

第二次创世

总有一天，人们会问，上帝的基因是什么？

——题记

1976年，中国一位科学家声称：“分子遗传学，所谓基因工程，都是资本家的御用学者们为了抬捧其主子所设立的，是为其愚民政策服务的。其实，这样的遗传学永远不会，也不能与生产实践产生任何联系。”在今天，我们读到这段话时除了痛感悲哀还能再说什么？在20世纪后半期，分子生物学取得了革命性的进展，它已经颠覆了人类思想深处的某些基本观念（比如关于生命、物种的概念），而且正在渗透进每个人的生活。也许在不久的将来，我们中华民族的传统神兽——如龙、凤、麒麟（龙头、鹿角、狮眼、虎背、熊腰、蛇鳞、马蹄、猪尾）——会走出传说，成为真实。永远也不可能想像科学将会创造出什么样的奇迹，这些奇迹使有的人认为揭开生命之

谜指日可待,而分子生物学时代也被形象地称为‘创世纪第八天’。

基因工程 (gene engineering),亦称**重组 DNA 技术** (recombinant DNA technology)、**分子克隆** (molecular cloning),是当代生物技术的核心。其内容包括 DNA 的分离、鉴定、扩增等技术及应用,而最惊人的是,它可以把不同物种的遗传物质进行重组、克隆,从而创造出新的物种。这种对上帝工作的逾越引起了一些人的不安。

一切都得从基因开始说起。

基因 (gene) 一词是丹麦生物学家约翰森 (W. L. Johannsen) 于 1909 年提出来的,那几年正在对 1900 年被重新发现的孟德尔 (J. G. Mendel) 遗传学说进行重新诠释。基因被用来表述孟德尔的‘遗传因子’,它在形式上更简洁,但也只是‘一种计算或统计单位’,约翰逊反对‘基因是物质的、具有形态特征的结构’的说法。

是美国遗传学家摩尔根 (T. H. Morgan) 及其学派对果蝇的开创性研究说服人们相信,基因就在染色体上。最初的果蝇是被香蕉引来的,用牛奶瓶养在著名的“蝇室”里。1910 年 5 月的某一天,红眼果蝇突变出一只白眼果蝇,从而开启了细胞遗传学时代。1920 年,温克勒 (Winkler) 将基因和染色体 (chromosome) 两词缩合成一个新词 genome,意指染色体

上的全部基因,中译为‘基因组’。

但是在 1953 年以前,人们并不清楚基因究竟是什么。它与生物性状之间的关系、基因变异的机制如何?一些技术上的局限和错误的观念让人们走了一段弯路。遗传学家们普遍认为蛋白质的多样性足以承载纷繁的遗传信息,而核酸“也许是在功能上最不重要的细胞组分”。

第一个证明 DNA (deoxyribonucleic acid) 就是遗传物质的肺炎链球菌实验由美国细菌学家艾弗里 (O. T. Avery) 在 1944 年完成,但混入 DNA 的少许蛋白质让人们有了争辩的理由。有趣的是,8 年后另一个由美国噬菌体小组完成的赫尔希-蔡斯实验(用噬菌体感染大肠杆菌)得出同样的结论时,虽然 DNA 中含有更多的蛋白质,人们却接受了。

与此同时,年轻气盛、桀骜不驯的沃森 (J. Watson) 和克里克 (F. Crick) 相信“伟大的事情就在角落里”,综合结构、生化、信息三个学派之所长进行探索,最终于 1953 年 4 月在《自然》上发表了 DNA 双螺旋结构模型。正是这个完美的“非存在不可”的模型开创了分子生物学的新时代,把遗传学深入到了分子水平。

接下来的 10 年几乎是“爆发式”地解决了以前梗塞在遗传学家们心头的难题。20 世纪 60 年代初已经能够这样描述从 DNA 到蛋白质的表达机制:DNA 双螺旋解开,其中一条链在

RNA (ribonucleic acid)聚合酶的作用下,根据碱基互补配对原则转录成信使 RNA (mRNA),以此为模板,转移 RNA (tRNA)把细胞质中游离的氨基酸送到核糖体(rRNA和蛋白质组成),形成的多肽链叠合成三维结构,蛋白质就被‘翻译’出来了。这个过程由克里克总结成‘中心法则’:DNA→RNA→蛋白质。其核心就是遗传信息不可能从蛋白质转移出来,用进化论的语言来说,就是获得性遗传是不可能的(实验表明,培养基能改变微生物内蛋白质的合成,如果蛋白质能传出遗传信息,那么环境就可以影响DNA了)。克里克的“法则”多少有些不幸;1970年发现了逆转录现象修正了中心法则,近年发现的一些其他现象表明中心法则并非是绝对真理。

1966年,遗传密码的完全破译为经典分子生物学时期画了个完美的句号。双螺旋结构出来后,碱基顺序与氨基酸的对应关系成了关注的焦点,又是克里克提出并证实了“三联体假说”:3个碱基“字母”决定一个氨基酸“单词”,再组成一个蛋白质“句子”。实验表明,遗传密码除了线粒体和叶绿体等个别特例外,在所有的生物中都适用,所以有句话说:“在细菌中适用的在大象体内也适用。”

这个时期,人们心目中的基因就是DNA片段,是相当完美的,没有重复,没有缺漏,但后来发现的事实表明大自然和

人类的完美观念可能有些不同。正如原子还有内部结构一样,基因也有个丰富多彩的世界。有的基因可以移动甚至在不同的染色体之间跃迁,有的像结疤一样重复,有些“垃圾基因”在转录成 mRNA 时被剪辑掉了,有的基因互相重叠,有的似是而非、看起来像正常基因但没有活性。除了结构基因外,还有调节基因和操纵基因,控制着蛋白质的合成过程。人类基因组计划完工后,还发现基因只有 3.2 万个左右,大大低于 10 万的估计,而蛋白质不知道有多少(至少在 10 万种以上),所以“一个基因一个蛋白质”的经典说法又被推翻了。基因远比原先想像的要复杂,况且还可能有人会挑战似地问:我脾气大,请问管脾气的基因是什么?

遗传机制得到阐述,并且遗传密码被破译之后,分子生物学就进入了科学哲学家库恩(T. Kuhn)所说的“常规科学”时期。常规技术的发展也许与基础理论的建构所需的思维方式不太一样,但其创造性并非就少了。相反,正是 20 世纪 60 年代到 80 年代所发展的生物技术把分子生物学带入了大众的视野,这里不再有科学理论与日常生活以及一般人与科学家的分野,大家都回归到人的本位,都必须对新技术带来的突兀的生命、伦理和社会问题进行重新审视。

基因工程,简单地讲就是指在体外将遗传物质(DNA 分子或片段)插入病毒、质粒或其他载体分子,从而构成遗传

物质的新组合,并将之导入寄主细胞进行繁殖的技术。工具酶的发现和 DNA 的分离、鉴定、重组、克隆、测序等技术的发明是基因工程的支撑骨架。

20 世纪 50 年代初,科学家们在对噬菌体的研究中发现了一种所谓‘寄主控制修饰’现象,就是说,一种大肠杆菌的噬菌体只对同种大肠杆菌情有独钟而不能感染另一种大肠杆菌。瑞士微生物学家阿尔伯(W. Arber)研究此一现象之后提出“限制—修饰酶”假说,认为寄主细胞内存在两种酶——限制性内切酶和甲基化酶,前者能识别和降解入侵的噬菌体 DNA 的某些专一切点,后者正好相反,识别出这些切点就把它修饰一番,使之逃过限制性内切酶的攻击。1968 年,限制性内切酶被分离出来。

限制性内切酶的特点是能够识别 DNA 分子的特定位点,并将 DNA 分子的双链交错地切断。这种酶被喻为“分子剪刀”。它对分子生物学的意义不久就由美国微生物学家内森斯(D. Nathans)阐明。

内森斯说,“1969 年春,我接到史密斯教授的信,告诉我他刚发现的 Hind II 具有内切酶的性质,这立即引起我的兴趣并推动我去钻研有关文献。我想到如果一个肿瘤病毒的 DNA 能够被这样的酶所切割,如果每一个切下来的片段能分离,那么就有可能来研究每个片段的生物功能。”他是第一个

用内切酶来研究基因的结构和调控的人。

到目前为止,已经发现了 500 多种限制性内切酶。1967 年,几个实验室几乎同时发现了 DNA 连接酶,能够把 DNA 链的切口重新拼接起来。内切酶和连接酶,一个剪刀,一瓶糨糊,它们的发现可说是奏响了基因工程的序曲。

另一个突破来自于载体的研究。人工剪切、拼接的 DNA 片段不具备自我复制能力,一个绝妙的想法就是把它弄进寄主细胞进行繁殖,这就需要某种具有自我复制能力的 DNA 分子来挟带目的基因(外源 DNA 片段),这种负担特殊使命的 DNA 分子叫‘基因克隆载体’。最初荣获‘基因搬运工’称号的是质粒,发现于 1965 年,它是细菌中染色体以外的一种 DNA 环形小分子,能够自由进出细菌细胞。为了科学研究,质粒需要一点牺牲精神,因为要接受改造,使它易于导入、标记、提取、纯化。后来发现噬菌体也可做载体,而大肠杆菌是殷勤好客的寄主。

在 20 世纪 60、70 年代还发展了一些重要技术,使基因的分离和鉴定变得容易了。最引人注目的是电泳和分子杂交技术。

从 20 世纪 20 年代开始,离心分离技术得到应用,原理很简单,就是利用各种大分子在快速离心过程中不同的沉降速度来分离样品和计算分子质量。1961 年的体外蛋白质合成就用

到了这项技术。受离心速度的限制,它对更小的分子·(片段)就有点力不从心。电泳被发展来取代离心技术。

利用电场分离不同带电物质并不是一个新想法,19世纪初电泳技术就被用来分离离子。带正电的游向负极,带负电的游向正极,不同运动员(离子)的泳动速度不同,这就是它们的身份标记。直到1937年,瑞典的蒂萨留斯(A. Tiselius)用电泳技术分离了血清中的几个蛋白质成分,人们才如梦初醒。原来电泳技术也可以这么用呀。蒂萨留斯获得了1948年诺贝尔化学奖。这个事实说明了电泳技术在分子生物学研究中的重要性,但直到20世纪50年代初放射性元素(^{14}C)示踪技术的引入才使电泳的使用‘平民化’了。

适用于不同的样品,电泳有很多花样。概括地说,电泳就是在均一的缓冲液中以孔径大小不同的琼脂糖或聚丙烯酰胺凝胶等作为支持物,使不同样品(蛋白质、氨基酸、核酸等)分离成独立的区带,然后用染色法或显色法使其现身。或检测已知成分的存在与否,或鉴定新分子的基本特性,或分离不同的分子,凝胶电泳在分子生物学研究中无处不在。

更有意思的利用分子杂交来捕捉DNA分子片段的想法,这项技术于1975年成就在索仁(Southern)手中,这就是后来以他的名字命名的DNA分子印迹技术(Southern blot)。如果你能理解,假如有一对夫妇非常恩爱、形影不离,当你找到

妻子时也就找到了丈夫 那么你就不难理解分子杂交。在大量分子中鉴别目标分子,利用的是生物分子之间的一种互补性,最典型的是 DNA 双链之间的碱基配对(A-T, G-C),或者抗体和抗原之间,如果你种了天花疫苗,它肯定对付不了肝炎。基于这个原理,索仁提出了分子印迹技术,主要包括 DNA 的提取、酶切、电泳分离、转移(印迹)、杂交和显影等过程。

对这些看似分离的技术将要产生的生物学上的意义,早在 1958 年塔特姆(E. L. Tatum)就说过:“伴随着对发育和分化过程中基因的功能与活性的调控更加全面的理解,这些过程能被更有效地控制和调节,不仅是去除发育过程中生物体结构或代谢上的错误,还可能产生性状更为优良的物种……这可能会是一步步地进行 从体外生物合成更好更有效的酶开始到相应的核酸分子的生物合成,进而将这些分子引入到生物的基因组中(通过注射、通过使用病毒、或通过一个类似转化的过程引入到生殖细胞中)。”到现在,基因工程也还没有走出这段话的范围,而它的开创则是以 1972 年美国分子生物学家博格(P. Berg)的 DNA 杂合分子实验为标志的。

严格说来,博格的 DNA 重组实验所用到的技术没有一项是新的,但他进行了创造性的综合。他本意是想把猴病毒 SV₄₀ 外源基因载入哺乳类动物细胞,因为 SV₄₀ 能把自己的

DNA 插入寄主基因使之发生癌变。但当时没有分离出来哺乳类动物细胞,所以他转而把 SV₄₀ 和入噬菌体 DNA 进行拼接(酶切后再用聚合酶和连接酶修饰补齐拼接处),形成 DNA 杂合分子,杂合分子能在细菌中自我复制。这是第一个用来自不同物种的 DNA 分子在试管中进行的遗传物质重组实验。在论文中,博格清楚地描述了这种遗传处理的双重前景:将基因引入到特定的物种中去,以及利用细菌将在体外产生的杂合 DNA 分子进行扩增。

后一种想法由美国分子生物学家科恩(S. Cohen)和博耶(H. Boyer)变成了现实。当时博耶在研究限制性酶,科恩在研究质粒。1972年11月,科恩在夏威夷听到博耶的一次演讲,他立即意识到用博耶的酶所切下的任何 DNA 片段都能插入到一个由相同的酶所切割的质粒中,而且可以不考虑物种。他们安排了一次面谈,在一家熟食店里,一边嚼着咸牛排三明治,一边决定合作,这个决定将对科学、医学和商业活动产生意义深远的影响。

他们从大肠杆菌中取出两种质粒,带有各自的抗药基因,重组后的质粒进入大肠杆菌体内,新的大肠杆菌便能同时抵抗两种药物,而且它们的后代也保持了这种特性。把葡萄球菌 DNA 插入到大肠杆菌质粒上进行了类似的实验,证明外源基因同样有表达特性和遗传特性。杂合质粒在大肠杆菌中自我复

制,同时大肠杆菌本身每 20 分钟也分裂一次,于是在很短的时间内就可能生成不计其数的外源基因的拷贝。这种生物复制就是分子克隆,为实验研究提供了无穷无尽的遗传材料,这样,分子生物学家们就不会有‘巧妇难为无米之炊’的遗憾了。

科恩和博耶的重组实验成功后不久,新技术所引起的忧虑就被公开地提出来了。人们觉得应当认真对待遗传重组实验可能存在的危险。外源基因(特别是高等生物的基因)中可能含有未激活的潜在致病病毒(博格所用的 SV₄₀ 就是一种致癌病毒),这些病毒 DNA 一旦被整合到细菌基因(比如大肠杆菌,人是它的天然携带者)中,就可能被广泛传播,在得以防止之前就造成大规模的灾难。另一个更有远见的担心是对人类基因的操作可能会导致某种‘精英主义’的优生学政策的出现。

这些忧虑并非没有一点道理,而博格表现出了一个负责任的科学家的高风亮节。他在致《美国国家科学院进展》和《科学》杂志的信中赞成对这类研究实行部分禁止,并呼吁召开一个会议以确定某种限制性条件。他自己在讨论结果出来之前主动停止研究一年。

会议于 1975 年 2 月在美国加州的阿西罗马举行,以会议上提出的建议为基础,美国国家卫生研究院(NIH; national

institute of health)制定公布了一个重组 DNA 研究准则。用高度危险的病原体 DNA 进行的实验被彻底禁止,而其他的实验必须设立各种等级的物理屏障的生物屏障,以防止基因重组生物进入人体或逃逸到外界环境中。

1976 ~ 1977 年辩论达到高潮,之后渐渐平息, DNA 重组技术所展示的巨大医学应用前景的诱惑毕竟不是那么容易抵挡。

1974 年,科恩和博耶的一项实验表明,来自非洲爪蟾的 DNA 被导入大肠杆菌中并进行复制后,能够转录出相应的 mRNA 于是利用细菌来合成高等生物蛋白质的可能性变得更为现实了。

20 世纪末科技换美元的传奇故事最先发生在博耶身上。在他与科恩的实验成功后不久,他和年轻的斯旺森 (R. Swanson) 打上了交道,这位前生物化学家现在是个风险投资者,狂热地想用分子生物学来发财,他直截了当地问博耶 能不能利用 DNA 重组技术在细菌中生产出外源蛋白质,尤其是人类所需的蛋白质 大多数别的人都说基因剪接的商业应用是 10 年以后的事,但博耶不这么悲观,他回答说 “yes”, 于是一个全新的产业随之展开 生物技术产业。

博耶借了 500 美元加盟由斯旺森创办的遗传工程技术公司 (Genentech),不用说这是第一家生物技术公司。他们的眼光

先盯上了胰岛素,糖尿病就是由于缺乏这种蛋白质引起的,很多人死于此病,而大约有 10% 的患者对使用牛和猪的胰岛素产生副作用。但在生产胰岛素之前,他们决定在人促生长素抑制素(简称 SS,缺乏它就会患巨人症)上牛刀小试一下。1977 年 8 月他们取得了成功,首次在人体外制造出了人类蛋白质。SS 在大脑中含量甚微,提取 5 毫克的 SS 需要 50 万个羊脑,而用 DNA 重组技术只需要 9 升的大肠杆菌培养液(只值几美元)。

胰岛素的研制是在疯狂竞争的气氛中进行的,最后还是 Genentech 拔得了头筹。1978 年 8 月 24 日一大早,科学家们得到了少量人胰岛素。这个历史性的实验结果,以及 Genentech 与制药行业的龙头老大 Eli Lilly 公司签订协议的新闻同时发布。后者于 1980 年 4 月投资 8000 万美元建立了制造胰岛素厂,但获得药物许可证花了些时间,直到 1982 年 10 月以 Humulin 为商品名的人胰岛素终于得到允许面市。

新兴产业得到的关注可以从股票市场看出。1980 年 10 月 Genentech 推出了股票,令人震惊的是在交易开始的 20 分钟里每股价格从 35 美元暴涨到 89 美元!1981 年,博耶也上了《时代》杂志封面,可谓是名利双收。有人预言超过比尔·盖茨的巨富必定出现在生物经济(bioeconomics)领域。虽然最初的狂热之后生物技术产业有过几次波动,但从长远看,它

的光明前景是毋庸置疑的。在 21 世纪时,对于促进新药开发和揭示疗法的化学本质而言,生物技术可能是最重要的技术源泉。

在微生物中,特别是在转基因 (transgenic)动植物中,不同物种间在亿万年中形成的天然屏障被打破了,科学家们扮演了类似上帝的角色,这个‘赞天地之化育’的工作为人类带来了福音,当然也不无隐忧。

一棵完整的植物植株可以由单个细胞在体外培养长成,如果在这单个细胞的染色体中整合进新的遗传信息,就可以得到“转基因植物”。自 1983 年以来,已有 100 多种转基因植物问世了。比如,1987 年,美国科学家将萤火虫的萤火虫素基因转入烟草植物细胞,长成的植株通体发光。还有延迟成熟的番茄、生产人血清蛋白的马铃薯、抗虫抗病毒作物、耐除草剂作物……人们觉得不用‘革命’二字不足以形容转基因技术对农业生产的巨大影响。

对于转基因动物,则‘基因手术’的对象是受精卵,导入了外源基因的受精卵被植入动物子宫,转基因动物由此而生。第一例转基因动物出现在 1982 年。美国科学家帕尔默特 (R. Palmiter) 和布林斯特 (R. Brinster) 利用显微注射技术把大白鼠的生长激素基因注射到小白鼠的受精卵中,结果得到了比正常小白鼠个大的白鼠。其他的转基因牛、羊、鸡、鱼等

应运而生。

一些转基因动物的乳腺组织被用来生产药用蛋白,比如人凝血因子、人血红蛋白、人生长激素等等,这类动物被称为“活”的生物反应器或生物制药厂。人体器官移植的希望也寄托在转基因动物身上,以避免免疫排斥效应。猪与人类有很多生物学上的相似性,被视为理想的异种器官供体,而且猪与人的亲缘关系较远,引入致命病原体的机会比灵长类要小些(艾滋病病毒就来源于黑猩猩和猿猴类动物)。

转基因技术也为研究某一基因在发育过程中的功能、其表达与调控等提供了有效手段,这为疾病的研究开辟了新的路线。2001年1月,美国科学家宣布世界上首只转基因猴安迪(Andi)于2000年10月诞生,给喧嚣的舆论又“引爆了一颗生物氢弹”。研究人员在安迪的人工受精卵中附加了一种绿色荧光蛋白标志基因,这种蛋白在受到特定波长的光照射时会发出荧光。如果将附加基因换成某种疾病基因就可能找到新的治疗方法。研究者沙滕(G. Schatten)说:“我们可以简单地引进老年性痴呆病的基因,加快针对这种疾病疫苗的开发研究。因为猴相比实验鼠与人更近似,这样我们可以从少量动物身上获得治疗人类疾病更好的答案,同时会加快分子医学的发展速度。”

第一例成功的基因治疗于1990年9月在美国完成。一个

女孩的白细胞缺乏 ADA 基因,她将因失去免疫功能而注定丧命,但科学家挽救了她。她的白细胞被抽取出来放进培养液中,去除了毒性的鼠逆转录酶携带着正常人的 ADA 基因插入白细胞中,修复后的细胞被重新输入小女孩体内。“她获得了 10 亿个细胞,注入过程花了 28 分钟。整个临床过程并不是很顺利,但这标志着人类基因治疗的开始。”主治医师的话点燃了人们对基因治疗的热情。

基因工程的迅猛发展还得益于一项叫做聚合酶链式反应 (PCR) 的技术的出现。虽然有人认为这只是一项技术,但鉴于其重要性,作为发明人的穆里斯(K. Mullis)还是获得了 1993 年的诺贝尔化学奖。PCR 的命名参考了核链式反应,因为它的呈指数扩增的原理。在特制的缓冲液中加入需要扩增的模板(一段 DNA)和起引导作用的引物(一段寡核苷酸),加热使模板双链分开(变性),降温(退火),引物与模板发生互补结合(复性),聚合酶指导缓冲液中的核苷酸使引物不断延长而与模板结合成双链。“变性—复性—退火—延伸”的过程每重复一次,目的基因的拷贝就增加一倍。1983 年 4 月的一个周五晚上,穆里斯在开车去度周末的路上突然想到这个主意,他停下车;开始在脑海里考虑着 2 的连续次方:2, 4, 8, 16……我模糊地记得 2^{10} 大约是 1000,而 2^{20} 大约是 100 万……”

在不用细菌的情况下，PCR 能在试管中复制无数个 DNA 拷贝。“DNA 样本可来自医院的组织标本，来自人的一根毛发，来自犯罪现场的一滴干血迹，或者来自 40000 年前冰川中被冻死的长毛象。”PCR 改变了遗传病、癌症和传染性疾病的检测方法，也改变了亲子鉴定和法医分析。罪犯听到这个难免会有点寒心。

基因工程的另一个重要内容是基因组测序，英国生物化学家桑格（F. Sanger）和美国的吉尔伯特（W. Gilbert）、迈克斯（F. Maxam）功不可没，他们分享了 1980 年诺贝尔化学奖。

之前，桑格已经因测出了胰岛素的氨基酸序列而获得过一次诺贝尔奖，但那种把蛋白质敲成碎片再重新拼接的方法不适合 DNA，“测定 DNA 的主要问题是它实在太大了”。新的方法（“我研究生涯的顶点”）是桑格在研究 DNA 聚合酶时发现的（1977 年）。聚合酶能够将一个个核苷酸（用 ATGC 代表）组装成与模板 DNA 互补的链，与原模板形成完整的双链。桑格发现加入双脱氧核苷酸（终止子）后链合终止于特定的位点，比如加入 A³²P，链合反应终止于 A 处，用电泳分离显影就可得知模板 DNA 中所有 A 的位置。其他核苷酸也如法炮制，再加整合即可测出整个 DNA 的序列。吉尔伯特和迈克斯的化学修饰法类似于此。

双脱氧链终止法和化学修饰法一次只能读几百个碱基，但

人基因组有 30 亿个,何年何月才能读出 直到 20 世纪 80 年代, DNA 自动测序技术取得突破性进展,测出人的整个基因组序列就不再是遥不可及的事了。

人类基因组计划(Human Genome Project, HGP)与曼哈顿计划、阿波罗计划并称为 20 世纪三大科技工程,对人类未来意义重大。从 1985 年始,前后辩论了 5 年才最后上马,美国能源部在推动整个计划中起了重要作用。

这个计划最初提出时大多数人不是不感兴趣就是反对,反对者认为投入太大,而且大部分碱基没有功能,测出来也没有意义。如果不是一批科学家的大力倡导,这个计划可能就此搁浅。1986 年 3 月 7 日,杜尔贝克(R. Dulbecco)在《科学》杂志上发表了《癌症研究的转折点——人类基因组的全序列分析》一文,指出癌症与基因有关,但零敲碎打的方式看来是肿瘤十年计划失败的原因,必须从整体上研究人类基因的结构和功能。全序列分析计划的意义“可以与征服宇宙的计划媲美,我们也应该以征服宇宙的气魄来开展这一计划”;这样的工作是任何一个实验室难以单独承担的项目”。

这果然不是单独行动。1988 年 4 月,国际人类基因组组织(HUGO)成立不久,英法两国启动 HGP 工程。1990 年 10 月 1 日,美国国会正式批准这一计划,预计在 15 年内投入 30 亿美元进行人类基因组分析。1999 年 9 月,中国获准加入

该计划,负责 1% 的测序任务。

HGP 最终目的是要研究人类基因的结构和功能,但不可能一蹴而就。在得出基因图谱之前必须完成碱基测序,而限于测序技术(一次最多只能测 1000 多个碱基对),只好化整为零,先把染色体打碎,分别测序,再按特定的‘标记’把分散的 DNA 片段一个挨一个邻接起来,去掉重叠部分即是整个基因组了。DNA 序列测出后怎么确定特定的蛋白质基因呢 用逆转录法。逆转录酶由 mRNA 合成互补 DNA (cDNA),以 cDNA 为探针与基因组 DNA 进行分子杂交,从而鉴别出与转录有关的功能基因。

HGP 在白热化的竞争中进展。1998 年,美国温特(C. Venter)成立了塞莱拉(Celera)遗传信息公司,宣布要在 3 年内完成测序工作。官方 HGP 不得不加快进度。温特说自己“一直在扮演催化剂的角色”。

2000 年 6 月,人类基因组工作框架图完成。2001 年 2 月,人类基因组图谱初稿完成,并分别发表在英国《自然》(官方 HGP, 15 日)和美国《科学》(塞莱拉公司, 16 日)杂志上。2003 年 4 月 14 日,人类基因组序列图全部完成,至此历时 13 年、耗资 27 亿美元的国际大合作圆满结束。刚好赶在 DNA 结构发表 50 周年前 10 天,为了纪念,美国国会将 4 月定为“人类基因组月” 4 月 25 日为“DNA 日”。

除了发现人类基因组上含有大量重复序列和 1/4 区域是没有基因的荒漠地带外, HGP 得出的最惊人的结论是人类基因只有约 3. 2 万个, 大大少于原来估计的 10 万个, 也比稻谷的 6. 2 万基因为少, 难道说一粒稻米比爱因斯坦还要复杂、聪明吗? 发表的基因组是混合序列, 来自塞莱拉公司的 5 个自愿者和国际计划组的 10 来个人, 他们代表着世界上的主要人种。结果发现, 不同个体的 DNA 只有 0. 01% 的差异, 基因组公布之日对种族主义者来说是“非常难过的一天”。

人类基因组测序的完成只是基因组研究的第一步, 现在功能基因、蛋白质、生物芯片、生物信息学的研究正热火朝天, 后基因组时代和系统生物学时代已经开始。谁也不能肯定对生命之书的解读将把人类引入何种境地, 惟一可以确定的是生命比人们想像的要深邃得多, 每个人都可能有不同的解读方式。人们必须认真对待基因污染、基因掠夺、基因专利、遗传歧视、基因隐私权……早在 1998 年 11 月, 联合国就批准了《人类基因组宣言》, 充分反映了生物技术对经济、伦理、法律和社会的影响的紧迫性和严肃性。

生物技术不光是可能颠覆我们的观念, 还会彻底改变我们的生理和生活。已经发现了几种能使蛔虫延长生命的基因, 进化论者对于干预衰老的前景不无惊讶, 2003 年 2 月《科学》上一篇文章呼吁公众对这个主题进行讨论。基因工程菌可以降解

废物,寄托着环保的希望。对在极端条件(高温、干旱)下生长的作物的培养可望让撒哈拉沙漠遍布绿叶。从 1996 年至今,转基因农作物面积增加了 30 倍,已占全球耕地面积的近 20%。一种欧元纸币中含有大量转基因棉花纤维,引起风波。更有甚者,1996 年日本和俄国科学家启动了一个“猛犸再造计划”,要在几万年前的猛犸老祖的遗体中提取 DNA,实现“侏罗纪公园”据称,俄罗斯政府已经同意拨出西伯利亚 160 平方公里的土地作为未来的猛犸生态保护区……

从以上列举的几个实例,不需要多大的想像力就可以预料到在不远的将来我们会面临一个多么不同的世界。希望和隐忧同在,想想计算机领域有多少黑客和病毒的爱好者,而与核能由政府集中控制不同的是,基因工程在实验室就可以做 谁来保证不会出现潜入人体删改人类 DNA 的病毒 除了人自身没有别人。

极 度 改 造

进步是一种麻烦与另一种麻烦交换的结果。

——马克·吐温

2001 年 2 月底 3 月初的几天,北京展览馆人满为患,上海第二医科大学第九人民医院曹谊林教授培育的人耳鼠吸引了所有人的目光。先以一种高分子材料做成人耳的模型支架,再“种”上干细胞,细胞在支架上增殖形成耳朵后,再植入裸鼠背部,不用多久,支架被降解,人耳与老鼠就长在了一起。这样的题材在科幻小说里已是老套了,但当它真实地呈现于世时,它警示我们,人类正在走向一个新世界,可以确定的是这个新世界并非是只有阳光没有阴霾的科技乌托邦。

生物技术是人们开启新世界大门的密钥,而细胞工程是其中一个重要部分。在细胞生物学演生出一项可操作的技术之

前,它经历了一段不短的发展历程,从对细胞的观察、描述,到对细胞结构和功能的研究。

1893年,病毒的发现一度威胁了细胞学说,但现在除病毒外的所有生物都由细胞构成已成常识。细菌、酵母等微生物只是单个细胞,高等生物则有多个细胞,比如人体由200多种、约 10^{14} 个细胞构成。在放大几十万倍的电子显微镜下,可看到细胞纷繁的内心世界:细胞膜、细胞质、线粒体、核糖体、微管等。而细胞核可说是整个细胞的司令部,DNA和蛋白质一起形成染色体,控制着细胞的生命活动。

20世纪50年代诞生的分子生物学对细胞的研究产生了巨大的影响,细胞生物学应运而生。由于基因的秘密还没有对人类和盘托出,所以把细胞作为整体进行的研究与基因组学可说是各有所长,相得益彰。

基因工程是分子水平的生物技术,而细胞工程则是细胞水平的生物技术,以细胞培养、细胞核移植、细胞融合、转基因等等技术为支撑的动植物克隆、干细胞技术正是人们关注的焦点。

体外细胞培养是细胞工程的第一步,它也被泛称组织培养,包括细胞培养、组织培养和器官培养。相对于微生物、植物细胞,动物细胞要娇贵得多,培养起来难度较大。20世纪初,诺贝尔奖获得者卡雷尔(A. Carrel)为此做出了重大贡

献。在完全没有抗生素的条件下,他将鸡胚的心脏细胞在试管中整整维持了 34 年,这简直是个奇迹,以至于卡雷尔对那块鸡心组织充满了敬畏。到后来,他要求助手们在接近这非凡的、在他认为足以永生的鸡心时,必须穿上庄严的黑长袍。现在,营养液的配制、立体生长的技巧、超低温冻存等等已经成为常规技术了。

1983 年 4 月 1 日,英国著名杂志《新科学家》登载了一则科技新闻,说是科学家们将公牛细胞和西红柿细胞融合,培植出了具有浓郁牛肉风味的西红柿。这则新闻是杂志编辑在愚人节向公众开的玩笑,但它所引起的轰动表明细胞融合技术所受到的关注。细胞融合,就是在某些病毒、化学药物或脉冲电流的作用下,两个细胞(可以是异种的)合二为一,染色体互换、重组,形成杂交细胞。在生物体克隆、新种培育和基因研究中,这个技术大有用武之地。

基于细胞融合的单克隆抗体技术发明于 1975 年,德国生物化学家科勒(G. Kohler)和阿根廷生物化学家米尔斯坦(C. Milstein)为此获得了 1984 年的诺贝尔医学和生理学奖。

我们知道,器官移植中最令人头痛的问题是排斥反应。那是由于人体的免疫系统,一般的细菌都难以攻破免疫系统的防卫。入侵者(抗原)与人体分子不同,它有特殊的标志(抗原决定簇),B 淋巴细胞(淋巴细胞意为“清澈的春天之水”)

识别出这些入侵者,分泌出相应的抗体。抗体是专门针对抗原的蛋白质,它会要了入侵者的命。一种天然抗原往往有多个决定簇,会刺激多种 B 细胞产生抗体,这被称为多克隆抗体。有时候多克隆抗体会判断失误,比如,针对溶血性链球菌的抗体常常错误地攻击人的肾脏组织细胞,从而导致肾炎。

最好能制造只针对一种抗原决定簇的抗体。将分离提纯的抗体形成细胞与肿瘤细胞融合,把得到的杂交瘤细胞大量扩增,所得细胞系分泌的抗体即是纯一的单克隆抗体。生产单克隆抗体的方式有很多。1996 年 4 月,美国一生物公司宣布培育出一只转基因山羊,取名为格雷斯(Grace),它能大量生产抗癌抗体,身价高达 100 万美元。

目前,单克隆抗体的主要用途之一是肿瘤的诊断和治疗,而它的产生则利用了肿瘤细胞无限增殖的特点,可谓以毒攻毒。对肿瘤的一般放疗、化疗各有弊端,而单克隆抗体具有精确的细胞定位能力,它可以携带药物冲向肿瘤细胞,选择性攻击而不伤及无辜,因而被誉为“生物导弹”。利用转基因技术生产的人源化单克隆抗体早于 1997 年上市,已形成上十亿美元的产业规模。

王小波《黄金时代》的女主角陈清扬问王二,精液射到地里‘会不会长出小王二来’?这个估计不是生物学家也能回答出来,但能否在体外完成受精培育新的生命则是另一回事。

英国剑桥大学的爱德华(R. Edwards)和曼彻斯特的妇科医生斯特普托(P. Steptoe)从1966年就开始从事治疗不孕症的研究,直到1977年,有80例不孕患者接受了体外受精胚胎移植(IVF; in vitro fertilization)治疗,但都失败流产了。后来遇到了布朗夫妇,布朗夫人因输卵管阻塞9年未育,他们愿意一试。这次很幸运,1978年7月25日,第一例试管婴儿路易斯·布朗(Louise Brown)以剖腹产的形式来到世间。她的妹妹也是以人工授精方式出世的,她们生活得很好。目前,全世界已有100万试管婴儿了。

新技术为许多不育患者带来了福音,然而也有不同的声音。夫妻间的同源人工授精没有问题,但如果采用别人的精子或卵子产出的试管婴儿,则亲子关系不无危险。只有10%的家庭把秘密告诉了孩子,而心理学研究表明,这部分孩子往往有心理方面的困扰。此外,类似诺贝尔奖获得者穆勒(H. J. Muller)的利用高智商捐献者的精子进行人工授精的观点也时时有人应和。

穆勒的看法多少有点让人寒心,但这种技术用于优良家畜的快速繁殖则对人类带来了巨大好处。人工授精和借腹生子一般是联合使用的。优质雄性动物的精子被注入雌性动物的子宫内,受精或发育出胚胎后再取出来,植入代理母亲子宫,这样本来不会怀孕的母畜也不得不产子了。美英法德等国的几乎全

部火鸡、优质奶牛都是通过这种方式繁殖的。

借腹生子在人类中也有 4000 多例,通常替人怀孕 9 个月,收费在 1 万美元以上。其中一件不愉快的事发生在 1986 年,美国的一位代理母亲在怀孕中对胎儿产生了感情,不愿把婴儿交给委托方,结果不得不对簿公堂。2001 年,日本有位女士替摘除了子宫的姐姐代理生子,引起了争议。目前,大多数国家都不支持代理母亲行为。

精子的冷冻保存为体外授精提供了前提,而胚胎的冷冻保存则为其提供了保险。第一次体外授精后,将多余的胚胎冷冻保存起来,一旦受孕失败可以再次植入胚胎,避免了重复取卵的不便。第一例冷冻胚胎婴儿 1984 年 3 月出生于澳大利亚。

相对于克隆人在科学界、神学界、伦理学界和公众舆论中点燃的喧嚣,因试管婴儿而起的纷扰可说只算得上是茶杯里的风波。媒体的夸张渲染可能对公众产生了不良的导向,有必要以科学的眼光检视克隆技术的由来和实质。

“克隆”是英文“clone”的音译,意指“无性繁殖”,它有三个层次的含义:DNA 克隆、细胞克隆和动植物个体克隆。将目的基因插入载体,转染细菌从而得到大量复制品的技术为 DNA 研究提供了材料,也可用于生产药用蛋白。肿瘤细胞的无限繁殖是一种“坏”的克隆,而杂交瘤细胞群则可以分泌单克隆抗体。目前为公众所广泛关注的克隆则是指利用动植物

的一部分组织或一个细胞培育完整个体。

在低等生物中,无性繁殖是很普遍的现象,如细菌的分裂用于植物的嫁接、扦插、压条、分枝繁殖等也都是无性繁殖的例子。然而对于高等植物、特别是动物来说,虽然从理论上讲任何一个细胞都拥有一套完整的遗传信息,都可能发育出完整的个体,但是其体细胞已高度分化,它们的克隆只能是人类的创造。

1902年,德国植物学家哈伯兰德(G. Haberlandt)提出植物细胞具有全能性的思想,他认为植物体细胞可以像胚胎细胞一样在体外培养出一棵完整的植株。美国科学家怀特(P. R. White)在三四十年代着手寻求实现这个创想的条件,他配制了一些营养液,在其中烟草和胡萝卜细胞出现了分裂,长成一团团的瘤状物,但没有进一步分化。

一个可喜的突破出现在1958年。美国康乃尔大学的斯图尔特(F. C. Steward)教授及其同事,将野生胡萝卜根部细胞放入他们精心配制的培养基中,接着发生了令人惊奇的事,细胞开始分裂、分化,长成了小苗,被移植到土壤中后这些胡萝卜苗都开花结果了。斯图尔特对实验结果深感意外:“我们对于这个戏剧性的结果简直没有准备”,也许是加入培养液中的椰子汁使原来很多被关闭的基因“解除了抑制”。像很多别的技术一样,植物克隆立刻得到应用,可望在不久的将来,一般

人也买得起像兰花、人参等名贵花卉和药物。

动物体细胞克隆的思想最早出现在胚胎研究中。人们已经不再相信精子中藏着一个肢体完整的小人儿(或别的动物),相反发育过程要复杂得多,跟细胞核、质都有关。遗传信息存储在细胞核中,细胞质则提供表达遗传信息的微环境,核移植技术为研究细胞核质关系提供了新的手段。1938年,德国的诺贝尔奖获得者斯佩曼(H. Spemann)提出一个他称之为“美妙的实验”的构想:将一个细胞的核(用显微注射器)植入一个除去了核的卵细胞中,看看会发生什么。但他没能完成。他的实验就逝世了。

1952年,美国科学家布里格斯(R. Briggs)和金(T. King)在豹蛙中进行了开创性的研究,他们用豹蛙胚胎核质杂交细胞得到了蝌蚪和成体蛙,但胚胎发育超过某种限度就不行了。

10年后,英国牛津大学的格登(J. Gurdon)用非洲爪蟾(另一种蛙)做了进一步的实验。他从高度分化的蝌蚪肠细胞中吸取细胞核,注入到用紫外线破坏了细胞核的未受精卵中,结果发现不少杂交细胞能发育成胚胎,其中少数可以长成成体,并有生育能力。这些实验表明遗传物质似乎并没有发生绝对不可逆转的改变。

1963年,英国生物学家霍尔登(J. Haldane)觉得有必

要创造一个新词‘clone’来描述这一新兴的技术。

对于格登的成就，英国生物学家坎贝尔(K. Campbell)评论说：“我历来以为，如果能够在青蛙研究中做到的，也能在哺乳动物的研究中做到。”但事实证明，做起来比说起来要难得多。1981年，《科学》上刊出了3只胚胎克隆老鼠的照片，伊尔曼斯(K. Illmensee)和荷泊(P. Htoppe)的研究成果轰动一时，但他们的实验没能重复出来，后来发现是伪造的。

生物学界的气氛一时低落下来，有人认为哺乳动物的发育单行道看来是不可能逆转的了。但对细胞周期有深入研究的坎贝尔持不同意见，他认为障碍可能是卵细胞和体细胞(或胚胎细胞)处在不同的生命周期；“我领悟到这可能是利用细胞生命周期的一个好方法。”

在坎贝尔获得成功之前，高等动物胚胎克隆出现了集体突破的态势，克隆羊、牛、兔、猪都成功了，但无一例外是胚胎细胞克隆。

1996年3月，坎贝尔和维尔穆特(I. Wilmut)利用胚胎衍生细胞进行核移植获得了克隆羊。其中有一项关键技术是减少细胞培养液中的营养物质，使细胞处于休眠状态，从而使移植核和细胞质周期同步。这为体细胞克隆奠定了基础。

1996年7月5日，坎贝尔和维尔穆特创造的第一例哺乳

动物体细胞克隆羊诞生于英国罗斯林研究所,取名为“多莉”(Dolly,源自于美国著名乡村歌手 Dolly Pardon)。在谨慎地积蓄了 8 个月的力量之后,多莉于 1997 年 2 月 27 日的抛头露面可谓石破天惊,一时举世沸腾。

紧接着的几年时间里,各国纷纷宣称克隆牛、鼠、兔、猴、猪等等的出世,异种克隆也粉墨登场,濒危动物可能不再珍奇。2000 年 11 月,美国依阿华州一头普通母牛产下了一头珍稀白腿野牛。我国大熊猫异种克隆在陈大元教授的主持下已取得重大进展,一些胚胎已在猫或黑熊子宫内着床,可望形成熊猫个体。

体细胞克隆立即和转基因技术结合起来。原来的转基因技术需要改变受精卵中的遗传物质,但羞涩的受精卵不易接受外源基因,少数诞生的个体也很少能在体细胞中分泌外源基因产物。转基因克隆——先将目的基因转入动物体细胞,再进行核移植克隆——却可以克服这些困难。1997 年 6 月,维尔穆特等人培育出的转基因克隆羊可以分泌人的凝血因子(伤口止血所需的一种蛋白质),这无疑是血友病患者的福音。

改良物种、攻克顽疾、提升生活品质一直是克隆技术的良好愿望,但它的威力完全可能改造人类自身。1978 年,美国人 D. M. 罗维克的《人的复制》一书描述了一个年老单身的富翁请几个科学家复制自己的故事,真伪难辨,耸人听闻。20

年后,这就不是科幻小说了 美国医生席德(R. Seed)宣布要克隆自己。2001 年 8 月,三名科学家在美国科学院的一个研讨会上表示要克隆人。他们被媒体称为‘克隆三疯子’或“科学三狂人”。2002 年底、2003 年初,法国女科学家布瓦瑟利耶(B. Boisselier) 宣称世界上第一、第二个克隆婴儿诞生;还有三个克隆婴儿将在今年 2 月份之前出生”她没有拿出令人信服的证据,而素有‘克隆大夫’之称的意大利妇产科医生安蒂诺里(S. Antinori)则称“这绝对是个谎言!”局面变得扑朔迷离,但可以肯定的是克隆人迟早会来到这个世界。

反对克隆人的理由很多。第一个安全性。多莉克隆实验的 277 个卵细胞中只有 29 个发育成胚胎,其中只有多莉一个正常出生,其他都是畸形胎儿 多莉的早衰加深了这种担忧。而且动物可以多次实验改进技术,但对于人则不可以。所以试管婴儿之父爱德华称,如果将来问题解决了,他可能支持克隆,“但现在,绝不!”

