $\mu$  介子衰变特性；在前苏联杜布纳联合原子能研究所工作时，他直接领导的研究组发现了反西格玛负超子。

他还是我国核武器研制的主要奠基人之一，并独立地提出了用激光打靶实现核聚变的科学设想。他是二项国家自然科学一等奖和一项国家科学技术进步奖的主要获得者之一，为我国科学技术事业和国防建设作出了卓越贡献。

## 21 世纪及未来的能源——核聚变能

王淦昌

原子能可分为裂变能和聚变能。现在的核电站是利用铀原子核分裂时发出的裂变能，而科学家正在积极研究中的是重氢（氘）核和超重氢（氚）核聚合时发出的聚变能。由于氘存在于海水中，氚可以通过两氘核相互碰撞的核反应产生，或者在反应堆中由锂—6 原子核吸收中子而获得，因而它们的来源可以说几乎是无穷的，因此，可以认为实现可控的核聚变是人类最终解决能源问题的途径。而且，与铀核裂变不同的另一优点是，这种氘与氚的融合反应直接产物是非放射性的，所以不像铀核裂变那样产生大量放射性核素，成为对环境的潜在污染源。因此核聚变电站有可能做到对环境无害。我们熟知的太阳的源泉即是轻原子核聚变所释放的能量。因而，早在 30 年代就有科学家在考虑如何开发这种更好的能源。但是，要使带正电的氘核与氚核在足够短的距离内发生聚合反应，以抵消带电粒子的相互排斥力，就需要粒子有很大的动能，相当于几千万度甚至几亿度的高温。要达到这个目的，有两种办法。第一种办法是使带电粒子在特殊设计的真空容器内用各种方法使之不断加热，并同时用磁场将粒子流约束住而不致向外膨胀或碰到容器壁，被约束的离子碰撞而引起聚合反应。这就是磁约束核聚变（MCF）。这种方法开始于 40 年代，到 60 年代更为成熟。其中一种称为“环形磁场的真空室”方法，按其俄文字首缩译为“托克马克”最为完善。

第二种方法可以说是基于微形氢弹的原理，称之为惯性约束核聚变（ICF）。即用一个充满氘氚气体、半径约 3 毫米的小球，在其四周均匀地用激光或带电粒子（例如锂离子）照射，使小球表面吸收束的能量而蒸发，因而反冲向内猛烈压缩。球内氘氚气体受到高压并达到高温，先在球中心发生聚合反应（“点火”），然后扩展到整个小球，使小球“爆炸”，产生巨大的聚变能。如果小球内装有约 5 毫克的氘氚气体，每秒钟有 5~6 次这样的小球爆炸，就可以产生 100 万千瓦的电能。这就是惯性约束核聚变（ICF）的极简单的描述。

从上述两种获得聚变能的方法可以看出，它们的机理有很大区别：前者的动作过程比较慢；后者相反，动作过程极为迅速。但是，两者都需满足相同的条件，即氘或氚核的密度，也就是每立方米的核子数  $n$ ，与聚变反应持续的时间  $t$ ，这两个参数的积  $nt$  是相同的。两者的  $n$  的差别悬殊， $t$  的差别也很大，但  $n$  和  $t$  的乘积仍大致相同，即在温度为 5 千电子伏的条件下， $nt \approx 10^{14}$  秒/米<sup>3</sup>。有关氘氚聚变反应的这一公式，就是有名的劳逊（Lawson）判据。本文因篇幅有限，不能介绍这一判据是如何得来的；读者若有兴趣，可参阅有关专著。

在此必有人问：两种方法，何者更优或更有前途呢？这问题目前尚难于回答，需待两种方法都取得实际经验，不仅要经过科学可行性和技术（工程）可行性验证，而且还需要商业堆演示和商业推广阶段，比较一下何者产生能量更为安全、方便、可靠、便宜，才能断定。虽然目前已有不少学者认为，惯性约束聚变方法的驱动器部分（如激光，粒子加速器等）与氘氚小球（即靶球）是完全分开的，维修方便；而磁约束聚变方法的各个部件相互关联，构成一个整体，不能把某一部分称为“靶”，另一部分称为“驱动器”，维修困难的多，因此前者比后者要优越。这种看法是有一定道理的。但是，总

的说来，还得看今后的发展才能断定。然而应当指出的是，无论何者最后在竞争中取胜，聚变能无疑将成为下世纪及以后的重要能源。

磁约束聚变以托克马克方法发展最快，到 90 年代已达到国际合作进行科学可行性验证阶段（见《科学》杂志 1992 年第 44 期钱尚介的综述文章）；欧洲联合托克马克装置已实现氘氘反应持续时间一两秒钟，并获得不足 2000 千瓦的能量。不久前美国 Princeton 大学的 TFTR 装置获得的氘氘反应的功率为 5.6 兆瓦及 6.4 兆瓦。目前，美、日、欧、俄等国正在共同建设一台国际托克马克装置，简称 ITER，并欢迎在这方面有基础的国家参加，我国正在考虑中。国际上较乐观的估计是，到 2030 年左右磁约束聚变可达到商业化阶段。惯性约束聚变的研究，起步晚些，但在驱动器及靶物理方面均已取得了长足的进展，在美国 LLNL 正在进行靶球点火工作。虽然目前还未确定最终驱动器方案，但科研工作进展很快，估计在 2040 年可实现商业化。

我国的磁约束聚变研究于 1958 年起步，40 余年来在成都西南物理研究院、合肥等离子体研究所及北京物理研究所已分别建有多座试验装置。其中，前一单位命名为“中国环流器一号”（HL—1）的托克马克，工作非常出色，在国际上常被称赞。该装置前一两年成功地进行了低混杂波电流驱动实验，其中大功率速调管和超高波导陶瓷密封多结阵天线的研究，填补了我国在这一领域的空白；弹丸注入系统的研制成功，使 HL—1 中心等离子体密度及粒子约束性能有较大提高，此外还实现了电子回旋共振加热实验等 3 项。使“中国环流器一号”的实验研究进入国际核聚变研究的前沿，并取得了一批重要成果，特别是等离子体使它的密度大大提高，为国际核聚变研究作出了重要贡献。到目前为止，等离子体约束时间约为 300 毫秒，密度已达到  $1 \times 10^{20} / \text{米}^3$ 。这在国际上可算是很不错的成就了。

合肥等离子体所，以前曾制造过 HT—6B、HT—6M 等小型的装置，还在 HT—6B 上成功地进行了外加螺旋场物理实验，获得很好的成绩。不久前他们从前苏联得到一个名叫 T—7 的超导托克马克装置，并把它完全更新，只保留了原来的超导线圈和铁芯基础，其余部件全部做了大规模的改造或重新加工制造，再加低温工程的制造，包括两套液氮系统和两套液氦系统。到今年，这个改造成名为 HT—7 的一台超导托克马克装置已宣告完成。主机环体中心磁场达 2 万 2 千高斯，达到了原 T—7 装置超导磁场的运行参数。相信今后不久必将从这个装置得到更辉煌的成就。

我国的惯性约束聚变研究，开始于 1964 年，可说与其他先进国家如美、俄等同时互相独立地起步的。从研制大功率激光装置起，到现在已发展到驱动器、制靶、试验、诊断与理论等五个部分的配套研究。由上海和四川绵阳的两个研究所联合建设的一座钕玻璃激光装置，激光波长为 1.06 微米，三倍频后得 0.35 微米，能量为  $2 \times 800$  焦，功率为  $10^{12}$  瓦，被张爱萍将军命名为“神光”装置，打靶工作已进行多年，成果显著，例如（ ）在激光打靶的空腔靶内温度已达到 160 电子伏，并从氘靶出中子；（ ）测得类氘的软 X 光激光输出近于饱和。目前正在研制神光 号装置，它的指标比原来的神光（现在名为神光 ）能量大三倍。而且正在设计神光 ，指标比神光 大八倍。预计到 2000 年，或跨世纪才能制成。

另外，1983 年起，在北京原子能研究院开始建立氟化氪（KrF）气体激光装置，激光波长为 0.25 微米，重复性能好，发光效率又高，是惯性约束聚变很有前途的候选者之一。目前其能量虽只达到百焦耳级，但工作有特色，

在国际上也颇有声望，目前正在搞角多路传输及 MOPA 系统等措施，使整个装置先进，为下一步工作打好基础。

## 冯端



祖籍浙江绍兴，1923 年生于江苏苏州。固体物理学家。1946 年国立中央大学毕业，历任中央大学物理系助教，南京大学助教、讲师、副教授、教授等职，1980 年后任南京大学固体物理研究所所长，1984～1988 年任南京大学研究生院院长，1986～1993 年任固体微结构物理国家重点实验室主任。1980 年当选为中国科学院数理学部院士，1993 年当选第三世界科学院院士。1991～1995 年任中国物理学会理事长。

他领导的晶体缺陷研究获 1982 年国家自然科学二等奖，并在国际上首次观测到准位相匹配的非线光学晶体的倍频增强效应。发表论文 100 余篇，主持撰写专著《金属物理》、《凝聚态物理学新论》等。

凝聚态物理学向化学、生物等学科的渗透仍将继续，甚至将导致物理学本身面目的改变

在世纪之交即将到来之际，展望一下 21 世纪中凝聚态物理学的可能进展，将是一种颇令人感兴趣的事。这里所谈的，无非是就 80 年代以来学科发展趋势作适当的外推。显然不可能说准。由于科学发展自有其不可预测的一面，一些真正重大的进展会失之交臂，将是毫不足怪的。

### 一、新有序相的问题

对称破缺导致有序相的出现，一直是凝聚态物理学的核心问题。80 年代以来，一系列新有序相（例如重费米子系统、有机导体与超导体、氧化物高温超导体、C60 超导体等）的发现，引起了学术界的普遍关注。看来，这方面的发展势头方兴未艾，将会持续到下一世纪。而已经发现的新有序相的基态、无激发和缺陷等机制的认定，也尚未解决。所遇到的困难，可能是这里接触到强关联的电子系统，而过去凝聚态物理学所成功处理的乃是弱关联的电子系统。有关强关联电子系统较彻底的解决，看来也将是 21 世纪的事。

### 二、纳米科技与相关的物理问题

电子学与光子学是和凝聚态物理学密切相关的技术。它们的高度发展是凝聚态物理学取得巨大经济和社会效益的明证；反过来，这些技术也对凝聚态物理学提出新的挑战。器件的进一步微型化将不仅涉及几何尺寸的缩小，也导致新的物理规律的揭示。从 70 年代以来，有关量子阱、异质结与超晶格的研究成为半导体物理的热点领域，占有愈来愈大的比重。这一趋势已向凝聚态物理学中的其他领域扩展，磁性多层膜和超导多层膜就是例子。以量子阱进一步降低维度，又导向了量子线和量子点的研究。相干波的量子输运也在介观物理这领域得到体现。进而库仑阻塞效应和单电子隧穿现象的发现又演示了单电子电子学器件的物理可行性。总之，这些领域构成了当今研究的热点，其活动看来是要延伸到下一世纪，而取得效益也显然是下一世纪的事。

另一方面在大块凝聚态物质与单个原子、分子之间空白的过渡区域，正在形成原子团簇研究的新领域。将团簇汇集而成的纳米材料，将物理与材料设计汇为一体，也是极有发展前景的新材料领域。隧道扫描电镜以原子成像向操纵原子技术方面的发展，也为纳米科技提供了有力的新技术。

### 三、面向复杂的物质世界

物理学的研究是从处理简单系统的规律入手的，牛顿力学，麦克斯韦的电动力学，均是如此。在经典物理学中物的成份较小，理的成份较大。但自从量子力学和统计物理的发展使人们掌握了认识物质世界的钥匙，使物理学中物的成分与理的成分相互平衡，平分秋色。随后是粒子物理与凝聚态物理

分道扬镳，前者探索更微观领域内简单系统的基本规律；而后者则面向复杂的物质世界。凝聚态物理学发展的本身，也体现了从简单物质向复杂物质发展的规律：导体从铜向聚乙炔，半导体从硅向砷化镓到 — 和 — 族超晶体，超导体从铌到  $Nb_3Sn$ ，再到钇钡铜氧多元化合物，都说明了这一趋势。凝聚态物理学重要成果之一乃在于初步理解了物质系统层现性质，由对称破缺导致序参量和广义刚度的出现，这是一个绝好的例证；其他如涉及遍历破缺的相关问题尚处于更原始的状态。无论如何，面对复杂的物质世界，物理学界不再是手足无措。多层次地运用层现性质，就可能将处理简单物质行之有效的种种方法逐步引伸去处理化学成分和结构层次更为复杂的物质。德燃纳与爱德华兹等在液晶物理和高分子物理等领域中卓有成效的工作可以作为例证。看来，凝聚态物理学向化学和生物等相邻学科中的渗透仍将继续，甚至将导致物理学本身面目的改变，物的成分将进一步加重，可能会盖过理的成分，这也许是 21 世纪物理学的重要特征。

## 刘东生



1917年生。天津人，第四纪地质学、古脊椎动物学、环境地质学家。1942年毕业于西南联合大学。1987年获澳大利亚国立大学名誉科学博士学位。中国科学院地质研究所研究员。早年师承杨钟健进行鱼化石研究。1954年开始从事黄土研究。提出关于黄土—古土壤序列 250 万年来古气候多旋回学说，通过古地磁磁化率与深海沉积中氧同位素结果比较研究得到证实。开辟了地球上大陆与海洋沉积环境的对比，为全球变化提供依据。1964年起参加和领导了希夏邦马峰、珠穆朗玛峰、托木尔峰、南迦巴瓦峰的登山科学考察。60年代末开创我国环境地质研究。1991年在南极长城站工作。

### 一、地球科学与人类未来

太空中这颗蓝色的地球，是我们人类的家园。探索了解地球，揭示它的形成、组成、构造和演化，是地球科学的基本任务。因此，从广义上说，地球科学是关于人类家园的科学，是关于人类生存的地球环境的科学。

在过去的几个世纪中，地球科学已经取得了举世公认的巨大进展。然而，促进地球科学发展的主要推动力，并不是地球生存环境这个比较抽象的概念。人类生活的需要，发展经济的需要，技术开发的需要，战争活动的需要，这种非常实际的利益需要推动着地球科学的发展。地球为人类准备了丰富的水资源、土壤资源、矿产资源、生物资源、气候资源，努力调查和开发利用这些资源，以满足经济和社会活动的需要，曾激励着几代人的地球科学工作者为之奋斗。地球科学为全球经济水平的提高和生活质量的改善作出了不可磨灭的贡献。

随着人类经济活动对地球环境愈来愈大的影响，对地球环境的研究也愈来愈受到重视。本世纪 60 年代一系列由环境污染引起的公害病的出现，震撼了世界舆论，成为 1975 年联合国破天荒第一次召开世界环境大会的直接原因。但在那个时期，在人与环境关系的认识上，更多的是揭示地球局部的或区域性的污染现象，更多的是强调爱护和保护环境。“只有一个地球”的口号生动地反映了当时人类要求爱护和保护环境的的心声。

对地球科学的发展具有里程碑意义的变化发生在 80 年代。由于观察到大气二氧化碳、甲烷等温室气体的全球性持续增长，南极上空出现了臭氧洞，地球表面何留下来的为数不多的热带雨林正在迅速消失，全球性土壤侵蚀在增加，全球性淡水供应紧张，全球性气候异常和自然灾害频繁，地球上从未有过的许多有毒有害物质愈来愈多，然而地球上的生物物种正以惊人的速度在减少。地球环境的日益恶化、资源日渐消耗，会使得地球上原本繁多的生物种类日渐灭绝，那么同属于“大自然花朵”的人类是否也会遭到同样的命运？这颗养育人类的地球到底是否还能持续的居住下去？如何来改变这种危险的趋势？如何做到把人类的经济活动与地球环境的变化协调起来？社会期待着地球科学作出回答。

理智地认识到人类前途可能出现的危险，给地球科学的发展带来了前所未有的机遇。地球科学终于在 20 世纪行将结束的时候获得了一个新的推动力——全面深入认识人类生存的地球环境。它来源于人类对本身与地球关系的反省，来源于对地球环境重要性的肯定，来源于对原初那个比较广义、但却具有根本意义的关于地球科学的研究范畴的重新认定。由于这种新的推动力与人类自身的前途休戚相关，可以预期它将是强有力的。它与原先推动着地球科学前进的动力结合在一起，将使地球科学更加充满活力地迈向 21 世纪。

### 二、21 世纪的地球科学

21 世纪的地球科学将责无旁贷地肩负起阐明地球环境形成和演变的责任。现在已经知道，我们居住的地球环境是一个由地核、地幔、地壳、海洋

和大气组成的运动着的圈层系统，在地球内部能量和外部太阳能的驱动下，地幔内部进行着物质和能量的对流，飘浮在地幔上的岩石圈板块相对运动，构筑了现今海洋和大陆的分布，高山和平原的形成，使海洋和大气之间、陆地和大气之间、陆地和海洋之间进行着不断的物质和能量交换，生物活动则贯穿其中。地球科学家相信，正是这些地球过程造就了适宜于人类居住的气候和地质环境，养育着人类的生存。只有人们精细地、定量地阐明上述复杂地球系统的作用机理，阐明人为活动对这个地球系统过程的影响，才可能弄清楚地球环境的演变规律，才有可能把握协调人和自然环境关系。

值得强调的是，地球科学在论证地球环境随时间而演变的历史方面是独一无二的。大陆上的各类岩石、海洋沉积物、第四纪沉积物等，分别贮存着距今几十亿年、几百万年到近几十年期间地球环境演变的丰富信息。它们是了解人类出现前地球环境自然演变过程的唯一途径，也是与今后任何有关地球环境演变的数学模型进行比较的参考标准。提高这些地质记录的时间分辨率，诠释其非线性过程特征，寻找与现代及未来地球环境演变趋势的接口等等，至今方兴未艾，大量的工作还有待今后进行。

21 世纪的地球科学应当在开发利用地球的生存空间资源方面作出崭新的贡献。现在的情况是，一方面，全球人口激增，一些区域人口密度很大，似乎人满为患；另一方面，地球上又还有很多生存空间资源等待人类去开发，如广阔的冻土地带，浩瀚的沙漠，高耸的高原等等。中国的情况也是如此。在开发生存空间资源方面，知识和资金同样重要。然而知识是需要积累的，只有对这类地质环境的各个方面有了充分了解，才能以最经济的开发方式获取最大效益。现在世界上的一些沙漠国家已经在利用环境地质的研究成果和先进技术，因地制宜地开发利用环境，养育国民。我们应当对此有所考虑，在控制人口增长的同时，如何开发利用我国广阔的生存空间资源，为缓解人口增长压力，均衡人口分布，促进国民经济持续增长作出地球科学特有的贡献。

21 世纪的地球科学仍将面临维持充足的水资源和矿产资源供给的重任。在经历了几个世纪对矿产资源的勘探和开采之后，地球上的资源是有限的事实，已愈来愈为人们所接受。它不仅将激励地球科学从地球整体系统作用机制的新高度来更深入地评估地球矿产资源的形成和分布，而且对有关资源的综合利用、废旧矿山的回采、特别是寻求可替代资源方面的工作已紧迫地提到了议事日程。人类的历史已经证明，地球科学在寻求供给人们必需的水资源、土壤资源和其他不可更新的自然资源方面曾起着何等重要的作用。今后，在寻求人与环境持续发展的努力中，地球科学的作用只会增加而不会削弱。

21 世纪的地球科学将探索对付自然灾害的积极对策。对人类生命和财产安全构成威胁的地震、火山喷发、热带风暴、海啸、洪水等，是地球环境演变过程中的自然现象，在人类社会出现前就已出现。当人类的经济活动和生活行为不能与之相适应，它们就会给人类社会造成重大灾害。因此，我们应该了解这些重大自然现象的形成和发展规律，以便协调人类和它们的关系，减轻或避免这些自然过程对人类社会的灾害影响。如前所述，这只有在深入了解整个地球系统的运行规律后才能做到。正是在这个意义上，地球科学的研究对减灾防灾有着根本的指导意义。另外，还应当看到，像地震、火山喷发、热带风暴、海啸等等又是地球巨大能量的释放过程，将这些无污染的巨

大能量转化为人类所用，对人类社会持续发展的重要意义是不言而喻的。地热的开发、风能的开发，以及正在试验的海浪发电等都证明，21 世纪的地球科学在开发利用这类地球能源方面大有可为。

走向 21 世纪的地球科学充满活力，与其在长期发展过程中不断更新自己的研究方法，吸取其它学科的知识、紧密适应社会的需要而提出新的研究目标有关。现代的地球科学不但和物理学、化学、生物学、数学、天文学等自然科学领域的学科愈来愈紧密地融合起来，而且还和社会科学愈来愈紧密地结合起来，它的着眼点已从地球内部、地表、扩大到从地球外层空间；它的研究手段除了传统的各类测量分析仪器、增添了精密的空间观测技术；它的研究方法已是野外调查、实验模拟和数学模型的紧密结合；但最重要的，还是紧密适应人类社会发展的需要。正如本文开头部分所述，当人类社会前所未有地关心自己的家园，关心自己生存环境的变化，强烈要求经济活动应与地球环境协调发展，并以《21 世纪议程》全球签约的形式发出呼吁的时候，对以研究地球环境为己任的地球科学来说真正是一个历史性的机遇。我们地球科学工作者应当为此作好准备。满怀信心地去迎接即将到来的 21 世纪——地球科学的世纪。（本文作者还有万国江和洪业汤）

## 刘光鼎



1929年12月生。1952年毕业于北京大学物理系。现任中国科学院地球物理研究所研究员、教授，中国科学院院士、地学部常委、第三世界科学院院士，IUGG中国委员会主席。50年代，曾任教于北京地质学院并任前苏联地震勘探专家翻译。50年代末，开始从事海洋地质地球物理调查与研究。历任地质部第五物探大队、第二海洋地质调查大队技术负责人、地质部海洋地质调查局副总工程师、综合研究大队大队长、地矿部海洋地质司副司长、地矿部石油地质局副局长，组织并领导国家重点攻关课题（75—054）项目，主编中国海区及邻域地质地球物理系列图（1:2M）。曾荣获国家自然科学基金二等奖和竺可桢野外奖，李四光科研荣誉奖，地质矿产部科技一等奖，已发表论文数十篇。

## 21 世纪的地球物理

刘光鼎

地球物理，和地质与地球化学一起，是当代地球科学发展的三大支柱。傅承义院士曾经十分明确地指出，地球物理的基本任务是认识地球，同时为资源勘探、环境保护和灾害防治服务。

在 20 世纪里，对地球的认识得到不断地深化。其线索基本上是沿着大陆漂移、海底扩张和板块大地构造而发展的。50 年代中期，海底扩张说的出现，引起 1957 ~ 1959 年的国际地球物理年活动，开创广泛国际合作总结地球科学成果之先河。特别是大洋地球物理所取得的累累硕果：洋脊中央裂谷两侧的磁条带异常、裂谷受横大断裂错动而形成的转换断层与海沟之下震源深度所显示的俯冲带，构成岩石层板块的边界和板块运动的传动带模式，从而取得全球板块大地构造的重要认识，并在地球科学中引起一场深刻革命。由此，以及随后在国际上出现的地壳上地幔计划（1960 ~ 1969 年）、地球动力学计划（1920 ~ 1979 年）、大陆岩石圈计划（1980 ~ 1989，1990 ~ 1999 年）以及全球地学大断面（GGT）计划，对此学说的验证与深化，都将地球物理作为先导，努力使地质与地球物理相结合，并作高层次的综合研究，以取得规律性的认识。

资源勘探、环境保护和灾害防治是当今世界上为求得社会进步和人类生存的重大课题，也是地球物理应用的广阔领域。对中国来说，资源的勘探与开发存在着许多亟待解决的问题。例如：我国石油天然气的探明地质储量不能保证国民经济发展的需求，必须依靠地球物理技术的进步提供沉积盆地的三维结构，通过地质、地球物理与地球化学的综合研究，取得对沉积盆地演化历史的认识，再作定量的动态模拟，以评价油气，指导勘探；我国油气田开发的采收率低，应通过油储地球物理，以及各种地球物理测井资料，详细描述油气储集体的形成与物性参数，结油气田开发提供提高采收率的依据。再如，我国煤炭产量高，而后备储量紧张；在煤田开发中存在着断层、陷落柱、瓦斯气、老窖水、采空区等一系列问题，而机械化采煤更要求准确了解煤层深度、厚度及其变化。同样，许多重要的金属矿产处于等米下锅的严峻形势下，攻深找盲，寻找隐伏大矿已经成为刻不容缓的课题。地球物理应能提供三维结构，指导勘探与采掘工程，而它与地质、地球化学的交叉、渗透能够认识各种矿床的成矿背景，成矿作用及其时空演化规律。因此，在资源勘探与开发中，依靠地球物理方法与技术来获取地下煤田与矿床的认识，指导找矿、开发，必将提高效率、减少事故、产生良好的经济效益和社会效益。

至于中国的城市环境污染、生态环境恶化等环境问题，以及地震、洪水、旱涝、森林火灾、火山喷发、滑坡、泥石流等自然灾害问题，尤其是巨大规模的经济建设，水利、电力、铁路、交通、等部门已经提出诸如港湾、码头、堤坝、隧道等基础工程和国防工程，都向地球物理提出挑战，同时也为地球物理提供了极其广阔的市场和前所未有的机遇。地球物理应该集中力量研究这些浅层问题的特征，改善自己的理论、仪器和方法，积极地投入这个新领域，在开拓中求生存，谋发展。

应该指出，应用地球物理来解决资源勘探，环境保护和灾害防治问题，必须在地质理论（对地球所取得的规律性认识）指导下进行工作，而国民经济建设中众多实际问题的解决，又必然会反过来加深对地球的认识。这样，

在地球科学中，基础理论和实际应用之间的关系应该是相辅相成而不矛盾对立的，甚至可以认为，它们之间不能也不应该存在一条鸿沟。

其实，在基础理论与实际应用之间，有一个承上启下的重要环节，那就是应用基础研究。它既要为应用地球物理解决实际问题开拓道路，又能够为地球物理基础理论的发展创造条件。

试看 20 世纪地震学的发展。俄国罗蒙诺索夫曾经预言，地震好像一盏灯，必将照亮地球的内部。从笨重达一吨以上的魏歇特地震观测仪器到奇尔诺斯三分量地震仪，确实记录并积累了大量的地震资料，使得地震纵、横波的速度分布对地球内部作出基本的划分：地壳、地幔与地核。但是，应用地震学原理对地下核爆炸的观测和预测地震以防御震灾的实际需求，才促使世界数学地震台网的建立，为岩石层板块大地构造的诞生提供科学依据。我国利用数学台网资料作面波研究和层析成像研究，取得中国海陆地壳与上地幔不均匀分布状态的基本认识，无疑是重要理论贡献。可以设想，宽频带、大动态范围、高分解能力的可移动三分量数字地震仪的应用，对于造山带的形成、演化，以及中国这块拼合大陆的矿产资源蕴藏，都会给出更具体、也更深刻的认识。

当代世界科学技术的发展，反射波地震勘探是进步最为迅猛的学科之一。其推动力主要是世界市场对油气资源的需求。反射地震技术从 50 年代仅有 25 分贝动态范围的光点记录仪器 经过 60 年代 45 分贝的模拟磁带地震仪和模拟处理机，虽然采用共深度点迭加技术，改善了分辨率，但仅能对沉积盆地的结构提供资料，而不能满足勘探油气的需要。70 年代反射地震进入数字地震仪发展阶段，几经更新换代，特别是瞬时浮点技术的应用，使反射地震仪器的动态范围提高到 120dB 左右，再加上小型、大型长至工作站和并行机的应用，各种软件的开发，大有使反射地震的数据采集、资料处理和地质解释往一体化方向发展的趋势。这样，反射地震勘探不仅能够利用反射波的运动学特点提供沉积盆地中各种局部构造的三维结构，而且可以利用反射波的振幅、频率、相位、速度、波阻抗等与岩石物理性质有关的动力学参数，从而出现根据地震相，识别沉积相，判断沉积环境的地震地层学，甚至导致层序地层学的发展。在此基础上，将沉积盆地看成一个地球动力学系统，了解它的构造史和沉积史，再对不同地质时期的盆地原型作具体分析，根据它们的大地构造环境和热体制，对沉积、沉降、应力和构造风格，以及有机质的成熟、运移与聚集进行数字动态模拟，最后对石油与天然气存在和位置和资源量作出有科学依据的判断。而在油气田的开发阶段，油储地球物理则通过各种测井、岩石物性，以及高分解率地震、多波多分量地震、井间层析成像等项研究，与层序地层学相结合，详细描述油气储集体，为开发提高采收率提供依据。还应该说明，正是由于反射地震勘探在解决油气田勘探与开发的实践中，大力地推动了应用基础研究，才使得今天认识地球的基础研究工作有了更好的方法、技术与手段，以致全球地学断面 (GGT) 才规定要应用瞬时浮点数字地震仪、可控震源 (Vibroseis) 并作共深度点反射 (CDP)，同时要求有重力、磁力和地质资料并对它们进行综合研究。

我们粗线条地回顾 20 世纪地球物理所取得的成就，不难导致以下几点看法：

1. 在地球物理的基础研究中，认识地球是其基本任务，应该通过地质、地球物理和地球化学的高层次综合研究，并在全球性国际合作计划中完成。

2. 地球物理的应用研究具有十分广阔的领域，资源勘探、环境保护和灾害防治都有许多紧迫的任务亟待解决，尤其在中国国民经济建设中的一系列重大基础工程项目，地球物理应该而且必须努力进入这些新领域，并作出贡献。

3. 地球物理能否在国民经济主战场上发挥作用，关键在于应用基础研究是否能根据需求在仪器设备、方法、技术上取得突破。一旦应用基础研究有所进展，则将能为地球物理开拓出广阔的应用领域，也势必会推进认识地球的基础研究。因此，地球物理的应用基础研究是科学研究中具有先导意义的，只有紧紧抓住这个环节，地球物理科学事业才能兴旺发达。

回顾历史的目的是展望未来。再有 6 年的时间，我们就将告别 20 世纪，而迈进 21 世纪了。在 21 世纪里，我们希望，而且必须使自己的祖国繁荣富强，自立于世界民族之林，对人类社会作出应有的贡献。

那么，首先应在改革、开放的进程中，把自己的事情办好。在科学技术领域中，“经济建设要依靠科学技术，科学技术要为经济建设服务”，既是已经取得普通共识的基本方针，就必须认真而切实地贯彻执行，并用来自来检验和衡量我们的行动，其范围大到保卫祖国海洋主权与权益，小到每一个工程项目的实施。

当前的科学技术，要“稳住一头，放开一面”，同时又应“有所不为，才能有所为”。在地球物理范畴内，必须首先稳住应用基础研究这一头，才能为进入国民经济主战场而放开一片，也才能促使基础研究得到发展。如果不为于应用基础研究，而有所为于理论基础研究，则有可能坐失良机，既不能很好地服务于经济建设，又难于迅速发展地球物理事业。因此，按比例来“稳住一头”，对于应用领域十分广阔的地球物理将是极为重要的。此比例系数大体应以应用基础研究占 2/3，而理论基础研究占 1/3。

这样，设想经过深化改革、开放的艰苦努力，在 21 世纪之初，能够理顺各种关系，并进入符合于社会主义市场经济的发展轨道，则不仅可以预期地球物理事业的兴旺发达，而且可以在世界科技舞台上看到一批年轻中国地球物理学家崭露头角，以及他们矫健的身手和非凡的技艺，例如：

1. 中国东部中、新生代沉积盆地，具有箕状断陷和复杂断块的特点，将会在已有成就的基础上取得更多的油气，甚至在陆相生油理论的同时，对深源气（He，CO<sub>2</sub> 等）作出贡献。西部塔里木、准葛尔以及吐鲁番——哈密等盆地尽管其条件艰苦，但已经显示出良好的油气资源前景，大规模的勘探开发，将能够使油气资源量和产量得到迅速增长，改变大西北的面貌。此外，南方中、古生代海相碳酸盐岩地区以及西藏地区，也都存在着油气的发现与突破的可能性，其经济和社会效益将是巨大的。至于中国海大陆架和南沙附近油气资源的勘探与开发，是需要大量现代高科技的投入，也正是有志男儿的用武之地。

2. 中国是煤炭大国，年产 10 亿吨以上，居世界前列，而且在相当一段时间里，煤炭还将在中国能源结构中占重要比例。因此，煤炭工业依靠科学技术，大步赶上石油勘探的发展，针对煤田特色，应用高分解率地震、高精度重磁，以及地质地球物理的综合研究，加深对煤盆地的认识，将会节约勘探工作量而发现更多的煤田。如果能将地震、电法、电磁等层板成像技术应用于煤田开发，解决断层、陷落柱、采空区、老窖水和瓦斯气等一系列问题，保证开采的安全生产，则其本身就是重要效益，更何况地球物理能为工程设

计提供精细的三维结构及有关参数，进而提高建井、开发速度，节省钻探，降低事故。

3. 金属矿产，特别是金、铜、银、铀等国家紧缺矿产，当前还不能满足经济建设发展的需求，但不等于说在地下几百米的深度范围内没有隐伏的大型或超大型矿床。问题在于要以地质理论为指导，在地质、地球物理、地球化学综合研究的基础上，具体地分析具体地区的成矿条件，作出科学的预测。到 21 世纪初期时，应该可能发现像金川镍矿那样世界级规模的大矿。

4. 地球物理面向国民经济建设，还会出现一批地球物理健之活跃在环境保护和灾害防治等许多重大领域，为中国社会与自然环境协调发展提供科学依据。

5. 地球物理在解决国民经济建设实践的大量问题中，理论、方法和技术都将得到检验和发展，也将积累大量的资料与丰富的经验。所有这些都是更深刻地认识地球的基础。因此，有理由相信，21 世纪初期在地质、地球物理与地球化学所取得成果的基础上，作高层次的综合研究，必将会取得更广泛、更深刻的对地球的规律性认识，从而达到新的理论高度。

最后，我想，中国从贫穷落后走上小康开放，经历了近半个世纪的漫长时间，但是，许多人都能和祖国同甘苦、共命运，坚持不懈地为振兴中华而奉献自己的聪明才智。这是中流砥柱，是民族之魂。在 21 世纪里，中国将从小康奔向富民强国，仍需要有一批人，也许是更大得多的一批人，怀着为国为民的崇高而伟大的理想，不论时间长短、道路曲折，都矢志不移地给祖国壮丽的社会主义大厦添砖加瓦。只有这批人，其中包括在科学前沿拚搏和在国民经济主战场上克服困难、解决问题的地球物理学家，才是 21 世纪发展蓝图的绘制者。

## 汤佩松



1903年生。湖北浠水人。植物生理学家。1925年毕业于清华学校。1927年在美国明尼苏达大学获学士学位，1930年在美国约翰·霍普金斯大学研究院获哲学博士学位。中国科学院植物研究所研究员、名誉所长。早年发现海星卵受精后呼吸增强和细胞色素氧化酶在植物中的存在；1946年用绿色小球藻证明光合作用的氧化还原电位势在光暗下的差异从而确证了 Van Niel 学说；提出了完整的植物呼吸代谢的控制与被控制理论，在国际上首先证明了高等植物中存在细胞色素氧化酶、植物叶绿体中存在碳酸酐酶以及高等植物体内适应酶的形成；首次证明在同一植物中呼吸代谢途径的多样性，证明糖酵解途径，戊糖支路、三羧酸循环、二羧酸循环、乙醛酸循环并行，并以一定比例在活体中运行，总结呼吸代谢途径的改变及其与其他生理功能相互调节的理论。

## 植物科学与人类未来

汤佩松

科学技术是第一生产力绝对是永远重要的，只有把试验植物学结合到工业、农业、医药、商业中去才能发展，植物科学工作者才能为振兴国民经济贡献力量。这项工作一定要在近十年、二十年内做好，千万不可忽视，在现在和将来都应如此。

植物科学的发展问题，也可说未来的科学，或叫科学学，或叫未来学中的一个问题，我们中国植物学家都要认真地考虑和研究，尤其是对中国今后植物科学的发展。

—

常听人说：“现在 20 世纪是生物学的世纪”。从 50 年代起很多人都说，过去的世纪是物理、化学高潮，现在是生物学高潮，这是个很好的总结。如果 20 世纪是生物学世纪，那么把过去的物理学发展、化学发展、工程发展摆在什么地位？它们现在的发展高潮是不是还存在？新的生物学发展，分子生物学，到底算作现代生物学，还是过去的生物学呢？因为分子生物学本身是从物理、化学，再加上生物学本身发展而来的。因此，这种说法前后存在矛盾。

现代生物科学的特点是学科交叉，或者说“是学科交叉的必然结果”，这个学科的交叉是肯定的，不交叉是落后的。但是，这是现象呢，还是一种结果？我们认为这只是一个表面现象，不一定是必然结果。它只不过是一种手段，但不是一个为了交叉而交叉的结果，而只是方法演变的结果。

生物科学发展是迅速的，是不断演变的，但演变到底是怎么一个演变法，是直线演变，还是进化、革命化，是直线发展还是曲线的发展，是齐头并进的发展还是圆圈式的发展，还是不同的。尽管圆圈式的“发展”是发展了，但是并没有进步，没有创新的一步。这种事例很多，国外同样有。衡量生物科学的发展，应该是螺旋形的发展，而且要分枝，造成新的学科，这就是进步。

国内与国际一样，认为微观比宏观进步，把学科的发展用宏观和微观完全分开了。学科本身只有一个范畴，一个范畴只有一个学科。分为学科的原因是由于操作方法不同，对象不同。微观和宏观都应该发展，不能说哪个先，哪个后，哪个先进。有人一提生物学就是宏观、微观的，好像宏观就是高人一等，反过来，微观研究是高深的。宏观有世界、环境、生态的研究，但不可忽视微观的研究。其实，两者应互相为补，不能分开。科学的进步与落后，不能以宏观、微观去分。如，联合国只提出“环境与人”、“地球与人”的提法，如果以宏观和微观去衡量学科的发展，则是很肤浅的。

有人提出“世界物种危机”，即濒危植物问题。中国不是有红皮书吗？在世界上这是中国的一大贡献，这是很对的。不过，世界上的物种，不管是大的物种还是小的物种，永远保持不变是不可能的。反过来讲，现在的分子生物学或是分子遗传学，尤其是基因的模仿，已能制造新品种。其实基因的

重组、重建，新品种的制造应当属于生物学或植物学的发展中。所以宏观和微观应一样看待，而不能以宏观和微观把学科完全分开。

从科学本身来讲，从“未来学”推测，或用科学的概率论方法去分析，可以简单地画一个曲线图。有些人，甚至有些专家说：“科学高潮已经到了，下半截是往下走”。“最重要的发现已经发现得差不多了”。这个观点我们不赞成。科学的发展是历史的必然，因此，也是有规律可循的。在一定的条件成熟时，才会产生新的理论和实践。例如，植物的矿质营养学说，只有在认识了化学元素、发展了分析化学技术之后，才能在植物生理学中产生，进而发展了化学施肥和化肥工业。科学发展的历史是预测的根据。

假如要真正的去估计、推测今后的发展，一定要把生物学的发展过程搞清楚，才能往第二步走。对植物科学的现在、过去和将来是怎么评价，最后得出结论，才知道应当怎么向前推进。谈科学，不能割去历史的时间概念。

## 二

植物科学是一门基础理论学科，它的任务是研究植物客观存在的自然规律。我们把植物科学发展分为描述植物学时期、实验植物学时期和现代植物学时期（也可以概括为分子生物学时期）。我国植物科学研究的实际情况是：描述植物学高峰还没有掉下来，如，《中国植物志》还没有写完。试验植物学研究仍在慢慢的上升。在中国植物学会 50 周年大会上所提出的“创新植物学”刚刚在起步。那么，在近期内怎样去适应国情，又要去追赶世界植物学研究的最高水平，我们认为：

我国幅员辽阔，植物种类繁多，但我国植物科学发展历史尚短，还有许多基本材料的收集、调查和整理工作没有完成。因此，要加速我国植物学基本资料的收集和研究，也要维持新兴起的试验植物学。但是，最要紧的是新兴的、有活力的试验植物学，一定要结合到农业、工业、现代化农业科学的基础中去进行研究。

科学技术是第一生产力，绝对是永远重要的。只有把试验植物学结合到工业、农业、医药、商业中去，才能发展，植物科学工作者才能为振兴国民经济贡献力量。这项工作一定要在最近 10 年、20 年内做好，千万不要忽视，在现在和将来均应如此。要借鉴国外发展植物科学的经验，但更重要的是根据国情。从我国 140 多年来植物科学的发展历史来看，取得较大成就的人，无不是既有明确目标，又能集中较多力量长期坚持工作的结果。过去我国植物科学战线过长，巨细不分，课题分散。今后，要集中几个优先发展的领域，并能在若干领域跻身于世界先进行列，由此而带动整个科学的发展，因此提议：

- 1、可以选择“植物多样性保护”作为带动整个宏观研究方面的重大课题，组织植物分类学、植物生态学、植物遗传学、引种驯化和植物生物工程等学科参加。组织多学科、多兵种共同攻关，为全球生物多样性保护做出贡献。

- 2、从微观方面引入分子生物学理论和技术，加强代谢过程（或叫生物力能学）、植物细胞生物学和植物结构及发育生物学的研究。组织各分支学科，集中力量研究植物科学重大基本理论问题，如被子植物起源、中国特有植物系统发育、光合作用、生物固氮等。保持少数力量，而且是最精锐的部队、最年轻的人，稳步地、慢慢地、踏踏实实地在 20~30 年内，争取能立足于世

界生物学之林，甚至在某些领域内超过。

3、植物资源的开发、利用和保持的研究，是以造福人类为目标的重要课题。要创造条件，实现若干产品的工业化，获得国际领先的成果。在以后的研究课题中，必须由各学科及单位交叉合作，切勿各自为政，固步自封。

### 三

关于生物（植物）学教学及人才培养问题，这是我国生物学（植物学）及自然科学的基本问题。

加速造就一支年轻优秀的科技队伍，精心选拔培养新一代学术带头人，是保证我国植物科学持续发展的关键。我们鼓励及支持比我们年轻的一代人，但是年轻人应把自己培养成这样的人：忠于事业，献身科学，忠于国家，忠于人民。在学术上你可以坚持己见，可以争论，但最终应服从真理。如果你搞研究能带领一班人的话，就应该尽量发挥一班人的作用：一要循序渐进，从工作一开始，就必须严格要求自己，积累知识；二要谦虚，切勿认为自己无所不知，应当有勇气对自己说，我是无知的，不要让傲慢统治你自己；三要热情，科学对一个人的要求是他的一生，科学工作者在他的工作和探索中应当抱有热烈的情感。（本文作者还有朱澍）

## 严东生



早年就读于清华大学和燕京大学研读化学专业，分别于 1939 年和 1941 年获学士学位和硕士学位。1946 年赴美深造，在伊利诺大学主修陶瓷工程专业，于 1949 年春获博士学位。随后他在伊利诺大学进行了一年的博士后研究，于 1950 年回到祖国。

回国后，他在中国科学院冶金陶瓷研究所任室主任、研究员。1960 年，冶金和陶瓷分为两部分，建立了上海硅酸盐研究所，严东生教授被任命担任副所长，1977 年任所长。1981 年，严东生教授当选为中国科学院副院长，继而于 1984 年至 1987 年任第一副院长。1987 年他从行政领导岗位上退了下来，受聘担任中国科学院特邀顾问。严东生教授是中国科学院院士、中国工程院院士和第三世界科学院院士。

严东生教授获得过许多荣誉。早年他曾是美国 SigmaXi 及其他四个荣誉学会的成员。1986 年他分别被美国伊利诺大学、法国波尔多大学和 1994 年香港理工学院授予荣誉科学博士学位，1984 年他当选为美国陶瓷学会高级会员，1985 年他成为纽约科学院院士，1990 年他先后被选任印度材料研究学会荣誉会员、日本材料研究学会荣誉会员，1991 年荣获日本陶瓷学会颁发的百年国际奖，1994 年被美国陶瓷学会授予杰出终生荣誉会员称号。

几十年来，严东生教授的研究生涯始终与无机材料相联系——高温材料的制备科学与机理，氧化物与非氧化系统（近 10 年来尤其是氮化物系统）的相平衡关系，高性能材料的材料设计与微观结构控制，材料制备与性能的关系，发表论著约 150 多篇。最近他又主持开展了对纳米材料科学的研究。

严东生教授目前除担任中国科学院特邀顾问、主席团成员外，还兼任中科院上海硅酸盐所名誉所长，亚洲各国科学院联合会主席，国际纯粹与应用化学学会衔称理事，中国硅酸盐学会理事长。他还是清华大学、中国科学技术大学、天津大学、浙江大学的兼职教授，并担任上海大学名誉校长。

## 21 世纪材料科学的发展前景

严东生

21 世纪将是在方方面面，发生重大变革的时期。我不愿把它称之为“什么”时代，因为它将是一个各学科交织发展，以至逐步消失它们之间的明确界线的时期。新材料与材料科学将无疑有着持续、高速发展的势头。首先各类新技术的诞生与发展无一不需要新材料，要求材料能与之同步或领先发展；其次材料科学本身就是一个多学科交叉的学科领域，物理学、化学、数学早已渗入，并成为材料科学发展的重要基础，生命科学（生物科学）也已渗入并将更为深刻地渗入。如果深入分析，就会发现许多其他学科也是如此。

下面举一些较有代表性的例子或预测，不求全面，甚至也不完全准确，抛砖引玉，引起科学界的讨论。

首先，已可较清楚地看到信息技术从电子技术到光电子技术，进而到光子技术是自然的发展趋势，新材料必然需要相应地发展以适应这种趋势。以光波导原理为基础，利用光导纤维进行大容量信息传输，已较预测更快地成为巨大的产业。可以预测光子技术到 21 世纪将出现更为长足的进步，因此不论传输、调制、存储等等材料，有必要开展更为深入、有效的研究与开发，而且在许多场合材料器件一体化、集成化的研究尤为重要。它的应用面也将不断拓宽，影响人类生产、生活的众多方面。这一领域的新材料与材料科学的发展将是十分丰富多彩的，涉及到新材料的各个方面，并要求许多领域的科技专家携起手来，更密切地协同合作。

其次，动力机械的效率受到热力学卡诺循环的限制，若干年来，人们一直致力于提高材料承受温度的能力，以提高热机效率，减少燃料消耗，改善环境污染。预计在 21 世纪初叶，有可能实现重大突破，使当前高温材料承受 1050~1100 的水平，提高到 1400，进而到 1600 或更高的水平。氮化物及碳化物以及它们的复合材料是各国科学家付出巨大劳动的研究开发对象，尤其氮化物受到更大重视，因为人们对这类材料可在十分广泛范围内进行设计以及结构与性能的调控。事实上，作为各别部件，世界年生产量现已超过 100 万件，用于汽车发动机的关键部位。同时，这类结构材料在其他若干领域受到更大青睐，特别是在那些对断裂韧性没有苛刻要求的应用领域。

在能源方面，另外一个受到重视的领域是燃料电池，特别是固体燃料电池。它的一大特点是能量转换不受热力学规律的制约。事实上，单体电池的热能转化为电能的效率已达到 80% 以上，大型电池组预计可达到 65%。当前在研制的燃料电池类型有 5 种左右，年投资额超过亿美元，所需研究的问题是多方面的，但材料研究，包括电解质，阳极、阴极以及相关材料与电化学问题是主要着重点，也是保护知识产权的关键。燃料电池可大可小，可联网，也宜于分散使用，是十分清洁、高效、方便的能源。预计在 21 世纪必将有重大突破。

谈到能源，太阳能这种取之不尽的低密度能源，仍一直是世界上受重视的对象。最核心的问题仍然是材料，如何能够高效、大面积、低成本地收集这种能源为人类的各种活动服务。21 世纪应当可以看到突破。

第三，纳米材料与纳米技术是近一些年来受到若干方面科学家重视的新领域。因为，一方面人们已经初步观察到一些新现象、新性能——在光、电、磁、热、力等方面；至于纳米技术，范围就更宽了。与此同时，许多现象尚

