

学校的理想装备

电子图书·学校专集

校园网上的最佳资源

潜科学丛书

-- 科学前沿集



绪 论

人类认识自然（包括人自身）是在科学的名义下进行的。本质上说，科学就是训练有素的专业集体对于混沌的、强定向的感知素材的种种序化，这类序化集构成人类对于自然的反映与认识。很明显，人类对于自然的这种科学认知，包含着相互关联的两个本质要素。一是科学的观测与实验，它把人的感知触针“锐化”与“延伸”，插向一切可能的领域，从而不断获取新的自然信息；二是科学的理论思维，它具有序化庞杂实验信息的本性，从而不断产生覆盖各种经验领域的科学理论。反过来，内涵深、外延广的新理论，又预示着更新、更隐蔽的观测与实验，……，这个过程不断进化，永不完结，科学的生命力就在于此。

科学中的疑难问题，是科学迄今尚未征服的领域。对于疑难问题的探索求解，从来都是科学研究中最活跃、最富生命力的部分，是科学活动的本性所在。科学中的疑难直接相关于科学理论本身的结构及其实际的发展水平。当科学信念与科学事实发生冲突时，就出现科学中的疑难。这不一定只限于理论的推论与实验事实直接矛盾这一种情况。当一个深信其成立的命题还未得到理论的严格证明时，它也会成为人们为之困惑的疑难问题。

科学中的各种疑难是具有不同的价值的。就是说，有的疑难问题的探索求解对于一个学科的发展至关重要，有的则不那么重要。然而，辨认出一个学科中的关键疑难并非易事。

疑难可以来自实验方面，也可能来自理论方面。因此，要判断一个疑难的性质，往往需要从两方面做细致的审核工作。一是看其实验方面有无差错？考虑能否在更高的精确度上重现实验，或能否设计新的实验方案作对照核实。二是分析理论有无差错？考虑能否改进演绎和计算的方法，或理论结构是否自治。经过这样的检查与校正之后随即消失的疑难，叫做平凡疑难。如果实验事实是可靠的，理论又是自治的，可就是找不到理论与事实之间的吻合关系；或是理论演绎不出事实结果来；或是理论命题与实验命题直接抵触。这些情况对于科学工作者具有很大的吸引力。探索求解这些疑难的努力，或有助于深入揭示原有科学理论的甚为隐蔽的内涵，从而可能开辟理论应用的许多新前景，或有助探明原有科学理论的有效域边界。属于前一情况的疑难并非理论本身所固有，它的解决使得原理论更加精细化。因此，这类疑难本质上是平凡疑难。属于后一情况的疑难则为原有理论所不固有，叫做非平凡疑难，它的探索求解将导致科学理论的根本变革，促进崭新理论的诞生。

读者将会看到：在科学的王国里不仅存在上述性质各别的、孤立的疑难问题，而且存在着更为复杂的疑难交叉、疑难串联、疑难并联与疑难嵌套等情况。

本书属潜科学丛书之列，定名为《科学前沿集》。全书选用了24篇文章，试图为读者提供一些观察窗口，去窥视科学前沿的现状。全书涉及到天文、地学、气象、物理、化学、数学、生物、医学、人工智能等学科。其中以物理文稿最多，生物学次之。这反映了当今物理学在科学前沿中取领先与基础地位以及生物学最为活跃的现状。

纵观自然科学的发展史，学科的分化与学科的综合两者总是相辅相

成、竞相前进的。可是，20 世纪以前科学的基本特点是分门别类地对自然进行考察，这种考察是建立在对于科学对象的可分性假设基础之上的。然而，20 世纪以来的科学，则是在揭示自然界的整体性特征中发展起来的。量子理论揭示了量子系统或量子现象的整体性，这种整体性已为贝尔不等式的否定性实验所佐证。在现代科学技术的名义下，再也找不到一门门孤立的、分隔的学问了。相反，现代科学研究中的创新，往往出于科学整体化的进程之中。现代化学在量子力学那里找到了自身的理论基础；现代生物学原则上把生物学、化学和物理学沟通了起来；基本粒子物理学与现代宇宙学的新近发展，走上了合流的道路。这一切表明：现代科学已经进入了这样的阶段，即把自然界的渺观、微观、宏观（生命在此层次内）、宇观和胀观等五个层次〔注〕连成一个整体进行考察。离开整体联系去孤立地阐述某一现象的学问，已经不够登上现代科学宝殿的资格了。它们只是潜科学（相对于公认的显科学而言）或前科学（相对于成熟的常规科学而言）的成分。但是，这些成分是极为广大的知识海洋，构成了现代科学这个有序的、动态的、整体化的开放系统的生长环境。

现代科学的整体化，不仅表现在自然科学内部各学科之间的渗透与综合和生长新的边缘学科，而且表现在自然科学与社会科学的交流与统一。科学的哲学就是在这种更大范畴的现代科学整体化进程中形成的体系和追求的目标。它要科学地回答世界的本性、科学（即意识）的本性及它们之间的关系等根本性问题，要在更高的水平上研究科学的本体论、认识论与方法论问题。现已表明：马克思主义哲学是同现代科学自身合理发展所导致的整体化体系相容不悖的。不仅于此，西方科学哲学中各流派曾发挥过积极作用的观点，都可以在马克思主义哲学体系中找到其受制于其他脉络因素的（context dependent）合法地位。

编辑这本书为一种强烈的动机所驱使，那就是，我们认识到沟通信息的重要性。我们以为：对于长期从事某单一学科教学与研究工作的同志来说，如果能了解到上述背景状况，明确自己是在整体科学结构中哪个层次上同哪些学科相关地工作着，那将是件大有裨益的事。对于青年科学工作者（包括大学生与研究生）来说，如果能够跨越自己学科边界去试图了解整个科学前沿的现状，这对于培植全方向的科学感知能力，也是大有好处的。这就是我们为什么要把众多学科的前沿论题组编到一本书中来的原因。

科学前沿是随着旧有疑难问题的解决和新的疑难问题的产生而不断向前推移的。因此，这本书必然带有时代的局限性，终将会被贴上历史的标签。然而，书中提到的许多问题却具有非常根本的性质，它们很可能顽固地变换自己的形式，不会轻易地在科学前沿中消失；有些基于坚实科学基础所作出的哲理概括，更会在更长的历史时期中发挥其积极作用。

细心的读者将会发现，在不同的学科领域中，撰稿人是在不同水平上提出疑难问题并展望未来的。这是各学科发展不平衡的必然表现。在尚未高度发展的学科领域中，只能定性地提出疑难事实和粗略地描述可能的解决方案；而在高度发展的学科领域内，疑难问题本身就带有高度的理论性质，它们的求解往往是从一个复杂的理论模型跳到另一个复杂的理论模型。为了便于读者阅读，对比较复杂的理论作了简化处理，努力做到学术性与可读性兼容；同时，在编排上尽量做到按类分块、难易搭配和由浅入

深。

本书撰稿人全是在高校与科研机构工作的教育与科学工作者。他们为了实现本书的宗旨作出了巨大的努力。在此，笔者对于他们的大力支持与通力合作表示衷心感谢。

钱学森同志读了本序初稿，并提出了宝贵的建设性意见。吴为平、王身立两同志参加了本书的部分统稿工作。在此一并致谢。

书中可能出现一些不足之处甚至错误，我们殷切期望读者对此提出批评意见。

洪定国

1986年9月13日于长沙

〔注〕在1985年6月5日钱学森同志给笔者的信中，他对于五层次新宇宙观作了如下描述：

	典型尺度	过渡尺度	例
(一) 胀观	10^{40} 米= 10^{16} 亿光年	3×10^6 亿光年	
(二) 宇观	10^{21} 米= 10^5 光年	3 亿公里 (太阳系)	银河星系
(三) 宏观	10^2 米	3×10^{-6} 厘米 (分子)	
(四) 微观	10^{-17} 米= 10^{-15} 厘米	3×10^{-25} 厘米	现物理实验下限
(五) 渺观	10^{-36} 米= 10^{-24} 厘米		Higgs 场

他强调：每从下一个层次升到上一个层次都是系统学。

苍茫大地，谁主沉浮？

——人类对于地壳运动问题的探索

一、沧桑之变

“时过境迁。”这是中国民间的一句俗语，它既辩证地道出了某种时空关系，又生动地点出了地理环境随着岁月的推移而变迁的客观规律。我们人类居住的地球是一个多变的星球，它的一切都处于无休止的运动和变化之中，其中最为人们注目的是高山的崛起和大海的消长，这就是人们通常所说的沧桑之变。

沧海桑田在我国古籍中早有记载。春秋时期的《老子》一书曾有：“桑田变沧海，我为之添一筹，沧海变桑田，我又为之添一筹，忽已三千年矣。”这可以称得上是对地球的沧桑之变最早的描述。

世界之大，无奇不有。然而，无论天涯海角，人们对大自然变迁的认识却存在着惊人的雷同之处。阿拉伯也有一个相类似的桑田沧海的传说故事：“有一个叫季德滋的人，曾到过一个人口稠密的古老城市，五个世纪后，当他第二次经过那个地方时，发现繁华的城市荡然无存，原来城市所在的位置是一个大草原。又过了五百年，他第三次来到这个地方，发现草原不见了，那儿成了汪洋大海。再过五百年，他第四次回来时，发现湛蓝的大海已经变成一望无际的平原。”无论是中国的史料，还是阿拉伯的寓言，都说明人类对海陆变迁的认识在很早就开始了。值得提出的是，古代的一些科学家不仅指出了地球的沧桑之变，而且还为论证这种变化并探索引起地貌和地质变化的原因，进行了不懈的努力。公元1077年，我国北宋的科学家沈括在出使河北、沿太行山进行考察时，发现山麓石壁间“往往衔螺蚌壳及石子如鸟卵者，横亘石壁如带”，就大胆推断太行山乃是“昔之海滨”，由于大河、漳水、滹沱、涿水、桑乾诸河之泥沙冲填，使原来的海洋变为陆地。

稍晚一些，欧洲文艺复兴时期出类拔萃的科学伟人达·芬奇(Leonard da Vinci, 1452—1519)，也有类似的发现和论述。他在米兰主持开凿运河时，在深度不同的堆积地层中发现含有海生动物贝壳的岩层，并确认这些贝壳最初是分布在海里的，后来大海被淤泥“填满”了。他根据当时所能掌握的事实，认为山和海并不是老在它们现在所在的地方，同时还认为，山脉也不是骤然拔海而出的，海陆轮廓的变化是漫长的地质历史过程。达·芬奇关于海陆变迁的论述在当时来说，可算得上难能可贵。但是，引起海陆变迁的神奇力源究竟是什么？他并没有揭示出它的真谛。

我国唐代诗人白居易虽然不是一个科学家，但是，他的动人诗篇对引起海陆变迁的动力却道出了一点端倪，他写道：

白浪茫茫与海连，平沙浩浩四无边，
暮去朝来淘不住，遂令沧海变桑田。

在这里，白居易显然看到海潮的这一巨大的自然力，“暮去朝来”不仅能破坏海岸，令陆变海，还将冲刷下来的泥沙搬运、堆积，遂使沧海变桑田。

海浪确实是一种引起地球表面变化的自然力，它可以使海岸前进或后退。然而，平地生高楼，使山脉拔地而起或使地壳深陷为盆地，断裂为深

谷，又是什么力量支配的呢？也就是说，苍茫大地，谁主沉浮呢？

二、探根溯源

探索地体起落和沧桑之变，换句话说，即探索地壳运动及其规律，这是一个科学难题。为了揭开它的奥秘，许多地球科学工作者继往开来，为此贡献了自己毕生的精力。

早在 1788 年，英国地质学家赫屯(Hutton, 1726—1797)就曾在他的名著《地球理论》一书中指出：“地下火”是使山脉崛起的内在动力。他认为，地球内部的“地下火”——炽热的岩浆侵入地壳或溢出地表，是使地壳隆起的真正原因。这就是最早对地壳运动问题作出解释的“隆起说”。这一假说从火山活动这一常见的现象出发，以简单、明了的模式探讨了引起地壳运动的原因。但是，限于当时的科学水平，它毕竟是肤浅的，甚至与某些事实相矛盾。因为如果地层的隆起是由于岩浆的活动，那么必然是上覆地层在先，岩浆活动在后。然而某些地区的花岗岩体却老于上覆的沉积岩层，这一现象就无法解释。随着与之相矛盾的地质事实的发现，赫屯“隆起说”像昙花一样，稍现即逝了。

1852 年法国地质学家鲍曼(Elie de Beaumont, 1798—1874)提出了又一种新的学说——“收缩说”。这一学说是建立在当时盛行的拉普拉斯地球热起源基础上的一种假说，认为由炽热星云冷凝形成的原始地球，由于它不断冷却散热而不断收缩，因为散热最快的是地球的外部，因此在地球的外面首先形成一层固体外壳。但是，地球的内部散热比它的外部慢，所以当外壳固结以后，它的内核还继续冷凝收缩。这就好像先是一个大胖子穿了一件得体的外衣，后来胖子突然瘦了下来，这时他原来的那件外衣就显得太大了。这样，地壳由于失去了内核的支撑，渐渐向里压缩，整个地球表面缩小，岩层受挤压，形成褶皱。因此，有人把收缩的地球比作干瘪的苹果，上面布满了皱纹，而阿尔卑斯山、喜马拉雅山、落机山、安第斯山等就好似一条条大的皱纹。收缩说由于形象生动，用它来解释山脉崛起过程，颇能言之成理，所以在 19 世纪下半叶，一直占据着统治地位。

科学的实践告诉我们：一时得到多数人承认的理论，并不一定是科学的。一种科学假说究竟正确与否，往往还需要接受实践的检验和时间的考验。按照“收缩说”的观点，由于地球的收缩，在地壳内应长期存在着一种均衡影响整个地壳的总压力，它将对地壳运动起着决定性的作用。然而，人们在广泛的地质调查中发现，地球表面上各个地区地壳运动的进程并不完全一样，有些地方岩层已经发生了强烈的褶皱，有些地方岩层却“纹丝不动”，保持着原始状态。另外，从整个地质历史来看，地壳运动也是有时激烈，有时平静，并不是持续不断地进行。这些客观事实都使收缩说遇到了一定的困难。但这还不足以使收缩说达到“山穷水尽”的地步，因为只要对它的内容作某些修正，便仍适用于解释地壳运动。1875 年休斯(E. Suess, 1831—1914)就作过这种尝试，他把全球分为“刚性地段”和“柔性地段”，由于地壳的性质不完全一样，对于作用力的反馈也不相同。因此，他认为当地壳收缩时，刚性地段本身不仅不发生什么变化，相反，对柔性地段还起到一种钳制作用，它不仅挤压柔性地段，而且对柔性地段发生的褶皱的轮廓、形态、位置都起着显著的控制作用。这样的解释，表

面上看还可以言之成理，但它的论点毕竟是脆弱的，经不起地球物理学家的定量分析和新理论的反驳。有人曾对“收缩说”视为有力证据的阿尔卑斯山大推复体进行了计算，现在褶皱隆起的阿尔卑斯山宽度为 150 公里，如果把被褶皱的地层统统展平，其宽度可达 600—1200 公里。二者相比，说明仅仅由于阿尔卑斯山地岩层的褶皱收缩，就意味着地球的周边要缩小 3%。如果这样，就要求地球的温度必须冷却到大约 2400 。但是，地球上不只是一条阿尔卑斯山，还有比阿尔卑斯山更高的喜马拉雅山和安第斯山等。如果按照同样的比例收缩，地球的温度还要大大降低，而原来炽热的地球要叫它在如此短暂的时间内冷却到如此程度，显然是不可能的。这时，人们对地球的热缩模型开始动摇了，将信将疑的人也越来越多。

19 世纪末到 20 世纪初，放射性元素的发现，彻底动摇了“收缩说”的根基。根据放射性元素蜕变能产生大量热这一道理，有人认为地球不是在逐渐冷却，而是在不断增温。在地球内部有丰富的放射性元素（主要存在于地壳中），它在蜕变为其它元素时，可以放出热。据计算，在地球的历史中，仅那些中、长半衰期的放射性元素产生的热量，平均每年为 5 亿亿卡（ 5×10^{20} 卡/年）。这个数量，如果与地球通过各种途径每年所散失的热量的总和（地球内部经由地表平均每年向宇宙散失的热量为 2×10^{20} 卡/年，火山和温泉每年从地球内部带出的热量为 10^{12} — 10^{19} 卡/年）相比，还绰绰有余。实际上，地球获得热量还有其他途径，如地球转动热、重力分导热、化学反应热和矿物结晶热等等。因此，地球不可能由于冷却而不断收缩。恰恰相反，有人提出地球可能在膨胀。如果真的是这样，我们居住的地球表面将不是布满了“皱纹”，而是随着地球的膨胀产生许多裂缝，如东非大裂谷，我国的郯庐断裂带，北美的安德列斯大断裂等。如果把世界大洋裂谷也算在内，真可以说地球的表面到处都是“伤痕”。由此看来，地球不是在收缩，而是在膨胀。

从“收缩”到“膨胀”，一个否定一个。但是收缩说也并一无是处，膨胀说也不是尽善尽美。事实上，地球表面既有隆起的褶皱带，又有深陷的断裂谷。收缩说解释不了地球上累累“伤痕”，膨胀说也解释不了偌大的褶皱带，这二种学说都有片面之处。这说明科学家还没有完满地揭示出主导地壳变动的真正力量来自何处。

人们的认识来自实践，又随着实践的发展而不断深化。19 世纪下半叶至 20 世纪初，西方一些主要资本主义国家由于采用了先进技术，工业生产急骤发展，一些新兴的工业部门也迅速建立。在这种情况下，对于原料的需求进一步扩大，不仅要求对本国的矿产资源有更多的了解，而且还要扩展到国外，寻找更多的原料基地，于是极大地推动了区域地质研究工作的广泛开展，例如英国地质学家在印度、缅甸、非洲和澳大利亚；法国地质学家在非洲和印度支那；荷兰地质学家在印度尼西亚；美国地质学家在北美洲以及俄国地质学家在欧洲部分、中亚和西伯利亚等地的考察。通过这些考察，积累了除南极之外的所有大陆的地质资料，为研究陆地地质的构造、矿床的形成和富集规律提供了可能。在此基础上，人们加以概括综合，从而得出一些规律性的认识，一些新的地质理论应运而生。在相当长的一个时期内风靡全球的地槽说就是其中的一个。美国地质学家霍尔（J.Hall, 1811—1898）在北美进行调查时，详细地研究了北美的地层，发现美国东部的阿帕拉契山古生代浅海相地层厚度比相邻的美国中部平原同

时代的沉积厚约 10 倍，这一现象用过去的任何理论都是无法进行解释的。霍尔不愧是一位在古生物方面造诣很深的学者，他根据阿帕拉契山地层和古生物的特点，断定均为浅海相沉积。从表面的现象来看，浅海相沉积和巨厚的地层系列是不能相容的。这一情况之所以发生，是由于浅海相地层长期处于边沉积边下沉的过程之中。换句话说，阿帕拉契山在古生代是一个巨大的拗陷，它好似一个橡皮袋子，里面装的东西越多，这个袋子便向下拉得越长。无独有偶，美国另一位地质学家丹纳(J. DDana, 1813—1895)也注意到了这一地质现象，并赋予更明确的概念，命名为“地向斜”(Ceosyncline)，中文译名为“地槽”。从此之后，无论在什么地方，只要发现类似的情况，一些地质学家统统称之为地槽。例如，在欧亚大陆上有分界欧亚两洲的乌拉尔地槽、中国的天山地槽、以及祁连山地槽等等。霍尔的地槽理论显然是以主张地壳的垂直运动为其特点的。按照这一理论，地槽演化的前期以缓慢地下沉为主，这种下沉的力是由于不断集积的沉积物的负荷。那么，原来的凹槽又是怎样隆起为现在的山地的呢？那是由于地槽在下沉过程中所派生的水平力使地层受挤压而发生褶皱隆起为山地。这一学说因与许多事实相符，所以被广大地质学家接受，很快就成为风靡全球的一种大地构造理论。

地槽说以翔实的地质资料论述了地球上某些构造单元演化的历史，使人们对地壳运动的认识深化了一步。可是它只注意到了地壳的垂直起落，却忽略了地壳还存在着水平运动，因此不免有其片面的地方。特别是当一些地质学家把它奉为“圣典”，不加具体分析地到处生搬硬套，把局部得出的结论视为不可逾越的信条时，就走向了反面。事实证明，当地槽说在学术领域居于统治地位时，就因此而阻碍过科学的发展。

20 世纪伊始，可以说是地质学上一次大的转折，德国地质学家魏格纳(Alfred Wegener, 1880—1930)以极大的勇气冲破了长期占统治地位主张地壳以垂直运动为主的传统理论的禁锢，大胆地提出了地壳可以远距离水平移动的新理论——大陆漂移说。

他设想，在石炭纪后期（二三亿年前），现在地球上的所有大陆连为一体，构成一个原始泛大陆。在它的周围是一片海洋，称为大洋。后来，这个泛大陆瓦解分离了。美洲离开了欧洲和非洲向西漂移，越漂越远，中间形成了大西洋。非洲有一半脱离了亚洲，在向西漂移的过程中，它的南端顺时针方向略略扭动，渐渐与印度次大陆分离，中间形成了印度洋。南极洲、澳大利亚与亚洲分离，分别固定在现在的位置上。魏格纳还认为，地球上的山脉也是大陆漂移的产物。如纵贯南北美大陆西岸的科迪拉山系和安第斯山脉，就是美洲大陆在向西漂移的过程中受到太平洋玄武岩基底的阻挡，由大陆的前缘褶皱而成的。

魏格纳关于大陆漂移的设想，由于观点新颖，所以它一提出，就轰动了整个地质学界，有的为之鼓掌喝彩，有的激烈反对。持反对观点的人认为，魏格纳的假说完全出于空想，好像是在玩弄积木游戏，把几块大陆任意地摆来摆去，并劝说相信大陆漂移说的人“不要为他那华丽的文学体裁所麻醉。”

魏格纳确实是一位有点浪漫色彩的科学家，他思想敏锐，善于思考，而又富有创造精神，他曾四次去格陵兰探险，行进在冰天雪地之中。早年他和他弟弟还乘坐气球飘摇过海，创造了当时气球连续飞行 52 小时的记

录。但是，他创立大陆漂移说却不是出于毫无根据的空想。魏格纳提出大陆漂移说是受到大西洋两岸大陆轮廓的相似性的启迪。他在审视地图时，发现大西洋东岸的非洲海岸线凹进，形成几内亚湾，而大西洋西岸的南美巴西部分却向外突出，如果把两块大陆移动一下，可以很好地吻合起来。由此他浮想联翩，设想现在地球上的大陆过去可能是连为一体的，后来才漂移分开。魏格纳为了证实自己的想法是正确的，曾呕心沥血寻找各方面的证据。功夫不负有心人，从前人的研究成果中，他终于找到了地质、岩石、动植物和古气候等方面的资料，说明这些大陆过去的确是连在一起的。1915年，魏格纳终于发表了《海陆的起源》这部划时代的专著，系统地论述了他酝酿已久的大陆漂移的思想。当然，大陆漂移说也有不完善的地方。它在科学上遇到的最大困难是：大陆移动的原动力问题。魏格纳设想大陆漂移的原动力有二：其一是地球自转所产生的离心力。由地球自转产生的离心力有两个分力，垂直分力和水平分力。因垂直分力为重力所抵消，只有水平分力起作用，因水平分力指向赤道，所以漂浮的大陆向赤道移动。但是，有人对离极力作了计算，得出的数值太小，只有重力的几百万分之一。虽然魏格纳认为小的力如果长期起作用，也可使大陆移动。但多数人认为这样小的力要想把大陆移来移去是不大可能的。有一位科学家通过数学分析得出结论，为了满足魏格纳提出的位移，必须有大一百万倍以上的力。有人还指出，假定离极力能够使大陆移动，但对于形成褶皱山脉来说，这个力仍嫌太小。计算表明，离极力产生的褶皱山脉，在两极和赤道之间只能引起10—20米的高差。显然，高耸几千米的山系将无法形成。其二是天体引潮力。魏格纳认为太阳和月亮对于地球的引潮力是引起大陆向西漂移的原因。但这种看法也遭到许多人的反对。英国地球物理学家杰弗里斯(H. Jeffreys)从理论上证明这样的设想是不正确的。这样，由于原动力问题没有得到很好的解决，使魏格纳所设计的“大陆航船”搁浅了。难怪有人说，大陆漂移说在解释各种具体问题时生气勃勃，而谈到大陆漂移的动力时却软弱无力。有人还说：“大陆漂移说虽然从现象上把许多问题就像快刀斩乱麻似的理了一通，但若搞不清现象产生的原因，恐怕也难以进入近代科学的行列。”对于魏格纳来说，他并不是没有意识到这一点，尽管他力图去解决，但限于当时科学发展水平，终究力不从心。到了30年代，随着魏格纳在格陵兰考察中以身殉职，大陆漂移说在一派反对声中消声匿迹了。

大陆漂移说虽然暂时衰落了下去，但它在人们思想中点燃的“火种”却继续在燃烧。一些相信大陆漂移说的人仍坚持不懈地为探索大陆漂移的动力而工作着。问题的突破是由海底探测开始的。第二次大战以后，特别是50年代以来，由于海底探测技术有了飞快的发展，人们对覆盖着地球表面71%的海底世界有了更清晰地了解。人们发现，大洋底部和大陆一样，有高山峻岭、深谷杳冥、一马平川、万丈瀑布。特别是人们在大洋深处还发现了一些在大陆上不曾看到的地貌现象，如全球大洋裂谷系等。超声探测技术使人们了解到大洋底部有一个环绕全球，绵延7万公里的洋脊，它好像陆地上的山脉。但不同的是在大洋中脊上有宽8—30英里的特大裂谷，裂谷中汨汨地溢出炽热的熔岩，然后冷凝成为新的岩石，以后新的熔岩又不断涌出冷凝，把原来的洋壳向两侧推开。因此，洋底年龄一般都是大洋裂谷处最小，向两侧逐渐变老，排列井然有序，非常有规律。基于这

一新的事实，1961年美国普林斯顿大学的赫斯(H.Hess)和美国海军研究所的狄兹(R.S.Dietz)先后提出了“海底扩张”的观念。他们把新生而又不断扩张着的海底视为一个不停地运转着的传送带，大陆就好比坐在传送带上的乘客，随着它的转动而移动着位置。这一新发现和别具一格的“扩张”模式一拍即合。这正是魏格纳所梦寐以求的，真可谓“踏破铁鞋无觅处，得来全不费功夫”。这一理论后来又得到加拿大多伦多大学的地质学家威尔逊(J.T.Wilson)的热心支持。以后，美国拉蒙特地质观察所的艾萨克斯(B.Esacks)和法国海洋开发中心的勒皮雄(X.LePichon)等一大批学者在此基础上，又综合了其它方面的科学成果，提出了一个全新的理论——板块构造学说。由此可知，板块构造学说是在“大陆漂移说”的基础上发展而来的，它以“大陆漂移说”为先导，经过“海底扩张说”，逐步引伸而成为当前世界最盛行的一种理论。有人说：“大陆漂移”、“海底扩张”和“板块构造”是一个主旋律的三部曲，它们一脉相承，都主张地壳可以发生大规模的水平移动。大陆和海洋曾经历了多次“合久必分”“分久必合”的历史画面。

板块构造学说的建立是地球科学上的一次革命，它不仅以最新的科学成果解释了海陆起源和大陆漂移的动力这一疑难问题，而且对像喜马拉雅山的崛起、青藏高原的隆升以及太平洋西岸的岛弧、海沟等许多全球性的构造系统都作出了很好的说明。所以这一学说一经提出，很快就成为了最时髦的理论，并受到了绝大多数地质学家、地球物理学家的赞成。

此外，值得提出的是除了以上所述的各种关于地壳运动的理论之外，中国地质学者也有不少独到的见解和理论，著名地质学家李四光创立的地质力学就是一种。李四光另辟蹊径从研究中国石炭二迭纪地层和绵延全球的构造形迹入手，提出了地球自转速度的变化是发动地壳运动的主要机制。地球是一个旋转的球体，根据角动量守恒定律，如果地球转动惯量减小，它的角速度就要增大；如果地球的转动惯量增大，它的旋转角速度就要减小。在重力作用下，地球内部物质不断分异，重的物质向内部集中，轻的物质向上部扩散，这样就会引起地球转动惯量的减小，而使地球自转速度加快。相反，随着地球自转速度的加快，地球内部较重的物质又会乘机离心扩散，又导致地球自转速度变慢。当地球自转速度加快时，由离心力所产生的水平分力使地壳从两极向赤道挤压，所以形成了一系列雄伟的与纬度相平行的山脉。李四光的这一理论不仅有充足的地质证据，而且也得到模拟实验的证明。北京大学王仁教授根据古生物钟提供的地球自转的速率，用轴对称地球模型进行的分层计算表明，只要地球自转速率能够保持一亿年的时间，由离心惯性力所积累的应力就可以达到100公斤/厘米²的数量级，这样的力足以发动地壳运动。因此，我们研究地壳运动，绝不能忽视地球自转这一因素，否则，有许多现象就不好解释。

黄汲清教授在批判地吸收一百多年前欧美一些地质学家所创立的地槽—地台说的基础上，结合我国地质构造实际，系统地研究了我国天山、祁连山地槽发育的历史，提出了多旋回说。认为：地槽向地台的演化不是一次构造运动便能完成得了的，而是经历了多阶段即多旋回的发展和演变。这一理论已成功地运用于找矿勘探。

张文佑教授则在60年代初提出了一种新的大地构造理论——断裂断块说。他认为：地球的壳体并不是铁板一块，其中有稳定的地块，也有活

动性的断裂带，在地球自转所产生的水平作用力推动下表现为不同规模的左右错动和层间滑动。断块说重视地质历史和地质力学分析相结合，又吸收了板块构造说的新内容和运用了大量地球物理资料，从理论上解释了大地构造上的一些疑难问题，从而受到了国内外学者的普遍重视。

陈国达教授结合我国中、新生代地壳活动的实际，提出了一种关于地壳发展规律的新学说——地洼说。他认为：地壳演化过程中有一个阶段，既不同于地槽，又不同于地台，而是另具更为复杂结构的大地构造单元——地洼区。并用动定转化递进的观点来解释其演化。“地洼区”是继地槽、地台之后所提出的一个新的构造单元。这一新的构造单元是在我国丰富的地质资料的基础上和学者长期实践认识后提出来的，具有很强的生命力，并得到了一些国内外地质学家的支持。同时，许多国家在找矿勘探上应用了“地洼说”，并取得了成功。

张伯声教授在 50 年代末提出了一种波浪镶嵌构造说，他把整个地壳分成许多稳定的或大或小的地块和一些活动的褶皱断裂带。认为活动的构造带穿插或者环绕稳定的地块，它们像愈合的伤疤一样，把破碎的地壳镶嵌起来，这就是镶嵌构造。镶嵌起来的地壳并不是稳定不动的，而是不断地发生着上下、左右或推拉的构造运动，从而构成波浪状的发展形式。

我国幅员辽阔，地质构造复杂，在探索地壳运动这一疑难问题上，理所当然应该作出相应的贡献。

三、永无止境

无疑，板块构造学说也好，地质力学也好，它们较之以前的大地构造理论，在找寻地壳的升降和海陆的起源这些问题上，显然是大大前进了一步，但也决不能视为终极真理。就拿板块构造学说来说，它也只不过是一种科学假说，有不少问题还有待于人们继续深入地进行研究。如地幔对流问题，认为地幔对流是地壳活动的驱动力，这还只是一种假设。因为地幔究竟能不能对流，如何对流？不少科学家对此还有存疑。有人指出：上地幔的粘滞性太大（ 10^{26} — 10^{27} 泊），这样粘的物质是否能对流还没有可靠的试验数据。此外，美国地质学者梅耶霍夫父子曾对地球科学家们普遍相信板块学说感到遗憾。

在板块构造学说没有提出之前，人们曾经笑话光凭只占整个地球表面 29% 的陆上地质资料来推断整个地壳升降变动的机制及全球构造模式是“瞎子摸象”。然而，今天板块构造学者又走向另一个极端，光凭大洋底部的一些海洋地质资料来推断整个地球构造变动模式，也有点以偏概全。正像苏联著名地质学家别洛乌索夫所说的：“把大陆上如此丰富的地质资料置之不顾，而光凭海底地质调查的一些资料，武断地得出结论是荒谬的”。

除此以外，人们对航天地质、天体地质学的研究也有一些意外的新发现：人们发现地球在原始时期，也像月球那样，遭受过其它天体和小行星的多次袭击，至今地球上仍然保留着上百个直径在 1 千米以上的陨石坑。科学家仔细地搜集了全球各个地质历史时期的陨石坑，还发现陨石撞击地球有 10 个相对集中的时期，这些撞击的时期与地球地壳大变动（造山、造陆运动）相吻合。每一次延续几百万年，美国科学家西费特甚至把陨石撞

击时期和地质历史时期的几次重大造山运动列表对比。不少天文学家的研究也持这一观点。如果这个研究成果经得起实践检验，那么，这不仅是对板块构造说的挑战，同时又给我们探索地壳运动的力源开辟了一个新的途径。

纵观人类探索地壳构造和地壳运动的历史，可以看到这是一个难度很大的疑难问题。首先，地质学是门历史的科学，正如恩格斯所说的：“地质学按其性质来说主要是研究那些不但我们没有经历，而且任何人都没有经历过的过程”。科学家需要用类比、追踪、模拟等方法多角度地恢复其历史。然而地球的诞生已经近 50 亿年了，它演化过程中留下的踪迹(信息)很多已经消失了，抓住其蛛丝马迹是极其艰巨的事。

其次，地壳运动是宏观的变化，研究地壳变动是门宏观的科学。从宇宙空间到大洋底部，乃至地壳深处，都是其研究范围。尽管目前宇宙航天学的发展和海洋学特别是古海洋学的崛起、海底深钻的设备完善使进尺加深，给研讨地质构造运动带来了大量宝贵的信息，但至今人们还未能进入地壳深处这一禁区，对地壳内部不甚了了。

再次，地壳运动受到多种因素的制约，不仅有地内因素，而且还受地外因素的影响。二者交织在一起，错综复杂，它不像某些物理过程和化学过程那样，可以在实验室重现，因此，给研究工作带来了困难。

由于以上三个原因，也就必然使人们对地壳运动的认识尚处于推断、假说阶段，具有很大的片面性。尽管如此，千百年来人们对地壳运动问题仍然进行了不懈的探索，并经历了由表及里、由近及远、由陆及海、由海及空的过程。它每前进一步，都代表了这一时期人类的科学技术水平和对地球认识的新高度。苍茫大地，谁主沉浮？这个亘古之谜，虽然现在人们尚未得到统一的认识，但它是可以认识的而又不可穷尽的，它需要人类付出无法计算的代价永无止境地探索下去。当一些旧谜解决了，又会有许多新谜出现在人们眼前，激励着人们永不休止地探索着，在新的起点上攀登新的科学高峰。

(朱新轩 罗祖德)

一石激起千重浪

——泛古陆破裂的原因初探

德国气象学家 A·魏格纳在本世纪初提出了大陆漂移假说，经过近半世纪的争论后，终于得到了广泛承认。很多地质学家都认为，南美洲、北美洲、非洲、欧亚大陆等在约 2 亿多年前曾经并合在一起，组成一个泛古陆（或称联合古陆）。自中生代起，通过海底扩张和大陆漂移，形成了大西洋及现有大陆的分布情况。这个新全球构造假说回避了一个科学难题，即泛古陆在什么作用下能分裂成现在的形状？泛古陆南北方向的长度都在 2 万公里以上，岩石圈的厚度亦在百公里以上。要把这样一个庞然大物分裂成 6 个主要大陆显然要有动力源。是什么力量促使泛古陆破裂成现在的大陆的轮廓呢？

在本文中，我们从天文地质角度提出一个陨击假说，即泛大陆的破裂的原因可能是由于小行星撞击造成的。

一、泛古陆的分裂是由于脆性破裂造成的

采用拼接七巧板的方式，可以把现有的各大洲地图连成一个整体，这就是：南美洲的东海岸与非洲的西海岸相连接，北美洲南部连接南美洲与非洲，东连欧亚大陆，然后南美洲、非洲、印度和大洋洲都南连南极洲。这就是泛古陆的概貌。可以看出各洲的边缘是不规则的，有的具有尖棱角形状（如南美洲、印度次大陆）。这些几何形状显示与脆性物质受到瞬时突然撞击后产生的裂缝（比方说，一块挡风玻璃因突然撞击而破碎）有一定的相似性。

以上分析表明，各洲的几何形状的形成可能就是由于脆性破裂造成的。

二、泛古陆的破裂可能是陨击造成的

从理论上讲，造成泛古陆破裂的动力来源只可能有下列两类：一类是地内成因，由于地幔对流，物质上涌，使泛古陆破裂。例如在火星上的塔西斯(Tharsis)地区，由于长期上隆，形成了大致放射状的断裂系统，使陆地产生许多裂隙。但是，泛古陆是一个宽达几万公里的厚板，使它破裂所要求的能量很大，由地幔物质上涌的力量不能产生那么巨大的能量。此外，泛古大陆分裂的裂隙亦不表现为明显的放射状。因此，这一成因机制的可能性不大。另一类是地外成因，即陨击成因。通过大陨石（或小行星等天体）对泛古陆进行剧烈撞击，使它破裂。我们认为，应该认真研究地外成因使泛古陆破裂的可能性。

众所周知，陨击作用的能量取决于陨击体的质量与冲击速度。只要陨击体的质量足够大，陨击作用是可以提供足够大的能量来击碎泛古陆的。对太阳系中类地行星的研究表明，在水星、火星等行星上，都存在着几十个直径超过 100 公里的陨击坑，最大的可达 1000 公里以上。形成这样巨大

的盆地的能量要比击碎泛古陆的能量大得多。

当陨石撞击在泛古陆上则需要有一个撞击点（或地区），这是陨击成因假说成立的另一个必要条件。

人们在日常生活中常可见到，窗玻璃在某点受到石子撞击后将产生很多的裂缝。当石子撞击力量不够大时，玻璃是破而不碎，仍保持整体，但已有许多裂缝，在撞击点处破裂密度最大，往四周裂缝密度变稀，单个裂缝的长度变大。撞击玻璃板的实验表明：在受撞击力中心部分会出现一个破裂的小区域，呈长椭圆形或近圆形，边缘有时亦不大规则，往外则往四周伸出 4 至 7 条裂缝。裂缝的数目多少可能反映了受力的大小。

在泛古陆上有无这样一个地区呢？有！那就是在泛古陆的中部（偏西）有一个破裂密度最大的地区，即现在的墨西哥湾和加勒比海地区。两者组成一个长椭圆形，并在北美洲、南美洲和非洲的联接处形成很多小碎块。这个地区与玻璃板受物体冲击点的破裂情况有些相似。自这个地区往东、西、东南方向伸延出几条弯曲（有的成弧形）裂缝，组成了几个大陆的边缘。

现在的墨西哥湾大致呈半圆形，加勒比海则呈长椭圆形，其北边由一系列群岛（西印度群岛、大安的列斯群岛和巴哈马群岛等）呈同心弧状排列组成。在地质图上，墨西哥湾和加勒比海周围主要是由新生代地层组成，大致亦为椭圆状分布，往外则为中生代地层。在西印度群岛则基本上由中生代地层作为骨架，覆以新生代地层。这样，墨西哥湾及加勒比海地区是以中、新生代地层为主的盆地。加勒比海北部的许多岛屿反映了一个强烈的破碎地带，有可能表明是受冲击后主要密集破裂的地区。北美洲、南美洲、非洲都是较为完整的块体，至少自中生代以来是如此。

非洲的东南缘有长条形的马达加斯加岛，它是由非洲分裂出来的。泛大陆的南极洲、印度次大陆和马达加斯加岛组成一个相对较为破碎地区，这是否有可能组成另一个撞击点也应进一步注意研究。

如果是陨击成因，则为什么不形成环形盆地而仅造成泛古陆的破裂呢？这有可能与岩石圈的脆性增强有关。类地行星上的大陨击环形盆地是在几十亿年前形成的，它们的岩石圈的特性显然与后来的岩石圈是有差别的。泛古陆的破裂形成在 2 亿多年前，这时地球岩石圈的表层已有大量的中生代前的沉积岩和岩浆岩，其性质与上述岩石圈显然有较大差别。总体上看，脆性已大大增强。

泛古陆的脆性破裂还可能与晚古生代的大冰期有联系。晚石炭世和早二叠世的大冰期是显生宙中最大的一次冰期，已知冰川沉积分布在南美、非洲、印度、澳大利亚、南极洲和我国西藏等地区，冰期大致发生在距今 3.5—2.7 亿年前，延续时间约 8000 万年，是显生宙中延续时期最长的一次。最寒冷时期约为 2.8—2.7 亿年前。温度下降至少在 10℃ 以上。这样长时期的寒冷显然会使岩石圈，至少是它的上部的温度有一定程度降低，而物质变冷会使它的脆性增加。

小 结

到目前为止，人们对全球 6 个大陆的基本轮廓的形成机制的讨论还不多。我们提出的泛古陆的脆性破裂是由于陨石等小天体的撞击作用造成的

假说，在一定程度上能较好地解释它的形成机制。泛古陆在破裂后并没有散开，而是过了一段时期以后，才由於地幔对流等作用使各大陆之间产生相对位移，随即发展了海底扩张过程。

这一假说还是不完美的，还存在一些悬而未决的问题，已提出的论据亦有深入研究的必要。

（徐道一）

风雨溯源天上星

——天体位置与长期天气预报

一、当今气象学的一大难题

现代气象学诞生至今已有 160 多年的历史了，使用各种方法所做的短期天气预报，其成绩是卓著的。但是，由于尚未找到决定着大气环流和天气状况的因素，因而各国气象部门所做的 2 至 10 天的中期预报，准确率并不高，至于做大于 10 天的长期、超长期预报则感到相当困难。正如我国气象学家束家鑫在《天气预报的进展》一文中所指出的：“自 1820 年第一张天气图问世以来，天气预报业务已有很大发展……但目前人们对这种规律的了解还很不清楚，给准确地预报天气带来很大困难”。苏联南北极科研所长期从事天气预报的室主任 A·A·吉尔斯也认为：“苏联和其他国家都编制月、季等长期预报，但预报质量不高，原因是至今还不了解是哪些因素决定着大气环流和天气状况，在编制预报时不知道应该如何考虑这些因素”（《气象科技资料》1975.9）。

美国气象学会于 1979 年 9 月发表了一个政策声明，所评价的美国当时的天气预报水平是：

“1. 预报 12 小时以内 1000 公里以上天气系统的变化，达到很高的水平。

2. 能经常在 24 小时前报出强风暴、大雨、灾害性风等的大致区域，但报不出龙卷风的准确位置；第 3 天降水的预报仍有相当的水平，但对热带的天气 1 天内的预报只有中等技术水平，2 天以上无水平。

3. 第 4 至 5 天的降水预报水平下降。对 6 至 10 天的降水预报具有较低的水平。

4. 超过 10 天的逐周预报水平未作讨论。”

为此，气象学家赫尔德克对美国中期降水预报的评分是：预报第 3 天的评分为 20 分，第 4 天的为 16 分，第 5 天的为 12 分。可见中期天气预报的水平依然是不高的。

目前世界各国的数值延伸预报的最长时效是：联邦德国、南斯拉夫为 4 天，英国为 6 天，日本为 8 天，前苏联和欧洲中期预报中心为 10 天，美国为 10.5 天。

1981 年美国国家飓风（即台风）中心和日本等国用多数方法所做的 24 小时台风路径预报，误差仍为 200 公里左右。

短期、中期预报况且如此，长期、超长期预报则可想而知了。

当今时代是信息时代，气象部门向各地各界提供准确可靠的气象信息，具有十分重要的意义。特别是对于大型水利工程建设、农业生产的安排等等，这类具有较长生产周期的门类，更加需要气象部门提供长期、超长期气象信息，以便提前做好预防特大旱涝灾害的准备。为了改变中、长期和超长期天气预报的落后、被动局面，许多中外气象工作者都在研究和探索长期天气预报的新途径。

二、栾巨庆的超长期预报

在研究和探索长期、超长期天气预报的人群中，有专业气象工作者，也有业余气象工作者。其中，我国自学成才的天文气象工作者栾巨庆所做的工作最为突出。他和他的合作者从 1980 年以来，利用日、月、行星在天球上视位置的变化，提前半年至 2 年对我国四大流域进行超长期天气预报取得了可喜的成绩。

例如，他们在 1980 年 7 月 15 日向国家科委、中国科学院、中央气象局等预报的《1981 年我国四大流域天气预报》，预报的 15 场暴雨或大暴雨，只有一场没有出现，其余 14 场基本上都出现了。现将这 15 场暴雨的超长期预报和实况（实况据中央气象台《气象月报》等）列表如下：

1980 . 7 . 15 栾巨庆组预报		1981 年天气实况
珠江流域	4 月下旬后期有大到暴雨	4 月 27 至 30 日：广西来宾 79 毫米；桂林 98 毫米；广东湛江 77 毫米；连平 65 毫米；福建宁德 98 毫米
	5 月上旬末、中旬初有大到暴雨	5 月 8 至 11 日华南降暴雨、大暴雨，粤、桂、滇局地受涝
	7 月下旬有中到大雨与暴雨	7 月下旬粤、桂出现暴雨、大暴雨长江流域
长江流域	4 月下旬长江南部有大到暴雨	4 月 20 至 22 日，川、湘、黔有大到暴雨
	5 月上中旬之间，长江南部有大到暴雨	5 月 8 至 11 日江南普降大雨，局部暴雨
	5 月下旬江淮之间有大到暴雨	5 月下旬江淮之间有小到中雨，四川有大到暴雨。江淮之间的大到暴雨，实际发生在 6 月上旬
黄河流域	7 月中旬长江流域有大到暴雨	7 月中旬四川盆地西、北部和陕南出现暴雨、大暴雨，局地特大暴雨，灾害严重
	5 月下旬黄淮有大到暴雨	(没有出现)
	6 月上旬中南部有大到暴雨	6 月 8 日黄淮、江淮有大到暴雨
黑龙江流域	(10)6 月中旬后期有大暴雨	6 月 18 日华北北部有中到大雨，局部大暴雨
	(11)6 月下旬后期有大雨与暴雨	6 月 25 日至 30 日华北中部到淮河之间有大到暴雨
	(12)7 月上旬初黄淮一带有大到暴雨	7 月 2 至 4 日华北大面积大雨与暴雨
黑龙江流域	(13)8 月下旬中部有大雨与暴雨	8 月中下旬之间，关中、陕西南部连降暴雨、大暴雨，灾害严重
	(14)7 月上旬有中到大雨	7 月上旬三江平原、嫩江地区雨量偏多 1 至 2 倍，发生洪灾
	(15)7 月下旬有大到暴雨	7 月下旬后期，辽东半岛、吉林局地出现了暴雨、大暴雨，灾害严重

栾巨庆等人在 1981 年还根据天文条件做了 6 次中、长期补充预报，同样取得很好的成绩：

补充预报	天气实况（据《气象月报》等）
1981 . 7 . 9 向国家科委、中央气象局预报：“在7月中旬的中期，黄淮一带有大雨到暴雨，尤其京、石一带与黄淮之间有大暴雨”	7月中旬黄河流域南部普降大到暴雨。其中，7月13日陕西汉中155毫米，宁强157毫米，均为历史上所罕见。7月15日陕南、豫南又降大雨到暴雨
1981.7.9向国家科委、中央气象局预报：“自7月中旬起，台风便可能在珠江沿海与浙江沿海登陆，受台风影响的地区，将在中旬解除干旱”	7月中、下旬先后有本年第6、7、8号台在广东、福建、浙江登陆，受台风影响的地区，虽有受害，但旱情解除或缓和
1981.8.7给长办拍电报：“9日前后江淮一带将有暴雨到特大暴雨”	8月8日至10日，长江北部到渭河流域出现大到暴雨，四川灌县100毫米，湖北武汉60毫米，陕西佛坪110毫米；10至12日，长江中下游出现较大降雨，大部地区50至70毫米
1981.9.7给黄委防洪指挥部拍电报：“9月8日至12日黄南江北的西部有大雨到特大暴雨”	9月上中旬之间，青东、甘南、陕南连降暴雨、大暴雨，黄河上游于9月11日开始出现有史以来的特大洪水*
1981 . 9 . 12 向国家科委四局、中央气象局办公室、长办等预报：“10月3日至10日，长江流域南部和珠江流域北部，将有暴雨至暴雨，雨量偏多，局部有洪涝”	10月上旬长江以南大部地区较常年偏多2至3成，苏、皖、鄂、湘四省南部及川东南，一般有50至120毫米，局地200毫米，偏吨*9倍，广东、广西暴雨成灾
1981.9.12向国家科委四局、中央气象局办公室、长办等预报：“9月19日至25日长江上中游有雨到大暴雨”	9月下旬初，江西、湖南一带出现暴雨、大暴雨。其中，湖南南岳在9月23至24日降雨230毫米，江西吉安在9月22日降雨109毫米

1981年我国还发生了四次较大的暴雨洪涝（7月初广东佛山的台风大暴雨，8月初东北三江平原的台风暴雨，9月22日东南沿海的台风大暴雨，8月中旬川西的大暴雨），栾巨庆组漏报。

总之，1981年我国四大流域共发生了25场较大的暴雨洪涝，栾巨庆组的超长期和中、长期天气预报中，报准和基本报准的是20场，误报1场，漏报4场。这些成绩决不是什么“瞎碰”能取得的，而是栾巨庆数十年如一日，呕心沥血、刻苦钻研的结晶。

三、在探索中前进

栾巨庆原是山东省潍坊县的农民，现内蒙古自治区呼伦贝尔盟吉文林业局工人。他的祖父是清代私塾教员，悉心研究了孔子、孙武子、歧伯、诸葛亮等人关于天文的见解，从多年观察星象变化中，认为地球上的旱涝与行星的位置有关，写有《天文与农时》。

栾巨庆在继承其祖父研究成果的基础上，研究了我国古代利用天文预报天气的传统经验，创绘了《视赤经、地心距行星动态图》，他将历年的这种图与历史上各流域的特大旱涝进行对照，并对解放后我国的许多场大暴雨进行天象检验，还进行了大量的预报实践，从而他初步发现了日、月、行星在天球上的视位置与我国四大流域发生天气异变的对应关系，即日、

月、行星在视赤经 $26^{\circ}—36^{\circ}30'$ 或视赤纬 $+11^{\circ}—+14^{\circ}$ 时，珠江流域就容易下雨；在视赤经 $36^{\circ}30'—52^{\circ}30'$ 或视赤纬 $+14^{\circ}—+19^{\circ}$ 时，长江流域和淮河流域多发生雨涝；在视赤经 $52^{\circ}30'—69^{\circ}$ 或视赤纬 $+19^{\circ}—+22^{\circ}$ 时，影响黄河流域下雨；在视赤经 $69^{\circ}—90^{\circ}$ 或视赤纬 $+22^{\circ}—23.5^{\circ}$ 时，则对应黑龙江流域；行星和月球的视赤纬超过 23.5° 时，其对应区便在副极地和极地一带。

行星等天体对地球大气环流的作用，主要是影响径向环流，由于季风环流属于径向环流，因而行星等天体对季风气候区有较明显的影响。为此，利用行星、月球和太阳在天球上视位置组合来作超长期天气预报，在我国主要是对东部季风气候区。又由于地球的自转，天体对地球天气的影响又具有明显的纬度带性质，而我国东部季风区的四大流域又大致与纬度平行，因而采用珠江、长江、黄河和黑龙江四大流域为预报区，这样做还有利于防洪与抗旱工作的进行。

栾巨庆根据祖传经验和自己的研究，在二十多年的预报实践中取得了较好的成绩：

他多年对山东潍坊县农村老家提前一年进行超长期天气预报成功率相当高，深受当地农民的欢迎；1964年栾根据来年6、7两月有水、金、木三颗行星对应黑龙江流域，和月球在 $+25^{\circ}$ 赤纬回归对应的天象，预报1965年6、7月份大兴安岭一带将出现连阴大雨与暴雨，建议抓紧这有利时机大搞阳坡植树造林。内蒙古自治区大兴安岭吉文林业局根据栾巨庆的超长期预报和建议，于5月份在光秃阳坡造林20多亩，造林后果然接上连阴大雨，成活率高达90%以上；1979年冬他又根据1980年6、7月份金、水二星同时对应黑龙江流域“下合”的天象，又建议“应利用1980年这个雨涝年大搞阳坡造林”，吉文林业局又根据这一预报于5月份在阳坡造林2800亩，造林后也接上连阴暴雨，成活率高达80%以上。

1973年栾在南京大学气象系接受为期一年的检验期间，成功地预报了当时长江中下游地区旱象解除的时间和1974年1月澳大利亚发生的大洪水。

1977年是世界性气候异常的年份、我国黄河、长江和珠江都发生了较长时间的旱涝。许多专家发现那时出现了全球性大气的“驻波”，但对“驻波”的成因依然一筹莫展。而栾巨庆却早在该年2月25日用电报形式从山东潍坊向中国科学院发电报预报：“黄旱夏至解，珠涝满芒连，长江春多雨，端午巨洪浪”。这一年黄河、长江、珠江三大流域的旱涝实况和发生的时间，与上述电文大体相符合。

1979年栾巨庆经国家科委推荐，来到中国科学院地理研究所协作，由国家科委拨出专款进行研究，从而使以天文预报气象的科研工作提高到一个新的阶段：

1. 他们利用《视赤经、地心距行星动态图》，解释了长江流域一千二百年来的特大干旱，和八百多年来的特大洪涝；解释了黄河流域五百年来的特大洪水；海河流域明代以来的特大洪水；以及珠江、黑龙江流域一些特大洪水年的天文条件。

2. 重新研究了我国古代自商、周至东汉利用天文因子预测天气的文献记载，以及古埃及、巴比伦、印度用天文预测旱涝的记载（后详）。

3. 设计了《视赤经、视赤纬直角坐标天象图》，以此图重新检验了栾

巨庆的“经验对应区”。一般情况下，在某对应区有行星对应，而月球一旦到达北半球的第一、二象限相应的赤纬区域时，我国的这个对应区均有下雨过程，这与我国古籍中所讲的“月之从星，则以风雨”的精辟论断相吻合（不同的是古代所说的“星”是恒星）；而且，在我国某流域对应区若有行星，而月球到达南半球的第三、四象限相应的赤纬区域时，我国的该对应区也有下雨过程，这种作用称为“镜相作用”，南半球与我国四大流域相对应的赤纬区域称为“镜相区”。

同时，在预报实践中肯定了行星和月球的“赤道效应”。即在视赤纬 $0\text{—}+5^\circ$ 若有大行星，当月球运行到这个纬度带时，我国从南到北或从北到南多有一次阴雨过程；如果在中途某对应区有行星的话，那么，这颗行星能起拦截作用，加大该对应区的降水，而使后面的对应区雨量减少或无雨。

4. 除了上述对应关系外，栾巨庆等人还研究了对“对应区”的影响因子，包括天文因子、地理因子、地球物理因子、环流因子等。例如，行星的地心距远近的变化，行星的冲、合及其前后对“对应区”的影响；多颗行星和单颗行星的影响，行星在太阳之先或在太阳之后到达“对应区”的影响差异；月球回归点的高低，回归前和后的影响差异，及朔、望对“对应区”的影响；太阳黑子丰歉，地球磁场的强弱变化对“对应区”的干扰；地形和环流因子的影响，等等。

5. 《视赤经、视赤纬直角坐标天象图》的创制和利用，为长期天气预报提供了极为简便的手段。由于在这样的图上，很容易找出月、星相“重合”的对应区和对应时间，这就为把超长期预报做到预报来年暴雨发生的具体时段提供了便利。例如，1980年5月笔者（栾巨庆组的主要成员之一）出差在上海，根据自己设计的该年直角坐标天象图所反映的金、水二星和月球的重合关系，给中国科学院地理研究所天文气候组写信预报：“7月上中旬之间长江北部有大暴雨”，结果在江淮之间7月8日和14日先后发生了两场大暴雨，安徽省洪水灾害严重。栾巨庆组的1981年至1985年各年《我国四大流域长期天气预报》，就是主要根据这种天象图所反映的日、月、行星与各对应区的关系，再研究和分析上述影响因子等的基础上做出来的。

6. 研究了近三十年来的台风，特别是对我国影响最大的20个回头台风的“折点”与天文条件之间的关系，为对台风登陆时间和路径的预报提供了线索。

这20个回头、转圈的台风可分两大天象类型：

(1) 在珠江流域和南海一带回头、转圈的台风，一般是：回头、转圈处的北侧都无行星对应；在这一带打转的台风，多数还与月球向天赤道运行或越过天赤道有关。这类台风在上述20个台风中占6次，如1940年的第36号台风和第29号台风、1943年第6号台风、1957年第15号台风、1958年第14号台风、1966年第13号台风均是如此。

(2) 在长江和黄河两流域回折、打转的台风：往往在回折、打转处当时都有行星对应该对应区，而且月球在这时又正好到达该对应区（或镜相区）；如果在邻近有数颗行星的话，那么台风发生回折的点往往是在这数颗行星的合成对应区；台风转折后的运行路径往往与月球的运行方向有关：如果当时月球是从高赤纬向低赤纬运行（在北半球往南运行，在南半球往北运行），则台风多折向西南方向；若月球从低赤纬向高赤纬运行，

则台风多折向东北方向。属于此类型的台风在上述二十个台风中占 8 次。如 1943 年 8 月 14 日在江苏徐州一带回折的第 18 号台风、1975 年 8 月中旬在赣北打转数天的第 4 号台风和 1975 年第 3 号台风等。其中，1975 年的第 3 号台风在豫西回折，造成河南罕见的特大洪水灾害，至今仍使人记忆犹新。该年 8 月 4 日，这个台风在福建南部登陆，经江西、湖北北上，6 日进入河南，7 日在豫西回头折向西南，而后进入四川变成低气压而消失。就在台风于豫西回折期间，发生了特大暴雨。这几天行星、月球的位置是：5 至 7 日，火星在第一象限视赤纬 $+17^{\circ}$ 至 $+18^{\circ}$ ，水星在第二象限 $+18^{\circ}$ 至 $+16^{\circ}$ ，太阳在视赤纬 $+18^{\circ}$ 左右，火、水二星和太阳当时正好对应淮河流域和长江北部；土星在视赤纬 $+21^{\circ}$ 左右，对应黄河流域北部；月球于 3、4 日在 $+21^{\circ}$ 回归，5、6、7 日南下正好通过淮河流域对应区，此时台风到达豫西并滞留，7、8、9 日便随月球南下到长江流域对应区，因珠江流域对应区无行星对应，台风便只能在长江流域对应区消失。