人造人似乎也粗暴地干涉了上帝的特权,生命变得平庸了。维尔穆特说:“……新生命的诞生是神圣的,是我们生命历程中最庄严的事。……如果没有那想为人父母的渴望,有什么其他繁殖人类的念头是可以被接受的?克林顿在得知多莉出生后随即发布命令,在 5 年内禁止把联邦资金用于克隆人。

他说：“鉴于我们最为珍视的信仰和人性的观念，我自己的看法是，克隆人必然将引起人们深深的忧虑。每一个人的生命都是独特的，是诞生在实验室外的奇迹，……我们必须尊重这种深奥的礼物。”

如果一位丈夫不幸死于车祸，妻子生下他的克隆婴儿，那么婴儿将是她的儿子还是丈夫？有人认为类似的问题将导致伦理的混乱和颠倒，法律上的继承关系也不明确。

启动多莉核质杂合细胞生命过程的电流，不禁令人联想到玛丽·雪莱笔下的怪物弗兰肯斯坦。想到呕心沥血创造出来的超级生物会把自己像蚂蚁一样踩死，没有一个科学家会心安理得。无性繁殖会不会用于克隆天才、英雄、漂亮女人？遗传学上较为‘低等’的人将被置于何地？（鉴于此，1998年8月第18届国际遗传学大会达成共识：优生学/Eugenics 这个术语以如此繁多的不同方式被使用，使其已不再适于在科学文献中使用。）

而悲观主义者则庆幸克隆技术没有出现在希特勒时代，他们想像未来由某个恶魔的体细胞克隆出来的军队会奴役整个地球。1976年，美国作家艾拉·莱文在其科幻作品《94个小希特勒》中讲类似故事：一群纳粹残余分子用留存的希特勒的血液和皮肤，复制了94个小希特勒，寄养在不同国家，妄图其中一个会成为真正的元首，领导他们东山再起。他们的阴谋

被破除了,小希特勒的名单落到了警察手里,出人意料的是,掌握名单的人——一名坚定的反纳粹人士——竟将名单毁掉了。他认为孩子是无罪的,而滋生纳粹的土壤已经成为历史陈迹,毋须杞人忧天。

从小说的结尾来看,艾拉显然不是一位基因决定论者,克隆人与其细胞核提供者虽然具有完全一样的基因,但肯定不会有完全一样的个性和脾气,无所不在的环境塑造着人。麻烦在于很难定量研究环境作用的机制,它和 DNA 各决定了多少?对那些在不同环境下长大的同卵双胞胎的研究提供了一些线索。据美国明尼苏达州孪生和收养研究中心报道,遗传对性格的影响程度:焦虑性,55%;创造性,55%;顺从性,60%;攻击性,48%;外向性,61%。可以看出,虽然没有明确的个性基因、冲动基因、酗酒基因,但基因的影响无所不在,自由意志的风筝拖着一条遗传基因的尾巴。

在克隆人的问题上人类面临着两难的选择,正如狄更斯所说:“某些最喧嚣的权威坚持要用形容词的最高级来形容它。说它好,是最高级的;说它不好,也是最高级的。”在得出结论之前,大多数国家明令禁止克隆人。1998年1月12日,欧洲19个国家在法国巴黎签署了一项严格禁止克隆人的协议。而中国则是四不政策:“不赞成、不允许、不支持、不接受”,但对于把克隆技术应用于人体医学技术领域,则给予切实的支

持。”

多莉的诞生打破了细胞发育不可逆的教条,而同样备受关注、争议的干细胞研究则试图完全弄清细胞分化发育的机制,从而人为地诱导生命的进程或组织器官的成形。

干细胞(Stem Cell)并非是“干燥的细胞”,“Stem”有“主干、起源”之意。干细胞一词在 19 世纪末已出现,用于描述存在于蛔虫、线虫等生殖系的祖细胞。直到 1998 年 11 月,美国科学家汤普森(J. Thompson)实现了人类胚胎干细胞的体外培养增殖,干细胞的研究才掀起热潮,1999 年被《科学》评为当年世界十大科技新闻之首。

干细胞的诱人之处,在于它具有自我更新、高度增殖和多向分化潜能,被称为“万能细胞”或“种子细胞”。可望用于治疗一些涉及细胞死亡的顽疾(如心肌梗死、帕金森病等),或者在实验室里培育组织器官,直接更换病变的组织器官,甚至病变的具体机理都无须知道。

想想人体所有 200 多种细胞、4 种组织、100 余器官,8 大系统都源自于一个小小的受精卵,即不难理解何为“分化潜能”。胚胎干细胞存在于早期胚胎中,像受精卵一样具有“全能性”,组织干细胞具有“多能性”或“专能性”,可以生成多种或一种类型的细胞。

人体每时每刻都有大量细胞老化死亡,新的细胞来源于各

种组织干细胞,如皮肤干细胞、造血干细胞、间充质干细胞、肝脏干细胞、胰腺干细胞等等,甚至在本以为是不可再生的大脑中也发现了神经干细胞,脑损伤可望修复。令人吃惊的是一种‘横向分化’现象,不同干细胞之间可以相互转化,似乎干细胞的分化受着微环境的调控。科学家做过一个有趣的实验,将蛙的早期胚胎上的视泡(将会发育成蛙眼)移植到尾部,结果尾部本应发育成尾,巴的细胞却长成了晶状体。

人类胚胎干细胞从一开始就是个敏感的话题,就像堕胎是否犯罪一样,随意摆弄人的胚胎是不是也有‘杀人’的嫌疑呢?罗斯林研究所一位科学家说:“人们谈到胚胎,往往想到的是一个极小的婴儿,想到头、臂和眼,但这是不正确的,这些胚胎细胞还未真正开始分化,还没有神经系统,事实上再过几周也都没有。”但有的人认为从受精那一刻起生命就算开始了。

2001年11月25日,美国高级细胞技术公司(ACT)宣布克隆出了人类早期胚胎细胞的消息,更是引起轩然大波。实际上,ACT公司用人的上皮细胞核克隆出的胚胎只分裂到4~6个细胞而已。各国的官方声音是一致的,禁止克隆人,但治疗性克隆则受到鼓励。

2002年6月,美国明苏里达大学医学院的维尔法伊(C. Verfaillie)在《自然》上发表文章称,他们提取出一种特殊的

干细胞(“多功能成体祖细胞”),几乎与胚胎干细胞具有同样强大的分化能力。也许这种细胞最终将取代人胚胎干细胞,从而绕开伦理上的纠葛。

科学家们已经从人胚胎干细胞诱导出了心肌细胞、造血细胞、造胰岛素的细胞等等,为细胞疗法带来了希望。与维尔法伊的成果同时发表的还有麦凯(R. McKay)等人的文章,他们将实验鼠胚胎干细胞进行了基因改造,再将诱导分化出的神经细胞植入患帕金森症的实验鼠脑部,实验鼠症状明显减轻,并存活了2~3个月。这增强了对干细胞应用潜力的信心。

1913年,卡雷尔说任何人体器官都可以从人体上取下,培养起来,而且可以移植到另一个人体上。40年后他的创想得以实现,第一例移植肾到1990年已运转了26年。目前,外源性器官产业规模可能超过60亿美元。

从转基因猪身上摘取器官未免有点残忍,干细胞技术可望把人道关怀普及到猪身上。患者体细胞→核移植→胚胎干细胞→基因修饰→定向分化→器官移植,这条路线提供的器官不存在免疫排斥反应。1997年10月,英国生物学家斯莱克(J. Slack)称他对蛙胚胎进行了某些基因修饰,得到一只无头活蛙,他正用同样方法研制人体配件。

斯莱克的想法已经超越了器官移植,而是直接的器官制造了,这是组织工程的重要目标。研究者兰格(R. Langer)和

瓦坎蒂 (J. Vacanti) 说：“研究人员用计算机辅助设计和制造方法,把一定形状的塑料放入模拟特定组织或器官结构的精密构架床。模拟的构架用化学物处理以帮助细胞黏连和增殖,然后种入细胞(特定的干细胞)。当细胞分裂和组合时,塑料降解,最后只留下黏附的组织。这种新的永久性组织即可为病人植入。”

组织工程的产品之一是人造子宫。2002年2月,传来美籍华裔科学家刘洪清教授研制成功人造子宫内膜的消息。虽然只是子宫内膜,但足以附会上“男人也可以怀孕”、“不再需要女人”等等“远见拙识”。同月,一个有关人造子宫问题的国际会议在美国俄克拉荷马州立大学召开,会议主题是：“自然母亲的终结？”

美国经济趋势基金会总裁里夫金(J. Rifkin)说,人类似乎正在一天天逼近赫胥黎(A. Huxley)所勾勒的“勇敢的新世界”(公元2532年)位于伦敦的生产线每小时前进33.3厘米,一天8米。267天瓜熟蒂落,一个新婴儿产生。这些人被分为等级森严的5个阶层,自胎儿阶段就被设定好未来的职业。化学工人的胚胎接受各种耐化学物质的疫苗,飞行员的胚胎则被放进特制的容器快速旋转……

“人类将在生物学的魔杖下,变成奇怪的二足动物,它综合了这样的一些特性:像蚜虫那样没有雄性可以自我繁殖,像

软体动物鹦鹉螺那样让它的雌性在相隔遥远的地方受精 像剑尾鱼那样改变性别 像蚯蚓那样断体再长 像螻蛄那样补偿失去的肢体 像袋鼠那样在母体外发育 像豪猪那样冬眠。’琼·罗斯坦德的想像可能有些夸张,但它或许有助于触动我们的内心。

21 世纪将是生物技术的世纪。里夫金在其名著《生物技术世纪》一书中,力图向我们展示我们将会面临的比过去上千年还要深刻的生活方式上的变化 历史上第一次不再需要农民和土地,食品和衣物将由室内的大型细菌培养槽获得;‘复制’越来越多地取代‘生殖’,克隆的动物和人已能令人习以为常 数以百万计的人都可以得到自己详细的遗传读本,从而可以远眺自己的生物学未来,以过去根本不可能的方式预测和计划自己的生活 父母可以选用体外的人造子宫生育后代 入胚胎期的基因修饰,不仅可以纠正后代的致死性遗传疾患,而且可以提高他们性格、行为、智力和体格等方面的遗传素质。

生物技术世纪给人以希望,它将向饥饿的世界提供丰富的遗传工程植物和动物食品 由遗传学方法生产的能源和纤维,将推动商业贸易并建立一个‘可再生’社会 奇妙的药物和基因治疗,使孩子们更健康,人类的疾病痛苦得以解除,人类的寿命进一步延长。

但是,当我们一步步走近这一‘勇敢的新世界’时,恼

人的问题也在缠绕着我们：“我们会为此付出何种代价？”

生物技术革命,将迫使我们每个人去反思心灵最深处的价值观,认真思考和衡量一个最根本的问题——存在的目的和意义。里夫金强调,这可能成为这场生物技术革命最重要的贡献。

认识你自己

已经过去的只是序幕。

——莎士比亚

宇宙和生命的奥秘一直是具有形而上取向的有志之士孜孜追索的两大主题,在几千年的哲学玄思之后,科学——尤其是20世纪的物理学、宇宙学和生物科学——在这个问题上取得了令人炫目的进展。尽管如此,科学还存在着‘最后一个未知领域’——脑。意识、认知、自由意志、计算机科学、人工智能……所有的希望都寄托在脑科学身上。中国杨雄里院士认为:‘探索和揭示脑的奥秘所具有的高度复杂性、所蕴涵的深邃的哲理,以及对人类的重要性,已成为当代自然科学面临的最重大的挑战之一。’看来,‘认识你自己’的古老箴言,正

好作为指向新的科学高峰的大旗。

大脑是生命的最后驻留之所,正如‘脑死亡’的死亡标准所明示的那样,但脑不是从来都这么受人青睐的。“心之官则思”;“恻隐之心,人皆有之”……在中国古人的眼里心是思维、性情、感官的主宰。同样,在古埃及人看来,心脏是精神和智慧的寓所。在制作木乃伊时,脑被当作废物掏出来丢掉,而心脏则小心地保存在木乃伊旁边,埃及人相信,心将被审判之神放在天平上称量,以判断其善恶。

现在,知觉、运动、思维、语言、感到沮丧或欢欣等等功能都归于大脑了,似乎只有大脑这样精美绝伦的结构才配得上这些不可思议的复杂功能。粗略地说,大脑的表面形态有点像核桃,左右对称(左右半球由胼胝体相连),布满皱褶,但不是黑色而是灰白色的,有句骂人愚蠢的话说‘脑袋里装的是豆腐渣’;大概是取其颜色相近,不过这团‘豆腐渣’创造了多少奇迹啊。大脑表面充满沟回的皮层呈灰色,称为灰质,是神经细胞集中的所在;神经纤维集中的地方呈白色,称为白质,另外一些不灰不白的区域称为网状结构,神经细胞和纤维兼而有之。

大脑半球被皮层中深陷的沟分隔为四个叶:前面的叫额叶,顶上的叫顶叶,后面的叫枕叶,外侧的叫颞叶。大脑的后部缀着像两团羊毛球一样的小脑,负责肢体的协调和某些无意

识运动。大脑的深处藏着一些复杂而奇怪的结构，如间脑（包括丘脑、下丘脑）、脑干（包括中脑、脑桥、延髓），还有海马、垂体、杏仁核等等。未被占据的间隙称为脑室，其中流动着脑脊液，古时的人不了解脑脊液在脑的代谢中的作用，轻蔑地称它“脑的尿液”。所有的结构都包在脑膜中，外面再围以坚硬的颅骨。

人脑大约形成于 10 万年前，大脑皮层最为发达，是最“新”的，而小脑更为“古老”。人脑重约 1.3kg，在所有动物中是最大的，虽然它只占人体重的 $1/40 \sim 1/50$ ，但它的耗氧量却占全身的 20%（在儿童期这个百分比更多达 50%）。大脑袋的另一个代价是生育，对母亲们来说，分娩是个漫长、痛苦而且有时是危险的过程。出生后的大脑还很稚嫩，还得家人养育 10 年以上，人们不禁要问如此一个“浪费的”鬼东西对人有什么好处，值得大自然花几亿年的时间把它进化出来？那些无生命的土石或无意识的蠕虫不是“生活”得挺好的吗？的确，这是一个谜，一个深邃撩人有时又令人绝望的谜。

关于神经系统，意大利解剖学家马尔比基（M. Malpighi）有一个形象的比喻，他说神经系统就像一棵倒立的树，树根盘结在大脑，树干沿脊髓而下，而遍布全身的神经末梢就是树枝。早在古希腊时，希罗菲卢斯（Herophilus）就已认识到脑是神经系统的中枢，但由于把神经系统与“灵魂”、“灵气”

之类神秘概念相混,脑和神经系统的研究直到 18 世纪末才用真正的科学方法加以研究。到 19 世纪中后叶,关于神经的基本组织单位、先天的反射活动和后天建立起来的反射行为等已经成为生理学家感兴趣的问题。其中,西班牙组织解剖学家卡哈尔(S. R. Cajal)创立的神经元理论为 20 世纪脑科学的大发展奠定了基础。

19 世纪 30 年代的细胞学说认为一切生物体都是由细胞构成的,神经系统是不是如此呢?当时的显微镜还不足以确证这一点,直到意大利细胞学家高尔基(C. Golgi)发明神经染色法后,对神经细胞的形态和构成才有了进一步认识。1872 年,在高尔基的厨房中发生了一个奇特的事,他把一块脑片放在硝酸银溶液中浸泡了几个星期,结果在显微镜下出现了一种复杂的图案:网状的缠结中悬浮着黑色的斑点。黑色的斑点即是与一般细胞类似的细胞体,从胞体长出的树枝状微管被形象地称为树突,形态各异,常说的神经纤维是从胞体伸展出的细长轴突,胞体、树突、轴突统称为神经元(其外围还有更多的神经胶质细胞),这就是形成我们的意识、性情的基本构件吗?

卡哈尔说是的,大量的研究使他确信神经系统由分立的、边界明确的神经元所组成。高尔基属于对立的网络理论一派,他们认为轴突末梢相互融合,大脑整个是一神经网络。1906 年,高尔基和卡哈尔分享诺贝尔医学—生理学奖,在领奖演说

中他们各陈所见针锋相对。这段公案直到 1934 年才了结,卡哈尔发表了长篇论著申述神经元理论,令人不得不服。

卡哈尔理论受人诘难的一点是,既然神经元各个分立,它们之间怎么传递信息呢?卡哈尔认为神经元之间存在着复杂的结构,1897 年,英国生理学家谢灵顿(C. S. Sherrington)引入“突触”来代表神经元的交接区。这些先驱者的宏观认识,在 20 世纪 50 年代得到威力强大的电子显微镜的确证。突触前、后有两个分开的膜,分属交接的两个神经元,中间有 200 埃的间隙。这种结构普遍存在于神经系统中。

所谓的信号指的是神经冲动,即动作电位。1780 年,意大利科学家伽伐尼(L. Galvani)在一次雷雨时发现,放在金属板上的蛙腿随着雷鸣电闪而抽搐,这个发现开启了电生理的研究。19 世纪末至 20 世纪初,德国生理学家杜布瓦雷蒙(E. H. Reymond)提出神经表面排列着电动粒子的设想,他的学生伯恩斯坦(J. Betrnstein)更进一步认为这些电动粒子就是钠、钾等离子,它们在神经纤维膜内外的流动导致了神经冲动的产生和传递。几十年后,借助于示波器和电子放大器,英德科学家霍奇金(A. L. Hodgkin)、赫胥黎(A. F. Huxley)、卡茨(B. Katz)等人证实了上述设想。到 20 世纪 80 年代,对于神经递质受体的研究又加深了神经膜离子通道的认识,至此神经兴奋传导的神秘机制才大白于天下。

神经纤维可以看成是一根中空充满液体的小管,管内外不均匀地分布着钠、钾等离子,平时内外离子不能自由流通,形成内负外正的电位差。当受到刺激时,膜内外电位差会发生变化,当达到一定值(阈值)时,嵌在膜上的蛋白质通道开后,钠离子内流,于是产生一个瞬间的电压脉冲,即动作电位,这时的电位差是内正外负。相邻未兴奋段仍处在静息状态,于是相邻段之间又会出现局部电流,膜外正电荷从未兴奋段流向兴奋段,膜内则反之。当未兴奋段内外电位差达到阈值时,又产生动作电位,神经兴奋就是这样一段一段传下去。由于纤维膜兴奋后有一段不应期,所以信号总是由兴奋段传向未兴奋段。

动作电位典型值为 90 毫伏,对给定的神经元来说是不变的,那么刺激的强弱又如何区分呢?最初的说法是跟频率有关,刺激强的时候就会产生更多的动作电位。但问题可能并不如此简单,可能还有其他的编码方式。

对于神经元内部信号的传递,苏珊·格林菲尔德形象地描述道:树突充当这些信号的接收区,就像某个巨大的码头一样,接纳各种船只载入的货物。正如货物可以从码头上卸下,并沿着汇聚于某个中心工厂的路线运送,这些分散的信号沿着汇集于胞体的树突传导,如果信号足够强,树突将会产生一个新的电信号……这时轴突开始起作用,它们将这个新的电信号

从胞体传送到回路中的下一个目标神经元,就好比工厂的产品输送到某个远处的目的地。

接下来的问题是信号会不会在突触间隙处戛然而止,它怎么越过这个‘鸿沟’呢?人们早就猜测,化学物质可能以某种方式参与神经元通讯,也许印第安人狩猎用的箭毒就是作用于神经的。这些想法被证实是对的,判决性的实验在 1921 年由维也纳科学家洛伊(O. Loewi)做出,据说这个绝妙的实验的设计来自梦中的灵感。他把两个蛙心浸浴在两缸溶液中,用电刺激第一个蛙心的迷走神经(会抑制心跳),将该蛙心的灌流液注入第二个蛙心,结果第二个蛙心心跳也变慢了。惟一可能的解释是,电刺激产生了某种物质,并对第二个蛙心产生了作用。5 年后,洛伊和英国生理学家戴尔(H. H. Dale)证明这种物质是乙酰胆碱。这种化学递质在人体内广泛存在。

神经信号传到轴突末梢时,会刺激突触小泡释放递质,递质通过突触间隙,到达突触后膜与下一个神经元膜上的受体蛋白结合,开启其离子通道,于是化学信号又转换成电信号,下一轮的兴奋传导又将开始。递质的扩散需要约 0.2 毫秒,想像一下长颈鹿,捏一下它的尾巴它要多久才能感受得到呢?

2000 年的诺贝尔奖是授予三位研究突触和递质的科学家的,深入的研究为中风、帕金森病、某些精神病等与递质有关的疾病带来希望。一些药物(如尼古丁、海洛因)的成瘾也

与递质有关,这些外来者冒充天然递质,作用于相应受体,超常的刺激使受体变得迟钝,于是出现恶性循环。海洛因成瘾机制受人关注,想想那些身不由己的吸毒者吧。

爱因斯坦生前是世界的中心,他死后四十多年的 20 世纪末,对他的大脑的研究又引起人们的关注。据称,爱因斯坦的大脑左右半球的顶下叶区域比平常人大 15%,这里与人的数学思维、空间想像力关系非浅。但得出明确的结论还为时过早,百年来人们对大脑功能的认识可以说还相当肤浅。

瞳孔会随着强光缩小,这种现象被称为反射,有人猜测,也许脑的功能也是一种反射作用,笛卡儿(R. Descartes)就是这么认为的。20 世纪开始的前后几年,谢灵顿和俄国生理学家巴甫洛夫(I. Pavlov)即是以研究反射著称于世。谢灵顿试图阐明一个神经冲动从感受器传到脊髓和脑,再传出到运动神经通路,从而产生一个特异反应(比如挠痒)的实际途径。他把整个环路叫做反射弧。稍后的巴甫洛夫因为一个偶然的机会有始研究条件反射,他注意到狗在吃到食物之前就已经垂涎三尺了,与食物无关的东西(如铃声)可能在狗的大脑里建立了新的神经联系。

他们的工作造成了心理机械论的兴起,但他们本人并非还原论的信徒,认为脑的功能就是众多反射的总和,脑是“思维的机器”相反他们强调脑是整个的。

谢灵顿认为应从物理—化学、心理(知觉、思维)、身一心和谐这三个层次上研究生物体。与之相应的另一思路是把大脑看作按等级组织起来的结构,如英国神经病学家杰克逊(J. H. Jackson)所说的那样。20世纪50年代,美国神经学家麦克莱恩(P. Maclean)也把脑看作是一种等级式结构,但这回是由三个等级组成:最原始的“爬虫脑”,即脑干部分,只表现本能行为;较高级的“旧哺乳动物脑”,包括海马、杏仁核等边缘系统,控制情绪行为,特别是侵犯行为和性行为;最进化的是“新哺乳动物脑”,即大脑皮层,负责运算、语言、思维等高级功能。

大脑究竟存不存在特定的功能区域,就像琴键确定地对应着哆唻咪一样?作为一个极端的例子,奥地利医生加尔(F. J. Gall)认为确实如此,他认为颅骨表面的隆凸与一个人的幽默感、意志、才智、语言表达等紧密相关,通过人的颅相即可推断其人的个性、能力甚至命运。

19世纪60年代风行几十年的颅相学遇到了麻烦。法国医生布洛卡(P. Broca)和稍后的德国学者威尔尼克(C. Wernicke)在对失语症患者的尸解中发现,患者脑损伤部位与颅相学预言的语言区不一样。颅相学从此一蹶不振。

与脑摘除、尸体解剖一样,电刺激法也为脑功能定位研究提供了线索。20世纪30年代,德国医生福斯特(O. Foer-

ster) 和加拿大医生潘菲尔德(W. Penfield) 做了相关实验, 在需要开颅的手术中,用电刺激清醒病人大脑的不同部位,根据引起的反应,他们绘制出了皮层功能区域图。感觉区集中在中央后回,运动区集中在中央前回,这些区域的每一处都同身体的一定部位相联系,但皮层部分的大小与实际体表部分不成比,而同感觉的灵敏度和控制的精确度成比,例如,头、手的相应皮层区特别大。

相信脑的大小跟智能成正比的人不会很多,一个反例是鼯鼠的脑占它身体质量的 3.33% , 而人脑的相应比例为 2.33%。不过,人们认为处于进化最顶端的皮层可能隐蔽着更多秘密,如果将其展平,大鼠的皮层面积大小相当于一张邮票,黑猩猩的相当于一张标准打印纸,而人脑皮层比黑猩猩的还要大 4 倍(黑猩猩与人的 DNA 只差 1%)。

皮层功能定位在某种程度上是合理的,比如运动皮层、感觉皮层确实具有一定的专一性。然而这种定位当然不再像颅相学那么机械,大部分皮层并不能界限分明地加以分类,这些被称为“联络皮层”的区域主要负责难以把握的认知和意识,当然这些部位受损也会影响到感觉和运动。现代颅相学者可能会抱怨说这些区域太小,以至于贴不下相应的功能标签!

顶叶与知觉、注意有关,顶叶损伤患者好像只能看到周围物品的一侧,他们甚至宣称自己的一半身体是别人的。颞叶损

伤最明显的缺陷是患者不能辨认所看到的物体,患者能“看到”一个面孔,但他不能“认出”那是谁的面孔,甚至自己的面孔也认不出来。

额叶损伤似乎引起更为广泛的灾难,影响到被称为“人格”的部分。1848年,美国一个叫盖奇(P. Gage)的铁路工头不幸遭遇一起爆炸事故,一根铁棒穿透他的颅骨,前额叶皮层严重受损。伤口治愈后一切都很正常,只除了盖奇由一个和善的人变得专横顽固、感情淡漠。

1935年,葡萄牙外科医生莫尼斯(E. Moniz)发明了前额叶切除术,用于处理极度抑郁、焦虑、恐惧等精神疾病。令人尴尬的是,这项荣获诺贝尔奖的技术于20年后被废除了,因为谁也没有料到这会导致认知的缺陷,就像发生在盖奇身上的那样——缺乏预见,不能适应外界环境的变化。

脑病的医疗实践常常为脑科学的发展提供契机,另一个极端的疗法是针对癫痫病患者的。美国脑生理学家斯佩里(R. W. Sperry)从20世纪40年代就开始用猫和猴子做实验,切断大脑两半球间的连接,进行观察。60年代用于癫痫病人治疗。他发现两半球分工不同,各自具有相当的独立性,左半球倾向于语言、分析、抽象和算术功能,右半球则更擅长于综合、直觉、情绪、空间想像等等。胼胝体连接两半球,把左右脑整合为一。过去人们认为具有语言功能的左半球是“优势

半球”斯佩里的研究推翻了这种偏见,引发了所谓的“右脑革命”,影响到智力开发。

裂脑实验似乎支持了功能定位说,但在对感觉信息的加工的研究中,人们发现感觉信息并非仅仅只送到皮层上它的初级加工区,而是送到许许多多“无关”的区域。就视觉而言,似乎整个皮层都在“欣赏”宁静的天蓝或者蝴蝶的翩跹颜色、形状、运动几个系统协同动作,缺一不可,这种并行工作模式还是一个未解之谜。

另一个困惑脑科学家的上百年的问题是脑电活动,为什么大脑里会产生不同频率的电波振荡呢?脑电活动发现于1875年,当时英国生理学家卡顿(R. Caton)将两个电极放在脑的表面,或者颅骨表面时,测到微弱的电流向各个方向传播。这种脑电随动物的死亡而消失。15年后,一场争夺发现脑电波优先权的笔墨官司才唤起人们对脑电的注意。1929年德国精神病学家贝格尔(H. Bergar)第一个记录了人的脑电活动,他的实验是躲在一个地下室里在他儿子头上做的。自那以后的十年里,贝格尔每年都出一本关于人的脑电图的小册子,那时候人们终于意识到脑电的临床意义。某些脑病(如癫痫)发作时,存在一定类群的细胞的强烈放电,通过检测异常放电,神经病学家可以对损伤的脑组织作出定位。从20世纪50年代开始,脑电的研究向着探索与特定知觉有关的信号方向发展,

开展了诱发电位的研究工作。

脑电波有四种波形 成人闭眼放松时出现 α 波,其频率为 8 ~ 13 赫兹;人处于注意并有心理活动时出现 β 波,其频率为 15 ~ 60 赫兹; θ 波频率为 3 ~ 7 赫兹; δ 波的频率低于 2 赫兹 θ 波和 δ 波在 10 岁前儿童或某些瑜伽修士脑中可测到,但成人只有在睡眠或有病时才出现。

对这几种波的观测改变了我们对睡眠的看法,这应归功于美国的三位科学家德门特(W. Dement)、阿谢仁斯基(E. Aserinsky)和克莱特曼 (N. Kleitman)。他们于 50 年代做了一系列实验,发现人睡着后并非没有变化,而是交替地出现眼球快速运动(REM)和非眼球快速运动两种状态。非 REM 期脑电图出现 θ 波、梭状波和 δ 波,眼球不动但全身肌肉却是活跃的,剥夺非 REM 睡眠会致死。REM 期出现快速眼动,肌肉近乎瘫痪,其脑电图跟醒着差不多,也被称为反常睡眠,剥夺此期睡眠不会致死。有人形容 REM 睡眠的特点是“一个不活跃的身体中有一个活跃的脑”,而非 REM 睡眠则是“一个活跃的身体中有一个不活跃的脑”。

几乎所有哺乳动物都有快速眼动睡眠,而爬行动物没有,在进化上 REM 远比非 REM 更为近代。子宫中的胎儿多数时间都处在 REM 睡眠之中,到二三岁时 REM 睡眠才与成人差不多,不超过睡眠时间的 1/4。REM 可能与皮层的发育有关。

最奇特的是,在 REM 睡眠期间被叫醒的人中有 80% ~ 90% 的人说在做梦,而其他阶段被叫醒的人却只有 10% 说在做梦。眼动似乎表明梦者正在观看梦中景致,而肌肉的放松保证梦者不会把梦付诸实施。有趣的是动物似乎也做梦,法国科学家茹韦(M. Jouvet)找到一种办法可以在猫身上恢复 REM 睡眠时的肌肉瘫痪,她有一次惊讶地看到实验猫在睡着时忽地站了起来,好像在追逐一只梦中之鸟,它抓住了那只鸟,并吃了起来。看来这只猫并不知道自己在做梦。

自古以来,梦一直被掩在神秘的面纱下面,或者被认为是神的召示,或者是妖魔鬼怪之所为,或者是灵魂的离体漫游。近代,弗洛伊德(S. Freud)提出梦是无意识的伪装,更新的理论则摒弃了心理因素,认为梦是神经兴奋的冷灰里偶尔蹦出的几点火星。1983 年,DNA 双螺旋结构的发现者之一克里克(F. Crick)则把大脑等同于神经网络,梦是一种“反学习”过程,即清除或调整一些错误或冗余的寄生联结。但子宫中的婴儿并不需要调整什么,他们却多在 REM 睡眠中。有人不乏刻薄地说,如果这一理论不是诺贝尔奖得主提出的话,它可能只会被扔进垃圾箱。

另一种理论认为,梦是意识的某种不健全的状态,在这种状态下脑内各部分的连接因为休眠或者发育不全,而无法正常建立。神经分裂症可能即是由于这种脑通讯障碍而导致梦幻般

地看待真实的世界。

生理学在很大程度上依赖于对尸体的解剖,由此得出的结论与生物体的活体状态不无差别,因此有人将生理学戏称为“死理学”。同样,脑科学最早也是由尸体解剖和研究脑损伤起家的,所得有限,特别是对于脑高级功能(记忆、意识、思维等)的研究,不得不依赖近代的脑成像技术。

20 世纪 30 年代初 X 射线开始用于大脑造影,它利用骨骼和软组织对 X 射线的不同吸收率,使骨骼在底片上发白而软组织发暗,从而显示出脑的结构。20 世纪 70 年代初发明的计算机断层扫描(CT)技术,利用计算机将扫描所得的二维图像整合成三维结构图,用于脑肿瘤、脑梗塞等病的诊断定位,引发一场革命。但 CT 只能揭示结构信息,对特定时刻(如注意、说话时)哪部分脑在工作的问题则无可奈何。

幸而脑对能量的贪婪暗示了某种信息,只要追踪到哪个部位对葡萄糖和氧的需求增加了,即可断定该部位处于活跃状态。正电子发射断层扫描(PET)和核磁共振(MRI)技术即基于这个原理,它们的定位精度可达到几毫米以内。当我们说话、思考或读书时脑内的状态就会被实时地记录下来,大大有利于自然状态下脑功能的研究。

在大脑的所有功能中,情绪处于一种特殊的位置,它虽不是人所独有的,但在人身上喜怒哀乐才表现了淋漓尽致,由此

形成多彩的人生和社会。情绪可能不是后天习得的,因为从“如果有人抢走你的糖果,你就应当愤怒”这句话中,很难知道什么是愤怒。

一种观点认为情绪是进化的产物,三分脑结构的麦克莱恩持这种看法,他认为旧哺乳动物脑是情绪的中枢。从情绪脑有神经通路输出到自主神经系统,从而引起汗腺分泌、心跳加速、脸色变红等等情绪反应 另一条通路会刺激多巴胺(一种化学递质)的分泌,作用于伏隔核(一个神经核团)即会引发欣快感,这也是海洛因等药物的作用机理。最近一项有趣的研究表明,无论快乐还是痛苦,伏隔核都处于活跃状态,看来人不但把自己的快乐建立在别人的痛苦之上,还把自己的快乐建立在自己的痛苦之上。

对情绪的进化说的一个质疑是,为什么不直接进化出理智 比如当遭遇危险时,为什么不‘理智地’选择面对或者回避,而要‘恐惧’呢 除了干扰思路外,情绪还有什么作用?

认知科学中另一个处于核心地位的是记忆问题,对过去经验的记忆反思是人格形成的必需过程。

记忆这个概念并不是乍看起来那么单一。记住朋友刚刚告诉你的电话号码属于短期记忆,记得小时候干过的一件恶作剧属于长期记忆。记得某件事是显性记忆,下意识地做事

(如骑自行车)只需要隐性记忆。

在电影录像里可以看到一些遗忘症的例子，他们追问“我是谁？”，不记得以前的事，但短期记忆完全正常。这说明短期记忆和长期记忆是分离的。相反的情况出现在一个叫 H. M. 的患者身上。1953 年，医生切除了 H. M. 大脑的双侧颞叶，治愈了他的癫痫，然而代价惨重，他能记起手术前两年的事，但不记得曾做过手术了。他的短期记忆仍正常，能记住 7 位数字，但不能建立较长期的记忆；“每天都是孤零零的一天，不管我有过什么欢乐，或有过什么悲伤。”他永远生活在现在。

不难看出，短期与长期记忆似乎是一个串行的过程，一个脑区只负责记忆流水线的一段。比如前额叶可能与事件的时空背景有关，如果前额叶受损记忆将变得模糊，隐约记得有那么一个漂亮的公园，但不记得哪年哪月去过公园了。

研究表明，海马和丘脑可能负责信息的初期巩固，然后送到皮层。并不存在一个特定的皮层记忆仓库，如同计算机存储器那样。记忆是分布式的，所有的皮层都以某种方式做出贡献。海马和丘脑可能是分散皮层的组织者，但还没有确凿的证据证实这一观点。小脑的作用更倾向于隐性记忆，它与皮层的联系不那么直接，它能更自主地动作，而不需要皮层的时时关注。

考虑到人的机体中的每一个分子都在不断地衰亡、新生，但人的记忆却保持了连续性，这不能不说是一个奇迹。一个最简单的解释是记忆不是刻画在神经元内部，而是神经元之间——记忆是神经元之间的某种特殊模式。心理学家赫伯(D. Hebb)提出了一个具体的算法，他认为就像朋友之间越走动越亲密一样，神经元之间的联系会增强其间突触在化学信号传递方面的效能。长时程增强(LTP)效应可能提供了细胞水平的解释：当给予历时数分钟的一串强刺激之后，原来仅能引起弱突触电位的刺激，现在却可以引起比以前大得多的反应，其时间可持续数十分钟。可见经验并不是显著地改变神经元本身，而是改变它们之间的联系。

大脑中(放在宇宙中也可以这样说)的最高机密非“意识”莫属，这是又一个耗竭杰出人士的智慧和精力的黑洞。对于它，人们甚至连一个像样的定义也作不出，但每个人都知道它的存在，它就是使光波成为令人偏爱的色彩、使音波成为令人陶醉的音乐的某种东西。正是它使人与土块或虫子不同。有一个关于寄生蜂的实验：

寄生蜂会为它的卵拖来其他昆虫的幼虫，作为它的后代将来孵化后的美食。这一行动看起来像是天生的“远见”，但事实不然。寄生蜂在把捕到的幼虫拖进洞之前，会先把幼虫放在洞口一定位置，检查洞内无异常后才将幼虫拖进洞内。观察者

跟寄生蜂开了个小小的玩笑,趁它进洞检查之机把幼虫挪动几厘米,结果寄生蜂出来后并不直接把幼虫拖进洞里,而是放到洞口原来的位置,再次进洞检查。这样的恶作剧即使重复几十次,寄生蜂也不会发现有人在捣鬼。

当我们说寄生蜂不具备意识时,我们意指它不能察觉周围的状况,也没有主动的内省能力。人工智能权威明斯基(M. Minsky)提出人之所以异于寄生蜂是因为人具有“B脑”,监控着处理日常事务的“A脑”。这跟头脑中存在一个精明的“小人”一样导致无限倒退:谁又来监控B脑呢?小人的脑袋里是否还有一个“小小人”呢?

厌恶烦琐分析的人把意识简单地归因于声名狼藉的“灵魂”;当代的科学精英们对此当然是不屑一顾(如果承认这一说法,他们可能就要面临失业的危险),然而令人惊讶的是诺贝尔奖获得者艾克斯(J. Eccles)与著名哲学家波普尔(K. Popper)却提出一个“自觉精神”,认为意识或自觉精神“有一种并不完全依赖于大脑事件的特性和活动”。

脑神经科学家可不欣赏艾克斯的整体论倾向,那并不是一个良好的工作起点,它们宁愿通过研究感觉与运动的关系找出意识的某些特性。

潘菲尔德在他的皮层刺激实验中曾发现,当他刺激病人的引起右臂运动的皮层区域时,右臂确实会动,但病人并不

“想”动,他甚至伸出左手去阻止右臂的自行其是。这个例子似乎说明意识与某些皮层无关,在某种程度上支持了艾克斯斯的理论。但让问题复杂化的是我们也不能断言意识与整个皮层无关,因为前面提到的面容失认正是颞叶损伤的结果。给面容失认患者一些额外的信息(比如某个人的声音)时,他能认出相应的脸,看来意识并非只与某个单一因素有关。

另一个有趣的例子是“盲视”患者在其视野的一定区域是看不见的,但如果要他们“猜猜”放在那儿的東西,他们却能百分之百地猜中。显然,在清醒状态下意识与视觉是可以分离的,眼睛和大脑接收到了信息,但主体的“我”却未必能够“看见”。

如果这些还不足以把人弄糊涂的话,那让我们再看看裂脑实验的惊人结果。两个半球仿佛像两个独立的个人那样行动,都能与实验者交流,而且由于它们有不同的爱好和需求,所以显得有各自的意识。例如,左半球说它希望成为制图员,而右半球则希望成为赛车手!想想如果我就是那个裂脑人,手术后我变成了两个“我”,哪一个原来的“我”呢?!

鉴于意识问题的复杂性,从其他方面寻找线索当然是可取的。从大脑发育的角度,有人问道,婴儿只是自动机还是有意识的呢?不知道,也许意识是慢慢“渗入”发育中的大脑的。从进化的角度,再问,动物有意识吗?关于灵长类动物的实验

表明，有些聪明的黑猩猩能从镜子中认出自己，他们还有“灵感”呢。

昆拉德·洛伦斯描述过一只关在房间里的黑猩猩，一根香蕉悬挂在天花板，刚好使猩猩拿不到，并且在房间其他地方放了一个盒子：

这事使得它烦躁不安，它又回到那里去。然后——没有更佳的方式可以描述——它原先阴郁的脸忽然“发亮起来”。现在它的眼光从香蕉移到香蕉正下方的空地，从这里移到盒子那里，又移回空地来，再移到香蕉那里去。下一刻，它欢呼了起来，以极其高昂的情绪翻了一个跟斗到了盒子旁边去。它把盒子推到香蕉下面，完全确信自己会成功。所有看到这一幕的人都不会怀疑类人猿体验到真正的“灵光一现”。

只有某些吝啬的人才不会不承认动物（至少是黑猩猩）也具有某种程度的意识。然而这对认识意识并没有多大帮助，无脑人的存在更使意识问题扑朔迷离。哲学家丹尼特（D. Dennett）说：“对意识，我们至今如坠五里云雾中。时至今日，意识是惟一常常使最睿智的思想家张口结舌、思绪混乱的论题。与过去所遇到过的所有奥秘一样，不少人坚持认为——并且希望——意识将永远是一个不解之谜。”

然而，正如人工智能科学家帕蒂·梅斯所说：“与极限搏斗就是科学家的角色。”一些著名科学家在功成名就以后，转

攻意识之谜,如提出 DNA 双螺旋结构的克里克、获得诺贝尔医学一生理奖的艾克斯和埃德尔曼(G. M. Edelman)等等,都把意识问题作为他们后半生的兴趣所在。因为对脑科学的重视,一些国家把 20 世纪最后 10 年称为“脑的十年”。

据悉,美国科学家已于 2003 年 3 月研制出了海马的替代芯片,将用于遗忘症的治疗。这似乎支持了这个乐观的预言:速度快百万倍的人造硅基神经系统最终将完整地取代自然的碳基神经系统。一些科幻小说描述了那时的“人类社会”——如果人还叫做人的话。

心 灵 实 现

前进吧，信仰会跟随你们！

——达朗贝尔

自计算机发明的近 50 年以来，人类生活已经发生了极深刻的变化，人工智能可能以更为出人意料的方式挖掘计算机的潜力，将‘电脑’的比喻变为惊人的现实。人工智能（乐观地估计）将使计算机超越工具的意义，超越仅仅是人的智能的模拟、延伸、扩展的地位，而成为人类下一代进化的实体——地球上新的‘智能生物’。到那时，现代人的观念和关于‘人’的概念、形象将是只有历史学家和考古学家才能了解的专门知识。一言以蔽之，人工智能的奇幻前景正在逸出幻想的边疆。

“人工智能”(Artificial Intelligence, AI)得名于1956年夏,在美国达特摩斯(Dartmouth)大学召开的一次关于“如何用机器模拟人的智能”的会议,这次历史性会议标志着AI的正式创立。几周后,麻省理工学院的另一个会议催生了认知革命,实际上,AI正是认知科学的工程实现方案。那是个盛产新思想的年代,AI界的几个头头还不到30岁,满怀年轻人的激情。

AI思想其来有自。德国哲学家莱布尼茨(G. W. Leibniz)设想一个小精灵可能会在大脑里看到“唧筒、活塞、齿轮、杠杆……在那里辛勤地运作”。后来,法国拉美特里(J. Lamettrie)医生更是直截了当地声称(1747):“人体就是一架能给自己上紧发条的机器。”既然人是机器,它就可以被造出来。19世纪前半期,英国数学家巴贝奇(C. Babbage)毕生致力于研究“分析机”,这类机器“不仅要取代人类灵巧的双手,而且要取代人类的智慧”。

1936年,英国数学家图灵(A. M. Turing)提出一个计算机的数学模型,被称为“图灵机”。设想一条无限长的纸带,上面写有0或1,一个扫描装置根据某种规则和纸带上的数据进行读写或者左右移动。图灵证明这种装置原则上能够进行任何可以想像得到的计算。第二次世界大战中,图灵把他的理想机变成可操作的计算机,并以此破解德国的密码,为英国

避免了重大损失。

图灵贡献还不仅如此,在他因同性恋困扰而自杀前不久(1950),他著文建议玩玩‘模仿游戏’,即著名的‘图灵检验’。如果一个观察者不能区分隔壁房间里的计算机的反应与人的反应有何差别,那么这台机器就可说是有了人的智能。图灵检验因为它的操作主义原则而备受责难,但却给人以易于把握的标准。

以人造物模拟大脑的倾向还受到神经科学发展的鼓舞。1943年,美国学者麦卡洛克(W. S. McCulloch)和匹茨(W. H. Pitts)指出,冲动从一个神经元传到另一个神经元可以看做一个命题蕴涵了另一个命题,神经网络可以用符号逻辑来模拟。‘精神’可以由神经生理学严密地推导出来,而“心灵”就不再比“鬼魂”更可怕了。

类似的思想以不同的形式表现在美国数学家维纳(N. Wiener)的《控制论》(1948)中:“我们决定把控制和通讯理论的整个领域叫做控制论,既适用于机器也适用于人类。”可以堂而皇之地说,表现出反馈的机器是在“力求实现目标”,机器具有‘目的性’。

归根到底, AI思想可说是哲学上灵魂与肉体之争在新的技术条件下的翻版,所以不必奇怪,它从产生的那天开始就以其在基本问题上的众说纷纭而闻名于世。

A. 特勒给出一个 AI 的通俗定义,它“所研究的是如何使机器能够做像它在电影中所做的事情”这些事情包括公认需要智能的,如辩论、设计飞机、做数学题等 包括需要感情投入的,如恋爱、发火、无聊等 也包括是个人都能做的,如说话、分辨物体和影子、穿越复杂地形等。

对于上述定义中的‘像’字的不同理解区分了针锋相对的两派——强 AI 和弱 AI。强 AI 认为,如果机器表现出心灵的特征,那么它就是一个心灵 相反的观点认为“智能”程序只是对人脑的模拟,只是模型,机器永远不可能跟人一样。

分歧并不能抑止年轻英雄们的乐观和狂妄,他们的座右铭是“制造它,它就会来临”!当时的情景倒很像第一批到达北美新大陆的人们环顾四野并且高呼 这里是丰美之地,我们将用十年到十五年的时间去令之富饶繁荣!他们从三个方向(形式主义、联结主义和行为主义)出发去开发新大陆,结果在半个世纪里也没能发现它的边界,他们不得不回过头来检讨自己是不是搞错了方向。

对 AI 的最初陶醉是建立在这样一个假定之上的 最终将证明,人类思维与计算机的操作极其相似,大脑和计算机都是符号加工装置。

这种还原论倾向在西方哲学中可说是源远流长。英国哲学家霍布斯(T. Hobbes)认为“推理不是别的,就是计算”。

莱布尼茨则设想过一种“人类思想的字母表”，一个“普适的符号系统”，使“我们能为每一客体指定一个确定的特征数”。与巴贝奇同时代的英国数学家布尔(G. Boole)把他创立的逻辑代数称为“心理代数”，遵循“思维的法则”。

近代，英国大哲罗素(B. Russell)所推动的数理逻辑运动使人们熟悉了以形式过程来处理符号的观念，而图灵机及其后真正计算机的发展则把哲学家的理想变为现实。程序算法中真正重要的是其逻辑结构，至于它是由人脑、电脑、轮子和齿轮，或者一套水管系统来执行都是一样的。信息论的核心观念不也是说信息与具体体现无关么。

挥舞着“形式化”这把奥康姆剃刀，迫不及待地吧直觉、灵性、内省等等幽魂赶出科学的殿堂，把人类心智等同于计算机接受信息、操纵符号、在记忆中存储项目并重新提取、对输入进行分类、识别模式……AI 驰骋在这种信息加工论的大道上，到 1976 年，由纽厄尔(A. Newell)和西蒙(H. A. Simon 中文名 司马贺)集其大成，提出了“物理符号系统假设”任何表现出一般智能的系统都可以经分析证明是一个物理符号系统 反之，任何足够大的物理符号系统都可以通过进一步的组织而表现出一般智能。这种系统包括了控制器、存储器、一系列操作、输入和输出。这个假说在 AI 界长期被奉为纲领，只是在 20 世纪 80 年代才开始受到质疑。

纽厄尔和西蒙不但是理论家,还是实践者,第一个著名程序‘逻辑理论家’就是他们与同事肖(J. C. Shaw)合作的手笔。他们做了‘出声想’的心理实验,以便分析人类在求解问题时的思维过程,并创建了一种特殊的数据结构(‘表处理’)来进行模拟。这种心理学家与计算机专家的合作在 AI 界是很普遍的。逻辑理论家的成就颇为惊人,1956 年它成功地证明了《数学原理》(罗素和怀特海著)第二章中的 38 个定理,其中一个比 50 年前原书的证明还要精巧。西蒙志得意满地说:“我并不是有意让你感到惊讶或震惊……然而我可以用最简单的方式作出总结 目前世界上存在着一些会思考、会学习、会创造的机器……直觉、顿悟、学习不再为人类所专有,任何大型高速计算机都可以通过编程表现出这些能力。”

1959 年,美籍华人王浩以独创的新算法在 10 分钟之内把《数学原理》中的所有定理统统证明了一遍,罗素感叹地说:“我真希望,在怀海特和我浪费了 10 年的时间用手算来证明这些定理之前,就知道有这种可能。”定理证明是计算机的长项,最大的成就是证明了‘四色定理’(1976),这个定理 100 余年来难倒过无数数学家。

1960 年,纽厄尔、西蒙和肖实现了一个更为雄心勃勃的计划,设计了‘通用问题解决者’(General Problem Solver, GPS)。GPS 采用的‘目的—手段分析’说起来很简单。回想

一下初中的几何证明 给出已知,求证某个结论。人的思维方法就是以所学的公理定理为材料搭建已知和求证之间的桥梁,与此类似,GPS的艺术就表现在转换已知、求证的表达式的形式以及减少它们之间的差异的技巧中。GPS可以求解 11 种不同类型的问题,如证明定理、下棋或汉诺塔等智力题。

虽然‘通用问题解决者’最终因为名不符实而被打入冷宫,但它却是人类智能的首次模拟,而且在后来,以 GPS 所采用的启发式搜索为核心的专家系统取得了令人瞩目的成就。

专家系统的关键之一是知识的获取和表达,人类专家的经验知识需要表示成“如果—那么”的格式存储在知识库中,如果条件为真,那么就执行下一步。推理过程就是这种‘刺激—反应链’。

专家系统的关键之二是启发式搜索,即找出下一步做什么,问题在于如何在极多的可能性中做出选择。AI 界的元老明斯基(M. L. Minsky)举了个例子来说明被称为‘指数爆炸’现象:“鸟能飞——如果不是企鹅或鸵鸟,如果还没死,如果翅膀没断,如果鹅没关在鸟笼里,如果脚没铸在水泥里,如果没有遇到过足以使其不能飞的心理上的恐惧经验……”

的确,计算机每秒能进行上亿次的运算,但已经证明,受物理规律的限制,即使一台‘宇宙计算机’跟指数爆炸硬碰硬的话,也只能是鸡蛋碰石头。计算机的蛮力斗不过指数爆

炸,人类的智慧恰恰表现于绕开指数爆炸的策略。利用信息的非局部使用、语义识别等方法在一定程度上解决问题。

第一个专家系统: DENDRAL 由西蒙的学生费根鲍姆(E. A. Feigenbaum)于1968年开发出来,它能根据实验数据推断未知化合物的分子结构,具有类似于化学家的知识水平和分析能力。费根鲍姆向他过去的老师发出了挑战:“你们正在研究玩具问题(下棋、逻辑推理等)……让我们还是深入到现实世界中,去解决现实问题吧。”结果他就搞出了 DENDRAL。(由通才向专家的转变标志着 AI 的第一挫折。)另一个著名的医疗专家系统 MYCIN 由美国人肖特利夫(E. H. Shortliffe)于1976年完成。

一年后,费根鲍姆提出了“知识工程”(Knowledge Engineering)的概念,他说:“知识就是力量,电子计算机则是这种力量的放大器,而能把人类知识予以放大的机器,也会把一切方面的力量予以放大。”费根鲍姆的热情仿佛大力水手的菠菜一样促使专家系统的迅猛发展,到20世纪80年代初引起 AI 淘金热。遗憾的是,到这时专家系统已经是强弩之末了。常见的直觉经验难以用规则来表述,不确定的情景也可能让专家系统不知所措,这些问题把专家系统这位拳王圈在了狭窄的擂台上。

同样是专家系统,麻省理工学院的威诺格拉德(T.