是未知数或尚无妥善的解释。更重要的是人们预见到它的广泛应用前景。已组织了若干次国际性的纳米材料会议并出现了纳米材料的专门杂志。预期 21 世纪将是纳米材料开花、结果的时代。

第四，生物材料也是人们十分感兴趣的领域之一。即以牙齿为例。它的基本组成是羟基磷灰石。我们的研究表明，它具有纳米结构，定向性很好，晶界有接近生物体的薄层，因此又具有较好韧性。然而人工合成羟基磷灰石需要一千度以上的高温，也难于得到定向的纳米结构。为什么人体能够在十分温和的环境下合成这类牙齿或骨骼？这就引发出一个十分有兴趣的新领域——仿生合成 (Biomimetic Synthesis)。21 世纪对此应将大有作为。

最后，应当明确说科学的预测本身是很困难的，我上面所谈到的几个方面都是或深或浅已经做了一些工作的重要领域，从而毛估它们在 21 世纪的发展前景。新发现常常是人们所未估计到的，善于抓住科学上的偶然性是科学家敏锐、成熟的体现。近年来，类钙钛矿结构的陶瓷高 T<sub>c</sub> 超导体、富勒球 (C<sub>60</sub>)、富勒管 (Fullerene-tubes) 等的发现都具有这类性质。因此，谈论 21 世纪的材料科学决不应当忽略这一点，当然对偶然性的判断同样是非常重要的。预祝青年科学家们，在 21 世纪这一大有作为的时代，能够摆脱一些传统的束缚，充分发挥才能，做出无愧于民族、国家和科学本身的贡献。

## 严陆光



1935年7月生于北平，浙江东阳人。

现任中国科学院院士，能源研究委员会主任，电工研究所所长、研究员，国家高技术计划能源领域专家委员会委员。

1959年毕业于莫斯科动力学院电力系，回国后在中国科学院电工研究所工作至今。长期从事近代科学实验所需的特种装备的研制和电工新技术的研究开发工作。在我国开创了大能量电感储能装置的系统研制，领导建成了储能 $6 \times 10^7$ 焦耳的合肥7号常温电感储能装置。领导研制和建成了我国第一名托卡马克CT—6的电磁系统，参加了合肥8号托卡马克CT—8的设计和意大利强磁场FT托卡马克的调试。在超导电工方面，领导进行了多方面的应用基础研究，研制成多台实用超导磁体，并在德国与日本进行了客座研究。1988年以来负责组织领导全国燃煤磁流体发电工作。共发表论文60多篇。

# 电工新技术的发展与展望

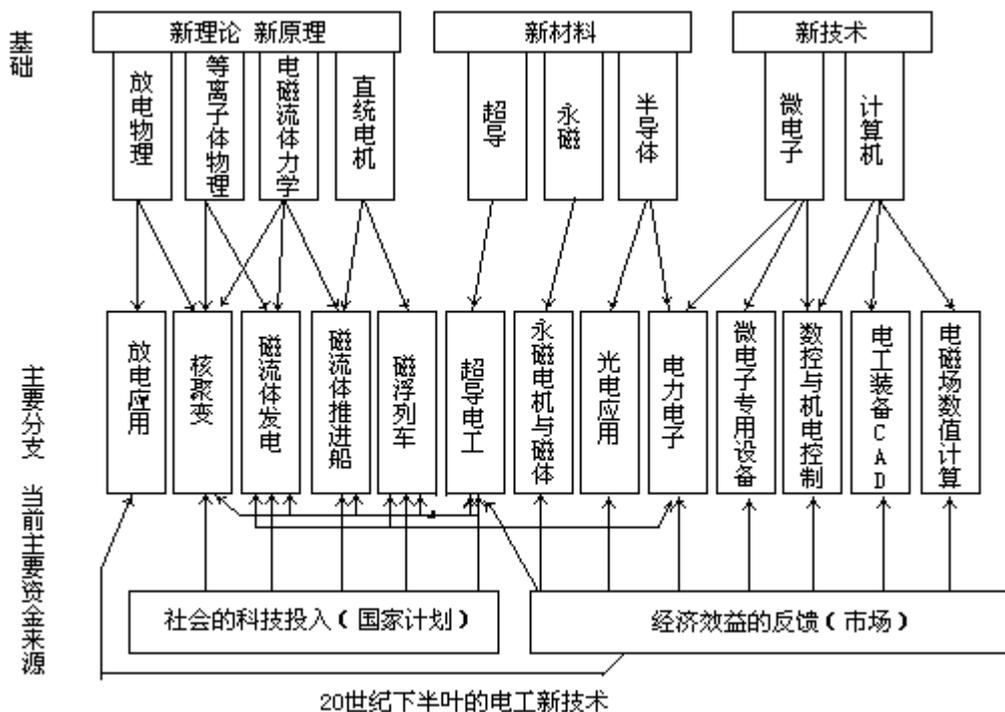
严陆光

电工（电工学、电工技术）是研究电磁领域的客观规律及其应用的科学技术，以及电力生产和电工制造两大工业生产体系。这个比较古老的工程学科大约起始于十九世纪的中、后期，经历了一个半世纪的发展，壮大成为有多分支学科的重要技术科学领域，其发展水平成为衡量社会现代化程度的重要标志。

在电力生产、电工制造与其他工业发展，以及国防建设与科学实验的实际需要的有力推动下，在新原理、新理论、新技术和新材料发展的基础上，发展起来了多种电工新技术，成为近代电工科学技术发展中最为活跃和最有生命力的重要分支。在这些电工新技术中，有一些已发展成为新兴产业或对传统产业的技术改造发挥了重大作用，另一些将为 21 世纪电力生产、电工制造、交通运输及其他工业的发展带来重大的革新性变化，导致一些新兴高技术产业的产生与壮大。对于国民经济的发展和科学技术的进步来说，电工新技术的发展都有着重大的意义。

## 一、20 世纪下半叶的发展概况

图 1 示出了 20 世纪下半叶电工新技术的发展概况，包括其主要分支，产生与发展的基础，以及当前支持其发展的主要资金来源。



如果在 20 世纪中期以前，电工学的发展主要基于电磁场与固体的相互作用，电机学主要在发展旋转电机，则从新原理与新理论的角度看，20 世纪后半期电工新技术的重大进展则基于电磁场与流体（导电气体与液体）相互作用的研究和直线电机研究的深入。这里物理与天文研究中发展起来的等离子

体物理学与电磁流体力学开始向工程应用方面蓬勃前进，与人类能源、电力、交通及其他工业发展的需要相结合，开创了并推进着受控核聚变，磁流体发电，磁流体推进，电磁泵在世界范围内迅速发展，取得了世人瞩目的进展。直线电机与应用的深化，又促进着磁浮列车，磁流体推进船在一些国家中成为了国家计划，人类长期以来的“火车不用轮子、轮船不用螺旋桨”的高速交通的美好理想正在逐步变成现实。此外，放电物理与技术的研究发展又开辟了许多新的应用。

从新技术的发展看，20 世纪后半期具有全局性的最大成就无疑在于计算机与微电子技术的飞跃发展。这些技术在电工领域的应用使电工的各个领域得到了迅速、长足的发展，登上了一个个新台阶。电磁场的数值计算成为了近年来发展的热点，一些长期以来依赖于复杂分析与精密实验解决的难题得以迎刃而解。电工装备的计算机辅助设计（CAD）使整个电工制造业的设计上了新台阶，进入了新时代。数控系统与机电控制的发展使从整个电力系统到各种装备的自动控制实现了全面的革新，成为了企业改造的强劲动力。电力电子的迅速发展使大功率整流、逆变、变频设备实现了革新，进一步拓宽了电能的应用，提高用电效率，创造了很大的效益。为了支持微电子的发展，微电子专用设备，如电子束曝光机、同步幅射光刻机等等的研制成为电工新技术发展的一个重要分支。

近年来，超导、永磁与半导体材料的发展对于电工领域有着特别重大的意义。60 年代初实用超导体的发现开始了超导电工的新时代。三十年的持续努力使得恒定与脉冲超导磁体技术达到了成熟，得到了多方面的应用，显示了其优越性与现实性。超导加速器与超导核聚变装置的建成与运行成为 20 世纪下半叶人类科技史中辉煌的成就，超导核磁共振谱仪与磁成像装置已实现了商品化。80 年代初，工频超导线的研制成功带动了超导工频应用的深入研究。1987 年高临界温度超导体的发现为超导电工的发展展示了更加美好的前景。新型永磁材料，特别是钕铁硼材料的发现与迅速发展使永磁电机、永磁磁体技术在深入研究的基础上登上了新台阶，应用领域不断扩大。半导体的发展为电工领域提供了多种电力电子器件与光电器件。电力电子器件为直流输电，电气铁路，各种节能电源和自动控制的发展做出了重大贡献。光电效率的提高及成本的降低为光电技术的应用与发展提供了良好的基础，使太阳能发电已在边远、缺电地区得到了实用，并有可能在未来电力供应占有一定份额。

任何一种新技术的发展都必须有相应的资金支持。主要来源有两方面，即社会通过国家计划对科技发展的投入和技术发展本身带来的经济效益通过市场的反馈。当前，以计算机与微电子技术为基础的一些电工新技术，由于与市场紧密相连，发展很快，经济效益显著，主要要依赖于市场的支持。一些重大的、长远的、离产业形成还较远的技术，如核聚变电工、超导电工、磁流体发电、磁浮列车、磁流体船舶推进等，还主要要依靠国家计划的支持，当然，对于那些已能进入市场的部份，也应积极地去开拓市场，从市场得到支持。

## 二、21 世纪上半叶的发展展望

我们已在准备进入 21 世纪。21 世纪，人类期望着进入一个持续协调发

展的新时代，我国将以无愧于我们这个伟大民族的新姿态屹立于世界之林。整个进程中，科技的进步与发展有着特别重要的意义。从能源发展看，我国在上半叶还不大可能扭转以煤为主的能源结构，从而在提高煤的利用效率，特别是燃煤发电效率方面还要做出很大的努力。与此同时，还要大力促进核能和可再生能源的应用发展，使之更快地在技术和经济上成熟起来，才能期望得以较快地改变以化石能源为主的能源结构，走上能源、环境与生态持续、协调、稳定发展的道路。在交通运输方面，实现高速度将是主要发展方向，而各种交通运输的高速化都必须以电力推进系统的发展做为基础。在能源、交通和其他工业的发展中，电工新技术的发展将起着重要的作用，20 世纪下半叶的一些进展已为此奠定了良好的基础，随着新原理，新技术与新材料的发展，还将出现一些新兴的领域。这里简要展望一下一些可见的重大进展，包括受控核聚变，磁流体发电，太阳能与风力发电，磁浮列车，磁流体船舶推进与超导电工。

1. 受控核聚变。受控核聚变的实现将为人类提供实际上用之不竭的洁净能源，从根本上解决人类能源，环境与生态的持续协调发展。20 世纪下半叶的巨大努力，已在大型的托卡马克磁约束聚变装置上达到了“点火”条件，证实了聚变反应堆的科学现实性，正在进行聚变试验堆的国际联合的设计研制工作，期望在下世纪初能建成、运行试验堆。然后还需要经过示范堆与商用堆两个阶段的发展，预期可在下世纪四五十年代建成第一座商用的聚变电站，走向产业化。与裂变反应堆主要依靠核工技术与热工技术的结合而发展起来的历史不同，聚变反应堆的发展主要依赖于核工技术与电工新技术的结合，这里要把大体积、强磁场技术，大能量，脉冲电源技术，辅助加热技术与等离子体控制技术提高到新的水平。除此之外，还要探索利用聚变产生的带电粒子直接发电的可能性。聚变电站的实现也将导致一些新兴的电工产业的形成。

2. 磁流体发电。磁流体发电是将高温导电燃气与磁场相互作用而将热能直接转化成电能的新型发电方式。由于其初温可高达 3000K，与已有的燃气及蒸汽发电组成联合循环，可望将燃煤电站的热电转换效率提高到 50% 以上，具有高效率、低污染、少用水的重大优越性。磁流体发电自 60 年代初原理性实验成功以来，经过 30 年的持续努力，已达到了最高发电功率几万千瓦，持续数百小时的水平。再经过试验电站、示范电站与商用电站几个阶段的发展，可望在 21 世纪二三十年实现商业化。磁流体发电的发展过程表明，所遇到的困难比原设想的大得多，特别是用于燃煤的长时间可靠发电，这里需要大力发展电工、热工、材料、化工等多方面的新技术，在电工方面要解决电站系统、发电通道、超导磁体、功率调节与逆变等一系列关键技术问题，在现有基础上还要有长足的前进。由于我国属于燃煤为主和电力迅速发展的国家，燃煤磁流体发电的商业化具有特别重大的意义。

3. 太阳能与风力发电。太阳能与风能是最重要的可再生能源，它们是广泛存在，机会均等，自由索取，最终可依赖的初级能源。近年来，在太阳能与风力发电技术方面取得了可喜的进展，建设投资与电能成本有了大幅度下降，几十万千瓦的太阳热发电站，百万千瓦的大型风力发电场已经接入电网运行多年，千千瓦的光伏发电站已有了示范，使得越来越多的人相信太阳能与风力发电能够在 21 世纪整个电力生产中占有一定的份额。为此，需要继续努力提高效率，降低造价与成本，扶植相应产业的发展，以及解决并网运行

的有关技术问题。

4. 磁浮列车。一部人类社会交通运输发展史，在某种意义上可以说是一部以提高运输速度为主要目标的技术开发史。20 世纪下半叶铁路的电气化使常规轮轨铁路的运营时速提高到了 200 多公里。为了进一步提高时速，发展起来了磁浮列车，它是一种采用磁悬浮，直线电机驱动的新型无轮高速地面交通工具，具有速度快、客运量大、对环境影响（噪音、振动等）小、能耗低、维护便宜、运行安全平稳，无脱轨危险，有很强的爬坡能力等一系列优点。经过近 30 年的持续努力，磁浮列车已达到 500 公里/时的时速，处于实用化试验阶段，德国、日本已对建造运营线做了布署。可以期望，磁浮列车将于 21 世纪前期投入运营，那时高速铁路的时速将提高到 500 公里/时，在 1000 公里的旅程内其实际运营速度将高于民航飞机，应用前景十分广阔。我国疆域辽阔，人口众多，正处于加速发展与振兴的历史时期，而铁路目前处于数量少，技术水平不高，负荷重的状态，成为制约国民经济快速发展的最主要“瓶颈”之一，从而加速发展高速铁路有着特别重大的意义。抓紧高速磁浮列车的研究发展，从技术上实行“迎头赶上”的战略，尤显重要。磁浮列车的实现要解决磁悬浮，直线电机驱动，车辆设计与研制、轨道设施、供电系统，列车检测与控制等一系列高、新技术的关键问题，推动着电工新技术登上新的高峰。高速磁浮列车有常导与超导两种技术方案，采用超导的优点是悬浮气隙大，轨道结构简单，造价低，车身轻。随着高温超导的发展与应用，将具有更大的优越性。

5. 磁流体船舶推进。磁流体船舶推进是一种正在发展的新技术。它利用强磁场与海水中的电流相互作用产生的洛伦兹力，使海水向后喷射，依靠其反作用力推进舰船向前行驶。由于它不用螺旋桨，具有无声、高速的优点，将引起船舶推进技术的重大革命。随着超导强磁场的顺利实现，从 60 年代开始了认真的研究发展工作。90 年代初日本的载人试验船“大和一号”胜利地进行了海上试验，显示了其实现的现实性。再经过一二十年持续的分阶段的努力，可以期望在 21 世纪上半叶达到实用。

6. 超导电工。实用超导线与超导磁体技术与应用的发展，以及初步产业化的实现无疑是 20 世纪下半叶电工新技术的重大成就。在 21 世纪上半叶，无论是聚变电站、磁流体发电，还是磁浮列车，磁流体推进船的商业化，均将促使超导电工继续长足地向前发展，成为一个重要的电工产业。与此同时，还可期望，随着高临界温度超导体的实用发展，超导输电与超导飞轮储能将得到实际应用，工频超导技术的发展将使超导限流器、超导变压器、超导发电机投入运行，大能量的超导储能得到了示范和推广，超导电力技术成为电力发展的重要支柱。假如那时出现了临界温度达到室温的实用超导体，整个面貌还将大大改观。

## 结束语

电工新技术的发展有着重大的国民经济发展和科技进步的意义。一些重要技术从其出现到成熟，形成产业，常常需要半个多世纪，几代人的持续努力，需要有稳定的支持和重大国家项目的带动。发展电工新技术，要把主力放在将已形成的重要分支向着产业化的方向努力推进，与此同时，要密切注视新原理、新技术、新材料的出现，及时抓住苗头，不断开辟新的方向与领

域。

已有 30 多年历史的中国科学院电工研究所多年来以发展电工电能的应用基础理论及其新技术为主要方向，组织了磁流体发电、超导电工、聚变电工、微电子专用设备、特种和微型电机及其控制系统、新能源、高电压脉冲放电技术、电加工、数控技术、计算机在电工领域的应用，以及高速交通的电工新技术等多方面的电工高新技术的研究发展工作，形成了良好的队伍和较好的基础，做出了一些重要贡献。改革开放以来，电工所仍决心保持精干队伍，继续以发展电工新技术为主要方向，努力拼搏与攀登。

## 李志坚



1928年生,浙江宁波人。微电子技术专家。1951年浙江大学物理系毕业。1958年在苏联列宁格勒大学获物理—数学副博士学位。清华大学微电子研究所所长、教授。50年代初,在半导体薄膜光电导和光电机理研究中,提出电子晶粒间界理论,在此基础上研究成高信噪比PbS红外探测器。1959年研制成高超纯多晶硅。60年代从事硅器件研究,其中平面硅工艺及高反压硅高频三极管成果,促进了国内有关的研究和生产。1977年以后主要从事大规模、超大规模集成电路技术及器件物理的研究,领导、指导和直接参与了多种静态存储器,8位、16位高速微处理器、EEPROM和1兆位汉字ROM等超大规模集成电路芯片的研制工作,并取得成功。同时开发出3微米和1微米成套工艺技术。指导并发明半导体红外高速退火技术和设备。

## 微电子技术迎接 21 世纪

李志坚

40 年代末发明晶体管,60 年代初发明集成电路,自此近半个世纪微电子技术取得了惊人的发展,推动了一大批信息科学技术的进步,带动了物理学、材料科学、化学、数学等一系列学科,改变了人类生产和生活方式,名副其实地已成为现代社会的重要技术支柱之一。

当前,超大规模集成电路的芯片集成度已达到  $10^8$  元件/芯片(动态存储器 DRAM 达到每片 64 兆位~256 兆位),商品化的高性能微处理器工作频率达到 275 兆赫,芯片加工特征线宽达到深半微米(如 0.25 微米);厂商们已着眼于吉位(1000 兆位)DRAM 的开发,竞相发展功能更强、速度更快的微处理器芯片;在研究上合格的 0.1 微米 MOS 器件已研制成功,加工特征线宽已达几十纳米。

可以预期,到 21 世纪微电子技术仍将沿着原来的发展途径(即按 Scalingdown 原则)继续高速发展,集成度更高、工作速度更快、功能更强、功耗更低,但价格即大幅度降低的各种微电子产品将不断涌现。与此同时,随着器件尺寸减小到几十纳米范围,MOS 器件的正常开关工作将因电子波动性体现而受到限制,简单的 scaling down 原理将达到极限,人们也普遍地预期,到 21 世纪,基于某些新原理而工作的器件将“取代”传统器件,而使微电子技术面目一新,它可导致迄今尚难于意料的更大的进展。

### 一、微电子高速发展是时代的需要

一种现代技术有无高速发展的前景,主要由二个因素所决定,一是该技术是否是现代社会发展所急需,二是它本身是否具有持续发展的潜力。综观 40 年左右微电子技术的发展历程,正是这两个因素不断相互推进的结果。21 世纪,人类将普遍地进入信息社会,人类的生产、生活都将发生巨大的改变。微电子技术是信息科学技术的基础,信息社会中人们将像现代人用电力一样一刻也离不开微电子产品。现在先进国家人均微电子芯片年消费量已经以数百计,发展中国家也正在跟上,一旦全面信息化这是多大的市场!从科学技术看,现在的微电子技术还远远不能满足信息技术发展的需要。正在大力发展的全世界高速信息设施(高速信息公路)要求微电子系统的信息处理容量、频带、传输速率都再有成量级的提高;多媒体化因要实时智能处理,要求更高;普及到家庭、个人则要求更小的体积,更廉的价格和更小的功耗。凡此种种都说明到 21 世纪微电子技术的发展仍将是高速度的。

### 二、微电子发展的几个技术方向

当代的微电子技术以硅材料和 CMOS 技术为主导。因为 GaAs 的电子迁移率比硅高许多倍(约为硅的 6 倍),一度有人期待以 GaAs 替代 Si 制造超高速集成电路并已取得不少成果,但近年来世界上许多大公司的 GaAs IC 计划已纷纷下马,原因是工艺太复杂,与 Si 没有竞争的能力,人们宁肯用更细的特征线宽来取得电路的高速。有一段时期,GaAs 的 HBT(异质结双极晶体管)技术在国际上很行市,但近年出现了 Ge-Si HBT 以后,几乎主要注意力都集

中到后一技术上去了，其主要原因还是因为后者的工艺与 CMOS 兼容。上述例子说明，一种有极大发展潜力的技术，如 COMS（它具有高速、低功耗和工艺相对简单等优点，且按 Scaling down 原则这些优点在尺寸越小时更为明显），当社会投入了大量人力、财力，一旦成熟，它的发展具有特定的惯性，即除非有一种新技术在各方面都比它优越并在成本上有竞争能力，才有可能逐步取代它。从这个观点出发，我们认为至少在 21 世纪的前两个 10 年内，传统的 Si 微电子技术仍将有很大发展。下面列出几个主要方面。

1. 器件与工艺特征线宽向 0.1 微米、进而向几百纳米发展。到纳米级时曝光技术肯定会转向电子束或 X 射线，但在 0.1 微米之间看来仍会用短波长的紫外光配以移相等技术以克服光衍射效应。要 0.1 微米及更小尺寸的 MOS 器件仍能正常工作，器件结构及掺杂分布和浅 PN 结制作等都需精密设计，予以优化。

2. 设计方法学及设计工具的创新。近十几年来集成电路和系统的设计方法、技术和工具都有很大发展，但是迄今它们仍是微电子发展的一个瓶颈；设计、应用仍远远未能充分利用微电子工艺技术所已达到的这个技术资源宝库。以微处理器而言，近几个通过 RISC（减小指令计算机）和 CISC（复杂指令计算机）两种设计方法（或结构）的竞争已把工作频率提高了近两个量级，充分说明了设计方法学改革的潜力。随着电路集成逐步转向系统集成，设计方法学的发展也将主要集中以微电子系统为核心而展开，从而相应地设计技术和工具的开发也将围绕系统级进行，如何使今天基本围绕微电子电路发展起来的丰富的设计工具规范化、集成化，以提供系统级使用，以及发展系统级设计和微电子芯片整体优化的技术和工具将是今后的重要课题。

3. 绿化芯片。随着微电子芯片集成度的不断提高，尤其对于高速集成电路，芯片功耗（虽然原则上说，CMOS 功耗是很低的，但是高速工作时单位面积耗散功率，因芯片所占面积小，可以达到惊人的程度——如每平方厘米上百瓦！）是急需严肃关注的问题。尤其，随着微电子系统的不断超小型化（今后人们将携带各种笔记本式微机或个人数字助理—PDA 等），高速化，以及大量应用，不光是社会功率消耗是个问题，对个人及环境的电磁辐射也将成为一个值得考虑公害，所以无公害的绿色芯片（低功耗芯片）必然是今后发展的方向。现在已出现了维持功耗仅有几十微瓦的微电子高速集成系统芯片。大大降低功耗仍保持高的处理速度的微电子芯片是 21 世纪的发展目标。对此电性能和热开销相结合（均优化）的设计将是发展的又一个重要方面。

4. 封装和测试策略。随着芯片集成度及复杂性的提高，VLSI ASIC（超大规模，专用集成电路）的封装越来越成为一个问题。现在一个管壳的管脚数可多达几百个，管脚间的间距已只有几十微米，虽用 SMT（表面组装技术）等方法也难于进一步进展。所以今后设计必须要考虑优化芯片引出线数目的问题。实际上这也是必须走向系统集成的一个重要因素。系统集成下就可考虑尽量把那些关键性（连线延时受限制的）部件集成在一个芯片上，并减少非必要的引出线。作为变通，现在已把一些子系统集成为模块，只留下模块间的连接通过封装的管脚相连。今后，如实现系统集成化，管脚问题就更容易解决。

微电子芯片的测试、检验是其发展的另一个瓶颈。随着芯片功能越多、越复杂，而工作速度越快，在出厂以前如何保证在各种条件、各种模式下芯片能正常工作呢？抛开成本不说，测试的时间也成为问题。现在对于一些逻

辑电路为主的 ASIC，设计者在设计同时设计了测试图形(达到一定覆盖率)，而且还插入必要的自检测电路，芯片完成后再用专用设备进行“全面”检测。据报导，即使如此，检测合格的 ASIC 芯片当插入系统实用时往往还有 30% ~ 50% 不能合格。为此已有人提出硬件仿真的老方法，认为对每一新设计的 ASIC 先做出试验硬件(如用 FPGA)，应用合格后再正式设计定型。但这样会大大延长设计周期，提高试制成本。我们认为对于微电子系统芯片的检测必须在理论上和策略上有一个突破，然后把测试纳入整个微电子系统芯片设计的内容。

5. 微环境和灵巧生产线。当前要建立一条 8 吋硅片、0.6 微米的 CMOS 大生产工艺线要投资高达几亿或十几亿美元。随着工艺日益精细化这种投资还要成倍增加。这使微电子大生产越来越为少数垄断企业所把持。工程师们日益感到当前这种一代新技术、一代新设备、一代新的超净厂房的发展模式应该有所改变。提出的方向是超净微环境化，即只环绕芯片加工的各道工序及其通道实行超净化替代今日极高代价的全厂房超净化；另外是工艺设备的集成化(通过积本块化)和灵巧化，使生产更为灵巧，通过排程可以升级或满足不同的技术要求。对此还有许多的技术工作要做。此外，走向 CIMS(计算机集成生产系统)进行生产无疑是微电子大生产的必然方向，对此上述技术的突破也是决不可少的。

### 三、微电子系统集成技术

系统集成可有二种理解(或分为二个层次)。狭义地它是把某一个微电子功能系统(如一个微计算机)或子系统集成到一个芯片上，由此发展相应的设计、制造、封装、测试等技术，这就是现在已经开始的，我们在上面已经讨论过的由电路集成升级到系统集成的道路。这个过程 90 年代已经全面开始，肯定会成为今后发展的主要方向。这里值得提出的是系统集成不光是使现有的微电子系统以更大的规模和更合理的方式集成到芯片上去，除原有系统在设计方法学和结构组织等方面有较大革新外，还有可能有许多新的系统思想、甚至新的系统工作原理的注入。例如，按当前的冯·诺曼串行计算机结构与软件相结合的思想，要实时地处理许多智能问题都遇到了极大的困难(信息量及速度)，但是近十几年来受到重视的人工神经网络、模糊逻辑等更接近于人类脑子结构和思维方式的智能处理原理已证明对此类问题的解决却十分有成效。迄今许多学者已利用它们来制作相应软件取得可喜的成果，但软件方法是不能充分发挥它们的实时处理作用的，今后肯定将出现各种专用的神经网络和模糊逻辑决策芯片以用于智能处理问题。

系统集成的广义理解是把包括信息获取、信息处理和信息利用(执行机构)的整个智能系统集成到一个或几个芯片上去。例如，组成一个微型智能机器人。针对这一领域当前已在大力发展硅集成传感器(把传感器与信号处理集成在一个芯片上)和硅执行部件(如微马达、微流量器等)，它们的基础技术是与 MOS 技术兼容的硅表面机械加工技术。这种具有智能、又能运动并具有执行一定加工功能的微型系统芯片对生物学、微观医学有重要的意义，将是 21 世纪的一项突破性技术。

### 四、MOS 集成器件极限和新一代微电子技术

当器件及电路特征尺寸缩小到一定程度以后，其发展受到工艺、可靠性以及器件工作原理等的限制。作为最基本的限制是器件尺寸小到几个纳米时，由于电子的波动性体现出来，使器件的正常开关工作和器件间的有效隔离遭到破坏，使以 MOS 器件为基础的集成微电子学达到极限。现在研究中的 MOS 器件已经达到 100 纳米。有人预见这个极限是 5~10 纳米，因此发展余地尚不小。此外，实际上现在已经着手研究新的器件，以便到时候“接替”MOS 器件从而发展新一代的微电子。正在研究的这一类器件有热电子器件、隧道共振器件及量子干涉器件，乃至分子器件和单电子晶体管等等。虽然这些器件现在都还不很成熟，但一旦突破肯定将对微电子技术产生一次新的冲击，导致新一代微电子技术和系统的诞生。在社会对微电子技术的强大推动下，这一天无疑将会到来。

现实的问题是在上述极限日益接近的 21 世纪，因为技术上的实际困难越来越多，微电子技术的发展会不会因“青黄不接”而在速度上有所延缓？我们认为对这个问题要分二方面来解答，首先是，单纯的集成度提高看，到一定程度后，仍保持每 3 年翻二番的速度肯定会有所改变，因为越接近极限（上面说的是理论极限，还有由许多技术问题所决定的实际极限），提高就越困难；但是正如本文前几节所提出，对微电子的发展不能光看单项集成度或加工线宽，而重点更应放到在同一集成度和加工线宽的技术下，如何能使微电子芯片的功能更丰富，速度更快，功耗更低，价格更便宜上去；正是在这里，进一步发挥微电子效益的潜力十分巨大，留下的技术问题十分丰富，所以发展远远没有达到或接近尽头。另一方面，我们对新的电子器件如何“接替”传统器件至今还难以预测。有很大的一种可能是，一些研究成熟的效应或技术（如隧道效应和三维集成等）被陆续利用到原来的集成技术中去，暂不改变 MOS 器件，而继续使集成芯片的集成度有很大提高（考虑到现在一个集成芯片布线占面积常常可占到 30%~50%，以及严重的布线延迟，估计这种可能很大），或通过混合集成的步骤逐渐推进到新一代去。总之，当前要推断何时出现或如何出现新一代微电子技术尚为时太早。

## 五、结束语

总结上面，共提出的有五点看法：

1. 到 21 世纪微电子技术仍将以极高的速度发展，这是因为它本身的潜力仍很大，且有现代社会需要的强大推动；

2. 微电子技术在今后相当长的一段时期内仍将以硅为材料，CMOS 为主导工艺技术发展，重点是设计方法学、设计技术和工具的发展，目标是在加工线宽不断缩小的同时，使微电子芯片功能更强，速度更快，功耗更低，更小型化，更可靠，更便宜；

3. 系统集成技术是一个需要重视的方向；

4. 生产技术、装备和方式将有较大的变革，超净微环境化，设备灵巧化和集成化，生产实行 CIMS 化；

5. MOS 器件正常开关的工作极限不会妨害微电子技术的继续高速发展，新的器件只会使微电子技术提高到更高的水平。

从以上几点可以看出，迎接 21 世纪，微电子技术既充满挑战，更充满机

会。

## 杨芙清



1932年生，江苏无锡人。计算机软件专家。1958年北京大学数学力学系研究生毕业。北京大学计算机科学技术系主任、教授。在国内首先提出了解决共享资源和多道程序协调运行的概念和方法，研制成功集成电路计算机DJS11机（150机）操作系统。开创性地运用PCM方法和层次管理结构设计实现了DJS200/XT2操作系统，且全部用系统程序设计语言XCY书写。主持了国家重大项目集成化软件开发环境（青鸟系统JB）的研究和开发，达到了国际先进水平。此外，还承担了软件生产智能化技术研究，领导研制了多语言混合编程环境KM系统。研制成功了多项计算机辅助企业管理信息系统和管理信息系统生成系统MISGS。

## 21 世纪的软件工程

杨芙清

21 世纪将是高度信息化的社会，这一点已在世界范围内得到一致共识。置身于跨世纪的时期，当今世界各国无不把发展信息产业作为一项重要国策，作为发展国民经济的主要手段之一。毋庸置疑的是，在信息社会中，软件将扮演极其重要的角色。

关于 21 世纪的面貌，人们已作了很多的描述。诸如电子报纸、电脑购物、家庭办公等，这一切都离不开信息。信息的获取、流通、处理构成了信息社会的基础，其中，计算机，特别是计算机软件则是实现信息化的核心。时代的发展对软件工程提出了更高的要求，即反映知识积累，反映民族文化特征的软件必须能够快速高质量地生产出来，以满足社会各方面的需求。要达到这一目标，必须改革软件生产方式，建立适应发展要求的软件产业体系，这正是当前软件工程领域众多研究者、实践者为之奋斗的目标。

信息社会的发展给软件工程带来了新的挑战。

### 一、软件工程由来

软件工程这个概念，正式出现在 1968 年 NATO 软件工程会议上。

自 40 年代计算机问世以来，如何编制符合要求的程序一直是人们追求的目标。并且，随着计算机应用领域的扩大，人们对软件的需求量剧增，对软件的正确性提出了更高的要求，并迫切地需要缩短软件生产周期。但是，当时的软件编制还只是一种手工活动，过多地依赖于程序员的个人能力和技巧，这就导致了软件的生产周期长，可靠性及可维护性也很差。软件开发远远落后于硬件发展，远远满足不了社会的需求，从而爆发了一场“软件危机”。

为了克服这种危机，结构化程序设计及软件工程应运而生，以期提高软件生产率，改善软件质量。

软件工程作为一门学科的出现给软件界带来了一场变革，众多的研究者和实践者投身于软件工程领域，并取得了丰硕成果。虽然离预期目标仍有很大距离，并未能从根本上克服软件危机，但是软件工程的思想毕竟给人们带来希望的曙光。

软件工程的研究除计算机软件本身外，还涉及众多其他的领域，如管理科学、心理学、经济学、人机工程学等，因此，它是一门综合性学科。粗略来说，软件工程学科可划分为两大方面，一是基础性理论研究，主要目标是用形式化技术解决软件生产中所遇到的问题，如需求规格的描述，规格到系统的转换，系统测试、维护及理解等，主要为解决“做什么”的描述手段问题。另一是工程化技术研究，总结软件开发过程的规律，探讨软件开发过程的工程化因素、方法及工程支持，解决“怎么做”的问题。80 年代以来，计算机辅助软件工程（CASE）的研究已成为软件工程领域中的热点，其中包括 CASE 工具和 CASE 环境的研究，旨在应用计算机支持软件开发过程，改进软件开发行为，为开发人员提高软件开发平台和环境，以提高软件生产率并改善软件产品的质量。

### 二、软件工程的发展与研究现状

软件工程的研究已逾 20 余年，其间成果纷呈。这些成果的应用为缓解软件危机起到了很好的作用。

如上所述，软件工程的发展大体围绕着两条主线，一条是形式化技术，一条是工程化技术。

形式化技术的研究及应用已取得了较大成果，突出表现在程序设计语言语义方面和抽象数据类型方面的研制。操作语义、代数语义、指称语义以及公理化语义是程序设计语言语义研究的代表工作。其间，随着软件技术研究的深入，形式化技术与软件开发方法学相结合，形成形式化的软件开发方法，试图实现从软件的规格说明、软件的设计到软件的代码实现的自动转换和验证。其中，基于模型的 VDM、Z 和基于代数的 Larch 均是这一方面的代表成果。

工程化技术的研究一直呈现生机勃勃之势。它包括方法学的研究以及与其相关的支撑环境的研制。在方法学方面，大体可分为程序设计方法学和软件开发方法学，前者是关于小规模程序设计，后者是关于大规模软件的开发过程。可以认为，结构化方法的出现与应用，是软件开发的一次“革命”。目前，面向对象方法的流行，可望带来一场新的软件开发“革命”。

在软件工程中，方法和工具是同一问题的两个不同方面，方法是工具研制的先导，工具是方法的实在体现。代表我国 CASE 领域先进水平的“青鸟”系统，旨在建立中国软件产业的基础，为软件开发提供符合中国文化特征的 CASE 技术标准和开发规范，提供实用、开放的软件开发平台和环境。它的应用改变了软件开发者对软件生产的认识及行为方式，大大提高了软件生产率及软件质量。

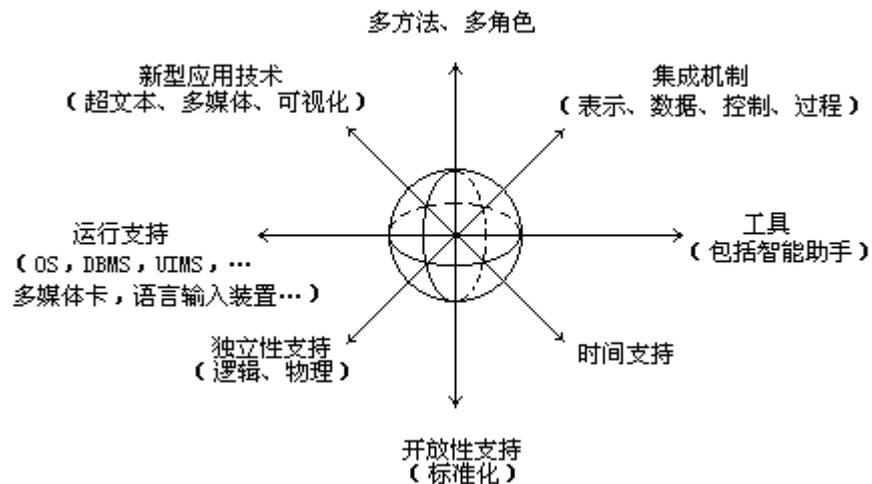
随着软件开发技术的研究，智能化技术得到了广泛的应用，软件重用已成为可能，同时带动了软件工程可视化技术、软件过程模型以及软件体系结构的研究。其中，智能化技术在系统规范，生成，维护及理解方面已有成功的运用；软件重用已开始进入领域适用阶段，特别是面向对象技术的采用，使软件重用出现了新的契机；可视化技术的运用可以使人们能够以更直观的方式开发软件；软件过程模型的研究有了长足发展，“软件过程是软件”已为人们所接受并成为 21 世纪期望实现的目标，软件体系结构的研究正成为新的热点，这种以“建筑师”的观点看待软件系统及其结构的方法无疑将对软件开发及过程产生深远影响。

20 余年的研究成果，必将为 21 世纪软件工程的发展奠定良好的基础。

### 三、21 世纪的软件工程

为迎接 21 世纪信息时代的到来，今后几年在软件工程领域将遇到新的挑战。软件自动化势在必行，研究的内容将涉及需求工程、软件规格说明的形式化以及规格说明到系统的进化或转换。但是，由于形式化的软件方法以严格的数学和逻辑系统为基础，至今尚远未达到工程应用的程度，因此，近几年内，尚会停留在实验室研究阶段，无法向工业界推广使用。因而，着眼于高度自动化、智能化的 CASE 研究，仍将成为软件工程的一个主体。其中，将根据开发经验的积累，聚合各类应用领域的知识，集成各类应用工具，在用户面前创造一个良好的应用系统开发平台和环境，支持软件群体式的“多维”开发。这样的 CASE 应具有以下一些特征：

其中，将涉及面向对象技术，重用技术，人工智能技术，图形、图像处理技术，多媒体与可视化技术，裁剪、组装与集成技术，质量保证技术，软件过程模型、描述及控制技术。尤其是由于软件是知识的积累，因此，软件重用将越来越受重视。并且，人们从现实实践中，已经注意到要获得成功的软件重用，仅有可重用代码模块和库技术是不够的，必须研究如何设计和包装可重用软件，如何组合可重用构件的框架结构以及如何适应组织与经济结构的要求等。有效的软件重用将彻底改变现行软件开发过程，代之以生产和消费可重用软件构件的开发模型、方法、过程和技术。



经过几年乃至几十年的努力，21 世纪的软件生产将是一种大规模的工业化生产活动，以符合产品化质量要求的工业标准，实现软件生产自动化。其突出特征是：计算机真正成为人们的一种工具，用户即为系统分析员，“软件过程是软件”。

为达到这一目标，形式化技术与工程化技术必然是有机的统一，并容纳其它相关的技术，产生一种新的软件生产方法、技术、规程以及相应的工业标准，并产生与之相适应的“傻瓜”CASE，为软件产业奠定坚实的基础，使软件走上工业化生产方式，形成规模经济。

## 杨雄里



1941年10月14日生于上海市。浙江省镇海县人。神经生理学家。历任中国科学院上海生理研究所研究实习员、助理研究员、副研究员。现任中国科学院上海生理研究所研究员、所长。1980~1982年在日本国立生理学研究所进修，获学术博士学位。1985~1987年在美国哈佛大学、贝勒医学院进行合作研究，1987年至今兼任贝勒医学院客座教授。亚大地区生理学联合会第一副主席，中国生理学会副理事长，中国科技大学、复旦大学、浙江大学兼职教授，上海大学顾问教授。

长期从事视觉神经机制的研究，涉及色觉的心理物理、视网膜电图、视网膜信息处理等方面工作。应用微电极细胞内记录、染色技术，并与药理、计算机技术相结合，从不同侧面对视网膜中的信息传递的调控在几个层次上进行了系统研究。他在水平细胞所接收的光感受器信号及其相互作用等方面有新的发现，修正了传统观点。他和合作者首先报道视杆—视锥间电耦合因背景光而增强，在国际上被列为80年代视网膜研究中的突出成果；率先发现了视锥信号在暗中受到压抑的新现象，并对网间细胞及几种神经调质的参与机制进行了系统而细致的分析。国际学术界评论他“对视网膜功能的认识作出了具有根本意义的贡献”。1990年，他向美国国立健康研究院（NIH）申请的基金“视网膜功能的调控”得到高度评价并获资助。1991年，他与国外科学家联合向“国际人类前沿科学计划组织”提出的基金申请“视网膜突触机制”再度获准资助。

1991年11月当选为中国科学院（生物学部）学部委员。1992年起担任攀登项目“脑功能及其细胞和分子基础”的首席科学家。

## 21 世纪神经科学研究方兴未艾

杨雄里

当代自然科学面临的重大挑战之一是揭示脑的奥秘。在‘神经科学’这面旗帜下，科学家们正在全力以赴地迎接这场挑战，并且取得了许多令人瞩目的重要成果。本文将评述神经科学发展的主要趋势，并对 21 世纪初叶的发展动向略陈管见。

—

把研究推向细胞和分子水平显然是当前神经科学发展的最重要趋势，这是一个毋庸置疑的事实。回顾 30 余年来神经科学的发展历程，在细胞和分子水平的重大发现和成果使人目不暇接。细胞内记录和染色技术使人们能在单个神经元上把结构和功能紧密地联系起来；免疫组织化学方法，原位杂交分子生物学技术的广泛应用使神经元结构、功能与其神经递质的分析融为一体；组织和细胞培养以及组织薄片方法使人们能把复杂的神经元回路还原成简单的单元进行分析；新的分子生物学方法（重组 DNA 技术）和电生理技术（片膜钳位技术）的发展在神经科学中引起了一场革命性的变化，几乎完全改观了我们对膜内外信号的转导、离子通道的分子结构、功能特性及运转方式的认知。对于在突触部位所发生的细胞和分子事件，如神经递质的合成、维持、释放及其作用的分子机制，最近 10 年所取得的进展远远超过了以往几十年的总和。

在细胞和分子水平对脑的高级功能的研究也取得了令人瞩目的进展。应用海兔对短期和长期记忆机制在细胞和分子水平异同的阐明堪称佳例。这一方面的研究现在已经扩展到高等动物。近年来，反向遗传学（Reverse genetics）介入神经科学的研究是一个极值得注意的发展趋势。反向遗传学方法通过制造定位、定向突变改变细胞的基因型，进而还可改变小鼠等哺乳动物的基因型以产生转基因动物，为研究某些基因产物在学习、记忆等复杂的生理过程中的作用提供了极有利的条件，已经取得了巨大的成功。

对神经和精神疾患的研究同样表现出科学家在分子水平所进行的努力。遗传性老年痴呆症（Alzheimer disease）和舞蹈症（Huntington disease）基因定位的成功是人们经常列举的例子。近年来，对精神分裂症的治疗由于对多巴胺受体的研究的深入可能会产生重大的进展。用基因疗法（Gene therapy）治疗帕金森氏症（Parkinson disease），已经取得了显著的成效。

对神经活动的细胞、分子机制的研究，就本质而言是一种还原论（Reductionism）的分析。不论从事这一研究的科学家在主观上是否意识到，这种分析合理性的潜意识的基础是：神经活动可以最终归结为细胞和分子水平所发生的变化。

但我们不能设想，对于脑这个自然界最复杂系统奥秘的揭示将完全依赖于在分子水平的研究。不能设想脑的功能，特别是高级功能，能完全归结为若干分子事件。当分子组成了细胞，分子就不再是原来意义上的分子（可以说，分子生物学的潜力即寓于与细胞生物学的结合）；当神经元组成了回路，神经元便不再是原来意义上的神经元；当神经元回路最后组织成脑，神经元回路即不再是原来意义上的回路。因此，从本质上来说，神经科学的研究必

然是多层次的，整合性研究有其独特的意义。完全囿于纯粹的还原论分析，则将使神经科学成为跛足的巨人。实际上，在细胞、分子水平以外的其它层次上也涌现了不少新技术、新思想、新成果。脑的成像技术（如正电子发射断层扫描术——PET、核磁共振术——MRC等）的急剧进步为在无创伤条件下分析神经系统的静态和动态的化学变化及其与神经活动或行为的相关，提供了重要的手段。计算神经科学对大脑和神经系统工作原理的揭示进一步展示了脑研究的另一个重要侧面。

## 二

对于 21 世纪初叶的神经科学我们能作什么预测呢？

1. 从 70 年代开始的在细胞和分子水平上对神经活动的研究是目前神经科学发展的主流，这个趋势仍将继续保持下去。对神经活动基本过程——神经信号的发生、传导、突触传递的了解将进一步深入，这些研究的进展肯定能为癫痫、帕金森氏症、老年痴呆症、精神分裂症等神经疾患提供更有效的治疗手段。对神经活动基本过程的研究导致重要的应用性成果的过程将大大加速。例如，目前治疗精神分裂症的药物是阻遏多巴胺对  $D_2$  受体的作用，这些药物有效地改善了行为症状，但会产生严重的运动系统异常。运用克隆多巴胺受体位点来作筛选，正在开发选择性阻遏  $D_1$  受体的药物，有可能消除上述副作用。另一方面，随着分子神经遗传学的急剧发展，一个合理的估计是，在未来几十年内，将能预测大部分遗传性神经系统疾患的未来表达或确定缺损基因的定位，从而为分析其致命的缺陷奠定基础；一旦这种缺陷被鉴定，设计新的治疗手段也就为期不远了。

2. 神经系统的发生和发育的研究肯定是一个成果丰硕的领域。以往取得的进展主要是采用低等动物的简单系统获得的，对于高等动物神经系统的发生、发育规律，还需要发展新的技术和方法来进行有成效的研究；也需要继续建立桥梁，以沟通在动物上所取得的基本发现同人类神经系统的发育和功能之间的关系。这方面的研究进展将为中枢神经系统的再生创造条件，进而可能运用脑内移植或其它方法、手段来缓解或治愈许多神经疾患。

3. 对神经信息处理机制的深入分析可能会导致计算科学发生革命性的变化。神经系统是一种并行机，其信号同时在几百万条通道中进行处理；神经元对输入信号的反应是模拟式的而非数字式的。进而，在大脑中，两群神经元之间的通讯常常是交互的，这种交互性联系使大脑有可能调制其信息处理，并使大脑形成一个具有高度复杂行为的真正的动态系统。脑的这种并行结构具有几个重要的优点。首先，它比传统计算机具有极大的速度优势，因为在各级水平上的许多突触是同时进行计算，而不是串行计算。其次，具有大量并行运算的系统是容错的、功能持久的。第三，并行系统以分布方式存储大量信息，其中各部分均可在极短时间内存取。这种信息处理的特点将为计算科学家提供启示，而一代又一代新的神经计算机的诞生已经展示其研究的光辉前景。

4. 人们对于脑的高级功能，诸如感知、运动控制、情绪、记忆、语言的认识，可能会取得突破性的进展。近几十年来，对高级功能的研究或者是整体性的完全黑盒（Black box）式的研究，或者是偏向另一个极端，即把这些功能还原成局部的神经网络，再者是在简单的系统中还原成基本的过程、基

本的细胞、分子事件。对于以这些过程和事件为基础的局部神经网络，如何组装起来构成庞大的神经系统本身，并以此来实现脑的高级功能，人们既缺少有成效的研究手段，在理论上也还只有很模糊的想法。例如，虽然在某种程度上我们对感觉信息在初级感觉皮层及其附近联合皮层上的处理已经形成了一幅概貌图，但感觉信息最后是如何被整合起来，从而认知外部世界的呢？对此我们几乎一无所知。在研究脑的其它高级功能时，也存在着类似的问题：我们的意识是如何被控制的？意识的整体性又怎样被保持？突触的可塑性是最近被广泛研究的课题，但我们对突触的可塑性与学习、记忆的形成之间关系的认识还刚刚开始。语言能力是人类脑特有的高级功能，但对于语言的中枢表象现在仍然只有很模糊的认识，甚至连研究这类信息处理过程所应当采用的方法也至今阙如。这一类问题是一种特殊的系统水平的问题，显然不能用还原论方法来解决，即不能期待通过对细胞和分子事件的阐述来解决。问题的实质是，我们必须去揭示由大量神经元组装成的功能系统的设计原理。从某种意义上来说，这是神经科学家的长远目标。

为了达到这个长远的目标，既需要多学科方法的紧密结合，更需要发展新的方法，开拓出原理全新的研究途径。看来，在研究神经系统的高级功能时，模型变得越来越重要。这些模型既基于神经生物学研究所取得的有关资料，又具有透彻的数学和物理上的分析，一旦它们与对脑的高级功能的实验分析密切结合，将有可能在神经科学研究中形成重大的突破。

## 吴传钧



1918年生，苏州市人。1941年毕业于中央大学地理系（重庆）。1943年毕业于中央大学研究生院，理科硕士。1948年毕业于英国利物浦大学研究生院，哲学博士。

1943~1945年任中央大学地理系讲师。

1946年任英国利物浦大学地理系兼任讲师。1948~1949年任（南京）中国地理研究所副研究员。1950年至今任中国科学院地理研究所副研究员（1950~1956）、研究员（1956年至今）、副所长（1979~1984）。1981~1991年任中国地理学会副理事长。1981~1983年任（东京）联合国大学（UNU）校长顾问。1983年至今任联合国大学科研协调员。1988至今任（地理学报）主编。1988年至今任国际地理联合会（IGU）副会长。1991年至今任中国地理学会理事长。1991年11月当选为中国科学院学部委员。兼任中国科学院研究生院、南京大学、北京师范大学、华东师范大学等校教授。曾出访过西欧、东欧、北美、南美、东亚、南亚及大洋洲等20余国。从事主要领域：经济地理、人文地理。主要著作有《中国粮食地理》，商务印书馆，1942。

"Rice Economy of China", Liverpool University Ph.D Thesis, 1948.