这些年来，栾巨庆等人根据未来的天文条件，做了台风试报，取得一些成绩。例如，1980 年 8 月 15 日预报：“8 月下旬随着水、金二星的相继南移，伸至江南一带的副高脊可能会逐渐削弱，台风有可能北上”。实况是：8 月下旬该年的 12 号台风北上，扫过台湾岛，久旱的台湾岛解除了旱象。又如，1981 年 6 月和 7 月，正当珠江流域由于没有行星对应而发生干旱时，栾巨庆等人在 7 月 9 日给中央气象局和国家科委四局发出预报：“根据金星南下的天象，自 7 月中旬起台风便有可能在珠江沿海与浙江沿海登陆，受台风影响地区将在中旬可解除干旱”。实况是：7 月中旬和下旬有该年第 6、7、8 号三个台风先后在广东、福建、浙江登陆，受台风影响的地区虽有受害，但旱情解除或缓和。

7. 初步研究了日、月、行星的视位置与我国气压场之间的关系。发现一般有行星对应的区域，气压降低，月球一旦加入进来，气压便降低更大；而无行星对应的区域一般气压升高。同时，寻找日、月、行星的位置与副高的西伸北跳的关系，及其对我国东旱西涝等的影响，从而在预报中开始把各流域的上、中、下游分开预报。栾巨庆等人关于 1981 年 9 月上中旬之间黄河上游特大暴雨洪水的预报，就是在研究了最近一百年来长江流域的东旱西涝的天文条件后，又将当时的天象与十分相似的公元 230 年（三国时代）水淹陈仓的天象进行对比之后所作出的。

8. 研究了行星的冲、下合周期与各对应区的气候周期之间的关系。

由于各行星的冲、下合点在天球上的位置不断移动，冲、下合发生的季节也在变化，而使各对应区的气候周期不可能那么恒定；此外，多颗行星的冲或下合的周期的组合，又使各对应区的气候周期复杂化。

与行星的冲、下合周期和月球回归点变化周期有关的各对应区的气候周期有：60 年旱涝周期（包括 240 年左右的周期）、35 年周期、11 年周期和 8 年周期。

例如，华北的干旱存在着明显的 60 年左右的周期。如，1797、1857、1917、1977 这四个丁巳年，华北都发生了大干旱；此外，1640 年（明崇祯十三年）华北大旱，和 1877 年（清光绪三年）华北大旱，相隔 237 年，属 60 年周期的扩展，这二年的地心天象图十分类似，明显地反映出这与水、火、木三颗行星的公共冲合周期相一致。

又如，1914 年和 1973 年长江流域都发生了严重的春旱，相隔 59 年。

这二年的地心天象图也十分相似，水、土、木三星经过 59 年又回到了原来的位置。

在单颗行星的冲合周期中，以离地球最近的行星——金星的“下合”周期对对应区的影响最大。金星在《视赤经、地心距行星动态图》上，每 8 年有 5 个“下合”点（这时金星处于日地之间，距地球最近），这 5 个“下合”点在天球上均匀地分布，两个点之间的地心张角均为 72° 视赤经，构成一个五角星。一般落在某个对应区的“下合”点，对这个对应区来说，8 年中只有一个，因此该对应区便有 8 年的周期。例如，长江流域历史上的特大旱涝存在着与金星在本对应区“下合”的 8 年或 8 的倍数洪涝周期，以及金星在旁的对应区“下合”而使长江流域对应区出现的 8 年或 8 的倍数的干旱周期：

金星在对应长江流域“下合”时长 江洪水年	相隔 (年)	金星不在对应长江流域“下合” 时长干旱年	相隔 (年)
1520 与 1560	40	1902 与 1934	32
1788 与 1796	8	1934 与 1966	32
1796 与 1860	64	1959 与 1967	8
1849 与 1905	56	1940 与 1972	32
1945 与 1969	24		
1969 与 1977	8		
1948 与 1980	32		

现阶段金星每 8 年的 5 个“下合”点，有两个分别落在第三、四象限，对应南回归线附近；有两个分别落在第一、二象限，对应赤道北侧一带；有一个落在第一、二象限之间，“下合”时的视赤纬对应淮河流域，因此现阶段我国淮河流域存在着与此有关的 8 年洪水周期。如 1956、1964、1980 淮河流域出现暴雨洪水，都是金星“下合”时赤纬对应（加上月球到达本区）而造成的；现阶段南回归线附近，在 8 年中则有二次金星“下合”的影响，出现与此有关的洪水有：1974 年澳大利亚与马达加斯加的洪水；1979 年玻利维亚的洪水；1982 年玻利维亚与马达加斯加的洪水等。

由于长江流域对应区的位置适中，金星每 8 年的五个“下合”点在某个阶段便有两个落到这里，那个阶段长江的洪水将可能显著增多。根据长江特大洪水的石刻资料，从公元 1153 年至 1980 年的八百多年中，长江共有 17 个特大洪水年，平均每百年 2 次，而在金星“双下合”影响长江流域的 1788 至 1892 年一百多年中，则有 6 次特大洪水年（1788、1796、1847、1860、1870、1892），平均每百年 4 次，是 800 年的平均石刻洪水年数的 2 倍。据我们推算，下一个金星“双下合”影响长江流域的时间将从公元 2040 年左右开始。我们预测从那时起的一百多年中，长江流域的洪水将可能显著增多。这是与金星“下合”有关的长江流域旱涝的大周期为 250 年左右的循环，它是由于金星的五个“下合”点组成的五角星以每 8 年向西移动不到 2° 视赤经的结果。

四、观今宜鉴古

现代天文学和现代气象学是互不发生关系的两门学科。然而，在世界各文明古国的古代，人们却常常用观察日、月、星辰的运动变化来预测未来的天气。例如，古埃及人以观察天狼星在一年中最早的晨现来预报尼罗河的定期泛滥；我国古代则用心宿二（又名“大火”或“商”）的最早昏现来预报农时；我国和印度的古代均把全天空的恒星划为二十八宿（二者略有差异）；两河流域的巴比伦人在古代常以天象来预测风雨，他们把轸星（乌鸦星座）作风星，昴星（即七姐妹）作雨星，而我国古代则把箕星（人马星座的头）作风星，毕星（金牛星座的α星毕宿五）作雨星。

我国古代以天文来预报气象十分普遍，在许多古籍中均有很精辟的记载。认真分析和研究这些古籍，取其精华，去其糟粕，恢复和发扬我国古代以天文预报气象的优良传统，对寻找影响地球上的大气环流和天气状况的根源，探索长期、超长期天气预报的新途径，提高预报水平，将是一项十分有意义的工作。

我国古籍中有关天象与气象的关系的记载很多，现只举一些：

《书经》有：“星有好风，星有好雨”、“箕星好风，毕星好雨”和“月之从星，则以风雨”等记载。

《诗经》有：“月离于毕，俾滂沱矣”等记载。

《孙子兵法》有：“发火有时，起火有日，时者天之燥也，日者月在箕、壁、翼、轸也，凡此四宿者，风起之日也”。

春秋时代的孔子对天文与气象也很有见解，这在东汉王充的《论衡》中有所记载：“孔子出，使子路赍雨具，有顷，天果大雨，子路问其故，孔子曰‘昨暮月离于毕’。后日，月复离于毕，孔子出，子路请赍雨具，孔子不听，果不雨，子路问其故，孔子曰‘昔日离其阴，故雨；昨暮离其阳，故不雨’。”

到了三国时代，自命“知天文之旱涝，识地理之平康”的诸葛亮借东风火烧赤壁的故事，至今仍被人们传颂。诸葛亮和曹魏的司马懿均常利用观察天象变化来预测未来的天气，为军事行动服务。例如，公元230年9月秦岭南北连降大雨，水淹陈仓，秦岭栈道断绝的天象——“毕星躔于太阳之分”的天象，诸葛亮和司马懿都在事先观察到了，并都做出了“月内必有大雨淋漓”的判断。……

天文和气象不应再是互不关联的两门学科，在古代它们尚是亲密的兄弟，在科学已经高度发展的今天，应该且完全可能使它们“破镜重圆”，重新结合成一门新的边缘学科——天文气象学。

（张庆祥）

月有阴晴圆缺

——对称与对称破缺的疑难

对称与对称破缺是自然界中普遍存在着的一种矛盾关系。现代科学都在从不同的侧面对这种矛盾关系进行探索。但是，人们在探索这对矛盾及其转化的机制时，却遇到重重困难。

一、对称概念的历史与现状

人类对对称与对称破缺的认识，几乎和人类文明同样古老。在早期，古人主要是认识到自然界的形象对称。在古人类的遗址中发现的装饰品和其它手工艺品，以及古老的陶器和青铜器，还有古代的壁画以及丝织品的花纹等，都注意到对称性。中世纪的美学家把对称与和谐理解为美，认为完整、对称、显明是美的“三要素”。

近代，对称概念又比较多地深入到自然科学中。例如，化学和矿物学发现了晶体和各种矿石的结构对称，结晶学家们还进一步从对称性上把晶体划分为7个晶系和32种对称类型。生物学中，发现和研究了低等生物的辐射对称和高等生物的两侧对称。数学中除了进一步研究圆、方、矩形、三角形、圆锥、圆柱、多面体的形象对称以外，还发现方程的对称函数比根式解法更重要。后来，又进一步创立了一门关于对称性的数学理论——群论，群论成了研究自然界对称性的重要的辩证辅助工具之一。

几乎在自然科学深入研究对称与破缺的同时，哲学、文学、艺术，也都广泛地研究对称与破缺的形式和内容以及二者的相互转化。较早从哲学高度研究对称性的是黑格尔，他认为对称与破缺是一致性与不一致性、同一性与差异性的关系。文学和艺术也从形象和概念上表现对称和破缺，例如，苏东坡讲的“人有悲欢离合，月有阴晴圆缺”，月圆则是中心对称，月缺则是非中心对称。音乐当中也讲求“嘈嘈切切错杂弹，大珠小珠落玉盘”。绘画中则反对呆板的形象对称，而要求在对称中显出变化，从而给人以美的享受。

总之，对称概念使用得非常广泛，几乎深入各种学术领域。

那末，什么叫对称？什么叫非对称或破缺呢？

所谓对称，就是指事物或运动以一定的中间环节进行某种变化时所保持的不变性。非对称或对称破缺(symmetry breaking)和对称相反，是指事物或运动以一定的中间环节进行某种变化时出现的变化性。用哲学术语来表述，对称就是变化中的同一，破缺则是变化中的差异。从一定角度来看，自然界就是在对称与破缺及其相互转化中显现出丰富多姿的形态。

二、对称与对称破缺的疑难

对称与对称破缺的概念并不难理解。困难在于，二者在什么条件下就可以互相转化。有很多科学领域对这类问题都还没有找到正确的答案。

在天体演化的各种假说中，有一种假说认为，在宇宙的早期正物质和反物质是对称的，随着时间的推移和天体的演化，反物质大部分消失了，

留下了今天以正物质为主的物理世界。这是为什么呢？科学上尚不能确切回答。如果不从天体演化的角度，仅仅从现实出发，科学上也无法解释为什么我们面临的物理世界是正物质的世界，而不是正反物质对称的世界。

在宇宙学大爆炸假说和粒子物理学大统一理论中认为，宇宙演化是一个从热到温再到冷的过程，在这个过程中，对称性逐步丧失。当大爆炸的最初瞬间，温度超过 10^{23}K 。存在着完全的对称性，夸克和轻子不可分，强、弱和电磁的相互作用是对称的和统一的，当温度降到 10^{23} — 10^{15}K 时，对称性逐步破缺，强相互作用分出来了，只剩下弱相互作用和电磁相互作用的对称性，即弱电统一。当宇宙的温度再进一步降低到目前的温度范围内，弱电统一也破缺了，宇宙从而就丧失了大部分对称性，只留下正负电荷的对称性。宇宙为什么不断地丧失对称性而分化为四种相互作用呢？对称性破缺的机制和原因又是什么呢？这也是一个科学之谜。

物理学上的四种相互作用也是不同的。在强相互作用、弱相互作用、电磁相互作用中，吸引和排斥都是对称的；但是，在引力相互作用中，对称性就破缺了。只有“万有引力”却没有“万有斥力”。牛顿根据经验凑了一个万有引力的公式，后来人们又求出了引力常数，这个公式成了经典力学的基础之一。但是，对于为什么不存在“万有斥力”却提不出任何解释，人们甚至都很少思考这一问题。

在基本粒子物理学中，对于对称和破缺的矛盾曾进行了深入地研究，揭示出基本粒子间的各种对称性。粒子物理学中的规范场论，是以规范变换群下的不变性（对称性）为特征的，用对称性来说明基本粒子的物理现象。1954年，杨振宁与米尔斯(Mills)又将规范场思想推广，指出：物理学中的对称性有两种，整体对称性，这是指空间各点作协同变换下的不变性。定域对称性，指空间各点作单独变换下的不变性。但是，对整体对称性向对称破缺转化，定域对称性向对称破缺转化，究竟需要什么条件和是什么原因出现的还缺乏有力的说明。目前，科学家们多半还只是指出了某些物理定律的对称性不严格成立就会出现对称破缺，并简单定性地说明，外部原因引起的对称破缺叫诱导破缺；内部原因引起的对称破缺叫自发破缺。这样简单的描述，也说明了一些问题，但并没有能指出对称破缺的深刻本质。

现代物理学指出，所有的物质客体总能量最低的状态是物理学上的真空，这是完全对称的。物理真空不知道什么原因就出现对称性自发破缺，从而就会产生一定质量的粒子，例如正电子等。由此看来，对称破缺是物理客体产生和演化的原因，那末，这究竟是为为什么呢？目前，这个问题还没有人能回答。

在热力学中，当一个系统处于平衡态时，其内部的原子、分子或其它粒子的排列是对称的，其对称元素是无限的，任何对称操作都是允许的。当系统远离平衡态时，则出现对称性破缺，使系统向组织化、有序化和复杂化发展。从这个角度讲，耗散结构实际上就是一种出现对称性破缺的有序结构。为什么伴随着对称性破缺才会出现有序结构呢？对这个问题的解释还是不能令人满意的。

另外，时间，在牛顿力学中是对称的，也就是说，时间反演不变，在热力学第二定律中，则通过熵增加的原理，揭示了时间的不对称性和不可逆性。所以说对称和对称破缺与物理过程的可逆性与不可逆性有密切的联

系，问题在于不能简单地指出这种联系，而应进一步去揭示这种联系的内在原因。

在化学中，也普遍存在着对称与破缺的疑难。以研究得比较深入的化学结构而言，化学物质的分子结构具有各式各样的对称和对称破缺。例如，环己烷及其不同的取代物，有椅式或船式的对称结构；在旋光异构体中，有左旋和右旋的对称。现代化学，从原子和分子的微观结构和运动过程中，揭示出对称与破缺的辩证转化。例如在丁二烯的电环合反应中，如果反应物的分子轨道对称性一致，反应就容易进行，这叫对称性允许；反之，如果对称性不一致，反应就难于进行，这叫对称性禁阻。日本的福井谦一和美国的霍夫曼，因为这一成果获得了诺贝尔化学奖。但是，为什么化学结构的对称性与化学性质和变化的因果性如此紧密地联系在一起呢？这个问题化学上曾提出种种微观解释，但这些解释都还处于探索之中。

在生物学和进化论中，对称与破缺的困难就更大了。

各种生物，不仅在形态上有不同的对称性，更重要的是在它们的微观结构和微观生物化学现象中，普遍存在着对称与非对称的转化。例如，量子生物学证明，在生物酶的催化作用下，可以使生化对称禁阻反应转化成对称允许反应。但是，生物酶是怎样完成这一机制的？目前还没有能提出有说服力的理由。

现代生物学已发现，地球上活的生命体中，组成蛋白质的氨基酸的构型，其旋光性几乎都是左旋的异构体，而右旋的氨基酸，只有在细菌和真菌产生的某些化学物质中或者是抗菌素中才能找到。这说明在高级生命体中，氨基酸的旋光性是不对称的，这种对称性破缺的原因是什么呢？现在谁也不知道。在陨石中发现的氨基酸，其旋光性是对称的。在著名的米勒实验和福克斯实验中，他们模拟地球天文时期晚期的条件，成功地合成了氨基酸等物质，力图以此证明无生命向生命的过渡和转化，说明生命的起源。但是，他们合成出来的氨基酸其旋光性是对称的。如果生命是这样起源的，那末，其氨基酸的对称性是怎样破缺的呢？

高级生命体中的糖和糖酐，其旋光性的对称性也是破缺的。不过，它们的旋光性与生命体中氨基酸的旋光性相反，都是右旋的异构体，而没有左旋的，这个问题也是一个不解之谜。

从生命体的实际情况来看，生命的产生和维持，是以生物大分子和细胞中物质分布的高度不均匀性和不对称性为条件的，一旦生物体中的物质分布变成均匀的和对称的，生命也就完结了。生命在进化和发展中，伴随着一个对称性的逐步破缺的过程，原始的细胞生命对称性较强，但进化到人以后，从外形上只剩下两侧对称，这种两侧对称还是不完全的；其内部物质的组成和结构，则出现了一系列的对称性破缺。

总之，从天体的演化、生命起源和基本粒子等科学领域来看，自然界的进化和发展则要伴随着对称性的不断破缺来实现；相反，退化和退步则要出现对称的增加（对称元素和对称操作的增加）。原因和机制如何？这是现代科学的一大疑难。

三、对称方法的困难

通常把利用对称性探索自然奥秘的方法称为对称方法。人们利用对称

方法，曾取得过科学上的进展。

过去，人们认为，粒子物理学中宇称(P)，是反映空间左右对称即镜像对称的物理量，这个物理量是守恒的，这就是通常说的宇称守恒定律。这一定律在强相互作用、电磁相互作用和引力相互作用的条件下都是正确的。但是，1956年李政道和杨振宁认为，在弱相互作用下，空间的左右对称会出现破缺，也就是说，在弱相互作用下，宇称P不再守恒了。这一预言，被1957年吴健雄的实验所证实。她同时还证明了，电荷的共轭变换C，在弱相互作用下也不守恒。这就打破了通常人们认为的，空间反演对称和正反粒子变换在任何情况下都对称的传统观念。后来，物理学家们又预言，宇称P和电荷的共轭变换C，虽然在弱相互作用下分别不守恒，但P、C二者联合作用又是守恒的和对称的。朗道曾将这一组合变换的对称性称为“CP对称原理”。这一原理为 μ^{\pm} 粒子的衰变实验所证实。1964年，菲奇等人发现，在K介子的衰变实验中，CP联合作用在弱相互作用下不守恒。这说明，CP联合对称并不严格成立，即又出现了对称破缺。但是，如果加上一个时间反演T，则出现了CPT联合作用的对称。这说明，当分别考察空间反演(P)、电荷共轭变换(C)、时间反演(T)时，可能是分别不对称的，但它们做某种联合反演则又变为对称的。这个复杂过程表明，在科学的认识过程中，似乎经历着：对称——不对称——新的对称——新的不对称这样的链条。但是，这个链条在什么条件下能成立，却难以寻求统一的模式。

在对自然科学的深入研究中，人们还常常采用“对称填补法”来做出科学发现。所谓“对称填补法”，就是把科学的逻辑体系中不对称的地方，填补成对称的，从而有目的地去探索未知世界的方法。这个方法曾取得过一定的成功。例如， Ω^{-} 粒子、粲夸克C，都是用这种方法先做出预言，后来才得到证实的。1962年，美国科学家盖尔曼，根据SU(3)八重态模型的对称性，预言了 Ω^{-} 的存在，后来就被出色地证实了。过了两年，即1964年，盖尔曼又提出著名的夸克模型，预言了强子由u、d、s三种夸克组成，这一成果使他获得了1969年诺贝尔物理学奖。到1970年，格拉肖注意到，夸克和轻子有很好的对称性，而轻子有 ν_e 、e、 ν_{μ} 、 μ 四种，其中，三种轻子 ν_e 、e、 μ 和三种夸克u、d、s是一一对称的，唯独另一种轻子 ν_{μ} 没有与之对称的夸克，出现了对称性破缺。据此，他大胆地预言了存在着粲夸克C，并指出，粲夸克C与轻子 y_{μ} 相对称。这一预言，被1974年丁肇中等人发现的 J/ψ 粒子所证实。上述成果，鼓舞了人们大胆地去使用“对称填补法”来思考问题。但是，在某些场合对称填补法却是无能为力的。例如，现代化学中，有人利用周期律的对称性，填补了化学元素周期表的第七、八、九周期；还利用无机物和有机物的对称性，用填补法制定了有机物周期律，事实证明，这种填补没有取得进展。

以上情况说明，利用对称填补法是有条件的，那末，这种条件是什么呢？现在谁也说不大清楚，这就是对称方法的困难。

总之，对称与破缺的转化以及在科学研究中利用对称方法，都存在着许多困难和问题，这些困难和问题的解决，将会极大地促进现代科学的发展。

(王德胜)

世界是规范化的吗？

——谈四种基本相互作用及其统一问题

一、四种基本相互作用

物质处于不断运动变化之中，物质之间的各种相互作用支配着物质的运动和变化。物质之间的相互作用十分复杂，它们有各种各样的表现形式，但按照目前的认识，它们可以归纳为四种基本相互作用。

最早被人们认识的相互作用是电磁相互作用。公元前 6 世纪古希腊的泰勒斯用琥珀和毛皮摩擦，开始认识摩擦生电现象。公元前 3 世纪我国《吕氏春秋》中就有关于磁石吸引铁的记载。但真正对电磁规律作定量描述还是最近二三百年的事情。麦克斯韦总结了前人一系列发现和实验成果，于 1875 年提出了描写电磁作用的基本运动方程式，后来称为麦克斯韦方程。这是第一个完整的电磁理论体系，它把两类作用——电与磁——统一起来了，定量地描述了它们之间的相互影响相互转变的规律。麦克斯韦方程还揭示了光的电磁本质：光本身是一定频段的电磁波。

1900 年瑞利(Rayleigh)和金斯(Jeans)根据经典物理学推导出关于黑体辐射强度的所谓瑞利—金斯公式。这公式在长波部分与实验符合很好，但在短波部分辐射强度不断增大，称为紫外困难。这种紫外困难反映了经典物理学的困难。面对这一困难，普朗克勇敢地放弃了经典物理的能量均分原理，提出了电磁波的能量量子假说，电磁波的能量只能不连续地、一份一份地被辐射或吸收。1905 年爱因斯坦从光电效应的分析中提出光量子理论，光不仅在能量组成上是不连续的，而且在结构上也是不连续的。爱因斯坦第一次把两种对立的观念——粒子和波动——统一了起来：光在传播过程中突出地表现了它们的波动性，它有干涉、衍射和折射等现象；但光在与物质相互作用中突出地表现了它的粒子性，光量子带有一定的能量和动量，可以与其他物质交换，发生相互作用。列别捷夫的光压实验证实了光量子的能量动量与光的频率波长的关系式。

还是在 1905 年，爱因斯坦分析了几个与经典物理尖锐对立的光及电磁现象的实验，提出了狭义相对论，从而开始了 20 世纪物理学的第一场革命。狭义相对论改变了牛顿的时空观，开始认识到时间空间是物质的存在形式，时间空间与物质不可分隔。狭义相对论是描写高速运动物体运动规律的理论，而牛顿力学只是它的低速近似。

1911 年卢瑟福(Rutherford)通过 α 粒子散射实验揭示了原子核的存在。1913 年玻尔把普朗克的量子化概念引进卢瑟福的原子结构模型，提出了原子结构的量子化轨道理论。1924 年德布洛意(de Broglie)假设粒子性和波动性的统一不是光的特有现象，微观粒子可能也存在波动性。他模仿光量子能量动量与频率波长的关系，提出物质波的假说。经过一系列物理学家的努力，例如海森堡(Heisenberg)、玻恩(Born)、薛定格(Schrödinger)、狄拉克(Dirac)等，量子力学建立起来了。量子力学开始了 20 世纪物理学的第二场革命。量子力学是描述微观粒子运动规律的理论，而牛顿力学是它的宏观近似。过去人们对光的认识过分强调了它的波动性，原来光在波动性上还迭加有粒子性；过去人们对电子等微观粒子的认识过

分强调了它们的粒子性，原来电子在粒子性上还迭加有波动性。一切物质都是粒子性与波动性的统一。

低能微观粒子与光子还有实质性的不同，光子在与物质相互作用过程中可以产生和消灭，而低能过程电子只能改变运动状态，不能产生和消灭。产生这种不同的根源在于光子的静止质量为零，而电子的静止质量不为零。按照狭义相对论，有静止质量的粒子带有一定的静止能量。只有在相互作用过程中能量传递超过粒子静止能量时，才有可能发生粒子的产生与消灭现象。因此，在研究高速微观粒子的运动规律时，两大革命统一起来了。相对论与量子理论结合起来，形成描述高速微观运动规律的量子场论。量子场论中最成熟的是描述电子的电磁作用过程的理论——量子电动力学。特别是 40 年代发展起来的重整化理论，消除了量子电动力学中出现的发散困难。量子电动力学关于电子反常磁矩和氢原子能级拉姆位移的计算结果，以 7 位以上有效数字的精度与实验符合，使量子电动力学站稳了脚跟。人们对电磁相互作用的认识得到了深化。

人类认识的第二种相互作用是引力作用。在哥白尼(Copernicus)、开普勒(Kepler)、伽利略(Galileo)等科学家对天体运行的大量观测和归纳基础上，牛顿(Newton)提出了万有引力定律，它很好地解释了与引力有关的大量实验。物体间的引力作用是很弱的，只有涉及星体这样的庞然大物，实验上才能感受到引力作用；引力作用又与电磁作用不同，任何物质间都存在引力。因此，在许多电中性物体的运动中，例如宇宙中星体运行、地球表面物体的运动等现象中引力会占有优势。

牛顿万有引力定律提出以后，与实验一直符合得较好，长期以来没有人想到要修改这一定律。19 世纪实验观测到的水星近日点的进动，根据牛顿定理计算，尚有每世纪 43 秒的差异，但这矛盾还没有尖锐到必须修改理论的程度。爱因斯坦(Einstein)在提出狭义相对论后，对牛顿引力定律发生了怀疑。他从在局部时空引力和加速坐标系的惯性力间的等价原理出发，认为引力作用是和空间弯曲相联系的。1916 年爱因斯坦提出了广义相对论，牛顿引力定律成为广义相对论在弱引力条件下的近似。广义相对论不仅解释了水星近日点进动的 43 秒偏差，而且预言了光线在引力场中的偏转和在引力场中光谱的红移现象。不久，后两个预言都得到实验验证。近年来，随着天体物理和宇宙学的发展，又提出了一系列广义相对论实验验证方法，如无线电波传播中的时间延迟，脉冲星的研究，黑洞的探索，宇宙起源等问题。广义相对论把人们对引力相互作用的认识推到了一个新的阶段。

另外两类相互作用都是短程作用，只在微观现象中才显示出来，因此人类认识它们的时间不长，认识的深度也远远不及前两种作用。从放射性原子核的衰变中人类开始接触到弱相互作用，以后在观测微观粒子衰变现象中丰富了关于弱相互作用的实验积累。因为作用比较弱，通过这种作用衰变的过程寿命大致在亿分之一秒的量级，比起典型的通过电磁作用衰变的过程要慢七、八个数量级，所以这种作用命名为弱相互作用。

衰变涉及四个粒子，费米提出用四费米子耦合形式来描述衰变。1957 年李政道和杨振宁发现弱相互作用过程中的宇称不守恒现象，引起人们在观念上的突破，从而使对弱作用的认识大大向前迈进了一步。不久，从实验中总结出弱作用是(V-A)型矢量与轴矢量耦合作用，其中矢量流耦合

是守恒的，称为 CVC；轴矢量流耦合是部分守恒的，即只在高能现象中才守恒，称为 PCAC。弱相互作用的矢量流部分和电磁作用的同位旋矢量流部分有一定联系，它们构成同位旋三重态，这又反映了弱作用和电磁作用的内在深刻联系。这些对弱相互作用的认识在实验中得到很好证实。1964 年实验又发现弱相互作用有很小的 CP 破坏，即对电荷共轭变换和宇称反演的联合变换不变性有微小破坏。

四费米子耦合的弱作用理论只是一种低能近似，在很高能量它会与一种基本原则——么正性条件——发生矛盾。人们猜测弱相互作用可能和电磁作用类似：电磁作用通过光子传递，弱相互作用通过某种中间玻色子传递。经过格拉肖(Glashow, S.)、温伯格(Weinberg, S.)和萨拉姆(Salam, A.)的努力，在 1967—1968 年期间提出了弱作用与电磁作用统一理论，把人类对弱作用与电磁作用的认识提高到一个新的阶段。

人类对强相互作用的认识也是从核力作用开始的。原子核由质子和中子组成，原子核大小在十万亿分之一厘米的数量级，每个核子的平均结合能为 800 万电子伏特。原子核在裂变和聚变反应中，结合能发生变化，可以释放大能量，这就是原子能的理论基础。质子和中子能以如此大的结合能来束缚在如此小的范围内，它们之间必须有很强的相互作用。这种作用开始称为核力，后来发现它不仅存在于核子之间，也存在于其他一些微观粒子之间，故统称为强相互作用。存在强相互作用的粒子称为强子。强相互作用比电磁相互作用又强了许多倍，微观粒子如果通过强相互作用衰变，它的寿命的数量级比典型的通过电磁作用衰变过程快六七个数量级。人类对强相互作用的理解还是极其初步的。70 年代初提出的量子色动力学是目前相对比较满意的强作用理论。但是还有许多不清楚的问题等待人们去探索。

在目前实验能达到的能量范围内，微观粒子之间的引力作用一般可以忽略。只有在各种守恒定律禁戒强作用和电磁作用的过程中，弱作用才显示其重要性。而相对强作用来说，电磁作用又是很小的修正，只有在强作用禁戒的过程中电磁作用才能充分显示出来。强相互作用是目前认识的最强的作用。

除了这四种相互作用外，目前粒子物理理论中还提出超强相互作用，标量粒子间和标量粒子与费米子间的直接耦合作用等，这些还停留在理论的假设阶段，尚未得到实验的充分证实。

二、规范相互作用

量子力学中系统状态由波函数描写。波函数通常为复数，复数的幅角称为位相因子。另一方面，一切实验观测量必须为实数，让所有波函数共同变化一个位相因子，在实验中是无法观测的。公共位相因子的不可观测性，表现为量子理论的运动方程式对波函数共同的位相变换保持不变，这称为第一类规范不变性。这种规范变换的不变性是与电荷守恒相联系的。

根据狭义相对论的观点，一切能量的传播速度存在上限，即不能大于光速。让所有空间点的波函数同时作相同的相因子变换，就涉及信号的无穷大传递速度问题。为了协调这种矛盾，引入波函数的局域相因子变换，即变化的相因子与时空坐标有关，这样的变换称为第二类规范变换。为了

使动力学方程对第二类规范变换保持不变，必须相应地引入静止质量为零的规范场，称为电磁场。第二类规范变换不变性严格地规定了各类物质场与电磁场的相互作用形式。描写电子场的电磁作用的理论即量子电动力学，正是建立在这种第二类规范变换不变性的基础上，称为 $U(1)$ 规范作用。量子电动力学取得惊人的成功，使规范不变性成为探索新的运动规律的一种重要方法。对于人类尚未充分了解的新的相互作用，例如强相互作用和弱相互作用，规范不变性可以作为探索相互作用具体耦合形式的依据。

1954 年杨振宁和米尔斯 (Yang-Mills) 提出了对同位旋场规范化的 $SU(2)$ 规范理论，称为非阿贝尔规范理论。这是规范理论向前发展的决定性步骤， $SU(2)$ 规范理论很容易被推广到各种复杂形式的规范理论中去。当时 $SU(2)$ 规范理论中遇到的一个重大困难是，严格的规范不变性要求规范场的量子是零质量的矢量粒子。作为 $U(1)$ 规范场的电磁场，它的量子是光子，静止质量为零。但是，实验上再没有发现其他零质量的矢量粒子，这是非阿贝尔规范理论 (non-Abelian gauge theory) 提出以后没有迅速得到应用的根本原因。但是，凡是符合客观实际的理论一定会有顽强的生命力，会经得起时间的考验。60 年代末和 70 年代初，通过不同方法克服零质量矢量粒子的困难，在规范场论基础上，弱作用与电磁作用统一理论提出来了，描写强相互作用的量子色动力学提出来了，它们都取得了相当的成功。通过这两次成功的突破，统一各种相互作用的愿望又一次得到鼓舞和促进。

三、四种相互作用的统一理论

长期以来，人们有一种朴素的愿望，世界是统一的，各种基本相互作用应该有统一的起源。许多著名物理学家，例如爱因斯坦、海森堡、泡里 (Pauli) 等，在晚年致力于统一理论的研究，但是没有取得成功。规范理论提供了各种相互作用统一理论的诱人的基础。

1964 年黑格斯 (Higgs, P. W.) 提出一种克服规范场粒子零静止质量困难的方法。他引入一种标量粒子，后来称为黑格斯粒子，通过这种粒子的真空自发破缺，可以使与被破缺的规范对称性相对应的规范场获得静止质量。1961 年格拉肖曾在 CVC 和 PCAC 理论上提出过一种基于 $SU(2) \times U(1)$ 规范作用的弱电统一模型，这模型的零质量规范粒子的困难依然存在。1967 年温伯格和萨拉姆在格拉肖原始模型的基础上，利用黑格斯机制，发展和完备了 $SU(2) \times U(1)$ 弱电统一规范理论。弱电统一理论取得巨大成功，它的预言与实验符合得很好，特别是它所预言的新的规范矢量粒子于 80 年代初期在西欧联合核子研究中心 (CERN) 的实验中观测到了，它们的质量与主要性质都和理论的预言符合得相当好。

麦克斯韦方程统一了电和磁两种相互作用，这种电磁作用理论是一种阿贝尔的规范理论。现在，温伯格—萨拉姆模型又在非阿贝尔规范理论基础上把弱作用和电磁作用统一了起来。这模型的成功加深了人类对弱作用和电磁作用本质的认识，也推动人们在规范理论基础上把各种相互作用统一起来的努力。

弱电统一理论当然也不是十全十美的理论，它的最大困难在于黑格斯

场至今没有发现，这理论引进的一些参数还没有得到充分的理论解释，甚至这理论尚未解释弱作用所有主要性质。例如与奇异粒子弱作用过程有关的卡皮波 (Cabibbo) 角，在弱电统一理论中是作为外来因素放进去的，理论无法提供任何解释。

量子色动力学沿着另一条途径来解决规范粒子零质量问题。早在 50 年代末，日本的坂田昌一 (Sakata) 领导的小组提出强子存在着 $SU(3)$ 对称性。60 年代初，对称性理论吸引了粒子物理界浓厚的兴趣。1964 年盖尔曼 (Gell-Mann, M.) 提出强子由夸克 (quark) 构成的设想。1966 年北京粒子物理理论组提出强子的层子模型，并对强子结构进行了具体的定量计算。“文化大革命”期间，中国的科学研究停顿下来了，但国际上恰正处于十分活跃的时期。一系列实验证实了强子的夸克结构，并在此基础上建立起描写强相互作用的量子色动力学 (Quantum Chromo-dynamics)。按照这一理论，夸克带有两种量子数，分别称为味道和颜色。当然，它们与通常的味道和颜色概念毫无共同之处。根据目前的实验，共有五种不同味道的夸克，很可能会有第六种味道，每种味道的夸克有三种不同的颜色。各种颜色夸克之间存在强相互作用，这是一种 $SU(3)$ 规范作用，传递规范作用的规范粒子称为胶子 (gluon) 规范理论严格地规定了强相互作用的耦合形式。这种非阿贝尔规范作用有十分奇特的性质：耦合强度随能量增高而减弱，高能粒子间的作用变得很弱，可用微扰论来计算，称为渐近自由现象，这也在实验中观测到；相反，随能量降低，耦合强度不断增强，以致要把带颜色的夸克分割开需要无穷大的能量，称为颜色禁闭现象。由于颜色禁闭，在目前能量的实验中只能观测到没有颜色的状态，即颜色中性状态。因为夸克带有颜色，作为规范粒子的胶子也带有颜色，所以目前实验无法直接观测到单独的夸克和胶子，这就解释了目前实验没有发现这类零质量规范粒子的原因。

量子色动力学解释了强相互作用的一些实验现象，但也还存在许多困难。例如在低能情况耦合系数较强时，如何按照这理论作外微扰计算问题，又如颜色禁闭性如何从理论上作严格论证问题。

既然弱作用和电磁作用在非阿贝尔规范理论基础上统一起来了，而且强相互作用也是一种非阿贝尔规范作用，一个诱人的想法是它们能否在一个更大的非阿贝尔规范理论下统一起来，这就是所谓大统一理论的基本想法。最简单的大统一理论是 1974 年乔奇和格拉肖提出的 Georgi-Glashow $SU(5)$ 大统一模型。

大统一理论把夸克和轻子看成一种粒子的不同状态，用数学的话来说，大统一理论把夸克和轻子填在同一线性表示里，通过 $SU(5)$ 规范作用把它们联系起来。强相互作用，弱相互作用和电磁相互作用在非常高的能量 (百万亿倍质子的静止能量级，质子静止能量约为 10 亿电子伏特。) 下统一成一种 $SU(5)$ 规范相互作用。随着能量下降，通过黑格斯场的第一次破缺，描写强相互作用的 $SU(3)$ 对称性和描写弱电相互作用的 $SU(2) \times U(1)$ 对称性分离开了。能量继续下降，在 100 倍质子静止能量量级，黑格斯场发生第二次破缺，电磁作用和弱作用又分开了，形成目前实验观测到的三种相互作用。在大统一理论中，夸克和轻子可以通过 $SU(5)$ 规范场相互转化，原则上层子不再是稳定的，它可能衰变成介子和轻子。尽管黑格斯场第一次破缺的能量标度非常大，质子衰变的寿命非常长，但是

质子不稳定造成原子核不稳定，由原子分子构造起来的物质都将是不稳定的。大统一理论引起了观念上的突破。作为规范理论的大统一理论，它对质子衰变的寿命有相当明确的预言。80年代初，人们密切注视着实验的发展，但是实验没有观测到大统一理论所预言的质子衰变现象。当然这实验比较难做，有很强的背景干扰，目前还有人在不断地改进设备和方法，努力寻找质子衰变的事例，现在只能说目前实验不太支持 SU(5) 大统一模型。

大统一理论还有两个重要缺点。一个称为能量阶层问题。大统一理论中引入两次黑格斯自发破缺，破缺发生的能量标度相差 12 个量级，在两次破缺之间这么大的能量范围内，大统一理论认为不会有重大物理现象发生，称为“物质沙漠”，这是难以令人置信的。另一个称为代的问题。SU(5) 大统一模型只容纳一部分夸克和轻子，而把其他夸克和轻子重复地构成相同的 SU(5) 模型，称为代。目前实验发现有三代粒子。为什么会形成代的结构？一共会有几代粒子？大统一模型都没有提供解释。此外，大统一模型中的黑格斯场相当任意，与它相关引入了许多可以调节的参数，大大减少了大统一模型的预言能力。

为了克服大统一模型的缺点，70 年代后期又提出了超对称 (supersymmetry) 理论。按照这一理论，费米子和玻色子都填入同一线性表示中，通过规范作用可以互相转化。为了达到这一目的，理论不得不在已知的微观粒子基础上引入大量配偶粒子。超对称理论形式十分美妙，可惜这些配偶粒子至今都没有找到。

大统一的能量标度离完全由普适常数构成的普朗克能量只相差几个量级，进入超对称理论后，能量标度更加接近，因此，再把引力作用排除在外已不太合理。为了把引力也统一进来，把引力作用也理解为一种规范作用，建立了超引力 (super-gravity) 理论。

近三年来，一种新的统一理论正在兴起，称为超弦 (super-string) 理论。这理论认为微观粒子不是一个点，而是一条弦，并在弦的基础上形成一套量子化方法。这理论宣称这是第一次得到的可重整化引力理论，这理论只有几个基本参数，其他参数原则上都可以在理论中计算得到，只是由于数学上的困难，暂时还算不出来。人们期望这一理论可以统一四种基本相互作用，当然，目前困难还很大，对这理论持批评意见的人也很多。

用规范理论统一四种基本相互作用是一种诱人的因素，但是在前进道路上还会有许多困难，也有可能遭到失败。也许人们还会寻找新的途径去统一各种基本的相互作用。通过一系列探

索、失败、成功，再失败，再成功，不断发现矛盾，解决矛盾，每一次循环都在加深着人类对自然界的认识。

(马中骥)

混沌初开

——质子衰变与重子数起源

一、“质子衰变热”的由来

质子会衰变吗？如果质子是不稳定的，则木星上的质子衰变就会引起木星辐射。从而由木星的发射强度可以估算出质子平均寿命的下限，估算结果是 10^{18} 年。1954 年，莱因斯(F. Reines)、哥德哈伯(M. Goldhaber)首次对质子衰变进行了实验探索，结果断定质子寿命至少大于 10^{22} 年。随后，日本、印度、美国和欧洲的一些研究小组，先后投入质子衰变的实验探索，从公布的结果看，一般认为质子的寿命为 $\approx 1 \times 10^{32 \pm 2}$ 年。整整 30 年过去了，尽管至今仍然没有发现一个公认的质子衰变事例，质子衰变问题一直处于若明若暗的混沌状态之中。然而，人们对这一课题的兴趣与日俱增。从 70 年代末期以来，相继又有一些小组投入探测行列，实验规模越来越大，水平越来越高，广大粒子物理学家和宇宙学家都以急切的心情，关注实验的进展，人们希望能从新的实验事实中，迎来“混沌初开”的局面。

为什么在极大科学（宇宙学）和极小科学（粒子物理学）这两个不同领域中同时出现“质子衰变热”呢？宇宙学必须解释粒子的宇宙生成问题，即观测宇宙中的重子—反重子不对称的问题；而质子衰变是粒子物理“大统一模型”的自然结果。如果质子确实存在衰变，那么，大统一理论基本设想的正确性就有了实验基础，进而为大爆炸宇宙学中的粒子生成提供了理论基础。这样，人们可把大爆炸时的早期宇宙，作为大统一模型特殊的“实验室”，使极大与极小的两门学科紧密地联系起来。有理由期待，由于它们的相互渗透和汇合，将导致这两门学科有突破性的进展。另一方面，“重子数守恒”是粒子物理中的一条重要定律。它的最强有力的证据之一是，质子是绝对稳定的。因此，重子数到底是绝对地、严格地守恒，还是有条件地近似地守恒？质子衰变的实验探测，将有最终的判决。总之，解决了质子衰变问题，就有可能解决重子数起源问题。人们一旦对重子数起源有了真理性的认识，人类对于过去、现在和未来将有更多的了解和更丰富的知识。这正是广大物理学、宇宙学和哲学工作者屏息以待地想弄清“质子衰变”问题的动因。

二、观测宇宙中重子—反重子的不对称性

1933 年，狄拉克因他的正、负电子理论的成功而荣获诺贝尔物理学奖。长期以来，物理学家一直推崇狄拉克的杰出理论：“每个基本粒子都存在一个反粒子，它们具有相同的质量和自旋，而所有其他的量子数如电荷数、磁矩、重子数等等都有着相反的值。”狄拉克主张宇宙是对称的。从宇宙的尺度来看，应当有一半的物质，一半的反物质，二者在数量上是相等的。他在诺贝尔演讲中认为，地球或整个太阳系中，电子及正质子在

重子是包括质子在内的可以衰变为质子的粒子。

数量上占优势“实在是一种偶然”。他说：“十分可能，对某些星球来说，情况并非如此。即这些星球主要是由正电子及负质子构成的。事实上，可能每种星体各占一半。这两类星体有完全相同的光谱。用现有的天文学方法，无法辨别这两类星体。”的确，对称的宇宙显得自然、和谐，较为符合美学判据。

然而，物理学和宇宙学都决不是纯理论的思辨性科学，它们必须首先尊重并立足于确切无疑的观测事实。愈来愈多的事实却表明，观测宇宙中的粒子含量远远大于反粒子含量，二者是不对称的。狄拉克的猜测违背了观测事实，因而是错误的。

现在的观测表明，宇宙间的重子数平均密度 n_B 为 10^{-6} 个/厘米³，即每一立方米的体积中大约有一个重子，而反重子数 $n_{\bar{B}}$ 的平均密度为零。根据标准的大爆炸宇宙学计算，今天的观测宇宙线度为 10^{10} 光年 (10^{28} 厘米)，因而宇宙中的重子与反重子的总数差为 10^{78} 个。以此回推至大爆炸的极早期，当 $t=10^{-35}$ 秒时，按标准模型计算，当时宇宙线度约为 1 厘米，因此，当时重子与反重子的数密度差为

$$n_B = 10^{\overline{78}} \text{ 个 / 厘米}^3. \quad (1)$$

另一方面，在 $t=10^{-35}$ 秒时，温度 $T=10^{28}$ K，由标准模型可得总粒子数密度 $n_B = 10^{87}$ 个/厘米³。

这样，由 (1)、(2) 可得，在早期宇宙中重子的不对称程度为

$$\frac{n_B - n_{\bar{B}}}{n_B} = \frac{10^{78}}{10^{87}} = 10^{-9}. \quad (3)$$

由 (3) 可知，今天观测宇宙中存在这样多的重子，则要求在早期宇宙中正反重子含量的不对称性是：

$$\frac{n_B}{n_{\bar{B}}} = 1 - 10^{-9} = 0.999999999, \quad (4)$$

即当时每 10^9 个重子大约伴随有 $(10^9 - 1)$ 个反重子。显然，这种不对称性是十分微小的。但为什么会有这样的不对称呢？这是大爆炸宇宙学必须加以回答的问题。

三、宇宙学中的重子数起源

大爆炸宇宙学的基本观点认为，宇宙间的一切都有其生成的过程，现有的各种复杂的、不对称的宇宙现象，都是从简单的、对称的原初宇宙演化而来的，式 (4) 的不对称性，也应从原初对称的宇宙（即重子与反重子的数密度相等）演化而来的。由对称演化到不对称，这就产生了“重子数起源”问题。

1967 年苏联物理学家萨哈洛夫 (Sakharov) 提出，从重子—反重子对称的宇宙中演化出重子数的不对称需要三个要素：

1. 存在改变重子数 B 的作用；
2. C 和 CP 都不守恒；
3. 存在对热平衡的偏离。

这里最基本的前提是第 1 条，如果存在改变重子数 B 的作用，必然也

存在重子数不守恒的过程。“重子数守恒”简称B守恒，其义即：在粒子的变化过程中，重子数减反重子数是不变的。质子是最轻的重子，如果它是不稳定的，就只能衰变为不是重子的更轻的粒子，那就必然会破坏B守恒。所以，倘若发现质子衰变，就直接证明了B并不总是守恒的。

存在B不守恒过程，对于解决重子数起源问题仅仅是必要条件，但并非充分条件。因为，即使质子是不稳定的，但若反质子也是不稳定的，且两者的衰变率相同，那还是不能从正反质子的对称状态演化到正反质子的不对称状态。因此，解决重子数起源问题的另一个必要条件是存在着正反粒子之间不对称的过程，这种过程一般称为C破坏过程或CP破坏过程。这里，P代表空间反演，也就是左右互换；C代表电荷共轭，即粒子与反粒子互换；CP守恒意即：将左右互换同时又将粒子与反粒子互换，物理规律仍保持不变。由于一个系统的熵在重子与反重子的数目相等时最大，故偏离热平衡时产生不对称的微观相互作用也是必要的。因此，一旦上述这些过程偏离热平衡，就可以使一个起初对称的宇宙进入一种重子多于反重子的不对称状态。这就是萨哈洛夫提出的第2、3条要素。

CP不守恒的过程，早在1964年就被美国物理学家克劳宁(Cronin)、菲奇(Fitch)等人所发现(这一发现使他们两人共获1980年诺贝尔物理学奖)。这就是长寿命中性 K_1^0 介子的衰变。这种介子有以下两种衰变过程：

$$K_1^0 \rightarrow \pi^- + e^+ + \bar{\nu}_e ;$$

$$K_1^0 \rightarrow \pi^+ + e^- + \bar{\nu}_e ,$$

因为 K_1^0 的反粒子就是它自身，所以，如果CP是守恒的。则上述两种衰变方式的机会必定是相等的。克劳宁等人的成功实验证明， K_1^0 更多地是按第一种方式衰变。具体地说， K_1^0 介子衰变为(π^- 、 e^+ 、 $\bar{\nu}_e$)的可能性比衰变为(π^+ 、 e^- 、 $\bar{\nu}_e$)的可能性略大0.33%，因而CP对称性破坏了。尽管这种不对称的程度十分微小，但 K_1^0 介子的衰变过程却明确无误地表现出CP破坏是一个真实的效应。克劳宁在他的诺贝尔演讲中说：“这个效应告诉我们，在物质和反物质之间存在着基本的不对称性。”

四、大统一理论与宇宙演化

自然界中是否存在着改变B的作用？ K_1^0 介子衰变的CP破坏是否与重子的不对称有直接的联系？在日常经验中为什么质子是稳定的？对这一系列问题，大爆炸宇宙学并没有给人们提供更多的知识。怎么办？在现代科学日趋整体化的今天，人们早已冲破了各传统学科之间的专业壁垒，在相互衔接的领域中探索、挖掘和耕耘。人们把“大统一理论”的研究成果运用于宇宙演化，这就为解决“重子数起源”开辟了新的前景。

大统一理论的目的，是在弱电统一的基础上再把强相互作用也统一进来，在理论上作出统一的描述。当前最流行的大统一模型是SU(5)，它将夸克与轻子统一在一起使之可以相互转化，这正是重子数不守恒的根据。在这种理论中，除传递电磁力的光子、传递弱作用的玻色子、传递强作用的胶子外，还要求有导致重子数不守恒的新作用传递者。这种新作用称之为超弱作用，其传递者总称为“X粒子”。由于X粒子能引起B守恒

的破坏，则正反 X 粒子就可能有以下的衰变方式：

$$X \rightarrow q + \bar{q}, X \rightarrow \bar{q} + \bar{l};$$

$$X \rightarrow \bar{q} + q, \bar{X} \rightarrow q + l;$$

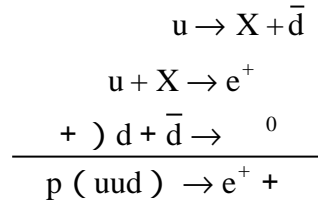
这里，q、 \bar{q} 表示正、反夸克，l、 \bar{l} 表示正、反轻子。X与 \bar{X} 的一类可能衰变方式如下：

$$X \rightarrow 6^+ + \bar{u} (B = -\frac{1}{3}), X \rightarrow d + u (B = 2/3)$$

$$X \rightarrow e^- + n (B = \frac{1}{3}), X \rightarrow \bar{d} + \bar{u} (B = -2/3)$$

这些过程的存在，就会导致质子的衰变。

质子是由 u, u, d 三个夸克组成的。通过 X 粒子的媒介作用，可以使两个夸克转化为轻子和反夸克，这个反夸克与质子中第三个夸克组成介子，于是质子衰变为轻子和介子。具体反应序列例示如下：



由 X 粒子耦合的相互作用是非常微弱的，而 X 的质量非常之大，故质子寿命极长。理论上预计，X 的质量约为 10^{15}GeV (相当于质子质量的 10^{15} 倍)，质子衰变的平均寿命约为 10^{31} 年。也就是说，大统一理论预言，只有当能量高达 10^{15}GeV ($G=10^9$) 时，B 不守恒的过程才会起显著作用。目前最大的高能加速器只有几百个 GeV，所以，对于 B 不守恒过程，在实验室里是难于实现的。什么地方会有如此高的能量呢？人们自然想到了大爆炸时的宇宙。

大爆炸宇宙学认为，现在的宇宙，是距今约 150 亿年前，由大爆炸开始的，爆炸后，物质以匀质而且各向同性地剧烈膨胀，从无限高的温度冷却下来。这一理论，得到 2.73K 背景辐射和宇宙空间氦的丰度等观测事实有力的支持。如果把大爆炸的标准模型外推上去直到接近爆炸的零时刻，那么空间全体的总能量应达到 10^{15}GeV 以上。这样，大统一理论为重子数起源提供了演化机制，而大爆炸后的极早期宇宙为重子数起源创造了环境条件，两者的结合，就能较自然地解释重子数的不对称问题：

在宇宙年龄小于 10^{-35} 秒时，则温度高于 10^{28}K ，对应的粒子热运动能量大于 10^{15}GeV ，虽然宇宙间有许多 X 与 \bar{X} 粒子，B 不守恒的过程普遍存在，但由于宇宙介质处于热平衡，所以重子与反重子的数密度保持相等，宇宙处于总重子数 $n_B - n_{\bar{B}}$ 为零的状态；当宇宙年龄到达 10^{-35} 秒时，情况就不同了。这时宇宙的能量尺度将开始低于 10^{15}GeV ，X 与 \bar{X} 粒子都将开始湮没或衰变而消失。如果这种衰变又是 CP 破坏的，衰变的结果将导致 $n_B - n_{\bar{B}} \neq 0$ 。即形成了重子—反重子的不对称。也就是说，如果大统一理论预言的 X 粒子存在，那么粒子和反粒子之间的不对称就会在 10^{-35} 秒的

宇宙大爆炸的标准模型存在许多根本性的弱点，不能用来描述宇宙演化的极早时期。

时间以内自然而然地产生。目前理论推测，这种不对称程度（ $n_B - n_{\bar{B}}$ 与 n_B 之比）为 10^{-9} ，此后，重子与反重子的总数差不会再改变，而密度差 $n_B - n_{\bar{B}}$ 将因宇宙膨胀而降低。在温度降至 10^{13} K时，正反重子将成对湮没，留下来的是一个由过剩重子构成的宇宙，而反重子则完全消失了。这就是今天人们看到的情景。

把粒子的统一理论和宇宙演化问题和谐地结合起来，绘出一幅自然而合理的演化图像，使人们看到解决重子数起源问题的曙光，因而激励了很多人认真地采纳了统一的观念，投入对各种大统一模型和宇宙演化问题的深入研究。1981年，美国国家科学基金会在加利福尼亚大学圣巴巴拉分校理论物理研究所试行一种新的研究方式，即邀请世界各地从事同类问题研究的学者，进行半年到一年的集体研究，期望他们共同努力，取得比他们各自独立进行研究更丰硕的成果。在1—6月的半年中，他们集中探讨了宇宙学与粒子物理之间的密切联系，进行了有关早期宇宙的研究，取得了许多成果。现在看来，虽然描述重子不对称生成的标准方案迅速得到了广泛的接受但这个模型仍然存在若干基本的不确定性。不确定之一涉及作为初始条件的热平衡假设。有人指出，如果宇宙最初不是处于热平衡状态，那末所产生的不对称量级就可能不同。另一不确定的地方是CP破坏的量级和类型。克劳宁在1980年的诺贝尔演讲中说：“我们今天观察到的CP破坏是否是上述猜测的宇宙早期事例的‘遗留化石’，这个问题现在还不能作出回答。……我们对CP破坏还知道得不够”，“我们需要知道CP破坏的理论基础，我们需要知道怎样可靠地将CP破坏特性外推到超高能区。”随着研究的深入，重子不对称不能直接与 K_1^0 系统的CP破坏相联系，这一点已几乎成为定论。有人提出了一个决定重子不对称的CP破坏与中子电偶极矩而不是与K介子系统相联系的模型（中子电偶极矩是CP破坏的另一种可能形式）。人们还在探索之中。总之，重子数起源的理论获得相当进展，同时也存在一些尚待解决的基本难题。

五、质子衰变的实验探索

实践是检验真理的标准。重子数起源说必须等待进一步的观测结果，以判断它的可靠性。质子衰变的实验探索是在当前条件下较为可行的观测项目。

要从实验上探测质子衰变是极不容易的。因为质子寿命极长，衰变事例极少，加上衰变后的产物不易探测和甄别，此类实验绝非易事。全部实验必须具备如下条件：第一，要有足够多的观测物质，假设质子寿命为 10^{31} 年，当我们守望池中4000吨水时（约含质子和中子 2.5×10^{33} 个），每月可以期望看到20个衰变事例。扣除其他效应，能够观察到的大概只有一半。因此必须有大量的监测物质。（除 H_2 外，一切物质中都含有将近一半的中子。中子也是由夸克组成的，也会由于其中的夸克传递一个 X 粒子而衰变。在一切“质子衰变”实验中，也计入了这样的中子衰变。）第二，必须排除宇宙线的干扰。即实验必须深潜在地下或海底进行，利用土层或海水来防止宇宙射线，但宇宙线中有高能 μ 子和中微子， μ 子的穿透力很强，仍有一部分深入地下，而中微子几乎可穿透地球而毫不衰减。按大统

一理论，质子衰变最经常的可能方式为 $p \rightarrow \pi^0 + e^+$ 。 π^0 又会立即衰变为两个光子。我们可从测定装置内的某一点上突然放出一个 e^+ 和两个光子的现象而观测到。可是，如果宇宙线中的中微子被质子吸收而发生 $p + \bar{\nu}_e \rightarrow n^0 + e^+$ 那样的过程，我们就难于辨伪了。因此，第三，要有一套能利用质子衰变产物的径迹和能量等特征来鉴别信号真伪的装置。

最早的实验是莱因斯和哥德哈伯于 1954 年进行的。他们用了 50 公斤闪烁体，质子和中子的总数约为 3×10^{28} 个。如果有一个质子衰变为 e^+ 和 π^0 ，那么每个粒子的能量应接近于 500MeV，其中 π^0 又很快衰变为高能光子。这些高能粒子在闪烁体中运动时会使闪烁体发光。用光电倍增管接受这些光信号可以计算出高能粒子的运动轨迹和能量，从而可以把质子衰变和宇宙射线的干扰区别开。为了减小宇宙线的影响，实验是在一个 30 米深的地下室进行的。该实验运行了几小时，每秒钟有几次闪光，但分析结果认为这些闪光都是宇宙线引起的假信号，未发现一个质子衰变事例。由此可以断定质子寿命至少大于 10^{22} 年。