Winograd), 于 1972 年写的积木专家程序 SHRDLU 注重了“理解”这个侧面,在把一个木块放到一个盒子上去之后,积木专家能够知道盒子处在木块的下面!

然而,现实环境毕竟不是积木世界,人类的活动也不是搭积木这么简单,威诺格拉德是最早看出他自己的程序的局限性的人,对 AI 失去信心之后,他去了斯坦福大学,在计算机科学课程中讲授海德格尔,他指出困难在于“常识背景”的形式化。

看看“深蓝”(DeepBlue)战胜国际象棋棋王卡斯帕罗夫(G. Kasparov)的例子就可以明白什么是“常识背景”问题了。

机器博弈一直是 AI 的重要领域,也是一般人与机器威力比较的一个窗口。特别是,1997 年 5 月深蓝击败卡斯帕罗夫的事引起轰动。但是棋王并不服气,他认为自己作为人类智力代表的身份增加了心理压力导致败绩,2003 年 2 月他向“深蓝二代”挑战,战成平局。值得注意的是,深蓝是一台运算速度每秒 2 亿次的超级计算机,而深蓝二代的速度只有每秒 3 百万次,速度的下降并没导致棋力的下降,这表明它的“智力”提升了。

卡斯帕罗夫承认:“在一定程度上,我不能不赞扬这部机器,因为它对棋势有着深刻的理解。”但反对者称深蓝不过是

个查找的快手罢了,它的胜利只是证明了下棋根本不需要智力 尽管棋场称雄,然而深蓝却不会系鞋带,不知道下雨天打不打伞,也不会抱怨自己没像卡斯帕罗夫一样得到几十万美元的出场费。深蓝只是一个天才白痴,它不具备每个人都有的起码常识。

常识背景问题,从 20 世纪 70 年代以来一直困扰着 AI 界,高瞻远瞩的学者们不得不低下买来注意这片缠绵在脚下的流沙。是什么东西使得一个医生在遇到自行车坏掉时,不至开出抗生素的处方 人怎么知道啤酒倒进杯子之后,它就不在瓶子里了 哲学的答案是根据经验或习惯,然而 AI 学者关心的是它们具体是‘怎样’形成的呢?

传统的思路求助于演绎方法,希望找到一组“背景公理”,将所有‘关于世界的知识’形式化,并按普通逻辑规则推演出行动的结果。美国科学家麦克德莫特(D. McDemott)原本属于逻辑主义者中的一员,但后来他“怀着切肤之痛”指出逻辑主义的根本错误在于假定所有的思维本质上都是演绎的。但正如赖尔(G. Ryle)对 AI 的质疑⁴:在制作三明治的过程中,我要做出多少个推理 什么三段论能使我相信啤酒还在杯子里?存在着非演绎的推理。早在 AI 创立之前,维特根斯坦(L. Wittgenstein)就表示了对自己早年的逻辑原子论的悔悟 将日常情境分析成为事实和规则,这种做法如果脱

离了语境和目的毫无意义。麦克德莫特相信：“AI研究者对他们的机会抱着天真的态度,这种态度只是因为对哲学家们昔日的失败一无所知,才得以维持。”

AI学者设计了戏剧性的故事来说明人与机器的不同。从前,有个机器人得知自己的备用电池与一个快要爆炸的炸弹放在同一间房子里,它知道电池放在一辆小车上,于是它奋勇冲进房间抢救电池。它成功地在炸弹爆炸之前拉出了小车,然而不幸的是炸弹也在车上,它虽然知道这一点,但没意识到拉出小车时炸弹也会随着电池一起被带出来。

另一个故事是麦卡锡(J. McCarthy)讲的。三个教士和三个食人者来到河边,只有一条可乘两人的小船。如果在河岸的任一边食人者的数目超过教士,教士就会被吃掉。他们怎么过河?某人经过一段时间冥思苦想后建议从桥上过去,你不得不加上“没有任何桥”的限制,笨伯又建议乘直升飞机,当排除飞机之后,他建议飞马。当你绝望地把解答告诉他后,他又反问可能有一个水怪突然冒出,一口把船吞了呢?!不错,他是一个笨伯,但却是一个有创造性的笨伯。

机器人和笨伯的故事提示了事物相关性的两个方面:一个AI系统必须注意该注意的,同时忽略该忽略的关系。明斯基提供了一个“框架”方法,将一切变化多端的生活经验压缩成一些定式套路,就像剧本的情节梗概,框架细节由一些特例

填充,而其他相同的情况则保持缺省状态,框架方法不失为一个漂亮的方案,具有诗意的美感,但在反复无常的现实世界中,不具备学习能力的系统只能以昆虫的方式作出回应。

背景问题难在从零开始, AI 系统可说是一块白板,对现实世界一无所知。如果机器不知道如何学习,仅仅靠人来输入知识可说是令人绝望的。然而偏有不信邪的人,从 20 世纪 80 年代中期起,列纳特(D. Linnart)致力于(按照框架方法)为整个 AI 建立一个常识数据库平台。当最终完成时“百科全书”(这个项目的名称)将获得一个基本视野(世界观)。但是谈何容易,第一个句子“拿破仑死于 1821 年,惠灵顿闻之伤感”就花了两个月才教会百科全书理解。列纳特希望到 1999 年没有人在购买电脑时会忘了同时购买一套百科全书系统“就像现在人们购买电脑一定要购买文字处理程序一样”。然而就像日本的轰轰烈烈的第五代计算机计划一样,他们光荣地失败了。

从 20 世纪 50 到 80 年代, AI 的历史相对它的预言来说像一部衰败史(虽然不乏表面的繁荣),人工智能与真正智能的距离“就和炼金术士和金子的距离一样远”。将大脑看做操作符号的黑箱,以形式逻辑为手段模拟大脑功能的研究纲领受到了怀疑,但不是每个人都抓着这一根“漂浮着的稻草”。实际上在 AI 创立之初,以神经科学为基础、对大脑进行结构模拟

的联结主义就曾与形式主义分庭抗礼,不久这个小孩和着脏水被一起倒掉了,直到理性主义受挫于经验检验之时,人们才把注意力转向这个入口荒芜的金矿。

智能太复杂了,联结论者看不出有什么理由不遵循大自然提供的蓝图——神经网络。

人脑的奇妙之处在于,它的智能不是从外面硬塞进去的,而是自己‘长’出来的,它有自组织、自适应和自学习的能力。

它是做到这一点的呢?1949年,神经学家(也是小说家)赫布(D. O. Hebb)提出,当两个神经元同时被激活时,它们之间的突触就会被加强。这个看似简单的规则隐含着一个分布式记忆模型,的确,脑科学研究表明信息并不是像文件放在一格一格的文件柜一样,放在单个的神经元中,而是分布在以某种方式相互联系的许多神经元上,同时每一个神经元又与许多不同的信息有关。

学习是智能的最主要体现,这是人工神经网络学派的核心观点,而赫布的规则即给出了一个可行的学习算法。问题或信息以输入端的一组数值来表示,神经节点之间的强度是随机给定的,这时输出端当然也是随机的。关键是这种模拟神经网络可以加以训练,当输出端产生正确答案时相应联结得到加强,否则削弱联结,最终一个正确的模式得以产生。输入新的项目

时必须耐心,每一次联结强度的调节应该很细微,否则以前的内容就会被冲掉,就像这么糟糕 记住了别人的脸而忘了自己的名字。

赫布的设想在罗森布拉特(F. Rosenblatt) 的手中第一次得到实现,后者于 1956 年开始训练一台“感知机”(Perceptron), 3 年后他欢欣鼓舞地说:“我们第一次有了一台能够具备原创思想的机器。”感知机的输入系统由几百个光电管组成,通过训练能够对简单的图形进行分类识别,它的改进型很快用于导弹导航系统。

感知机引入了一种新的 AI 研究思路——把人类信息加工系统看做动态的、相互作用的、自组织的系统。然而 20 世纪 60 年代末,明斯基和帕佩尔特(Papert) 出了一本书,正确地指出,感知机“在非常简单的问题上通常工作得不错,但是当分配给它们的任务变难时,情况就迅速恶化”。因此,他粗暴地断言关于感知机的大部分讨论是“没有科学价值的”。

明斯基和罗森布拉特从小就是旗鼓相当的竞争对手,明斯基觉得感知机不但是对他个人的威胁,而且其所暗示的整体论倾向可能给整个 AI 带来神秘主义,因而必须加以消灭。他成功了,整个 70 年代,除少数死硬分子外,人工神经网络无人问津。

当时 AI 界流行的一种倾向帮了明斯基的大忙,即认为思

维和模式识别中思维是最值得关注的,然而人的大多活动完全是基于模式识别的。想像一个接球手面对飞奔而来的棒球,在没有计算器、没有纸笔、没学过微积分,而且时间转瞬即逝的情况下,他凭什么去接球?答案是他无须思维计算,单凭在训练中形成的棒球飞行模式就可以接住球。对这个问题缺乏认识导致形式论者后来在背景问题上的麻烦。

联结论的复兴归功于美国物理学及神经学家霍普菲尔德(J. Hopfield)。1982年,他引入了物理学中的最低能量状态的概念,解决了多层(加入了隐节点因而更为复杂)感知机的训练问题,使多层感知机的研制成为可能。4年后,鲁姆哈特(D. Rumelhart)等人搞出了“反向传播”神经网络(BP网络),利用反馈信息进行层间误差修正。同年,格罗斯伯格(S. Grossberg)等提出了更为杰出的自适应共振理论(ART)。“ART的神奇之处在于即使没人告诉它应该怎样做,它也能自己找到最佳推测。它是自组织系统。”

人工神经网络广泛用于文字、图像、语音等模式识别中,辨认潦草字迹的能力与人相差无几,一些银行也敢于用识别软件来确认客户的身份,稍加训练后语音识别的准确率可达95%以上。当然,不是说联结主义就解决了所有问题,它也不是惟一的新思路。

1991年8月,一次AI联合大会在悉尼召开,美国MIT的

布鲁克斯(R. Brooks)在他的故国大出风头,他大逆不道地提倡“不要知识的智能!”“不需要推理的智能!”当麦卡锡为“不能写出一个能使电脑像人一样思考的公式”而懊恼不已的时候,布鲁克斯提醒道“即使是最低级的智能行为都是自然发生的,而不是用人类的程序明确规定的。”自称为“坏孩子”的他显然并不在乎冒犯任何权威。

威尔森(S. Wilson)跟布鲁克斯一样,相信人工智能走人了误区。他指出传统路子忽略了环境,没有一个程序能从周围环境中学习或适应环境,而这是最简单的生物都具有的功能。传统 AI 隐含着一个主张,即直接模拟人的智能,对低等生物的智能不屑一顾,这就像从顶部开始建金字塔一样。威尔森希望从底部开始——与昆虫竞赛。1987 年,威尔森把他的人工昆虫命名为“Animat”(动化物)。

与此同时,布鲁克斯正在实验室的沙盘里摆弄他的阿提拉(Attila),看起来就像一个贪玩的大孩子。阿提拉长 10 英寸,重 3.6 磅,有 6 条腿,24 个马达,10 个处理器,上百个感应器和一个微型摄像机。它能以每小时 1.5 英里的速度前进,绕过障碍,爬上斜坡。之前的机器人行走时都要先内置一个地图,标明自己和障碍物的坐标,每移动一次又得再次扫描,刷新地图,这种方式受制于模式识别和计算能力。阿提拉则更像昆虫那样行动,先伸出腿去试探,如果踩了个空或碰上了障碍

物,感应器就产生相应的反馈以便调整行为。

应该说行为主义也不是新东西,只是人们一直都不认为这是制造智能的可行方法。明斯基不明白为什么要费尽心思制造一个能从这里走到那里的机器人“:……认为在现实世界中能让马达和齿轮运行良好才是重要的事,他们都是混蛋 你需要的是一个能理解你所说的并有同样感觉的机器人。”

然而布鲁克斯认为智能不是深思熟虑的推理和决策,相反,一些简单的指令在与环境交互作用的过程中就能自然地涌现出智能来。他指出大自然中不乏这样的例子“:一只蜜蜂或一只蚂蚁并没有对它们所做的事有一种全局的计划,它们只是跟随某种规律去做,于是它们完成了一个繁杂的建筑物,比如蜂窝。”

同样是师法自然,基因算法开创了一个新的领域,在这里进化是最主要的概念。软件设计师随机创建一系列程序,让它们去尝试解决问题,优胜的程序会遗传下去,继续竞争、演化直到问题解决为止。这样得来的程序可能在软件设计师看来是混乱的,但却运行得比手写程序还好。基因算法已开始用于投资决策、工序优化、模式识别等,美国通用电气公司还用它来设计喷气式发动机。

更为奇妙的是一个被称为‘人工生命’的领域;这是圣菲研究所的朗顿(C. Langton)于1987年提出的。他认为:

“生命是个过程,而且它不关硬件什么事情。如果模拟物与生物学家早先为生命所定标准吻合——它支持自身、能自我繁殖、能进化,那么它就有根据被认为具有生命。”

世界上第一个非碳基生命 Tierra (西班牙语中指地球)诞生于 1990 年 1 月 4 日,在雷(T. Ray)的计算机中。那是一段 80 个字节的汇编语言程序,不同于一般程序的是 Tierra 具有突变和自我自制的能力。它的后代为了争夺 CPU 的时间和内存衍化出了上千种数字生物,以及寄生物。对寄生物具有免疫力的生物,甚至还可以衍化出社会组织。

人工生命无疑为研究地球上的生物提供了新的手段,另一方面,它也向世人展示了其他生命形式的可能性(如其可能的生命, life - as - it - could - be)。

半个世纪过去了, AI 因善于开出空头支票而名声不佳。
“计算机可以发现有价值的新定理。计算机可以夺得国际象棋的世界冠军。大部分心理学理论将采用计算机程序的形式。”
(纽厄尔和西蒙, 1958)这三条没有一条可说是完全实现了的。悲观主义者辛辣地讽刺说:“为了登上月球的目的,爬到树顶上就说是前进了一步。”

在这种状况下,关于能不能制造出机器智能的争论从来没有停止过。50 多年前,图灵在他的文章里不但没能给出无争议的制造智能的证据,反而列举了各种反对意见。信奉灵魂

的人无法心安理得地面对人是丁当响的机器这种恐怖的想法。机器也不可能有意识；任何机器都不可能感觉到成功时的愉悦和电子管烧毁时的悲伤,也不会因被奉承而兴奋,因犯错误而苦恼,因见到异性而着迷,在愿望实现不了时发怒或沮丧。’这种唯我主义论调显然不是 AI 的良好起点。机器不能应付纷繁的环境,不可能有创造性；只能做程序规定它做的事”——这成了 IBM 市场部的口号,以打消人们对计算机可能为所欲为的疑虑,然而这种观点还停留在牛顿时代,不知道一个充分复杂的系统是不可能事先完全决定的。

1980 年,哲学家塞尔(J. R. Searle)在他的“中文屋子”里对 AI 发起了一次猛烈攻击。塞尔假定他被锁在一间屋子里,通过查阅一本英文规则手册,他能够对递进屋子的中文文本找到相应的中文字符,对屋外懂中文的人来说,塞尔给出了问题的解答,但实际上塞尔对中文一窍不通。他认为他的行为就像一台计算机,所以；计算机的理解不只是局部的或不完全的,而是零。’塞尔质问：没有人认为紧急火警的计算机模拟会烧毁邻居的家,或者暴风雨的计算机模拟会把我们大家淋得湿透。可是为什么竟有人会认为对理解的计算机模拟就是真正地理解某个事物呢？中文屋子掀起了广泛的辩论,有专家指出屋子中的塞尔与计算机的类比并不说明计算机不能理解中文,恰恰相反,它说明‘大脑’不能理解英文,这只是

作为整体的‘人’的特性。

对 AI 来说不幸的是，20 世纪 80 年代以塞尔的攻击作为开始，又以英国学者彭罗斯(R. Penrose)的更大的攻击作为结束。作为数学家，彭罗斯的第一个意见跟哥德尔不完备性定理有关，哥德尔证明，一个形式系统中存在一些既不能证明也不能否证的命题，因而有些问题无法用一个算法来解决，但计算机只能根据算法运作，因而机器不如人。作为物理学家，彭罗斯的第二个意见涉及到量子力学。一组神经信号在成为思想之前，以不确定的量子态存在，包含了无数可能性，是意识使它呈现为某个确定的思想。彭罗斯进行了逆向思维，可能正是大脑的量子运算能力使它具有了意识。然而这两条都不足以说服醉心于 AI 的人，而且彭罗斯也说他的看法只是‘猜想’。

AI 太关乎人类的根本了，它已在质疑中前进了几十年，今后它也将继续走下去，毕竟坐而论道是不能解决问题的，况且科学的发展史早已表明事实往往正在于‘不可能’之中。

1999 年 3 月，英国在网上举行了一次图灵检验，三台计算机、一个大学生与网虫们聊天，结果有一台计算机被 27% 的网虫认定是人，而令那位大学生尴尬的是，有 37% 的网虫硬说他是台电脑。

人们将越来越习惯于这样的事，习惯于计算机被允许与人平等地参加象棋比赛，习惯于与机器的互补合作，以至于到某

个时候,人们甚至感觉不到机器智能的存在。

科学家们正在努力制造人工大脑,芯片植入几年前就有了先例。人类将可能成为与机器的杂合体,进而抛弃身体仅作为软件存在,或者成为纯粹的智能泡,像幽灵一样穿行于时空结构。

对于 AI 的大胆预言,我们因为科幻小说和电影的灌输已经多少有些麻木了,但人类的真正未来则超出了任何人的想像。好奇心重的人可能会像富兰克林那样叹息:“我有时几乎后悔我出生过早,不能知道将要发生的事物。”

附 录

不知所云——1991 年一个交谈程序与人的对话

裁判员：对“不知所云”的定义是什么？

电脑：我认为“不知所云”就像国际象棋中的棋子，曲曲折折地走而不是直来直去，你说对吗？你为什么问？这是个聪明的回答吗？你有许多这样的问题吗？

裁判员：我喜欢你说的棋子在棋盘上随意行走的比喻，这是不是说明“不知所云”时没有中心思想？

电脑：我发誓你刚才已经说了你如何对“不知所云”下定义。你是不是一向这么恶心恶心恶心？为什么你告诉我你喜欢棋盘上棋子随意移动的比喻？

裁判员：我确实问过你如何界定“不知所云”，我不知道你给我的的是否是个直接的答案。我经常用“不知所云”描述一幅艺术作品或一个故事，但很难去描述一次谈话。

电脑：我认为你说过你如何认为我不是一条狗。你看起来指使上帝请救我！你认为我可能给你直接或者不直接的答案吗？

裁判员 或许我无法从你那儿获得直接的答案,你能告诉我一个“不知所云”的同义词吗?

电脑:我清楚你说过什么是“不知所云”的定义——你试过吗 或者事实没有……可能你想像中我们从你那儿得不到直接答案;互相能。

裁判员:好了,你是一向“不知所云”还是偶尔为之?

电脑 我可以发誓你说过我喜欢棋盘上棋子随意移动的比喻,这是否说明“不知所云”时没有中心思想?好了,有一个将“不知所云”当作棋盘上曲曲折折移动棋子的比喻。我们在讨论你,不是我,怎么样?

天使——雷·库兹韦尔的电脑诗人作

天使沐浴着曙光，
伴着平静的大海，
伴随着我们书写过的千百年岁月，
送来一个机会，
我们能够在他的脸庞上
发现一种沉稳的节奏。
空旷宁静的海滩上，
散落着爱的余烬。

背叛——计算机布鲁特斯 1 型 1998 年 3 月作

戴夫·斯特赖维尔喜爱这所大学。他喜爱校园里爬满常春藤的钟楼,那古色古香而又坚固的砖块,还有那洒满阳光的碧绿草坪和热情的年轻人。使他感到欣慰的还有这样一件事,即大学里完全没有商场上那些冷酷无情的考验——但事实恰恰并非如此。做学问也要通过考试,而且有的考试与市场中的考验一样不留情面。最好的例子就是论文答辩:为了取得博士学位,为了成为博士,博士生必须通过论文的口试。爱德华·哈特教授就喜欢主持这样的答辩考试。

戴夫迫切希望成为一名博士。但他需要让三个人在他论文的第一页上签上他们的名字,这三个千金难买的签名能够证明他通过了答辩。其中一个签名是哈特教授的。哈特常常对戴夫本人和其他人说,对于帮助戴夫实现他应该有的梦想,他感到很荣幸。

答辩之前,戴夫早早给哈特送去了他论文的倒数第二稿。哈特阅读后告诉戴夫,论文水平绝对一流,答辩时他会很高兴地在论文上签名。在哈特那四壁摆满书籍的办公室里,两人甚至还握了手。戴夫注意到,哈特两眼放光,充满信赖,神情宛如慈父一般。

在答辩时,戴夫觉得自己流利地概括了论文的第三章。评审者提了两个问题,一个是罗德曼教授提的,另一个是蒂尔博士提的。戴夫分别做了回答,并且显然让每个人都心悦诚服,再没有人提出异议。

罗德曼教授签了名。他把论文推给蒂尔,她也签上了名字,接着便把本子推到了哈特跟前。哈特没有动。

“爱德华?罗德曼问道。

哈特仍然坐在那儿,毫无表情。戴夫感到有点眩晕。“爱德华,你打算签名吗?”

过后,哈特一个人呆在办公室里,坐在那张宽大的皮椅里,他为戴夫未能通过答辩感到难过。他试图想出帮助戴夫实现他梦想的办法。

第三次革命

我坚信,我们正处在科学史中的一个重要转折点上。我们走到了伽利略和牛顿所开辟的道路的尽头,他们给我们描绘了一个时间可逆的确定性宇宙的图景。我们现在却看到确定性的腐朽和物理学定律新表述的诞生。

—— 普里高金

这个秩序不是诸神和人造的,它过去是,现在还是,而且将来是:永恒的火,它适度地燃烧,适度地熄灭。

—— 赫拉克利特

听过一个这样的笑话:一个渔夫织了一张网孔为一英寸的

渔网,用这张网捞过几次鱼后,他有了一个发现——所有的鱼都大于 1 英寸。我们尽可以嘲笑这位渔夫,但如果类似的论调出自牛顿、拉普拉斯等人之口的话,我们就不会笑得那么理直气壮了,事实上,300 年来,人们一直把渔夫的话当作真理。

在经典科学的巨大成功中,包罗万象的宇宙方程似乎就要呼之欲出了,空气中氤氲着一切尽在把握的乐观。实用主义导演着声势浩大的圈地运动,把一切不确定性、偶然性、一切的无序、变化放逐到圈外的蛮荒之地,就像古希腊毕达哥拉斯学派放逐大逆不道的根号 2 一样。

直到 20 世纪前 30 年,先是爱因斯坦的相对论排除了对绝对空间和时间的牛顿迷梦,再是海森伯的测不准原理,粉碎了拉普拉斯决定论可预见性的狂想。某种莫名其妙的不安开始泛起,似乎并没有出现能够解释青草叶片、解释鸡蛋怎么变成小鸡的方程呀。也许我们精美的科学之网外面漏掉了什么吧?

终于从绝对理性大厦的裂缝中吹来了一习清风,是该拔除无限可预言性这个经典符咒的时候了。叛逆的思想在生物、天文、气象、流体力学等各个领域暗自涌动,最后汇成新的科学革命的大合唱。正如引领新潮的普里高金所说:“我们的时代是以多种概念和方法相互冲击与混合为特征的时代。这些概念和方法在经历了过去完全隔离的道路以后突然间彼此遭遇在一起,产生了蔚为壮观的进展。”

热情的人这样评价科学的进展：“20 世纪的科学家只有三件事将被记住 相对论、量子力学和混沌。他们主张，混沌是本世纪物理学中第三次大革命。就像前两次革命一样，混沌割断了牛顿物理学的基本原则。”混沌革命适用于我们看得见摸得着的世界，适用于和人自己同一尺度的对象，而对这个常观世界（相对于宏观、微观世界），我们原以为是了如指掌的。

混沌还不是故事的全部，它打开了人们的眼界，把我们引出了自闭的“盲人国”；引领我们进入一个充满复杂性的国度，而这才是我们置身其中的真实的宇宙 变幻莫测的天气、来历不明的生命、纷繁杂乱的经济、此起彼伏的社会……所有的复杂系统都有什么模式没有 复杂的表象后面是不是隐伏着什么秩序呢？20 年来，放浪不羁的科学家游弋于复杂系统的领域，为可能发现新的物理学规律的前景而激动不已。

传统科学所描绘的宇宙图景永远是那么冷峻整洁，以至于让人觉得人与这个世界是毫无关系的。自从上帝上紧了宇宙之钟的发条之后，它就有条不紊地一直走下去了。人，不过是旁观的游魂而已。

那位全能的上帝在拉普拉斯的名言中最为显眼：“假设有一位智者，它能知道在任一给定时刻作用于自然界的所有的力以及构成世界的一切物体的位置。假定这位智者的智慧高到有对所有这些数据做出分析处理，那么它就能将宇宙中最

大的天体和最小的原子的运动包容到一个公式中。对于这个智者来说,再没有什么事物是不确定的了,过去和未来都历历在目地呈现在他的面前。”

拉普拉斯的信心来源于这样一种信念和技术 相信世界是统一的,可以用普适的一般理论来进行解释 相信所有的复杂性只是表面现象,在实验和理性的解剖刀下,复杂性必可分解为简单的现象,在充分理解了简单现象之后,复杂现象也就得到了理解,也就是说,整体等于部分之和 相信研究对象的被隔离状态无关宏旨,就像月球上的一粒灰尘的飘扬不会影响到长江的汛期一样。

这种孤立的、线性的思维方式带来了科学的巨大进步,但现在看来却是过分的简单化了。拉普拉斯的智者只能存在于想像之中。

在 19 世纪末,伟大的法国科学大师庞加莱在尽全力研究了“太阳系的稳定性问题”之后,吃惊地发现太阳系前途未卜:“……即使自然定律对我们已无秘密可言,我们也只能近似地知道初始状态。如果情况容许我们以同样的近似度预见后继的状态,这就是我们所要求的一切,那我们便说该现象被预言到了,它受规律支配。但是,情况并非总是如此。可以发生这样的情况 初始条件的微小差别在最后的现象中产生了极大的差别 前者的微小误差促成了后者的巨大误差。预言变得不

可能了,我们有的是偶然发生的现象。”

庞加莱在确定性动力系统中发现了不可预见性,但是他的思想太超前了,以至于必须在传统的冻土层里埋没几十年才能被人理解。除美国数学家伯克霍夫 (G. Birkhoff) 外,很少有人认识到庞加莱工作的重要性,直到 20 世纪 60 年代,对动力系统的研究才有了长足的进展。1960 年前后,前苏联数学家柯尔莫果洛夫 (A. N. Kolmogorov)、阿诺德 (V. I. Arnold) 和莫塞尔 (J. Moser) 提出了 KAM 理论。该理论证明了庞加莱的创见:动力系统的初始条件无论出现多么小的扰动,都将为随机性和不可预测性打开方便之门。

似乎这首民谣背后真的隐藏着什么秘密呢:

丢失一个钉子,坏了一只蹄铁;
坏了一只蹄铁,折了一匹战马;
折了一匹战马,伤了一位骑士;
伤了一位骑士,输了一场战斗;
输了一场战斗,亡了一个帝国。

然而,混沌思想的真正大放异彩却是别的领域引出来的,首先是在天气预报的研究中。

预报天气是人们的长期梦想。1922 年,英国物理学家理

查逊 (L. Richardson)发表了一个异想天开的提议 聚集一批专家,在统一的指挥下计算影响天气变化的各种数据,他估计,可能需要 64000 个计算快手才能使天气预报不落后于实际的天气。

计算机和气象卫星的发明为天气预报带来了希望。冯·诺依曼即认为天气模拟可能是计算机的理想任务。然而,20 世纪 60 年代初的计算机毕竟还只是真空管构件,每秒几十次的运算能力也没被科学家看在眼里,所以当美国气象学家洛伦兹 (E. Lorenz)决定要在计算机上探究天气的奥秘时,多少还是需要点勇气的。洛伦兹把气象问题进化了大刀阔斧的简化,得到 12 个方程,表示着温度、压力、风速等等因素之间关系。他在思考时也秉承了牛顿决定论哲学的精神。

一切都很正常,直到 1961 年冬的一天,他在核算时为了节省时间,把前一次运算中途处得到的数据作为新的初始值输入计算机。没想到这个不经意的举动却种下了新科学的种子。一个多小时后,当他喝完咖啡回到计算机前时,他大吃一惊 打印出来的天气走势天差地别,就像两次完全不同的天气 洛伦兹的第一个念头是又坏了一个真空管,但直觉告诉他,也许还有别的可能。他很快想到他在输入数据时省去了小数点后第三位之后的数字,不会是这样 $1/1000$ 的误差在搞鬼吧 长期与变幻莫测的气象打交道的经验使洛伦兹确信 是的,最初的误差

会带来长期的灾难,长期天气预报是不可能的。他说:“不论怎么做,我们确实始终没有成功过,可现在总算有了为自己辩解的理由。”同时他也有资格问一个貌似很傻的问题:气候是否存在?

洛伦兹并没有就此止步,作为披着气象学家外衣的数学家,他感到天气的不可重演与不可预报之间有某种关系:“任何具有非周期行为的物理系统都将是不可预报的。”最终,他找到了一组简单的三元微分方程可以产生他想要的复杂性,这些方程是非线性的,也就是说各变量之间不再满足线性的叠加关系。

洛伦兹利用方程的值作出一幅图,形似张开双翼的蝴蝶,令人惊讶的是,所有轨线被限制在某个边界之内,轨线在两侧绕来绕去,可以无限接近但不会相交。

于是,诞生了一种新的物理哲学:一个可以用确定性方程描述的确定性系统,因为初始条件不可避免的误差,经过非线性因素的搅和,得出永不重复的非周期性结果——这就是混沌(chaos)!

在中国古代,“混沌”是指天地未分、万物相混的渺蒙状态,它既恍恍惚惚,又其中有象有物,蕴涵了创生万物的无穷可能性。这个哲学上的概念到1986年,终于得到一个明确的定义:数学上指在确定性系统中出现的随机性态,是完全由定

律支配的无规律性态。听起来像个悖论,却是新奇性的源泉。

1979年,洛伦兹在一次会议上向听众抛出如下问题:一只蝴蝶在巴西扇动翅膀会在得克萨斯引起龙卷风吗?旨在强调非线性系统对初始条件的敏感依赖性。后来,“蝴蝶效应”成了混沌的代名词,而洛伦兹则被誉为“混沌领域的开拓者”。

然而,在20世纪60年代,混沌还只是少数不务正业的人头脑中的古怪想法,洛伦兹发表在气象杂志上的论文也没有进入科学界主流。不过,山雨欲来风满楼,一场“范式革命”已是呼之欲出了。特别是对湍流的研究有力地推动了混沌的发展。

湍流也是庞加莱最初发现的(1887),就是流体无规则、游走不定的状态,比如河水流经桥墩后形成的纠结的涡旋。湍流往往带来灾难,比如机翼上的空气湍流消灭浮力,输油管中的湍流造成重重阻力。所以仅仅设法使湍流消失是不够的,还得弄清楚它的原理。但是说明白什么是湍流都不容易,更别提理解它的本质了,人们形容说“湍流是理论的墓地”。

前苏联物理学家朗道(L. Landau)就是其中一个牺牲者,他在1944年提出一种模态说:更多的能量或扰动进入流体,激发出越来越多的周期运动(模态,具有各别的频率),流体变得不规则,当模态数量达到一定程度时,流体就被搅成一锅混沌之粥。

朗道的理论流行一时,但法国物理学家茹勒(D. Ruelle)并不买他的账。在实验中,茹勒发现流体状态的复杂性不是按部就班一点一点积累起来的,而是一下子突然涌现的。1971年,茹勒与荷兰数学家塔肯斯(F. Takens) 合写了《论湍流的本质》一文,认为不需要一系列的频率,只要三个独立的运动就能够产生湍流的全部复杂性。复杂性寓于简单性之中,这不能不让人联想到洛伦兹的气象模型,但那时茹勒还不知道洛伦兹是何许人物。

最重要的是茹勒和塔肯斯提出了一个全新的概念 奇怪吸引子。如果用相空间(动力学系统的所有变量所构成的一个数学空间,其中一个点就代表系统的一个状态)来表示系统的演化,会得到几种不同的轨迹模式:一种是不动点,系统处于定态;一种是封闭的极限环,代表系统的周期运动 再就是奇怪吸引子了,它的奇特处在于非周期性,轨线永不重复、自交,而且在有限区域内具有无限的长度。

在茹勒那里,奇怪吸引子还只是一种数学上的构造,当几年后他得知洛伦兹已经得到一个具体的模型时,他难免又惊又喜了。奇怪吸引子的概念后来变得如此有名,以至于茹勒和塔肯斯为了它的优先权还进行过友好的争论呢。

在风马牛不相及的领域里发掘出奇怪吸引子,比如在恒星围绕星系中心的轨道中、在水龙头水滴下落的时间中发现吸引

子,感觉就像第一次到火星探险的人看到有人卖兰州拉面一样,看来奇怪吸引子揭示了自然隐藏甚深的某种共同结构。

同样,有关虫口(生物群体数量)涨落的研究也提示出某种普适性的规律。

生物体数量的变化不是连续的,大致可以按年来描述,因此生态学家就用离散方程来建立数学模型,以便找出虫口增减的规律,一个较好的逻辑斯蒂(Logistic)差分方程是:

$$X_{t+1} = kX_t (1 - X_t)$$

其中, X 被定义在 0 和 1 之间,表示虫口的相对数; t 表示时间; k 代表生殖增长率,是个非常重要的参数。

20 世纪 70 年代初,美国生态学家梅(R. May)对这个方程进行了详细的研究。这是一项小孩都能做的工作:取定一个 k 值,再取一个 X 作为初值代入方程右边,得出的数值再代入方程右边,如此循环迭代。

然而,得出的结果却富有戏剧性。梅发现,当 k 小于 1 时,任取一个初值,若干次迭代后, X 都将趋于 0,即生物群体灭绝。当 $1 < k < 3$ 时,迭代后虫口将达到一个稳定值。令人惊异的是,当 k 超过 3 后,系统就会失去平衡,虫口不再处于定态,而是在不同的周期上振荡。比如 k 取 3.5,则周期为 4,虫口每 4 年返回原值一次; k 取 3.56 时,周期为 8……以此类推,出现周期倍化分叉的现象。当 k 达到 3.58 左右时,

分叉突然呈现崩溃之势,进入混沌状态,虫口不再是确定的,逐年的变化完全成为随机的了。

梅的研究到此为止,更一般化的发现是由美国物理学家费根鲍姆(M. Feigenbaum)作出的。从图上容易看出,分叉的间隔越来越小,费根鲍姆发现了这一点,而且计算出前后分叉点的差值的比率为 4.669,这是他的手持计算器(注意不是手提计算机)的最高精度了。几天后他把这一精度提高到 10 位,并且在其他函数中也发现了同样的收敛比率。看来这是一个从有序转变到混沌的普遍规律,它暗示着在不同的尺度变换下,有某种性质保持了下来,即自相似的分形结构。

奇怪吸引子也是分形,而“分形”(fractal)在当时还是个新名词,是法国数学家曼德勃罗(B. B. Mandelbrot)于 1975 年杜撰出来的。他所创立的“分形几何”专门研究被传统几何扔到“科学的垃圾桶”里的“病态曲线”;然而这些“几何学怪物”却正是自然本身的形态——“云朵不是球,山峦不是锥,海岸线不是圆,树皮不光滑,闪电也不走直线。”

“分形”意味着图形部分与整体之间的自相似,这里不存在传统意义上的尺寸标度,而是一种新的对称,不是左右或上下的对称,而是大小尺度之间的对称。“分维”则更为抽象一些,平面是二维的,我们生活在三维世界,但分形图形的维数却可能是分数,它标志着分形的不规则程度,代表一个物体

占领空间的本领。比如科赫曲线,由一条无限长的线包围着有限的面积,它的维数是 1.26。分形和分维概念促生了许多美妙的电脑艺术图,同时也是研究混沌的有效工具。

曼德勃罗被称为‘职业异教徒’,像他一样,在各自的角落研究混沌的每个人都有一段辛酸史,没有导师、朋友、支持,只有冷嘲、劝阻、漠视,然而正是这些勇敢的人的执著探索才改变了人们看待世界的方式,对每个新听到混沌的人来说那都是一次类似电击的经历。人们开始重新审视以前的问题,比如心脏的纤维性颤动、生物钟、木星大红斑等等,甚至是人工智能。总之,混沌开始之处,经典科学就终止了。

混沌是非线性科学的一个重要部门,而非线性,因为它的不优雅一向是被科学拒之门外的,现在知道,线性才是特例。“圣经里并没有说一切自然定律都可以表示成线性的”,而把混沌研究称为‘非线性科学’,好比把动物学叫做‘非象类动物的研究’一样不伦不类。

复杂现象必有复杂原因,简单现象其原因也必简单,这样的看法已经过时了。复杂性与简单性其实是统一的。大气的复杂性可以产生于洛伦兹的三个简单方程,奇怪吸引子都是自相似结构,木星上的大气旋涡是一个稳定的混沌,可见某些看似复杂的现象后面蕴涵着简单的秩序。这种秩序的产生,正是上帝的最大秘密之一。

“上帝不掷骰子。”爱因斯坦如是说。

“上帝的确掷骰子,但它们是灌了铅的骰子。”混沌理论的传教士之一福特纠正道。

19 世纪 70 年代是混沌理论的黄金时代,原来的地下斗士都一举成名,美国物理学家法默 (D. Farmer) 就是其中的一位。但到 19 世纪 80 年代初,法默对混沌理论已经开始厌倦了。混沌揭示了微小变化如何产生巨大效应,也展示了简单的规则如何产生复杂的行为,但是,它不能回答法默最想知道的问题:为什么宇宙如此有组织?为什么宇宙在永不停息地形成秩序和结构呢?上帝到底是按什么规则为骰子灌铅的呢?

法默不是第一个为这些问题困惑的人,当 19 世纪中期发展出热力学第二定律(在微观层面,宇宙总是趋于最大的无序状态)之后,人们就为热寂说所描述的灰暗前景头痛不已了。可逆性佯谬被提了出来:单个分子的运动是服从牛顿力学原理的,因而是完全可逆的,但由大量分子组成的宏观系统的热力学过程,却表现出不可逆性,这简直不可思议。奥地利物理学家玻耳兹曼 (L. Boltzmann) 引入一个概率性解释。比如把一桶热水与一桶冷水混合,一段时间后,得到的是温水,从统计上讲,这是最可能的状态。另一方面,温水再分开成为热水和冷水从逻辑上说,并不是绝对不可能,但是你必须等到海枯石烂,地老天荒!

