

科 学 时 代

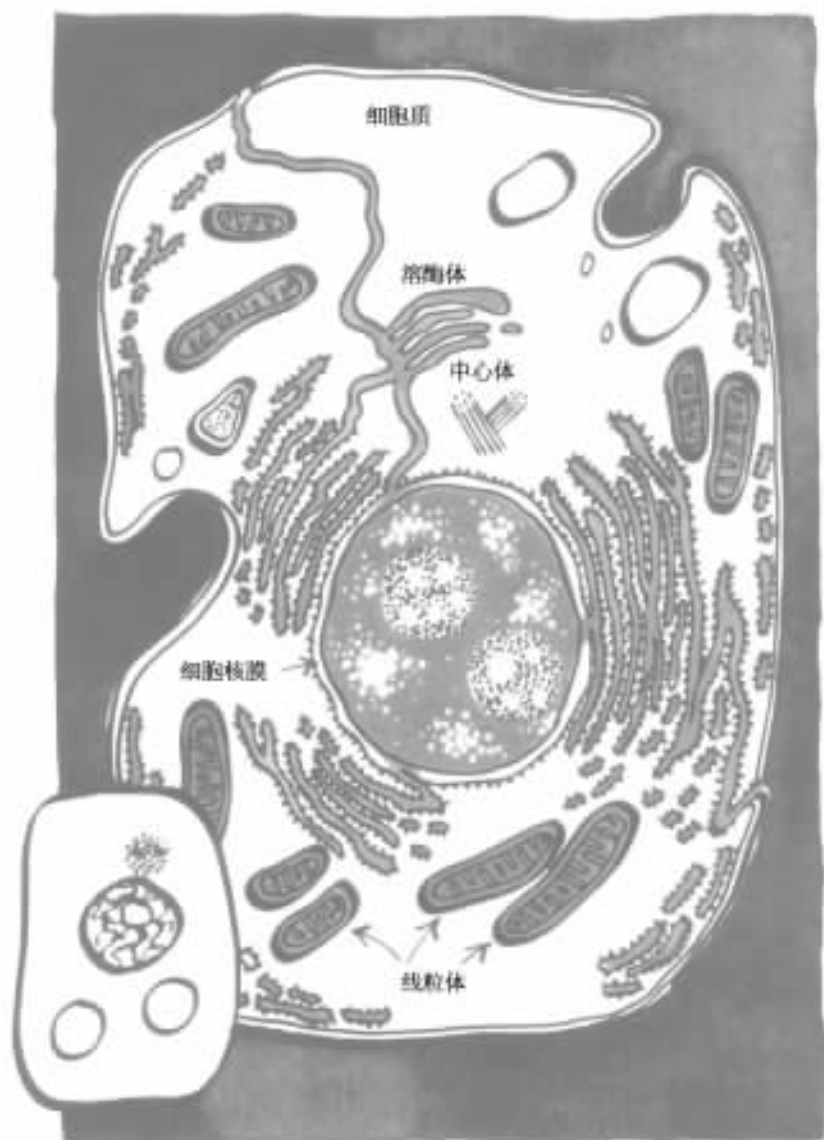
——20 世纪科学家学到些什么

〔美〕杰拉德·皮尔 著
潘笃武 译

復旦大學出版社

内 容 提 要

“万物怎样来自无？万物又怎样发展到会思考无？”这是本书作者杰拉德·皮尔在本书的第一章开头写的两句话。这两句话概括了本书的叙述思路。皮尔曾担任《科学美国人》杂志的发行人和编辑近40年，由于他的职业地位，他能接触到许多当代最卓越的科学家，了解他们的尖端研究成果。在这本书中，皮尔按照编年史的体例，全面总结了20世纪中人类在探索宇宙和物质的产生与演化、研究地球上生物和人类的出现与进化、以及人类的过去和未来等方面所学到的知识、获得的成果，并讨论了人类文明的起源和当前的人口问题。这不仅是一本有关科学史的大众读物，也是一本自然史和自然哲学的通俗读物。作者优雅的文笔及100多张插图，使每个具有好奇心的读者都可从这本书里简要地了解20世纪最伟大的进展。



目 录

关于这本书和我本人	1
科学的社会学 (3) 我探知了“秘密” (5) 科学杂志 (9)	
第一章 科学家所做的事就是科学	1
10 的幂 (4) 知识的基础 (8) 科学革命 (9) 伽利略的斜面 (12)	
伽利略的抛物线 (17) 没有更高的权威 (20) 客观知识的伦理学 (21)	
说明及证明 (26) 真理和光 (28) 每英寸 14 400 条线 (31)	
高能光谱学 (33) 建立宇宙学 (35) 成果的购买 (37) 自由选题研究 (37)	
意见一致的习惯 (39) 科学家学到些什么 (42)	
第二章 知识基础的革命	45
运动定律 (47) “……答案十分接近” (49) 引力定律 (50) 燃素与化学 (56)	
电和磁 (70) 富兰克林的电流 (72) 电磁学的伽利略 (75)	
麦克斯韦方程组 (78) 电磁波谱 (80) 场取代了以太 (81)	
紫外灾难 (82) 量子:能量的粒子 (85) 狭义相对论 (87) 斐兹杰惹-洛伦兹收缩 (93)	
能量到质量的变换 (94) 质量到能量的转换 (96)	
9×10^{20} 尔格对 1 克 (97) 场和尔格 (98) 广义相对论 (100)	
“……最快乐的思想” (102) 能量的引力 (102) 非欧几何学 (103)	
星光轨迹和抛物线 (104) 难以捉摸的形式原理 (106)	
第三章 光和物质	108
永不静止 (110) 没有不可分的原子 (114) 不要问是什么而要问从何而来 (116)	
电子的发现 (118) X 射线和自发放射性 (120) 量子轨道上的电子 (126)	
比喻的必要 (128) 电子的波动性 (130)	

不确定原理 (132) 伪认识论 (133) 反物质 (136) 氮变为氧 (140) 弱力的发现 (144) 原子的裂变 (146) 粒子的多重性 (150) 守恒律破缺 (151) 力的多重性 (154) 夸克八重态 (157) 量子色动力学 (159) “上帝粒子” (163)

第四章 时间和空间 167

引力 (168) 几何动力学 (171) 广义相对论受到检验 (173) 宇宙
的过去和未来 (176) 宇宙红移 (177) 星体的视差 (180) 膨胀着
的宇宙 (185) 宇宙项 (188) 星族 (191) 稳恒态宇宙 (192) 元
素的核合成 (193) 宇宙背景辐射 (196) 银河系 (199) 恒星由宇
宙尘组成 (201) 恒星的诞生 (203) 恒星之死 (206) 银核 (214)
伸展的银河系 (215) 类星体和遥远的宇宙 (216) 类星体光亮的来
源 (219) 观测宇宙的边缘 (220) 大爆炸的回声 (222) 大爆炸：
标准模型 (223) 加速器所达到的大爆炸 (224) 暴胀 (227) 暗能
量 (229)

第五章 活的细胞 231

孟德尔的基因 (233) 孟德尔基因的基因座 (235) 细胞和细胞
核 (238) 活质的构造 (240) 烟草花叶病毒 (245) DNA :遗传分
子 (247) 夏格夫法则 (248) 分子建筑学 (249) 资助革命 (250)
功能与结构 (252) 密码的编码 (252) 遗传密码 (253) DNA 转录
到 RNA (256) RNA 转译成蛋白质 (257) 概率产生的秩序 (260)
有丝分裂纺锤体 (262) ATP :细胞中的能量转化 (263) 光合作用和
呼吸 (265) 光合作用的细胞器 (267) 呼吸细胞器 (270) 遗传密
码和进化 (273) 物种起源 (274) 实验探究 (275) RNA 和“核糖-
生物” (277) 最早的化石细胞 (279) 利用太阳 (279) 进化中的
共生 (281) 细胞核的起源 (284) 有丝分裂和减数分裂 (288) 细
菌基因交换 (289) 多细胞使生物变大 (291)

第六章 地球的历史和生命的进化 293

板块构造 (295) 最早的生命迹象 (301) 地球历史的发现 (302)
均变过程的时间 (303) “贝格尔号”的航行 (304) 自然选择 (305)
地球内部 (307) 大陆漂移 (310) 钟和罗盘 (312) 水平方向的沸
腾 (315) 冥古代 (317) 最古老的岩石 (318) 天降吗哪 (320)

氧的危机 (321)	地球的第一个生态系统 (323)	板块构造的起始 (324)
大气中的氧 (326)	4 个新的生物界 (329)	第一个捕食者 (331)
第一个多细胞生物 (332)	地球上最长的冬天 (333)	退却中的原核生物 (336)
进化中的行为 (337)	“近代综合”中的进化 (340)	水中的里程碑 (342)
植物先出现 (344)	开花的植物 (346)	白垩纪灾变 (347)
自然选择:一种结果 (349)	对设计的渴望 (353)	

第七章 工具和人类进化 356

人口转变 (358)	环境影响 (359)	经济问题 (360)	客观知识 (361)
目的的曙光 (362)	灵长类的出现 (363)	人猿首科 (365)	人猿 (367)
文化革命 (368)	直立猿人 (370)	智人 (374)	直立猿人被取代 (375)
没有原始的语言 (377)	没有原始的艺术 (379)	追随着冰川 (381)	农业社会前的文明 (382)
农业文明 (384)	社会的“正常结构” (385)	小麦革命 (386)	黄铜时代及后来的铁器时代 (387)
最早的都市文明 (388)	印欧语 (390)	稻米革命 (391)	秦朝的陶制大军 (393)
欧亚大陆的内部边疆 (396)	玉米革命 (397)	特奥提瓦坎 (401)	阿兹台克精耕细作的农业 (402)
绝对权力 (404)	印加文明 (405)	工业革命 (407)	机械能 (408)
人口原理 (409)	奴隶制度成为不道德的 (410)	并非“永恒的问题” (411)	富裕的普及 (411)
摆脱贫困 (415)	国内生产总值 (GDP) 的百分之一 (416)	贸易,而不是援助 (417)	可持续发展 (419)

注释	422
----------	-----

致谢	432
----------	-----

译后记	434
-----------	-----

科 学 时 代

——20 世纪科学家学到些什么

杰拉德·皮尔

彼德·布兰德福绘图

卷首插图：真核细胞的解剖图。20 世纪初只知道里面除一团细胞质外几乎没有别的东西 [见第 238 页]，现在知道细胞会将其中的大分子组织起来进行细胞生命反应，并以有序的连锁相互作用循环不息。细胞通过包围着的细胞膜和周围介质相联系，不断地从外部汲取物质。包含染色体的细胞核是主管遗传的场所；细胞分裂时中心体控制染色体的分离和复制 [见第 273 页]；溶酶体是可重复使用的分子碎片的细胞中心。

关于这本书和我本人

在这本书中,我要告诉读者的是:我所知道的有关科学家在 20 世纪中学到些什么。总的说来,科学研究的目的是正确无误地认识我们周围的世界以及我们自己在其中的地位。在我们能够说明所有的事物的这一天到来之前,我们的世界图像总是不完整的。科学研究揭示了围绕着我们世界之内以及超越这周围的世界、召唤我们去认识的广阔的天地。

现在的认识都扎根于可证实的人类经验。我在这里要报道的经验基本上都是在 20 世纪中得到的。在 20 世纪的最后几十年内,不同学科的研究都集中在同一些根本问题上。根据客观知识来重新表述这些古老的问题,并把这些问题和现实生活直接联系起来。这种工作还在继续进行,这些问题还将被经验进一步扩展并修改。

新知识的客观性通过无所不在的、极其精巧的技术向广大公众作了证明。这些技术使个人和社会都有能力可以达到任何目标。技术所引起的经济、社会和环境改变的速率、规模和不可逆转性迫使人类重新审查公认的前提,迄今为止人类追求的目标都是从这些前提引申出来的。

科学事业为这种重新审查提供了推理、宽容及个人自由的典范。

我必须一开始就指出,我这里综合得到的图像是正式的科学

文献中从来没有如此综合过的。作者们从不谈论学科间的关联性。专业领域内的同事们肯定会马上理解这种关联性的意义,如果不是这样的话,他们是不会从事他们所做的工作的。

我像大多数人一样不是科学家,我是自己综合出这幅图像的。我希望我的读者从本书获得材料和勇气,从此综合出自己的图像。

作为作家、编辑和发行人,我是 20 世纪后半期所揭示的客观知识的探索过程的目击者。我们的任务是向那些想知道科学事业的整个发展前沿的广大读者介绍各门科学研究领域内的成就。

读者向我和我的同事们提出的挑战首先是满足他们的好奇心,这些问题对于几乎所有的科学家来说都在他们自己熟悉的领域之外。探索认识周围世界中的所有事物是人类与生俱来的本性——每个孩子都是自然科学家。不需要很多经历,他们就会懂得只能把兴趣局限在很有限的范围之内并使之专业化。科学家在自己的专业之外也是外行,他们寻找进入对他们说来也是一无所知的领域的通道,他们也不在乎被人看作只是有兴趣的外行。假如我们连这些人的兴趣都不能满足,那么我们就更没有资格对别的任何人讲话了。

20 世纪 40 年代,我担任当时刚创办不久的、发行量很大的《生活》画报的科学编辑的时候,就意外地发现了广大社会公众的需要。于是我就着手为我在见习期中就熟悉的读者们创办一本科学杂志。在寻求合作伙伴和工作人员并筹集所需的风险资金的时候,我学习我的老板的先例。时代公司购买了《生活》的刊名,它原是一本已停刊多时的滑稽连环画刊物。我为我们自己的公司买下了濒临倒闭的、已有 102 年历史的杂志《科学美国人》(SCIENTIFIC AMERICAN)的刊名。1948 年 5 月,我们出版了用旧刊名的新杂志的第一期。

我为这毕生的事业所作的准备是最不充分的。我于 1937 年

获得的哈佛学院历史学文学士证书证明了我历史专业上的优异成绩，但也证明我在科学上的无知。就像大多数美国中小学生一样，即使现在也是如此，从低年级开始就害怕数学和科学。本来应该通过做练习来学习的算术却用死记硬背的方法来学习，这更产生了抵触。算术学习中形成的难以改正的错误方法，使我在以后的代数和数学课上丢尽了脸面。

当时的科学是（现在还是）根据书本进行教学的。高中和大学的教材都是平装的 8 开本而不是彩色的 4 开本——其中最好的要算弗里曼（W. H. Freeman）公司出版的《科学美国人》的科学教材辅助读物——当然这也加重了今天学生书包的负担。我从老师那里学到的物理是很有限的。像欧几里德（Euclid）几何一类的教本都是绿皮小书，作者之一是杜尔（Charles Elwood Dull）。一个典型的实验练习是测量水的沸点，我知道那是华氏 212 度。老师要求我证明它是摄氏 100 度。我测量到的却不是这一数值，而是平均摄氏 98.6 度。到现在为止，我还没有搞清其中的道理。

科学的社会学

我在哈佛学过的最接近科学的课程是社会学辅导课，在这课程中我受到一位名叫罗伯特·默顿（Robert. K. Merton）的研究生的影响。按照完全沉浸式强化训练原理，他引导我研读了托尼（R. H. Tawney），爱弥儿·涂尔干（Emile Durkheim），卡尔·马克思（Karl Marx），维尔纳·宋伯特（Werner Sombert），麦克斯·韦伯（Max Weber）等一些伟大人物的著作。还有维尔弗雷多·帕累托（Vilfredo Pareto）的著作，当时他的书刚从意大利文翻译过来。有了这些认真学习的经历，我开始把重点学习的领域转向历史学。

历史告诉我们，当时世界大战已是一触即发，出于报道第二次世界大战的抱负，我于 1938 年到《生活》杂志社工作。可是我

却突然发现我在科学上的无知胜过了我在历史知识方面的准备而成为录用条件。当时约翰·萧·比林斯(John Shaw Billings)一直担任《时代》杂志总编。他考虑到公司对《生活》杂志巨大投资的压力,决心要将这本照相画报办成公司的王牌杂志,致力于在各个方面向公众进行教育的重要使命。(确实,我们不会相信现在超市货架上取这样名字的杂志可以完成这种使命。)他任命我来采访报道科学是因为他认为无知比一知半解更可靠。我们都知道,似懂非懂往往反而坏事。

在我接受任命的时候,我知道还没有一本公众科学杂志。我的同事们——负责国内外的新闻、体育、好莱坞、艺术、戏剧——有各种信息来源,包括《纽约时报》等等,这些信息都能告诉他们下一期《生活》杂志可以安排些什么内容。我发现科学界有比人类其他事业更多的自己的刊物。非常专业的杂志只用于专门的研究领域的内部交流。这些杂志的内容对于外界,甚至对于其他领域的科学家来说也是难懂的。我发现当时在任何报刊上,包括今天已有很多科学报道的《纽约时报》里都几乎读不到有关科学的文章和报道。

在那个时候,科学家总是有足够的理由提防着新闻媒体:由于媒体对他们的工作的过热的、不恰当的报道,使他们经常被弄得十分尴尬。我做了一些工作说服了第一批两位共同研究的科学家与我及一位摄影师合作报道他和她的工作。然而,在我成功地在《生活》杂志上发表了我最初的几篇报道后,我发现说服下一位科学家和我合作就更容易了。

这是因为我们是用照相机来讲故事。用事物自身的魅力来展示事物本身,照相免除了为引起读者兴趣的冗长的文字。在另一些大众出版物中,为了吸引公众的注意而制造的狂热喧嚣反而使科学家和出版界打交道时感到窘迫。如果能恰当地使用照相,照片本身就能说明问题,也避免了乏味的文字。我写的图片标题

和说明必须保证准确无误，因为我的科学合作者坚持要审阅我的稿件。当然他们应该有这种权利，因为我和我的摄影师为了进行报道已经给他们带来了许多麻烦。

这也是首次在发行量很大的杂志上对科学进行认真的、权威性的报道。到 1944 年夏天，我发现当我寻求科学家帮助的时候已经受到欢迎。我甚至得到冷漠自负的洛克菲勒研究所的支持，进行了一次报道。那是首次分离出病毒并进行化学分析。这是该研究所研究人员温德尔·斯坦利 (Wendell Stanley) 的功绩。他在 1946 年获得战后第一个诺贝尔化学奖。在斯坦利的帮助下，我们还从他那里借到一品脱烟草镶嵌病毒。我的主要合作摄影师弗里茨·哥洛 (Fritz Goro) 利用一条游动的虹鳉^①使病毒活动起来，用 4 种颜色演示病毒的特殊几何形状。

到这时候，我意识到我的科学栏目自身就能在当时有 400 万发行量的《生活》画报中单独地引起读者的热烈兴趣。读者们对我在杂志中添加的科学篇章的强烈兴趣告诉我，即使在他们自己的领域中有丰富知识的读者也同样需要一本像我所编撰的那种杂志。

我探知了“秘密”

与此同时，我在工作中还知道了许多不能报道的事。这些使我相信，一本科学杂志必须坚持自身独立的编辑方针。但我不能把这种想法向我们老板提出。虽然我在科学上的准备知识少得可怜，但我还是探听到了原子弹的“秘密”。

我们主要情报的来源却是保密检查过程本身。在 1942 年初，我和约翰·比林斯收到华盛顿战时保密局的电报。保密局执行美国新闻出版界签署的自愿保密协议。电报中列出从“原子

① 译注：一种色彩鲜艳的淡水热带鱼。

能”开始的长长一串词目,我现在记得起来的有“镭”、“铀”、“同位素”、“临界质量”以及“原子裂变”等等,这些都是要回避的词目。

原子裂变是奥托·哈恩 (Otto Hahn) 在德国发现的。他的合作者莉瑟·迈特纳 (Lise Meitner) 从希特勒统治下逃亡到瑞典,1939 年她来到哥伦比亚大学时在新闻界引起了小小的轰动。这还是在我接受任命之前的事。保密局的电报使每一个读到它的人都明白这些事物在战争准备中的地位。电报上罗列的词目为我提供了一份读书目录。

我发现,公开发表的文献已足以让每个读过它们的人知道原子武器的原理及制造方法。当然,我并不是实际参与其中任何一部分工作的读者。然而,心中带着这样明确的问题,我甚至还可以从费米 (E. Fermi) 和惠勒 (J. A. Wheeler) 的文章中捉摸出一些意思 [见第 147 页]。使我感到宽慰的是,除了原始文献以外,我还找到一本 1939 年出版的大学教材,这是美、英、法的物理学家在被禁止发表他们的物理学突破性进展之前出版的。该书以讨论从原子核中释放能量的可能前景作为结束的一章。

我的研究使我警觉,每当我遇到保密检查时我就知道原子弹计划进行得怎样了。一次,我们在伊利诺斯大学拍摄质谱仪漂亮的演示过程时,尼埃尔 (O. Nier) 教授提出,由于他不便说明的理由不得不终止和我们的合作。说到这件事,我急切地要告诉我的读者我刚学到的东西:物理学家有办法区别化学家不能区分的原子。根据其重量区别有同样化学性质的“同位素”是很重要的,因为它们有不同的物理性质——例如,产生链式反应的裂变的可能性。由于保密检查的干扰,使我知道了质谱仪被考虑用来从丰富得多的稳定同位素铀 238 中分离出原子量为 235 的、稀有的、可裂变的铀同位素。

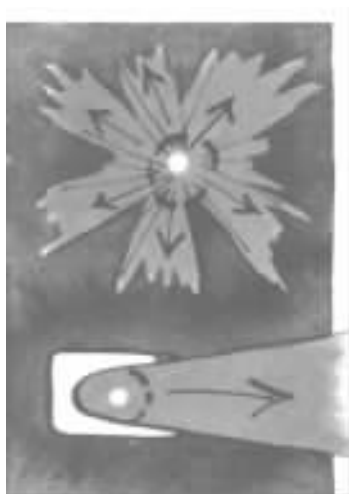
根据这一线索,我知道了参与哥伦比亚铀裂变工作的科学家

都已经去了芝加哥。当时,我还被告知我不能采访从丹麦逃亡出来的尼尔斯·玻尔(Nils Bohr),并且我还受到警告,甚至连我知道他在美国也不“准许”。我从加拿大政府的一位采购人员那里第一次听到曼哈顿计划这个名称。一天晚上,在冷清的曼哈顿街,他轻声地问我知不知道有关曼哈顿计划的事。加拿大政府的备战“优先”是无法和田纳西州进行的曼哈顿计划的物资供应相比的。我有一次在伊斯曼·柯达公司午餐时无意中听说他们拔尖的青年物理学家中的一位从“去田纳西”的征募中被留了下来,这一件事使我得到那边小山下的企业大约是怎样规模的概念。

到1944年夏末,我所有的猜测一下子都被约翰·霍普金斯大学的荣誉退休物理学教授伍德(R. W. Wood)所证实。当时,他正帮助我撰写一篇有关“特形装药”(Shaped Charge)的报道。这是在1941—1942年间北非沙漠战役中,德国的反坦克炮弹如此厉害的原因。这种特形装药法很晚才在美国大炮中采用。此事已经没有秘密可言,因为敌人已优先采用。

伍德在20世纪初就已从美国海岸警卫队的一份技术公报中知道了这种现象。警卫队的一位军械专家曾发现装甲钢板会被安放在甲板上的特殊形状的炸药炸穿;这位专家为了证明他的发现,还将炸药塑成特定的形状,在一块军舰钢板上穿出“USA”字样的孔。伍德读到这篇报告后就向巴尔的摩警方解释破坏保险箱的方法。警方曾发现被盗的保险箱门上只有一个光溜溜的洞而没有金属碎屑留下,但在保险箱里面却发现凝结的钢渣。可是,伍德却没能引起美国军方的军械官对这现象的兴趣。

在北非战争中,德国在反坦克炮弹中演示了特形装药法可以把大部分爆炸能量集中到一个方向,即向前的方向上,而不是分散在所有方向(包括相反方向,见第8页插图)。在伍德的帮助下,我们用照相方法证明了定向能量束产生的力主要来自金属衬



里气化时生成的超高速重原子。金属衬里是德国武器制造者有意装进火药的圆锥形凹坑中的。炮弹的向前锥形鼻是一个挡风板，并带有导火线；应用高深的物理原理使得钢甲得以刺穿。

利用伍德自己制造的约翰·霍普金斯衍射光栅的塑料复制品，在我们的照片上显示出了蒸发出来的金属原子。衍射光栅曾被认为是人工制造的最完美的器具[见第31页]。我们将复制光栅放在照相机镜头前作为滤波器。伍德原是亨利·沃古斯图·罗兰(Henry Augustus Rowland)的一名研究生。罗兰首先制造出了这种完美的光栅，后来伍德接替了罗兰的教授职位。第二次世界大战爆发的时候伍德还在任上，他的实验室发现这种光栅在美国有巨大的战时市场。伍德研制出罗兰衍射光栅的塑料复制品以适应市场需求，他以非常低廉的成本复制出和原光栅同样完美的优质塑料光栅。利用塑料光栅为《生活》杂志的读者清楚地显示出炸药向上爆炸时产生的金属蒸气所发射的特定波长的光谱线。

伍德本人只知道他大批量制造的复制光栅的买主之一是曼哈顿计划。由于保密人员不让他明确知道曼哈顿计划中用他的

复制光栅派什么用场——这是他可据此以改进他的复制光栅性能的必要知识——他花了许多心思来推测这个问题。直到我们认识他的时候为止，伍德一直抑制着他对保密人员不尊重他的年龄和名声的愤懑。既然他们拒绝向他透露秘密，他反倒可以无拘束地谈论他的推测。显然，在曼哈顿计划中，是将他的光栅用于光谱分析以精确检测所用材料的纯度，其中包括可裂变的 U-235。U-235 在天然铀矿中的含量很低，需要从丰富得多的同位素 U-238 中提纯，使之达到工业等级。从对他的光栅需求的时间和数量，他可以估计出事情进展的情况。当时，他从这些情报估算出 U-235 的几种临界质量。

关于特形装药的报道本身也和原子弹有关系。伍德解释道，特形装药提供了最可靠的方法，可以通过爆聚，在一刹那间将裂变物质聚合起来达到临界质量并维持到裂变发生爆炸。用 U-235 或 Pu (钚) 做衬里的空心球体就可以达到这个目的。在和我们合作报道特形装药期间，伍德和保密人员开了一个高级玩笑。可是朱利叶斯和埃塞尔·罗森堡 (Julius and Ethel Rosenberg) 夫妇却被指控泄露有关的秘密而于 1953 年被处决。

伍德认为原子武器即将出现。他认为制造原子武器是不负责任的、罪恶的事业。他特别担心放射性尘埃的长时期后果。他声明，之所以让我知道有关原子弹的事，是希望新闻界尽快作出反应，如果可能的话，不要去使用它。

科学杂志

虽然什么也不能写，但我还是按照职务关系向约翰·比林斯汇报了从伍德那里了解到的情况。这样，我的老板及时代公司的负责人可以有所准备，在时机适当的时候及时作出反应。从这以后，我决定要抓紧时间启动一本科学杂志，它是包括科学家和非科学家在内的有责任心的公民迫切需要的。