与当前正在进行的几组实验相比，1954 年的首次实验，在规模上实在太小了。目前的质子衰变实验大体可分为两类：

一类用水作观测物质。高能带电粒子在水中运动时，只要其速度大于水中的光速就要发光（切伦科夫效应）。在非常纯的水中，光的传播距离可达数十米，比粒子的射程长得多，因此可以用较少的仪器来监测较多的物质。目前最大的实验是在美国俄亥俄州的一个 600 多米深的盐矿内进行的。这个研究组由加利福尼亚大学欧文分校、密执安大学、布鲁克海文国家实验室以及美国、英国、波兰的一些其他大学的人员组成，带头人是莱因斯。探测器的中心是 $17 \times 18 \times 23\text{m}^3$ 纯水，矩形体的六面围以 2048 只光电倍增管，每只直径为 12.5cm，依此探测 e^+ 和两个光子在通过纯水时的切伦科夫辐射，经过 130 天的连续观察，未测到一个衰变事件。1983 年他们宣布，质子衰变的平均寿命的下限为

$$> 6.5 \times 10^{31} \text{ 年}$$

另一类以铁或混凝土为监测物质。铁比重大，因而同样多的核子数的铁占地较小。但铁不透明，没有切伦科夫效应可资利用，只能直接探测衰变产生的次级粒子。由于这些粒子在铁中的射程只有几个厘米，因此，实验装置须做成一层铁、一层探测器相间叠合起来。这种装置中单位重量物质所用的探测器和电子系统比前一类多得多，所以这类装置一般都在 100 吨以上。一个典型的实验，正由日本东京大学和印度的科学家合作在印度的科拉尔金矿 2300 多米深的地下进行。1982 年夏天，这个组宣布，认为发现了三个质子衰变事例，而且定出质子的寿命为

$$= 7 \times 10^{30} \text{ 年}。$$

还有欧洲组，他们在意大利、法国边境的阿尔卑斯山脉勃朗峰的隧道中进行实验。1983 年，欧洲组也宣称观测到一个衰变事例。

最简单的 SU(5) 大统一理论预言，质子衰变的平均寿命不大于 2.5×10^{31} 年。至 1983 年，印度的“金矿”组的实验数据支持了 SU(5) 模型，但美国的“盐矿”组的结果却与 SU(5) 相悖。人们普遍认为，从实验规模、观测方法和统计精密上看，美国“盐矿”的实验比较可信，而“金矿”的实验比较粗糙，其结果并不令人信服。

据报导，1984 年元月初在美国犹他州召开的一次会议上，印度、美国

俄亥俄州、日本、瑞士和美国犹他州共五个实验组，公布了有关质子衰变的实验数据。其中在日本神冈的某矿井中的实验组比较肯定地宣布，他们发现了两起质子衰变事例。印度“金矿”组报告了他们又发现一个新的事例，从而把他们认为可能是质子衰变事例增加到四个。但是，俄亥俄“盐矿”组还是持否定态度。他们报告说，在 200 天的工作中共有 170 个衰变现象被记录，但所有这些现象又都可以归因于中微子引起的假信号。他们得出的结论是，质子的平均寿命大于 2×10^{32} 年，因此，质子能否衰变，仍然是一个悬案。不过，可解释为质子衰变的事例已在增加。

六、重子数起源与科学的整体化趋势

重子数起源是粒子物理和宇宙学中的前沿课题。经物理学家和宇宙学家的协同努力，目前已提出了较为合理的重子数起源方案。人们首先希望通过质子衰变的实验探索来取得突破。从 1984 年几个质子衰变研究组的实验结果中，人们已看到“混沌初开”的端倪。虽然尚未解决的问题还很多，道路还很曲折，但步伐正在加快，这是无疑的。人们看到，在这一课题的研究、探索过程中，学科间的相互渗透作用是多么重要，重子数起源的探索充分运用了粒子物理和宇宙学这两个学科的成果、方法和手段，这就是基础理论之间的相互融合，研究方法的相互移植和研究手段的相互配合，这些都是科学正在走向整体化的生动体现。

物质运动形式既是多样的又是统一的。各门学科之间也是既有区别又有联系、相互过渡和相互转化的。当不同学科对客观现象的研究越是深入、细致时，就越是感觉到各个事物和各种现象之间的相互联系越是密切。粒子与宇宙是物质世界的两个极端，在粒子物理与宇宙学这两个似乎迥然不同的领域中却存在着汇合点，它就是早期的宇宙。在那时候，宇宙介质是由大量高能粒子构成的超高温气体，因而高能粒子的规律成了支配宇宙整体行为的基础。就在这个汇合点上，粒子物理的大统一模型与宇宙学的大爆炸模型相互融合了，从而产生了重子数起源的新方案，它不仅帮助人们了解宇宙的演化，而且也能帮助人们判断粒子物理理论中哪些要素是合理的。

在粒子物理中，对称性方法是一种十分重要的研究方法。人们可以根据对称性来判断一个过程能否发生。也可以在不了解某种相互作用的具体形式时，根据一般的对称性原理来唯象地使粒子之间发生一定的联系，从而便于对它们进行系统的研究。对称性还决定了粒子的寿命。因为粒子的衰变是由相互作用引起的，相互作用越强，粒子衰变得越快，则寿命就越短。正是对称性方法在粒子物理中起着重要的作用，狄拉克把它誉为“理论物理学新方法的精华”，而海森堡则盛赞对称性反映了当代“自然科学时代的精神”。人们把对称法移植于宇宙学，其侧重点则在于研究事物的不对称性。即从自然界中物质多于反物质这一观测事实出发，研究如何从重子-反重子对称的宇宙演化成现今重子数不对称的宇宙。从而提出自然界应该存在着重子数不守恒和 CP 对称性破坏的过程，这种新思想的提出，不仅促使人们重新审查粒子物理中某些守恒定律的适用范围和对称性破坏的机制，进一步推动物理学的发展，而且在思想方法上提醒人们注意：既要重视对称法的普遍性和有效性，也要注意它的相对性和局限性，不应把对

称性绝对化，而应加以辩证地运用。

学科间的相互渗透和结合，也带来研究手段的变化。大型加速器一向是粒子物理学家的基本工具。而宇宙学家的基本工具历来是大型望远镜。如今，粒子物理学家则对大爆炸遗留的奇异粒子大块物质的搜寻、氦及氘的宇宙丰度、星系的分布、微波背景的结构以及探测太阳中微子等实验十分关注。宇宙学家却对高山宇宙线的观测、加速器和反应堆上的实验、分数电荷的探测、磁单极的搜寻等发生兴趣。对深地下矿井中的质子衰变的实验，更是他们共同关切的目标。总之，粒子物理的探测范围由实验室扩展到深空，深入到地下；宇宙学则由深空进入实验室并深入地下，两门学科的研究手段紧密配合，正朝着共同的目标挺进。

（吴为平）

走向混沌？走出混沌？

——有序与无序的疑难

有序与无序及其相互转化是现代自然科学普遍关心的问题。各门自然科学都从不同的侧面研究其对象的秩序性问题，但是，对这个问题的研究确实遇到了很多困难。

一、有序与无序的概念及其历史

所谓有序，是指事物内部的要素或事物之间有规则的联系和运动转化；无序是指事物内部各种要素或事物之间混乱而无规则的组合和运动变化。有序与无序在一定的条件下，统一形成事物的秩序。

古人早就对世界的秩序进行过直观的猜测。中国古代思想家们认为，世界是从毫无秩序的一片混沌发展来的。他们把太古时期描述为“混沌相联，视之不见，听之不闻”。后来，盘古开天地，“阳清为天，阴浊为地”，天和地就从混沌中分化出来了。大诗人屈原则认为，人类面对的自然是从混沌中发展来的观点，是无法考证的，“遂古之初，谁传道之？上下未形，何由考之？”他还进一步问道：“明明暗暗，惟时何为？阴阳三合，何本何化？”他提出的问题，是当时自然科学根本无法回答的。

古希腊的哲学家们，有许多人也认为，世界发展的方向是从混沌到有序。例如，赫拉克里特认为，世界是由火分化产生出来的，德谟克里特则认为，世界是由杂乱无序的原子，由偶然的碰撞结合而产生的。

历史跨入近代以后，人类对有序与无序的探讨，就逐步地建立在自然科学的基础之上。法国的狄德罗认为，“混沌是不可能的，因为由于物质的原始性质，本质上就存在一种秩序”。他说，宇宙是有序的，它类似于一个弹性体，一旦外力的干扰终止，它就会回到原来的秩序上去，有序是物质的原始属性。康德在《宇宙发展史概论》中，也有类似的观点，他指出：“大自然即使在混沌中，也只能有规则有秩序地进行活动。”著名哲学家黑格尔不同意世界单纯地从无序走向有序的观点，也不同意世界是单调地从有序走向混沌的观点，他认为，“这两种过程都是片面的和表面的，都设置了一个不确定的目标。”

现代，自然科学更为广泛地探索了有序和无序的关系，但在这种探索中，面临着许多困难。

二、有序与无序的疑难

自然界的秩序究竟是怎样建立和发展的？是从无序向有序发展，还是从有序向无序退化？无序和有序是如何转化的？转化的规律和途径是什么？自然科学在回答这些问题时，受到了各种各样的挑战。

自然界中确实存在着从无序向有序、从低级秩序向高级秩序发展的趋向。例如，现代天文学认为，弥漫的星云可以发展为有序的星系。在天体演化的过程中，伴随着化学元素的演化。化学元素的演化也经历着从无序到有序的过程，在“大爆炸”的早期，半小时之内，先形成各种简单的化

学元素，主要是氢和氦。后来，星云变成了恒星；恒星形成以后，由于引力收缩使恒星的内部温度升高到 $7 \times 10^6\text{K}$ 时，氢聚变成氦。当这种聚变反应终止以后，恒星的引力收缩又占了优势，从而使恒星内部温度升高达 $1 \times 10^8\text{K}$ 时，又发生了氦聚变成碳、氧等元素的核反应。氦聚变的核反应终止以后，引力收缩又占了优势，从而使恒星的中心温度再次升高。当温度达到 10^9K 时，就发生了“碳、氧燃烧”的核聚变反应。从而形成镁、硅、硫等更复杂有序的核。这样，化学元素就在恒星的中心由低级有序到高级有序，由简单到复杂发展起来了。化学元素是否总是这样无休止地从无序到有序、从简单到复杂的前进呢？幻想不断合成新元素的人们，希望是这样的，所以他们总是不遗余力地在大型现代化设备中，进行原子核的融合反应或转移反应，总希望得到更大的核。原子核的幻数理论也预言，在化学元素周期表第 114 号和 164 号位置上，可能存在着超重元素的“稳定岛”。但是，众多学者无数顽强地努力，都没有能合成或寻找到这种高度复杂有序的元素。这说明，化学元素无限地向着有序化和复杂化发展的观点，是难以成立的。究竟是为什么，科学上还难以回答。

说明世界是从无序向有序、由低级到高级无限发展的自然科学理论，最典型的是生物进化论。早在 18 世纪布丰就提出来了。1809 年，拉马克又提出了比较系统的理论。1859 年，达尔文在《物种起源》中，比较详细和充分地阐明了进化论的系统观点，他用丰富的材料证明，生物的发展是从无序到有序，由低级单细胞生物向高度有序的人类进化的过程。后来，有人把这种观点加以引伸和发挥，认为自然界总是从低级向高级无限地发展的。但是，如果自然界无限地从低级向高级，从简单到复杂发展，是不是迟早有一天发展出“上帝和诸神”来，发展出“全知全能”、“佛法无边”的东西来？显然单单采用进化论的思想是无法回答这些问题的。

热力学中，却提出了和进化论完全不同的观点。克劳修斯在 1850 年提出了热力学第二定律，即熵增加原理，熵增加的不可逆过程，是一个从有序到混乱的过程，也就是一个物质和能量从不均匀状态到均匀状态的过程，而这一过程是自动的和不可逆的。克劳修斯把他的热力学第二定律，推广到了宇宙中去，他认为根据熵增加的原理，整个宇宙会自动地由有序变为无序，随着宇宙的熵趋于极大，太阳和其它恒星的燃料烧尽之后，宇宙万物就会达到热平衡，那时，现有有序的宇宙就会变为无序的宇宙，一切运动就会停止，一切都会死亡，这就到了世界的末日，这就是通常说的“热寂说”或“热死论”。这种观点，曾受到过软弱无力的批评，但没有被驳倒。

达尔文和克劳修斯从不同的两端，揭示了互相矛盾的世界变化的图景和趋势：对于认为世界的变化是从无序到有序，生物进化就是证明；对于认为世界的变化是从有序到无序，热力学第二定律就是证明。二者谁是谁非呢？科学上长期争论，得不到圆满的解决。恩格斯曾认为，恒星散失到宇宙中的热量会重新聚积起来，也就是认为现存的宇宙变为无序以后，还会变回来，那么怎样才能变回来呢？他说，“指明这一途径，将是以后自然科学的课题”。这个问题解决得怎么样了呢？回答是：不够理想。

近年来，比利时科学家普利高津，建立了耗散结构理论，西德物理学家哈肯创立了协同学。这两种理论，是统一进化论和热力学第二定律的最有希望的理论，目前也取得了一定的成功。耗散结构和协同学等非平衡系

统的自组织理论，研究了系统怎样从混沌无序的初态，向稳定有序的终态演化的过程和规律，并力图描述系统在临界点附近相变（质变）的条件和行为。这种理论指出：一个远离平衡态的开放系统，通过与外界交换物质与能量，从外界获得负熵流来抵消自身的熵产生，有可能在一定的条件下，使系统从一种混沌无序的状态，发展成一种稳定有序的结构。这说明，即使是按着热力第二定律，整个宇宙有走向无序的倾向，而其中的一个部分，却会发生相反的过程，即向着有序化复杂化发展。

现在，根据最新科学结论，可以初步地得出，混沌在一定的条件下会转化为有序，有序在一定的条件下又会归于混沌，但是，具体自然过程的具体条件是什么？转化的过程如何？有没有普遍的模式和最基本的条件？对这些问题科学上尚难以定论。

三、对有序与无序的深入探讨

现代自然科学不仅注意从无序到有序过程的研究，同时也注意到了相反过程的研究。1979年以后，哈肯等人认识到，一个非平衡的开放系统，不仅可以通过突变从无序变为有序，而且还可以通过突变从有序再进入混沌。例如，水绕过圆柱体流动时，当流速比较低时，在圆柱体水流去方向的一侧，形成与圆柱体相似的平流花纹，当流速增大到某一阈值时，在圆柱体的后侧形成一对有序的对称旋涡，当流速再增大到一个新的阈值时，旋涡就处于振荡之中，速度再增大，最后形成湍流，进入混沌状态。这种现象看起来很简单，但是，要定量地用数学模式说明它的机制，却是相当困难。

美国著名科学家费根巴姆（Feigenbaum）为了说明从有序进入混沌的机制，最近提出了一个“周期加倍”的理论。该理论指出：当系统的外界参数变化时，系统的运动可能从有序走向混沌。例如，参数在一定范围内，体系出现周期为 T 的运动，但一旦变化超过这一范围，体系就只有周期为 $2T$ 的运动……，这样发展下去，运动的周期就会不断加倍，最后导致完全无序。“周期加倍”也叫“倍周期现象”，它描述了系统从时间上有节律、有周期的有序运动状态，向时间上无节律、无周期的运动状态变化的途径和规律。许多学者指出，这种通过倍周期的途径而使系统走向无序的过程，具有一定的普遍性，这也是目前研究的最细致的通向混沌的道路。但是，用这种理论解释一些现象时，也会遇到一些麻烦，即，对时间序的解释还好办一些；对空间序的解释，就困难得多，在许多情况下，是软弱无力的。

在通向混沌的道路上，还有一条阵发混沌的道路。阵发混沌的系统，在时间行为上，时而有周期（有序性），时而又趋于混乱状态，随机地在二首之间跳跃。在这种状况下，系统有可能随着周期部分的比例的逐渐缩小，一直到消失，最后，体系归于混乱状态。

无论是“倍周期理论”还是“阵发混沌”的理论，还都没能成为解释从有序通向混沌的普遍的模式，还都需要科学家们进一步深入的探讨。

人类在研究空间序的时候，也遇到许多麻烦。

在本世纪60年代以前，人类主要研究的是空间有序结构，如晶体等。对这类结构的研究曾取得过辉煌的成果。大部分科学成果都是以有序结构为对象的，遇到无序问题，就化为有序问题来对待，最好是化为线性问题，

这样就能严格定量地描述，建立统一的数学模式。但是，对于无序结构或系统，则研究得比较少，在这方面，那怕是提出最粗浅的问题，也难以回答，或者作出错误的回答。例如，对高聚物的无序聚积态，橡胶、玻璃的无序微观结构，人类还主要靠经验的方法，做些粗浅的定性的描述，许多问题解决得都不理想。近年来，在这方面的研究有了些进展。例如，美国著名学者 P·W·安德森，提出了非晶态理论（有关无序结构的理论）。他比较系统地研究了玻璃体等无序结构，并试图对无序问题用数学方法加以描述，从而取得了许多重要成果，尽管还有大量的困难问题要解决，但毕竟还是奠定了非晶态理论的基础，他的这一成果曾获得了 1977 年度的诺贝尔奖金。但是，对无序结构，仍然有许多困难问题要解决，这比研究有序结构要困难得多，不仅对这种结构内部运动变化的规律难以寻求，而且在数学方法上也遇到了难以克服的困难。有些学者，在研究有序和无序及其辩证转化时，曾采用著名数学家托姆的突变理论，虽解决了一些问题，但还是不够理想。这一方面是由于突变理论本身还不够完善；另一方面是有序与无序相互转化中，不仅有突变还有渐变，不仅有有节律的变化，还有无节律的变化，是一个非常复杂的过程，要把这个过程简单化，还是一个十分困难的课题。

在目前，对于有序与无序的转化的研究，往往采取把时间结构与空间结构分解开来的方法进行。而现实的自然系统，有许多都是时间结构与空间结构统一起来的时空结构，时空结构的参数多，变化复杂。特别是对于时空都无序的结构和系统地研究和描述，更遇到极大的困难。这类问题，成了现代科学中一个很大的谜团，这种谜团的解决，必然促进科学的进步和人类认识的深化。

（王德胜）

山外青山楼外楼

——非线性理论中的孤子与混沌

人类的发展史表明科学的理论总是从简单到复杂，从特殊到一般，从粗糙到精确，一步步逐渐深化的。因此，以数学为工具，以物理学开路的严密自然科学在初期阶段总是力图把描述对象简单化、近似化，在数学方面采取的一个重要办法就是线性化。

但是，随着科学的发展和人类向更完美的目标的持续追求，复杂的自然界不断促使我们逐渐地把一个个线性理论发展为非线性理论。如：理想流体力学发展为非线性的纳维尔—斯托克斯（Navier - Stokes）理论；牛顿引力定理发展为非线性的爱因斯坦引力场方程；线性振动、波动发展为非线性的；光学、热力学、统计力学等都从线性理论发展为非线性理论。还有，玻恩等试图发展非线性的电磁理论；海森堡、德布罗意、玻姆及 P. B. Burt 等都努力发展过非线性量子力学等，所有的线性理论似乎都在趋于非线性化。“欲穷千里目，更上一层楼。”复杂的具有千丝万缕联系的自然界，在彼此相互作用中通常总要导致非线性。因此，我们相信非线性化是科学发展的必由之路。

可是，非线性理论极为复杂，非线性方程的求解也很困难，加之迭加原理对此不成立，从而傅里叶展开和拉普拉斯变换都不适用。多年来，人们面对这片未知的辽阔的海疆，望洋兴叹，徒唤奈何。然而，“山重水复疑无路，柳暗花明又一村”，近年来，得力于数学的巨大进步和电子计算机的普遍应用，非线性理论中出现了两个举世瞩目、并被广泛研究的领域：孤子和混沌。二者迥然不同，而又有微妙的联系，这一有趣的特点尚未引起人们的足够注意。

一、孤子 (soliton)

从 1834 年 8 月司各特·罗素观察到河面上稳定的孤峰兀立的水波，1895 年柯特维格和德弗里导出 KDV 方程及其孤子解以来，已经许多年了，但引起人们对它的普遍关注却还是本世纪六七十年代的事。对此，国内外已经有了很多综述和若干专著。在短短的二十年中，从天文学到“基本”粒子，从浅水波传播、流体力学到晶格理论、非线性光学、等离子体物理、固体物理、凝聚态物理、超导物理、弹性力学、统计力学、声子、位错、工程学、材料科学、气象学、海洋学、高分子理论、分子生物学，甚至气功、经络等等，孤子这一新的概念得到了极其广泛地应用。

非线性方程中导致解不稳定的非线性和色散效应相结合，获得了稳定的孤立波，即孤子。孤子解是应用一些技巧得到的某些非线性偏微分方程的一类特解。它具有若干有意义的性质。孤子解是一种单峰行进波，它传播时波形不变且为常速，碰撞后形状和速度仍然保持不变。

人们广泛地研究了具有孤子解的各种方程：KDV 方程

$$\varphi_t + \varphi\varphi_x + \varphi_{xxx} = 0$$

及其推广；正弦—戈登 (SG) 方程

$$\varphi_{xx} - \varphi_{tt} = \sin\varphi;$$

黑格斯 (Higgs) ϕ^4 场方程

$$\phi_{xx} - \phi_{tt} + m_0^2 \phi - f^2 \phi^3 = 0;$$

非线性薛定谔方程

$$\phi_{xx} + i\phi_t + a |\phi|^2 \phi = 0;$$

广田 (Hirota) 方程

$$i\phi_t + 3ix |\phi|^2 \phi_x + p\phi_{xx} + i\sigma\phi_{xxx} + s |\phi|^2 \phi = 0;$$

马布西尼斯 (Boussinesq) 方程, 非线性格点方程; 玻恩—英费尔德方程; 自透射方程; 非线性 LC 网络方程等, 并将这些方程应用于多种多样的领域。人们采用了各种数学理论, 如散射反演方法, 无穷多个守恒律, 贝克兰得 (Bäcklund) 变换等。方程的解也从孤子推广为反孤子、呼吸子、碰撞解及扭结解、涡旋解、瞬子解、磁单极子解等。

初期, 大家仅限于研究经典的孤子理论。1977年, 弗里德伯格和李振道把它推广为量子的, 并得出结论: 对任何一种玻色子场系统, 只要经典孤子存在, 则总存在相应的量子孤子解, 至少在弱耦合的情形时如此。他们把所有孤子解分为两大类: 拓扑性孤子和非拓扑性孤子。巴丁等的 SLAC 袋模型就是基于 ϕ^4 场方程的孤子解, 并由此讨论了夸克的禁闭问题。同时, 由孤子理论可以得到夸克所需要的分数电荷。

我们从对称性破缺的拉氏量得到耦合的非线性方程组, 由它们的孤子解可以获得粒子的盖尔曼—大久保 (GMO) 质量公式及其更精确的公式

$$M=M_0+AY+B[l(l+1)-Y^2/2]$$

并且进一步展开了讨论。

粒子物理中为什么可以应用孤子? 我们认为一方面普遍存在的粒子系统是相互作用耦合的, 其场方程一般是非线性的。这些方程的一类有意义的解就是孤子解。另一方面, 粒子是稳定的或平稳的, 这正好相应于孤子。第三方面, 因为由平面波叠加得到的波包必然要扩散, 这是量子力学中的老问题, 所以如果波—粒二象性始终成立, 粒子也只能是孤子。由此推广, 我们相信并预言, 所有存在相互作用的体系, 只要其中有相对稳定的客体, 孤子理论都大有用武之地。因此, 孤子及其数学方法必将进一步发展, 必将更加深入地应用到各个领域。

二、混沌 (chaos)

虽然 60 年代人们就开始注意混沌现象了, 但直到 1978 年菲金堡姆 (Feigenbaum) 从计算机实验中发现一些简单的单变量非线性映象的分岔点结构具有若干普遍规律, 出现一些普适常数以后, 混沌才引起了大家的极大兴趣。

几年之中, 连篇累牍的论文, 令人目眩的应用, 众多的专著, 形成新的巨大的浪潮滚滚而来。“春色弥漫溢天地”, 混沌迅速冲进了科学的各个领域, 如纯数学、时空理论、湍流、浅水波的强迫振动、非线性振荡电路、量子力学、光学、声学、等离子体物理、超导理论、位错理论、非线性振动、相变理论、微波理论、固体物理、统计物理、天文学、广义相对论、地磁场理论、化学、气象学、工程模型、协同学、生态学、群体动力学、生命科学、生物学、医学 (如心脏跳动、脑电波及非线性药物代谢动

力学、生理和病理现象的自动调节模型等) 经济学、社会学、战争论等等。它形成雪崩式的应用, 出现了“条条道路通混沌”的趋势。

当一个非线性动力学系统远离平衡时就可能出现混沌态, 这是一种非常普遍的非线性现象。各种非线性方程、非线性映射, 如 $x_{n+1} = 1 - ax_n^2$, 在一定的参数 a 范围内, 当 a 不断改变时, 不动点逐渐跃变, 分岔现象不断出现, 周期点增多, 以后 a_n 的间隔越来越小, 最后在 a 处出现无穷多点周期, 并转入混乱状态。混沌具有很强的普遍性。它出现于代数方程、一维和高维的差分方程、自洽和非自洽的常微分方程、偏微分方程、微分积分方程和泛函方程中。

非线性迭代无穷进行下去时, 得到普适的菲金堡姆泛函方程

$$\lim_{N \rightarrow \infty} f^{(N)}(x) = g(x) = -xg\left(\frac{x}{a}\right),$$

其中 N 表示迭代 N 次。混沌具有一些普适性很好的常数: 分岔序列的收敛速率

$$S = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_n - a_{n+1}}{a_{n+1} - a_{n+2}},$$

标度变换因子 (自相似系数), 分岔点附近的慢化指数等。 $g(x)$ 的形式与迭代函数 f 的具体形式无关, 只依赖于函数的一些普遍性质。

混沌显示的普适性表明, 一方面在不同的非线性映射中出现同样的分岔结构和定量特征, 另一方面对于同一映射它们适用于不同层次的内嵌结构。

混沌状态出现时运动轨道不稳定, 它们随机地但密致地逐渐汇集于一个整体日益减小但局部指数分离的区域。这就是奇异吸引子 (strange attractor)。它不同于一般稳定的不动点 (整数维吸引子), 具有奇特的非整数的空间维数, 这种空间是豪斯道夫 (Hausdorff) 空间。因此, 这是一种多层次的整体稳定, 局部不稳定的运动状态, 形成无穷嵌套的自相似结构。而且各种奇异吸引子具有某种共同的特点, 即所谓标度不变性 (标度律)。这就是把标尺作适当地收缩后, 形象地说即用放大镜放大若干倍后, 吸引子的细节部分与整体具有同样的结构。这是与内在随机性密切相关的几何性质。

普适性和标度律把我们引到了在量子场论和相变理论中被成功应用的重正化群方法。事实上, 菲金堡姆的泛函方程就是决定倍周期分岔普适性质的重正化群方程。混沌必须远离平衡, 这又与非平衡态统计、耗散结构发生联系。物理系统在远离平衡时即可能突变为更有序和对称的状态, 也可能突变进入混沌状态, 且普利高津等还进一步认为有序来自混沌。

人们先研究的是倍周期分岔现象, 以后郝柏林、彭守礼等又研究了三周期等高次分岔现象。目前不仅在若干实验中观察到了此类现象, 而且在理论方面也取得了一系列进展。

“等闲识得东风面, 万紫千红总是春”。菲金堡姆的工作出人意料地发现了混沌现象的普适性, 从而迎来了桃红柳绿的初春。但混沌的各种定义和理论还在变比、发展, 繁花似锦, 姹紫嫣红的大好春光才刚刚开始呢。

三、孤子、混沌的结合与非线性理论

物理学中一直存在决定论和概率论两套描述体系。二者不仅基本精神相反，而且曾经长期对立，互不相容。可是科学的发展日益表明，这两套体系是互补的。混沌理论的研究更揭示了除广泛存在的外在随机性之外，甚至确定论系统本身也普遍具有内在的随机性。

决定论和概率论并存的现象，很具体地表现了在非线性理论中同时存在着孤子和混沌。孤子具有不变的形状和速度，具有确定的轨迹，类似经典粒子，是典型的确定论的客体。而混沌完全相反，与统计理论密切相关，具有内在的随机性。它们一个具有特殊性，是某些非线性方程的特解；一个具有普适性，并且广泛存在于非线性系统中。一个对时间和空间都是稳定的，传播和碰撞时不变；一个不断分岔，直至混沌，并有正序和反序两个方向的对称变化。孤子基本出现于偏微分方程中；而混沌目前主要出现在常微分方程中，偏微分方程的研究才在拉开序幕。但它们都本质地联系于系统的非线性。二者携手并进，取长补短，一定能更好地发展非线性理论。

1983年，我们提出一种新的孤子方程

$$\varphi(\varphi_{xx} - \varphi_{tt}) - a(\varphi_x^2 - \varphi_t^2) + b\varphi^{n+1} = 0.$$

它的孤子解包括孤子形的柯西分布、正态分布和学生氏分布。并且方程可以进一步推广为

$$\varphi(\varphi_{xx} - \varphi_{tt}) - a(\varphi_x^2 - \varphi_t^2) = F(\varphi)$$

它与很多已知的孤子方程相关，其孤子解包括费米—狄拉克分布。这样就有可能把统计理论和微分方程、物理上的动力学联系起来研究。

为了解非线性方程，数学物理中还取得了一个重要突破，采用了一些巧妙的特殊变换作为傅里叶分析的推广。它们可以称为“非线性迭加原理”，其中最著名的例子就是贝克兰得变换。这一领域的研究方兴未艾。

1985年，我们应用孤子解的方法得到费米子几率密度方程 $\frac{d\rho}{dE} = a\rho(1 - 2\rho)$ 。

然后，推广混沌理论，假定其中周期分岔相应于粒子产生，这样混沌理论就可以应用到新的领域，就可以定量描述高能多重产生和级联簇射。而多重产生和混沌理论的很多性质都是普适的。

“山外青山楼外楼”，一座比一座更加巍峨壮丽的科学高峰还屹立在我们前面，宏伟的科学大厦还等待我们去建造。孤子和混沌的结合与应用，决定论和概率论的研究与发展等等未知领域，还有待于我们去发现，去开拓。非线性理论的广阔天地才刚刚露出几点瑰丽的醉人奇景，而试看将来的科学，必是非线性的世界！

(张一方)

揭开湍流之谜

——用混沌理论解释湍流现象

一、历史的简短回顾

湍流问题曾被称为“经典物理学最后的疑团”。因为它涉及到从微观到宏观许多时空尺度上的运动，它不仅和周围进行着能量交换，其内部也存在着各式各样的能量交换。有人估计：在一个线度为 l 的湍流中，信息产生率为

$$\frac{dH}{dt} \sim \left(\frac{l^7 u^{15}}{u^{11}} \right) \quad (\text{比特/秒}) \quad (1)$$

其中 ν 为运动学粘滞系数， u 为湍流中最大漩涡的速度。据此，即使是一杯咖啡被搅拌时也会产生 10^{12} 比特/秒的信息。难怪对湍流的研究进展甚缓，至今还停留在半经验理论的水平上。

早在阿基米德时代，人们就注意到了湍流现象。1883 年雷诺 (Reynolds) 指出：当流体的雷诺数 R 大于某个临界值 R_c 时，它就从层流向湍流转化。尔后，他又提出了著名的雷诺方程，试图用确定论的方法来解决这个问题，然而始终没有得到明确的结果。

从本世纪 30 年代开始，泰勒 (Taylor)、卡曼 (Karman)、哥尔莫柯洛夫 (Kolmogorov)、周培源等人创立了湍流的统计理论，把概率论的方法引进了这个领域。这不能不说是一个重大的进展，湍流中大漩涡套着中漩涡，中漩涡套着小漩涡，互相交叉互相混杂，这些运动着的漩涡数量之巨、种类之多、相互作用之繁决不是用几个甚至几十个确定论的方程可以描述的。这几十年来，湍流的统计理论有了很大的发展，但是对这个复杂的问题几乎没有引出什么定量的预测。

随着科学的发展，电子计算机的诞生，在最近的实验和理论研究中都出现了有希望的新方向，研究的重点是一些能为理论研究所接受的比较简单的湍流发生机制，研究的对象也从流体力学扩充到物理、生物、化学、天文、地学等领域。有人认为，对这个问题的研究很可能导致物理学的又一次革命——开辟对“复杂”系统研究的新途径。

二、新的方向

我们知道：从理论上解决湍流问题的重大障碍是流体力学基本方程——纳维尔—斯托克斯 (Navier - Stokes) 公式

$$\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + (\mathbf{V} \cdot \nabla) \mathbf{V} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \nu \nabla^2 \mathbf{V} \quad (2)$$

的非线性。以前只知道这类方程的定常解不稳定，会出现分岔，至于这以后会发生什么就不清楚了。1963 年，洛伦兹 (Lorentz) 在电子计算机上进行大气对流的数值实验时，发现一个完全确定的三阶常微分方程组，在

式中 \mathbf{V} 是流体的速度场、 p 是压力、 ρ 是密度、 ν 是运动学粘滞系数。

一定的参数范围内给出了非周期的、看起来很混乱的输出。传统的观念根本无法解释洛伦兹的发现。起先他以为随机性来自计算机的误差，在排除了种种随机因素后还是出现了上述现象。面对事实，他冲破了旧的观念，提出了一种新的湍流发生机制。由于受到当时科学水平的限制，人们没有也不可能意识到这项工作的划时代意义，加之论文登在一本不太出名的杂志上，所以一直过了将近十年，这项工作才被重视起来。人们开始认识到确定论系统的内在随机性——混沌（chaos）是客观事物固有的特性，对它的研究很可能导致湍流问题的突破性进展。

确实，混沌现象的发现是人类认识自然的又一次飞跃。以前，我们把对自然界的描述分为确定论和概率论这二套看起来完全对立的方法，取得了很大的成功。但是对造成它们之间差别的原因，以及它们之间的联系等一系列根本问题，却始终没有得到满意的答复。以致统计物理的奠基人玻尔兹曼（Boltzmann）也为此而苦恼万分，人们对随机性的出现存在两种观点。有文献认为，统计方法只是处理大量粒子体系的一种权宜之计，有朝一日它将要被精确的确定论计算淘汰掉。但是，比较多的人认为：对于大量粒子所组成的复杂系统而言，统计规律是它们本身所特有的，决不能把它还原为力学规律。从确定论到概率论的发展在哲学上常常用来说明量的增加必定导致质的改变。但是对于中间的转化过程，由于缺乏必要的手段，所以一直没有搞清楚。电子计算机的应用使我们找到了这个问题的答案：只要确定论的系统稍微复杂一点，它就会表现出随机行为，被人奉为确定论的典型——牛顿力学——具有内在的随机性。在确定论和概率论的描述之间存在着由此及彼的桥梁。

混沌理论刚出现就解决了这个百年悬案，所以有人把混沌理论和确定论、概率论并列起来，作为人类认识客观世界的又一套方法论，称为混沌论。在近阶段，混沌理论在哲学上的意义远大于它在一些具体问题上的意义，它标志了人类对客观世界的认识已进入了一个新阶段——不仅对“非此即彼”的明晰形态，而且对“亦此亦彼”的过渡性形态都能进行比较详细的研究。与随机性相关的混沌理论以及与可能性相关的模糊数学都在迅速地发展着，虽然它们研究的对象不尽相同，但是它们所描述的都是客观事物的不确定性。

为了说明什么是混沌现象，我们考察如下的迭代过程：

$$x_{n+1} = f(x_n) = 1 - ax_n^2 \quad (3)$$

如果把参数 a 限制在 $[0, 2]$ 区间内，上式便是从线段 $I = [-1, 1]$ 到它自身的一个非线性映象。这种映象可以记为 $f(x_n)$ ，它表示经过 n 次迭代所得到的结果。 $f(x_1), f(x_2), \dots$ 是对离散时间（ n 相当于 $t_n, t = 1$ ）的不可逆演化序列。它所描写的是一个最简单的耗散系统。在参数 a 的增加过程中，迭代将出现多次突变。

当 $0 < a < 0.75$ 时，在 $x \in [-1, 1]$ 内任选一个初值 x_0 ，迭代过程将迅速地趋于一个定值 x_A^* 。虽然由 $x^* = 1 - a(x^*)^2$ 可解出两个根 x_A^* 、 x_B^* ，但是在迭代时可以发现只要 $x_0 \in (x_B^*, x_A^*)$ ，其结果总是趋于 x_A^* ，可见 x_A^* 对于迭代具有吸引性，谓之稳定不动点或吸引子；而 x_B^* 对于迭代过程有排斥性，故谓之不稳定不动点或排斥子。当 a 变化时，原来的稳定不动点可能失稳，但同时又会产生新的不动点。

当 $0.75 < a < 1.25$ 时，迭代结果将趋于两个数值交替出现的状态，我们称它为 2 点周期。 $a > 1.25$ 后又会出现 2^2 点周期，尔后相继出现稳定的 2^n 点周期 ($n=3, 4, 5, \dots$)。当 $a = a_\infty = 1.40115\dots$ 时迅速达到无穷长周期： $n \rightarrow \infty$ 。我们称区间 $[0, a_\infty]$ 为倍周期区，随着 a 从小到大它可分为一周期区、二周期区、…… 2^n 周期区。在上述过程中，每一个稳定的周期在分岔点上都为二个稳定的周期，通常称之为倍周期分岔。

当 $a > a_\infty$ 后，多数迭代结果看起来象是分布在一定区间内的随机数，这就是混沌现象，区间 $[a_\infty, 2]$ 叫做混沌区。在混沌区内，根据随机数在 $x \in [-1, 1]$ 区间内分布区域的多少我们就说有几个混沌带。随着 a 从小到大，混沌区可分为一带区、二带区、…… 2^n 带区，当 a 趋向 a_∞ 时 $n \rightarrow \infty$ 。此外，在混沌区中还嵌套着许许多多周期窗口。关于这个迭代更细致的结构，无论从计算机实验还是从严格的解析理论中都发现了下面几个重要的性质。

(1) M.S.S. 规则：上述映射的周期结构（包括周期数、循环方式）在参数轴上的排列具有相同的顺序，对任意周期 P ，在参数增大的方向上，按顺序有 $2P, 4P, 8P, \dots, 2^n P, \dots$ 的倍周期序列。周期区和混沌区内均存在倍周期序列。

(2) 萨可夫斯基 (Sarkovskii) 定理：混沌区内一带区中主要周期窗口随着参数的减小依次（不连接）为 $3, 5, 7, \dots$ ，类似地 2^n 带区中主要周期窗口为 $2^n \times 3, 2^n \times 5, 2^n \times 7, \dots$ ，混沌区内主要周期窗口的排列也是有章可循的。

(3) D.G.P. 内部相似定律：对任一周期 p ，在它的右边必定存在一个区间，这个区间内的结构与整个参数区间内的结构相似，但是它的周期为后者的 p 倍。

定律显示了混沌区内存在着无穷嵌套的自相似几何结构，同一种行为在越来越小的尺度上重复出现。这样的图象颇具我国古代所刻划的混沌——“气似质具而未相离”的风格。

1977 年菲金堡姆 (Feigenbaum) 用一个可编程序的计算器配合几何作图的方法证明了：单峰映射相邻的倍周期分岔点之间的距离当 $n \rightarrow \infty$ 时，存在着一个普适常数

$$\delta = \lim_{n \rightarrow \infty} \delta_n = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_n - a_{n+1}}{a_{n+1} - a_{n+2}} = 4.6692016091029\dots$$

在无穷嵌套的自相似几何结构中，相邻二个结构之间的标度变换因子，当 $n \rightarrow \infty$ 时也将趋向一个常数

$$\alpha = 2.5029078750957\dots$$

郝柏林在 1981 年发现，参数从小到大靠近分岔点时，迭代将发生临界慢化现象——达到定态的时间 τ 趋向无穷大

$$\tau = \frac{a_n}{2^n |a - a_n|^\Delta} \quad (4)$$

其中慢化指数 $\Delta = 1$ ，恰好与相变现象的平均场理论一致。所不同的是这里呈现为“单边”慢化，它发生在从低阶分岔状态往高阶分岔状态接近的过程中。

上述各种普适性和标度律，对于相当多的一维映射都成立。由微分方程所描述的复杂的实际过程往往可以化为高维映射。实践表明高维映射也具有这样的性质。法兰斯西尼 (V. Franceschini) 等人报导过纳维尔—斯托克斯方程的演化过程中所看到的倍周期分岔序列和混沌区域，以及它们的普适常数和标度变换因子。虽然这些讨论仅限于少自由度系统的时间演化过程，尚未同时涉及到空间分布，但是它至少显示了流体力学的基本方程中也有内在的随机性。人们越来越有信心在这个方程的框架内，用混沌的观点来说明流体从层流到湍流的演化过程。

定量关系的发现使人们自然地把包括了分岔和混沌的“突变”现象和物理中已经研究得很透彻的“相变”现象进行更深刻的类比。这方面工作的蓬勃开展有三个背景。首先，体系远离平衡态的失稳（突变）和体系从一种热力学的平衡态转变到另一种平衡态（相变）有许多类似的地方。在定量规律发现以前已经有不少人从事这一方面的工作。其次，数学家托姆 (Thom) 在 70 年代初创立了“突变论” (catastrophe theory)，使得“突变”和“相变”处于同一个数学理论的框架之下，从数学上提供了开展这项工作的保障。第三，恰逢威尔逊 (Wilson) 用重整化群方法处理了相变（这是个牵涉到无穷维自由度的难题），并取得了很大成功，再者，菲金堡姆用简单的设备所发现的如此重要的规律性，也颇具传奇色彩，它给人以科学的源泉永远不会枯竭，人类的认识永远不会穷尽的启迪。广大科学工作者看到了解决湍流问题的新方向。

三、奇怪吸引子

在研究实际情况的高维映射中，除了具有与一维映射类似的性质外，还存在着相空间的相似性。这种相似性是由奇怪吸引子的分数维数所描述的。和通常的高维吸引子不同，奇怪吸引子的形状，既非曲线也非曲面，而是由离散点集组成的，点集中任何二个相邻的点之间必定存在不属于这个点集的点。为了具体说明这个问题让我们考察埃农 (Henon) 映射

$$\begin{aligned} x_{n+1} &= 1 - ax_n^2 + y_n \\ y_n &= bx_n \end{aligned} \quad (5)$$

这是一个二维映象， $b=0.3$ ， $a=0.4$ 时它是一个耗散系统，经过 10000 次迭代后，人们可以绘制出点集 (x, y) 的图 A 来。如果把迭代次数增加到 10 万次取出 A 图中的一小块放大绘成 B 图，可以看出它仍有内部结构。迭代 100 万次，再取出 B 图中的一小块放大，人们会得到与 B 相似的 C 图……藉此不难想像出高维映象中奇怪吸引子的性态。

奇怪吸引子的出现是由于高维相空间中的耗散系统，在演化过程中要耗损掉快弛豫参量，剩下决定系统长时间行为的慢弛豫参量。在这过程中，系统的相体积要不断地收缩，并趋向一个维数比原来相空间维数低的有限区域——吸引子上；方程的非线性，使得某些方向上的运动是不稳定的，局部看来呈指数分离。为了在有限的区域里进行指数分离，空间运动轨道只能采取无穷次折迭起来的办法。奇怪吸引子吸引一切在它外面的运动，而它内部的运动轨道又是互相排斥的，它是吸引与排斥二种趋势相斗争、妥协的结果。它所描述的相空间中无穷嵌套的自相似结构和湍流中大漩涡套小漩涡的情景有异曲同工之妙。所以罗埃尔在 1971 年就提出了湍流就是

奇怪吸引子的观点。瞬息万变的湍流现象内部有无限多的层次，但是我们一旦抓住了各个层次上的共同特征及其本质的规律后就可以化繁为简，构造出奇怪吸引子这个处处稀疏、处处不连续的几何对象来刻画它。

由于奇怪吸引子的行为特异，所以至今还没有为人们普遍接受的定义，但是下面的性质是公认的。

奇怪吸引子上的运动对于初始条件十分敏感，因而不存在周期性。其结果使体系遍历各种可能的状态。这种谓之遍历性的性质将初始条件的影响彼此抵消、互相调匀了，为我们用统计方法描述体系的性质提供了依据。

奇怪吸引子的另一个特征便是作为相空间中的子集合，往往具有非整数维数。这是豪斯道夫 (Hausdorff) 1919 年引入的维数概念：

$$d = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \ln N(\epsilon) / \ln(1/\epsilon) \quad (6)$$

它表明对于 p 维空间中的子集合，需要用 N 块边长为 ϵ (任意值) 的 d 维方块去覆盖。为了使覆盖越来越精确，必须使 ϵ 趋向零，也即用无限多个小方块来覆盖无限多个点，通过求它们的比值把无限维的问题转化为有限的情况来处理，所以往往呈分数的形式。非整维数的引进把牛顿、爱因斯坦以来的时空观又向前推进了一大步。作为非整维数的实例，我们介绍一下康托尔 (Cantor) 集合，它是由线段 $[0, 1]$ 三等分后舍去中段，对剩下二个闭区间再作同样的处理，如此无穷继续下去，最后剩下的点的全体所组成的。这是一种处处稀疏、处处不连续的几何对象。显然，康托尔集合的维数 $d = \ln 2 / \ln 3 = 0.630$ 。

康托尔集合是一种很基本的对象，它出现在许多更复杂，具有无穷自相似层次的几何结构的某些截面中。前述埃农吸引子在某一方向上基本是连续的一维结构，而在与之相垂直的方向上，虽然有一定宽度但又处处稀疏达不到一维连续统。计算表明，埃农吸引子的豪斯道夫维数 $d=1.26$ 。需要指出的是，由于豪斯道夫维数是一种测度性质，它可能随参数或空间位置不同而异。

在科学史上往往有这样的情况：从某一个方向考虑一个难题许久未有结果，但如果从另一个角度去考虑，有时甚至只是改变了一下问题的提法就看到了希望所在。湍流的研究也许就是这样。1976 年曼德勃罗特 (Mandelbrot) 提出必须从几何形态的考虑着手解决湍流问题。根本改变了传统的做法。他根据大尺度间歇现象的发现，认为大气湍流不是像传统的连续介质那样处处都存在，而是有些地方有，有些地方又没有；有时有，有时又没有。因此，湍流运动只是一种局部的、间断的现象，应该把湍流区看作是介于二维和三维之间的一种分数维数的情况来处理。湍流的运动区域与肥皂泡的形状很像，与“奇怪吸引子”有类似的结构。他也提出要利用分形 (fractal) 研究湍流。

“他山之石可以攻玉”，这里一方面指的是不同领域、不同学科之间的交叉、渗透，同时也包括了积极吸收前人的成果，吸取他人的先进思想，把它应用到有待解决的问题中去。通过奇怪吸引子把古老的湍流问题和现代相变理论挂上了钩，许多人借用了相变理论中的临界指数、标度律和普适性等概念，借助重整化群的方法来处理湍流问题，并且得到了满意的结果。

四、条条道路通湍流

目前，对混沌现象的研究离发达的湍流相去甚远。但是，大家都希望能用少自由度的低维吸引子来刻画湍流。这个观点在弱湍流阶段已得到了实现。在下面的行文中，我们将不加区别地运用混沌和湍流这两个词。

从数学上来讲，通向湍流的道路和非线性方程解的分岔性质有着密切的关系。我们已经比较详细地讨论了倍周期分岔的道路，下面将简单地介绍其它几种情况。

1. 切分岔——阵发混沌的道路

它发生在混沌区内周期窗口附近。现以 $a=1.75$ 为起始点的三周期 $f^{(3)}(x)$ 为例说明之，在 $f^{(3)}(x) \sim x$ 图中， $f^{(3)}(x)$ 与对角线 $f^{(3)}(x)=x$ 在三点同时相切，这三个切点就是不动点。当 $a > 1.75$ 时，三个切点变为三对交点。根据稳定性判据，在每一对交点上有一个是稳定的，另一个是不稳定的，因此同时出现了一对稳定和不稳定周期。最后在这里形成了稳定的三周期轨道。而在 $a < 1.75$ 时， $f^{(3)}(x)$ 与对角线没有交点，因而也不存在稳定的或者不稳定的周期，这个由切点而导致的分岔称为切分岔。阵发混沌发生于切分岔起点之前，它随时间变化的基本特征是：在基本上属于周期振荡的序列中，有时会突然出现一阵混沌运动，尔后又出现周期运动……。随着 a 的减小混沌运动所占的时间比例越来越大，最后完全变为混沌。研究表明，凡是观察到倍周期分岔的系统都可以看到阵发混沌。

2. 霍甫 (Hopf) 分岔——准周期的道路

由于分岔次数的差别它又分为二种情况：

(1) 朗道 (Landau) —霍甫道路

霍甫分岔描述的是在二维以上的相空间中，当某个不动点在参数变化的过程中由稳定而失稳时，新的稳定状态往往是围绕着原有不动点的周期运动，并产生频率为 f_1 的振荡。控制参数继续增大，极限环又失稳出现了另一个新频率 f_2 ，运动扩充以到二维环面。只要 f_1 、 f_2 之比为无理数时，运动就有准周期的性质：在充分长的时间内，系统所经历的状态可以与事先给定的一种状态任意地接近。随着参数的增大，新产生的频率越来越多，当频率数变得充分大时，导致了发达的湍流。

但是，在其后的几十年中，无论是理论研究还是实验观察都否定了上述机制。然而，他们对这个问题考虑的精华部分却被后人所接受。

(2) 罗埃尔—泰肯斯 (Tankens) 道路

1971 年他们提出，不动点经过三次霍甫分岔后，只要所产生的三个频率是不可约的就可能失稳而进入湍流状态。1978 年他们认为只需要经过二次分岔，即二维环面上的准周期运动就可能失稳而导致湍流。但是，在实验室中和计算机上都发现了具有三个不可约频率的准周期运动的系统仍未进入混沌的情况。看来准周期道路应理解为不动点经过有限次分岔后就会失稳而进入混沌状态，具体情况须视系统的本身、参数的选择以及环境的影响而决定。

郝柏林等人在微分方程所描述的强迫布鲁塞尔振子参数空间的不同截面方向上已经观察到了上面所介绍的各种通向湍流的道路。看来湍流的发生机制可能是多方面的，一条道路只反映了一个侧面。“条条道路通湍流”并非说说而已。

实践是检验真理的唯一标准。我们采用了分频采样、功率谱、彭加勒（Poincare）截面和直接观察的方法，引进了吸引子的维数、李亚普诺夫（Lyapunov）指数以及各种不同定义的熵来刻画混沌运动。无论是解析讨论还是实验室里的实验都有大量的报导。作为混沌现象的重要研究手段，计算机实验的报导更是屡见不鲜。下面，我们仅介绍流体力学实验中所看到的湍流形成机制。

首先，考虑夹在二块无限大平板之间的流体在上、下底面温度差变大的过程中所出现的对流花样变化，最终形成对流湍流的实验。Libchaber等人以液氦为工作物质的实验中，在功率谱上看到了倍周期分岔，以及随着雷诺数的增加从层流演化到湍流的过程，中间还看到了阵发混沌的现象。Giglio等用水做工作物质，直接测量了至 $n=4$ 的分岔点及相应的 λ_n ，得到了 $\lambda_1 \sim 2$ ， $\lambda_2 \sim 3.3$ ， $\lambda_3 \sim 3.53$ ， $\lambda_4 \sim 4.3$ ，从趋势上来看与理论相吻合。Swinney 选用水银做工作物质时，在功率谱上看到了具有两个不可约频率的准周期运动及其失稳进入混沌状态的过程，表现为罗埃尔的道路。

剪切湍流最常见，对它的研究也最有实用价值。通常是测量在两个可以独立转动的同轴圆筒之间所盛的工作流体随着雷诺数的增加而产生的状态变化，人称泰勒不稳定性。在外圆筒静止的实验中已观察到倍周期分岔和准周期到混沌态的过渡，而且得到了和计算机实验较为一致的结果。在两个圆筒都旋转的实验中还观察到了阵发混沌的现象。流体力学的实验证实由于参数选择的不同，甚至达到参数的过程不同，流体从层流到湍流的过程呈现不同的道路。

对于奇怪吸引子维数的测定也已有实验报导。在模拟因地球自转而引起的大气层对流的实验中测到的奇怪吸引子维数为 $7 \sim 12$ 。在有温度梯度的泰勒圆筒实验中，当系统处于准周期状态时为 $2 \sim 3$ 维，进入混沌状态后增加到 11 维；没有温度梯度时，准周期阶段的维数为 2 ，当雷诺数 $R=1.3R_c$ 时增加到 $4 \sim 5$ 维。可见，这些有无限多个自由度系统的弱湍流状态完全可以用低维的奇怪吸引子来描述。但是要藉此来讨论发达的湍流恐怕还有一段距离。

从混沌现象着手考察湍流的发生机制已经受到越来越多的科学家和工程师们的关注。在研究流体中所发生的实际情况的基础上建立新的统计模型，有希望在探求湍流过程共同特性上取得进一步的了解。最近阶段，上述研究将有助于我们得到关于湍流统计模型较为合理的多种假设，改善控制不稳定性的技术，提高我们利用和控制湍流的能力，改进各种和湍流有关产品的设计和制造以及加强对大气和海洋这一类大尺度无序的预报能力。

由于非线性是自然现象的普遍规律，所以在有物质流、能量流、信息流的地方均可能出现混沌现象。目前的报导不仅在自然科学、工程技术诸领域中，而且已经延伸到社会科学。钱学森同志认为系统工程得以上升为系统理论的基础就是“突变”理论。菲金堡姆常数可以作为系统理论定量

化的一个出发点。湍流问题不应局限于流体力学而应成为自然科学、社会科学以至各行各业共同关心的一个横断学科。

对混沌现象研究的背后蕴含着物理学的又一次革命，本世纪初的物理学革命找到了接近光速的高速系统和尺度为原子大小的微观系统的规律，而对由大量客体组成的“复杂”系统则知之甚少。虽然玻尔兹曼 1887 年就提出了 $S = k \ln W$ 的关系，普朗克则把它进一步推广为 $S = k \ln W$ ，并在得到普朗克常数的同时得到了 R 的值。但是统计问题的复杂性，以及当时其它学科的迅速兴起吸引了人们的注意力，使得统计物理的奠基问题拖了将近一个世纪。现在，混沌理论能够很好地描述系统从简单到复杂的演化过程，但要解决上面的问题尚有大量的工作要做，很可能还是以“熵”作为问题的突破口。可以预料，这次革命的意义必定超过以前的任何一次革命。

混沌理论将有助于我们从整体上去认识现实世界多样性和复杂性的进化。西方的经典科学片面地强调了组成物质的单元，习惯于把研究对象分解为各种简单的要素来处理，以致有时忽视了我们所面临的是这些单元复杂而有机的结合，它们要随着时间的流逝而发生演化（在众多的物理学定律中唯有热力学第二定律涉及了这个论题）。为了全面、准确地认识这个世界还需要从整体上去进行考察。对此，中国古代的哲学有其独到之处，阴阳五行相生相克，充分体现了整体的协调和协作，这一点正为越来越多的西方科学家所注目。把东西方传统的哲学结合起来，建立新的自然哲学将有力地推动新的科学革命，这种哲学是建立在人和自然统一的自然观之上的。混沌理论涉及了这二个问题的基础，显示了事物随着时、空的演化过程及其越来越丰富的结果，而决不是“热寂”。可以预料，混沌理论必将在人类历史长河的这一个转折点上发挥重要的作用。

（陈瑞熊）

“洞”在虚无缥缈处

——黑洞之谜

按照近代物理学的观点，“黑洞”是由超中子星临界质量的重级恒星发生引力塌缩而形成。用时空语言讲，在渐近平坦的时空间中，其引力场强到能“吞食掉”任何物质（连光和电磁波也无法逃脱）的时空域称为“黑洞”。

这种奇异天体的存在，早已为牛顿力学所预言，后为广义相对论从理论上对其作出了进一步论证。从此，黑洞为全世界的物理学家和天文学家所瞩目。特别是近十年来，黑洞物理学，作为相对论天体物理学的一个新分支，又作为广义相对论的一个新分支活跃于科学舞台。然而，至今谁也没有确实观察到这种奇异的天体。物理学家把某些天体说成是黑洞，论据却还不足；而天文学家把当前物理学说明不了的天体又一概推向黑洞。从这种意义上来讲，可以认为，“黑洞”尚未发现，仍是一个未解之谜。一、黑洞的回顾

1796年，P. S. Laplace 根据牛顿力学，考虑在质量为 M ，半径为 R 的星球上沿径向抛射出—个物体，并使该物体脱离此星球的引力作用，则物体每单位质量的粒子应具有—的动能有

$$\frac{1}{2}v^2 - \frac{GM}{R} \quad \text{或} \quad R \frac{2GM}{v^2},$$

式中 G 为牛顿引力常数， v 为物体的初速。若用光速 c 代替上式中的 v ，则有

$$R \frac{2GM}{c^2}。 \tag{1}$$

当 $R > \frac{2GM}{c^2}$ 时，这表示假设光受到引力场的影响，要使光不被此星球的

引力拉回来，则此星球的半径应大于临界半径 $\frac{2GM}{c^2}$ 。

当 $R < \frac{2GM}{c^2}$ 时，即星球半径小于临界半径，就是光也无法从此星球的引

力中逃逸出来。因此，这种星球不能像太阳那样向外部空间辐射出光及其它任何信号。光只能返回其表面被吸收，使我们看不到这种星球。于是 P. S. Laplace 预言：“若一个发光的星体，它的密度与地球密度—样，它的直径比太阳直径大 250 倍，但它由于吸引的缘故，不允许光线到达我们这里；因此，在宇宙中最大的发光星球可能由于这个原因而成为看不见的星体。”这就是牛顿理论中的黑洞。尔后—百多年的时间内，—这预言却没引起人们的注意。“光受到强引力场的作用”，也只是一种假设而已。

直到 1915 年，“光受到强引力场的作用”，才直接成了 Einstein 提出的广义相对论中的—个结论。理论推断：由太阳引起的光线引力偏转为

$$= \frac{4GM_{\text{日}}}{c^2 r_{\text{日}}} = 1.75$$

在 1919 年的日食时，这一结论已由英国观测队的观测所证实。即沿太阳表面切线方向放出的光，由于太阳引力场的作用，发生了微小的弯曲，其观察结果为 $\delta = (1.98 \pm 0.18)''$ 。

1916 年 Einstein 为了扩展、完善他的广义相对论，终于使他想到必须引进黎曼几何学。他思索再三，导出了著名的引力场方程。这方程过于玄妙，当时谁也无法理解，连 Einstein 本人也感到迷惘。按照牛顿引力定律，在地球和太阳之间，其引力场的引力大小应与距离的平方成反比，但 Einstein 引力场方程的解却不是这样，问题变得极为棘手。可在人世间毕竟不乏才智之士，居然就在同年，德国天文学家 Schwarzschild 解出了这个方程。是他首先解出了中心具有大质量星体的空间引力场：在与大质量星中心相距的一段半径处，如像太阳质量这样大小的星体在半径为 3.75 公里处，他能够导出一个具有两种“边界”的静态球对称引力场方程的解。但这个解是以假设质量集中在中心的条件下而得出的。然而，太阳在几万公里甚至几千万公里的半径范围内，始终有物质在扩散。考虑到这种实际情况，Schwarzschild 再一次推导出一个把物质分布考虑在内的完全解，他的解的度规是

$$ds^2 = \left(1 - \frac{2m}{r}\right) dt^2 - \left(1 - \frac{2m}{r}\right)^{-1} dr^2 - r^2 (d\theta^2 + \sin^2\theta d\phi^2) \quad (2)$$