《黄河中游西部地区经济地理》，科学出版社，1959。《东北地区经济地理》科学出版社，1959。"Land Resources of People's Republic of China"

（主编），United Nation's University, Tokyo, 1983. "Geography in China"（主编）Science Press, 1984. "Regional Planning in Different Political System: the Chinese Setting"（主编）Ruhr University, Bochum, 1984.

《人文地理研究》，江苏教育出版社，1989。《国家农业地图集》（编委副主任），地图出版社，1989。《国土开发整治规划》，江苏教育出版社，1990。

《1:1000000 中国土地利用图》（主编），科学出版社，1990。"The Progress of Human Geography in China", GeoJournal Vol. 21, No.1 - 2, 1990.

"Territorial Management and Regional Development in China, Recent Development of Geographical Science in China", Science Press, 1990.

（共出版专著约20种，发表中英文论文200篇）

## 中国人文地理学的发展

吴传钧

地理学是自然科学和社会科学的汇合，它包括自然地理学和人文地理学两大分支。在 50 年代，我们按照前苏联地理学的模式来发展中国地理学，而前苏联地理学在当时左的政治思潮影响之下，一度把人文地理学作为唯心主义学说来批判，以片面发展自然地理学来代替综合地理学，这样也就影响到了我国地理学的健康、全面地发展。此风到“文化大革命”后得到了拨乱反正，我们根据国家现代化建设的需要，提出复兴人文地理学，促进了地理学的综合发展。

总的看来，我国地理研究工作坚持为社会主义生产建设服务的大方向，通过建国几十年来的广泛实践，第一，丰富了地理学的内容，例如，开展了自然综合体的形成与发展规律、自然资源的技术经济评价、环境的合理容量与综合治理、农业生产地域类型与农业区划、生产力合理布局与地域优化组合、国土开发整治与规划、人地关系地域系统的形成、结构与优化调控等方面的研究；第二，加强了地理学与有关学科的联系，从而促进了诸如环境科学、资源科学、国土经济学、人类生态学和区域科学等交错学科的发展；第三，在地理学内部突破了以往受前苏联地理学影响而形成的自然地理学与人文地理学分头发展的二元论模式，引导自然地理学与人文地理学的融合和有机联系，加强了地理学的综合研究。

在国际上，由于人类面临日益突出的人口加速增长、环境日趋恶化、资源供求失调等重大的全球性问题，要求地理学家对处理这些问题做出贡献。在这个强大的潮流冲击之下，地理学的研究重点就相应地转移到人文地理学方面。我国人文地理学在“文革”后的 10 多年来已走上了加强发展的道路，在大学地理系中确立了这一学科专业，在中国地理学会中成立了这一专业的委员会，并出版了几种有关这一学科的专门学术期刊。人文地理学已成为我国地理学中的一个重要分支，又是对中青年地理工作者最具有吸引力的一个研究领域。

120 多年前，当西欧大学中设立第一个地理系，也就是地理学确立为一门近代科学时，就被认为是研究人类和地球关系的科学。正如李希陀芬所说：“地理学的最高目的在于发掘人类和自然现象的关系。”时至今日，协调人地关系仍然是现代地理学的主要目的。

从人文地理学的总体来说，人地相关论是它的基础理论，研究人类活动和自然环境的关系是始终贯彻在人文地理学发展的各个阶段的一条主线。人地相关论说是一种和时代背景密切联系的理论思维，它不是一成不变的，而是随着人类社会进步而向广度和深度发展，也因此人文地理学对它的研究在不同阶段就具有不同的内容。在 80 年代初期很多不同专业的科学家集会讨论什么是当今世界最重大、最迫切、最需要集中不同专业的科学工作者共同研究的全球性问题，他们的结论是：协调人类活动和自然环境的关系。很多科学都会涉及到人地关系的研究，但以地域为单元，用系统论的观点来研究人类社会和地理环境两大相互作用的人地关系巨系统的就只有人文地理学一家了。

江泽民同志在中国科协第四次全国代表会议上作报告说：“90 年代我国的科技工作必须在几个方面取得重大进步，其中之一就是调整人和自然的关

系，包括人口控制、环境保护、资源和能源的保护和开发利用等。”可以认为这为地理研究指明了方向。我国杰出的科学家钱学森同志多年来提倡发展地理科学。他认为国家很多生产建设问题和地理学息息相关，并指示中国科协：“为了社会主义建设，我们要组织力量，统一思想，理直气壮地建立地理科学”，他还把资源、能源、水源的系统建设、环境保护和绿化、灾害预测和防治、城镇和居民建设，以及人口控制等，概括称之为“地理建设”，并指出地理工作的目标是使地理系统和社会系统协调发展。这正是画龙点睛地指明了一切地理工作的总目标。这些负责同志的意见，促使我们提到哲学的高度来重新认识地理学，并思考如何加强地理学的理论建立和方法革新问题。

在分析人地关系时要考虑到人类社会和地理环境两大系统相互关系的复杂性和多样性以及其结构的多层次性和明显的地域差异性。在不同类型地域上的表现、结构和矛盾都不尽相同，因此必须按地域类型来协调不同的人地关系。我们可以地域为单元，采用系列指标来模拟双方的相互作用和引发的变化及其后果。

现代人文地理学就是以人地关系的地域系统作为其研究核心，是以地球表层一定地域为基础，由人类社会和地理环境两个相互联系又相互作用的子系统交错构成的复杂的开放巨系统。它是一个动态结构，具有时间和空间的变化。人和地双方的关系是一个可变的量，投入和产出是这一巨系统中最基本的双方作用过程，可采取定性分析与定量计算综合集成的方法，来研究这一系统的形成过程、机理、功能和结构特征、发展趋势、整体调控和优化的途径和对策。其目的是促进两个子系统之间的良性循环，优化人地关系的地域结构，应用到一个地区时就是协调开发利用自然资源、环境治理、人口继续高速增长和经济持续稳定发展之间的关系，从而为制定各类区域性综合发展规划提供依据。人文地理学的研究主要就在于处理和解决地区性人地关系的基本矛盾。它为现代化建设服务的水平高低，也就在于处理和协调人地关系的成效如何。目前，国内关于这方面的研究已逐步走向逻辑化、体系严密化和理论模式化。

例如，关于优化人地关系地域系统结构的研究，选用数量和质量两方面的指标，来进行经济效益、社会效益和环境效益的评价。经济评价要求确定人类社会为保护自然、人类生活环境和为弥补它们受经济活动影响造成的后果而需要付出的人力、物力和财力，其中最重要的是对土地利用和人口分布影响的评价。社会评价要决定自然变化对人类生活条件和社会活动的影响，以及这种变化对自然环境满足人类社会需求的影响，其中最重要的是对人类健康的影响。

由于历史发展和客观形势需求的不同，我国人文地理学内部各分支学科的发展是不平衡的。有些发展最好，如经济地理学、人口地理学、城市地理学、地理学和历史人文地理学，今后要求一方面根据形势发展，开拓新的课题，同时更重要的是在以往实践基础上进行理论性的总性。建国以来我国地理工作之所以获得很大成就，是由于我们坚持为社会主义生产建设服务的方向，而同时又暴露了很大的特点，那就忽视了理论建设。因此，这些分支学科在扩展实践的同时，要加强理论研究。

还有一些人文地理学的分支学科发展是比较差的，是薄弱环节，如政治地理学、文化地理学和乡村地理学，其中有些分支基本上还是空白，如社会

地理学、行为地理学等。这些分支之所以研究得不多，是由于过去在左的思潮下不便于开展。例如，政治地理学包括地缘政治的研究，一度被视为禁区，而在国际上很多经济发达国家在制定对外政策时，无不讲究地缘政治。在这些分支学科方面有很多问题，需要我们组织力量，加强研究，填补空白。

我国要建设具有中国特色的社会主义，在这个总任务的前提下，我国人文地理学的发展也必然要求因地制宜具有中国特色。这就要求开展人文地理学的研究首先要根据中国的国情特点，适应我国社会、政治、文化的发展趋势和改革、开放的需要，研究在我国社会主义发展的初级阶段进行现代化建设的过程中的一系列具有明显的地域性和综合性相结合的重大问题，也就是把解决有关人文地理学的现实问题作为我们的主攻方向。这样既可满足客观的需要，又具备其实现的可能。

我国社会经济的加速发展，为人文地理学提供了极为丰富的研究内容，但同时客观上也提高了对人文地理学的要求。挑战与机遇并存，使我国人文地理学迈入了一个重大的转折阶段。面向 21 世纪，谋求社会经济的持续发展，中国人文地理学的发展主流，将是力求在解决社会发展与经济建设中所带来的或将面临的有关重大科研问题方面发挥学科的独特作用，作出具体贡献，同时并开展一些具有全球性意义的项目，积极参预国际合作研究。

根据我国国情和国际地理学的发展趋向，我国人文地理学面向 21 世纪的研究重点，将集中在以下几个方面：

### 一、协调人类与自然关系，谋求社会经济的持续发展

人类社会经济迅速发展和技术进步，大大提高了人类的创造力，但人地关系方面出现了诸多不协调的重大问题，特别是人口剧增、某些资源供不应求，灾害频发和环境恶化等问题，因而协调人地关系已成为全人类的当务之急。联合国 1992 年“环境与发展”会议提出的《二十一世纪议程》，其中心目标就是通过协调人口——资源——环境三方面的关系，以谋求全世界、各国、各地区社会经济的持续发展。我国在经济高速发展的过程中，人口、资源、环境等问题将是长期的制约因素，必须充分认识人类活动和资源、环境的相互促进和相互制约作用，探讨持续发展的理论和方法。以此为导向，根据不同类型地区，因地制宜地研究社会经济持续发展的模式，为正确制定各项社会经济活动的战略和规划，提供可靠的科学依据。

### 二、人地关系地域系统的理论与调控

在上述协调人地关系的实践基础上，相应开展有关的理论研究，包括：人地关系地域系统的形成过程、结构特征和发展趋向的理论和整体调控的途径与对策；人地两大系统之间的相互作用、物质和能量的传递与转换的机理、功能、强度分析、潜力估算，后效评价和风险分析；人地相关系统的地域分异规律和地域类型分析；不同类型和不同尺度的地区人地相关系统的动态仿真模型和人地关系协调发展的优化调控模型的研究；人地关系动力学与持续发展的理论与研究方法体系。

### 三、地区资源系统和生产力布局

以往地理界对资源的研究大多以单项资源为主，而事实上各种自然资源之间存在着相互依存关系，形成一个资源系统，它和当地的生态系统有着有机联系。当一项资源被开发之后，往往产生一系列的连锁反应，影响到整个生态和资源系统。因而为了更好规划资源的开发和保护，就需要研究一个地区资源系统的结构和功能，考虑地区资源的整体性和稳定性。根据资源有效利用原则，优化生产力布局，促进地区经济和合理分工与协调发展，形成有利于发挥地区特色和区际协作的经济体系，把全国经济的统一性和地区经济的特色结合起来。为此开展研究：自然资源的分布，地区组合与技术经济评价；地区自然资源系统的合理开发和有效利用的整体研究；生产力发展的自然资源基础和资源合理分配与地区产业结构的相关；资源开发——生产力空间结构——区域发展——环境效应的系统研究；土地与水资源的合理利用与有效保护；探索不同类型地区建立资源节约型的社会经济体系。

#### 四、全球环境变化及人类活动对环境的影响

在国际上对全球变化的研究已由气候变化扩展到从全世界着眼探讨整个地理环境的变化以及和人类活动的相互关系，并进一步设法度量在变化过程中的人地关系（human dimension of global environmental change），需要多学科的配合。由于人类活动对环境的影响已达到十分明显的程度，因而有必要把人地关系纳入地球过程的研究，促进自然科学和社会科学的联系。人文地理学侧重研究：全球变化对社会经济的影响及其对策；从土地利用变化衡量人类活动对环境的具体影响；全球变化对我国环境脆弱地区的影响；环境质量的系统分析与综合评价；地区环境质量变化趋势的预测与综合治理；人类活动与自然灾害的相互作用与减灾的对策。

#### 五、地区综合发展的战略与规划

从地区赋有的资源和建设条件入手，探讨优化地区人地关系系统的具体途径，目标是提出因地制宜的发展战略。为此要开展研究：社会经济地区差异与调控；经济发展的地区分工与地区产业结构优化问题；区域发展与人口、资源、环境的相互协调；全国范围内地区发展的均衡与不均衡问题；区域发展决策与调控的新技术应用与方法；扶助贫困地区人民脱贫致富；区域社会、经济、文化结构的时空演变及其整合过程；我国各地区经济、文化结构的演变与世界政治、经济、文化的关系；从地缘政治和地缘经济的角度研究我国参与亚太地区、特别是和东亚国家经济合作以及和内陆周边国家发展经济贸易关系的前景。

#### 六、国土开发整治的宏观调控

自 80 年代初以来，我国人文地理工作者积极而广泛地参与全国性和地区性国土开发、整治和规划工作，在此实践基础上可进一步深入研究：国土开发整治重大问题与重大项目的论证；我国重大工程建设对环境与生态系统的影响以及工程建成后的效应；国土规划的科学管理和实施跟踪；国土规划数

据建库与数学模型的应用。

## 七、乡村发展、城市化与城镇体系

以往在人文地理学范围内，对乡村和城市由农业地理和城市地理工作者分别研究，由于城市关系日趋密切，今后的趋势要加强城乡的关联研究，为此要研究：城乡人口和城乡地域划分的科学依据；乡村人口转移与城镇化机制；城市密集地区经济和人口的空间集聚和地理扩散；不同类型地区的城市化与城镇体系演化的动态机制及优化调控；保护与改善城市生态；不同类型地区乡村的产业结构与布局调整。

## 八、海洋经济与立法

由于人口增长和生产发展，陆上某些资源将出现供不应求的局面，因而开发海洋已成为滨海国家的大事，近年历次国际海洋会议就着重讨论海洋经济与立法问题。为了摸清与我国有关的 300 万平方公里海域内的资源情况，并为最后划定我国的海洋经济专属区作好准备，就有必要加强海洋经济和立法。为此要着重研究黄海、东海、南海海域的资源开发与保护，以及沿海海岸带社会经济的持续发展问题。

我国发展人文地理学有其天赋的优越条件，首先是地理环境复杂，少数民族众多，不论自然和人文方面都有丰富的研究内容。其次是文化历史悠久而变化大，近年又处于改革的阶段，出现了多种多样的新问题，客观上都需从动态观点研究其来龙去脉；人文地理学将是中国地理工作者的一个极其广阔的研究领域，根据社会经济发展的客观需要，这方面的研究规模和专业队伍将不断扩大。完全可以预计，中国地理学以往重自然地理轻人文地理的局面，在不远的将来将完全改观。

## 吴汝康



1916年生，江苏武进人。古人类学家。

1940年获中央大学学士学位。1947年获美国圣路易斯华盛顿大学医学院硕士学位，1949年获该校博士学位。中国科学院古脊椎动物与古人类研究所研究员，精于人体解剖学和人类学研究。与他人合作出版的《人体解剖学》、《人体解剖图谱》在国内外解剖学界享有声誉。在人类学研究方面，先后对蓝田猿人、北京猿人、马坝人、丁村人、柳江人、资阳人和禄丰古猿、巨猿等，做了系统研究。提出从猿到人的过渡、人类体质发展的不平衡性，人类的新进化等理论，创建《今人类学》的新学科，在国际学术界获得高度评价。

## 人类起源研究的现状和展望

吴汝康

人类起源问题是迄今尚未解决的十大科学问题之一。

1871年达尔文在《人类起源》一书中指出，人和猿最重要的区别在于两足直立行走的行动方式以及小的犬齿、高度的智慧和使用工具。然而从达尔文时代以来直到本世纪40年代，人们大都认为人为万物之灵，有高度的智慧，因此必然有大的脑子，片面强调大的脑子是人和猿相区别的标志，原始人类应有比猿为大的脑子。这种关于人类标志的先人之见，在形成人类起源的科学观点中起了重要的作用。1912年英国人道森(Charles Dawson)宣称发现了脑袋像现代人而下颌骨像猿的远古人类(皮尔唐人)，更助长了这种观点。

### 一、对人类特征偏见的转变

1924年南非威特沃特斯兰德(Witwatersrand)大学医学院的年轻解剖学家达特(Raymond A. Dart)根据汤恩(Taung)地方的采石场工人爆破出来的一个小的化石头骨，既具有某些猿的性状，又具有某些人的性状，他认为这是已发现的与人的系统最相近的一种绝灭的猿，命名为南方古猿(Australopithecus)。1925年在英国《自然》杂志上发表文章后，受到当时有关的权威学者的冷遇，认为它不过是一种特化的猿，与人的系统无关，虽然它有似人的牙齿和前额，但是它的脑子太小，与人类起源没有特殊的关系。

30年代以后的10多年中，有更多的南方古猿化石发现，肯定它已能两足直立行走，可是当时大多数人类学家还是抱着否定的态度，正像当时美国的权威人类学家哈佛大学教授胡顿(Earnest A. Hooton)在1949年出版的《从猿到人》一书中所说的：“这些南非更新世的猿……缺乏发育良好的脑子，而大的脑子是人的特征，或者可以说是与人的直接祖先是否有关的最终标准……因为它们的脑子太小，即使牙齿像人，但仍然是猿。”

50年代初，1912年设置的皮尔唐人的骗局被揭穿了，原来是伪造的现代人的头骨配上一个现代猿的下颌骨的假化石。另一方面，南方古猿的化石有了不少新的发现，从而改变了人们对南方古猿的看法，逐渐承认它是人科的最早成员，肯定了它在人类进化系统上的位置。

现今，最早的南方古猿化石距今的年代接近400万年前，结合半个多世纪来在亚、非、欧各洲的许多地点发现的人类化石，确立了从南方古猿到能人，再到直立人，再到智人(早期智人和晚期智人)的完整的人类进化系统。

### 二、腊玛古猿的被提升和贬谪

人是古猿进化来的，什么古猿最早踏上人类的征途？南方古猿以前的什么古猿可能是人的系统上的最早代表？

从本世纪60年代中开始，中新世的20多种古猿中的腊玛古猿(Ramapithecus)被选中作为最早的人科成员，因为它有小的似人的犬齿和颌骨。而腊玛古猿最早的时代为距今大约1400万年前，从而认为人类起源的

时间至少是 1400 万年以前。

在 60 年代后期，分子人类学研究有了重要的发展。1967 年萨里奇和威尔逊 (Sarich and Wilson) 提出了分子钟的假设，用免疫测量法确定各种灵长类白蛋白的不同分量，从而推算出各种灵长类系统分离的时间，其结果是人类与猿类分离的时间在距今大约 500 万年前，而根据当时仅有的零碎化石推测的年代是在 1400 万年前，两者相差几达 1000 万年，因而古人类学家一般都认为分子钟的计算是不准确的。

近 20 多年来，免疫扩散、核酸 DNA 和线粒体 DNA、氨基酸顺序、凝胶的电泳等不同大分子比较的资料，都得出人与非洲猿的祖先分离的时间距今为 500~600 万年前，加减误差 200 万年，因而估计分离的时间在 500~800 万年前是合理的，最多不会超过 1000 万年。根据化石证据得出的 1400 万年以上的估计，现在看来是很少可能的。

另一方面，发现腊玛古猿类化石的材料和地点大量增加了，表明每一个化石地点甚至同一层位都同时有腊玛古猿和另一种肯定是猿类的西瓦古猿化石的存在，两者在形态性状的许多方面没有重大的差别。早在 1979 年就有人提出腊玛古猿是西瓦古猿的同义词，它们应该是同一类古猿的雌雄个体，它们的学名，根据国际动物命名法则，西瓦古猿属名的命名在先，腊玛古猿的在后，因此腊玛古猿的属名应予以取消，并入西瓦古猿属，作为西瓦古猿的雌性个体。近年来一般都同意这种意见，否定了腊玛古猿是最早的人科成员的代表，人类的历史明显比原先的设想大大缩短了。

### 三、新的发现和新的问题

近 10 多年来，世界各地发现了更多的古猿化石和人类发展各阶段的化石，作了进一步的研究，但也提出了不少新的问题。

腊玛古猿是最早的人科成员的观点被否定了。在亚洲和欧洲的中国、巴基斯坦、土耳其、匈牙利和非洲的不少地点，都发现了一些中新世的古猿化石，定了 20 多个拉丁文的种属名称，但它们与现存大猿或人类有什么关系，现在还没有一致的意见。又为什么中新世以后直到大约 400 万年前的近百万年时间内几乎没有古猿化石发现，存在一个时间上巨大空白？众说纷纭，也没有一致的意见。

从大约 400 万年前出现的南方古猿，分为两大类，即纤细型南方古猿和粗壮型南方古猿。每一类中又有几种类型，它们之间的相互关系有着多种见解。还有人指出，一般认为纤细种在与粗壮种分离之后，与人属 (Homo) 有着共同的祖先，那么根据分支系统论的原则，则应归入人属而不能叫南方古猿。

在东非坦桑尼亚的莱托里 (Laetoli)，玛丽·利基 (Mary Leakey) 发现了一组保存得极好的足印，其年代相当可靠，是距今 370 万年前的。有两个人并排行走，另一人踏过了其中一人的足印。这三个人是走过新近落下的火山灰上，火山灰后来凝固了，足印保留了下来，而且保存得非常好，以致能描绘出足印的细节，可以肯定这种人的步态。这种足印完全像现代习惯性地赤脚行走的人的，是非常清楚的直立行走的步态。与四足行走的黑猩猩托沓的步态绝然不同。

两足直立行走是人类出现的关键性的一步，是人类发展史上第一个大事

件。

在莱托里还发现了距今 370 万年前到 300 万年前的南方古猿的化石标本，其年代与足印化石相当。在埃塞俄比亚的阿法（Afar）地区也发现有类似的南方古猿标本，可以肯定是直立行走的，可是它们的脚骨并不现代化。莱托里的人类足印很像现代人的，而阿法的脚骨化石却明显不是很现代化的，这是现在不能解答的一个谜。其它地区发现的较晚的类似阿法的不现代化的脚骨化石表明它几乎持续了 200 万年之久，这就更增加了与足印化石的矛盾。专门研究人猿超科成员的步态和肢骨的美国芝加哥大学的塔特尔（Russell Tuttle）教授设想足印是尚未发现化石的另一种人的。

从 1960 年起，在东非坦桑尼亚的奥杜韦（Olduvai）和肯尼亚特卡纳湖（Lake Turkana）岸的库彼福勒（Koobi Fora）陆续发现了能人（Homo habilis）化石，脑子扩大了，开始能制造工具，其年代为距今大约 190 万年前。

1992 年英国的伍德（Bernard Wood）从各方面检查了有关能人的材料，提出能人标本不是一个种的，其变异范围太大。奥杜韦的标本是一个种，可以叫能人，而库彼福勒的标本，则是另一个种，可以叫鲁道夫人（Homo rudolfensis）。这个名称的来源是特卡纳湖以前叫鲁道夫湖。这两个种是同一个时期的，都处于原始的人属水平，因而广义的能人现在可分为两个种。1992 年美国耶鲁大学的希尔（Andrew Hill）及其同事在清理 1967 年在肯尼亚巴林戈（Baringo）湖区发现的材料时，发现了一块头骨右侧底部的破片，认为与所有的南方古猿标本不同，应归属鲁道夫种。特别重要的是其年代，用钾氩法测定，为距今 240 万年前，而以前发现的能人化石最早的不过 200 万年，这个发现把人属的年代大大推前了。这个年代与现今已发现的最早石器的年代 250 万年前相接近。

根据以上的介绍，如果早期的人属归入一个以上的种，则大约 200 万年前前后有三个种出现，即能人种、鲁道夫种和相当于直立人种的匠人种（Homo ergaster）。原先常把能人当作直立人的单线的祖先的观点，现在成了新的问题。

直立人化石最早从 19 世纪末在印度尼西亚（当时为荷属东印度）的爪哇猿人开始，引起了是人还是猿的争论。从本世纪 20 年代后期起，在我国北京房山区周口店陆续发现了北京猿人的化石，从而确立了直立人（猿人）在人类进化史上的地位。以后在亚、非、欧三洲的不少地点发现了这一阶段的人类化石。在非洲，直立人化石的年代最早为距今大约 170 万年前。在亚洲和欧洲，最早直立人化石的年代现在还有争论，不能肯定。1991 年在高加索格鲁吉亚共和国第比利斯附近发现了一具保存良好的直立人下颌骨，其年代据古地磁法测定，为距今 90 万年或 160 万年前，钾氩法测定结果则支持早的年代。如果这个很早的年代能够成立，则表明欧洲最早的直立人与非洲的同样古老。最近报道，爪哇猿人最早的年代为距今 180 万年前。

一般认为直立人最早起源于非洲，然而分布到欧洲和亚洲。由于年代测定的不稳定性，目前还难于作出定论。

非洲发现的较早的直立人头骨，如库彼福勒的 ER 3733 和 ER3883 头骨等比其后的直立人头骨为薄和细致，还有其他一些与智人较为相近的形状，因而英国的伍德于 1991 年把这些较早的标本从直立人中分离出来，归入另一个与之密切相关的种叫匠人种。伍德认为其时间较早，形态上却更近于其后的人类主干。但其他人则认为匠人只是直立人的同义词。

直立人之后是智人。智人一般分为早期智人（或远古智人）和晚期智人（现代人）。

现代人是怎样起源的？长期来有两种理论。一种叫直接演化说（Direct evolution hypothesis），也叫多地区起源说或连续说。这种理论认为现代人是当地的早期智人以至猿人演化而来的，各人种在很久以前即已分歧，各自平行发展演化成现代人，但长期来互相有基因的交流。例如欧洲的白种人是由当地的尼安德特人逐渐演变来的；亚洲的黄种人是由当地的早期智人和猿人演变来的。另一种理论叫入侵说（Invasion hypothesis），也叫迁徙说或代替说。这种理论认为欧洲是典型尼人的家乡，而解剖结构上的现代人是在欧洲以外地区演化出来，然后侵入欧洲的尼人区域，消灭了土著的尼人而形成的。侵入亚洲的也一样，形成现代的黄种人。这种单一地区起源说过去一般认为亚洲西部是现代人最早形成的地区，近年来有人提出非洲南部才是现代人最早形成的地区，然后迁徙到世界各地。最近这个问题又发生了激烈的争论。

1987年1月，英国《自然》杂志发表了美国伯克利加利福尼亚大学的分子生物学家卡恩（Rebecca L. Cann），斯通金（Mark Stoneking）和威尔逊（Allan C. Wilson）的题为“线粒体DNA与人类进化”的文章，他们选择了其祖先来自非洲、欧洲、中东和亚洲的妇女以及新几内亚和澳大利亚土著妇女总共147人，利用她们生产婴儿时的胎盘，分析了胎盘细胞内的线粒体（mitochondrion）的脱氧核糖核酸（DNA）。他们发现不同类型的线粒体DNA，有些互相接近，有些则差别较大。由此作了一个系统树表示其相互关系，结果是该树来自单一的共同祖先，而很快分为两支，一支的线粒体DNA都是从非洲祖先而来的个体，另一支则来自非洲、亚洲、澳洲、高加索和巴布亚新几内亚的祖先，这种类型最简单的解释是其共同祖先来自非洲。根据已知的线粒体DNA突变的速度，计算其年代为距今14万至29万年。平均为20万年。他们由此提出，所有婴儿的线粒体DNA向前追踪，最后追到大约在20万年前生活在非洲的一个妇女，这个妇女是现今全世界人的祖先。大约在13万年前，她的一群后裔离开其非洲家乡，分散到世界各地，代替了当地的土著居民，最后在全球定居下来。

这个理论提出后，引起了激烈的争论。遗传学家中有不同意见，古人类学家中也有不同意见。有的热烈支持，有的激烈反对。

#### 四、展望

展望未来发展的趋势，提出以下几点看法。

##### 1. 更多化石的发现

人类起源的直接证据是人类化石（包括猿类化石），这类化石，特别是早期的，不仅稀少，而且通常都是破碎的、不完整的。预期在世界各地将会有更多的人类化石发现，在数量和种类上都会有所增加。但是不要希望一旦会有“重磅炸弹”出现，需要长时间的逐渐积累。新的化石的发现会进一步肯定或改变我们的观点。会像以前一样，经常发生争论，但是在更为稳固的基础上的争论。

##### 2. 化石年代测定方法的改进

化石年代的测定对于确定它们在进化系统上的位置，有着极为重要的作

用。现在测定化石年代的方法，不仅有相对的测定法，还有多种绝对年代测定法，最常用的如古地磁法、钾氩法、铀系法等，但是每一种测年法都有局限性，都受到多种因素的影响。随着各种测年法的改进和完善，将对人类起源的研究发生更大的作用。

### 3. 分子人类学的进展

分子人类学的进展已经对人类起源的时间发挥了重要作用，近来又激化了现代人起源的两种理论的争论。预期分子人类学的迅速发展和它在进化上的应用得到更好的了解时，将对人类起源的研究产生更大的影响。

### 4. 各种新技术的应用与人类行为的研究

各种新技术和数理统计方法的应用，提出了多种人类行为的新的证据，从牙齿的显微擦痕的研究，可以得知所吃食物的种类。微量元素和放射性同位素的分析，有助于了解史前人类的食物结构和营养状况，如锶、镁、铜、铁等元素以及一些放射性同位素如碳、氮含量的比例，可以了解史前人类的生活方式和经济形态，对于了解农业的起源和新石器时代的发展具有特别重要的作用。骨骼的生长发育状况和所遗留的创伤和病灶，有助于了解某群人或某一阶层人口的营养条件、劳动分工和强度，常见病以及死亡率和平均寿命。

### 5. 我国在人类起源研究中的作用

我国是人类发展的重要地区。我国已发现有几种古猿化石和许多人类化石，特别是直立人及其后的人类化石。现代人起源的多地区起源说的化石证据，主要来自中国。预期今后在我国会有更多的各种人类化石的发现；各种化石年代测定法也在积极开展中；电子计算机和各种数理统计方法在广泛应用；分子人类学的研究和一些新技术的应用，例如史前人类骨骼微量元素的分析，骨骼病症的鉴定等也在进行中，今后我国会在人类起源研究中发挥更大的作用。

## 何祚麻



上海人，1927年8月生。粒子物理、理论物理学家。1951年毕业于清华大学。中国科学院理论物理研究所研究员。主要从事理论物理学、科学史、自然辩证法、哲学、政治经济学等方面的科学研究并取得多项重要成果。在物理学方面，对弱相互作用特别是 $\mu$ 俘获问题作了深入研究，发现了一系列新的选择法则；首次提出 Chew Mandelstam 推导的方程有严重错误；对层子模型进行了合作研究。对复合粒子量子场论建构了一个新的理论体系，对宇宙论中的暗物质问题，如中微子质量问题等进行了创造性的有价值的研究。在科学史、自然辩证法、哲学、政治经济学等方面，曾先后探讨了有关中国古代元气学说方面若干重要问题，并着重探讨了粒子物理和宇宙论研究中有关马列主义哲学问题，曾先后探讨了粒子的可分性、场的可分性、真空的物质性、宇宙的有限和无限等问题，澄清了对这些问题认识上的一些模糊观念。近来又在量子力学和认识论问题方面进行了大量的工作，澄清了对“波包扁缩”问题，EPR 佯谬问题等一些错误观念。在科学方法论、教育经费、科技政策、社会经济、政治、和平与裁军等研究方面取得重要成果。

## 发展中的理论物理学研究

何祚庥

国家自然科学基金委员会自 1993 年起给理论物理学科增拨 100 万元“专款”，以支持理论物理学的发展。这是一个有远见的决定，也是一个十分重要、十分正确的决定。

理论物理学的发展对国民经济的发展、对科学技术革命，在历史上曾起过重大作用。我国“两弹”过关的历史经验表明：“两弹”的过关首先要打好“理论仗”，要从理论的角度高瞻远瞩地为科学技术的发展路线问题做出正确的战略决策。理论物理学者的一个重要职责就是结合国家的实际需要，为国家挑选出最具有发展战略的技术开发项目，并为这些项目的决策提供理论依据。

1955 年，我国的现代化空军建设正处于草创时期。当时的有识之士指出：中国与其重点发展空防飞机，不如重点发展导弹。导弹有远比飞机速度更高的“马赫数”，不论从攻击或防御的角度，其性能均比飞机优越。当时从世界范围来说，洲际导弹尚未过关，人造卫星尚未上天，以中国如此落后的技术基础，能否迅速掌握这一有待开拓的技术，是一大疑问！然而正如一些理论工作者所指出：飞机的困难不仅有理论上和技术上的困难，还在于有无尖端的材料的困难。飞机的起落和使用的多次性，决定了对材料的选择比较苛刻，其解决尤其依赖于经验的积累，远非短期内所能奏效。而导弹的材料却是一次性的。导弹的困难在于制导。这有赖于聪明的设计。于是，一个重大的战略决策便做出了，我国将优先发展导弹技术。

1955 年，我国在发展核武器的技术问题上，又面临一次抉择：是选择钚 239 还是铀 235？乍一看来，实现化学分离将比物理分离更容易。然而钚和铀的化学分离有两个问题，一是要处理反应堆中铀棒照射后的强放射性。二是钚有剧毒，因而，实现这一化学分离并不容易。相反，铀 235 和铀 238 的同位素分离及其所需的分离膜的制备工作，只要有优秀的理论物理学家、优秀的化学家参加工作就能完成，反而比从反应堆中实现铀、钚分离更为容易。

在确定了我国核武器的核材料以后，接踵而来的理论问题是：在爆炸机理上，是选择炮筒式还是内爆式？在原子弹发展的历史上，用铀 235 作燃料，首先采用的是炮筒式的引发方式；对钚 239 采用内爆式的点燃方式。但前者效率较低，后者效率较高。中国核武器面临的抉择是，能否在仅有铀 235 的情况下，直接采取比较先进的内爆式的机制来点燃铀 235 的原子武器？中国的理论物理工作者做了研究并和实验工作者一起解决了这些问题，从而实现了一颗由内爆式机理所触发的、由铀 235 所制成的原子弹。美国著名理论物理学家兼军事评论家在《中国原子弹的制造》一书的序言中指出：令人惊讶的是，这居然是一颗向心聚爆的浓缩铀弹。中国的原子弹制造者不但从气体扩散场得到了浓缩铀，而且还掌握了先进的向心聚爆技术（这项技术最初是为了钚弹而开发的），并把它用于浓缩铀弹，这是一项惊人的成就。

以上两项实例，是我国理论物理工作者和科学工作者，在国防尖端技术上所做出的历史性贡献。

理论物理学的研究还常常为物理学的发展以及整个自然科学的发展，带来新的理论观念、新的指导原则、新的探索新事物的途径。略为早一些的发现是量子力学的出现。正是量子力学为原子物理、分子物理以及原子核物理

奠定了理论基础，也深入地影响到化学、生物化学以及生命科学等等基本问题的研究。可以说，没有量子力学就没有自 50 年代以来蓬勃发展的各种现代科学以及新技术。

需要提到的是，自 50 年代以来，理论物理有一个重要的但却为人们忽略的一个进展。那就是由狭义相对论而广义相对论，而宇宙论的确定，亦即人们所属大爆炸的宇宙论。现在这一理论已得到多方面的实验验证，如宇宙红移、背景辐射、元素丰度、三代中微子等等，已被广泛承认为“标准模型”。自 60 年代以来，由于在粒子物理方面大量的实验数据的积累，理论物理工作者相继提出了夸克式层子的观念、层子模型或夸克模型，继而又将规范场论的原则应用于探讨层子或夸克间所可能的强相互作用、弱相互作用以及电磁相互作用。60 年代末 70 年代初又相继出现了弱电统一理论，量子色动力学的理论，并以此预言了“ $Z^0$ 、 $W_{\pm}$  粒子以及胶子的存在。自 80 年代以来，这些预言中的粒子均相继在实验中得到证实。于是，有关粒子物理研究中，粒子运动的基本规律就得到确立，并也被公认为“标准模型”。随着这一基本理论的确立，人们也就进一步移用于核物理、原子物理、天体物理以及宇宙论等研究领域。

21 世纪的理论物理将向何处去？历史即是现实的见证。理论物理学将一方面为开拓国民经济的新领域继续做出贡献，而另一方面又仍将继续向“粒子之小”和“宇宙之大”进军。如果有什么新的动向的话，那就是人们正在尝试将理论物理的思维方式以及技能等移用于解决复杂性问题。当前值得关注的一个重要问题，是要为宏观物理和微观物理间架起一座桥梁，亦即介观物理的领域。我以为，介观物理的研究将成为揭开复杂性问题的序幕。

## 邹承鲁



1923年生，江苏省无锡县人。生物化学家。西南联大化学系1945毕业，英国剑桥大学1951年生物化学博士。在中国科学院生物化学所，生物物理所从事研究工作四十余年。现任全国政协委员，政协常委。

中国科学院院士，学部主席团委员，生物学部主任。第三世界科学院院士。美国生物化学与分子生物学会荣誉会员。曾任美国哈佛大学访问教授，国立健康研究所 Fogarty 研究员。在胰岛素人工合成，蛋白质必需基因化学修饰和活性丧失的定量关系，酶作用不可逆抑制动力学，以及酶活动性部位柔性等工作中都做出重要贡献，曾获1993年第三世界科学院奖，陈嘉庚生命科学奖，国家自然科学基金一等奖两次，和中国科学院自然科学一等奖三次等奖励。在 *Comprehensive Biochemistry* 37卷生物化学史上发表自传，对当代生物化学发展的贡献已载入史册。

## 生物学走向 21 世纪

邹承鲁

生物学在 20 世纪取得了巨大的进展,数理科学广泛而又深刻地渗入生物学的结果,全面改变了生物学的面貌,开辟了在分子水平研究生命现象的新学科—分子生物学。分子生物学的研究,涉及生命现象最本质的内容,把在各个层次的生命活动有机地联系起来,在新的高度上揭示生命的奥秘。分子生物学渗入生物学每一个分支的结果,全面地推动了生物学的发展。细胞生物学和神经生物学,已相继进入分子水平,成为生物学领域内新的生长点。但它们已经不是原来的经典学科,而是以分子水平研究为基础的,面貌全新的现代细胞生物学和现代神经生物学。即使最古老的生物分类和进化也因为分享了分子生物学的成果而焕发青春。

50 年代 DNA 双股螺旋结构的确立和 X-射线衍射蛋白质空间结构的测定奠定了分子生物学的基础。生物学研究进入分子水平,才得以从本质上去探讨生命活动的规律,因此分子生物学成为当代生命科学基础研究中的前沿,开辟了现代生物学的全新局面;在另一方面它又使生物学以空前主动的态势,对人类物质生产和社会生活产生重大影响。1973 年重组 DNA 获得成功,开创了基因工程。以此为基础,生物技术作为前途远大的高技术产业在世界范围兴起,生物工程将成为现代化的大工业,与此同时还极大地推动了医学和农业科学的实践。在这些领域中正在展示出的广阔的应用前景,必将又一次引起人类社会和经济生活的革命。

### 一、分子生物学的兴起改变了生物学的面貌

#### 1. 组成生物体的基本物质

分子生物学的兴起首先建立在对组成生物体的基本物质的认识上。构成生物体的物质种类很多,但其中最重要的无疑是蛋白质和核酸。

蛋白质是生命活动的主要承担者,一切生命活动无不与蛋白质有关。新陈代谢是生命活动的主要特征,而构成新陈代谢的所有化学变化,都是在酶的催化之下进行的,除最近发现的极少数具有催化功能的核糖核酸以外,所有的酶都是蛋白质。生长,运动,呼吸,免疫,消化,光合作用,以及对外界环境变化的感觉并作出必要的反应等,都必须依靠蛋白质来实现。虽然遗传信息的携带者是核酸,但遗传信息的传递和表达不仅仍然是在酶的催化之下,并且也是在蛋白质的调节控制之下进行的。

每一个蛋白质都有它自己的一定的氨基酸序列和一定的空间结构。50 年代中,胰岛素分子的氨基酸序列及二硫键连接方式的阐明,是蛋白质一级结构测定的开始。40 年来氨基酸序列被测定的蛋白质已有数千。蛋白质分子,除有以氨基酸组成的并有一定顺序的肽链结构以外,还具有肽链在空间的卷曲折叠而形成的三维空间结构,第一个被测定空间结构的蛋白是肌红蛋白。只有处在这种特定的三维结构中的蛋白质分子才是能够发挥生物功能的活性蛋白。因此,即使肽链的氨基酸序列不变,只要空间结构被破坏,就会导致蛋白质功能的丧失。蛋白质在肽链保持完整下空间结构的破坏,称为蛋白质的变性,这一概念是我国科学家吴宪在 30 年代初根据他在国内的工作首先提出来的,长期来被国际上广泛接受。

蛋白质晶体 X-射线衍射仍然是蛋白质空间结构测定的主要方法,已经确定空间结构并存入数据库的蛋白质已达 1000 个以上,但是这些一级结构和空间结构被测定的蛋白质,只不过是自然界数以百万计的蛋白质中的一个微不足道的部分。在结构研究领域内,近 20 年来发展起来的二维核磁共振方法已经显示了它对蛋白质在溶液中的空间结构和运动状态方面研究的优势,现已解出了上百个较小蛋白质的结构,也许会在不久的将来为生物大分子空间结构测定带来又一次突破。

结构与功能关系的研究,一直是蛋白质研究的核心问题之一。过去最常用的方法,是用化学方法修饰蛋白质的侧链基团,以观察对蛋白质生物活性的影响。现在,体外基因突变技术,特别是定点突变的发明使可以任意改变蛋白质分子中的氨基酸残基,并观察其对生物功能的影响。另一个重要的问题是蛋白质空间结构与其生物活性的关系。我们新近的研究结果指出,空间结构对酶的功能至关重要,即使极其细微的扰乱,也会导致酶活力的丧失。但是,蛋白质分子并不是一个刚性分子,它的空间结构在一定程度上是在不断运动之中,即使在晶体状态下运动也不停止。实际上,蛋白质的功能不仅与分子结构本身密切相关,而且必须依赖于结构的这种运动性能,酶分子活性部位的一定程度的柔性,亦即可运动性,正是酶充分发挥其催化功能所必需的。

核酸是遗传信息的承担者。绝大多数生物体的遗传信息存在于 DNA 分子之中,DNA 的复制构成了遗传的分子基础。这一复制过程是极为可靠的,发生错误的可能性虽然仅为一万亿分之一。

50 年代 X-射线衍射 DNA 分子双股螺旋结构的测定,是分子生物学发展史上的一个里程碑。此后虽然又发现了 DNA 分子中有不同类型的双股及三股螺旋结构,但是核酸分子的主要生物功能仍然是由特定的双股螺旋承担,其他结构的功能目前还不太清楚。核酸的序列测定也是分子生物学中的一个突破,并且取得了极大的进展。全自动序列测定仪的出现和不断改进,不仅已经使蛋白质氨基酸序列的测定逐渐被它的编码 DNA 的序列测定来代替,而且使人类基因组 DNA 全序列的测定得以提上日程,并引起全世界科学界的巨大兴趣及争议。人类基因组含有 30 亿个碱基对,它的全测定,美国已经在国立健康研究院建立了专门的组织并着手进行,其他国家的科学界对此也极为关注。从现在的进行速度来看,估计在 2005 年可以完成,投资 30 亿美元,这是生物学领域中的第一项所谓大科学。全部完成后,如果印成书,以每面 3000 个印刷符号计,会有 100 万页,这将远远超过现有的任何一种百科全书的篇幅。对这一工作也有不同看法,支持者认为,这一宏伟计划的完成将使我们能从根本上掌握人体所有生命活动的遗传信息,因此应该可以对现在还不能控制的各种危及人类生命的常见病,遗传病以及癌症,找到根本的解决办法。反对者则认为,人体基因组中大部分 DNA 序列不编码任何蛋白,其功能还不清楚,集中大量资金解决其全序列未必能达到期望的宏伟目标,并势必影响其他急需科学项目的投资。再者,这项工作较多的是需要工作量的积累,看不出可以全面推动和促进生物学发展的前途,因此在基础研究和实际应用两方面,似乎都将是得不偿失的。

## 2. 生命活动的基本规律

遗传信息由 DNA 到 RNA 再到蛋白质的过程,是分子生物学的核心,通常称之为中心法则。虽然后来发现有一些病毒的遗传信息是由 RNA 携带

的，在这些病毒的复制过程中，信息由 RNA 传给 DNA，这一过程称为反转录，但这不过是极少数特例，并不影响分子生物学中心法则的普遍性。

经过多年的研究，遗传信息由 DNA 到 RNA 再到多肽链的合成过程已经基本清楚。现在的问题是，这一过程是怎样得到调节控制的。这不但是细胞发育分化的基础，也和生物体与各种环境因素的相互作用有密切关系。现在看来调节主要发生在转录阶段，通过某些特定蛋白质与 DNA 的结合，从而控制信使 RNA 的合成。另一个问题是，蛋白质分子除一定的氨基酸顺序外，还必需有一定的空间结构才能体现生物功能。因此，怎样以一定氨基酸顺序排列的多肽链，生成有一定空间结构的蛋白质，也是分子生物学中心法则目前还完全没有解决的问题。遗传信息传递的调节控制和新生肽链的折叠现在是分子生物学研究中的二个核心问题。当前，通过遗传工程或蛋白工程得到多肽链的表达已经不会有根本上的障碍，通常遇到的困难是所得到的多肽链不能自己折叠卷曲生成有一定空间结构并具有完整生物功能的蛋白质，因此这两个问题的研究也有很大的实际应用价值。