1942年7月我们及时发表了的一篇亨利·凯泽(Henry J. Kaiser)“特写”的署名报道,使他成为我国战争工业中的保尔·班杨(Paul Bunyan)^①。事实上,他在战争期间的确建造了我国制造的所有货船和运输舰的1/3。在最高统帅部的命令下,海军不得不接受凯泽的50艘护航运输舰。在菲律宾战役中这些舰船为前线部队的服务发挥了重要的作用,目睹了日本海军的覆灭。在整个1945年中,我受雇于凯泽,作为他的“私人助理”,这项工作使我学会了很多商业方面的知识,有助于1948年5月新版《科学美国人》得以顺利出版。

像我的《生活》杂志的科学专栏一样,《科学美国人》是科学家和编辑合作的产物。我们列出科学家的名单,他们都是引起我们兴趣的著作的作者,我们想写些有关他们研究工作的文章。一旦他们认识到能引起广大读者对科学的兴趣时,他们就会接受我们的邀请,与我们合作编写。他们还同我们一起设计插图,这些图使枯燥的文字增添了不少趣味。

杂志到底是否能解决使公众理解科学这一悬而未决的问题?我们曾向读者承诺,保证他们能够“满意地得到真正需要的知识”。我们从读者兼作者的阿尔伯特·爱因斯坦(Albert Einstein)那里获得了信心。爱因斯坦还自告奋勇地要在我们的杂志发行的第二年末之前给我们写文章。从市场得到的真实数据证实了他的判断:我们杂志英语版的发行量在几年内稳步增长到60万份以上。通过发行杂志这种独一无二的方式联合了美国科学界,这广义的科学界包括科学家和对科学家做的工作感兴趣的人们。

到1986年,《科学美国人》英语版在全世界的发行量达到100万份以上,并被翻译成9种语言的版本——按启动的先后次

^① 译注:保尔·班杨是美国民间故事中力大无比的伐木巨人,常把他当作美国强大与力量的象征。

序排列为：意大利语、日语、西班牙语、法语、德语、汉语、俄语、匈牙利语和阿拉伯语。上述每一种版本的创立都是操本国语言的人首先倡议的。他们要寻找能“非常满意地”适合他们本国同胞需求的杂志。《科学美国人》在发行中已将全世界的科学界联合起来了。

正如我在最后的注释中所指出的 [见第 422 页]，这本书是我对 40 年中《科学美国人》所发表的文章，在当时及以后所做的深入研究的总结。这些文章在发表时都是当时最新发生的事件，我将它们作为人类认识的光辉进展的历史重读了每一期上的文章。

在第一章里，我们将会知道科学家所做的就是我们每个人都能够做的，只要我们清除头脑里原有的偏见并将问题纳入经验所及的范围之内形成我们的问题。以下的 3 章是要说明我们周围的世界随着被揭露出来的内部和外部的深邃无限而不断地被重新构建。最后 3 章讲述生命的故事。从地球开始冷却到出现液态水以后不久，生命就出现了，直到最后人们终于觉悟到必须在自己的头脑中尽快找到人类存在的意义。

第一章

科学家所做的是科学

科学应当是最有才华的科学家真正要做的事。

沃伦·韦弗^① (Warren Weaver)

万物怎样来自无？万物又怎样发展到会思考无？每个人都曾在这个时候或另一个时候，以这种方式或另一种方式提出过这两个问题。每一种语言中都有自己的创造世界的故事。这些故事中没有一个会漏掉专门创造男人和女人的情节。无论这些故事对操不同语言的人来说还意味着别的什么，这种创造的故事都是他们自己语言文学中的里程碑，并且也显示了想象的光辉和力量。

现在，在 21 世纪开始的时候，科学探索仍在寻求这两个最重要问题的其他答案。要注意的是，科学探索须受三条法则的约束，这是从事这方面工作的人员自愿遵守的共同协议。可以允许科学家在经验可及的物理实在之外合理地思考无。至于所说的经验以及对它的解释，科学家可以在他或她自己的判断以外不相信任何权威，但在任何时候都必须承认怀疑的权威。经验必须提

^① 译注：韦弗 (1894—1978 年)，美国科学家，信息论和通信理论的奠基人之一。

出证据,公开接受他人的质疑。

物理实在的“实在”在认识哲学中始终是一个有争议的问题。最近的科学研究又重新激起了哲学家对这个问题的兴趣。他们问道,实在是不依赖于人的知觉而独立存在的,还是人的知觉的创造物?不过,科学家们只关心他们的研究工作而对这类问题很少甚至毫无兴趣。在20世纪中,由于对自然哲学^①孜孜不倦的研究实践,他们扩展了经验可以达到的宇宙疆界。

天文学仪器将人的视界扩展了百万倍,直到遥远的宇宙边缘。物质内部的研究前沿依靠实验工具,使观察推进了百亿倍,达到了构成宇宙物质更深的层次。在现在达到的极限尺度上,科学家发现了物理实在全新的秩序。人类意识必定要尽力延伸,去认识宇宙。我们的日常经验所及的渺小世界就漂浮在这浩瀚的宇宙中。

这些努力至今还支持着这样一种信念:随着人类对宇宙认识的扩展,它的复杂性还在不断地显露出来,人们将会发现这复杂性终究还是统一在秩序和简单性的基础之上。观察到的简单性使物理实在中原来不相关联的各部分的分界线坍塌了,而发现的秩序是完全预料不到的新的类型。

在新的巨大尺度的宇宙中,时间和空间——在感觉经验中是完全分离的——融合成为四维连续统。时间和空间不再是宇宙事件的舞台;它们是与物质和能量一同参与事件的“时空”。从观察宇宙最远距离处发来的光得知宇宙生命早期的情形。在那个时候,空间也相应小得多。随着时空膨胀,宇宙从无中产生出来后的下一步由于深入地研究当时的粒子成分而开始有所了解。

物质和能量也被发现是同一实体,可交替地从一者转变为另一者。从物理实在根本性质来说,物质—能量的相互转变决

^① 译注:就是现代所说的自然科学,有时也专指物理学。

定于机会,如果可以用这个词来描述的话。机会是被分立的可能性所制约:并不是在连续尺度的任意数值上都可以发生能量和质量的转变,只有在某些固定数值的点上才会发生转变——能量是“量子化”的。可能性通过概率实现,在这种可能性制约的机会中产生出了秩序。在适当的尺度间隔位置上,物质—能量自组织成为粒子,原子中的粒子,分子中的原子。尤其是在宇宙中我们身边最近的地方,自然界显示出它的多样性,有生命的有机物在它们自己的王国中呈现出物质—能量自组织千变万化的能力。

从最古老的沉积岩中得到的证据显示,从地球刚开始能够保持液体状态的水的时候,地球上的生命就出现了。这意味着有水的地方就不可避免地会出现生命。然而,液态水的存在只以很窄的温度范围为条件:只有摄氏 100 度的区间。这是可观察的宇宙中开尔文温标的几亿度到不能达到的零度以上 1 度的亿分之一的整个区间中一个极小的范围。有了水,加上生命物质主要成分以及从大气和地壳中得来的其他元素,再从太阳辐射中很窄的光谱带吸收了光能量,于是生命出现了。各种颜色的光在从几千周的无线电波到每秒振动兆兆次的、能引起物质和能量转换的波段的整个电磁波谱中只是一小段。[见第 6 页图]。

这种环境虽然非常特殊,但人们还是认为生命的产生可能是相当普遍的。在太阳系内,并不排斥在类似于地球的行星上,或在巨大的气状的木星的一个类似于地球的卫星上有生命的可能。当然,人类观察者很想知道在宇宙中别的地方的生命是否会产生像他们自己一样的生物。这种可能性相当小。人类是否能存在足够长的时间来研究这个问题主要取决于人类自己。

人脑是已知的物质—能量高度组织起来的集合体。20 世纪晚期得知,人脑的进化始自 250 万年前,最早的制造工具的人在他们的头脑中形成了有意识的目标。除此之外,这种 90 磅重的

灵长类动物和他们的还没有形成制造工具的能力的堂兄弟并无异样。智人的出现只是地球 45 亿年的历史中最近几十万年的事。

只在 20 世纪——相当于地球历史的最近 1 微秒——人类才有能力探讨他们在宇宙中是不是孤独的这样的问题。和其他星球上的生命通信的可能性只决定于地球上的这一刹那和附近某个星球上生命的历史中某适当时期恰巧相符合。这种可能性随着每一个世纪地球上人的能力不断加强而提高。随着客观知识的不断积累,人们将会找到实现这最终目标的最有把握的方法。

10 的幂

到 20 世纪初,观察到的宇宙已向外延伸到 50 000 光年,即到达称做 Milky Way 或 Galaxy^① (银河系) 的中心。现在知道银河系是 1 000 亿颗恒星的集合。光年是距离的单位,是光以每秒 300 000 (最新测量的准确数值为 299 800) 千米的速度在一年内所通过的路程。这个速度乘以一年内的秒数,得到以整数表示的光年长度为 10 000 000 000 000 千米,现在观察到的宇宙半径为 100 000 000 000 000 000 000 千米。

宇宙的数字都是难以捉摸、难以理解的。不过人们在生活中不得不学会和更大的数字打交道。在现代人一生中,美国的国内生产总值(GDP) 以现值美元计,从 \$ 1 000 亿增加到近 \$ 10 太^②。如果写成从 \$ 100 000 000 000 到 \$ 10 000 000 000 000,读起来就不大方便了。

为了处理描写物理实在的不同大小的数字,科学家使用 10 的幂或数量级记数法。用这种记数法,美国的国内生产总值增长

① 译注:Milky Way 和 Galaxy (大写字母 G) 在汉语中都是银河系。

② 译注:1 太(拉) = 10^{12} 。

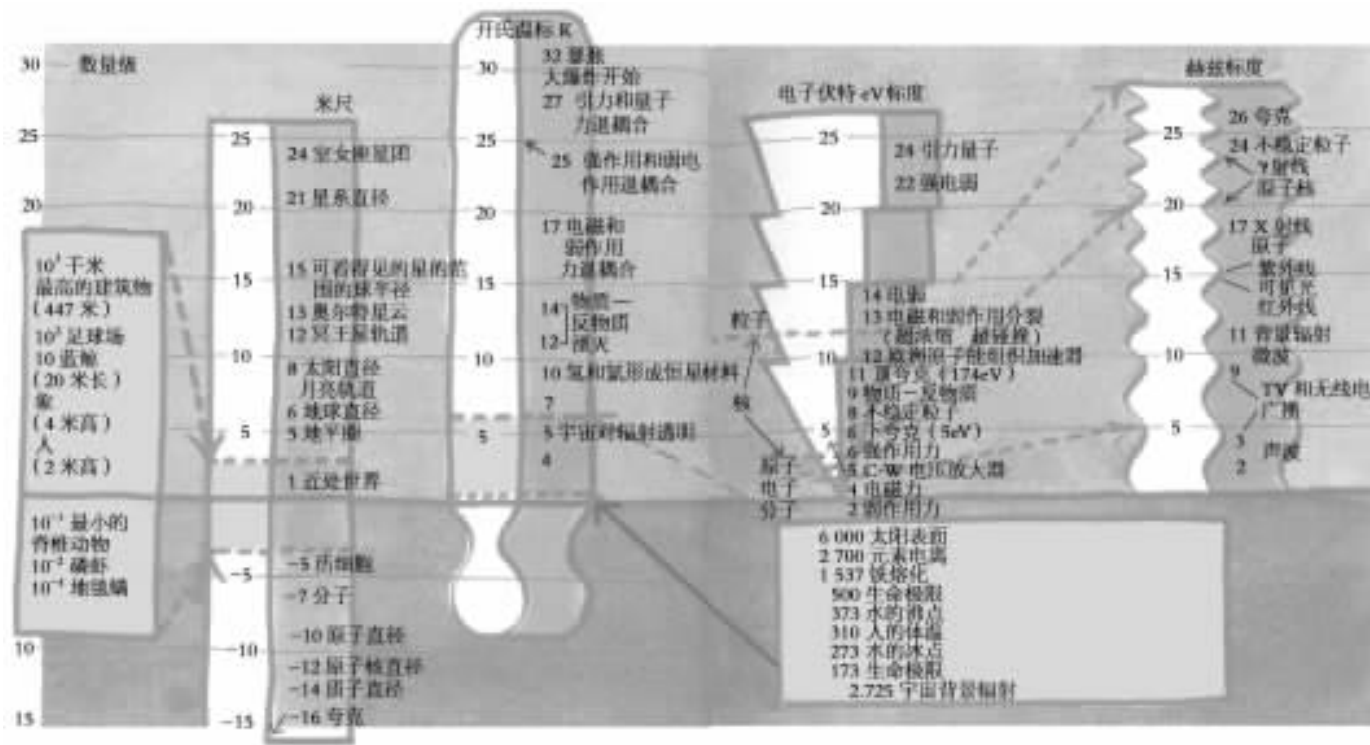
就写作从 10^{11} (1000 亿) 增加到 10^{13} (10 太), 读起来更为方便。指数表示要完全写出数字后面再加上的零的数目。相应地, 一光年更为简洁, 显然写成 10^{13} 千米就难以捉摸了。到观察到的宇宙边缘的距离 10^{10} 光年等于 10^{23} 千米或 10^{26} 米。

10 的幂的记数法也适用于更小的数字。粒子加速器将人类认识向内延伸到夸克的线度——夸克是原子核内部粒子的组成粒子。这个线度是太分之一米的万分之一, 或 $1/10\,000\,000\,000\,000\,000$ 米。这个分数很容易写成 10^{-16} 米, 负号意味着指数是分数的分母。观察到的宇宙跨越 10 的 43 次幂; 从 10^{-16} 到 10^{26} 。向外到达的最大的界限和向内到达的最小的界限的中间是 1 米 (10^0) 的量级, 这个量级最接近人类日常生活的经验 (见第 6 页图)。

由此可见, 现代观察到的宇宙比当年想象中的无限的宇宙更广阔得多。 10 的幂记数法有助于使观察到的很难理解的尺度的差别变得易于想象。譬如要比较数学符号 10^2 和 10^9 , 通过指数相减可知: 10^9 比 10^2 大 10^7 ($10\,000\,000$) 倍。这表示 10 亿 (10^9) 就是 $1\,000$ 万 (10^7) 个 100 (10^2)。相反, 10^{-2} 为 10^{-9} 的 10^7 ($10\,000\,000$) 倍; 即 10^{-2} 可容纳 $1\,000$ 万个 10 亿分之一 (10^{-9})。

大部分人不用任何仪器的帮助在意识中形成的宇宙概念是从 $1\,000$ 光年或 10^{19} 米以外的星空到近处观察可达到的约为 0.1 毫米, 即 10^{-4} 的限度。这个跨度范围是 10 的 24 次幂 (包括 10 的零次幂)。但这并不能认为裸眼看到的 24 次幂量级的世界相当于 46 次幂量级的宇宙的一半还多一点。深层次的物质内部是肉眼看不到的, 在可观察的宇宙中的 10^{22} 的范围是裸眼看得见的世界。

本书中将用指数来表示普通经验以外的数字。即使读者没有这方面的实践经验, 但总比数许许多多的零要更容易些。到现在为止, 一般的项目还不需要用比“太”更大的数字, 这在 GDP



用数量级或 10 的幂表示 20 世纪中科学家认识到的线度的图表。在距离标度上,他们观察到的宇宙半径增加了近 20 个量级,向外扩大 9 个量级到类星体的区域和宇宙早期历史的时代,向内直到夸克,有 10 个量级 [见第 157 页]。在温度和能量标度上,加速器到达 10^{13} 电子伏特 (eV),相应的温度为 10^{17} K,在这样的温度下物质粒子从宇宙的背景能量中取得它们的静止质量 [见第 196 页]。这正好达到宇宙历史最初的 10^{-12} 秒 [见第 223 页]。“生命的极限”温度是原核生物的生存范围,真核生物的生命被局限在水的沸点和冰点之间的狭窄的区间内。相应的辐射能量谱,这里用频率单位赫兹 (Hz) 标度,我们知道了从频率高到 γ 射线的频谱学和新的加速器能谱学中大多数我们“确切知道”的东西 [见第 33 页]。

中也只是最近才在一般的文章中用到。国际协定规定采用希腊文字的名称来表示科学论文中更大的数字,也相应地用于表示微观世界大小的名称。这本书中太是最大的数字名称。用“billion”就不是最好,因为它会引起英国人和美国人之间的误解;在英国人的语言中它是 10^{12} ,美国是 10^9 。在这本书中用的是美国的用法: 10^9 。

到 1900 年,光学望远镜和显微镜使裸眼的视力向外和向内的扩展不比一个数量级大多少。此后,光学仪器的改进将可观察的宇宙的半径扩展了大约 4 个数量级。20 世纪由于技术的发展,向外和向内可观察的最远的极限又扩展了 14 个数量级 [见第 6 页图]。

这些技术使认识达到可见光谱的两端以外很远的电磁波谱区域,把人的认识扩展到能直接感觉范围之外。用无线电望远镜看到了我们自己所在的星云内的原恒星之类的天体,这种天体还没有点燃发光;还有宇宙边缘的类星体,这些是星云正经历着引力聚爆的星系。在 21 厘米波段,无线电望远镜已经测绘出我们的本银河系中最丰富的元素——氢的星际分布图。在 10^{-10} 米波段工作的 γ 射线望远镜被安置在发射到保护地球的大气层以外的人造卫星上,以测量远距离的星系大灾变。

在人类经验的尺度上,随着空间膨胀而必然引起的时间膨胀这并不使人感到太大惊奇。17 世纪的《圣经》学者厄舍尔大主教 (Bishop Ussher) 将上帝创造世界的时间定在公元前 4004 年。19 世纪初的地质学家则需要一个寿命为几千万年的宇宙方能符合他们的观察数据。今天,无线电望远镜将膨胀着的宇宙的寿命设定为 100 亿年至 150 亿年。

直到最近才认识到宇宙更早的时间相应于更小的空间。能深入到 10^{-16} 米的区域的加速器达到相当于宇宙第一秒内同样比例的短暂条件。有关自然界各种力的统一、物质的来源以及宇宙

的开始这些关键的问题,现在仍然激励着人们进一步探究尺度更小的、时间上更早的领域。负指数的进一步增加需要有设计能力设计出更强大的仪器,并且要求社会愿意支持建造这种设备。

想象指数向正的方向增加比较容易,这对于在用如此巨大的数字来描写的宇宙中的人类来说有较大的活动余地。这里一定要介绍一条科学家观察了跨度达 46 个数量级以后所认识到的宇宙定律:只有经验才有考虑的价值;经验的证据必须受到审查。还没有可证实的从宇宙外面来观察宇宙的经验。因此,从原理上说,膨胀的宇宙之外没有时间和空间。

从内部观察,宇宙半径为 10^{10} 光年的量级,并且还在膨胀之中。在过去 50 年中,望远镜一直追踪着时空的膨胀,直到遥远的过去,其效果就相当于膨胀的逆转。利用它们,人们相应地得到更小、更密并且更热的宇宙的感性和理性认识。在 130 亿年或 140 亿年前的时间和地方,它们抓住了正在发生巨大灾变的星系。仪器测量到更为遥远的过去,3 000 K 的温度的宇宙已处于诞生爆炸的晚期状态。理论已经推到年龄为 10^{-35} 秒和半径为 10^{-6} 米的宇宙的情况,这已得到粒子物理实验的部分支持。这已经是小到不能再小的宇宙了。这幅想象中的图像提示我们:宇宙只能从里面来看,宇宙之外既没有时间也没有空间,存在的只有巨大的宇宙核,里面没有星系,更没有人;这里只有可以物化的物质—能量。

通过合理地外推构建的理论,也部分得到了实验的支持,时空被进一步压缩,直到几何点,并且物质—能量密度无限大。这就是经验所能到达的“无”。

知识的基础

将论据外推到科学仪器能探测到的 43 个量级之外肯定会出现不确定性。然而,在科学探索的进程中,前提的不确定性是与

生俱来的，科学家总是用归纳法寻求所观察到的特殊事物中的普遍定律。这并不能保证观察到的证据不违背任一条普遍定律。大家都知道，可能会发现第 n 只乌鸦是白色的。

作为探求真理的方法，归纳法被认为不如演绎逻辑，用逻辑推理从一般导出特殊更为可靠。然而，演绎不能得出新的东西，因为特殊的事物原来就已经存在了，蕴含在一般之中。再者，现在知道演绎也并不总是能得到正确的结论。20 世纪伟大的数学发现之一就是证明了，经过足够多的逻辑上弯弯绕绕的推理以后，任何前提的有限集都会得出自相矛盾的结果或者佯谬。正如这个发现的创始人库特·哥德尔 (Kurt Gödel) 提出的，这种佯谬可以通过对前提加以补充而得到纠正，但是其代价是出现新的佯谬。

科学的实用主义方法用两种方式得到真理。通过“自由创造”，这是爱因斯坦最喜欢用的词——或者通过痛苦的二次思考——科学家选择出可从此提出问题的一组前提。通过演绎，推导出可以面对经验的命题。于是，通过实验或观察的归纳对前提的有效性进行评价。

步骤的不确定再加上人类容易犯错误，因为人往往自以为是所谈问题的权威，从改正错误这一方面说来，科学研究作为能自我纠错的社会事业而继续发展。

科学家如果不向其他科学家发表自己的成果，他的工作也就等于零。如果其他科学家对他的工作产生足够的兴趣，他们不会不厌其烦地重复这些观察和实验，予以验证，直到他们满意为止。大多数有兴趣于同一研究课题的科学家的小团体会对这项研究工作的有效性和意义形成一致的观点。在这团体中一致认可的发现，在科学上是最可靠的。寻求真理的科学家可能发现，他们自己对发现问题比得到问题的答案更感兴趣。

科学革命

认清了科学是会犯错误的人类的工作这一点使得科学事业

中严肃的科学家感到困惑，这些人中就有《科学革命的结构》一书的作者托马斯·库恩(Thomas Kuhn)。库恩发现这些科学革命中都有相同的情节：某一领域中的研究人员参照他们的前提，并将他们的新发现纳入流行的“范式”或所研究领域的普遍理论中。他们不断地这样做，直到新的发现积累到终于突破了包含它们的范式的能力限度。这种危机引发了“范式移动”，从而解决了矛盾。此后，在这一领域中的研究人员又将问题和新发现纳入新的普遍理论框架之中，直到下一次危机到来。

以上是对即将谈到的科学革命理解的概括。“范式移动”像普通硬币般在现时的谈话中广泛流通，这说明库恩的论文有着广泛的读者。但库恩不必为误解他的历史解释而负责，就是认为我们时代中爱因斯坦的革命结果取代了牛顿的宇宙。然而，库恩最后还是丧失了他的认识论的力量。他总结道：“更准确地说，我们可能不得不抛弃这种概念，不论是明确的还是含蓄的，即范式的改变使科学家以及追随者越来越接近于真理。”

库恩没有对使他如此失望的“真理”下定义。科学研究寻求的真理在皮尔斯(C. S. Peirce)^①的实用主义哲学中有明白的表述。他的拥护者威廉·詹姆士(William James)重新表述为：“概念的真理不是其中的不变性质。真理碰巧成为概念。概念之所以真实是因为事件使它成为真实。事实上它的真实性是一个事件，一种过程，这个过程就是它的证明。”

某人作了证明。另一些人证实这个证明是对的。证明成为要证明的主题。

用公元前3世纪所能得到的证据，萨莫斯的阿里斯塔克斯(Aristarchus)得意地发现太阳比地球大得多，而月球又比地球小得多，绕自身的轴自转的地球带着绕它转动的月球一同绕静止的

① 译注：皮尔斯，美国哲学家，实用主义创始人。

太阳旋转；地球的自转轴相对于轨道平面有一点倾斜，由于这少许的倾斜造成四季的变换。由于对这方面的证据缺少兴趣——并且由于建立在其他的基础上的范式的优势——在近两千年中，人们生活中的宇宙图像完全不同。阿里斯塔克斯和他同时代人的观察证据到 16 世纪和 17 世纪才被第谷 (Tycho)、哥白尼 (Copernicus)、伽利略 (Galileo) 和开普勒 (Kepler) 复活，把事情理顺。人们今天知道的宇宙图像很像阿里斯塔克斯当年提出来的图像。

如果说从牛顿的范式转移到爱因斯坦的范式并不更接近于托马斯·库恩心中的真理，那么肯定它会证明真理统一在一个集合中以证明皮尔斯—詹姆士的标准。在下一章里将进一步上升到对广义相对论的理解，而牛顿方程在较大的系统中继续有效并且在我们周围的世界中仍旧令人满意地成立。从阿里斯塔克斯到爱因斯坦，物理实在的任何一角的正确理解就是对整体的领会，这个法则始终成立。

科学研究工作最终在技术中得到了公开的证明。对物理实在的任何一角的正确理解会立即成为对这一角的控制。每一种“技术”首先是设计出来为检验有关物理实在的命题的科学实验。如果获得成功，实验规模就进一步扩大，并由工程技术人员设计、制造新的机器，使其能够可靠地重复并连续运行。无论在阿拉莫哥多、广岛、长崎以及以后相继进行的地上和地下核试验的军事和政治目的是什么，它们都在过分多地向世界演示物质转换为能量的公式，即 $m = E/c^2$ 。大家更为熟悉这个公式的另一种表达式 $E = mc^2$ 。将它翻译成噜嗦的语言表述即为能量等于质量乘以光速平方。如此冗长的表述只是爱因斯坦的狭义相对论导出的结果之一。狭义相对论使时间和空间、物质和能量都坍缩合并。

引发这些后果的历史将在下一章里详细谈论。第三章中将要讨论狭义相对论和马克斯·普朗克 (Max Planck) 的量子怎样

结合起来而得到量子电动力学理论。这是历史上最卓越的智力协奏曲。这种无可比拟的精神造物为每种事物提供了最终参照标准,这些事物包括已知的和还在研究的与人类存在有密切关系的物理实在的基石。

量子电动力学在 20 世纪后半期发生的工业革命浪潮中得到了公开的证明。由在量子尺度上对时间和空间的新认识所引发的生产物资和消费品及服务总计达到工业化国家的国内生产总值的 25%。新技术已基本上开发了光和物质的相互作用及固态物质的性质等各方面的理论成果。这些技术以“跳蚤功率”而不是以马力运行,它们是模仿神经系统的机器而不是模仿肌肉的机器。在现在大家都熟悉的计算机芯片中,程序控制的微小电压使几百万个开关以超过微秒的速率打开和关闭,使微小的电流脉冲通过或停止。用这样的方式可以完成抽象的逻辑运算,在现实的世界中的应用从飞机的飞行控制到国会图书馆。

对物理世界的性质有意义的研究始自伽利略·伽利雷伊(Galileo Galilei)的实验。伽利略作为天文学家比实验物理学家更为有名,他是第一个用望远镜观察天空的人。他用望远镜看到月亮上的山脉在太阳光照射下投射出影子。他观察到木星遮掩了绕着它的轨道上运行的卫星,还有同样重要的是金星有像月亮一样的相变。

伽利略的斜面

伽利略在他的《两个世界的对话》一书中阐明了这些观察的意义。1632 年,他不用当时的学术语言拉丁文而用意大利文,为广大读者写了这本书。该书所讨论的两个体系是哥白尼提出的以太阳为中心的宇宙和托勒密(Ptolemy)提出的以地球为中心的模型[见第 14 页插图]。正如科学历史学家欧文·金格里希(Owen Gingerich)所注意到的,《对话》一书并不偏袒自然之书和