式中 m 为球体质量， ds 为时空间距。

从这个完全解可看出，当 $r = 2m$ 时，度规变成奇异的，即有

$$g_{00} = \left(1 - \frac{2m}{r}\right) = 0, \quad (3)$$

$$g_{11} = -\frac{1}{1 - \frac{2m}{r}} = -\infty \quad (4)$$

出现奇异性的这一半径称为 Schwarzschild 半径。 $r = 2m$ 时，虽不具有局部的奇异性，但它具有一些整体的奇异性，通常称为视界。

而当 $r < 2m$ 时，球体不可避免地向其中心塌缩，出现区域的奇异性。因此，在 $r > 2m$ 的区域，不可能放出信号使之传递到 $r < 2m$ 的区域来；即使是光线，一旦落入这个 $r < 2m$ 的区域，再也无法逃逸，唯有奔向中心。

“视界”像是一个“单向膜”，信号可以传入，而不能传出。由“单向膜”所包围的时空域就称为“黑洞”。

“视界”是个魔幻般的球面，它将黑洞的内部与外部完全隔离开来。在它的外部，时间迟滞，光波红化；而在它的内部，时空倒置，黑洞的所有物质都集中在中心一个体积为零、密度无限大的几何点——黑洞中心，这就是所谓的“中心奇点”的状态。而在视界内的其他地方却是空空荡荡、一无所有的真空，既无任何辐射，也无任何物质，是一个名副其实的“黑暗的空洞”，称为 Schwarzschild 黑洞。

1963 年，澳大利亚的 Kerr 求解 Einstein 的引力场方程时，得到了质量为 M ，角动量为 J 的黑洞解；1965 年，Newman 得

到质量为 M ，角动量为 J 、电量为 Q 的黑洞解。采用 Boyer-Lindquist 坐标描述，稳定黑洞解的度规为

$$ds^2 = \left(-dr^2 + d^2 \right) + \sin^2 \left[\left(r^2 + a^2 \right) d - adt \right]^2 - \left(dt - a \sin^2 d \right)^2, \quad (5)$$

式中 $r^2 = r^2 - 2mr + a^2 + Q$, $r^2 = r^2 + a^2 \cos^2$ 。这就是Kerr所求

出的自转的黑洞之解。此解有三个参数：黑洞质量 M 、黑洞角动量 $J=aM$ ，黑洞荷电量 Q 。这表明，在一个稳定的黑洞外面的引力场和电磁场，唯一地由该黑洞的 M, J, Q 这三个参量确定，而不再有其它独立的特征量，这就是黑洞的唯一性定理（即黑洞的无毛定理）。由于真空天体荷电量极微，故常用的是参量 $Q=0$ 的 Kerr 黑洞的解。

Kerr 黑洞有着古怪的特性。首先主要表现在其外层，当 $M < |a|$ 时，Kerr 黑洞不存在视界面。此时， $r=0$ 的奇异区域完全暴露于外，形成了“裸奇点”，光线不能逃逸红移为无穷大的界面，与物质不能溢出的黑洞视界并非一致，这将是理论的一大灾难。为此 Penrose 提出一个猜测：任何裸奇点在现实世界中都是被禁绝的，这就是著名的“宇宙监督原理”。证明这一猜测是当今广义相对论所面临的最重要的课题之一。

其次，Kerr 黑洞的古怪特性表现在黑洞外部的能层内，粒子可具有负能量。把一个能量为 E_0 的粒子注入这个能层中，并将该粒子分成两部分，一部分带有负的能量 ($E_1 < 0$) 进入黑洞；另一部分带有正的能量 ($E_2 > E_0$) 穿出能层向外飞去。由区域能量守恒知，负能进入黑洞将使黑洞的能量减少，而飞出能层外的那部分能量则大于粒子原来注入能层时的能量 E_0 ，于是飞出能层外的部分相当于从黑洞中获取了能量。有如接近黑洞视界的火箭，若喷出与黑洞转向相反的气体，而落进黑洞的气体却又能减慢黑洞的转速，通过与黑洞进行角动量的转换，这种旋转能量转移给火箭，能使火箭以高速飞离黑洞。这就是著名的 Penrose 过程，是一个从转动黑洞中提取转动能的过程。

二、黑洞的理论研究

由 Einstein 引力场方程解出的黑洞之物在茫茫宇宙之中是否确实存在？广义相对论在强引力场条件下是否完全成立？这正是当今的引力物理学家和天体物理学家在研究黑洞时所潜心为之追求探索的问题。

科学理论不仅能概括揭示当今世界，而且还能预示未来世界。众所周知，当 Maxwell 建立起电磁场方程时，他就预言了电磁波的存在，后为赫兹的实验所证实。因此，忠于广义相对论的科学家们深信黑洞是客观存在的，并对黑洞物理学进行了广泛深入的理论研究。

1971 年，Hawking 证明了关于黑洞面积 A 的一个普遍性定理：任何黑洞视界的表面积 A 不减少，而且在动力学过程中增加，即

$$A \geq 0. \quad (6)$$

这条定理最早启发人们把黑洞与热力学联系起来。

1973 年，Bardeen, Carter 和 Hawking 又发现对 Kerr 黑洞存在如下关系式：

$$M = \frac{K}{8} A + dJ. \quad (7)$$

当 $K=(r^2-M)/2Mr$ 时，它就表示视界上的引力加速度，而 d 是黑洞转

速。此式就相当于热力学第一定律，并且 K 与“温度”对应。特别重要的是，又发现了：

在视界内的所有各点 K 值相同。(8)

这与“热平衡系统的温度处处相同”类似。由此，把黑洞视为一个热力学系统，仿照热力学“四定律”，而提出了“黑洞热力学四定律”之说。即把(8)、(7)、(6)分别称为黑洞的第零定律、第一定律、第二定律。并推测存在黑洞的第三定律：

不能通过有限步骤将 K 降为零。(9)

针对这种类比，根据黑洞的奇异性质，Wheeler 对热力学第二定律提出了质疑：人们如果向黑洞抛入一块物质，由于视界的存在，我们失去了对这块物质的热力学性质的任何知识，我们无法断言这块物质的熵是增加了还是减少了；但我们能确切知道的是黑洞外的宇宙，由于失去了这块物质，其总熵是减少了的。在这种情况下，热力学第二定律还正确吗？这就是所谓的“Wheeler 妖”。

针对“Wheeler 妖”，Bekenstein 建议引进有限黑洞熵的概念，把热力学第二定律推广为广义热力学第二定律，即“宇宙间的广义熵随时间永不减少”， $s \geq 0$ 。但囿于经典黑洞理论的束缚，Bekenstein 无法证明该定律的普遍性。而且“黑洞热力学四定律”与“普通热力学四定律”只是数学上的类似，前者并不具有真实的物理意义。因此，当时人们也无法了解黑洞是否真具有热力学性质。

1974 年，Hawking 运用量子论研究黑洞附近的“弯曲时空”时发现：在顾及量子效应时，黑洞有量子辐射，而且是一个黑体谱。黑洞的辐射就像如下温度的黑体：

$$T = \frac{c^3 h}{8 G k m} = \frac{GMh}{2 k c r_g^2} \quad (10)$$

式中 G 为引力常数， k 为玻尔兹曼常数， M 为天体质量， $r_g = 2GM/c^2$ 为天体的引力半径。上式表明，强引力场在接近于 r_g 的距离 r 处，要产生辐射！这不仅确认了黑洞可看作一个温度一定的黑体，使黑洞具有了确实的热力学性质，而且使人们还发现，由于黑洞的温度与其质量成反比，因此黑洞具有奇怪的“负热容量”特性。

量子场论发现，真空中产生的粒子对，有的能量为正，有的能量为负。“负的”被黑洞吸收，“正的”则形成辐射发射出去，这就是黑洞辐射的机制。黑洞发出的这种辐射叫做黑洞的“蒸发”。

黑洞辐射现象向目前公认的物理理论提出了新的挑战。一颗塌缩前的恒星，几乎全由正粒子组成，当它的质量超过中子星质量的上限时，它将在强大的自重力作用下，一直塌缩下去而成为黑洞。因此，黑洞的确代表着恒星的“死亡”。由于“死亡”了的经典黑洞的温度极低，所以它是不会辐射的。然而，Hawking 的黑洞蒸发理论却告诉我们在宇宙中能够存在一种微黑洞，它会“蒸发”，它将在一次大爆炸中化为炽热的星云。就像恩格斯的著名预言那样：“死去的太阳转变为炽热的星云”。一个崭新的世界，在旧世界的末日中诞生。天才的黑洞物理学家们为我们勾划出了这样一幅极为生动的宇宙大循环理论图像。

近十年里，中外物理学家和天体物理学家不仅用广义相对论、热力学、

量子场论对黑洞的力学性质、热力学性质、电磁学性质进行了广泛、详细的研究，而且对黑洞的形成机制也同样进行了研究。

按照恒星演化理论，认为黑洞是这样形成的：恒星演化到晚期，它内部的热核燃料烧完之后，由于引力塌缩作用，晚期恒星将塌缩下去。当它的质量 $M < 1.4M_{\odot}$ 时，它将成为白矮星，白矮星内部的电子简并压力抗衡了引力，使塌缩终止；当它的质量， $1.4M_{\odot} < M < 3M_{\odot}$ 时，它成为中子星，中子星内部的中子简并压力抗衡了引力，使塌缩终止；当它的质量 $M > 3M_{\odot}$ 时，不存在可能的平衡状态，它只能继续塌缩下去而形成黑洞。

还有其他宇宙过程可以形成黑洞。例如在形成星系、星系团时，一部分物质不能形成平衡的天体，发生引力塌缩，可形成质量为 $10^8 \sim 10^{11}M_{\odot}$ 的黑洞，现在以“不发光的物质”形式存在的可能性较大。还如在高密星团和星子核内的动能急剧失散时，也可能发生引力塌缩形成黑洞。甚至还有人认为，在很早以前，天体还没有形成时，黑洞就可能存在了，这些黑洞叫做“原始微黑洞”。我国物理学家方励之等人提出，“反常中子星”可能是形成黑洞之前的前兆情况。国外还有人提出“夸克”星。

不管怎样，在广义相对论和恒星演化理论的框架内，一切大质量的恒星，从不稳定，一开始就会引起接近自由落体速度的收缩，而不可能停止，直到引力塌缩最后成为黑洞。恒星一旦塌缩成黑洞，原来描述恒星性质的一系列物理量（如密度、温度、压强、电离度、元素丰度等）均不复存在；剩下的只是质量、电荷和角动量这三个参量来描述黑洞。

三、黑洞的寻找

根据广义相对论预言，在浩瀚的宇宙中有许多黑洞存在。宇宙中真有黑洞存在吗？物理学理论的真理性和真理性，首先表现在对理论所预言的事物进行检验上。因此，人们在黑洞进行理论研究的同时，广泛开展了在茫茫宇宙中寻觅、观察黑洞的工作。

连任何信号都不可能发出的黑洞，在这么广袤的宇宙里如何去寻找？更何况冷却了的白矮星和中子星也同样可认作为暗天体存在，观测时，它们与黑洞很难区别。黑洞虽然很难直接观察到，但理论预示，由于中子星具有临界质量，如能观察到有比中子星更重、更暗的小型天体，它可能就是黑洞。落入这个洞的物质（如所吸收的气体），在堕落途中到被吞没之前，围绕黑洞形成旋转的圆盘。围绕黑洞旋转急剧堕落的这种加热的和可能磁化的等离子体能够辐射能量，所以黑洞在某个时期作为活动的天体被观测到的可能性比作为暗天体被观测到的可能性大。再者，根据前面所说的“黑洞蒸发”辐射理论，如果宇宙中真还有原始微黑洞存在，可能产生强大的射线，放出高能粒子，按理现在能直接观测到这种正处在“蒸发”辐射的微黑洞。此外，由于其它天体处在强引力场尚未显现的情况，可以说黑洞是引力波发生之源的唯一依据，这样人们便可通过观测引力波来寻找黑洞了。

近十年来，人们对微黑洞的“蒸发”辐射进行了搜寻，并仍在继续搜寻。时至今日也仍未发现这种微黑洞的踪迹。

但有人认为，Seyferf 星系和类星体(quasar)等天象都可说成是 Kerr

黑洞。这些天体用电波干涉计进行观测，在两极处，电波呈明显的细条状流线。此条状流绵亘数百万光年之广，从而可肯定至少在数百万光年间，存在一个稳定的物质流。人们认为，它既然能把如此巨大的能量在同一方向上稳定释出，那必然是 Kerr 黑洞无疑了。然而，这毕竟不是对黑洞“蒸发”辐射的观测，只是一种推理而已。

1978 年，美国天文学家 J. Delia 在探索研究引力波的历史上开创了发生质变的新局面。他连续四年在密切注视测量 PSR1913+16 脉冲双星的周期中，不仅首次间接证明了 Einstein 的预言——引力波的存在，而且也为其寻找其波源的黑洞找到了一个佐证。

自本世纪 50 年代以来，人们就向“直接检验出引力波”（这一实验物理学家遗留下来的最大课题之一）进军了，期望诞生“引力波天文学”。只有直接收到引力波，窥看宇宙的崭新窗口才会打开，黑洞之谜便可由此而解。

如前所述，落入黑洞的物质，在被黑洞吞没之前，它将绕黑洞旋转并辐射能量。由此人们认为，充当双星系子星的黑洞，其引力场在很大距离处与普通恒星引力场无区别，因为它影响另一子星（恒星）的运动。此系统的双子星相互围绕旋转，演化的某一阶段会发生强烈的物质交流，奔向黑洞的物质发出 X 射线。那么，发出 X 射线处的子星就是黑洞。70 年代以来，随着“X 射线天文学”的诞生，人们对双星的 X 射线进行了大量的观测。

夏季的夜空，位于天鹅座的东北角会出现一颗取名为 HDE226868 的蓝色巨星，有一个称为天鹅座 x-1 的天体就作为这颗蓝色巨星的伴星，以周期 5.6 日在蓝色巨星的周围盘旋。美国加利福尼亚大学的一个研究小组用一种高灵敏度的新探测仪重新考查了天鹅座 x-1，认为天鹅座 x-1 就是黑洞。其理由有两条：测得其 X 射线的强度在 $\frac{1}{1000}$ 秒的极短时间内呈不规则变化，推知它是一个直径不到 100 公里的小天体；由双星的公转周期求出其质量在 $6M_{\odot}$ 以上，这已经超过了中子星演变为黑洞的临界质量。延续十年来的观测，这与黑洞假说没有矛盾。

但遗憾的是，这还不能向世界宣布：奇异的黑洞被找到了！对天鹅座 x-1，还需进一步详细研究，排除其他的可能性。例如(1)在一个正常的双星系统中，由于磁场的作用，也可能产生 X 射线（这个问题还需进一步研究）；(2)天鹅座 x-1 和蓝色巨星 HDE226868 可能是一个三重星系统。也就是说，这颗蓝色巨星的伴星不是黑洞，而是一个由一颗较大质量的恒星和一颗中子星紧密组成的双星系统。这种配置非常复杂，至于这是如何演化而来的，更是一无所知。伴星也可能是一颗高速旋转的大质量的白矮星，这种白矮星能否发出 X 射线，目前还不清楚。

究竟需要寻觅到哪些数据才足以证明黑洞的确存在呢？能直接观测到黑洞吗？在本世纪末、下世纪初有可能取得一些较大的进展吗？

到目前为止，天文学主要依靠光、电波、X 射线等电磁波作为手段进行观测。但是电磁波在物质中几乎不能穿行，要想知道星体内部，只能获得少得可怜的信息。因此希望之一，来自引力波望远镜。如果引力波望远镜能制造成功，那么我们就能够像了解太阳那样看到遥远处巨星的塌缩姿态和黑洞了。

希望之二，是来自太空望远镜。把口径为 2.4m 的光学望远镜载上航天飞机，送入地球轨道，就不难以角分辨力为 0.01 秒的精度分析天体，直至观测到 26 等星。使用了太空望远镜，虽然仍无法直接观察黑洞，却能捕捉到引力透镜现象。通过黑洞边缘的光线，会因黑洞引力场引起弯曲而形成扭曲图像，这些像可用高分辨望远镜进行观察。

早在 1939 年 Einstein 就发表了对引力透镜的计算。迄今人们已经发现了若干个引力透镜现象，但这些都是由远处巨大椭圆星系形成的像。要想用太空望远镜寻找黑洞，也许以银河系内太阳近处的星体或双星为探索目标，或以微黑洞为直接探索目标，较为方便。如能随着岁月的流逝，去跟踪某些星体的扭曲图像，说不定那神奇黑洞的真面目就会出现在我们的眼前，黑洞之谜也就大白于天下了！

四、结束语

黑洞物理学发展到当代水平，使热力学、广义相对论和量子场论相结合，无论理论研究还是搜寻观察都取得了令人振奋的进展。然而对双星的引力波和 X 射线的观测并不是直接观察，更不是对引力波源和 X 射线源的直接观测，即还未直接观测到黑洞的确切存在。这为当今和未来的物理学家和天体物理学家，提出了更新的课题，留下了更艰巨的任务。如何迎接黑洞辐射理论对现今公认的物理理论的挑战？例如，大质量的恒星通过引力塌缩成黑洞然后又“蒸发”的过程中，初态和终态的重子数、轻子数大不相同，明显地违反了重子数、轻子数守恒定律。是废除还是修改“重子数、轻子数守恒定律？”对黑洞的“负热容量”这一奇怪特性，热力学“熵”的概念如何去扩充？若广义相对论正确，黑洞又确难直接观测到，那么黑洞形成的机制到底是什么？如何才能直接观测到黑洞？在广义相对论的框架内出现某种“奇点”是不可避免的，而“奇点的出现”恰好表明这一理论的局限性。是否由于顾及量子效应，在强引力场条件下，广义相对论的适用性受到了限制？……这一切不得而知，大量的问题有待于进一步去探索。

正因为如此，对于研究黑洞，无论对物理学还是对天文学（包括宇宙学）都具有重大的意义。对物理学来说，研究黑洞，不仅可以验证发展广义相对论的真理性，探明弯曲时空奇异区域的物理本质，为 Einstein 引力场方程赋予新的物理涵义，推动整个物理学理论的发展；而且有助于人们深刻认识物理学各学科间的内在联系、致力于相对论的量子化，为物理学的大统一理论提供一条可供探索的途径。对天文学和宇宙学来说，研究黑洞，不仅可以帮助人们进一步了解天体的演化规律，而且还能为推动宇宙学的发展去创立“量子宇宙学”。创立量子宇宙学正是当今天文学家们研究黑洞的基本转向，已有了某些成果，期望消除“奇点”，创立无“奇点”的合理宇宙模型。

物理学定理都是用“物质”、“时空”表达的，在弯曲时空奇异区域内，时间和空间倒置了，通常的物理定律也应随之失效。因此对黑洞时空奇异区域物理本质的深入研究，也许会发现新的物理学理论。

（柳书伦、陈大荣、岳胜文）

崎岖的道路，光辉的历程

——探求周期系的低限和高限

所谓周期系的低限，是指周期表中元素最轻一端的始点，所谓周期系的高限，是指周期表中元素最重一端的终点。两者可统称为周期系的限度。

探求周期系的低限和高限，不仅是周期系理论研究中的疑难问题，而且这一课题的正确解决，是全面把握周期系的内涵和外延的重要前提。本文将通过人们对于周期系限度问题认识历史的考察，探索解决尚存问题的新途径，以预测未来的发展趋势。

一、对低限的探求

人们认识低限的过程，大致可分成三个阶段；创建元素周期系理论的初级阶段；揭示周期律本质和建立现代周期系理论的阶段；现代周期系理论的充实和发展阶段。各个阶段主要是围绕着三个方面的问题而展开的。其一，位于氢前面的元素存在的可能性问题；其二，第一周期的结构问题；其三，氢在周期表中的位置问题。但是，每个阶段对这三个问题的讨论都不是等同的，而是各有其侧重。

在以门捷列夫为中心的时代里，化学家们着重探讨了第一周期的结构问题和位于氢前面的元素存在的可能性问题。

氢是否为低限的问题，与第一周期的结构问题有着密切联系。如果搞清了第一周期的结构，那么，就有可能为确立氢的位置和低限提供规律性的逻辑判据。门捷列夫根据氢和锂的原子量之差（约等于6）太大的事实，曾预言在氢和锂之间存在原子量约等于3的未知卤素。这一异常直到发现了氦之后，才基本上被消除。但是，限于当时的科学水平，门捷列夫难于理解第一周期只有H-He两个元素的反常现象，况且他又被束缚在以太思想之中，仍然坚持在H-He之间存在元素的观点，因而氢是否为低限的问题也无从肯定。

门捷列夫表述的元素周期律是以原子量为依据的。虽然他有成功的预言（指类硼、类铝、类硅等），但也遇到了钾原子量轻于氫、镍轻于钴、碘轻于碲的矛盾。门氏亦曾试图以证实有轻于氢的元素而为证明元素性质对原子量的依从关系寻求新的证据。但是，他假想的元素氦，后来已被光谱分析的结果所否定，而他关于以太元素的思想，也在现代科学的发展中消声匿迹了。

至于氢在周期表中的位置问题，当时未展开讨论。似乎那时的化学界都默认门捷列夫把氢放在第Ⅰ族的位置。

1911年卢瑟福提出的原子有核的结构模型理论，标志着人们对元素周期律的认识进入了新的阶段。1913年他的学生玻尔提出原子结构的量子化轨道理论，完成了卢瑟福—玻尔原子结构模型的创立工作。同时，莫斯莱从元素的X光谱中发现了原子序数定律。所有这些成就，使门捷列夫发现的周期律在理论上实现了一次重大的飞跃，完全建立在科学的基础之上。元素周期律的定义重新表述为：元素的性质随着原子序数的增加而呈周期性的变化。这是由于元素原子的核外电子壳层结构随着原子序数的增

加而呈周期性变化的结果。所以，这个基本原理，既说明了周期系的低限应是原子序数为 1 的元素，又解释了第一周期结构的合理性，从而排除了在 H-He 之间存在元素的可能性。

留下来的问题就是氢在周期表中的位置问题。到了 20 年代，一方面，人们通过化学实践已更多地认识了氢的性质；二方面，原子的电子结构模型也为确立氢的位置提供了理论根据。所以，从这时开始，氢的位置问题就成了人们注意的重要课题。可是直至今天，还未取得统一的看法。归结起来，主要有三种观点。

1. 认为氢应占据第 Ⅰ 族的位置。其根据是：从化学性质看，氢在化学反应中能呈现正一价状态，并能与碱金属正离子互换位置；从原子结构模型看，同第 Ⅰ 族碱金属原子具有相似的最外壳层电子构型；固态氢显示金属性质。

2. 认为氢应占据第 Ⅶ 族的位置。其根据是：氢原子在化学反应中，能获得一个电子而形成类似于卤素的负一价阴离子，而与碱金属或碱土金属形成氢化物（这是氢与碱金属的重要区别）；从价键性质看，氢具有与卤素十分相近的非金属性质，在常态下能形成双原子分子，都属于共价键的性质，而且它们的离解能几乎分布在一条平滑的曲线上，呈现规律性的变化。

3. 认为氢应占据既非 Ⅰ 族又非 Ⅶ 族的特殊位置。德国化学家安特罗勃夫第一个认为氢在周期表中应像一条横梁那样占据凌驾 Ⅰ-Ⅶ 族所有元素之上的原始物质的位置。到了 50 年代，苏联卡普金斯基坚持类似的观点，主张氢在周期表中占据既属于 Ⅰ 族又属于 Ⅶ 族的特殊位置。

关于位于氢前面的元素是否存在的问题，在门捷列夫假想的元素被否定和认识到周期律与原子序数的关系之后，本应已经解决。但到 1932 年查德威克发现中子之后，思想重新活跃起来。有人由中子推演到电子，提出了 $e^- - n^0 - H^+$ 序列的假想，认为可由 e^- 和 n^0 构成零周期。这种把基本粒子硬拉入周期表的做法是非常牵强附会的。

要重新判定氢是否为周期系的低限，不能不涉及到究竟如何看待基本粒子与元素的异同问题。在发现基本粒子的初期，由于认识很肤浅，而把它们错划为元素是不难理解的。今天，再也不可能有人把它们混为一谈了。人们已熟知：元素的化学行为是与原子的结构紧密联系在一起的。如果脱离了原子的电子结构，那么元素的化学行为就无从谈起。目前，化学已扩展到分子化学、原子化学、核化学、基本粒子化学四个层次。其中每个层次都与原子结构或类原子结构有关。奇异原子化学作为基本粒子化学的重要领域，已为人们区分原子和基本粒子提供了新的论据。

所谓奇异原子，是相对于正常原子而言的。一指正常的原子核不变，只是核外电子有一个被其它荷负电的粒子所取代而形成的原子；二指原子核外的壳层电子不变，只是核内质子被其它荷正电的粒子所取代而形成的原子。它们都是基本粒子在射入物质之后，由于损失了部分能量而被俘获或它俘获电子所成。人们已经研究了一些类氢原子的奇异原子，属于第一类型的类氢原子（如 μ^- 原子， e^- 原子等），都比正常的氢原子重；而有些属于第二类型的类氢原子（如 μ^+ 子素，正子 (e^+) 素等），却比正常的氢原子轻。能否把这些轻于氢的类氢原子看成位于氢前面的元素呢？我们认为，尽管它们的质量轻，可是核电荷仍等于 1，因而在周期表中只能

和氢同位。虽然已知氢有三种同位素(H 、 H^2 、 H^3)，但从“同荷异质”的概念看，把类氢奇异原子看成氢原子的同位素，比看成有别于氢的元素可能更合理些。

奇异原子虽然由基本粒子形成，但它们两者之间有根本的区别。奇异原子正像正常原子一样，起码要由一个荷正电的粒子和一个荷负电的粒子所形成，核外电子处于一个有心力场的作用之中。从类氢奇异原子的结构模式看，虽然它的原子半径比氢原子小上百倍，但比起基本粒子(质子、中子)的尺度大得多，大上近百倍。况且两者的内部作用力和结构模式有本质的区别，所以，把基本粒子体系和原子体系完全相混淆是违背科学道理的。

目前可认为，氢元素作为周期系的天然低限，是站得住脚的。从人工制造原子或合成元素的角度看，许多类氢原子的形成，只是丰富了氢作为低限的内容。是否可这样说，周期系的低限，既是清楚的，又是模糊的。

关于如何对待氢在周期表中的位置问题，我们认为应着重研究氢原子的特殊性，以便做到特殊的问题特殊对待。氢原子结构具有不同于其它一切元素的根本特征。氢原子只有核质子与核外电子的吸引作用，而不存在电子之间的排斥作用。当氢原子失去电子之后，它就转变成一个“光秃”的质子，而不像周期表中其它元素的原子那样，当它们丢失外层电子之后，还保留着部分内层电子而构成原子“骨架”。所以，后者的直径在 $0.2 \sim 3.3A$ 范围内，而前者(H^+)的直径却只有 $0.00001A$ 。氢原子处在基本粒子(质子和电子)相结合就成原子，失去电子又变成基本粒子的边缘地带。这些大概就是氢原子具有非常特殊性的根本所在。所以，一定要把氢安置在周期表的某一固定位置，也许是很难满意的。而且有可能增加人为性，歪曲氢原子的本来面目。只有认清氢元素的本质特征，才能真正把握它的全貌。可是目前还不能说已经完全达到了这个目标。

今后，在探求低限方面，应把氢置于原子、核和基本粒子三个层次的交叉地带进行深入考察。为此，应继续重视奇异原子、反原子的研究成果，以便认清氢的特殊性质和地位。

二、对高限的探求

人们认识周期系高限的过程，大致也经过了三个阶段：承认天然铀既成事实的阶段；解释和寻找天然元素高限的阶段；追求人工合成元素高限的阶段。

1871年，门捷列夫在《化学原理》第1版提出的元素周期表中，清楚地列出，铀元素孤零零地位于最后。当时对它的左邻右舍，一无所知，而且门捷列夫对周期表为什么在铀处结束，未做任何说明。因此，那时铀便成为元素周期表的当然高限。只有在发现了惰性元素和放射性元素之后，门氏在1905年才开始注意到研究铀对发展周期系的重要性。

铀是同发现放射性现象直接有关的第一个元素。有关放射性的研究工作，也为回答周期系的高限问题，不断地送来信息。所以，从本世纪初开始，就进入了解释和寻找天然元素高限的新时期。

在探求周期系高限的道路上，未认识核结构之前，曾出现过一段所谓的“电子”解释。这个阶段的主要特征是外因论，把元素的放射性看成是

原子受外来射线的激发所造成的。当核科学进入 30 年代以来，提出了放射性发源于核内部矛盾运动的理论，进入了所谓的“核”解释阶段，为人们解决周期系的上限问题开辟了正确的途径。科学家们根据 粒子衰变的能量、寿命（半衰期）与核稳定性的关系，以及运用幻数和核壳层模型的闭壳层概念，较好地解释了周期系的天然高限在铀处的原因。

从 U^{234} ($t_{1/2}=4.5 \times 10^9$ 年) 和 U^{235} ($t_{1/2}=7.1 \times 10^8$ 年) 的寿命看，由于它们的半衰期同地球的寿命 ($\sim 5 \times 10^9$ 年) 相近，因而它们的原始状态至今仍然存在地球上。比它们重的元素，都因同位素的半衰期短于 10^8 年，大多已经衰变光了。如果还有幸存者，那么其量也已微少到难于探测的程度。由此可见，铀就成了周期表中原始天然元素的高限。

关于铀后元素在自然界是否存在的问题，曾有许多化学工作者，根据超铀元素类似于铀的推测，在天然铀矿中寻找过它们。可是直到 1940 年麦克米伦等人从铀人工制得 93 号元素之前，都未获得有关天然超铀元素的可靠证据。只有在研究了铀与镭的母子关系之后，并经过改进测试技术，才终于在铀矿中发现了镭和钷。但是须知，它们的原始状态已不存在，只是作为天然铀同位素的天然核反应的二级产物而存在于自然界中，而且其量甚微。至于原子序数大于 94 的元素，在自然界中至今未被发现。所以，如果不涉及天然元素存在的原因，而只考虑存在的事实，那末周期表的天然高限，目前应扩展到 94 号元素钷。

周期系的天然高限，仅是个相对概念。天然高限是否还要向原子序数增大的方向扩展，要视今后的理论推算和探测技术所能达到的水平而定；但天然高限向原子序数减小的方向收缩，却是肯定的，只是时间要很久很久（如 100 亿年）。

核科学从本世纪 40 年代开始，已进入了人工合成超铀元素的年代，冲破了天然高限，并随着新元素的发现，不断向原子序数更大的高限推进。从 60 年代开始，已进入了发现超重元素的新领域。

发现超重元素的研究工作，是在现代核结构理论和核反应理论的指导下进行的。在 60 年代，科学家们根据核壳层模型的理论计算，推论出 114 号元素的原子核具有稳定的双幻数结构 ($[114]^{298}$)，类似于铅，围绕着它形成一个所谓的超重元素的稳定岛。甚至还推测出质子数为 126, 164 的幻数核也有长寿命的同位素。当时，真是欢欣鼓舞，于是核科学工作者兵分两路出击：一路寻找自然界的 114 号元素；另一路人工合成它。

在向自然界寻找的过程中，从古老教堂的有色窗玻璃到海底锰铁矿石；从地球上的铂金矿石、独居石到月球岩石、陨石，均未找到确凿的证据，当然也难于得出肯定的结论。

人工合成超重元素，虽已取得了很大的进展，例如西德重离子研究所宣布：1982 年发现了 109 号元素。但要到达 114 号，仍然困难重重，而且暴露出许多新的矛盾。这是一条通向周期系最高限的崎岖道路。科学家们主要集中于超重元素原子稳定界限的预测和实现人工合成的探索。

1. 关于超重元素原子稳定界限的理论推测

现代原子结构理论认为，原子是核和电子的对立统一体。只有核和壳层电子都稳定，原子整体才能稳定存在。只要其中任何一方受到完全破坏，原子就失去了稳定存在的条件而转化成其它层次的客体。因此，人们从电子壳层和核两个方面探讨了原子的稳定性。

从电子和核的关系看，当原子核增大到足以把内层电子（主要是K层电子）连续吸入核内时，就会导致整个电子层结构崩溃。

最初的工作是由哥本哈根学者罗西兰德进行的，他采用的计算式是：

$$d = \frac{d_0}{2_z} (1 - a^2 z^2)$$

，式中 d_0 是正常氢原子的轨道半径， a 是常数（等于 7.2×10^{-3} ）。根据这个公式可计算出任一元素原子的内层电子的轨道半径 d 。由该式看出，内层电子的轨道半径将随着核电荷(z)的增大而变小，直到使电子落到核上为止。

玻尔从量子力学的角度进行了更精确的计算，按下式计算原子序数 Z 的最大有效值（临界值）， $\frac{Z_{\text{有效}}}{R} = \frac{hc}{2c^2}$ ，当 $h=1$ 时， $Z_{\text{有效}}=137$ 。后来，

狄拉克等人又从相对论量子力学的角度进行了修正和计算，其计算式为

$$E = mc^2 \sqrt{1 - a^2 z^2}$$

，式中 a 是精细结构常数。如果按类氢原子计算，可得K层轨道的能量值。因 $a = \frac{1}{137.04}$ ，当 $Z > 137$ 时， E 为虚数，说明该原子不可能存在。还有人得到 $Z_{\text{有效}}=200$ ，因可靠性更难于断定，在此不再赘述。

当周期表中的元素排列随着核电荷的增加进入第七周期之后，通过光谱分析数据，发现电子的充填规律有些紊乱。按正常的推理，其外电子壳层的构型应为 $7s5f6d$ 。但光谱数据证实，钷原子是 $7s^26d^2$ ，铀原子是 $7s^26d^25f^2$ 。当原子序数大于99时，由于原子的数量很少，半衰期又很短，已很难取得它们的光谱数据。所以，关于它们的电子构型，直到现在仍然是预测而已。尤其原子序数再增大时，由于强烈的相对论效应造成轨道“收缩”，自旋——轨道的相互作用造成能级分裂，以及量子电动力学效应等因素的影响，使电子出现“错位”。因而，对它们的电子构型的预测更困难。尽管有人对121号、122号，直至154号等元素的电子构型做了推算，但可靠程度不大。目前看来，至少有下列不足之处。

在第七周期后半部元素的电子构型未得到证实的情况下，就推演到第八甚至第九周期，缺乏可靠的科学根据；在对 Z 大于110核的稳定性的推测尚未肯定的情况下，把外电子层的构型推演得那样远，能有意义吗？预测121号元素在填充 $8s$ 亚壳层之后，立即充填 $8p$ 层($8s^2 8p^{1\frac{1}{2}}$)，把这种在第二、三周期中出现的情况，硬搬到第八周期表，能合理吗？

从核结构理论看，核物理学家采用类似于电子壳层结构的概念，建立了核的壳层结构模型理论。他们根据核结合能电四极矩和中子俘获截面等实验数据，发现具有2, 8, 20, 50, 82, 126个质子（或中子）的核特别稳定，认为这些称为幻数的核都具有闭壳层的结构。但是，如果把114号元素的寿命估算太高，是同寿命随着核电荷增加而变短的趋势相矛盾的。幻数的特殊稳定性只是个相对概念，是同它周围的核相比较而言的。从总的变化趋势看，也是随着核电荷增加而寿命变短的。

实验事实说明，104号的同位素，其半衰期最长者为65秒，107号为 2×10^{-3} 秒，109号也为毫秒级。而超重岛理论指出，从110号元素起，已经是超重岛的边缘了（理论预测它的半衰期 $t_{1/2}=10^8$ 年）。它的寿命是否真比109号变长，现在还很难断言，需要实验证实。因此，对110号元素

的探索，将对验证超重岛理论起着关键作用。

化学元素和核素是两个不同的概念，它们的高限应有不同的标准。如果在超重元素领域内，核的不稳定性比电子壳层的不稳定性变化快，那么化学元素的高限就要被核素的不稳定界限所制约。因此，核稳定存在的高限就成了元素的高限。

2. 关于合成超重元素的可能性

核科学家对合成超重元素的可能性，主要考虑了两个方面的问题：一是合成途径是否可行？二是合成手段和鉴别技术的有效性如何？

合成途径的可行性，主要决定于两个前提条件，即寿命的长短和反应截面的大小。

正如许多文献所指出的那样，采用连续俘获中子合成超重元素的途径，已极其渺茫，而采用重离子核反应以飞跃的形式前进，似乎有些希望。

在合成超重元素的重离子核反应中，矛盾也不少。如果炮弹太轻，当然到达不了 114 号位置。如果炮弹加重，从增大质量看，是有利的；但从能量增大看，对形成新核还会产生不利的影 响。70 年代，发现的“弛豫”特征或“准裂变”现象，更为说明合成 114 号元素的困难性增加了新的证据。说明弹核和靶核在击中的一瞬间，还未来得及形成复合核就立即分开了，致使反应截面急剧变小，从而使合成和鉴定都变得十分艰难。已知合成 105 号元素的截面为 10^{-9} 巴。合成 109 号元素的实验指出，轰击离子 (Fe^{58}) 和靶核 (Bi^{209}) 在 10^{14} 次结合中，才只有一次成功，轰击靶核达一周之久，才检测到了合成的一个新原子核。试想，反应截面再小下去，新核形成的机遇会是怎样呢？

目前一些有条件从事重离子核反应研究的国家，如美国、俄罗斯、德国等国家，都在改进原有的加速器或建新的加速器，提高加速粒子的能量（可达 27 亿电子伏特），可加速包括 U238 在内的所有原子序数小于 92 的原子核（有人称它为全粒子加速器），为研究超重元素的合成提供了先进的技术条件。但是，是否真能合成 114 号元素，目前看来，起决定作用的因素，可能不是合成技术问题，而是前面提到的反应机理和合成途径问题。

鉴别方法，尤其是化学方法，已成为认识化学元素高限的直接限制。虽然核化学工作者已发展了许多快速而有效的鉴别方法，如有线质谱法，速度选择器，氦气喷嘴法等。但是，由于任何鉴别方法都是基于某一特定原理而设计的，所以，都具有自身的局限性。化学鉴别要求提供确保完成化学变化的时间和显示变化的数量。因此，超重元素的寿命和生成数量，必然限制着鉴别方法的有效性。从这个角度看，真正具有实际意义的元素高限，就是化学鉴别方法所能达到的极限。如果没有可靠的化学鉴别，那么很难评价元素的性质及其在周期表中的地位。

目前，对待探求周期系高限的研究工作的前景，由于缺乏直接的实验证据，尚难准确地预测。但是，也不能因至今未得到任何有关证实稳定岛存在的信息，而失去解决问题的信心。寻找超重元素的研究工作应坚持下去，争取尽快做到水落石出。从目前的发展趋势看，值得重视下列研究方向。

其一，目前已获得了约 1900 种放射性同位素，而理论预测却有近 6000 种。所以，发现新的放射性元素（同位素）的工作，还有广阔的天地。当

然，由于它们的寿命很短、反应截面极小，制备工作已非常困难。正因为如此，就应继续改进和发展重离子加速器，提高束流强度和能量。同时也要继续发展瞬间的化学和物理鉴别方法，争取认识更多的新元素。

其二，正确地看待“计算化学”的功能。虽然把电子计算机应用于计算化学中可进行大量的逻辑推理运算，但是，仅停留在许多近似和假设的基础上，是不可能彻底解决问题的。计算化学需要在人工合成实验提供更多证据的基础上，进一步充实其理论依据，完善其逻辑推演方法和运算程序。为此，应注意运用群论、集论、数论等数学理论，发展新的核结构模型，以便对未知的超重元素做出比较符合实际情况的预测。

其三，重视基本粒子物理学和化学中新的研究成果，加深对核力的认识，促进对核不稳定性变化规律的认识和把握。发展新的概念（如超对称性），开拓新的领域，建立四种基本作用力的统一理论，有可能对元素周期系作出新的评价。

（张道民）

一个待解之谜

——幻数理论的困难

一、幻数的提出与幻数理论的形成

40年代末，美籍德国人迈耶尔（M. G. Mayer）首先发现稳定原子核中的“幻数”（magic number）规律，即中子数或质子数符合 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126 这些整数的原子核具有特殊的稳定性。质子数和中子数均为幻数的核，称为“双幻数核”，尤其特别的稳定性；单项符合者，叫做“单幻数核”。前者如 ${}^4_2\text{He}_2$ ， ${}^{16}_8\text{O}_8$ ， ${}^{40}_{20}\text{Ca}_{20}$ 等；后者如 ${}^{60}_{28}\text{Ni}_{32}$ ， ${}^{88}_{38}\text{Sr}_{50}$ ， ${}^{120}_{50}\text{Sn}_{70}$ 等。对于现已发现的原子核来说，126仅代表中子数，如 ${}^{203}_{82}\text{Pb}_{126}$ ， ${}^{209}_{83}\text{Bi}_{126}$ 。“magic number”的命名有“不可思议”的“魔魅”之意，表达了在核结构问题上的一个“待解之谜”。刚提出幻数规律时，还不能称之为幻数理论，因为这仅仅是依据经验（实验）事实（例如核素丰度、核的结合能、衰变的能量，等等）而总结出来的，充其量是经验选择出来的规律。

紧接着，迈耶尔和另一位德国科学家简森（J. D. Jensen），在幻数存在的基础上，提出原子核的壳层结构模型。

原子系统的化学稳定性取决于核外电子壳层结构的稳定性。由满壳层电子总数 2, 10, 18, 36, 54, 86, 决定了氦、氖、氩、氪、氙、氡原子的闭壳效应。原子系统的化学稳定性和原子核的物理稳定性虽然有本质上的不同，但是这不妨碍以核外电子壳层结构的闭壳效应来想像核子也成壳层结构而有闭壳效应。

由于核结构、核子之间的相互作用比核外电子的运动状态问题复杂得多，因而用量子力学来描绘核子的壳层模型有许多困难，致使核的壳层模型设想成为一种模型理论所经历的道路是颇为曲折的。

核子的自旋和电子一样，都是 $1/2$ ，因而都遵从泡利原理。因此，在核壳层的各个能级上，应有定额的核子数。然而，核子是两种粒子，中子和质子都能分别构成已有的能级壳层吗？这从幻数存在都能机会均等对应着质子和中子这点来看，人们可以持乐观态度。令人悲观的是，很难想像核力作用之距离短到比 $2.88 \times 10^{-18}\text{cm}$ 还小的程度，密集的核子能够像核外电子那样作为各自独立的客体来对待；核里是否存在与原子系统相仿的不变性向心力场？这导致人们一度冷落核壳层模型。

原来，不少实验材料有利于“幻数”的存在，这促使核物理学家们设法在半经验和半理论的水平上把核壳层的核子满额数和幻数相互符合起来，这样做的结果，就使单纯经验性的幻数向理论性的幻数发展了，核壳层模型理论也成为了幻数理论。

需要假定，核里的任何核子都处于相同的一个平均势场之中，该场是被考虑处理的一个核子被其余所有核子发生作用的分场的总和。同时，把泡利原理在核里的应用加以发展，即假定核子之间的碰撞机遇很少，以保证单个核子在核中的运动态势是独立的。这就构成了与核外电子壳层相仿的独立粒子式的壳层模型。通常假定原子核为球形，原子光谱的细节确实

表明许多原子核的电荷分布是球对称的。有些原子核的电荷分布呈椭球形对称（有点像橄榄），核有两对电磁极，因而构成“四极矩”。但这和球形相差并不悬殊，最极端的核类情况，其长短轴之差也超不过 20%。对于近球形（电四极矩趋于零）的核类来说，所假定的平均势场可以视为向心场。从最简单的向心场出发，选择在数学上容易处理的直角势阱和谐振子势阱这种具体形式，对独立粒子的能级加以量子力学的处理，可以得出 2, 8, 20 三个幻数。

进一步考虑核子的自旋——轨道耦合作用，平均势场得到修正，在能级的较大分裂处，找到了 50, 82, 126 三个幻数。至此，现有的全部幻数都对应上了。

原子核的自旋是其角动量，由核内全部核子的角动量（包括轨道角动量和自旋）的总矢量和所贡献。某原子核内全部核子的宇称之乘积是该原子核的宇称。质子和中子均正好填满已有的主壳层，就是所谓双幻数核。双幻数核的自旋为零，宇称为正。

据统计，稳定核素不到 300 种。按核中的质子和中子数目之偶奇来分类，偶偶核最多，占一大半，可见偶数原则与幻数有必然联系。偶偶核自旋为零，宇称为正。奇奇型核素仅有 5 种稳定（ ${}^2_1\text{H}_1$ 、 ${}^6_3\text{Li}_3$ 、 ${}^{10}_5\text{B}_5$ 、 ${}^{14}_7\text{N}_7$ 、 ${}^{50}_{25}\text{V}_{25}$ ） ${}^{50}_{25}\text{V}_{25}$ 具有微弱的放射性，半衰期是 6×10^{15} 年，可视为稳定的。其它质量数大于 14 的奇奇型核素都是不稳定的。奇奇核的宇称和自旋取决于最后两个奇核子。奇质子和奇中子之间的自旋耦合较强，致使两个核子的自旋趋向平行。奇偶型稳定核素和偶奇型稳定核素各有 50 种左右，两者可概括为质量数 A 为奇数的奇 A 核，其自旋均为半整数，由于每个核子的角动量都是半整数，奇数个半整数耦合的结果自然是半整数。奇 A 核的自旋和宇称均取决于填充壳层的最后奇核子状态，余下的偶数个核子可当作一个“偶偶核”来处理。

这样，对于绝大多数的核素来说，核壳层模型理论均能解释它们的基态自旋和宇称。

核壳层模型理论的成功之处，也就标志着幻数理论的形成。

二、幻数理论的预言难以实现

简单的壳模型理论，即是单（独立）粒子模型理论，也就是幻数理论，最适用于双幻数核——球形核。其局限性正好也在这里。

60 年代中期，核物理学的幻数理论预言， ${}^{298}[114]$ 是个双幻数核，即 114 和 184 均为幻数。把 184 定为中子幻数， ${}^{294}[110]$ 这个单幻数核也应该是稳定的。因此有人推想，在 ${}^{298}[114]$ 周围可能存在着“超重核素岛”。

如何“登上”理想的“超重岛”呢？

用中子作“炮弹”而使“靶核” β -衰变成更重的核素的方法，在突破超重核素问题上卓见成效，但进一步实验证明，用此办法根本不可能达到理想的“超重岛”上去了。这好比“坐船”，在已知核素半岛和“超重岛”之间的那些过渡核素（比作“渡船”）易发生裂变，似乎渡船总是避免不了沉没的恶运。在自然界千方百计寻觅超重核素的失败经验表明，希望核

素“吃进”中子而多次衰变成超重核素的想法是不现实的。失败的根本原因是入射中子能量达到和超过了靶核的激活裂变能。

人类用合成核素的办法在制造铀后核素的非凡事业上有巨大功绩。但进一步实验表明，用此办法“飞过”已知核素半岛与理想超重核素岛之间的“海峡”，是多么困难！

在制造铜后核素方面，铜作为靶核屡见奇勋。但是，用 $^{48}_{20}\text{Ca}$ 轰击 $^{248}_{96}\text{Cm}$ 的实验表明，很难形成复核，即使形成也很快裂变。在诸如此类的想“飞过海峡”的实验中，导致意外的重要发现，例如在70年代初被苏、法、美所确认的一种深度非弹性散射核反应。

用 $^{84}_{36}\text{Kr}$ 轰击 $^{209}_{83}\text{Bi}$ ，若将弹性碰撞过程，两者的内部结构不变，散射是弹性的。实验发现，两者往往有叠加的部分，甚至发生核子交换的现象，这必然伴随着能量交换，结果是非弹性散射。更令人惊奇的是，这种核子交换可能使入射核变大，靶核缩小。这种交换行为是集团性的，而不是一对一那样对等地交换。核子“成群结队”地集团行为不是均等的，靶核里的核子往弹核里集体转移的机会较多，以致两者变得大小约略等同，其间形成“核子交换桥”成“哑铃状”，然后断裂开。弹核和靶核这样碰在一起（这已经很难得了）而又如此裂开，形不成人们热切盼望的“复核”。这是一种深度非弹性碰撞，结果好像是裂变，但不是常规意义上的核裂变，因此称“准裂变”。然而，这种新现象破坏了人们热望中的理想幻数核形成的“温床”。

应当指出，在壳模型基础上加以改进的集体模型（综合模型）理论，虽然考虑了核子的集体运动，对转动能级和振动能级作了定量分析，但是它不能解释核子交换这种集体行为。

加大加速器的能量，改进加速器的技术性能，可以把某些弹核加速到近光速的程度，被加速的弹核也可以越来越大，然而中靶之后，弹核和靶核都破碎了，质子、中子或其它轻核飞射出来，甚至会飞溅出介子来……。看来，单靠加大入射粒子的能量是不能造就超重核素的。

向第一超重岛进发都如此困难重重，70年代提出的“第二超重岛”（质子幻数为164）就更可望不可及了。

从现实的幻数理论来看，质子数为126的核素应当稳定存在。

美国科学家1976年宣布，从马达加斯加的云母矿中收集到的独居石矿包体里发现了超重核素，其中就有126号，并在加拿大和牛津发表了正式报告。这曾作为幻数理论的胜利而激动了整个国际科学界，立即掀起了企图证实和否定的热潮。

在黑云母矿里，铀、钍的放射性核素（及其子体）产生的放射性晕圈直径是24—28微米，某些超铀核素的放射性晕圈的直径可达140微米，独居石矿包体的放射性特大晕圈的直径为200微米。用质子射线来轰击晕圈中心物质而诱发发出的X射线表明，主要是126号核素的特征辐射。认证的判据问题很复杂，颇有争议，可能产生误认。带电子壳层的126号核素的L层X射线可能是铀的K层X射线或者质子与核碰撞而产生的射线的误认。1977年，美国的橡树岭研究所用可调谐的同步加速器辐射（即同一能量的强光子流）来诱发样品的X射线，在可诱发的X射线谱段内并没有发现超重核素的峰值，因此否定了1976年证实126为质子幻数的这一重

大发现。

上述可见，不论是在人工形态的幻数核方面，还是在自然形态的幻数核方面，幻数理论的预言都遇到了严重困难。这种困难实质上是核素周期系理论之不成熟性的表现。

三、核素周期系理论的不成熟性

在一定意义上来说，幻数理论和核素周期系理论是等价的。显然，每个核素周期，都以幻数核素为界限。由于核素概念与核素图存在一些疑难问题，致使核素周期系理论还很不成熟，幻数理论的困难也在于此。

1. 核素概念的疑难问题

这里所说的疑难问题，并非是通常意义上的关于核素概念的不明确性，而是指与核素理论相联系的实质性困难问题。

核素概念不同于同位素概念，后者属于化学元素范畴。不能因为在许多情况下两者可以等同使用而忽略其区别。核素，“即习惯上所说的‘同位素’”（见1977年原子能出版社出版的《核素常用数据表》）——这种说法属于概念不明确之列。

核素 (nuclide, nuclear species)，主要是表征特定原子核的概念。在原子系统中，核素有正常的核外电子壳层结构，因此可以把它视为“原子”，也可把它看作“同位素”。然而，当原子体系的电子壳层结构变形、甚至崩溃的时候，例如在地球核心那样的高压状态之下，只要有核类存在，哪怕是“裸核”，核素概念自然适用，但原子、同位素的概念就无用武之地了。

问题在于，如何处理同核异能态。具有相同的质子数和中子数，在通常意义上就是“同一原子核”，例如 ${}_{91}^{234}\text{Pa}_{143}$ ，其 β^- 半衰期为6.75小时。后来发现这种“同一原子核”具有另外不同的核性质，例如主要是 β^- 衰变（占99.87%，其余的0.13%是同核异能跃迁）的半衰期是1.17分，这被看作是 ${}_{91}^{234}\text{Pa}_{143}$ 的异能态，命名为同核异能态，标记为 ${}_{91}^{234m}\text{Pa}_{143}$ ，也被叫做同核异能素。 ${}_{91}^{234}\text{Pa}_{143}$ 成为“具有同核异能态的核素”。问题在于， ${}_{91}^{234}\text{Pa}_{143}$ 是同一核素 ${}_{91}^{234}\text{Pa}_{143}$ 不同的表现形式，还是另外一种独立的核素呢？

《核素常用数据表》一书指出，“对于半衰期 0.1 秒的同核异能态，则作为独立的核素排列在相应基态核素的后面。”“作为独立的核素”这种说法并没有明确回答 ${}_{91}^{234}\text{Pa}_{143}$ 与 ${}_{91}^{234m}\text{Pa}_{143}$ 是不是两种不同的核素的问题。

异能就意味着核内具有不同的能态结构，同质异能就意味着同质异构。如果肯定同核异能态是不同的核素，笔者认为这是在原子核层次的“同分异构体”，“同分”系指相同数目的质子和中子，“异构”则表明这些核子构成原子核的结构方式不同。在化学上的同分异构体是不同的化学物质；在核层次的同分异构体则是不同的核素物质。如果进一步要问，不同

的核素物质就是不同的原子核吗？这是核素概念的真正疑难问题。现在文献上通常说的“同核”异能态，“同核”异能核素，就包含着这一疑难悖论问题。所谓“同核”显然是同一原子核的意思，实质上不能视为同核。似乎叫同质异能态（或者同质异能素）可以避开这个问题，但这仅仅是从表面上回避了，要进一步追问，疑难仍旧存在。

据统计，现已知三百多种原子核有异能态，其中十几种原子核有两种异能态，标记为 m_1 和 m_2 ，例如 $^{116m_1}_{49}\text{In}$ 、 $^{116m_2}_{49}\text{In}$ 。这些异能态是以“长寿命”（半衰期 0.1 秒）为标准的。划分标准的人为可变性，使疑难问题更加复杂化了。

不管核素从激发态回到低态或基态的途径如何，即不论是跃迁，还是放射内转换电子，只要能测出同质异能素的寿命来，“同分异构体”的数量就要大大增加。随着测量技术的进步，人们把标准降到了 10^{-10} 秒这个数量级。近几年，科学家们干脆退守到这样一个“标准线”：只要激发态的寿命可测量出来，就算是同质异能素（卢希庭主编、胡济民审校，《原子核物理》，原子能出版社 1981 年版）。换句话说，寿命小于 10^{-10} 秒，只要是能被测量出来的异能态，就算是同质异能核素。这样，同质异能核素的定义问题就更加重了核素概念的疑难。核素稳定存在的规律性问题，核素性质呈周期性变化的规律性问题，都因核素概念的疑难问题而趋于复杂化，从而也就增加了幻数理论的困难。

2. 核素图的疑难问题

核素概念是 40 年代下半期提出来的，它既不同于同位素概念，也有别于原子核概念，只要抓住同质异能核素这个事实，就能证明这一论断。如果我们能够接受“同分异构核素”这一概念，它和同位素、原子核概念的区分就更加明显了。同分异构核素是不同的核素，带正常电子壳层的同分异构核素同样也是不同的核素，然而它们是同一同位素；在核层次的同分异构体是不同的核素，通常意义上它们是同一原子核。然而，核素概念及核素图的疑难问题也正好出在这里：“同核”异能态是不是不同的核素？

最早的核素图是所谓赛格瑞图（Segre chart），以中子数为横坐标，质子数为纵坐标，把全体已知核素按其所含的中子和质子数目标记在平面图上。可见，稳定核素都分布在一条曲线的附近，该曲线在原点附近的近 45° 角升起。“稳定线”可用经验公式表示出来。

如果把表征原子核性质的核数据标记在直角平面图上，每一核素在赛格瑞图上占有一块位置，这就是核素图。如果把它们列成表格，就是核素数据表。这样看来，最早的核素图与同位素表是等价的。1978 年，美国的同位素表（table of isotopes）已经出到第七版。

各国流行的核素图花样繁多，但大体上可分为两大类。一类是以赛格瑞图为基础的直角坐标图，美国 1977 年出至第十二版，西德 1981 年第五版；另一类是以中子数加或减质子数为横、纵坐标的平面图。我国原子能出版社 1976 年出版的核素图在国外图的基础上虽然有所改进，但是并没有克服核素图所具有的疑难问题。

核素的编号借用了元素的号码。借用元素的原子序数和按质量数递增的顺序，把所有已知的核素排列起来而制作的核素图，表明它是在化学元

素周期表的基础上进一步发展起来的。质量数相同的核素按纵队排列，从上到下的同量异位核素，实际上就是核素序数不同而质量数相同的核素，可称为同质异位核素（即同量异位素）核素；同序数按质量递增的顺序从左向上向右下斜队排列的核素，即是质子数相同的核素，它把元素周期表的同位素分开排列，从而将元素的原子量也“拆开”了；从左下至右上的斜队是同中子异位核素；横列是等超额中子异位核素。此图的优点表明，正像核素概念有独立存在的价值一样，核素图也有独立存在的价值。

最难处置的是同分异构核素，核素概念的疑难问题和核素图的疑难问题主要都集中在这里。同分异构核素是核素图中的“同位核素”，它们是否是相同的核素呢？如果按核素序数和同中子数来决定，它们当然是同一核素；若按核性质而论，它们就是不同的核素。目前，国内外文献还没有这样明确地提出问题，在核素图中也没有考虑如何处置这一问题的方案。

现代化学元素周期系理论和核外电子壳层结构模型理论是等价的。严格说来，106, 107, 108, 109号“元素”不宜放入现代化学元素周期表，因为它们“化学性质”尚未鉴定。换句话说，它们是否有正常的核外电子壳层结构，目前尚未判定。然而，它们可以列入核素图，因为它们的核性质是可以确定的。

建立在核子壳层结构模型基础之上的核素周期系理论很不成熟，它仅仅是初步揭示了核素稳定存在的规律性问题，远不像元素周期系理论那样准确、完整而令人信服。因此，作为反映核素规律性的图表形式——核素图，仅是初步的尝试工作。

四、出路何在？

如何克服幻数理论的困难呢？总结以往的科学实践来看，现在似乎到了理论先行的阶段，特别显示出理论研究的重要性。

1. 重离子反应机理的理论研究

总结重离子物理学二十多年的实验工作历史，迫切要求从理论上回答：轻粒子反应理论在重离子反应上究竟有多大用武之地？重离子反应机理的特殊性究竟是什么内在因素决定的？特别是那些新发现的核现象的内在本质问题。

入射核和靶核相互作用的复合系统远比复合核概念复杂。在直接反应与复合核反应中间过程中产生的深度非弹性反射，从作用的时间上来看，也是在两者之间的。前者约为 10^{-22} 秒，后者是 10^{-18} - 10^{-15} 秒。中间复合系统介于非平衡和统计平衡之间，其各种自由度均有“弛豫”特征，即由非平衡到统计平衡的过程特征。中子与质子之比对于核素稳定存在有重要意义，同样，中质比 (N/Z) 这个自由度对中间复合系统来说也是至关重要的。当其完全弛豫时，相对于复合核“忘记”了入射粒子来说，它对入射道还有所“记忆”，即保留了入射核的某些特点，这是重离子反应所特有的现象。出射核的质量数和电荷数，可以不同于弹核，深度非弹性散射的产物具有一定的统计性质。这种新的反应机制急需从理论上进行研究。