热力学第二定律的哲学含义一直是争论的焦点,它真的就是贴在地狱门口的告示么 宇宙真的就是一个单行道,一切都终将归于死寂么 然而,日月星辰、山河大地、生命现象、社会组织……一切并没有化作混沌的原子,这也是明摆着的事实。解决这一深刻矛盾的人物中最著名的一位是比利时科学家普里高金(I. Prigogine, 1977 年诺贝尔化学奖得主),他在 20 世纪 60 年代创立了非平衡态热力学,这一理论提出了‘自组织’和‘耗散结构’等新的概念。

自组织的现象发现得很早,比如伯纳德(H. Bernard)花纹,那是法国的伯纳德 1900 年发现的。在一个浅浅的碟子里加入一些水,加热,当水上下层之前的温差达到一定程度时,对流开始,成千上万的分子开始协调一致地行动,在水面形成六角形的花纹,热水从六角形中心升上来,又从六条边上降下去。

化学中的自组织现象也是很早就发现了的,但是由于意识形态的局囿,到上世纪五六十年代才得到承认。特定的化学配方在发生反应时会出现不同颜色的周期振荡,这似乎是存心向热力学第二定律叫板。

新的现象催生新的理论,普里高金是从‘宇宙发生’的高度来认识自组织的。他把一般系统分成“平衡结构”和“耗散结构”;认为宇宙的平衡结构并不是铁板一块,在某些

局部的、远离平衡态的非线性区域,系统参量的改变可能会引起系统状态发生相变,涌现出全新的秩序。这些区域处于开放状态,能量和物质的不断交换(即耗散)维持着结构的稳定。

空间到底是无限还是有限的,宇宙到底是不是“瓶装宇宙”,这些关系到热力学第二定律普适性的问题还没有定论。然而,普里高金的理论至少说明一点:热力学第二定律并不禁止有序结构的产生。他从热力学的研究中提出了一种秩序的产生的原理,而关于秩序涌现的规律的更为广泛的研究是在 20 世纪 80 年代展开的,那被称为“复杂性科学”(Complexity Science)。

复杂性只是简单的量的堆集而已,传统思维一贯是这么认为:“通往诺贝尔奖的辉煌殿堂通常是由还原论的思维取道的”。三百年来,科学家们已经习惯于拆解,以至于忘了要把部件重新组合到一起了。然而,我们所感兴趣的绝大多数事物是开放的系统,比如生物系统、经济系统、社会系统等等,真实世界不是一潭死水,而是充满变化、无序和涨落的惊涛骇浪。

对于这个沸腾的世界,已有的科学手段无能为力,只是在计算机广泛运用于科学研究之后,才能建立模型进行模拟。但是,只是工具的改进还远远不够,还得有思维方式的革新。比如有一个全球经济的模型,包括 4500 个方程式和 6000 个变

量,但仍不能对付社会、政治等等多变的因素。

复杂性来源于系统的大量组分之间的无穷无尽的相互作用。除了非常简单的物理系统外,世界上几乎所有的事情,所有的人都被裹罩在一张充满刺激、相互关联的巨大的非线性大网之中。一个地方小小的变化会导致其他所有地方的震荡,就像艾略特所说的那样,我们无法不扰乱宇宙。

一个有趣的例子表明,相互作用甚至可以改变自私基因的力量。蚁群常被分成勤劳的工蚁和坐享其成的“懒惰者”,这好像是基因决定的,但是研究发现,如果把原来的蚁群隔离成两群,那么每一群本身又会分化出各自的工蚁和惰蚁来,相当多的惰蚁会一下子转变成勤奋的工作者!

可见,复杂系统中相互作用的主体绝不是孤立的。然而,从另一角度来看,并没有一个专制君主强令系统的每个部分说:“喂,NO. 1,你做这个,NO. 2,你做那个。”好像一切都很随意,只要稍稍顾及其他部分的影响而已。通过相互适应和相互竞争而经常性地自组织和再组织,分子就组合成细胞,神经元形成大脑,物种形成生态系统,消费者和企业形成经济系统,等等。在每一个阶段,新的结构和新的宏观行为会突然涌现(emergence)出来。

而复杂性科学正是要探寻涌现的规律,整体大于部分之和到底是什么意思。法默说:“这不是魔术,但当用我们人类粗

陋狭小的大脑来感觉时,这就像是魔术。而大自然随时随地都在表演这个魔术,比如水的相变(phase transition)。20世纪60年代,坦桑尼亚一个叫姆潘巴的中学生无意中发现,一杯热牛奶和一杯冷牛奶同时放进冰箱,热的反而比冷的先结冰。科学家能够理解单个水分子的运动,但却无法解释这个奇怪的姆潘巴现象。一些计算机模拟实验可能有助于揭示涌现的本质。

但对于复杂系统来说,光谈涌现是不够的。涌现的概念太模糊了,它是如何产生的呢?整个宇宙充满了涌现的结构,比如星系、排列有序的云彩和雪花这类仅仅是物理的、没有任何独立生命可言的物体。但是组成经济系统的消费者毕竟不同于形成蚁群的蚂蚁,活的蚂蚁也与形成云彩的分子大异其趣。

显然,在复杂系统中,除了涌现之外还隐藏着别的规律。人工生命的创立者朗顿(C. G. Langton)提出的‘混沌的边缘’的概念有助于理解的深入。

提到混沌的边缘,不能不让人联想到用牛顿法解多项式方程所得到的奇妙分形图案。图上不同的颜色标志着不同的吸引域,每一个吸引域对应着一个方程的解。让人讶异的是,在两条交叉的分水岭上,不同颜色纠缠在一块,没有一个明显的边界,只要两种颜色靠近一些,第三种颜色就会挤进来夹在中间,如此往复,引起一系列新的自相似的入侵。这个不知其可

的混沌的边缘,好似进行着某种复杂的运算,微观的精神分裂却形成了宏观的美丽结构。

同样,复杂系统也具有将秩序和混沌融入某种特殊平衡的能力——平衡点即被称为混沌的边缘。那里是一个经常变换在停滞与无政府两种状态之间的战场,是复杂性系统能够自发地调整和存活的地带。

对生命而言,不能过多地强调秩序,而应是混沌的边缘。朗顿认为,混沌的边缘就是生命有足够的稳定性来支撑自己的存在,又有足够的创造性使自己名副其实为生命的那个地方。他认为,应该观察系统是如何动作的,而不是观察它是由什么组成的。当你从这个角度观察系统时,就会发现存在秩序和混沌这两个极端点,在两极的中间,就会有相变和涌现的奇迹。

秩序、组织、复杂、相变、涌现和混沌等等概念本来就很模糊,混沌的边缘就更像只是一种哲学的遐想了,而与之有某种关系的‘自组织临界性’则多少可以和数学挂上钩。这是由丹麦出生的物理学家巴克(P. Bak)及其同事于1986年发现的。

巴克用了一个沙堆的比喻来说明自组织的临界性。想像桌子上有一堆沙子,有涓涓细沙均匀地从上流泻而下,沙堆越来越高,直到达到一个临界状态,表面的沙粒刚好能够呆得住,再多一粒就不可预料了,也许什么也不发生,也许发生沙崩,

但永远不可能知道哪一颗沙粒引起多大程度的崩塌。沙崩的频率与规模之间只有一个统计的幂律关系 大的沙崩少见,小的沙崩多些。

巴克认为,问题的关键在于,大自然中由自组织而达到临界状态的现象屡见不鲜,形形色色的系统之间的能量和物质交换使得它们处于一种微妙的平衡状态,相互锁定,环环相扣,牵一发而动全身。

朗顿对于如何把混沌的边缘概念运用于经济或生态系统毫无头绪,巴克的观念则提供一种定量观察的手段。如果一个系统表现出各种变化和骚动,而且其规模遵循着一种幂律,那么这个系统就处于临界状态,或者说是处于混沌的边缘。

然而两个概念毕竟有差异。巴克的系统在沙粒、能量或任何形式的输入的推动下自发进入界状态,而朗顿的系统只能通过自然选择达到混沌的边缘。

众所周知,自然选择是达尔文进化论的核心概念,它与自组织会是什么关系呢?美国著名生物学家考夫曼 (S. Kauffman)说过,最深奥的道理一定与自组织有关,但他从来都没有怀疑自然选择的作用。自然选择并非自组织的敌人,而更像是一种运动法则,一种不断推动具有涌现和自组织特征的系统趋于混沌的边缘的力量。

除自组织和混沌的边缘而外,自然选择所彰显的适应性也

十分重要，以至于复杂性科学几乎等同于对复杂适应系统（CAS）的研究。在CAS中，作用者被称为“适应性主体”，任何特定的适应性主体所处环境的主要部分，都由其他主体组成，主体之间必须相互适应。

囚犯悖论为主体的适应性提供了生动的说明。两个囚犯分别接受审讯，他们知道，如果两人都保持沉默的话，警察就无法给他们定罪。但他们被告知，如果揭发同伙的话，不但免罪还有奖赏，而被揭发的人将承受重罪。他们该怎么办？背叛最好，但同伙也不是傻子，他也可能背叛，两个人都得坐牢。显然，不管他们怎么决定，都无法不考虑同伙的行为。

有一些模拟人际关系的计算机模型，不同于囚犯处境的是模拟人可以重复自己的选择。最终得出最好的人际关系策略中，以其人之道还治其人之身。自己不主动背叛对方，如果对方合作了自己则给予回报，就是这个简单的策略形成了竞争中的合作、自私中的善意。

所以，演化绝不是单打独斗的事，而是物种共同的事业。用考夫曼的比喻来说，生态系统就像一个橡皮膜，生物体在上面争夺资源的制高点，每移动一步，整个橡皮膜都会随之变形。在往复追逐的橡皮舞蹈中，系统趋于混沌的边缘，创造出秩序之美。

适应性导致多样性和复杂性，适应性还得为复杂性的增强

负责。从尘埃到星团，从分子到细胞，从自由集市到市场经济，宇宙中似乎存在着对更高程度复杂性的隐秘向往。一旦在某个层次积累了一定数量的多样性，相变就会发生，而每一次涌现都为下一次涌现铺平了道路。

复杂性研究才 20 年历史，还没有形成一个系统的理论，但涌现、混沌的边缘和适应性等等概念已经勾勒出了它的大致轮廓。它引入一种全新的方法，为老问题带来了新的视角。特别值得注意的是它对进化论的修正和补充。

达尔文只是阐述了物种的起源，并没有说明生命的起源，所以只算得是半截子理论，引出无穷的争论，至今不息。对此，复杂性科学贡献了一个自组织概念，自组织建立基层的结构，而自然选择（适应性）则造就一级一级更高层次的结构，以至于生命。这就是考夫曼所谓的“化学的创世说”。

他一直为生命依赖于偶然的突变和选择感到困扰，因为那种机遇的可能性太小了，好比一阵大风刮过一堆废铁，结果组装成一架飞机一样不可思议。

考夫曼提出了“自催化”概念以避免纯粹的随机性。在地球形成之初的原始汤中，一些分子发生反应的产物恰好是另一些反应的催化剂。如果分子足够多，就可能形成一个连贯的、自我强化的相互作用网。从整体来看，这个网能够催化自我的形成，它会成为一个自动催化组。这就是生命的火种，火

种一旦撒下,生命就会扑面而来。

如果自催化假说成立的话,那么生命就不再是一个随机的偶然事件。人类并不是被抛入这个陌生的世界的,而是从自然本身涌现出来的。人类不再是宇宙中的吉普赛人,宇宙就是我们人类的家园。考夫曼感慨地说:“这一点真令人欣慰!”

当然我们可以指责说,考夫曼的模型只在计算机上得到证明,一团团的自催化物质并非就一定是生命,除非你让原始汤里长出几只阿猫阿狗来!

不错,一些野心勃勃的家伙的确在制造“人工生命”,他们宣称,人工生命是我们人类潜在的最美好的创造。同时,人工生命研究也导致对生命的新的理解,它与在复杂系统中发现的基本原则别无二致。

朗顿认为,必须从抽象的组织来看待生命,生命的特征并不存在于单个物质之中,而存在于物质的组合方式之中,因而生命可能就是一种计算机算法。生命是自下而上地涌现出来的,而不是由工程师自上而下设计的。生命作为一种生化机器,并不需要注入某种“生命力”,只要把它各部分组织起来,让它们产生互动,就会涌现出生命。

与传统方法相反,这完全是整体性的、过程性的看法,因而对生命的概念是一个大大的拓展,也许可以说,我们所在的宇宙就是有生命的,是生机勃勃的。生命存在于所有自组织系

统中,在这个态度下,我们就可以超越狭隘的人类沙文主义,可以以豪迈而平和的心态对待宇宙间的万事万物。

在一个创造着自身的世界中,神的观念不再滞留在外部,而是根植于所有的结构层次,上帝不再是造物主,而是宇宙的精神。可以说,自组织的宇宙观是对人类心灵的一次大解放。

了解了复杂性科学(混沌是它的一个分支)之后,就不会以旧眼光看待这个世界了。我们正在经历一个根本性转变,从机械论的单一转向多重性、暂时性、非线性和复杂性,从而重新发掘这个万花筒般的世界。

目前的复杂性科学好比 19 世纪二十年代的热力学一样,还没有清晰的概念,对于那个预期中的新的第二定律还只有支离破碎的了解,通向理论的路还很长。新的理论关注真实的世界,不仅囊括物理化学,也囊括生物学、信息处理、经济学、政治科学以及人类生活的每一个方面。

更为重要的是,新理论将可能弥合自然科学与人文科学之间的裂隙,将可能消除物质和意识的游离,从而带来人类心灵的慰藉。

美丽小世界——纳米科技

假如一位科学家指出某件事是可能的,那么他几乎肯定是对的,但当他说某事是不可能的,那么他很可能是错的。

想发现可能世界的界限的惟一方法是,冒险进入“不可能”世界。

任何足够先进的技术,看起来都跟魔术难以区别。

——阿瑟·克拉克的技术三大定律

我们都听说过石器时代、青铜时代、铁器时代,甚至钢铁时代、高分子时代等等说法,这些时代都以相应的材料作为标志。由此也可以看出材料对于科学技术、生产方式、生活方式的重大影响,实际上材料是一切的基础,新材料的出现可能导

致社会的全面革新。科技发展到 21 世纪,我们还必须加上一个“纳米时代”——一个依托于纳米科技和纳米材料的美丽世界。

“纳米”作为一个时代的称谓仅仅是几年前的事,跟美国有很大关系。

从 20 世纪 90 年代中期起,美国对纳米科技的影响和意义进行了严肃的论证,到 2000 年时,克林顿把它提升为国家级计划,他在向国会提出的预算报告中说:“我的预算支持一项价值 5 亿美元的重要的新国家纳米技术计划。……能够在原子和分子水平上操纵物质。想像一下这样的可能性:强度为钢的 10 倍而重量只有钢的一小部分的材料,把国会图书馆的所有信息压缩进一个方糖大小的装置,在癌肿瘤只有几个细胞大小时就能探测出来……”

克林顿的报告标题是“纳米技术将引发下一场工业革命”。既然科技上龙头老大都这样说了,其他国家自然不想在新一轮科技竞争中落后于人。英、德、法、日、中等国家迅速跟进,纷纷把纳米技术的研发作为国家战略来部署。日本宣称“要像上一世纪 70 年代抓微电子技术那样,加快发展纳米技术……要把发展纳米技术作为新世纪立国之本”。印度也决心要像 90 年代抓计算机软件产业那样大力发展纳米技术。

一些专家也是语不惊人死不休。曾是 IBM 首席科学家的

阿姆斯特朗(J. Armstrong)在1991年预言：“我相信纳米科技将在信息时代的下一阶段占中心地位,并发挥革命的作用,正如20世纪70年代初以来微米科技已经起到主导作用那样。”诺贝尔物理学奖获得者罗赫尔(H. Rohrer)则说：“20世纪70年代重视微米技术的国家如今都成为发达国家,从现在开始重视纳米技术的国家,很可能成为21世纪的先进国家。”

于是一股纳米热趋势而起,但在中国的媒体或企业界,好好的科学又变味了。纳米不再是一种科学,而是一个可供炒作的概念,一个可使股价一夜飙升的法宝,一张可使产品升值的标签。于是出现了哗众取宠的纳米冰箱、纳米洗衣机、纳米水等等‘高科技产品’,甚至街头卖米的小贩也声称自己卖的是“纳米”结果科学家不得不出来浇浇冷水：“中国的纳米研究和应用亟待走出认知误区。”

那么到底什么是纳米科技呢？

纳米(Nano)是一个尺度的度量单位,十亿分之一米这样一个数量级,1纳米相当于几个原子串联起来的长度,大概是头发丝直径的五万分之一。

最早把这个度量单位用到技术上的是70年代的日本科学家,但是以纳米来命名材料则是在80年代。它作为一种材料的定义把纳米颗粒限制在1~100纳米这个范围。这个尺度的范围并不是那么严格,关键是在这个尺度范围是否有性能上的

突变,即由于尺寸缩小产生了由量变到质变的飞跃,导致纳米材料性能既不同于微观也不同于宏观物质。如果没有纳米特性的出现,即使尺度达到这个范围也不能称为纳米材料。

一直以来,科学家勇猛地向宏观领域和微观领域深入,本以为对日常生活的层次是了如指掌的了,但混沌学和分形理论的出现打破了这个常识性错误。现在,对纳米层次的漠视也得到了纠正。纳米科技(Nano Science & Technology: NanoST; 1990年得名)的基本涵义就是,在纳米尺度内,直接操纵原子或分子设计和制造新物质的技术。

纳米领域并不是宏观领域的具体而微者,而是蕴藏着新的有待发掘的物理理论和规律,这个领域被称为“介观领域”。所以纳米科技不仅是技术上的,而且也是认知上的一次革命。正如美国总统科学顾问尼尔·莱恩所说:“纳米技术是最可能在未来取得突破的科学和工程领域。这项技术并不只是向小型化迈进了一步,而是迈入了一个崭新的微观世界,在这个世界上物质的运动受量子原理的主宰。”

由于纳米尺度上不可忽略的表面效应、小尺寸效应和量子效应,纳米材料表现出既不同于原子、分子,也不同于大块物体的性质,它具有光、热、电、磁等方面的新特性,用原有的模型和理论无法解释。比如材料中的大部分原子都成为表面原子,其表面物理和化学性质会变得更加显著。原子中的电子

不能再看做绕轨道运行的经典粒子 导线电阻的概念也不再适用。更直观的例子 铜本来导电导热的,但到纳米尺度时,既不导电也不导热 某些磁性材料到纳米尺度时磁性要比原来高 1000 倍;纳米金属熔点的大幅降低;纳米陶瓷的良好韧性

对纳米特性的理论解释我们还知之甚少,可以说,纳米技术作为下一代主导技术还处在孕育期,但它取代微米技术的发展趋势是不容否认的。微米技术已经快要达到它的物理极限了。英特尔公司的创始人之一的摩尔(G. Moore) 在 20 世纪 60 年代提出了“ 摩尔定律 ”,经修正后表述为 集成电路上的晶体管密度每 2 年将翻一番。40 年来,摩尔定律一直是芯片工艺的主旋律,芯片线宽从 2 微米缩小到 0. 1 微米,取得了巨大的进展。

然而再向前走就有麻烦了,最小线宽受到光刻工艺中光源波长的限制。波长越短,线宽越小,集成度越高,于是从可见光到紫外线到远紫外线再到超紫外线,科学家们可谓无所不用其极。但这条自上到下不断微型化的道路毕竟有尽头,会遇上量子效应这只拦路虎。

早在 1959 年,美国著名的物理学家、诺贝尔奖获得者费曼 (R. Feynman)就一反常规地提出创想。他在一篇《在底部还有很大空间》的演讲中说,从石器时代开始,人类从磨

尖箭头到光刻芯片的所有技术,都与一次性地削去或融合数以亿计的原子物质做成有用形态有关;为什么我们不可以从另外一个方向出发,从单个分子甚至原子开始进行组装,以达到我们的要求?’

“至少依我看来,物理学的规律不排除一个原子一个原子地制造物体的可能性。’的确,自然界早就证实了纳米技术的可行性,DNA就是纳米尺度的,它通过摆弄原子隐藏了不可思议的遗传信息。费曼憧憬说:“如果有一天可以按人的意志安排一个个原子,将会产生怎样的奇迹?’

费曼的思想无愧于纳米技术的发端,美国以他的名字设立了纳米科技最高奖 费曼奖。

1986年,德雷克斯勒(K. R. Drexler)在自己的著作《有创造力的机器》中,对费曼的思想做了比较详细的阐发,并引来非议。

这几乎是一个规律,先知的思想总是要被埋没、遗忘,直到条件成熟才被人重新认识。这个条件就是科技的一点一点的进步。

自1861年,随着胶体化学的建立,科学家们开始对微观粒子系统的研究,但都是从化学角度把它们作为宏观体系的一个中间环节来研究。直到上世纪60年代,科学家们才有意识地探索纳米粒子世界的奥秘。

1962 年,日本物理学家久保亮武(R. Kubo) 发表了著名的久保理论——量子限制理论,以解释金属超微粒子的能量不连续性。由于这个能量不连续性,超微粒子会表现出不同于金属块体的物理性质。

1970 年,日本科学家江琦和中国科学家朱兆祥提出了半导体超晶格的概念。他们在按一定规则堆积起来的纳米结构中实现了量子阱和超晶格,观察到了丰富的物理效应。

1981 年,德裔物理学家宾宁(G. Binning) 及其导师瑞士的罗赫尔(H. Rohrer) ,共同发明了扫描隧道效应显微镜(Scanning Tunneling Microscope: STM),并获得 1986 年诺贝尔奖物理学奖。STM 的原理跟盲人用木棍感知地面高低类似,只是盲人的感觉换成了所谓的隧道电流,即探针与样品在近距离(小于 0.1 纳米)时产生的微小电流。隧道电流对距离非常敏感,用计算机处理电流数据,得出距离参数,从而描绘出样品表面形貌。STM 的发明为纳米研究提供了重要工具,大大推动了研究进程。

1984 年,德国科学家格雷特(H. Gleiter)在实验中发现纳米陶瓷在室温下出现良好韧性,使人们看到了陶瓷韧的战略途径。

1985 年,英国化学家克罗托(H. Kroto)、美国化学家斯莫利(R. Smalley) 和柯尔(R. Curl)等人发现了 C_{60} 分子:

60个碳原子组成的足球状分子,由 20 个六边形和 12 个五边形组成的 32 面体。它是碳的除石墨和金刚石以外的第三种结构形式。5 年后,大规模制备 C_{60} 的方法发现后,立即激起新的研究热情。上述三人因为发现 C_{60} 的贡献获得 1996 年诺贝尔化学奖。

他们从美国建筑师富勒(Buckminster Fuller)的圆顶建筑中得到灵感,想出的 C_{60} 结构,因而有这种结构的物质被称为巴氏球或者富勒烯。它具有特殊的物理性质。非常稳定,能抗辐射、耐高温、抗化学腐蚀。纯 C_{60} 固体是绝缘体,适当掺杂后可以成为金属性导体,或者超导体。总之, C_{60} 将是 21 世纪的重要材料。

接下来的二三年里又发现了纳米金属另一新特性——巨磁阻效应,即在外加磁场的改变下,纳米金属的电阻值会发生很大变化。容易想像,巨磁阻效应在传感器领域将大有用武之地。

1990 年,美国 IBM 公司研究人员用 STM 在镍基片上用 35 个氩原子“写”出了“IBM”三个字母。后来,中国科学院化学所的研究人员,在石墨表面用碳原子绘制出了世界上最小的中国地图。费曼的光辉预言终于得以实现。

同年 7 月,在美国巴尔的摩召开了国际上第一届纳米科学技术会议,正式把纳米材料确立为材料科学的一个分支。

1991 年,日本科学家饭岛(Ijima)在研究 C_{60} 的过程中发现了碳纳米管,管的直径一般为几纳米到几十纳米,厚度只有几纳米。由于碳纳米管的奇特性能,它被誉为“纳米材料之王”,在未来的纳米器件中可能充当基本的构造单元,具有广阔的应用前景。

随后这些年,纳米材料的内涵不断扩大;由最开始的纳米颗粒、原子团簇到随后的纳米丝、纳米棒、纳米管,再到最近的纳米组装体系。所谓纳米组装体系,是指以纳米颗粒以及它们组成的纳米丝、管为基本单元,在一维、二维、三维空间排列组装成特定的结构。这里所强调的是按照人们的意愿设计、组装、创造新的体系,实现对原子的直接操纵。

纳米科技的理论和实验研究也十分活跃,它无孔不入,渗透进了科学的各个部门:物理、化学、力学、材料、测量、电子、加工和生物等等领域。纳米物理、化学和力学是整个纳米科学的基础领域,纳米材料和测量是纳米科技的支撑领域,而纳米电子、加工和生物学则是纳米科技领域的至高点,也是衡量一个国家纳米科技发展水平的标志。各个领域相互依赖,不可偏废。

介观物理学是纳米科技的基础,但纳米技术的巨大应用前景仍然诱惑各国把主要力量放在实用层面,特别是各国企业,更是直接推动了纳米科技的市场化进程。这也无可厚非,正如

斯莫利所说：“纳米技术是建设者最后的边疆。”

大自然可能是最杰出的建设者，在自然界本来就存在纳米现象，不假人工。比如出淤泥而不染的莲花，莲花花面极其平滑，它的纳米结构使污物无法附着。鹅鸭等水禽为什么冬天也敢入水，就是因为它们的毛羽也是纳米尺度的，足以防水保暖。生物体内也存在纳米尺度的颗粒。比如蜜蜂腹部的磁性纳米粒子，这种磁性纳米粒子具有类似指南针的功能，蜜蜂利用它来确定周围环境，利用磁性纳米粒子中存储的图像来判明方向。科学工作者发现海龟也是依靠自己头部的纳米颗粒进行导航来完成几万公里的迁徙的。

人类是自然的最佳模仿者。纳米技术无孔不入，正在给材料、信息、生物医药、环境、能源等等领域带来深刻的变化。

材料还不是产品，但巧妇难为无米之炊，哪一行也离不了材料。利用纳米颗粒对传统材料进行掺杂改性，往往带来新奇效果。比如美国的 F-117A 型隐形战斗机，1991 年在第一次海湾战争中共出动了 1271 架次，没有损失一架。它的风头建立在技术上，因为机身上的纳米颗粒涂层能有效吸收电磁波，致使伊拉克的雷达成了睁眼瞎。

另据美国估计，本世纪 30 年代汽车近半数的金属材料要被轻质高强的纳米材料所代替，这样可以节省汽油 40%，减少 CO₂ 排放 40%，就此一项，一年可为美国创造社会效益

1000 亿美元。纳米技术的潜力由此可见一斑。

1993 年,美国航空航天公司提出一个新概念 纳米卫星, 每一个重 $0.1 \sim 10\text{kg}$ 。前几年已有纳米卫星上天。这种卫星一次可以发射成百上千颗,分布覆盖,无所不到,同时也可避免单个航天器失灵后带来的危害。

纳米材料还可以用于高效传感、陶瓷增韧、强力催化等等,纳米导线、光纤也可能是未来量子计算机与光子计算机的重要元件。

21 世纪最让人看好的材料是碳纳米管,它可制成极好的微细探针和导线、性能颇佳的加强材料、理想的储氢材料。碳纳米管的细尖极易发射电子,用于制作电子枪,可做成几厘米厚的壁挂式电视屏,这个特点相信电视或显示器行业不会忽视。

碳纳米管还是最好的人工静纤毛。静纤毛长在耳蜗里面,声波通过静纤毛触发听觉神经。美国科学家受此启发研制纳米听诊器,这种听诊器经久耐用,灵敏度极高。可以注入人体血液中,作为流动的体内“窃听器”,随时监听人体健康和细胞功能状况,有助于疾病的早期发现。

碳纳米管听诊器还可以用来侦听化学反应产生的噪声,建立分子水平的噪声学,了解分子世界的演变。通过监听水中微生物的节奏,可以检测水质的好坏。通过纳米听诊器,一切天

籁之音都可为人类所用。

碳纳米管的最异想天开的应用莫过于太空缆绳的设想了。乘宇宙飞船遨游太空可能是富豪的梦想,但纳米材料制作的太空缆绳,可能在将来使得平民也可以乘升降机自由上下太空,或者是往返于地球与月球之间。纳米纤维的强度是钢的 10 倍,但重量只有钢的六分之一,它是惟一能够连接月球与地球而不为自身重量压断的材料。斯莫利说:“如果将纳米管和铜缆编织成支架,强度可以支撑一个位于 3.52 万公里高的太空平台。”

由于这种种应用,所以我们需要成吨的纳米管,但目前大批量生产纳米管还有技术困难。斯莫利成立了一个生产碳纳米管的公司,日产量也不过几十克。碳纳米管在刚出现后,每克售价 1000 美元,而黄金才每克 10 美元。

据估计,如果碳纳米管生产成本降到每克 33 美元,而且年产量达到一吨,即可用于电视和显示器。如果价格降到每克 22 美元,则可用于更多产业,如汽车车身、防弹衣、隐形飞机机壳等。如果降到 5 美元以下,则可运用于一般日常生活用品,例如手机、绳索,假发等等。可以预料,这些想法都会一一实现。

信息技术对我们的生活生产方式影响之大是众所周知的,纳米技术作为未来的主导技术,将彻底改变电子元器件与计算

机的现状。

纳米电子器件可分为两类,一类是量子器件,另一类是单电子器件。

量子器件的制造利用了纳米尺度下的量子效应。传统上,一个功能的实现,导线里流动的电子数是大量的,但在纳米尺度下,器件内的电子不再能被视为粒子,它的波动性质使得即使是一个电子的传输都足以引起新的效应。量子器件主要是控制一个电子的波动相位来实现某种功能的。

单电子器件是指一个电子就是一个具有多功能的器件。它利用了库仑阻塞效应,这种效应是说,当金属纳米颗粒从外电路得到一个额外的电子时,金属颗粒就具有了负电性,它的库仑力足以排斥下一个电子从外电路进入颗粒内,从而切断了电流的连续性。适当利用这种现象可以开发出单电子的数字电路或存储器。

如果纳米器件得以实现,将成千上万倍的缩小产品体积、增加存储器量、提升计算机速度。但是如何制作集成电路,单电子器件之间的关联将不再是导线,而需要更新的创意,必定要能制造出上亿个性能稳定的元件,而且组装成逻辑电路,才谈得上产业化。虽然已经研制出了单电子晶体管,但还有很长的路要走。

被囚禁在纳米颗粒(量子点)内的电子的另一个特点,

是能使材料发光,可用于制作高效激光器,用来读写光盘可使光盘的存贮密度提高几倍。另外,利用囚禁原子的小颗粒量子点来存贮数据,制成的量子磁盘存贮密度可以达到每平方英寸上千个 G, 费曼的把《大英百科全书》全抄在一枚大头针头上的预言可望实现。

生物技术与纳米技术的联姻产生了纳米生物学,于 20 世纪 90 年代开始兴起。纳米生物学试图在纳米尺度上操纵生物大分子,制造具有特殊功能的分子器件,或者利用微型机械来取代某些生理单元,最终的梦想是赋予人体以新的材料。有专家指出:“蛋白质不是理想的材料,因为它只有在一个很窄的温度和压力范围内才具有稳定性,而且对放射特别敏感,此外它还排斥许多构建技术和组件……”用纳米材料重塑人体的前景激动着科学冒险家们。

目前在各方面都进行了卓有成效的尝试。著名的如 DNA 芯片,用于快速分析大量的基因信息,从而可以及时发现一些基因疾病。

再如分子马达。人体内本来就有分子马达,如 RNA 聚合酶、ATP 酶。美国康奈尔大学的科学家在活细胞内的能源机制的启示下,利用为细胞内化学反应提供能量的 ATP 酶作为分子马达,研制出一种可以进入人体细胞的纳米机械装置——纳米直升机。类似的微机械将来可能用于在人体内传布药物或者

监查疾病。

硅虫晶体管更有意思。有些生命力超强的细菌可以在晶体的包裹中存活,当细菌进行呼吸或光合作用时,光照或者器官的水汽能诱导细胞产生电子转移,从而可以看做某种开关过程。这种生物晶体管将有广泛的潜在应用。

纳米尺度的 DNA 是理想的生物材料。近来,科学家通过在 DNA 表面覆盖金属原子,制成了导电的 DNA 链,但如此一来,DNA 链就仅仅起到支架的作用,失去了选择性地合成其他生物分子的特性。新的方法可以避免这一缺陷,使 DNA 链成为良好的导线,用于制作生物传感器。纳米材料还在组织工程中起重要作用,因为细胞还不能进行人工定向分化,只有依附于一定形状的结构才能生长和分化。纳米可降解材料已经进入这一领域。

另外,生物分子还是很好的信息处理材料,每一个生物大分子就是一个微型处理器,分子在运动过程中以可预测的方式进行状态变化,其原理类似于逻辑电路中的开关,这种特性结合纳米技术将可能制造出纳米生物计算机。

纳米生物学在医药上的应用也已经初露曙光。据研究, C_{60} 可以有效抑制癌细胞的增殖、减低艾滋病病毒的毒性,给癌症和艾滋病的治疗带来了新的希望。在 C_{60} 足球笼子里还可以暗藏药物,到达病变部分后定点释放。

纳米机器人可以用于直接打通脑血栓,清除心脏动脉脂肪沉积物,也可以通过把多种功能纳米机器注入血管内,进行人体全身检查和治疗。

美国人已经做出一种微型药房的雏形:一个具有上千个小药库的微型芯片,每一个小药库里可以容纳一定药物,在传感器的指挥下在适当的地方适当的时间投放适当剂量的药物。

又是美国人,提出人造红血球的设计,已成为纳米技术的标志性结果。这种人造红血球是个 1 微米大小的金刚石的氧气容器,内部有一千个大气压,动力来自于血清葡萄糖。它输送氧的能力是同等体积天然红细胞的 236 倍。这些应用都只是牛刀小试,前景不可限量。

在 21 世纪,一个挑战性的问题是如何节省资源和能源(煤可再用 170 年,石油 70 年),做到与环境友好,纳米科技为这个问题提供了一个机遇。虽然小孩比大人吃得少这个比喻不太恰当,但它形象地表明纳米技术可以大幅度节省资源。

纳米技术对空气中 20 纳米的污染物、水中 200 纳米的污染物的清除能力,在某种意义上来说是其他技术不可替代的。利用纳米技术可以设计新型的催化剂、助燃剂,提高传统能源的燃烧效率,减少污染。纳米技术也给开发新能源带来机会,它可以使不能燃烧的气体变成可燃烧的气体,可以制造能量转化元器件,提高太阳能转换为电能、化学能转换为电能、热能

转换为电能的效率。可以说,纳米科技关系到了人类持续发展和生存的大问题。

纳米科技为科学家的想像插上了翅膀。有科学家预言,在 21 世纪后期,采用纳米技术集群的方法,可以使真实世界呈现出许多虚拟世界的特点。比如“实用雾”设想空间布满上亿的人体细胞大小的机器人(命名为“雾滴”),有 12 只触手四面八方伸出,相互之间可以抓握以形成更大的结构。这些纳米机器人是智能型的,可以把各自的运算能力结合起来,形成一个分布式智能。在空间中,人眼看不出雾滴,但只要发出指令,小雾滴能立即模拟出任何结构。实用雾概念的提出者霍尔说:“雾城看上去可以像一个公园、一片森林,或者今天像一座罗马城池,明天却又像绿宝石城。”

小雾滴可以形成向任何方向扩散的光和声的任意波阵面,从而产生任意想像的视觉和听觉环境。也可以生成任意形式的压力,触觉环境也有了。这样,虽然实用雾存在于真实的世界中,它却具有创造虚拟环境的灵活能力。

其实早在上世纪 70 年代时,德雷克斯勒就提出了类似的想法。我们为什么不制造出成群的、肉眼看不见的微型机器人,让它们在地毯或书架上爬行,把灰尘分解成原子,再将这些原子组装成餐巾、电视机呢?归根到底,所有的物质都是由基本的元素组成的,只是不同的结构和组合而已。而且,这些

微型机器人不仅是只懂得搬运原子建筑的工人,而且还具有绝妙的自我复制和自我维修能力。

这些预言是纳米技术的终极目标——装配工机器人,一种直接把原子或分子装配成各种具有特定功能的机器或物体的万用智能微机械。

这种基本上是从零开始制造物体的技术不能从常理层面进行理解,小尺度意味着新的困难。比如在宏观尺度上可以忽略的摩擦和黏性,在纳米尺度变得至关重要了;再如动力源问题,细胞利用特定的化学反应提供能量,纳米机器的相应策略还有待发展。

尤其是在化学家眼里,更有严重的困难。在装配原子时用什么做‘钳子’呢?要灵巧地抓取原子,钳子应该比原子小,但钳子最小也是原子做的,这不好办。另外,原子与原子之间有相互作用力的,取走一个原子需要能量,放下原子时需要释放能量。很难想像什么样的装配工的钳子从原料中取出原子的时候不会被粘住,就像很难想像驴子吃面粉不会变成白嘴一样。

不但是在纳米机械的制造中,而且在它的运作中也会出现意想不到的麻烦。比如,令人神往的纳米潜艇,它能够如人所愿那样在血液中巡行吗?水分子比纳米潜艇小得不会太多,纳米潜艇必须能够经受得住水分子布朗运动风暴的洗礼。比纳米

潜艇大一两个数量级的血细胞在血液中是翻着跟斗前进的,所以纳米潜艇即使研制成功,也会以意想不到的方式控制运行。

生物体内有很多复杂的纳米机构,细胞本身就是纳米机器,自然的进化自有它卓越的策略,与人类设计的机械大为不同,师法自然的纳米仿生学不失为一个明智的选择,当然这必须以纳米尺度的生物学研究为基础。近年,美国科学家报道细菌可望成为纳米结构的装配工。他们利用转基因技术培植出一种细菌,它产生的蛋白质能形成一定的规则结构,以此作为模板附上纳米颗粒。这种结构可望成为未来纳米计算机内存和逻辑器件的基础。

虽然具体策略还不清晰,但无论如何,纳米机械终究要被研制出来。所以我们在憧憬它所预示的美好未来时也应该仔细考量它所隐含的不良后果。

纳米机器要得到应用,一个关键问题是它必须能够大批量地生产,一次只制造一台太昂贵了。为了提高效率,需要数以亿计的纳米机器一起工作。达到这一目的的方法是让机器自我复制,只要赋予它必要的操纵手、自我复制的信息以及材料。但更为重要的是,它必须知道什么时候停止自我复制。

否则将产生灾难性后果。美国计算机科学家比尔·乔伊曾经指出 纳米技术可能成为吞噬整个宇宙的癌症,因为我们难以保证,说不定哪一天,神奇的纳米盒子就会变成潘多拉盒

子,成千上亿的纳米机器人就会将人类和这个世界作为它们制造‘产品’的原料。一个蝗虫没事,铺天盖地的蝗虫却可以毁灭一切。

另一方面,纳米技术如要发挥良性作用,还得寄希望于人类的理性,否则它成为别有用心的人手中的可怕武器。各国的军事研究计划中已经提到了‘墙上的苍蝇’、‘蜚人的共同蜂’、‘蚂蚁雄兵’、‘间谍草’等等利用纳米技术制作的超微型武器,它们用于侦察敌情,或者携带少量高效炸药炸毁敌方的通讯线路,或者钻进计算机系统直接摧毁其硬件。美国五角大楼估计,这种武器几年后将会投入实战。不计其数的这种小东西将防不胜防,未来的战争会更加戏剧性、更加残酷。

无论是好是歹,我们都必须准备迎接纳米时代的到来,正如我们曾经迎接过前三次产业革命的来临一样。从18世纪中叶到现在的250多年,人类经历的三次大的产业革命,每一次都给人类社会带来了翻天覆地的变化。

第一次产业革命发源于英国,以纺织机械的革新为起点,以蒸汽机的发明和广泛使用为标志,从而实现了从手工劳作到机器操作的转变。造就的新兴产业包括机械制造业、冶金工业、煤炭工业、交通运输业等等。

19世纪中叶,电气化技术的问世和电力作为动力代替蒸汽机为动力,是人类工业社会发展的第二个里程碑。以电力工

业作为主导技术发展起来的新兴产业包括有线电通讯、无线电通讯、真空电子管产业、电话电报产业等,这些产业成为 19 世纪末和 20 世纪初的支柱产业。

第三次浪潮产生于二战以后,一直持续到现在,以微电子技术全面取代真空电子技术为标志,高潮时期大致是计算机得到广泛运用的 20 世纪后 30 年。支柱产业包括计算机软件、硬件、网络通讯等等。

每一次产业革命都造就了一个强势国家。第一次是英国,第二次是美国,第三次最大的受益者是日本。现在,以纳米技术为主导技术的第四次浪潮中,谁将是新生的天之骄子呢?过去并不能完全说明未来,可以说新的挑战也是新的机遇,每个国家都有机会在新一轮角逐中脱颖而出。

进入 21 世纪,昔日在微米技术中受益最大的发达国家的经济都萎靡不振。日本连续几年出现负增长,美国宣布 2001 年经济进入衰退期,欧盟经济增长速度放慢。总的经济形势表明微米技术将要走到尽头,纳米技术的身上寄托着世界经济振兴的希望。

1996 年,德国科研技术部组织专家通过论证,估计在 2010 年纳米技术市场将会达到 1.44 万亿美元的规模,相当于现在法国 GDP 的全年总额。每个国家都想在这块大蛋糕分得最大的份额,都在进行战略部署,投资增加,竞争加剧了。

各国著名公司都纷纷建立研究中心,以保证在将来的竞争中立于不败之地。商业资本的投入也加速了纳米技术的商业化,比如斯莫利的碳纳米管公司就吸引了 1500 万美元的风险投资。

剧烈的竞争不但体现在投入的增加上,也体现在专利的争夺上。举例来说,美国 IBM 公司组织占领关于巨磁阻应用的产权,申请了十多个专利,但就差德国一个专利,他们就跟德国谈判,以 100 万美元的价格把它买过来,占领了巨磁阻的全部专利。而整个巨磁阻的市场 1998 年至 2000 年预测为 40 亿美元。

诱人的前景、强力的竞争使纳米技术到来的步伐大大加快了。一位专家说:“如果说以前人们问我纳米量子学和技术离我们多远,我还不能做出确切地估计,那么现在我可以说纳米时代至少比原来的估计提前五六年。……分子电子器件、纳米芯片、单电子晶体管的问世已经使我们感觉到纳米技术很快走近我们的生活。”

从它诞生的那一天起,纳米技术就以其革命性的理念给人以震撼,它所持有的制造方式与传统方式完全背道而驰。传统的方式是‘自上而下’批发式操纵原子,无论是铸、磨、铣,甚至石印都是如此。这种生产方式就像‘戴着拳击手套玩积木’纳米技术将使人们脱下这副手套。

费曼说:“如果……最终能从原子水平上解决问题,许多

化学和生物问题都可能迎刃而解，而且我认为这是不可避免的。’实现费曼理想的最好方法是自组织、自组装，这是‘自下而上’地生成物品的方式。一旦我们在掌握了纳米尺度物质的规律，我们就可以随心所欲地摆弄原子分子。一切都会因此改变，从疫苗到计算机到汽车轮胎直到还没有想像过的物体的设计和制造方式。无穷无尽的新可能性于是在我们面前绽放。

同样不可避免地要变革的是我们的生活方式。蒸汽机带来了火车，电气时代我们可以飞机代步，而微电子时代，我们可以在家里一隅点击全世界。纳米时代将带给我们什么，我们还不能完全确定，但纳米技术权威詹姆斯·埃伦博根做出了“物质将成为软件”的预测。

“人们可以想一想当今天下载软件是什么情形，是以改变分子团磁性特征的方式重置磁盘的物质结构。如果计算机做到足够小，以至于它的部件比我们现今用于在磁盘驱动器上装载信息的物理结构小得多，那么我们就可以直接通过磁头来制造元件、芯片，乃至整个计算机！”因此，在不久之后的某一天，我们将能够像今天下载软件一样从网络里下载硬件。”下载硬件所需要的新的磁盘驱动器正在研制之中……

我们的未来不是梦，因为它已经大大超出梦的想像了。

梦想的距离

超导理论为许多振奋人心的科学与技术的新发展开辟了一个领域,毫无疑问,许多新的发展是属于未来的。

—— 施里弗

人在极端的境况(比如恐惧)下,可能会表现出平时意料不到的行为。同样,小说中的人物在矛盾冲突中展现出的人格个性,也最令人难忘。那么,在物理上,极端条件(极低温、超高压、强磁场等)对物质的性质会有什么样的影响呢?会出现什么样的奇异性质呢?