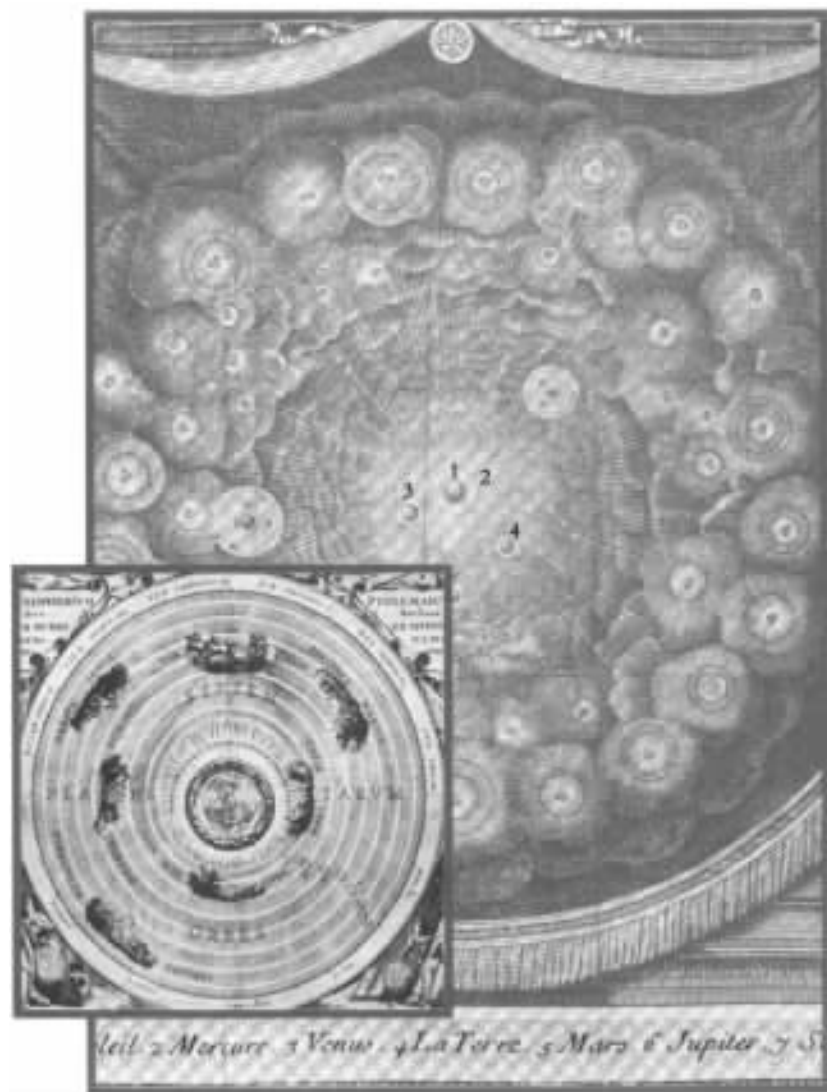
经书中的任何一方。伽利略让书中名叫辛普利曹 (Simplicio) 的人物扮演看上去要失败的书和体系的辩护者。看来教皇乌尔班八世 (Pope Urban VIII) 在辛普利曹的辩论中发现了他自己和伽利略争论的回音 (他们曾经同是世界上最早的科学学会——林赛学会的会员)。宗教法庭将伽利略软禁起来终其余生。

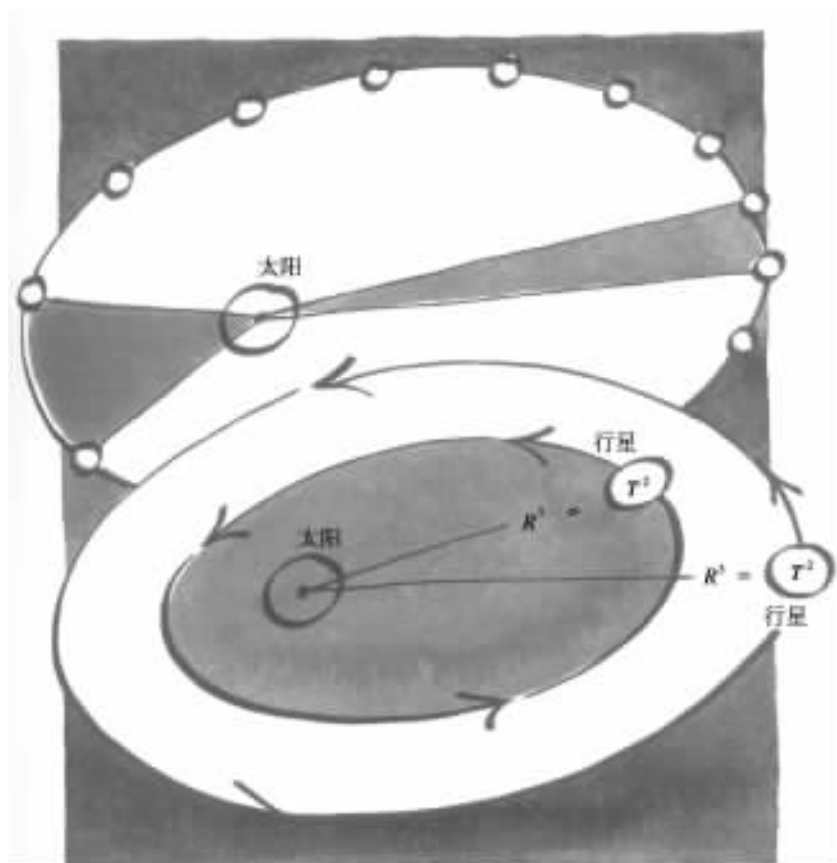
与伽利略在《对话》中派给书中人物扮演的角色完全不同,哥白尼在他的《天体运行论》中提出的异端邪说却是极其重大的事件。多少世纪以来,在亚里士多德 (Aristotle) 的权威笼罩下,托勒密的宇宙将地球放置在上有一个固定不动的恒星的球面中心 [见第 14 页插图]。天空从外面通过恒星发光。里面可以看到太阳、月亮和行星在以地球为中心的各自的天球上绕行。在地球内部深处,无论认为它是平的还是球形,是阴间地狱。

托勒密—亚里士多德体系得到托马斯·阿奎那 (Thomas Aquinas) 的支持。要用渎神的对话来推翻这一体系,将人从宇宙中心移开,还要他绕太阳作被认为是不可能存在的运动,这动摇了维持社会秩序的权威和驯服的信仰基础。然而,哥白尼的书并没有被列入教廷的禁书目录中,直到伽利略将他自己的令人信服观察结果公之于众,这才引起了广大读者的关注。

在 70 岁的时候,被软禁中的伽利略撰写了《关于两种新科学的对话》。为了广大读者着想,《对话》还是用意大利文,但是从他 30 年前所做的一些实验中得出的新物理学的正式表述却是用拉丁文。这一次,辛普利曹用亚里士多德和阿奎那的观点解释,认为较重的物体比较轻的物体下落得更快。但伽利略的历史性的实验证明,各种重量的物体都以同一不变的加速度下落。

为了测量加速度,伽利略设计了一个巧妙的实验。当时没有一种钟表能测量出垂直下落的时间,即使是从高塔上落下。如伽利略自己所说的,将吸引物体落到地上的“重力”“稀释”,以减慢下落的速率。他让铜球沿斜面滚动“下落”:斜面是一块木板。





哥白尼革命 [见第 14 页插图] 将地球从托勒密宇宙的中心位置上 [插入图] 移开。在这张 17 世纪的图中, 地球在中央太阳右下方 45 度角的地方; 周围天空中的恒星都有行星围绕。开普勒第一定律 [见第 49 页] 将行星放在椭圆形轨道上, 上图中被夸大了。行星靠近太阳时运动较快以使角动量保持不变, 同样时间内扫过的面积和离太阳最远的时候扫过的面积相同。开普勒第三定律是离开太阳的平均距离的三次方 (R^3) 正比于一年时间的平方 (T^2)。

木板中间沿着长的方向刻出一条抛光的槽轨，在沿槽轨等距离的点上做标记。

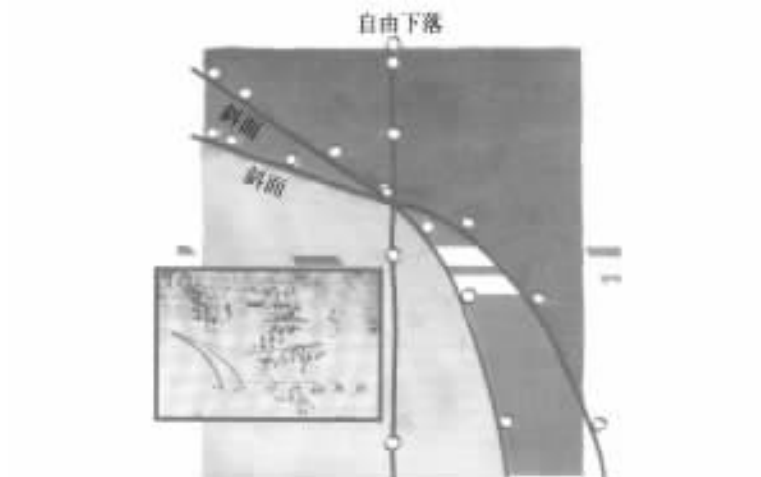
但是，伽利略怎样测量球滚下的时间呢？科学史家史蒂尔曼·德拉克 (Stillman Drake) 不久前发现，伽利略在实验中依据的是他对短的时间间隔研究的心得，用唱歌来测定时间！

当球从斜面上向下滚的时候，伽利略一遍又一遍地唱着同一支曲子。他沿着板中间槽轨有标记的点的位置或在标点之间放上横档，滚下的球随着歌曲的节拍敲击着这些横档。测量横档间的距离，伽利略发现槽轨上的横档间的距离随时间的平方增加而增加（假如正巧在第一拍结束时球正好敲击第一标点处横档，那么在第二拍结束时球到达第四标点，第三拍结束时铜球撞击第九标点处的横档）。将木板的倾斜角度增大，他发现要将横档之间的距离增大，但其距离仍旧按时间的平方而增加 [见第 17 页图]。很清楚，将板放置成任何倾斜角度，每次铜球都以不变的加速度运动^①。

为了证实他用唱歌计时的可靠性，伽利略在盛水的桶底上焊一根小管子，“水从小管口沿一根细线流到另一只小玻璃杯内。当球沿斜面的槽滚下时，玻璃杯收集流下的水……水的重量的差别和比例给出了时间长度的差别和比例”。

20 世纪 70 年代，德拉克 (Drake) 在多伦多大学重复了伽利略的实验。他发现伽利略的测量结果惊人地接近于每秒每秒 980.7 厘米 (大约 32 英尺)，这是伽利略实验所在地帕多瓦的重力加速度数值。

① 译注：这一句表达不确切。实际上是球的重力加速度始终不变，但球沿斜面滚动的加速度随斜面对水平面倾斜角度减小而减小。因此，斜面越陡，下落的球在同样的时间内运动的距离越长。



伽利略的斜面 [插入的小图] “游离”出重力后伽利略就可以测出自由下落物体的加速度大约是每秒每秒 9.8 米 [见第 16 页]。他注意到球离开斜面时保持向前的水平速度不变。不变的向前速度和下落时的重力加速度使球沿抛物线运动,对每一种速度,这都是最短时间和距离的轨迹。伽利略从而假设匀速运动“是永恒的”,这就是后来的牛顿第一定律所断言的。

伽利略的抛物线

伽利略接着讨论一个更为普遍的问题:就是运动本身。这个问题来自铜球滚到斜面底部后滚离桌面掉落到地板上的运动轨迹。测量和计算都证实了伽利略的直觉,球无论落到多远,轨迹总是抛物线。由于这一发现,伽利略有了一些名望。这一发现改善了大炮的准确度。这里,实用价值并不反映它的意义。伽利略的抛物线为爱因斯坦广义相对论中星光的轨迹铺好了轨道。

和直觉相反,飞行中的球并不“失去动量”——除了空气的阻力引起的损耗。伽利略注意到沿抛物线飞行的球同时作两种运动。一是在垂直的方向上加速下落。另一是离开斜面时的向前水平运动。伽利略发现球从桌子落下到撞击地板的距离正比于

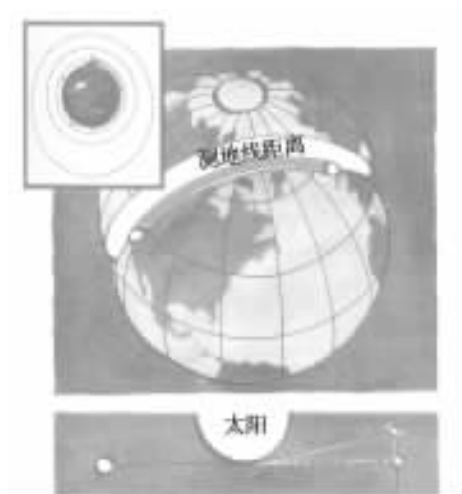
陡峭的斜面给予球的速度。既然已经证明小球每一次垂直下落都有相同的加速度，他就注意到小球必定保持原来向前的速度作为整个飞行过程的复合运动中的不变分量（即，小球并不“失去其动量”）。这两个速度组成沿抛物线轨道的运动，球落到地板上时仍旧保持原来的向前水平运动[见第 17 页图]。伽利略进一步领悟到抛物线对所有速度而言，都是沿从斜面底部到落地的位置间最小时间和距离的路程运动。

伽利略后来在他的《两种新科学》中得出以下普遍的结论：“我心中设想将运动[物体]放置在水平的板上，所有的阻碍都不予考虑……假如平板无限大，则在平板上平稳的运动恒久不停。”这一普遍结论就是今天在教科书中读到的牛顿第一运动定律：“除非受外力作用，物体始终保持静止或匀速直线运动状态不变。”伽利略是将运动分离出来作为物质的自然状态的第一人。作用于物体上的力引起的是物体运动的变化而不是运动本身。

伽利略的实验证明第一运动定律是正确的，而所有人的第一个印象都会觉得这是不可能的。每个人都可以重复这些实验——至少可以在自己的头脑中重复它们——并看一看小球沿抛物线轨道运动。

牛顿将更高速度的抛物线延伸出去，直到使物体达到可以沿着绕地球的轨道上运动的速度[见第 19 页图]。大约到每秒 11 千米，就是现代地球人造卫星的速度，这时伽利略的铜球运动的常数分量抵消了重力加速度。在相应的更高的速度下，牛顿将月球放在绕地球的运动轨道上，再把地球—月球系统放在绕太阳的轨道上。

在阿尔伯特·爱因斯坦的广义相对论中，将伽利略的抛物线推广到以光速运动的星光的光子的最短时间的轨道。正如在下一章中将要看到的，星光的轨道在太阳引力场中的弯曲说明了



牛顿第一运动定律说物体以恒定的速度沿直线运动直到受到力的作用，譬如重力，使它偏转为止 [见第 47 页]。牛顿注意到，增大在地球重力场中的物体的速度，会使伽利略的抛物线延伸成为绕地球旋转的轨道 [插图]。通过地球中心的平面和地球表面相交描绘出最短时间和距离的“短程线”。爱因斯坦证明 [见第 104 页] 光以“不能超越的速度”沿太阳的扭曲的引力场中的短程线运动。

1919 年阿瑟·爱丁顿 (Arthur Eddington) 在日食观察中测量到的恒星的表观位移。这次观察不仅证实了爱因斯坦的广义相对论，也证实了牛顿的推测。

由于伽利略的工作所取得的伟大成果，因此他理所当然地常常被尊为近代科学的奠基者。他明确地作出示范：应当怎样做科学实验。伽利略在运动物体的轨道问题中分别独立地考虑垂直方向和水平方向的运动、加速运动和匀速运动，然后他进一步在朴素而简单的实验仪器中将运动的这两个分量在物理上独立开来。

今天很少有黑箱操作的实验能像伽利略的斜面那样简单而巧妙地达到预计目的。今天，研究远在人感官能直接达到的范围之外的对象的物理学家提出的问题是，如何从错综复杂的数学

抽象推导出假设的粒子和力。他们是通过加速器实验得到的经验来面对这些对象,这些实验中得到的结果是在计算机上读出的事件的第二级或第三级效应。伽利略的榜样虽然是旧式的,但仍是理想的楷模。

没有更高的权威

伽利略也被奉为对科学伦理学的有影响的典范,要求科学家认识到除了自己的经验之外没有更高的真理权威:“在科学问题中,上千人的权威并不比单独一个人的谦卑的论据更有价值。”

伽利略不得不屈从延续了几世纪的宗教法庭的权威,宣布放弃《两种世界体系》一书中的论点。他离开这个争论去撰写《两种新科学》,这本书被送到欧洲研究学问的地方,就雪崩式地引起一连串的变化,在客观的知识领域内建立个人自由意志的自主权。

帕赛·布里奇曼(Percy Bridgman)曾对科学工作中可靠的个人经验作了很好的描述。布里奇曼于20世纪20年代至30年代在哈佛大学研究物质在高压下的性质,当时除他之外没有别人对此感兴趣,他是这方面的先驱者。他的独一无二的研究工作获得了1946年诺贝尔奖。今天,他的工作帮助了解地球内部引起大陆运动的剧烈搅动;用他的实验设备为模型制成的机器制造出了工业金刚石。布里奇曼写道:

我称做科学的过程是这样的过程,它包含认识的不断深入、对其重要性的不变评价,同时还要反复核对以确保我正在做的事正是我想要做的,并且还要判断其是否正确。这种核对、判断以及承认共同建立起的认识都是我自己完成的,没有别的人可以替我去做……这就和我的牙痛一样是我私人的事,如果没有这些科学就会死亡。

通过发表,研究工作就成为公共的事业,这是科学的社会化过程。

对之有兴趣的科学界人士就会负起他们的个人责任而参与这项工作。这是军阀的民主。如果科学没有死亡,他们就要不断根除实验设计中的缺点以及数据中的错误。他们要向研究工作据以进行的前提以及作者在其中发现的意义挑战,或许他们还要和自己争论。在大家取得一致同意的结论的过程中辩论是不留情面的。

对各种问题积极进行工作的少数探索者组成了无形的学院。他们参与互相竞争,他们共有的不确定性促使他们进行合作。他们通过内部的和公开的渠道不断地交流。一位科学家完全可以将他访问另一位科学家时所谈论的内容告诉第三者,这或许是没有人在公开的会议上争辩的问题。在科学受到更广大公众支持的时代里,飞机票被说成是万能的科学仪器。今天的互联网使得这看不见的学院内部进行洲际通信更为便利。只有那些杰出的科学家,他们可以没有证据也没有经过某种事先的非正式的审核和鼓励就发表文章。许多出版物,特别是在大科学中,都有多位作者的署名。

科学研究工作如果不向对之有兴趣的学术界发表出来就不能进行下去,从这一学术界的广度本身就可预测出这项研究的重要性。伦敦皇家学会从 1662 年开始发表合作的各方当时交换的信件。今天,成千上万份科学杂志给图书馆管理人员造成了最棘手的财政和管理上的问题。

客观知识的伦理学

在 4 个世纪的历史中,有组织地探求客观知识形成了世界上第一个真正国际性的学术界。它吸收了许多具有比西方古老得多的历史和文化的国家中的成员。无论他们来自何方,这些成员都具有相近的兴趣,他们之间的互相交流比他们和大多数国内同胞的交流更加容易。他们有共同的推理和数学的语言。从习惯到业务实践,这个世界性学术界有自己的共同法律进行自我管理。

分子生物学家雅克斯·莫诺德 (Jacques Monod) 在 1967 年当选法

兰西学院分子生物学会主席时对公共的伦理发表了他的个人意见：

知识伦理——如果我们承认它——的唯一目的、至善和最高的价值不是人的幸福，更不是人的舒适和安全——而是客观知识本身。我认为必须明白地表达这种伦理学并使之系统化，并且应不顾道德的、社会的以及政治的后果将它教给学生并传播到国外，对于现代世界的创造者，这是唯一的能和这个世界上的生命和谐一致的伦理学。

不必隐瞒，这是严厉的和强制的伦理学；当它期待人们去发展知识时，它宣告一种比人自身更优越的价值。

这是征服的伦理、权力的意愿，但只是智力圈（noösphere）^① [知识的领域] 中的权力。因此，是教唆暴力的罪恶和世俗的统治的伦理。

这是个人的和政治自由的伦理，因而争论、批评和不断地提出问题不只是其中的权利而且是一种责任。

这是社会的伦理，除非在一个尊重客观真理的准则的社会中，否则它就不会得到珍视。

带着他的胡格诺派教徒^②传统的简朴，莫诺德描绘了一个几乎每个人都愿意在其中生活的社会。科学家作为生活在其中的居民，也不能自动地取得资格。他们在科学的社会化进程中经受考验，只有最杰出的人背叛了他们仅仅表现出人的特征的我。

科学社会学的奠基人、哥伦比亚大学的罗伯特·默顿（Robert K. Merton）宣布“共产主义”是控制科学家行为的主要伦理道德。依据这个原则，他们将“他们共同合作的实质性的产品交付给学术界公有。科学家所要求的属于‘他的’智力‘财产’只限于承认和尊敬，如果机构以效率很低的方式运作的话，这种‘财产’大致相当于给知识的共同基

① 译注 noösphere 是法国古生物学家、哲学家德夏丁（Pierre Teilhard de Chardin）创造的词，意指人类意识和智力活动超越生物圈而发展的知识领域。

② 译注 16—17 世纪法国基督教新教徒。

金带来些许的增长额而已。”

这是没有赏金的奖赏。因此，“关心科学的优先权成为‘正常的’反应。”争夺优先权在整个科学历史中一再发生。伽利略不得不容忍他的学生的学生波纳凡土拉·卡瓦里埃里 (Bonaventura Cavalieri) 抢先发表抛物线轨迹的证明。德拉克引证伽利略愤怒的抗议时说道：“这项证明是他在更早的 40 年前就已开始的研究的成果，他至少应该享有首先发表的待遇。”

默顿发现，伊萨克·牛顿 (Isaac Newton) 和罗伯特·胡克 (Robert Hooke) 之间长时间的争论是最令人头疼的案例。他们间长达 10 年的争论是，他们两人中到底是谁首先证明物体的颜色决定于该物体表面反射的光的颜色是人眼能感觉的全部颜色中的某一特定部分的颜色。牛顿断言：“按照哲学原则没有什么东西比争论更想避免的，也没有哪种争论比这里发表的争论更愿意介入的。”他将《光学》一书的出版推迟到比他年纪更大的胡克逝世之后。因受到胡克关于引力的平方反比定律的早先声明的威胁，牛顿赶紧出版《原理》一书。

至少有 10 多幅肖像已被确认为是牛顿的肖像，但胡克的肖像一张也没有留下。所有的怀疑都指向当时任皇家学会主席的牛顿在滥用权力。

至于查尔斯·达尔文 (Charles Darwin)，他也曾表示“我十分痛恨为优先权而写作的思想，但我肯定也会因有人在我之前发表了 my 学说而恼火。”直到 20 年的最后一分钟他撰写他的伟大著作时才解脱这种烦恼——部分来自害怕预料到的必定会产生的争论。1858 年，他收到一位名叫阿尔弗莱德·拉塞尔·华莱士 (Alfred Russel Wallace) 的青年博物学家写的关于自然选择原理的精辟要点的信件。该信件来自遥远的摩鹿加岛，华莱士希望得到伟大的博物学家对他的思想的批评。

经过朋友们的安排，同时发表了华莱士的概要和达尔文的简明评述。达尔文的《物种起源》的全文于 1859 年赶快发表。结果是，华莱士成了这场争论中的达尔文冠军。

无论这些故事情节说的是关于什么人的事情，它们都说明了科学探索寻求的知识的客观性。在科学史中，同时发现事例的产生与其说是例外还不如说是一种规律。研究工作须要重复被验证，可以说这从发现的同时性中立即得到了验证。

出于人们的偏心，记录明确记载有关优先权的争论比这种情况出现的实际次数更少。在各个领域内的科学家，无论他们在哪里，常常会研究同一个重要问题。发现的同时性——例如反映在共享诺贝尔奖的人数上——也表明，即使含蓄地，各个领域中都有许多科学家参与合作。

这种合作从每一篇发表的文章后面附上的参考文献可以明显地看到。他们提供参考文章并向别人的工作的优先权表示感谢。通过一连串的索引逆向追溯，进行文献检索往往比沿常用的按作者索引的途径更有效得多。再加上利用出版商提供的索引，这种检索会更为便利，而非盈利的图书馆系统很早以前就已不再需要科学方面的图书馆管理员。对科学史学家和科学社会学家来说这种索引资料十分丰富。经济学家瓦西里·列昂捷夫 (Wassily W. Leontief) ^①——显示各门工业之间货物和服务流动的输入—输出矩阵 [见第 25 页插图] 的作者——在他的矩阵图解中描绘出交叉学科领域的变动和科学领域的流动以及知识的交流。

科学家们注意到从这些指数可以看出他们的竞争级别。史蒂芬·温伯格 (Steven Weinberg) 为他 1967 年的关于“电弱理论”的文章“是前半个世纪基本粒子物理学中被引用最频繁的文章”而感到自豪，甚至比他得知获得了诺贝尔奖的时候更为高兴。

^① 译注：列昂捷夫 (1906—1999 年) 是俄国出生的美国经济学家。他因创造表示社会生产体系中各部门间依赖关系的输入—输出分析法而获得 1973 年诺贝尔经济学奖。这种方法为世界银行、联合国和美国商业部等多方面用于经济和生产的计划和预报，以及研究经济增长对环境的影响等问题。

1	2	3	4	5	6	7	8	9
农业和渔业	食物及其同类产品	纺织品	服装	木材和木材制品	家具与装置	纸和有关的产品	印刷及出版	化工
1. 农业和渔业	10.86	15.70	2.16	0.02	0.19			
2. 食物及其同类产品	2.38	5.75	0.06	0.01	*			
3. 纺织品	0.06	*	1.30	3.88	*			
4. 服装	0.04	0.20	—	1.96	—			
5. 木材和木材制品	0.15	0.10	0.02	*	1.09			
6. 家具与装置	—	—	0.01	—	—			
7. 纸和有关的产品	*	0.52	0.08	0.02	*			
8. 印刷及出版	—	0.04	*	—	—			
9. 化工	0.83	1.48	0.80	0.14	0.03			
10. 石油和煤的产品	0.46	0.06	0.03	*	0.07			
11. 橡胶制品	0.12	0.01	0.01	0.02	0.01			
12. 皮革和皮革制品	—	—	*	0.05	*			

思想的谱系,正如所期望的,靠着老师和学生,说得更恰当一些是靠大师和其追随者们的一代代相传而延续形成的家族树。100 年以来,珍贵的诺贝尔奖最先授予第一代研究工作者,而有更多的奖项授予了诺贝尔奖获得者的学生,在物理学中尤其如此。