对于重弹核和重靶核来说，临界角动量的实验值与理论值的矛盾很

大。例如弹核 ${}^{84}_{36}\text{Kr}$ 和靶核 ${}^{186}_{74}\text{W}$ ，全融合截面的实验值较之整个反应截面，几乎趋近于零。合成新幻数核的希望也被反应截面问题难住了。这要求对原来的反应截面理论重新进行研究。

在重离子核反应中，新发现的特别现象，诸如形状同质异能素、双质子放射性和超晕态阱等，都需要进行理论性探讨。

2. 对基本粒子潜在性的理论研究

研究近 2000 种已知核素，探求核素稳定存在的内部机制，在表面幻数之下，肯定还有许多未知的因素决定着核素的性质。现有理论所预言的 6000 种未知核素是不足为凭的。仅从抽象数字上来看，核素可以无限制地发展下去，然而中子和质子不能任意数结合成核素。核素是基本粒子的大本营，然而它们是以潜在形式内存的，只有打出来，才能显示出它们的本来面目。探索核素稳定存在的规律，必然牵扯到基本粒子问题。

核素的统计性质证实质子和中子的组成，核素的稳定性和现实性主要取决于中子和质子的配比数及其相互结合的方式。核子之间的相互关系是极其错综复杂的。中子和质子不仅交换 π 介子，而且交换其它基本粒子。

按介子场理论，可导出核子之间的相互作用势，但这局限于两核子体系。同时，质子和中子组成两核子体系的排列组合方式有 3 种，而单 π 介子交换势 (OPEP) 又仅适用于单 π 介子交换作用。实际上，还有多 π 介子的集团性交换作用，从理论上导出多 π 介子的交换势是很困难的。同时，对多体作用问题的研究还没有什么肯定性结论。

实验发现，核素捕获 π 超子发生在核的远表面区，因此可用来探索原子核的最外表面的性质； π 和核素的相互作用实验证明，在核的表面区，主要是中子占据着，由此可推想，在核区域，中子的分布范围很可能超过质子，在实验上容易区分 K^+ 和质子、 K^- 和中子这两种相互作用的情况，于是可用来判断出核表面区域的中质比。有人认为，在重核素的表面区域，主要是中子活动着。有些实验表明，似乎核中有核，即核素中还有一个高密度的核心，外被一层密度逐渐减小的表皮包着。看来，基本粒子潜在的核环境是非常复杂的，这导致核素稳定性的研究变为基本粒子潜在性的理论研究。

探索核素规律，上联元素规律，下接基本粒子规律。原子核心与化学环境，核与基本粒子的相互关系问题，都积累了很多实验材料，也需要从理论上加以清理，闯出一条新路来。

3. 对核素的起源和演化问题的理论研究

作为人类认识界标的“基元物质”层次概念，不同于物质层次概念。反映“基元物质”集群规律性的周期性图表形式，化学元素周期表最成功；现有的核素图可以说是探索核素周期表的一个里程碑；基本粒子周期表的探求工作正在逐步深入下去，60 年代初提出的“八重法”很快就给夸克模型理论让位了。因此，与元素—核素—基本粒子这三个层次的概念相适应，元素周期表—核素周期表—基本粒子周期表，应该是人类对物理世界认识过程中的三个丰碑。

对核素起源和演化问题的理论研究，似乎到了“宇宙考古”的阶段。在这里，上述认识链条有必要首尾调换，即：基本粒子— 核素— 元素。

总之，幻数理论问题的解决，还存在着许多困难，牵扯面之广，涉及根本问题之深，由上述可见一斑。目前人类对核力本质以及核子之间的结合方式问题所知甚少，在“先行”的理论研究问题上，我们不能墨守同新的发现相违背的陈规和模式，而必须寻找新的理论出路！

（解强）

以太何处觅，何处无以太？

——狭义相对论的新探讨

1905年，爱因斯坦以狭义相对性原理和光速不变原理为基础，建立了狭义相对论。这一理论已经成为现代物理学的主要基础之一。然而，最新的实验检验和理论思维却揭示了相对论体系的一些疑难。这些疑难带有如此根本的性质，以致作者认为，探索和建立新的时空理论，已是一项紧迫的任务。这里，我们先回顾狭义相对论遇到的实验上和理论上的一些可能的挑战，然后探索一下建立新时空理论的可能途径。

一、关于狭义相对性原理

狭义相对性原理认为，所有惯性参考系都是完全等价的，不存在一个优越的特殊的惯性参考系；在一个惯性参考系内部做的任何物理实验都无法发现该惯性系相对任何别的惯性系的运动速度。在现代宇宙学的成就面前，上述论断已经难以成立。狭义相对性原理和现代宇宙学是完全冲突的。

当前比较公认的宇宙学理论，建立在宇宙学原理的基础上，即假设宇宙在空间上是均匀而且各向同性的。宇宙可以看作是密度到处都相同的流体，而星系或星系团就是组成这种流体的质点。由于均匀性和各向同性的要求，这种流体只能均匀膨胀或均匀收缩。现代宇宙学认为，在宇观范围内，存在着“宇宙标准坐标系”，典型星系或星系团在这个坐标系中是相对静止的；“宇宙标准坐标系”是优越的空间坐标系，典型星系和宇宙背景辐射对于这个坐标系均匀和各向同性；可以测量地球相对于宇宙标准坐标系的运动速度。

现代宇宙学得到河外星系红移和2.7K宇宙背景辐射等大量观测事实的支持。宇宙背景辐射是美国科学家彭齐斯和威尔逊于1965年发现的。近几年的研究证实，背景辐射严格地各向同性的情况只存在于一个惯性系中，在相对它运动的任何其他惯性参考系中显示出辐射温度的方向变化。可以认为，宇宙背景辐射是宇宙标准坐标系的最好的物质体现。测量从各个方向到达地球的宇宙背景辐射温度的微小偏离，得到我们的地球穿过这个“宇宙背景”的绝对运动速度大约为400公里/秒。正是这个速度被称为“新以太漂移”。

爱因斯坦在以太问题上也曾犹豫不定。1920年，他在题为《以太和相对性原理》的演讲中说：“根据广义相对论，空间没有以太是不可思议的。实在的，在这种（空虚的）空间中，不但光不能传播，而且量杆和时钟也不可能存在，因此也就没有物理意义上的空间—时间间隔。……因此，在这种意义上说，以太是存在的。”他甚至说到：“至于这种新以太在未来物理学的世界图像中注定要起的作用，我们现在还不清楚。”

现在，面对宇宙背景辐射等实验事实，许多著名的物理学家都认为应当恢复以太假设。柏格曼认为，在宇观尺度上，相对性原理被破坏了；宇宙背景辐射只在一个独一无二的参考系中各向同性，在这个意义上，那个参考系代表“静止”。韦斯科夫认为，无论如何，观察到的2.7K辐射决定了一个各向同性的绝对坐标系；迈克尔逊和莫雷的梦想变成了现实，即

找到了我们太阳系的绝对运动，不过不是相对于以太，而是相对于光子气。斯塔普认为，2.7K 背景辐射定义了一个优越的参考系，利用它可以决定事件发生的绝对顺序。协同学创始人哈肯也认为，狭义相对论否定了特殊参考系的存在，但是宇宙背景辐射却成了一个绝对的参考系。罗森甚至认为，宇宙学的最新发现要求回到绝对空间的观念。胡宁认为，在迈克尔逊实验的零结果和以太模型之间并不存在任何矛盾；在某种意义上，前述 400 公里 / 秒的速度可以看作是迈克尔逊所要测量的地球相对于以太运动的速度。他认为，宇宙背景辐射各向同性分布所决定的坐标系可以看作是真空的静止坐标系；相对性原理的适用范围应有一定的限度。

最后，我们看一看当代著名物理学家狄拉克对此作出的评论。早在 1970 年，狄拉克就指出：“以太观念并没有死掉，它不过是一个还未发现有什么用处的观念，只要基本问题仍未得到解决，必须记住这里还有一种可能性。”他在 1979 年美国普林斯顿纪念爱因斯坦诞生一百周年大会的报告中进一步说到：“可以说，宇宙背景辐射只对于一个观测者来说是对称的，这个优惠的观测者在某种绝对意义上是静止的，也许他就对于以太是静止的。这恰恰与爱因斯坦的观点相矛盾。……在某种意义上说，洛伦兹是正确的而爱因斯坦是错误的，因为爱因斯坦说过的一切，是当时的物理学不可能观测到绝对的零速度。……为什么迈克尔逊和莫雷得到零结果，为什么他们观测不到地球的绝对运动，唯一的解释是他们的技术不行。今天的技术比约一百年前能达到的水平要高明得多。用现代化的技术，绝对运动是存在的。”

二、关于光速不变原理

狭义相对论的第二个基本假设是光速不变原理，即假定在任何惯性参考系中，光在真空中的速度都等于常数 c 。这个原理是否已经为实验所证实呢？

要测量两个分离点 A 和 B 之间的单程光速，就必须确定从点 A 发射的光脉冲传播到点 B 所通过的距离和所需要的时间间隔。这个时间间隔的测量必须使用两个分别置于 A 处和 B 处的同步（校准）的时钟。异地时钟的同步（校准）实质上就是不同地点的同时性问题。我们可以在 t_A 时刻从点 A 发出一个信号，假设信号速度为 u ，到达点 B 时，B 处的时钟读数为 t_B ，如果 $t_B = t_A + AB / u$ ，可以认为两处的时钟已经校准。

这里出现了一个难题：为了测量单程速度，需要校准不同地点的时钟；而为了校准不同地点的时钟，又需要知道信号的单程速度。这就是异地时钟校准和单程速度测量之间的逻辑循环。在狭义相对论的体系中，这个逻辑循环不可避免。在这一点上，爱因斯坦本人早先也已承认，尽管他后来（1946 年）实际上否定了这个看法。

爱因斯坦是如何解决这个问题的呢？他在 1905 年创立狭义相对论的论文《论动体的电动力学》中说：“要是没有进一步的规定，就不可能把 A 处的事件同 B 处的事件在时间上进行比较。……只有当我们通过定义，把光从 A 到 B 所需要的‘时间’规定为等于它从 B 到 A 所需要的‘时间’，我们才能够定义 A 和 B 的‘公共时间’。设在‘A 时间’ t_A 从 A 发出一道

光线射向 B，它在‘B 时间’ t_B 又从 B 被反射向 A，而在‘A 时间’ t_A 回到 A 处。如果 $t_B - t_A = t_A - t_B$ ，那末这两只钟按照定义是同步的。”这就是说，爱因斯坦是通过约定光速与方向无关，即单程光速不变来定义不同地点的同时性，来校准异地的时钟。

由此可见，“单程光速不变”完全是一种逻辑约定，或者按照爱因斯坦的说法，它“仅是为了得出同时性定义，我按照我自己的自由意志所能作出的一种规定。”除非发现并利用超光速信号（超光速信号的存在是违背狭义相对论的），仅用电磁学方法是无法测量单程光速的。因此，也不可能检验爱因斯坦的（单程）光速不变原理。

要注意的是，测量从点 O 发出的通过一段回路距离再回到 O 点的回路平均光速，是不难通过测量距离和只用一个置于 O 点处的时钟测量时间来完成的。这里不涉及异地时钟校准和不同地点同时性的问题。事实上，关于光速不变原理的检验实验的分析表明，各种实验都只证明了回路平均光速不变，并没有证明单程光速的不变性。因此，通常所谓的“光速不变原理已经为实验所证实”的说法是不确切的。

1963 年，爱德华从回路平均光速不变这一假定出发，舍弃光速不变原理，导出了各向异性空间中各个惯性系之间的普遍的时空坐标变换式（称之为广义的洛伦兹变换）。当应用于可观察效应时，这些新变换给出了与狭义相对论完全相同的结果。

三、关于光速的极限性

狭义相对论的一个重要推论，是认为真空中的光速 c 是物体运动的极限速度。根据相对论速度相加公式和动力学公式可以得出不可能使物体运动速度超过光速的结论。但是，更主要是因果律的要求，使狭义相对论作出了光速极限性的论断。因为如果允许超光速信号存在，类空分离事件之间可以建立因果联系，按照狭义相对论，在某些惯性参考系看来，就会出现结果发生在原因之前的情况。

将爱因斯坦的物理实在观与光速极限性结合起来，可以得出爱因斯坦可分隔性原理或定域性原理，它可以表述为：不存在瞬时超距作用；若没有以不大于光速的速度传递的物理信号建立联系，空间中分离的客体的实在状态是彼此独立的。

与狭义相对论的论断相反，自 70 年代以来，现代物理学的实验进展有种种迹象表明，超光速运动和超光速作用很可能是存在的。

首先，射电天文学发现，半径大于一光年的河外射电源（包括类星体和射电星系）如 3C273 等，能够在几个月之内发生整体的明亮变化。如果光速是不可超越的，河外射电源发生这种亮度变化所需要的时间就要在一年以上。十分迅速的整体亮度变化意味着射电源上存在着超光速的相互作用。

另外，克莱和克劳奇观测研究了广延大气簇射现象（1974 年），他们在英国自然杂志上报道说，在通常的簇射粒子（它们的速度接近光速）到达地面之前，实验装置已经记录到非随机信号。他们认为，这很可能是超光速粒子引起的。

当然，对于上述两种实验观测现象的解释也许不是唯一的，要断定超

光速作用存在于上述现象中，还必须做进一步的更为详细可靠和结论明确的实验。

关于超光速运动和超光速作用，特别值得提到近十多年来量子力学的基础研究中关于贝尔不等式的实验检验。

我们知道，对于量子力学，爱因斯坦和玻尔持完全不同的见解，他们为此进行了长期的争论。爱因斯坦并不否定量子力学在物理学中取得的重大进步，但是他认为，量子力学只是关于单个体系的实在状态的不完备的描述；之所以必须根据几率来解释粒子的运动，仅仅是因为某些决定运动的参数尚未找到；如果知道了这些假想的“隐参数”的数值，就能够定义和完全确定粒子的运动轨道。

为了论证量子力学的不完备性，早在 1935 年，爱因斯坦和波多尔斯基、罗森一起提出了一个假想实验（通称为 EPR 理想实验或 EPR 论证）。他们考虑两个自旋为 $\pm 1/2$ 的粒子 A 和 B 组成的总自旋为零的体系。设在 t_0 之前的一段时间内两个粒子之间存在相互作用，然后用不影响每个粒子自旋的方法使其分开，当 $t > t_0$ ，二者在空间上相距甚远，不再有相互作用。按照爱因斯坦可分隔性原理，在这种情况下，对粒子 A 的测量不应当立即对粒子 B 发生任何影响。但是，量子力学预言，只要测出 A 自旋的某一分量，就能立即得知 B 自旋的同一分量值。按照量子力学理论，微观客体在测量之前一般并不处于确定的本征态，测量操作得出粒子 A 自旋在某一方向上的分量，粒子 A 本身也就进入取该自旋分量值的本征态。可是，相距甚远的粒子 B，既不与粒子 A 也不与仪器有相互作用，怎么会使自己的自旋在同一方向上立即取相反的值呢？考虑到上面的叙述对任意方向的自旋测量都成立，即可以任意改变仪器测量的方位都得到上述结论，问题就变得更为严重。这意味着仪器测量 A 自旋的事件对粒子 B 产生了影响，并且这种影响是超光速瞬时传递的。这在爱因斯坦看来是不可接受的。

爱因斯坦认为，为了消除上述悖论，人们只能肯定下述两个论断中的一个：“要么量子力学不完备，要么就必须假设存在超距作用。”我们知道，爱因斯坦断然维护了定域性原理，否定了量子力学的完备性。

为了对 EPR 论证进行实验研究，玻姆在 50 年代首先把 EPR 理想实验变成测量质子自旋和测量光子偏振关联的方案。这类实验早先由吴健雄等人做过，结果与量子力学的预言相符。

1964 年，贝尔从定域隐参数理论出发，采用定域实在论的三个基本假设（见下述），证明了一个不等式：

$$|P(a, b) - P(a, c)| \leq 1 + P(b, c)$$

其中 $P(a, b)$ ， $P(a, c)$ 和 $P(b, c)$ 分别表示：（1）在 a 和 b 方向；（2）a 和 c 方向；（3）b 和 c 方向上分别测量粒子 A 和 B 的自旋投影的乘积 $A_a B_b$ ， $A_a B_c$ ， $A_b B_c$ 的平均值。这个关系式称为贝尔不等式。

以 θ 表示 a 方向和 b 方向之间的夹角（取小于 $\pi/2$ 的值），由于三维空间各向同性，记 $P(a, b) = P(\theta)$ ，可进一步求得 $|P(30^\circ)| \leq 2/3$ ，

$$|P(45^\circ)| \leq 1/2,$$

$$|P(60^\circ)| \leq 1/3.$$

贝尔采用的定域实在论的三点基本假设是：第一，实在论，即认为所观察现象的规律性是由某种独立于观察者之外而存在的物理客体引起的；

第二，归纳推理法，即认为可以自由运用归纳推理法从一贯的观察中得出合理的结论；第三，爱因斯坦可分隔性原理或爱因斯坦定域性原理。

到 70 年代，经过维格纳等人的简化推导，特别是斯塔普和德·埃斯帕纳等人的工作，人们清楚地认识到，贝尔不等式的本质在于爱因斯坦定域性原理，而与是否具体引入隐参数无关。就是说，只要根据定域实在论的三个基本假设，引入量子力学的可观测量，就能导出贝尔不等式。

如果按照量子力学理论，则可以求得如下的等式，

$$[P(\dots)] = -\cos \dots$$

这就是说，定域实在论断言实验结果满足贝尔不等式，而量子力学则预言实验结果必将违背这个不等式。到 1982 年为止完成了十二个实验，除两个外，十个实验的结果都不落在满足贝尔不等式的广大区域，而偏偏落在量子力学预言的曲线上。目前，物理学家们已经相当普遍地把违背贝尔不等式作为一个实验事实接受下来。

因此，定域实在论看来是站不住脚的，在作为这个理论的三条基本假设中至少有一条是错误的。但是，正如苏汝铿在一篇文章中提到的，第一条涉及唯物论（？），第二条涉及方法论，第三条涉及相对论。究竟问题出在哪里呢？有人认为第一条不是不可置疑的，因为观察者和观测仪器也是物理客体，它与被观察的物理客体的不可分割性，对于“所观察现象的规律性”可以产生重大影响。因此他们认为，贝尔不等式的实验检验结果与爱因斯坦定域性原理不是不可能协调的。但是，比较这三条假设，特别是考虑到爱因斯坦的最初的论述，多数物理学家倾向于认为：贝尔不等式的实验检验，事实上就是对爱因斯坦定域性原理的检验，只能通过放弃这个原理来解释违背贝尔不等式的实验事实。

评论贝尔不等式的检验结果，物理学家们提出了许多全新的观点。玻姆认为，客观世界存在着一个新领域，在这个领域中，非定域联系是一种更基本的真实的联系。玻姆借助于全域相关或整体相关的量子势来解释这种非定域联系。他认为，当前物理学的发展正指示着这种新的本体或本质的存在。斯塔普认为，世界的空间上彼此分开的各个部分不是独立存在的，它们必定以某种超出我们所熟悉的关于因果联系只能传入前光锥的方式而相互联系，这是一种存在于单个事件之间的“超光速联系”。德·埃斯帕纳认为，贝尔不等式的实验检验表明爱因斯坦定域性原理的破坏，这就意味着在多个独立系统之间或单个延展系统之内存在着超光速（瞬时）的因果联系或影响。

为了避免与狭义相对论正面冲突，无论玻姆，斯塔普，还是德·埃斯帕纳等人，都希望保留信号有限速度传播的原理。为此，玻姆把信号定义为传递能被观察者感受到的宏观信息的通讯手段，斯塔普把信号定义为可控制的信息传递。他们认为，远距关联实验揭示的超光速联系或超光速影响并不能传递这样的信息，因而并不意味着超光速信号的存在。

我认为，无论如何，贝尔不等式实验检验所揭示的种种非定域相关性（“超光速的因果联系”），应当理解为是某一更深层次上超光速运动的物质所传递的一种超光速相互作用的结果。果真如此的话，这不是对相对论“光锥规范”的挑战吗？

四、关于时间的观念和同时性问题

众所周知，狭义相对论确立了时间和同时性的相对性概念。但是，宇宙背景辐射提供了一个优越的参考系，它可以用来确定时间的绝对次序。对此，哈肯指出：“在某种意义上讲，这个新的绝对空间导致了一个有趣的时间概念。……在狭义相对论中，作任意运动的不同观察者不可能找到一个共同的时间，而宇宙漂泊的观察者却经历着一个宇宙的或者说普适的时间。”

在美国，以怀特海为先驱的过程哲学学派有着广泛的影响。过程哲学学派认为，世界即过程，过程由事件构成，事件表现出有秩序的连续性。怀特海的世界模式仍然服从相对论的光锥要求，即形成有秩序的连续序列的只是类时分离事件而不包括类空分离事件。远距关联实验（即贝尔不等式的实验检验）揭示了类空分离事件存在着因果联系，因此，它们也应当具有绝对的（与参考系无关的）先后次序。从这种实验事实出发，近年来斯塔普进一步修正和发展了怀特海的世界模式，他认为：相对论并没有从本体论上对客观存在的时间次序加以阐明；存在应当是本原的，时空是派生的，存在在逻辑上先于时空；每个事件在基本的生成过程中都有绝对的先后顺序；类空事件也是如此。这样，宇宙中所有事件的集合构成有秩序的序列，过程哲学的思想得到了真正的满足。

许仲平从四维对称标架中钟系的校准过程分析时间，指出相对论时间并不是唯一可能的，他提出了一种具有普适时间（ $t = t$ ）的理论。

绝对有序的概念和普适时间的概念都包含同时的绝对性论断，这与狭义相对论的同时的相对性是完全矛盾的。

最后可以提到，在时间观念上，作为现代物理学的两个支柱的相对论和量子理论一直存在着抵触。量子力学在绝对意义上使用时间的概念，同时性也具有绝对的意义，而相对论认为这是不容许的。正如狄拉克所说：“这里我们就碰到了巨大困难的开头。……这个抵触是最近四十年来物理学的主要问题。可以说，物理学家们的主要努力全是围绕着要协调相对论和量子力学这一问题而转的。对于这一课题已经做了大量工作，但还看不到解决的办法。”现在，远距关联实验的结果也许为我们解决这个问题提供了一点依据和线索。

五、标准时空论的基本假设和主要观点

前面我们回顾了狭义相对论遇到的主要疑难。现在的问题是，在上述现代物理学的最新实验事实和理论思维成果之中，我们应当选取哪些事实作为探索新时空理论的逻辑起点呢？作者认为，下面两个基本假设可以作为这种探索的起点。

第一个假设：标准惯性系原理

存在一个空间显示各向同性的特殊的惯性参考系，即标准惯性系（或称以太参考系）；物体由于相对以太参考系运动而在运动方向上产生的长度收缩是一种动力学效应，具有绝对的意义。对标准惯性系作匀速直线运动的参考系也是惯性参考系。

第二个假设：回路平均光速不变原理

在任何惯性参考系中，沿真空中任一闭合路径传播的光信号的回路平

均光速都等于常数 c ，与光源的运动和空间的方位无关。

这里的第一个假设也可以称为以太参考系假设，显然，它与狭义相对论的第一个假设狭义相对性原理是完全对立的。但是，既然承认存在新以太，并且它构成一个特殊的参考系，那末长度收缩等效应当然是运动物体与以太相互作用的结果，是一种动力学效应。因此，以太参考系假设的叙述自然成立。这里的第二个假设只包含了狭义相对论的第二个假设光速不变原理的内涵的一部分。如前所述，较之光速不变原理，它具有更为坚实的实验基础。不仅如此，按以太参考系的观点，回路光速不变是可以理解的，因为在一般惯性系看来，光速大小也许与方向有关，但是这种方向效应在往返回路中可以相互抵消而不会显示出来，平均光速仍为常数 c 。

除这两个基本假设之外，新时空理论如同狭义相对论一样必须满足以下三个要求：

1. 对于可以构成因果联系的两个事件，作为原因的事件必须发生在作为结果的事件之前。（因果律）

2. 空间和时间上的所有点都是完全等价的。（时空均匀性假设）

3. 新的时空变换关系在低速范围($v \ll c$)内必须还原为经典变换关系。（对应原理）

作者遵照爱因斯坦的方法论，按照逻辑简单性原则，从尽可能少的意义明确的基本假设出发，最大限度地运用数学工具和逻辑推理，把基本假设所包含的物理内容尽可能地挖掘出来，阐述清楚，最后将理论的结果与实验事实相对照。所有这些，就构成了一种时空理论，作者把它称为标准时空论。

作者从上面两个基本假设和三个要求出发，推出了一般惯性系 S 和标准惯性系 S_a 之间的时空坐标变换式即推广的伽利略变换

$$x = (x_a - vt_a),$$

$$y' = y_a, z' = z_a,$$

$$t = \gamma^{-1} t_a$$

式中， $\gamma = (1 - v^2/c^2)^{-1/2}$ ， v 表示 S 系相对 S_a 系的运动速度。显然，这里关于时间的变换式可以导出同时性的绝对性和时间的绝对有序，因而它允许超光速运动和超光速作用存在。从推广的伽利略变换出发，统一地处理了亚光速运动和超光速运动的运动学和动力学问题：求得了速度变换，长度收缩，时间延缓和事件之间的间隔等运动学公式，其结果表明，斐兹杰惹—洛伦兹长度收缩假说和拉摩—洛伦兹时间延缓假说，作为前述两个基本假设的逻辑推论的一部分，被包括在标准时空论之中；求得了运动粒子的质量，动力学方程和质能关系式（ $E = c^2 m$ 和 $E^2 = p^2 c^2 + m_0^2 c^4$ 仍然成立）等动力学公式。接着，作者建立了标准时空论的四维形式，其动力学方程满足方程的协变性要求。最后，按标准时空论观点对于验证狭义相对论的一些主要实验重新作了解释，迄今没有发现一个实验与标准时空论相抵触。新理论还提出了几类新的实验预言。

有关的论文已发表在《国防科技大学学报》1984年第1期，和《大自然探索》1985年第3,4期和1986年第1,2期上。在上述论文中，使用了惯性系原理、回路平均光速不变原理和绝对有序原理三个假设。但后来作者进一步证明了由这里的两个基本假设就可以建立标准时空论。

按标准时空论观点，严格地说来，狭义相对性原理并不成立，但物理学理论和定律应当满足推广的伽利略变换下的方程协变性要求。标准时空论认为，存在特殊的优越惯性参考系，这就是标准惯性系或称以太参考系；存在着绝对运动，这就是相对标准惯性系的运动；存在着作为标准惯性系的背景空间物质的新以太。运动物质（包括量度工具）相对标准惯性系运动所产生的长度收缩、时间延缓和质量增加，并不是表面的外部关系的产物（因而在标准时空论中不存在双生子佯谬），而是一种真实的变化，应当把它们归因于运动物质与新以太相互作用的结果。因为量度对象和量度工具都产生这种真实的变化，所以任一惯性参考系中关于运动物质的长度、时间和质量的量度结果既具有相对的性质，又具有绝对的性质。运动是相对性和绝对性的对立统一。

显而易见，标准时空论是一种严格的“新以太论”。按标准时空论观点，空间不空，除实物粒子之外，空间充满着连续的背景物质——新以太场。这种场物质自然不应当理解为是绝对静止的，恰恰相反，它是一种在非常小的尺度（如 10^{-34} 厘米的尺度，按著名科学家钱学森的意见可称之为“渺观”）上迅速脉动的场。我们也可以称它为渺观场。无论从渺观或宇观来看，这种场都可能是不均匀的，但是，在一定的微观或宏观范围内，平均说来这种场可视为是均匀分布的。作者认为，标准时空论适用于空间新以太场（或渺观场）可视为均匀分布的区域。

如前所述，标准时空论以严密的逻辑体系统一地处理了亚光速运动和超光速运动的运动学和动力学问题，并不存在破坏因果律的困难。理论的推导得到，亚光速粒子和超光速物质之间存在着“光障”，即两类物质之间的转换需要无限大的能量，因而是不能直接相互转换的。这样，物质世界可分为亚光速世界和超光速世界。实物粒子及其组合而成的宏观物体构成了亚光速世界，光速是这类物质运动的极限速度。又是什么物质构成了超光速世界呢？作者认为，这就是新以太场，或称渺观场。不仅如此，我们由此可进一步得出这样的论断：亚光速粒子是由超光速物质组成的，或者概括地说，物质世界分为实物粒子和新以太场（渺观场），而实物粒子是新以太场（渺观场）的自组织。

因此，标准时空论也是一种超光速理论，是一种亚光速和超光速的统一理论，它引导我们进入渺观场论的研究。

作者提出的标准时空论是对爱因斯坦狭义相对论的一种修正。然而，作者的工作一直受到爱因斯坦追求真理的精神的支持和鼓舞。他说过：“对真理的追求要比对真理的占有更为可贵。”我们应当学习他勇于批判，大胆探索的精神，把他所开拓的现代物理学的研究不断向前推进。

（谭暑生）

行到水穷处，坐看云起时

——量子理论的根本症结何在？

一、粒子物理主要理论概况

量子论是本世纪物理学中与相对论并列的两个最伟大革命之一。

1900年，普朗克提出了量子假设 $E=h\nu$ ；1905年，爱因斯坦将其应用于光电效应而直接揭示了光的粒子性，即光子；1913年，波尔描述了行星式的原子结构；1923年，德布罗意根据光和粒子的类似性，大胆假设粒子也有波动性， $\lambda = h/p$ ，以后被实验所证实。然后，经海森堡、薛定谔、狄拉克等一代人的努力，建立起了量子力学，并发展出量子场论。迄今重正化的量子电动力学仍然是最完美的量子场论，被认为完全适用于纯电磁现象，虽然 μ 子-电子质量差等还无法解释。但随着研究领域的深化，从原子到原子核，到“基本”粒子及其内部结构以及宇宙论；从电磁相互作用到强、弱相互作用等，目前的量子理论就远不能令人满意了。

在粒子物理理论中，每二三年就出现一个新的巨大的浪潮。每个浪潮又产生几十甚至上百种派生的模型、理论。这些形形色色、气象万千且有时是互相矛盾的潮流，就汇成了粒子物理中一种空前困难的洋洋大观的场面。我们粗略地把它分为互相密切联系的四个方面。

1. 场论方面

1954年，Gell-Mann等提出了色散关系，它以因果性为基础，研究了散射振幅的解析性和积分关系等。1959年发展出Mandelstam的“双重色散表象”。同年开始提出Regge理论，Regge研究了在复平面上散射振幅解析延拓的性质。在复角动量平面内每条Regge轨迹联系于一组粒子及共振态。1968年总结为集大成的Venegiano模型，它统一描述了解析性、交叉对称性和双关性等。此外，有人研究了公理化场论、束缚态场论及Bethe-Salpeter方程等。同时，守恒和部分守恒流，流代数，手征对称性等也被广泛探讨过。

1952年起，以德布罗意、玻姆为首的物理学家主要基于对理论本身的不满意，对波动力学的因果描述作了努力，提出了非浅性波动力学和隐参量理论。这一具有根本性质的讨论不断引起人们的广泛兴趣。从1953年直到1966年，海森堡出于统一描述所有物质的愿望，大力发展了企图包罗万象的非浅性旋量统一方程。又因为目前的理论多数基于定域性（即总模型的粒子结构），因此理论上还作过非局域场论，量子化时空和非阿不连续几何的探讨。1966年汤川等还发展为基本领域理论。

特别重正化群及其方程的研究，不仅应用于场论以及多重产生等粒子领域，而且被成功地推广应用于相变理论之中。

2. 粒子结构方面

随着粒子的不断增多，物理学家也不断提出了粒子的多种复合模型。

1943年，德布罗意提出熔合模型，认为光子由中微子对组成。1949年产生了费米—杨振宁(FY)模型，假定 π 介子是基元核子-反核子的复合体。发现奇异粒子后，推广FY模型出现了不同方案：以K介子为奇异粒子基元的Goldhaber模型；以 Λ 超子为基元的坂田模型。1960年，Frisch以 Λ 与K为基元的模型特别对称。对轻子、重子考虑基辅对称性，又发展出名古屋模型和中微子统一模型。数学上展开了对 $U(3)$ 、 $SU(3)$ 的一系列研究。1962年，Gell-Mann, Ne'eman提出八重态模型。1964年Gell-Mann等进一步发展为统一的夸克模型。这是结构模型的一座里程碑。它提出了下一层次的新粒子，取得了重大的成绩。结合汤川理论，夸克间相互作用必须存在胶子(gluon)。1969年，基于粒子碰撞时其中有点状结构的实验，Feynman提出部分子(parton)模型。以后和夸克结合导致了多种夸克-部分子模型。目前公认的标准夸克是分数电荷和渐近自由的；为了克服统计性等困难，必须引入色；具有红外奴役才能解释迄今没有发现夸克的实验事实。由于存在夸克—轻子对称性，以及夸克数也在不断增加，70年代开始，国内外又有人提出了多种亚夸克模型。如Pati-Salam的前子(preon)模型，宫学惠—焦善庆的亚夸克模型，Harari的rishon模型等。甚至还有亚夸克组成的前—前子模型。

但由于夸克一直未被发现，因此国际上始终有些人并不赞成夸克模型。此外，与夸克观点相反，Chew等发展了认为“基本”粒子完全民主平等，彼此互相组成而没有下一层次的靴带(boot-strap)模型。并且看来矛盾的夸克与靴带之间又存在有趣的二重性。

3. 半唯象理论

为了解释夸克的成功而实验又没有发现它，人们提出了多种夸克禁闭理论。著名的半唯象模型之中就有弦和袋。1969年，Nambu及Nielsen等基于强子的双关共振模型的受激谱数学上表现得像弦，并且强子的谐振子模型及局域场论也给出双关弦，因此提出所有强子是基本实体：弦激发态的弦(string)模型。如果假定弦端点是夸克，则没有自由夸克。然而为克服鬼态，时空必须是10维甚至26维的。1974年，Chodos和莫大峻等提出限制强子在一个有限空间区域的MIT袋模型。1975年，Bardeen等利用 ϕ^4 场的孤子解得出一种新的SLAC袋模型。1977年，Friedberg和李政道推广了孤子理论，得到两种袋模型是这一理论的两种极限情况。

同时，在高能产生等过程中结合实验现象，还存在很多半唯象的模型与理论。如，1950年费米统计模型与1953年朗道流体力学模型，二者都基于热力学平衡体系。1958年，丹生以及Cocconi等结合热力学概念的火球(Fireball)模型，以后又发展出多火球模型。此外还有激发态模型等。1968年，杨振宁等密切联系于较早(1949年)的光学模型及1959年的Glauber模型，应用程函近似提出了碎裂模型，并发展为极限碎裂模型(HLF)，即相干液滴模型。1968年，Chiu和Finrelstein组合光学和Regge模型为混杂(hybrid)模型，从而统一描述Regge理论和MLF。其它还有边缘模型及多边缘(multiperipheral)模型，衍射模型，Nova模型，势模型，吸收模型，削裂(strip)模型和各种窄共振模型等等。人们还研究了各种标度理论及其破缺。

4. 规范理论和统一模型

1954年,杨振宁和Mills提出了SU(2)的YM规范场。1956年,内山系统讨论了规范场。以后规范理论被广泛地应用于很多方面。1974年,Wilson提出的格点规范理论最初是类比于固体理论,把时空作为不连续的格点,夸克处在格点上。它可以结合统计性,用蒙特卡洛模拟。这种新的处理方法引起了人们的广泛兴趣。基于色并类比于量子电动力学(QED),物理学家发展了强相互作用的理论——量子色动力学(QCD),并探讨了量子味动力学(QFD)。

1967年,Weinberg与Salam分别利用Higgs-Kibble力学自发破缺对称性,成功地提出了弱电相互作用统一的SU(2)×U(1)理论。1973年弱相互作用中性流和1983年W[±]和Z⁰介子的发现,使WS理论在科学上确立了地位。结合强相互作用的规范理论,1972年Bars-Halpern-Yoshimura提出了弱电强三种相互作用统一的理论,1974年Georgi和Glashow提出了简洁的SU(5)大统一理论等。此外,还有引力强相互作用统一的Salam等的SL(b,c)理论,1974年,我们也提出过四种相互作用统一的GL(b,c)理论的初步方案。这可能是目前形式的四种相互作用统一的最小规范群。1977年,Terazawa结合轻子-夸克内部对称性的SU(16N)或SU(b+n)群和时空对称性的SL(2,c)群,也得到统一规范对称性的GL(32N,c)或GL(12+2n,c)群。1971年开始研究的超对称性理论基于费米子和玻色子的对称性,近几年正在日益受到大家的重视。

其实,若干理论都是上述四方面的某种结合。如,最近引起极大兴趣的超弦理论就是超对称性、多维时空理论和弦模型的结合。

从这些简单且不完全的概述可以看出,目前粒子理论五花八门,千奇百怪。对于许多实验事实,特别在高能方面,仍然没有统一地解释。

这是目前粒子物理理论的主流派。另一些人,包括若干大科学家,如爱因斯坦、海森堡、德布罗意、狄拉克、汤川、玻姆等却认为在物理学的基本概念上,“必须进行某种巨大的变革”(狄拉克)!远距离相关实验违反贝尔不等式,证明了非定域性。这已经揭示了物理学中的某些基本概念必须修改了。

R.M.Santilli认为狭义相对论和量子力学对强子结构,更一般对强相互作用可能不成立。他认为夸克模型仅是猜测,也许不适用;强相互作用时泡利不相容原理也不成立。并且发展了几种形式的超李代数,特别是容许李(Lie-admissible)代数。1982年,基于实验和理论等方面,笔者提出在高能时,玻色分布和费米分布可能将统一为一种新的统计性。由此高能对泡利不相容原理可能不成立。1984年,笔者又提出若干检验方案。1985年,H.Rinneberg等应用激光技术将原子中的电子激发到主量子数n=290的高能级,有效直径约为百分之一毫米,这已达到了宏观尺度。它的轨道和能量是低能“正常”原子的10万倍。高激发态处于轨道只能容纳两个态和n时可以有无穷多个电子的电离态之间。笔者认为n达到一定值时有可能容纳两个以上的电子,起码在短时间内。而这正好相应于高能。并且,Rinneberg等的实验已表明自旋效应能略去,这恰巧是我们预言的统计性统一和泡利不相容原理可能不成立的条件。同时,在星际空

间深处，探测到存在着 $n=390$ 的氢和 $n=732$ 的原子，后者的轨道和能量都是“正常”原子的 50 万倍。

物理学目前的发展阶段应该是处于稳步而缓慢的进展呢？还是已经到了大规模变革的前夜了？这一关键性的问题只有历史才能回答！但可以肯定的是，如果我们不能自由地、多方面地进行探讨，那么历史的发展必然将把我们远远地抛在后面。

而且，既使我们相信“山雨欲来风满楼”，一场暴风雨已经正在来临。但理论的根本症结何在？突破点和发展方向在哪里？也仍然是一个必须认真探索的困难问题。

二、目前形式的波动性是永远成立的吗？

1976 年，笔者对整个量子理论的历史、基础和逻辑结构作了认真分析后，认为量子力学、量子场论完全基于物质结构的原子组成层级上的主要特征——波粒二象性。虽然这一特征是优美的、对称的，但当对物质结构的认识深入到“基本”粒子及其组成这一层级时，其所能解释的事实却是有限的。相反，粒子的可能产生、衰变、湮灭和相互作用等性质以及相关的理论都主要基于各种守恒定律和选择规则，决定于时空对称性和各种内部对称性。而这些对称性同二象性与波动性并无直接联系。

目前实验和理论是朝着下述方向发展的：高能，超微观（小空间、短时间）；与单个粒子的结构及其组成相关的强和超强相互作用；与其衰变和转化相关的弱和超弱相互作用等。经过长时间的反复思考和认真总结，并作了各种可能修正的尝试以后，我认为：在“基本”粒子的上述领域，即对单个粒子，极小时空范围，短程强弱相互作用，高能过程等，粒子目前形式的波动性是否仍然成立，并没有得到很好验证！问题的关键极可能在于：在上述情况或其某一部分中波动性已经无法显示，而需要修改，并以含义更广的其它形式或特性取而代之。在量子力学领域中，这些新特性应退化为通常的波动性和二象性。

众所周知，量子力学是以粒子的二象性为基础并类比波动光学而发展起来的，粒子的二象性则是从光的波粒二象性的类比和推广中得到的。量子场论也是从类比自由电磁场并将其量子化而实现的。这些类比导致量子理论的成功，也可能导致了它的局限性。狄拉克就明确指出过，量子理论是原子结构的理论。我想可以进一步更确切地说，它是电磁相互作用的微观粒子理论。目前的波动性也可能只是原子范围（较大时空）电磁相互作用时的特性；对于其它相互作用和领域，它仅是一种重要的启示而已。

已经知道，波动性概念本身只在空间尺度大于波长，时间尺度大于周期 T 的较大时空区域里才有意义，而且只有存在适当大小的衍射孔或散射中心的情况下才能显示出来。粒子波动性及其波长主要表现在衍射、散射实验中，大量粒子在晶体中衍射、散射后，分布在一定区域内，并遵从波动性的布拉格公式 $2d \sin \theta = k$ ，呈现有规律的统计性几率分布花样。一般此时强弱相互作用可以略去。微观物质的德布罗意波是统计性的几率波，它的特性要求波显示时必须有大数量粒子（或大量事件）。但波动性的直接验证并不多，主要更多地反映为导出的理论与实验符合。

少数粒子，小时空时的衍射、散射都不能显示波动性；例如单粒子衍

射在一段小时间内只像粒子，在劳厄图的一个局部小空间也只是一个个点。而且极少数粒子也无力显示几率波的波动性。爱因斯坦等人就认为量子力学只能描述许多个体系的系综，而不能描述单个体系。同时小孔远大于波长时，无法显示波动性；波长越小，越难显示（这也是几何光学成立的条件）。高能时波长很小（高能光子都主要显示粒子性），强、弱相互作用时作用力程极短（相当于 10^{-13} - 10^{-15} 厘米），相应衍射孔也必须很小，这样小的区域已经是粒子的大小，从而衍射、散射也就成了粒子间的碰撞。而碰撞时粒子是否仍呈现目前的波动性，还需要深入研究。况且目前很多事实与波动性导出的理论并不符合，特别上述情况的实验更是如此！

粒子的强弱短程相互作用恰巧都是在极短的时间和极小的空间内起作用。强相互作用时间特别短，弱相互作用空间特别小。而且短程相互作用及其饱和性也要求相互作用只能在一个有限的区域，涉及几个粒子。单个粒子也总是仅占据一个极小空间。同时，高能时的主要特征：转化，大多数必须有强弱相互作用；高能粒子衰变很快，也可能时间太短，未衍射时就衰变了，无法显示波动性。而且高能本身就相应于小时空。粒子的这四个方面常常是互相联系的。

粒子波动性的定量限制的数量级主要决定于 $\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{h}{p}$

$hc / \sqrt{E^2 - m_0^2 c^4}$ 。粒子静止时， $v = 0$ ， $\lambda \rightarrow \infty$ ，波动性无意义；静质量不为零的粒子 $v \rightarrow c$ 时， $m \rightarrow \infty$ ， $\lambda \rightarrow 0$ 也不行。因此，质量越大越要低速，只有一定范围内的粒子（如热电子）才易于显示波动性。光子在低能、低频、长波时主要显示波动性，而高能、高频、短波时（如光电效应，康普顿散射中）主要显示粒子性。对小空间区域，如 10^{-13} 厘米（相当于核子大小和强相互作用距离），波动性最显著的光子，频率也为 10^{23} 秒⁻¹，一般也是表现为粒子性，更何况其它粒子。目前基本粒子所探讨的时空区域越来越小，能量也越来越高，加之质量越来越大，从而对波动性进行重新审定，确定其适用范围，显然是理所当然且势在必行的。

在相对论领域，高速时波长特别小。设 $v = 10^{10}$ 厘米/秒，则对有最小静止质量的电子 ($m_e = 0.51 \text{ MeV}/c^2$)， $\lambda = h/mv < h/m_e v = 1.2 \times 10^{-10} \text{ cm}$ ，对核子则 $\lambda < 6.5 \times 10^{-14} \text{ cm}$ ，此时很难显示波动性。众所周知，相对论研究高速、宏观、动量较大的现象，而波动性只有在低速、微观、动量较小（如质量小，速度慢的热电子）时才易于显示。所以相对论领域与微观波动性在一定程度上是互相矛盾的。只有理论从波动力学（偏重于波动性）发展为抛弃了连续性的量子场论（主要揭示了场的粒子性）后，相对论和量子论才得以初步统一。而色散关系、Regge 理论等更基于相对论，大多数高能粒子也都是高速相对论性粒子。当然对超光速现象，波动性是否成立可能更有疑问了。

其实，物理事实和理论的发展似乎已经在无意识地突破和日益抛弃波动性、二象性。在公理化场论中，无论是 Epstein 表述的，或是 Araui - Haag 理论以及 Lehman - Symanzik - Zimmermann 场论等，都在一定程度上放弃波动性作为理论的基本原理。特别是 S 矩阵理论，色散关系及 Regge 理论中更只以实验上可观察的量为研究对象，以他们认为最明显的洛仑兹

协变性与因果性等为基础。新的原理并无波动性，也侧面说明其不可观察。德布罗意、玻姆理论企图确定轨道，也是在一定程度上否定波动性。而上面提到的大多数模型与理论都没有把波动性作为基本原理。虽然如此，但我们的头脑，我们的概念方法，特别是形式体系仍然完整地保留了它。尽管人们曾设想过多种修改量子理论的方法，但由于没有一个实验直接提出这个问题，加之波动性早期的辉煌成就，因此人们都忽略了这种可能性。

任何理论都有一定的适用范围。起码在受测不准关系限制的范围内($p \cdot x$; $E \cdot t$)，目前的量子理论不适用。一般波动理论在 $k \cdot x$, $v \cdot t$ 范围也是无能为力的。而且，一般说二象性也是波动—粒子对称，虽然这是优美的，但二者的性质不同，成立的条件也不同；两方面不会是完全平权的，在一定情况下总有一方面占优势，如光子在不同条件时主要显示波动性或粒子性。何况，在一定条件下对称也会被破缺，也要发展，也要转化为新的对称性。此外，粒子的复合模型及对称性都很难说成是波的结构性质，“基本”粒子也不称“基本”波。

因为测不准关系、无轨道等直接来源于二象性中的波动性，且是其必然的结果，因而试图对此作独立的因果描述，可能十分渺茫。笔者认为，不是粒子无轨道，不是测量永远受限制，而是基于波动性的量子力学及其发展出的理论对此无法描述。测不准关系正表明量子理论、粒子波动性的适用范围有一定局限性。当波动性不成立时（如在小时空中），轨道的存在并没有被绝对排除。

如果波动性被修改、发展为新的特性，则涉及哲学上有争论的很多东西，如测不准，无轨道，无速度，统计性等等和全部与波动性有关的概念、基础，即整个量子理论都要修改、发展。

“行到水穷处，坐看云起时”。我们认真探寻了困难的可能根源，认为抛弃目前的波动性可能是今后粒子物理发展的方向。但究竟如何，还有待实验的决定性判决。

（张一方）

大胆假设，小心求证

——数论中的猜想

一、猜想的来源

在科学研究中常常发生这样的情况，尽管人们还不知道某些问题的结论是否正确，但是却坚信这些“结论”应该成立。这就是人们常说的“猜想”。人们在不断地解决旧的猜想和提出新的猜想的过程中丰富了自己的知识，促进了科学的发展。

既然不知道“结论”是否成立，向来尊重客观的科学工作者为什么要像预言家那样提出猜想呢？他们又是凭什么提出猜想的呢？

提出猜想的背景之一是一些特殊事物的考察。例如著名的素数定理是研究不超过 x 的素数的个数 $\pi(x)$ 的性质。1808 年勒让德 (Legendre, A. M.) 考察了 $\pi(x)$ 的数值：当 x 增加时， $\pi(x)$ 的数值也增加。当 x 很大时， $\pi(x)$ 数值的增加呈现出一定的规律性。勒让德研究这种规律性并指出：对于充分大的 x ， $\pi(x)$ 渐近地等于 $x / (\log x - 1.08366)$ (所谓渐近地等于是指：这两个数之商在 x 趋于无穷大时所得的极限值为 1)。高斯 (Gauss, C. F.) 考察了以 1000 个连续正整数为单位时在每一个单位中素数的个数。他在 1876 年提出以 $1/\log x$ 来表示 x 充分大时素数分布的平均密度 (即单位区间中素数所占的比例)，这两个猜想都可以归结为下式成立

$$\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{\pi(x)}{x / \log x} = 1$$

这就是著名的关于素数个数的猜想。这一猜想已于 1896 年被哈达玛 (Hadamard, J.) 和泊桑 (de la Vallée Poussin) 分别独立地证明。此后，关于素数个数的猜想被称为“素数定理”。

人们之所以相信猜想是正确的，往往是基于对大量的特殊情况的考察和研究。例如 1742 年 6 月 7 日哥德巴赫 (Chr. Gold - bach) 给欧拉 (Euler, L.) 的信中提出这样的猜想：每一个大于 6 的数一定是三个素数之和。欧拉在同年 6 月 30 日给哥德巴赫的复信中表示，尽管他还没有证明这一结论，但他相信这个猜想是正确的。欧拉还将它修改为：“任意一个大于 6 的偶数都可以表为两个素数之和。”这就是现代广为流传的哥德巴赫猜想。1770 年华林 (Waring, E.) 在叙述哥德巴赫猜想时增加了“每一个奇数或是素数或是三个素数之和。”1775 年欧拉证明了形状为 $4n+2$ 且不超过 110 的偶数一定可以表为两个素数之和。1855 年杰波夫 (Desboves, A.) 证实了从 4 到 1000 的每一个偶数至少可以用两种方式表示为两个素数之和或者表示为某个素数的两倍 (在杰波夫的论证中将 1 也称为素数)。1894 年康托 (Cantor, G.) 对于小于 1000 的正整数证实了哥德巴赫猜想。1896 年奥伯利 (Aubry, V.) 证实了在 1002 到 2000 的整数之间，哥德巴赫猜想成立。同年，荷斯纳 (Haussner, R.) 证明哥德巴赫猜想一直到一万都是成立的。1905 年玛利特 (Maillet, E.) 证明了在不超过 9×10^6 的正整数中至多除去 14 个数，哥德巴赫猜想都成立。由此可见，人们总是先对某

一命题的特殊情况进行研究，并由此得到“命题是正确的”这样一个信念。只有产生了这种信念，人们才把这个命题称为“猜想”。

对于一些具有较高理论价值的猜想的研究，人们常常能够导出许多性质。倘若导出的性质不合理，则猜想就是错误的；倘若导出的性质是合理的，在客观上就增强了人们证明猜想正确性的信心。黎曼 (Riemann,

B.) 猜想就是一个范例。我们考察当 s 是复数时级数 $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^s}$ 的收敛情况。当 s

的实部 $\text{Re } s > 1$ 时，这个级数是收敛的，其和记为 $\zeta(s)$ 。用复变函数论的方法我们可以将 $\zeta(s)$ 延拓为全平面除去 $s=1$ 外处处解析的函数。这个函数称为黎曼 ζ 函数，仍记为 $\zeta(s)$ 。但是从解析延拓理论并没有得到

$\zeta(s)$ 在 $\text{Re } s < 1$ 时的具体表达式。这为黎曼 ζ 函数的研究造成了很大的困难。在数论的研究中，黎曼 ζ 函数的零点 (即使得 $\zeta(s) = 0$ 的那些 s) 在复平面上的分布情况有着广泛而重要的应用。1859 年黎曼提出关于黎曼

ζ 函数的六个重要猜想之一为：除去一些人们熟知的平凡的零点外， $\zeta(s)$ 的零点都满足 $\text{Re } s = 1/2$ 。由于其余五个猜想都已陆续被证实，人们就将这一个猜想称为黎曼猜想。一百多年来，人们在黎曼猜想成立的前提下导出了一系列结论，而那些结论又是合理的。例如在“相继素数差”问题中杰

波夫曾经猜测在 n^2 与 $(n+1)^2$ 之间一定有素数。希思—布朗 (D. R. Heath-Brown) 和因凡涅斯 (Iwaniec, H.) 在 1979 年得到：当 x 是充分大的数时， x 与 $x+x$ 之间一定有素数，而 $\theta > 0.55$ 。1984 年笔者和姚琦得到

$\theta > 6/11$ 。应用黎曼猜想可以得到在 x 与 $x + \sqrt{x} \cdot \log^2 x$ 之间一定有素数。与上述猜测和近期进展相比较，用黎曼猜想所得到的结果看来是合理的。

猜想产生的背景之二是对于一些重要性质或猜想之间关系的研究。著名的孪生素数猜想是指存在无穷多个素数 p 使得 $p+2$ 也是素数。1973 年海斯雷 (Hensley) 和理查德 (Richards) 证明了下列结果：如果不等式

$$\zeta(x+y) \leq \zeta(x) + \zeta(y) \quad (1)$$

成立，则孪生素数猜想不成立。由于许多数学工作者都认为孪生素数猜想是正确的，因而人们猜测：(1) 式是不成立的。这就形成了一个新的猜想。

人们在研究猜想的过程中不断地丰富了自己的知识。同时，随着知识的不断积累，有一些从表面看起来似乎和猜想关系不大的结果却会对猜想的解决起推动作用。例如哥德巴赫关于奇数的猜想：每一个大于或等于 9 的奇数都可以表示为三个奇素数之和。1937 年爱斯脱尔曼 (Estermann, T.) 证明了每一个大的奇数都能表示成形如 $p_1 + p_2 + p_3 p_4$ 的和数，这里的 p_1, p_2, p_3, p_4 都是素数；以及每一个大的整数都是两个素数与一平方数的和。

爱斯脱尔曼的结果虽然已经很接近哥德巴赫关于充分大奇数的猜想，但用他的方法还是克服不了其中的主要困难。维诺格拉托夫 (Vinogradov, I. M.) 在早些时候所研究的关于素变数三角和估计式的成果正好克服了这个困难。于是，在同年维诺格拉托夫就证明了关于充分大素数的哥德巴赫猜想，也就是著名的“三素数定理”。1984 年，单叶函数论中的比伯巴赫 (Bieberbach L.) 猜想出人意料地被德布朗吉斯 (Louis de Branges) 解决了。虽然这个猜想的证明思路在本世纪二十年代已经形

成，但它的最后解决是依靠德布朗吉斯发现的一个不等式。

二、猜想的发展

人们毕竟不能用对于特殊情况的考察来代替对于一般情况的研究。所以，从考察特殊情况出发而提出的猜想未必是正确的。例如：当 n 表示正整数时，我们将形为 $2^{2^n} + 1$ 的数称为费尔马 (Fermat) 数，并把它记为 F_n 。容易看出 $F_1=5$, $F_2=17$, $F_3=257$, 以及 $F_4=65537$ 都是素数。1640 年 8 月，费尔马在给弗兰涅克尔 (Frenicle de Bessy) 的信中提出，他相信一切 F_n 都是素数。1659 年 8 月他在给卡尔卡维 (Carcavi) 的信中进一步指出：可以用“递降法”来证明这一猜想。著名数学家梅森尼 (Mersenne, F. M.)、哥德巴赫等都曾表示过相信这个猜想是对的。但是，在 1732 年欧拉却发现 $F_5=2^{32}+1=641 \times 6700417$ 是一个合数。这一事实立即否定了费尔马关于费尔马数的猜想。不过，人们在否定了旧时的猜想后又提出了一个关于费尔马数的新猜想：是否存在无穷多个 n ，使得 F_n 都是素数；以及 $\{F_n\}$ 中是否存在无穷多个合数。这两个猜想至今尚未解决。

从上述例子可以看出猜想并非是一成不变的，随着研究工作的深入，人们会使猜想更加可信。这方面的另一个例子是关于完全数的猜想：如果一个正整数 n 的所有真除数（即能够整除 n 又不等于 n 的正整数）的和等于 n ，则 n 称为完全数。例如 $6=1+2+3$ ，而 $1, 2, 3$ 是 6 的仅有的三个真除数，可见 6 是第一个完全数。究竟有多少个完全数以及完全数有什么性质呢？大约在公元 100 年尼科马修斯 (Nicomachus) 得到前四个完全数： $6, 28, 496$ 和 8128 。这四个数分别在 $1, 10, 100, 1000$ 和 10000 所形成的四个间隔之中。欧几里得早就证明了当 $p=1+2+2^2+\dots+2^{n-1}$ 是一个素数时， $2^n p$ 是一个完全数。而尼科马修斯得到的四个完全数恰巧是这个数在 $n=1, 2, 3$ 及 4 的情形。于是，他断言：(一)完全数的末位数是 6 与 8 交替地出现，(二)可以用欧几里得的方法得到一切完全数。以下简称这两个断言为完全数猜想(一)和(二)。在公元 283 年至 330 年雅勃利修斯 (Iamblichus) 不但重复了上述猜想，而且进一步猜测在每两个 10 的相继幂次数所形成的区间（即 10^n 与 10^{n+1} 之间）中有而且仅有一个完全数（以下我们将这个猜想称为完全数猜想(三)）。后来，很多数学家重复过上述断言，有人甚至还由此导出一些错误的结论。直到 1536 年雷杰乌斯 (Regius H.) 给出了第五个完全数 33550336 ，立即推翻了完全数猜想(三)。1588 年加太地 (Cataldi) 给出第六个完全数 8589869056 ，由此可见完全数猜想(一)也是错误的，1644 年梅森尼研究了形如 $(2^n - 1)$ 的数，由欧几里得的方法知道如果 $2^n - 1$ 是素数， $2^n - 1(2^n - 1)$ 就是完全数。人们称形如 $2^n - 1$ 的素数为梅森尼数。这样一来，我们已经把完全数和梅森尼数联系起来。1849 年欧拉证明了每一个偶完全数都是形如 $2^{n-1}(2^n - 1)$ 的数，其中 $2^n - 1$ 是素数。这实际上证明了偶完全数一定可以用欧几里得方法得到。此后，关于完全数的猜想就改为：存在奇完全数；存在无穷多个梅森尼数，即存在无穷多个完全数。于是，人们的注意力也就转向寻找更多的梅森尼数以及研究奇完全数的其他性质。

有些猜想被人们所证实以后，又会诱导出一些更为深刻的猜想。前节

中所提到的素数定理被哈达玛和泊桑证实以后，人们进一步讨论以下问题：既然高斯曾经提出当 x 充分大时，可以用 $1/\log x$ 表示素数在 x 附近的密度，那么在多长的区间中一定有素数存在呢？换句话说，如果素数分布是均匀的，当 x 充分大时，在和 $x+\log x$ 之间就应该有素数了。但是这个结论是不成立的。人们自然要问 x 和什么样的数之间一定有素数？在前节中我们曾介绍过关于相继素数差的杰波夫猜想以及应用黎曼猜想所得到的结果。1936 年克莱默 (Cramér, H.) 进一步提出猜想：当 x 充分大时，在 x 和 $x+c\log^2 x$ 之间一定有素数 (这里 c 是常数)。杰波夫猜想至今尚未证实，克莱默的猜想当然尚未得证。