在 20 世纪,原子结构和量子力学大大地促进了我们对那些由大量原子、分子或离子集聚而成的物质的物理性质、结构的认识,形成一门叫‘凝聚态物理学’的学科。理论方面先

不说它,就实际应用上,这对新材料的研制、电子工业的发展起了极大的推动作用,比如半导体就是最好的例子。这些成就对研究极端条件下的物质性质是必不可少的。

诺贝尔奖得主巴丁(J. Bardeen)曾用一个浅显的比喻来说明这段历史:“我们可以把固体物理学(凝聚态物理学由此发展而来)的成长比喻成一棵果树的成长。这门科学的种子是在本世纪(20世纪)的初期播下的。后来种子发芽了,随着1926年量子力学的问世,幼小的树木开始迅猛地成长起来。过了一些年,树木才长到足够成熟而能够结出果实的地步。直到第二次世界大战以后,人们才第一次得到真正的收获。这棵树很快地继续成长着,长出很多新的枝条,而且每年收获的成熟果实越来越多……”

巴丁所说的果实自然包括超导理论的成熟和超导材料的运用,其土壤之一就是20世纪初低温物理学的进展。

热力学第三定律告诉我们,最低温度是绝对零度($0\text{K} = -273.15^{\circ}\text{C}$),这个温度不可能达到,但可以无限趋近。在绝对零度附近,物质中原子、分子的无规热运动将趋于静止,一些常温下被掩盖的现象得以显示出来,这就为破解物质世界的奥秘提供了重要线索。

在20世纪初,向绝对零度的进军取得了突破性的进展。这跟气体的液化密切相关。英国科学家法拉第(M. Faraday)

是第一个系统地液化气体的人,到 1845 年,他几乎液化了所有的气体,除了氧、氢、氮、氦等少数几种以外。这几种气体被称为‘永久气体’,直到 1877 年氧的液化成功,才打破永久气体不能液化的信念。最顽固不化的气体是氢和氦,对它们的液化成为低温物理学家之间的一场竞赛。1898 年,英国科学家杜瓦(J. Dewar)首次液化了氢。1908 年,荷兰物理学家昂内斯(H. K. Onnes)解决了氦,他说“当我第一次看到似乎是幻想的液氦时,有如奇迹降临”。两年后得到了大约 1.04K 的低温,真正地逼近了绝对零度。昂内斯由此得到“绝对零度先生”的绰号。

昂内斯从小就热爱科学,父母大加鼓励,特意腾出阁楼作为他专用的实验室。一次,昂内斯做实验时不小心点着了火,烧掉半座楼房,但他的父母并没有责怪他,反而鼓励和支持他继续自己感兴趣的实验。他后来长期领导莱顿大学的实验室,最终使该实验室成为低温物理的一代圣地。1913 年,昂内斯被授予诺贝尔物理学奖,以表彰他“创造了在液氦温度下进行实验的可能性,开辟了对于物理学有重大意义的极为重要的领域”。

著名的物理学家洛伦兹(H. A. Lorentz)曾劝告昂内斯,不要把所有的实验工作都押在低温研究上,那儿不会出现什么奇迹。但昂内斯有自己的看法,他研究了液氦温区金属电阻的

变化问题。当时这个问题众说纷纭,昂内斯开始时相信开尔文(L. Kelvin)的说法 随着温度的降低,金属的电阻在达到一极小值后,会由于电子凝聚到金属原子上而变为无限大。他测量了铂在液氮温度下的电阻,发现在 4.3K 以下,铂的电阻保持为一常数,而不是变成无限大。于是,昂内斯转而认为纯净的金属的电阻应在液氮温度下消失,还提出了一个电阻随温度变化的公式(自然是错误的),下一步就是用更纯的金属来检验这一理论。汞在当时最易提纯。

昂内斯在 1911 年 4~12 月的三篇论文中报道了戏剧性的实验结果。第一篇论文里他写道:“纯汞能够被带到这样一个状态,其电阻变为零,或者说至少觉察不出与零的差异。”他觉得这证实了他的新理论。第二篇论文里昂内斯感到有点不对劲了,在某个温区,汞电阻的变化未免太快了。第三篇论文题目是《论汞电阻消失速度的突变》,在 4.2K 时汞电阻突然消失,完全出人意料,这没有证实昂内斯的新电阻理论,而是一种全新的现象!两年后,昂内斯为其取名为“超导电性”(Superconductivity)。从此,一门新的学科诞生了!

超导电性,顾名思义就是电阻为零,但实验总有一定的精确度限制,不可能测出电阻绝对为零。为了估计这一不可测量的电阻究竟小到什么程度,1914 年昂内斯设计了一个巧妙的实验。他给一个铅制闭合线圈加上外磁场,再降低温度进入超

导态,然后撤去外磁场,于是在闭合线圈中激发一个感生电流。在实验用的液氮完全蒸发掉以前的两个多小时内,昂内斯没有观察到电流的衰减。再后来美国人柯林斯(J. Collins)又做了同样的实验,在两年半的时间内也没有观测到电流强度的衰减。现在我们知道,超导体的电阻率比良导体铜的电阻率要低将近 20 个数量级,完全可以看作是零。当然,是直流电阻为零,而交流电阻并不为零。

超导现象的发现并没有带来‘革命性’的影响,因为人们囿于旧有的思维方式,并没有看出超导的本质。即使是昂内斯也只倾向于把超导电性看做是金属正常导电机制的一种极端情形。因而,在相当长一个时期内,超导体被认为是理想导体——电阻率为零的导体。由于电阻为零,所以在理想导体内部不可能存在电场,根据电磁感应定律,穿过理想导体的磁场不可能改变。因而,如果在外磁场中把理想导体降温至超导态,然后撤走外磁场,在它体内将会产生感生电流以保持磁场,这就是磁场的‘冻结’。在早期的超导文献中,经常可以看到磁场的冻结,这被认为是不证自明的。

第一次世界大战延长了人们的误解,因为 1914 ~ 1923 年间,莱顿是世界上惟一能生产液氮的地方,由于战争的影响有关超导电性的实验研究完全停顿了。

战后研究恢复了。率先成功地用实验检验冻结磁场的教条

的，是德国物理学家迈斯纳(W. Meissner) 和奥森菲尔德(R. Ochsenfeld)。迈斯纳注意到，在外磁场中的金属向超导态转变时有磁滞现象存在，迈斯纳觉得有点异样：“这种磁滞现象首先把我引导到磁导率变化的可能性。在超导电性产生时，如果用来测量的电流和它的磁场分布保持不变，就没有理由出现磁滞现象。”

于是，在 1933 年，他们做了实验。把一圆柱形样品放在与其轴向垂直的磁场中，并从正常态冷却到超导态。当温度高于转变温度时，磁场是穿过样品的；但当温度低于转变温度时，磁场分布发生了变化，磁场被完全排斥到圆柱体之外。撤去外磁场后，磁场就完全消失了。超导体的这种完全抗磁性被称为“迈斯纳效应”。

很重要的一点是，迈斯纳效应是可逆的，与“历史”无关，即不管是先加磁场再降温还是先降温再使样品进入超导态后再加磁场，超导体内部都不存在磁场。这就说明超导态是一个热力学平衡现象，可以用很成熟的平衡热力学来研究它。

完全抗磁性的发现否定了理想导体的臆想，是对超导现象认识的根本性转变。对超导体的认识还必须注意三个临界参数：温度(T_C)、电流和磁场。临界温度是超导态转变温度。临界电流(磁场)是超导态下允许的最大电流(磁场)，再大就会变回正常态了。至此，对超导体才算有了全面的认识。

从超导电性发现的那一天起,物理学家们就试图给它一个说法。然而,谁也没有料到这个过程异常艰难,在近半个世纪时间里,超导理论一直是物理学家的噩梦。

当然,路是一步一步走的。在必需的条件具备之前,物理学家们做了各种努力。首先是唯象理论的提出。所谓唯象理论,指那些不是从量子力学那样的第一性原理出发,不一定具有清楚明确的微观图像,而是预先做出某些不需证明的“工作假定”,并在此基础上推演出来的描述物理现象的理论。唯象理论虽不完全正确,却是微观理论的先导。

就在超导电性发现的当年,法国物理学家朗之万(P. Langevin)提出,从正常态向超导态的转变可以用两相之间的转变来描述,即正常相和超导相之间的转变。相变概念属于热力学范畴,这种提法几乎没人响应,因为在当时,人们一般把超导现象看做不可逆现象,所以对于将可逆的热力学理论应用于超导体持怀疑态度。

只有荷兰物理学家、昂内斯的继承人之一的开索姆(W. H. Keesom)于1924年首开先例,把热力学理论用于超导体,算出了超导态与正常态的熵差和临界磁场导数的关系。但这项工作太过超前,无人问津。1930~1932年间,开索姆等人在实验上取得进展,发现液氮的比热在2.19K有尖锐的突变,超导体在转变点也存在比热的不连续变化。这是正常态到超导

态是一种相变的实验证据。

在此基础上,荷兰物理学家埃伦菲斯特(P. Ehrenfest)提出了热力学中二级相变的概念。把通常有相变潜热(如熔解热、汽化热等)和体积改变的相变称为一级相变,而把没有相交潜热和体积变化、但有比热跃变的相变称为二级相变。他的学生拉特格斯(A. J. Rutgers)将这一理论用于超导体,得出了著名的拉特格斯公式,与实验符合得很好,加强了人们对超导体的热力学研究方向的信心。

昂内斯实验室的第三代领导人戈特(C. J. Gorter)受此启发,更加详细地考虑了这个问题。他在设定超导态磁场为零的情况下,应用一般热力学方法讨论了超导相变。他走得太远了,以至于拉特格斯拒绝跟他同流合污。

戏剧性的是,几个月后迈斯纳效应发现了。由于实验中还发现了其他一些非理想的复杂情况,迈斯纳等人并未明确提出在超导体内磁场为零是普遍情况。而戈特因为早有准备,他立即撰文指出,在超导体内磁场可能永远为零,而且是普遍情况。基于此,戈特等人于 1934 年正式提出超导体热力学唯象理论——二流体模型。该理论认为,在超导体内存在着两种电子,一种是有阻碍的正常电子,一种是无阻碍的超导电子。超导态的出现是正常态中的一部分电子凝聚成超导电子引起的。超导电子的熵几乎为零,因而超导相是更为有序的相。此模型

虽然简陋,但‘有序相’的概念却富有启发意义。

二流体模型能够解释超导体的热力学性质和临界场,但迈斯纳效应捅出一个新的漏子,电磁性质作何解释呢 还得借助于电动力学的方法。

伦敦兄弟(F. London, H. London)本是德国犹太人,纳粹上台后被迫逃亡英国。他们兄弟非常重视迈斯纳效应的发现,提出过超导态的热力学解释,但落在戈特后面了。1935年,他们又提出了两个描述超导体的电磁性质的电动力学方程,即‘伦敦方程’,再结合麦克斯韦方程组,可比较理想地解释超导体的电磁性质。这一理论有个预言 在超导体表面有一很薄的穿透层,在穿透层中存在磁场和电流,用以屏蔽外磁场,超导体内部磁场还是为零。用 F. 伦敦的话来说“ 超导电流作为抗磁电流而出现,为磁场所保持,……除非加上外场,否则在一个环中最稳定的态是无电流的态。”穿透层的预言在 1939 年得到证实。

F. 伦敦可不是一般的物理工匠,他的博士学位是关于纯哲学的。有人这样评价他“ 哲学的爱好显著地贯穿在伦敦的工作中,其特征是对普遍原则持之以恒的探索,对所选课题的逻辑基础透彻的钻研,他从不仅仅是一个只搞计算的人。”

所以, F. 伦敦并不满足于唯象理论,他与兄弟提出伦敦方程后,立即着手分析隐藏在背后的深刻的物理本质“ 根据

金属电子论所承认的概念,用通常的方式来解释这现象的超导理论是不可能的。’需要一些新的概念,比如‘能隙’。电子被某种形式的相互作用所耦合,使得最低能态可被一有限间隔同激发态分离开。”

1937年, F. 伦敦在研究有机化合物的抗磁性时形成‘长程有序’的思想,他把它用到超导体上。在超导体中,这种有序概念与一般的有序概念不同,它是一种在动量空间中的有序,是运动有序,而不是位置有序,好比跳交谊舞的一对,位置虽然转来转去,但他们总是面对面地移动。F. 伦敦认为平均动量的长程有序是超导态的基本性质之一。超导电性是一种“宏观尺度上的量子结构”;不论有无磁场存在,在整个金属中都有相同的动量分布。”这就要求‘一种平均动量的凝聚或凝固’,因而“超导问题被简化为寻找一种机制,这种机制在足够低的温度下迫使这样一种特殊种类的有序建立。”后来超导微观理论的发展证明, F. 伦敦的概念框架是完全正确的,极具洞察力。

由于 F. 伦敦的杰出贡献,1953年他被授予在西欧具有崇高地位的洛伦兹奖章,他在讲话中说:“在一生的大部分时间中,我总是如此地幸运,能够去做那些我自己的天性驱使我去做的事情,而仅仅由于做了这些事就得到了如此的重视,这真令人不安。”1957年,设立了 F. 伦敦奖,以表彰那些在低温

领域的杰出人士。

还有一些唯象理论提出来过,大多都进了垃圾堆了,另外一些将在后面介绍。关于从唯象理论到微观理论,戈特说过一段话:“因为从电子理论探讨超导电性问题看来还有很大困难,而且对于超导电性之谜还没有得出确实令人满意的答案,在没有完整的电子理论观点的情况下,试图从唯象的方面来解决这一问题,绝不是全然无用的。人们可以希望的是,在理论上的探索没有得到令人满意的结果之前,用这种方法可以提高认识,也许还可以在探索解决这个问题的方向上得到启发。”

戈特所谓的困难,在 1928 年以前包括量子力学和金属电子论,1933 年以前包括迈斯纳效应,这些理论没出来之前是不可能提出超导微观理论的。当然还有实验手段方面(测量精度、微波技术、原子能技术等)的困难。

20 世纪 30 年代初,美籍瑞士物理学家布洛赫(F. Bloch)提出了一个定理 任何一个电子系统在没有外磁场时,最稳定的状态是无电流的态。这一理论常被用作批判某些超导理论的依据。在众多超导理论失败后,布洛赫开玩笑地提出他的‘第二定理’任何超导电性的理论都可以被驳倒!

但玩笑归是玩笑,超导的神秘面纱毕竟被一点一点地逐渐揭开了。最先明确的是超导的热力学性质,即从正常态到超导态是一种相变。已经知道,晶体是原子或离子按周期性的点阵

排列而成的,如果相变涉及到原子或离子的排列规则和距离的变化,如水凝固成冰,这种相变称为结构相变。有人猜测超导相变也是结构相变,开索姆对此进行了研究,1924年报告说超导体在进入超导态时保持相同的点阵结构。这就暗示出一条线索,超导相变可能是电子的行为引起的。从正常相到超导相的转变是在极短的时间内完成的,巨大数量的电子(10^{23} 量级)是如何在极短的时间之内几乎同步地凝聚到超导态的呢?

另外,热力学研究表明,超导态是比正常态能量更低、更有序的凝聚态。如果把超导态叫做基态,那么正常态可称为激发态。电子从激发态到基态会有能量上的跃变,所以存在相变潜热。电子的基态与激发态之间的能量差叫做能隙。这是一个很重要的概念,伦敦兄弟在1935年就提出了这个猜想,但限于那时的实验条件,能隙概念只能是一个“纯粹的假设”,无法用实验证实,只有一些定性的暗示。

到了20世纪50年代,测量精度、低温技术和微波技术的发展为从实验上证明能隙的存在准备了必要的条件。超导体电子的比热是以指数形式随温度变化的,这个实验结果明确地支持了能隙概念,并且测出能隙的量级为 $k_B T_C$ 。(非常小,约为万分之一电子伏特)。50年代的唯一理论已经包含了能隙概念,一个成功的微观理论更是必须能够解释能隙的产生。

建构微观理论的另一线索是英国物理学家皮帕德(A. B.

Pippard) 于 1950 年引入的。他研究了磁场在超导体表层的穿透深度,发现它随着掺入超导体内杂质含量的不同而变化,伦敦兄弟的理论无法解释这一现象。为了说明理论与实验的差异,皮帕德提出,超导体中的电子具有一种相干性,如果通过适当的扰动(比如掺杂)来改变超导体在某一点的性质,那么它的影响将波及到这点周围一定距离的范围内。这个范围被称为“相干长度”,约为 10^{-4} cm 量级,代表了电子有序化的延伸尺度,是超导体的又一重要参量。

F. 伦敦的洞见给后继者提供了正确的导向,他认为超导态的本质是一种有序,而微观理论需要解释有序出现的机制,亦即某种形式的相互作用。长期以来,物理学家都在寻找这种相互作用,并且认为可能存在于为布洛赫的金属电子理论的自由电子模型所忽略的电子与电子、电子与晶格之间。

有人研究了磁相互作用,有人尝试了库仑作用力,量子力学的创始人之一海森伯(W. K. Heisenberg)属于后者。对于他在 1947 年提出的超导微观理论,有人评价说:“这个理论无疑复兴了对于这一问题的积极讨论,也许将证明,它的主要价值就在于此。” F. 伦敦也错误地把注意力放在了电子间的库仑力上,而没能在实际理论的建构上走得更远。

直到 1950 年,流亡英国的德国物理学家弗烈里希(H. Frohlich)大胆地提出,电子与晶格之间的相互作用是导致超

导电性产生的根本原因,而迈出了关键性的一步。电子与晶格之间的相互作用又称为电子—声子相互作用或电—声耦合。

按照金属电子论,晶格点阵中的离子通过结合力而相互作用,某处离子的振动会以波的形式在点阵中传播,称为格波。当电子经过晶格离子时,由于异号电荷的库仑吸引作用,会在晶格离子点阵内造成局部正电荷密度的增加,所以格波的传播相当于正电荷相对集中的区域在传播。想像一下鲁莽的蚊虫一头撞上蜘蛛网时,蜘蛛是怎么知道的。是因为蚊虫的冲撞引起了蛛网的振动,振动在网格上传播到了蜘蛛那里。不过,蜘蛛肯定不知道晶格振动的能量是量子化的,这种能量子被称为声子。

电磁振动的能量子是光子,它是传播电磁相互作用的媒介,同样,声子即是传播晶格作用的媒介。当晶格点阵中的一个电子和晶格作用引起晶格振动产生格波时,就相当于这个电子发出了一个声子,格波传播一段距离后,影响到另一个电子,就相当于声子被另一个电子吸收了。两个相隔甚远的电子就是通过这种方式交换能量的。

布洛赫利用电子被晶格的散射来解释正常金属电阻的产生,但没有人把电—声相互作用看做超导电性产生的原因。弗烈里希曾回忆说,当时人们“几乎普遍相信这样一句名言:从晶格离子的大质量(与电子相比)来看,在超导态的建立

中,它们不可能起重要的作用”。弗烈里希突破了这一盲信,更重要的是他引入了量子场论来处理电—声耦合,结果发现,如果电子和晶格振动的相互作用足够强,电子在动量空间中就会出现一种新的分布,他认为这就是超导态。

弗烈里希完成自己的论文后不久,同位素效应就被发现了。所谓同位素效应,是指超导体的临界温度与它的同位素原子量的平方根成反比。而离子振动的频率(声子也是)也与原子量的平方根成反比,所以,同位素效应实际上印证了电—声相互作用是超导机制的设想。巴丁得知同位素效应后第一反应是‘我想到它必定同电—声相互作用有关,并试图在此基础上构造一个理论’,他的理论跟弗烈里希的如出一辙。

电—声相互作用取得空前的成功,它表明,不必对金属电子论的基本模型再做扩展,而只需考虑一个被遗忘的布洛赫电—声散射即可。当然这个理论只是朝正确的方向踏出了第一步,声子能量那么小(跟能隙同一量级),静电库仑作用势能那么大,如何处理两者的关系还是问题。也未能把在正常态产生的相互作用同那些对于超导电性起特殊作用的相互作用加以恰当的区分。最关键的是,物理图像尚付阙如。

在超导微观机制的最后攻关中,巴丁是个关键人物。他因半导体方面的研究(如与另两人一起发明晶体管)得到过1956年的诺贝尔物理学奖。听说同位素效应后,他又转向以

前就感兴趣的超导理论。在 1955 年,他看到这样一个形势:“对一个适当的理论来说,框架已经有了,但问题仍是极度困难的。所需要的是一些根本性的新观点,特别是需要一个真正恰当的超导态物理图像,以及有序参数(如果它存在)的本质。”

巴丁意识到量子场论是有力的工具,但他本人不很精通,于是请杨振宁教授推荐一个既精通场论又愿意搞超导研究的人,杨振宁推荐了库珀 (L. N. Cooper),再加上巴丁的一位研究生施里弗 (J. R. Schrieffer),这三驾马车对超导微观机制发起了最后的冲刺。

最先取得突破的是库珀,他于 1956 年提出了急需的物理图像。当两电子间相互有吸引力时,不论多么弱,它们都能够形成能量较低的束缚态,这两个门当户对的电子组成对偶,称为库珀对,它们的动量相等、方向相反,自旋方向相反。两个电子形成库珀对时要放出能量,形成能隙 Δ ,拆散库珀对时需要 2Δ 的能量来激发。需要说明的是配成库珀对的电子都必须位于费米面上(电子具有费米能级就叫做“位于费米面上”,比如导体中的传导电子)。

但是仅此还不够,正如巴丁所言:“要立即用这方法来构造一个超导理论还是不可能的。如果这电子对的结合能有 $k_B T_C$ 的量级,那么它的波函数的尺度就具有 10^{-4} cm 的量级。但

是,如果在费米面 $\sim K_B T_C$ 内所有电子都结成电子对,那么这些电子对之间的平均距离只有约 10^{-6} cm ,而此距离远小于电子对的尺度。因而,一个真正的多体方法所要求的是,找到超导体的基态波函数。”

这可是块硬骨头,以至于施里弗一度想把论文课题改到别的方面去。就在这时,巴丁要动身前往斯德哥尔摩去领取诺贝尔奖,临行前,他劝施里弗再坚持一个月。结果,就在这一个月(1957年1月)里,施里弗找到了基态波函数,并导出了能隙方程。

至此,主要的障碍都扫除了。1957年2月,被称为BCS理论(取三人的名字开头字母)的超导微观理论终于形成了,一扫46年来“理论物理学的耻辱与绝望”这个成就被誉为是“自量子论发展以来对理论物理学最重要的贡献之一”;三人因而共享1972年诺贝尔物理学奖。巴丁是惟一个两次获此殊荣的人,可贵的是,他把这次奖金的全部用于设置F. 伦敦奖,以表达对先行者的敬意。

BCS理论的核心概念是库珀对,而库珀对是电子气的集体效应,一个电子对内部的吸引强弱、电子对结合能或能隙的大小取决于费米面附近全部电子状态的分布。在绝对零度时,费米面附近所有电子都两两结合成对时,能隙最大,最为有序。当温度低到临界值时,就启动了形成库珀对的雪崩式过程,大

量电子在瞬间凝聚到同一个量子态,即超导态。此时,当一个电子被散射而改变了自身的动量时,由于库珀对中两个电子之间的相干性,另一个电子的动量也会发生改变,而使库珀对的总动量保持不变。这种具有共同动量的电子对集体的运动便构成了无阻的超导电流。另一方面,当温度高于绝对零度时,由于热激发,一些库珀对被拆散,剩下的库珀对的结合变得更加松弛,温度达到临界温度时,库珀对全部拆散,能隙为 0,超导态转为正常态。

BCS 理论解释了超导体的几乎所有性质,总的来说,理论和实验吻合得像一块拼板玩具一样”,但在个别地方还是有出入。原因是 BCS 理论假设电子之间的耦合很弱,而且是瞬时发生的,没有考虑到电子间交换声子在时间上的延迟。对 BCS 理论的上述缺点加以改进,需要直接从电子声子相互作用模型来建立超导理论,而不是像 BCS 理论那样用一个等效而简化的电子直接相互作用的模型来代替它。这样的强耦合理论在后来提出了几个,但不理想。

早在 1913 年,昂内斯就试图用超导材料制成的线圈来产生很强的磁场,但他失望地发现,当电流和磁场增强到一定程度时,超导态就被破坏了。昂内斯所用的金属元素超导体应为实验的失败负责,他有正确的想法,却用了错误的材料,真正适合的超导体主要是合金和化合物,那时还没发现呢。

20 世纪 30 年代有为数不多的地方在研究超导合金,并发现了超导合金与纯金属元素超导体在一些性质上很不相同,如超导合金的临界磁场很高,还有磁通“冻结”的现象。1935 年,前苏联物理学家舒布尼可夫(L. V. Schubnikov) (曾在莱顿实验室呆过四年) 在实验中发现,合金超导体有两个临界磁场。当外磁场大于上临界磁场时,样品处于正常态 当外磁场小于下临界磁场时,样品有完全的抗磁性 而当外磁场介于两个临界磁场之间时,样品处于混合态,一部分区域仍处于超导态,另一部分区域处于正常态,磁场可以穿过这样的正常区域。

由于第二次世界大战的爆发以及苏联在“大清洗”中对舒布尼可夫的迫害,超导合金的研究停顿了下来,到 20 世纪 50 年代才又重新开始。1950 年,前苏联物理学家京兹堡(V. L. Ginzberg) 和朗道(L. D. Landau) 的唯象理论提供了一个契机,使阿布里科索夫(A. A. Abrikosov) 提出了“第二类超导体”的概念。这类超导体的特点除了有两个临界磁场外,就是临界电流和磁场都很大,使超导材料得以进入实际应用领域。京兹堡和阿布里科索夫因为他们的贡献分享了 2003 年度的诺贝尔物理学奖。

1960 年,美国科学家昆兹勒(J. E. Kunzler) 等人获得了非理想第二类超导体铌三锡(Nb_3Sn) ,能在很高磁场下运

载很大电流,为超导强电(强磁)应用拉开了序幕。

超导弱电(弱磁)方面的应用也开始于 1960 年代,是以约瑟夫森效应为基础的。约瑟夫森效应是 BCS 理论的一个直接应用,在实验上,它又以单电子隧道效应的发现为前提。

在经典力学中,若两个空间区域被一个势垒(绝缘层)隔开,则只有当一个粒子具有足够的能量越过势垒时,它才会从一边进入另一边。而在量子力学中,粒子要具有足够的能量不再是必要的了,一个能量不大的粒子也可能以一定的概率穿过势垒,这就是所谓的隧道效应。1959 年,美国物理学家贾埃佛(I. Giaever)观察到了超导体—绝缘层—超导体(SiS)这样的体系结构中的单电子隧道效应,并利用这种方法准确地测量了超导体的能隙。这位“物理学几乎不及格的台球和桥牌能手”分享了 1973 年的诺贝尔物理学奖。

贾埃佛在实验中曾多次观察到,在 SIS 结构中,即使电压为零,也有超导电流通过绝缘层,但他由于没有理论上的准备而认为是存在短路。其实这就是直流约瑟夫森效应,是英国物理学家约瑟夫森于 1962 年从理论上作出的预言之一。

当时美国贝尔实验室的物理学家安德森(P. W. Anderson)正访问约瑟夫森所在的剑桥实验室,安德森在讲座中讲到“对称破缺”的概念,引起约瑟夫森极大兴趣,他想在实验上观测它的存在。不久有人从理论上证实了贾埃佛的经验公

式,但只是对于超导体—势垒—正常金属的情况,而对于 SIS 结构的计算是一件令人生畏的任务。约瑟夫森迎难而上,得到了出人意料的结果,他自己过了好几天才相信自己的计算没错,而他的导师皮帕德则直言他看不懂:“我……发现这是一篇很难的论文……我根本弄不清他所讲的东西,而他最好去找安德森谈谈……”下了一番功夫之后,安德森弄懂了,而且他还在 1963 年从实验上证实了零电压下超导电流的存在。

约瑟夫森效应还包括交流的情况,对 SIS 结构,在有限的电压下存在交流超导电流。超导电流对磁场十分敏感,可用于微弱磁场的测量。

约瑟夫森分享了 1973 年诺贝尔物理学奖,时年 33 岁。之后,转而研究心智、特异功能等现象。他认为,运用科学的概念和方法重新解析东方神秘主义,很可能在人类对于自然界和宇宙的理解中带来一场革命。不用说,主流科学界对此表示惋惜。

超导强电和弱电的应用都是从 20 世纪 60 年代逐渐展开的,但低温问题是个很大的限制,液氮在地球上很稀少,而且不可再生,设备复杂,成本极高,成了超导应用的瓶颈。所以人们一直向往高温甚至室温的超导体,作了长期的艰苦努力,但结果不很理想。

从理论上讲,人们最关心的问题之一是超导体的临界温

度最高能达到多少 有没有上限呢? BCS 理论没有给出说明, 之后有一个强耦合理论提出 40K 是超导体的最高临界温度, 但另一个理论则反对这种说法, 没有定论。所以, 高温超导体的探索基本上是集中在实验方面的, 正如美国物理学家马梯阿斯 (B. T. Matthias) 所说: “……理论对于寻求具有高 T_c 的材料方面并没有贡献。临界温度的一切提高都毫无例外地曾是 (而且仍然是) 实验的结果, 或有时是一种半经验的处理方法的结果。”

在这种情况下, 实验家们进行了锲而不舍的探索。第一个较高临界温度材料是 1941 年发现的 NbN (T_c 为 15K)。20 世纪 50 年代初有个小高潮, 发现了一种具有较高临界温度的新结构 (A-15 结构), T_c 达到 17.1K。马梯阿斯 1954 年发现了 Nb_3Sn , 其临界温度为 18K 左右, 而且成为应用最多的超导材料之一。马梯阿斯还提出过一些经验规律用于指导寻找新的超导体。1973 年, 美国贝尔实验室泰斯塔迪 (L. R. Testardi) 等人制备了铌三锗 (Nb_3Ge) 薄膜超导体, 临界温度为 23.2K, 这一纪录保持了 13 年之久。

在 BCS 理论框架之内寻找高温超导体是一条路线, 另一条路线就是寻找别的超导机制。比如 1963 年, 美国物理学家利特耳 (W. A. Little) 考虑了在有机物中存在超导电性的可能性, 并提出所谓“激子机制”; 在所选择的结构中, 是电

子的振动提供了电子之间的耦合,而不是通常的超导体中由晶格离子的振动提供了这种耦合。利特耳估计这种机制的临界温度可达 2200K!

巴丁也与别人搞了个激子机制模型,引起广泛的关注。另外还有像非晶态超导体、超晶格超导体、颗粒超导体等‘奇异’超导体的研究,但均未获得较高的超导临界温度。

在沉寂多年之后,高温超导体的研究领域可说是门庭冷落了,谁又能料到 1986 年荒芜的火山会突然爆发呢。

瑞士的缪勒(K. A. Muller)和德国的柏德诺兹(J. G. Bednorz)是没有丧失信心的少数人。他们从 1985 年夏天在 IBM 苏黎世研究所开始研究金属氧化物陶瓷,因为出于某些理论上的考虑,缪勒认为在金属氧化物中可能会存在高临界温度的超导体。他们研究了一些金属氧化物,没有取得成果,后来看到一篇研究镧钡铜氧化合物的论文,他们决定尝试这种新物质。1986 年 1 月 27 日,他们发现这种样品在 35K 开始出现超导转变。柏德诺兹感慨地说:“每当我把仪器安装好时,我都预感要发生什么令人激动的事,但却什么也没有发生,直到这一次。”

在反复核实了结果之后,4 月份他们才向德国《物理学杂志》寄交了论文,题目谨慎地拟为《在 BaLaCuO 系中可能的高 T_c 超导电性》,9 月发表。他们的谨慎是有道理的,刚开始

时,重视这篇论文的人不多,美籍华人朱经武曾说过:“从过去的记录来判断,不管何时有人宣布得到了异常高的 T_c , 会有 99% 以上的可能是不对的。”此前宣称发现高温超导体而最后不了了之的事也不只一例,朱经武本人就有一次。他曾发现 CuCl 样品在 90K 以上温区有磁化率异常变化,但他在文章中并没有肯定地说这就是超导现象,后来苏联科学家宣称在 CuCl 中发现了 140K 的高温超导电性,可是最终没有得到确认。

在那篇划时代的论文中,缪勒他们只测了样品的电阻率,还没有测超导体的另一性质 抗磁性。11 月,日本物理学家内田慎一等人重复了缪勒和柏德诺兹的实验,并观察到了抗磁性,确证了该系统中存在高温超导电性。之后,激动人心的进展不断出现,1987 年 2 月,朱经武领导的小组发现了临界温度为 92K 的超导材料,一周后中国科学院物理研究所的赵忠贤等人获得起始转变温度在 100K 以上的超导体。由此人们终于突破了液氮温区(77K)的壁垒,实现了多年的梦想,并引发“世界性的科学淘金热”。

目前,超导体临界温度的最高纪录是 135K。2001 年美国贝尔实验室制备出临界温度为 117K 的新型 C_{60} 材料,同年日本科学家发现金属化合物 M_gB_2 临界温度为 39K,前者是纳米技术的主打材料,后者是如此简单普通的材料,都是出人意

料的重大发现。

缪勒和柏德诺兹因对高温超导的重大突破获得了 1987 年的诺贝尔物理学奖,室温超导材料和高温超导微观理论,也公认是诺贝尔奖级别的难题,等待着有志者的摘取。

现在,对超导已经不像 20 世纪 80 年代末那么狂热了,但各国仍投入大量精力进行研究,开发新的应用。比如,电能输送、电动机和发电机的制造、磁流体发电、储能、高场磁体、磁悬浮列车、粒子加速器、扫描隧道电子显微镜、微磁场的测量……甚至,制造超导计算机。正如马梯阿斯所说:“如果在常温下,例如在 300K 左右能实现超导电现象,则现代文明的一切技术都将发生变化。”先知的話指示了未来的方向。

寻找新世纪的爱因斯坦

当物理学的这些基础本身成为问题的时候……物理学家就不可以简单地放弃对理论基础作批判性的思考,而听任哲学家去做 因为他自己最清楚,也最确切地感觉到鞋子究竟是哪里夹脚。在寻求新的基础时,他必须在自己的思想上尽力弄清楚他所用的概念有多少根据,有多大的必要性。

——爱因斯坦

上帝说,要有光,于是就有了光。上帝轻轻松松撂下一句话,却让物理学家忙活了三百多年(从近代算起)也没彻底弄清楚光的本质是什么 不过话说回来,一代代的物理学家毕竟还是在争争吵吵中明晰了光的各种脾性,其中影响最大的,可能要数爱因斯坦(A. Einstein)了。1905年,爱因斯坦在

狭义相对论中为光速立下一条律令,即光速不变公设,任何实体物质的运动速度都不可能超过真空中的光速。

相对论的巨大成功和爱因斯坦的崇高威望,使光速不变公设深入人心,但科学的发展总是出人意料,如果百年后的今天,爱因斯坦看到如下的书名或者文章题目,他会作何感想呢?

“超越爱因斯坦”;

“爱因斯坦错了吗?”

“相对论是否遭遇真正的挑战?”

“光速不变原理可以抛弃吗?”

“爱因斯坦光速恒定不变理论可能有误”;

也许爱因斯坦只会微妙地一笑,脑海里浮现出 1919 年日全食实验证实相对论的预言时,人们惊慌的质询:牛顿(I. Newton)被打倒了吗?爱因斯坦从来不说牛顿被打倒了,他会认为物理学需要新的理论来打破僵化局面的沉闷。同样,对超光速的积极探索也无法简单地归结为一句话:爱因斯坦错了!即使他错了,他也是犯了一个伟大的错误!

21 世纪初,物理学天空的阴霾与百年前的确有些相似,那时的“两朵乌云”导致了相对论和量子力学的创生。而今天,对光的本质的探求、对超光速的研究、对量子力学意义的持久思索似乎也正孕育着新的惊人的突破。

体验光学现象并不要求你是物理学家。当人类第一位祖先在水中看到自己的影子而惊惶失措的时候,他不知道他经验到了光的反射现象。而你如果足够幸运恰好生活在河边或海边的话,你会学到在叉鱼时注意把叉子对准鱼影的前面一点,这是因为光的折射在搞鬼。这些属于几何光学的内容跟物理学的其他部分一样古老。

而对光的本性的严格探究,则是从近代才开始的。哲学家、数学家笛卡儿(R. Descartes)认为光本质上是一种压力,在完全弹性的、充满一切空间的‘以太’中传递,传递速度为无限大。牛顿则倾向于光是由大量微粒组成的流动体,这些微粒从光源倾泻而出,遍满整个空间。与牛顿同时代的荷兰物理学家惠更斯(C. Huygens)顶着不小的压力,提出与牛顿不同的观点,认为光的传播方式与声音差不多。他注意到两束光相遇时并不会像两条水柱相遇那样撞得粉碎,光束互不影响,因而他认为光是一种波。

微粒说与波动说的争论贯穿了光的本质的研究。惠更斯的理论缺乏数学基础,也不能解释光的干涉和衍射现象,况且那时候,牛顿力学节节胜利,席卷光学不在话下。因此,在 19 世纪之前,微粒说占据统治地位。

真正为波动说平反的是英国物理学家托马斯·杨(T. Young)和法国物理学家菲涅耳(A. J. Fresnel),前者的双

缝干涉实验(1801)及后者对衍射现象的严格数学解释(1819)开启了光学研究的新阶段。

历史的发展富有戏剧性,谁又能预料到波动说和微粒说都是半边窍呢。1905年,爱因斯坦提出了革命性的光量子假说,认为光在传播过程和物质相互作用的过程中,能量不是分散的,而是一份一份地以能量子的形式出现的,它们不能再分小,只能整个地被吸引或产生。后来,1924年,美国物理学家康普顿(A. H. Compton)和中国物理学家吴有训共同发现X射线散射效应,证明光予不仅有能量而且有动量,是和电子一样的实体,光子作为微粒的观点终于确立。于是光的波粒二象性本质得以揭示。不过,不要以为光的秘密袒露无遗了,爱因斯坦在晚年曾说:“经过50年的思考,也没有使我更接近于解答‘光量子是什么’这个问题。”

另一方面,人们一直以为光的传播是瞬时的,不花时间。直到1676年,丹麦天文学家罗默(O. Romer)第一次算出了光速。他发现当地球远离木星时,木卫蚀将推迟几分钟,而当地球接近木星时,木卫蚀将提前几分钟。罗默断定这是由于光的进行需要时间造成的,并算出粗略的光速,比真实值低了约30%。

此后,测量光速的技术日渐精密,到20世纪50年代,电子计时装置已经取代了古老的机械设备(旋齿法、旋镜法)。

70年代,开始用激光方法测光速,通过测量激光的频率 f 和波长 λ ,运用 $c = f\lambda$ 公式计算出光速 c 。这些计算以米和秒的标准定义为基础。

光速测量精度如此的高,以至于在 1983 年,光速取代了米原器被选作定义标准,1 米即光在真空中 $1/299,792,458$ 秒内走过的距离。因此现在的长度是由光速定义的。

光的速度牵涉到两个著名的理论,揭示了光的新的本质,光速被赋予了特殊的物理意义。一个是电磁波理论,是 19 世纪 60 年代中期苏格兰物理学家麦克斯韦(J. C. Maxwell) 创建的。他的方程表明电磁波在真空中必须以约为每秒 30 万公里的速度传播,跟光速相当接近,于是,他大胆预言:“光是一种按电磁规律通过场传播的电磁扰动。”光就是电磁波,不同颜色的光波具有不同的频率。时至今日,人类利用电磁波理论取得了巨大的成就,但它的局限性也逐渐暴露,爱因斯坦就曾多次把电磁波称为“引导光子的鬼波(ghost waves)”。

另一个理论是爱因斯坦的狭义相对论。在他的“奇迹年”(1905) 爱因斯坦领悟到“不可能绝对地确定时间,在时间和信号速度之间有着不可分割的联系”;于是他提出相对性原理和光速不变原理来解释 1887 年迈克耳孙—莫雷以太漂移实验。这两个原理简单地说就是相对任何以恒定速度运动的观察者来说,不管这个速度是多少,物理规律及光速都是一样

的。

例如, A 相对于 C 以 $0.6c$ 的速度向东运动, B 相对于 C 以 $0.6c$ 的速度向西运动。对于 C 来说, A 和 B 之间的距离以 $1.2c$ 的速度增大。这种“速度”——A、B 之间相对于第三观察者 C 的速度——可以超过光速,但是 A、B 相对于彼此的运动速度并没有超过光速($0.88c$)。

根据爱因斯坦的意思,光速不仅仅是光子在真空中运动的速度,而且它被赋予在物理学中以根本地位。它是连接时间与空间的基本常数,其形式就是洛伦兹变换:

$$m = m_0 c^2 / \sqrt{1 - v^2/c^2}$$
式中, m_0 为静止质量, m 为运动质量, v 为物体运动速度, c 为光速。

根据这个公式,实物粒子速度越大其质量越大,要使粒子加速所必须做的功也越大。因此,如果要把粒子加速到光速必须提供无穷大的能量,但这是无法满足的。于是相对论给出的结论是实物粒子不可能以通常的方式被加速到光速,更不用说超光速了。

关于光子,相对论认为它的动质量与频率有关,有能量和动量,但没有静质量,因为自然界没有静止的光子。

但有专家认为,这种论断是牵强的。我国数学家、物理学家秦元勋 70 年代认为:“爱因斯坦在时空理论中,把伽利略理论中的‘绝对时间’概念抛弃,这是一大进步,应当肯定。

但是，他也引入一个‘光速不变’即‘光子达到绝对速度’的概念。根据这一概念，应当推出洛伦兹收缩因子对于光子 $\sqrt{1 - v^2/c^2} = 0$ ；用于质量，爱因斯坦得到光子静质量 $m_0 = 0$ ；用于空间，得到光子无大小（‘尺缩’到零）用到时间，得到光子无内部时间（‘钟慢’到停）。这样，爱因斯坦的光子是‘三无世界’。”

又比如我国学者黄志洵认为，以爱因斯坦质能关系和量子概念推导动质量的手法，完全是把光子形象化地粒子化了，但对于波长较长的波，粒子性概念就很难建立。

而对于光子静质量是否真的为零，科学家们也是放心不下的。在整个 20 世纪，包括德布罗意(De Broglie)和薛定谔(E. Schrodinger)在内的许多科学家都探寻过光子的静质量问题。中微子一直也被认为是静止质量为零的，但 1998 年，在日本的多国科学家的联合实验肯定了中微子有静质量，光子静质量问题一时又受到关注。

“自从相对论诞生之日起，就形成了一个主流看法，认为超光速运动是不可能的。理由是相对论的许多基本公式中，都含有一个因子 $\sqrt{1 - v^2/c^2}$ ，如果物质运动速度 v 超过光速 c 的话，根号成为虚数，它将导致该物质的多个物理量变成虚数而失去意义，同时也会造成时序颠倒，为因果律所不容。这种看法其实是一种对相对论公式的误解。”

这是我国学者耿天明于 2002 年发表的观点。他把光速不变原理解析为两层意思,第一是假定存在一个对所有惯性系都恒定不变的极限速度 c ,第二是光在真空中的传播速度就是此极限速度。耿天明认为狭义相对论的基础是“极限速度不变”;至于光速,可以不提,更谈不上光速不变的禁令了。

这种看法无疑开阔了我们的视野,但在看到‘超光速粒子’概念时还是不免令人惊讶,特别是它早在 1904 年,在狭义相对论创立之前,就由德国著名物理学家索末菲(A. Sommerfeld)提出来了。可以想像,在爱因斯坦的盛名笼罩之下,这种学说是不会有多少人注意的。

1967 年,美国哥伦比亚大学的费伯格(G. Feinberg)发展了该理论,并把超光速粒子命名为“快子”(tachyon)。这个学说的逻辑是这样的:增加能量使物体加速并不是使物体运动得更快的惟一办法,因为很明显,光子的速度就不是加速得来的,而是本来就有的。所以从逻辑上讲,有可能存在速度本来就比光子快的粒子。

在日常世界中,静止物体能量等于零,当它获得能量时,它就运动得越来越快,如果能量达到无限大,它就被加速到光速。而在快子世界中,能量等于零的快子以无限大的速度进行运动,它获得的能量越大,运动就越慢(注意,这里没有印刷错误),到能量为无限大时,它的速度就降低到光速。但能

量为无限大是不可想像的,所以光速的是个能量的壁垒,是两个迥然不同的世界的分界线。

根据洛伦兹公式 $m = m_0 c^2 / \sqrt{1 - v^2/c^2}$,如果物体运动 v 超过光速 c 的话,分母就变成虚数,这时只有取静质量 m_0 为虚数,动质量 m 才能为实数,才与康普顿—吴有训效应相符。费伯格正是这样假设的。

虽然费伯格理论并不与狭义相对论冲突,但“虚质量”的确是个让人头痛的概念,难以想像。然而它也许暗示着一个全新的物质世界,在这个世界中,物质并不是靠万有引力互相吸引,而是互相排斥。

物理学家相信实验,这样,超光速粒子理论就给自己出了道难题,正如伽莫夫(G. Gamov)所说:“一般的快子和它们的闪光在我们能够发现它们之前,早就一瞬即逝了。只有那种非常罕有的高能快子,才会以慢到接近光速的速度从我们眼前飞过。即使在这种场合下,它们飞过1千米也只需要三十万分之一秒左右的时间,所以,要发现它们也是一桩极伤脑筋的任务!”