由于布里奇曼的研究路线加上他并不是一心一意地从事于该项研究,因而他没有带出很多研究生。可是他有一个名叫约翰·巴丁 (John Bardeen) 的后继者——是晶体管,现在已发展成计算机芯片的发明者之一——是获奖的凝聚态物理学领域继承人。有两代或三代后继者是常有的事。一个四代相继的谱系联结着量子力学奠基者之一的沃尔夫冈·泡利 (Wolfgang Pauli) 到拉比 (I. I. Rabi), 拉比在 20 世纪 30 年代将他的研究室带到哥伦比亚大学,建立了美国第一个新物理学中心,到在量子电动力学中建立量子力学的成熟表述而作出贡献的朱利安·许温格 (Jul-

ian Schwinger), 再到谢尔顿·格拉肖(Sheldon Glashow), 格拉肖试图将除宇宙范围的引力以外的其他所有作用力都纳入量子物理学。

一个未被公认的等级系统将科学的民主体制分成层次。科学研究工作的范围从仍旧从事于鉴别、分类和描述他们的对象扩展到完整地提出物理实在领域中的定量数学描述。

说明及证明

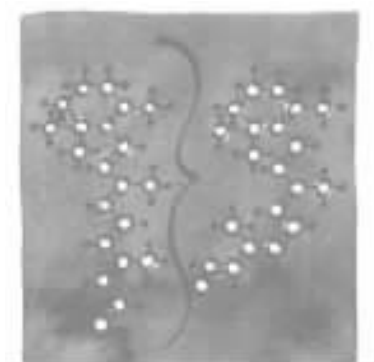
对某一领域中确凿可靠的观察结果提出“为什么”的问题要从作为观察基础的领域中去寻找答案。执著地要探询任何事物为什么会如此表现, 必然将探索者引导到物理学。人们必定会最终深入到被称做粒子物理学的物理学分支学科中, 粒子物理学寻求的是对物质—能量最终的性质的理解。最近一个世纪的研究在能量标尺上建立了这样一些固定点, 这些点标志发生物质和能量相互作用的主要事件的位置。物理学还不能回答这样的问题: 为什么能量标尺上出现这些点? 对这些描述的事件还没有找到解答, 只提出了问题。追究这些问题致使粒子物理学和宇宙学的时空物理学结合起来。对为什么是这样的问题的回答现在成为寻求它怎样会成为这个问题的。

在科学界中逻辑的等级体系引出了社会等级制度的问题。遗传分子的鉴别和基因的解码引起分子生物学这一新的学科从生物学中分裂出来。现在只有年轻的“整个生物体”的生物学家——动物学家和植物学家——从这个学科获得了有用的工具。整个学术界的损失是社会统治集团产生了政治分歧, 使个人和社会资金的公共投资一度减少。1992年凝聚态物理学家向参议院和众议院作证, 反对用80亿美元拨款建造粒子物理学家梦寐以求的超级超导对撞机。

逻辑等级体系是从对“还原论”的某些方面的异议而提出的。

用约翰·济慈 (John Keats) 的失望的怀旧语言来说,自然哲学要“分解彩虹”。科学家将公开声明,在他们的领域中他们遇到的奇迹不能归结到电子和光子。为减轻这种焦虑,美国自然历史博物馆动物行为部主任施奈拉 (T. C. Schneirla) 提出了“综合层次”的思想。施奈拉的对象是中美洲军蚁。在严格的行为层次上,他提出对“任何一种昆虫,或者任何一种比这方面更适用于比人类低级的动物,巢外经常发生的有组织的群体行为的最复杂的事例”的详尽解释。对神经生理学家和分子生物学家而言,施奈拉的工作对下一个综合层次提出了很多问题,并向他们指出应该到哪里去寻找答案。诚然,他们的工作是建立在物理化学的基础上,在更深的层次上是量子力学。

在哈佛,乔治·沃尔德 (George Wald) 在更深的层次上阐明了光是如何激发视觉的。一个光量子交出的能量正好用来释放在新陈代谢过程中储存在视色素中的能量。三维结构的视黄醛分子 [见本页插图] 突然从一种构形扭曲成为另一种构形,释放出的能量^①形成神经脉冲。在类似的情况中,能量也可以通过叶



^① 译注:原文用“能量”,不妥。应为释放出电子形成神经电脉冲,这是一种光电效应。

子的光合作用从太阳获得。沃尔德急切地要求从事动物整体的同事们知道“物理学和化学已经发展壮大成了生物学。”

真理和光

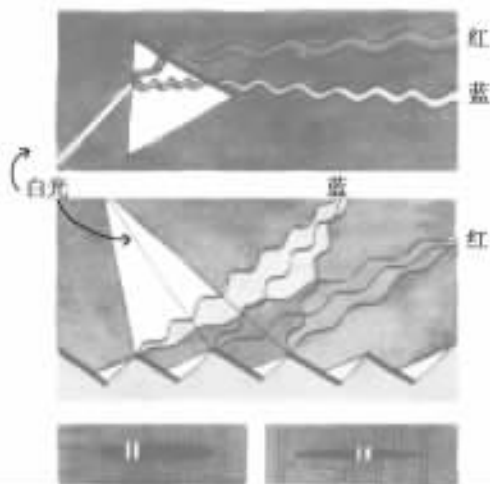
至少在物理学中对有关事物性质的每一个命题都要给予证明,这是因为物理学是所有科学的第一基础。这是我们知道的“确实知道的”东西最多的综合层次。

说到这种确实性,物理学家在电磁辐射谱中发现了许多确凿的证据。三棱镜将光的各种颜色分散开,显示出这些辐射频率扩展还不到一个八度[见第 29 页图]。设光速常数为已知,则频率反比于波长:每秒 300 000 千米(3×10^8 米, 3×10^{10} 厘米)除以每秒振动 10^6 次的频率得到的波长比除以每秒振动 10^{12} 次的频率得到的波长更长。从可见光谱中红色低频端往外,首先遇到的电磁辐射是红外波段的热波,再后面依靠电子技术得到雷达、电视、无线电话、调频和调幅波、还有特殊用途的频率更低的电磁波。从蓝色高频端向外,首先遇到紫外线,然后是 X 射线、 γ 射线,外面还有电子和其他原子粒子波的频率^①。

物质—能量互换的每一事件都可在波谱表中某个位置上表示出来。一个铁火炉辐射连续光谱,在可见光谱红色端以外,是不可见的“温暖”的红外光。将铁加热到气体状态,铁就辐射具有特征波长或频率的具有狭窄光谱带形式的不连续光谱。其他天然存在的 91 种元素的炽热蒸气各自辐射相应的不连续“线光谱”。在遥远的星体或激发实验室的化合物所发射的辐射中相对应光谱线的出现表明,该元素在地球上和天体中都存在着[见第 29 页图]。在点燃的蜡烛的灯芯附近,可以看到炽热的煤烟粒子形成的黄色火焰里面有氢燃烧时所发射的蓝色光。将一撮盐

^① 译注:电子和粒子的德布罗意波的波长虽然很短,但德布罗意波不是电磁波。

洒在本生灯上,灯会发出黄色火焰,这是钠的特征发射光谱,常见路灯的黄色就是钠的光谱色。



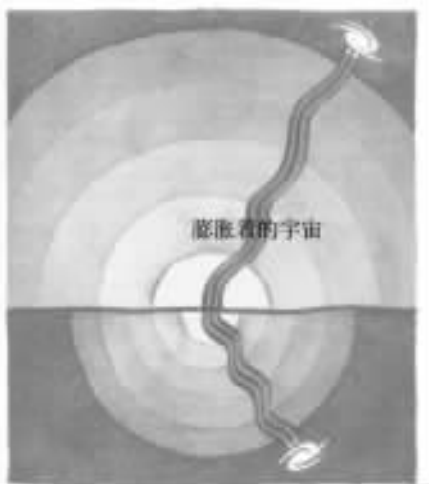
三棱镜将可见的“白”光分解成多色光。蓝色光比红色光受到的折射更强;短波长的光在通过三棱镜时速度减少较多。牛顿将这个差别归因于光粒子“重量”的差别,对于万有引力也应该有同样的差别。中图画出衍射光栅[见第31页]的截面,蓝色光从衍射光栅上反射的角度比红色光要小。图中角度被大大地夸大了。下图是钙光谱中的两条亮线,可以看到在宇宙光源光谱中,红移正比于到光源距离的这两条很弱的光谱线。

物理学家用被称为“科学仪器女王”的光谱仪将可见光和频率高与频率低的紫外线及红外线的几百万条光谱线编成目录。光谱学的证据表明最遥远的宇宙和地球一样,是由相同的化学元素组成,只是组成的比例不相同。从银河系以外的光源辐射的光谱线向红色端的移动随光源距离增加而增大的事实表明,宇宙正在膨胀之中,还可由此测量出宇宙的年龄。

地球上的化学元素的光谱线揭露了电子壳层的外层构造。壳层是用来比喻带负电的电子绕带正电的原子核旋转的层次结构的。光谱线也揭露了原子核内部的能量状态。光谱的红外区

域展现分子结构,可从红外光谱测量出组成分子的原子间的化学键的强度和角度,也揭示这些键在温度升高时的伸展、缠绕和重叠。

在 19 世纪末,光谱学已经证明短波长和高频率的辐射携带较高的能量。这些发现引发的危机促成了狭义相对论和量子论等新物理学的产生。新物理学将物质和能量、时间和空间融合在一起。氢元素的光谱线系提供了原子的量子化电子壳层结构中不同能量状态的第一个确凿证据。经过天文观察,发现太阳辐射的光谱线向光谱的红端移动这个事实验证了阿尔伯特·爱因斯坦的广义相对论中的关键性结论,由此形成了新的观察宇宙学。



红移测量宇宙的膨胀。时空的膨胀使通过其中的光的波长变长,从远距离星系发来的光谱线移向波长较长的红色端;星系距我们越远,红移越大[见第 177 页和第 185 页]。膨胀速率表现出随距离增加的原因是在早期较小的宇宙中无论距离长短都以同样的比例增大。在第 29 页插图的下图的右面小图中,钙光谱的两条亮线记录了从最远的星系来的最弱的光谱。

光谱学的精确性最终还要依赖于人类的手和眼的精确性。在研究用的光谱仪中,是用衍射光栅而不是用熟知的棱镜来分解

光的辐射能量。衍射光栅是表面上镀有反射金属材料的平面或球面玻璃,光被刻画在反射面上的平行线条——所以得到栅这个名称——所衍射[见第 29 页图]。光栅的分辨率——衍射得到的光谱线的狭窄和纤细的程度——是每英寸刻线的数目及刻线分布的精确度的函数。

直到第二次世界大战以后,当时电子反馈控制技术有了很大发展。在这以前光谱学的成就都应归功于亨利·奥古斯图·罗兰(Henry Augustus Rowland),他像伽利略那样赤手空拳地和物理实在较量。他的宝贵遗产是 1 000 块最完美的衍射光栅以及用这些光栅拍摄记录下来的 100 万条以上精确测定的光谱线的光谱学图表目录。

作为约翰·霍普金斯大学物理学奠基教授的罗兰在 1875 年时正是 27 岁。他为实现他的决心,迅速而又精确地完成了光谱学的基础工作。他决定制造一块标准光栅,在镜面上刻出 14 400 条 2 英寸长同样宽度和深度的刻线,这些刻线始终严格互相平行,在 5~6 英寸宽的光栅上的每两条线之间的间隔都要严格相等。为了取消会聚透镜并减少光的损失,他发明了自聚焦的球面光栅。

每英寸 14 400 条线

亨利·奥古斯图·罗兰有一次夸口说,他还从来没有见过一台他不是一看就能懂的机器[见第 32 页插图,爱金斯(Eakins)摄]。他知道要制造出能刻制完美光栅的完美“刻线机”必须要求关键的机械部件十分完美:导螺杆要在 5~6 英寸的行程中将金刚钻刻刀每一步准确地推进 1.44×10^{-4} (或 $1/14\,400$) 英寸。导螺杆上每英寸有 20 条螺纹,螺杆每旋转一周将刻线机上的金刚钻刻刀推进 $\frac{1}{20}$ 英寸,每一周分成 720 小格,每转动一格就推进



1.44×10^{-4} 英寸。

为了在 9 英寸长的导螺杆上磨制出完美的螺纹,罗兰发明了新型的机床。这是一根 11 英寸长的研磨用的外包螺母,它有均匀的螺纹。他将这只螺母纵向劈裂成 4 块。将它们包围安装在螺杆的四周,在用金刚砂和油的研磨过程中可以调节螺母的松紧,最后还要用抛光望远镜镜面用的红铁粉抛光。

“现在要研磨装在螺母中的螺杆”,罗兰写道,“使螺母沿整个螺杆前后运动……每 10 分钟将螺母掉个头,如此连续两个星期。”这里最精彩的是螺母和螺杆互相研磨,它们本身都磨损了。

手中有自制的完美的光栅,罗兰就着手编制太阳的光谱。他“在 1 个小时内做的工作相当于在这以前 3 年中所做工作的总和。”罗兰于 1898 年发表的太阳光谱波长的“草表”一直到 1928 年都被用作全世界的标准。威尔逊山天文台在修订这波长表时发现,必须改正的比值最多为 3×10^{-4} (或 $1/30\,000$)。罗兰还编制出所有已知元素各自的特征光谱线表。把这些谱线和太阳光

谱相比较,他所面临的问题是“[在太阳光谱中]没有计入的重要谱线”的数目很大。其中一些是尚未分离出来的未知元素,包括氦的谱线。到1901年他去世时为止,罗兰给他的后继者留下了内容丰富的记事本以及继续完成他的工作的工具。他的光栅还在全世界实验室和天文台中继续使用,约翰·霍普金斯物理系继续用他的刻线机的后代制造出光栅供应全世界。

为了达到更高的精度,现在天文学家转向用干涉仪。用罗兰的同时代人迈克尔孙(A. A. Michelson)完善的干涉仪证实了光速的不变性[见第91页图]。现在这种仪器又经过改进,配备了利用光电效应探测光信号的光电倍增管后,可以达到空间的深处[见第92页图]。用这些仪器能“看到”肉眼不能看见的宇宙源,相当于每次只有一个光子进入仪器。

到19世纪末,科学家揭露的电磁辐射波谱范围在更高和更低的频率方向上都延伸了许多个八度,在衍射光栅色散频带以外约30个八度。现代技术除了用光谱学方法之外,还可以通过其他许多种方法达到波谱的这些区域。星际空间的有机分子在无线电频率波段揭露了它们的存在。在同样低的能量范围中,可以通过核磁共振谱(应用于医学成像的一种现象)观察活细胞中进行的化学反应。在另一方面,在衍射光栅光谱高频端的外面,可以将探测X射线及 γ 射线光谱调谐到能够接收恒星和星系生命中激烈变动的事件的波段(例如,可以由超新星的残留物中的氦发射的X射线谱中的一条谱线探测出这类事件)。

高能光谱学^①

最好把高能物理学家的粒子加速器看成是一种光谱仪器,这是麻省理工学院的维克多·韦斯可夫(Victor F. Weiskopf)的比喻。

^① 译注:Spectroscopy一词在无线电波段常译成波谱学,在高能物理学中译成能谱学,本书中一律译成光谱学。

他曾担任过一届 CERN (欧洲原子核研究组织) 主席,这是在日内瓦附近的国际加速器实验室。按照粒子物理学的能量尺度——用“电子伏特”或 eV 表示——经典光谱学研究的几乎都是完好的原子,它的能量在这标尺的最底部。在氢原子中,单个质子组成的原子核束缚单个电子的最低能量或基态能量为 13.6 eV 。原子之间的作用,例如碳和氧燃烧每生成一个像二氧化碳一类的分子产生的能量通常在一个电子伏特到几个电子伏特范围内。

能量在较低的百万电子伏特 (MeV) 范围的加速器将光谱学引入恒星内部,这是被剥光了电子的激发原子核的光谱学。被激发到足够高能量的原子核不仅发射高能辐射的量子,也发射粒子——电子、中微子,甚至还有中子。

在 800 MeV 以及更高的能量,加速器将质子和中子这些组成原子核的粒子激发到它们的激发态。这些状态会产生多种不稳定的、质量不断增加的、衰变更快的粒子,20 世纪 50 年代出现的这许多粒子使物理学界惊喜不已。

这种混乱情况到 20 世纪 70 年代得到了解决,人们认识到质子和中子,无论是在正常状态还是在激发态,都是由更为基本的“夸克”所组成。当时加速器的能量已经达到 GeV ——G 来自希腊语中的“吉咖”(giga),美国用语表示 10 亿 (billion) ——范围。现代加速器的能量极限值为 $2\,000 \text{ GeV}$,1994 年第六种夸克短暂地显现了一下。

到现在,粒子加速器的高能光谱学以及由它们获得的知识极大地引起了物理学家的兴趣,也同样吸引了对物理实在提出为什么和怎么样以及从何处来等问题也有兴趣的人们。一旦这种认识广泛地流行起来,就会影响到其他知识领域。例如,物理学家对电子的了解迫使化学家接受第三代量子物理学家林耐斯·鲍林 (Linus Pauling) 对化学键的全新解释。从此化学家们丢弃了他们的实验手册并开始按照功能要求的规格来设计分子。无机物

晶体的 X 射线衍射为物理学家提供了这些结构中原子排列秩序的清晰图像。精通了 X 射线衍射的使用之后,又将它应用于分辨活细胞中大分子的三维结构。有名的 DNA 双螺旋结构的提出开创了分子生物学这一新学科。通过相互影响,其他领域反过来又给物理学提出了新问题。生命过程的可靠性以及诸如此类的许多问题都向量子力学提出挑战。

这种交叉学科的交流还没有得到很多成果,最多只是使科学中分离出专门化程度更高的分支学科。工具、技巧、概念体系、已有的知识、提出的新问题确实都推动专门化的发展。专门化的弊端也引发了“整体论”的抨击。这方面的意见通常忽略专门化必然带来的优点,并且忽略了随着各学科不断发展,往往最后又重新汇合到一起这一现象。例如,研究活细胞解剖学和生理学的细胞学和生物化学结合成为分子细胞生物学——实现了 30 年前莫诺德野心勃勃的宣言:“给生物学以至今还没有达到的概念上的完全统一。”粒子物理学和宇宙学的会合引发了追溯宇宙诞生时物质性质的探索。

建立宇宙学

除了研究前沿的专家以外,一般人没有必要被过分吹嘘的知识爆炸吓怕,而且专家也只是在他们自己的领域内才感觉到知识爆炸。每个领域中已经理解了的观念都可以压缩到人类头脑中。要知道,将各个科学学科的知识并将呈现的整体图像联系起来是每个人都能做得到的,这取决于引起的兴趣的大小。

要找出一个人在新世界中的关系需要对整体有一定程度的理解。从越分越细的客观知识——必须记住,这在许多方面都会遭遇到内在的不确定性——每个人都可以随心所欲地综合出各人自己的大千世界。宇宙学家只限于考虑经验可及的外部实在,并且科学家一致关心的是作为整体的各部分元素。不可避免地,

在每个人自己宇宙的 360 度的视界之外的东西和包括在其中的东西一样多,甚至更多。有人说,由于知识范围的扩展,使我们处处都会遇到我们不知道的东西。

在这本书中我建立了我的宇宙学,这不仅给不懂的人看,也给懂的人看,甚至给比我懂得更多的人看。我很幸运,碰巧走上了这个工作岗位。这使我,事实上也可以说是迫使我,接受到科学的终身教育。

在《科学美国人》创刊后的发行潮流中出现了一个高潮。到第二次世界大战结束时公众领悟到了科学在战争中所起的作用。原子弹将可怕的现实赋予新物理学的数学抽象。青霉素和真空冷冻干燥血浆拯救了送达军队前线救护站的 95% 的伤员的生命,这是生命科学的奇迹。于是科学成为紧要的公共事业。

富兰克林·罗斯福 (Franklin D. Roosevelt) 于 1944 年邀请科学研究和发展办公室主席,也是大学科学家战时动员的负责人范尼伐·布什 (Vannevar Bush) 策划一个机构,在即将到来的胜利之后联邦政府可以通过这个机构来支持国内大学里的科学研究工作。布什在报告《科学,没有止境的前沿》中建议设立由总统任命但在政府权限之外的委员会来管理的一项基金。它把联邦基金分配给各个科研项目。这一建议的法规于 1947 年送到哈里·杜鲁门 (Harry Truman) 的办公桌上。总统予以断然否决:“所建议的 [基金] 可能会脱离人民的控制,这意味着明显缺乏民主过程来保证其合理分配。”

最后,在 1948 年立法设立了国家科学基金会,该基金会由总统任命、向总统负责并接受一个顾问团建议的负责人管理。到 1953 年,支持科学基金的任务的拨款达到 400 万美元。那一年中,国防部和准军事的原子能委员会投资 100 万美元以上支持大学的科学研究,主要集中在物理科学方面。各大学中的生命科学,主要是他们的医学院,则从联邦政府的卫生部获得另外的

50 万美元。

成果的购买

从 1945 年以来,用于来自科学研究成果的有前途的产品——特别是武器和药物——的支出累计达到了 5 000 亿美元(以 1990 年的美元值计算)。在战后第一轮狂热地大量增加拨款的高潮中,联邦的军事和准军事机构以及卫生部等的拨款机构认为,他们的任务应包括长期基础研究的各个方面。从 1970 年起,这些机构发放的基金给了更穷得多的被称作“任务为方向”的项目。这些资金还支持那些不是给科学家的、短期的而不是长期的科学探索项目。

直到 20 世纪 80 年代,联邦政府年度开支的不到 7% 分配给国家科学基金会用于科学。在基金会被要求为提高美国大学的“工业竞争力”而建立“研究所”以后,它的预算升高到 10 亿美元左右。另外,该机构经过仔细审查基金申请的 $\frac{1}{4}$ 后,批准资助了一半申请。

在科学成果上的公用支出同时收回了所花金钱的全部所值。美国工业帝国地位的确立无论从哪一方面都不能不归功于高技术,为购买这些高技术花去国家开支 18.7 亿美元(1996 年的美元)专门用于长时期的冷战军备竞赛中的军事建设。

在制订联邦“科学政策”时,大学和科学团体有着共同的利害关系。他们没有抓住科学的普及教育这个机会,这是从公共基金中支出 5 000 亿美元的正当理由。为了更有效,他们准备就此独自向国会呼吁。

自由选题研究

但是,联邦基金还是不能资助所有自由选题的科学研究。在

这方面,值得一提的是植物科学——国防部或卫生部对它都没有兴趣——除了少数几个大学中植物学还比较好并得到有限的资助以外,总的来说已经衰落了。

在另一方面,美国的科学依靠庞大数量的基金得以繁荣。这在年复一年的诺贝尔奖记分牌上得到了证明。然而,经过了半个世纪以后,联邦政府承担的用于资助科学的总数只是政府用来购买科学成果的年度支出的一小部分。目前,这一基金,包括国家对人和材料资源的投资还在减少。

对于有较大风险的开放的自由选题科学研究来说,这种减少已部分被市场激励的工业集资所补偿。市场的入侵尤其对生命科学的研究造成了损害。整个大学的医学院现在都变得好像医药公司的附属机构。他们在遵守某些协议的前提下获得大量的基金,这些协议对发表和公开交流要求约束或强制约束,而发表和交流是科学中有竞争的合作的生命。以前奉献给社会的知识财富现在却成了私有财产。研究课题的选定取决于纳斯达克(NASDAQ)指数的变动。最有才能的科学家——特别是正准备他们首次探险的青年科学家们——要做他们真正想做的事变得越来越困难了。

《科学美国人》在这几十年中报道了许多向公众证明科学进步的新技术。从1948年我们报道了贝尔电话实验室中第一次演示“晶体管”开始,杂志一直追踪着电子学的固体化革命及其对各种经济活动的影响。最新版本的计算机芯片中有几百万晶体管和相应的电路协同运行。现在,根据列昂捷夫的工业部门间物流表在计算机的能力范围内对输入的数据进行分析,于1960年作出推测,预料更强大的计算机正在使办事人员和中级管理人员的数量减少。

计算机还只是故事的一部分。在计算机输入端配上灵敏的电子传感器,在计算机输出端配备机电传动装置,自动的生产逐

渐取代“加工”工业中的人。在 1990 年,石油精炼工业雇用的“生产工人”或蓝领工人的数目只是 1950 年雇用的一半,而在这同一时期中产量翻了 3 倍。钢铁工业中生产人员减少了一半,但却生产出同样的锭吨位。美国从事生产的劳动力的百分比从 1950 年大于 1/3 到 1990 年小于 20%。白领专业人员取代了他们。

1950 年到 1990 年间钢铁生产的不景气——在总产量翻了 4 倍的经济中——表明新物理学另一方面的影响。根据对物质内部结构的认识制造出的新材料取代了传统使用的材料。1960 年中,有机塑料在批量上超过了钢铁;10 年之后在吨位上也超过了。用细微的碳纤维加强的陶瓷——按照古代在砖块中加入稻草的模式——制成的涡轮机叶片能经受更猛烈的加热。光学玻璃的纤维——贝尔实验室新近的另一成果——开始在通信系统中取代铜,在光导纤维中输送光子来代替电子。

意见一致的习惯

1952 年有一期《科学美国人》专辑中报道了这次正在发生的科学革命的经济和社会后果。包括白领和蓝领都在内的劳动力的重组以及付给劳动者报酬的减少,引起现在对“中产阶级”福利的政治上的关心,所谓中产阶级现在指较高收入的工薪阶层。这个国家和已工业化世界的其余国家面临的问题是:还没有就无工作经济的目的、价值和公平提供安全保障的机制。

关于军备竞赛和军备控制的问题是这些年来公众给予极大关注的焦点,国家在这个问题上要感谢科学界形成意见一致的习惯。这被大众传播媒体发表的许多报道所误导。因为媒体以同样的篇幅报道一致的意见和不同的意见甚至狂人的言论,这些不同的意见往往是争论中某一方面经济利益的代言人。为了平衡,我们在《科学美国人》中为一致的意见保留了篇幅。

这样一来外行的公众，包括他们在国会中的代表，对从权威方面得来的军备竞赛和军备控制的秘密技术问题都有了自己独立的见解，就好像他们都是受过官方忠贞审查的“国防知识分子”一样得到了有关的所有情报。在 20 世纪 60 年代我们的作者对我们国家的“核威慑”从报复性武器到第一次打击武器的不祥转变作了公开的记录。他们用无情的数字揭露发疯似地积聚起来的核炸药的吨位数，这在现在国际无政府主义占主导地位的状态中，会导致因丧失相互信任所引起的文明被毁灭的危机长期存在。这些文章也在我们杂志的俄语版《В мире науки》中发表了，这说明形成科学界意见一致的习惯是国际性的。

从第二期中亚马逊边远地区的文章开始，新的《科学美国人》始终关注着世界未来的重要问题——人口、环境和发展。我一直期望看到在美国公共政策中重视在 1955 年的杂志中第一次发表的“人口过渡”，即人口的出生率和死亡率比例的转变的概念。

- a) 从高死亡率和高出生率以及预期寿命小于 30 岁条件下的接近于人口零增长开始。
- b) 经过人口爆炸。
- c) 再回到低死亡率和低出生率以及预期寿命超过 70 岁条件下的人口近于零的增长。

12.5 亿人口的工业化国家已经达到了零增长。如果一切都顺利，各种指标都表明到 21 世纪末，世界其余部分的人口也将完成这种过渡，那时人口将停止增长。然而，在公众的理解中，人口爆炸的继续会像马尔萨斯 (Tomas Robert Malthus) ^①所说的那样：人口增长的结果会引起相互残杀的战争从而造成自我毁灭。这种观点仍在决定包括我们国家在内的一些国家的对外政策。

^① 译注：马尔萨斯 (1766—1834 年)，英国经济学家和人口统计学家，他提出的理论是人口增长总是超过食物的供应，如果对生育不作严格限制，则人类进步就受到阻碍。这种理论被称为马尔萨斯主义。