近年来的一个出人意外的发现，是某些 RNA 具有转换酶或水解酶的活性，可以把 DNA 的转录产物加工为成熟的信使 RNA。虽然 RNA 的催化活力远比一般的酶低，并且这一发现也并不影响分子生物学发展的主流，但是由于蛋白质的合成依赖于核酸的编码，而核酸的合成又依赖于酶（蛋白质）的催化，因此在生命起源问题上，长期存在着先有核酸还是先有蛋白质的疑问。RNA 既能携带遗传信息，又具有酶活性的发现，为 RNA 或某些类似 RNA 的分子在生命起源过程中最先出现，而 DNA，蛋白质和酶都是 RNA 进化产物的假说，提供了有力的证据。

膜结构是生物体的基本结构之一。除细胞的外周膜之外，细胞内还有多种功能各不相同的膜结构。膜主要由磷脂和蛋白质组成，对于代谢活动旺盛的膜，如线粒体膜，蛋白是主要成分；相反，如神经细胞的外周膜，则以磷脂为主要成分。由于磷脂是以甘油，脂肪酸酯和磷酸酯组成，因此既有脂溶性部分，也有水溶性部分。它在水溶液中的稳定结构，是以脂溶性部分内向，水溶性部分外向的双层结构，这也是膜的基本结构。蛋白质有的完全结合在膜的表面，有的穿透整个膜的双层，有的部分在膜的内部部分暴露在表面，还有一些镶嵌在膜的内部。此外，膜结构上有时还有少量的糖和 RNA，现已知道，糖与细胞间的识别及信息传递有关，它的重要性正开始受到重视。

许多极为重要的生命活动都与膜结构紧密相关。能量转换是生命活动的根本需要，无论是动物从食物的氧化中通过氧化磷酸化作用获得能量，还是植物从光能通过光合磷酸化作用取得能量，不能脱离膜的完整性。为了完成一个完整细胞所有复杂功能，细胞内部有多种以膜包含而与细胞浆相对隔离的小体，即细胞器。每一种细胞器都有其相对独立的，特定的功能，例如，细胞核含有担负遗传功能的染色体，它为膜所包围，以保持染色体的相对独立性和稳定性；又如，溶酶体含有多种水解酶，仅在特定情况下发挥其功能。如果不被膜结构所包围，则将破坏细胞内部的蛋白质等重要物质，从而导致细胞死亡。

近年对于膜研究的极大重视，主要是来自细胞与其周围环境的相互作用。从单细胞生物来看，必须通过其外周膜，才能有选择地吸取外界的营养物质，排斥外界有害物质，使其不能进入胞内。细胞还要通过其外周膜接受外界传来的信息，调整自己的生命活动以适应环境的变化。对多细胞的高

等生物而言，除上述所有活动外，还有细胞间的物质交换和信息传递。这些重要的生命活动，都要通过外周膜上的蛋白质（其中不少是糖蛋白）才能进行。细胞生物学和神经生物学领域内的许多重要问题都和膜—蛋白体系有密切关系。

由于膜外层的亲水和内部的疏水性质，一般物质是不能自由通过细胞膜的，这就保护了细胞内部环境的相对稳定性，使得尽管外部环境处于不断变化之中，细胞活动也可以不受过多的影响。但是，细胞又需要不断与外部环境进行相互作用，如从外界吸取必需的营养成分，以及从外部接受信息，并作出必要的反应等。从外部吸取营养物质是通过穿透膜的蛋白质来进行的，即使是像钠离子那样的普通物质，也必需通过跨膜的，有一定结构钠离子通道蛋白才能进入细胞。实际上，对钾钠离子出入细胞的控制是神经生物学研究的一项重要内容。

细胞内外和细胞间的信息传递，是通过细胞表面的一类被称为受体蛋白进行的。现在知道，激素，神经递质，细胞生长因子和分化因子，以及某些药物等，都首先通过它们与细胞表面的特异受体蛋白结合，才能把信息传递到细胞内部。动物体的感知行为，也必需通过受体才能实现。

### 3. 生命现象的多样性和生命基本原理的一致性

生命世界的多样性和生命本质的一致性，是一个辩证的统一。

多少世纪以来，生物学研究的主体一直是观察和认识生命世界的多样性。从生命现象的表面观察日益深入到生命活动本质的阐明，是生物学发展的必然趋势，也正是现代生物学的特点。分子生物学，自诞生以来短短几十年间所取得的一系列重大进展，深刻地揭示了虽然生命现象在数以百万计的不同种属中的表现形式是多种多样，千姿百态的，即使孪生兄弟也不完全相同，但是生命世界中最本质的东西，在不同生物体中却是高度一致的。

所有的生物体，从最高等最复杂的人到最低级最简单的单细胞生物，其基本组成物质都是蛋白质和核酸。它们的蛋白质都是由相同的 20 种氨基酸以肽键连接而成，核酸也都是同样的四种核苷酸以核苷酸链构成的。上面提到在核苷酸顺序和氨基酸顺序之间的对应关系，即遗传密码，除极少数例外，在整个生物界也是基本一致的。如果没有这种一致性，就不可能实现基因在不同生物体之间的转移及表达，已逐渐成为现代化大工业的遗传工程和蛋白工程也就完全谈不上了。

动物和植物从外界取得能量的方式显然不同。动物从食物的氧化通过氧化磷酸化获得能量，而植物从太阳光能通过光合磷酸化取得能量。然而现在知道氧化磷酸化和光合磷酸化这两种表面看来完全不同的作用，在分子水平上的机制却是极其相似的。二者都是通过电子在一系列的蛋白质间的传递，造成膜内外两侧的质子梯度差，然后合成腺三磷。整个生命世界都以腺三磷为细胞的各种活动提供能量。激素，以往一直认为是高等生物所特有的，但是近年来发现人雌性激素受体在酵母中表达后，对酵母细胞基因的转录可以进行依赖于雌性激素的调节。哺乳动物胰岛细胞分泌的胰岛素，也发现在某些单细胞生物中存在，并表现和在高等动物中类似的，促进生长的功能。生命活动高度一致性的阐明说明分子生物学确实已经深入到了生命现象的核心和本质。

### 4. 生物学的全新面貌

当前凡是研究生命现象的学科，不可避免地都要深入到分子水平去进行

本质规律的探讨，这使分子生物学很快就渗入生物学的各个领域，改变了整个生物学的面貌；同时也对医学和农业科学及其应用产生了巨大的影响。生物学的全新面貌最突出地表现在出现了一系列新的分支学科，如：分子遗传学、分子细胞学、分子分类学、分子神经解剖学、分子药理学、分子病理学、分子流行病学等等，影响到生命科学的所有领域，即使是生态学、古生物学和分类学等也不例外。下面我们简略地介绍分子生物学对一些基础生物学领域的影响，着重谈谈当代生物学研究的几个热点，以及虽然从表面看来和数理学科关系较远，但由于分子生物学的冲击也已面貌一新的学科。

作为生命体基本单位的细胞，和作为生命活动最高形式的神经活动是现代生物学研究的最活跃的领域，但是今天，这两门学科由于采用了分子生物学的新的研究思想和新的研究手段而获得新的生命力，研究步伐大大加快，与分子生物学一起发展成为当代生物学研究的三大热点。现在如果浏览一下这两门学科在国际上的主要刊物，或者重要国际会议的内容，就可以知道它们已经和传统的细胞生物学及神经生物学有了很大的不同，而是以分子生物学为基础，在分子水平上进行研究，从而面貌一新，实际上已经演变成为分子细胞生物学和分子神经生物学。

细胞学的基本知识早就告诉我们，所有细胞的分裂都有一个周期。直到现在，我们才从分子水平认识到细胞是如何控制其分裂周期的。一种可以称之为周期蛋白的物质在细胞内的浓度发生着周期性的变化，它的不断合成使其浓度不断增加，在细胞分裂之前达到高峰。周期蛋白活化了细胞内的蛋白激酶，后者活力的升高所引起的一系列化学变化会最终导致细胞分裂。在细胞分裂时，周期蛋白则迅速被水解，浓度下降；在子细胞中周期蛋白又重新合成并积累，这样开始下一个周期。控制这个周期的分子机制，在从酵母到人的细胞中是完全一致的，这就再次说明了生命活动在分子水平上的高度一致性。

一个单一的受精卵细胞怎样在发育过程中，逐渐分化成为一个由千千万万不同类型和不同功能的细胞组成的成熟个体，一直是细胞学研究的核心问题之一，也是发育生物学的中心内容。现在知道细胞的分化也是由基因决定的，是在由基因编码的，一类接受决定细胞分化方向信息的蛋白质的控制之下。例如，编码控制果蝇复眼细胞分化的有关蛋白的基因已被分离，DNA 序列测定的结果表明，它和癌基因有类似的特点，它所编码的蛋白质是一个膜蛋白，与某些生长因子受体结构相似，很可能具有酪氨酸蛋白激酶的活性。细胞发育分化的研究实际上已经是基因调控的分子生物学研究，而基因调控的分子生物学研究必需上升到去解释整个细胞的活动。各个学科之间的渗透和交叉如此密切是现代生物学的又一特点。

除物质交换外，细胞与外界环境以及细胞间的信息传递，也依赖于存在于细胞表面的或跨膜的蛋白质。这些蛋白质，称为受体蛋白，接受外界信息，然后把信息传达到细胞内部，再引起一系列的变化，调节细胞的新陈代谢，以适应外部的环境。这些蛋白质在生命活动中有多方面的重要作用。例如，某些生长因子就是通过受体控制细胞的分裂繁殖。这种受体蛋白能与鸟二磷（GTP）结合，因此被称为 G 蛋白。这个 G 蛋白—GTP 复合物能够把细胞生长的信息传递到细胞内，但它又有 GTP 水解酶活性，能在以上过程中把鸟二磷水解为鸟二磷（GDP）。所生成的受体蛋白—GDP 复合物则是细胞生长终止的信号。现在知道，G 蛋白在细胞生长调节等方面有重要作用。癌细胞生长失

调也与此有关。

在神经生物学领域中，神经细胞中信息的存储和组织，以及神经细胞间信息传递的研究，现在都已进入了分子水平。以电生理学而言，脑组织中的电流活动与膜的离子通道密切相关。这些离子通道都是跨膜蛋白，通过蛋白构象变化，控制离子出入神经细胞。这些离子通道蛋白大体上可分为配体控制，如乙酰胆碱受体，及电压控制，如钠离子通道蛋白两大类，它们都具有特定的专一性。现在不少通道蛋白的编码基因 DNA 序列，及由此得到的蛋白序列已经测定，在膜上的结构与其作为离子通道的功能关系也已有所了解。

动物一般有极强的感觉能力，这是动物生存所不可缺少的，也是神经生物学研究的重要内容之一。例如，某些动物感知气味的灵敏度及分辨能力都是极其惊人的。灵敏度可达一万亿分之一，并能分辨化学物质的光学异构体。现在这些现象已经从分子水平开始得到阐明。视觉，味觉和嗅觉等都有自己的受体，这些受体也都是蛋白质。这些受体蛋白质不但有极高的专一性，并且以极高的亲和力与配体结合，这就是生物体感觉的分辨力和灵敏度的分子基础。

大脑的研究也许是神经生物学领域中最复杂的问题了，思维，感情，学习，记忆都是大脑的活动，不少人认为它将是 21 世纪最活跃的研究领域，现在也已开始进入分子生物学研究的范围。我并不怀疑 21 世纪大脑研究将有突破性的进展，但最主要的进展必将从分子水平上取得。人的大脑可能含有一百万亿个突触接点，其物质基础仍然离不开受体蛋白。正是这些突触接点的连接组织方式，决定了人脑的活动。记忆的基础，可能与突触接点连接组织方式的改变有关，某些蛋白质的磷酸化，能对突触接点的加强或减弱起调节作用，从而影响突触的连接组织方式。

分类和进化是生物学领域中历史最悠久的学科之一。近年来由于分子生物学的影响，这两门古老的学科已经产生了根本性的变化。过去主要是依靠生物体的形态，并用生理特征作为辅助，探讨亲缘关系的远近，进行分类和研究不同种属间的进化关系。对于形体简单的生物体，如细菌等，生理特征的比较就成了主要手段。近年来由于蛋白质和核酸序列研究的突破性进展，人们逐渐发现了不同生物体中担负相同功能的蛋白质和核酸在序列上的相似性和它们在亲缘关系上的远近有直接的联系。由于生物体适应环境的能力，其形态和生理受它们所生活的环境的影响很大，而蛋白质和核酸序列则反映了不同生物体进化演变更为根本的性质，较少受环境影响，因此也更为可靠。

目前应用较多的是核糖体 RNA 序列的比较。在原核生物中，过去的习惯分类法是分为蓝绿藻和细菌。现在根据 RNA 的序列更为合理的分类是分为古细菌和真细菌。前者包括甲烷菌，硫细菌和嗜盐菌，后者则包括其他较为常见的细菌如杆菌等。两者在细胞膜脂质的化学组成上也有明显的不同。关于真核生物的分类学，人们利用核糖体 18SRNA 序列的比较，也解决了一些过去不清楚的问题。

除直接的核酸或蛋白质的序列比较外，还可以用较为简单的不同种属间单股 DNA 的杂化，或抗原抗体的相互作用来分别比较 DNA 或蛋白质结构的相似性。根据碱基配对原理，不同种属间 DNA 序列越相似，其单股 DNA 配对后生成的双股 DNA 分子就越稳定。抗原抗体的相互作用也有类似的关系。这些方法都是不需要复杂的技术或设备就可以做到的。对于高等动物所得结果虽然大体上和经典的看法近似，但也澄清了一些过去有一定争议的问题。例如，

根据 DNA 的杂化和免疫蛋白的相互作用，明确了熊猫属于熊科，而不是属于猫科等。和传统的方法相比，这类方法的另一个优点是可以根据核酸或蛋白质序列差异的程度，判断种属之间的分化时间。例如，熊猫与熊科其它种属分化的时间是 1500 万至 2500 万年前，人类和黑猩猩的分化时间是在 630 万至 770 万年前。

由于冷冻的尸体，骨骼，甚至化石中的 DNA 分子仍能保存一定的完整性，这就使对现已灭绝的生物种属在分子水平上研究其进化和分类成为可能。例如，西伯利亚冻土中保存的猛犸象尸体中的 DNA 仍然相当完整，其序列分析结果充分说明猛犸象和现代象有密切关系。已知保存最久的 DNA 或许是保存于琥珀中的象鼻虫（黎巴嫩）的 DNA，已有 1.2 亿年，但序列仍然相当完整。从其序列可以确定其与现有种属的关系。在美国 Idaho 州湖底发现的叶化石中的 DNA 也有 1700 万年以上的历史，是编码光合作用中一种极为重要的酶，核酮糖—1，5—二磷酸羧化酶—加氧酶的基因片断，从 DNA 序列比较使对这种现已灭绝的植物与现存种属的关系的研究成为可能。类似的研究已形成了一门新的学科，分子古生物学。

考古学从表面看来和生物学关系不大，甚至可以被认为不属于自然科学。但是考古学家现在也不能不对分子生物学有所了解。近年来对保存了几千年的埃及木乃伊进行研究的结果，发现其体内的 DNA 分子仍然保存了一定程度的核苷酸顺序完整性，由于人体内的所谓卫星 DNA 的核苷酸顺序是极端多变的，对每一个人都不一样，不同个体之间 DNA 顺序的相似性，依赖于他们之间的血缘关系。因此对埃及王族木乃伊的 DNA 的序列分析，就可以对埃及王族的世系有所阐明。

#### 5. 生物学已经对人民生活产生了巨大的影响

分子生物学的兴起还不到 40 年，它所取得的成果，已经在工业，农业及医药卫生等方面有了重要应用，特别是基因在不同个体，甚至在远为不同的生物种属之间的转移，为某些遗传疾病的治疗，和新品种的培育等提供了前所未有的可能性，从而为人类健康，农业增产，以及控制和改造整个地球上的生物界展现了无限广阔的美好前景。但从近年来的发展看，这还不过仅仅是一个开端，将来必然会有更为广阔的发展前景。分子生物学成果在工业上的应用，产生了以基因工程为基础的生产生物制品的一种新兴的工业。从一种生物体分离编码某个蛋白质的基因，即 DNA 片断，再人工重组到可以用发酵法大量生产的如大肠杆菌或酵母的基因中去，使其在大肠杆菌或酵母的细胞中表达成这个蛋白质，并达到大量生产的目的。新近发展起来的蛋白工程则是分离出某个蛋白质的基因之后，根据三联密码，把这个 DNA 序列中编码某一个氨基酸的密码子，改变成为编码另一个所需要的氨基酸的密码子；或者用合成 DNA 的方法直接合成基因，在体外加以改造。从以上两种方法都可以得到在自然界原来并不存在的 DNA，再用和上面所说的类似的方法，引入大肠杆菌或酵母的基因中进行表达，以达到大量生产的目的，得到具有新的特性的蛋白质。

组织血栓溶酶活化蛋白（TPA），是一种有助于溶化血栓的蛋白质，在生物体中含量甚微，不可能用天然来源制备的药物。现在已经用基因工程方法大量生产，并被用于中风的预防和治疗。仅此一种产品，年产值已达 2.3 亿美元。糖尿病是一种常见病，过去胰岛素的生产依靠从动物胰脏中提取经常供不应求。目前世界市场上销售的胰岛素，用基因工程方法生产的人胰岛素

已经占总产量的一半，为糖尿病患者带来了福音，年销售额值约为 5.7 亿美元。现在世界上的生物工程公司，已经在几年前纷纷建立的基础上取得了很大的发展，各种疫苗、抗菌素、激素、酶等。估计到 1997 年生物高技术产品世界总销售额将达 71 亿美元。

基因工程用于农业，已经对农作物的品种改良起了以前不可能想象的重要影响。农作物以及家畜品种的改良，现在可以用定向引入有关基因的方法进行，这就从根本上改变了过去盲目大量诱变然后再从中进行筛选的传统作法。在农作物中，已经成功地对马铃薯进行了改造，不但使其获得了抗病毒基因，也得到了高蛋白质含量的马铃薯新品种。把一个蛋白水解酶抑制剂基因引入烟草之后，使得以烟叶为食的害虫不能消化其中的蛋白质而不能繁殖，这样，这一品种就获得了抗虫害的能力。对蕃茄的基因改造，得到了比较不易软化和擦伤的品种，因此可以在成熟后收获且保存较长时间，也避免了过去在成熟前收获因而口味不好的缺点，现产品已经在美国上市。虽然植物基因工程的应用还刚刚开始，但为农作物的大量增产和品种改造，例如固氮基因的转移等，提供了无法估量的发展前景。

癌症是危害人类最严重的疾病之一。分子生物学的进展为认识癌症发病原因，从而彻底征服癌症提供了新的可能性。现在已经发现了几十种癌基因，其中已有 10 余种已被认为与癌症病源学有关。前面提到生长因子受体蛋白，即 G 蛋白，能与 GTP 及 GDP 生成复合物，从而实现了对细胞生长的控制。某些癌基因的表达产物，P21 蛋白，与 G 蛋白的氨基酸序列极为相似，但 P21 蛋白能与 GTP 生成复合物后，却不能引起 GTP 水解为 GDP，从而终止细胞的分裂，这就导致了细胞生长的失控。最近，P21 蛋白的 X-射线衍射空间结构已经解出，对它和 GTP 及 GDP 的结合方式，包括分子中与结合有关的肽段，及直接与 GDP 结合的氨基酸残基，都已有所了解，并发现它分别和 GTP 及 GDP 结合后，分子的空间结构发生明显的变化。最近，还利用同步加速器的强 X-射线光源，对 P21 蛋白水解 GTP 的动态过程进行了研究。这些都将对癌症的最终解决有所帮助。

人类的遗传疾病是由于基因缺陷而引起的。早已知道，镰刀状贫血症，是由于血红蛋白基因中的一个核苷酸的突变造成蛋白中一个氨基酸的突变，从而引起脱氧血红蛋白溶解度下降，在细胞内成胶或聚合，使红细胞变形成为镰刀状，并且丧失结合氧分子的能力。另外一种比较常见的遗传疾病是由于编码苯丙氨酸羟化酶的基因丢失，人体不能合成苯丙氨酸羟化酶，造成苯丙氨酸在体内的积累而引起的痴呆症。此外，某些过去曾被认为是生活习惯的问题，现在也证实与遗传有关，并发现其分子水平上的原因。酗酒基因的发现及克隆就是近来一个引人注意的例子。用引入有关基因的方法，来治疗遗传疾病已经取得了很大的进展。在一些国家基因治疗已经取得初步成果。看来，在不远的将来，许多遗传疾病可望得到治疗。

人体内的所谓卫星 DNA 序列是极端多变的，对每一个人都不一样。现代技术的发展，只要极微量的材料，如一滴血、一根头发、一块皮肤屑或极少量的精液，从中提取的 DNA 经过多聚酶链反应扩增，就可以对卫星 DNA 进行序列测定。罪犯可以极小心地不留下指纹，但很难完全避免留下身上极少量的上述物质，这一方法已经被用于刑事案件中罪犯的确定，被称为 DNA 指纹法。又由于不同个体之间 DNA 序列的相似性是依赖于他们之间血缘关系的远近，根据卫星 DNA 之间序列相似性的比较，不仅可以决定亲子关系，甚至可

以区别亲兄弟和堂兄弟，在民事案件中也十分有用。DNA 指纹法已经开始在实际案件中普遍使用，所得结果发生错误的可能性仅为一亿分之一。和任何新方法一样，使用不当也会发生错误，但随着方法的不断完善，可能会取代指纹法成为法医学中的重要方法。

## 二、21 世纪将是统一生物学的世纪

分子生物学的发展已经揭示了生命本质的高度一致性，这是人类认识自然和认识自己的极大飞跃，下一世纪的生物学将是在对生命活动的本质统一认识下的真正的 General Biology。21 世纪将是统一生物学的世纪，并将形成崭新的生命观。分子生物学对科学和人类生活的全面影响，完全可以和本世纪初物理学所引起的变革相比，它和生物化学及生物物理学一起，吸引了大量的物理学家和化学家进入生物学领域工作，从而也影响了这两个学科的发展。它不仅现在是自然科学中发展最迅速的领域，到 21 世纪，它仍将毫无疑问地是自然科学领域中的带头学科。

## 陈可冀



1930年9月生，福州市人。1954年毕业于福建医学院医疗系本科。中国中医研究院50年代建院初期奉调来京，是我国第一代西医学习中医的中西医结合医学家。

现任中国中医研究院西苑医院及老年医学研究所教授，博士研究生导师，中国科学院院士。并任全国政协委员，中国科协常委，中国中西医结合学会副会长，中华医学会老年医学学会副会长；《中华心血管病杂志》副总编。应聘并任WHO传统医学顾问，Int. J. of Phytotherapy Research (U.K.) 顾问，北京中医药大学、中国药科大学及福建中医学院客座教授或名誉教授，北京医科大学中西医结合临床医疗中心顾问，中国医学科学院药植所高级顾问等职。长期从事心脑血管病、老年病治疗研究，对活血化瘀理论及清宫医药档案研究有成。曾获爱因斯坦世界科学奖（1989）及立夫中医药学术奖（1994）。

## 展望 21 世纪的中国传统医药学

陈可冀

中国传统医药学是中华民族的科学宝库之一。我们这一代人有幸得以运用现代科学知识和方法加以继承、整理与提高，开展中西医结合的科学研究，不胜欣慰。45 年来，中西医药工作者孜孜不倦，勤奋工作，开通了航道，取得了辉煌的成就。展望即将到来的新世纪，我们当继续开拓，摆脱各种困境或困惑，做出更大更好的贡献。

### 一、提高创制高效新药能力

我国有传统中药及植物药 6000 余种，民族药 1600 余种（包括藏药 404 种，蒙药 323 种，彝药 323 种，畲药 200 种，傣药 350~400 种），资源丰富；中国中医研究院中药研究所《电脑检索全国中草药数据库》1993 年统认为 13268 种，为数尤多。从这些资源中开发高效新药，有中医药传统理论及长期实践经验作参考，命中率理当不低。过去我国发展了新药青蒿素、山莨菪碱、联苯双酯、天花粉蛋白、延胡索乙素、川芎嗪、丹参素、葛根总黄酮、丁公藤碱、鹤草酚、茜草双酯、毛冬青甲素、汉防己甲素、雷公藤甙以及阿魏酸钠等等；其中青蒿素由于是过氧化物倍半萜化合物，冲击了以异喹啉或其它类似的含氮杂环化合物为抗疟药基本药效基团的传统认识，对恶性疟，尤其是对氯喹耐药的脑型疟原虫有迅速杀灭作用；改构后，所得蒿甲醚及青蒿琥酯等，溶解度也较好。所以，青蒿素被 WHO 列为重点推广项目。80 年代以来，美、英、日等国际不少国家更组织力量，从天然资源中开发抗肿瘤及艾滋病等新药，鬼臼毒素及紫杉醇是有代表性的药物，前者对小细胞肺癌，后者对实体瘤如卵巢癌都有应用前景；形成了世界性的热潮。我国医药界对此有不同认识，有的认为这样的研究是开发新药的途径之一，有的则认为这是“中药来，西药去”，并不赞同。我认为我们在科学研究和开发中，应坚持百花齐放思路，即注重经济实效，更注意高效，要有国际市场的竞争能力，应当努力增强创制这类高效新药的能力。这包括应用目前国际上先进的科技方法，首先要明确药物的有效成分、分子结构及含量，然后不但对中药进行一般的药理学研究，还需要进行药物作用部位和作用机理的研究，药物对整体器官和细胞分子结构影响的研究；既要有明确的体内药代动力学数据，又要有严格的毒理学依据，只有具备了这些条件才能在国际市场上有较强的竞争力。过去我国还对云芝多糖、猪苓多糖及黄芪多糖等作为免疫促进剂进行开发，成效显著。而这些成绩的取得，其实也都是继承传统中医经典论著关于青蒿抗疟（晋《肘后方》）及后面几味中药具有补益性能认识的基础上取得的。于理既不悖，对国家、对民族、对传统科学文化，都是一大发展。我估计新世纪的前 20 年，经过大家努力，我国会创制出若干类似青蒿素水平的新药来。

### 二、重视中药制剂的改进创新

药剂学是一门十分重要的学科，将原料药制成合适的剂型供临床防治应用；国际上，随着高技术的发展，已着重在缓释或控释制剂，靶向给药制剂，

皮肤给药制剂及粘膜给药制剂等方面的研究。我们也应当在这些方面加强研究力度，发展新药，占领国际市场。现在已出现包衣法控释片、溶蚀骨架片、胃内浮漂片、不溶性骨架片及渗透泵片等维持久效的制剂。更有以脂质、类脂质蛋白、微囊、微球及磁性微球等靶向药剂，以及在单克隆抗体分子上结合“弹头”药物，进展甚快。反观我国传统中成药，较多地在丸、散、膏、丹、片剂及少数针剂上生产，当然也还有气雾剂及栓剂等，至于开发适合各类疾病的较新剂型则较少。1993年卫生部新药评审通过的中药成药217种，二类药仅10种，其他均为三、四类小复方，创新甚少。中医药走向世界，除了部分病人可依旧使用煎煮汤剂外，对于用惯了轻便剂型药物的西方人来说，不常受青睐，所以在美国东西部，以及日本等，都已有复方及中药饮片的颗粒剂或粉剂等生产应市，很受病家欢迎；中药复方科学制剂的国际市场90%不是中国的，日本占上风。我国台湾也开始生产类似的“科学中药”，既方便，也适合辨证应用。切望我国中西医药工作者在加强物理药剂学及生物药剂学的同时，积极改变我国制剂落后的面目，以改变中成药出口额滞留现状，并使中医药为更多国际友人乐于应用。当然，这些改变剂型的药物的药效，是否与传统汤剂等同？低了还是更高了？是今后临床药理学家很值得开展的一项新颖的研究工作。

### 三、加强中药复方的科学研究

复方的临床应用是中医治病的主要特点和优点，对复方加强研究，有助于科学阐明其作用机理，并进而阐明有关的中医药理论。国际上对复方有两种看法，一种是持承认或肯定态度，一种是认为复方化学成分复杂，作用环节及药物代谢动力学不清，持否定态度；所以国内外都有一些较高层次的学术性刊物不刊载复方研究论文。我国45年对复方进行了大量的研究，超过230个，其中经方及古方约占50个，其余为时方等。我国对生脉散、冠心2号、保元汤、六味地黄丸、大承气汤、清开灵及玉屏风散等的实验药效学研究表明，与临床药效学结果及中医理法方药的一致性观点是吻合的。复方配伍研究方面也证明了其优越性，如补中益气汤中升麻、柴胡对全方其他药物可起调动的作用。日本十分重视复方的研究，尤其重视方证结合的研究，对著名方剂六神丸、小柴胡汤、黄连解毒汤及桂枝茯苓丸等的研究，相当系统完整，某些项目不在我国之下。我认为复方研究是必须进行的，对研究复方作用机理及中医药理论会有很大促进，但在实验研究方面，需研制对应的病或证的实验动物模型，具有较大难度。现代药理学认为一个理想药理模型的建立，表明或标志某种新药的出现，所以创立新的实验模型和方法的目的要明确，要有成效。此外，日本研究复方从主药到辅药，从粗提物到有效成分也相当重视，由此而发展新药完全可能，应当得到支持。

### 四、辨证论治理论的现代科学研究

辨证施治是传统中医学最富有特色的科学精华。中医诊病，可谓须臾不离辨证施治。这一理论最重大和最核心部分是对“证”的概括或归纳。证，体现了疾病某一阶段或进程中的整体综合表现。据此中医得以进行个体化的治疗，针对病证的进行多种针对性或调节性的治疗。

我以为对证本质的现代科学研究，是中医理论的基本点。证，可有基本证，复合证（兼证），多级复合证（兼挟证）之分；也可分为全身证，局部脏器证，外因所致证；潜证和显证等。证的本质研究最好结合病进行，因为相同的证与不同的病，其证的本质可能不尽相同，例如心脏神经官能症和心功能不全俱可有心气虚证表现，其发生机理完全不同。辨证施治的临床疗效研究难度更大，需宏观微观指标相结合。主证有时变化不大，但次证可以千变万化，治疗方药若过分灵活，则难以总结出证的规律，所以当以“辨证分型，主方固定，随证加减”的办法为基本方法进行随机对照研究。研究者应密切跟踪国际进展，相应纳入方案，例如研究高血压病辨证治疗，证的分型是一方面；在现代医学方面，须知 1993 年 WHO/ISH 又提出了新的高血压分类标准，是较以往更具合理性的，不可忽视。又如我国卫生部新药临床验证指导原则中，对抗心绞痛药物或针刺效果的评价标准中，与西药标准大相径庭，如欲与国际水平相比较，应当采用西药的标准，主要因为后者更为科学、严谨；前者制订偏松，不够严谨。

45 年来，我国学者为研究中医的证的本质，研制了各种证的实验动物模型，在大小动物的选择；动物模型如何定证型；诸种证的病理模型的制作等方面，取得了许多经验，其中包括寒证、热证、气虚证、血虚证、阴虚证、阳虚证、亡阳证、血瘀证及肝阳上亢证等病理模型；有的结合疾病的模型研制；有的除在整体动物上研究外，还从离体器官或组织培养细胞上进行，进展很大。展望 21 世纪，相信在更为系统的证的研究基础上，对传统中医药理论将会有新的突破，以发展传统医药学，并提出新的理论认识，提高医学科学水平，丰富世界医学，也可促进新方药的开发。

#### 参考文献

[ 1 ] 国家自然科学基金委员会生命科学部：《药学科学发展战略研究》，1994，北京。

[ 2 ] 中国科学院化学部：《新药研究途径的调研报告》，1994 年，北京。

## 陈芳允



1916年生，浙江黄岩人。1938年毕业于清华大学物理系。1945~1948年在英国 A.C.Cossor 无线电厂研究室工作。全国解放后在中国科学院物理所、电子所任研究员至 1966 年。1964 年起参加我国人造卫星及其跟踪测控系统的研制和建设。1967 年调至国防科工委基地和测量通信总体所，继续进行卫星测控工作。1984 年调国防科工委科技委，现任顾问。专长：电子学和空间电子系统工程。曾研制出多种新的电子设备；提出新的卫星测控系统，负责总体设计工作，并研制成功，为我国空间事业作出贡献。他曾获得国家科技进步特等奖二次，一等奖一次。陈芳允教授是中国科学院院士，国际宇航科学院院士，现任国际宇航联合会（IAF）副主席。他现在正在提出并研究新的应用卫星系统。

## 杨嘉墀



1919年生，江苏吴江人。空间控制学家。中国科学院院士。1941年毕业于上海交通大学。1949年获美国哈佛大学博士学位。现任航天工业总公司中国空间技术研究院研究员。先后主持火箭和核试验用的仪器和控制系统开发工作。三十多年来，多次参与我国空间计划的方案论证工作。主持人造卫星姿态控制系统的研究和发展。在三轴稳定的返回式卫星和科学探测卫星的发展中做出重大贡献。1986年与王大珩、王淦昌、陈芳允联合向中央提出了发展我国高技术的倡议（863计划）。

## 闵桂荣



1933年生,福建省莆田人。研究员,工程热物理学及空间技术专家。1956年毕业于南京工学院动力工程系。1963年苏联科学院动力研究所热物理学研究生毕业,获苏联技术科学副博士学位。

1963年起,闵桂荣教授从事航空航天技术研究。多年来在发展中国人造卫星热控制技术、卫星总体设计等方面作出了重大贡献,1985年和1990年两次获得国家科学技术进步特等奖。

历任中国空间技术研究院热控制研究室主任、空间飞行器总体部主任,中国空间技术研究院副院长、卫星总设计师等职。1985年至1991年任中国空间技术研究院院长。

现任航空航天部科技委员会副主任,中国空间技术研究院科技委主任,中国卫星系列总设计师。

闵桂荣教授是中国科学院院士、中国宇航学会名誉理事、国际宇航科学院院士。

# 空间技术的研究与利用

## 前言

空间科学技术的开创和发展是 20 世纪最引人注目的成就。空间飞行器从近地空间发展到远离地球 36000 千米的地球同步轨道，进一步到月球和行星际飞行；从无人卫星到载人飞船、到航天飞机和空间站。自从 1957 年前苏联发射第一颗人造地球卫星 Sputnik 以来，空间技术的发展迅速地从探索走向实际应用，而且不断地扩大。到今天，空间技术已进入人类日常生活、经济活动、科学研究和军事活动等各个领域。在通信、广播、教育、导航定位、气象、资源开发、海洋利用、减灾等方面，都已离不开空间技术，成为不可或缺的系统组成部分。它的利用不仅可以取得很大的经济效益，而且可以获得更为显著的社会效益。在外层空间运行的飞行器是对于影响人类生存环境的日地关系进行探测研究的有效手段。为空间技术而发展起来的一系列先进的电子、控制、材料、能源等技术扩散和影响到许多工业生产，使它们更新和提高，同时也促使许多科学技术向前发展。

空间系统中的核心部分无疑是空间飞行器，其中最主要的是卫星。截至 1992 年底世界上 13 个国家共进行了 3500 多次成功的发射，进入空间的飞行器已达 4500 多个，其中应用卫星占 74%（包括军事应用卫星，它们占其中的大多数，但许多军事卫星实际是军民两用的）。如果我们把应用于科学探测的卫星计算进去，则所占的比例还要大。

几十年来应用卫星的发展是容量从小到大，功能从简单到综合，卫星的体积和质量也相应加大。自从 80 年代中期以来，出现了新型的小卫星（质量 500 千克以下）和微卫星（100 千克以下），局面有所改观。这是由于精细机械、轻型复合材料和微电子等新技术发展的结果。小卫星可用于专业性较强、目标较为单一的任务，而且可以组成卫星群或星座以解决单个卫星所不能解决的问题；一般有成本低、研制周期短、风险小、易于发射等优点。

在已发射的 4500 个空间飞行器中，前苏联和美国占 80% 以上，发展中国家仅有约 40 颗，还不到 0.9%。在今天，空间技术利用和人类关系之密切程度已为世人所充分认识，发展中国家除利用现在已有的空间系统外，亦应逐步掌握空间技术，争取重大效益。近期小卫星的兴起，更值得重视，机遇不可放过。

## 一、世界空间技术应用发展概况

空间技术的应用或利用空间为人类服务，大致可分成卫星通信、卫星对地观测、卫星定位、外空观测以及利用空间飞行器进行微重力试验等。现在分述它们的发展概况 [1] [2]。间飞行器进行

### 1. 卫星通信、广播和教育

这是空间技术应用的最大领域。最初试验的通信卫星是中、低高度轨道的卫星。1964 年美国发射辛康—3 (Syncom—3) 到地球同步轨道成功以后，开始了新的卫星通信时代。这类卫星的轨道高度为 35800 千米（约为地球赤道半径的 5.6 倍），它的轨道面和赤道面一致，运行周期为 23.94 小时，等于地球自转周期；故当卫星在某一经度开始正常运转后，从地球上观测，它

便似静止于该经度不动。因此这种卫星又称为地球静止卫星 (Geostationary Satellite)，而其入轨经度便称为定点经度 (可以控制迁移其定点位置)。整个卫星通信系统主要由通信卫星、地球站和与二者相联系的跟踪测控系统组成。卫星位于赤道上空的定点上，犹如一个极高的无线电转接站。卫星通信容量大、传输距离远、传输质量好、能全天候通信。因此卫星通信系统还被作为广播、教育和近年来有很大发展的数据传输之用。

截至 1992 年底，在赤道上空定点的民用通信卫星约有 150 多颗。现在世界上最大的卫星通信网络是国际通信卫星组织 (The International Telecommunication Organisation)，有 122 个成员国或组织参加。国际卫星 (Intelsat) 现在已发展到第 6 代。现有新旧 18 颗工作卫星定点于三大洋上空。遍布全球的地球站达 1000 余座。以国际卫星—6 来说，星上有 C 频段 (4/6 吉赫) 和 Ku 频段转发器共 44 台，可提供 12 万路双向电话和至少 3 路电视。其中 Ku 频段用点波束天线以增强对地的等效辐射强度 (EIRP)，以便小型地面站使用。卫星进入轨道初期的质量为 2546 千克，干重 1896 千克，工作寿命 13 年。国际卫星通信量每年以 10% ~ 12% 的速度增加。另一国际性通信卫星组织是国际海事卫星组织 (International Maritime Satellite Organisation)，有 64 个成员国，布置在三大洋上空的海事卫星 (Inmarsat) 用于海上和海陆间通信。1976 年海事卫星开始移动通信业务，包括海事通信卫星和航空通信，并拟逐步向陆地移动通信发展，但主要是可携式小站而不是手持机。

欧洲通信卫星组织于 1983 年开始发射欧洲通信卫星 (Eutelsat)，上有 16 个 Ku 频段工作转发器，作为欧洲各国之间的主要卫星通信系统。其他国家也有自己的国内通信卫星 (Domestic communication satellite)，例如我国的东方红—2A (DFH—2A) 和即将发射的 DFH—3，印度的 Insat-1，加拿大的 Anik-A 和-B 等。

移动通信是社会经济发展的必然要求，卫星的移动通信可以使移动通信不受地理条件的限制，覆盖范围广，以至全球；特别可提供城市与城市之间，干线不到之处，我国西部、海上、空中、游牧民族、运输、救灾以及军事也迫切需要移动通信。国际上近年来发展很快。除了进一步增大地球静止通信卫星的辐射功率以达到可使用更小的移动台以外，近年来由于小卫星的发展，许多利用中或低轨道的卫星星座覆盖全球的卫星移动通信系统被提了出来 [3]，竞争很是激烈。但一般都需要数量较多的卫星，需要大的投资。我国也正在提出自己的可行系统。

卫星通信在技术和业务上的迅速发展，使其产生巨大的经济和社会效益。目前卫星通信可提供有关信息传递的 100 多种业务。以国际通信系统为例，通过其业务活动的经济效益每年近 100 亿美元，但其终端用户利用卫星通信的间接收益则达数百亿美元。由于业务增长的要求预计到 2003 年 11 年间世界各国还将发射 150 颗左右的通信卫星 (包括替补现在工作而寿命到期的卫星)。

卫星通信的社会效益更引起人们的高度重视，而且在不断地扩大。卫星电视广播已众所周知，不予赘述。兹举卫星电视教育为例。据联合国研究报告，由于全球人口增加，今后 30 年间要受教育的人口将超过人类有史以来至今受教育人口的总和。为满足此需要，通过电视进行教育是不可缺少的手段。一些亚洲国家 (印度、印尼、中国等) 都在执行卫星电视教育计划，使众多

的人受益。据中国教育电视台统计，中国现在 5000 多个卫星教育接收台，接受教育的人数达 2000 万以上，今后还会有更大发展。印度是较早实行卫星教育的国家，在 80 年代初期发射印度卫星—1A( Insat-1A ) 便已考虑了卫星教育问题，经常使数百万人受益。卫星电视还可使国家高级教师远距离授课，并可使高级医师远距离诊断治病。

我国自行研制的通信卫星还不能满足社会的需求，加速发展势在必行。

## 2. 卫星定位和导航

卫星无线电定位业务是地面物体用无线电和卫星沟通测量两者间的距离或距离变化率计算出自己在地球上的位置；知道自己的位置座标及其变化，即可进一步知道自己的航向，以供导航之用。对于海上舰船、空中飞机、陆上车辆的行驶，工作队或单人的远行，都需要及时知道自己的位置，并且有必要让有关部门知晓。在卫星应用之前虽已有多种无线电定位导航系统，但它们的应用范围小、定位精度低。卫星定位系统的出现，解决了大范围、全球性以及高精度快速定位问题，对于保证航行安全、提高运输效率、大地测量、资源勘探，已成为不可缺少的手段。

1960 年美国开始为海军发射成功子午仪( Transit ) 系列导航卫星以来，经过几次改进，得到充分利用，近年来已为导航星全球定位系统( Navstar-GPS ) 所代替。子午仪卫星高度为 700 ~ 900 千米，全球的卫星数 4 ~ 5 颗，为海上船只只在一定的时间间隔( 约 2 小时 ) 内见到一星时定位。该系统系利用对星上发射机的多普勒频率测量定位原理，定位一次需要 2 分钟以上，定位精度对固定点在 100 米以内，而对在洋流中运动的船只则可能降至 200 米。在 60 到 70 年代，子午仪导航接收机，不仅在舰船上普遍应用，而且也用于陆上的定位和基准点的坐标测定。但该系统有相当缺点，如定位的时间间隔长，确定一次位置需要的时间长，不适应于快速运动物体( 如飞机 )，定位精度对某些要求尚不够高以及被定位物体与其基地之间不能进行信息交换等。

美国于 1978 年开始发射的导航星全球定位系统由 24 颗分布于 6 个轨道面高度约 10000 千米的卫星组成。全球各地的用户随时可见 4 颗以上的卫星。地面运动物体上的接收机捕获由它们发出的距离码和轨道参数，计算出自己的三维位置，定位时间缩短( 秒级 )，精度提高。GPS 星上有准确时钟，可用于定时和时间同步。但 GPS 主要由美军方控制，其高精度测距码不公开，一般使用民用的 C/A 测距码，精度降至 100 米左右，且军方屡次宣称还可能对其扰乱并再次降低精度，使人惴惴不安。但现在 GPS 系统已在世界上广泛应用。由于微电子技术的进展，GPS 接收机价格下降，但获利甚高。

前苏联全球导航卫星系统 Glonass ( Global Navigation Satellite System ) 与 GPS 相类似，由 9 ~ 12 颗轨道高度约 20000 千米的卫星组成，定位精度相当于 GPS 的民用部分。目前国际上正在研究将两者合二为一，使接收机能同时接收两种信号，以互补不足。

用 GPS/Glonass 定位系统，用户可测定自己的位置，但如欲使主管或调度部门知道，则还需再配备移动通信机，才能传回其位置信息。1982 年，Gerard K. eil 教授的专利及 1983 年我国独立提出的双星定位系统 [ 4 ]，具有将定位、通信和定时等功能结合在一起，而且有瞬时快速定位的能力。这一系统利用 2 颗有一定经度间隔的地球静止卫星，中心站通过它们对用户进行双向测距，由于卫星定点位置是准确已知的，故即可算出用户的准确位置，

由中心通知用户，在用户接收机上显示。用户机不必有计算装置，可以简化；但有发射部分，故可同时作为简单的通信和数传之用。定位精度视双星的经度间隔而定。如地面有参考点时，其精度可达 10 米量级。但物体的高度需另用测高仪测量，在必要时提供三维数据。授时精度则可比 GPS 更高，因标准时钟可以安装在中心站而将定时信号通过卫星传送给用户，比 GPS 装于星上的更可保持稳定度和准确度。这种系统的定位处理集中在中心站进行，故中心站随时掌握用户动态，对于管理和商业应用十分有利。由于所用的是同步卫星，覆盖范围是地区性的，但是面积可以很大（例如中国和东南亚），而且可以发展成为全球性的（高纬度地区除外）。建立这一系统对于交通、运输、旅游、我国西部地区的开发、灾害监视和防治以及全国范围的时间同步都有重要的作用。

GPS 一类的定位导航卫星在现今的技术条件下可以用小卫星来实现。

### 3. 对地观测卫星系统

对地观测是空间信息系统的主要应用目标之一。事实上人造地球卫星上天后，人们首先提出的任务之一就是获取大范围的高空大气资料。其后气象观测、陆地资源和环境探测，海洋观测已成为许多卫星的主要使命。这些卫星配备相应的地面数据接收和处理站，可提供大气、地球、地质、植被、生态、海况、地面建设等大量信息，从而为人类对农林生产的保障、自然灾害的预防和监控、陆地和海洋资源的开发和管理，提供了极有效的手段，产生极大的社会和经济效益（直接经济收入看似不大，但利用后所获得的间接经济效益是很大的）。

现有的气象卫星有两类：一类是近地的极轨（轨道倾角近  $90^\circ$ ，轨道途经两极地区）卫星，一类是可定点于赤道某一经度上空的地球静止卫星。前者轨道高度 800 ~ 1500 千米，利用可见光和红外光谱拍摄云图，并测量大气中的垂直水气分布，例如美国的泰罗斯（Tiros）系列卫星和新的泰罗斯—N（Tiros-N）卫星和诺阿（NOAA）系列卫星以及我国的风云—1 号（FY—1）卫星等。NOAA—11 卫星高度约 850 千米，上有先进的甚高分辨率辐射计，其分辨率约为 1.1 千米。后者从 35800 千米的同步高度大面积观测和拍摄云图，可了解其时间变迁情况，从而得到风和大气沉积的运动过程。例如美国的静止轨道环境卫星（GEOS），日本的静止轨道气象卫星（GMS），欧洲的气象卫星（Meteosat），印度的多用途印度卫星（Insat-1）以及我国即将发射的风云—2 号（FY—2）卫星等。近地和同步轨道气象卫星组成全球经常性观测网，两者结合，对于大、小范围的短、中期天气预报起到重要作用。

气象卫星有许多用途，但对于气候变化及其对农、林、牧及水、旱灾情等方面的预报、监测、估产的作用特别重要。美国的统计资料表明，该国每年和气候有关的农业损失，如无准备估计达 120 亿美元，如有 3 ~ 5 日的预报，则平均每年可减少损失 50 亿美元（41.7%）[5]。美国每年对气象卫星工程投资 3 亿美元，应用效果折算为每年增产和减少损失 20 亿美元。投资效益是 1 : 7。前苏联估计其投资效益比是 1 : 10。我国用以进行气象预报，农业估产，灾害监测等，也起到了很大作用。

气象卫星由于需要及时对变迁的大气云层进行观测，它注重的是大面积和多次数，观测仪器要有较大的视场角，而其分辨率要求不高（就是甚高分辨率辐射计 VHRR，其分辨率一般为 1 千米，较高的 0.5 千米）。因此对于地球资源和环境的勘测以及某些环境保护和自然灾害的监测就很不够了。地球