所以毫不奇怪,20世纪60~70年代利用加速器、 γ 射线、宇宙射线等手段寻找快子的努力均以失败告终。但是美国得克萨斯大学的苏达珊(G. Sudarshan)认为必须继续研究快子,因为快子可为一系列关于粒子物理、大气物理、宇宙学等方面

的问题提供解释,而且快子的数学分析与物理理论一致,实验证明是有可能的。快子目前的遭遇有点类似当年“正电子”的情况。每一种新思想最初总是被嘲笑为荒唐,不笑不足以为道。

过去,中微子被认为是以光速运动,或者以非常接近光速的亚光速运动。但最近某些测量显示中微子质量可能是虚数,中微子是不是一种超光速粒子呢 有待进一步研究。

根据狭义相对论,不同的观察者对于不同事件发生的相对时间会有不同意见,这取决于事件发生时他们的位置,他们本身移动的速度和光从事件发生的地点到达他们所需的时间。但关于事件的信号不会比光更快地到达他们, 不然的话,他们在看到事件的原因之前就看到了结果,违背了因果律。

这里明确限制不能超过光速的是‘信号速度’的确,我们感兴趣的超光速一般是指超光速传递信号或者能量。然而,什么是真正意义上的超光速,并非一目了然。爱因斯坦也说过“光速不变’并不是始终正确的,当时间和距离没有绝对的定义的时候,如何确定速度并不是那么清楚的。

为此,科学家们需要更为明确地界定‘速度’。可以从两个方面来看,一是实物粒子速度,这已经在上面讨论过了 另一个是波速度,因为电磁波对我们是太重要了。

相速度和群速度概念出现较早,19 世纪就有了。单一频

率的波的一定相位点的运动速度,称为相速度。光速也就是单色波在真空(自由空间)的相速度。但实际存在的波都不是单一频率的,比如太阳光就是七种单色光组成的。如果媒质对这个波又是色散的,那么,传播中的波由于各不同频率的成分运动快慢不一致,会出现扩散。但如果此波由一群频率相差不大的单色波组成,那么波在相当长的传播途中仍将维持为一个整体,以一个固定的速度运行,这个特殊的波群称为波包,其波包峰的速度称为群速度。能速是指能量传递速度,相速不代表能速,群速在一定条件下可以等同于能速。

对非色散均匀媒质中的单色波传播,相速与群速相等。对于正常色散,群速滞后于相速;对于反常色散,群速大于相速,这时可能导致群速高于光速。

在早期。讨论波动问题时,总是假定该波早已存在,而不关心波是怎样建立的。但是,波总是从某个时刻开始产生,它不会是单色波,所以相速的价值非常有限。而仅有群速概念也是不够的。群速实际上是已调波包络的相速,对包络而言也是针对稳态情况提出的定义。显然对于现实的信号而言,需要一个新概念,即“信号速度”。

1907年~1914年间,索末菲和他的学生布里渊(L. Brillouin)用数学分析详细讨论了电磁波速度问题,并对什么是信号、信号建立过程等作了非常精辟的分析。

他们认为,实际的信号总是在某个时刻从零开始的,从这个时刻起直到稳态信号完全建立,这个过程才有信息传递,才谈得上信号速度的概念。因此,信号速度意味着波从微弱的波阵(波头)以怎样的速度逐渐地、迅速地发展,达到可观察的、稳定的振幅。而相速,则仅仅从相位角度考虑问题。

索末菲—布里渊波速理论与狭义相对论并无矛盾,他们证明了有起始时间的信号在媒质中的传播速度不可能超过光速。

由以上论述即可以看出,信息和信息的传播是超光速研究的核心问题。“现在是什么时代 信息时代!”这样的话几乎成了人人可说的口头禅,但是到底什么是信息我们还知之甚少。20 世纪 40 年代,美国数学家香农(C. E. Shannon)从统计学的观点分析了信息问题,建立起影响深远的信息论,使人们对信息的数学属性有所了解。然而,它的物理属性到底应如何描述仍是一个尚未涉及的领域。我们习惯于把时间、空间、质量和能量作为物质的基本属性,但科技发展至今,信息是否也该纳入物质的基本属性的范畴呢?对信息的本质和传播的探讨必将有助于推动超光速研究的进展。

至此,我们已经明确,应当区分两种不同类型的‘超光速’现象,但是由于对信息本质的迷惑,有时区分有意义的和无意义的超光速现象并不是一件轻松的任务。

最普通的例子是这样的 在灯下晃动你的手,你会发现影

子的速度比手的速度要快。影子与手晃动的速度之比等于它们到灯的距离之比。如果你朝月球晃动手电筒,你很容易就能让落在月球上的光斑的移动速度超过光速。遗憾的是,不能以这种方式超光速地传递信息。

切伦科夫效应也可能被误认为‘超光速’现象。我们知道媒质中的光速比真空中的光速小,比如在水中,光运动的速度只有在真空中速度的 60%。这是因为光子与媒质微粒的相互作用。因此像高能电子这样的粒子在某些媒质中完全可能比光在同一介质中运动得快。这种情况下,它们产生电磁波,电磁波的运动速度没有粒子快,就会沿运动方向聚集形成一个剧烈的冲击波,这与超音速飞机产生音爆的机理相同。这种切伦科夫辐射不是真正意义上的超光速,因为它是在媒质中而不是真空中。1919 年,美国天文学家哈勃(E. P. Hubble)在研究星系光谱时发现,绝大多数星系的光谱表现出红移,数值大约与星系距离远近成正比。由多普勒效应可知,宇宙正在膨胀,星系正在互相远离。可以想像,距离足够远的星系可能以超过光速的速度彼此分离,但这是相对于第三观察者的分离速度。

哈勃的发现奠定了大爆炸(big bang)理论的实验基础,20 世纪 40 年代以来,大爆炸理论得到了更多的观测支持。但是,如果光速就是任何信号传递速度的上限,宇宙中相距遥远

的区域就没有理由达到热平衡。简单地讲,就是因为没有任何东西——包括热——能够在爆炸发生以后的时间里走完这段距离。而如果两个区域不能交换热量,它们也就不会达到相同温度。然而,宇宙在大尺度上是相当均匀的,因此在宇宙诞生之初其中必然存在某种以超光速传递的联系。

英美物理学家据此提出一个“光速可变理论”,作为宇宙学疑难的一个可能解答。2000年4月,美国学者勒莫尼克(M. Lemonik)发表文章说:“宇宙诞生时的强大能量场对宇宙扩张起一种增压作用,迫使宇宙急速爆裂、膨胀,其速度是光速的许多倍。光速上限是对运动物体的限制,但宇宙本身却不受这一速度极限的制约。”

有关初期宇宙的理论不容易得到实验的直接证明,但间接的实验检验不是没有可能。宇宙中一些类星体距离地球非常遥远,甚至达到120亿光年,它们可说是宇宙的化石,它们发出的光现在才能到达地球。因此,其光谱就提供了宇宙婴儿期的情况。2001年8月,澳大利亚科学家韦伯(J. Webb)发表了对类星体光谱的研究结果,他们发现亿万年前微观结构常数(标志电磁作用大小的一个基本物理常数)比现行值稍小,这被认为是光速发生了变化造成的。

即使在现在也可以观察到超光速现象。例如,1994年发现有星体喷射出两道电子云,它们以超光速在天空中移动。

1996年,有报道称,在暴风雨云层上方,有一种持续时间很短的环状闪电,向外扩展的速度超过光速。

所有这些研究和观察表明,某种超光速在自然界是普遍存在的,也是许多科学家的共识。

20世纪90年代以来,人为的超光速实验成为关注热点。在具备了量子隧道效应、量子干涉、电磁理论等等理论基础之后,超光速(FrL: faster than light)成为了一门新的综合学科。需要说明的是,目前的超光速实验通常指的是微波脉冲或光脉冲的群速度大于光速的实验现象,而群速在过去通常认为就是信号速度,最新的研究表明事实并非总是如此。

自然界是否是上帝用来嘲弄人类心智能力的魔物,这一点还不清楚。但是,量子力学的确以其神秘性质不知累死了多少杰出的脑细胞,美国大物理学家费曼(R. Feynman)甚至声称没有任何人真正懂得它,因而它被某些人戏称为“量子神学”。

FTL实验所借重的量子隧道效应就是量子力学的奇妙性质之一。当你向墙壁扔出一个乒乓球时,你指望它反弹回来,但量子力学宣称乒乓球有可能(以一定的几率)出现在墙壁的另一侧。这种几率随着墙壁厚度的减小而呈指数上升,特别是当乒乓球和墙壁的厚度都小到量子尺度时,这种现象就可被观测到了。

著名物理学家、科普大师伽莫夫更为夸张一些，他说这就好像一辆汽车明明被锁在车库里，却自己钻了出来，令起居室内的客人大吃一惊。解释这种奇怪现象的一种办法是根据海森伯的测不准原理，他指出，精确地知道一个量子粒子的能量和生存时间是不可能的——在这两个参数的结合当中存在着一个固有的不确定性。这意味着到达一个位垒的量子粒子只要能够保持外来能量一个非常短的时间，它就能够通过从模糊的不确定的量子世界中借取能量来跨越位垒。

大多数 FTL 实验都涉及到量子隧道效应，科学家企图弄清这样一个问题：一个事件在入射后经过多久才会在位垒另一端发生，或者说，粒子通过位垒需要多少时间。理论分析的结果分歧多多，跟教科书上规整划一的大好局面完全是两码事：有人认为粒子穿越位垒不需要时间，也就是速度为无限大，有人对此断然否定，还有人认为隧穿时间将逐渐达到最大，并在位垒加厚时保持恒定，这就会意味着当位垒加厚时穿越速度有可能超过光速。

实干家不满足于纸上谈兵，还独具匠心设计巧妙的实验以验证理论。1991 年，美国加州伯克莱大学的乔瑞雨(R. Y. Chiao)等人设想了一个“光子赛跑实验”，两年后这个设想得以实现。

光子赛跑实验说来很简单。光子源同时发送一对相干光

子,如果两路光子跑过的距离一样,它们到达终点的时间应相同。现在为其中一路光子加上一道滤光器(相当于位垒),测出光子到达的时间差,就可以算出光子通过位垒的速度。

但是实行起来谈何容易啊,因为时间差是飞秒(10^{-15} 秒)级的,超过一般原子钟的精度。研究人员利用了纽约罗彻斯特大学研制的干涉仪,配合计数器,把时间测量精度提高了百万倍,测出了时间间隔。再用一个初中生也会的公式算出光子通过位垒的速度是光速的 1.7 倍。

1994 年,奥地利维也纳大学的克劳兹(F. Krausz)小组用激光脉冲(飞秒级)取代光子,也得到超光速结果,证实了乔瑞雨实验结论。他们还发现位垒厚度增加时隧穿时间增加,最终达到饱和。

光子(或光束)赛跑实验好像是挑战了相对论,但乔瑞雨并不这么认为,他说:“这些实验并不意味着你可以发送比光快的信号。”实验中仅有几个光子穿过位垒,而且也无法确知是怎样穿越的,故无法用来发送信息。

但怎么理解实验结果呢?一种被广泛接受的方法利用了波粒二象性。把粒子的行为看做是波动,波的前沿将在波峰之前进入位垒。如果位垒以某种形式改变了波的形状,波峰则可能出现在波的前面,看起来似乎粒子以比它们在空气中具有的速度更快地穿越了位垒。但实际上波的前沿并没有超过光速,满

足了相对论爱好者的的心愿。

维也纳小组的实验说明隧穿时间与位垒厚度无关,这导致一个很奇怪的结果。假设一个位垒任意大,比如说像银河系一样大,那么穿越位垒的光几乎可以立刻跳过银河系,正如乔瑞雨所说:“位垒中的空间似乎消失了。”

当然这只是理论上的说法。因为由测不准原理,从模糊的量子世界借用能量是可能的,但只能在一个有限的时间里这样做,借用的能量越多,这个时间就越短,粒子穿越位垒的几率就越小。因此,量子隧道效应的超光速现象只在很短的距离内存在。

光子赛跑实验的一个关键是位垒反射了大部分光子,只允许少数光子通过,这和作用类似于微波技术中的波导——圆形或矩形的金属管道,可用于传播电磁波。每个波导根据它的材质和几何形状都有一个截止频率,低于截止频率的电磁波不能传播。但与隧道量子类似,一些微波不顾经典物理规律,仍然能够穿透禁区。因而截止波导可以作为位垒用于微波超光速实验。1985年黄志洵首先提出了这种思想,90年代初得以实施。

最为著名的微波超光速实验是1992年德国科隆大学的宁茨(G. Nimtz)小组的实验。1995年3月,在美国雪鸟市的一个研讨会上,宁茨教授报告了实验结果。实验设计思路与光子赛跑实验类似,也是比较两路微波到达终点的时间差,由此

算出其中一路微波经过截止波导(长 12cm)的速度。

引人注目的是,宁茨宣布他们不仅测出微波穿越波导的群速度为 $4.7c$,而且还发送了一个信号。他们把莫扎特的第 40 号交响曲调制到微波载频上了。此曲以 $4.7c$ 的速度飞越了 12cm 的距离。他们还录制了一盘磁带作为证明,并放给惊讶的人们听了。

主要是交响曲引起了热烈讨论,音乐算不算信号呢。乔瑞雨认为不算:“因为包含了时间的尺度,因此,它不是一个爱因斯坦意义上的信号。我承认,当音乐穿过位垒时,和按传统路径传播的音乐相比,它在时间上前移了,但只前移了很小的距离。它是如此小,以至于你只要看一下原始的声音波形是如何变化的就能预测出音乐将会如何变化。这并没有危及到因果律。”

宁茨则很难信服音乐不是信号的看法:“我不对这是否动摇了因果律表示意见,但是,我不能接受莫扎特的交响乐不是一个信号的意见。理论上,我可以延长这条路径很长距离,这时,将不可能预测音乐的变化,这样就真的有了一个传播得比光还快的信号。”

放弃相对论的确使物理学家们太为难了,他们宁愿接受一些不太过激的说法,而坚守信号速度不能超过光速的相对论阵地,同时不妨承认群速度的超光速。其实,索末菲和布里渊

早就预言群速度可以超过光速,还可能出现负群速。但直到2000年7月王力军的实验出现之前,负群速概念一直缺乏直观的物理内容。

王力军实验装置的核心是一个长6cm的铯(Cs)气室,它作为光脉冲通路上的反常色散区起到了关键作用。在一般的反常色散媒质中,光脉冲要么严重失真,要么严重被吸引,使实验无效。王力军巧妙地用激光把铯原子激励到同一个量子态,绕开了这个困难,使得脉冲得到很强的反常色散却没有失真。

媒体报道说王力军的实验证明了“激光脉冲以大约300c的速度前进”,而他本人认为这种说法不准确,应该说“光脉冲在原子气室远端的出现,比它在真空经过同样尺度时的时间快,时差是真空度越时间的310倍”。“这意味着通过原子气室传播的光脉冲峰在进入气室前就离开气室而出现了……好像它还没有进入气室之前就离开了气室。”

王力军认为这样讲并没有违背因果律或相对论,但争议很大,很难认同激光脉冲没有传递能量。另外王力军认为实验表明“一般人的错觉(没有东西可以按超光速运动)是不对的,该陈述仅适用于有静止质量的物体。光可看成波,没有质量,故它在真空中的速度不受限制。”

上述三个实验都涉及到某种量子屏障(固体介质、截止

波导气体介质),是不是说只有通过某种介质才可能产生超光速呢?回答是否定的,因为意大利科学家兰弗格尼(A. Ranfagni)领导的小组利用两个相对的喇叭传送电磁波,也发现超光速现象,当喇叭相对距离加大时,超光速现象消失。在自由空间传播的经典电磁波居然也出现超光速,令人十分费解,还没有公认的解释。

除了自由空间的微波异常传播以外,其他 FTL 实验都涉及到量子隧道效应,或者是不同频率微波在介质中的量子相干。总而言之,量子力学不但不禁止超光速,而且它可能还是超光速的真正起因。量子力学对超光速的影响在对 EPR 佯谬的旷日持久的争论中最为明显。

EPR 佯谬是 1935 年爱因斯坦等人提出来论证量子理论的不完备性的,引起广泛的关注(在“量子信息”一章有更详细的描述)。现在看来,它的最重要的作用倒是唤起了人们对远程量子相关的重视。也就是说,如果两个粒子是相关的(动量相等,自旋相反,曾经有过相互作用),那么如果改变一个粒子的量子态,另一个粒子的量子态也立刻发生相同的转变,哪怕是隔了整个银河系也是如此。所以,EPR 思维后面隐藏着某种比光速更快的东西。

爱因斯坦反对的正是这种“幽灵般的超距作用”。而现在,一种折中的想法认为,即使存在某种瞬时超距作用,它也

不能直接用于传递信号,借助经典手段才行,这样一来信号的传递还是没有超过光速,不违背相对论。

但不是每个人都这么谨慎的,例如英国物理学家、诺贝尔物理学奖获得者约瑟夫森(B. Josephson) 认为:“也许宇宙的某部分知道宇宙的另一部分,即一种在某些条件下会发生的远距离接触。……我当然不会期望法国南部的一列火车会因一只北极熊跃入冰水而失事,但我们也无法把这种可能性完全排除。”20世纪80年代,美国物理学家玻姆(D. J. Bohm) 提出了一个量子势理论。这一理论认为有一种新的物理场——宇宙场,弥漫于整个宇宙,不随距离而减弱。也许正是这种场的存在导致粒子的远程相关,但玻姆只想到此为止,他强调仅仅是一种相关性,不是信息传递。他不想放弃相对论。

借助量子力学这根魔棍冒出来的新概念有很多 负能量、负引力、负折射率、负相速、负群速、虚质量、虚时间、虚粒子……这些新奇概念令人联想到数学史上的虚数概念曾经引起的困惑。像虚数并不“虚”一样,这些奇怪概念可能并不仅仅是数学上的符号,也许一个物理学上的新世界正等待着发掘。

在这个新世界里,超光速和时空旅行可能是再普通不过的事了。1994年,美国物理学家索恩(K. S. Thorne) 宣称用数学方法证明了以 FTL 作空间弯曲飞行的可能性,科幻小说

的设想也许不无道理。

虫洞 (wormhole)并不是来自科幻小说,而是广义相对论的产物,指的是由强重力场在时空中造成的连接两个地点的捷径。旅行者可以从某点进入虫洞,几小时后从相隔数千光年的另一处出来。英国宇宙学家霍金 (S. Hawking) 建议人们别冒这个险,因为虫洞非常微小,约为原子大小的十亿分之一,存在时间极短,很不稳定。

但是索恩研究后认为,如果能制造出具有反引力的负能量物质,就能够保持虫洞畅通无阻。他建议在大尺度上利用卡西米尔 (Casimir) 效应来产生负能量区域。索恩坚持认为,虫洞和时间机器均为爱因斯坦理论所允许的。

墨西哥物理学家阿尔库贝瑞 (M. Alcubierre) 因提出一种能实现空间“曲相推进”的设想而知名。基本想法是压缩飞船前面的空间,同时拉伸飞船后面的空间,从而使飞船以 FTL 飞行。跟虫洞一样,也需要负能量物质。

鉴于幻想都有变成现实的本性,所以物理学家的超前思维就并不是在浪费时间了。

超光速现象在实验上已是不容否认,但理论上阻碍人们接受它的最大原因来自因果律——在时间上原因先于结果。

信息是以光速前行的,如果超光速成为现实,你就可以追上逝去的光,看到你的祖父。想得歹毒点的话,你还可以杀死

他，然后再想想你来自哪里，你就会掉进所谓“祖父悖论”的乱麻里了。

但是物理学发展至今，因果律已经在量子力学那里遭到重创了。有因必有果，有果必有因，但是根据测不准原理，偶然性被引入物理学，决定论的日子一去不回了。

因而，我们的观念再被刷新几次的话也没什么值得大惊小怪的。例如，中国学者焦克芳认为，事件发生的因果关系与光速的大小没有绝对的必然联系。美国著名物理学家惠勒(J. Wheeler)则更为大胆，他早在 20 多年就撰文指出：“量子原理表明，从某种意义上看，一个观测者在将来做的事就决定了过去发生的事 甚至那过去是如此遥远，远到连生命都不存在。”

惠勒的观点估计认同的人不多，但是他暗示了人作为“观测者”的作用。EPR 超距作用似乎加强了这一暗示。量子态可以瞬时远程传递，但是它对于接收者来说是未经测量因而是未知的。由此可见，信息似乎与人(或者说意识)的参与分不开。所以有些物理学家以令人惊讶的开放态度把“意识”引入到物理学中来，比如中国学者高山认为：“尽管将意识引入物理学似乎是非标准的、不成熟的，但我们将论证这只是历史遗留下来的一种偏见。实际上，意识已等候在物理学的门前了。”

可以认为,对光的审视关乎我们对宇宙本质的认识,超光速研究将是新的科学革命的一个突破口。在此新旧交替的世纪之初,让我们以更为开阔的心胸,记住如下的话:“大自然重写宇宙法则,物理学寻找新的爱因斯坦。”

直 面 幽 灵

如果谁在量子面前不感到震惊，他就不懂得现代物理学；同样如果谁不为此理论感到困惑，他也不是一个好的物理学家。

—— 尼尔斯·玻尔

这是个白痴讲的故事，一派胡嚷和乱叫，没有半点意义。

虽说这是发疯，然而其中自有条理。

—— 莎士比亚戏剧中的人物对白

虽然有不同的理解，但量子力学是当今物理学中的一个基础理论，一块普基石的看法是无法否认的。它有毫不含糊的数学形式，它经受住了百般批驳和种种实验，而且从激光、核

能、半导体、计算机等技术和产业,无不铭刻着量子力学的印迹。

然而,量子力学的意义却是聚讼纷纭,人言言殊,甚至有人说它根本没有意义。争议持续了 100 年,无疑还将持续下去。在这一点上,在科学史上可说是没有先例的,它创立于一个世纪以前,以当今的发展速度来看,它可以称为古董了。现在还在热门的许多领域,比起量子力学来,只能算是后来的暴发户。但它本身还像初生时一样新鲜和高深莫测。

从某种意义上说,量子力学的处境与宇宙的处境是一样的。宇宙存在着,但我们却不知道它从何而来,为什么存在?大多数人把接受既成事实当成问题的解决,但总有些不死心的人,痛苦或者快乐地思索着这个问题。量子理论即是这种思索的一个结果。也许正是因为它成功地模拟了世界的本性,从而变得像世界本身一样扑朔迷离了。

量子论创始人、德国著名物理学家普朗克(M. Planck)曾说:一个新的科学真理取得胜利并不是通过让它的反对者们信服并看到真理的光明,而是通过这些反对者们最终死去,熟悉它的新一代成长起来。不错,一代一代的新人开拓了量子力学新的应用领域。正如没有人会在弄清消化原理之前拒绝进食一样,现在也没有人能抗拒量子理论的神秘魅力。

目前最受关注的是量子信息技术,包括量子隐形传态、量

子计算、量子计算机、量子通信、量子密码技术等等。这些技术的发展不但将彻底改造现行的生活,而且将全然更新我们对世界的理解方式。

这一切都肇始于世纪交替的 1900 年,开尔文提出经典物理学上空的‘两朵乌云’是这一年,普朗克提出量子概念也在这一年。普朗克认为在黑体辐射中,能量是一份一份发射的,这一说法明目张胆地违反了能量均分和连续性假设,意义非同凡响。普朗克本人在气质上属于保守一类的,但为了物理学真理,他只得牺牲以前所持的任何信念,做出孤注一掷的行动。

量子论粉碎了物理学家们习惯已久的经典土地,它引起的震动和恐慌是可想而知的,因而它势必要经历一个困难的时期。1905 年爱因斯坦提出光量子假说,成功地解释了光电效应;1913 年玻尔把量子化概念引入原子结构中,对氢光谱做出了满意的解释。他们为量子论开辟了道路。

沿着玻尔指示的方向,海森伯彻底抛弃了经典的轨道概念,于 1925 年发现了一套新的系统的数学方案——爱因斯坦称之为‘魔术乘法表’。其中原子辐射的频率和强度以一定规则排列成一个方阵,方阵之间按照一种新的乘法规则进行运算。

当量子力学的矩阵形式横空出世时,另一股创造的潜流正

蓄势待发,这里有爱因斯坦的启发。1923年,德布罗意把爱因斯坦的光子的波粒二象性概念推广到物质粒子。1926年,薛定谔提出一个微分方程来描述物质波的状态变化。这就是量子力学的波动形式。矩阵形式和波动形式是等价的。

量子力学最让人吃惊的是它的不确定性,及其对因果律的离解。自然不再是经典式的了,不再有确定的轨道,不再能同时测量位置与速度、能量与时间。甚至物理学规律也建立在了几率之上,只有几率的精确性。经典理论的光辉形象是过去的事了。

对于既是波又是粒子的奇特禀性,美国物理学家霍夫曼(B. Hoffman)认为,它本质上揭示了空间和时间不是根本的东西,基本粒子和能量本身才是。“也许量子论所力求表达的就是这个。……如果空间和时间不是宇宙的根本素材,而只是更深潜存在的更为根本的实体群的平均的、统计的效应,那么不足怪,这些根本的实体如果想像为存在于空间和时间中,就会表现出波动和微粒的性质这类不相配的性质。”霍夫曼认为,一个单独的粒子不是同时处在两个地点,它根本不在任何地点。正如一个“思想”并不具有位置性一样,它超越了时空的限度。

而玻尔的看法则为更多人接受,他用互补原理来解释。并不是自然出了偏差,而是人类出了偏差。一个量子,如果不去

测量它，说它是粒子或波根本没有意义，测量本身决定了它“塌陷”为粒子或者波。而这互斥的两种图景同等重要，缺一不可，因而它们是互为补充的，同为描述实在所必需。

对于物质波概念（或波函数，即描述物质波的函数，受薛定谔方程约束）的诠释更是众说纷纭。薛定谔取消了粒子的根本地位，而代之以波包。但玻尔指出这是不可能的，因为波包在传播过程中必然逐步扩散，缺乏粒子的稳定性。

1926年，德国物理学家玻恩（M. Born）提出的解释占据了正统地位。他认为，物质波是几率波，波函数描述的是在某处找到该粒子的几率，它不在任何特定的地方，而是以不同的几率同时在这里或者那里。这听起来像是一派胡言。

但是必须指出，这里的几率与统计学中的概率是完全不同的。这里的几率并不是出于人类的无知，而是出于自然的本性。它不是对大量系综（初始条件不同的同类样本）的统计结果，而是对单个粒子的描述。因而，它并不仅仅是数学上对可能性的一种表示，而是具有物理意义的。这一点在双孔干涉实验中表现得最为明确。

设想有一个光子源，一块感光板，两者之间隔着一块不透明的屏，屏上有两个相距不远的小孔。这个实验200年前就有人做了，结果是在感光板上出现明暗相间的干涉条纹。但是，现在把光源减弱，直到一次只发出一个光子。很明显，光子每

次不是经过这个孔就是那个孔；但是我们不知道它到底经过哪个孔。令人吃惊的是，一段时间后，感光板上仍然出现干涉条纹。结论是：单个光子同时经过了两个孔，并与自己发生了干涉。由于得到实验的支持，几率论在玻尔的支持下被奉为“哥本哈根诠释”，大行其道。

爱因斯坦在量子理论的发展中扮演了特殊的角色。一方面，他是早期量子论的三驾马车之一；另一方面，他又是后期量子力学的严厉批判者。他以他的声望迫使量子力学的支持者去完善它，给它以更为合理的哲学解释。

令玻尔十分遗憾的是，爱因斯坦最终没有被说服，但他并没有说量子力学是不正确的，他只是认为它对自己心目中的实在的描述是不完备的。1935年，爱因斯坦(A. Einstein)、波多尔斯基(B. Podolsky)和罗森(N. Rosen)提出以EPR佯谬著称的论文。他们认为，对于一个完备的理论，每一个物理量都对应于实在的一个要素。对物理量的实在性的判据是：“如果不以任何方式干扰一个体系，我们就能肯定地(即以等于1的几率)预言一个物理量的值，则存在物理实在的一个要素和这个物理量相对应。”

玻尔在反驳中指出，对系统没有任何干扰对于量子理论不适用，因为测量即意味着干扰。因而对物理实在必须以新的眼光看待：可在何种程度上给‘物理实在’之类的词汇下一个

不含糊的定义,当然不能从一个先验的哲学概念来推知……必须建立在直接借助于实验与测量的基础之上……事实上,自然哲学的这一新的特征,意味着我们应该彻底改变对物理实在的态度。”

除了关于实在性的分歧之外,爱因斯坦最不能接受的还有他称为‘幽灵般的超距作用’的东西。他在写给玻恩的信中说:“何种事物真实地存在于 B 区域应该……与在(相隔很远的) A 区域某个地方实施哪种测量没有关系,与 A 空间是否进行了任何实验也应该无关。如果谁要坚持这一方案,那么,他几乎不可能认为量子理论描述是对物理上真实的事物的完备描述。而如果谁不顾这一事实,仍坚持认为它是一种完备的描述的话,那么,他就得假定, B 空间的真实事物,会因为 A 空间所实施的一次测量而发生突然的变化。我的物理直觉使我强烈反对这种情况。”因为这种远程瞬时作用违背了狭义相对论的光速不变公设。

这里涉及到局域性假设 两个不再发生相互作用的系统,对其中一个的测量不会影响到另一个。对立的观点即非局域论。我国学者沈惠川将‘非局域性’概括为三个特征:一是不成形性,即不认为物质粒子的质量、能量全部或大部局限于一个小范围;二是超光速性,即允许信号传播速度超过光速;三是相关性,即空间分离的事件可相互关联。

基于对实在性、局域或非局域性的理解,引发了许多异想天开的理论,如多宇宙论、历史一贯论等。其中之一是隐变量论,由美国物理学家玻姆于 1952 年提出来的,企图“打开了通往更微妙的实在底层的大门”。他像爱因斯坦一样,对量子力学的几率概念作古典的统计性解释。那么,如同统计力学的基础是经典力学一样,量子力学的基础又是什么呢?或许是某种未知的变量,而几率是对这些隐变量作某种平均的结果。

同样重要的是,玻姆以更易理解(有人认为是误解)的方式表述了 EPR 思维。设想一个自旋为零的微观粒子,某个时刻衰变为两个自旋 $1/2$ 的粒子,然后向反方向飞离,并在距离相同而方向相反的地方接受测量。根据量子力学,两者的自旋都不确定,直到测出为止。尽管两者可能相距若干光年,但由一个粒子自旋的测量却可以立即判定另一粒子的自旋。如果一个为 $1/2$,另一个必为 $-1/2$ 。由于某种量子关联,两个粒子像同谋犯一样行动一致。

决定性的进展是贝尔(J. Bell)于 1964 年带来的,这位爱尔兰物理学家当时正在欧洲高能物理实验室设计加速器,业余时间搞量子论研究。他在局域实在性的双重假设下,对同谋粒子的关联程度建立了一个严格的数学描述,称为贝尔不等式。贝尔是玻姆的少数支持者之一,他也倾向于爱因斯坦,如果爱因斯坦是正确的话,那么不等式成立。贝尔的功绩在于开

辟了对量子力学基础作出直接检验的途径。

截至 1986 年,有 15 个实验发表,只有 2 个满足贝尔不等式。最有说服力的是 1982 年,法国物理学家阿斯派克 (A. Aspect)所做的实验。钙原子从激发态返回基态时辐射出两个光子,在光子飞离之后测量其偏振的关联程度。结果表明,局域实在性假设是错误的,非局域性是量子理论的基本特性。

最近的实验报道来自瑞士。1997 年,日内瓦大学的科学家利用两条分开的光纤,在 10km (阿斯派克实验距离只有 15m)的距离上测到了光子对的关联。阿斯派克评论说:“新实验意义重大,因为这将在很远距离上保持这些令人奇怪的量子关系。”

阿斯派克实验使贝尔的观念发生了转变,对于量子力学,“很难相信它是错误的”,EPR 实验中确实“包含了某种比光快的东西”。也就是说,EPR 思维与超光速的可能性是密切相关的。实际上非局域论认为,量子力学并没有否定超光速,甚至可以说,量子关联是超光速的根源所在。

对于形而上学来说,这是个非常严峻的问题。因为非局域性本来是小心翼翼地假设只在原子或亚原子内部有效的,现在一下子扩展到了全宇宙。设想两个粒子分别位于宇宙的两侧,它们共享一个波函数,对其中一个粒子的测量使波函数收缩,各种可能的量子状态(包括动量、偏振、自旋等)收缩成一

个测量结果,另一个粒子立即采取同一状态。这种波函数是宏观的,它的收缩可以立刻影响到宇宙另一侧,其速度之快,不受光速限制。

但是,利用量子对(也称为 EPR 对)的纠缠能不能实现信息的超光速传递呢?目前的回答是否定的。因为信息意味着消除某种不确定性,而对一个粒子的测量立即可以知道另一粒子的状态,没有新东西出现。另一个障碍是量子态不可复制,这个定律是测不准原理的一个推论。测量这个粗鲁的行为会破坏量子态娇嫩的叠加结构。

因此,量子态的远程传送长期以来被认为是不可实现的。但是,人类的智慧无孔不入。1993 年,IBM 的贝内特(C. Bennett)等科学家,提出一个利用经典与量子相结合的方法实现量子隐形传态的方案。

之所以称为“隐形传态”,是因为发送者 Alice 和接收者 Bob (量子信息理论中习惯这样称呼通信双方)都不知道所传送的量子态是什么。实现这一点的关键是被称为贝尔态测量的过程: Alice 将所需传送的粒子 1 与 EPR 对中的粒子 2 相耦合,测量它们的共性。这时粒子 1 的量子态映射给粒子 2,由于量子关联,粒子 3 收缩到粒子 1、2 共同的状态。为了把粒子 3 还原到粒子 1 的状态, Bob 必须对它进行 4 种可能的操作之一。究竟做哪一个操作,要看 Alice 的贝尔测量的结果。

由于存在 4 种贝尔态,所以 Alice 需要以经典方式发送 2bit 信息给 Bob。然后 Bob 根据收到的信息对粒子 3 实行特定的变换,就得到所传送的量子态了。这种方法的妙处在于,所传送的量子态在整个过程中都是未知的。限于常规方式传送信息过程,这也不是超光速通信,没有违反因果律之虞。这种方法也没有违背量子态不可复制原理。虽然原来要传送的粒子 1 的量子态被测量破坏了,但并没有禁止它在别的地方被还原出来。

1997 年 12 月,在奥地利因斯布鲁克与罗马之间进行了首次量子远距传态实验,是荷兰布密斯特(D. Bouwmeester)和中国学者潘建伟等人主持的。通过对携带极化信息的初始光子及 EPR 关联对中的一个光子进行联合的贝尔态测量,使关联对中的另一光子获得了初始的极化信息,而后者可距初始光子任意远。

1998 年,美国加州理工学院也实现了光的远传实验。利用量子纠缠,两个相距甚远的粒子如同孪生,其特性相互影响。用实验者津布尔(Ginbul)的话来说:“如果你胳肢其中一个,另一个就笑”。

因斯布鲁克实验中,量子态的 4 次传送中只有一次是正确的,对于实用的目的来说,这显然是不够的。出错的一个原因是退相干,也就是说,在长途传送过程中,由于环境噪声的影

响造成量子纠缠的衰退,限制了量子传送的距离。2003 年 5 月,潘建伟等人在量子纠缠态的纯化上取得突破性进展。相关论文发表在《自然》杂志上,审稿人认为这次进展“首次令人信服地在实验上证明了量子信息处理中任意未知的退相干效应是可以被克服的”。

量子隐形传态传送的只是粒子的量子态,并不是粒子本身,这一点在有些媒体的报道中是混淆的,究其原因,可能是受科幻小说的影响。设想一下,在某个夜幕降临的街头,一个光屁股的阿诺从天而降……从原理上讲,这已经不是问题了,但技术上存在巨大的困难。就人体而言,1030 个量子态的规模实在让人望而生畏,只有整体输送才能保持人体的完好。而且意识是不是量子现象,远程传送会不会破坏人的心灵呢?这已不单是科学问题了,一不小心就变成了“伪科学”。

但是,2001 年 9 月,《自然》发了一篇引人注目的文章:“宏观物体的量子纠缠状态”。丹麦物理学家在两个宏观物体(数万亿个铯原子气)之间造成了纠缠态,虽然时间很短,但已让人看到这样的希望:“即时把物体从一地送到另一地的想法不再是遥不可及了。”

量子隐形传态传送的是量子信息,它是量子通信的最基本过程。基于量子理论,量子通信跟经典通信方式相比,自有它独特之处。最基本的信息表示方式都不同了。

在经典信息论中,基本的信息单元是比特(bit),在实用的系统(如计算机)中,比特用 0 和 1 表示 在物理上,原则上只要是明确的二值系统都可以,如脉冲的有无、门的开闭、电压的有无等等。在量子信息理论中,量子信息的基本单元是量子比特(qubit)。任何双态(互相独立)的量子系统都可以用来制备成量子比特,比如光子的偏振、电子的自旋、原子的能级等等。以电子的自旋为例,向上自旋和向下自旋的态分别表示成 $|0\rangle$ 和 $|1\rangle$ (这是费曼提出来表示量子态的简洁办法),而量子位则是这两个态的叠加形式 $a|0\rangle + b|1\rangle$ 。经典位在 0 和 1 之间非此即彼,而量子位可以一定的几率既是 0 又是 1。

跟经典通信一样,量子通信也要把来自信源的信息(比如 Alice 的情书)通过某种方式编码在量子态上,然后把这些量子态发送给男友 Bob,解码后 Bob 就可以沐浴在女友的情意中了。在量子隐形传态中,EPR 对就是传送量子态的渠道。实用上,一个关联对当然不够,需要许多量子粒子(如光子)来构成量子信道。

传送未知的量子态,是量子通信所特有的,当然量子信道也可以传送经典信息。1011,这一串数码可以用 4 个量子位来传送,只要把它们制备在 $|1\rangle |0\rangle |1\rangle |1\rangle$ 四个纯态上就行了。这种方式与经典方式没有实质差别,一个量子位对应

一个经典位。

但是基于量子纠缠现象,可以实现只传送一个量子位而传输两个经典位信息。这就是所谓的量子稠密编码。这里涉及到一些专门知识,只能略述一下。

对于一个双量子位系统,施加 4 种特殊的变换,所得到的 4 个最大纠缠态(贝尔态)可以用来编码 2 比特经典信息。关键还是量子纠缠态。通信过程大致是这样的:如果 Alice 和 Bob 希望彼此通信,那么他们可以先拥有一个由 EPR 源产生的关联粒子。假如 Alice 想发送 0-3 当中的一个数字给 Bob,显然 4 个数字需要 2 个经典位来传送,但现在只需要一个量子位就可以了。Alice 根据要传送的数字在她的关联粒子上执行相应的变换,这种变换通过一种瞬时关联作用传递到 Bob 的关联粒子上。然后 Alice 将其量子位发送给 Bob。Bob 再对两个关联量子位执行相应的逆变换,即可得知发送的是哪个数字了。

这跟量子隐形传态好像是反其道而行之。但有一点很不相同。在远程传态中, Alice 只发送量子态给 Bob,量子粒子是不发过去的。而在这里, Alice 必须把量子粒子发送给 Bob。这种编制在量子纠缠态中的信息称为“隐匿的”,就是因为 Bob 必须接触到两个量子位才是可行的。

基于量子隐形传态过程,人们还提出量子因特网的构想。

量子因特网是用量子通道来联络许多量子处理器,它可以同时实现量子信息的传输和处理。相比于现在的经典因特网,量子因特网可实现多端的分布计算,有效地降低通信复杂度,还具有安全保密性。

量子态的不可复制原理乍看起来是对通信的一种限制,但从另一角度来看却正好为保密性提供了绝佳的物理依据。任何想中途截取量子信息的人都必须对信息进行测量,但测量的破坏作用会留下蛛丝马迹,用户一旦发现有人在窃听,马上就更换通信信道。

秘密通信依赖于密钥,在最简单的情况下密钥可用 0 和 1 的随机串。用密钥把信息数码按一定的规则进行搅和,不知道密钥的只看到一锅数据之粥,知道的却可以破译。这种传统的数学加密方法在量子计算机(如果真做出来的话)面前不堪一击,使量子密码术受到广泛的关注。

量子特性可用于保密的创意,是美国科学家威斯纳(Wiesner)最先想到的。他于 1970 年提出,可利用单量子态制造不可伪造的“电子钞票”。但这个设想的实现需要长时间保存单量子态,不太现实。贝内特和布拉萨德(G. Brassard)建议把该设想用于密码通信。1984 年,贝内特和布拉萨德提出了第一个量子密码术方案,即 BB84 方案。1992 年,贝内特又提出另一方案。

量子密码通信还是依赖于纠缠态,通信双方先测量一系列关联对的量子态,得到随机串。然后通过经典方式比较测量结果,如果关联对的相关程度低于预计值(排除环境影响引起的退相干),那么一定是有窃听者,立即更换信道。如果相关程度正确无误,则没有窃听者,那么可取测量所得随机串的一部分作为密钥。由此可知,量子特性只是帮助建立信道和确定密钥,并不是直接发送密文。

打个不太恰当的比方。好比 Alice 发送了一个苹果给 Bob,如果有只虫子中途咬了几口, Bob 就会在收到后告诉 Alice 说,你发了一个烂苹果给我。Alice 就知道中途有虫子咬了,马上就会换个方式。如果以前只是用纸包了一下,下回可能就要用纸箱试试了。

1993 年,英国首先在光纤中实现了基于 BB84 方案的量子密钥分发,传输距离为 10km。今年,日本把这一距离提高到了 87km。目前还有些技术上的困难阻碍把距离提高,但专家预计 5 年内量子密码通信可能实用化。

除了量子通信、量子保密等技术以外,量子计算机也是科学探险家们向往的圣地。探险家自身的激情固然重要,实用的推动也很关键。

电子计算机是 20 世纪最重大的发明,但是目前的计算机体系结构在人类探索世界奥妙的雄心壮志面前已经力不从心。

半个世纪以来,提高计算速度的方法主要是缩小芯片尺寸,但是这种努力已经逼近物理极限了。当线宽小于 0.1 微米时,电子波性突出,所有线路都变成了发射天线,量子障碍不可避免。必须有根本性的突破才能解决人类的计算困境。

光子可以互相穿越而互不影响,电子之间有库仑力,所以光子是注定的数据信使,而电子则是注定的控制者。它们在机箱内的结合将导致光子计算机的产生,但光波波长限制了它在芯片内部的应用。以光存储信息和以光控制光的设想也已得到部分实现。尽管困难重重,光子计算机也不失为一个方向。

生物计算机又称为分子计算机,用 DNA 链来进行计算,这是 1994 年美国数学家阿德勒曼 (L. Adleman) 提出的创意。他在烧瓶里尝试解决一个经典难题:如果一个推销员要在许多城市推销,每个城市必须而且只能经过一次,如何找到最短的路程?问题的难度随城市数目以指数方式增加,阿德勒曼解决了 7 个城市问题,但如果城市数目上百的话,所需要的 DNA 恐怕就得用地球这么大的容器来装了。

量子计算机才是真正的希望所在,它在几秒之内作出的计算足够目前的计算机气急败坏地忙上几亿年。在量子计算机的优雅面前,经典计算机简直像个苦力。正如以色列量子计算专家多伊奇 (D. Deutsch) 所说:“量子计算是驾驭自然的全新方式”。

量子计算与现有的计算方式截然不同,它是基于量子态的叠加的。1935年,薛定谔以令人困惑的方式表述了这个奇妙的量子特性。他提出一个思想实验。在一个封闭箱子里放了几样东西:猫、放射性物质、装有毒物的玻璃瓶,等等。放射性衰变是一个量子过程,下一秒发射和不发射粒子的几率各占一半。如果发射粒子,计数管放电控制继电器使小锤落下击碎玻璃瓶子,毒气逸出猫将死去。如果没发射粒子,猫当然活着。现在的问题是:一秒钟后猫是死是活。按常理,猫非死即活。但量子力学正是以违背常理著称的。既然粒子发射是不确定的,猫的命运在打开箱子观察之前也不能确定,猫处在活与死的叠加态中。这只似死似活、半死半活的猫就是著名的“薛定谔猫”。

薛定谔猫死活这两种状态,用数值表示就是0和1。对于经典存储器而言,如果它是 n 位的,那么它所能表示的状态有 2^n 个,但是在一个时刻,它保存的状态只能是这 2^n 个状态中的一个。而对于量子存储器却不是这样,它表示的状态也是 2^n 个,但是它却是同时保存这 2^n 个状态。所以它有着惊人的存储能力,一个250量子位的存储器可能存储的数为 2^{250} ,比现在已知宇宙总原子数目还要多得多。

对于计算,量子计算机与经典计算机相比也有同样的加速比。经典计算机结构是美籍匈牙利数学家冯·诺依曼(Von-

Neumann)提出的,按照程序一条指令一条指令地执行,这是串行方式。而基于量子叠加态,各种几率的值可以同时并行运算,计算结果存放在新的叠加态里。量子并行计算是量子计算机巨大威力的奥秘所在,它与多处理器的并行计算完全是两码事,不可同日而语。

心细的读者可能已经感觉到有点不对劲了。既然计算结果也是处于量子叠加态中,怎么提取出来呢?因为提取结果必须对量子系统中的量子位进行测量,那么因波函数的塌陷,只能从原来多个态中以概率的形式读取到其中一个计算机结果,其他的则被测量无情地破坏了。而且,由于量子测量的不确定性,我们甚至没有选择读到哪个结果的权利。

也许你的最终态里包含有一亿个答案,但如果不能正确地读出来,等于什么也没有。这真令人沮丧。幸运的是,在1985年,多伊奇发现一个关键:不要让量子计算机简单地回答并行问题,而是要让所有答案互相干涉产生一个集体答案。还可以对量子态进行一些变换,放大感兴趣的态,以便可以较大的概率测量到该结果。