现在国际公约中也承认了 30 年前《科学美国人》的作者们就已开始告诉他们的读者的：矿物的燃烧是工业文明带给环境的主要危害并要为此付出代价。自 1950 年以来，能量的消耗翻了 4 倍，因人类活动产生的二氧化碳占地球大气周转量的 25% 以上。为使世界其余部分的人口过渡到零增长所必需的再翻 4 倍的能量供应是不可能从矿物燃料得到保证的。为了缓解国际上的忧虑，我们对其余主要的能源——包括太阳能的光生伏特转化以及提取储藏在海洋中的太阳能，也不排斥原子核能——都给我们的读者作出了及时的评价。引用英国分子生物学家梅达沃 (P. B. Medawar) 的话来说：“根据定义，技术引起的问题必须由技术来解决。”



在 1953 年 9 月号的《科学美国人》中，沃伦·韦弗提出希望，

“懂得并珍视科学研究工作的自由民主的公民会支持科学，并理解对科学的支持会繁荣科学，带来利益、力量和美，服务于所有人民。”作为从 1932 年起洛克菲勒基金会科学的财务主管，韦弗管理主要的基金——每年数百万美元——在第二次世界大战以前这补贴了一些大学的自然科学学科的预算。9 月号这一期是讨论“科学的基本问题”。韦弗关心的，也是编辑关心的问题是和当时正在增长的联邦政府巨大开支正转向支持国内大学的科学研究工作这个情况有关。科学家所做的研究工作的报道充满了《科学美国人》的篇幅，并将读者吸引到这些报告中。我希望和本书的读者共享的这些知识都应归功于这些作者。

科学家学到些什么

1948 年 5 月号《科学美国人》的封面上的图画是用魔幻现实主义的手法描绘贝尔电话实验室的戴维孙 (C. J. Davisson) 和革末 (L. H. Germer) 于 1925 年所用的实验仪器 [见第 41 页插图]。他们证明了电子具有波长，即粒子也具有波动性。他们的实验使对称性完美：阿尔伯特·爱因斯坦于 1905 年在关于普朗克量子的文章中解释了光电效应，表明辐射波具有粒子性。

《科学美国人》从 5 月号的这一期开始，在以后的 40 年中一直全面报道在认识自然方面首创性的重大进展。诸如量子电动力学在认识物理世界方面的成就及其整个历史。据说量子电动力学是无法理解的，即使对于那些全身心投入研究它的人也是如此。《科学美国人》的编辑被吓怕了，所以在杂志的第二期中请一位作者来说这样的话，困难不在于理论。帕赛·布里奇曼给出了正确的诊断：“几百年来企图在我们自己的头脑中找到所需要的外部世界的模式已令人失望地被证明失败了……我们只能把经验看作是外来的并且只能努力使我们的思想去符合它。”

到 20 世纪中叶，量子电动力学深入研究宇宙的微小区域的

物理学——我们身边的“自然界”——这里原子是完整的或者近于完整的，这里的原子组成包括令人神往的会产生生命现象的各种化合物。20 世纪的后半个世纪，量子电动力学研究的对象包括除引力和广义相对论以外的所有物理实在。量子理论加上广义相对论对现代观察和实验所及的所有物理实在作出了近乎完全统一的解释。

因此，在以下 3 章里将要知道，在这些强有力的观念指引下的探索给出了在本章开头提到的两个问题中第一个问题的现代的答案。

接下来的几章中讨论第二个更热门的问题，就是怎样会产生我们人类以及我们究竟是谁。弗朗西斯·克里克 (Francis H. C. Crick) 在 1954 年 10 月号的《科学美国人》中详细描述了的 DNA，即脱氧核糖核酸的双螺旋结构无疑比起那后半世纪中任何其他发现都更多地引起公众的关注。这个结构复杂的分子将一个世纪以前格里高尔·孟德尔 (Gregor Mendel) 假设的抽象的遗传单元物质化了。于是认识分子解剖学和活细胞生理学的道路开通了，从而认识生命的起源、进化谱系的分支、胚胎发育中形态的发生以及大脑中意识的产生。

认识地球上及宇宙中出现生命的地方的中心问题是收集从绘制海底地形图到探索太阳系所得到的资料。对大陆漂移和地壳板块构造——认识到这个行星因其可塑性的内部周转对流，不断改变地壳上的形貌而在地质上始终保持着活力——的了解有助于说明地球上生命胜利的原因。大约在 30 亿年前，地球上的生命只存在于海洋中并且只有单细胞生物。到远古时代，这些生物占据了地球的硬壳和水圈及大气圈，共同形成了生物圈，反过来对地质又产生很大的作用。人们认为现在各种生物已经发展到所有时代的顶峰——现在就是这种时代，在这个时代中人类进入了进化的监护之中。

要探究人类的身份为什么在自然界中显得如此突出,现在就要从类人猿灵长类动物在 250 万年以前开始制造工具以作为适应环境的策略这一发现着手。在几千年中——正如布里奇曼所说,我们是“从我们自己的头脑内部”来寻找外部世界需要的模式——我们期望从外部世界,从天空和更遥远的地方寻求我们存在的理由和目的。对我们的进化的新认识将目的之自然所在地放到人类的头脑中。现在可以看到,人类存在的目的已经历了进化,从制造工具的灵长类动物头脑中萌发的目的开始到现在。这种进化目前正在压力作用下加速以适应由于最近一个世纪中人类在探求客观知识方面的进展而带来的人类生存条件的根本改变。对客观知识的探求从会制造工具的动物就已开始了。

第二章

知识基础的革命

有着对认识的热情。

阿尔伯特·爱因斯坦

19⁵⁰年,阿尔伯特·爱因斯坦在他70岁时写的一篇有关他的生活和工作的回忆文章中写道:

“没有这种热情就没有数学,也没有自然科学。时间加上认识的热情导致一种幻觉,即人类只要通过纯粹的思考而不需要任何经验基础——简而言之,就是通过形而上学——就能够正确地认识客观世界。我认为每一个真正的理论家都是某种类型驯服的形而上学者,无论他怎样把自己想象为一个多么纯粹的‘实证主义者’。”

“形而上学者认为逻辑上简单也是实在。驯服的形而上学者相信并不是所有逻辑上简单的东西都包含在经验的实在中,但是可以从建立于极大简单性前提上的概念体系的基础上理解全部感觉经验。”

在另一段文字中爱因斯坦引证牛顿世界体系作为建立在这种前提上的一个例子:

本质上有两种定律:

1. 运动定律；2. 力或势能的表达式。

爱因斯坦并没有指明牛顿将这些前提安放在时间空间是绝对这一更深刻的前提上，这可能是他认为这和日常经验一样不需要特别说明。但是牛顿把这一点写明了：

绝对空间：其自身特性与一切外在事物无关，处处均匀，永不移动。又称广延^①。

绝对的、真实的和数学的时间，由其特性决定，自身均匀地流逝，与一切外在的事物无关，又名延续。

爱因斯坦世界体系一开始就把这两个前提弃置一边。这是想要进入爱因斯坦世界体系的人遇到的第一个困难。绝对时间承认同时性，即使穿过时区也没关系。绝对空间允许存在绝对运动，这种运动是大多数人从这里走到那里时都经验到的。时间和空间表明事情发生在什么时间及什么地点。这两个绝对在牛顿物理学之外也同样存在；它们是事件的舞台。而在爱因斯坦宇宙中，时间和空间是紧密地联系着的物理变量。“从预先规定的超越物质和能量的对立的完美，”用宇宙学家约翰·惠勒（John A. Wheeler）的话来说，爱因斯坦将时间和空间变换为“时空……积极地参与这一竞争的新的动力学统一体。”

只在极端的情况下一个人才可能在熟悉的身边世界中经验到爱因斯坦狭义相对论所说的四维时空物质—能量连续统中的情形。例如，当物理学家在高能粒子加速器中将电子的速度提升到光速的99.9999%时，电子质量增加到其40 000倍的情况。另一方面，可以完全忽略不计驾驶汽车的人将汽车加速到每小时100千米时汽车质量 1.5×10^{-8} 克的增加。对于几乎所有的实用目的，狭义相对论对牛顿定律的修正都可忽略不计，即使如此，这

^① 译注：牛顿的这两段关于绝对时间和绝对空间文字的中译文取自王克迪译本：《自然哲学之数学原理》，2001年版，10~11页。陕西人民出版社、武汉人民出版社。但该书没有“又称广延”一句。

还是使世界变得比它在 20 世纪初的样子更为有趣得多。

绝对空间使牛顿有可能认定绝对静止的状态。由此提出了使物体从静止开始运动的“力的表述”的必要性。在这必要性的后面是另一个前提：结果是有原因的。因为这如此明显，所以牛顿不必要提起它。

量子电动力学也将经典物理学的某些前提抛弃了，特别是这样一个前提：新物理学不需要原因和结果。它证明物理世界自发地偶然发生。事件是统计倾向的结果，概率决定于事先已定的条件，从来没有偶然性不起作用的时候。

为奠定量子力学基础作出关键性的贡献的爱因斯坦却不能接受这种思想。他坚持自己的信念，即宇宙是由把过去、现在和将来联系起来，以及把部分和整体联系起来的定律所支配的，而科学的任务就是发现这种定律。这表示他在思想深处是一个经典物理学家，或许是一个不彻底的“驯服的形而上学者”。在他的支持者们最后交流观点时，他同情牛顿，并表示他对牛顿的歉意：

牛顿，请原谅我，你找到了你所在的时代的唯一道路，这恰恰是一个具有最高思想和创造力的人所可能做到的。你创造的概念甚至到今天仍旧指引着我们物理学的思想，如果我们的目标是更深刻地认识各种关系，就会知道这些思想必须被远离直接经验范畴的其他思想所代替。

运动定律

牛顿运动三定律中的第一定律——爱因斯坦作为“运动定律”来引用——从静止的物体开始——它保持静止到受到力的作用为止。当物体受到力的作用时，开始作加速运动并在力的作用下继续加速运动。力撤去以后，该物体以加速获得的速度和方向作匀速运动，直到它受到另外的力作用为止。

牛顿第二运动定律被爱因斯坦称作“力的表达式”。力等于物体的质量乘以使物体从静止开始运动或偏离原来的运动的加速度。

第三定律是静止或运动中的物体的“惯性”的表达。它等于使它加速的力而方向相反,并随力的作用产生的加速度的增加而增加。对于绝对空间中的运动,绝对时间测度运动的速率及其改变率,从而测量力和惯性的大小^①。

牛顿用这些最低限度的原理将地球上的和天体的力学统一起来。虽然当时也有一些关于绝对时间和绝对空间的争论,从他自己一代人开始直到在他以后的世世代代,但他的“建立在最大简单性的前提上的概念体系”包容了整个物理世界。同样的运动定律支配了大家熟悉的苹果落地和地球以及当时知道的其他 5 大行星绕太阳的轨道运动。即使在现代,牛顿力学仍旧是工业文明所有包含“有重量的”物体的技术的基础,如打桩机和蒸汽涡轮机、摆钟和上发条的表。如爱因斯坦所说的:在许多年代中它还包括了“力学明显无能为力的领域”,如热力学研究的热的理论。从其中还生长出一些分支学科,如气体动力学,它处理牛顿没有预料到的偶然性。在天体的领域中,它满意地支配着太阳系的运动,直到人们真正做到飞离地球探索太阳系时才需作一些小小的修正。

没有人不知道牛顿生于伽利略逝世的 1642 年。作为他的伟大业绩的准备,牛顿已知道伽利略的加速的和匀速的运动的实验演示。牛顿也已得知约翰尼斯·开普勒 (Johannes Kepler) 的研究结果。作为始终坚定不移的伽利略的同时代人,开普勒从丹麦天文学家第谷·布拉赫 (Tycho Brahe) 用肉眼所做的高精确度的观

① 译注:作者对牛顿第三定律的表述不正确。第三定律是作用与反作用定律:对一物体施加作用力时必有一个大小相等、方向相反的反作用力作用于施力物体上。第三定律不涉及惯性。

察数据中发现了行星运动的 3 条定律。第一条定律是将地球和当时知道的另外 5 个行星放在椭圆轨道上,从而开普勒将太阳从新的哥白尼宇宙中心这个暂时的显赫位置移到行星椭圆轨道的一直在动的两个焦点中的一个,这是一个不确定的位置。他的第二定律是,从在轨道上运动的行星到太阳联结的直线“在相等的时间内扫过相等的面积。”这是由于行星在轨道上靠近太阳的地方运行较快而在远离太阳时运行较慢[见第 15 页图]。牛顿从这发现了天体力学和地球上的力学之间有很强的相关性。开普勒的第二定律表明行星运动中的角动量守恒——从花样滑冰运动员把她的双臂收拢靠近身边以使自旋加快可以体会出角动量守恒来。

牛顿心中一定对这些先行者十分熟悉,他在给罗伯特·胡克的信中写道:“我之所以能看得更远是因为我站在巨人的肩上。”他讨厌的胡克[见第 50 页]是一个侏儒。

在他的祖母照看下的孤独的乡村童年时期,牛顿可以静心地思考像日出和日落的位置在地平线上季节性地迁移这类问题。他通过在祖母房间里刻画投射在地板和墙上的窗户的影子来跟踪太阳的运动。19 岁时,在剑桥大学的三一学院,牛顿受到卢卡斯数学教授艾萨克·巴罗(Isaac Barrow)的注意。巴罗吸收这个有希望的学生参加新的世界体系和光学方面的研究工作。

“……答案十分接近”

1665 年,在黑死病威胁着伦敦并向剑桥逼近时,牛顿躲避到童年时代居住的村庄。在这里隐居的 18 个月期间,他完成了他毕生工作的大部分。他发明了微分和积分,使得像运动变量那样连续变化的增量的计算成为可能。他应用这些方法“比较了使月球保持在其轨道上的必需的力和地球表面处的引力,发现两者的答案十分相近。”他有时间去考虑光学中色差的问题,通过一块

不完美的透镜去观察物体的边缘,看到边缘呈现出淡淡的虹彩而变模糊。他推测这一定是不同颜色的光通过透镜时产生不同的折射角所致。为了避免天文观察中出现这个问题,他发明了反射望远镜。

当他回到剑桥时,艾萨克·巴罗从教授职位上退休了,从而牛顿可以接任这一席位。在他 26 岁时,牛顿获得一个稳定的学术职位,这使他可以进行他的学术研究。不久以后,他向皇家学会呈送他的反射望远镜模型和第一部著作《光 and 色的新理论》。牛顿立即被选为会员,加入对他的工作有最大兴趣的同时代人的团体。从此以后,世界上的大型光学望远镜都是反射式的,按照“牛顿式的”光路进入人眼或照相机。

他不久就卷入了与罗伯特·胡克和其他人的有关光学研究工作的优先权的争论,这使他被人看作是爱争论的没有自信的作者。直到这同一个胡克发表了证明引力随两个物体间距离平方的增加而减弱的计算以后,牛顿才开始写他的里程碑式的著作《自然哲学之数学原理》(Philosophiae naturalis principia mathematica,当时拉丁文仍是学术的通用语言),这本书于 1687 年出版。牛顿在这本书里公布了他在避难的 18 个月中的研究结果:他的 3 条运动定律和万有引力定律。他也提出了从他的第三运动定律导出的动量守恒定律:两碰撞物体的质量和速度乘积的总和在碰撞前后保持不变,只是在两者之间的分配可能会有所改变。

引力定律

牛顿设想引力是宇宙中所有物体之间的一种作用力,在地球上的物体和地球之间,在月球和地球之间,在地球和太阳之间。就是这种力使行星偏离他的第一定律要求的匀速直线运动而不断向太阳掉落下去。由此,行星的轨道是两种运动合成的结果。它们的匀速直线运动被引力加速度所抵消(地球向着离它 150 百

万千米的太阳沿轨道下落，离开匀速运动的直线轨迹每天大约200万千米）。

开普勒第三定律断言，每个行星绕太阳运行一周时间的平方正比于行星到太阳平均距离的立方。牛顿的《原理》给出了各个情况中它们受到的使它们束缚在太阳周围的力的强度。这个力正比于太阳质量和该行星质量的乘积除以该行星到太阳距离的平方。物体的质量于是就有两种功能。在牛顿第二^①运动定律中，质量量度物体的惯性或者对力的阻挠。在引力定律中，质量量度该物体吸引其他物体的力，也是被其他物体吸引的力。在精确度的极限以内，牛顿可以用单摆实验予以确证，他认定惯性质量和引力质量近于相等或“等价”。这个等价性只会使其二重性更加难解。

他确信引力是真实的力并对这个概念十分得意，牛顿无法用像惯性力那样大家熟悉的力的经验对它作出解释：一个物体作用于另一物体并满足动量守恒。对于引力却没有这种“作用”的证据，用牛顿的话来说：

引力是物质固有的、内在的和本质的，所以一个物体可以通过真空超距作用于一定距离外的另一个物体，而不需要任何其他要靠它并通过它来传递作用和力的媒介，对我来说这是如此荒谬，以致我相信没有一个在哲学问题上具有足够思考能力的人会永久地陷入这个问题。

对于超距作用的荒谬牛顿并没有作出任何说明。然而他曾考虑过如何测定每单位质量引力的大小。他的计算表明这个“引力常数”一定是一个难以测量的小数。

这个结论给下一个世纪中的后继者提出了挑战。亨利·卡文迪什(Henry Cavendish)于1798年得到了最接近于现在公

^① 译注：原文为“第三”，有误。应为“第二”。

认的引力常数的数值。他将两个小铅球固定在扭秤平衡杆的两端,将两个大铅球各靠近一个小铅球使扭秤偏转,通过测量这个偏转数值他求出了引力常数[见第 187 页图]。这个数值确实非常小: 6.754×10^{-8} 达因厘米²克⁻²①——比起使 1 克物体在 1 秒钟内加速到每秒 1 厘米的速度的 1 达因力来是一个可忽略的极小的力。1994 年测出这个数值为 $6.672 \times 10^{-8} \pm 0.01$ 达因厘米²克⁻²。

与牛顿同时代人的哲学家对他的绝对时间和空间有不同看法。贝克莱主教(Bishop Berkeley)把它们当做人类知觉主观性的元素。哥特弗里德·莱布尼兹(Gottfried Leibniz),牛顿的发明微积分的竞争者,把时间和空间看成只不过是事件序列和物质分布的函数,并非不依赖于物理实在而客观存在。

牛顿一定知道伽利略指出的:在运动物体本身的参照系内,匀速运动和静止状态没有区别。在第一运动定律中隐含着伽利略相对性原理。没有这一原理,所有 3 条定律就会从它们系泊的绝对空间中脱离开去。

为使这个不明确的前提条件得到满足,牛顿想找到一个在宇宙中运动可以参照的绝对静止的物理位置。它不可能是太阳。他知道行星和太阳互相吸引,一定将太阳向这边和向那边拉来拉去。牛顿通过计算将宇宙不动的中心安放在太阳旁边,当行星穿过该中心拖拉太阳时几乎就在太阳内部。

牛顿对宇宙中绝对静止的位置仔细思考了许多年。在他的生命即将终结时,牛顿在《原理》一书中加上一个附录。他在附录中将绝对的时间和空间归于至高无上的上帝的无所不在。

到下一个世纪,《原理》成为经典物理学。牛顿提供了一个大

① 译注:引力常数的 CGS 制单位应为厘米³秒⁻²克⁻¹或达因厘米²克⁻²。原文误写为达因。质量都是 1 克的两个微小物体相距 1 厘米时的相互吸引力为 6.754×10^{-8} 达因。

纲,后继者可以根据这个大纲说明他们从事研究的物理世界的一切。运动定律描写支配事件系列的秩序,保证效果跟随着原因。根据已有的定律并应用微积分的算法,机械技术在以后的两个世纪中进入加速发展的时期。

牛顿以后的伟大的机械师们发现,从牛顿第二定律导出的能量——做功的能力——的概念特别有用。一个物体在力的作用下得到加速度而从静止到运动,获得了“动”能;它等于物体的惯性质量乘以该物体被加速后得到的速度的平方所得的数值的一半。在引力场中的物体,即使在静止状态中也具有能量。这是正比于它的惯性质量的“势”能。当物体下落,或者在力的作用下运动起来,势能就转换成动能。在受到冲击或像被一根曲轴推动那样使运动方向改变时,一部分动能转移到另外的物体上,但总能量仍保持不变。在力学中这就是“做了功”。一部分能量在碰撞过程中或通过摩擦转换为热——从而消散到广大世界中,正如 19 世纪中所做的将运动定律推广到热力学。

有了各种系统中能量因摩擦而损失的经验,机械师们很早就对能量守恒有了深刻的认识。这条定律否定了永动机的幻想。某种外来能源必须提供因摩擦产生热所引起的能量损失。从空中产生功的愿望被指责为荒谬,定律要求能量的消耗必须超过所做的功。



机械师们不久就知道能量变换也可以部分地反向进行，热变为运动。在飞球调节器 [见第 53 页插图] 中，詹姆斯·瓦特 (James Watt) 利用角动量守恒原理使蒸汽机自动调节。机器提供了宇宙的决定论设计的微缩模型。皮埃尔—西蒙·拉普拉斯 (Pierre-Simon Laplace) 在 1799—1825 年间出版的五卷浩瀚巨著《天体力学》(Mécanique céleste, 意思实际上就是天上的机器) 中对天体和地球上的秩序的信念有着最伟大的表述：

我们必须将宇宙现在的状态看作是先前的状态的结果，并把它看作是以后的状态的原因。假如在某个时刻出现一种智能，它能认识使自然界活跃起来的所有的力以及组成自然界的各种存在的状况……——它将宇宙中最大的物体和最小的原子的运动都包括在同样的公式中，对它来说没有什么东西是不确定的，未来和过去一样都呈现在它的眼中。

一切都平静无事，拉普拉斯和牛顿的宇宙看上去就像一个荒芜的世界。牛顿还通过他在学识上其他方面的伟大贡献为他的后继者指明，支配机械的宇宙的定律如何包括丰富的普通经验的世界。就在《光学》中他说明了光可传递的全部颜色可以通过折射或选择反射分解以后进入眼睛，引起色视觉。他将一块玻璃三棱镜插入一束太阳光，使太阳光色散，从而得到他所说的“光谱”。他证明了单色光通过第二个三棱镜不再引起进一步色散。然后他又证明了色散得到的色光反过来通过第二个三棱镜后又组合成白光。

对于白光通过三棱镜产生色散的现象，牛顿作出和他的力学协调一致的解释。他提出光像一束很小的物质粒子流。他引用光束沿直线传播以及光投射出明锐边缘的阴影作为证据。如果光有质量，则一束星光会被太阳质量产生的引力所吸引。经过推算后，牛顿预言靠近太阳的恒星的表观位置必定有半弧秒的偏

移。这个预言被证实了——是从检验广义相对论的相应建议附带得到的。

为了证实他的光的机械模型，牛顿得知第一个测量光的速度
的设想并得到可信的结果时感到高兴。荷兰天文学家奥劳夫·
罗麦 (Olauf Roemer) 将木星与地球距离增大时发生的一个木星卫
星蚀和木星与地球相互接近时发生的木星卫星蚀的时间差进行
比较^① [见第 89 页图]。不论木星是接近还是远离地球，星蚀开
始和结束的时间间隔应该相等。使人惊奇的是，在木星与地球远
离时，星蚀开始和结束的时间间隔变长，这是由于光将星蚀结束
的消息穿过太阳系中较长的距离传给我们，因此需要较长的时
间。罗麦对光速进行了估算，他得到近似于每秒 200 000 千米这
个相当不错的结果。当时在计时方面还有许多不可靠的因素，但
它与现在公认的每秒 300 000 千米的速度相差不远。可测量的
有限速度明显地将光和引力的即时超距作用区别开来。

有了奠基者乞灵于光的粒子说的榜样，18 世纪和 19 世纪的
物理学家求助于各种各样的假定的物质，将力学的原则用到其他
知识的领域中。燃素就是一种在火焰中释放的假设物质，这一概
念一直沿用到用氧解释燃烧来代替它为止。热质曾经在一段时
间内被当作会不断自动减少的热物质。两种不同的流体——
“玻璃质”和玻璃用丝摩擦联系在一起，“树脂质”和琥珀用法
兰绒摩擦相联系——被用来解释静电荷间的吸引和排斥。本杰
明·富兰克林 (Benjamin Franklin) 提出了简单的电流概念，虽然
我们今天已经知道电流是被负电极排斥的电子流，但我们还是说
电流从“正极”流到“负极”。这样一类东西可比作脚手架，可以
暂时使用一下，直到它被一脚踢开时为止，或者也可以只把它当
作为一种比喻。

① 译注：原书对罗麦测量光速的原理表述不很正确，已经译者改正。

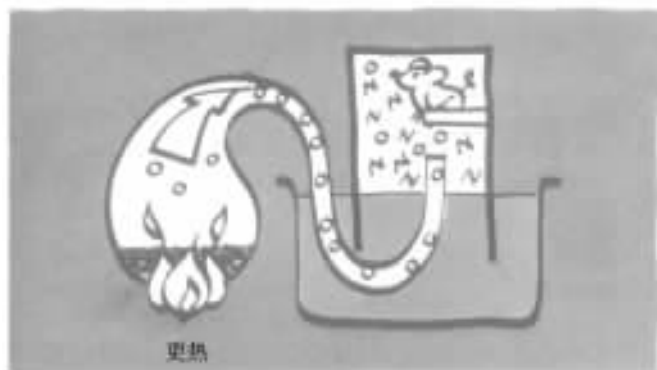
燃素与化学

这类假设可用来解释某些现象的第一种物质就是燃素。这种短命的物质是 18 世纪的范式。燃素从木材中被烧“出来”，留下灰烬。朱砂被加热后燃素离开而留下汞。在密闭的容器中火焰很快熄灭是因为里面的空气吸收燃素的能力有限。

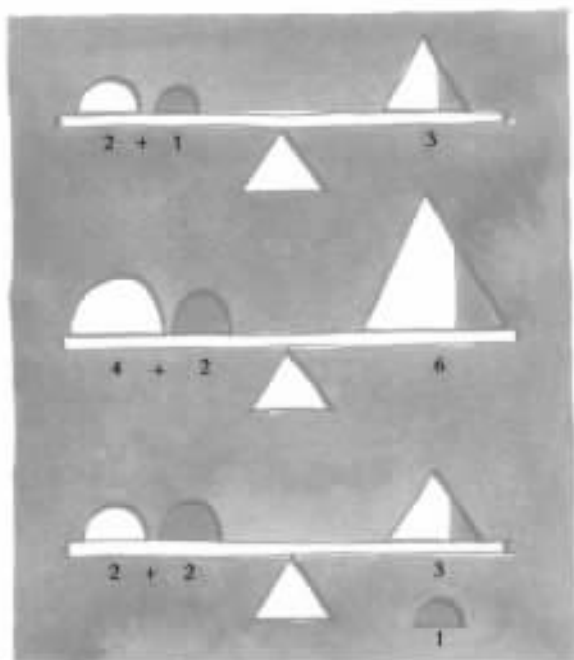
约瑟夫·普里斯特利 (Joseph Priestley) 于 1774 年发现，蜡烛在从朱砂中释放出来的燃素中燃烧更为明亮。他实际上已经分离出了氧。但为了忠于这种范式，他称之为“失去燃素的”空气。