三、研究猜想的作用

尽管猜想不一定正确，但是，人们还是不断地提出各种猜想和解决猜想。无论是证实或否定一个猜想，都会使我们加深对有关问题的认识，并且还会由此而导出一些有用的方法和工具。

1642 年费尔马曾提出一个著名的猜想：当 $n > 3$ 时，不定方程 $x^n+y^n=z^n$ 不存在异于零的整数解。当 $n=3$ 时，欧拉及高斯都给出了证明。1825 年狄利克雷 (Dirichlet, G. L.) 证明了 $n=5$ 时猜想为真。但是，他的证明是不完备的，后来由勒让德 (Legendre, J. L.) 修正。在 1832 年狄利克雷证实了 $n=14$ 的情形。1839 年拉梅 (Lamé, G.) 证实了 $n=7$ 的情形。费尔马猜想的研究进程是缓慢的。直至 1847 年，库末尔 (Kummer, E.) 在给柳维尔 (Liouville, J.) 的一封信中提出了“理想数”的概念，他试图在比整数更广泛的一类“数” (即理想数) 中找出不定方程 $x^n+y^n=z^n$ 的解，然后再考察这些解中是否有整数。此后，不仅促进了对于费尔马猜想的研究，而且库末尔的方法奠定了现代代数数论的基础。虽然费尔马猜想尚未解决，但是人们认为库末尔的方法的深远影响已超过了费尔马猜想本身的意义。

人们在研究猜想的过程中所产生的新的方法不仅在这个问题的研究中有重要意义，而且在其他问题的研究中有广泛的应用。维诺格拉托夫在证明三素数定理中所用到的三和方法在华林问题及素数分布的有关问题的研究中有重要应用。瑞尼 (Rényi) 在哥德巴赫猜想的研究中创造了“大筛法”，这在“等差级数中的素数分布”、“相继素数差的下限”等问题的研究中得到了很好的应用。正因为研究猜想的过程中产生的新的工具和方法所具有的价值往往超过猜想本身，因此，人们在科学研究中仍然不断地证实或否定猜想，同时又提出新的猜想，在研究猜想的过程中促进了科学的发展。

在数论领域中，众多的猜想历来吸引着各国最优秀的数学家，许多人作出过杰出的贡献。然而，我们应该看到，数学家在得到崇高荣誉的同时，也付出了辛勤的劳动，一些猜想的解决，甚至是微小的进展，都是科学家们艰苦劳动的结晶。因而，我们不能盲目地“追求”猜想的解决，而应该踏实地打好坚实的数学基础，在自己所从事的工作中为祖国的四化事业作出贡献。

(楼世拓)

几何代数协奏曲

——用代数方法解几何问题

“几何代数化”这个迷人的课题，多少年来吸引着许多数学家对它作了深入的研究，也取得了一系列辉煌的成就。然而，从现代数学角度来看，它仍然是一个有价值而又不易解决的课题，并构成了基础科学前沿研究中的一个疑难。

我国古代很早就产生了几何代数化方法，它是解析几何的先驱。到了笛卡尔创立解析几何，古代中国的几何代数化真正达到了“化”的地步，但这是立足于初等数学的基础上来谈几何代数化的。数学发展到今天，怎样在现代数学的基础上进一步使几何代数化？不少数学工作者有着这种设想，可面临着一系列巨大的困难，需要十分具体的方法和措施。

首先，必须明确什么叫“几何代数化”。

数学上所谓的“几何代数化”，指的是用代数的方法去解决几何的问题。人们往往有一个错觉，以为几何代数化是化几何为代数。这两个貌似相同的提法，实际上具有极大的差异。化几何为代数或化代数为几何，就目前人们所研究的几何学或代数学，都是远远办不到的；并且实际上这样做也没有多大的科学意义。而用代数的方法来解决几何的问题，则意义极大。

对于什么是几何，人们的看法随着历史和科学的发展而不断地发展和变化。过去，人们比较普遍地认为几何是一种关于实在物理空间形式（点、线、面、体是其基础）的学问。后来，这种观念产生了很大的变化，也就是说，较早的是只在欧几里得几何范围所反映的程度上研究物质世界的空间形式和关系，后来发展到现实世界的只是同空间形式和关系相似的其他形式和关系也成了几何的对象。比如，克莱因提出的厄兰根纲领就认为：几何学是对在给定的对称群下的不变量的研究。而黎曼则把他的非欧几何建立在微分计算的基础上，来代替克莱因所提倡采用的那种群论。而最近，国外又有不少人对什么是几何又进行了讨论，其中有一个很重要的新见解是：认为几何学是数学中形象思维占统治地位的那部分，而代数学则是系统思维占统治地位的那部分。所谓代数方法，是随着代数概念及其内容的不断丰富和变化而一起变化和发展的。自从公元9世纪穆罕默德阿里·花刺子模提出解一次及二次方程的一般性法则、16世纪韦达建立符号代数学之后，代数被看成是关于字母计算、关于由字母构成的公式的变换以及关于代数方程等的科学。后来，由于18世纪末19世纪初人们把代数方程的解法问题作为中心问题，并进行了深入探讨，在19世纪中叶，代数已被看成是代数方程理论了。而到了本世纪初，代数又被人们看作是以研究各种代数系统为目的，即所谓的公理化的代数或抽象化的代数。考察代数发展的历史，可以看出，代数方法，就是字母计算的方法贯穿在全部的数学中。一是“字母”，二是“法则”。字母可代表数，也可以代表任何其它对象；运算法则或规律有满足有理数规律的，也有满足不同于有理数的运算规律的；有数的运算法则，也有像向量、张量、矩阵等其他运算法则；还有与代数方程解法问题有关的代数工具，如行列式与矩阵的理论、不变量的理

论等。也就是说，一个是用字母表示的各种形式的量，一个是作用于字母的运算所满足的规律，正是这二者，赋予代数方法以十分健全的活动能力。例如，使用字母及字母的表示式按照确定的法则进行变换，可以求解许多具体问题；仅仅依靠作用于字母的那些运算法则，就可进行代数定理的证明。近世代数还能不把自己局限在研究数的运算的性质上，而进一步地去研究更具一般性的元素上运算的性质。可见，代数方法在处理量、量的关系上确实具有它独特的优越性。

在理解“什么是几何”和“什么是代数方法”的同时，我们可以明显地看到用代数方法解决几何问题的好处：当人们用代数式来表达几何特征，用代数式间的代数关系来表达几何关系时，空间形式的研究就可以归结为比较成熟也容易驾取得多的数量关系的研究，这就给几何学的研究带来了许多方便。那么，能不能把几何都代数化呢？探讨这个问题，并非简单地回答“能”或“不能”。这里有两类问题需要研究：1. 几何代数化究竟能达到什么程度，如何把几何代数化提到更高的水平？2. 都用代数的方法去研究几何问题，数学上有没有这种必要？对于这两类问题的深入研究，也是对这一课题进行研究的科学意义所在。

对于上述第一类问题，我们提出以下几点浅见：

(1) 在一定的意义下，几何代数化的程度取决于代数新概念、新思想和新方法的出现。

总结出代数运算、代数系统的一般概念，这是近世代数的重要成果。近世代数从运算的一般概念出发，即给出元素的某个系统 s ，并给出一个规则，对于 s 中取一定顺序的 m 个元素 a_1, a_2, \dots, a_m ，在 s 中确定唯一的一个元素 a ，这时，就说在 s 中给出了一个 m 元运算，并说元素 a 是施行这个运算于元素 a_1, a_2, \dots, a_m 上的结果。定义了一个或者若干个运算的元素的集合，叫做一个代数系统。现代著名数学家 R·柯朗指出，关于集的运算的研究形成了“集合代数”，它和数的代数在形式上有许多相似之处，同时也有所不同。代数方法能用于研究像集这样的非数值对象，这个事实说明了现代数学的概念具有很大的普遍性。近些年来，已清楚地显示了集合代数能用以阐明像测度论、概率论这样的许多数学分支；它也有助于系统地把数学概念归结到它们的逻辑基础上。由于一般集合论的发展使得被代数所研究的元素的系统得到扩展，并且也导出代数运算概念本身的推广，这就大大地提高了几何代数化的水平，其典型的例子就是拓扑学。按照本世纪的理解，拓扑学分为点集拓扑和组合拓扑。就拿组合拓扑来说，在这里，几何图形可以被看作是由一些基本构件所组成，然后采用代数方法去组合这些构件，并研究图形在微分同胚变换下的不变性质。组合方法对于近代拓扑学的价值是巨大的，这个方法开辟了应用代数方法来解决拓扑问题的途径。几何代数化的这种水平对现代数学发展起着不小的影响作用。在近世代数中，群、环、域是很重要的基本概念，群论以及环、域的理论是近世代数很重要的三种代数系统。就拿群论来说，它的产生使得几何代数化的水平得到了惊人的提高。英国数学家 Newman 提到，Nielsen 在研究曲面的自映射的不动点时，运用了曲面的基本群，并认为基本群与其它同伦群的运用将促使不动点理论得到实质性的发展。在群论主要是作为变换群的理论而发展的时期内，著名数学家菲利克斯·克莱因就提出，无限的变换群，即具有无限多个元素的群，可以用来对几何进行分类，每种

几何都可由变换群来刻画，每种几何都可以看作在这个变换群下的不变量来研究。比如，在著名的厄兰根纲领中，克莱因提出：“作为几何的推广，就这样提出下列一般性问题：给了一个流形和这个流形的一个变换群，以在这个变换群的变换之下其性质保持不变的观点研究这个流形的实体。……还可以这样来表达这个一般性问题：给了一个流形和这个流形的一个变换群，建立关于这个群的不变性理论。这便是一般性问题，即不仅囊括了通常的几何学，并且也囊括了我们必需——考虑的现代几何学方法，以及任意维流形的各种研究方式。”这种用新的代数方法来研究几何的观点，是几何代数化的一个转折，它为统一各种几何学提供了一个很好的方案。除了上面所提到的集合代数、群、环、域等新的代数概念、理论之外，还有同态理论、自由系统以及自由并理论、直并理论、根理论等等，它们都已在或将在几何代数化上作出贡献。

代数上新概念、新思想的出现往往伴随产生着新的方法，几何代数化的水平在很大程度上取决于新方法对几何学的渗透。例如，在拓扑学中，拓扑空间的连续性与连通性，可以通过引进如贝蒂数、欧拉特征数等一些数或同调群、同伦群等代数系统来表达，而对这些数和代数系统则可以用代数方法进行分析，分析的结果可以了解到拓扑空间几何性质，代数拓扑学正是沿着几何代数化的这种思想方法而建立起来的。对于整个学科来讲，几何代数化可达到如此高的程度；而对学科中的某一具体问题来讲，几何代数化的水平也往往要由代数方法对几何领域渗透的程度来决定。比如，在数学史上，不动点理论的发展可以说有两个阶段：先研究了某一空间 x 的自映射 f 的全体不动点的指数和的问题，即代数个数的问题，属于不动点有无问题的范围；后来在有无问题的研究成果基础上，提出并研究了 f 的不动点的（几何）个数的问题。细心的读者马上就会发觉，这两个阶段正是人们处理各式各样数学方程的两个步骤。可见，代数方法的渗透既有具体技巧方面的，也有指导思想方面的。

(2) 不论几何被看成是在给定对称群下的不变量的研究，或看成是数学中形象思维占统治地位的那部分，还是看成建立在微分计算基础上的科学，人们用代数的方法去解决几何问题的主要杠杆有三；一是字母符号，二是运算法则，三是渗透于其中的思想方法。也就是说，若想把几何代数化，就应当衡量一下这些杠杆是否都适用，是否已完备，是否有必要再创立新字母符号、新符号系统、以及建立新的法则，或是要对代数方法本身加以改进，增添新杠杆，赋予新形式。其实，人们已经都在有意或无意地进行着这些方面的工作。比如，创立新的符号和建立新的法则，已为许多进行第一流数学研究的数学家所重视。现代法国著名数学家让·迪多内说：“常常是由于缺乏能够说清楚真正实质的符号，数学的某个领域就得不到发展。典型的例子就是代数学：为了写出一般的代数方程式 $a_0x^n+a_1x^{n-1}+\dots+a_n=0$ ，从丢番图到维耶特和莱布尼茨用了整整三个世纪；……为了使无穷小的计算获得一个确定的形式，用了整整一百年。……好的符号往往伴随着易于使用它们的算法。”我们不难发觉，为了推动数学发展，新符号及其算法比比皆是。自古至今，符号就有较先进与较不先进之分。在我们看来，有力地推动数学发展的先进符号，至少应同时具备这么三个特色：确定性——表达的意思很明确，尽量不要一个符号有多种含义；简单性——一般说来，形式愈简单愈好；系统性——便于构成科学的符号系统。这就

是说，几何代数化的程度也取决于一般性代数运算的水平，尤其是字母符号和运算法则的水平。

(3) 几何代数化的程度还与代数方法的产生同几何学的发展是否“同步”或“超前”有关。因为我们必须以动态的观点来看待几何代数化，在把代数方法看成是不断丰富和发展的同时，也要把几何学看成是不断丰富和发展的。当一个几何问题出现时，人们能否及时地提供有力的代数方法，较快且成功地解决它，这对生产、生活以及科学本身的发展有着重大的意义。在几何代数化的历史上，有一些几何代数问题被代数方法延搁了很多年，如欧氏几何早在公元前约三百年就已诞生，而坐坐标思想在古希腊就有了萌芽，14世纪法国僧侣尼哥拉·奥莱斯姆也有对坐标的丰富想法，但是，一直等待到韦达符号代数学的建立，再经笛卡尔的努力，才较圆满地用代数的方法解决了初等几何的问题；也有一些代数方法促进了几何发展甚至导致产生新的几何分支，如群论方法对几何研究的促进等，它成了几何、物理、化学等科学研究的重要工具。近世代数及其方法，更直接地影响了代数几何学这门学科的发展。数学发展史证明，如果代数方法能够同步或超前于相应的几何学的发展，则几何代数化便可望有较理想的进展。

既然几何代数化具有显著的优点，并且，随着代数方法和几何学的发展又可以把几何代数化推向更高的水平，那么，有没有必要对所有的几何问题都采用代数方法去解决呢？我们认为，代数方法固然有许多长处，但它亦并非没有短处，在数学王国中，不能说它就是最好的数学方法了。因此，如果一味人为地硬要用代数的方法去解决几何问题，或硬要用几何的方法去解决代数问题，效果都是不好的。代数方法与几何方法各自都有对方所不能代替的优点。比如，采用几何方法，可以利用几何图形直观地反映函数或方程中的变量之间的关系，有时还能从几何形象中对解决问题的途径得到提示。正如我国著名数学家吴文俊教授所指出的：不仅几何学由于代数化而获得了有力的武器，而且代数学（以及分析学）也往往由于借用了几何术语，运用几何类比而得到了新的生命力，促进了它们的发展。例如，早在18世纪中，法国数学家拉格朗日就把时间因素作为与三个空间坐标并列的第四个坐标而引入了四维空间，推动了力学的研究。同样，力学家与物理学家往往把各种物理参数作为不同坐标而引进了高维的相空间等概念，使几何方法得以在物理学中发挥作用。……现代数学中还有一个常用的方法，即把一个个函数看作一个个“点”，而把某类函数的全体看作一个“空间”，函数间的相异程度看作“点”之间的“距离”，由此得到了各种无穷维的函数空间。一个微分积分方程组的求解，往往归结为相应函数空间中一个几何变换的不动点问题。这样，不仅分析的问题具有了几何“直观”的意义，而且可以运用近代几何拓扑以及抽象代数学的有力方法。拉格朗日说得十分好：“只要代数同几何分道扬镳，它们的进展就缓慢，它们的应用就狭窄。但当这两门科学结合成伴侣时，它们就互相吸取新鲜的活力，从而以快速的步伐走向完善。”

当今，不管是几何或代数，其抽象程度都在大大地加强。几何学已远远超过了欧氏几何范围，它已抽象地研究几何内部形成的独特的几何分支，出现了各种新而又新的“空间”；代数也已远远地超出了对代数方程的研究，它已考察比数具有更普遍得多、更抽象得多的性质“量”和“量的运算”，出现了一连串新而又新的“代数系统”。从原则上说，抽象程

度越高，其应用范围就越广泛；但在实际上，愈是抽象的东西也愈难以把握。因此，人为地硬要用抽象的代数方法去解决几何问题，势必弄巧成拙，事倍功半，这并不是我们所提倡的。我们所提倡的，是要从几何与代数的相互渗透、相互联系中，发现并采用其中有科学方法论价值的东西。比如，连续性与不连续性向来就是一对矛盾，但二者又是辩证统一的。代数方法擅长于注意并处理不连续（离散）关系，它能把问题分成几部分，然后分别精细地研究这些部分，从而达到对于连续性问题的解决，把几何问题作圆满处理。这是把某个代数方法和某种几何都看成是隶属于某类连续与不连续范畴来加以处理的思想方法。在相互渗透、相互联系中，特别有价值的是它们的交叉点。这往往是用代数方法处理几何问题，或用几何方法处理代数问题的最好用武之地。著名数学家丸山哲郎在评价克莱因时指出：“克莱因思想方法的一大特征，在于相互渗透的各学科间的融合。……把几何学、代数学、函数论、群论等融合为一，堪称是一曲曲深刻关系而支配着的旋律谱成的交响乐。”19世纪末叶出现了用公理化思想整理几何，本世纪20年代又出现了代数学的公理化，这崭新的公理化的数学思想，亦是用代数方法处理几何问题或用几何方法处理代数问题的重要法宝。现代数学的前沿研究，光有高等微积分、高等代数、高等几何还不行，还必须要近世代数、拓扑学和泛函分析等众多学科。这一事实也表明了，在现代数学研究中，代数方法仍居重要地位。如应用十分广泛，于本世纪出现和得到迅猛发展的泛函分析，它就是分析课题加几何观点再加代数方法的综合产物。因此，代数方法以及几何代数化的前景，将在数学各学科相互交叉、相互渗透的联系中，越来越广阔。

（郭金彬 郑榕英）

医学科研的设计、衡量和评价

——D.M.E.的疑难及展望

一、D.M.E 的由来

D.M.E.是英文字“Design, Measurement and Evaluation”的缩写,在我国现译为“设计、衡量和评价”。D.M.E.是近年来在国外发展起来的一门新型的综合性边缘学科,专门用以指导医学科研的开展,可属于医学科研方法论的范畴。D.M.E.包含、综合和发展了医学领域内的卫生统计学(或医学统计学)、流行病学(包括临床流行病学)和卫生经济学三门学科。大家知道,如果数学在哪个学科领域里渗透得愈深,运用得愈好,哪个学科就会愈发展,愈取得成功。在各门学科中,生命学科是最复杂的,也是数学渗透最浅、运用最少的学科领域。近年来这种情况有所改善,卫生统计学、流行病学和卫生经济学是在医学各学科中运用数学较多和较成功的学科,现在D.M.E.把这三门学科综合和提高,其核心也将是数学在医学领域内的应用更加深入。

医学科研的最终目的是为了促进人的健康和长寿,为此必须防治疾病。医学科研的内容大致可分成两大类:1.探讨疾病的种类、各种疾病发生的原因、结果、分布规律和诊断方法等,其核心是探讨病因;2.研究预防和治疗各种疾病的药物和方法(或措施)等,其重点是预防疾病。前类科研是后类科研的基础。

开展科研是为了想取得科研成果。这首先需要预先制订一个很好的科研设计,然后按设计方案进行科研,其间当然也可根据实际执行情况对设计方案作一些修改。但一个科研课题作完了(或一个科研课题的某个阶段作完了),如何衡量其科研结果?又如何根据衡量结果来最后评价这个科研结果?是失败还是成功?成功的程度怎样?实际上只有能准确的衡量科研结果和正确的评价科研结果,才能对科研设计的好坏作出判断。也就是说,医学科研的设计、衡量和评价三者是紧密联在一起的,D.M.E.就是在这个指导思想下发展起来的。

医学科研成果有些不同于工农业和其他许多自然学科的科研成果,后者往往可用直接的经济效益来衡量和评价,或至少科研是否作出了成果是比较容易判断的,但医学科研成果却难于判断。现时有一种普遍的却不正确的观点,认为医学科研成果只有社会效益而无经济效益。而所谓医学科研成果的社会效益也是泛指且抽象的,把本是自然学科的医学完全看作了社会学科。在自然科学奖、发明奖的评奖中,评定医学科研成果奖的尺寸是最难掌握的。虽然可制订一些评定医学科研成果奖的标准,但由于这些标准往往很多是主观性质的,难于具体和统一,灵活性大,本身就很难掌握,因此评定医学科研成果奖的争论最大,和实际情况不符合的可能性也最大。可能把一些是成果的漏评或降级评奖;也可能把一些不是成果的评奖或虽是成果而升级评奖。因为如前所述,医学科研主要是探讨病因和防治疾病,显然要真正找到病因和真正找到防治疾病的药物或方法才算是成果,但判断病因和判断药物或方法对疾病的预防效果或治疗疗效却是很困难的,后者更为困难。无论在国内还是国外,一些原认为对预防或治疗某

种疾病有效的药物或方法，后来经医疗实践证明为无效的例子是很多的，更不用说一些投机分子有意制造假药和假疗法了。这正说明了现在用D.M.E.来指导医学科研设计，衡量和评价医学科研成果，是何等的重要和迫切！

二、D.M.E.的难题分析及进展评述

寻找疾病病因和寻找防治疾病的药物或方法这两类医学科研，其数学模型是相同的：即寻找两类事物或现象有无因果关系。在寻找疾病病因中，把研究因素作自变量 X ，疾病的发生作因变量 Y （注意；无论自变量或因变量，可以是一个，也可以是两个或多个，后者应记为 X_i ，和 Y_i ，下同）。如果 X 对 Y 有作用（或有影响），则该研究因素是病因，否则不是病因。在寻找防治疾病的药物或方法中，把药物或方法作自变量 X ，疾病的防治效果作因变量 Y 。如果 X 对 Y 有作用，则是有效的药物或方法，否则不是。

在医学科研中，寻找两类事物或现象有无因果关系，主要会遇到三个困难（或难题）：1．个体差异：不管是人或动物，由于自身的某些条件不同，对发生疾病的抵抗力或对痊愈疾病的康复力就不同。在同样的环境中，或在同样的研究因素作用下，一些人（或动物，下同）可能不发病，一些人可能发病，发病的程度也不同；对于用同样的药物或方法防治同样的疾病，一些人可能无效，一些人可能有效，有效的程度也不同。而且有一些疾病不用治疗也会自然痊愈，但痊愈的时间对不同的人有差异。2．干扰因素：人或动物本身具有很多因素，所在的环境又具有很多因素。一个科研课题只能研究一个或几个因素，其他未研究的又影响结果的因素都叫干扰因素。如研究食盐量过多是否是引起高血压的一个病因，则食盐是研究因素，其他影响血压的因素，如年龄、职业、其他食物等都是干扰因素。在医学科研中，干扰因素又多又不可避免。如果不排除干扰因素对结果的影响，就不能判断一种疾病是研究因素引起的还是干扰因素引起的，同样也不能判断一种疾病是用特定的药物或方法治愈的还是自然痊愈的。而且在用某种药物或某种方法预防或治疗某种疾病的研究中，人的心理作用和精神状态也可能是干扰因素，必须注意排除其对防治效果的影响。3．判断结果：判断结果的困难主要存在于防治疾病的医学科研中。判断结果包括衡量结果和评价结果，只有先对结果进行衡量，然后才能对结果进行评价。如评价疾病的治疗效果首先要衡量疗效——人的患病减轻程度或健康增加程度，而现时医学上衡量疾病或健康的标准一般是主观定级。例如用某种药物或疗法治疗某种疾病的疗效分为四级——无效、好转、控制和治愈，这分成四级就是主观定的，也可分为两级——无效和有效。虽然可拟订分级标准，但这些标准往往就带主观性，难于掌握。无论如何，级与级之间的界线是模糊的，不管怎样有经验的医生也会发生错判，如会有医生把某个无效判为好转等。

D.M.E.既然是指导医学科研的综合学科，其主要任务就是要设法解决医学科研中所遇到的三个难题。如前所述，D.M.E.是在卫生统计学、流行病学和卫生经济学三门学科的基础上发展起来的。在这三门学科中，卫生统计学和流行病学历史悠久、比较成熟，已早在医学院校开课；而卫生经济学发展的历史较短。卫生统计学和流行病学对于解决医学科研所遇到的

第一个难题（个体差异）和第二个难题（干扰因素）已经有了比较系统和比较成功的一套办法，D.M.E.可继承和发扬这一套办法，使其更加系统和更加完善。

卫生统计学是把数理统计的理论和应用于医疗卫生实践和医学科研的学科，属于应用数学的范畴。由于医学家对该学科重要性的认识愈来愈深刻，它在医学领域内的地位已愈来愈提高。尤其是在电子计算机问世和发展以后，卫生统计学把电子计算机广泛的引用于医学科研，取得了初步成功。流行病学是研究各种流行病发生的原因、分布（包括地区分布和时间分布）规律、诊断方法和防治措施等的学科，它本是以现场调查研究为主的，现已推广到临床研究中，发展了临床流行病学。卫生统计学和流行病学的重要特点都是研究人群，前门学科是后门学科的基础，两者是既有区别又紧密联系的。

用卫生统计学来指导医学科研，为了排除个体差异和干扰因素的影响，在科研设计和执行过程中要遵守三个原则。1. 设置对照。对照组和试验（试验是对人而言，若对动物而言用实验，下同）组只有研究因素取值不同，干扰因素取值齐同。这样在数学模式上把试验组的结果减去对照组的结果就是研究因素造成的结果，从而排除了干扰因素的影响。2. 随机抽样或随机分配。在现场调查中于所定总体中随机抽样；在临床试验中把病人（或正常人）或在实验室把实验动物随机分配到对照组和试验组（或实验组）。随机抽样和随机分配就可把个体差异作为随机误差用数理统计方法处理，分离出随机抽样误差，从而暴露本质（总体）差别。随机抽样或随机分配有时还可补充保证在各对比组干扰因素齐同。3. 安排重复。包括调查抽样不只抽一个个体而是重复抽多个个体；和试验（或实验）处理不只施加给一个个体而是重复施加给多个个体。有重复才能有随机。重复抽取或施加处理的个体数叫做样本含量。样本含量的大小决定于个体差异的大小。小的个体差异只要小的样本含量来分离随机误差；大的个体差异需要大的样本含量来分离随机误差。安排重复就是指确定样本含量。

流行病学有一套利用卫生统计学三个原则来寻找事物或现象间因果关系的具体办法，主要有两种调查研究方法，现以实例结合说明：如要研究吸烟这个因素和肺癌发病的关系，为简单起见，把吸烟这个因素分成两个水平——吸烟和不吸烟；把肺癌这个结果也分成两个水平——发生肺癌和不发生肺癌。1. 前瞻性队列研究：先随机抽取一些吸烟和不吸烟的人，再前瞻调查一段时间（预先确定，如 20 年），观察哪些人发生肺癌？哪些人不发生肺癌？这是由因查果。2. 回顾性病例对照研究：先随机抽取一些有肺癌的人作病例和无肺癌的人作对照，再回顾调查一段时间（如 20 年），观察哪些人有吸烟历史？哪些人无吸烟历史？这是由果查因。

如果在医学科研设计和执行过程中遵守了卫生统计学的三个原则，又是严格按照流行病学的调查研究方法作的，则得到的科研原始数据就可选用恰当的卫生统计学方法来进行计算和分析。卫生统计学方法就本身而言是数理统计方法。它对于客观的计量资料和定性的计数资料，尤其是数学上一些常用的已知分布规律的资料，如正态分布资料和二项分布资料等，有一套传统的统计描述和分析方法，这就是由样本统计量来估计或推断相应的总体参数（如均数、率、相关系数和回归系数等），包括总体参数的可信区间估计，由样本统计量差别的显著性检验来推断总体参数的差别。

近年来，由于计算机在医学科研领域内的推广应用，医学统计方法在广度和深度上都有所发展，尤其在空间（因素或变量空间）广度上发展更快，即从单因素和双因素的统计方法发展到多因素的统计分析方法，如逐步回归分析、判别分析、聚类分析、因子分析、典型相关分析、logistic 回归分析等。在时间深度上也有所发展，但发展较慢，即从对一个时刻或时期的随机现象（总体参数固定）的研究，发展到对随机过程（参数随时间而变）的研究，如对生长发育过程的研究，对疾病发生发展过程的研究，对生死过程的研究等。所有这些都为更广泛更深入的开展医学科研提供了更加先进的方法。

总之，D.M.E. 在解决医学科研所遇到的个体差异和干扰因素这两个难题上，虽还存在一些疑难，但随着卫生统计学方法向更广和更深方向发展，随着流行病学方法的更加先进和更加完善，D.M.E. 继承和综合这两门学科的已有成就和最新成就，处理这两个难题会愈来愈顺当。

D.M.E. 现在的最大难题是医学科研遇到的第三个难题——判断（衡量和评价）结果。对于寻找病因这类科研结果的判断必须肯定其研究因素是病因还是非病因，这种判断虽然也难，但只要能排除个体差异和干扰因素就可判断，并可用人（或动物）的生理和生化变化来加以验证。问题主要存在于寻找防治疾病的药物或方法这类科研结果的判断。

三、D.M.E. 的突破途径及未来展望

防治疾病的结果应是人的患病程度减轻（包括痊愈）或健康程度增加。如何衡量患病程度或健康程度？也就是说，把患病程度或健康程度作为因变量 Y 则如何取值？这个问题是在医学科研中长期没有得到很好解决的大问题。现在一般的粗略的解决办法是划分等级：如把患某种疾病分成轻度、中度和重度；把某种药物或方法的疗效分成无效、好转、控制和治愈等。如前所述，级的划分有主观性。在卫生统计学的术语中，把这类指标叫做等级指标，把等级指标构成的资料叫做等级资料。等级指标是介于定性指标和定量指标之间的指标，等级资料是介于计数资料和计量资料之间的资料。定量指标如身高、体重等有大小、有单位。定性指标如性别、血型等只有类别。定性指标的特点是类无秩序，可以任意排列；类和类之间界线清楚，不会错判。如人的性别分男和女两类，男排前或女排前都可以；不会把男错判为女或女错判为男。等级指标的等级是人为制订和划分的。其特点是级虽衡量不出具体大小但有秩序之分，必须自低（或弱）至高（或强）或自高至低排列；级和级之间界线模糊，可能错判。可把等级指标叫做半定量指标，把等级资料叫做半计量资料。在卫生统计学中，对处理等级资料发展了一套统计方法，叫做非参数统计方法。它的特点是不管总体分布和总体参数，只对总体特征量（如中位数、百分位数等）或分布吻合情况进行估计或推断（如秩程检验、游程检验等），因此非参数统计方法适用于任何分布资料，又叫做任意分布统计方法。但处理等级资料的非参数统计方法，到现在还不成熟，方法虽多，但在不同程度上还存在一定缺陷，有些彼此之间还有矛盾，因此争论较大。近年来有人探索用模糊数学来处理等级资料，作了一些有益的尝试。

最好能把定性指标和等级指标数量化，这样所有因素（包括原因和结

果)就可用定量变量来衡量,所有医学资料就统一为计量资料。指标的数量化将是 D.M.E.解决医学科研第三个难题(判断结果)的最大科研任务。解决了这个难题,数学在医学领域内的应用就会有重大突破和质的突变。关于指标的数量化现已有一些基础,尤其是对定性指标用取值 0 与 1 的两分变量来数量化取得了相当成功。其方法是;如定性指标只有两类,则用一个取值 0 与 1 的 X 表示,如性别用 X 表示,男为 X=1,女为 X=0(也可男为 X=0,女为 X=1)。如定性指标有 m 类,则用 m-1 个取值 0 与 1 的 X_1, X_2, \dots, X_{m-1} 表示,如血型有四类,可用 X_1, X_2 和 X_3 表示:O 型为 $X_1=1, X_2=0, X_3=0$;A 型为 $X_1=0, X_2=1, X_3=0$;B 型为 $X_1=0, X_2=0, X_3=1$;AB 型为 $X_1=0, X_2=0, X_3=0$ 。但等级指标若用 0 与 1 的两分变量来数量化则会损失等级(半定量)信息。有人为简单起见,把等级指标用一个不连续变量 X 表示,如果自低至高排等级的 1 级,2 级,3 级, ..., 则可定 1 级为 X=0,2 级为 X=1,3 级为 X=2, ..., (也可定 1 级为 X=1,2 级为 X=2,3 级为 X=3, ... 等)。显然这样规定每个等级的 X 值相差 1 未免太主观。有人力图在这方面作改进,如 Bross 提出用频数分布的特点来定各等级的 Ridit 值就是一个较好的设想。

衡量防治疾病的效果也有一些传统的定量指标:如因预防或治疗了某种疾病所增加的生存年数(或日数),还有所谓躲避伤残日数等。但这些指标都有一定的缺点和局限性:有些疾病得到了防治并增加了生存年数;但有些疾病得到了防治并不能增加生存年数;另有一些疾病经治疗虽不能完全治愈却可增加生存年数。D.M.E.想在此基础上提出一个统一的定量指标——一个人患各种疾病平均所损失的健康生活年数或标准质量生活年数。于是,用某种药物或方法预防或治疗某种疾病的效果就可用所获得的(或增加的)健康生活年数来提量。提出了人在各种情况下(如患各种疾病、残废等)的健康状况指数或生活质量指数。规定健康状况指数取值从 0 到 1。最小健康状况指数为 0,相当于死亡,实际上不存在;最大健康状况指数为 1,相当于完全健康,即没有什么疾病或没有妨碍健康的疾病。某疾病妨碍健康愈大则患某疾病时健康状况指数愈小,即患疾病的妨碍健康程度可用所损失的健康状况指数来衡量。一个人在某段时期内的健康生活年数等于实际生活年数和健康状况指数相乘之积,因此当一个人患某种疾病时有:

$$\begin{aligned} \text{患某病损失健康生活年数} &= (1 - \text{患某病时健康状况指数}) \times \\ &\quad \text{患某病年数} \\ &= \text{患某病的损失健康状况指数} \times \\ &\quad \text{患某病年数} \end{aligned}$$

于是,只要定出了患各种疾病的健康状况指数或损失健康状况指数,就可由平均患该病(指一次)的时间(年)来求出平均所损失的健康生活年数。

健康生活年(或日)数这个衡量防治疾病效果的定量指标确实很吸引人。如果求得了某种药物或方法防治某种疾病所获得的健康生活年数,那么这个医学科研成果就可用价值(或费用)效果比例——每获得单位效果(如 1 健康生活年)所花费的钱数(费用)来评价。现举例如下:

美国某地在某年计划给当地 100000 个 65 岁以上的老年人进行预防流

感注射，试预算其价值效果比例。

1. 预防流感的净效果计算

根据美国以往资料分析，如果不预防流感，100000个65岁以上的老人中有1000人会患流感，其中有10人会因流感死亡。因预防了流感，1000个未患流感的人可使生活质量改进，占1个健康生活年的4%；10个未死亡的人还可平均一般健康生活8年，65岁以上老人一般健康生存8年，只相当于6.8完全健康生活年（即健康状况指数为0.85）；但有50人因预防流感注射产生副作用，使生活质量变差，占1个健康生活年的9%。因此此项预防流感的净效果为：

$$1000 \times 0.04 + 10 \times 6.8 - 50 \times 0.09 = 103.5 \text{ (健康生活年)}$$

2. 预防流感的净价值（费用）计算

根据美国以往资料分析，预防流感注射每例的各项费用总值为3美元。如果患流感，每例流感医疗费为50美元；如果对预防流感注射有副作用，每例副作用的处理费为300美元。现在对100000人预防流感注射，减少了1000例流感患者，但有50人有副作用。因此此项预防流感的净价值（或净成本）为：

$$100000 \times 3 + 50 \times 300 - 1000 \times 50 = 265000 \text{ (美元)}$$

3. 预防流感的价值（费用）效果比例计算

某项卫生保健工作的价值效果比例是该项卫生保健工作所花费经费的净价值和所获得健康生活年的净效果的比例，即

$$\text{价值效果比例} = \frac{\text{净价值}}{\text{净效果}}$$

本例预防流感的价值效果比例为：

$$\frac{265000}{103.5} = 2560.4 \text{ (美元 / 健康生活年)}$$

一项卫生保健工作是否可以实行？预防或治疗同种疾病的几项卫生保健工作选择何者为佳？这些都可根据预算的价值效果比例来决策，有下列四种情况：

第1种：净价值和净效果都为正数。这时选择价值效果比例最大者的卫生保健工作为最有效的措施。

第2种：净价值为零或负数，净效果为正数。这时卫生保健工作除有效果外，还有经济价值，一般可以施行。

第3种：净价值为正数，净效果为负数。这时卫生保健工作不当（无效果），不能施行。

第4种：净价值和净效果都为负数。这时卫生保健工作也不当（有经济价值而无效果），也不能施行。

如果还能把防治疾病所获得的健康生活年数换算成多少钱，则可用钱这个定量指标来衡量防治疾病的效益，从而可用计算防治各种疾病的经济

效益（如相对效益）——每花费单位钱所获得的钱数，来评价医学科研成果，但这存在一定困难。如果用最简单方案处理，可用所在国家每人每天所创造的产值来换算。不但可算防治疾病的成本，而且能算盈利，是卫生经济学家长期以来所盼望解决的问题。有了防治疾病成果的经济效益的评价，那么一些原来用于指导工农业生产等的许多学科，如系统工程学、运筹学、决策论等就可更好的用于医学领域了。到那时，人们再也不会说医学科研成果只有社会效益而无经济效益了，而且相对于其他科研成果来说，医学科研成果的经济效益会最显著，这是 D.M.E. 的美好前景。

如前所述，要定出人患各种疾病（或残废等）所损失的健康生活年数，必须定出患该疾病的健康状况指数或损失健康状况指数和求出患该病的时间，患该病的时间可据收集得的患该病资料用统计方法求平均数，比较容易。但 D.M.E. 要定出患各种疾病的健康状况指数或损失健康状况指数这个任务是非常艰巨的。不用说各种疾病的健康状况指数会不同，而且相同疾病由于轻重程度不同健康状况指数也应不同。健康状况指数又反映生活质量，由于人的年龄、所从事的职业等不同，相同疾病所造成的生活影响会不同，因此有些疾病的健康状况指数还要依不同年龄、不同职业等而异。如相同程度的手残废对体力劳动者的生活影响就较对脑力劳动者的生活影响大。总之，要定出真正反映生活质量的人在各种状况下的健康状况指数，除了依靠医学专业知识，还要其他学科的知识来配合，以便建立恰当的确定健康状况指数的数学模式。这个任务是光荣而艰巨的，展望未来，它将在多学科专家的共同努力下完成。对医学研究感兴趣的、特别是已经在医学领域内工作的数学、物理、化学、生物和计算机科学等专家，已经掌握了系统工程学、运筹学、决策论和经济学等专家，参加 D.M.E. 的研究，和医学专家一道制定健康状况的数学模式，完成这个光荣而艰巨的任务。国外已在加紧作这方面的科研，我们国家要迎头赶上去！

（黄正南）

向经典热力学的挑战

——从负熵到“负熵论”

一、宇宙热寂论、麦克斯韦妖与负熵

热力学发展的初期，克劳修斯（R.J.E.Clausius）和汤姆逊（W.Thomson，即开尔文 LordKelvin）等人，把热力学第二定律滥用于整个宇宙，得出荒谬的“宇宙热寂论”，认为整个宇宙都发生着熵增加，最后整个宇宙将会达到热平衡，熵值达到最大，温度差消失，压力变为均匀，所有的能量都成为不可再进行传递和转化的束缚能，整个宇宙都陷入停止变化、停止发展的状态。

在 19 世纪，能够认识到热寂论谬误的科学家寥寥无几。在文献中留下记录的，只有玻耳兹曼（L.E.Boltzman）和麦克斯韦（J.C.Maxwell）两人。早在 1866 年，离克劳修斯提出“宇宙的熵趋向极大值”的论点不过一年时间，甚至当克劳修斯还来不及进一步发挥成宇宙热寂论时（克劳修斯说宇宙将发生热的死寂是在 1867 年），玻耳兹曼就注意到生物的生长过程与熵增加相拮抗的事实。他说：“生物为了生存而作的一般斗争，既不是为了物质，也不是为了能量，而是为了熵而斗争（联系上下文来看，玻耳兹曼这句话的意思是说生物学过程是对抗熵增加的斗争——本文作者注）。这种斗争在能量从热的太阳到冷的地球的转移过程中很有价值。为了尽可能利用这种转移，植物铺开了它的面积大得不可计量的叶片，以一种尚未探明的方式，迫使太阳去完成我们在实验室中不知道如何完成的化学合成。” 1895 年，玻耳兹曼还曾进一步提出“微观起伏”说来反驳热寂论。

麦克斯韦也模模糊糊、隐隐约约地意识到，自然界存在着与熵增加相拮抗的能量控制机制。但他当时无法清晰地说明这种机制。他只能假定一种“类人妖”，能够按照某种秩序和规则把作随机热运动的微粒分配到一定的相格里。这就是 1871 年出现的有名的“麦克斯韦妖”（Maxwell's demon）的概念。

由于麦克斯韦妖只是一种猜想，当然不可能解决宇宙热寂论的问题。玻耳兹曼所说的绿色植物进行光合作用与熵增加相拮抗，则要求从阳光输入更多的负熵，也就是说，是以太阳的更大的熵增加为代价的。至于微观起伏，也远远不足以与宇宙中极其巨大的熵增加过程（例如恒星的衰老死亡和宇宙本身的膨胀）相抗衡。于是，宇宙热寂论成了 19 世纪的自然科学留给 20 世纪的一大疑难问题。

1914 年，斯莫鲁霍夫斯基（M.Smoluchowski）第一次揭示了“麦克斯韦妖”的荒谬性。他提出“妖”的新陈代谢问题。他指出，干预系统的“妖”要看作系统的一部分，不然就不是孤立系统。当时斯莫鲁霍夫斯基的想法太粗略，以至没有能够说服物理学家们。

齐拉德（Leo Szilard）在斯莫鲁霍夫斯基工作的影响下，对麦克斯韦妖作用的原理进行了较为深入的分析。1929 年，德国《物理学期刊》上发表了齐拉德的一篇论文“精灵的干预使热力学系统的熵减少”。首先，齐拉德提出熵减一定以系统的某种物理量作为补偿，这一物理量的补偿实际上就是增加信息。齐拉德的工作是现代信息论的先导，他还提出了一个计

算信息量的公式：

$$I = -k (W_1 \ln W_1 + W_2 \ln W_2)$$

式中 W 是热力学几率。齐拉德还首次提出了“负熵”这个经典热力学中从未出现过的概念和术语。齐拉德这篇开创性的论文当时也没有被人们充分理解。更令人遗憾的是，他本人也没有沿着这条道路继续探索下去。

1944年，著名的物理学家、量子力学的奠基人之一、诺贝尔奖获得者薛定谔 (E. Schrodinger) 出版《生命是什么？》一书，更加明确地论述了负熵的概念，并且把它应用到生物学问题中，提出了“生物赖负熵为生”（或译“生物以负熵为食”）的名言。薛定谔说：“要摆脱死亡，就是说活着，唯一的办法就是从环境中不断地吸取负熵。我们马上就会明白，负熵是十分积极的东西。有机体就是赖负熵为生的。或者更确切地说，新陈代谢中的本质的东西，乃是使有机体成功地消除了当它自身活着的时候不得不产生的全部的熵。”

负熵的概念最初是不容易被人们接受的。薛定谔本人也明白地写道：“关于负熵的说法，遭到过物理界同事们的怀疑和反对。我首先要说的是，如果我只是想迎合他们的心意的话，那我就该用自由能来代替这个问题的讨论了”。薛定谔一开始就意识到负熵与自由能的联系，说明他的目光敏锐，思想深刻。如果有一种机构，它是一个开放系统，能够不断地从外界获得并积累自由能，它就产生负熵了。生物体就是这种机构。动物从食物中获得自由能（或负熵），而绿色植物则从阳光中获得它们，这真是“生物赖负熵为生”！后来著名的美籍俄裔理论物理学家兼科普作家盖莫夫 (G. Gamow) 在一本通俗著作中也讨论过这个问题。

二、熵与信息

经典热力学中关于熵的概念，最先是由克劳修斯提出来的。它的定义是

$$S = \frac{\Delta Q}{T} \quad (1)$$

即“热温商”，作为热力学过程不可逆程度的一种量度。统计力学使我们对熵这个概念的实质有了更为深刻的理解。统计力学中对熵的定义是玻尔兹曼关系式：

$$S_0 = k \ln W \quad (2)$$

式中 W 是分子热运动状态的几率（热力学几率）。这样，熵便是分子随机热运动状态的几率大小的量度，也就是分子热运动的混乱程度或无序度。

如果所讨论的对象不限于分子热运动，我们也可以借用熵的概念来描述并非分子热运动的其他任何物质运动方式、任何事物、任何系统的混乱程度或无序度。这样，我们就可以有另一种关于熵的概念，它是热力学和统计力学中熵概念的推广，可以叫做广义熵。广义熵也可以借用玻尔兹曼关系式来定义，但式中 W 可以是任何一种物质运动方式所可能有的运动状态的数目。

广义熵也可以说是我们对事物运动状态的不肯定程度（不定度），这事实上就是信息论和控制论中关于熵的概念。这一概念几乎同时分别由费歇 (R.A. Fisher)、维纳 (N. Wiener) 和申农 (C.E. Shannon) 从数学上表

述出来。它也是由几率来定义的：

$$H = \log_2 W. \quad (3)$$

当我们得到足够的信息后所消除的关于事物运动状态的不肯定性程度，或者说所消除（或减少）的熵，可以叫做负熵，也就是信息量：

$$I = -H = -\log_2 W. \quad (4)$$

信息量所表示的是体系的有序度、组织结构程度、复杂性、特异性或进化发展程度。这是熵（无序度、不定度、混乱度）的矛盾对立面，即负熵。

关于信息论的熵与热力学熵的关系，布里渊（L.Brillouin）、林启茨（H.Linschitz）和奥根斯坦（L.Augensine）等曾进行过初步讨论。在数学式中的表示方面，比较（2）和（4）两式，于是我们有：

$$I = -\frac{1}{k} \log_2 e \cdot S_0 \quad (5)$$

由（5）式可知，只要通过单位的换算，就可以用信息量表示负的熵值，也可以用熵来表示负的信息。

在文献中，熵和信息曾有过许多种不同单位或不同符号的表示法，但在概念上却只有两种。一种是热力学的熵，只能应用于分子或其他粒子的热运动这种特定的物质运动方式。它可由实验数据得出（经验物理熵），也可由分子运动的统计理论推演而得（理论物理熵）；另一种是广义熵，它来自信息论和控制论，可应用于描述任何一种物质运动方式（包括生命现象）的混乱度或无序度，它的矛盾对立面叫负熵或信息量，是组织结构复杂程度或有序度的表示。广义熵概念的含义比热力学熵要广，对于热力学过程可还原为热力学的熵（通过单位换算）。但热力学的熵却不能应用于非热力学过程，因为热力学熵的概念局限于粒子热运动这种特定的物质运动方式，它与能量（热量）的分配有特定的比例关系。对于并不涉及热能转换的非热力学过程，是不能应用的。可以说，热力学熵的概念是包含于广义熵之中的。

三、从不可逆过程热力学到耗散结构理论

本世纪 40 年代，科学中出现了一连串的新概念冲击着经典热力学。除了前述薛定谔提出的负熵概念、控制论和信息论中对于熵概念的推广之外，还有以普里高津（I. Prigoging）为首的布鲁塞尔学派提出的“非平衡定态”热力学理论。到 50 年代，进一步发展为“不可逆过程热力学”，终于在 70 年代发展为耗散结构理论。耗散结构是指在远离平衡的条件下，借助于外界的能量流、质量流和信息流而维持的一种空间或时间的有序结构，它随着外界的输入而不断地变化，并能进行自组织，导致体系本身的熵减少。普里高津用数学方法从理论上论证了耗散结构的存在，并且用他所创立的非平衡、非线性热力学理论进行了深入的研究。耗散结构在某些物理化学过程、自动控制系统以及生物学过程中都有很重要的意义，它有助于阐明生命现象中组织结构和有序度增长的现象。由于这方面的卓越贡献，普里高津荣获 1977 年的诺贝尔化学奖。

50 年代普里高津曾在《不可逆过程热力学导论》一书中指出，不可逆过程热力学中关于非平衡态的描述“与生物机体的显著特征精彩地相符合。”“在生物机体生长时，实际表现出当向定态发展时熵产生减少的事

实。”“生物体组织结构普遍地增加的事实相应于熵减少。”因而普里高津说：“生物机体的行为，从经典热力学观点看起来，总似乎是如此奇异，热力学对这样体系的可应用性时常是有疑问的。我们可以说，从开系和定态系的热力学观点看起来，它们主要行为的更好了解是获得了。”德格鲁脱(S. R. de Groot)也指出，“(生物)系统在生长的最后阶段达到每单位质量具有最小熵增率的状态。在此过程中熵本身在减少，而此时在有机体内发生组织结构的增长。”“进化理论说到在这过程中的内部复杂化趋势，与上面提及的熵减少是一致的。”

普里高津和德格鲁脱说生物体组织结构的增长相应于熵减少，这里所说的熵，事实上是信息论的熵(广义熵)而不是热力学的熵。看来，普里高津后来察觉到了这一点。因此他在耗散结构理论中就小心翼翼地避免使用熵减少或负熵来指有序化。他只是说，耗散结构依靠来自环境的负熵流输入而产生有序化，但他决不再轻易说有序化也是熵减少。这是普里高津的严谨之处。他将整个耗散结构理论局限于热力学中。即使是“非平衡、非线性”热力学，也仍然是热力学！

但是，普里高津并不留恋经典热力学的过去时代，而称自己“一生主要着眼点在未来”，是属于未来的乐观派。我们透过普里高津一系列的论著和讲演，看到他正酝酿着一个更远大的目标：如何把自然科学、生命科学和社会科学三者的发展规律统一起来，即向着广义的大统一进军。

要实现这个大统一的目标，不彻底突破热力学的框框恐怕是不行的。事实上普里高津已经从非平衡和非线性两个方面在向经典热力学发起突破性的进攻了。虽然他目前还做得很不彻底，但他毕竟开始认识到信息论概念对发展耗散结构理论的意义。他自己说，他在耗散结构理论中“使用了物理—化学语言。另一些人可能喜欢说成负反馈，或自动调节等等。因此把我们的探讨与信息论密切联系将是可行的”。布雷默曼(H. J. Bremermann)说得更为透彻：“不能只从能量的耗散来推演生物的结构，更重要的是信息。”生物系统和社会系统都不是热力学的耗散结构而是信息系统，只有广义的、信息论的负熵概念才是它们共同统一的因素。耗散结构与负熵的研究如果能够与信息论和控制论的研究结合起来，就有可能出现新的突破。

四、信息热力学

既然热力学熵的概念包含在信息论的熵(广义熵)概念之中，那么，是否可以从信息论概念来推广整个热力学，或者说，建立一种研究信息系统的更广义的理论体系，而以热力学系统作为其特例呢？下面即试图从这方面进行一些初步探论。

热力学系统与通信系统 对于热力学过程来说，如果没有冷热的差异或矛盾，热是不能传递和转化的。单一的热源既不能传热，也无法做功。要使作热运动的分子朝一定的方向运动，以传热和做功，就得用冷源来控制分子运动的方向，使热量从高温流向低温。这里，冷源的作用是提供信息，以控制热能转移的方向。

从信息论的观点来看，冷源便是一个信息源。在热量转移过程中，冷源接受热源的一部分热量，分子运动的混乱度增加。用信息论的术语来说，

热源是一个噪声源，它对冷源发生噪扰。这样，我们可以借用信息论的概念和术语把“热源——热机——冷源”所组成的热力学系统看成是一个通信系统，传热过程可以看成是一个通信过程。

热力学第二定律的信息论表述方式 用信息论的术语来表述热力学第二定律，便是：如果不从外界得到新的信息，那么对信息所进行的操作和变换不可能使信息量增加，或者说，不定度不可能减少。热力学第二定律的信息论表述方式的含义更广，可应用于并非热力学过程的任何信息传递或变换过程，因此，可以称之为广义的热力学第二定律。

热和功 热是质点不规则的随机运动，是一种未受控制的能量形式。而能量做功时则是一种有规则的形式，能量以功的形式传递可以受到控制和管理。可以说，热是不带有信息的能量形式，而功则是一种带有信息的能量传递形式。因此，当利用冷源通过热机而提供信息，以控制和管理热源的能传递方向，就可以获得功。当功这种带有信息的能传递形式受到噪扰时便更会损失信息而转化为热，例如摩擦这种不规则的机械运动形式就会产生“噪声”，使信息损失，因而使功转变为热。

热力学第二定律的信息论表述方式告诉我们，任何自动进行的热力学过程总是要损失信息的。因此，功可以损失掉它所携带的全部信息而完全转变为热。而在不引起外界其他变化的条件下，热却不能全部转变为功，这是因为在没有外界提供附加信息的条件下，信息的损失无法得到补充的缘故。同样，电能、光能、化学能等等，都是带有信息的能量形式，它们都可以全部转变为热，但在外界不提供附加信息的条件下，热就无法全部转变成其他任何一种携带信息的能量形式。

束缚能和自由能 能量的传递和转化必须有信息的控制才能进行。例如两个温度相等的物体进行热力学的相互作用，当外界不时它们做功时，由于缺乏信息，热的传递不可能进行。但这两个物体都含有热能，这种由于缺乏信息而无法传递和转化的能量，便是束缚能。废热就是一种束缚能，除非另外向它提供信息，否则便无法利用。

当二物体间存在温度差时，它们进行热力学的相互作用，就会产生单向性的热量传递。这是因为较冷的物体向较热的物体提供了信息，因而控制较热的物体的热量向较冷的物体转移。能够转移的热量部分便是“ e ”（*exergie*）。另一方面，较冷的物体本身也具有一定温度，具有内部的分子随机热运动，在与较热物体的相互作用过程中又不断受到较热物体的噪扰，因此它不可能提供完全的信息。当两物体达到温度相等的热平衡状态时，便不再有可以利用的信息，因此能量传递就无法再进行。这时的 e 为 0，只有束缚能或“ a ”（*anergie* 或 *anexergie*）了。

在热力学中，自由能 $F=U-TS$ ，式中 U 是总内能，由于热力学过程受分子热运动本身的噪扰而损失信息，也就是由于熵 S 的存在，使得其中 TS 的部分无法进行传递和转化， TS 这一项即束缚能。

可逆过程与不可逆过程 对于可逆过程，当其沿正方向进行后，又沿反方向进行而返回初态时，不引起周围环境的任何变化，能量传递或转化的能力毫无损失。因此，可逆过程实质上是不损失信息的过程。

理想的卡诺可逆热机，因为其中不存在任何漏气、摩擦和其他任何损失，因之也不损失信息，故能可逆地循环运转。热力学中设想的所谓准静态过程，过程进行的每一步都处在连续的平衡状态，变化无限小地进行，

过程进行的时间无限长，这样，在每一步中都几乎没有发生信息的损失，因而是可逆的。这相当于信息论中的“正规变换器”或“非奇异变换器”。

不可逆热机由于有把功转变为热的摩擦存在，摩擦所导致的分子随机热运动对过程进行中的信息传递发生了噪扰，信息受到损失。因此不可逆热机的效率小于可逆热机。不可逆热机有信息损失，相当于信息论中的“非正规变换器”或“奇异变换器”。

五、信息与能量

在热力学系统中，熵与能量是成比例的。 $S = \frac{\Delta Q}{T}$ 这个公式就是一个

极好的说明。对于耗散结构，输入的负熵也是与输入的能量成正比的。但对于信息系统，输入的信息与输入的能量之间却不存在这种比例关系。例如一部收音机或电视机，它输入的信息是通过天线接收的电台或电视台的载波信号，信号的强弱与信号本身包含的信息量不成比例关系。输入信号的信息量与电源供给的电源之间也不存在比例关系。这里，从电源输入的是热力学的负熵，而从天线输入的是信息论的负熵。系统内部的有序化，例如显像管屏幕上图像的有序化或喇叭声频振动的有序化，也可以用信息论的负熵来描述。这种有序化虽然要以电源的热力学负熵输入作为先决条件，但两者之间却并不存在因果关系。从天线输入的信息论负熵才是产生这类信息系统内部有序化的原因。正如人脑活动的有序化与吃饭（供应能量或热力学的负熵）之间不存在因果关系一样。

消耗不同的能量可以传递同样多的信息，而不同的信息量却又可以用同样多的能量传递出去。例如用不同的功率来拍发同一份电报，它们所传递的信息相等，消耗的能量却不同；而信息量不同的两份电报，却又可以用同样的功率拍发出去。因此，为节省能量计，实际的信息系统往往都是用很微量的能量来传递极其大量的信息。无论是工程技术中的通讯系统和自控系统，还是大自然本身所造成的生命系统，都是如此。例如对一部电子计算机输入很多指令，就只要消耗很少的能量。动物体的神经系统用来指挥肌肉活动所消耗的能量，与肌肉活动本身所消耗的能量相比，就简直小得微不足道。

信息系统从信息输入装置（例如天线）输入由很小的能量所携带的大量信息，这大量的信息又可以控制电源所提供的大量能量的变化，例如转化为电视机荧光屏上的有序化图像。自控系统往往还能控制更大得多的能量变化。这就是用小能量控制大能量的原理，或信息放大器原理。

对于热力学的耗散结构，其内部的有序化是由单一的热力学负熵流而引起的，除此之外，它再没有其他的信息流输入，这就是普里高津之所以能够避开信息概念的原因。也正因为如此，输入的负熵和能量之间才存在确定的比例关系。这就是说，热力学的耗散结构中不存在信息放大机制。但对于信息系统，热力学的负熵流（例如电源供给）与信息论的负熵流（例如天线输入的信息流）分开了，出现了信息放大机制，系统内部的有序化程度是输入的信息流所引起的，与电源所输入的负熵之间就不再存在因果关系和比例关系了。

“麦克斯韦妖”问题的实质也就是用信息来控制能量的转移或变换。

1929年齐拉德(L. Szilard)发表了一篇讨论熵的论文,被认为是申农信息论的先导,其中就提出麦克斯韦妖要减少它所控制的系统的熵,它就要付出代价——本身产生熵增加。1948年,维纳在《控制论》一书中也指出,“麦克斯韦妖在动作以前,必须收到有关前来的粒子的速度和位置的信息”。到50年代,布里渊应用熵的信息论解释,指出麦克斯韦妖要能分辨粒子运动速度的大小,就必须从外界获得信息,引起环境更大的熵增加。或者说,麦克斯韦妖必须从环境中获得更多的负熵为代价。于是,麦克斯韦妖的疑难就最后被解决了。

麦克斯韦妖疑难的解决,不仅是旧问题的结束,而更是新问题的开始。维纳说:“拒绝由麦克斯韦妖产生的问题要比解答这个问题简单。否认这种东西或这种结构存在的可能性是最容易不过的事了。严格意义上的麦克斯韦妖不可能存在,可是如果我们一开始就接受这一点而不加以论证,那我们就要失去一个难得的机会来研究关于熵和关于在物理学、化学和生物学中麦克斯韦妖的可能意义的系统知识。”如果我们把从外界输入负熵而产生有序化的系统都看成是一种含义经过修正的麦克斯韦妖,我们就有了一个统一的概念来研究包括耗散结构、信息系统和生命系统在内的一切产生负熵的开放系统了。含义经过修正的麦克斯韦妖并不违反热力学第二定律,它是在以环境提供负熵为代价的舞台上演出的有声有色、内容丰富、威武雄壮的史剧。热力学第二定律只告诉我们,每一台这样的史剧迟早都要结束。而我们的任务是研究每一台史剧,并且去导演水平更高、信息量更大的史剧!薛定谔的负熵概念、维纳的控制论、申农的信息论、普里高津的耗散结构理论……,都是科学舞台上一幕幕威武雄壮的史剧。也许,一场更为威武雄壮的科学史剧正在等待我们去编导哩!