在纳米科技一章中,我们体验到了一个独特的创意导致一个全新产业的威力,那是伟大理论物理学家费曼提出来的。现在,我们还得在他的功绩中加上一项:量子计算机的思想。

1981年,费曼受邀在计算物理大会上做主题发言。他指

出有些量子现象在经典计算机上没有宇宙寿命那样长的时间是计算不出来的。他设想,若能把这类不可计算的问题映射到量子系统上,那么,只需做个量子实验就等价于完成了这项计算。反过来,许多量子系统的演化也可以用量子计算来模拟。同年,阿斯派克以实验证明了两个粒子可以在远距离上发生瞬时关联,费曼敏锐地意识到这种关联性将成为量子计算的关键。一般认为,量子计算和量子计算机的概念就是由此产生的。

1985年,多伊奇给出了一个量子图灵机模型。以前也有人用量子力学语言来表述过经典计算机,但没有用到量子论的本质特性,如量子态的叠加性和相干性。多伊奇的图灵机是第一个真正的量子计算机模型,这台图灵机的读写和操作都利用了量子操作来完成,而且它用来保存状态的磁带也不再是经典状态,而是叠加态。它每一步的状态可以既是0又是1,可以同时对所有输入状态进行计算,体现了量子并行性。

美国波士顿大学的托弗里(T. Toffoli)听过费曼的演说,他在20世纪80年代初提出了量子逻辑门的建议。沿着与经典计算机类似的思路,很自然地出现了量子线路模型——由一个量子门和量子线路组成计算机。量子线路模型与量子图灵机一个直观一个抽象,但已经证明它们是等价的(A. Yao, 1993)。

从 1985 年到 1993 年这几年中,因为找不到实际的系统可供进行量子计算实验,量子计算机被看成不可能实现的神话,仅仅在一个小圈子里还在继续着严肃的研究。

直到 1994 年,情况因贝尔实验室的肖尔 (P. Shor) 实现了第一个具体的量子算法而发生突然变化。肖尔把量子并行性和干涉手段用于分解质因数,他的算法将可能破译现行的所有军用和商用密码。

现在使用的 RSA (1977 年发明此加密法的 3 个人的名字的首字母, A 就是提出生物计算机的阿德勒曼) 密码体系,都用到了大质因数。两个大质数的积用于情报编码,只有能把大数分解为质因数的人才能破译密文。

分解质因数是令人绝望的。1977 年,发明 RSA 体系的三个人用 129 位的一个数编了一份情报,悬赏 100 万美元让人破译。1994 年,美国人动用了世界范围内 1600 个工作站,费时 8 个月才把它分解开。破译出的原文很有意思:“神奇的咒语是令人倒胃的。”

破解 RSA - 129 难题的大动作让人敬佩,但按照肖尔算法,分解一个 1000 位的数只要几分之一秒,同样的事情由现在最快的计算机来做也得 10^{25} 年。在量子计算机面前, RSA 保密体系将无密可保。没有哪个政府敢在这样的技术面前无动于衷,量子计算机的研究自然受到鼓励,气氛顿时热烈起来了。

时隔 2 年，同在贝尔实验室的研究人员格罗弗（L. Grover）发现了在未加分类的数据库中搜寻特定信息的量子算法。例如，在 100 万种库存商品中寻找某个商品，经典算法要找 50 万次，成功的几率为 $1/2$ 。而用格罗弗算法，只需要 1000 次（100 万取平方根），成功的几率也是 $1/2$ ，但多重重复操作几次，那么找到所需商品的几率接近于 1。格罗弗把这个在海量信息中进行搜索的算法形象地称为“从稻草堆中寻找一根针”。

肖尔和格罗弗的努力可望把指数时间难题变成多项式时间问题，两者的区别相当于把 2^n 次计算降为 n 次，这就为大量传统上认为不可解的 NP 完全类问题（一个例子是前文提到的推销员问题）带来了希望。当然前提是真正地实现了量子计算机。这里简单介绍一下量子计算机的逻辑门线路模型，对于理解量子计算机会有所帮助。

对照一下经典计算机的逻辑门线路模型可能是有益的。经典计算机有一个基本假定：任何“合理的”计算都可以用布尔逻辑表达，而不管布尔表达多么复杂都可以通过简单的逻辑门（如与门、或门、非门等）的各种组合来实现。结合少量非标准的门操作，通用逻辑门的组合即可实现任意复杂的逻辑运算。量子计算机也是如此，关键是要找到通用的量子逻辑门，实现对输入量子态的演化过程，即所谓的么正变换（一

种特殊的矩阵变换)。量子逻辑门都是可逆的,可以从输出逆推输入,这是与经典计算机的一个根本区别。

1995 年,美国科学家证明,两位的量子控非门(C - NOT,如果第一量子位为 1 就对第二位取非)和一位量子门(非门是其中一个)具有计算上的通用性,可构建任何想要的量子逻辑线路。同年,瓦恩兰(D. Wineland)在实验室用钡原子制成了两位量子控非门。光子对原子的量子态实行初始化,然后再由光子提供量子程序,改变原子内部状态,告诉它进行控非运算。最后,借助光子读出量子比特,再把信息传递给下一个逻辑门。光子和电子的合作在这里已初现端倪。

到此为止,量子计算机不再是理论家头脑中的臆想了,它在实验室里建立了滩头阵地。尽管如此,如何把量子逻辑门连接起来进行通用的量子计算还是一个巨大的实际问题。多伊奇曾说:“即使有足够数量的通用量子门可供使用,迄今为止,仍然没有证明,对于想利用它们进行计算的人有什么用途。因为这些门首先要组装成量子计算网络,才能用于执行需要的计算。”

量子计算机的物理实现已经提出了一些方案,如离子阱、腔量子电动力学(腔 QED)、核磁共振、量子点等等,已实现少数量子位系统,但距离有效量子计算的需求还相差甚远。

除了量子算法、量子逻辑门、物理实现等困难以外,实现

量子计算还有一个严重障碍,即消相干。量子计算机与环境会发生相互作用,引起编码量子态退化成经典态。环境可以描述成电磁辐射场,这种背景辐射无所不在,即使在真空中也存在着这种场的零点起伏,形成对量子计算机的噪声干扰。这个问题不解决,量子计算机仍是一句空话。

和经典计算机一样,保证信息的传送和计算过程绝对不出错是不可能的,明智的方案是出错之后想办法纠正它。在经典计算机中,为了保证信息的正确性,使用了纠错编码来控制。它通过设置附加的数据位,使信息增加一定的冗余度,从而使原来无规律或规律性不强的一组信息具备一定的相关性。根据这一相关性就可以检错或纠正错码。

量子纠错的基本思想与经典纠错类似,但存在一些特殊的困难。经典编码中,为了引入信息冗余,需要将单个位的信息复制到多个位上,但量子力学中,量子态不可复制。经典编码在纠错时需要进行测量,但测量会引起量子态的塌陷,破坏量子相干性。经典编码中的错误只有一种,即 0 和 1 之间的变化,但量子错误的可能态有很多。

所以,直到 1995 年,肖尔和斯迪恩 (Steane)才独立地提出了两个量子纠错编码方案,通过一些巧妙的措施,避开了上述困难。总的原则也是引进冗余,但不是通过态的复制,而是利用量子纠缠,以毒攻毒,以纠缠对付纠缠(环境施加

的),达到抗干扰的目的。

20 世纪 90 年代后半期,量子计算机的理论和实验研究不断取得重大突破,贝内特甚至宣称量子计算机将进入工程时代。2000 年时,IBM 公司研制成功了 5 位的量子计算机,只能做一些简单的计算。乐观如贝内特者也只能说,现在的量子计算机只是一个玩具,真正做到有实用价值也许是 5 年、10 年,甚至是 50 年以后的事。不过,50 年只是一两代人的时间,在掌握如何控制量子系统之后,量子计算机的理想必定会变成现实。

另外,量子计算机的作用不只是能够解决一些经典计算机无法解决的问题,正如 1985 年 IBM 的兰道尔(R. Landauer)所说,不仅仅是物理决定了计算机能做什么,而且计算机能够做什么,反过来也将限定物理定律最终的性质。可见,量子计算的思想对物理学的基础也具有深远的意义。

把太阳装进口袋

有一天,人类将设法把核能释放出来,为人类造福。

—— 爱丁顿

自有史以来,能源就一直是关乎人类生死存亡的一大问题。而几乎每次新能源的利用,都会使人类生活发生巨大的变化,引起技术上乃至社会发展史上的一个飞跃。火的使用,使人类从蒙昧走向文明 煤在工业上的大规模利用,使人类从手工业时代走向了机器时代 电能的利用则是现代文明的开始。

自第一次工业革命(18世纪30年代)以来,特别是20世纪的100年,全世界消耗的能源和资源是以前的100倍。人类既已骑在了能源饕餮的背上,就没有退路了,不得不考虑拿什么来填饱它加速膨胀的胃口。

目前的人类社会,主要靠电能、石油、煤和天然气这几种能源支撑。水资源匮乏已是共识,而按现有水平计算,煤还能用 170 年,石油最多还能使用 70 年,天然气也只能持续开采 50 年左右。总之,大约 200 年之内,石油、煤和天然气资源都有枯竭之虞。

先且不说矿物能源所造成的各种污染和温室效应,关键是在它们枯竭之后,我们用什么煮饭取暖、发动汽车、驱动机器。在短短的 200 年内,人类是否能找到更有效的新能源,来代替矿物能源,甚至推动人类技术史上新的革命。核能寄托了人们的期望。

核能是指由原子核的链式反应所产生的能量。它的释放通常有两种形式,一种是重核的裂变,即一个重原子核(如铀),分裂成两个或多个较轻的原子核,而释放出能量。另一种是轻核的聚变,即两个轻原子核(如氢的同位素氘),聚合成为一个较重的核,而释放出能量。

原子弹利用的是重核裂变,它的和平利用也已有半个世纪了。但地球上铀的储量大约也只够再用 100 年,而且处置放射性废物也是个麻烦。所以,利用裂变能只是一个过渡罢了。

据计算,1kg 核燃料完全裂变释放的热量,相当于 3, 200 吨煤燃烧放出的热量。而热核聚变释放的热量更是核裂变的几倍到十几倍。而且,聚变材料在海水中含量丰富,又无污染之

弊,所以聚变才是人类彻底摆脱能源困扰的希望之星。

人类对核聚变的认识过程,可以说也是深入物质微观结构的探寻过程。真正说来这个历史并不长,开始于 19 世纪末 X 射线、放射性和电子这三个重大的发现。这些发现引起物理研究的热潮,并使人类的思维触角深入到了原子内部世界。

1896 年,法国物理学家贝克勒尔(A. H. Becquerel)受 X 射线的启发发现了人工放射现象 铀元素会放出某种射线使底片感光。两年后,皮埃尔-居里夫妇(Pierre - Curie)发现放射性元素镭和钋(这后面的感人故事估计大家都知道),大大促进了放射性的研究。

同时,著名的卢瑟福(E. Rutherford)也加入进来。卢瑟福极其热爱实验,允许助手和学生们大胆提出设想,但实验时必须一丝不苟,提倡自制和利用最简单的仪器,实验结果必须绝对可靠。他一生都在研究 α 粒子的本质,并利用其巨大的能量与动量作为‘炮弹’去轰击原子和原子核,揭开了原子组成与变化的奥秘。

卢瑟福对核物理学的贡献主要有三:一是发现了铀放射性辐射的不同成分—— α 射线和 β 射线。他的关于元素衰变的理论打破了元素不会改变的传统观念。

第二方面是,他在 1911 年提出了原子的有核结构模型。1908 年,卢瑟福用实验证明了 α 粒子就是氦离子,又通过 α

粒子被物质散射的研究,从理论和实验上无可辩驳地论证了原子的有核结构模型,从而把原子结构的研究引向正确的轨道。因此,他被誉为“原子物理学之父”。

人工核反应的实现是卢瑟福的第三项重大发现。1915年,他的学生马斯登(Marsden)发现用 α 粒子轰击空气时出现一些粒子,它们具有不寻常的长射程,卢瑟福决心利用业余时间搞清楚这些粒子的成分。他花了3年时间,最后于1919证明:这是 α 粒子轰击氮原子之后使之衰变放出了氢原子核。

这一实验的成功引起了一场热烈争论,最后以云室照片证明了卢瑟福的正确而告终。这标志着人类第一次实现了改变化学元素的人工核反应。

在卢瑟福的时代,只知道重原子的裂变,还不知道轻原子可以聚变,但卢瑟福大胆猜测,能量足够大的轻核碰撞后,可能发生聚变反应。

在卢瑟福开创原子物理学,提出核聚变的可能性之后,科学家们把眼光投向了太阳和宇宙中的恒星,开始研究它们巨大而持久能量的来源。

首先是英国化学家、物理学家阿斯顿(F. W. Aston)发明了质谱仪。阿斯顿是卢瑟福领导的卡文迪许实验室的助手,因为他的质谱仪及其对同位素的研究,获得了1922年诺贝尔化学奖。质谱仪可以准确地测定同位素的原子量,为后来核聚

变的主要原料之一——氢的同位素氘的发现,提供了理论依据和研究工具。

在当时,阿斯顿发现了氦-4 质量比组成氦的 4 个氢原子的总质量轻 1% 左右。杰出的英国天体物理学家爱丁顿 (A. S. Eddington) 立刻认识到阿斯顿发现的重要意义。在同年的一次会议上,爱丁顿指出太阳可以通过 4 个氢核聚变成一个氦核而发光。根据爱因斯坦的质能方程 $E = mc^2$, 这个聚变反应可以把 0. 7% 的质量转化成能量,太阳那源源不绝的巨大能量便来源于此。

从此,天文学家们开始了对恒星内部核聚变反应的研究。

1929 年,英国的阿特金森 (R. de Atkinson) 和奥地利的豪特斯曼 (F. G. Houterman) 证明了氢原子聚变为氦的可能性。他们也认为,太阳上进行的就是这种轻核聚变反应。

1938 年,康乃尔大学物理学家贝蒂 (H. A. Bethe), 对恒星内部的核聚变作了进一步的研究。研究结果证明,在恒星中的高温、高压下,氢失去所有的电子只剩下一个氢核,氢核在高温高压下克服了彼此之间的排斥力,聚合成一个氦核,导致质量的损失,产生了巨大的能量,这些能量绝大部分以光子的形式辐射出来。

1kg 氢变成氦时所释放的能量,足以使一只 100 瓦的灯泡长明 100 万年。而就拿离我们最近的恒星——太阳来说,在它

那巨大的核里,每秒钟有 6 亿吨氢变成氦。巨大的核能量朝向恒星外部猛烈冲击,阻止其引力收缩。虽然目前太阳已走完了生命历程的一半,但核聚变反应还能维持太阳的燃烧长达 50 亿年之久。

如果有朝一日太阳‘死亡’,它的内部必将发生另一次核点火。当其内部温度达到 1 亿度以上时,核心的氦元素就会发生核聚变。这时太阳会由一个变成两个,体积将膨胀 100 万倍以上。

太阳那几乎取之不尽、用之不竭的光和热来自于核聚变这一事实,更加鼓舞了人们对核聚变能应用的研究。只要掌握了有效控制核聚变的技术,人类就能获得稳定而巨大的能量来源,把太阳装进自己的口袋,为自己造福。

1931 年,哥伦比亚大学的副教授尤里(H. C. Urey)打破了阿斯顿关于氢元素没有同位素的预言。他把将天然液态氢蒸发浓缩后,发现了氢的同位素。尤里将这个新发现的同位素命名为 Deuterium,简称为 D,它在希腊文中的意思是‘第二’,中文译作‘氘’。

第二年,在卢瑟福的带领下,卡文迪什实验室的考克劳夫特(J. D. Cockcroft)和沃尔顿(E. T. S. Walton)发明了静电加速器。如此一来,人工核聚变的原料和研究工具准备宣告完成。

澳大利亚物理学家奥利芬特(M. Oliphant) 在卢瑟福的支持下,建造了一座低压静电加速器,在这座加速器上用氘-氘反应制取了氦(超重氢),实现了第一个 D-D 核聚变反应。

这一实验的成功,对用核聚变解决能源问题有着重要意义。因为核聚变的原料是海水中的氘。尽管海水里的氘只占 0. 015% ,但由于地球的 70% 都是海洋,可利用的核聚变材料几乎是无限的。这些氘通过核聚变释放的聚变能,可供人类在很高的消费水平下使用 50 亿年。

氢气大约在几千摄氏度开始少量电离,到 10 万度左右就可以成为完全等离子体。由于太阳质量比地球大 33 万倍,它所产生的巨大的引力,可以将太阳上的等离子体约束在一起,从而产生由氢原子聚变为氦的轻核聚变反应。而在地球引力条件下无法实现自然的聚变。

在实验室实现人工核聚变,向我们展示了核聚变能源的美好前景。爱丁顿也早在 1920 年就预言:“有一天,人类将设法把核能释放出来,为人类造福。”然而,人类要想真正达到这一目标,还得克服重重困难。

就拿奥利芬特等人实现的 D-D 反应来说,氘核带正电,发生聚变反应必须克服库仑斥力,使两核接近到核子间距离,即 10^{-15}m ,必须具备 10keV 以上的能量。如果用加速器加速氘核,再使其轰击含氘的固体靶,加速氘核的绝大部分能量将

损失在与电子碰撞的散射之中。由于能量损失巨大，D - D 反应不仅成本高昂，能够利用的能量也极为有限。

虽然有人提出过，可以用两束高能氘核对撞实现聚变。但这种想法很快被证明是行不通的，因为氘核在束中的平均自由程很大，两束氘核几乎是完全透明的。要使对撞发生，氘核束的密度必须很高，然而密度极高的氘核束很难获得。即使成功地制备了这种高密度氘核束，在氘核的互撞中，不可避免的多次库仑散射，将使偏转角很快地累计达到 90° ，而使氘核偏转离开原有的束流散失殆尽。而且在聚变反应进行过程中，等离子体的能量也会通过多种途径不断散失。

要想让热核聚变发生，并且维持持续进行，不仅应保持高温等离子体的能量足够高，还要维持能量平衡，以达到聚变的自持条件。

在这种情况下，人们很自然地想到了无规则的热运动。如果设法将一团氘核约束在一起，并加热使其到达足够的温度，核间频繁地碰撞，就可能有核聚变发生。温度越高，氘核运动的速度也越快。当温度达到 $1 \sim 2$ 亿 $^\circ\text{C}$ 时，氘核运动的速度也就达到每秒 $1000 \sim 2000\text{km}$ 。采用常规的方法，要想加热到如此高的温度是不可想像的，当时的科学家们还没有为此作出完善的理论准备。

20 世纪 40 年代前后，核物理进入一个大发展的阶段。

1939年,哈恩(O. Hahn)发现了核裂变现象。1942年,费米(E. Fermi)建立了第一个链式裂变反应堆,这是人类掌握核能源的开端。

1945年,原子弹研制成功以后,人们找到了在极短时间内产生几亿度高温的方法。1952年,美国用原子弹爆炸产生的高温,第一次实现了大量氘、氚材料的聚变,这就是氢弹。

但是原子弹要有一定的临界质量,才能产生链式反应,而且一旦实现链式反应,就会在极短时间内释放出巨大的能量而爆炸。用这种方法去加热聚变燃料,也只能是一种在极短时间内释放大量的能量的爆炸,不能维持热核聚变的持续进行。

受控核聚变成为了研究的关键所在。二战期间,美国洛斯阿拉莫斯实验室在研制原子弹的同时,也进行了早期核聚变反应的系统研究。二战结束后,英国与前苏联也秘密地开展了受控核聚变研究工作。

而转机就在不久之后到来。1957年,英国的劳孙(J. Lawson)计算了高温聚变等离子体能量平衡关系,提出了受控热核反应实验能量增益的条件。

他的考虑如下:一定密度的等离子体在一定温度下,如果不从外部获得能量,由于各种能量损失,等离子体最终将从高温降到室温。这一过程所维持的时间,称为能量约束时间。如果维持能量平衡,可使聚变堆输出功率,经过热功转变系统,

转变为电能回授给等离子体,用来维持等离子体工作。如果能量的得失相当,聚变堆即可持续工作。

劳孙条件的提出标志着受控热核聚变理论研究的重要进展,它向人们指出了实现受控热核聚变反应的两个基本要求:等离子体的加热和等离子体的约束。

计算表明,要使热核聚变反应能以显著的速率进行,必须要使反应燃料达到1亿度以上的超高温,比太阳内部的1500万度高一个量级。在如此高的温度下,燃料已成为完全电离的稀薄气体——等离子体。

其次,在1亿度温度时,等离子体中的核(或电子)以每秒几千英里的平均速度在各个方向上做无规则运动,在百万分之一秒内所有的粒子都将碰到容器壁,结果它们的动能基本上都损失了,等离子体也很快地被冷却。因此必须想办法约束等离子体,阻止等离子体粒子碰撞器壁。

一个有趣的问题是,即使忽略热功转换中的损耗,劳孙的设想也只是做到能量的收支平衡,那么我们忙活半天为了什么呢?这的确是一个问题,不过路得一步一步走。劳孙条件仍被看做为聚变研究第一阶段的目标,因为只有实现了这一目标,才意味着受控热核聚变在科学上的可行性。

然而劳孙条件在实践上仍然难以实现。概括起来,要实现这个条件应满足两点,那就是极高的温度和充分长的约束时

间。这需要极为严格的材料技术与设备要求,需要科学家们的进一步研究。

在自然界中的等离子体,一般具有天然的约束,否则也不可能保持等离子态了。前已叙及,地球微弱的引力无法对高温等离子体产生约束作用。很自然地,科学家们想到可用磁场代替引力来约束。

磁场对等离子体的作用包括三种,即带电粒子所受磁场的洛伦兹力、磁场对等离子体束的磁应力以及等离子体电流所受磁场的箍缩力。洛伦兹力可以把带电粒子约束在磁力线的周围,磁应力来自磁场的非均匀性,使等离子体整体受到指向内部的作用,从而抵消等离子体的热膨胀,而箍缩力将使等离子体电流束沿径向被箍缩。看来磁约束设想值得一试,关键是要有足够的磁场强度和合适的磁场位形。

目前已经制造并投入使用的磁约束装置,大致可以分为两类:一类是仿星器或者磁镜,另一类是托卡马克(Tokamak)。

美国天文学家、物理学家斯必泽(L. Spitzer)是早期磁约束装置研究中较为成功的一位。长期研究宇宙尘埃在弱磁场下形成新恒星的学术背景对他不无裨益。

1951年4月,斯必泽提出了一种称为“仿星器”(Stellarator)的磁约束装置。在这种仿星器里,等离子体沿8字形绕行一圈,总的漂移被抵消。

斯必泽想用磁场把等离子体约束在一个圆柱形空间里。为了解决等离子体在端点的泄漏,他设想把两端连接成圆环状。然而,励磁线圈产生的环形磁场内侧强,外侧弱,致使正带电粒子向下漂移,电子向上漂移,正负电荷的分离所产生的电场与磁场共同作用的结果,把等离子体向外推,因而不能形成稳定的约束。为了克服正负电粒子的分离,斯必泽巧妙地设想把圆环状空间扭成 8 字,也许效果会好。

他的想法得到了美国原子能委员会的资助,于 1952 年建成一台小型实验用仿星器 Model - A,以后又陆续建成规模更大一些的 Model - B 和 Model - C。

20 世纪 60 年代以后,由于实验结果不甚理想而进展缓慢,美国基本上停止了仿星器的研究。然而英国、原西德、前苏联和日本却坚持了下来,并取得了较好的结果。

和仿星器相比,磁镜属于开端系统。它用中间弱、两端强的磁场位形约束等离子体,具有结构简单、能稳态运行等优点。

提出这一方案的是刚从斯坦福大学获得博士学位的波斯特(S. Post)。1952 年,他从斯坦福大学毕业后,到劳伦斯 - 利弗莫尔辐射实验室从事同步辐射研究。应实验室热核聚变研究课题负责人约克(H. York)的邀请,参与了核聚变研究。

由于波斯特在微波与等离子体方面的知识背景,使他很快

地从地球磁场俘获带电粒子中受到启发。地磁具有中间弱、两端强的磁场位形,被俘获的带电粒子在两极间来回反射,称为磁镜效应。波斯特把这一效应用于解决直线型聚变装置的等离子体泄漏问题,于参加工作的当年,就建成了第一台人工磁镜装置。

一个有待进一步解决的问题是,由于磁力线不闭合而带来的终端损失问题。有人提出终端能量的再循环使用,以及在端头加‘塞子’的堵漏设想。基于这些想法,产生了反向场磁镜、串联磁镜及环键磁镜等新设计。

从发展趋势看,磁镜应该是一种有前途的磁约束装置。它在发展中渐趋完善,已经成为另一类得到广泛应用的磁约束装置——托卡马克的竞争对手。

在二战后,托卡马克被苏联科学家寄予厚望。托卡马克的磁场位形极为巧妙。它的总磁场不是圆环形的,而是由一个沿大环形的圆形磁场与一个沿圆环截面的小环形弱磁场叠加而成,这种合成场的磁力线既沿大圆环旋转,又沿小圆环缓慢旋转而形成螺旋线。在这种具有旋转变换的磁场中,正离子绕行一周后,进入到电子漂移前的位置,而电子绕行一周后,进入到离子漂移前的位置。由于正负粒子互换,并不破坏原有的电中性,因而不向外侧漂移。

这种巧妙的磁场位形,使托卡马克克服了一般环形磁场使

带电粒子漂移,致使正负电荷分离而产生电场,破坏稳定约束的缺点。

在托卡马克的研究和制造的过程中,有两位科学家做出了重要贡献。一是前苏联著名物理学家塔姆(I. Tamm),他早在20世纪50年代初,就曾提出用环形强磁场约束高温等离子体的设想。塔姆毕业于莫斯科大学,曾经因为成功地解释了切伦科夫辐射现象,与另一位前苏联物理学家弗兰克(I. Frank)共获1958年诺贝尔物理学奖。第二次世界大战后,他转向了受控热核聚变研究。他认为,把强电流产生的极向磁场与环形磁场相结合,可望实现高温等离子体的磁约束。

莫斯科库尔恰托夫研究所的前苏联物理学家阿奇莫维奇(L. Artisimovich)在塔姆的启发下,开始了这一装置的研究。

最初,他们在环形陶瓷真空室外套多匝线圈,利用电容器放电使真空室形成环形磁场。与此同时,用变压器放电,使等离子体电流产生极向磁场。后来,经过逐步改进,以阿奇莫维奇为首的科学家们利用不锈钢真空室代替陶瓷真空室,又改进了线圈的工艺,增加了匝数,改进了磁场位形,最后成功地建成了一个高温等离子体磁约束装置。阿奇莫维奇将这一形如面包圈的环形容器命名为托卡马克,是俄文环流磁真空室的缩写。

具有奇特旋转磁场位形的托卡马克的出现,使托卡马克明

显优于其他同类设施,让受控核聚变研究取得了重大的进展。20 世纪 60 年代末,前苏联的 T-3 和 TM-3 托卡马克的等离子性能明显地优于其他环形装置。电子温度达到 1keV,离子温度 0.5keV,等离子体约束时间达到了‘玻姆扩散时间’的 50 倍。这一神速进展在 1968 年召开的第三届等离子体和受控热核聚变研究国际会议上一公布,立刻引起轰动。

1969 年,英国卡拉姆实验室主任皮斯(R. S. Pease)带领等离子体专家小组,对上述结果做了实地验证核实,证明准确无误后,引起了极大的反响。因为这一进展表明,人类不久即可在托卡马克装置上实现受控核聚变。

由于阿齐莫维奇首创的托卡马克装置对国际核聚变研究发展中所做出的杰出贡献,在他逝世后,国际原子能委员会做出决定,在每年度等离子体物理和受控热核聚变研究国际学术会议上,将有一篇专题报告,纪念阿齐莫维奇的功绩。

自 20 世纪 70 年代伊始,世界范围内掀起了托卡马克的研究热潮。美国普林斯顿大学实验室将仿星器 Model-C 改装成 ST 托卡马克;橡树岭实验室则建成了奥尔马克(Ormark);法国冯克奈—奥—罗兹研究所建成了克利奥(Cleo);日本原子能研究所建立了 JFT-11 托卡马克;德国的普朗克研究所建立了普尔萨特托卡马克。

几年以后中国科学院物理所也开始了托卡马克的研究,第

一台小型托卡马克 CT-6 于 1975 年投入运行。1984 年 6 月，又建成了目前国内最大的托卡马克装置——中国环流 1 号 (HL1)。它们为中国的核聚变研究做出了许多开创性的贡献，在其上所取得的实验成果，都已经达到国际同类装置等离子物理品质参数水平。

目前全世界有 30 多个国家及地区开展了核聚变研究，运行的托卡马克装置至少有几个。但尽管目前托卡马克技术最成熟，进展也最快，也有聚变专家认为，它的磁场会出现大破裂，为建立磁约束而消耗的能量利用率低，聚变反应室内的功率密度不高，而且环形对于检修不便，不能连续运行。因此在实现点火以后，可能会被近几年迅速发展起来的其他磁场形状的磁约束装置所取代。

磁约束方式虽然是目前最为流行的等离子体约束方式，但既存在各样的宏观不稳定性，又存在有各种微观不稳定性，它们都可能使约束受到破坏。因此在磁约束方式之外，为了进一步探索受控核聚变反应的可行性，科学家们也试图寻找更稳定的约束方式。

20 世纪 50 年代初，就有人从爆炸中受到启发，寻找到了—种通过惯性进行约束的方式。因为在氢弹爆炸中，氢的加热是由 ^{235}U 裂变炸弹爆炸完成的。由于自身的惯性，在爆炸的极短瞬间，等离子体来不及四外扩散，就被加热到极高温而

发生聚变反应。

在激光出现之后,惯性约束方式发展很快,1963年,前苏联的巴索夫(N. Basov)与中国物理学家王淦昌分别提出了激光核聚变方案。利用激光打在燃料靶上,使靶材料形成等离子体,由于自身惯性发生聚变反应。但限于技术条件,当时并没有采用这种方案。

由于激光器与聚变堆是分开的,惯性约束反应堆将比磁约束聚变堆简单得多。惯性约束的原理虽然简单,实现受控热核聚变却尚需克服一系列难题。首先便是有足够强的激光器。根据劳孙判据,要在极短时间(10^{-10}s)内,把直径1mm的氘氚燃料靶加热到热核反应温度,激光器的能量应达到 10^9J ,这几乎是不可能的。

1972年,美国的尼科尔斯、华能等人又提出了一种“向心聚爆方案”。在核爆炸前,通过向心聚爆,把靶丸压缩到高密度。密度升高,可以相应降低热核反应温度,从而减小激光器的能量。当聚爆的瞬时高压达到 10^{17} 帕斯卡时,利用驱动器使靶丸吸收激光或粒子束的能量,靶丸表面融蚀,向外喷射形成超高强的向内压力。为达到这一目的,来自驱动器的激光或粒子束波形和靶丸的结构要匹配得当。这对驱动器和靶丸的要求都很严格。

向心聚爆原理的提出,给激光核聚变研究带来了活力。目

前,惯性约束已与磁约束一起,成为受控热核聚变研究的两大平行发展的途径。

惯性聚变研究可以用于军事目的。由于用惯性约束聚变模拟真实热核爆炸,可以在实验室获得数据资料,免去实弹实验的巨额耗资,一些拥有核武器的国家也在积极进行此项研究。

目前,日本和美国在该项科技上已经走在了世界最先进的行列,无论从经济上还是从军事上,这都是我们值得注意的。

虽然可控核聚变近年来发展迅速,但劳孙条件提出的两大课题,仍然有待解决。

首先是要探索新的加热方式与机制。

为实现聚变点火,必须把等离子体加热到一定高温以上,如何加热等离子体,一直是核聚变研究的重要课题。一般来说,最基本、最普遍的是欧姆加热法。

根据欧姆定律,随着温度的升高,热功率密度将明显地下降,在较高温度时,欧姆加热效果明显变差。

当然为提高欧姆加热的效率,可以增大电流密度或提高等离子体的电阻率。然而,增加电流密度势必造成工程上的困难。而且对于托卡马克装置,等离子体中的电流值不能超过某一极限。由此看来,在一般情况下,欧姆加热可以作为等离子体的第一步加热法。但要想进一步提高等离子体的温度,还必须寻找其他途径。

中性粒子注入是目前较成功的一种等离子体加热法。磁场可以约束带电粒子,高能中性粒子却能畅通无阻地进入等离子体。它们与带电粒子作用后,变为高能离子,从而被磁场约束在等离子体中。这些高能离子再与原有等离子体粒子碰撞,把能量转移给等离子体,使其温度升高。创造离子温度世界纪录的美国大型 TFTR 托卡马克就是采用这种方法加热的。

但实践证明,中性束流的功率不能太大,当其能量超过 150keV 时,中性注入的效率会急剧下降。然而,聚变反应堆所要求的能量是 300keV 左右。此外,中性注入加热所需的设备庞大,结构复杂、造价高昂,也影响了它的普及。

目前,科学家们正探索射频波加热法,如电子回旋共振加热、离子回旋共振加热和 α 波加热等。除了相关技术研究外,加热的共振特性,加热过程的能量转换及吸收机制与加热效率等一系列理论研究也在相应深入进行着。

其次,需要改善等离子体的约束性能。

热核反应中,高能中性粒子的注入提高了等离子体的离子温度,却随着温度的提高,约束性能也变坏。

产生不稳定性出现的原因是注入高能的中性粒子被电离后,所形成的高能离子的速度并不单一,这些高能离子使等离子体的速度分布受到影响,在速度较大处又出现一个峰值而形成双峰分布。如果等离子体中存在有波,其相速度恰在升起峰

值的上升区域,由于朗道增长,波的幅度也随之加大,从而使稳定性破坏。

这种情况并非不能改善,当加热功率超过一定阈值时,或者满足一定条件时,随着中性粒子注入功率的增加,等离子体的约束性能反倒有所改善,这两者分别称为“L模约束特性”和“H模约束特性”。进入20世纪90年代,中国环流1号(HL-1)托卡马克装置,利用加偏压电极实现了H模运行。研究人员同时外加径向电场对H-L转换及转换中等离子体的性质及变化过程进行了系统的研究,这一工作是我国核聚变研究的重要成果。

除了这两大问题外,关于反常输运与涨落现象的研究也是热点之一。磁约束下的等离子体是一种准稳态力学平衡系统,它的状态变化以及所引起的耗散效应,甚至迅速变化过程,如波动、不稳定性或激波都主要由其输运过程决定,因此,研究输运过程对等离子体研究有十分重要的意义。

另外,最近在核聚变领域还掀起了冷聚变研究的热潮,但由于冷聚变研究到现在为止还没有能在研究领域取得一致,也没有突破性的进展,在此略过不提。

早在1973年,阿齐莫维奇院士就说过,当在人类非常需要热核聚变时,它必将会被人们所掌握,这样的时刻就要到来。到现在,30年时间已经过去了,悲观的人有理由觉得沮

丧,但是某事‘不可能’的说法最终多半被证明是愚蠢的。

我们相信,科学家对可控核聚变的研究,很可能在 21 世纪后半期发生突破,实现对高温等离子体的有效约束和对热核聚变的大规模运用,把核聚变的‘太阳’装进‘口袋’。这将彻底解决人类迫在眉睫的能源危机,为人类带来美好的明天。

Internet 史话

大概没有人能够真正说清楚将来 Internet 能够给我们带来什么。不过,根据我们人类的一般观念和 Internet 过去的发展历史,我们有理由认为未来的 Internet 将会更加精彩、有用。

自40 年代第一台计算机问世以来,计算机技术的发展已走过了半个世纪的历程,而 Internet 的建立和发展使计算机技术这项 20 世纪最为卓越的科技成就在 90 年代又一次达到高潮,以网络为中心的信息处理时代终于来到了。

Internet 是人类历史发展中的一个伟大的里程碑,它是未来信息高速公路的雏形,人类正由此进入一个前所未有的信息化社会。人们用各种名称来称呼 Internet ,如国际互联网络、因特网、交互网络、网际网等等,它正在向全世界各大洲延伸

和扩散,不断增添吸收新的网络成员,已经成为世界上覆盖面最广、规模最大、信息资源最丰富的计算机信息网络。

Internet 起源于美国的 ARPANET 计划,其目的是建立分布式的、存活力强的全国性信息网络。ARPANET 基于分组交换的概念,在网络建设和应用发展的过程中,逐步产生了 TCP/IP 这一广泛应用的网络标准。以 ARPANET 作为主干网的 Internet 产生于 1983 年,随着 TCP/IP 协议被人们广泛接受,越来越多的计算机连接到 Internet 上。目前,Internet 已经成为全世界最大的计算机互连网。

从某种意义上,Internet 可以说是美苏冷战的产物。这样一个庞大的网络,它的由来,可以追溯到 1962 年。

翻开美国人写的关于互联网发展历史的书,或者从互联网上查找这方面的资料,都少不了提起 1957 年 10 月 4 日苏联发射的第一颗人造地球卫星:“Sputnik I”。这颗卫星重约 80 公斤,差不多每天都要在美国人的头顶上飞过一次。喜欢‘恶作剧’的苏联人似乎觉得这一颗卫星还不过瘾,仅仅在一个月之内,1957 年 11 月 3 日,第二颗人造地球卫星‘Sputnik II’又上天了。这颗重达 500 公斤的卫星,甚至还带了一只活狗进入太空做实验。

敏感的美国人把苏联的卫星看作是对自己技术落后的严重

警告,当然要急起直追。1958年1月31日,他们终于把‘山药蛋’给抛了上去。然而,与美国普通百姓听到的卫星上天的‘喜讯’不同,技术专家们都非常清楚,这颗象征意义远远大于实际意义的人造地球卫星“Explorer I”,的确只是一个“山药蛋”比起苏联此前发射的卫星,美国的‘Explorer I’实在是小得可怜。这颗卫星只有8公斤,其重量也许还不如苏联第二颗卫星中携带的狗!

美国军队的通信网络也令人担忧。尽管这些网络按照当时的标准是高水平的,但是,这种由中央控制的网络从一开始就先天不足,稍有常识的人都会想到,只要摧毁这种网络的中心控制,就可以摧毁整个网络。因此,在这个意义上,军队通信联络的网络化程度越高,受到破坏的可能性也就越大。更何况这种网络在原子弹面前是如此脆弱,很可能用一颗原子弹就可以切断整个美国军队的联系。

美国军队的威信和权威,甚至自信心,一下子降到了最低点。

1962年,美国国防部为了保证美国本土防卫力量和海外防御武装在受到苏联第一次核打击以后仍然具有一定的生存和反击能力,认为有必要设计出一种分散的指挥系统,它由一个个分散的指挥点组成,当部分指挥点被摧毁后,其它点仍能正常工作,并且这些点之间,能够绕过那些已被摧毁的指挥点而

继续保持联系。为了对这一构思进行验证,1969年,美国国防部国防高级研究计划署(DOD/DARPA)资助建立了一个名为 ARPANET(即“阿帕网”)的网络,这个网络把位于洛杉矶的加利福尼亚大学、位于圣芭芭拉的加利福尼亚大学、斯坦福大学,以及位于盐湖城的犹它州州立大学的计算机主机联接起来,位于各个结点的大型计算机采用分组交换技术,通过专门的通信交换机(IMP)和专门的通信线路相互连接。这个阿帕网就是 Internet 最早的雏形。

到1972年时,ARPANET 网上的网点数已经达到40个,这40个网点彼此之间可以发送小文本文件(当时称这种文件为电子邮件,也就是我们现在的 E-mail)和利用文件传输协议发送大文本文件,包括数据文件(即现在 Internet 中的 FTP),同时也发现了通过把一台电脑模拟成另一台远程电脑的一个终端而使用远程电脑上的资源的方法,这种方法被称为 Telnet。由此可看到,E-mail,FTP 和 Telnet 是 Internet 上较早出现的重要工具,特别是 E-mail 仍然是目前 Internet 上最主要的应用。

1972年,全世界电脑业和通讯业的专家学者在美国华盛顿举行了第一届国际计算机通信会议,就在不同的计算机网络之间进行通信达成协议,会议决定成立 Internet 工作组,负责

建立一种能保证计算机之间进行通信的标准规范(即“通信协议”),而这个组织第一位主席美国人文顿·瑟夫(Vinton G. Cerf)则被不少人称为“互联网之父”;1973年,美国国防部也开始研究如何实现各种不同网络之间的互联问题。

至1974年,IP(Internet Protocol, Internet 协议)和TCP(Transport Control Protocol, 传输控制协议)问世,合称TCP/IP协议。这两个协议定义了一种在电脑网络间传送报文(文件或命令)的方法。随后,美国国防部决定向全世界无条件地免费提供TCP/IP,即向全世界公布解决电脑网络之间通信的核心技术,TCP/IP协议核心技术的公开最终导致了Internet的大发展。

可以说,没有TCP/IP,计算机联网、全球信息共享将只能是一个浪漫的幻想。TCP/IP协议以其独具的跨平台特性为全球信息化时代的到来架起了桥梁。

其实在TCP/IP之前,还有一个协议在历史上发挥了作用,这就是ARPA网最初使用的NCP(Network Control Protocol,网络控制协议)。文顿·瑟夫参加过这个协议的设计,并了解它的种种缺陷。因此,他和他的合作者对原有协议加以完善,形成了现有的TCP/IP协议。

到了1977年,美国国防计划署组织了第一次三个网络之间的互连。经过9.4万英里的传输,竟然没有丢失一个数据

位！TCP/IP 协议的优越性顿时体现出来。

到 1980 年,世界上既有使用 TCP/IP 协议的美国军方的 ARPA 网,也有很多使用其它通信协议的各种网络。为了将这些网络连接起来,文顿·瑟夫提出一个想法 在每个网络内部各自使用自己的通讯协议,在和其它网络通信时使用 TCP/IP 协议。这个设想最终导致了 Internet 的诞生,并确立了 TCP/IP 协议在网络互联方面不可动摇的地位。

1983 年的 1 月 1 日,被称为是 Internet 发展史上的一个“纪念日”(flag-day)。因为,从这一天起,NCP 被永久性地停止使用。从此以后,在 Internet 上的所有计算机之间有着共同的协议,这些计算机的连接必须遵守同样的规则,这个协议或者说规则就是 TCP/IP。

1997 年,美国授予当年发明和定义 TCP/IP 协议的文顿·瑟夫和卡恩(Robert E. Kahn)“国家技术金奖”,无疑是对 Internet 的发展和作为 Internet 基础的 TCP/IP 协议的最佳褒奖。

70 年代末到 80 年代初,可以说是网络的战国时代,各种各样的网络应运而生。

八十年代初,DARPANET 取得了巨大成功,但没有获得美国联邦机构合同的学校仍不能使用。为解决这一问题,美国国家大学基金会(NSF)开始着手建立提供给各大学计算机系

使用的计算机科学网(CSNet)。CSNet是在其他基础网络之上加统一的协议层,形成逻辑上的网络,它使用其他网络提供的通信能力,在用户观点下也是一个独立的网络。CSNet采用集中控制方式,所有信息交换都经过 CSNet - Relay (一台中继计算机)进行。

1982年,美国北卡罗莱纳州立大学的斯蒂文·贝拉文(Steve Bellovin)创立了著名的集电极通信网络—网络新闻组(Usenet),它允许该网络中任何用户把信息(消息或文章)发送给网上的其他用户,大家可以在网络上就自己所关心的问题和其他人进行讨论;1983年在纽约城市大学也出现了一个以讨论问题为目的的网络——BITNet,在这个网络中,不同的话题被分为不同的组,用户可以根据自己的需求,通过电脑订阅,这个网络后来被称之为 Mailing List (电子邮件群);1983年,在美国旧金山还诞生了另一个网络 FidoNet (费多网或 Fido BBS) 即公告牌系统。它的优点在于用户只要有一部电脑、一个调制解调器和一根电话线就可以互相发送电子邮件并讨论问题,这就是后来的 Internet BBS。

以上这些网络都相继并入 Internet 而成为它的一个组成部分,因而 Internet 成为全世界各种网络的大集合。

当初的 ARPANET 是在美国国防高级研究计划处的资助和

指导下建立起来的。它的本意当然是要为美国军队打仗服务。然而。在运行 ARPANET 的过程中。人们越来越清楚地看到。ARPANET 的真正功能还是为电脑科学家服务。而不是为美国军队打仗服务。

并且尽管互联网起因于军队的资助。尽管军队的特性就是封闭和保密。然而由于互联网一直是在大学的校园里培养起来的。美国大学校园的开放性的风格对互联网产生了直接的影响。使它从一开始就不那么象是一个军队的网络。

因此美国国防部于 1990 年正式取消 ARPANET。可以说终于让互联网回到了本来应有的位置上。接替 DARPA 管理互联网的是美国国家科学基金会。它成立于 1950 年。是隶属美国政府的一个独立机构。

其实在此之前。互联网就开始了‘军转民’同时也包括“学转商”的步伐。

因为当时随着用户的增加。互联网已经很难继续作为一种接受资助的免费服务而继续存在下去。而由于互联网技术的成熟和用户的增加。商业化趋势也越来越明显。

从 80 年代初。就有几十个小的软件商把 TCP/IP 协议加在他们到软件中。因为他们的客户需要有能够接入互联网的功能。但是。这些小的软件商并不真正了解 TCP/IP 协议的工作原理和细节。因此编出来的软件也难免问题重重。有的只是把

他们自己的网络功能加了上去。

为了解决这一问题,1985年丹·林奇(Dan Lynch)组织了为期三天的讲习班。给所有需要提供 TCP/IP 协议的软件商讲解 TCP/IP 的工作原理。结果,参加讲习班的人大约有 250 多人。而讲解这些原理的人也有 50 来人,这些人大多数正是那些发明 TCP/IP 协议,并且每天都要使用这些协议工作的人。

讲习班的效果之好完全超出了组织者的预料。一方面,听讲的人大多数来自商界,他们不仅学到了有关 TCP/IP 的知识,而且也学到了学术界与商界完全不同的开放风格——这些学者毫无保留地把 TCP/IP 的工作方式,甚至存在的问题都详细地讲了出来。而另一方面,讲解的人也收获不小。因为他们不仅传授了知识,而且从使用者那里了解到了一些问题有的问题是他们一直没有想到过的。

这种使双方都受益的互相交流到后来也一直没有中断。

在这样的交流中,软件商们逐渐成熟起来。又经过 2 年多制定 TCP/IP 的人和软件商在一起召开数次会议、讲习和交流,已经有不少软件商能够提供很好的符合 TCP/IP 的软件。

1988 年 9 月,这些软件商被邀请参加为期 3 天的大会,来演示他们的 TCP/IP 软件。这是第一次互联网软件的演示、交易会。有 50 个公司以及来自可能的用户的 5 千多名软件工

程师参加。这种演示会的形式也一直保留了下来。现在,每年都要在全球的 7 个城市召开演示会,听众达 25 万人。通过这样的演示会,大家可以了解互联网最新动态,探讨今后的发展进程。

1995 年 4 月,美国国家科学基金会正式完成了互联网的私有化工作,不再为互联网的主干网提供资金。从 1986 年建立科学基金网到 1995 年完成私有化,美国国家科学基金会一共为互联网提供了 2 亿美元的资金。这时,整个美国联入互联网的网站一共有大约 2 万 9 千个。而全世界联入互联网的网站则超过了 5 万个。

自从 80 年代出现个人电脑以来,信息技术迈着快捷而又坚定的步伐迅速走进个人家庭。从 1988 年起,尽管互联网的数据传送速度还很慢,尽管大量用户还是通过几乎是难以忍受的电话线拨号联入互联网,迫不及待的人们已经开始涌入这个新的领域。毕竟,通过互联网可以很方便地和亲友通信,可以获取大量的信息——虽然,在此之前还需要学一些小的技巧。

这一切,从 1993 年开始突然发生了更加惊人的变化。从那以后,通过互联网所看到的不再仅仅是文字,互联网开始有了图片,现在又开始有了声音和动画,甚至有了小电影。

使用互联网也不必事先学习那些枯燥乏味的电脑命令和术

语,甚至可以根本不懂电脑,可以不熟悉如何用键盘打字,只要用一只手来操纵一个小小的鼠标,在非常直观的图标上点几下就能把丰富多彩的世界展现在眼前。

世界真的变得更加美丽了。而把我们带入这个美丽世界的,就是万维网。

万维网(World Wide Web)即 Web、WWW ,是 Internet 提供的一种信息检索服务手段。它的设计者是位于瑞士的“欧洲高能物理实验室”的软件工程师蒂姆·伯纳斯-李。

蒂姆·伯纳斯-李是一位富于想象力的研究人员。当时他想设计一个软件在实验室成员的文件之间建立一种非常容易掌握的联系方式。当某个人需要了解另一个人的工作时,他甚至不必把对方的文件拷贝到自己的电脑上,而只要‘链接’到对方的电脑上就行。而且,每一个人也都可以不同的地方建立自己的网页,然后把这些网页‘链接’起来。因此,这种“链接”与传统电脑的文件系统的最大区别在于,在传统的文件系统中,参考不同的文件是通过完整地拷贝这些文件到自己的电脑上来实现的,而这种‘链接’方式却不需要拷贝。

这种方式也就是现在的环球网上使用最为普遍的‘超文本’(Hypertext)方式。超文本并不是一种新东西,早就有人试验过在一台计算机上用其链接文件,但是在 Internet 浩繁的文档中,这种方法显出了全新的意义。

1989 年,伯纳斯 - 李完善了 Internet 上一种新的图形屏幕文件的设计方法,称为超文本标记语言(HTML),使用它能轻松地将一个文件中的文字或图形连到其他的文件中去。只要用鼠标在第一个文件中点取其中一段或一个图标,Internet 即可为用户取来相关的文件,并显示在屏幕上。

1991 年,当伯纳斯 - 李把他的万维网首次在 Internet 上露面时,立即引起轰动并大获成功。正如伯纳斯 - 李所说,万维网的最大贡献在于使互联网真正成了交互式的。人们可以访问网站,可以给网站增加内容,可以编辑网站上的内容,甚至可以对网站发表自己的意见。

交互式网络的出现,强有力地推动了 Internet 走向商界的速度,并提升了它的知名度。从此,Internet 向全世界迅速蔓延,成为信息时代的新宠儿。

近几年来,信息高速公路成为一个全球性的热门话题。这股从美国刮起的革命风暴以迅猛之势席卷全球。美国用“信息高速公路”的口号,以史无前例的规模唤醒了美国工业。美国的经济发展趋势表明,90 年代乃至到 21 世纪的前十年,仍将是美国经济发展更加美好的 20 年。而这令世界经济学家颇感困惑,究竟“信息高速公路”是何方神圣,有着如此的魔力,令美国经济变得如此生机勃勃呢?现在,让我们掀起它

的神秘面纱看个清楚。

1993年,也就是克林顿入主白宫的第一年,克林顿政府提出了建设国家信息基础设施(NII)的报告,目标是建设美国的“信息高速公路”;并成立了由副总统戈尔领导的国家信息基础设施顾问委员会。

何谓信息高速公路 把家庭和企业里的多媒体与全国范围的企业、商店、银行、学校、医院、图书馆、电脑数据库、新闻机构、娱乐场所、电视台、政府部门中的多媒体联结起来,形成互相交叉的网络,这个网络就是信息高速公路。

那么,信息高速公路与现在的 Internet 有什么不同呢?