安东·拉瓦锡 (Antoine Lavoisier) 把氧当作一种物质并给它命名。他认识到燃烧是氧和碳或氢化合放出能量的作用。他知道氧和汞化合放出较少能量，生成朱砂 [见第 57 页图]。燃素范式就此让位于新的化学科学。

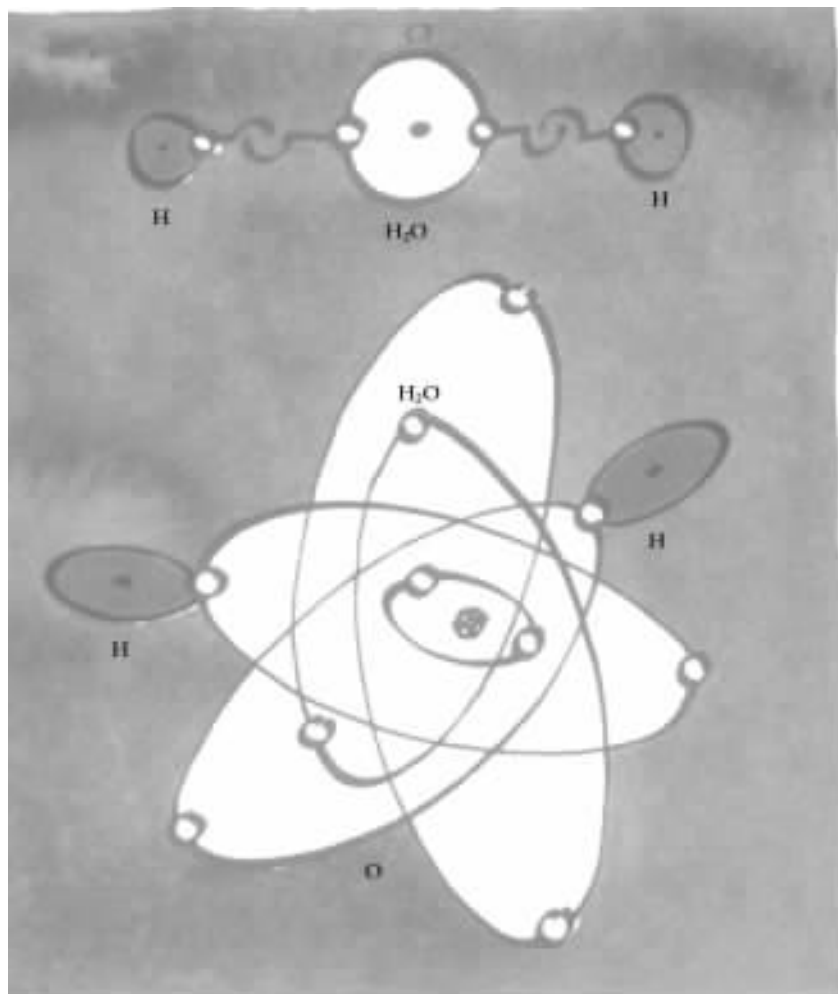
到 18 世纪末，化学家已经知道他们称为元素的不能再进一步分解的物质化合成为化合物。他们用的仪器天平是支点在中间、两边各挂一个小盘的水平杆，用来精确称量重量。1799 年，约瑟夫·路易斯·普鲁斯特 (Joseph Louis Proust) 证明了元素化合有“一定的比例” [见第 58 页图]。



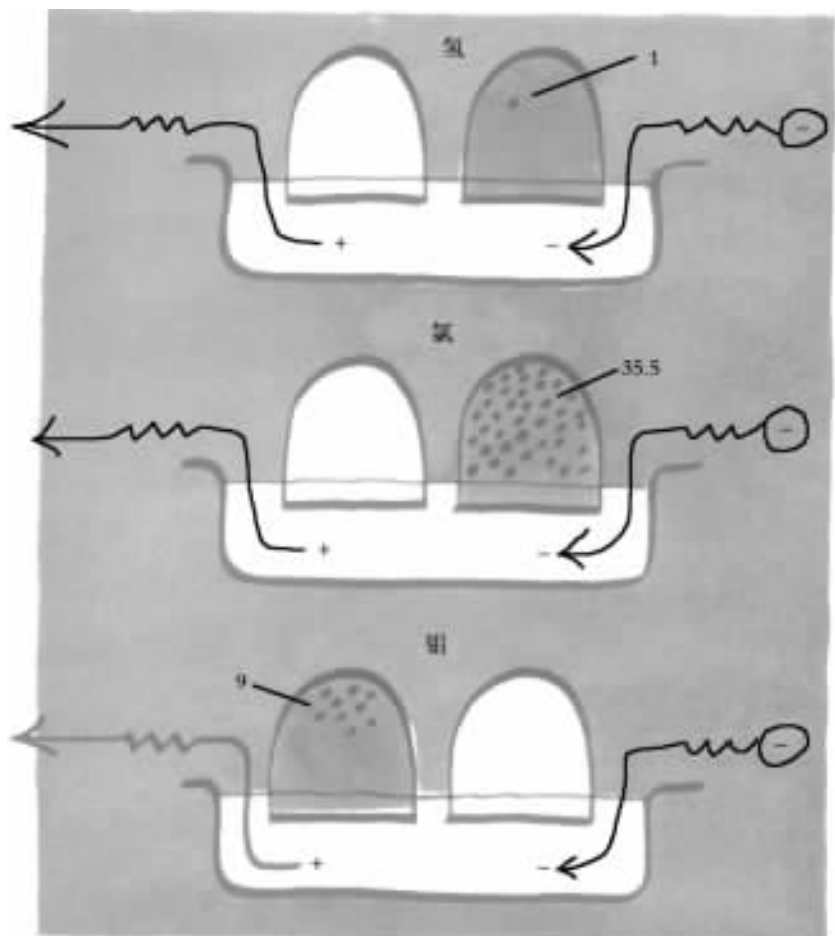
氧的发现,近代化学是从拉瓦锡发现氧开始的。长颈瓶里的朱砂,即氧化汞[上图],微温时从空气中吸收额外的氧;假想实验中的老鼠窒息而死。加热使朱砂中结合弱的氧分解出来[下图]。在真实的实验中拉瓦锡演示了放出的气体能维持动物的呼吸(在这图上是老鼠)。拉瓦锡进一步演示他称为氧的气体能维持木材的燃烧,和碳化合就成为 CO_2 [见第 56 页]。



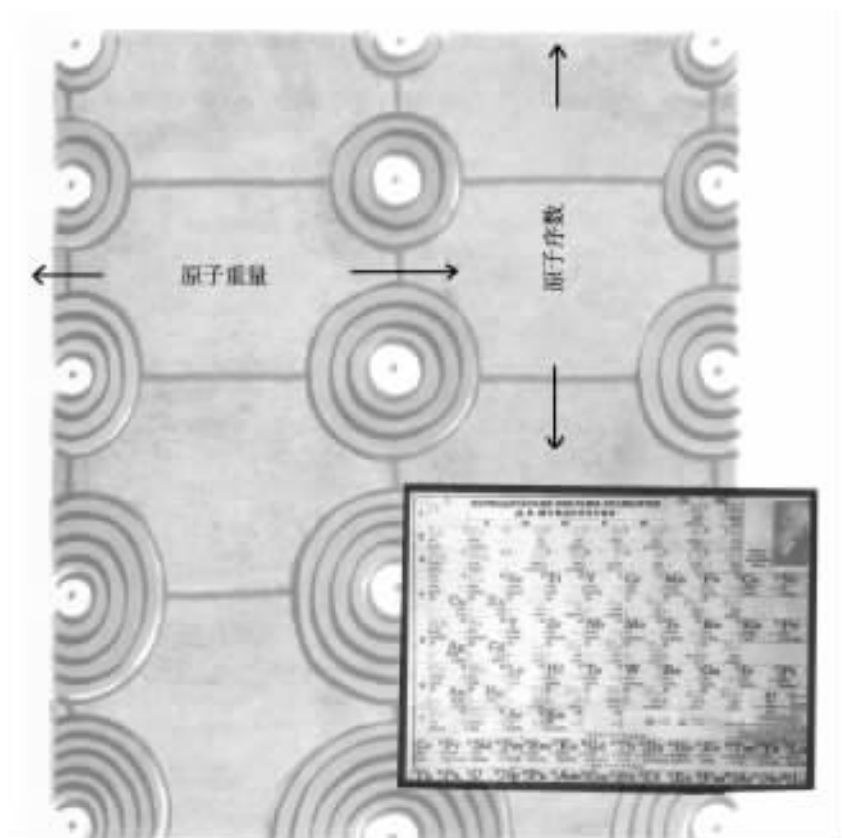
定比定律和新的化学科学中其他基本原理一样,它是通过精确称量成分元素在化合反应前和反应后生成的化合物的重量而建立的[见第56页]。假如比例为2比1的两种元素化合产生重量为3的化合物,如果二者的比例变为4比2,则产生重量为6的化合物。以不同的比例组合,化合后就有一种元素过剩。因此,早期的化学家就深信原子的实在。



“价”将原子结合成化合物，这是早期化学家思维的眼睛中所看到的 [上图]。从氢和氧以比例为 2 比 1 的体积化合，他们看到氢有一价而氧有二价 [见第 73 页]。电子的发现给价以电力的物理实在 [见第 73 页、第 119 页]。有 8 个电子的氧原子的外层轨道上还留着给另外两个电子的位置。两个氢原子中各有一个电子，正好填充在氧原子的空缺处，组成大家熟悉的化合物水。



电解定律,化合物被电力分解为组成它的元素,这条定律法拉第建立的。他发现 96 500 库仑的电流 (1“法拉第”) 从水中分解出 1 克氢,193 000 库仑得到 2 克氢。1 法拉第产生 35.5 克氯,一个氯原子比一个氢原子重 35.5 倍。不过,产量要用价数除,1 法拉第产生 9 克铝,铝的原子量为 27,铝是三价元素 [见第 73 页]。



元素周期表,按照“原子量”(原子核中质子和中子的总数)增加的次序排列成行,将由价数决定的化学行为相同的元素排列在同一纵列,价数与原子核中的质子数,即其“原子序数”有关。正如门捷列夫于1869年发表的文章中指出的,表中有些空格表示尚待发现的具有指定的性质的元素[见第73页]。周期表的俄文纪念版[插入的小图]上有他的肖像。

约翰·道尔顿 (John Dalton) 发现它们以一定的重量比化合。约瑟夫·路易斯·盖—吕萨克 (Joseph Louis Guy-Lussac) 证明气体,如氧和氢,化合时有一定的体积比例。这些证据使化学家确信元素可分解到原子,原子本身是不可再进一步分解的粒子。如果不是这样的话,它们就能以不同的比例化合。

道尔顿的一定的重量比和盖—吕萨克的一定的体积比启发了阿梅第奥·阿伏伽德罗 (Amadeo Avogadro) 于 1811 年提出大胆的假设,同样体积的气体——在同样的压强和温度下——一定包含同样数目的粒子,原子或分子。一个世纪以后,确证了在标准压强和温度下标准体积 22.4 升的任何气体中原子数目都是 6.02×10^{23} 。这个数被特地命名为阿伏伽德罗数。

以后又被别人扩充的道尔顿的原子量表启发了威廉·普鲁特 (William Prout) 在 1815 年提出一个更为大胆的假设。以氧为标准,规定一个整数 16,其他原子的重量与氧相比较,从氢大约为 1 开始一直到铂为 195。所有原子的质量都接近于一个整数乘以的氢原子的重量。普鲁特由此提出,所有元素的原子都是由或多或少不同数量的氢原子所构成。

普鲁特的氢原子就是今天的质子^①,这是原子核的粒子。在 19 世纪,按照工作的性质来区分化学家和物理学家,他们也可以按“原子的假设”来区分。原子对研究物质的化学家有用。研究各种力的物理学家始终对原子的概念表示怀疑,直到 J·J·汤姆孙 (J. J. Thomson) 在那个世纪末演示了第一个亚原子粒子——电子的存在为止。

在 19 世纪早期,对光的微粒性有着激烈的争论。托马斯·杨 (Thomas Young) 演示了光具有波动性。他用一束光照亮两条

^① 译注:原文为“质子和中子”,有误。氢原子核是质子。氢同位素原子核中有中子。

狭缝。在远处的屏上投射出双缝的像是明暗相间的直线图案 [见第 114 页图]。由几何学计算可以证明,通过稍有不同距离的两列波在屏上相遇时,在不同位置会出现增强或减弱的现象,这决定于两列波相遇时位相相同还是相反。

为了维护力学的原则,光波开始被想象为纵波,好像空气中声音的压缩波那样。然而,观察到某些晶体能使光偏振——就是说在一个平面上振动的光波能通过,而在另一个平面上振动的光波被阻挡^①。这对今天戴偏振太阳镜的人都很熟悉,这种效应说明光波是垂直于传播方向振动的横波。也可以用抽打马鞭或摇动绳子 [见本页插图] 来模拟,只是光波通常是在包含光传播线的所有平面上振动。



空的绝对空间适合于引力;超距作用对瞬时传播没有作出任何解释,两个引力作用的质量之间也不需要某种介质。已经证实以有限速率传播的光的横波具有可认识的力学性质。因此,需要找出携带光波的介质。牛顿的后继者不得不作出有关这种介质的假设。

他们构想出“以太”来传播光。这是一种完全透明的、不可压

^① 译注:原文这句话不清楚,译者已作适当改写。

缩的固体介质,它受力学定律的支配,可传播光的横波。还有,以太对地球上物体的运动不会产生阻力,比行星在轨道上运动受到的阻力还要小得多。在 19 世纪末期,开尔文勋爵 (Lord Kelvin) 提出如果它具有“可塑的”性质就可以满足这种要求,因为塑性的物体会产生稳定的压力,而坚硬的东西在突然受到足够大的冲击力时会破裂。

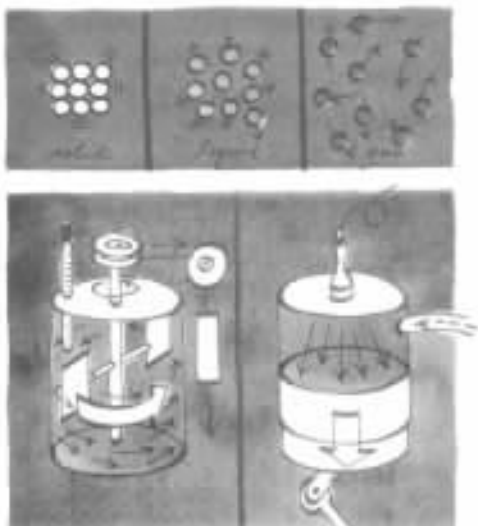
以太被赋予了这样和那样的性质,成为最精巧的假设的物质,设计出来用以传递经典力学的力。利用它保持牛顿图像的完整。它的根本性质到适当的时候会搞清楚,解决问题的人是些不受经典力学思想束缚的人。

这种经典力学的原则在热力学中,在气体分子运动理论中,在物质的原子理论以及电和磁的新奇事物中得到进一步充实。符合经典力学精神的热力学到 21 世纪也不会有多大变化,它的内容是完全的和永远不变的普遍规律。热力学定律与动量、能量和物质的守恒共同支配了整个现代宇宙。“它是唯一的具有普遍内容的物理理论。”阿尔伯特·爱因斯坦说:“我坚信热力学的框架和基本概念的适用性永远不会被推翻。”

没有重量的热质流给热力学带来更深刻得多的见解。热质就是热。热的物体比冷的物体中有更多的热;热从热的物体流到冷的物体中。在 19 世纪早期,沙地·卡诺 (Sadi Carnot) 正好根据这一公认的机械论概念说明蒸汽机怎样得到最大的功:使热质在尽可能最大的温度差之间流动。他的定律表述引擎做功的能力随“工作流体”——蒸汽或燃烧气体——在活塞或气轮机叶片的表面和排放环境之间的温度差的增加而增加 [见第 65 页图]。用热质就已经足以得出热力学第二定律的第一种表述:热总是自动地从高温物体流向低温物体,从不反向流动。

本杰明·汤普森 (Benjamin Thompson) 这个从新英格兰叛逃

出来、以拉姆福德伯爵 (Count Rumford) 闻名的强烈的亲英分子，提出了简单的，但仍是机械的而到现在仍旧承认的热解释。在 18 世纪 90 年代，他被安排到巴伐利亚国王的兵工厂里，在水下钻制铜加农炮。楼上站满的旁观者看着钻具和铜炮摩擦产生的热使水沸腾。汤普生称量热的和冷的金属碎屑以证明热质必定是没有重量的。他断言，热什么都不是，只不过是车床传递给金属的“运动”。



热是运动，是物质粒子的运动，上图依次是固体、液体和气体。用一个下落的重物来搅动水，焦耳通过测量重物下降的“尺-磅”数和温度的升高来证明运动变换为热量。卡诺通过设想热是“热质”，一种非物质的流体 [见第 64 页]，从而正确地得出通过用热机将热反变换为运动的效率，随着活塞面上的和排放出的“工作流体”的温度差增加而增加。

詹姆斯·普利斯高特·焦耳 (James Prescott Joule) 在 1849 年建立了功和热更精确的等价性。他使一个下落的重锤通过一系列齿轮转动水槽中的叶片，将水搅动。焦耳测量下落的“尺—磅”数和水温度升高的度数，得到接近于近代“焦耳”的数值 [见

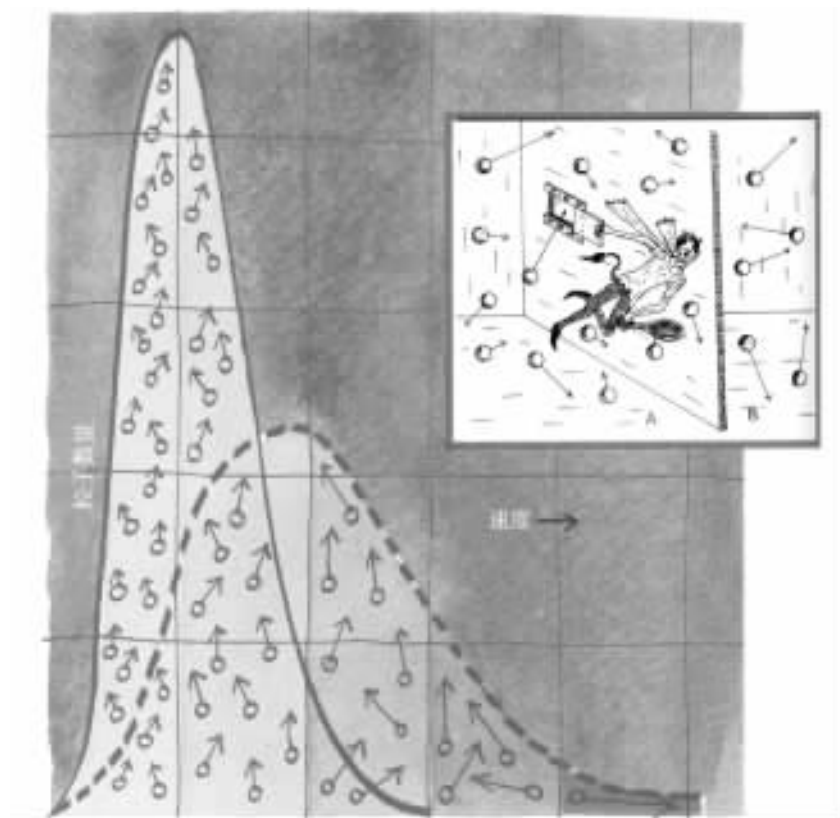
第 65 页图]。亨利·奥古斯图·罗兰于 1872 年用安装在他的约翰·霍普金斯大学的实验室中的设备解决了测定这一数值的方法。使用了蒸汽机、温度计和专门为这个实验设计的量热器,他测定 $4.19 \text{ 焦耳} = 1 \text{ 卡}$ 。卡是热的单位,是使一立方厘米水升高摄氏一度的热量(规定食物热量的“大”卡,正确的应写成 calorie,是焦耳的“小”卡(calorie)的 1 000 倍)。焦耳的实验建立了热力学第一定律:能量可以转换——例如从运动转化为热——但是不能创造或消灭。

对热感兴趣的物理学家必须接受原子的假设。因为粒子的运动在气体中比在焦耳的水槽中可以更容易想象,所以他们首先考虑气体。对于一定量的气体,例如在自行车打气筒中,由于体积突然减少造成的压强增大可以从打气筒温度升高感觉出来。这可以看作空气分子速度增加和它们彼此之间及和容器壁之间的碰撞力和频率增加的结果^①。

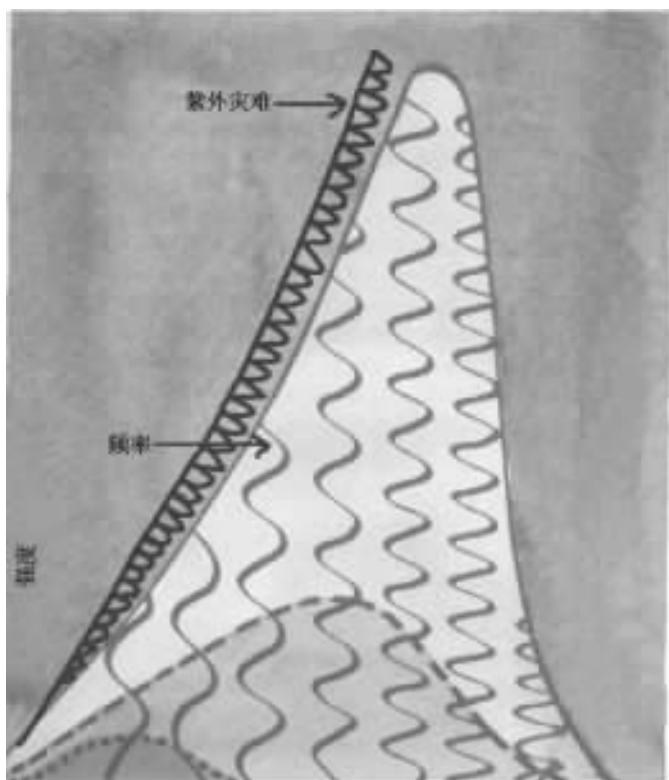
通过碰撞,分子之间不断交换各自的动能,可以认为原子和分子均等地分享气体的全部热能。吉姆斯·克勒克·麦克斯韦(James Clerk Maxwell)——电磁方程组的创造者——对这“能量均分”原理作出了重要的修正,这是他对知识的第二项重要贡献。他并不认为阿伏伽德罗数 6×10^{23} 那么多的每一个原子或分子都准确地以同样的速度运动。计算表明,空气中平均速度约每秒 500 米,平均两次交换能量的碰撞之间分子走过的距离,或称做“平均自由程”,为 0.000 01 厘米。围绕着这些平均值,麦克斯韦速度分布曲线描绘不同温度和压强下分子之间动能^②的最可能的分配方式[见第 67 页图]。

① 译注:这一段的说明在物理学上不很确切,译者未作改动。

② 译注:麦克斯韦速度分布律,不是动能分布。



粒子的热能分布,随温度变化关系的曲线画在图中,图示两种不同温度下粒子的数目(纵坐标)与速度(横坐标)的函数关系。粒子的总数是常数,曲线下的面积是相同的。平均速度随温度平方根增加而增加。“统计力学”承认经典的能量在粒子之间“均分”这一假设是合理的[见第 66 页]。麦克斯韦“妖”[插图,乔治·伽莫夫(George Gamow)画]将热的粒子和冷的粒子分开。



“紫外灾难”来自热的物体的辐射波之间能量的“均分”：右边高频率一端最大数值的子波携带了几乎所有的能量 [见第 82 ~ 84 页]。测量到的辐射强度谱与粒子间的能量分布相对应 [见第 67 页图]。普朗克证明每个子波携带同样大小能量的“量子” 6.77×10^{-27} 尔格 [见第 84 页]。爱因斯坦证明量子或光子也具有机械动量 [见第 85 和第 96 页]。

麦克斯韦和德国人路德维希·玻耳兹曼 (Ludwing Boltzmann) 的“统计力学”——描写阿伏伽德罗数那么多的分子集合的不规则运动——将机会和概率引进决定论的经典物理的世界。事后才认识到这是 19 世纪末的革命就要到来的第一个征兆。对

于那些介意的人来说,拉普拉斯的无所不知的智慧仍能继续记录下每次碰撞时的动量守恒。然而,统计力学预言的可信度使下一代物理学家认为由此决定的秩序是可能而不是必然。以后的一代进而认为它是不可能的。

热力学第二定律认识到一个系统能量的消耗表示系统中运动的粒子的无秩序或“熵”的增加,这使认识达到了新的深度。所有形式的能量最后都要变成热,最后热消散到广大宇宙中。在一个系统^①中的熵可以减少——例如活的生物体中综合成的大分子。这种秩序性的增加并非是“不要代价的”,必须从系统外面取得能量以供系统的需求,同时使得外界的熵增加。

麦克斯韦“妖”——麦克斯韦自己更加冷静地称之为“人”——将热直接和运动联系起来:

我们现在假定用一隔板将一个容器分为两个部分,A和B,在隔板上有一个小洞,旁边有一个人,他可以看见每一个分子,他通过打开或关闭小洞,让较快的分子从A通过小洞到B,而让较慢的分子从B到A。于是,他可以不消耗功而使B的温度升高并使A的温度降低,这样一来就和热力学第二定律相矛盾了。

麦克斯韦妖模仿人类来支配第二定律:“我们只能处理整个物体而没有能力觉察和处理构成物体的各个分子。”现在,我们已经掌握了这种能力,这是一种完全不同的力学规律,量子力学已被证实为支配妖的领域中的法则。新的认识使我们可能觉察和处理少数的以至单个的分子和原子。然而,为了达到这样的境界必须支出与粒子大小成反比例的能量——例如在粒子加速器中。不管怎样,根据热力学第二定律这还是要求增加熵作为代价。

^① 译注:原文为“closed system”,应译为“封闭系统”。但这是不正确的。实际上封闭系统的熵是不会减少的。像生物体这样的系统不是封闭系统。它从外界吸取能量,生物体本身熵减少,宇宙的总熵增加。

第二定律的简单性和普遍性是真理就是美这一规则的例子，优美成为思想力量的保证。不过，第二定律并没有告诉我们为什么系统必须服从它。这个问题的答案要到描写力的性质和粒子及其相互作用的最基本的定律中去寻找。这些定律的方程式是对称的；原则上它们都能向前走也能倒退着走，好像描述一个事件的电影。熵打破了对称性，指着无情的时间方向，这就是阿瑟·爱丁顿所说的“时间之箭”。