六、负熵和宇宙论

麦克斯韦妖的疑难解决了,还有宇宙热寂论疑难的问题。耗散结构以及其他一切含义经过修正的麦克斯韦妖,都依赖于从环境输入负熵而产生有序,因此,这种有序化是以环境中更大的熵增为代价的。如果把耗散结构与其环境整个看成一个系统,那么这个系统是仍然要产生熵增加的。事实上,普里高津本人也没有给耗散结构的研究提出解决宇宙热寂论的任务。钱学森同志说:“普里高津的理论是很有启发性的,它使我们从经典热力学的窒息气氛中解放出来,再也不必去召唤麦克斯韦妖来减小某处的熵了。”如果我们把这句话理解成普里高津的理论已经解决了热寂论问题,那就错了。

恩格斯早就说过:“只有指出了辐射到宇宙间的热怎样变得可以重新利用,才能最终解决这个问题。”同时,恩格斯还明确地预言:“放射到太空中去的热一定有可能通过某种途径(指明这一途径,将是以后自然科学的课题)转变为另一种形式,在这种运动形式中,它能够重新集合和活动起来。因此,阻碍已死的太阳重新转化为炽热星云的主要困难便消失了。”宇宙中散逸的辐射怎样才可以重新集中起来呢?有能够吸引辐射的机制吗?哦,那是黑洞!黑洞具有极其强大的引力,引力场强到使其周围的空间高度弯曲,以致光线也无法辐射出去。在黑洞的引力范围内,一切物质,包括辐射及其所携带的能量,都将被它吸积(accretion)进去。即

即使是恒星所散逸出去的辐射以及 2.7K 宇宙微波本底辐射或其他任何废热，都能够被黑洞所吸积。这就会造成宇宙中某些区域高度的质能集中。近年来的研究表明，这样集结起来的能量有可能重新活动起来而释放出去。例如英国理论物理学家霍金（S. W. Hawking）把广义相对论、热力学和量子力学结合起来探讨黑洞理论，提出黑洞可以通过量子力学的“隧道效应”发射粒子，从而进行“蒸发”。到最后阶段黑洞蒸发极快，因而最终将是一场猛烈的爆炸。也有人设想，由黑洞的爆炸可能产生新的恒星和星系。

也许，黑洞还可能其他的释能方式。总之，在黑洞中集结起来的能量不一定是束缚能，而是可能转化和重新活动起来并释放出去的自由能。从外部供给黑洞的可以是高熵的质能（例如宇宙中的弥散性辐射或“废热”），而黑洞的吸积和质能转化却可以把它们变成低熵的质能。从某种意义上来看，黑洞本身是可能产生负熵的，它并不需要从外部获得负熵流。名闻遐迩的科普作家阿西莫夫（I. Asimov）说：“在黑洞里，热力学第二定律被颠倒过来了，因而尽管宇宙的大多数区域是在衰亡，但黑洞里却在逐渐复兴。”

黑洞能导致宇宙的局部收缩，但还不足以与整个宇宙的膨胀相抗衡。宇宙膨胀是由宇宙大爆炸开始的，宇宙大爆炸通常被看作是宇宙时间箭头——熵增的本原。因此，要最终解决热寂论的问题，还必须找到宇宙收缩的机制。根据爱因斯坦的引力理论，宇宙将来是会发生收缩的。爱因斯坦引力理论对宇宙发展图景的预言是，宇宙从大爆炸开始，膨胀至它的最大限度，然后收缩以至坍缩。这一预示后来被许多学者推广了（R. C. Tolman, A. Avez, R. P. Geroch, S. W. Hawking, R. Penrose）。

有迹象表明中微子具有静止质量。宇宙大爆炸产生的中微子比其他物质粒子的总数还要多十亿倍，即使中微子只有一丁点儿质量，整个宇宙中的中微子质量总和就要大大超出所有其他物质的质量总和。据称根据测定的中微子静止质量计算，中微子的总质量要占宇宙总质量的百分之九十以上。因此，中微子有可能是控制我们宇宙膨胀和收缩的关键性因素。有人认为，中微子对宇宙密度的贡献有可能在将来导致宇宙收缩。这样，宇宙热寂论的最后阵地就被攻破了！

七、负熵论——一个未来的新学科

信息论的负熵概念较热力学的负熵概念含义要广，而且具有普遍性意义，可以称为广义负熵。要实现普里高津提出的自然科学、生命科学和社会科学研究对象进化发展规律的广义大统一的目标，进化发展程度或有序度的表示方法是一个极为重要的问题。广义负熵或信息量的概念提供了表示的一般性原则，并且将这种表示方法与许多不同学科中出现的形形色色的熵和负熵的概念联系起来，使这许多驳杂的概念之间的联系和区别变得清晰。广义负熵在许多不同但却相互有关的学科中都有相应的概念，这就便于人们对不同学科中提出的不同的熵和负熵的概念进行比较，并因此而建立各门学科之间的准确关系。可以说，广义负熵的概念满足了当代科学发展中提出的“大统一”这个普遍而深切的要求，从而成为联系许许多多不同学科的纽带。广义负熵给许多不同学科提供了一个共同的、统一的词

汇，这就有助于为这些不同学科建立一套共同的语言，促进它们的相互渗透和相互丰富，从而实现普里高津提出的广义有序化（实际上就是广义进化）的大统一的目标。这个大统一性质的未来的新学科，我们是否可以称之为“负熵论”呢？我们不妨先给这个未来的新学科译一个外文名：将 negentropy（负熵）这个词的词尾-y 改为表示学科的词尾-ics，就成为 negentropics（负熵论）了！

负熵意味着进化发展。因此，负熵论也就是广义进化论。1859年，达尔文（C. R. Darwin）的巨著《物种起源》问世，正式奠定了生物进化论的基础。达尔文的积极支持者和战友赫胥黎（T. H. Huxley）自称达尔文的“斗犬”，不遗余力地宣传进化论，并在1884年出版了《进化论与伦理学》（即《天演论》）一书，阐述了关于整个自然界进化发展的广义进化思想。他把进化观点从生物界推广到整个宇宙：“对世界的局部来说是这样，对整体来说也是这样，自然知识越来越导致这样的结论：天上的列星和地上的万物都是宇宙物质的部分过渡形式，在沿着进化的道路前进”。

“只要我们称之为科学知识的那种对事物的性质的有限揭露还在进行，它就会越来越有力地使人相信，不仅植物界，而且动物界；不仅生物，而且地球的整个结构；不仅我们的行星，而且整个太阳系；不仅我们的恒星及其行星，而且作为那种遍及于无限空间并持续了无限时间的秩序的证据的亿万个类似星体，都在努力完成它们进化的预定过程”。生物进化、宇宙进化、耗散结构、信息系统、自动控制系统……，它们都能产生有序化，这就是广义进化。可以说，负熵论（广义进化论）是关于整个自然界进化发展的带有普遍性意义的综合性理论体系。我们热切地期待着，这个新课题能引起更多人的兴趣，大家共同努力，使负熵论这个未来的新学科或新的自然科学理论体系尽早诞生。

（王身立）

揭开生命的神秘面纱

——生物科学发展历程的剖析

生物学是生命的科学，近二三十年来，生物学的发展迅猛异常，学科的面貌和涵义不断地延伸和扩展，一些专家们预测，21世纪将是生物学的世纪。从高等院校生物系新生入学成绩来看，近几年内，已从理科的末几位跃居第一、二位，这说明生物学科的重要性和蓬勃发展的势头，正在被社会尤其是青年人所认识。

人们常常把生物科学的发展区分为两个阶段。描述科学阶段——对于周围生长着的树木和农作物、野兽和牲畜、形形色色的水生生物和微生物，人们早就注意对它们的形态结构、生长习性和相互联系进行观察、记录和描述。产生出了“形态解剖学”、“分类学”以及“胚胎学”等经典的生物学分支学科，达尔文的进化论将这个阶段的生物学研究成果归纳概括，达到科学思想的高峰。实验科学阶段——人们在田野、温室和实验室，培育各种实验用的生物材料，进行预先设计的实验处理，追究生物体内部的生理活动和生化变化规律，探索生物体内的精细结构与功能关系及其对环境刺激的感应，从而产生出“生理学”、“遗传学”、“生物化学”等近代生物学的分支学科。然而，近年来基因工程的出现，预示着生物学正在进入第三个阶段——工程生物学阶段。人们依据已知的数学、物理学、化学、工程学等方面的知识，设计制造各种各样的机器供人们使用，已有不下几百年的历史了。而人们依据已有的生物学知识，在大自然的赐予以外，按照人们的意愿设计制造出新的生物种类，则是近十几年才刚刚开始。

依据所用材料的不同，又可将生物科学研究划分为几个水平。群体水平——例如研究有害昆虫群体的发生发展和被控制的规律。整体水平——以动物个体或植株为单位研究其生长发育或代谢活动的规律。细胞水平——着重研究活细胞的结构与功能，发生在细胞表面和细胞内的各种变化。分子水平——研究生物分子的结构与功能，代谢与调控，试图揭示生命活动的分子基础。在这几个水平之间，还有一些中间过渡的层次，如在整体水平和细胞水平之间，有器官组织水平，在细胞水平和分子水平之间又有亚细胞水平等。但是，近代生物学发展的趋势，像是要把这几个水平打乱。与其说生物学正在向分子水平深入，不如说分子生物学的发展，使人们更有可能把各个水平的研究融会贯通。目前，分子生物学的许多技术、方法和观念，正在改变细胞水平、整体水平和群体水平研究的传统面貌，已使它们之间的界限变得模糊起来。

上述这些生物科学的巨大变化，发生在不太长的时间内，给人们留下了深刻的印象，为什么生物科学近年来发展如此迅猛？究其原因，大致有三个方面。

首先，生物科学与实际的密切联系是生物学迅猛发展的根本原因。

生物学是现代农业的基础。利用遗传学，细胞学和分子生物学的研究成果，人们正在以越来越快的速度，越来越明确的目的性，为粮食作物、经济作物和畜牧养殖业提供具有多方面优良性状的新品种。基因文库的建立和积累，有可能把高产量、高品质（如：蛋白质含量，必需氨基酸组成）、抗逆性（如：抗病虫害，抗盐碱，抗干旱，抗冷冻等）以及大有希望的生

物固氮能力等各种性状掌握于手。细胞融合和基因工程等技术又提供了将多种优良性状组合到一个品种中去的手段。植物生理学是农作物科学栽培管理的理论基础；施肥灌溉的合理时机，开花繁殖的人工控制，都有赖于对农作物生理活动规律的深入研究；而光合作用的研究，使人们有可能提出如何提高大田作物光合效率的设想。在昆虫学、生物化学、动物生理学和生态学等多方面研究的基础上，关于少用或不用化学农药，对农业或林业害虫进行综合防治的设想，已经提到议事日程上来。

生物学是现代医学的基础。通过微生物学研究，不但找出了各种病原微生物，而且提供了抗菌素等一大批有效药物，使鼠疫、天花、霍乱、肺结核等几种危害严重的传染病，在世界的大部分地区得到控制，甚至销声匿迹。由于生物化学和生理学的进展，深入阐明了一大批疾病的病因，包括营养缺乏性疾病，代谢紊乱性疾病，先天缺陷性疾病和遗传性疾病等。如维生素缺乏症，糖尿病，甲状腺机能亢进，镰刀状细胞贫血病，先天性痴呆等等。从而为诊断和治疗提供了理论基础。陆续问世的各种缓解和治疗冠心病的药物，大多是神经传导的兴奋剂和阻滞剂，它们的研制，得助于神经生物学的基础理论研究。最近发明的单克隆抗体技术，不但对分子生物学和细胞学研究，而且对许多疾病的诊断治疗，以及流行病监测，正在作出革命性的贡献。

生物学还是现代工业中许多重要部门的基础。食品工作、发酵工业与生物学的密切关系是显而易见的。随着人民生活水平的提高，食品工业和发酵工业在整个国民经济中必然会有突出的发展。以日本为例，近几年内，发酵工业的年产值占它的工农业总产值的5%，来自发酵工业的税收，占它的税收总额的8~9%。我国抗菌素行业、味精行业等，近几年也发展很快，但是总的来讲，我国的发酵工业还处在起步阶段。我国的食品工业则更有待大力发展，如何使工业化的食品产品既保持丰富的营养又具有诱人的色、香、味，又保证安全卫生，已向生物学提出很多课题。例如：在知道不少化学的食品着色剂有致癌性以后，植物学家和植物生物化学家便忙于从植物来源中寻找无毒、无致癌性的天然食品着色剂，这仅仅是食品工业向生物学提出的很多问题中的一个小例子。

另外，许多初看起来和生物学毫无关系的工业部门，也十分迫切地向生物学伸出手来。化工工业部门每年要合成几百种新产品，其中许多产品准备用于制造生活资料，必需进行致癌性方面的测定。若依靠传统的动物试验方法，需要大量的人力、物力和时间。现在，在细菌遗传学研究基础上，发明了沙门氏菌回复突变检测系统，用于致癌物检查，简便迅速而又相当可靠，使许多化工新产品能及时地投入使用。石油开采部门力图把微生物产生的生物大分子多糖和微生物活菌体本身用于油井的二次、三次回采，希望把油田开采效益提高10~20%，甚至更多。还有许多国民经济和人民生活问题，需要生物科学参与解决，如环境的保持和净化，生物新能源的开发，人口的控制和优生，生物资源的保护和利用，宇航事业的开拓等等。正是这些宽阔的“用武之地”，为生物学的迅速发展提供了肥沃的土壤。

第二，生物科学与各个学科的相互渗透是生物科学迅猛发展的巨大动力。

生物学既古老又年轻，它不断从其它学科中得到新的血液和活力。生

物理学和化学的边缘科学——生物化学——始终显示出强大的活力，在现代生物学的发展中无疑起着核心作用。近来，生物化学又进而和几个传统的化学分支学科互相渗透，产生出诸如“生物无机化学”、“生物有机化学”等新的边缘学科，以及“金属离子与生物大分子的络合与功能”，“自由基在生物细胞中的影响”之类极为有趣味的问题。生理学的发展在很大程度上是借助于物理学，尤其是电学和无线电学的渗透。所以，现代生理学和生物物理学之间很难划分出明显的界线。特别在生物膜的结构与功能的研究中，既要考虑到生物膜的完整性，又要跟踪生物膜随着细胞的环境条件和生理状况改变而产生的瞬间变化，许多物理的和生物物理的技术方法是不可缺少的有力武器。在攻克对人类威胁甚大的心血管病的会战中，不但需要从医学、药理学、生理学和生物化学等方面进行的研究，而且需要力学方面的研究。因为运动中的血流与血管壁之间的相互作用，动脉粥样硬化在血管中发生的部位等，都受流体力学规律的支配。而引人注目的分子生物学，应该看作是生物学、化学和物理学的共同宠儿。正因为分子生物学的学科渗透性质十分强烈，且处在学科发展的早期阶段，所以还没有人能够说清楚分子生物学的疆界。

数学和计算机科学向生物学的渗透是悄悄的，而又是深入的。不但在酶的动力学研究 and 生物大分子立体结构推算等方面数学是不可缺少的，而且在生态环境、流行病学等研究工作中如果没有数学模型的概括，几乎无法把研究的结果加以论证或说得清楚。

总之，生物学科像一块万能的磁石，把各个学科的最新成果吸引到了自己的研究领域。所谓“21世纪是生物学的世纪”，这丝毫也不是说，生物学将会抛开其他学科远远走在前面，而恰恰是意味着生物学将从长期落后的状态中赶上来，靠着与其他学科的相互渗透，转而处于自然科学的前沿位置。在跨入21世纪的时候，自然科学的发展，一方面使生物学有可能以最快的速度，最大的限度，利用数、理、化、工程等各个学科的成果——包括材料、理论、技术、方法和观念等，将它们组织到探索生命奥秘、造福人类的巨大努力中来；另一方面，其他学科感受到生物学的推动，因为生物学向它们提出许多新的问题和给予了许多新的启示，为它们的发展拓展了新的天地。

第三，现代化的仪器、技术和方法的武装是生物学迅猛发展的支柱。

人们印象中的生物学研究，往往是背着标本箱，拿着捕虫网，先到野外去采集，然后回到实验室用解剖刀和显微镜进行解剖和观察。当然，一些传统的装备和方法还在使用。但是，大量且形形色色的现代化仪器和装备不断地拥进了生物学实验室，极大地开阔了人们的视野，节约了人们的时间，使得生物学研究在广度、深度以及速度上，都产生了飞跃。电子显微镜和与之配套的超薄切片、喷镀、扫描、冰蚀等技术，不但可以把要观察的材料放大几万倍到几十万倍，而且能够提供反映细胞、细胞器乃至生物大分子的立体结构的清晰图片。而X-衍射，红外、紫外和核磁共振等大型分析仪器的应用，更使人们可以记录下生物大分子内部和生物大分子之间的结构与功能联系的信息。放射性同位素标记和荧光标记技术，提供了分析活细胞表面和细胞内部分子识别和代谢过程的方法。氨基酸组成和顺序分析的自动化，核苷酸序列分析的技术方法，再加上多核苷酸合成过程的自动化，极大地加速了基因工程方面等研究工作的进展速度。在30多年

前完成第一个蛋白质——由 51 个氨基酸组成的牛胰岛素——的氨基酸顺序分析，实验工作化了几年时间，实验使用的蛋白质材料数以克计。而现在使用氨基酸顺序分析仪器做类似工作，只要花几十小时，只需数以毫克计的样品。

由于生物体结构与功能的复杂性，从而用一种方法和技术不可能把某一生物过程完全弄清楚。于是，长期以来，逐渐形成了生物学特有的方法学和方法论。那就是：充分使用各种仪器手段，从各个侧面积累丰富的实验材料，再在整体的和活体的观念的指导下，进行综合、概括、推断和印证，以求得到反映生活有机体本来面目的知识。例如：为了研究某一种细胞器的结构与功能，把某一器官组织从活体中摘除出来，用匀浆器或其它手段破碎细胞，用超速离心技术获得该细胞器的组份，用酶学方法去检验所得到的细胞器组份的纯净程度及其代谢机能的特点，用电镜去观察该细胞器在整体细胞中的结构位置，用标记同位素技术去跟踪该细胞器在离体和活细胞内的生化反应过程，用生化手段分离出该细胞器中某些结构成份，还可以用 X-衍射或其它技术测定这些结构成份的大分子三维空间结构，还可以用整体实验方法去试验神经激素调节或外界因子变化对该细胞器在活细胞内功能和代谢的影响，等等，综合所有这些材料，人们才有可能得到关于所研究的细胞器，在正常和不正常的生理状态下的组成、结构、代谢和功能的概念。这样一种独特的适合于生物材料的方法论，已经成为生物学必不可少的组成部分。显然，它需要众多的仪器设备以及分离分析和测定手段为基础。

总之，呈现在我们面前的生物学科，是一个由各种现代化仪器装备起来的，处于各个学科互相渗透中的，并把自己的触角伸向工、农、医等各实践部门去的，生动活泼的“学体”。在这个“学体”内，众多分支学科此起彼伏地涨落着。有的像是老化了却又得到更新（如：从传统的形态学、胚胎学到近代的发育生物学），有的与相邻分支融合却又分得更细（如：生理学和生物物理学），有的刚刚萌动出土而充满活力（如：分子生物学）。虽然都在不断地更新发展，但是总有一些分支学科、研究方向或课题，处于整个生物学的前沿，对整个生命科学能够起到带动作用，因而具有强大的生命力。前沿也是在变动之中的。以基因的表达和调控为核心的分子遗传学，一直是公认的前沿分支学科，正随着基因工程的问世而到达高潮。与此同时，已有人开始预言，另一个活跃生长着的领域——神经生物学——很可能跑到前面去，成为新的前沿。长期以来，人们的注意力主要放在生物大分子上。但是，具有强烈而又灵活的调节功能的小分子生物活性物质，正在引起人们愈益浓厚的兴趣。

急剧的发展和变化，有时使人们对现代生物学的面目感到迷惑。这反映在国内外高等院校中，涉及生物学科的系和专业的设置特别地混乱和庞杂。如：在美国加州大学伯克利分校有关生物学科的系一共有十四五五个；而在北京大学，则所有生物学科都包含于一个系里，下面设六七个专业。这两个学校倒有一点是共同的：虽然他们都力求抓住生物学发展的趋向，但是都远远未能容纳下生物学科的全部分支和方向。系科设置上的差别和变动，也正反映出人们在回顾和展望生物学的来龙去脉的同时，也在思索着应该如何培养人才，才能适应生物学迅猛发展的形势，这确是一个值得深思的问题。

(张惟杰)

一个仍待证实的天才猜想

——生物重演律的机理与意义

胚胎学的创始人贝尔(Karl Ernst Von Bear, 1792—1876)首先对动物的发育进行了较为系统的比较研究,提出了著名的“贝尔法则”,指出各类动物在胚胎发育初期是相似的,越是早期就越相似;达尔文(Charles Robert Darwin, 1809—1882)对此法则很重视,认为胚胎早期的相似表明了动物种间的亲缘关系,反映了种的进化趋势。后来弥勒(Johann Friedrich Theodor Müller, 1821—1897)在此基础上并通过甲壳类发育研究等提出了个体发育可为祖先的历史提供线索的观点,这被海克尔(Ernst Heinrich Haeckel, 1834—1919)进一步明确,发挥总结为重演律(也称生物发生律):个体发生就是种系发生的短暂而迅速的重演。这一定律的提出是与进化论确立密切有关的,其本身也被看作为进化论的重要证据之一,曾对生物学诸多领域有过相当深刻的影响,并导致过大量的辉煌成果,至今在生物科学中仍有着重要的地位。

但与此同时,在发育生物学和胚胎学的深入过程中,重演律却受到了有关资料的挑战和非难。较详细的研究观察成果表明生物的个体发生并不严格地重现系统发生的阶段,甚至某些器官、系统的发育过程中找不出重演现象,故现代大多数生物学者都趋向于慎重而有限地承认重演律,对曾经出现过的对其过分渲染和无节制地引用持批评态度;有的学者甚至认为所谓重演律只是对贝尔法则的歪曲,指出海克尔本人从来不是一个专业胚胎学家,胚胎学家受其诱惑乃是专业史上黑暗的一页。

现实情况表明重演律实际上只是一个天才的猜想,有关机理一直未能阐明,其意义也有待重新明确;这些已引起了某些人的注意,如有人已明确提出个体发生是否重演种系发生是当前发育生物学的基本问题之一。本文将简单地对生物发育重演及其有关现象予以回顾,并对其可能机理和意义进行初步探讨,希望能有助于问题的解决。

一、生物发育重演及其有关现象

生物重演律指出:生物在个体发育过程中,重现其祖先的主要发育阶段。有关的现象颇多,经典的例证如鸟类、哺乳类动物的胚胎一度出现的鳃囊,就是其祖先鱼类特征的出现,人胚中暂时性存在的尾等,也是其祖先特征的出现。

近年来的科学进展,不仅进一步充实了有关胚胎发育重演的资料,而且也在很多领域也为重演提供了一些新证据和认识。这里仅简单地就几个侧面介绍一下。

1. 生物生活史方面

此方面可由重演律解释的现象很多。在植物中有很多例子,如苔藓植物孢子萌发形成的原丝体,与丝绿藻很相像,可以看作是重现其藻类祖先的特征;银杏的精子也被认为是重视其有鞭毛水生祖先的特征等。动物中

的例子也有不少，如不少扁形动物及孢子虫的复杂生活史（更换宿主）无疑与系统发育有关，在其系统发育早期应该仅有一种宿主，寄生性扁形动物与疟原虫大约分别是软体动物和节肢动物的寄生虫，在进化过程中，可能进入了某种不适宜的宿主体内，生活史无法完成，但尚可生存，偶然地由脊椎动物宿主接续，形成了新的生活史周期，不适宜的宿主成了两宿主体系中的一个适宜宿主，生活史复杂了起来，逐渐被选择进化成了现今的情况，也即，在它们的生活史中大致简略地重现了其系统进化的这一过程。蛔虫在脊椎动物体内有一移行发育过程，幼虫必需在肺内生活发育一个阶段才能在肠道低氧张力条件下营寄生生活，这个肺内生活阶段很可能就是其自由生活祖先需富氧条件生存特点的某种再现。

2. 生物形态方面

生物形态方面的观察研究成果为重演律的提出提供过大量的例证，除胚胎学方面的实例外，大量的返祖现象在某种程度上也是例证，只不过后者是在个体发育过程中，由于某些原因发育进行得不彻底，而使得再现的系统发育中的某些原始性状保留了下来。在人体中，返祖现象时常可见，除较明显的毛人、有尾人等外，还有不少隐蔽的情况，如我们在考察经络实质的过程中，就发现经络感传道与某些低等动物（如扁形动物）的原始子午干神经传导系基本上是一致的，表明前者可能是后者在人体上的某种保留，即所谓经络感传敏感者（经络敏感人）在某种意义上也是一种返祖现象。

近年来有人对生物形态进行了一些新探讨，如提出了生物全息律，认为生物相对独立的部分可重现整体的化学成分分布趋势，并可在形态、数目上反映出来，以解释一些生物局部的形态、功能特点，如不少植物的叶形与整株外形有某些相似的空间分布特点等。这实际上也在某种程度上充实了重演律，即生物局部发育简略地重演整体发育。

3. 细胞学方面

细胞有丝分裂是真核生物细胞增殖的最主要方式，现已了解到绝大多数较高等生物的细胞增殖周期中，均有核膜消失和重现等现象，这一过程很可能就是原始真核细胞产生在细胞发育中的重演。在细胞起源的研究中，有关真核细胞分裂过程中叶绿体，线粒体等的连续性存在现象，被认为是细胞内共生起源学说的重要证据之一，这实际上也是以细胞发育重演细胞起源的认识为基础的。

在有性生殖过程中出现的细胞减数分裂，是有丝分裂的变异形式，其DNA合成期（S期）不像有丝分裂时那样与分裂期（M期）一一对应，而是一个S期对应两个M期，这与某些原生生物的细胞增殖情况有类似处，故实际上很可能是重演原始前性生物细胞增殖过程。不少生物的性别可能是异源的，即性差别是基于形成有性生殖的两种原性生物的种间差异，原则上是两原性生物之一为一种性别，其杂交型为另一种性别而衍生出的这类性现象，故其异配生殖时配子的异形现象，在某种程度上也是重演了其性起源时祖先间的差别。

在细胞的发育和行为特性方面也有重演的影子，如某些器官的完全再生和生理放大过程中，细胞受到刺激后会发生返幼变化，回复到幼稚状态，进行增殖，进而分化，重现其产生时的过程。有的情况下，细胞也会返祖，如癌细胞原则上就是一种返祖细胞，它失去了分化，却具有了与原生生物细胞类似的转移播散活动能力，在某种程度上重现了祖先的特征。实际上高级生物体内的很多细胞均与某些对应的单细胞生物有共同点，如早就知道的人体内游走性吞噬细胞与阿米巴行为上很相似。甚至粘菌的分化现象与高等动物的分化现象也有可比之处，如一种粘菌（*Dic-tyostelium discoideum*）在族聚时，cAMP起作用，而cANP在高等动物体内是某些激素调节的二次信使；此粘菌分化时系在无增殖情况下进行，与高等动物红血细胞形成的发育是相同的。这些一致性或可比性有一些也可以看作是与重演有关的现象。

4. 生物的机能方面

早就有人提出人的个体意识发生（心理学过程）重演人类文化的发展历程。较近的古人人类学研究已证实，人语言的个体发生也与进化有联系，如婴儿的发声器官与直立人和古人的发声器官相似，即喉头位置明显地高于现代成人，这种位置可使他们边呼吸边饮水（乳），但只能喃喃呐呐不清楚地发音，这也清楚地显示了一种重演现象。在成人的日常活动中，有时也会再现一些婴幼儿时的低级反射，如在受到惊吓时，不少人都下意识地出现拥抱反射等，即再现较原始的反射特点。这些都可以看作是与重演有关的现象。

生物界中发育重演及其有关现象很多，这里就不再列举了。总之，重演现象并不局限于经典的胚胎过程中，而是一种极广泛的带有普遍性的发育现象。但另一方面，就现已知的任何重演现象而言，没有哪一种或一类是严格遵循重演律的，正如现代胚胎学观察研究所揭示的，人胚的鳃囊并不能与鱼类的鳃相比，前者后来发育为与鳃根本无关的一些器官，在动脉弓、心脏以及眼等器官发育过程中也并没有与之相应的明确的重演过程，无法在人胎发育中确定一个所谓的“鱼期”。所谓的重演都只是模糊的、大致的。

现有的观察研究成果，在一定程度上充实扩展了重演律的适用度，但同时又否定了它的严格性，表明其只是一个广泛适用的模糊定律，如其仍要存在下去，则必须采用较松散的形式。我们考虑它大致可表述为：在生物个体发育过程中，在整体或局部水平、甚至细胞水平有重现其原始发育过程中的某些性状或阶段的现象。

二、发育重演的可能机制

解决发育重演问题至少要回答两个主要问题，即重演的基础是什么？其顺序是如何决定的？

海克尔在提出重演律时，曾指出系统发生是个体发育的机械原因。这对解决第一个问题是有一定价值的，就一般而言，个体发育是系统发育的环节和产物，在分子水平上，个体的基因是在系统发生过程中逐步积累变

异来的。可简单地用两个过程来说明，即先引入简单的重复序列，然后通过碱基的变化将其改造。各忽略两者基因数量上的不同，则个体基因库就可看作为系统原始基因库多样化进程的一个终端，前者势必含有后者在进化过程中出现的不少基因（如不是全部的话），即个体基因库中与系统发生过程中出现过的基因有相当大的重叠度，保留了不少决定祖先性状的基因。这为重演现象的出现提供了一定的物质基础，也是不难理解和接受的，其证据很多，如亲缘关系越接近的物种，相同基因数量就越多便是一个明证。当然，由于进化过程并不仅是添加新的基因，而且整个基因库还在一定速率下不断歧化，故就此而言，个体基因库与系统进化中所出现的基因的重叠只有相对的意义，由此而导致的重演现象不可能十分严格，而只能是模糊的，大致的。

目前阐明重演现象机制的关键是解决第二个问题，即重演发育顺序是如何决定的？已知的事实表明，系统发生与个体发育是由不同的矛盾因素参与进行的；系统发生是历时长达亿万年，有自然选择因素参与的进化过程，其基因库是由简单到复杂；而个体发育则是受精卵（或发育细胞）在较短时间内受发育有关因素影响的分化过程，其基因库是相对恒定的。个体发育并不是系统发育的“缩时电影”，也没有任何迹象表明个体发育是遵循着进化规律，故个体发育绝不是系统发生的机械性压缩。

一般地说，在个体发育中，细胞的分化有两种可能的机制，一是遗传信息的改变，一是遗传表达的改变。前一机制仅有个别现象支持，如马蛔虫体细胞分化时有染色体丢失现象。近几年来在分子水平上也发现了例证，如在人体内抗体生成细胞（B 细胞）在形成时存在着基因突变，这对生成多种多样抗体的 B 细胞分化有一定贡献，甚至在 B 细胞分化后，其基因仍可有变化，从而产生某些抗体变异；80 年代的这一成果为深入认识细胞分化提供了新的线索，丰富了发育生物学的内容，但就目前所知而言，此机制缺乏普遍性，尚不足以成为发育和分化的主要原因。后一机制已有广泛的研究成果的支持，从原核生物到真核生物的很多生物体内，都曾明确过分化细胞的核也具有“全能性”，即基因库在分化过程中基本上是保持完整的，发育和分化主要是对基因库的有序地选择性表达。后一机制是得到较一致的公认的，具有较普遍的意义，故这里主要就此进行初步探讨。由于已了解到的决定或影响基因表达的因素很多，关系也十分复杂，为了较清楚起见，我们将其人为地划分为若干层次进行有关讨论。

1. DNA 水平的调控

DNA 是目前已知的最主要的真核细胞遗传信息载体，其分子结构中含有大量的潜在遗传信息。在特定的分化细胞中，任一时期只有基因库中的一小部分（2~15%）是表达的。目前已经明确，在 DNA 分子上基因的排列有一定的组织性，有明显的基因丛的存在，操纵子就是已公认的一类；它由启动基因、操纵基因和结构基因组成，形成表达调控的一个单元，对表达顺序有一定影响。三四十年代提出的真核生物中的“转座因子（控制因子）”，现已被公认并得到了不少实验研究结果的支持，表明 DNA 分子上或分子间的一些跳跃片段对发育和分化也有一定影响。另外在基因内部或之间可有一些插入顺序，还有不少似乎是无功能的重复顺序，这些都可能

影响分化过程，前者已证实在 B 细胞分化时，对生成多样化的抗体有重要贡献，后者目前虽未能明确有直接关系，但就作为 DNA 上的一部分，有明确的分割作用，也是与基因表达有联系的。

总之，DNA 分子本身的一些结构特点，活动特点就对基因表达有一定的影响，在有序地表达过程中会起一定作用。但就目前所知，DNA 的结构、活动特点与发育有序性并没有明确的联系（起码在真核生物中是这样），很难想像重演现象完全是由 DNA 分子本身的特点所决定，故此水平的调控尚不能独立解释重演现象。

2. 染色质（或染色体）水平的调控

真核生物细胞的 DNA 一般均是以一种复合的核蛋白结构存在，此复合物被通称为染色质（或染色体）。染色质中与 DNA 结合的蛋白质有两大类，组蛋白和非组蛋白。目前已基本了解到组蛋白在染色体的形成中起结构作用，在表达时为基因阻遏物；非组蛋白则可能是基因表达的正调节物。这提示在染色质水平上存在着明确的调控基因表达的因素。在不少生物体内还可以看到染色体按阶段发育的现象，如某些昆虫的多线染色体的活动情况，我国就有人提出过有关发育的染色体阶段活动假说，认为生物个体的发育是染色体以其不同组分循序进行阶段活动的结果。这有一定道理，但就目前所知而言，染色质水平上的调控的规律性尚无法与发育的顺序性统一，并不足以解释包括重演现象的发育现象。

3. 核、质关系中的调控

这方面工作的很多，有关卵的活化作用的实验、核移植的试验以及杂交细胞的一些实验都表明细胞质内具有刺激或影响基因表达的因素，对发育过程有控制作用。在某些胚胎学研究中，早就发现过，某些动物受精卵中的胞质有分化，通过分裂子代细胞中胞质成分有差异，这可大致决定细胞的分化趋势，在某些情况下，甚至可预言得到某一部分细胞质的细胞可发育成什么组织或器官。这表明细胞质内有影响基因表达和决定细胞分化的某些因子。这无疑为发育和分化提供了重要线索，但这并不能完全将发育和分化归结为细胞质的预决定，因为发育本身是一个明确的渐变过程，这一过程不可能仅由简单的胞质成分定位来解释，另外，目前也没有充分的证据说明在所有的生物中受精细胞内均有明确的胞质分化，故核质关系中的调控对发育顺序的影响作用并不是唯一的和完全决定性的。

4. 细胞间的调控

细胞水平上，个体发育实际主要由三种变化组成，即：质变（特性的变化和分化），量变（大小及数量变化），重排（位置的变化）。在此水平上的相互作用对发育有明显的作用，大致可分为两类，一类是直接接触作用，这种作用中已明确的有细胞接触抑制作用，可抑制细胞的分裂等，还有某些识别作用等，这可能在发育过程中主要起某些阻遏作用；另一类是通过介质传递的间接作用，像诱导作用，胚层细胞的重组定位等

都是通过某种化学物质来调节的，最明显的可能要算某些激素诱导的一些生物的变态发育了，如蜕皮激素对昆虫发育的作用等，此类作用可能在发育中起正调节作用。就目前所知，细胞间水平的调控对发育的作用是不可忽略的。

5. 环境——机体水平的调控

很多经典的观察早已表明环境因素可影响生物性状的表现和发育，如已证实：对某些生物，温度可控制、决定性别。在某些生物还有所谓阶段或世代发育现象，其中有大量环境因素影响发育的例证，如寄生性扁形动物和疟原虫的情况，它们的发育阶段或世代与宿主的更换常联系在一起，进入了下一个宿主才发生相应的发育；在植物中也可以看到类似的情况，如冬小麦的春化和光照两个阶段的发育等。从现有资料来看，环境因素对发育的一些大的阶段似有某种启动作用。

从上面的简略讨论不难看出，个体发育是多层次复杂因素影响基因表达的一个有序过程。我们认为发育重演作为个体发育的一个重要内容也必然是以此为基础的，即发育重演的机制只能是一种多层次有序调控的基因表达过程。由于各层次与基因联系空间的差异，自然地组成了一个从密切到疏远，从细胞内到细胞外的序列，这与系统发育有某些类似之处，可大致对应起来；我们推测这一类似可能有内在的联系，并从而导致了发育重演现象，其大致情况可能是这样的：

在系统发育过程中，基因和调控因素都是逐步发展完善的。应该是一定的原始基因与较密切的影响因素先出现，并形成稳定的遗传关系；在进化中又出现新基因及其组合和较疏远的一些调控因素，也形成稳定遗传关系，如此反复，形成多层次多级环节，大致是高一级调控是在低级调控基础上发展建立的，与基因的关系也要间接一些。这是不难理解的，实际上系统发育的每个细小环节都可以看成是个体发育，它发展进化的多种可能性，由于自然选择的作用，一定会转化为单一性的，并稳定下来，形成一个关节点，又作为新的起点向可能的方面发展，最后又固定为一种（类）发展模式，开始新的环节，基因及其调控因素逐步复杂、机体也逐步进化，大致对应于病毒（？）、原核生物、原生生物、后生生物的序列。在这一过程中，自然选择对基因的影响越来越间接，其关系越来越疏远，逐次被由密切到疏远的各层次调控因素取代。这些保留在系统发育终端——个体发育中就形成了稳定的有序的阶段发育现象——重演现象；实际上，相当于系统发育的顺序性信息粗略地编排在基因调控因素以不同层次水平先后出现的顺序中了。就经典的胚胎发育重演现象而言，其阶段出现的信息可能主要存在于核质关系，细胞间关系以及环境与机体关系的调控因素中。因为从进化上来看，胚胎重演是多细胞后生生物特有的，故细胞间相互作用则应无疑是决定重演现象的主要因素，但由于它是在胞质关系基础上才能发挥作用，并受环境因素影响，故这后两个层次的调控也有一定作用，甚至在某些情况下可起决定性作用。病毒类生命（类似 DNA 加某些自然因素的调控水平）活动主要是复制与活化；细菌类（类似于染色体加某些影响因素）仅可出现一些低级分化；核质关系水平可决定某些分化；多细胞水平出现发育重演等现象似乎为上面看法提供了一定佐证。我们设想，胚

胎发育大致是以若干关节点为转换的系列阶段过程，由于阶段启动(诱导)的关节点与基因组合的关系是在系统发育中确立的，于是就表现了重演现象；当然进化是高度复杂的过程，而不仅是简单的量变，保留下来的关节点势必有所简并，从而个体发育只能是系统发育的大致的、模糊的简略重演。其它重演现象也可按此机制调整有关调控因素而加以解释，这里就不多说了。

上面的讨论只是一个初步的设想，并不深入完善。我们考虑，很可能发育和分化的机制最终要落实在分子水平上予以说明，但这只能是在综合全面考察研究细胞生化、核质关系，细胞间关系以及环境与机体关系等后，才有可能揭示生物发育重演现象的内在规律，导致问题的彻底解决。

三、生物发育重演的意义

通过上面对发育重演机理的初步探讨，我们认为，重演现象绝不是偶然的，而是个体发育与系统发育有机联系的必然反映。虽然胚胎、重演现象不仅是简略的，而且是大致的模糊的，但也是客观的，它大致间接地反映了进化的事实，作为进化论的证据之一是有坚实的客观基础的。

发育重演现象虽不能完全地在细节上为我们提供认识各种生物进化现象的证据，但无疑可提供可贵的。大致准确的线索，为我们正确解决细胞、有性生殖、各类生物以及人类的起源与进化等问题提供有力的帮助；并可能为在实验领域中利用低等生物、简单生物以及某些局部材料进行研究，说明高等生物、复杂生物的相似现象提供重要的过渡理论基础。

发育重演现象本身支持生物进化是一种修补和改造过程，并把它们形象地展现出来。由此可延伸出一个规律：任何一种带有普遍性或有一定出现频率的稳定性状都是进化的产物，它们的起源与发展在进化史中应有痕迹可循。现今不少所谓“奇异”性状实际上只是返祖或原始性状的保留，如经络可能就是一种原始神经系的保留，某些所谓人体特异功能现象也许会在深入研究低等动物的结构和功能过程中被揭下奇异的面纱。

深入认识发育重演现象还会为了解各种生命现象提供联系线索，如完全再生可理解为某种重演，其本质为某些细胞间关系改变而导致相应基因组活化，进而重现阶段发育；癌症则是细胞水平返祖，某些原因导致的细胞处于原始发育阶段；所谓“全息律”则是局部重演，是生长细胞在特定条件下发育不完全重现部分系统发育性状的反映。此种联系有助于我们认识生命现象的统一性和规律性。

对生物发育重演现象的深入了解还有助于启发我们对其它自然现象的认识。与重演现象类似的现象在自然界和社会中是很多的，如化学上的元素周期律，物理上的不同物质等级，如原子、行星系、恒星系……等，结构方面的相似性，以及社会科学中大量的否定之否定螺旋发展现象等，似乎都有某种类似的发展重演规律，我们认为这不可能仅是偶然的，深入探讨有关现象的共性，也许可以建立一种与重演有关的方法论，来丰富我们认识客观世界的思维宝库。这在原则上是合理的，就生物学研究而言，还原论和生机论是当前两种对立而又不可偏废的认识角度，前者立足于物质运动的共性，而忽略了物质运动的天然等级差异，后者则恰恰相反，过分强调了物质运动的等级差异，这中间有一个空白过渡区。重演论如建立的

话，大约就可填补这一空白，它可在承认物质运动天然等级差异的同时，提供对不同等级中简单与复杂、低级与高级的演化关系与联系的规律性认识方法，促进有关研究。我们认为，很可能在同一等级物质运动层次上，重演是局部与整体、个体与系统发展联系中最基本的一种关系。

（刘燕明）

生命科学中有待揭示的奥秘

——细胞分化之谜

一颗植物种子，是怎样分化出根、茎、叶来，长成一株具有特定外形的植物体的？一个高等动物的受精卵，是怎样分化出四肢、眼、耳、鼻、脑来的？为什么有时细胞还会发生癌变？细胞分化的机理问题，一直是生命科学中有待揭示的重大奥秘之一。

早在 17 和 18 世纪，生物学史上就出现过机械唯物论的“预成说”，认为胚胎发育是预先形成的微小动物的扩大。甚至说在精子或卵子中就存在着预先形成的完整的微小生物体。1759 年，俄籍德裔生物学家沃尔弗（C. F. Wolff, 1733—1794）出版《发生的理论》一书，在实验事实的基础上提出胚胎发育的“渐成说”来反驳预成说，指出生物的组织 and 器官是在发育过程中逐渐形成的。

但是，真正开始细胞分化机理的科学探索，却是 20 世纪的事。

一、遗传物质的丢失？

小麦瘦蚊（*mayetirole clestructor*）卵的后端含有一种特殊细胞质，叫做极细胞质。在极细胞质中的核，保持了全部 40 条染色体，但位于细胞质其余区域的核，却丢失了 32 条染色体，只保留了 8 条。有全部 40 条染色体的细胞不久发育为生殖细胞，而只有 8 条染色体的细胞继续增殖，将来分化成各种体细胞。在尖眼蕈蚊属中也发现了类似情况。在马蛔虫（*parascaris eguorum*）中受精卵中只有两条很大的“复合染色体”。在胚胎发育的一系列细胞分裂过程中，大部分细胞中复合染色体的末端部分丢失，并分散为许许多多小的染色体。这些细胞以后进一步分化为各种体细胞，而保留完整复合染色体的少数细胞则发育为生殖细胞。这些例子表明，遗传物质的丢失是与细胞分化有关的。但丢失遗传物质的现象仅发现于蕈蚊属、瘦蚊和马蛔虫等少数生物中，在生物界并没有普遍性意义。

在社会性昆虫（例如蜜蜂、蚂蚁、白蚁等）的群体中，不同的个体往往分化成不同的类型。例如一个蜂群中就有蜂王、雄蜂和工蜂等不同类型。蜜蜂的性别分化也与细胞中遗传物质的量的多少有关。雄蜂是由未受精卵发育而成的单倍体，遗传物质只有雌蜂（即蜂王）的一半。但蜂王和工蜂却都是由受精卵发育而来，细胞中的遗传物质完全相同，不同的只是幼虫期的食物。如果用蜂王浆喂养，则发育成蜂王；如果用普通蜂蜜喂养，则发育成工蜂。

绝大多数多细胞动物的细胞分化也像蜂王和工蜂的分化一样，不是遗传物质数量的改变，而可能是遗传基因活性的变化。研究表明，细胞分化与基因调控有关，这在生物界是具有普遍性意义的。

二、基因调控与细胞分化

本世纪 40 年代末、50 年代初，美国遗传学家麦克林托克（B. McClintock）在玉米中发现转座因子（transposition elements），

即某些遗传基因可以从染色体的一个位置跳到另一位置，甚至从一条染色体跳到另一条染色体。玉米中这些跳动着的基因控制着籽粒中合成花青素的“颜色基因”的活性。这些控制因子跳动得如此之快，使得受它们控制的颜色基因时开时关，于是玉米籽粒上便出现了斑斑点点。由于颜色基因活性的改变而导致玉米组织细胞颜色的分化，这是科学史上关于细胞分化与基因调控有关的最早研究。麦克林托克由于发现转座因子这项卓越的贡献而在 81 岁的高龄荣获 1983 年的诺贝尔生理学—医学奖。

一个比较完整的基因调控学说，是 1961 年法国微生物遗传学家莫诺（J. Monod）和雅可布（F. Jacob）首次提出操纵子模型而奠定的。他们在大肠杆菌中发现， β -半乳糖苷酶等与乳糖分解代谢有关的三种酶，编码它们的遗传基因可以受到调控。当培养基中存在乳糖（同时没有葡萄糖）时，乳糖便可作为诱导物起作用，使上述有关的三个基因启动，从而合成分解代谢乳糖的酶。当乳糖缺乏时，细菌就自动关闭有关的基因，不再产生 β -半乳糖苷酶等，以避免浪费。

操纵子学说刚刚提出，就有人借用它来说明高等生物的细胞分化。事实上，大肠杆菌的乳糖操纵子本身就可以看作是一种细胞在时间上分化的模型。在有乳糖存在时，大肠杆菌的细胞便“分化”出产生 β -半乳糖苷酶的特性来。经过若干年之后，生物学界终于普遍接受了这样一种概念：细胞分化是遗传基因选择性激活和（或）抑制的结果。

三、激素与细胞分化

激素诱导细胞分化，在生物界是一个十分普遍的事实。例如，蜕皮激素促进昆虫变态，甲状腺素促进两栖动物（蛙等）的变态，性激素（雄性激素和雌性激素）促进鸟类和哺乳类第二性征的分化等等。

早在莫诺和雅可布发表操纵子学说之前，克列瓦（V. Cleve）和卡尔逊（P. Karlson）就已经在摇蚊（chironomus tentans）中观察到，蜕皮酮能引起唾腺染色体上的一定部位产生膨突（puff）。及至操纵子学说问世，卡尔逊就指出蜕皮酮是通过基因调控起作用的。染色体膨突区有活跃的信使核糖核酸（mRNA）的合成，标志着遗传基因的活动。激素能调控遗传基因的活动，通过诱导昆虫染色体膨突的实验首次得到证明。这一发现，开启了高等生物中基因调控研究的先声。吉尔伯特（L. I. Gilbert）和薛内德曼（H. A. Schneiderman）认为，这是“生物学上划时代的事件，它们把昆虫激素从狭小的昆虫学领域带到当代生物学思潮的中心问题上来了”。

卡尔逊还指出，激素通过基因调控起作用的概念，不仅适用于昆虫激素，而且也可能同样适用于脊椎动物的激素。不久之后，就有人发现：脊椎动物的甾类激素对靶细胞的染色质有很强的亲和力，激素与受体的复合物迅速结合到染色体的 DNA 上。数分钟之后，即可诱导 mRNA 的转录，进而促进蛋白质的生物合成，并表现出一定的生理效应（例如雌二醇刺激大鼠子宫肥大）。目前已有不少证据表明，脊椎动物和人体的许多激素，都是通过基因调控而起作用的。植物激素方面，也发现了类似的事实。

总之，激素诱导细胞分化的作用，是通过基因调控而实现的。

四、胚胎诱导

在胚胎发育过程中，细胞分化的方向受到与它们接触的邻近细胞的影响。这邻近的细胞被称为诱导者。例如视论（前脑的凸出物）可以诱导与它接触的外胚层细胞形成眼睛的晶体，以及下衬中胚层的“组织者”（即胚孔的背唇，以后分化为脊索）诱导神经组织的产生等等。由于操纵子学说提供的启发，生物学家普遍相信，胚胎诱导作用的机理也在于基因调控：由于诱导者的作用，使被诱导细胞中一定的基因被激活，于是细胞向特定的方向分化，形成一定的组织器官。

但有一个问题是，组织者的诱导作用并不具有特异性。经放线菌素 D 处理因而不能合成 mRNA 的，甚至死的组织者，都可以诱导神经组织的形成，而且没有物种特异性。例如蛙的组织者可以诱导蝾螈的外胚层产生神经组织。甚至牛肝或马肝，无论是新鲜的活组织，还是经酒精处理而杀死的，对两栖类胚胎都有神经诱导作用。更有甚者，甲基兰或中性红等染料，氯化锂或氯化钠等盐类，较缓和的酸、碱处理（pH 值的改变），二氧化碳，氨，甚至碎玻璃和聚四氟乙烯塑料片等等，都能诱导两栖类的外胚层产生神经组织。

这就意味着，动物的外胚层具有由遗传所决定的、分化成神经组织的固有的潜能。只要由外界的非特异刺激造成一个扰动，就足以启动有关形成神经组织的一系列基因呈链式反应地表达。对于一团未分化的细胞（例如动物的桑椹胚），非特异性的刺激当然无法提供“位置信息”，使处于不同方位的细胞向特定的方向分化。那么，特异性的位置信息又储存在何处呢？

五、细胞表面与分化

通常所说的细胞表面，包括细胞膜及其邻近的一薄层细胞质。动物卵细胞表面的一薄层被称为卵皮质或周质（cortex），它具有一些特殊的性质，RNA 的含量也特别丰富，对于胚胎的发育和分化，例如体型的建造（极性、轴性和对称性）以及器官分化等，起着重要作用。

卵细胞表面具有一个向极的、背膜的和横的方向所组织起来的三维“周质场”。这个“场”为卵细胞提供了一个互相协调的系统，使得全部发育过程都同它有关。随着发育的开始，细胞质物质在周质场所发生的吸引力和排斥力的影响下从一个粗略均匀分布的状态，开始向某些区域集中。同时，也开始了细胞核和整个细胞的分裂。细胞核和纺锤体的方位同样也受周质场的支配。周质场引起细胞质物质的分化性分布，形成初级化学分化，可能对发育过程中核基因的参与活动创造了先决条件。同时也使得细胞形状和细胞之间的亲和力发生局域性变化，这些变化引起形态发生的运动，导致原肠和胚层的形成以及进一步的发育，直到整个有机体的形态结构建成为止。

在两栖类动物中，卵周质的一定区域具有特殊色素和花纹，叫做灰月区。早在 30 年代末，就有人指出灰月区对胚胎发育具有重要意义。后来克梯斯（Curtis）进行了灰月区的移植实验，发现割去了灰月区的周质并不妨碍细胞分裂，但却能阻止细胞分化和胚胎中任何结构的发育。如果对胚

胎再移植一个灰月区，使其具有两个灰月区，则可造成腹部结合着的联体双胞胎畸形。那些在正常胚胎中将要形成内脏的部分，由于移植灰月区的结果，就变成肌肉和神经细胞了。可以从这些结果推断，卵细胞表面的灰月区对基因活动具有重要的调控作用，并从而控制着胚胎的分化。

卵细胞表面所荷载的周质场能调控核内基因所荷载遗传密码的解译过程，决定着卵的发育方式、定向和极性，也就是通过卵裂面、卵裂方向、卵裂球的大小与移动等来决定未来胚胎的体轴、头尾、背腹等方位。由此可见，受精卵的发育信息不仅储存在细胞核和细胞质内，而且还有相当一部分储存在细胞表面的周质场。因此动物的发育信息可区分为基因信息、胞质信息和周质信息。发育过程的时空顺序就是由这三种信息的相互作用和相互制约而决定的。周质信息主要是位置信息，故被称为“定位密码”。在胚胎发育过程中，周质场的定位密码最早起作用，但也最早失去作用。以后，基因信息就起主导作用了。

六、脱分化：生命的 态

细胞的分化状态是靠基因调控机制来维持的。处于特定分化状态的细胞，其中特定的基因被激活，转录特定的 mRNA，从而合成特定的蛋白质，表现特定的生物学功能。如果细胞复制 DNA 的功能占优势，转录 mRNA 的活动就受抑制，细胞便表现为以分裂增殖为主的脱分化状态。

著名的美籍匈裔生物化学家和生物物理学家、诺贝尔奖获得者森特—乔其（A. Szent-Györgyi），现已年逾八旬，仍然身体健朗，思想活跃，老当益壮，置身于科学的最前线。1976 年他曾出版《电子生物学与癌——癌的一种新理论》一书，提出 态和 态的概念，在生物学界引起很大的兴趣。森特—乔其所说的 态和 态，前者就是细胞分裂增殖的脱分化状态，后者是表现各种特定生物学功能的分化状态。

如果 态的细胞失去调控进入 态，而且不能再恢复调控功能的话，就会成为脱分化状态的癌细胞。近年来发现的致癌基因（oncogene），它们编码“癌蛋白”，其作用机理很可能就是使得细胞控制 态和 态的调控机制丧失功能，从而使细胞进入失调的 态而发生癌变。

在植物的组织培养中，利用 2,4-D 等植物激素可以诱导植物细胞脱分化而进入 态，形成类似于动物肿瘤的愈伤组织。但这种 态可以受到调控。当愈伤组织转接至含有激动素等物质的培养基上时，又可以诱导出苗——进入 态。

七、结 语

由于 60 年代以来基因调控研究的发展，使人们对生物学中细胞分化这个重大的疑难问题的了解有了长足的进步。今天我们已经能够从原则上说，细胞分化是基因选择性激活和（或）抑制的结果。但在胚胎发育过程中，究竟是哪些基因被激活？其先后顺序如何？从基因的选择性激活到转录 mRNA 和转译蛋白质，

究竟怎样造成形态分化？目前所知仍然甚少。研究者们正从分子生物学的水平，应用分子杂交、DNA 分子克隆与重组技术等等进行深入研究。

如果高等生物的基因调控机制也能像对细菌的乳糖操纵子了解得那样清楚的话，细胞分化机理之谜也就能得到较完满的解决了。

（戴君惕）

山重水复，柳暗花明

——获得性遗传之争

一、何谓获得性遗传？

从拉马克提出获得性遗传，至今已近两个世纪，有关此问题之争几经兴衰，但在相当长一段时期里，争论的双方只是在打混战，而不是从什么是获得性这一根本问题出发。

先看看这样一个例子。家鼠中有个体大的大鼠，属名是 *Rattus*，有个体小的小鼠，属名是 *Mus*，这两个属的家鼠各有各的遗传性，彼此之间不杂交。这种个体大小性状是由不同的生长素所决定的，大鼠能产生效应大的生长素，从而个体较大。有人将大鼠的生长素基因，应用遗传工程的手段转给小家鼠，结果小鼠获得了个体大的性状，而且这种性状能一代一代地往下传。

小鼠新获得的大个体性状是不是获得性？上述例子是不是获得性遗传的例子？如果仅从字面上讲，上述例子不仅支持有获得性，而且支持获得性遗传。这正是以孟德尔遗传学为基础的现代分子遗传学的必然结果。如果这就是获得性遗传，那么在是否有获得性遗传的问题上就不存在任何争论。但是，反对获得性遗传的学派认为这不是获得性遗传，因为小鼠获得的首先是基因，其次才是基因表现的性状。支持获得性遗传的学派对此倒也不尽满意，认为此例中小鼠固然获得了遗传的新性状，但他们所指的获得性遗传却并不是这个意思。那么，矛盾的焦点在哪里呢？

获得性遗传是拉马克在 1809 年出版的《动物哲学》中首先提出来的。这位进化论的先驱坚定地反对“神创论”和“不变论”，不仅提出物种是逐渐由低级向高级演化的进化观点，而且还提出生物进化的动因——用进废退与获得性遗传。关于后者，拉马克认为：“在自然环境的影响下，也就是在某一器官更多使用的影响下或者在某一部分经常不使用的情况下，使个体获得或失去的一切，只要所获得的变异是两性所共有的，或者是产生新个体的两性亲体所共有的，那么这一切变异就能通过繁殖而保存在新的个体上。”关于用进废退和获得性遗传的最有名的例子是长颈鹿。长颈鹿以树叶为生，据化石记录揭示，古代长颈鹿的颈子比现代长颈鹿的要短得多。在生存竞争中谁的颈子长，谁就能吃到更多的树叶，而为了吃到更高处的树叶，长颈鹿就拚命伸长颈子，久而久之，它的颈子就真的更长了。这种长颈子性状就是获得性，它是通过“更多使用的影响下”产生的，而且这一性状还能一代一代往下传，每一代都在努力伸长颈子，这样颈子每一代都比上一代长一点，以致现代长颈鹿的颈子竟有长达 6 米的。归纳起来，拉马克认为：(1)生物的性状是由环境决定的，而决定方式是走向变异，即一定的环境刺激生物发生一定的变异，从而适应环境，更好地生存，这就是获得性。(2)生物在后天环境中获得的性状是可以遗传的，这就是获得性遗传。