资源卫星相对地缩窄了观测幅宽而提高了星上光谱扫描仪对地面的分辨率。美国于 1972 年发射地球资源技术卫星—1 号 (ERTS—1)，后改为陆地卫星 (Landsat) 系列，现已到 Landsat-6，(发射失败) 轨道高度 705 千米，质量 2000 千克，星上的 4 谱段多光谱扫描仪分辨率为 80 米；还有分辨率较高的主题测绘仪 (TM Thematic Mapper)，有 6 个可见光和近红外谱段分辨率 30 米；全色—分辨率 15 米；热红外—分辨率 120 米。陆地卫星—6 的地面测绘带宽 172 千米，故重访一地的时间间隔需 16 天；而主题测绘仪则仅在某时卫星飞过某地上空时经请示才能观测一次。现在陆地卫星地面接收处理站已遍布全球，对于各国资源勘探和利用起了很大作用。法国的斯波特卫星 (SPOT) 有较高的分辨率 (高分辨率可见光谱段 HRV : 20 米；全色 : 10 米)，但其沿轨道的地面测绘带更窄，观测某地的重访周期需 26 天。补救方法是使星上相机在必要时可以侧摆，调整视角以观测相邻轨道的目标，此法可做到对某些特定地区每 2.5 天重复观测一次。中国和巴西合作正在研制的中巴地球资源卫星 (CBERS—1) 亦属于同一类型。

上面提到的气象和资源卫星均系用可见光和红外敏感器接收地物辐射以获得图像数据。当大气中有云层水气吸收时，这些光谱不能透过。气象卫星是适得其所，因其目的就是观测云层；而对于资源卫星需要观测地面时，则被遮挡而视而不见。微波雷达可以穿透云层而合成孔径雷达成像有很高的分辨率。美国 1987 年发射的第一颗海洋卫星—1 号 (Seasat-1) 装载了合成孔径雷达 (分辨率 25 米)、雷达高度计、风场散射计和多信道微波辐射计等微波遥感仪器以及可见光和红外辐射计，这一 2274 千克的卫星虽然只工作了三个月，但获得了大量的洋流、海浪、风场、海水、海温和海上污染等信息。欧洲不久前 (1991) 发射的欧洲遥感卫星—1 号 (ERS—1) 除有高分辨率多光谱扫描仪 (分辨率 30 米) 外，也安装了合成孔径雷达 (分辨率 30 米) 和雷达高度计，可对海洋和陆地进行全天候观测。日本于 1992 年发射的日本地球资源卫星—1 号 (JERS—1) 具有类似的仪器和功能。加拿大则将发射专门的雷达卫星 (Radarsat)，其合成孔径雷达可作较大范围扫描，使其地面观测带可达 500 千米宽 (但分辨率降低)，可以缩短重访周期，有利于对地面变化环境和自然灾害的观测和监视。

上面已经提到的各种高分辨率的对地观测卫星都有一个观测带较窄，回访周期长的缺点。雷达卫星虽有穿透云层的优点，但其观测带更窄，重访周期更长，如日本的 JERS—1 的合成孔径雷达，其分辨率为 18 米，但测绘带仅 75 千米，而重访周期为 44 天。加拿大的 Radarsat 虽然可以做到对某些特定地区在较短时间内重复观测，而且对不同地区要有不同的轨道设计。这种情况对于自然灾害或较快变化的环境，尤其是针对全球各地的及时监测是有困难的。我国遥感科技工作者全面研究了各种地球环境变化所需要的观测分辨率和观测周期，认为大气变化的重复周期需以小时计而不需要高的分辨率，而其他绝大部分地学、环境信息要求每日二次重复观测和中等分辨率 (约 30 米) 已经足够。(军事行动需要另作考虑)。因此我们提出以装载中等分辨率多光谱遥感仪器的小卫星群来作不间断的观测 [6]。这样的系统，投资少，研制周期短，与其他系统的配合使用 (如和雷达卫星互相配合使用)，可以得到较好的效果。

许多目标较为单一的专项对地观测项目，也可以用小卫星来完成。

#### 4. 外空探测和研究

人类了解自然，了解和研究地球在宇宙中所处的环境，对于生存是十分必要的。利用人造卫星携带探测仪器对于高空大气、粒子辐射、磁层、日地关系、宇宙射线等的探索，发现了许多新的现象，其中有直接和人类生存有关的，如高空臭氧层和太阳辐射等；有些则影响到空间技术本身的发展，例如高空的粒子辐射环境等。卫星在高出浓密大气层的位置，避免其遮挡和折射效应，还可以进行天文观测。

在外空观测中值得提出的是美国的探索者（Explorer）系列。从 1958 年 Explorer-1 起，坚持到 70 年代末期，发射 55 颗，以后又发射专用的探测卫星。它们对日地空间进行了各种探测，获得了丰富而有用的数据，并深入到月球和行星际空间，为其后的行星际航行打下基础，Explorer 卫星中的一部分是作为天文探测用的。还有前苏联的国际宇宙号（Interkosmos）系列，英国的羚羊号（Ariel），日本的 Astro 等（其中有些是大学中研制的小卫星）。较大的天文卫星有美国的伽马射线观测台（Gamma Ray Observatory），先进 X—射线天体物理设施（AXAF），红外望远镜设施（SIRTF）以及于 1990 年发射的哈勃空间望远镜（HST：Hubble Space Telescope）等 4 项。哈勃空间望远镜重 10 吨，因设计不善而有许多故障（曾经过一次空间大修），但还是观测和发现了一些新的天文现象。

#### 5. 微重力试验

由于卫星、空间飞船、空间站等在高空运行时是处于零重力或微重力状态下的，在微重力环境下，可以克服在地面时存在不均匀作用力的影响，制造出高纯度的晶体材料和新的合金。医学研究人员能够制出比较完整的蛋白质晶体。生物也表现了生长机能加速的现象。人们在讨论日后建立空间工厂，生产新的材料和药品问题，利用返回式卫星或空间站作这些试验研究将对以后可能的批量生产起先导作用。美国和前苏联在这一方面利用载人飞船已经做了相当多的试验，我国也已利用返回式卫星搭载进行砷化镓等材料制备的试验，得到了很好的效果。

6. 关于空间技术的军事应用，我们这里不作详细介绍。统计表明，在全世界发射的卫星中，由于过去两极的冷战状态，在空间飞行器中有 80% 以上是用于军事目的，而且主要是美、苏两国发射的。但也可以看出，大部分卫星是可以军民两用的，例如通信卫星的转发器，同样可以转发军事通信信号，但需加保密措施；遥感卫星所得的地面信息，同样可以用于军事。相反，许多军事卫星也可以民用，例如美国的 GPS 导航定位卫星，而军事侦察卫星所得的地面资料也可以民用。在技术上也是基本一致的。这里我们就不详谈了。

## 二、中国空间活动概况

空间技术属于高技术，空间活动对人类社会进步起着重要作用，许多国家已为发展空间技术作出重大贡献。在我国党和政府高度重视航天高技术的重要作用，积极开展研究与发展工作。

#### 1. 中国航天主要成就 [7] [8] [9]

中国第一颗人造卫星重 173 千克，1970 年发射成功，在轨道运作正常，标志着中国开始进入了宇宙空间。1971 年成功发射了实践一号科学卫星，卫星正常工作八年多。

60 年代末期，中国开始研制回收型卫星及其配套长征二号火箭，1975

年首次成功地发射了这种卫星，在轨道运行正常，并按预定计划返回地面，至今共成功发射了 16 颗，有 15 颗按计划在完成各种试验任务之后，安全返回指定地点。

前苏联于 1957 年发射第一颗人造卫星以后，中国科学院天文台和电子、光学等研究所即开始了卫星跟踪观测的工作。50 年代末期中国开始发展空间技术，当时在中科院开展了基础研究和研制了小型探空火箭。1965 年中国科学院开始研制第一颗人造卫星，航天部研制长征一号运载火箭，中科院和一些有关工业部研制卫星跟踪，测控系统。1966 年后，运载火箭和人造卫星归由航天部统一研制，人造卫星部分由航天部空间科学技术研究院研制；中科院着重空间科学的研究；而整个航天工程则由国防科工委统筹管理，地面发射、测控通信等系统亦由国防科工委规划建设。

为了适应科学研究的需要，我国在 1981 年用一枚火箭同时发射三颗不同的物理探测卫星，取得了大量的空间物理参数。

70 年代中期，我国开始发展通信卫星及其配套运载火箭长征三号，经过自己的努力，于 1984、1986、1988 年成功地在西昌发射了 5 颗静止通信广播卫星，它们分别定点在不同的东经赤道上空，经过几年的运行试验，证明卫星性能满足设计要求并已提供应用。

为了改善天气预报，80 年代我国发展了 FY—1 气象卫星，两颗试验气象卫星 FT—1 于 1988 年和 1990 年 9 月用长征四号火箭成功发射入轨，卫星轨道高度为 900 公里的太阳同步轨道，经过飞行试验，证明方案正确，云图和地物图像清晰，使用价值大，同时经飞行试验，也发现一些技术薄弱环节，积累了宝贵经验。

至今，中国已有多种运载火箭，共发射成功 30 多颗不同类型人造卫星，卫星成果已在我国许多领域，包括教育、广播、通信、资源、测绘、气象、海洋、科学研究等得到应用，为国家经济建设和科学研究作出了很大贡献。同时，通过这些卫星的研制和发射，带动了中国空间技术基础建设，积累了宝贵的发展空间技术的经验。虽然我国发射卫星数量不算很多，但有以下特点：

- (1) 全部卫星、火箭和地面设备均是我国自行研制，是自力更生的产物；
- (2) 中国航天产品的质量和可靠性高；
- (3) 中国航天产品的价格比较低。

## 2. 中国典型航天系统

### (1) 长征系列运载火箭

长征系列包括长征一号、二号、三号、四号和长二捆。

长征二号为二级火箭，低轨道能力为 2.5 吨，共发射过 14 发，成功 13 发，所以可靠性很高。

长征三号第三级为低温燃料，可以两次点火，它可以把 1.4 吨的有效载荷送入静止转移轨道。至今已成功发射了 6 颗通信卫星。新的长征三号 A 则可将 2.5 吨有效载荷送入静止转移轨道。

长征四号类似长征三号，但第二级为常规燃料，价格较低，它可以把 1.4 吨的卫星送入太阳同步轨道。已两次发射我国气象卫星成功。

长征二号捆绑式火箭由长征二号火箭加四个液体助推火箭组成，其低轨道运载能力约 8 吨，1990 年首次发射成功。

大家已经知道，我长征火箭已经宣布开放，对国际提供服务。1990 年成

功发射了美国制造的“亚洲一号”通信卫星，之后又成功发射了两次澳星和一颗亚太星。

#### (2) 科学探测和技术试验卫星

这是一种可回收的人造卫星，质量约 2000 千克，采用三轴稳定。它运行在低轨道上，飞行 3~16 天后在我国指定地区安全返回，卫星的各种技术关键都已过关，卫星的飞行和回收成功率极高。

这类卫星的任务是进行技术和科学实验。包括开展各种遥感试验，获取了很有价值的卫星照片，用于我国国土普查和各种经济建设。卫星上还进行各种科学实验。由于卫星上具有优良的微重力环境（ $10^{-4} \sim 10^{-5}$  克），可以进行各种生物学和材料科学实验。

#### (3) 通信广播卫星 STW

STW 是一种自旋稳定的通信卫星，卫星直径为 2.1 米，采用消旋天线，通信频率为 C 频段，天线有全球波束和国内波束两种，星上有四个转发器，国内波束 EIRP 为 36dBW。卫星轨道寿命 4~5 年，我国已经利用这种卫星向全国转播中央台电视、开展电视教育、通信电话、传真、数据收集传输等业务。这种卫星价廉，可靠性高，但容量小。

#### (4) 气象卫星 FY—1

主要任务是获取国内外云图资源，服务于国家经济建设，同时也为国外提供气象资料。星上有五谱段扫描辐射计，包括可见光与红外谱段，以 HRPT, APT, DPT 三种形式发送图像信息，分辨率分别为 1 千米和 4 千米，卫星采用三轴姿态稳定，太阳电池帆板对日定向，全星重量约 850 千克，卫星运行高度 900 千米的圆型太阳同步轨道上。

### 3. 中国卫星应用

70 年代是中国卫星的探索与试验阶段，80 年代起中国卫星从试验转向应用阶段。应用卫星的部门达到几十个，地区遍布全国各省、市、自治区，为国家的经济建设和社会进步作出了重大贡献。主要的应用领域有以下几个方面。

#### (1) 卫星电视广播

利用卫星电视来解决中国的教育问题，提高全国人民的文化和科技水平是多快好省的道路。全国已开通电视教育专用频道，已建成教育电视台、收转站 5000 多个，放像点两万多个。收看的电视学员达 2000 万人，培训中小学教师 100 多万名，不仅提前完成培训计划，而且质量高。仅这一项每年可为国家节约几十亿元的费用。

卫星广播方面，自从中国通信广播卫星入轨工作后，中央电视台第 1、2 套节目已经通过卫星向全国各地播送。除此之外，还有云南、贵州、新疆、西藏等省、自治区的地方台电视节目也通过卫星转播。中央广播电台通过卫星开通了 30 多路对外语音广播。卫星电视广播在精神文明建设、丰富人民生活、普及科学知识、以及在外交、经济、政治上发挥了重要的作用。

#### (2) 卫星通信

至 1989 年底，通过自己的卫星已开出 1500 多路卫星电话，占全国跨省电话路数的 6%，另外石油、煤炭、水利电力也开通了约 200 条电路。现在抓紧建设，预计不久将有 7 千~8 千条卫星电路开通，对改善通讯，缓和交通运输，促进经济信息交流和国防建设将起重要作用。

除了报话通信外，近年中国在利用卫星进行专业数据通信也取得了成

就。中国地形辽阔复杂，许多部门需要收集和传送各种专业数据。目前中国卫星已为银行、江河水库、电力，气象等多种部门提供服务。

### (3) 国土资源与测绘

国土资源卫星及其它遥感卫星所年摄的优质照片已经广泛用于各经济领域，其中包括地矿、油气田、地震断裂带、水利、农林、土地利用、污染等方面调查研究。国土卫星已拍摄 3000 多幅大幅面国土照片，覆盖了全国的各主要经济区，如京津唐、黄河三角洲、山西能源基地、三北防护林、塔里木盆地等地区。应用卫星照片进行资源和环境调查的效益十分明显，不仅周期短，而且费用低，只有常规调查费的 7%~30%。

卫星遥感照片用于测绘工作有许多优点，中国摄影测量卫星所获取的照片已经用于国防和经济建设，包括制作高精度地形图、地理定位、测量海岩线、沿海岛屿图等，可完成 1:5 万、1:10 万地图的测绘。它为我国经济、国防建设和外交工作作出了重要贡献。

### (4) 气象与防灾

中国有关部门较早利用气象卫星的成果。气象卫星获取的云图和地球表面信息，不仅用于改善天气预报，对台风、暴雨等的天灾测报预防，而且还用于海面温度的监测，叶绿素分布探测，对海洋渔业等具有重要价值。目前，气象卫星资料的应用已扩展到地球环境和自然灾害的监测，并显示出独特的功能。

### (5) 科学研究

70 年代中国曾研制专门的科学技术试验卫星，对地球空间环境和太阳辐射进行探测研究。在此后研制的各种应用卫星上都结合科学研究，进行了多种项目的空间探测和微重力科学试验。80 年代中国利用返回式卫星，开辟了微重力科学实验研究，为中国科学院等国内研究单位和德国、法国科研机构进行了 200 多项半导体材料、特种合金、蛋白质、微生物、植物种子等空间微重力等环境的搭载试验。在空间试验材料中有砷化镓、碲镉汞、铽化铟、铝锂、铝铌、银基稀土材料及超导材料等多个项目。在通信卫星、气象卫星上都装有高能粒子等探测器，分别对地球同步轨道和太阳同步轨道上的有关空间环境进行探测研究。这许多研究都取得了较好的结果，有重要的参考价值。

### (6) 国防建设

多年来发射的不同应用卫星不仅为经济建设和科学研究，还为我军装备的现代化做出了重大的贡献。在气象、通信、遥感、测绘等方面都利用空间技术增强了国防力量。

## 4. 未来的空间活动

过去的 30 年，我国在空间技术方面取得了许多成就。预计本世纪最后 10 年中国的空间活动将有所加强。国家正在制定下一步发展规划。

我国的资金有限，因此首先应把有限的投资集中于发展对国家建设有重要意义的应用卫星系统。

### (1) DFH—3 通信卫星

这是一种较大的通信和广播卫星，卫星含远地点发动机质量为 2100 千克，它用公用舱作为卫星平台，采用三轴稳定，平台两侧太阳帆板提供 2KW 的电功率，上面有 C 频段的转发器 24 个和双栅抛物面天线，电波覆盖中国，其 EIRP 为 37dBW。卫星设计寿命 8~10 年。

## (2) 极轨和静轨气象卫星

气象卫星 FY—1 (极轨) 和 FY—2 (静止轨道) 的研制也是我国空间计划的重要部分。极轨气象卫星正在研制新的更先进的多谱段辐射扫描仪, 可提供实时和延时云图和地物图像。卫星还有数据收集和云图转发、广播功能。卫星采用自旋稳定, 将定点在亚洲上空, 并为该地区提供服务。

## (3) CB 地球资源卫星或 CBERS

CB 地球资源卫星采用先进的 CCD 多光谱和红外相机遥感技术。CCD 相机的谱段为  $0.45 \sim 0.52$ ,  $0.52 \sim 0.59$ ,  $0.63 \sim 0.69$ ,  $0.77 \sim 0.89$  和  $0.57 \sim 0.73 \mu$ , 分辨率为 20 米; 红外相机有 4 个谱段:  $0.5 \sim 1.1$ ,  $1.55 \sim 1.75$ ,  $2.08 \sim 2.3$ ,  $10.4 \sim 12.5 \mu$ , 分辨率 80 米。遥感信息通过 X 频段实时传输到地面。卫星采用三轴稳定, 太阳帆板对日定向, 卫星将在 800 千米高度的太阳同步轨道上工作。本资源卫星已完成初样设计, 由中国、巴西联合研制。

回收型的卫星具有很高的价值, 包括遥感及微重力科学实验等, 这种卫星中国已经有 20 多年的经验, 将继续改进和发展, 研制更为先进的系统。

此外, 导航定位卫星、海洋卫星、数据收集和传输卫星对国家建设十分重要, 预计适当时候也将进行研究和开发。

载人航天及建造空间站是宇航发展的必然阶段, 空间站将成为综合空间平台, 它对国家建设、科学研究和空间技术的发展将起重要作用。世界上先进国家都投资发展空间站系统, 中国在适当的时候也会开始载人航天工作。

中国空间技术将继续发展, 中国的空间活动宗旨是和平目的, 过去中国空间活动是依靠自己力量完成, 按中央开放政策, 现在我国也积极探索和开展国际合作, 几年来, 我国已与许多友好国家开展了空间技术交流合作, 我们将继续努力, 为全人类的文明进步作出中国人民应有的贡献。

## 三、对发展我国空间技术利用的建议

在国际上对空间技术的利用有很大进展的今天, 我们认识到它对于我国国民经济发展以及对人类社会的发展是不可缺少而有很高效益的科技事业。因此我们必须予以充分重视。综观我国的空间技术和航天工业, 已经有 30 多年努力奋斗所建立的基础, 运载工具和人造卫星的地面配套设施——发射基地和测控系统也已比较完整, 人员熟练。从全国来说, 有关的通信、遥感和信息处理的技术队伍也是很强的。我们应该大力协同, 创新地发展自己的空间应用系统, 一方面为国民经济和全社会服务, 一方面投入国际市场, 参加竞争, 对自己也是促进和提高。

我们建议:

- 1、加强对空间技术利用的统一领导, 国家加强对这一方面的投资, 并要求尽快取得效益。

- 2、首先结合我国已有的和在研制中的卫星以及国际上已有的卫星, 加强地面系统 (如利用通信卫星的数据传输甚小终端站 VSAT, 对地观测卫星的地面接收处理站等) 的建设, 加以利用并开展卫星应用的研究。

- 3、在技术方面, 首先从通信广播, 对地观测、导航定位等迫切需要的方面, 研究新的空间系统。特别应注意小卫星在这些方面的应用, 例如全球卫星移动通信系统、卫星遥感自然灾害监控系统等。

要从天地一体化来考虑整个系统的设计和研制。从要求的提出、卫星、

用户、发射、测控等方面，综合考虑，使其获得尽可能大的效费比和能较快地建成。

4、寻求国际合作，特别是亚太地区的合作，投入国际市场竞争。

#### 参考文献

[ 1 ] "Interavia Space Directory 1991-1992 , "Edited by Andrew Wilson , Jane s Information Group , Surrey,UK.

[ 2 ] Yan Jiachi : "Benefits from Space Activities , Advances in the Astronautical Sciences" AAS , Vol.77 , 1992.

[ 3 ] F.Ananasso et al : "Small Satellites Applications , A New Perspective in Satellite Communications" AIAA-92-1930-cp.

[ 4 ] 陈芳允、刘志逵、冯汝明等， “ 发展我国的星基定位通信系统 ” ，中国空间科学技术，1987.6.

[ 5 ] Abraham Schnapf ( ed ) : "Monitoring Earth's Ocean , Land , and Atmosphere from Space—Sensors , Systems , and Applications", pp 216-259 , AIAA , Inc,1985.

[ 6 ] Chen Fang-yun , Chen Shu-Peng et al : "Earth Environmental Observing Satellite System and International Cooperation" , IAF-92-0138 , 43rd , Congress of IAF, Aug 28-Spt.5, 1992, Washington, D.C. U.S.A.

[ 7 ] Yang Jiachi & Lin Jin : "China's National Program of Launch Vehicle and Spacecraft Development" , Proc.of 5th International Space Conference of Pacific Basin Societies , June , 1993, Shanghai .

[ 8 ] 闵桂荣， “ 中国卫星的发展及应用 ” ，中国空间科学技术 11 卷 3 期，1993.

[ 9 ] Min Cui - rong : " A summary of China's Space Activities" , Proc.of 1993 Science Engineering & Technology Seminars , Houston , Texas U.S.A.

## 陈建生



1938年7月生，福建福州人。天体物理学家。1963年毕业于北京大学地球物理系。中国科学院北京天文台研究员。与其他学者合作（以陈建生为主）首次得到类星体吸收线光谱中 Ly  $\alpha$  Ly  $\beta$  的强相关，以及 Ly  $\alpha$  Ly  $\beta$  强相关的最好结果，从而确证了高红移宇宙空间原始氢云的存在；与同事合作通过分析类星体吸收线证明了高红移星系的存在，并通过对元素丰度的测定和比较显示出星系化学组成在百亿年内的演化；在国内率先开展类星体物端棱镜巡天，发现上千个类星候选者。结合我国条件，发展了实测手段并开展研究；首次提出并与同事一起实现了在施密特望远镜上用 CCD 进行多天体同时快速测光的方法，开辟了一条大样本天文研究的新途径。

## 21 世纪的天体物理学

陈建生

21 世纪天体物理学将要用更令人信服的观测结果、更严格、严自洽的理论来确立宇宙的演化链；现在的宇宙演化模型完全有可能被新的观测事实所推翻而导致演化学说的再一次飞跃。

以类星体、射电脉冲星、星际有机分子谱线和宇宙微波背景四大发现为标志的本世纪 60 年代，成为天体物理发展的新的里程碑。其中，射电脉冲星和宇宙微波背景的研究，已先后三次获得诺贝尔物理学奖。天体物理的发展势头越来越猛，新发现层出不穷，引力透镜，引力辐射，视超光速，爱因斯坦光弧，射线暴，莱曼森林……；新理论、新概念不断涌现；暗物质、吸积盘、黑洞……。另一方面，人类探测天体的能力突飞猛进，全电磁波段天文学探测技术日臻成熟，一批巨型设备正在陆续投入观测。在此世纪之交时刻，展望下一世纪天体物理学的发展是激动人心的，同时又是十分艰难的。

### 一、总起源问题

钱学森教授过去曾概括过自然科学的三大基本问题，既天体演化、物质结构与生命起源。既然一切自然现象都发生在地球上，星球又是在宇宙演化的总环境下诞生的，因此一切起源问题与宇宙起源相比，都是次层次的问题。自然科学最根本的任务是要探索宇宙的总起源问题，也就是在宇宙演化的漫长过程中，如何逐渐形成各层次物质：基本粒子、元素、分子、物质的结团到星系、恒星等宇宙天体，以及从无机物到有机物，乃至生命等众多次级的起源问题。半个世纪以来，天体物理观测技术的进步和重大发现，高能物理的理论成就，为研究总起源问题指出了方向和解决问题的具体道路，并在某些方面已取得重要的进展。为众多观测事实所支持的“标准”宇宙模型，推算出宇宙原初是极高温（极高能）的光子气体，因宇宙膨胀而逐渐降温，在降温过程中经历各个层次物质的临界能量，形成基本粒子、原子、分子。而光子与量子物质也在降温过程中退耦，并按各自不同的物理规律演化。物质的结团过程来自于原初的密度的微小不均匀性，这些不均匀性的发展使得正偏离平均密度高的区域发展成为星系、星系团乃至超星系团，而负偏离高的区域演化为空洞。今天所观测到的宇宙元素丰度应当是原初核反应与恒星形成后的内部核反应产物的综合结果。在一定的宇宙环境下，简单分子合成复杂分子，生命也是在特定的条件下逐渐演化而诞生。21 世纪天体物理学将要用更令人信服的观测结果，更严格、更自治的理论来确立宇宙的演化链，现在的宇宙演化模型也完全有可能被新的观测事实所推翻而导致演化学说的再一次飞跃。

### 二、暗物质的本质

由动力学方法测定的各类天体的质量远大于由它们的光度推算出来的质量，这是近 20 年天体物理研究中的一个重大疑案。暗物质与可视物质之比，

随天体的尺度而变化。尺度越大的天体，暗物质的比例越大。平均宇宙密度中，暗物质要占 90%。探讨暗物质的本质与物理学及宇宙学起源的基本问题紧密相关。

从宇宙学角度看，宇宙平均密度是直接决定宇宙膨胀中的减速因子。如果由可观测到的有限天体中定出的暗物质密度可以外推到整个宇宙的话，那么我们的宇宙将是闭宇宙，即将来某个时刻又会收缩到一个奇点。暗物质的模型又直接关系到宇宙中结构的形成，影响总起源的演化链。

如果暗物质不是死亡的恒星，则可能是某种基本粒子，它的成份的确又直接关系到粒子物理中的大统一理论。因此暗物质问题是天体物理与理论物理学家所共同关心的焦点。

### 三、类星体的核区物理

正常星系的发光区域可达到 10 万光年大小，但类星体及活动星系核的辐射主要来自于大小约为 0.1 ~ 1 光年的中心区域，而其辐射却比整个星系（约有 1000 亿个太阳）高出 1 万倍。宇宙中其他天体，如超新星爆发虽然也辐射出比正常恒星高 1 亿倍的能量，但持续时间很短，通常只有几十天的时间，而类星体的寿命却可长达几十亿年。探讨这一能源的本质具有基本的理论意义和重要的实际价值。一种流行的模型是类星体的中心形成大质量黑洞，在强引力场的作用下，对周围物质的吸积，由引力能转化为辐射能。吸积率约每年  $10^8$  太阳质量，在角动量的作用下，被吸积的物质在黑洞周围形成吸积盘。直接从观测上证明这种吸积盘的存在，并弄清核心区的能量释放机理，这无疑是在自然科学中的重大问题。

### 四、21 世纪探测宇宙的能力

和基本问题同样重要的是探测宇宙的技术能力。天文学的一切成就都来源于观测，它的进一步发展也受制于观测能力。本世纪 80 年代以来，电磁波各个窗口的探测技术已日臻成熟，下一世纪将在更大规模上去实现。为了说明人类在下一世纪可能达到的能力。以探求类星体核区为例。类星体的核区直径为 0.1 至 1 光年，类星体的距离约 10 亿至 100 亿光年，它对地球的张角为百万分之一角秒，相当于原子在显微镜下的张角。要看清类星体核区的结构就需要相当于地面实验室要看见原子一样。唯一解决的方法是用建立在干涉基础上的综合孔径成像技术，这个技术本世纪已经成熟。但要用到分辨类星体核区，在光学上需要基线长度为 50 公里，在毫米波段需要基线长度 30 万公里。这就要求在下一世纪建成的光学综合孔径望远镜的布局要和今天最大的射电望远镜阵相当。而射电波段则要求月-地之间的干涉，因此下一世纪，巨型月基天文台必将问世。因为任何轨道空间天文台均不能满足这样的要求，只有月面上才能提供这样大范围的、不受地球大气影响的大天文台址。建成这样的天文台显然不是一个国家的国力所允许的，需要靠全人类的努力！

引力波存在的被证实和引力波探测技术的发展，将能够最终弄清楚暗物质的本质及其分布，因为引力波直接与质量及其运动相联系，21 世纪在引力波的探测及其应用方面应当会有重要突破。

## 五、新科学的摇篮

天文学是近代科学的摇篮。由行星轨道运动规律的研究导致牛顿力学的诞生是必然的。因为一门新的自然科学的诞生需要对新现象精密的和重复的测量。行星运动是当时研究质点力学运动的最理想的实验室。牛顿力学诞生之后，近代科学的实验室转为以地面实验室为主，天体物理学变得更像是物理学的应用科学，忽视了天然的宇宙实验室对科学进步的启迪作用。其实地面实验室受到当时、当地的工业、技术及经济发展的限制，人类到了本世纪初才在地面上发现核衰变现象，而热核反应却远在人类诞生之前，就天天在太阳上进行。宇宙本身无疑是科学思想的源泉。可以肯定地说，许多基本科学问题，离开宇宙这样的天然实验室是无法进行研究的。本文所提到的许多问题，为极早期宇宙的超高能、引力辐射、暗物质等问题的解决奠定了基础，将再一次成为新物理学诞生的摇篮。

## 林兰英



1918年2月生，福建莆田人。半导体材料科学家。

1940年毕业于福建协和大学，1955年获美国宾州大学博士学位。中国科学院半导体研究所研究员。中国科协副主席。一直从事半导体材料科学研究工作，是我国半导体科学事业开拓者之一，先后负责研制成我国第一根硅、锑化铟、砷化镓、磷化镓等单晶，为我国微电子和光电子学的发展奠定了基础；负责研制的高纯度汽相和液相外延材料达到国际先进水平。近年来，又开创了我国微重力半导体材料科学研究新领域，并在砷化镓晶体太空生长和性质研究方面取得了世人瞩目的成绩。

## 21 世纪空间材料科学展望

林兰英

空间材料科学目前主要是利用外层空间轨道上自由飞行的飞行器中的微重力环境的特点来制备和加工材料及其性质研究的科学。当然，外层空间的超高真空和超洁净的环境也可用于材料加工，但是目前这方面的研究还不占主要地位，因此空间材料科学也可以叫做微重力材料科学。

微重力材料科学是在实现大规模载人航天以后出现的。我国科学工作者近年来才开始逐步认识了这门科学。大家知道，在一定高度的空间飞行器内，如航天飞机、宇宙飞船、人造卫星内，物体处于失重状态。这是因为物体的重力与其离心力相平衡，其残余重力是非常微小的，可以小于  $10^{-5}g_0$ 。（ $g_0$  为海平面的物体的重力加速度）。所以这种特殊环境叫做微重力环境，而且飞行轨道上的航天器内的微重力环境是人类可以获得的唯一模拟长时间失重的方法。许多材料制备和生产过程中，通常都伴随着液态向固态的相变过程。在重力条件下液相材料中不可避免地存在着强烈的重力驱动力对流，即通常所说的热对流。热对流在许多情况下对材料加工是有利的，但是在许多情况下则是有害的。譬如要在地球上制备比重相差很大的金属合金，如铅—铝、铅—锌合金等几乎是不可能的。与此相仿，在材料科学的每一个分支都存在着一些在地球上无法解决的生产质量问题。在微重力条件下热对流消失了，不同比重的物质的沉浮消失了，液体的静压力消失了。恰当应用这些特性就可能生产高质的材料，这样一来就形成了一个内涵极为丰富的，极端条件下的材料科学分支，即微重力材料科学。如果有一天人们能像乘坐飞机一样在天地间廉价地自由往返，利用超高真空和超净等空间环境条件生产特殊材料的任务也会提到日程上来。那时空间材料科学就不只是微重力材料科学，而是完全意义上的空间材料学。

目前微重力材料科学的内容有：晶体生长，包括半导体单晶和其他无机盐晶体；金属合金，包括金属基复合材料；生物材料以及流体力学。

自 60 年代末，70 年代初美、苏利用航天飞机和宇宙飞船率先完成了一系列的微重力材料科学实验，初步揭示了在微重力下制备材料的优越性，1983 年欧空局 (ESA) 利用美国航天飞机发射了西欧联合制造的“空间实验室 D<sub>1</sub>”，这是首次完全为了微重力科学实验目的而发射的空间飞行器。在其中完成了 69 项科学实验，材料科学项目占了一半。经历了由“挑战者号”失事挫折而导致 10 年的停飞之后，美国航天飞机再次升空，并于今年又把西欧的“空间实验室 D<sub>2</sub>”送上太空。地面的材料专家可以通过“遥科学”实时控制正在 D<sub>2</sub> 空间实验室进行的科学实验。日本也有自己的宇宙开发计划，一方面利用国际合作开展微重力科学研究，另一方面也正在发展自己的运载系统，发射专门的微重力科学自由飞行器。东欧集团和前苏联合作完成了数量很大的空间材料加工实验。印度于 1989 年派宇航员登上前苏联空间站进行材料加工和生物医学实验。从 1987 年开始我国利用返回式卫星进行了 5 次搭载实验，其中主要是空间材料实验，从此开始了我国微重力科学的开创时期，引起了世界微重力科学界的关注。总之，世界的发达国家和一部分发展中国家都卷入了这一空间应用领域。下面就微重力材料科学的若干重点的现状，发展前景及存在的问题做一点评述。

## 一、晶体生长

晶体的空间生长的首选目标是半导体单晶生长，因为半导体材料是信息产业的基石之一。半导体器件对半导体材料提出了很高的要求，而地面生产不能加以满足。迄今为止已经研究了几十年种半导体材料，发现了它们在各种领域的广泛用途。但是只有硅材料才顺利地获得了大规模的工业应用，许多其它具有比硅单晶更加丰富多彩的应用前景的化合物半导体材料，由于质量不过关，在走向大规模工业应用的道路上困难重重，步履蹒跚，至今没有一种材料在应用规模上可以和硅材料相比拟。空间的微重力，超高真，超洁净的环境都是有利于改善半导体材料质量的，因而有可能在空间生产高纯的，掺杂和组份分布都均匀的和完善的（低位错和无位错，低的点缺陷和微缺陷浓度）晶体。加之化合物半导体材料价格昂贵，制造器件时用量少，因此经济上也较为合理。这就是为什么半导体单晶生长，特别是化合物半导体单晶生长成为空间材料的重点。根据 1987 年我国在空间生长 GaAs 单晶的结果，我们提出了在空间生长化合物半导体单晶更加必要的观点，也就是说空间半导体单晶的生长研究的重点应该是化合物材料。这一观点得了国际微重力科学界的认可，国际的发展趋势也与我们的意见相一致。另一个发展趋势也值得我们注意。从 70 年代起半导体薄膜材料，超薄层和超晶格材料已成为半导体材料科学的主流，并在半导体器件应用中占有核心的地位。因此半导体材料的空间研究也应当与此相适应。

有许多无机盐晶体，主要是氧化物和卤化晶物，在光学应用和制造探测器方面占有重要地位，这些材料的空间生长受到了重视。目前这些晶体的空间生长以熔体生长为主。水溶液生长所需要的时间特别长，只在短时间生长小的晶体方面作了一些探索性实验。将来能为这一实验提供长时间微重力时，大晶体的生长才有可能。

## 二、金属合金

金属合金是工业上广泛应用的一类材料，其种类繁多，因而微重力下的金属合金研究的内容十分丰富，主要有：难混合金、偏晶合金、共晶合金、非晶合金、超导材料、磁性材料，发泡金属以及复合材料。此外，生产金属空心球作为热核反应的核靶意义十分重大。金属合金的空间研究存在的主要问题是主攻方面还不明确。

## 三、生物材料

生物材料的空间加工的目的是制药，为此正在从事两个方面的研究。一是利用空间电泳技术高效率地提纯可以作为药物的生物制品；二是蛋白质晶体生长，主要目的是生长大尺寸蛋白质晶体，用来开展其晶体结构的研究，为人工合成药物蛋白质提供基础知识。看来空间制药的道路是漫长的。

## 四、微重力流体力学

这是一项微重力的基础研究，其目的是了解微重力下材料加工的机理。微重力下的燃烧和流体管理研究对空间技术的发展有十分重要的作用。此外，在空间完全没有重力驱动对流的情况下来进行扩散、分凝，界面等基本物理化学现象的研究，才能获得准确的数据。因此，这方面的研究也是微重力流体力学的重要内容之一。

空间材料科的前景是人们非常关切的问题。外层空间不仅提供了微重力，超高真空、超净环境，而且还有丰富的太阳能，因此空间材料的发射前景是肯定的。主要的约束条件是经济的合理性，可行性以及发展速度问题。在人类掌握了廉价的，可重复使用的天地往返运输系统之后，这些问题就可以得到解决。最近美国成功地发射可以垂直返回的大推力火箭之后，解决这一问题的前景就更加明朗了。因此首先我们相信空间材料科学的发展前景是光明的，建立材料空间产业的可能性是存在的，而且在 21 世纪一定会取得重大突破。

空间材料科学经过 20 多年的发展历程，也遇到了没有预料到的困难。因此我们也要充分认识到任务的艰巨性和发展道路的曲折性。例如，要克服表面张力对流引入的“微杂质条纹”，就要采用皮壳技术限制自由表面。如果要克服在空间熔区断裂，就要采用限制或部分限制容器，这样就使之失去无容器加工技术的优点。合金组分的粗化过程在表面能力对流作用下进行得非常迅速，使制备任意组份均质难混合合金的设想还没有实现。巨大的耗资和众多的科学家为了一次空间实验需要数年的工作，导致空间实验的机会甚少。由于受空间站体积，能源和人力的限制，以及人类控制、干预、操作空间实验的可能性还很小，因而空间实验失败的情形经常发生。衡量空间科学进展的时间坐标是以 10 年为单位，因此，材料空间产业不可能在短时间内建立。当美国和前苏联的雄心勃勃的计划受挫以后，西欧科学家很少谈到空间产业的前景。当少数科学家谈到这一点时也是忧心忡忡，认为可望而不可及，甚至认为是在搞赌博。同时也有人注意到，如果高度冒险的事业能够获得巨大的利润，这正好是推动由不成熟的技术支持的，具有科学价值或商业价值的科学的发展动力。

我国的财力和技术力量比西欧要薄弱得多，因而我国总的方针应比西欧更加谨慎，切忌把目标定得太高。我们也不应该搞纯科学研究，还是要坚持利用空间环境造福于中国人民的方针。同时也要允许化少量的钱去探索新的道路。

我国在没有航天飞机、宇宙飞船的情况下，利用返回式卫星搭载开展微重力科学实验的经验是：在严格的科学精神的指导下，一定程度的因陋就简，以勤劳节俭的精神开展微重力实验是可能的。这一经验将在发展我国的空间材料科学中产生重大影响。

最后需要指出，微重力材料科学研究的目的是不仅是开发材料空间产业，而且还要通过空间材料研究不断地给人们以新的认识，反过来指导地面的材料加工工艺，提高在地面生产的材料的质量。在这方面微重力研究所能给予人类的效益是难以预计的。（本文作者还有锺兴儒）

## 欧阳予



汉族，1927年7月生，四川省乐山市人。总设计师，核反应堆及核电工程专家。

1948年武汉大学工程院电机系毕业。1957年在苏联莫斯科动力学院获技术科学博士学位。曾先后在武昌发电厂、中南电力建设公司、二机部设计院（今核工业二院）等单位工作：1971年任上海核工作研究设计院高级工程师（教授级），总工程师；1987年任秦山核电公司第一副总经理；1990年任中国核工业总公司科学技术委员会副主任。1957年起他在二院作为设计总工程师参与主持并组织完成了我国第一座军用生产堆研究设计，该堆于1966年顺利建成投产。他是我国第一座自行设计建造的秦山核电站的总设计师，全面负责这项国家重点工程的技术指挥和决策。1989年被建设部授予中国工程设计大师称号。1990年被能源部聘请为高级咨询委员。1991年11月当选为中国科学院（技术科学部）院士。1992年4月获中华全国总工会授予的全国优秀科学工作称号和五一劳动奖章。现为全国政协委员，我国出口巴基斯坦正在建设的恰希玛核电站总设计师。

## 核能利用的意义和前景

欧阳予

本世纪的伟大科技成果之一，是人们打开了核能利用的大门。1905年，爱因斯坦在其著名的相对论中列出了质量和能量相互转换的公式： $E=mc^2$ ，其中， $E$ 为能量（erg）， $m$ 为质量（g）， $c$ 为光速（厘米/秒）。这一公式表明，少量的质量转换为能量就十分巨大，揭示了核能来源的物理规律。

1938年，德国物理化学家哈恩和施特拉斯发现了铀—235的裂变现象：铀原子核裂变的同时，释放出巨大的能量，这个能量来源于原子核内核子的结合能，它恰好相等于核裂变时的质量亏损。这一发现，使核能的利用走向现实。

核能的利用是从制造核武器的军用开始的。1942年美国在芝加哥大学建成了世界上第一座核反应堆，首次实现了可控核裂变连锁反应，并应用其试验成果于1945年建成投产了第一座为生产用于核武器的裂变物质钚—239的反应堆。同年在橡树岭也建成了浓缩铀—235的高浓铀工厂。分别装有铀—235和钚—239的两颗原子弹，先后于1945年8月6日和9日投放在日本广岛和长崎，促进了第二次世界大战的结束。

核能的和平利用始于50年代初期。1951年美国利用一座生产钚的反应堆的余热试验发电，电功率为200千瓦。1954年，苏联建成世界上第一座核电站，电功率5000千瓦。之后，英国和法国相继建成一批生产钚和发电两用的气冷堆核电站，美国移植利用其核潜艇技术建成了电功率9万千瓦的第一座在水堆核电站。那时，各有核国家在抓紧核武器竞赛的同时也竞相建造核电站。至70年代中期进入了发展核电站的高潮，那时核电站增长的速度远高于火电和水电。但是，至70年代后期，一方面由于国外经济增长缓慢，能源需求趋缓，另一方面，更由于三里岛核电站事故特别是切尔诺贝利核电站事故的影响，使相当多的人对核电站的安全产生疑惧，反核势力趁机抬头，从而使核电站的建设进入了低潮。尽管如此，法国、日本、韩国等仍坚持了以发展核电为主的方针，并取得了卓越的成效。我国自80年代以来，发展核电的决心也坚定不移，自行设计建造成功的秦山核电站于1991年并网发电，进口的大亚湾核电站也于1994年并网发电，秦山和大亚湾的第二期核电工程也正在积极组建中。近年来，国际上关于发展核电的呼声又趋高涨，预计到21世纪，核能利用的复甦必将到来。这是因为，解决人类能源的需求，从长远观点来看，终将依靠核能。

### 一、核能在能源中的地位

在19世纪产业革命之前，人类能源消耗的增长，相当缓慢。产业革命以来，由于经济的发展，能源耗业也迅速增长。近一百年来，世界能耗增长了20倍。本世纪50年代，世界能源年耗量约为26亿吨标准煤，至80年代初已超过年耗量100亿吨标准煤，预计到21世纪初将达200亿吨标准煤。但是，迄今为止，世界耗能的85%均来自燃烧煤、石油、天然气等有机燃料。大量燃烧有机燃料所产生的二氧化硫、二氧化碳、氧化亚氮和烟灰等物质，给人们带来深为忧虑的环境影响问题。而且，这些有机物质的巨大增长的耗量，使它们在地球上的储量日益面临枯竭。

自然界中，除有机燃料外，核能、水力、风力、太阳能、地热、潮汐能也都是可资利用的能源。水力是无污染的能源，应充分开发使用，但水力资源终究有限，且受地理条件限制。水力发电量又随季节变化很大，故光靠水力替代不了有机燃料，满足不了日益增长的能源需求。风力、太阳能、地热、潮汐能等，都因受多种条件的限制，只能在一定条件下有限开发，很难大量使用。多种预测资料表明，即使做较乐观的估计，到下一世界，上述这几种能源中每种在能源总耗量中的比例，都很难超过 1%。目前，技术上已较成熟，且能大规模开发使用的，唯有核能。而从人类能源需求的前景来看，发展核能更是必由之路，这是因为核能有其无法取代的优点，主要表现于：

1. 核能是地球上储量最丰富的能源，又是高度浓集的能源。一吨金属铀裂变所产生的能量，相当于 270 万吨标准煤。按照地球上有机燃料的储量和人类耗能的情况来估算，地球上煤的储量大概还过 200 多年即将耗尽，石油则只够用三四十年。人类已经面临如何选择后继能源的问题。地球上已探明的核裂变燃料，即铀矿和钍矿资源，按其所含能量计算，相当于有机燃料的 20 倍，只要及早开发利用，即有能力替代和后继有机燃料。更进一步说，地球上还存在大量的聚变核燃料氘，能通过聚变反应产生核能。1 吨氘聚变产生的能量相当于 1100 万吨标准煤。自然界每吨海水或河水中均含有 3 克氘，所以，将来聚变反应堆成功后，1 吨海水即相当于 33 吨标准煤。那时，人类将不再为能源问题所困扰。

2. 核电是清洁的能源，有利于保护环境。目前，世界上大量燃烧有机燃料的后果是相当严重的，燃烧后排出大量的二氧化硫、二氧化碳、氧化亚氮等气体，不仅直接危害人体健康和农作物生长，还导致酸雨和大气层的“温室效应”，破坏生态平衡。比较起来，核电站就没有这些危害。核电站严格按照国际上公认的安全规范和卫生规范设计，对放射性三废，按照尽力回收储存，不往环境排放的原则，进行严格的回收处理。往环境排放的只是处理回收后残余的一点尾水尾气，数量甚微。核电站运行经验证明，它每发 1000 亿度电，放射性排放总剂量平均 1.2 希，而烧煤电站的灰渣中放射性物质总剂量约为每发 1000 亿度电 3.5 希。可见即使仅从放射性排放角度看，核电也比火电小。

3. 核电的经济性优于火电。电厂每度电的成本是由建造折旧费、燃料费和运行费这三部分组成。主要是建造折旧费和燃料费，核电厂由于特别考究安全和质量，建造费高于火电厂，一般要高出 30% ~ 50%，但燃料费则比火电厂低得多。火电厂的燃料费约占发电成本的 40% ~ 60%，而核电厂的燃料费则只占 20% ~ 30%。国外和我国台湾省的经验证明，总的算起来，核电厂的发电成本要比火电厂低 15% ~ 50%。

4. 以核燃料代替煤和石油，有利于资源的合理利用。煤和石油都是化学工业和纺织工业的宝贵原料，能以它们制造出多种产品。它们在地球上的蕴藏量是很有限的；作为原料，它们要比仅作为燃料的价值高得多。所以，从合理利用资源的角度来说，也应逐步以核燃料代替有机燃料。

总之，核能的优点终将为人们所确认。它的利用是解决能源问题必由之路。可以预见，在下一世纪，它在能源中的比例必将逐步加大，从而改善能源结构，并将彻底解决人类对能源的需求。