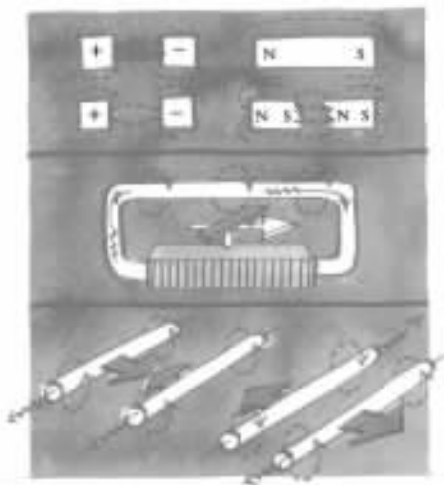
电和磁

将电磁学纳入经典物理学的范畴的努力一直延续到 19 世纪最后 $\frac{1}{4}$ 的年代。今天工业化国家的生活中如同引力一样遍布的电磁作用之所以会进入人类经验，最早是由于偶然的好奇心。磁是从天然磁石的神秘的力量得知的，在指南针上找到了它的应用。然而，这种力和静电放电中手指尖上的火花没有什么联系，火花和闪电之间也没有联系。从地毯上收集到的以及门把手上放电的静电电荷是单极的，或是正电或是负电。然而磁总是两个极成对出现，从航海罗盘的应用中得到了北极和南极的名称。没有人能将磁铁的北极和南极断开 [见第 71 页图]。桌上实验表明两相同电荷或两相同磁极之间的力是排斥力，两不同电荷或磁极之间相互吸引。这与只有相互吸引的引力完全不同。为了确证电和磁这两种力的相似性，查尔斯—奥古斯汀·德·库仑 (Charles-Augustin de Coulomb) 在 18 世纪晚期证明了静电力和磁力都按与相互作用的两个物体间距离的平方成反比的规律而变化。库仑获得了以“库仑”作为电荷的单位这一荣誉。

电和磁最先是各自独立地被研究的。电引起广大公众的兴趣是由于受到新世界第一位国际名人本杰明·富兰克林研究的影响。在富兰克林任驻巴黎大使时流行的一张他的画像上的

附带说明是：“Fulgur eripuit coelo, sceptrumque tyrannis！”（“他从天上抓住闪电并从暴君手里夺取权杖！”）

富兰克林摆弄闪电是非常小心的。经过观察得知闪电倾向于打到最高的地方，他将他的第一个避雷针装在丝制的风筝上，再将风筝放飞到可能产生雷电的云端。正如他所预期的，避雷针将电荷从云端引下来在风筝的绳子和用麻绳系在风筝线旁边的一个铜钥匙之间放出了火花。这是第一个线索，现在我们知道：由于大气的对流使天空和大地之间产生变化着的电势差，在全世界范围内平均为百万伏的一半。富兰克林的避雷针今天用于将天上的电荷在它们聚积到产生雷击之前被引入大地中。他的实验和他的避雷针——电的知识的第一个实用例子——证明这种可怕的力量是大自然中普遍存在的。



电和磁很长时期以来一直被认为相似但也有不同：相同的电荷（正或负）或磁极（北或南）相互排斥，不同的相互吸引；可是可以有单独的这种或那种性质的电荷，而磁铁总是偶极子。奥斯特首先发现两者的联系，观察到磁针被电流偏转[见第74页]。安培证明了电流激发磁场；同方向流动的电流的场相互吸引，反向电流的场相互排斥[见第74页]。

富兰克林的电流

富兰克林认为他的电“流体”从一个物体转换到另一物体时是守恒的。中性物体带有“正常”数量的电；正电荷表示流体过剩，负电荷表示流体不够。“电物质”，如牛顿学说的信奉者所说，“是非常精巧的粒子，因为它能穿透普通的物质，即使是密度最大的金属。”在 19 世纪第一个 10 年中，阿历山德罗·伏打 (Alessandro Volta) 将交叉重叠的锌片和铜片浸在盐水中，锌片和铜片间相互绝缘并分别引出导线，将导线连接起来，其中就有稳定的电流流动。电位差的单位伏特就是纪念伏打的。

伏打的实验演示了物质结构中电力的存在。水被电流分解时氢聚集在负极，氧在正极 [见第 60 页图]，在许多教科书中近代化学的历史就从这里开始了。继汉弗雷·戴维爵士 (Sir Humphry Davy) 任皇家科学研究所所长的迈克尔·法拉第 (Michael Faraday) 在 19 世纪初期就建立了电化学定律。

法拉第追随戴维，对电解的发展作出了贡献。戴维曾用电解方法将盐分解为钠和氯。法拉第第一定律确定，从化合物中分解出的元素的质量正比于用于电解的电量。他发现 96 500 库仑电量能释放出 1 克最轻的元素氢，193 000 库仑能释放出 2 克氢。对于较重的元素，像氯，化学家证明它的原子量为氢的 35.5 倍，他发现 96 500 库仑释放的氯为 35.5 克。一种元素的这种量——所有元素的重量都以氢 = 1 来量度——称为“克分子量”或“摩尔”。在 1 摩尔中有阿伏伽德罗数的原子： 6.02×10^{23} ；1 摩尔的气体元素在标准状态下的体积为 22.4 升。

这里对阿伏伽德罗数作一些讨论。从近代科学史的早期知道它的时候起，它一直是描写普遍经验的世界中一个最重要的数字。要想看到 6.02×10^{23} 个任何东西肯定是不可能的。如将一个原子铺放在 1 平方毫米的地上，一克任何元素的原子就要铺满

地球表面 12 次。要能接受这个数字就是我们身边的实在世界的性质还需要有一定的实践经验。

从氧与是它本身体积两倍的氢一类的元素组成化合物这个事实中,法拉第得到更为有趣的发现。他发现 96 500 库仑只释放 8 克氧,而它的摩尔数为 16。当时化学家已经发明“价”这个词,以表示各种元素的化合能力;氢和氯被认为是一价;氧是二价。法拉第由此得到他的电化学第二定律:被一定的电量分解出的元素的质量正比于元素的原子量除以它的价数[见第 60 页图]。

对许多化学家来说,这是说明原子是构成物质的基础的最后一个证据。在思维图像中氧原子“键合”两个氢原子,两种气体化合成水,这是一种液体——[见第 59 页图]。法拉第将真实世界中存在的电荷给予假设的价。为纪念他的贡献用法拉第表示分解出 1 摩尔的元素所需要的 96 500 库仑电量^①。

从化学价的物理实在中,德米特里·门捷列夫(Dmitry Mendeleev)发现了排列元素周期表的关键,就是今天挂在墙上、装饰各个化学教室和实验室的周期表。其他化学家已观察到元素的一些性质,如密度的大小、熔点和热传导率、硬度和软度、和其他元素的反应性与亲合性等等元素的性质按其原子量的增加循环变化。他们将元素按金属和非金属、卤素和碱金属等等,按族分类。门捷列夫将这些概念归纳成定律:“元素的性质周期性地依赖于其原子量。”在他安排他的表格的时候,化学价是关键的周期性变化的性质。元素原子量沿横行增加,同一价数排在同一纵列,从一价到七价,这个循环从一行到另一行重复着。

物理学家法拉第没有接受化学家的原子假设。他满足于从电解溶液中分离出元素建立起明确和统一的电荷单位 9.65×10^4 库

^① 译注:应为电解出 1 摩尔的 1 价元素需 1 法拉第电量或电解 1 克当量元素电量为 1 法拉第。又原文将电量单位写成 farad,不对,应为 faraday,译作法拉第。farad 是电容单位:法拉。

它。到 1833 年,法拉第完成了演示从磁场感应出电流的实验。

丹麦的汉斯·克里斯琴·奥斯特(Hans Christian Ørsted)在 1820 年第一次将电和磁联系起来。他使电流通过一根在指向北方的磁针上方南北向放置的导线。磁针突然转动指向东方。奥斯特使电流反向,磁针向西转动。这是否是另外还有一种力的证据?这完全不同于引力或磁和电的作用力,这些力都是从一个物体直指另一物体——不是成直角方向! [见第 71 页图]。

同时在巴黎,安德烈-马里·安培(André-Marie Ampère)一直想弄清他的发现的意义:两根平行的通过同方向电流的导线互相吸引,当两根导线中电流方向相反时两导线互相排斥。当他得知奥斯特的实验后他正确地将这两种,还可能是三种力归并为单一的电磁力。电流产生安培所发现的磁力,并服从“右手定则”(见本页插图)。

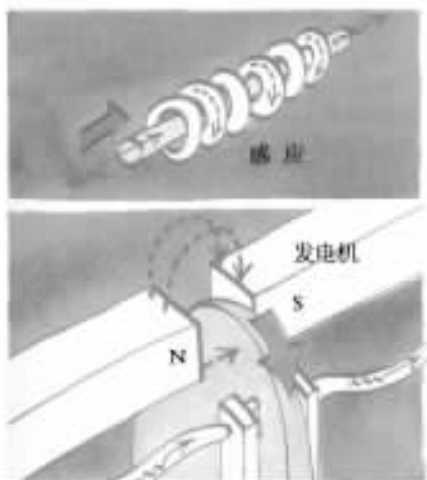


这些发现对力学产生的普遍影响立即被卡尔·弗里德里希·高斯(Carl Friedrich Gauss)认识到了。在“纯”数学家中他被尊为“天神”高斯。在生活中,高斯从真实世界中得到灵感并将数学应用于当时的物理学。他不能使力学定律和既依赖于运动又依赖于距离的力相协调。“在相对运动的状态中的两个电的元素会互相吸引又会互相排斥,”他惊讶地声明,“这与它们在相对静止状态中的作用方式不同!”他从这种状况的数学表述证明这是违背能量守恒定律的。

电磁学的伽利略

1831 年,亦即奥斯特发现电流产生磁力以后 10 年,迈克尔·法拉第证明电磁关系是对称的:他演示了由磁力感应出电流。他简单地在两磁极间运动一根导线,反过来将一块磁石穿过导线的线圈运动。两者作相对运动时会激起导体中的电流,只要它们在作相对运动,电流就不停地流动。

法拉第不久就改进了这个初步的实验,做到不断地从运动产生电流——机械能转变为电能——这是有转子的发电机的第一个粗糙的近似[见本页图]。他进一步证明了电流的强度依赖于用



电流的感应是法拉第通过一个简单的实验演示出来的。他使导线在磁场中运动,类似于安培做过的实验,或者使磁铁在线圈中运动都可以产生电流。法拉第注意到磁场中的导线如果运动得快会在较短时间内产生较强的电流。他使一个金属轮子在磁场中旋转[下图]就感应产生连续的电流。这个实验是现在全世界都用的转子发电机供应电能的模型^①。

^① 译注:这只是一个演示电磁感应发电原理的模型,实际的发电机是在磁场中旋转的线圈。

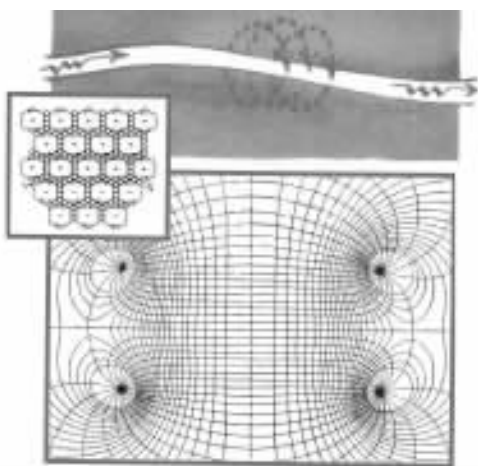
来产生电流的机械能的数量。法拉第的发电机的数量成千上万倍地增长并运行着，现在电灯照亮了整个世界^①。

被誉为电磁学中的伽利略的法拉第找到的第一份工作是装订工人的学徒。他读了那些他正学着装订的那些书，并且对新成立的皇家研究所的实验室中的研究发生了特别兴趣。凭借他写的一本著作的摘要，他说服了负责人汉弗莱·戴维爵士于1813年雇他做实验室助手。由于他在英国上层社会活动中的表现，法拉第成为研究所的荣誉所长，1867年逝世时他拒绝了给他的骑士头衔，戴维承认，他选择了这位学生是他自己对人类认识最伟大的贡献。

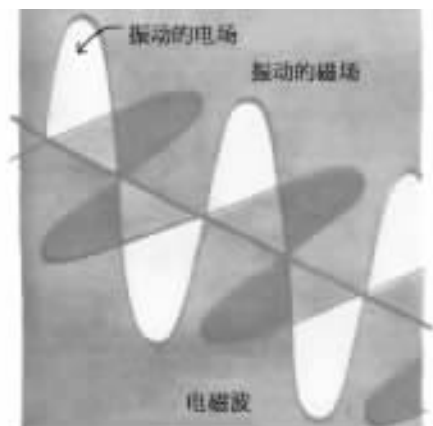
法拉第的自然科学家的天赋补偿了他缺少正规教育的弱点。铁屑在磁铁附近自动排列的方式启发了他的视觉思维。他看到围绕磁铁的“场”中充满了“力线”——用他的话来说，在磁场中运动的导线切割力线。“如果[切割力线的]导线运动较慢，则其中产生的电流较弱，”法拉第在实验室记录本中写道，“如果它很快切过同样一些数目力线，在较短的时间内会产生较强的电流。”他能看到力线从静电荷发出——其密度随距离平方减小——到达宇宙某处相反符号的电荷上。空间每一个地方都被这种力线和力场“绷紧”。

法拉第清楚地认识到电磁力的作用与经典力学的概念不同，作用不是直接在导体或磁铁上，而是通过这些物体之间空间中的场。他得出结论，这些实验中的电场和磁场的产生和消失必定在场或力线占据的空间中激起波动。他看到它们从扰动源起没有限制地向外传播到整个空间——好像光从星体放射出来。他肯定可以证明这种波就是一种光。

^① 译注：法拉第发电机与现在普遍使用的发电机的构造不同，当然它们的原理都是法拉第电磁感应定律。



法拉第的电磁力“场”打开了通向爱因斯坦场论的道路。麦克斯韦的方程式发展了法拉第的概念中的所有的力 [见第 78 页]，他首先构造出想象的力学模型，使它和经典物理学 [插入的小图] 相协调。在麦克斯韦设计的磁场等高线图中，两根圆形导线的截面表示为图上 4 个中心。图中画出同方向的电流产生的磁场；等高线的间隔表示场强。



电磁波是由电荷振荡所产生，它以光速传播，电磁波也可以看作电场和磁场互相感应而产生的扰动。这是法拉第猜测出来后被麦克斯韦方程证明了的 [见第 76 页和第 81 页]。正负交替变化的电场画在垂直的平面上，相应地指向北和南的磁场在水平面上变化。导体，可能就是天线，会从电磁波感应产生电流，从而激活了电话或电视。

法拉第花了多年的时间想在实验上找出光和电磁之间的关系。1845 年他成功了：使一束光通过强磁场中的一块玻璃，他发现光变成偏振光。他进一步证明，改变磁场的方向，偏振面会旋转。作为物理学的舞台的“虚空的空间”现在充满了电磁力。“所有我可以说的是，”法拉第在 1846 年的笔记本中写道：“我不能觉察到在空间的任何部分，无论是空的还是充满了物质的，除了力和它们发生作用的力线以外还有别的什么东西。”在“思考光线振动”时他公开推测他的场中的波就是光。“我十分大胆的观点是进一步考虑辐射是以高 [频率] 沿力线振动的一种波，这里的力就是将粒子和物质联结起来的力。”他更大胆地进一步发挥：“它尽力取消以太，但不消灭振动。”

到物理学家能够踢开以太这个脚手架去接受场和力本身充满空间这种观点还要再过 60 年。甚至被誉为电磁学中的牛顿的詹姆斯·克勒克·麦克斯韦，也不能免除以太。

麦克斯韦方程组

麦克斯韦生于法拉第演示由磁场感应产生电流的那年。他受到法拉第所缺少的教育，并且他的数学才能足以与法拉第的灵敏知觉相媲美。麦克斯韦成功地将法拉第的实验室记录和文章中所有丰富的经验观察资料抽象成为一组互补的偏微分方程。但他首先还需要在他自己心目中以及在纸上建立起法拉第场的力学模型 [见第 77 页图]。

麦克斯韦的方程组也考虑到哥廷根的威廉·韦伯 (Wilhelm Weber) 和弗里德里希·柯劳希 (Friedrich Kohlrausch) 1856 年令人惊奇的实验结果。他们想确定“电磁 [单位] 与电学的静电单位之间的比例”。静电单位是库仑建立的，1 静电单位电荷在单位电场中“感受到”1 达因的力。为建立相应的电磁力单位，韦伯和柯劳希测量了能产生 1 达因的电磁力的电流强度。

1 达因——卡文迪什表示引力常数的值所用的词 [见第 52 页]——是使 1 克质量在 1 秒钟内速度增加每秒 1 厘米的力。1 达因的力将物体推进 1 厘米距离所消耗的能量为 1“尔格”^①。

已知电荷的运动作用的电磁力,那么用麦克斯韦的话来说,“电的静电单位在电磁单位中的数值……直接随时间的单位选用而变。”因此这个数被确定是一个速度,“这个表示速度的数就是电的静电单位在电磁单位中的数值。”韦伯和柯劳希通过测量指南针的偏转找到这个数值为 31 074 000 000 静电单位。这给电磁单位为一个静电单位的 $1/31\,074\,000\,000$ 这样超小的力,或者说大约是 3×10^{-10} 达因^②。

麦克斯韦立刻看出,作为在韦伯—柯劳希的 1 达因的分数中用每秒厘米表示的速度数值接近于光速 (3×10^{10} 厘米/秒 = 300 000 千米/秒)。他用自己的精巧的实验验证他们的结果,得到一个比后来法国的奥古斯特·伊波利特·斐索 (Auguste Hippolyte Fizeau) 得到的数值更接近于现代光速的数值 [参见第 89 页图]。麦克斯韦于 1865 年进一步完善了他的电磁辐射原理的数学表述。

“横向电磁扰动传播的概念”,麦克斯韦写道,“是法拉第在他的‘关于光线振动的思考’中明确地提出来的。他提出的光的电磁理论和我在本文中开始发展的理论本质上是相同的,只是 1846 年不能提供用以计算传播速度的数据……这一速度如此接近于光速,看来我有足够的理由断定光本身(包括辐射热和其他可能有的辐射)是以波的形式按照电磁定律通过电磁场传播的电

① 译注:原文这一句意义不明确,译者已适当改写。

② 译注:这几段说的是由电荷的静电相互作用力定义电量的单位,和由电流间磁场作用力定义的电量单位之间的比例关系,由电磁力定义的单位电量等于光速 c (3×10^{10} 厘米秒⁻¹) 乘以静电单位电量。其他单位关系可由此推出,都与光速有关。在一般的情况中磁场对运动电荷的作用力约为电场力的 $1/c$ 。

磁扰动。”

确证在电磁场中传播的“其他辐射”的存在是在麦克斯韦 47 岁就过早逝世的 1879 年以后的 10 年。在卡尔斯鲁赫 (Karlsruhe) 技术学院,麦克斯韦方程组的优美和重要性引起了年轻的海因利希·赫兹 (Heinrich Hertz) 的兴趣。他看到静电放电的火花以很高的频率在火花隙之间前后跳动。赫兹在火花振荡中想象出在电场和磁场之间交换能量,如同麦克斯韦方程组描写的那样,这肯定会产生法拉第的电磁波。

于是赫兹在物理学讲堂的一端建立大容量的电容器。在讲堂的另一端建立起一架今天人人都认识的天线。他预期电磁波使天线中感应产生的短暂电流脉冲强到足够可以使火花隙间放电。赫兹得到的回报是“可以被适应了黑暗的眼睛看见”的火花。

电磁波谱

为了证实电磁波和光有相同的性质,赫兹使电磁波从金属表面上反射,用抛物线形的金属反射镜将它们聚焦,还用树脂做的棱镜使它折射。赫兹的电磁波的波长约为 1 米,其波长足够短,因而它的行为接近于光的行为。“微波”的性质是在雷达技术中被开发出来的,雷达在第二次世界大战中引导英国高射炮兵和夜间战斗机群成功地抗击纳粹德国的空军。调频无线电波的波长也很短,表现出微波同样的易受干扰的性质,汽车中的无线电接收器就容易受到干扰,尤其是城市的建筑物影响很大。

到 1895 年,在赫兹实验以后不到 10 年,古里爱莫·马可尼 (Guglielmo Marconi) 以长得多的波长广播了他的第一个无线电报。1893 年,赫兹在 37 岁时死于癌症。赫兹,简写作 Hz,现在也和库仑、安培及伏特一同进入电磁学术语的伟人祠名单中,用作电磁波谱中波的频率单位。

最先被牛顿的三棱镜分解出来的可见光谱的频率跨度从

4×10^{14} 到 7×10^{14} 赫兹 [见第 29 页图] ;这就是从紧靠紫外光以内的 3.75×10^{-5} 厘米到比红外或热辐射稍短的波长约 7.5×10^{-5} 厘米。在可见光谱的两边电磁波谱的波长,或与之成反比的频率都延伸到数不清的数量级。

麦克斯韦方程组证明了某些连法拉第自己都没有提出过疑问的事情:不同波长的电磁波不仅能穿透空虚的空间和大气,也能进入各种介质——例如绝缘体——中,这种介质并不导电,也不会产生电或磁作用。这一组方程式在 X 射线医学成像和 CAT (计算机化 X 射线轴向体层照相术) 扫描中以及在微波炉和光纤通信中得到证明。近代的城市居民整天都浸泡在从电线、无线电、电视以及现在的手机等的辐射场中。

场取代了以太

麦克斯韦认识到隐含在电磁波谱后面法拉第的场及其力线中的东西。他看出法拉第提出的与经典力学有根本分歧的思想:“法拉第通过他的思维之眼看见力线充满着整个空间,数学家在这里看到的是力的中心在不同距离上产生的作用。法拉第在他们除了距离以外什么都看不到的地方看见了介质。法拉第寻找介质中发生真实作用的现象的位置,他们 [麦克斯韦指的是韦伯] 满足于他们发现的作用力是通过超距作用加到电流上的。”麦克斯韦深刻地并感到宽慰地认识到“当我将我认为法拉第的思想翻译成数学形式时,我发现总体上这两种方法的结果是一致的。”麦克斯韦猜测,法拉第看到的场及其力线不只是对流行的物理实在的概念图式的改进,而是它的替代物。

他从不认为物体之间除了距离和按距离的某种函数关系相互作用以外什么东西都没有。他想象所有空间都是力场,力线通常是弯曲的,这是由于物体从各方面影响着它。他甚至说到属于一个物体的力线在某种意义上是

该物体的一部分,所以它对远处物体的作用不能说成是作用到它不存在的地方……我想他不如说空间的场中充满了力线,力线的分布依赖于场中物体的排列,每个物体受到的机械的和电的作用决定于紧靠该物体的力线。

从法拉第的猜测和麦克斯韦方程组,对物理世界性质的探索遭遇了危机,这要在 20 世纪的新物理学中才得到解决。例如,资深物理学家开尔文爵士曾想将麦克斯韦方程组美妙地描写的电磁场和麦克斯韦在把方程式写成公式时会与之斗争过的经典力学模型调和起来。那些年轻的物理学家们,用爱因斯坦的话来说,发现“场论的成就已经变得非常之明显和重要,因为它改变了力学的教条”。“空间具有传递电磁波的物理性质,并且不必……过分担心这个陈述意义”这句话早已被许多人接受。

紫外灾难

按照爱因斯坦自己所说,正是热辐射的更为严格经典的解释遇到了危机才激励他 1905 年的行动。危机完全出人意料地出自将热力学和电磁学结合起来研究炽热固体辐射的光。

温度高于绝对零度的所有固体都发射出辐射。组成它们的原子的运动——伦福德爵士曾演示过的热——产生电磁辐射。在 50 左右产生的辐射可以被 37 的人体探测出来,使人感觉“温暖”。按照法拉第的直觉,组成原子的粒子的电荷互相推撞产生辐射,麦克斯韦方程组和赫兹的实验演示了可见光谱以外的电磁辐射。随着温度升高,一大群原子乱哄哄地越动越激烈,可见波长的辐射越来越明显——物体最先呈红色,然后变成白热。颜色的改变表示辐射不断地向光谱蓝色端的短波长方向移动 [见第 68 页图]。真实的固体在组成它的元素的线光谱的波长位置有较强的辐射^①。它们对同一波长也有较强的吸收。对这些事实的

^① 译注:固体的光谱和组成它的原子的光谱通常是不相同的,黑体辐射的光谱也不是固体或原子的光谱。

认识到 19 世纪中叶由剑桥的巴尔福·斯图尔特 (Balfour Stewart) 和海德堡的古斯塔夫·基尔霍夫 (Gustav Kirchof) 作了理论处理。理论假设一种理想的“黑体”,这种理想黑色的物体对所有波长都毫无例外地全部吸收而不反射。在物体和辐射的温度完全相同的平衡状态下,黑体也是在所有波长上都辐射能量的同样完美的发射体。

仪器制造者用铂制的、里外都涂黑的圆柱形或球形空腔做成近似的假设黑体。加热以后,它通过可以从外面观察的小孔发射辐射能。这种仪器在当今的冶金工业中得到应用;通过熔炉里发射辐射的颜色和理想黑体辐射的颜色相比较。可以精确测量熔化金属的温度。

不同温度下辐射强度的精确测量表明,随着温度的升高,光谱强度分布的峰值从长波长向短波长方向移动。在 500 左右的热铁块,其强度峰值在可见光谱以外的远红外区。2 000 的白热铁块,峰值仍在可见光以外的近红外区。使人炫目的太阳光约为 6 000 ,强度的峰值在可见光区的黄色波长位置。将类似的许多测量结果平均就得到理想黑体和有关热及电磁辐射的定律。黑体辐射(和吸收)的能量随温度的 4 次方成正比地增加,这从炫目的太阳光和白热铁块辐射的光相比较中就可以看出来。真实的物体,视其成分的不同,多少与这定律有歧离。

真实物体和黑体的光谱辐射强度分布曲线很像麦克斯韦作出的不同温度下的原子和分子速度分布曲线。这是令人惊异的。能量均分原理对于辐射和对于物质都同样成立,这是被普遍接受的。可是,如果按能量对各种波长都平均分配来求出分布曲线,能量就要变成无限大。

剑桥大学的詹姆斯·金斯 (James Jeans) 认识到这个令人失望的结果来自过分推广了经典理论。按定义,从光谱的红色端到蓝色端,频率每增加一个数量级,每单位长度中波的数目就增加

10 倍。能量按光谱均分就必须给较高频率的波分配较多的能量。由于这个理由,理想黑体辐射的能量大多数应当在可见光以外的紫外光区,甚至在这以外波长更短得多的区域。金斯将由这经典理论得到的荒谬结果称为“紫外灾难”[见第 68 页图]。

1899 年,马克斯·普朗克 (Max Planck) 对应用于辐射的能量均分原理提出修正。他提出辐射能量与其频率间的比例是一个常数。钠黄光的频率是 5.1×10^{14} 赫兹。它的每一份携带能量 3.4×10^{-12} 尔格 [尔格:见第 79 页]。该频率波振动一次的时间或周期为 1.9×10^{-15} 秒。将它乘以这一份波的能量得到 6.6×10^{-27} 尔格·秒。这就是能量的小包——记作 h ——就是普朗克常数。将钠光的频率乘以 h 又回到它的能量—— 3.4×10^{-12} 尔格·秒。紧靠可见光谱的 8×10^{14} 赫兹的高频紫外光乘以 h 得到能量 5.0×10^{-12} 尔格——近于钠黄光能量的两倍。无论紫光或黄光,每一个子波节^①携带的能量都等于普朗克常数 6.6×10^{-27} 尔格。

下面是紫外灾难的解释。能量守恒定律要求原子最少吸收和它可以辐射同样多的能量。它们的辐射强度曲线近似于麦克斯韦——玻尔兹曼统计力学的速度分布曲线。

普朗克把他的常数称作“作用量子”。“作用”一词是他从经典力学的早期词汇表中借用的。这个词令人想起一个物体受到另一个物体的力的作用时,运动从一个物体转换到另一物体。普朗克常数决定了辐射能不能进一步约简的基本单位,将它乘以辐射的频率就得到这基本单位,或者叫量子的数值,这个频率的能量就以这量子为单位传递。普朗克一直活到看见他的作用量子成为近代物理学中一个关键性的常数,这一突破是对物理实在的性质在认识上的根本修改。在 1899 年,他为他的解释使电动

^① 译注:原文用 wavelet,应译为子波。但这里的 wavelet 的意思是一个波长或振动一次的一段波动,故译成子波节,意谓一个波长的一小节波。

力学和经典力学协调一致而感到满意。

量子：能量的粒子

阿尔伯特·爱因斯坦在多年以后回忆当时的情景，他并没有和普朗克分享这种满足“辐射能量只能以这种样子的量子为单位进行转换”。这种概念和“力学及电动力学的定律相矛盾……我想使物理学理论基础适应这一建议的所有试图都失败了，并且是彻底地失败了……我尝试得越久就越失望，这更加使我确信，只有发现一个普遍有效的原理才能使我们得到可靠的结果。”

爱因斯坦这段回忆中所说到的时间，是指1900年到1905年期间，这时他已拿到苏黎世联邦技术学院的毕业文凭，但学院拒绝给他教师助理的位子；但他却设法成为瑞士专利局的专家，他破格地被录用来为寻求困扰物理学界的最深奥问题的数学答案。1905年，在他26岁时，爱因斯坦发表了4篇文章。其中两篇帮助物理学界最终同意物质是由原子构成的——一些物理学家曾对原子论进行了可以说是无情的攻击。另外两篇文章的影响的结局当时还没有立即见到。

在4月份发表的第一篇文章中，爱因斯坦提出他自己的普朗克量子的概念。他大胆地断言，辐射一定“具有一种分子般的结构”。在第二篇文章中他进一步证明，辐射量子是具有动量——电磁能量的函数的有效质量。他说，这种物质—能量的粒子有点像牛顿的光微粒，它指导物质和辐射之间的相互作用。

一种已知的、不可思议的效应支持这种基本的思想。爱因斯坦引用“光电效应”为例，它早已被观察到但一直无法理解。现在大家对掌中计算器电源的光生伏打效应都很熟悉，麦克斯韦曾指出，以不同波长的光照在不同的材料上会产生不同性质的效果，能从金属上排去电荷。赫兹将光照射在火花隙的金属上能够

增强接收电极①间的电火花。

当爱因斯坦的辐射能量量子的频率等于或大于与被照射的物质中电子某一定的束缚能量相对应的阈值频率时,就能引起光电效应。如辐射的强度很高但频率很低(低于阈值),就不会产生光电效应。等于或高于材料的阈值频率时,即使辐射很弱,也很容易激发出许多电子,形成可测量的电流。对等于或高于某一物质的阈值频率的辐射来说,可利用该物质的光电效应制成辐射探测器②。正如吉姆斯·金斯解释的,“你不可能用一块石子打死两只鸟[两种不同的材料];也许,你也不能用两块石子打死一只鸟[不合适的材料]!”