定向变异如果在伸长颈子这一点上还解释得通的话，那么对生物保护色是如何产生的这一问题就很难解释了。枯叶蝶为什么是土黄色？长颈鹿身上为什么会有花斑？野兔为什么会在不同的季节有不同的毛色？这些问

题都不能用定向变异加以解释。此外，关于性状是怎样遗传的这一问题，拉马克当时完全不知，因为作为科学的遗传学当时还没有诞生。尽管如此，拉马克还是不失为一个伟大的生物学家，他第一次提出了系统的进化论。

二、获得性遗传的早期争论

达尔文接受了拉马克的获得性遗传观点，并在此基础上提出了自然选择学说。达尔文认为环境有两种作用，一是诱发变异，包括一定变异（即定向变异）和不定变异，二是选择变异。不定变异指的是非对应关系的变异，如环境对生物体色的作用就是产生不定变异。在环境的作用下，生物体有可能出现各种体色，从是否适应环境的角度看，有的适应，有的不适应。那些具有保护色的生物，能更好地隐蔽自己，能生存下来，繁衍后代。而其他体色的生物，很容易被敌害发现，不能保存自己而被淘汰，这就是自然选择。获得性遗传加上自然选择以后，各种现象基本上都能解释了。达尔文本人最伟大的贡献是提出了自然选择学说，他自始至终强调不定变异，强调自然选择，但他自始至终都没有放弃获得性遗传观点。

对于性状是如何遗传的，达尔文于 1868 年提出了泛生说。他认为：“身体的某些部分直接受到了新生活条件的影响，因而放出改变了的芽球，这种芽球被传递给后代，按照普通的观点，无论是对胚胎、幼体或成体，发生作用且变化了的生活条件为什么能引起可以遗传的变异，是不可理解的。……但是，根据我们的观点，我们只是假定某些细胞最后在构造上改变了，并且这些细胞放出了同样改变的芽球。”在达尔文看来，每一个能够各自独立变化的性状，是同一种物质载体连结在一起的。发育中的生物体的每一个细胞都能产生无数个细小的颗粒，它们是彼此不同的，负责一个个性状和器官的形成，这些颗粒即芽球，能以不同的速度各自独立地繁殖，每当细胞分裂时，它们就进入子细胞并能在身体里自由流动，在生殖时进入生殖细胞并传递给后代。如果某一种芽球的数目多于另一种芽球，那末由前者所决定的性状就愈突出，否则就愈不显著。达尔文不仅完善了进化论，而且完善了获得性遗传，以致获得性遗传广为流传，如海克尔，赫胥黎等都对此深信不疑，直至今日还有不少拥护者。

第一个出来反对“获得性遗传”的是德国生物学家魏斯曼。他做了一个在生物学史上十分著名的切断老鼠尾巴的实验，实验连续进行了 22 代，共做了 1592 只老鼠。然而，第 23 代老鼠仍然长有尾巴，也就是说老鼠后天获得的无尾性状不能遗传。1892 年魏斯曼提出种质说，认为生物体由种质和体质所组成，种质是可以世代连续的，而体质则是逐代死亡的，种质可以产生下一代的种质和体质，但体质并不能产生种质。切断老鼠尾巴只不过改变了老鼠的体质，拉马克所谓因用进废退而产生的获得性，也不过是体质的改变，所以它们是不遗传的。魏斯曼认为种质就是细胞核里的染色物质，胚芽或定子位于细胞核的染色体中，而“定子不是别的东西，而是生殖物质的活的要素，它存在于胚种之中，规定着身体某一具体部位的

拉马克是一个二元论者，带有唯心主义色彩。他认为生物有内在向上发展的正规道路，环境条件的作用使生物脱离了正规发展的道路，因而生物发生各种各样的变异，有关拉马克的评论已超出本文范围，故不作深究。

外形和特殊的发育”。即定子是性状的载体，每一个定子都是一个能够生长，繁殖的自我保持的实体，定子以特殊的型式存在于种质之中。

表面上，魏斯曼的定子理论和达尔文的泛生说似乎差不多，但把定子和芽球同身体细胞的关系加以分析后，就可看出它们间的重大差别了。泛生说认为，芽球受身体细胞的制约，改变了的芽球决定生殖细胞。而魏斯曼认为，定子是决定因子，由它们来决定身体细胞的性状。因此，由于使用或不使用，以及外界影响直接在体细胞中引起的改变，无法对种质施加同样的影响，所以是不遗传的。

1893年斯宾塞就获得性遗传问题与魏斯曼展开辩论，导致第一次“获得性遗传之争”。斯宾塞的命题是“或者存在获得性遗传”，“或者没有进化”，他完全回到拉马克那里，连达尔文的自然选择学说也被他抛到脑后了。为解释获得性遗传，斯宾塞提出了所谓“平衡法则”，认为有机体有一种趋向平衡的企图，从而陷于了目的论。由于当时达尔文的理论已广为传播，在辩论中斯宾塞理所当然地失败了。

早期的获得性遗传之争处于一种混沌状态，因为那时人们还不懂什么是遗传，遗传的是什么。人们看到的只是生物性状。而仅从性状角度看，遗传的例子千千万，不遗传的例子万万千。如果不搞清楚性状是怎样遗传的，那么关于获得性遗传的争论就只能停留在肤浅的层次上。拉马克不懂得有比性状更基本的东西，以为遗传就是性状的延续，所以他认为获得的性状都是遗传的。用斯宾塞的话来说就是：“能遗传的一定表现”，“不能遗传的一定不表现”。达尔文比拉马克看得深，知道性状是次生的东西，是由芽球衍生并通过芽球遗传的。但达尔文认为芽球是性状决定的，所以获得性能遗传。魏斯曼也认为性状是次生的东西，但基本的遗传载体是定子，基本的东西决定次生的东西，次生的东西不能决定基本的东西，所以获得性是不遗传的。早期争论时期可以称为遗传学前期。这段时期孟德尔的遗传学犹如一块被人忽视的璞玉，人们对遗传的认识模模糊糊，拉马克关于环境作用对生物变异的重要性的强调给人们留下了深刻的印象，魏斯曼关于有遗传载体的理论把争论引上了正确的轨道，但种质学说把生殖细胞与体细胞绝对化，不能解释植物的营养繁殖，所以，问题还远没有解决。

三、米丘林学派与摩尔根学派之争

获得性遗传的早期争论，由于人们对遗传认识肤浅，所以并没有大张旗鼓。在米丘林学派和摩尔根学派形成两军对垒以后，由于各个学派对遗传都有了系统的看法，有关获得性遗传的争论才处于高潮。米丘林学派继承了拉马克的学说，主张获得性遗传，但这个学派并不认为所有新获得的性状都能遗传。有时环境条件的改变对有机体的影响不深刻，不能引起有机体代谢类型的改变，此时的性状改变就是不遗传的。摩尔根学派继承了孟德尔的学说和自然选择学说，反对获得性遗传，但他们并不认为所有新出现的性状都不遗传，那些因基因改变而引起的性状改变就是遗传的。看上去两派似乎是相容的，实际上争论更尖锐、矛盾更复杂了。

米丘林学派承认性状遗传是有其基础的，如李森科所说：“遗传基础并不是某种特殊于躯体的，能自身繁殖的物质。凡能发育、能变成有机体的细胞，就是遗传基础。在这个细胞中，各种不同的细胞器的作用是不同

的，但没有一个细微部分是不发育的，不进化的。”他们认为：如果承认有遗传物质，那么有机体内的任何活的物质，包括有机体的每一个组成部分都是遗传物质。这就是说遗传性并不是某一种物质的特性，“根本没有，也不可能有专门负责‘遗传’的遗传器官，就如同没有专门的生命器官一样”。性状改变必然是生物体某一部分改变的结果，既然生物体的每一个组成部分都具有遗传性，所以获得性必定是遗传的。

摩尔根学派认为遗传的物质基础是基因，除基因以外的其他组成部分都是受基因控制、与基因相互作用的。基因决定性状，而不是性状决定基因。除非性状的改变是因基因改变而引起的，否则，新获得的性状是不遗传的。因为摩尔根学派认为有专门负责“遗传”的物质——基因，所以，实际上他们否定了米丘林学派意义上的“获得性遗传”。事实证明遗传基础的确是特殊于躯体的、能自身繁殖的物质，支持获得性遗传派再次败北。

在此期间定向变异再次被提出来，由于对定向变异及其遗传问题两派理解不同，所以争论得相当激烈。米丘林学派有很多定向变异的例子。如米丘林培育抗寒果树的实验，他通过把生长在南方的果树逐步北移，使果树在寒冷环境的作用下逐步获得抗寒性，成功地将杏北移了1400多里，将樱桃北移了1000多里。又如人工饲养的家禽家畜可以用定向培育的方法提高其经济性状，母牛通过不断挤奶，可以培育出产奶量高的品种。在微生物方面也有不少例子，抗药性细菌似乎就是在经常接触抗菌素的环境中出现的，耐高温细菌也是通过在高温条件下培养而获得的。在米丘林学派看来，这些例子和人体经常锻炼而肌肉发达一样显而易见，是一种定向变异。而摩尔根学派则认为，环境引起的变异一般为不定变异，有机体与环境的统一是定向选择的结果。如生长在南方的果树有喜温特性，但它也可能经突变而产生抗寒的后代。果树在北移过程中，大量实生苗抵抗不住严寒而被淘汰，只有少量获得成功，严寒不是培育而是选择了果树。根据同样的原理可以解释家禽家畜育种、抗药性或耐高温细菌的筛选，而锻炼导致肌肉发达这样的定向变异，由于不能改变有机体的基因型，所以是不遗传的。对这些例子两派似乎都能解释，所以争论维持了相当长的一段时期，其余波也曾影响到我国遗传学界。

现在看来，以往所认为的走向变异基本上是定向选择的结果。至少，“影印培养”证实抗药性细菌的产生就是如此，这一点已成定论。那么是不是绝对没有定向变异？有人用链霉素处理眼虫（*E. gracilis*），眼虫就永远地丧失了叶绿素，这种个体能在适宜的培养液里生长、繁殖，其后代也缺乏叶绿素。链霉素定向地诱发无叶绿素眼虫，但这不是拉马克意义上的定向变异，因为很难看出这种变异有什么适应意义。遗传工程也能产生“定向变异”，如前面提到的小鼠转变为大个体，但这也不是拉马克学说或米丘林学派所指的定向变异。

四、从分子生物学角度看获得性遗传

从分子生物学角度看获得性能否遗传，其焦点在于蛋白质和核酸的关系究竟如何。遗传学进入分子阶段后，基因的本质是核酸已被证实，任何能遗传的变异都是核酸的变异已被公认，获得性遗传的问题似乎不再具有争论的价值了。克里克的中心法则似乎给获得性遗传判了死刑。他认为遗

传信息只能按 DNA RNA 蛋白质的方向传递，只能是核酸决定蛋白质，而不能由蛋白质决定核酸。由于生物的一切性状都与蛋白质有关，而蛋白质不带遗传信息，既不能通过本身的复制传下去，又不能经蛋白质 核酸传递，所以，获得的性状是无法遗传的。反转录的发现证明有 RNA DNA 传递的过程，但这并没有推翻中心法则，因为 RNA 和 DNA 本来就可杂交，有的生物就是以 RNA 为遗传物质的，以 RNA 为模板合成 DNA 就不是那样不可思议了。

不过，反转录的发现并不是对“获得性遗传问题”完全没有影响。最初发现反转录仅存在于某些 RNA 病毒的生活史中。我国已故生物学家童弟周曾给金鱼卵注射鲤鱼的 mRNA，培育出鲤尾金鱼，似乎说明在鱼类中也有反转录。80 年代以来莱德 (Lader) 等发现在高等生物——哺乳动物的细胞中也有这种反转录过程，从而揭示这种反转录现象也许是普遍存在的。沙默斯 (Summers) 等对鸭乙型肝炎病毒的研究揭示了一个更有趣的现象，这种 DNA 病毒在繁殖时要经过 DNA RNA DNA，似乎走了一段弯路，然而却启迪人们思索生命的历程。是不是在生命早期先有 RNA 后有 DNA？是不是 DNA 原本就是由 RNA 合成的？这种历史的遗迹虽已淡漠，但却实实在在地存在，而在鸭乙型肝炎病毒的“个体发育”中，还出现了原始过程的重演。由此又会使人进一步思索 作为生物活性的体现者蛋白质又怎么样呢？

在蛋白质和核酸知识都已相当丰富的今天，可以清楚地看出，生命活动不能没有蛋白质，核酸没有蛋白质的帮助不能复制，只有核酸不能成为生物。原始生命可不可以只有蛋白质？福克斯 (Fox) 加热各种氨基酸的混合物得到了类似蛋白质的颗粒，这些颗粒具有原始酶类的活性，在水中和盐溶液中能聚集成具有双层膜结构的微球体，并能通过出芽来“繁殖”自身。这种微球体虽不能看成是原始生命，但表明原始生命有可能以简单蛋白质聚合体形式存在。而如果原始生命只有蛋白质，那么它的遗传信息是什么？怎样遗传？这些都是难以回答的问题。但是，近年来鲁特—伯伦斯坦 (Root-Bernstein) 提出了氨基酸配对假说，认为蛋白质也能携带遗传信息，并通过氨基酸配对复制遗传信息，而且原始生命系统是 RNA 和蛋白质共存的系统，信息过程是按图 1 方式进行的。反转录发现后，修改过的“中心法则”如图 2，氨基酸配对假说使信息过程变成了图 3。如果原始生命系统果真如图 1，那么在现存生物中一定会有蛋白质 RNA 的遗迹，就像在鸭乙型肝炎病毒中出现重演律一样。也就是说从分子生物学角度看，获得性遗传哪怕罕见，却应是存在的。然而，至今尚未发现有蛋白质 RNA 的证据。不过，近年来发现羊瘙痒病原体，或慢病毒 (prion)，证明是一种只含蛋白质的颗粒，引起了人们的极大兴趣。是不是这种病原体就是以蛋白质为遗传物质？其中有没有蛋白质 RNA 的过程？这些都不清楚，但却不排除其可能性。

图 1 图 2

科学研究往往会发现出人意料的结果，所以否定图 3 所示的信息过程也许为时过早。而从美学角度考虑，图 4 更为理想。当然，这些都只是猜测。符合美学理想的方式并不一定是自然界的真实。

图 3 图 4

不过，获得性遗传问题以后也许还会被讨论。但需要记住，把原始生命中发现的情况简单地外推到现代极其复杂的高等动植物，应该特别慎重。

（陈建华）

细胞癌变模式纵横观

——关于癌基因的科学思考

人类探索癌症问题已历经一个世纪的时间。随着科学技术的进步，大多数严重危害人类健康的疾病相继被制服，而癌症的致命威胁却依然如故，并突出地成为当今医学难题之一。尽管癌症问题牵动着千百万人的心，科学家们也绞尽脑汁，设法揭露其症结所在，但长期以来并没有取得根本性突破。原因何在？总的来说，是没有认识细胞癌变原理之真谛。一旦认识清楚细胞癌变原理，癌症问题的彻底解决也就指日可待了。

一、寻找突破口

出于解决问题的迫切心情，长期以来不少科学家根据各自的观察和研究，相继提出一些假说来解释细胞癌变的原理，如化学致癌假说、物理因素致癌假说、内分泌失调假说、病毒致癌假说等等。可惜这些假说中多半都只停留在表型改变的水平。分子生物学和分子遗传学的基本原理告诉我们，细胞的特性是由存在于细胞核的遗传基础物质——脱氧核糖核酸（简称为 DNA）所决定的，DNA 分子包含着生物所需的全部基因，不同基因按照正常的“时刻表”和“图纸”进行表达活动，产生出特定的蛋白质产物，再由这些蛋白质行使特定的生理功能，从而构成一定的遗传特性。由这一概念出发，在 1969 年有人提出了“致癌基因假说”，认为细胞内应当存在能引起癌变的基因，当细胞变到外界致癌因素的作用后这种基因就会被活化而活动起来并产生出癌性蛋白质，最终使细胞癌变。无疑，这一假说具有很大的吸引力，原因是它站在基因水平上运用逻辑推理来看待肿瘤问题。由于基因决定着一定的遗传特性，而肿瘤不过是一种变异的遗传特性，因此应当有一种相对应的基因决定着此种变异的遗传特性，这就是癌基因。这种推理既站得住脚，又令人耳目一新。可惜由于受到当时理论和技术的限制，科学家们很难开展基因水平的工作。70 年代以后，作为生物科学的前沿阵地——分子生物学迅速发展起来，特别是遗传工程（也叫基因工程）技术的发展和日趋完善，肿瘤分子生物学家有可能采用基因分离、转移和转染技术、DNA 重组技术、基因图谱分析技术和 DNA 序列测定技术及基因表达检测技术等现代技术直接在基因水平上研究癌基因是否存在，这就使肿瘤研究的水准提高到一个更高的层次，翻开了肿瘤分子生物学研究新的一页。

科学家是唯物主义者。面对浩瀚的生物世界，到哪里去找癌基因？在这里需要求实精神和创造性思维。就是说要面对客观事实，进行分类、比较和综合，找出突破口，以便长驱直入，击中要害。高等生物细胞的基因组容量太大了（它包含着 10^6 数量级的基因数目），而推测中的癌基因数目不可能很多，其在基因组中所占的比例微乎其微，几可忽略，故用这类细胞作为分离和鉴定癌基因的材料，犹如大海捞针，费力而无功，显然此路不通。科学家们把目光集中到逆转录病毒上，这类病毒的基因组极为简单，仅含三、五个基因，每个对病毒复制必需的基因的结构及限制酶图谱也比较清楚，更重要的是这些病毒的致癌性已被确认。因此，按照“致癌

基因假说”的设想，从这类病毒基因组中分离癌基因应能成功而且是最为简捷的途径。果然，经过一番努力，在 1976 年，第一个癌基因——Src 基因——分离成功了。Src 基因是鸡 Rous 肉瘤病毒负责诱发细胞癌变的基因，它在细胞培养体系中能使 NIH3T3 细胞转化（恶性变），并维持转化状态，若将转化细胞接种在裸鼠皮下，可生出肉瘤来。从那以后，连续从其他的逆转录病毒中分离出不同的癌基因，迄今共计 24 种，它们都是以单一拷贝而存在。事实证明，以逆转录病毒作为突破口成功地分离出癌基因，是思维逻辑和思维艺术的胜利，此中体现出了创造性思维的三大特征，这种思维过程从具体工作路线上使人们经历了从占有材料，分析比较材料，制订研究方案到取得成果的道路；在认识上，则使人们经历了从纷纭繁复的现象中由模糊的概念逐渐得到清晰的结论的过渡。

突破口既已打开，下一步的目标是证明人类和其他高等脊椎动物细胞中也存在癌基因，这是建立以癌基因为中心的细胞癌变原理模式的第一步。这一步是比较容易迈进的，因为逆转录病毒的癌基因提供了理想的探针，此种探针相当于一种很容易识别和探测的信号，人们可追踪它的行踪，所以只要将这些探针与人细胞 DNA 进行分子杂交，就可探测到这些 DNA 中是否也含有癌基因，结果如所预料，迄今在动物细胞中已鉴定出，凡逆转录病毒中存在的癌基因，它们也都占有，在人类细胞中现已鉴定出十几种。

人和动物细胞中存在癌基因的事实为细胞癌变原理的研究带来了新的曙光，同时也带来了更多更复杂的问题，甚至埋下了一些陷阱。一方面，由于癌基因的发现，使各种以表型改变为依据的假说和观点在基因水平上统一起来，这使认识由现象向本质方向前进了一步。另一方面，考虑癌基因在细胞癌变中的作用时，由于前者的存在和活动并不是孤立的，故必须考虑癌基因的调控以及表达活性的激活和表达产物对细胞由于多酶体系的作用等一系列问题，因此在基因水平上阐明癌变原理比单从形态或表型来考虑要复杂得多和困难得多，需考虑的因素也分解得更精细。这也许是科学研究中的思维反馈现象，这种反馈主要以可变因素复杂化和可分性以及疑点增多（即使用怀疑方法）的形式使原来已经简单化或似乎垂手可得的结论又趋于复杂化，造成新的困境。不过这种反馈也提供了新的信息：一旦渡过新的困难局面，离真理就更近了。为此，我们不妨对目前有关癌基因研究的复杂局面和主要困难略加讨论。

二、关于癌基因的激活机理

正常细胞中确实存在着癌基因，具体一点来说，癌基因人人有之，但得癌者毕竟是极少数，这说明在一般情况下癌基因是不活动的。有人观察到，在正常细胞中各种癌基因的表达产物的量极低甚至检测不出来，而在癌细胞中某种癌基因的表达产物的量以数十数百倍计增加，这如果不是癌基因被激活，是不可想像的。看来细胞癌变首先需要癌基因的激活表达。因此近年来有关癌基因的研究，主要是针对癌基因激活原理，这方面的文献资料极多，但对每一种所提出的机理也同时存在某些反证据，因此每一种激活机理在细胞癌变中的地位仍是值得探讨的问题。

最初提出的一种癌基因激活机理叫促进子（promoter）插入致癌模式。该模式认为，病毒只要以其所含的促进子插入到细胞癌基因的上游区，就

可启动癌基因表达出过量的产物，插入的位置要紧挨着癌基因，离得太远则无效。人受到病毒感染的机会并不少，但病毒促进子正好插入癌基因旁边的机率却相当小，故一般不会引起癌变。后来发现不少实验事实用该机制不能解释，比如小鼠淋巴瘤中病毒促进子可插入很多位点，但并不一定正好在癌基因上游区的邻近处；有的淋巴瘤细胞中虽然病毒促进子正好插入癌基 myc 的上游邻近处，但该基因并不增加表达；在有的情况下，病毒促进子插入到远离癌基因的静止区，却也激活了癌基因。因此就异源性插入物而言，促进子插入致癌模式恐怕只是其中一种解释而已。对于其他不同的实验证据，目前尚无较好的模式给予解释。有人认为，不论插入什么位置，异源性插入物都可视为诱变剂，它通过改变调节序列区域核小体或染色质的位置和结构，使癌基因与促进表达的因子接近和结合，结果使其表达大大增强。

有的作者把考虑重点放在癌基因本身的结构上。认为在正常细胞中癌基因是以原癌基因状态存在着，可能经点突变的刺激开始活化，变为活泼的癌基因。1982 年底，有两个实验室在互相封锁消息的情况下分别从两个膀胱患者的癌细胞中分离出表达的癌基因 C-Ha-ras1，经与正常细胞 C-Ha-ras1 比较，发现前者在第 12 位密码子发生了点突变，使原来编码甘氨酸的密码改变为编码缬氨酸，他们的结果真是不谋而合，当即引起国际肿瘤学界的轰动，据说上述两个工作还得了奖。这一发现的理论依据是突变学说。肿瘤成因的突变学说是一个老学说，很早以前就提出来了，但一直没有直接的分子证据，上述发现第一次为突变学说提供了分子依据。通常认为，C-Ha-ras1 第 12 位密码所在的短序列中含有鸟苷三磷酸（GTP）结合位点，在正常条件下该位点上面复盖着调节蛋白，此种蛋白阻碍了 GTP 与 GTP 结合位点的结合，使其不能表达。该序列发生后，由于改变了 GTP 结合位点的结构，除却了调节蛋白的阻碍，使 GTP 可结合上去，从而激活癌基因。对上述的解释也有人提出怀疑，并得到证据说明此种怀疑的正确性。有人证实，在同一个膀胱癌患者的癌细胞、正常膀胱细胞及其外周血白细胞中，C-Ha-ras1 第 12 位密码子都发生了相同的点突变。这一结果促使许多人提出了这样的疑问，癌基因 ras 的点突变是否只是一种多态性现象？基因多态性是很常见的遗传学性质，多态性是基因的中性突变所致，并不会对基因的功能产生任何影响。现在已经证明：有的癌基因确实存在多态性，不过其出现频率较低。至于癌基因的多态性是否使癌细胞对癌变因素变得敏感起来，目前还不得而知。

癌基因发生重排，包括插入、缺失、易位和扩增，都可能激活癌基因。在人伯基特淋巴瘤和小鼠浆细胞瘤中，癌基因被易位至免疫球蛋白重链基因区，但此种易位究竟是怎样使癌基因复活的，则众说纷纭。有的作者认为是癌基因易位后借用了免疫球蛋白的高效启动子之故；有的认为是受到远距离的增强子（*enhancer*）的刺激所致；有的则认为是易位引起癌基因自原先存在的隐蔽启动子发挥作用的缘故。这些原因都引起癌基因表达的过度。但是，有的作者并不满足于以上的解释，他们认为既然基因重排的形式可以多样化，则其激活机理亦应多样化，果然，后来陆续发现某些瘤细胞中癌基因易位的地方并不是免疫球蛋白基因区，而是别的地方。有时候癌基因在细胞基因组中并不发生易位，但可在不同位置上大量扩增（这叫基因放大），使其由正常情况下的单一拷贝变为多拷贝，从而使表达产

物以相应倍数增加。有时候癌基因也可因基因的部分缺失或插入而被激活。有的作者特别强调这种激活类型，认为缺失和插入都将使癌基因产生出结构异常的产物，它们才是真正的癌性蛋白质。不过，到目前为止，就癌基因重排而言，到底这些重排是改变了癌基因结构占主要地位还是增强其表达占主要地位仍不能定论。

关于癌基因的协作问题，是多年争论中冒出来的一个新事物、新想法。围绕癌基因问题，一开始就出现论争，而论争的关键问题之一是如何使用 NIH3T3 细胞系的问题。3T3 细胞是小鼠成纤维细胞，经传代培养成系，但在培养多代之后，它们逐渐失去了正常细胞的特性，向恶性方向过渡但又未达到恶性细胞的程度。因此，这种细胞已属不正常细胞，用这种细胞作为鉴定癌基因的实验体系是不够完善的，它不能真实地说明癌基因在正常细胞中的作用及其在细胞癌变中的作用。另外，在人体或动物体内，癌的生长具有组织器官及细胞类型特异性，用 3T3 细胞系鉴定出来的癌基因却不能说明这一点，这构成了与事实不相符的现象。再有，从肿瘤临床和病理过程来看，癌组织的形成需要一个较长的发展过程，其中包括癌前期（增生期），癌变期和癌形成期等。按照这个时间表，有理由认为细胞癌变并不是说变就变，而是经过多阶段变化过程完成的。这实际上是由于细胞在处理外环境中的有害因素或不测因素发生差错，而使错误逐渐累积及恶性循环造成的后果，也可以认为是量变到质变的过程。基于这种推测，不少人认为，为了反映癌基因对正常细胞癌变所起的作用，应当以正常的原代细胞或第二代培养细胞作为实验体系为宜。出于上述想法，有人设计了一套实验方案，得到了很有意义的结果：用膀胱癌细胞系 EJ 的癌基因 C-Ha-ras1 可很容易使 3T3 细胞转化，若换用正常的第二代大鼠胚胎成纤维细胞 REF，则不能发生转化作用，这不仅说明 3T3 与 REF 在性质上有区别，也说明在正常细胞中单个 C-Ha-ras1 不足以引起癌变。癌基因 myc 的情况也同上。作者进一步将 C-Ha-ras1 和 myc 一起加到培养的 REF 中，奇迹出现了：REF 出现了转化作用，转化的 REF 可在裸露皮下诱发出肿瘤。这一结果说明了癌基因之间进行协作可能是正常细胞癌变的必经之路。这一发现改变了过去在探讨细胞癌变原理时只考虑单一癌基因作用的局面，使实验体系更接近自然状态。后来还发现许多肿瘤的形成都与 ras 和 myc 的激活表达有关，据此有人认为，癌基因并不具有组织特异性，故不同肿瘤的发生可以通过相同的分子机制即同一种癌基因的激活来实现。在癌基因的协作中，不同的癌基因其激活方式和时间次序不同，这又支持了癌变的多阶段学说。在癌基因协作中，不同癌基因其功能是不同的，以便达到分工协作。如 ras 是负责癌变功能，但仅有它还不足以使细胞癌变，一旦 myc 被激活就会使细胞获得克隆优势，形成不受控制的生长增殖细胞系，使 ras 诱导的癌变作用得到了充分的条件。我们不能就此认为问题已经解决。有人提出，上述体系中只涉及两个癌基因的作用，因此充其量只能说明癌变的两阶段性。而在实际上，不少系统肿瘤的形成显然多于两个阶段，如上皮细胞癌变过程比成纤维细胞癌变过程更长更复杂。在后者的情况，究竟涉及多少癌基因的协作？另外，在癌变的多阶段过程中是否一定要多种癌基因参与？是否存在癌基因与其他因素的协作的可能性？这些问题虽然是以上述的实验结果引伸出来的，但似乎比上述实验结果本身更令人深思。

也有人别出心裁，认为一定的癌基因可以通过其产物从细胞表面将信

息传递给另一个癌基因使其复活，引起细胞癌变，并用实验证明了确实存在这样的机理，由于作用的程序是先从膜开始最后达到细胞核，故将这种作用方式称为序贯致癌作用。

这里还要提及“游击机制”。大家知道，单纯疱疹病毒能引起细胞转化，与宫颈癌的关系很受注目。但长期以来，人们很难在癌细胞中发现该种病毒的蛛丝马迹，它们是怎样引起细胞癌变的谜一直未能揭开，因此科学家们就起了个“打了就跑机制”或“游击机制”的名称作为上述癌变过程的代名词。意思是，这种病毒像游击队，钻到细胞里攻击目标后就跑了。目标是什么？现在有的学者认为是癌基因。疱疹病毒会就地取材灵活作战，通过合适的方式激活癌基因后消失。是否事情真是这样还有待进一步研究。

三、癌基因产物的功能及其在癌变中的可能作用

在细胞癌变中，如果癌基因的作用起主导作用的话，除了癌基因必须激活这一前提外，更重要的是要知道癌基因的表达产物如何发挥作用。在癌基因研究中，目前已把重点转移到这一方面上来。但问题很多，目前在大多数问题上尚处于探索阶段，还未能形成某种观点或假说的“毛胚”。

根据现在已知的产物种类，主要有四类：酪氨酸特异性蛋白激酶、膜糖蛋白、结构蛋白和核内结合蛋白。谈论最多的是第一类产物的作用。如 Src、abl、tp53 和 trk 等癌基因的产物都是酪氨酸特异性蛋白激酶，以 Src 产物（称为 pp60）为例，pp60 可嵌入细胞膜并使底物磷酸化，改变疏水区的氨基酸顺序和膜的性质，有利于细胞转化。另外它也使一种与细胞骨架有关的蛋白质 VN（Vinculin）的酪氨酸残基磷酸化，使 VN 丧失调节微丝集合的能力，导致微丝的网状结构中心不能形成而使细胞形变。当然，上述解释不一定是全面或正确的，只是作为一种解释而已。以上解释的一个明显的缺陷是没有和相对应的基因变化事件联系起来，即癌基因产物酪氨酸激酶如何反过来触发形成转化细胞克隆优势的基因事件，更没有指出这种产物的作用是如何由细胞膜及通过什么传递途径将恶性信号传递到核内。

还有一种癌基因的产物是细胞膜上糖蛋白。这种产物很能引起人们的兴趣，因为膜表面糖蛋白可以认为是细胞的“天线”，是接受外界信息的关键部位之一。“天线”的质料不同或数量不同或结构不同，自然接受信息也不同。问题是癌基因制造出来的“天线”究竟与正常的细胞“天线”在上述诸方面有什么不同？只有搞清这个问题，才可能进一步回答“什么样的‘天线’接受什么信息”的问题。另外，有的人想得更精细，认为癌基因制造出来的“天线”只是粗产品，最后安装在细胞表面前要经过一个加工过程，以便去掉一点什么和增加一点什么，变成特殊性质的“天线”，因此了解这个加工过程往往比了解“天线”的粗制过程更重要。

一般而言，科学发明和创造具有一定的可预见性和必然性，但也有不少发明创造并不如此，癌基因与生长因子的关系就是这样。1983 年中，有一组研究人员在用电子计算机对癌基因产物与别的各种蛋白作比较时，无意地发现癌基因 sis 的产物与血小板生长因子 N 端结构极为一致。这是第

一次发现癌基因产物与一个已知功能的蛋白质因子相对应，并由此作为一个生长点，引出一个完全崭新的领域——癌基因与生长因子的研究。生长因子是促进细胞分裂和增殖的物质，这对于细胞转化是一个需要考虑的因素。以上的偶然发现使人们的眼界顿开茅塞，意识到癌基因通过生长因子—生长因子受体—细胞内信息传递途径的作用很可能在诱导细胞癌变中起重要的作用，因为这一条信息传递线路不仅会接受异常的信息，而且还会干扰和破坏正常的信息传递和对异常信息起二级、三级或多级放大作用，从而使细胞无法按正常的信息指令行事。按照这样一条思路，有些实验室相继发现有的癌基因产物是作为表皮生长因子受体起作用；有的是通过细胞表面的蛋白受体如转铁蛋白受体、血小板生长因子受体或胰岛素受体等而发挥作用。这些癌基因产物作用的分子过程之一是增加聚酸肌醇形成，该物可以介导几种激素、神经递质及生长因子的信息传递。当聚磷酸肌醇系统被激活后，就释放出两种作为第二信使的产物，第二信使再引起一系列生理特性的改变。目前由于以上工作获得了进展，人们关注的热情正在势头上，估计会有更多的人参加到这一研究领域中来，特别是作为生长因子或生长因子受体或信息传递介质的癌基因产物，到底是作用于另外的细胞起作用还是与细胞本身的受体和传递介质直接起作用还是二者兼而有之，是颇为吸引人的课题。

尽管关于癌基因产物的生物学作用的研究已经取得了一些进展，但离问题的解决仍有一段很大的距离。首先，目前对很多癌基因的产物的基本性质还缺乏了解，如那些作为核内结合蛋白的产物的作用，基本上一无所知，而这类产物的作用又是不可忽略的；其次，由于细胞总是处于多酶反应体系的动态平衡之中，在这个平衡网中任何不平衡因素所引起的影响必然是连锁反应，经过一系列连锁反应后要么使不平衡因素的作用消除，达到新的动态平衡；要么不能达到新的动态平衡，使细胞发生代谢紊乱，导致最终的恶性变。因此，在考虑癌基因产物的作用时，似应把视野再放开阔一些，努力搞清这些产物对细胞内各种代谢过程的影响及其相互间的关联。只有做到这一点，我们才能仔细推敲癌基因产物作用的真实情况，并作出正确的评价。

四、癌基因表达的调控问题

癌基因的开放和表达，是细胞癌变的一个必要前提条件。与其他基因一样，癌基因的表达亦应受到严格调节控制，一旦失去正常的调控就会导致严重后果。这种看法是有根据的。最明显的事实就是细胞癌基因的高度保守性。所谓保守性，是指癌基因从人类进化的最早期至今一直都被保留着。众所周知，人和其他生物在进化过程中会不断丢弃不利因素，发扬有利因素，使自己变得更加适应环境和更加强大。癌基因为什么历经漫长的进化变革过程而经久不衰呢？这个事实本身就说明它们并不是一无是处，应有有用的一面。在这种思想的启示下，有些学者发现，某些癌基因确实在正常生理过程的某些阶段起重要作用。最好的例子是胚胎发育和肝再生。在人足孕胎膜和羊水细胞中以及胎盘和滋养层细胞中，某些癌基因高度表达，这对于营养胎儿，保证胎儿快速生长是必要的，但具有严格的细胞类型特异性。这时期，如果这些癌基因在纤维母细胞或其他细胞中高度

表达，则会引起骨肉瘤和纤维母细胞转化。这里也提出这样的问题：为什么在胚胎期与胚胎发育有关的一些细胞类型虽然癌基因高度表达而不会癌变，而另外的细胞类型当癌基因高度表达后就会引起癌变呢？回答是前者受到了正常生长的调控，后者却逃脱了正常的调控。肝再生也需要某些癌基因的表达，一旦再生完成即停止表达，故正常调控机制是相当精密的。此外，人类在胚胎期之后癌基因即处于关闭状态，成为实际上的“沉默”基因，不表现任何活性，在一定限度内不会被不良因素所激活。为什么存在这种现象呢？这也是天然调控机制起作用的缘故。而这种调控我们不妨将其比喻为“开开关”，需要时就开，不需要时就关。问题是，为什么有的成人会再次打开癌基因的开关？开开关者为何物？开放成人癌基因与开放胚胎期癌基因为什么会产生性质上的根本差别？这些问题真令人难以捉摸，至少在今天是这样。基因表达的调控（包括癌基因表达的调控）的极端重要性人们早就意识到，并在不同生物种属系统中试图建立调控系统。基因表达的调控系统相当于交通调度指挥中心，通过各种途径和方式维持和保证正常交通而不出事故。一旦调度指挥失灵或混乱，结局就不堪设想。但是，在生物体中，基因表达的调控很难研究，因为活细胞代谢途径太复杂，参与调控的因素必然很多，要在这么复杂的体系中理出一个头绪并证明属于调控系统，确实是不容易的，特别对于真核细胞更是如此。难怪有些研究者甚至觉得研究这个问题无从下手。对于癌基因的调控问题，目前仍所知甚少。首先，须了解癌基因的调控序列在结构上的特点以及在不同状况下的变化特点，在此基础上才有可能针对一种特定的系统寻找调控的物质基础。同时，不久前有的学者设想，既然正常情况下癌基因只有极低水平的表达，甚至检测不出表达，想必在细胞基因组中存在一种特定的对抗癌基因的序列，这就是抗癌基因（anti-oncogene）对癌基因调节的调节概念。不言而喻，这一概念具有潜在的理论意义和实际意义，它由传统的调节序列（调节基因）的概念脱颖而出，又充实了传统概念的内涵。此外就实际意义来说，如果搞清抗癌基因与癌基因这一对矛盾事物间的相互依存和制约关系，也就可能为癌变原理的阐明及制订癌变预防措施奠定基础。尽管目前对于这些问题的认识还只处于一种模糊状态，但人们似乎已经意识到这是一个有意义且重要的研究方向。

五、不结束语

毫无疑问，癌基因的研究和发现是肿瘤分子生物学的重大事件，这首先是由于它是在分子生物学和分子遗传学发展基础上发展起来并符合和解释了某些生物学基本现象的领域。因此癌基因作为与癌变相关的特定基因，无论在理论上或实际上都是可信和站得住脚的，提出并证明癌基因的存在本身就是一项创造性成果。其次，对于癌的成因，过去各派学家曾提出众多假说，分子生物学家则将这些假说归纳为癌变原理的两大观点：基因突变观点和基因表达调控失常观点。由本文的介绍可知，癌基因的概念已把它们有机地统一起来了。癌基因研究为揭开细胞癌变原理开辟了新途径，使本来纷争的局面开始有了共同的基础，并使研究方向集中化、趋向化。但在这一新的层次上，新的问题又接踵而至，把本来已简化的问题又复杂化了，人们的认识似乎经历着模糊——集中——模糊的循环，不过每

一循环都使人们的认识水平提高一步。因此，通过癌基因的研究建立一个以癌基因为中心的细胞癌变模式并非绝对不可能，但欲建立这样的模式，至少应具备以下三个基本条件：进一步搞清癌基因的激活机理，特别要搞清癌基因表达产物的结构与功能以及对细胞内代谢平衡的影响；在离体和整体体系建立起与癌变相对应的癌基因表达的调控体系；用人工合成或基因工程方法所得之模拟癌基因应能重现的结果。这些条件看起来似乎是苛刻的，但却势在必行。

当然，也不能排除另一种可能性：癌基因所涉及的事件只是癌变过程中所涉及到的基因事件的一部分而非全部，这种可能性使癌基因的研究进一步复杂化，因此当我们在考虑一个主要倾向时应同时考虑到那些可能被掩盖的倾向，这样才会逐渐走向科学真理。正像有的科学家所说的那样，寻找癌变原理之真谛也许要冒从一个错误走向另一个错误的风险。因为面对我们的是一个未知数，欲解答它，必须提出假说和理论，而一旦发现这些假说和理论是错误的（至少不适用），就可能孕育出新的、仍是错的假说和理论。不过，人们会在错误的探索中接受经验教训，为最终解决肿瘤问题作准备。

（方福德）

探索高低温微生物生命的奥秘

——高适应性微生物的研究成就

自然界的微生物资源是极其丰富的，但目前对特殊环境条件下的有用微生物类型研究得很少，对它的开发利用还处于萌芽状态，而这些微生物处在特殊的生态环境中有着特殊的生物学意义和经济意义。作为一种“特殊的微生物资源”不论在理论上或实际应用上都需要积极地研究、开发和利用。在人的控制下这类微生物将会为人类创造或提供更多的物质财富。但有好些问题还有待人们去探索：(1)自然界有些什么样的高适应性微生物？(2)有些微生物为什么在不寻常的温度条件下能够生存？(3)为什么这类微生物在极端高温或低温下保持它们的强大生命活力和适应力？(4)它们的特殊性质究竟受什么因子所制约？(5)它们在生命演化中占有什么样的地位？(6)它们在生产实践上有何经济意义等等。

为了探索这些奇异生命的奥秘，首先对高适性微生物的概念应有所了解。所谓高适应性微生物指的是在特殊环境——高低温、强酸、强碱、高浓度溶质以及干旱、高压等条件下或只能在这种条件下生存、繁殖的微生物叫做高适应性微生物，其中嗜高温微生物或嗜低温微生物正是本文要探讨的主题。自然界确实有这么一些微生物能在高温(100 以上)或在低温(2 以下)的特殊环境下生存，并保持它的生命活力，人们把这类微生物称为适高温或适低温微生物。它们能够或需要在这种特定环境条件下生存以及进行其代谢活动。人们会想到：这些微生物会有它自己本身独特的适应机构和特殊的代谢功能，它们在特殊环境里表现其分布特性以及自己生命活动的规律性。揭示它们生存的特殊性及其规律性正是生命科学工作者要探索的奥秘。

一般说，在自然环境中不论它处于何种气候条件或何种生态环境必将有各种不同类型的微生物的分布，根据它们对温度反应力的不同，把嗜热微生物分成四大类(表1)。

表 1 嗜热菌分类

微生物	典型代表	生长温度()		
		最低	最适	最高
中温	大肠杆菌 (E . coli)	< 20	20 — 37 37	约 < 40 约 40
耐热	凝结芽孢杆菌 (Bacillus coagulans)	< 30 15 — 25	55 < 55	65 55 — 60
嗜热	嗜热脂肪芽孢杆菌 (Bac . Stearothermophilus)	> 30 30 — 45	< 55 55 — 65	> 65 65 — 75
极端嗜热	嗜热栖热菌 (Thermus thermophilus) Methanoth ermuspervidus	> 40 45 — 48 60	> 65 75 83	> 75 85 97

从表 1 可以看出, 尽管嗜热菌的不同类群都有它本身需要的温度范围, 但近年来对适温菌的研究又有新进展, 不仅发现有超高温微生物的存在, 而且发现超低温微生物的存在。根据微生物对不同程度温度的反应能力或适应能力又可把它们分成七类: (1) 极端嗜温微生物 (extreme thermophiles 或 caldophilic organisms), 最适温大于 65 °C, (2) 嗜中温微生物 (mesophilic microorganisms), 最适温为 40 °C, 有的认为 37 °C; (3) 专性嗜温微生物 (obligate thermophiles), 即在中温条件下不能生长; (4) 兼性嗜温微生物 (facultative thermophiles), 既能在高温下, 又能在中温下生长繁殖; (5) 嗜冷微生物 (psychrotrophic microorganisms), 20 °C 下不能生长, 通常在 0 °C 时生长得很好; (6) 兼性嗜冷微生物 (facultative psychrotrophic microorganisms), 既能在 0 °C 下又能在 20 °C 以下生长; (7) 超高温微生物 (superhighthermophiles), 最适温为 85 ~ 105 °C, 如嗜中性热变形菌 (*Thermoproteus nentrophilus*), 最适温为 85 °C; *Pyrodicticum occultum* 19, 最适温 103 °C, 有的种在 250 °C 或更高些的温度亦能生存, 低于 75 °C 则不生长。

这些嗜高温微生物不论是原核系统或是真核系统对温度的反应力表现出它的多样性, 现根据 T. D. Brock 等的工作, 并参考其他的工作, 把嗜温微生物列成一个总表 (表 2)。

从表 2 可以看出, 某些细菌对高温或超高温有很强的适应力。无胞壁的嗜酸热枝原体能在 55—87 °C (最适温为 70—75 °C) 范围的酸性环境里保持其生命活动, 嗜热硫化叶菌和硫杆菌、硫球菌等这些化能无机硫氧化菌能在 > 60 °C 环境里生存; 有一种红藻当在 > 45 °C 时亦能生存; 160 °C 高温处理土壤中藻类, 如绿球藻目中的 *Klebsormidium*、鱼腥藻、颤藻均观察到它们的生长。甚至还发现某些特殊生命类型在极端高温或超高温 (105—250

以上) 环境里生存, 这确实是生命界最罕见的现象。它们为什么能在这样极端高温条件下显示出奇特生存能力? 与生命的发生、演化有何关系? 这些问题有待进一步深入研究。客观事实必然引起人们的思索和联想, 既然某些微生物能在这种特殊环境下生存, 那么完全可以推测地表的深处, 甚至在其他星球上可能有类似的细菌存在。

然而, 这些嗜热菌不论处于什么样的特殊环境, 也会遭受噬菌体的侵袭, 只是作用程度不同而已。如嗜热栖热菌的噬菌体便侵染嗜热菌。从经济意义来考虑, 对那些高温腐蚀菌来说, 噬菌体的存在是有益的; 对那些产生有价值产品如淀粉酶等嗜热菌来说, 噬菌体的存在是不利的。问题的关键是, 这些菌体为何对高温环境有强大的适应力? 近年来, 一些科学工作者对某些常规嗜高温菌的分子遗传学及高温适应机理有过一些探讨, 如自养热甲烷菌、嗜热硫化叶菌、产甲烷细菌等某些嗜高温菌中发现有质体存在; 在嗜热菌属中发现有隐蔽质粒; 嗜热芽孢杆菌找到抗药性质体; 嗜热脂肪芽孢杆菌 (60 °C) 含有多种抗药性隐蔽质粒。因此人们认为, 它们的嗜热性可能与菌体内存在着某种染色体外遗传因子有关, 还有待进一步地研究和证实。另外, 这些嗜高温特性是否与该菌产生热稳定性酶和胞膜的特殊性质有一定相关性, 这种酶是什么样的酶, 这种膜具有什么样的特殊构造等问题均需要作深入的研究。

目前, 科学工作者对微生物耐热的分子机制, 如日本大岛泰郎 (陈中

孚译)《好热性细菌》一书所述,主要应从内因和外因两个方面作某些阐明。

内因的代表是各种酶蛋白。酶以及许多蛋白质的耐热性是由其本身的结构特性所决定,热稳定性起因于微妙的结构差异,这种差异一般隐藏在种间或属间的氨基酸排列顺序上的差异之中。

某些酶蛋白如磷酸甘油醛异构酶(两个亚单位组成)和好热菌 PS-3 的 ATP 酶在亚单位之间相互作用乃是耐热性的基础之一。TRNA 分子内 G-C 对的增加而变得稳定。TRNA 分子内有 60 多个氢键,只要再增加三个氢键就能说明好热菌 TRNA 对热稳定的大部分原因。表明内部结构上微妙变化会使得热变性温度(T_m)发生变化。

外因有保护因子型和生化修饰型这二种类型。温泉水是天然的保护因子,如噬菌体 YS40,由于温泉水中存在有 NaCl,还有 Mg^{++} , Ca^{++} 等二价离子,热稳定性就增大。四价锡能取代 NaCl 和二价金属离子的作用,成为人工的保护因子。在高温下由于四胺的量增加,蛋白质合成系统变得更加耐热(未严格证实),这是热诱导型保护因子机制的代表性例子。

表 2

嗜温(热)微生物

属 (或某些种)	近似最适温 ()	近似最高温 ()
真核生物:		
1. 真菌有 15—20 个属包括根霉, 青霉、鬼伞 (coprinus)、腐殖霉 (humicola) 和 dactylar-ia 等	45 ~ 50 取决于种	50 ~ 60 取决于种
2. 原生动物的几个属包括 cercosulcifer 和纳氏虫属 (naegleria)	40 ~ 45	50 ~ 55
3. 藻类中有红藻即 cyanidium	45	55
原核生物:		
1. 蓝藻有 8—10 个属, 包括聚球藻属 (syne-chococus), 鞭枝藻属 (mastigocladus), 颤藻属 (oscillatoria)	40 ~ 65 取决于种	50 ~ 75 取决于种
2. 细菌和放线菌有 15—20 个属, 其中包括 chloroflexus 芽孢杆菌 (baacillus), 硫杆菌 (thiobaCillus), 热枝系体 (thermoplasma), 栖热菌 (thermus)、硫 化叶菌 (Sulfolobus), 热微菌 (thermomicrobium) 嗜热无机养甲烷球菌 (methanococcusther- molithotrophicus) 古细菌中生长最快的一种。嗜酸嗜 热硫球菌 (sulfosphaerellusther-moacidophilum) 嗜酸热枝原体 (thermoplasmaacidophilum)	40 ~ 70 取决于种 65 70 70-75 (55-87)	50 ~ 80 取决于种 55-78 80 87
3. 高温细菌, 其中有 热解芽孢杆菌 (bacilluscauldolylicus) 多孔热芽孢杆菌 (bac.caldotenax) 嗜高温栖热菌 (thermuscauldophilus) 水生栖热菌 (thermusaquat icusE-1)	70-85 (低于 40 ~ 45 不长) 70-80 70-80	100-105 100-105 95 95
4. 超高温细菌 火热甲烷菌 (methanothermusfervidus) **多孔热变形菌 (thermoproteustenax) 黄杆菌 (flavobacteriumJAM1030) **嗜中性热变形菌 (T . neut roproteus) **热变形菌 (thermoproteussp . H3) **热变形菌 (thermoproteussp . Bn5) **海岸田盘高温菌 pyrodictiumoccnltumPL19	83 65-97 88 85(80-95) 85 90 88 85 105	97 90 105

*此属包括嗜酸嗜热菌

**这些菌系原始古细菌, 兼气, 化能自养型, 其中热变形菌 (H3、Bn5)

利用

硫 pH=5.5 - 6.5 产氧量可达 80%。

通过生化修饰反应而获得耐热的类型为第二类型, 并又细分为组成型与诱导型。蛋白质分子内所含的二硫键与肽链延长因子 (EF-Tu) 的热稳定

有关，而且在细胞内常常由于特定酶的作用使 CYS 残基氧化而形成二硫键，这就能成为组成型修饰反应机制的一个代表性例子。诱导型修饰的代表性例子是 TRNA 中的胸腺嘧啶被硫化。

除了上面提到的极端嗜高温或超高温微生物外，自然界中也存在着某些嗜冷性微生物，它们对 20 的温度特别敏感，很适于 0 下生长繁殖。如北极藻类的针丝藻，蓝藻中的粘球藻，真菌中的北方黑盘菌 (*Sclerotinia borealis*)，酵母类的隐球酵母属南极白冬孢酵母 (*Leucosporidium antarcticum*) 等，都是嗜冷性微生物。细菌类群中的嗜冷性菌更多，如假单胞菌、纤维粘菌属、黄杆菌属、冰状节杆菌 (*Arthrobacter glacialis*)、嗜冷微球菌、嗜冷芽孢杆菌等等，有的细菌如硅酸盐细菌能长期在液氮-198 的环境中保持生命力。这些微生物其嗜冷性或兼性嗜冷性所表现的生理、生态特性，还尚需作进一步地研究。如果这类嗜冷微生物能产生某种毒素的话，则无疑对食品冷藏事业是一个潜在的威胁，这是值得注意的。

除了上两类嗜热、嗜冷微生物外，还有一类既嗜冷又嗜热的兼性微生物，它具有更重要的潜在意义。这是最新提到的硅酸盐细菌 (又称矽酸盐细菌，也有人称为钾细菌)，它具有兼性的特殊功能，既能在高温 (160 和阳光辐射) 下，又能在超低温 (长期在液氮-198) 下维持其生命力。

早在 1912 年，K. Bassalik 首先从蚓肠道中分离出这种细菌，1939 年苏联学者 B. Arekchagpog 等直接从土壤中分离到了这种细菌，并命名为硅酸盐细菌 (*silicatic bacteria*)。一度曾把它作为一种细菌肥料，用于生产实践。

硅酸盐细菌杆状，两端圆形，长 4~7 μ ，横切面 1.2~1.4 μ 。从其特殊功能和生物学意义或经济意义来说，主要有如下九个方面的特性：(1) 自养性。所需食物来源主要是无机物，因此大部分称岩养微生物 (粘液杆菌)，从砂子、岩石中吸收硅 (氧化硅、硅酸盐、铝硅酸盐) 来维持自己的生命活动；(2) 对高低温有惊人的适应性。即 -198，+160 以及在太阳辐射条件下仍能维持其生命力 (说明该菌不怕紫外线)；(3) 吸收大气中的碳和氮，从矿石中吸收磷和硅，利用矿物析出磷、钾，有利于植物吸收。因此，常把它作为一种细菌肥料来使用。当把这种菌与磷钙石或磷灰石粉混合制成合剂磷肥时，更有利于提高作物产量；(4) 由于这类菌的生命活动过程而破坏岩石和矿物，能使不长一草一木的硅酸盐沙漠变成土壤。因此，土壤的形成与该菌的生命活动有关系，土壤的进化是这类细菌积极参与下作用的结果，也是这类菌作用的产物；(5) 提供潜在的蛋白质来源。该菌含有 65% 的 17 种必需氨基酸和 18 种矿物元素组成的蛋白质，为扩大饲料蛋白开辟了新的来源，安全性有所保证；(6) 可用于预防人的矽肺病。当此菌进入肺内时，能使含硅尘埃微粒变成可溶状态，然后将其从机体内清除出去；(7) 由于该菌破坏岩石，并具有使之转变成可溶解状态的能力，故可用它来强化采铜、铝和其他有色金属。因为该菌能够“吃掉”矿石中大约一半的硅，这样，铜、铝或其它有色金属土矿中的金属含量可增加一倍；(8) 增加钢筋混凝土梁、陶瓷和其他制品的强度。因为该菌能把晶状氧化硅和硅酸盐转变为能够进入化学反应的硅酸，则如同普通的氧化硅添加剂一样，能提高水泥或陶瓷的强度和耐水性，有利于建筑工业与陶瓷工业。总之，这种对高低温具有双重适应力的生命体在微生物界是奇特的，是值得研究与开发的。然而，它们为什么具有这种双重的特定

功能？是受什么特定因子所控制？目前还不清楚，有待进一步研究。

上面只是从细胞水平或个体水平阐述了某些微生物对高低温的适应能力，有些科学工作者还深入到亚细胞成分来研究耐高温性能，并在探索其生命起源问题上取得了某些进展。最近日本学者发现一种原始细胞状球体蛋白，在高温高压的试管内很容易从氨基酸中获得。将一些氨基酸放在 150 试管中使之发生反应，4 周内就可以产生球状蛋白质。当选用氨基酸为甘氨酸、丙氨酸、缬氨酸和天冬氨酸等时，将其水溶液放入容器内，在 200—250 ，130 个大气压条件下反应 6 小时，也得到类似结果。此球状蛋白质呈中空状，外膜是由氨基酸连接形成的，分子量约为 2000 个多肽。联系到自然条件下的情况，在 266 个大气压，300 的太平洋底热液喷出口附近，找到超高温“细菌”的存在。从自然界发现的超高温生命形态以及实验中找到的高温蛋白，或许有可能证明地球形成初期的高温、高压环境是生命诞生的条件，这对揭示生命起源有重要意义。

目前，对高温菌酶系及其应用的研究十分活跃。日本、意大利等国家嗜温芽孢杆菌产高温淀粉酶进行了研究，如 *Bacillus* sp. 11-TS 分泌嗜温淀粉酶，酸性芽孢杆菌在酸性环境中（pH=2）产生高活性 α -淀粉酶（MW=54000），在 65 24 小时内可水解水溶性淀粉（糖苷键）约 34%，并获得麦芽三糖和麦芽糖。美国嗜热脂肪芽孢杆菌生产高温 α -淀粉酶，使淀粉完全转化为右旋葡萄糖。另一种菌——地衣芽孢杆菌，尽管能在 100—110 增溶性淀粉中很好完成最大产量，但活性、pH 值范围等方面不如前者。Sonn - Feitner 等发现一些极端嗜热芽孢杆菌，最高生长温度为 80 以上，生产淀粉酶的半衰期为 1—2 小时。一种嗜热栖热菌生成的蛋白酶叫热细胞溶素，80 时，半衰期为 30 小时，比另一种蛋白酶要长 30 倍。从日本温泉分离的水生栖热菌，产生两种胞外蛋白酶，前者为碱性蛋白酶，后者为中性蛋白酶，其活性比美国的嗜热栖热菌 Gk24 要高 10 倍，这些酶在工业应用上有着重要意义。通过基因工程技术，将嗜热栖热菌亮氨酸合成基因转移到大肠杆菌，成功地生成了嗜热酶，非常引人注目。新西兰科研工作者也对嗜热菌中的酶进行了研究，并正在用遗传工程和实变选育办法来扩大细菌酶的生产力。为了使这些酶保持高温的催化活性，苏联科学工作者根据共聚方法，将酶（如 α -胰凝乳酶）固定在聚丙烯酰胺凝胶上，使它在 70 条件下仍能有效地工作，加热时也不致使分子析开，这是酶工程研究的重要进展。美国康奈尔大学科研工作者用遗传工程技术改造菌株获取新能源，研制了高温纤维素细菌。即把热单孢菌编码纤维素酶基因植入到大肠杆菌中，使它能在 65 时仍有消化纤维素的作用，其目的在于把这种工艺应用到使农业度纤维降解为糖，然后再由糖转化为乙醇，这样，使得有可能利用“工程菌”在高温下大量生产酒精，既节约了能源，又利用了废物，为能源建设开辟了新途径。美国 Wisconsin 大学找到了嗜热纤维梭状芽孢杆菌和热氢硫酸梭状芽孢杆菌，在 60 下发酵纤维素，从发酵液中可以生成 5% 的酒精。这样，利用高温菌直接扩大了对废纤维素的利用，并获取了新的能源。

综上所述，不论嗜高温的或嗜低温的高适应性微生物，它们在生产上、学术上均有重要价值，特别是极端高温菌，在整个生命演化中占有相当重要的地位。从这些高温真核生物和原核生物，特别是超高温微生物包括亚细胞大分子生命体系，所表现的对高温的适应能力来看，尽管适应程度不

同，但它们在生命演化过程中，是否也反映其“性”行为呢（那怕是最原始的）？同时，如果在分子水平上探究它们的遗传性，那么在遗传物质 DNA 的

顺序性以及“遗传物质”的交流等方面是否有共同性呢？加强对这些特异微生物生命体系本质的研究，不仅在理论上，而且在生产实践上均具有十分重要的意义。

（罗明典）