但是，人们在承认核能优点的同时，往往担心核电站会因发生事故而污染环境 and 危害人民。苏联切尔诺贝利核电站事故后，这种担心骤增。其实，

自从世界上有核电站以来至今 40 年,已有四百多座核电反应堆运行了 6 千多堆年,造成环境严重污染和人员伤亡事故的,仅前苏联切尔诺贝利一例。这次事故,有其独特的条件,主要是切尔诺贝利采用的世界上仅前苏联所独有的石墨沸水堆,其设计本身就有严重缺陷,潜在着严重的不安全因素,容易引发瞬发超功率,损坏反应堆。加上它又没有设置封闭放射性物质的安全壳厂房,一旦反应堆损坏,放射性就释往环境;再加上严重违反安全规程,以致不可收拾。当今世界上绝大多数核电反应堆,包括我国秦山和大亚湾的压水反应堆,都设计成可根据“负反应性温度系数”进行安全保护的功能,即温度升高,反应性减弱;温度超过一定限度,核反应就自行停止,趋向安全。所以,切尔诺贝利式的事故在压水型反应堆中肯定不会发生。再则,当今绝大多数核电站都专门设置了密封耐压的安全壳厂房,将反应堆和核能系统整个笼罩密闭在内。所以,即使反应堆和核能系统损坏,安全壳仍能阻挡放射性物质,不往环境泄放。美国三里岛核电站事故之所以没有危害环境,是安全壳起了重大作用。在核电站的安全设计中,本着预防为主,纵深防御的原则层层设防,设置多重的、多样的和互相独立的安全保护系统和专设安全设施以防止事故的发生和扩大。在设计、建造、运行中建立严格的质量保证和检验制度,以确保工程质量,消除事故根源。此外还针对各种可能的灾害诸如地震、海潮、风浪、暴雨、洪水、台风、火灾,飞机撞击等以及各种可能出现的故障事件逐一进行分析,采用防御措施以确保安全无虞。对于核电站操作人员,必须经过培训和考核通过后取得合格证书,方能上岗。核电站安全措施完善程度和管理的严格程度,远非一般工业所能比拟,它的安全是有充分保证的。当然,安全是没有止境的,近年来,专家们又在安全设计中引入新的概念,着手研究设计“具备固有安全性”的反应堆,“能抗严重事故;无需厂外应急”的反应堆等安全目标。这类核电反应堆将在下一世纪陆续实现,那时,核安全又更上一层楼,更有保证了。

## 二、核能开发利用的步骤

核能的开发利用,是一个循序渐进的长期过程。一般说来,应按其科技难度的不同,分为热中子反应堆,快中子增殖堆、可控聚变堆三步,互相衔接,逐步进入实用阶段。

第一步是热中子反应堆的应用。这是指堆芯内有慢化剂,将快中子慢化为热中子工作的反应堆。压水堆、沸水堆、重水堆、石墨堆都是热中子反应堆,现在世界上已有四百多座热中子堆核电站(其中约 70%为压水堆)在运行发电,总装和容量三亿多千瓦,年发电量占全世界总发电量的 17%,热中子堆今后技术改进的重点是提高其固有安全性和抵抗严重事故的能力,确保不发生危害环境的事故;同时将堆的寿命由现在的 40 年延长至 60 年,以提高核电站的经济性。这些目标可望在 21 世纪初期实现。

热中子堆的主要缺点是它的核燃料利用率很低。在开采、精炼出来的金属铀中,只有约 1%能在热中子堆中裂变产生核能,99%都将作为贫铀(其中含铀—235 约仅 0.2%,其余 99%以上都是铀—238)积压起来,要等待建成快中子增殖堆后方能大量利用。

第二步是快中子增殖堆的应用。快堆最大的优点是它能充分利用核燃料。在块堆里,每个铀—235 或钚—238 裂变时放出的中子,除维持裂变反应

外，还有 1.2~1.6 个中子可以用来使难裂变的铀—238 转变为易裂变的钚—239，也就是说，快堆在消耗裂变燃料以产生核能的同时，还能生成相当于消耗量 1.2~1.6 倍的裂变燃料。这样，就可以把热中子堆所积压的铀—238 在快堆中充分利用。

快堆这种能增殖核燃料的特点，早在 1945 年就为主持世界上第一座反应堆设计建造的科学家费米所指出。50 年代以来，美、英、法、苏等国都集中相当力量研究建筑快堆。在 60 年代相继建成了一批实验性快堆核电站，70 年代又建成了几座电功率约 25 万千瓦的示范性快堆核电站。80 年代苏联建成了电功率为 60 万千瓦的 BN—600 快堆核电站，法国建成了电功率为 120 万千瓦的“超凤凰”快堆核电站，基本上证实了钠冷池式快堆在工业技术上的可能性。然而，通过这些快堆的研制，专家们也认识到，快堆在工艺技术上的难度、防止钠积渣和铀水反应以及耐高辐的材料选用等问题，都比当初想象要复杂得多。由于要对付这些难题，使得快堆的工艺系统相当复杂，投资甚大，因此就冲淡了它在燃料上的优越性。以法国 120 万千瓦的超凤凰快堆电站与同规模的压水堆电站作比较，前者的基建投资为后者的 3.5 倍，发电成本为后者的 2.5 倍。所以，当前由于快堆在技术上尚不成熟，它在经济上还不能与压水堆竞争。如何促使快堆技术成熟，工艺简化，从而使经济性提高，是反应堆专家们在下一世纪在快堆上的主攻任务。估计需要三十多年时间，即到 2030 年前后，快堆才能取得对压水堆等热堆的优势，从而逐渐取代热堆，成为 21 世纪核能利用的主力堆型而推广应用。发展快堆，方向是完全正确的。

第三步是可控热核聚变堆。聚变堆成功后，水中的氘足以满足人类几十亿年对能源的需求。然而，实现持续的可控聚变，难度非常大。

人们已经确认，太阳就是一个巨大的聚变反应堆，它中心的温度约 1500 万摄氏度，压力约 300 亿大气压。太阳之所以有这样大的高温高压，是因为它的质量为地球的 33 万倍，引力巨大之故；在这样的高温高压下，每 4 个氢原子核能聚变为 1 个氦原子核，放出大量能量。在地球上的自然条件下，引力太小，靠引力不能把高温下的等离子体约束在一起产生聚变，聚变在地球上只能在人工条件下实现。关键问题是等离子体的稳定约束。目前主要研究的有磁约束，惯性约束和  $\mu$  介子催化等途径实现可控聚变。各国已建造多种类型的试验装置二百多台，向上述多种途径聚变点火目标探索前进。要证明可控聚变的可行性，除了要解决等离子体约束的稳定性等基本问题外，还需要解决有关超导电、导磁体，中子束注入，超高真空和大功率储能电源等一系列技术问题。目前可控热核聚变还处于基础研究阶段，但已露出胜利的曙光。预计到 2050 年前后能实现原型示范的可控聚变堆，发展到经济实用的阶段，还有一段艰辛的道路，但它的前景是光明的。

### 三、我国核能利用的现状和前景

我国是重视核能发电的。1955 年中央制定原子能发展计划 12 年大纲中就指出：“用原子能发电是动力发展的新纪元，是有远大前途的。”七十年代，在核武器和核潜艇基本过关后，核电站提上了议事日程。1974 年，电功率为 30 万千瓦的压水堆核电站被中央批准作为科技开发项目立项，随即开展了相关的研究、设计、试验工作。1983 年，党中央和国务院再次表明，发展

核电是坚定不移的方针，并同意专家论证结果，选定压水堆为近期发展的主要堆型。之后自行设计建造的秦山 30 万千瓦核电站和进口的  $2 \times 90$  万千瓦核电站相继开工兴建，并分别于 1991 年和 1994 年并网发电，结束了我国大陆无核电的历史。1986 年，经过专家论证，国务院决定在今后相当一段时期内将以电功率 60 万千瓦的压水堆为核电主力机组，充分吸取秦山一期经验，以我为主，中外合作，系列发展，并先在秦山厂址建造 4 座，并为设计建造 100 万千瓦的机组打下基础，以期在下一世纪开始一段时期内压水堆核电有较大的发展，增加核电在电力中的比例。

快堆的优点也为我国领导人和专家所共识。为了给核电的第二步发展创造条件，863 高科技规划决定，把研究、设计、建造一座热功率 6.5 万千瓦，电功率 2.5 万千瓦的快堆试验性电站作为重点高科技项目列入，计划在下世纪初建成之后，将陆续研制示范性快堆和经济实用的快堆电站，以期在 2030 年前后达到当时世界先进水平。

与此同时，863 规划还决定研究、设计、建造一座热功率为一万千瓦的高温气冷堆。这是一种先进的热中子堆型，其冷却堆芯的氦气温度可达  $800 \sim 1000$  ，除了能高效发电外，还可用于炼钢、煤的气化、氢气生产等，但其技术难度也高，一系列高温工艺和氦密封技术有待克服。

可控聚变堆的研究，已在核工业西南物理研究院和中国科学院合肥物理研究所同时进行了多年，已取得研制成功“环流一号”装置等令人瞩目的成果，并正在扩大国际合作，以期能与国际上的研究接轨，同步进行。

总之，我国核能开发利用的前景是光明的，但这终究是一个长期的大系统工程，既要解决为国民经济服务的大量工程技术问题，又要为下一步发展进行系统的预研工作，还需要深入进行一系列基础研究，牵涉到的学科范围也十分广泛。因此，必须远近结合，高瞻远瞩，全面考虑，统筹安排，认真落实。我们相信，在国家的统一规划和扶植下，在人民群众的积极支持下，我国核能的开发利用，必将结出丰硕成果。

## 冼鼎昌



1935年生，广东广州人。1956年毕业于北京大学物理系后到中国科学院近代物理所工作，1962年在丹麦尼玻尔研究所任博士后，1980年曾先后在美国纽约州立大学（石溪）理论物理研究所、比利时布鲁塞尔自由大学、意大利国际理论物理中心及日本东京大学任职，1991年当选为中国科学院院士，现为中国科学院高能物理研究所研究员、博士生导师。

1990年领导建成我国第一个同步辐射装置—北京同步辐射装置，在同步辐射光源、插入件、同步辐射光学等多方面多有建树。1990年因这项工作成为当年国家科技进步特等奖项目—北京正负电子对撞机的特等奖获得者之一。其后领导开辟了一些重要的同步辐射应用研究领域，如X光光声 EXAFS 谱学、元素的三维分布无损成像方法等、取得首先在国内探测到X光的光声效应、同步辐射在地矿科学中应用等重要成果。

长期以来，在粒子的唯象分析、粒子的对称性、层子模型、非阿贝尔规范场的经典理论、格点规范场理论、自由电子激光等相当广泛的理论物理领域中从事研究，曾获1978年全国科学大会重大成果奖，1982年国家科学技术二、三等奖，1988年国家科学技术三等奖，以及中国科学院的奖励。

曾在国内外学术刊物上发表了100多篇学术论文。

## 同步辐射与工业生产领域的新机遇 ——从微机械加工的 LIGA 技术谈起

冼鼎昌

在北京和合肥建成的两个同步辐射装置为我国的科研工作提供一种新的手段，为工业生产领域带来了新的机遇。其影响之大，几乎是立即可见的。以我国的超高压科学为例，中科院物理研究所的超高压技术，几年前已达到 150 万个大气压的水平，应当说是不错的。但是因为它缺乏先进的分析手段，对在此压强下的物态实际上无法进行分析。研究工作处于停顿状态。在同步光源投入运行后，超高压科学的研究重新焕发了生机。总的说来，同步辐射在科研中所起的巨大作用，已被国内各方面的专家所认识。

除了在科研领域，同步辐射给工业生产领域也带来了巨大的新机遇，这一点目前尚未普遍为国内产业界广大的技术人员和发展规划人员所认识。但是，在国外工业先进的国家中，它已被引起高度的重视，并有了相当的规模和投入，这应当引起我们的注意。在这里我想就同步辐射在微机械中的一种大规模的加工技术—LIGA 技术所起的作用作为例子，来说明这个巨大的新机遇，呼吁产业界的同行和规划人员对此予以高度重视，以免与它失之交臂。

高科技的发展，已经把微机械加工提到日程上来。例如，光纤光缆通讯技术的发展，要求能够由工业大批量生产具有微结构的光纤芯耦合器，以取代目前手工或半手工的操作。这种工业就属于微机械加工业。

现代的微机械加工是指宽度为几个到几十个微米、高度为几十到几百微米的机件的加工。它的第一个主要特征是高宽比大到几十以上；它的第二个特征是有着集光、机、电性能于一体的生产器件的潜力。微机械产品正在被应用到越来越广泛的领域中，例如，微马达和微照明灯具已被应用于非剖开性人体内部的外科手术，微米结构的同位素分离喷嘴已被用于核燃料铀的富集生产中。目前，微机械加工是一种正在成长的、具有巨大广阔前景的新工业，完全有可能成为下一世纪的一种主要的工业，应当引起我国的高度注意。

当前正在发展的微机械加工技术有多种，但就大规模生产与高度的适应性而言，80 年代中的德国卡尔斯鲁尔 (Karlsruhe) 原子核研究中心发展的 LIGA 技术，在国际上被认为是微机械加工的一个最有前景的新方向。

LIGA 是德文 Lithographie (光刻)、Galvanofornung (电铸成型) 和 Abformung (塑铸成型) 三个字的字头，它由深层同步辐射光刻、电铸成型及塑铸成型这三个工艺过程组成。所以准确的名称为机械加工的同步辐射深层光刻、电铸成型与塑铸成型技术，简称为 LIGA 技术。在原理上 LIGA 技术与全息记录的大规模复制 (例如激光唱片生产) 有点相仿，第一步是用光刻的方法在光刻胶上刻出微机械或微器件的三维结构，第二步是通过电铸从光刻胶三维结构上产生金属母模，第三步是用母模通过电铸或塑铸方法复制许多金属的或其他材料的生产用模，最后一步是用模作大规模复制，其工艺流程是：

(1) 用于深层光刻的掩模制作；(2) 同步辐射 X 光曝光；(3) 光刻胶显影；(4) 电镀铸模制作；(5) 光刻胶剥离；(6) 生产性塑模制作；(7) 脱模成型。

LIGA 技术中的光刻工艺与用在微电子工业的光刻工艺是很不相同的。微米级微电子器件的刻蚀深度不大于几百纳米，刻出的结构的高宽比小于 1，

所以也称为平面的光刻，所使用的光源的波长在可见光到紫外光的范围便已足够。与之对比，LIGA 技术中的光刻的深度要到千倍以上，因此也称为立体的光刻。要增加刻蚀深度，必须使用波长比紫外光短得多的 X 光。如果要做几十到几百微米深度的光刻，所使用的光就是波长在 0.2~1 纳米之间的 X 光。

对于深层光刻所使用的 X 光源的性质，除了波长之外，还有两个重要的因素，就是光的功率密度和准直性。它应当有足够大的光功率密度和足够好的准直性，前者是为了曝光的需要，后者是为了保证制作出来的微机械结构的垂直面具有优异的平行度。目前的软 X 光光源，有用轻元素为靶的常规 X 光源、聚焦激光打靶形成的等离子体产生的软 X 光，以及同步辐射光源。第一种光源功率小，第二种光源目前达到的波长在 10 纳米以上。两种光源都属于点光源，光的准直性都不好，而且两种光源的功率密度都不足以在合适的时间内使厚的光刻胶层曝光。最适合于深层光刻的光源是同步辐射光源。目前在北京同步辐射实验室中提供的软 X 光同步辐射光源波长为 0.4 纳米左右，略经改进后可达 0.2 纳米，完全可满足深层光刻的要求。

光源性质的差异与大的高宽比的要求给 LIGA 技术中的光刻工艺从掩模制作开始的每一步几乎都带来有待解决的问题。至于后续的电铸和塑铸工艺，也是有着从材料开始的一系列的问题。

目前国外的发展情况大致如下：德国卡尔斯鲁尔原子核研究中心的小组，经过六七年的努力，应用同步辐射光源首先解决了深层光刻的一系列技术关键，然后又解决了在这个尺度上的电铸及塑铸技术，完成了 LIGA 技术的可行性研究，不久前交付工业进行开发。从已发表的报告来看，德、美等国投入了很大的力量进行发展。日本公开发表的报道很少，但据国外得到的工业情报，在这方面日本也投入十分可观的力量，而且达到了相当高的水平。国际上普遍认为，LIGA 技术是微机械加工的一个极重要的技术，有着巨大的发展前景。

北京同步辐射国家实验室自建成之后，一直在从事 LIGA 技术的探索工作。最近它和中科院长春光机所合作，在光刻胶上刻出深度为 20 至 40 微米的微型齿轮三维结构，是一个很可喜的开端。鉴于此项技术的重要性，以及在北京的同步辐射装置已能提供波长适合于作 LIGA 技术研究用的同步光和一些必要设施的有利条件，可以说，一个工业技术方面的重大机遇已经出现。我们应当不失时机，抓住这个机遇。作为第一步，我国是有条件立即立项开展此项技术的可行性研究，是十分合时的。

## 郑哲敏



原籍浙江鄞县，1924年10月生于山东济南。爆炸力学和应用力学专家。中国科学院院士，中国工程院院士。美国工程科院外籍院士。1947年获清华大学学士学位。1949年、1952年分别获美国加州理工学院硕士、博士学位。中国科学院力学研究所研究员。早期从事弹性力学、水弹性力学、振动及地震工程力学研究，其中影响较大的是输水管的振动。1960年开始爆炸力学研究，涉及爆炸加工、地下核爆炸、穿破甲、材料动态力学性质、爆炸处理水下软基、煤与瓦斯突出等问题，在爆炸力学的理论和应用方面做出贡献，并开辟了“工艺力学”的新方向。代表性成果有爆炸成形模型律、成形机理、惯性模、模具强度及成形工艺和流体弹性模型及其在地下核爆炸、破甲和爆炸复合等方面的应用。获1993年度陈嘉庚技术科学奖。

## 21 世纪的力学

郑哲敏

### 一、力学发展的趋势

#### 1. 20 世纪力学的巨大成就

本世纪初，边界层理论的提出，对力学的发展起了划时代的作用。从此，流体力学能够成功地解释流动对物体的阻力与升力，为航空、航天的发展奠定了科学基础，这个典型也影响与推动了其他力学分支的发展，使力学研究的内涵有了空前的充实、扩大与深化。早在 20 年代初便形成了活跃于整个 20 世纪内容广泛的应用力学，成为工程与应用科学的支柱，人们把空气动力学的研究，看做是本世纪以科学为基础将航空、航天建成的第一个例子，由此可见，应用力学在创立新产业方面所起的巨大作用。19 世纪发现的湍流是数理科学，特别是流体力学公认的难题，虽说，湍流理论还远不完善，但湍流理论的研究从未中断，而且不断出现高潮，重要的有湍流的统计理论，湍流的模式理论，湍流的拟序结构，大涡理论等。它们对阐明湍流机理的某些侧面起了十分重要的作用。湍流模式理论是周培源先生奠基的，有许多发展，至今仍是解决某些实际问题的主要手段（虽然并不普遍）。湍流（以及水波）的研究促成了非线性科学，而非线性科学又为湍流的研究带来了新的高潮。

固体力学同样有巨大的发展，这里只举一个断裂力学的例子，断裂力学能对受力状态下，含宏观裂纹固体的失效与否和使用寿命做出可靠的估计，这就从根本上改变了传统设计的概念与方法，其经济和社会效益是难以估计的，而且促成了对固体材料力学性质更为深入的研究（微观力学，损伤力学）。

曾经被认为是已经十分完美的哈密尔顿系统，有了出人意料而意义又十分重大的新发展，哈密尔顿力学现在被置于辛几何这个更为基础的框架内，苏联学派对哈密尔顿系统进行持续不断十分深入的研究，所提出的 KAM 定理（Kolmogoroff, Arnold, Moser）是非线性科学中的一个基本定理。60 年代以来，自从混沌现象被发现，人们发现确定性的问题可以导致几乎是随机性的结束，从而认识到甚至牛顿力学的内涵也远没有认识清楚。还应当指出流体力学的基础研究为非线性科学提供了丰满的理论与实验成果。

在这个世纪里力学还对数学和其他自然科学做出了重要的贡献，流体力学被应用于大气科学和海洋科学，使天气预报、海况预报发生了质的改变，从而使这一学科从过于纯经验性的变为以数值计算为基础的。力学推动了应用数学的发展，奇异摄动法就是一个突出的例子；力学对天文学的贡献也是大家所公认的（例如：星系螺旋臂的实质与自持性质）。

总之，在本世纪力学做为既是基础科学又是应用科学，对科学与技术的贡献是巨大的。

#### 2. 展望 21 世纪

在世纪之末，科学地展望一下 21 世纪的力学将会是怎样的，是有必要和有益的。这里我们着重根据现状和可能，对力学发展的总趋势做些预测。但必需指出，预测毕竟是预测，绝不能等同与现实。

我们的估计是以下述几个总趋势为基础的：

（1）人们的计算与实验和观测能力将得到极大的加强，学科面的交叉和综合的趋势也会更增强。

(2) 人类将更加关心信息、环境、健康, 这将对科学技术的发展起到引导与制约的作用, 而且国际化的势头将进一步加强, 大科学将更多采用国际合作的形式。对我国来说, 能源, 交通, 保证工农业生产持续发展, 提高劳动生产力, 提高产品质量, 增加品种, 解决农村大量剩余劳动力的就业问题, 将是突出的问题, 这些方面科学界应做出贡献, 否则科学在我国生长的土壤将是贫瘠的。

(3) 在世界上 50 年来颇有影响的 Vanevar Bush( Science TheEndless Frontier ) 的观点, 特别是他关于基础研究是知识源泉的观点将得到修正, 人们将会把有应用目的的所谓应用研究也纳入基础研究的范畴, 因为后者已被证明也是知识的源泉, 联合国所定义的基础研究 ( 或 Pure research ) 与应用研究 ( 包括工程科学 ) 间的界限将变得模糊。

(4) 人们终将认识到, 在我国正确的策略将是着力发展那些“省钱”但效益 ( 科学的, 社会的 ) 较好的学科, 而把“大科学”组织到国际合作项目中去 ( 关系到国家安全的除外 ), 以这些为前提, 我们认为力学学科是无疑应在我国的规划中有其独立的位置的, 附带说一句, 力学曾经是物理的一部分 ( 或者说在本世纪之前, 经验力学是物理学的主线和样板 ), 今天力学已经发展到这一步, 已远远超越物理学所能包括的学科了, 这在国际上已是公认的事实。

下个世纪力学将是怎样的呢?

(1) 与 20 世纪相比, 力学将进一步突破宏观的框架, 如果说在 20 世纪气体力学方面已经开始这样做了, 下个世纪, 在现有断裂力学、微观力学、损伤力学的基础上, 采用宏、细、微观相结合的方法, 在各种材料的强度理论上将有重要的新进展, 在实验手段方面也将有突破传统方法的创新, 所谓各种材料将包括金属材料, 高性能复合材料和陶瓷材料、纳米材料、地质材料等。在新理论的基础上, 传统的均质连续介质力学将得到根本性的改造, 使其不仅更精确地判断构件和结构在各种复杂受力环境下的变形与失效行为, 而且有望成为用于像设计房屋那样, 按照所需功能设计材料。

(2) 随着计算力学和计算机能力的提高, 将对湍流运动提供愈来愈详尽的描述, 为理解湍流提供了极好的机会, 问题是如何从浩瀚的数据中去提取有用的信息, 整理出普适性的规律, 以揭示湍流的根本机制。这将是下个世纪湍流理论工作者的任务, 既是机遇也是挑战。从最近的情况看, 对于均匀各向同性湍流而言, 这种目标似乎已经不很遥远了。

从层流到充分发展的湍流是个复杂的过程, 这个过程的理解在科学和应用至关重要, 包括这类流动的控制和利用将构成流体力学研究的重点内容。是一个长期的任务, 在 21 世纪会有重大的突破, 成为科学史上一件值得夸耀的事。

(3) 传统的力学主要是就某类具体问题通过实验, 解析和计算的手段, 深入理解其机制, 并在此基础上建立数学模型, 用它来准确预测在不同条件下, 这个力学系统的行为。下世纪, 这无疑仍将是力学的主要方式, 但可以预期这种方法的应用将得到远比 20 世纪更为广泛的应用, 力学学科也将在通过这些应用中得到新的提高与发展。如果说 21 世纪将是力学大延伸, 大推广的时代, 大概不会是过份的。这里举几个这样的例子。

a. 力学与地学的结合将在地学量化、精确化方面起比 20 世纪更大的作用, 这特别是指固体地球物理, 地球构造动力学, 各种类型的地质灾害以及

水资源，水循环，污染物的扩散，控制与治理。

b. 人们将看到 20 世纪中叶发展起来的生物力学首先在医学、人工体育训练，药物或生物制品生产方面发挥作用。

c. 一批传统的工业，过去主要依靠经验，或者经验的成份很高，以至成为一种艺术。因而成本高，质量差，费劳力，其出路是把生产逐步转移到近代科学的基础上来。例如，大型铸钢件成品率低，次品过多，是一种极大的浪费，如果充分利用现代力学的成就，这个问题是可以完全得到解决的，这类的工业很多，所以说下个世纪力学将为改造传统工业，使其立足于现代科学发挥重大的作用。

4. 可以预计，力学研究的模式（方式）也将有很大的开拓，由于计算能力和数学工具的限制，各种设计的优化问题和信息处理中的各种逆问题在我国并没有纳入力学研究的主流，绝大多数这样的问题都是非线性的。随着计算机能力不断提高，如果再把力学与控制论密切结合起来，此类问题一定会得到更好的解决，那时，力学学科的理论框架将更为完善，解决实际问题的能力也会有实质的提高。

## 二、关于力学的前沿课题

单纯从学科发展的需要与可能看，我们认为 21 世纪力学学科的前沿课题有：

1. 流动中的涡不稳定性，层流向湍流的转换过程和充分发展的湍流的研究

所研究的对象可以是气体、液体乃至非牛顿流体，但最根本的困难大都包括在经典的牛顿不可压缩流体中，在这个领域内最重要的是高性能巨型计算机和中、小型的具有三维流场测定和显示功能的实验设备，这两方面我们目前都大大落后于国外先进国家，但鉴于这个问题在学科上的重要性与应用上的普遍性，国家应当下决心在这方面投资。在这些条件未完全具备前，充分利用国内现有条件和国际合作条件，国内力学界应力争做出成绩，但国家的投资是必不可少的。

2. 各种材料（人工的和天然的）强度理论的研究

重点是研究材料在各种环境条件下（例如高温、高压、高应变率、腐蚀环境等），材料在受力过程中损伤的萌生、演化与失效，同时强调宏观与微观、微观研究相结合，传统实验的缺点是宏观试验与细微观的观察常常是分离的。今后应当发展新的实验与观测设备，在试验过程中能实时地进行必要的宏、细、微观的定量测量（力学的、热学的、结构的、化学的等）。同时这项研究还应当包括界面力学性质的研究，这方面同样需要发展新的实验与测量方法。

3. 一批重要力学过程（现象）的建模问题

在自然界与各项工程中，有一批尚有相当一部分未被认识或未被足够清晰认识的重要现象，我们还没有可靠的数学模型对之加以描述，这是力学界义不容辞的责任。这些力学现象有：a. 散体的流动 b. 多相介质（气液，固液）的流动 c. 兼有孔隙与裂隙介质中（可以不严密地称之为“分维介质”）的渗流现象 d. 气流（风）与液面（水面）的相互作用，表面波与传质过程 e. 表面形态与减阻的关系（海豚的表面是带沟槽的，鲨鱼表面是粗糙的，鸟类的表

现由羽毛构成，都有减阻效果，为什么？)

4. 复杂结构（也包括机械，机器人，矿山和大型水利枢纽）的静动力响应，振动与控制，寿命与失效和优化

主要是结合几个典型，做深入、全面的研究，提出新的，比较完整的系统理论。

#### 5. 制造过程中的力学问题

把一部分研究重点放到制造上来，以改进产品质量，增加品种，提高生产率，降低能耗，减少或完全避免污染，同时增加产品竞争能力，这已成为当前国际上科技改革的一个重要方面。力学在把传统工艺建立在科学分析与定量的基础上，改进化学与生物反应的流动状态，创造新的反应环境，处理污染物，以至提出新的工艺流程方面都可以起重要作用，因此有必要鼓励，引导力学工作者在这些方面做贡献。

以上所列的五个问题我们认为是在 21 世纪学科规划中应该单独体现的力学问题，当然力学与其他基础学科有许多交叉，如天文学星体中的湍流，星际空间的磁流体力学，陨石碰撞，数学中的应用数学，声学中的流体噪声，航空航天中的分离流的控制与利用，超声速燃烧，非平衡高速气体力学，微重力条件下的流体力学，能源问题中的海洋工程，大型水利工程，交通问题中的大型民航机，高速火车，高速信息网中力学信息的提供，加工等等，这些也都非常重要，我们认为应在相应的规划中体现，力学工作者积极参与，且国家在经费上给予保证。

另外，力学与军工的发展历史一直有十分密切的联合，后者往往是力学发展的推动力，这部分内容没有包含在上面提出的课题中。

力学中的前沿问题可以说都是非线性，它可以从非线性科学吸取许多有用的结果，但它所研究的多数非线性现象，正如在许多其他分支学科中一样，并不是非线性科学所能概括的，而且由于它有较强的本门学科的特性，所以常常超越了非线性科学研究中的共性问题。另一方面，力学界的一部分力量，特别是湍流、材料的损伤与破坏、水波、和一般力学方面的一部分，应当积极参与到非线性科学中去。

### 三、关于力学的再思考

#### 1. 关于力学的性质

在这个问题上应当说已经有了比较统一的意见，即它既是一门基础科学又是一门应用科学；它是一种科学，而不是技术，尽管它的发展与技术有密切的联系。

我们说它是基础科学，因为它有认识世界的根本任务，有它推动自身发展的内在动力，又能为数学与自然科学的其他分支提供重要的支持，组成科学的总体，我们说它是应用科学，因为它是工程技术和其他应用技术的基础，以工程技术为例，力学与它的关系是结合的问题，而不是代替的问题。

#### 2. 趋势与政策

(1) 力学的根本任务是通过实验与观察，分析和数值计算，为一个复杂的客观体系（许多乃至无穷多个粒子或物体的集合）建立数学模型，取得对这个体系力学行为的深刻理解，包括对它的行为做出可靠而精确的预测，作为应用科学，力学又要在这些认识的基础上，为应用技术提供概念、理论、

方法、手段，一方面推动技术的发展（包括新技术的建立），一方面从应用中取得新的认识，进一步发展力学的基础理论。曾经有个时期，认为有了牛顿力学，在一般宏观尺度范围内，最基本的规律已经有了，剩下的是计算的问题了。这种认识由于简单非线性力学系统中混沌运动的发现，而被证明是过于乐观了。实际上，迄今为止，人们对非线性力学运动规律的认识还只能说处于很初始的阶段，而且仅有的一些认识也大多来自几个典型力学系统。所以说，混沌现象的发现，为力学研究提出了历史性的新任务。

自然现象和应用技术中的实际力学大都是非线性的，过去力学发展了各种线性化与摄动技术，解决了一大批问题。但在非线性效应强烈的条件下，这些方法大多失效。因此，一系列重大技术问题没有得到解决，着力解决这类问题，同时，发现普适性大的非线性规律与提供有效的计算与分析手段，将是下一阶段力学学科发展的一个主要趋势。

### （2）较之 20 世纪，21 世纪的应用力学将有更大的发展与普及

出于节约能源和其他资源，保护生态环境，提高人类生活质量，保证经济持续发展的需要，必须不断开发新技术和改造传统技术，使其以科学为基础，这将是促进力学，特别是应用力学发展的巨大的动力。

回忆一下 20 世纪应用力学发展的历史是有好处的。我们知道，在把航空和航天工业建立在科学基础上的过程中，空气动力学的研究发挥了关键性的作用，当飞机的速度还在每小时 200 公里左右的时候（20~30 年代），空气动力学家已经在研究可压缩性对飞行的影响，超声速飞行，声障与热障的研究，远早于实际超声速飞行的实现（50 年代），此例表明：a. 基础性研究能对发展新产业产生巨大作用；b. 要对新产业起这样的作用，超前研究是十分必要，这需要有远见的财政支持与研究人员的创业精神；c. 应用研究推动了力学研究的发展，由于出现研究高温气体性质的需要，力学家的研究领域超出了经典力学的范围，需要应用与发展微观理论，形成宏、微观相结合的势头。

在 21 世纪，应用力学的这些优良传统无疑应当得到继承与发展、社会对发展新技术和改造传统工业的要求将是持续的，长期的，应用力学家的任务是发现有价值的研究课题，这需要应用力学家一方面具有对应用技术需求与发展趋势的深刻了解；同时要有对应用研究的热忱。

在力学领域内，保持基础研究和应用基础研究在大约 1.5 : 8.5 或 2 : 8 将是合适的，同时应该注意到，至少在力学范围内，基础与应用基础研究的区别常常是困难的，它们之间往往更多的是定向与非定向研究的区别，在很大程度上取决于研究者的目的，而不在于研究内容的实质。

（3）21 世纪力学与其他学科的交叉与融合将更为深刻与广泛，这里，其他学科不只是数学，物理，化学，天文，生物，地学，也包括工程技术与其他应用科学技术领域，如医学与农业，这种交叉和融合不仅表现在研究对象上，也表现在方法与手段的相互借鉴和人员的交流，这种趋势首先要求我们在力学教育上做相应的调整，一个力学科研工作者自然需要有传统力学方面的坚实基础，但这还不够，还需具备某些其他领域的专门知识，而且要不害怕走出传统领域的圈子，进入新的领域，这常常不是件容易的事，但是如果在本科或研究生教育中注入这种思想，而且在组织领导部门的有力支持下，是应该能够办到的。这件事情做好了，就可能出现力学的一个新的繁荣时期，但是我们应该注意一种倾向，那就是表面上与其他学科交叉，实际却

没有真正做到。这种情况无疑是应当避免的。

(4) 力学既然有基础的一面又有很强的应用性，与多种学科和应用及工程技术又有广泛的交叉和联系，可做的事自然很多，作法也有千差万别，那么，应当有什么政策呢？

首先，应该允许不同途径，不同风格，不同学派并存。例如，力学问题可以从物理，应用数学，工程的角度加以研究。这些无疑都应受到鼓励。

要认识到，重点的选择总免不了有主观的成份，而且受多种非科学因素的干扰，这是不可避免的，但毕竟又需要有重点，在这种情况下，重点项目或课题的比重不能过大，而且以偏小一点为宜，对面上项目的支持则应当加强，要通过学术活动的方式，让学术界和应用的一方来评价成果与人才，从而形成新的重点，发现新的人才，把行政干预减小到最低限度。

科学规划与计划应当是滚动的。为了开辟资金来源，在支持应用研究方面，基金委与三峡工程总公司合作，建立基金的方式是很好的，建议在基金委与科委扩大这种集资方式，并采用基金委已经行之有效的评审办法（虽然仍需改进），使力学工作者能更多地参与重大国民经济建设有关项目的研究。

(5) 50年代以来，在我国建立的几个交叉学科都是有相同特色的，它们应当得到适当的支持，这些分支学科包括物理力学，化学流体力学，爆炸力学，等离子体动力学，岩石力学等。

应当加强现场工作，特别应结合重大工程，发展现代化的现场观测与测量仪器。

## 赵其国



1930年2月生，湖北武汉人。土壤地理学家。1953年华中农学院毕业，中国科学院南京土壤研究所所长，研究员。在热带土壤发生研究中，首次明确提出中国红壤具有古风化过程及现代红壤化过程两种对立统一的特征。指出运用红壤渗透水组成、游离铁等作为红壤化过程指标的重要性，对红壤的发生研究与定量分类提出了新的途径。总结了以橡胶为主的热带作物开发利用与红壤分布及土壤性质的相互关系，首次提出以热量条件、土壤性质为标准的热带作物利用等级的评价方案，为制定热带作物发展规划与布局提供了可靠的科学依据。通过系统总结提出土壤分区整治、退化土壤改良以及土壤生态与环境评价的多种规划与开发方案。

# 跨世纪的土壤科学

赵其国

土壤是人类生存的重要自然资源，随着自然科学的发展，土壤学的研究不断有新的推进。特别是当前世界进入以经济、科技为主体的竞争年代，人类面临人口—资源—环境间的尖锐矛盾，使土壤学面临着十分严峻的挑战。

## 一、土壤学的发展趋向

随着社会的不断发展，人类活动对全球生态环境的冲击强度和规模也在不断扩大，使整个世界自本世纪中叶以来一直受资源—环境—人口—粮食（REPF）等一系列重大问题的困扰。土壤作为人类赖以生存的重要自然资源，由于持续的集约利用，亦正在逐渐或迅速地发生变化，这种变化不仅对土地承载力产生重要作用，而且对全球气候状况也产生直接或间接的影响。因此，当今土壤学已由原来仅研究土壤本身向土壤圈及其与各圈层之间的关系的方向扩展。

土壤圈概念自 1938 年由 S.Matson 提出后，近 10 年来获得了极大的发展，特别是 1990 年，Arnold 对土壤圈的定义、结构、功能及其在地球系统中的地位做了全面地阐述和发展，为土壤科学参与解决全球环境问题奠定了基础。

土壤圈是地球上气圈、水圈、生物圈及岩石圈交界面上的一个圈层，它处于四个圈层的中心，既是地球各圈层间物质循环与能量交换的枢纽，又是地球各圈层间相互作用的产物，因此，它是最活跃最富生命力的圈层。土壤圈内的各种土壤类型、特征与性质是过去和现在自然环境和人类活动作用的信息记忆块，也是各圈层物质与能量相互交换的反映。

土壤圈概念的发展旨在从圈层的角度出发来研究全球土壤的结构、成因和演化规律，以达到了解土壤圈的内在功能、在地球系统中的地位及其对人类与环境的影响。从而使土壤科学能真正介入地球系统科学，参与全球变化和生态、环境建设研究，以解决人类所面临的重大资源、环境问题。

因此，跨世纪土壤学发展的总趋向是以探索土壤圈的内在功能及在地球系统中的地位为前提，深入研究土壤圈的物质循环（包括物质的形态与转化）与土壤全球变化及其对人类生存与环境的影响。这一趋向表明未来土壤学的研究首先必须从土壤圈与地球系统中各圈层之间关系这一宏观角度出发，研究（1）土壤—生物系统中的养分元素的循环与平衡；（2）土壤水量平衡与区域及全球水循环的关系；（3）土壤—大气之间的大量气体及痕量气体的交换；（4）土壤与岩石之间的元素迁移与转化，其中研究土壤系统内部及其边界产生的各种过程与发生机理，是土壤学的核心。其次是在上述研究的基础上研究（1）全球土被时空分异和演化；（2）物质循环与地球生命的关系；（3）土壤圈的演变与人类活动和生存环境的内在联系；（4）土壤圈对生态环境以及全球变化的作用。

## 二、土壤学研究的内容

根据土壤学发展的总趋向，跨世纪土壤学的研究内容主要围绕一个核心

和由此派生的两个方面进行，即以研究土壤圈物质循环与土壤全球变化为核心，在此取得逐步进展和突破的基础上向（1）土壤肥力提高与农业持续发展以及（2）土壤资源保护与生态、环境建设两个方面扩展（见图），为人类社会的持续发展做出应有的贡献。

#### 1、土壤圈物质循环与土壤全球变化

过去的土壤学研究主要侧重于土壤本身（固、气、液相）的组成与性质及其各种成土因素之间的关系方面，尽管这些研究曾有过突破和对人类生存作出过划时代的贡献，如李比希的土壤矿质营养学说，推动整个化肥工业的发展和提高了粮食生产，但当代土壤学所面临的难题是已经把土壤学研究前沿推到了物质循环研究阶段。即在引入圈层概念的条件下，通过连结一系列土壤物质的形态转化，迁移过程来研究物质的循环规律，并通过探索过程发生的机理建立模拟循环系统，以达到预测和调控的目的。研究土壤全球变化又从宏观的角度上研究地表物质分配过程和进入地质大循环的规律，以探索土壤圈的演化机制及其与大气圈、水圈、生物圈、岩石圈以及人类活动的关系。因此，土壤学的研究在向更微观发展的同时，进一步向系统、综合和宏观方向发展。

为了使土壤圈物质循环与土壤全球变化研究向纵深发展，根据对国际土壤学前沿研究领域分析，并结合我国实际，下列关键领域应作为土壤学基础部分优先开拓的领域：

##### （1）土壤圈 C、N、S、P 的循环

内容包括：土壤圈 C、N、S、P 的平衡、转化过程、转化速度及其影响因素；N 素硝化、反硝化机理； $\text{NO}^{-3}$  和  $\text{NO}^{-2}$  的迁移规律；温室气体  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2\text{O}$ 、 $\text{NO}$  的生成机理、反射通量及其影响因素；含 S 气体的生存、转化及其排放机理；残余 P 的有效利用及径流迁移规律。

##### （2）土壤生物工程

通过生物工程改造植物的营养特性，使其去适应土壤条件，建立新的养分循环系统。具体内容包括：植物营养的遗传特性；养分吸收的分子机制，植物营养性状的遗传学改良。

##### （3）土壤水量平衡与溶质迁移

土壤水作为植物生长的源泉，连结地下水的纽带，物质循环的介质是自然界最活跃的一部分水资源。研究土壤水分运动规律，建立水量平衡系统，将是调控植物生长、防止地下水污染，掌握物质循环的途径的重要基础。具体内容包括：多维条件下的水分和溶质迁移规律；区域性土壤水文过程和大尺度土壤水量平衡模型的建立；建模技术。

##### （4）土壤胶体的界面化学行为

土壤中的生命活动以及各种反应和化学过程都在土壤胶粒与胶粒、胶粒与溶液的界面上进行，土壤界面的化学行为决定着植物的养分供应，污染物质的转化以及进入物质循环系统的数量和速率。因此，土壤胶体的界面化学行为已成为土壤学中跨世纪的重大基础理论问题。具体内容包括：土壤胶体表面结构、特性和电荷特点，特别是可变电荷的发生特点；土壤中物质在不同界面上发生的化学反应过程及其转化和迁移的机理。

##### （5）地表物质再分配过程与土壤发生演化

地表物质的再分配过程，是形成并将继续改变土壤圈及其相关圈层现状的最基本原因和动力之一。具体研究内容包括：自然及人为影响条件下地表

物质剥蚀速率及其动力学；人类活动影响下地表形态与土被结构的变化；人类活动影响下土壤生物地球化学循环的方向、变化速率及其后果；人为作用下土壤发生演化的规律；地表物质再分配过程的环境效应。

## 2、土壤肥力与农业持续发展

为改善人类生存条件，未来农业的发展以持续农业为战略体系。发展持续农业的目的是获得高额的农业产量，保持清洁的环境和生物多样性，其内涵主要是在保持和提高代传土地质量，增强抗风险的缓冲能力，使土地能永续利用的基础上，提高农业生产力和经济价值，其实质是土壤肥力的永续维持。因此，维持和增进土壤肥力以达到稳定、均衡和协调供应养分，是发展持续农业的关键。土壤肥力作为土壤学为人类生存作出贡献的优先发展领域，着重要加强下列关键问题的研究：

### (1) 不同生态系统中土壤肥力演变规律

土壤肥力的演变与环境条件影响有关，但更与人为作用有关，研究不同生态条件下的土壤肥力演变规律，特别是稻田生态系统、旱农生态系统、雨养农业系统以及集约化条件下土壤肥力发展趋势对土壤肥力的定向培育极为重要，具体内容包括：不同生态系统条件下土壤肥力的长期观测（包括土壤物理化学性质、养分含量、形态及转化及其对作物生长的影响）；不同培育措施对土壤肥力演变的影响；土壤肥力演变的预测与建模。

### (2) 高度集约化条件下施肥制度的建立

在高度集约化条件下，有机—无机肥的配合体系是培肥土壤、建立“高产、优质、高效”农业的基础。具体内容包括：不同农业生态系统中养分再循环的特点和作用，以及提高再循环效率的措施；化肥养分在土壤中的转化和去向及其对增产效果和环境质量的影响。

### (3) 区域土壤养分消长规律及肥料需求

预测肥料的需求决定于土壤养分的消失、作物的需肥规律、产量目标和环境效益等因素，其中了解土壤供养状况最为关键，因此研究土壤养分状况和区域土壤养分消长规律，对中国肥料施用需求预测和新肥料的开发具有指导作用。具体内容包括：我国土壤养分消长规律及区划；我国肥料的需求预测及依据。

## 3、土壤资源与生态、环境建设

社会的发展增加了对资源消耗的强度，有限的资源要求人们从保护的角度出发进行有效作用。我国土壤资源相对缺乏，合理开发已迫在眉睫，这就要求我们在原有的清查、规划和利用的基础上，通过加强生态、环境建设来保护土壤资源，促进土壤资源增值。因此，在开发原则上必须以生态学原则为指导，以环境建设为目标；在开发方式上变资源消耗型为资源节约型，变经营粗放型为经营集约型，同时协调广度开发（荒山、荒地、荒滩的利用）、精度开发（低产田、低产园、低产林的改造）以及深度开发（延长资源开发序列、开拓资源多层次加工增值、建立复合生态系统）之间的关系，使土壤资源的消耗与再生速率平衡，以保证我国土壤资源能适应社会的发展。为此，土壤资源合理开发作为生态、环境建设的保证应给予优先发展。其中下列几个方面必须有重大发展：

### (1) 土壤资源动态变化（数量、质量）监控预测系统

当前，土壤资源无论在数量上还是在质量上都发生了很大变化，各类土壤退化非常突出，严重影响土壤生产力的发挥。加强土壤资源监控预测系统

的研究,对提高土壤生产力、控制土壤退化、恢复退化土壤的生态系统,估计土壤资源在全球变化中的作用,改善我国土壤资源开发利用指挥和管理能力都极为重要,其研究的具体内容包括:土壤—土地数字化数据库(SOTER)的建立;全球土壤退化评价系统(GLASOD)的建立;中国土壤信息系统的建设;土壤资源的遥控监测系统的建设。

#### (2) 土壤资源的承载能力

土壤资源承载能力的研究是保护和有效开发土壤资源的前提。其中区域发展条件的综合评价,区域各种结构功能的系统分析,土壤资源利用与生态环境的平衡保持应作为主要内容。

#### (3) 土壤生态、环境系统演化与建设途径

土壤生态系统始终处于不断变化之中,因而,其结构、功能及生产力也发生一系列改变。人类活动的加剧、掠夺式经营及粗放管理导致土壤严重退化。研究土壤生态、环境系统演替规律对生态、环境建设途径的选择提供依据。具体内容包括:退化土壤生态系统的发生机理与恢复重建的途径;良性循环生态系统培育的基础;复合生态系统建设技术;固体废弃物的土地处理和清洁土壤的保持技术。

#### (4) 区域生态、环境建设与示范工程

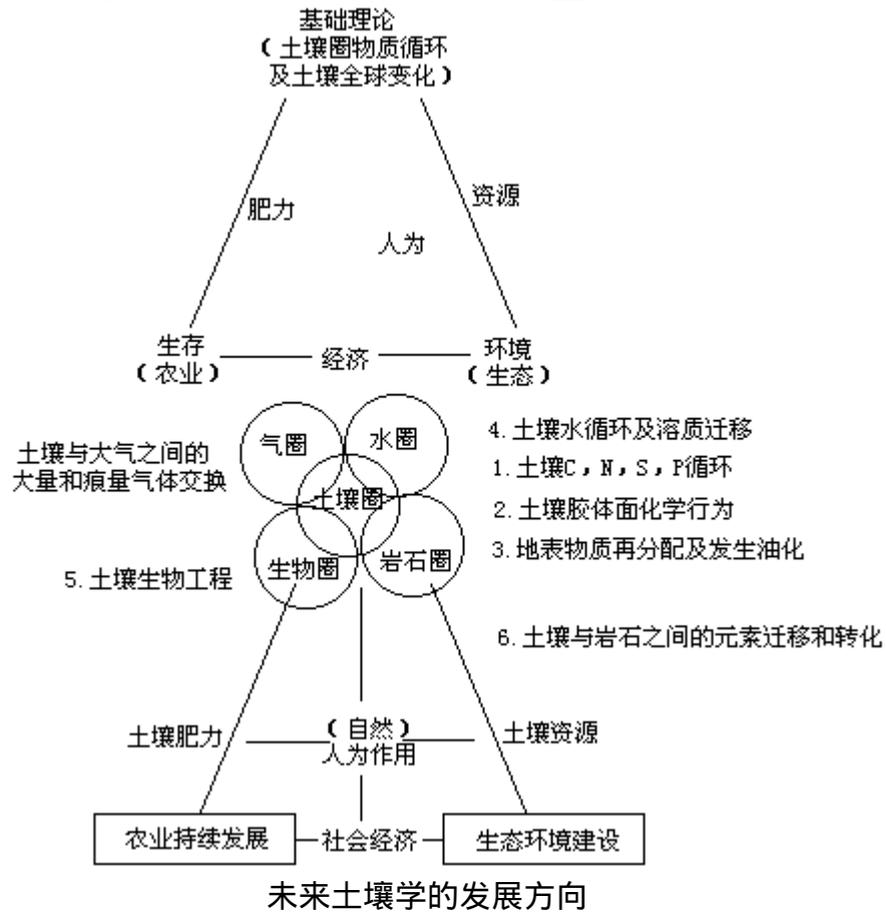
以农业持续发展为主题的区域开发应与生态、环境建设保持协调发展,特别是在生态脆弱带。因此,首先必须对区域开发的发展战略进行研究。其次,根据各区域的特点,有重点地进行治理,对于黄土高原以水土保持为中心,加强植树造林、提高土壤肥力的研究;对于黄淮海平原应以综合治理为主题、加强节水、培肥、治盐碱的研究;对南方丘陵应在防治水土流失的基础上,加强立体农业的研究;对长江三峡地区,在提高移民环境容量的同时,重点应放在生态环境恢复、重建和保持上。第三,应在各区域建立示范工程。