可以说,Internet 是未来信息高速公路的雏形,信息高速公路是 Internet 发展的必然结局。从目前来讲,Internet 还远远不能满足未来信息时代的要求,它本身诸多问题如带宽有限、保密性不够、服务费用过高等都需要解决。国家信息基础设施计划就是要发展新一代网络,对电信计算机软硬件等基础设施进行全面建设,进而建成信息高速公路。

美国信息高速公路的核心内容主要由以下几个部分组成:建设一个覆盖全美国的宽带高速信息网 信息资源的开发和利用 以微电子技术为基础的信息设备的开发与制造 电信与信息软件、应用软件和各类技术标准的研究开发 培养和造就大量的信息人才。这五部分的工作将通过政府的支持和协调

形成一个有机的整体。

在美国建设信息高速公路的计划出台后,西欧各国、日本、新加坡、加拿大、韩国、台湾地区争先恐后地制定了自己的信息高速公路计划,赶乘这趟信息快车。

信息高速公路将使人类社会中的“地球村”变成现实。人类社会生活的方方面面无不涉及到信息技术,它改变了人类社会的工作、生活观念,信息技术的发展正使这幅图画越来越绚丽多彩。

Internet 的迅速崛起,引起了全世界的瞩目,我国也非常重视信息基础设施的建设,注重与 Internet 的连接。目前,已经建成和正在建设的信息网络,对我国科技、经济、社会的发展以及与国际社会的信息交流产生着深远的影响。

早在 1987 年中国科学院高能物理研究所(简称高能所)首先通过低速的 X. 25 租用线实现了国际远程连网,并于 1988 年实现了与欧洲及北美洲地区的 E-mail 通信。1993 年 3 月经电信部门的大力配合,开通了由北京高能所到美国斯坦福大学(Stanford)直线加速器中心的高速计算机通信专线。1994 年 5 月高能所的计算机正式进入了 Internet(后来发展为中国科学技术网络(CSTNET))。与此同时,以清华大学作为物理中心的中国教育与科研计算机网(CERNET)正式立项,

并于 1994 年 6 月正式连通 Internet。1994 年 9 月,中国电信部门开始进入 Internet , 中国公用计算机互联网(CHINANET) 正式诞生。及后, 原电子工业部系统的中国金桥信息网 (CHINAGBN) 也开通。随着中国 Internet 四大主力的崛起, 以及政府部门制定 " 三金 " 工程, 在中国, Internet 越来越成为人们科研工作甚至是日常生活中重要的一部分。

1987 年至 1993 年是 Internet 在中国的起步阶段, 国内的科技工作者开始接触 Internet 资源。在此期间, 以中科院高能物理所为首的一批科研院所与国外机构合作开展一些与 Internet 联网的科研课题, 通过拨号方式使用 Internet 的 E - mail 电子邮件系统, 并为国内一些重点院校和科研机构提供国际 Internet 电子邮件服务。

1986 年, 由北京计算机应用技术研究所(即当时的国家机械委计算机应用技术研究所)和德国卡尔斯鲁厄大学合作, 启动了名为 CANET (Chinese Academic Network) 的国际互联网项目。

1987 年 9 月, 在北京计算机应用技术研究所内正式建成我国第一个 Internet 电子邮件节点, 通过拨号 X. 25 线路, 连通了 Internet 的电子邮件系统。随后, 在国家科委的支持下, CANET 开始向我国的科研、学术、教育界提供 Internet 电子邮

件服务。

1989 年,中国科学院高能物理所通过其国际合作伙伴 - 美国斯坦福加速器中心主机的转换,实现了国际电子邮件的转发。由于有了专线,通信能力大大提高,费用降低,促进了互联网在国内的应用和传播。

1990 年,由电子部十五所、中国科学院、上海复旦大学、上海交通大学等单位 and 德国 GMD 合作,实施了基于 X. 400 的 MHS 系统 CRN (Chinese Research Network) 项目,通过拨号 X. 25 线路,连通了 Internet 电子邮件系统 清华大学校园网 TUNET 也和加拿大 UBC 合作,实现了基于 X. 400 的国际 MHS 系统。因而,国内科技教育工作者可以通过公用电话网或公用分组交换网,使用 Internet 的电子邮件服务。

1990 年 10 月,中国正式向国际互联网信息中心(InterNIC) 登记注册了最高域名“CN”,从而开通了使用自己域名的 Internet 电子邮件。继 CANET 之后,国内其他一些大学和研究所也相继开通了 Internet 电子邮件连结。

从 1994 年开始至今,中国实现了和 Internet 的 TCP/IP 连接,从而逐步开通了 Internet 的全功能服务,大型计算机网络项目正式启动,Internet 在我国进入飞速发展时期。目前经国家批准,国内可直接连接 Internet 的网络有 6 个,即中国科学

院主管的中国科学技术网(CSTNET)、中国教育部主管的中国教育科研网(CERNET)、中国电信主管的中国公用计算机互联网(CHINANET ,它也是目前拥有最多带宽的网络)、中国吉通公司主管的中国金桥信息网(CHINAGBN)、中国联通公司主管的 UNINET和中国网通公司主管的正在建设的中国网。授权网输入出口分设在北京、上海和广州,某种意义上充当着“信息海关”的作用,对来往信息进行监管、过滤。

其中,中国科学技术网、中国教育科研网、中国公用计算机互联网、中国金桥信息网资历较老,基础雄厚,被称为中国 Internet 的四大骨干网。

中国科学技术网络(CSTNET)

中国科学院系统的 CSTNET 目前有两个网络国际出口,一个主要为高能物理所所内科研服务,不对外经营;另一个是 1994 年 5 月与 Internet 连接的中国国家计算机与网络设施 NCFC (The National Computing and Networking Facility of China)。NCFC 经历了几个不同的工程发展阶段即: NCFC、CAS-NET 和 CSTNET。

始建于 1990 年的中国国家计算机与网络设施 (NCFC) 是由世界银行贷款的“重点学科发展项目”中的一个高技术信息基础设施项目,由国家计委、国家科委、中国科学院、国家自然科学基金会、国家教委配套投资和支持建设。该项目由

中国科学院主持,联合北京大学、清华大学共同实施。1991年6月,中国科学院高能物理所取得 Decnet 协议,直接连入了美国斯坦福大学的斯坦福线性加速器中心;1994年4月正式开通与 Internet 的专线连接;1994年5月21日完成我国最高域名 CN 主服务器的设置,实现与 Internet 的 TCP/IP 连接,从而可向 NCFC 的各成员组织提供 Internet 的全功能服务。

CASNET 是中科院的全国性网络建设工程,分为两大部分:一部分为分院区域网络工程,另一部分为广域网工程。随着 NCFC 的成功建设,中国科学院系统全国联网计划 - “百所联网”项目于 1994年5月开始进行,并于 1995年12月基本完成。该项目实现了国内各学术机构的计算机网络互联,并接通 Internet。

CSTNET 是以中国科学院的 NCFC 及 CASNET 为基础,连接了中科院以外的一批中国科技单位而构成的网络。目前接入 CSTNET 的单位有农业、林业、医学、电力、地震、气象、铁道、电子、航空航天、环境保护等近 20 个科研单位及国家自然科学基金委、国家专利局等科技管理部门。

中国教育和科研计算机网(CERNET)

中国教育科研计算机网络 CERNET (China Education and Research Network) 于 1994 年启动,由国家计委投资、国家教委主持建设。CERNET 的目标是建设一个全国性的教育科研基

基础设施,利用先进实用的计算机技术和网络通信技术,把全国大部分高等院校和有条件的中学连接起来,改善教育环境,提供资源共享,推动我国教育和科研事业的发展。该项目由清华大学、北京大学等 10 所高等学校承担建设,网络总控中心设在清华大学。

CERNET 包括全国主干网、地区网和校园网三级层次结构。CERNET 网管中心负责主干网的规划、实施、管理和运行。地区网络中心分别设在北京、上海、南京、西安、广州、武汉、成都等高等学校集中地区,这些地区网络中心作为主干网的节点负责为该地区的校园网提供接入服务。整个工作分两期进行。首期工程(1994 - 1995 年)着重于各级网络中心的建设、主干网的建设和国际通道的建立, CERNET 计划建立三条国际专线和 Internet 相连,1995 年底已开通了连接美国的 128KB/s 国际专线和全国主干网(共 11 条 64KB/s DDN 的专线),目前已有 100 多所高校实现与 CERNET 的联网。第二期工程(1996 - 2000 年),全国大部分高等院校入网,而且将有数千所中学、小学加入到 CERNET 中。同时,将提高主干网的传输速率,并采用各种最新技术为全国教育科研部门提供更丰富的网络资源和信息服务。

中国公用计算机互联网(CHINANET)

原邮电部系统的中国公用计算机互联网(CHINANET) 于

1994 年开始建设,首先在北京和上海建立国际节点,完成与国际互联网和国内公用数据网的互联。它是目前国内覆盖面最广,向社会公众开放,并提供互联网接人和信息服务的互联网。

1994 年 8 月,原邮电部与美国 Sprint 公司签订协议,通过 Sprint 出口接通 Internet。1995 年 2 月,CHINANET 开通了北京、上海两个出口,3 月北京节点向社会推出免费试用,6 月正式对外服务。

CHINANET 也是一个分层体系结构,由核心层、区域层、接入层三个层次组成,以北京网管中心为核心,按全国自然地理区域分为北京、上海、华北、东北、西北等 8 个大区,构成 8 个核心层节点,围绕 8 个核心节点形成 8 个区域,共 31 个节点,覆盖全国各省、市、自治区,形成我国 Internet 的骨干网。以各省会城市为核心,联接各省主要城市形成地区网,各地区网有各自的网管中心,分别管理由地区接入的用户。各地区用户由地区网接入,穿过骨干网通达 CHINANET 全国网。

中国金桥信息网(CHINAGBN)

原电子工业部系统的中国金桥信息网(CHINAGBN)从 1994 年开始建设,1996 年 9 月正式开通。它同样是覆盖全国,实行国际联网,并为用户提供专用信道、网络服务和信息服务的基干网,网管中心设在原电子部信息中心,现为中国吉通通

信有限公司。目前 CHINAGBN 已在全国 24 个省市发展了数千本地和远程仿真终端,并与科学院国家信息中心等各部委实行了互联,开始了全面的信息服务。

由于上述 4 大网络体系所属部委在国民经济中所扮演的角色不同,其各自建立和使用 Internet 的目的和用途也有所差别。CSTNET 和 CERNET 是为科研、教育服务的非营利性质 Internet,原邮电部的 CHINANET 和原电子部的 CHINAGBN 是为社会提供 Internet 服务的经营性 Internet。

面对各国发展信息高速公路的热潮,中国人表现出极大的热情,同时也面临一次巨大的挑战和机遇。

为此,我国政府有关部门制定了信息化的重大战略举措,“三金工程”便是其中之一。“三金”为“金桥”、“金关”、“金卡”工程。

“金桥”工程又称经济信息通信网工程,它是建设国家公用经济信息通信网、实现国民经济信息化的基础设施。这项工程的建设,对于提高我国宏观经济调控和决策水平以及信息资源共享、推动信息服务业的发展,都具有十分重要的意义。

“金关”工程又称为海关联网工程,其目标是推广电子数据交换(EDI)技术,以实现货物通关自动化、国际贸易无纸化。

“金卡”工程又称电子货币工程,它是借以实现金融电子化和商业流通现代化的必要手段。

按照“三金”工程的蓝图,中国的信息高速公路将从应用信息系统和国家通信网两个方面考虑,有计划有步骤地推进。

今天,很多曾经从 Internet 得到过好处的人们对未来的 Internet 有着无数的期望、憧憬甚至是幻想,让我们一起来看看梦想中的 Internet (要非常精确、全面的预测 Internet 未来的发展是很困难的,但以下几个方面是不可忽视的):

随着世界各国信息高速公路计划的实施, Internet 主干网的通信速度将大幅度提高;

有线、无线等多种通信方式将更加广泛、有效地融为一体;

Internet 的商业化应用将大量增加,商业应用的范围也将不断扩大;

Internet 的覆盖范围、用户入网数以令人难以置信的速度发展;

Internet 的管理与技术将进一步规范化,其使用规范和相应的法律规范正逐步健全和完善;

网络技术不断发展,用户界面更加友好;

各种令人耳目一新的使用方法不断推出,最新的发展包括实时图像和话音的传输;

网络资源急剧膨胀。

上面的期望其实只是冰山的一角,大概没有人能够真正说清楚将来 Internet 能够给我们带来什么。不过,根据我们人类的一般观念和 Internet 过去的发展历史,我们有理由认为未来的 Internet 将会更加精彩、有用。

总之,人类社会必将更加依赖 Internet,人们的生活方式将因此而发生根本的改变。不过,Internet 永远不能替代你的一切,请不要忘记进行足够的户外活动,否则,Internet 将会影响你的健康。

机器人探秘

机器人学的进步和应用是 20 世纪自动控制最有说服力的成就，是当代最高意义上的自动化

20 世纪，人类取得了辉煌的成就，从量子理论、相对论的创立，原子能的应用，脱氧核糖核酸双螺旋结构的发现，到信息技术的腾飞，人类基因组工作草图的绘就，世界科技发生了深刻的变革。信息技术、生物技术、新材料技术、先进制造技术、海洋技术、航空航天技术等都取得了重大突破，极大地提高了社会生产力。

机器人技术作为 20 世纪人类最伟大的发明之一，自 60 年代初问世以来，经历 40 年的发展已取得长足的进步。工业机器人在经历了诞生——成长——成熟期后，已成为制造业中不可少的核心装备，世界上有约 75 万台工业机器人正与工人朋

友并肩战斗在各条战线上。特种机器人作为机器人家族的后起之秀,由于其用途广泛而大有后来居上之势,仿人形机器人、农业机器人、服务机器人、水下机器人、医疗机器人、军用机器人、娱乐机器人等各种用途的特种机器人纷纷面世,而且正以飞快的速度向实用化迈进。

机器人一词的出现和世界上第一台工业机器人的问世都是近几十年的事。然而人们对机器人的幻想与追求却已有 3000 多年的历史。人类希望制造一种像人一样的机器,以便代替人类完成各种工作。

西周时期,我国的能工巧匠偃师就研制出了能歌善舞的伶人,这是我国最早记载的机器人。

春秋后期,我国著名的木匠鲁班,在机械方面也是一位发明家,据《墨经》记载,他曾制造过一只木鸟,能在空中飞行“三日不下”,体现了我国劳动人民的聪明智慧。

公元前 2 世纪,亚历山大时代的古希腊人发明了最原始的机器人——自动机。它是以水、空气和蒸汽压力为动力的会动的雕像,它可以自己开门,还可以借助蒸汽唱歌。

1800 年前的汉代,大科学家张衡不仅发明了地动仪,而且发明了计里鼓车。计里鼓车每行一里,车上木人击鼓一下,每行十里击钟一下。

后汉三国时期,蜀国丞相诸葛亮成功地创造出了“木牛流马”,并用其运送军粮,支援前方战争。

1662年,日本的竹田近江利用钟表技术发明了自动机器玩偶,并在大阪的道顿堀演出。

1738年,法国天才技师杰克·戴·瓦克逊发明了一只机器鸭,它会嘎嘎叫,会游泳和喝水,还会进食和排泄。瓦克逊的本意是想把生物的功能加以机械化而进行医学上的分析。

在当时的自动玩偶中,最杰出的要数瑞士的钟表匠杰克·道罗斯和他的儿子利·路易·道罗斯。1773年,他们连续推出了自动书写玩偶、自动演奏玩偶等,他们创造的自动玩偶是利用齿轮和发条原理而制成的。它们有的拿着画笔和颜色绘画,有的拿着鹅毛蘸墨水写字,结构巧妙,服装华丽,在欧洲风靡一时。由于当时技术条件的限制,这些玩偶其实是身高一米的巨型玩具。现在保留下来的最早的机器人是瑞士努萨蒂尔历史博物馆里的少女玩偶,它制作于二百年前,两只手的十个手指可以按动风琴的琴键而弹奏音乐,现在还定期演奏供参观者欣赏,展示了古代人的智慧。

19世纪中叶自动玩偶分为2个流派,即科学幻想派和机械制作派,并各自在文学艺术和近代技术中找到了自己的位置。1831年歌德发表了《浮士德》,塑造了人造人“荷蒙克鲁斯”;1870年霍夫曼出版了以自动玩偶为主角的作品《葛蓓莉

娅》；1883 年科洛迪的《木偶奇遇记》问世；1886 年《未来的夏娃》问世。在机械实物制造方面，1893 年摩尔制造了“蒸汽人”；蒸汽人“靠蒸汽驱动双腿沿圆周走动。

进入 20 世纪后，机器人的研究与开发得到了更多人的关心与支持，一些适用化的机器人相继问世，1927 年美国西屋公司工程师温兹利制造了第一个机器人“电报箱”，并在纽约举行的世界博览会上展出。它是一个电动机器人，装有无线电发报机，可以回答一些问题，但该机器人不能走动。1959 年第一台工业机器人（可编程、圆坐标）在美国诞生，开创了机器人发展的新纪元。

现代机器人的研究始于 20 世纪中期，其技术背景是计算机和自动化的发展，以及原子能的开发利用。

自 1946 年第一台数字电子计算机问世以来，计算机取得了惊人的进步，向高速度、大容量、低价格的方向发展。

大批量生产的迫切需求推动了自动化技术的进展，其结果之一便是 1952 年数控机床的诞生。与数控机床相关的控制、机械零件的研究又为机器人的开发奠定了基础。

另一方面，原子能实验室的恶劣环境要求某些操作机械代替人处理放射性物质。在这一需求背景下，美国原子能委员会的阿尔贡研究所于 1947 年开发了遥控机械手，1948 年又开发

了机械式的主从机械手。

1954 年美国戴沃尔最早提出了工业机器人的概念,并申请了专利。该专利的要点是借助伺服技术控制机器人的关节,利用人手对机器人进行动作示教,机器人能实现动作的记录和再现。这就是所谓的示教再现机器人。现有的机器人差不多都采用这种控制方式。

作为机器人产品最早的实用机型(示教再现)是 1962 年美国 AMF 公司推出的“ VERSTRAN ”和 UNIMATION 公司推出的“ UNIMATE ”。这些工业机器人的控制方式与数控机床大致相似,但外形特征迥异,主要由类似人的手和臂组成。

1965 年,MIT 的 Roberts 演示了第一个具有视觉传感器的、能识别与定位简单积木的机器人系统。

1967 年日本成立了人工手研究会(现改名为仿生机构研究会),同年召开了日本首届机器人学术会。

1970 年在美国召开了第一届国际工业机器人学术会议。1970 年以后,机器人的研究得到迅速广泛的普及。

1973 年,辛辛那提·米拉克隆公司的理查德·豪恩制造了第一台由小型计算机控制的工业机器人,它是液压驱动的,能提升的有效负载达 45 公斤。

到了 1980 年,工业机器人真正在日本普及,故称该年为“ 机器人元年 ”。

随后,工业机器人在日本得到了巨大发展,日本也因此而赢得了“机器人王国的美称”。

随着计算机技术和人工智能技术的飞速发展,使机器人在功能和技术层次上有了很大的提高,移动机器人和机器人的视觉和触觉等技术就是典型的代表。由于这些技术的发展,推动了机器人概念的延伸。80年代,将具有感觉、思考、决策和动作能力的系统称为智能机器人,这是一个概括的、含义广泛的概念。这一概念不但指导了机器人技术的研究和应用,而且又赋予了机器人技术向深广发展的巨大空间,水下机器人、空间机器人、空中机器人、地面机器人、微小型机器人等各种用途的机器人相继问世,许多梦想成为了现实。将机器人的技术(如传感技术、智能技术、控制技术等)扩散和渗透到各个领域形成了各式各样的新机器——机器人化机器。当前与信息技术的交互和融合又产生了“软件机器人”、“网络机器人”的名称,这也说明了机器人所具有的创新活力。

人们常常会问为什么要发展机器人。我们说机器人的出现并高速发展是社会和经济发展的必然,是为了提高社会的生产水平和人类的生活质量,让机器人替人们干那些人干不了、干不好的工作。在现实生活中有些工作会对人体造成伤害,比如喷漆、重物搬运等。有些工作要求质量很高,人难以长时间胜

任,比如汽车焊接、精密装配等 有些工作人无法身临其境,比如火山探险、深海探密、空间探索等 有些工作不适合人去干,比如一些恶劣的环境、一些枯燥单调的重复性劳作等 这些都是机器人大显身手的地方。服务机器人还可以为您治病保健、保洁保安 水下机器人可以帮助打捞沉船、铺设电缆 工程机器人可以上山入地、开洞筑路;农业机器人可以耕耘播种、施肥除虫 军用机器人可以冲锋陷阵、排雷排弹……

现在社会上对机器人有很多迷惑,有人认为机器人无所不能。这些朋友是从电影、电视、小说中认识机器人的,他们眼中的机器人是神通广大的万能机器,当他们看到现实的机器人时,他们会认为现在的机器人太普通,不能称之为机器人。有人认为机器人是人,形状必须像人,不像人怎么能叫机器人,然而现实中绝大多数的机器人样子不像人,这使很多机器人爱好者大失所望。还有人认为机器人上岗,工人就会下岗,无形中把机器人当成了竞争对手,他们没有想到机器人会为人做许多有益的事情,会推动产业的发展,给人类创造更多的就业机会。

在科技界,科学家会给每一个科技术语一个明确的定义,但机器人问世已有几十年,机器人的定义仍然仁者见仁,智者见智,没有一个统一的意见。原因之一是机器人还在发展,新的机型,新的功能不断涌现。根本原因主要是因为机器人涉及

到了人的概念,成为一个难以回答的哲学问题。就像机器人一词最早诞生于科幻小说之中一样,人们对机器人充满了幻想。也许正是由于机器人定义的模糊,才给了人们充分的想象和创造空间。

其实并不是人们不想给机器人一个完整的定义,自机器人诞生之日起人们就不断地尝试着说明到底什么是机器人。但随着机器人技术的飞速发展和信息时代的到来,机器人所涵盖的内容越来越丰富,机器人的定义也不断充实和创新。

1886年法国作家利利亚当在他的小说《未来夏娃》中将外表像人的机器起名为“安德罗丁”(android),它由4部分组成:

1,生命系统(平衡、步行、发声、身体摆动、感觉、表情、调节运动等);

2,造型解质(关节能自由运动的金属覆盖体,一种盔甲);

3,人造肌肉(在上述盔甲上有肉体、静脉、性别等身体的各种形态);

4,人造皮肤(含有肤色、机理、轮廓、头发、视觉、牙齿、手爪等)。

1920年捷克作家卡雷尔·卡佩克发表了科幻剧本《罗萨姆的万能机器人》。在剧本中,卡佩克把捷克语“Robota”写

成了“ Robot”，“Robota”是奴隶的意思。该剧预告了机器人的发展对人类社会的悲剧性影响，引起了大家的广泛关注，被当成了机器人一词的起源。在该剧中，机器人按照其主人的命令默默地工作，没有感觉和感情，以呆板的方式从事繁重的劳动。后来，罗萨姆公司取得了成功，使机器人具有了感情，导致机器人的应用部门迅速增加。在工厂和家务劳动中，机器人成了必不可少的成员。机器人发觉人类十分自私和不公正，终于造反了，机器人的体能和智能都非常优异，因此消灭了人类。

但是机器人不知道如何制造它们自己，认为它们自己很快就会灭绝，所以它们开始寻找人类的幸存者，但没有结果。最后，一对感知能力优于其它机器人的男女机器人相爱了。这时机器人进化为人类，世界又起死回生了。

卡佩克提出的是机器人的安全、感知和自我繁殖问题。科学技术的进步很可能引发人类不希望出现的问题。虽然科幻世界只是一种想象，但人类社会将可能面临这种现实。

为了防止机器人伤害人类，科幻作家阿西莫夫于 1940 年提出了“机器人三原则”：

- 1 机器人不应伤害人类；
- 2 机器人应遵守人类的命令，与第一条违背的命令除外；
- 3 机器人应能保护自己，与第一条相抵触者除外。

这是给机器人赋予的伦理性纲领。机器人学术界一直将这三原则作为机器人开发的准则。

在1967年日本召开的第一届机器人学术会议上,就提出了两个有代表性的定义。一是森政弘与合田周平提出的“机器人是一种具有移动性、个体性、智能性、通用性、半机械半人性、自动性、奴隶性等7个特征的柔性机器”。从这一定义出发,森政弘又提出了用自动性、智能性、个体性、半机械半人性、作业性、通用性、信息性、柔性、有限性、移动性等10个特性来表示机器人的形象。另一个是加藤一郎提出的具有如下3个条件的机器称为机器人:

- 1, 具有脑、手、脚等三要素的个体;

- 2具有非接触传感器(用眼、耳接受远方信息)和接触传感器;

- 3具有平衡觉和固有觉的传感器。

该定义强调了机器人应当仿人的含义,即它靠手进行作业,靠脚实现移动,由脑来完成统一指挥的作用。非接触传感器和接触传感器相当于人的五官,使机器人能够识别外界环境,而平衡觉和固有觉则是机器人感知本身状态所不可缺少的传感器。这里描述的不是工业机器人而是自主机器人。

机器人的定义是多种多样的,其原因是它具有一定的模糊性。动物一般具有上述这些要素,所以在把机器人理解为仿人

机器的同时,也可以广义地把机器人理解为仿动物的机器。

1988 年法国的埃斯皮奥将机器人定义为:“机器人学是指设计能根据传感器信息实现预先规划好的作业系统,并以此系统的使用方法作为研究对象”。

1987 年国际标准化组织对工业机器人进行了定义:“工业机器人是一种具有自动控制的操作和移动功能,能完成各种作业的可编程操作机。”

我国科学家对机器人的定义是:“机器人是一种自动化的机器,所不同的是这种机器具备一些与人或生物相似的智能能力,如感知能力、规划能力、动作能力和协同能力,是一种具有高度灵活性的自动化机器”在研究和开发未知及不确定环境下作业的机器人的过程中,人们逐步认识到机器人技术的本质是感知、决策、行动和交互技术的结合。随着人们对机器人技术智能化本质认识的加深,机器人技术开始源源不断地向人类活动的各个领域渗透。结合这些领域的应用特点,人们发展了各式各样的具有感知、决策、行动和交互能力的特种机器人和各种智能机器,如移动机器人、微机器人、水下机器人、医疗机器人、军用机器人、空中空间机器人、娱乐机器人等。对不同任务和特殊环境的适应性,也是机器人与一般自动化装备的重要区别。这些机器人从外观上已远远脱离了最初仿人型机器人和工业机器人所具有的形状,更加符合各种不同应用领域

的特殊要求,其功能和智能程度也大大增强,从而为机器人技术开辟出更加广阔的发展空间。

中国工程院院长宋健指出:“机器人学的进步和应用是 20 世纪自动控制最有说服力的成就,是当代最高意义上的自动化”机器人技术综合了多学科的发展成果,代表了高技术的发展前沿,它在人类生活应用领域的不断扩大正引起国际上重新认识机器人技术的作用和影响。

关于机器人如何分类,国际上没有制定统一的标准,有的按负载重量分,有的按控制方式分,有的按自由度分,有的按结构分,有的按应用领域分。一般的分类方式见表:

分类名称	简要解释
操作型机器人	能自动控制,可重复编程,多功能,有几个自由度,可固定或运动,用于相关自动化系统中。
程控型机器人	按预先要求的顺序及条件,依次控制机器人的机械动作。
示教再现型机器人	通过引导或其它方式,先教会机器人动作,输入工作程序,机器人则自动重复进行作业。
数控型机器人	不必使机器人动作,通过数值、语言等对机器人进行示教,机器人根据示教后的信息进行作业。

分类名称	简要解释
感觉控制型机器人	利用传感器获取的信息控制机器人的动作。
适应控制型机器人	机器人能适应环境的变化,控制其自身的行动。
学习控制型机器人	机器人能“体会”工作的经验,具有一定的学习功能,并将所“学”的经验用于工作中。
智能机器人	以人工智能决定其行动的机器人。

我国的机器人专家从应用环境出发,将机器人分为两大类,即工业机器人和特种机器人。所谓工业机器人就是面向工业领域的多关节机械手或多自由度机器人。而特种机器人则是除工业机器人之外的、用于非制造业并服务于人类的各种先进机器人,包括服务机器人、水下机器人、娱乐机器人、军用机器人、农业机器人、机器人化机器等。在特种机器人中,有些分支发展很快,有独立成体系的趋势,如服务机器人、水下机器人、军用机器人、微操作机器人等。目前,国际上的机器人学者,从应用环境出发将机器人也分为两类:制造环境下的工业机器人和非制造环境下的服务与仿人型机器人,这和我国的分类是一致的。

不论是工业机器人还是特种机器人(尤其是服务机器人)都存在一个与人相处的问题,最重要的是不能伤害人。然而由于某些机器人系统的不完善,在机器人使用的前期,引发了一系列意想不到的事故。

1978年9月6日,日本广岛一家工厂的切割机器人在切钢板时,突然发生异常,将一名值班工人当作钢板操作,这是世界上第一宗机器人杀人事件。

1982年5月,日本山梨县阀门加工厂的一个工人,正在调整停工状态的螺纹加工机器人时,机器人突然启动,抱住工人旋转起来,造成了悲剧。

1985年前苏联发生了一起家喻户晓的智能机器人棋手杀人事件。全苏国际象棋冠军古德柯夫同机器人棋手下棋连胜3局,机器人棋手恼羞成怒,突然向金属棋盘释放强大的电流,在众目睽睽之下将这位国际大师击倒。

这些触目惊心的事实,给人们使用机器人带来了心理障碍,于是有人展开了“机器人是福是祸”的讨论。

面对机器人带来的威胁,日本邮政和电信部门组织了一个研究小组,对此进行研究。专家认为,机器人发生事故的原因不外乎3种:1,硬件系统故障;2,软件系统故障;3,电磁波的干扰。

这种意外伤人事件是偶然也是必然的,因为任何一个新生

事物的出现总有其不完善的一面。随着机器人技术的不断发展与进步,这种意外伤人事件越来越少,近几年没有再听说过类似事件的发生。正是由于机器人安全、可靠地完成了人类交给的各项任务,使人们使用机器人的热情才越来越高。

美国正在研究一种航天器内使用的机器人,计划在两年之后被宇航员带入太空,做一些宇航员无法做到的事情,成为宇航员最得力的助理。这种机器人只有垒球那么大,可以对航天器中的生命维持系统进行自动监视、摄像和排除障碍等,同时还可以代替已损坏的传感器完成监视任务。可以说,有了它,今后的航天器在太空中飞行将更加安全。

在科幻小说和电影电视中,我们对机器人作战的场面已不陌生。机器人不外乎分为两种,一种是人类的朋友,协助正义战胜邪恶;另一种则是人类的敌人,给世界带来灾祸。

英国雷丁大学教授凯文·渥维克是控制论领域知名专家,他在《机器的征途》一书中描写了机器人对未来社会的影响。他认为50年内机器人将拥有高于人类的智能。机器人在某些方面确实比人类强,比如速度比人快,力量比人大等,但机器人的综合智能较人类还相去甚远,还没有对人类形成任何威胁。但这是否说明人类永远能控制或战胜自己的创造物呢?现在还不得而知。这些预见从另一个角度给人们敲响了警钟,不

要给自己创造敌人。克隆技术的出现,在社会上引起了很大的争议,大多数国家禁止克隆人。对于机器人还没有到这种地步,因为现在的机器人不仅未对我们构成威胁,而且给社会带来了巨大的裨益。对于一些对人类有害,如带攻击武器的军用机器人应有所选择并限制其发展,我们不应将生杀大权交给机器人。

随着工业化的实现,信息化的到来,我们开始进入知识经济的新时代。创新是这个时代的源动力。文化的创新、观念的创新、科技的创新、体制的创新改变着我们的今天,并将改造我们的明天。新旧文化、新旧思想的撞击、竞争,不同学科、不同技术的交叉、渗透,必将迸发出新的精神火花,产生新的发现、发明和物质力量。机器人技术就是在这样的规律和环境诞生和发展的。科技创新带给社会与人类的利益远远超过它的危险。机器人的发展史已经证明了这一点。机器人的应用领域不断扩大,从工业走向农业、服务业,从产业走进医院、家庭,从陆地潜入水下、飞往空间;……。机器人展示出它们的能力与魅力,同时也表示了它们与人的友好与合作。

“工欲善其事,必先利其器”。人类在认识自然、改造自然、推动社会进步的过程中,不断地创造出各种各样为人类服务的工具,其中许多具有划时代的意义。作为 20 世纪自动化领域的重大成就,机器人已经和人类社会的生产、生活密不可

分。世间万物,人力是第一资源,这是任何其它物质不能替代的。尽管人类社会本身还存在着不文明、不平等的现象,甚至还存在着战争,但是,社会的进步是历史的必然,所以,我们完全有理由相信,象其它许多科学技术的发明发现一样,机器人也应该成为人类的好助手、好朋友。中国的未来在科学。展望 21 世纪,科学技术的灯塔指引着更加美好的明天。

参 考 书 目

第二次创世：

《破译生命密码基因工程》，周雪平等著，浙江大学出版社，2002

《20 世纪科学技术简史》，李佩珊、许良英主编，科学出版社，1999

《科学技术概论》，胡显章、曾国屏主编，高等教育出版社，1998

《二十世纪生物学的分子革命》（法）莫朗热著，昌增益译，科学出版社，2002

《人之书——人类基因组计划透视》，（英）W. 博德默尔、R. 麦凯著，顾鸣敏译，上海科技教育出版社，2002

《基因探奥秘 生物科技》，李绍武主编，北京理工大学

出版社, 2002

《走近生命科学 生物——医学英汉时文精粹》,王秀芝、王秀盈编译,世界知识出版社, 2002

极度改造:

《DNA 激情》,(美) J. 沃森著,迟文成译,辽宁画报出版社,冷泉港实验室出版社, 2002

《改造生命之舟——细胞工程》,邵健忠等著,浙江大学出版社, 2002

《克隆技术》,李建凡编著,化学工业出版社, 2002

《干细胞技术》,裴雪涛主编,化学工业出版社, 2002

《生物技术世纪 用基因重塑世界》,(美) J. 里夫金著,付立杰等译,上海科技教育出版社, 2002

认识你自己:

《脑的奥秘》,陈宜张等著,清华大学和暨南大学出版社, 2002

《20 世纪的生命科学史》,(美) G. E. 艾伦著,田沼译,复旦大学出版社, 2000

《皇帝新脑》,(英) R. 彭罗斯著,许明贤、吴忠超译,

湖南科学技术出版社, 1995

《认知科学揭秘》, 赵南元著, 清华大学出版社, 2002

《会思维的猿——智力进化的起源》, (英) R. 伯恩著, 何朝阳译, 湖南教育出版社, 2002

《人脑之谜》, (英) S. 格林菲尔德著, 杨雄里等译, 上海科学技术出版社, 1998

《梦》, (英) M. 恩尼斯、J. 帕克著, 李长山译, 三联书店, 2003

《情感之源：关于人类情绪的科学》, (美) V. S. 约翰斯顿著, 翁恩琪等译, 上海科学技术出版社, 2002

心灵实现：

《灵魂机器的时代》, (美) R. 库兹韦尔著, 沈志彦等译, 上海译文出版社, 2002

《机器人》, (美) H. 莫拉维克著, 马小军、时培涛译, 上海科学技术出版社, 2001

《人工智能》, 戴汝为主编, 化学工业出版社, 2002

《制脑者》, (美) D. 弗里德曼著, 张陌、王芳博译, 三联书店, 2001

《剑桥五重奏 机器能思考吗》, (美) J. 卡斯蒂著, 胡运发等译, 上海科学技术出版社, 2001

《心灵的新科学》,(美) H. 加德纳著,周晓林等译,辽宁教育出版社,1989

《人工智能哲学》,(英) M. 博登著,刘西瑞、王汉琦译,上海译文出版社,2001

《虚实世界》,(美) J. L. 卡斯蒂著,王千祥、权利宁译,上海科技教育出版社,1998

第三次革命:

《从混沌到有序》,(比) I. 普里高金等著,曾庆宏、沈小峰译,上海译文出版社,1987

《自组织的宇宙观》,(美) A. 詹奇著,曾国屏等译,中国社会科学出版社,1992

《复杂系统理论基础》,(英) 欧阳莹之著,田宝国、周亚、樊瑛译,上海科技教育出版社,2002

《复杂》,(美) M. 沃尔德罗普著,陈玲译,三联书店,1997

《确定性的终结》,(比) I. 普里高金等著,上海科技教育出版社,1998

《机遇与混沌》,(法) D. 吕埃勒著,刘式达等译,上海科技教育出版社,2001

《混沌 开创新科学》,(美) J. 格莱克著,张淑誉译,

都柏林校,上海译文出版社,1990

《隐秩序——适应性造就复杂性》,(美) J. H. 霍兰德著,周晓牧,韩晖译,上海科技教育出版社,2000

《物理学史教程》,李艳平,申先甲主编,科学出版社,2003

《第三种文化》,(美) J·布罗克曼著,吕芳译,海南出版社,2003

美丽小世界——纳米科技:

《第四次浪潮——纳米冲击波》,张立德著,中国经济出版社,2003

《纳米科技新大陆》,卢天贶、程龙江编著,湖南科学技术出版社,2002

《加工原子的技术 纳米技术》,罗蕾编著,江西科学技术出版社,2002

《纳米科技》,马远荣编著,汕头大学出版社,2003

《纳米生物技术》,姜忠义、成国详编著,化学工业出版社,2003

《完美的对称》,吉姆·巴戈特著,李涛、曹志良译,上海科技教育出版社,1999

梦想的距离：

《著名超导物理学家列传》，刘兵著，北京大学出版社，
1988

《超导物理学发展简史》，刘兵、章立源著，陕西科学技术出版社，1988

《神奇的超导材料》，丁世英编著，科学出版社，2003

《物理学史》，郭奕玲、沈慧君编著，清华大学出版社，
1993

《近代物理与高新技术物理基础》，陈泽民主编，清华大学出版社，2001

《近代物理学进展》，张礼主编，清华大学出版社，1997

寻找新世纪的爱因斯坦：

《超光速研究新进展》，黄志洵著，国防工业出版社，
2002

《超光速研究》，黄志洵著，科学出版社，1999

《量子运动与超光速通信》，高山著，中国广播电视出版社，2000

直面幽灵：

《量子信息技术》，戴葵等著，国防科技大学出版社，2001

《光速思考》，(美) D. D. 诺尔蒂著，王国琮译，中信出版社、辽宁教育出版社，2003

《量子通信和量子计算》，李承祖等编著，国防科技大学出版社，2000

把太阳装进口袋：

《聚变能及其未来》，王乃彦著，清华大学出版社，2001

《人造小太阳——受控惯性约束聚变》，王淦昌著，清华大学出版社，2001

《激光核聚变译文集》，徐至展等编，原子能出版社，1979

《原子核物理》，卢希庭著，原子能出版社，1981