### 三、未来土壤学发展的措施和展望

我国土壤学研究自1930年起步以来已有半个多世纪。我国土壤科技工作者围绕土壤资源开发利用、农业持续发展、生态环境建设及土壤学科发展做了大量工作,并在国民经济建设中作出了重要贡献。与国际土壤学发展相比,我国土壤学的某些分支,如人为土发生分类及土壤系统分类、表面化学、植物营养(N、P、K等)、土壤水分、肥料试验、水稻土、盐渍土、干旱土、红壤的发生与生态农业研究均取得领先地位,同时近年来在环境保护、持续农业、遥感信息、全球变化( $\text{CH}_4$ 、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{N}_2\text{O}$ )、土壤生物技术及新技术应用等方面均有明显推进,其中,不少工作正在与全球发展与21世纪议程联网。但由于资金紧缺,人才不足,手段落后,系统研究少,基础研究薄弱,因此,总体说来,我国土壤学的研究水平与国际相比仍存在一定差距。针对这种情况,今后我国土壤学发展必须重视人才培养,改革科研体制,增加经费投入,加速设备更新,开展综合研究与国际合作,使我国土壤学立足全国,面向国际,不断向前推进。

如果说,一个世纪以前李比希的矿质营养学说,盖德罗依茨的土壤吸附理论及道库恰也夫的土壤发生学说创建了近代土壤科学,那么,可以预见,在跨入21世纪新的纪元后,随着自然科学和土壤学分支的不断发展,通过对土壤圈的研究,未来土壤学理论必将有长足的发展,并将对人类生存与自然

环境的改善作出重大贡献。



## 侯祥麟



1912年4月生于广东汕头。1935年毕业于燕京大学化学系，后在中央研究院化学所工作。1948年获美国卡乃基理工学院化学工程博士学位，应聘麻省理工学院任副研究员。1950年回国后历任清华大学教授，石油科学研究院副院长、院长，石油工业部副部长、科技委员会主任；曾任中科院首届主席团成员，中国石油学会理事长，是全国政协五、六、七届常委、七届科技委员会副主任。曾全面负责石油科研计划的管理、机构队伍的建设；参与历次国家和部门科技发展规划的制订、协调和实施；组织领导、研究开发了若干重大炼油新技术；领导研制出国防急需的多种产品。主编《中国炼油技术》等专著。现任中国石化总公司高级顾问，中国石油天然气总公司科技委副主任，中国石油学会名誉理事长，中国科学院和中国工程院院士。

## 略谈 21 世纪石油加工科技若干发展方向

侯祥麟

我国石油加工工业(包括炼油与石油化工)经过建国以来 40 多年的艰苦奋斗,特别是 60 年代初大庆油田的发现和开发,原油产量迅速增长的推动,已进入现代化工业的行列。1992 年加工原油 1.2 亿吨,生产内燃机燃料(汽油、煤油、柴油)和润滑油共 6500 万吨,合成材料(树脂、纤维单体、橡胶)近 500 万吨。炼油产品迄今在品种、质量和数量上都能满足国内的需要。石化产品虽未能适应国内市场,也在努力追赶,力求达到自足。

在石油加工工业发展的过程中,一方面依靠了石油加工科技的发展,另一方面也促进了我国石油加工科技的发展。虽然这些年来石化行业引进的国外技术较多,炼油引进较少,但在建设过程中,都有赖于国内科技成果和科技人员。“依靠”促进了“面向”,加速了科技发展步伐。

### 一、石油加工科学技术现状

1. 石油加工工业最初仅是炼油,采用蒸馏办法把原油分割成轻、重部分,目的产物是灯用煤油。随着发动机的发展,逐渐要求生产汽油、柴油、润滑油、喷气燃料等。为此需要将原油的重质部分转化为轻馏分。起初采用热加工的手段,主要有热裂化和焦化。后来逐渐发展催化加工技术,用催化裂化和加氢裂化取代热裂化,获得收率较高和质量较好的汽油等馏分。为了把一些裂化气体转化为液态烃,发展了叠合和烷基化技术,以获得优质汽油组分。为了提高产品质量,发展了加氢精制技术;为了增产芳烃和异构烃,发展了催化重整和异构化技术。这些炼油技术的发展,大大推动了有关的催化过程和催化剂领域科学技术的发展。

催化剂划时代革新是美国飞马公司 60 年代发展的沸石催化材料。由于其晶形结构可以实现晶内催化和择形催化,导致一系列新催化剂和催化过程的产生。如在流化催化裂化,由于开发了有很高裂化活性的稀土沸石催化剂,为了减少二次反应,发展了提升管反应器,以缩短反应时间,并减少了反混。稀土沸石催化剂提升管催化裂化同以前的硅铝催化剂床层反应相比,汽油收率可从 30%左右提高到 50%以上。

新中国成立后,为了满足国民经济对石油产品的需求,需要建设若干座现代化炼油厂。50 年代苏联曾在兰州援建一座年加工原油 100 万吨的炼油厂。进入 60 年代,在外国对我国进行技术封锁的情况下,我国科研人员依靠自己力量,借鉴外国技术,研究开发了若干项急需的、先进的炼油技术,并配合设计、机械制造、建设安装和生产等单位,建设起若干座年加工能力超过 250~500 万吨、技术先进的炼油厂。

随着经验的积累,科研人员逐渐在借鉴外国技术的基础上进行革新。在催化剂方面有更为显著的成就。如在催化裂化方面,不断跟踪国际的发展,60 年代就开始研制稀土沸石催化剂,并不断创新完善。在国外催化剂迅速更新换代并大力向我国推销的今天,国产催化剂仍普遍被炼油厂所采用。又如加氢精制催化剂,针对我国原油含氮量高的特点,研究人员从反应动力学及催化剂活性组份作用等方面深入研究,发展出高脱氮性能的催化剂,很快被国内炼油厂所采用,并有出口。

2. 世界石化工业的崛起始于四五十年代，经过 20 多年形成支柱产业。石化工业的发展主要依靠蒸汽裂解制乙烯和高分子合成技术。

石油烃裂解成烯烃的反应动力学相对较易阐明，当今蒸汽裂解制乙烯技术已接近完善，虽不断有所改进，但提高余地不多。烯烃聚合则变数很多，高分子化学、高分子物理和高分子合成的研究仍在不断深入，崭新产品不断出现。

我国石化工业在 50 年代曾开发萘制苯酐技术，60 年代开发丙烯氨氧化制丙烯腈和丁烯氧化脱氢制丁二烯并合成顺丁橡胶技术，目前主要技术则都依靠进口。但在催化剂的国产化方面已有较大进展，如乙烯脱炔烃、丙烯聚合、甲苯歧化，以及异构化、丙烯腈等多种催化剂已可与国外媲美。

炼油与化工的结合是当今的一种趋势，目的是为了求得石油产品与石化产品的最优生产过程。在这方面我国有了良好的开端。近年来炼油研究单位为了解决丙烯、异丁烯的不足，开发了催化裂解制丙烯技术和多产烯烃或异构烯烃的裂化技术，受到国内炼油厂的重视和采用，也吸引国外石油公司争相寻求代理供销。这些技术在工艺上和催化剂上的进一步完善和提高，将为我国石化新工艺的发展开辟一条道路。

## 二、21 世纪的展望

预期到 21 世纪，石油加工工业仍将是国民经济的支柱产业。尽管运输工具要采用代替燃料或能源的呼声很高，在下世纪内能实现多少还难以预料。氢能、太阳能在实用上所受限制太多，推广很难。电动车虽然被认为即将问世，但要解决有实用意义的蓄电池还需较长的时间。况且用煤发电所造成的污染有人认为超过内燃机排放的污染，也需要进行深入的研究。因此，21 世纪运输工具的主要燃料最可能仍是汽油、柴油和喷气燃料。炼油工业仍将不断前进。

对石化产品需求的增加预期也将跨入下一世纪。当今全世界各种材料的发展速度中，高分子材料领先于金属材料和其它非金属材料。用合成材料代替黑色和有色金属，代替木材和其他天然材料的趋势随着人口的增长只会加速不会倒退。石化工业仍将是朝阳工业。

进入 21 世纪，石油加工科学技术的首要任务仍然是为了生产质优价廉的产品而研究开发新技术、新产品。同时还有两个重要技术问题必须研究解决：一是环保技术，二是超重原油或渣油的加工技术。

保护人类赖以生存的生态环境是全世界的呼声。一些国家对石油加工工业环保要求越来越高，为了达到这些要求所采取的措施耗资会很大。杜邦财团的副董事长在 1994 年第 14 届世界石油大会发言时说：1992 年美国石油工业在环保问题上花费了 105 亿美元，相当于该年处于前列的 300 家大石油公司利润的总和。因此，研究开发高效低投入的新环保技术仍将是 21 世纪的首要任务。

世界常规原油的储量据预测到下世纪中叶仍能满足全世界的需要，接替的将是超重原油（相当于沥青）。我国和委内瑞拉等国已开始开采重质和超重质原油。加工这类原油需要对现用的工艺流程、加工技术等进行必要的变革，以优化加工过程。石油加工科技在这方面应有大的作为。

1. 一个不排放有污染的废水、废气、废物，不造成噪声的石油加工厂将

是 21 世纪的目标。为此应在现有环保技术的基础上，进一步研究开发无泄漏、不排放的工艺流程和设备。对污水和废气的处理可考虑研究开发高效吸附剂或离子交换树脂，回收低浓度的排放物质。噪音的处理，一是要求机械制造工业发展低噪音的机械；二是从设备安装上寻找噪音源并寻求解决办法；三是邀请声学专家共同研究如何防止噪音的传播。

炼油工业另一个重要的环保任务，是提高发动机燃料的质量，以求减少排气中氮、硫的氧化物和一氧化碳、烃类以及铅的含量。根据国外环保要求，汽油和柴油的氢含量应高，芳烃和外烃含量应低，还不能加铅。这就需要炼油科研工作者对现有催化裂化、重整、加氢等技术沿着少产芳烃、多产异构烷烃这个方向加以提高，同时探索发展新的加工工艺和催化剂，比如高异构化性能的减压馏分加氢裂化催化剂。

提高汽油质量难度较大。由于限制了汽油中芳烃和烯烃含量，为了满足辛烷值要求，需要增加异构烷烃和含氧化合物含量。含氧化合物中，甲醇、乙醇来源多但使用不便；好用的如甲基叔丁基醚、甲基叔戊基醚等则限于异构烃的来源，难以满足今后的需求。探索研究其他原料有来源而且便于使用的含氧化合物是重要的方向。近年已有从丙烯生产二异丙醚方法的出现。我们也应寻找新的途径，比如甲醇或乙醇的新改性方法。关于增加异构烷烃的途径，有人建议研究直馏汽油环烷开环，链烃加氢异构化过程以代替重整过程，值得考虑。

有关内燃机排气污染问题，不少人认为解决的办法从改进发动机设计入手比从改进燃料入手更为有效。促进发动机设计部门与燃料研究部门共同研究解决这个问题是重要举措。

2. 重油和渣油加工技术的提高是石油加工科技的另一长期任务。自从 70 年代后期发生所谓“石油危机”之后，各国都采取措施，减少发电站烧油，加强重油轻质化以提高轻质油收率，这个趋势至今未衰。进入 21 世纪，除炼油厂的渣油外，还将有不断增长的重质或超重质原油需要加工，都要通过裂化来生产轻质油品。

重油和渣油裂化生产轻质油，为使产物有必须的氢碳化，基本途径是脱碳或加氢。目前为实现这两种途径的工艺技术，在过程中都会产生相当数量的甲烷等耗氢产物。应通过分析重油、渣油的组成，利用烷烃、环烷烃、芳烃的组合结构，探索降低耗氢量的加工过程。比如开发加强氢转化作用的催化剂，利用胺氢作用供应裂化所需的氢，同时生产单环芳烃等。

重油裂化产生的液体馏分中有大量的单环重芳烃和萘系芳烃，应进行深入的组成分析，据以探索有效的分离、利用途径。芳烃是石油化工的重要原料，开辟芳烃的新来源是重要的科研任务。

今后加氢过程会增加，氢的供应是个重要的问题。目前炼油厂大都无天然气供应，从油或煤制氢成本都很高，研究发展廉价制氢的新技术是重要方向。催化裂化后再生的催化剂积炭的活性很高，倘有抗蒸汽性能很强的催化剂，在再生器中产生水煤气应有可能。开发从炼油厂废气中提取氢的经济有效新方法也值得探索。

3. 产品在品种和质量上的研制开发和提高是石油加工工业能否生存和发展的关键性问题。石油产品中，液体燃料和固体产品，经过积极努力，在国际市场上占有一席之地是有可能的。但润滑油则不然。由于国外产品更新换代较快，我们虽拥有优质基础油的优势，产品仍落后不止一代，以致在国内

市场竞争也很艰难。要迎头赶上，必须在科研和生产的组织管理上，在研究路线加添加剂配方的选择上和评定手段上研究制定较大的改革措施。

聚烯烃是合成树脂的主要部分，在石化产品中也占有很大的份额，其生产水平、市场竞争能力，对石化工业的发展有重大影响。为了同国外竞争，我们必须大力提高聚烯烃质量，发展高性能化和功能化新产品。我国高分子科研队伍有一定的力量，把高分子化学、高分子物理和高分子合成的力量组织起来，选择一些重点课题进行配套攻关，应能取得可同国外竞争的成果。塑料管代替钢管，在能耗和成本上都可有很大的节约。但塑料管耐冲击力低，用户有顾虑。设想研制出抗冲击性能接近金属的品种，推广就会转为顺利。我国农膜年用量达几十万吨，急需改用可降解产品。目前国外开发的掺淀粉品种，质量不好，我们应探索研制更好的品种。高吸水性树脂在印度试用于农田，抗旱节水作用很好，但成本太高。寻找大幅度降低生产成本的新方法、新品种，对农业会有很大的贡献，诸如此类课题都可加以考虑。

功能高分子材料是高技术发展的基础之一，必须重视。但研究方向应着重在我国高技术发展近期有需要的，才较易奏效。那种单纯跟踪国外的发展，取得成果后再研究开发产品用途的作法是不足取的。

4. 催化过程和催化剂是石油加工工业的核心技术。由于催化剂的开发不一定要有新的催化工艺和生产设备，科研成果较易在工业生产上应用，在我国有较大发展。我们要发挥这个优势。

在催化剂的基础研究上，近年来国际上有较大的进展。由于有多种新的检测手段的产生和应用，对催化剂活性中心的认识，已可深入到原子水平进行探讨。对活性中心结构的认识和表征，加上对反应中间物的原位鉴别技术，研究提出催化过程模型，将会逐渐把催化剂的研制建立在理论指导的基础上。我们要抓住时机，投入力量，建立起我们的系统理论。

建立理论应以实践为基础，应与我们已有较多资料积累的反应过程和催化剂相结合，以实践验证理论，然后以理论指导实践。可选择重要而比较简单的如加氢精制，重要而复杂的如裂化过程，从个别入手以求得一般规律。

发展新催化剂的一个现实途径是寻找新的催化材料。新型沸石、层柱粘土、固体超强酸等等材料都是研究热门。在沸石领域中进行创新还富有余地，如有人提出将过渡金属离子引入沸石骨架中，以做成双功能催化剂。为了求得较大的创新，还须探索沸石以外的催化材料。国内有人曾采用碳纤维为载体，取得高活性的结果；加拿大近年开发的渣油加氧裂化，采用极细的催化剂微粒达到高转化率，都是通过加大比表面以提高活性。

近年来出现了许多新的有机金属络合物，均相催化剂又受到重视。据统计，70年代以来，在大宗有机化工原料的生产中共开发了19个新的催化工艺，其中有13个是均相催化工艺。这些工艺中，甲醇羰基合成制醋酸的产品纯度高达99%以上，显示均相催化剂的优越性。我们对均相催化应跟踪其发展并进行探索研究。在制订课题时，还必须安排研究解决反应产物与催化剂的分离问题。国外近年开发的水溶性均相络合催化剂和负载型络合催化剂启发我们考虑分离途径的新构思。

发展新催化过程的一个重要趋势是采用廉价的代用原料。国外在进行探索和可能进行的方向除用甲醇代替乙烯、丙烯为原料外，大多围绕着用烷烃作为原料，通过氧化、脱氢等途径来获得目的产物。如用丙烷代替丙烯进行氢氧化制丙烯腈据报导已在1993年工业化。有关甲烷氧化耦联各种工艺研究

更是当前的大热门。在原料代替这个领域可进行的研究工作很多，从我国石化工业今后需要来看，甲烷、甲苯制乙苯和甲醇氧化耦联制乙二醇都有很大意义。实现烷烃的直接反应需在反应动力学和化工热力学方面作深入的研究，其成果还可为开拓其他反应过程打基础。

5. 催化反应和分离技术相结合是催化化学和化学工程学者共同感兴趣的新过程。这个新概念的实现始于开发催化蒸馏过程用的生产甲基叔丁基醚。这个过程把催化反应与产品蒸馏分离安排在一个塔中同时进行，简化了加工流程并推动化学反应平衡向有利于主反应方向前进，从而提高收率，减少副产物的产生，因之迅速在工业上应用推广。这一过程的成功，推动了把催化蒸馏应用于烃化、醇化、加氢等过程的研究开发。只要反应条件和分离条件比较接近的过程，应用催化蒸馏就有可能。

反应和分离结合这个概念还推动了反应萃取、反应吸附、反应结晶等过程的研究开发，特别是膜反应更受重视。国外有个科学家预言，催化膜和膜反应器将构成新颖化学工艺技术的新时代。但膜反应器有个弱点是通量太小。在反应温度较低时，可采用高分子中空纤维膜，以加大通量。用于石油加工的加氢、脱氢、氧化等反应温度较高的过程，需用金属膜或陶瓷膜，通量都很小。然而通量大了，催化活性问题又会突出出来。如何解决好膜反应技术的分离效率、催化活性和通量问题，是科研的首要任务。

从反应和分离结合这个概念引起的还有多个反应过程的结合、多个分离过程的结合等等。适宜的组合都有可能提高效率，值得探索。

炼油和石化领域可进行探索 and 创新的课题很多，但要得到推广应用，开发的成果无论是产品、工艺或催化剂，都必须比国内外现有的在质量和成本上有明显的优势才有可能。展望未来，只要抓住重点，深入研究，立足于创，立足于超，科技将为我国石油加工工业今后的发展作出更大的贡献。

## 郭景坤



1933年11月生，广东新会人。材料科学家。中国科学院院士。1958年毕业于复旦大学化学系。中国科学院上海硅酸盐研究所研究员，所长，国家高性能陶瓷和超微结构重点实验室主任，国家高技术新材料领域专家委员会首席科学家。60年代研究金属与陶瓷的封接，在深入研究陶瓷/金属封接机理的基础上，提出的活化钼锰金属化方法，适合于多种氧化物陶瓷以至蓝宝石单晶与金属的封接，提出的铂金属化法适合于酸碱环境中应用。70年代起从事陶瓷材料的强化与增韧研究，所提出的纤维补强陶瓷基复合材料曾获国家发明一等奖，已在我国的空间技术上应用。80年代中末期，从事多相复合陶瓷及陶瓷发动机材料的研究，在此期间更注意陶瓷材料的设计。90年代着手纳米陶瓷的研究。

# 材料科学研究的发展方向

郭景坤

材料是人类赖以生存和发展的物质基础，因此，使用什么材料来制造工具往往成为人类文明发展的一个重要标志

当前材料研究应该向多相复合材料、纳米材料、智能材料、生物医学材料及材料设计、材料的无损评价方向发展

材料科学作为一门独立的科学需要不断完善和发展，从而逐渐增强它对材料工艺过程的正确指导作用。这里蕴藏着理论与实践辩证统一的关系，理论来源于实践，反过来又指导实践。材料科学对材料研究指导作用的一个重要方面是材料设计。根据使用的要求对材料的组成和结构进行设计以达到所要求的性能，这是发展新材料的必由之路。因此为了进行有效的材料设计，必须广泛研究材料的合成与制备中的科学问题；研究材料的组成、显微结构及其与性能之间的关系和规律、研究材料的相关系以及材料的缺陷、损毁规律、无损评价和使用寿命预测等。在新的理论指导下，又必须进行新的实践，以求得新的发展。当前材料研究应该发展的方向有：

## 一、多相复合材料

为满足新技术对材料性能的综合要求，不得不放弃单体材料后处理改性的唯一途径，采取取长补短的两种（或两种以上）单体进行有效复合化的复合材料。因而多相复合材料成为当前材料研究的重要对象，它的内涵已极其广泛，主要包括：

### 1. 纤维（或晶须）增强或补强复合材料

纤维增强有机高分子复合材料已经得到很广泛的应用。高性能聚酰胺复合材料、聚苯并咪唑基复合材料今后都将有较大的发展。纤维增强金属基复合材料估计仍以碳纤维或碳化硅纤维增强铝基和钛基复合材料为主要发展对象。纤维补强陶瓷基复合材料则以碳化硅纤维或其他无机纤维为补强剂，基体则以非氧化物陶瓷为主的复合材料发展前景较大。从强度/重量比和它们的工作温度来衡量，在 1200 以下近期的使用则是金属复合材料、金属间化合物及其复合材料；在 1200 以上至 1700 左右环境下则是陶瓷基复合材料；在 1700 以上应用，则是碳/碳复合材料。玻璃陶瓷基体复合材料，由于它的性能匹配上的可调性，与纤维组成复合材料可以具有较优的性能，是一类作为 1100 以下使用的较有发展前途的复合材料。

### 2. 第二相颗粒弥散复合材料

以无机化合物弥散金属的复合材料是当前颇具吸引力的材料。SiC 颗粒增强铝基复合材料和钛基复合材料在改善它们的高温性能方面均显示出明显效果 TiC 或 ZrB<sub>2</sub> 弥散的 SiC 基复相陶瓷的强度和断裂韧性大约可提高 50% ~ 70%。SiC 颗粒弥散的氧化锆 (Y—TZP) 复相陶瓷，在 800 时的高温强度提高约一倍以上，使它成功地应用于热机上。SiC 颗粒弥散的莫来石陶瓷，常温和高温下的强度和断裂韧性都可以有近两倍半的提高，而且搞热震性能亦大大改进，是作为热机应用的第四种候选材料。用无机化合物颗粒弥散的有

机高分子材料能有效地改进它们的耐磨性能、刚性等等。由于颗粒弥散型的复合材料、具有工艺的重复性好和可靠性高的特点，而且成本较低，因此应用前景看好。

### 3. 两（多）相复合材料

锂铝合金，Ti - Ni 系统的金属间化合物的两相复合材料是一类有望提高金属的强度/重量比和使用温度的材料。两（多）相陶瓷复合材料是典型的自补强陶瓷材料。充分利用多相复合材料来获得具有综合性能的材料是一个很好的思路，很值得研究。

### 4. 无机物和有机物复合材料

无机/有机复合材料的研究已经有较长的历史，以无机物作为高分子材料的充填剂进行改性早被人们所应用，例如玻璃钢就是一种已经广泛应用于工业和建筑业中的典型的无机/有机复合材料。近年来，这类材料仍具有较好的发展前景，如压电陶瓷与高分子材料相复合，不仅提高了它的物化性能，而且改善了老化性能。这种复合原理还普遍应用于封装材料之中。

### 5. 无机物和金属复合材料

在 50 年代末期和 60 年代前期曾经热闹过一阵子的所谓金属陶瓷，希望集金属与陶瓷的各自的长处于一身而得到一种新型材料。但是不幸的是实践的结果正好相反。这并非是思路上的失误，更多地应归咎于工艺问题。最近纳米技术的发展，为金属陶瓷的设想重燃了一线光明。通过纳米技术的途径，有可能制备出兼具金属与陶瓷各自长处于一身的新型材料。

### 6. 梯度功能复合材料

最近发展了一种所谓梯度功能复合材料，即一面是可作为结构作用的金属材料，再逐层地掺入无机化合物，使另一面成为具有一些特殊的功能。这一设想早为人们为人们在厚涂层材料中加以应用，但是以此设想来制备体材料则是一种大胆的构思，因而一经提出就受到人们的重视。最近将此概念扩展，做成 SiC/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 梯度复合材料，使它的性能较纯粹的 SiC 陶瓷有大幅度的提高。因此，利用“梯度”这一设想，可以构思出一系列的新材料，是一个很值得注意的研究方向。

### 7. 纳米复合材料

最近，新发展的利用纳米技术来制备复合材料可以是晶内纳米复合，即纳米晶粒进入到较大的相晶粒之中；也可以是晶间纳米复合，即纳米晶粒分布于较大母相晶粒的晶界之上，所得复合材料统称为复相的纳米材料。这一设想可以适用于陶瓷、金属和高分子材料。特别在陶瓷材料方面，已经取得了令人可喜的结果。

从上可知多相复合是改进材料性能的一条很好途径，但不是唯一的途径，各种不同的强化和增韧的机理同时起作用，以起到叠加的和协同的效应是最具有实用价值的。

## 二、纳米材料

纳米材料是指晶粒和晶界等显微构造能达到纳米级尺度水平的材料，当然所用的原料——粉料首先必须是纳米级的。从微米级到纳米级的进步，不仅是制备工艺上的跃进，而且能推进材料科学的理论发展。

材料的很多性能如强度、断裂韧性、应变速度硬度、超塑性等等，都受

晶体尺寸大小的影响，在材料制备过程中的物理和化学行为亦与所有原料的颗粒尺寸有关。纳米技术的进步将使近代的微米级尺寸的材料跃进到纳米级尺寸的材料，并使材料的许多性能产生飞跃。现在已可以利用激光或等离子体的技术从高温气相合成得到纳米级的金属粉料和陶瓷粉料。用化学共沉淀法、溶胶凝胶法以及水热合成法均可制得相应的纳米尺寸的陶瓷粉料。其次是纳米粉料的成型与烧结，超细粉末成型和烧结过程中所遇到的最大问题是团聚。实验结果表明，可以通过增加适当的添加剂或调整介质来改善以至消除团聚现象。防止超细颗粒烧结时的重结晶是纳米材料制备过程中的另一个要认真对待的重要问题。因此，原有适应于微米级材料的工艺都将作相应的改进以至改变。

当颗粒变细时，巨大的颗粒表面为整个工艺过程带来重大的变化。由于颗粒变细，大大改变了烧结过程的驱动力—表面能；由于颗粒变细，物料的扩散路径变短、接触界面增多，从而加速了扩散及化学反应过程，使原有的烧结动力学理论不适应于纳米材料的烧结；由于颗粒变细，晶粒尺寸效应和晶界效应变得更为重要，对性能的影响变得显著。因此，成功制备纳米材料必须对原有工艺和工艺学理论作大量的补充和修改，从而引出了很多新的研究课题。所以，它的提出是具有方向性和指导意义的，是当前材料研究的一个重大趋向。

虽然纳米材料现在没有达到具有量子效应的尺寸水平，但是在性能上已经表现出它的优越之处，如某些金属的超高硬度，某些陶瓷的超塑性行为，陶瓷材料烧结温度的降低等等。纳米级氧化锆粉料可以在 1250℃ 烧结到理论密度的 98% 以上（比原来的 1650℃ 降低 400℃），且具有约 400% 的塑性变形。具有典型共价键结构，无极性的氮化硅陶瓷，在纳米态时却出现与极性相联系的压电效应，较高的交流电导和在一定频率范围的介电常数急剧升高的现象。纳米级的  $\text{Si}_3\text{N}_4$  陶瓷同样具有超塑性行为。随着对纳米材料的不断研究，将会发现更多高新性能的新材料。纳米技术与多相复合材料相结合所组成的纳米复合材料使材料的性能成倍地增长。

### 三、智能材料

智能材料是指能模仿生命系统同时具有感知和驱动双重功能的材料。它既能像人的五官那样，感知客观世界，又能能动地对外做功、发射声波、辐射电磁波和热能，甚至促进化学反应和改变颜色等类似有生命物质的智慧反应。当然这类材料的智慧功能的获得是材料与电子、光电子技术结合的结果。无源的智能材料不需外加的辅助而能有效地反映出对外界环境的变化作出的响应；而有源智能材料则是通过反馈网络而发挥它的感知和驱动功能。

无源智能材料之所以能有效地响应外界环境条件而不需要任何外电场、应力或反馈系统来诱导它的行为，是因为它自身具有下列的一些功能，这些功能的英文词中都以 S 开头的，故称之为“S 行为”，如选择性、自诊断、自调节、灵敏性、变形性、自恢复、简化性、自修复、稳定性与多元稳定性、候补现象、免毁能力和开关性。如陶瓷变阻器、正温度系数热敏陶瓷就是比较典型的无源智能材料。

有源智能材料则要求有一外加反馈系统来发挥它自身的感知和驱动功能。如录像磁头定位器即是一例。

#### 四、生物医学材料和环境意识材料

为了保障人类的健康和长寿，生物医学材料的发展尤为人们所关注。生物医学材料的目标是对人体组织的矫形、修复、再造、充填以维持其原有功能，要求具有相适应的性能外，还必须有与人体组织的相容性以及一定的生物活性。

具有较高强度的氧化铝陶瓷和氧化锆陶瓷以及带有陶瓷涂层的钛合金材料往往被选作能承受负荷部位的生物体的矫形修复材料。具有生物活性的羟基磷灰石和微晶玻璃是牙根种植体、牙槽矫形、颌面再造等的可用材料。聚乳酸与羟基磷灰石、磷酸钙的复合材料，以及加入碳纤维或玻璃纤维组成的多相复合材料则是矫形固定器、组织再造等的有效材料。此外，人工心脏瓣膜的碳基复合材料亦被成功地应用。材料学家与医学家的紧密结合，可创造出更多的生物医学材料来保障人类的健康。仿生材料亦是一个很值得重视的研究方向。

环境意识材料 (Environment Conscious Materials, 简称 Eco-materials) 是考虑如何保护地球环境免遭或减少污染以及维护整个生态平衡所需的材料。这一类材料将是 21 世纪重点予以发展的。它所包含的内容极宽。如防止或减缓对环境污染；对污染源的处理；废弃材料的处置与再生利用；能源的节省与新能源的开发；生态保护措施等方面所需要的各类材料。环境意识材料的研究是造福子孙后代的大事，现在应该提到日程上面来了。

#### 五、材料设计

按照使用上的要求对材料进行设计是人们从被动应用现有材料到主动地创造新材料的必由之路，这是科学技术的发展为人们提供了这种可能。材料设计可以分几个层次，从原子和分子水平上对材料作微观上的设计可以从材料本质上创造出新的材料，已有的研究已初见成效。但对大多数材料来说还有相当距离；比较现实的是对材料的组成与其显微结构针对使用要求，按照材料科学的知识进行设计。陶瓷的“晶界工程”研究已卓有成效，最近提出的晶界应力设计，企图为解决陶瓷的脆性问题找出新的途径。膜材料的设计，以至超晶格材料的设计均为新材料的创造提供基础。

#### 六、材料的无损评价

具有实用意义的材料无损评价技术是材料使用可靠性的保证，是整个材料科学与工程研究的不可忽视的一个重要环节。

一般说来，陶瓷属脆性材料，其强度严格说来不是一个确定的值，而是在其平均值的一定范围内变化着，并根据缺陷状况而呈一定的统计分布，且取决于应力状态与加载速率，时间效应明显。因此，传统的工程设计准则是陶瓷构件允许最大张力应力不得大于其平均强度的 20% ~ 10%，这无疑是未充分利用材料的特性。因此，先进陶瓷的真正趋于实用化，首先必需解决材料的可靠性评价技术及安全寿命预测方法。

电子与光电子技术的不断发展为材料的无损评价提供更多的可用技术。

例如高技术项目中热波检测技术所用电声成像装置分辨率已优于 2 微米，对陶瓷材料亚表面缺陷检测，涂层的微裂纹扩展和气孔分布、半导体材料的表面改性和光损伤观察等方面的都开展了有效的研究。虽然提高检测的分辨率是材料无损评价的一个重要方面，但是应坚持以实用为主，切实地解决具有一定分辨能力的实用检测技术，对新材料的发展是重要的。

## 唐有祺



1920年生，上海南汇人。化学家。1942年毕业于同济大学化学系。1950年获美国加州理工学院博士学位。北京大学教授兼物理化学研究所所长。学位论文研究某些合金中超结构的形成以及六次甲基四胺与金属离子键合的本质。1951年回国后开设结构化学和统计力学等课程，并开展晶体结构工作。60年代对化学中共振的本质的争议进行了澄清，并对不断增长的生物大分子结构知识有所传布。所在的研究组是进行胰岛素晶体结构工作的主力之一。70年代兴趣扩展到固体的表面研究，并特别关心如何发展作为要立足于结构化学的一门学科分子工程学。

# 化学学科的继往开来

唐有祺

## 一、化学学科的奠立和原子论

史家认为，近代化学萌芽于 A.L.拉瓦锡 (Lavoisier) 从否定燃素说中得出的元素学说 (1774) 和 J.道尔顿 (Dalton) 的原子学说 (1803)。化学由此进入了持续至今以原子论为主线的新时期。从 1860 年起，S.康尼查罗 (Cannizzaro) 采纳了 A.阿佛加德罗 (Avogadro) 假设，理顺了当量与原子量的关系，并改正了当时的化学式和分子式，从而使原子—分子论得以确立。从此，化学的发展越来越顺畅。奠立近代化学总体的理论基础是原子—分子论，简称原子论。它指明：不同元素代表不同原子；原子在空间按一定方式或结构结合成分子；分子的结构直接决定其性能；分子进一步集聚成物体。这个理论基础在化学的发展进程中不断深化和扩展，但并无颠覆性的变化。

## 二、物理学在两个发展时期中与化学的关系

物理学科的发展明显地经历了两个时期：从质点运动和波动这两极来反覆研究热、光、声、电、磁等效应的经典物理和揭示原子内部结构、波—粒二象性后的近代物理。在经典物理时期，化学与物理之间曾有过一种约定俗成的分工。A.A.诺伊斯 (Noyes) 和 M.谢里尔 (Sherrill) 所著《化学原理教程》(初版, 1922) 曾开宗明义地说明了化学和物理两个学科早期在研究对象和范围上的分野。分工的要点是化学要追究物质的组成，而物理在研究中则要回避物质组成的变化。

看来，这种分工是双方乐意的，并且也取得了种瓜得瓜、种豆得豆的效果。迷恋于追究物质组成的化学在整个 19 世纪中建成了原子—分子论，发现和合成了很多化合物，揭示了元素周期律和碳的四面体向价键，对物质世界的认识大为开阔，并为资源的开发提供了依据，但化学学科若要再深入一步就需要迎接外来的契机了。幸好“摆弄”热、光、声、电、磁等效应的经典物理也取得了累累成果，为机电等工业奠立了科技基础，并从 19 世纪末起终于在揭示原子内部结构和波—粒二象性中将牛顿力学上升为量子力学。化学学科的发展竟因此而进入一个新的阶段。近代物理对化学的发展不论在实验上和理论上都提供了新的起点。像 X—射线和其他电磁波以及电子束等技术在化学研究中越来越多的应用，是这个新阶段的标志之一。在原子结合成分子的层次上，量子力学才是锐利的理论工具。

## 三、自然科学的轴心：化学和物理

关于化学与物理的关系谈了不少，但仍意犹未尽，还应当明确一下它们在整个自然科学中的关系和地位。P.皮门特尔 (Pimentel) 编写《化学中的机会》(1985) 时一开始就提出，“化学是一门中心科学，它与社会各方面的需要有关”。而从学科之间的地位来看，化学也处在一个多边关系的中心。但我们也不会对另一种说法听而不闻：物理以物质的运动为其研究对象，从而其他学科与物理可以统称物理科学。我认为，化学之所谓中心地位当渊源

于它对各种物质素有无所不究之传统。实际上，物质和运动是同一个统一体的两个侧面。它们理当分属化学和物理两个学科。因此，比较全面的提法显然是，化学和物理合在一起在自然科学中形成了一个轴心。

#### 四、化学的使命和传统

借助于近代物理，化学得以如虎添翼般地迅速发展。但化学学科的使命不变，它仍然是一个在原子、分子水平上研究物质的组成、结构和性能以及相互转化的学科。物质在分子水平上相互转化的过程称为化学反应或化学过程。化学在长期实践中也形成了一系列值得重视的传统。

化学首先是一个实验和理论并重的学科。化学的实验性固然很强，但理论思维的作用也很突出。早期从原子—分子论，经过元素周期律到碳的四面体向价键，都是运用科学的抽象和假设的范例。

在长时期的发展中化学学科久盛不衰的任务是整理天然产物和耕耘周期系，从而发现和合成了大量化合物。从 1950 年到现在，已知化合物已从 200 万增至千万种上下。化学的这个工作方式正以惊人的速度增殖它的化合物储备，并通过筛选来满足各方面对新物质的需求。同时，这样的工作也能对化学学科的发展有所带动。这种发展一般要求：深入研究化学反应理论并开发各种新过程；揭示结构及其与性能关系的规律；利用新技术和新原理强化分析、测试方法，使化学工作的“耳目”趋于灵敏和可靠。

#### 五、二次大战以后科技发展的新时期

二次大战中最令人瞩目的科技大事是爆炸了原子弹。其后不久，约在 50 年代初，科学技术正处在全面大发展的前夕。那时，第一代电子计算机 ENIAC 已经问世。从基础研究中萌发出来的半导体技术已日趋成熟，出现新一代电子器件的前景已经在望。物理学在一定程度上成为自然科学中的先导学科；尼龙等巧夺天工的新材料已开始成批生产；化学在认识原子结合成分子的方式、依据和规律方面已日趋深入而系统；生物学正在进入分子水平的前夜；工程界要求发展工程科学的呼声极高。在这个科技迅猛发展的洪流中，各个学科几乎都是有点身不由己地进入了一个新的发展阶段。

化学在这个将近半个世纪的新时期中，新的需求不但使自身及其各个分支取得了极大进展，而且还在分子生物学和材料科学等新学科的奠立上起了十分积极而显著的作用，同时也迎来了电子计算机、激光、磁共振、新材料和重组 DNA 技术等新事物以及新的发展机会。

对化学学科来说，这个时期中最有深远影响的大事是分子生物学和材料科学的诞生和成长。从此以后，在原子、分子层次上，化学又增添了两个新的学科伙伴。现在，化学在很大程度上已离不开与生命科学和材料科学的相互依存关系而独立发展了。

经过半个世纪的发展，生物学已从观察、描述和分类的科学，成长为将生命当作化学过程来认识的学科。现在可以认为，一切生物功能取决于分子水平上发生的事件，而这些事件都是由生物大分子控制着的，后者实际上是生命的分子机器。从 70 年代起，基因工程或重组 DNA 技术问世，并发展成为蛋白工程。从 1985 年以来，又开创了催化性抗体或抗体酶和聚合酶链反应两

种很有前景的合成技术。

今天，化学家如要在分子水平上从事生命科学的研究时，切忌回避生物大分子的作用。在加强功能意识的基础上，化学家从事结构生物学是有优势的。化学必须积极对待分子生物学中开拓出来的各种合成技术。

材料的门类很多，物质类型的跨度也大，材料的用途更是五花八门。因此，材料科学的范围很广，方面很多，又各具特点，从而对其整体性不可苛求。值得重视的是，比起化学家对待一个化合物来，材料科学家看待一个材料时的功能意识要强得多。在化学学科内从事高分子材料和精细功能体系是很有优势的。

## 六、关于化学发展道路感想

化学学科的传统工作是从整理天然产物和耕耘周期系来发现和合成新化合物，并弄清它们的结构和性能以及有关的反应条件等。化学的学科系统就是这样逐步建设起来的。这样的学科系统离建成还差得很远，这个模式肯定还需要继续下去。已知化合物越积越多，肯定也会筛选出一些有用的新物质。而且这样做也会带动联系制备和结构之间关系的理论，工作的成效也会跟着提高。

从另一方面来说，当前化学学科的发展水平已有较大提高，同时也面临着新的需求，化学学科的建设工作如果局限在这种模式上，未免有点作茧自缚。首先，能否逆向而行，即根据所需性能来设计结构，并进行制备？这种做法好处很明显，并体现了较强的功能意识。其次，目光不要盯在单个化合物上，而要把着重点放在复杂一些的体系上。就凭在这两点上变通一下，就会对化学的发展道路产生较大的影响。化学会更多地致力于贯通性能、结构和制备三者之间关系的理论。化学也会注意生物或工程技术性能，而不会只考虑分离和表征组分的性能了；它就会更多地关心分子结构以外的结构类型和层次；它也不会把制备工作过多地局限在合成单个化合物上了。

我曾其他场合谈过分子工程学的学科建设问题，在此不再赘述。但我需要强调一下，任务能不能‘带’学科，除了其他因素外，学科意识不强往往是关键之所在。

## 唐孝威



1931年生。江苏无锡人。实验物理学家。1952年毕业于清华大学。中国科学院高能物理研究所研究员。主要从事原子核物理、高能物理、物理学与其他学科交叉领域等方面的研究。50年代研制核辐射探测器。60年代参加中国原子弹、氢弹研究及试验，作出重要贡献。70年代进行卫星空间辐射测量；并领导中国小组参加马克杰国际合作实验，发现胶子喷注现象。80年代参加L3合作实验，证实存在三代中微子；还开展物理学与生物学交叉学科研究。90年代从事脑科学和核医学领域的工作。

## 发展新的脑功能成像，技术进行脑的实验研究

唐孝威

人脑是自然界中最复杂的物质。人脑内部的运动是迄今所知的最复杂的物质运动形式。“意识是什么”的问题是当代科学难题之一。我们要了解人脑的工作原理，必须对工作着的人脑进行直接的实验测量。因此，开展脑科学的实验研究具有重大的意义。由于人脑的工作非常复杂，可能要在系统、回路、细胞、分子等各种水平上研究脑功能的动态过程，才能对“意识是什么”的问题做出科学的回答。

脑科学研究不但是一项重要的、前沿性的基础研究，而且是一项对人类健康有重要实际意义的应用研究。随着社会的发展、人类寿命的延长，脑的保健显得越来越重要。同时，因脑衰老、紊乱或受伤而引起的脑疾患，对社会财富消耗和家庭的负担日益巨大。据报导，美国每年精神分裂症的发病率约占人口的百分之一；另据统计，美国在脑疾患的治疗、康复及有关方面支付的费用每年达3千亿美元。只有深入了解脑疾患的机制，才有可能从根本上对它们进行有效的预防和治疗。脑科学研究对社会经济的影响是巨大的。

基于以上两方面情况，许多国家纷纷将脑科学的研究列入国家规划，并且制订长远的研究计划。人们把21世纪看成是脑科学研究高潮的时代。

脑科学研究首要的是实验研究，特别需要在无创伤条件下对活体脑进行动态过程的研究。目前已经有了、而且正在发展许多种脑功能成像技术，包括核磁共振功能成像技术（fMRI：functional Magnetic Resonance Imaging）、正电子发射断层扫描技术（PET：Positron Emission Tomography）、脑磁图技术、脑活动的光学成像技术等。

核磁共振功能成像技术是一种无损的成像技术，能显示脑功能快速变化的过程，被人们称为“思维阅读器”。在脑功能活动区中血液的流动及其和氧程度的变化，使得该区域的磁化率发生变化，核磁共振对磁化率的变化是敏感的，所以用核磁共振可以显示这种变化的空间分布和动态过程。另外，结合核磁共振成像的空间选择性，可以同时测量脑内指定区域中的核磁共振波谱，这称为活体核磁共振波谱学（MRS）。

PET技术是利用与发射正电子的 $^{18}\text{F}$ 结合的脱氧葡萄糖注入血液，作为痕量示踪剂，进行脑功能的显像。它可以对脑的不同部位活动中，神经元所消耗葡萄糖的代谢过程进行无创伤的显像，从而研究活体脑中神经元的活动状态。或者是利用与发射正电子的 $^{15}\text{O}$ 结合的水注入血液，作为痕量示踪剂，进行脑功能的显像。

脑功能成像技术是一个新的研究领域，还需要研究和新的成像技术。例如脑功能的脑磁图成像技术，以及脑活动的实时光学记录与成像技术等，也发展很快，值得予以重视。至于脑功能图像的生理模型的图像解释、脑功能图像的计算机模拟、脑功能图像数据的计算机分析等方面，都有大量工作要做。

我国现在有一支优秀的脑科学研究队伍，他们正在各自的领域中开展脑科学研究。从目前情况看，发展新的脑功能成像技术、进行脑的实验研究，已经提到研究工作的日程上来。可以考虑建立我国的脑功能成像研究与应用中心，专门进行这方面工作。脑科学研究是涉及许多学科领域的交叉学科，十分需要生理学、生物学、心理学、医学、化学、物理学、信息科学、计算

科学等各方面的专家通力合作，共同进行这门交叉学科的实验研究。

## 梁栋材



1932年生。1932年5月生于广州市。

生物物理学家。1955年毕业于中山大学化学系,1956年赴苏联留学。1960年在苏联科学院元素有机化合物研究所研究生毕业。获副博士学位。1980年当选中国科学院学部委员。历任中国科学院物理所助理研究员,中国科学院南海海洋所副研究员、研究室副主任,中国科学院生物物理所研究员、室主任、所长,中国生物物理学会理事长。1984年起任中国科学技术大学生物系兼职教授。1986年至今兼任中国自然科学基金委员会副主任。1985年被选为第三世界科学院院士。60年代初测定了一批有机物晶体结构并与协作单位一起建立了我国第一个用于晶体研究的计算程序库。60年代末作为负责人之一参加了猪胰岛素晶体结构的测定,该成果获1982年国家自然科学二等奖。自1980年以来,主持胰岛素三维结构与功能研究组,该组的0.12纳米分辨率胰岛素结构的精化及0.15纳米分辨率去五肽胰岛素结构测定等研究成果达到国际先进水平。曾先后测定了胰岛素及衍生物的三维结构共14个,并对胰岛素分子三维结构特征要素、分子运动特征及胰岛素分子与其受体结合作用机制等提出了一些有价值的见解。研究成果曾分别获1986年及1992年中国科学院科技进步二等奖和1987年一等奖,并获1989年度国家自然科学二等奖,1992年获首届王丹萍科学奖金。发表科学论文80余篇及专著《X射线晶体学基础》等。

## 结构分子生物学进展

梁栋材

随着学科的交叉渗透和科学技术的迅速发展，一个极其重要的分支学科——结构分子生物学正在高速发展，并已成为当前分子生物学中的一个重要前沿学科。结构分子生物学是结构生物学中最活跃的研究层次，它是在分子层次上从结构角度特别是从三维结构的角度研究和阐明当前生物学中各个前沿领域的重要学科问题。结构分子生物学是一个包括生物学、物理学、化学和计算数学等多学科交叉的，以结构（特别是三维结构）测定为手段，以结构与功能关系研究为内容，以阐明生物学功能机制为目的的前沿学科。

众所周知，生物大分子发挥其生物学功能（包括分子间的识别、结合，能量及信息的传递等相互作用）必需具备：（1）稳定的特征的三维结构，（2）其三维结构在各个水平上的运动。而各个层次的生命活动都是建立在生物大分子的结构、运动及其相互作用的基础上。50年代核酸双螺旋结构模型的确立及其后肌红蛋白与血红蛋白三维结构的阐明为分子生物学奠定了学科基础。过去、现在和将来分子生物学中的每一个前沿突破都是并必将是与其三维结构研究的突破密切相关。生物大分子的结构与功能研究是分子生物学的基础和学科前沿，它更是分子生物物理学的核心。

结构分子生物学对生物大分子（包括多亚基、多分子的复合物及复杂的复合体）三维结构及其运动的研究手段主要有：X射线单晶衍射—蛋白质晶体学，二维及多维核磁共振谱，电子晶体学及电镜三维重组，中子衍射，其他包括应用傅里叶变换技术的各种谱学方法。他们都各有自身特有的优越性和不足。然而，无论从已测定生物大分子三维结构的数量上（见附表）、在精确度和它的发展潜力上，X射线单晶衍射方法—蛋白质晶体学—至今及可见的未来仍占统治地位，都是其他手段不可相比的和不可代替的方法。二维及多维核磁方法发展较快，到现在为止可以解决分子量高达2万~3万的三维结构，一些生物大分子无法获得结晶，其结构可以在溶液中测定，这样实际上它是与蛋白质晶体学互补的一种重要方法。近些年来电子晶体学特别是电镜三维重组的方法发展也很快并已取得了许多令人瞩目的成就，特别是一些难以堆积为三维晶体的诸如膜蛋白等生物大分子，以二维结晶获得了三维结构诸如高等植物捕光蛋白复合物（LHC-）结构的分辨率最近报告已达0.34纳米等。虽然所提供的结构信息量远不如上述方法，其它谱学方法，特别是质谱方法，发展也很快，在生物大分子三维结构研究中起重要作用。

结构分子生物学至今为止已有好几位诺贝尔奖金获得者，F.H.C. Crick和J.D. Watson确定核酸双螺旋结构而获1962年生理与医学奖；M.F. Perutz和J.C. Kendrew阐明了血红蛋白与肌红蛋白结构获1962年化学奖；D.M.C. Hodgkin由于对维生素B<sub>12</sub>结构的研究成就而获1964年化学奖；A. Klug由于对病毒结构研究的突出贡献而获1982年化学奖以及1988年西德的R. Huber教授及其合作者由于紫色细菌光合反应中心的三维结构研究成就而获化学奖。这些都是些标志着结构分子生物学发展的里程碑。

80年代在国际上迅速崛起的蛋白质工程及药物设计已充分表明结构分子生物学是当前生物高技术应用研究的重要前提和保证。其中也显示了蛋白质晶体学方法—作为生物大分子三维结构测定的手段所具有不可取代的重要性。

当前结构分子生物学发展的趋势有如下几个特点：

1. 生物大分子三维结构测定在高速度发展。为了使研究成果能够及时交流和广泛应用，1973年国际晶体学会建立了“蛋白质银行”(Protein Bank)，专门接受储存世界各国已测定的生物大分子三维结构(原子坐标)和原始数据，以供世界各学科领域的学者索取、使用。附图是记录了从1989年至1992年每月存入蛋白质银行的生物大分子三维结构(原子坐标)的套数。显然，从图可见，存入的结构套数与月俱增，从1989年每月不到10套到1992年底递增每月近60套，呈朝上的抛物线激增。附表列出最近两年总共存储在蛋白质银行的结构全部套数，其中也给出了用核磁共振(NMR)方法所测定的溶液结构的情况。这种激增的势头仍在上升，已有人预测，在进入21世纪之前，存入蛋白质银行的生物大分子三维结构的套数将会净增2800套以上，即平均每天将存入一套。跨入21世纪以后的速度就更难以预测了。

2. 结构分子生物学的研究成果越来越受到生命科学各个相关领域的重视和引用。当前，任何一本与分子生物学相关领域的专著和教科书都在大量引用结构分子生物学的研究成果，任何一篇与分子生物学相关领域的优秀科学论文都会尽可能地运用生物大分子三维结构的研究结果，从而能更深入地阐明有关生物学机理等前沿学科问题。此外，在一些著名的国际期刊如J.Mol.Biol.和Nature等重要的核心刊物所刊登与结构分子生物学有关的论文与日增，而1991年创刊的《Macromolecular Structure》和《Current Opinion in Structural Biology》，1993年创刊的《Structure》以及1994年创刊的《Nature Structural Biology》等重要国际期刊几乎全部都是刊登结构分子生物学的最新研究成果，可见结构分子生物学在当前和未来生命科学中的重要位置。

3. 国际上很多难度高、意义重大的三维结构均是在近几年内突破的，如：细菌光合作用反应中心(Photosynthetic reaction centre from *Rhodospirillum rubrum*)、细菌视紫红质(Bacteriorhodopsin)、C—藻蓝蛋白(C—phycocyanin)、人组织相容性抗原(Human class II histocompatibility antigen, HLA-A2)、人生长激素与受体复合物(Human growth hormone-receptor complex)、类人猿(Simian)病毒40、人鼻病毒14(human rhinovirus 14)、人免疫缺乏性病毒蛋白酶(HIV protease)、CD4(与HIV有很强结合能力的一种细胞表面的糖蛋白)、口蹄疫病毒(Foot and mouth disease virus)、高等植物光合作用系统(System of photosynthesis, PSI)、高等植物捕光蛋白复合物(LHC- )等等许多世人所瞩目的重要结构研究都是近些年来完成的。三维结构的突破极大地推动了与其相关的学科前沿领域的研究，许多重要的作用机制因而得以阐明。

4. 结构研究已由单一分子进入研究分子之间相互作用的复合物结构分子。诸如激素与其受体，酶分子与其底物，蛋白质分子与核酸、抗体与抗原(或抗抗体)，药物分子与受体等等复合物的三维结构研究成就使人们更深入和直观地获得大量有关它们作用机理的重要信息和规律。除了极多重亚基聚合的复杂的病毒结构研究之外，近年来多个不同亚基、多个不同分子所构成的复合体的复杂结构已由诸如细菌光合作用反应中心发展到由60个不同的蛋白质分子和三条RNA链所组成的分子量为230万的核糖体(Ribosomes)结构的整体研究，其X射线晶体学研究已在85K低温下，用同步辐射收集了0.29纳米分辨率数据，一种由十一个金原子构成的原子簇化合

物的重原子同晶置换已经成功地获得，并已收集了 X 射线衍射数据；其二维晶体的电镜三维重组研究也十分顺利，在 0.30 ~ 0.47 纳米分辨率的三维重组结构模型中已给出了许多极其宝贵的结构与功能的信息。核糖体整体的三维结构研究将会是结构分子生物学发展历程中的另一个里程碑。当我们踏入 21 世纪的时候，核糖体整体的三维结构将会在较高分辨率上得到解析和精化，从而有关蛋白质生物合成以及新生肽链折叠盘绕等许多奥秘将会逐步被揭示。可以想像，诸如肌球蛋白—肌动蛋白复合物、病毒—抗体复合物、药物—受体复合物，线粒体亚基、网状的糖蛋白、脂包裹的病毒如风疹病毒和麻疹 (Measles) 等乃至高等植物光合作用的组件 (复合体)、包含有膜蛋白的生物膜组件 (复合体) 和细胞器等一些极其复杂的生物组件的三维结构都有可能进入 21 世纪后得到突破。

5. 蛋白质晶体学研究从生物大分子静态 (时间统计) 的结构分析开始进入了动态 (时间分辨) 的结构研究及动力学分析。由于同步辐射光源具有极高的光通量、高度单色和高度准直，它也可以调制成脉冲式光源，为瞬时结构变化研究提供了可能性。为了连续记录瞬时结构变化的 X 射线单晶衍射谱，人们已设计出各种类型的与脉冲式光源相匹配的、能快速脉冲式微量平移的 Laue (平板型) 摄谱仪。近年来，时间分辨率为 1 ~ 10 毫秒的 X 射线单晶 Laue 衍射方法的连续摄谱已经成功，这一时间尺度对于研究生物大分子之间的相互作用过程中二级结构之间的运动是十分合适的，它为诸如酶分子与其底物的相互作用，蛋白质分子的折叠卷曲运动等动态结构研究提供了有力的手段。随着同步辐射光源的光通量的提高和方法与摄谱仪的不断改进，当跨入 21 世纪的时候探测时间分辨为纳秒量级的结构动态变化将是可能的。在这一时间尺度上，人们将有可能直观地探测到诸如在小肽段内的折叠卷曲、在蛋白质分子内部环 (ring) 结构的反转以及有关螺旋—盘绕的转移等许多有趣的结构运动现象。另外，从理论上和实践上，探索从 X 射线单晶衍射的精细衍射谱中获得在晶体中有关生物大分子动力学方面的信息也将越来越为人们所关注。

六、技术和方法在高速发展。同步辐射光源已逐步作为常规光源广泛应用，正在兴建的具有更高光通量的同步辐射光源，诸如在日本姬路兴建的 Spring-8 等新一代的同步辐射装置将会在进入 21 世纪前投入使用，并向世界各国科学家开放。计算机硬件和软件的迅猛发展和图像显示技术的进步等都一直在为结构分子生物学的发展提供着机会和条件。先进的工业技术的发展也不断地为电子晶体学和核磁共振的研究提供更先进的手段，更高分辨率的电镜和 750 兆赫的超导体的核磁共振仪早已进入一些实验室。显然，跨入 21 世纪后技术的发展将会出现飞跃，它们给结构分子生物学研究手段的发展将会有更大的推动。

相位问题对于小分子的晶体结构测定已经基本得到解决，然而它仍然一直困扰着蛋白晶体学者。生物大分子晶体结构测定中相位问题的解决一直都是沿用 1953 年 M.F.Perutz 创建的重原子同晶置换方法和 1957 年 W.Hoppe 首先提出并经许多学者不断给予完善的分子置换方法，它们的成功与完善一直推动着蛋白质晶体学前进。与此同时，希望将已成功地用于小分子晶体结构分析的直接法应用于生物大分子晶体结构测定的探索一直没有停止，并不断地取得了许多可喜的进展。由于生物大分子晶体结构的特殊性，十余年来这一方面的进展仍然十分有限。然而人们可以期望，当进入 21 世纪的时候，

直接法在蛋白质晶体学中的应用将可能有一个较大的突破。然而，蛋白质晶体学家们可能对跨入 21 世纪以后抱着更高的奢望，这就是将激光 X 光（波长在 0.1 纳米量级的激光）用于晶体衍射的愿望能成为现实，从而晶体衍射将不仅仅只给出振幅而同时也将给出了它的相位。相位问题的彻底解决将意味着人们从晶体衍射数据（振幅与相位）可直接通过 Fourier 综合获得三维结构，这将是晶体结构分析的一个革命。

电镜三维重组方法将电子衍射术与电子成像术结合在一起，巧妙地解决了相位问题。可以肯定，二维结晶的经验与规律的大量积累必将导致二维结晶方法的突破。从而可以期待在进入 21 世纪之后，越来越多难以获得三维晶体的生物大分子和庞大复杂的生物组件作为整体的三维结构测定将被电镜三维重组方法所突破。它与 X 射线晶体学方法在结构分子生物学中将是互为补充的重要的结构研究手段。

由于对核磁共振谱指认的困难和谱峰之间分辨的限制，现在有一些学者正在议论：分子量为 3 万~4 万的生物大分子结构测定是否在理论上和实践上已是多维核磁共振方法测定生物大分子三维结构的极限。然而更多的结构分子生物学家却仍然期望着 21 世纪将会给核磁共振方法带来新的突破，将那些难以结晶的生物大分子能在溶液结构研究上推到一个新的高度。

7. 基础研究不断深入与扩展的同时，应用研究在迅速发展。一方面，80 年代迅速崛起的蛋白质工程向人们展示了利用和改造蛋白质的美好前景，可预测的深远的学术意义和重大经济效益使它成为现代高技术领域的重要方向之一。另一方面，对医学卫生、工业和农业上具有应用背景的一些生物大分子结构研究越来越吸引着人们注意和重视。以蛋白质晶体学为主要研究手段的结构分子生物学已经从 50 年代、60 年代乃至 70 年代的纯基础性研究逐渐步入应用基础性以及应用性研究。许多课题研究都与企业、公司、财团有着密切联系。这一变化随着时间的推进将会变得越来越突出，这一发展趋势恐怕难以逆转。

8. 激烈的竞争机制已打破了传统的学院式的研究体制和格局，并在很大程度上左右着一些重要项目的进展和方向。首先是课题的竞争，一项具有重要意义的课题同时在几家实验室内进行，他们接受不同财团的资助，自觉或不自觉地开展“竞争研究”。其次是表现在方法和技术上的竞争，谁在方法和技术上占有优势，谁就有可能赢得竞争的胜利。再就是财力上的竞争，课题的组织者和研究者都全力以赴从各种渠道争取资助，许多例子都表明：“财大气粗”是在竞争中取得优势的重要条件。然而，最终的竞争是人才的竞争，这已是各国政府部门、实验室和广大科学家的共识。因此，几乎可以这样说：人才是决定性的因素。随着竞争而同时到来的就是研究工作的保密性增强和知识产权的保护。

60 年代末的胰岛素晶体结构分析使我国在国际上属于较早地涉足这一领域的国家之一，70 年代初胰岛素结构测定的成就曾得到国际同行的承认和赞扬。80 年代初胰岛素三维结构与功能关系研究、天花粉结构分析及随后 3—磷酸甘油醛脱氢酶及胰蛋白酶抑制剂等结构的测定，近十年来，各种（致）核糖体失活蛋白、酶、毒素蛋白、胰岛素突变体、藻类捕光蛋白以及血红蛋白、神经毒素、抗真菌蛋白等一批课题不断涌现并取得了不少成果。然而，70 年代几乎处于停顿状态的十年所造成的差距是巨大的，除了有一些课题在国际上占有一定位置以外，无论从课题的开创性、难度、解题的速度以及技

术条件等方面都与国际先进水平有较大差距，而且差距有进一步扩大的趋势。除上述蛋白质晶体学外，核磁共振、电子衍射及各种谱学方法都有一些基础，电镜三维重组也已开始逐步建立，虽然这些手段已开展了一些课题研究并已取得一定成果，但与国际的差距很大。显然，除在晶体结构方面的部分研究项目在国际上仍可占有一席之地，从整体上我国结构分子生物学研究与国际先进水平有着明显差距。但是，它又拥有优厚的基础和急起直追的潜力。显然，面对国际上激烈的竞争机制，我国结构分子生物学的发展战略完全决定于对它的投入的力度。

附表

| 日期               | 1992年10月      | 1993年1月 | 1993年4月 | 1993年10月 | 1994年1月 | 1994年4月 |      |
|------------------|---------------|---------|---------|----------|---------|---------|------|
| 总共存入套数<br>(晶体衍射) | 1007          | 1055    | 1110    | 1727     | 2327    | 2441    |      |
| 分类<br>统计<br>套数   | 蛋白质、<br>酶、病毒  | 897     | 944     | 982      | 1564    | 2134    | 2247 |
|                  | DNA           | 89      | 90      | 107      | 137     | 156     | 166  |
|                  | RNA           | 2       | 2       | 2        | 7       | 9       | 9    |
|                  | tRNA          | 9       | 9       | 9        | 9       | 9       | 9    |
|                  | 碳水化合物<br>(糖类) | 10      | 10      | 10       | 10      | 10      | 10   |
| NMR 测定<br>的溶液结构  | 23            | 23      | 30      | 31       | 31      | 31      |      |

引自《Protein Data Bank-Quarterly Newsletter》

## 彭桓武



1915年10月生。生于吉林长春，物理学家。原籍湖北麻城。1935年毕业于清华大学。1940年获英国爱丁堡大学哲学博士学位。中国科学院理论物理研究所研究员、所长、名誉所长。英国皇家爱尔兰科学院院士。主要从事理论物理的基础和应用研究并取得显著成就。回国前研究固体理论、介子理论和量子场论。回国后研究轻原子核理论，对分子结构提出新的处理方法，并对钢锭快速加热工艺问题作过理论的应用研究，结果与同时的实验符合。在反应堆理论与工程方面作过初期的培训工作。帮助过核工厂制订临界安全规定。参与领导中国第一代原子弹和氢弹的理论研究设计时也做出了具体重要贡献。近来对量子多体问题提出了自洽场的推广理论。

## 物理学发展的两大趋势

彭桓武

21 世纪物理学将更精致、更复杂，并与生物学、化学携手前进。

随着科学技术发展的深化，开发工作中的研究成分不断加大；随着研究所要求的条件更加精致，研究工作更需要开发工作的支持。

对于 21 世纪物理学的发展作探讨，我现在所讲的或所想的都是属于科学未来学的问题。我设想时间步长不妨也取为 60 年，即来想象一下 2050 年的物理学。跟其他未来学问题一样，首先要考虑到方法论，即用什么方法去预测 60 年后的物理学。因为用不同方法所得结果的可靠程度可以大不相同。下面我就物理学当前发展大趋势作探讨。

我只想突出下面两点大趋势：一点是物理科学与生物科学相结合；另一点是研究与开发相结合。这些趋势当然也符合发展规律。

### 一、物理科学与生物科学相结合

在探讨物理科学与生物科学相结合的前景之前，不妨简略地回顾物理学与化学相结合的历史。按科学分类，物理学与化学同属于物理科学，物理科学与生物科学同属于自然科学，自然科学与社会科学同属于科学。所以上述两个相结合相差一个层次，但总还有参考价值。

19 世纪初期对气体的化学和物理研究导致原子、分子概念的形成。1858 年坎尼扎罗的著名演讲，可认为是物理学与化学相结合的第一个回合。19 世纪中期以来，物理学建立起分子运动论、热力学和平衡态的统计物理，这些理论在化学领域中得到大量应用，促进了包括化学热力学在内的、内容十分丰富的交叉学科——物理化学的成长和发展。这可看作是物理学与化学相结合的第二个回合。1926 年量子力学诞生，1927 年海特勒与伦敦用它来解释氢分子的结合能与振动频率，1928 年伦敦用它来讨论氢分子与氢原子的碰撞，引入了 3 个原子的位能面，开辟了用量子力学解释化学反应和计算化学反应率的道路。这些工作虽属近似工作，但正如狄拉克所说，量子力学能解释一切化学问题，因为从本质上讲，原子、分子的化学性质取决于其电子的快速运动，而后者是个量子力学多体问题。所以量子力学诞生后，化学与物理学实现了根本性的结合。应用量子力学去解释大量化学问题促进了更带有数学物理气味的交叉学科——化学物理学的发展。这是物理学与化学相结合的第三个回合。60 年来，对氢分子与氢原子这个最简单的化学体系，用量子化学方法定量地计算位能面的工作，愈来愈精确，对热化学反应率和态-态化学反应率的理论计算结果与实验结果也符合。位能面包括了电子快速运动必须用量子力学处理，而对原子的运动除量子力学处理外还可用经典力学近似计算其轨进。比较态-态反应率发现还是量子力学计算结果更接近实验值，这些定量计算都依赖于计算机。

现在考虑物理科学与生物科学的结合问题。物理学的描述是数理的，近乎哲学；生物学的描述是图形的。近乎历史。特别是生物的分类和演化。我见到的第一本将物理学用到生物学上的书是“Growth and Form (生长与形态)”，书中讨论细胞分裂，认为除体积能外还考虑到表面能时，分裂便是自然的。印象更深刻的是谈到有按形态分类的两种鱼：一种扁些，一种圆些；

一种习居于浅海，一种习居于深海。但将前一种鱼取来加压力，其形态便变为后一种。按物理学家看来是一种鱼，形态不同是由于环境（压力）不同所致。后来在都柏林听薛定谔的公开演讲“生命是什么？”好像他提过生命秩序的维持要靠“吃”负熵，指的是带进生物体的各种物质的总熵比从生物体排出的各种物质的总熵少。因我在清华大学上叶企孙先生的热力学课时已听过这类话，所以再听时不觉新鲜，但今天回味起来，我怀疑这可能只是说说而已，不知有人认真核算过没有。在薛定谔的演讲中，给我印象最深刻的一点，是他对基因遗传的稳定性所作的量子解释。他将包含许多基因排序的染色体比作他命名的非周期性晶体。根据量子力学，要改变这晶体的能级，需要一定的较大能量。譬如说，需要的能量差不多是X射线的光子能量那么大，比通常温度下原子的平均动能大很多倍。这就解释了用x射线照射染色体可能引起基因突变，而不照射则不引起突变。基因遗传的稳定性是个量子效应，基因信息即包含在晶体的非周期结构中。到70年代末，我才从我国生物界同事那里听说，薛定谔40年代演讲后出版的小册子早已成为经典著作，曾引起人们广泛注意，并与50年代X射线对生物大分子的结构分析和其他实验一起，影响到DNA的双螺旋模型和三联体遗传码的建立。我觉得这表明，物理科学和生物科学相结合是可能的，可以作为物理科学和生物科学相结合的第一个回合。

在这基础上，分子生物学迅速发展，同时促进了生物物理学的广泛而深入的发展。对生物大分子的结构研究有X射线衍射（定晶体结构）、核磁共振（定溶液中构象）和分子动力学（计算机上模拟）方法。结构中包括多种类型的原子运动，运动尺度快慢有若干个量级的差别。以球蛋白为例，在室温下，运动的空间幅值为0.001~10纳米，时间快慢为 $10^{-15}$ ~ $10^3$ 秒，能量为0.1~100千卡/摩，而运动类型有局部运动（原子涨落、侧键振动、环与臂的位移），刚体运动（螺旋、区域、亚单位），大尺度运动（开启涨落、折叠与去折叠），集体运动（弹性体方式、偶联的原子涨落、孤子与其他非线性运动）等。

生物科学的对象是复杂而具有多层次性的，如分子、细胞、器官、整体、群落、生态环境等。对细胞中的生物膜结构与功能的研究也是当前的一个热点，因为膜是物质运输、能量转换与信息传递的重要场所。膜为中间疏水两面亲水的脂双层，层中镶嵌着蛋白质，后者必有一头或两头伸到膜外。膜脂能进行侧向扩散和翻转、旋转、摆动（链内的或链间的）等运动，膜蛋白则仅有侧向扩散和旋转运动。对神经系统和脑的研究又是一个热点，神经网络的Hopfield模型与凝聚态物理的自旋玻璃有些类似，它提供一个解释记忆、学习和图像识别等脑功能的信息处理的可能模型。

生物功能多种多样，生命表现有低等与高等之分。要达到对生命的本质有所了解，需要物理科学与生物科学从根本上相结合。物理学方面，特别像对生物大分子和细胞这样的复杂体系的力学和统计处理，还需要很大发展。

### 三、研究与开发相结合

前面曾提过科学技术是通过实现条件而使现象出现，以资利用。无论是为研究而制造的新仪器设备，或是为生活而生产的新产品，都需要开发。随着科学技术的深化，开发工作中的研究成分加大，随着研究所要求的条件更

加精致，研究工作更需要开发工作支持。研究与开发在相互作用下相伴发展的趋势愈来愈明显。

以开发受控核聚变能源为目标，对产生高温高密度等离子体（磁约束、惯性约束）已研究了几十年，到真正开发商用产品还需要几十年。在物质结构研究方面，在原子以下层次即核层次已获得丰富成果，因而开发出核武器、核电站、多种核技术与仪器设备，以及同位素的广泛应用；而研究更深层次（基本粒子）的粒子物理则需要开发高能加速器与探测器，这方面已有很大进展，需要高技术和大量投资；如能同时开发出副产品，才容易赢得社会的支持。在原子、分子和它们的较简单的组合如无生命的凝聚态这个层次，包括与光、声和电磁场的作用在内，基础研究与产品开发距离较近，其中与信息材料关系更密切的如半导体和高分子等人工材料，其结构与性能的研究更是为产品开发和生产开路；在这方面如能继续维持节约材料与能耗，其生产的经济效益能补偿研究开发费用而多有盈余。现代生物科学研究与工程开发相结合，常听到基因工程、蛋白质工程、生物医学工程等等，后者还包括一些物理工作在内。人们常常向往仿叶绿素进行高效利用太阳能，或仿细菌在常温常压下进行化工生产。在物理科学与生物科学相结合进行研究的同时，向生命学习，寻求启发，这对我们向工、医、农等领域开发新技术或许是很有利的。日本政府前几年提出的《人类前沿科学计划》便是一个以开发促研究和以研究促开发的范例，很好地体现了研究与开发相结合。不妨猜测 21 世纪物理学将是更精致、更复杂，并与生物学、化学携手前进。让我们能过上节约能源、节约资源、减少污染、增进健康的幸福生活。我个人还盼望在 21 世纪我国在认识能力的工具方面也能赶到世界前列。

## 曾呈奎



1909年6月出生于福建省厦门市灌口镇。1931年毕业于厦门大学植物系，获理学士学位，1934年毕业于广州岭南大学研究院，获理学硕士学位，1942年获美国密执安大学理学博士学位，1942~1943年任美国密执安大学 Rackham 博士后学侣，1943~1946年任美国加州大学 Scripps 海洋研究所副研究员。1946年底回国，任山东大学植物系教授、主任兼水产系主任。1950年起任中国科学院海洋研究所及其前身海洋生物研究室、研究所研究员、副所长、所长，1984年起任名誉所长。1980年当选中国科学院院士，1985年当选第三世界科学院院士。1987年被美国俄亥俄州立大学推选为荣誉科学博士。第三~八届全国人大代表，山东省第五~七届人大常委会副主任。现任山东省科协、侨联名誉主席、民盟中央参议委员会常委、中国海洋湖沼学会、中国海洋学会名誉理事长。现任中国孢子植物志编委会主任。长期从事海洋生物学特别是海藻生物学研究，先后发表学术论文260余篇，编写专著9部，研究成果获国家及院部委多项奖励。

## 展望海洋生物学

曾呈奎

近年来,有关单位的科技人员对中国对虾、长毛对虾、刀额新对虾精子的结构进行了比较细致的研究,确定中国对虾及近似种的精子无尾、不能移动、由球形的球状体和钉状的棘尖构成,提出了用美蓝、伊红或中性红染液着色情况来判断、鉴别对虾精子死活的简便方法。对虾多在夜间产卵受精,有关科技人员采用光周期控制及其他措施,达到人工控制雌对虾在白昼产卵、受精的目的。

染色体的研究在对虾和紫菜中进行了工作。有关科技人员对13种对虾类进行了染色体的研究,确切地掌握了每个种的染色体数目。对几种紫菜的染色体的研究也确切地掌握了每个种的染色体数目,还找到了紫菜的减数分裂在壳孢子的第一次分裂,从而解释了同一个体具有两种颜色的现象。这项工作获得了中国科学院的奖励。

80年代,我们进行了大量的海洋生态学研究工作。在近海和海湾的综合调查研究方面,显著的特点是与环境保护和资料开发的密切结合。主要项目有全国海岸带和海涂资源综合调查研究,包括初级生产力、浮游生物、底栖生物、游泳生物和水文化学、物理海洋学的综合调查研究。以胶州湾和大亚湾为代表的综合海洋调查和生态资源调查研究,其内容大大超过了海岸带调查,取得了丰富、完整的系统资料。三峡工程对长江口的环境和生物资源影响的调查研究,取得了该水域各类生物和海洋物理、化学、地质的综合资料。南沙群岛的调查研究和南极海域的调查研究也积累了宝贵的资料。

近10年来,海洋生物学工作者的主要力量放在与生产建设和社会经济发展有关的科学技术的研究方面。新中国成立以来,水产生产有了长足的发展,从1950年的不到100万吨增长到现在的1300多万吨,处于世界第一位,其中养殖生产的产量约占一半,海产养殖为160多万吨,而1950年产量只有1万多吨。这100多倍的增产应当归功于海洋生物研究和水产生产工作。

新中国成立后,第一种水产品获得重大发展的不是动物而是一种海藻即海带,70年代曾高达250,000吨干品,近年产量已高达300,000吨干品,栽培方法基本上仍是五六十年代的成果。对海带的育苗方法在80年代已提出新方法,可以免去长达4个月的低温育苗,但目前还没有得到应用。第二种海藻是紫菜,现已生产1万多吨干制品。紫菜育苗技术已经过生物技术的改进,可以免去长达6个月的丝状体育苗,缩短了育苗时间,但仍因有一些问题没有解决,尚未应用。此外,裙带菜、江蓠、麒麟菜、石花菜和红毛菜等海藻虽已在生产,但问题还不少,需海洋生物学家进一步研究。

80年代两种微藻的研究、生产是新兴事物,这就是盐藻和螺旋藻。80年代以前微藻的培养已大量进行,但只作为动物的饵料,但盐藻和螺旋藻是作为直接生产的对象而培养的,它们的生产是用室外大水泥池培养的,盐藻是为了提取β-胡萝卜素而螺旋藻含有大量的蛋白质(高达70%)和氨基酸。盐藻已在天津塘沽进行,螺旋藻则在广东和青岛等地试验,广东的3000平方米生产池已生产了大量的螺旋藻,平均日产量超过每平方米10克。

海产动物已投入生产的有贝类、虾类和鱼类。最早投入生产的贝类是贻贝(海红),70年代已解决了贻贝的育苗问题,现又成为培养对虾的饵料,年产量已达到50万吨,但在科学技术上仍采用70年代提出的方法。70年代

本地的栉孔扇贝已投入生产，80年代引进了美国大西洋沿岩的海湾扇贝。通过几年的努力，人工育苗成功，发展了一套适宜于在我国北方和华东沿海的育苗和养成技术，并达到了亩产3吨的水平。目前，我国的海湾扇贝年产量已达7~8万吨，形成了一种新的养殖事业。这种扇贝生长快速，当年春天采苗、育苗，秋天即可养成收获，比本地种生产周期缩短半年。此外，珍珠贝的研究也取得了良好结果。

对虾的人工养殖研究在50年代后期和60年代初期就得到了良好发展。1979年起，开始进行生产，以后几年，差不多每年以一倍增加产量。现已达到年产20万吨的水平。这10年来，主要是研究优良新品种的培育，研究对虾的人工植精，可以避免自然交配，研究人工控制雌虾的成熟产卵时间，这两项研究已获得初步成功。

随着对虾、扇贝养殖生产的大规模发展，养殖生物病害的调查研究越来越受到重视，目前已发现了几十种流行的疾病，研究人员对其中较严重的、危害较大的疾病病原、病理、流行病学和病症进行了全面的研究，提出防治方法。

对虾的另一项工作是海湾里的资源增殖。这项工作首先在胶州湾里进行，以后又在浙江的象山湾和福建的东吾洋，利用育苗放流的方法。胶州湾及邻近海域连续数年对虾产量都超过500吨，而以前没有对虾渔业的浙、闽近海也形成了具有一定生产规模的对虾渔业。

早在六七十年代，鱼类养殖的研究就开展起来了，是从半咸水鱼类如梭鱼、罗非鱼开始的。近10年来，真鲷、黑鲷、尖吻鲈、中华乌塘鳢、东方大黄鱼的成熟、产卵、受精和种苗培育研究，都取得了显著的进展，发展了人工育苗和池塘、网箱养殖技术。石斑鱼人工催熟和育苗研究，近年来也有显著进展。但从总体上看，海洋鱼类的繁殖生物学和生态特性的研究以及育苗和养殖技术的发展较之淡水鱼类的研究尚有较大差距。

此外，为了鱼、虾的培育，饵料生物，如微藻类，卤虫、轮虫的研究也提到日程上来了。

根据10年来研究和生产的情况，我们认为，今后10年海洋生物学工作者的任务最少有下列几项：

- 1、完成海洋生物志的编写，调查及保护海洋生物的多样性。
- 2、继续基础理论如比较光合作用，发育生物学的研究。
- 3、我国是海藻生产大国，但产品质量差，市场价格低。必须通过加工和生物技术提高质量，国际市场需要的种类，如裙带菜和江蓠，则需提高产量。
- 4、我国是贝类生产大国，开展扇贝遗传研究，培育三倍体和牡蛎、蛎子及其它蛤蚶类的全人工养殖。
- 5、我国是对虾养殖大国，但产苗率太低，产品质量差，污染突出，必须通过研究加以解决。
- 6、水产养殖最终必须鱼类挂帅。鱼类养殖问题较多，现在已经到了必须解决的时候了。我们过去研究是以养殖便宜的鱼类为主的，但一直未能得到应有的发展。现在，我们应当以市场上的需要为主来考虑问题。此外，许多非鱼类的养殖、栽培也需要考虑，如裙带菜是出口价值相当高的品种，也必须加以考虑。
- 7、对有基础的养殖种类，采取生物技术研究它们种苗的培育和病害及其防除研究。进行海洋生物转基因研究，探索外源基因的整合、表达，培育快速生长、具抗寒和抗热特性的海洋生物品种，建立基因文库。
- 8、随着鱼、虾、贝、藻及珍贵动物的养殖，各式各样的病害必然产生。必须对这些病害给予应有的研究，以减轻损失。

## 谢家麟



1920年8月8日生于黑龙江省哈尔滨市。加速器物理学家。1943年毕业于燕京大学物理系。1947年获美国麻省理工学院硕士学位。1951年获美国斯坦福大学博士学位。1951~1952在奥里根大学任教。

1952~1953在斯坦福大学微波与高能物理实验室进行研究。1953~1955在芝加哥任直线电子加速器建造负责人。1955年至今，先后在中科院高能物理研究所（前原子能研究所）任室主任。加速器部副主任，八七工程加速器总设计师，高能物理所副所长，北京正负电子对撞机工程经理等职。现为该所研究员，北京自由电子激光课题负责人，加速器学会名誉理事长。

1950年代初期，在美国领导研制成功当时世界上能量最高的医用电子直线加速器。60年代初领导研制成功我国脉冲功率最大的速调管和可向高能发展的电子直线加速器等，均获全国科学大会的重大贡献奖。同期还领导研制成功中子管任务，为国防做出了贡献。1981~1986领导北京正负电子对撞机工程的设计，预研和建造。由于在该工程作出的贡献，获国家科技进步奖特等奖，排名第一。此后，领导国家高技术863北京自由电子激光的研制。于1993年底建成出光达到饱和，成为亚洲第一台红外区自由电子激光。40年来，通过加速器有关领域的研究，建造和人才培养，为我国实验物理，加速器物理和技术的发展，起了重要的推进作用。

1980年当选为中国科学院院士。

## 自由电子激光的研究及应用前景

谢家麟

当电子（或其他带电粒子）的运动状态或周围边界（介质、金属）发生变化时，可以产生电磁辐射。例如：在储存环中做圆周运动的电子产生同步辐射；沿光栅运动产生 Smith-Purcell 辐射；沿晶体的晶轴作螺旋线运动时产生沟道辐射；通过介质时产生切仑克夫辐射；通过不同介质介面时产生渡越辐射等等。这些辐射一般是非相干的电磁辐射，强度与产生辐射的电子数成正比。但如利用反馈机制使发生的辐射与电子相互作用，使电子的空间分布发生变化，聚集在较辐射场的波长为短的尺度内（群聚），则产生的辐射将成为相干的受激辐射，不但强度将随产生辐射的电子数的平方而增加，并且可以提供相位的信息（可用于全息术、谐波产生、混频等等），应用的领域也就大大扩展了。

### 一、自由电子激光（FEL）发展的背景

如何达到上述目的，使用电子产生相干辐射，是科技领域长期探讨的课题。从二次世界大战时期发展起来的微波管，如磁控管、速调管、行波管等等，都可以产生相干电磁辐射，并且一直在向短波长、高功率的方向推进。但它们受结构尺寸的限制，很难将波长缩短到光波波段。60 年代发明的常规激光基于原子、分子的能级跃迁的原理，是相干光源的划时代的发展，它推动了人类的科学研究和生产活动，做出了极为重要的贡献。但它一般说来不便调变波长，而且功率受工作物质发热的限制。同步辐射利用电子作圆周运动而产生连续谱的辐射，但广谱辐射经分光后，单色强度却大受限制，而且是非相干光。同步辐射装置几十年中经历了三代的发展，由于它有广泛的应用，世界上兼用和专用的装置已有 70 余台，总投资估计逾 10 亿美元。为了更好地满足应用的要求，它正在向更短脉冲、更好相干性、更高耀度的第四代发展。下面将要介绍的自由电子激光（以后简称 FEL），正是具有这些特征的崭新的光源，所以 FEL 也被称为第四代同步辐射。

在光波范围工作的 FEL 多数使用射频电子直线加速器提供电子来源。它的工作原理可简述如下。由加速器产生的高能电子经偏转磁铁注入到极性交替变换的扭摆磁铁中。电子因做扭摆运动而产生电磁辐射（光脉冲），光脉冲经下游及上游两反射镜反射而与以后的电子束团反复发生作用。结果是电子沿运动方向群聚成尺寸小于光波波长的微小的束团。这些微束团将它们的动能转换为光场的能量，使光场振幅增大。这个过程重复多次，直到光强达到饱和。作用后的电子则经下游的偏转磁铁偏转到系统之外。以上是 FEL 产生过程的比较形象的描述。从物理学角度看，这个过程就是电子对辐射的受激康普顿散射的结果。这里一个最为关键的环节是电子要聚集成许多短于光波波长的束团。因为，只有这样它的辐射才是相干的，而 FEL 的技术难度，恰恰也正在于此。电子束性能必须十分优越（能量分散小，方向分散小，时间稳定度高……），同时流强尽可能大，才能达到要求，显然，FEL 工作波长愈短，技术难度也就愈大。

由上可见，FEL 这个新兴的高技术领域，一方面技术难度很大，对研究者是一个严重的挑战；另一方面，它的特点表明它有广泛的诱人的应用前景，

是一块未开垦的处女地。

## 二、FEL 发展过程及概况

FEL 的发明是在近 70 年来许多有关的研究工作的基础上产生的。首先，1927 年施洛丁格 (Schrödinger) 就指出了利用受激康普顿散射产生相干电磁辐射的可能性。1933 年卡皮查 (Kapitza) 和迪拉克 (Dirac) 提出了使用低能电子观测受激康普顿散射的实验方法。1968 年潘特尔 (Pantell) 等人建议使用电子散射微波，以产生相干辐射，并在作用区两端，使用反射镜组成光腔。但理论计算表明，在当时微波能得到的功率密度下，增益过低，不可能产生受激辐射。另一方面，1951 年莫茨 (Motz) 等人在斯坦福大学发明了扭摆磁铁，并让高能电子通过，产生了非相干的电磁辐射。1960 年，菲利普斯 (Phillips) 把扭摆磁铁使用在一种叫作 UBITRON 的微波管上，其工作原理与 FEL 基本相仿。但他使用的是低能电子，最短波长只做到 6 毫米。加之常规激光也是在当年发明的，故他的研究成果，并未引起应有的重视。

此后，人们进行了大量理论研究，派尔莫 (Palmer) 提出了利用加速器产生相对论性的电子束，以便利用洛仑兹效应缩短辐射的波长。1971 年马迪 (Madey) 首先认识到，如果使用扭摆磁铁，代替潘特尔方案中的微波，就可以产生每平方米高达京瓦的功率密度，并获得足够的增益。在这个新认识的基础上，马迪和他的同事们开展了实验研究，利用斯坦福大学的超导直线加速器的束流与 CO<sub>2</sub> 激光同时通过扭摆磁铁，观测到了激光信号的放大。此后，又经过一年的努力，他们终于在 1977 年研制成功了世界上第一台红外谱区的 FEL 振荡器。红外 FEL 振荡器出现之后，引起科技界很大的重视，各科技先进国家纷纷投入研制，都首先在各自己有的，能提供电子束流的加速器上，开展研究，使用的加速器计有脉冲产生器，静电加速器，感应直线加速器，射频直线加速器（包括超导直线加速器），电子回旋加速器和储存环等。据统计，迄今各国共建成 FEL 装置 40 台以上，其中射频直线加速器 19 台，感应直线加速器 11 台，储存环 7 台，静电加速器 2 台，电子回旋加速器 2 台。美国，欧洲各约有 14 台。正在建造的 FEL 约为 40 台，拟建的约为 10 台。

通过十多年来的实践，人们发现并不是所有建成的装置都能产生 FEL，约有一半光波波段的装置未获成功，主要原因是，如前所述，FEL 对电子束流的品质，如能散度、发射度、流强、稳定度等，都有十分苛刻的要求，已达当前加速器性能的极限。如果使用的加速器产生的束流品质不够好，则根本无法满足出光要求。现在已经明确，射频直线加速器是产生光波波段 FEL 的最佳选择。世界上目前有 6 台 FEL 用户装置，其中 5 台是使用射频直线加速器提供电子束流的。因此，本文讨论都以射频直线加速器产生的 FEL 为主。

我国在 1988 年开展了“北京自由电子激光”的研制，1993 年 5 月观测到了受激辐射，12 月达到饱和，成为继美、欧之后，亚洲的第一台出光的红外自由电子激光。说明我国在这尖端科技领域，已达到很高的水平。

FEL 的出现，在世界科技界引起了很大的轰动。这是可以理解的。相干辐射有多方面的重要应用，而红外和 X 光谱区，还缺少合用的相干光源，FEL 提供了填补空白的可能。

### 三、FEL 应用领域及发展前景

FEL 出现至今，只有 10 几年的历史。与同步辐射相比，尚属青年时期，考虑到同步辐射应用的开拓，用了几十年的光阴，可见 FEL 真正在实用中发挥作用，应是下一世纪初的事情。表 1 中给出 FEL 可能应用的领域，以供参考。

表 1 自由电子激光应用前景

材料科学（凝聚态物理、表面物理/化学）：

1. 半导体材料：

a) 窄能隙导带不连续性研究

b) 半导体动力学过程（双光子诱发载流子动力学等）c) 非晶半导体薄膜光致发光谱

d) 超晶半导体量子结构的研究

e) 半导体毫微结构电性研究

2. 非晶吸收振动谱

3. 超导体库珀对形成及寿命，高温超导材料能隙研究 4. 辐射与物质的非热作用机理

5. 低耗光纤材料探索

光化学：

1. 高分子聚合物研究

2. 分子束化学动力学

3. 分子振动激励

4. 多光子离解

5. 诱导性化学反应

6. 同位素分离

生物物理：

1. 蛋白质能量传输机理

2. 生物分子动力学

3. 生物聚合物 Ps 光谱

4. DNA 结合能的测定，以及剪、裁、粘接

5. 细胞组织和大分子生命过程

医学：

1. 激光医疗机理

2. 光动力学治癌

3. 激光手术刀

工业：

制药；纤维处理；切割、加工、光刻

军事技术：

军用探测、跟踪装置的定标与破坏效应研究能源：

等离子体加热、等离子体诊断；激光聚变；能量传输高能物理：

束流控制技术、射频源（双束加速器）、激光加速器

由于篇幅所限，我们不能对表中项目逐条讨论。这里只在对基础研究、能源开拓、医疗保健、工业生产四个方面的展望略加展开。

（1）基础研究 波长为几个纳米的可调、高耀度的相干软 X 光将会出现。

它对生命科学、材料科学、微电子学等的发展，将产生巨大的推动。同时，高强度的相干电磁辐射，将为能量在兆兆电子伏左右的下一代线型正负电子对撞机提供能源。另外，用强激光加速带电粒子也将实现。使加速场强由当前每米几十兆电子伏提高到几千兆电子伏，大大缩短直线加速器的长度，这两方面都将进一步推动“基本”粒子物理的发展。

(2) 能源开拓 在为实现可控聚变反应堆而进行的磁约束聚变研究中，需要使用波长为毫米量级的强电磁辐射对等离子体加热；在惯性聚变研究中，需要波长为微米左右的高功率短脉冲辐射来压缩氘氚小球产生高温、高密度热核反应；这两者都将可能由 FEL 提供。同时，FEL 作为向空间远距离走向传送能量的手段，它在军事和民用都将发挥作用。

(3) 医疗保健 继断层 X 光、电子直线加速器放疗、小型回旋加速器生产医用短寿命同位素、核磁共振和正电子断层等物理设备成为新一代大医院的典型设施之后，鉴于人体不同部位的组织对不同波长和时间结构的电磁辐射的吸收、散射的机理不同，FEL 也将在医院普遍使用，作为手术和治疗的手段。

(4) 工业生产 FEL 的短波长、高强度和可调性，使它适用于大规模集成电路的直接扫描刻蚀、器件的微加工和化学试剂的生产。

为了实现以上的一些目标，FEL 领域还有大量的工作有待完成。下面几个方面，可以说是 FEL 当前研制工作的重点。

1. FEL 物理研究。其内容是进一步了解能量转化的机制，束流品质的限制等问题，以达到提高总体性能的目的，如超辐射现象、光导效应、调频光脉冲、边带抑制、谐波利用等。

2. 发展 FEL 应用。美国斯坦福(Stanford)大学、万德比特(Vanderbilt)大学、杜克(Duke)大学、荷兰 GELIX 装置，法国 CLIO 装置等在红外谱区工作的，使用射频直线加速器的 FEL，都已先后向用户开放，推动应用研究的开发。

3. 简易 FEL 的研制。要使 FEL 得到普遍的应用，必须先使结构简化，运行可靠，而且造价低廉。美国洛斯阿拉莫斯国家实验室和日本某些实验室正在进行这方面的工作。

4. 向更短波长推进。当前 FEL 波长的前沿是可见光，美国布鲁克海文国家实验室(BNL)正在研制紫外 FEL；使用斯坦福直线加速器中心的加速器进行 X 光 FEL 研究的方案正在论证中。

5. 向高效率，高平均功率推进。一般 FEL 的电子-光转换效率为千分之几，但如采取特殊措施，如渐变扭摆磁铁，能量回收等，则效率可达十分之几，这就使高功率 FEL 有可能实现。美国波音公司实验室和法国原子能委员会的研究所都进行了这方面的工作。但考虑到高功率 FEL 的技术困难和费用庞大，可以预言它的进展将是缓慢的。

## 后记

邓小平同志总结了多年来世界经济发展的新趋势和新经验，提出了“科学技术是生产力，而且是第一生产力”的科学论断，丰富和发展了马克思主义关于科学技术是生产力的学说，揭示了科学技术对社会经济发展的重要作用。

为了配合国家有关部门和各科研单位、大专院校制定“9·5”及“跨世纪”科学技术研究规划，《中国科学报》从1992年底开辟“院士谈21世纪”专栏，组织有关专家、中国科学院院士撰写有关这方面的文章，见诸报端后，反映强烈。利用报纸作为学科发展战略的研讨，缺陷也是明显的，其主要表现是受篇幅的限制较大，院士们的文章大都在6000~10000字左右，而见报的只有3000~4000字，尽管我们作了很大的努力，但毕竟是忍痛割爱，文章中很多精采部分被删去了，这不能不说是一个遗憾。在编辑过程中，我们逐渐感到这么多丰富的资料要是将它整理出来，不仅对专业读，而且对广大干部、青年读者了解21世纪科学技术发展会有所帮助，在这种情况下促使我们萌生了编写一本较为系统、全面介绍21世纪科学技术发展的专著的想法。因此，在编发报纸文章过程中，我们即投入了另一项任务，请作者修改、补充已发表的文章，又有针对性地邀请一些学科领域的院士撰写文章，以弥补学科间的不平衡。

在短短几个月的时间里编辑出版这样一本书，其最终完成取决于各方面的共同努力，我们首先要感谢撰稿的各位院士，是他们在繁忙的科研工作中，抽出时间撰写文章，按期交稿，并给予了我们的最大支持。我们还要感谢全国人大常委会副委员长严济慈、卢嘉锡、吴阶平，中国科学院常务副院长路甬祥，国家自然科学基金委主任张存浩，中国科学院院士黄昆、金善宝先生担任本书的顾问。此外，卢嘉锡、吴阶平、周光召、金善宝院士在百忙中分别为本书题写书名、题词或作序，编者愿借此机会再次表示感谢。

由于时间仓促，书中各学科比例尚不平衡，写法、风格也不一致，恳请读者批评指正。

在本书出版之际，编者衷心希望本书能为繁荣我国科学技术事业作出它应有的贡献。

李士

1994年12月30日