考虑到每一个波都具有同样的 6.6×10^{-27} 尔格作用量子,可以在 1 秒钟内将入射的频率为 ν 的所有 ν 个子波节所具有的能量整个释放出来。吉姆斯·金斯搞不清楚,在斐索的测量光速的设备中,光经过两个转动的齿轮的“大屠杀”后量子怎么还能存活下来。我们必须明白辐射像波那样传播,而作用却以整个量子为单位。举一个例子说明一下,蓝色光的每一个子波节比黄光的一个子波节的周期时间较短,两者都有同样大小的量子 6.6×10^{-27} 尔格,因而黄光释放较少的能量。可以看到,蓝光在较短的时间内释放一个量子——因而具有较大的冲击力。法国炮兵称为 brisance③。

人们过去已经承认光具有几乎完全相反的两种性质:既是波动又是光线。实际上,证明了光线就是光子。波粒二象性是我们必须承认的实在,虽然这难以理解和想象[见第 87 页图]。

① 译注:原文为 diodes (二极管),估计作者写错了。应为光照射放电的金属电极上。

② 译注:原文对光电效应的说明含糊不清,文句已作适当整理。

③ 译注:brisance 应译为炸药的破坏效力,决定于炸药爆炸时释放出最大能量的快慢。



波粒二象性在这张图中用一个假定的粒子波动结构的放大图,粒子用一个点表示,从它开始整个结构描画出来都被放大了。光波和物质粒子的实验中观察到的二象性是如此违背普通的感觉,这要求把粒子或波看作事件而不是“事物”。在这比喻的图画中粒子直径约为 10^{-1} 毫米, 10^{12} 赫兹的光子的直径为 10^{-24} 毫米,相当于低能电子。(译注:通常不说光子直径,光子并不是经典粒子。)

狭义相对论

在 1905 年的第三篇文章里,爱因斯坦要表述“普遍的形式原理”。“论动体的电动力学”这篇文章的题目远不如狭义相对论更为大家所熟悉。满意于他的“巨大简单性”的标准,爱因斯坦将物理学的基础安放在两个“假设”之上。他将伽利略和牛顿的力学以及法拉第和麦克斯韦的电动力学结合在一个自治的体系中。他将时间和空间、物质和能量组合在一起,作为单一连续统中的相互依存的变量。

在这篇文章第二段的末了,爱因斯坦断言这两个假设为下面的论证所支持并已经排除了绝对空间。如法拉第已经证实的,他

首先观察到磁铁相对于导线运动和导线相对于磁铁运动都毫无区别地产生电流和电磁场。“诸如此类的例子,以及企图发现地球相对于以太运动的失败都暗示电动力学现象和力学现象同样没有和绝对静止的观念相对应的性质。不如假设电动力学和光学的定律对于力学方程式在其中有效的所有参照系也同样有效。”

爱因斯坦的第一个假设抛弃了牛顿靠它支撑经典力学的绝对空间的概念。自然定律在无限多的相互之间作相对运动的参照系中都是不变的,这是现在保留的唯一的绝对。爱因斯坦作出相应的结论,以太看来是“多余的”。几年之后,爱因斯坦对无数其他各种场合中不恰当地用“相对论”的反应是他宁可把它称作“不变性原理”。

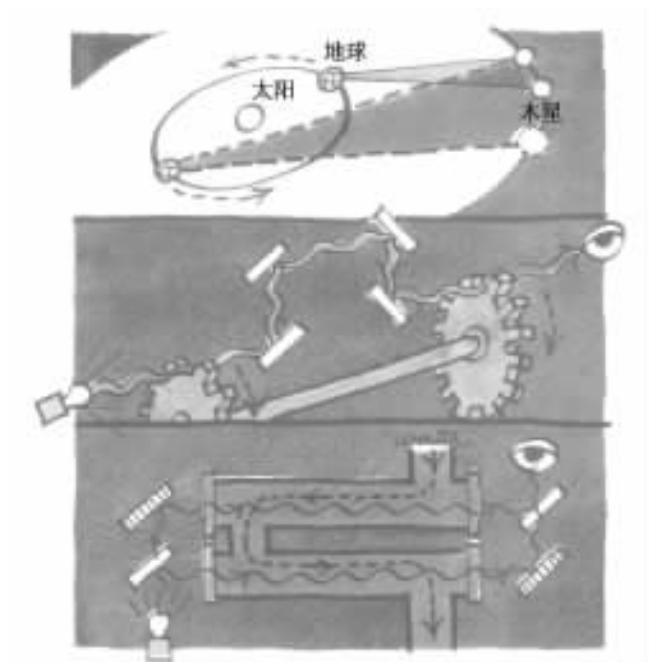
相对论在这篇文章中被称为“狭义”是因为它只讨论匀速运动。这是伽利略发现的和静止不能区别开的那种运动。作为牛顿第一定律^①的回应,这种狭义相对论中的参照系也称作“惯性系”。加速运动,例如在受到引力作用的情况中,要等到1916年用广义相对论再来解答。

对狭义相对论的第二个假设,爱因斯坦并没有作初步的讨论。他只是声明“光在真空中总是以不变的速度 c 传播,和发光物体的运动状态无关。”这意味着光从物体发射出来以后总是以每秒 3×10^{10} 厘米的速度运动,不论发光体向着我们运动还是远离我们。总之,光的速度并不是相对的。绝对空间和绝对时间让位于光速的不变性。

不过,经验证明光速也不是绝对的。光在不同的介质中以不同的速度传播,只是有时候和每秒 3×10^{10} 厘米这个约数相差不多而不一定要改正。还有,正如斐索在1851年用另一个精巧的

^① 译注:原文为“第三”,不妥。

实验所证明的,光速随在其中传播的介质的速度而变,如在流动的水中[见下图]。从更大和更广的意义上来说,在爱因斯坦的广义相对论中进一步得出电磁辐射的频率和波长随辐射通过的引力场的变化而改变。



光的速度最早是罗麦在 1673 年从木星与地球逐渐接近时以及木星和地球相互远离时木星卫星的星蚀的时间差求得^①,为每秒 200 000 千米[见第 55 页]。斐索用两个旋转的齿轮,当它们以某一定的转速转动时正好把光挡住,从齿间的角度可以更准确地计算出光速为每秒 300 000 千米。他还发现传导光的介质的运动会使光速增大或减少。

^① 译注:原文的表达不正确,文字已经译者改正。图上地球的两个位置分别表示地球和木星接近和远离,扇形的阴影并不说明木星卫星蚀的过程。

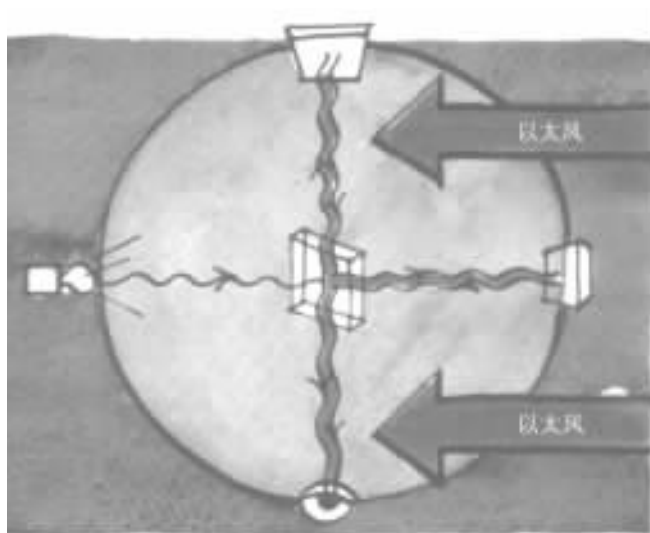
相对性和光速的不变性是 19 世纪末在物理学界中广泛流行的概念。爱因斯坦对两者都没有专利权。在认真学习了恩斯特·马赫 (Ernst Mach) 的著作后, 他已作好按新的观念工作的准备。将声速及其倍数用“马赫数”来表示以纪念他的这位马赫是维也纳“逻辑实证主义”学派的奠基人。他是经验主义者中最教条的人, 他的观点是除了从感觉得来的东西以外精神中没有别的任何东西! 他抑制住了对以太和绝对空间的蔑视, 所以以太才得以保留下来。爱因斯坦却为抛弃这些东西作了充分准备。

这种抛弃的根据来自比他年长的同时代人迈克耳孙和莫雷 (E. W. Morley) 的实验。他们的实验最早完成于 1881 年, 当时爱因斯坦只有 3 岁。他们的目的是测量地球的运动产生的“以太风”, 在以后几十年中他们反复做这个实验都不成功。这个实验很像去检测滑雪者从山上快速往下滑时感觉到的“一阵风”。迈克耳孙设计的精巧的干涉仪将一束光分裂为二, 分出来的两束光沿不同方向来回传播, 经过差不多相同的距离后, 两光束被准确“调整”到屏上同一位置相遇 [见第 91 页图]。一束光路向东, 沿着地球转动的方向, 这样它就“顶风”传播; 另一束光路向北或向南, 沿地球运动的直角方向传播。以太, 如果确实存在的话, 就会使向东传播的光的速度减小。但实验得到零结果。即在两光束相遇的屏上看不到干涉条纹 (杨氏首先观察到这种条纹 [见第 62 页]) 因仪器朝向的变化而移动, 这就证明两路光的速度并没有不同^①。

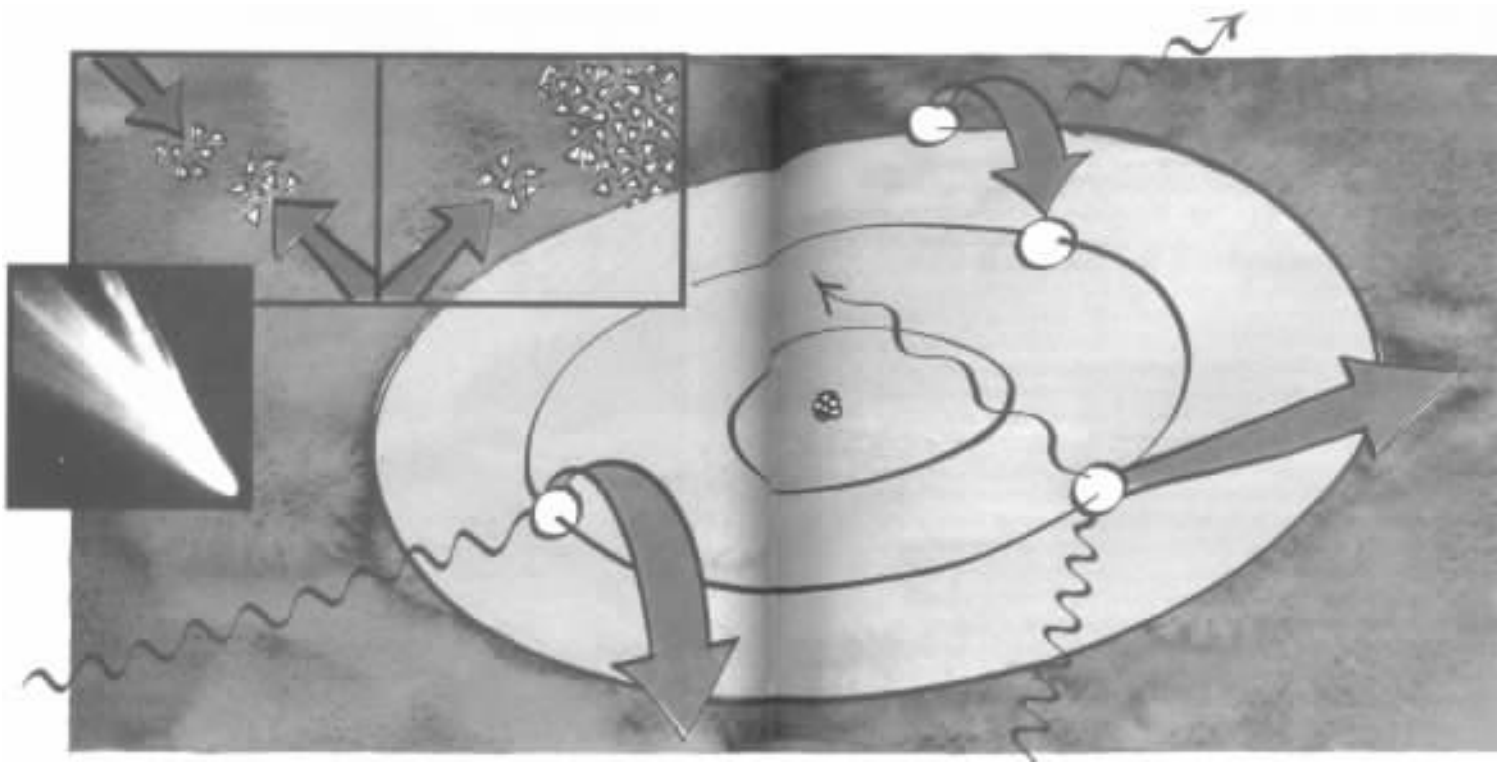
物理学界对这个结果的惊讶在爱尔兰物理学家斐兹杰惹 (G. F. Fitzgerald) 的基本假定中提出了解决办法。他提出, 光速在以太风中变慢之所以检测不出来, 是因为向东传播的光路

^① 译注: 原文的这段描述不确切, 已作适当改写。

由于地球的运动而缩短了。由于这种“斐兹杰惹收缩”，沿着它们运动方向放置的所有的尺都缩短了。在迈克耳孙—莫雷实验中，向东方的光路的缩短抵消了由于以太的阻力所造成的光的速度的减少。由于大家都对以太的假设深信不疑，许多人非常欢迎这个建议。



测量以太“风”的企图导致光速最准确的测定 [见第 90 页]。迈克耳孙干涉仪将一束光分解为两束，分别沿各自的路程传播后到达屏上同一位置。沿地球运动方向传播的光的速度被以太风减慢。斐兹杰惹对零结果的解释是，沿地球运动方向的长度收缩所致。洛伦兹将它解释为在运动方向上的时空收缩 [见第 93 页]。



光子的有效质量是爱因斯坦在狭义相对论中首先提出来的,用它解释光电效应 频率合适的辐射,也就是有合适的能量,即使辐射强度低也能使电子从原子中游离出来 [见第 85 页]。于是,无质量的光子就具有动量为“质量 $\times$ 速度”的机械力。康普顿效应的实验证明,一个 X 射线光子通过和一个电子碰撞并将其从轨道上踢开去以后成为较低频率的光子,像一个台球一样被弹回来 [见第 130 页]。按光和物质作用的对称性,当电子从较高能量的轨道落到较低能量的轨道上时,原子发射一个光子。光的机械力,“光致迁动”在宇宙的尺度上起了一定的作用。在星际空间中,星光将尘埃微粒推挤成一团 [上左图]。在团块的阴影中,尘埃物质的聚集引起了恒星中引力坍缩 [见第 204 页]。太阳光的光子将彗星中的物质轰击出来形成彗尾,彗尾总是向着远离太阳一面。这是物质—能量同一性的可以看得见的演示。

斐兹杰惹—洛伦兹收缩

荷兰数学物理学家洛伦兹 (H. A. Lorentz) 完全独立地对迈克耳孙—莫雷实验的零结果作出了解释。不过,他并不打算挽救以太假设。相反,他宁愿接受光速不变。他算出收缩与运动物体的速度平方除以光速平方有关。洛伦兹—斐兹杰惹收缩相应地有一个极限:在米尺的速度达到每秒 3×10^{10} 厘米时米尺的长度收缩为零。

1904 年,法国数学家亨利·庞加莱 (Henri Poincaré) 提出一种相对论力学,在这种力学中光速是“不可超越的极限”。事后的认识表明,即使爱因斯坦没有提出相对论,他的同时代人也会代替他将运动的普遍相对性和光速不变结合起来创造出新物理学。他们可能不会像爱因斯坦做得那样 *fraicheur* (译注:法文,意为新颖漂亮)——这个词是他的传记作者阿伯拉罕·佩斯 (Abraham Pais) 用来描写他不加掩饰地对待所思考的事物的特点。

爱因斯坦声明,从他的两个假设足以得出运动物体电动力学简单而又自治的理论。就像欧几里德从他的公理推导出几何学那样,爱因斯坦从这两点假设推导出各条定理。在这朴实的过程中对物理世界并没有作出任何特别的暗示。这些惊人的假设各自的逻辑地位本身就表明争论还要继续进行下去。

既然已处理了绝对空间,爱因斯坦着手处理绝对时间。以马赫的实证主义者的严格态度,为了相对于参照系来处理运动,就要求三维空间中有一组刚性的 *xyz* 坐标,一根刚性的量尺,还要有一只钟以及对时间是什么的清晰的理解。“例如,如果我说‘火车 7 点钟到达这里,’我的意思是这样:‘当我的表上的短针正好指着 7 和火车的到达是同时的事件。’”

在同一参照系中的事件之间可以建立同时性——有着不可避免的“不精确度”——在互作相对匀速运动的不同参照系中的各

事件之间不能谈论同时性。由于速度有限,光从一个参照系传递信息到另一参照系需要时间。从两个参照系中的任何一个观察,另一参照系中的长度看上去变短了,钟走得慢了。在每一个参照系中,由于测量的尺和被测的物体都一同缩短了(也没有一只普遍适用的钟可用来核对放在各个不同参照系中的钟),所以他观察不到自己是否在运动的证据——正如迈克耳孙的失望所清楚地表明的。

斐兹杰惹收缩是从狭义相对论导出的第一个结果。这使从一个参照系到另一参照系的测量的变换变得有些复杂。在绝对时间和空间背景上的伽利略相对论中进行这种“变换”的步骤比较简单。在 1904 年,为了将这一收缩——以及限制它的光速——纳入规则中,洛伦兹提出一组全新的变换方程式。“洛伦兹变换”是狭义相对论的中心,爱因斯坦也总是用它的作者的姓名来称呼它。

能量到质量的变换

对牛顿惯性定律的重要修正来自洛伦兹变换。相对于观察者运动的物体的惯性质量随着运动物体速度平方增加而增大的规律与支配尺的长度随速度平方增加而缩短的关系式相同但成相反的比例关系^①。由这个关系,使物体速度增加的不变的作用力产生的加速度越来越小。由此,作用力将能量不断转移给物体,物体的质量也不断增加(在电子的情况中,它在高能加速器中达到最高速度时质量增加到 40 000 倍)。动能转变成质量,到不能达到的光速,物质粒子的能量—质量趋向无限大。在通向

① 译注:原文表达不确切,译者略加修改。惯性质量和速度的关系式为

$$m = \frac{m_0}{1 - \sqrt{\frac{v^2}{c^2}}}, \text{尺的长度与速度的关系式为 } l = l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}.$$

“不可逾越的极限”的路上,方程式 $E = mc^2$ ^① 表示质量和能量的可相互转换,像跷跷板那样一上一下,一者减少,另一者按比例增加^②。用来表示速度的时间和空间这两个变量融合为一个物理变量“时空”。

从观察者的参照系上看,被观察的参照系上的时钟不可靠,所以测定的长度和质量不正确。当他们互相观察时就要问,哪一个参照系是正确的?两个参照系的相对匀速运动造成他们各自观察到的结果不能互相比较。一定要使其中一个参照系掉转头来并加速到和另一个会合;使快速运动参照系加速,它就不再作匀速运动,因而对另一个参照系上的观察者来说狭义相对论也就不再适用了。

如果观察者小心地进行测量,在观察者能可靠地谈论的范围内,进行观察的参照系本身是可靠的。但是,在被观察的参照系中真实的事件也应该是在被观察的参照系中的观察者看来是真实的事件。只是钟、量尺及其质量必定都随相对运动而变化。这种思维实验的“经验”对于阿尔伯特·爱因斯坦的活跃的物理直觉是足够的了。此后,其他人提出了物质和能量可转换性的确实的证据。

为使他的思维实验能面对物理实在,爱因斯坦考虑在快速运动的参照系中的钟走得慢的“特殊结论”。他设法比较在不同的匀速运动参照系中难以进行比较的两只钟,以求得一个近似的答案。“我们假设”,他说,“一个在连续的弯曲轨道上以不变的速度运动的物体的速度的常数分量近似地满足这一原理的匀速运动的要求。通过比较可以证明,在赤道上的钟一定比放在北极或南极的同样的钟走得稍微慢一点”。

① 译注:原书这个公式写错了,写成 $m = v^2 / c^2$ 。

② 译注:原书上这一句不明确,译者已作适当改写。

爱因斯坦的思维实验已经由放在绕地球飞行的飞机上的钟的计时与地上的钟相比较作出了精确的证明。人造卫星上的钟也被证实符合广义相对论的预言。

质量到能量的转换

爱因斯坦在文章中既已建立起了“动力学部分”中的能量到质量的转换,他还要证明在“电动力学部分”中也一定会有同样的规则。麦克斯韦—赫兹方程组的洛伦兹变换确证了奥斯特、安培和法拉第指出的:“电力和磁力并不独立存在于坐标系的运动状态之外。”力的大小是相对速度的函数。规定了光速不变,相对于遥远的运动着的光源,观察者觉察出光的频率有一定的移动——由于多普勒效应,大家在行近的和远离而去声源的声音中都感觉得到——如光源向我们靠近时,则频率增高,如光源离我们而去,则频率向低频方向移动。无论向哪个方向,频率移动的大小都是相对速度的量度。这意味着,如普朗克常数不变,当光源向观察者运动时观察者遇到较高能量的光子,当光源远去时光子能量变低。因此,能量的振幅是相对运动的函数:“对一个向着光源以光速 c 运动的观察者来说,光源的强度必定是无穷大。”

爱因斯坦接下来考虑电磁能量变换为机械能。他断言光照射到完全反射的镜面上必定施加压力于其上。他证明光子惯性所施加的压力与它们的能量相对应,并且进一步计算出力的大小。作为它们的能量的函数——即普朗克常数 h 乘以光的频率——光子的惯性质量等于能量除以光速平方^①。

光致迁动——光的压力产生的作用——有一个大家熟悉的示范就是彗星的尾巴。被高能粒子组成的太阳风加强的光压将彗

① 译注:这一段原文有误。作者想说的是:光子被镜面反射时对镜面施加的压力与光子的惯性质量成正比, $m = E/c^2$, E 是频率为 ν 的光子能量: $E = h\nu$ 。

星的尾巴吹离太阳 [见第 92 页图]。

1905 年 9 月,爱因斯坦发表了一条重要的补充:“物体的惯性是否依赖于它的能量的大小?”他在这篇文章中证明“如果物体以辐射的形式放出能量 E ,它的质量就减少 E/c^2 ……因而我们得到更为普遍的结论:物体的质量是它包含的能量的量度;如能量改变了 E ,相应地质量改变 $E/9 \times 10^{20}$ [9×10^{20} 厘米² 秒⁻² = c^2],此地能量的单位是尔格,质量的单位为克。单位电磁力 3×10^{-10} 达因,是韦伯、柯劳希和麦克斯韦建立的,从而得到 1 克物质相当于 9×10^{20} 尔格这个互补关系。

9×10^{20} 尔格对 1 克

爱因斯坦已经废除了质量守恒定律。不过,宇宙决算表中还是由质量—能量守恒的超对称性得到平衡。面对分类账一边的狭义相对论的结论,他提出一个实验。“这并非不可能,”他建议,“利用发生能量改变很多的物体(例如用镭盐)的反应就可以证明这一理论。”后来的大规模实验使得这个问题不再存在疑问。 9×10^{20} 尔格的能量近似于 17 000 吨 TNT 爆炸所释放的能量。这是 1945 年 7 月 16 日在新墨西哥州的阿拉莫哥多的原子弹爆炸的威力。这永远给公众极其深刻的印象,物质可以转换成能量。这个爆炸力表明原子弹里面的 8 000 克钚中有 1 克转变成了能量。两个日本城市的破坏情况表明,在爆炸中只有全部释放能量的一小部分起破坏作用。还想象不出一种明白易懂的图像可以表示出 9×10^{20} 尔格的能量有多大。回忆一下能量的单位尔格是使 1 克质量的物体每秒钟内增加速度每秒 1 厘米^①,把克转换到更容易体会的吨,厘米转换为更熟悉的千米,就可以形象地

① 译注:作者此地将能量的单位尔格和力的单位达因混淆了。1 达因的力等于使 1 克质量在 1 秒钟内增加每秒 1 厘米的速度。1 尔格等于在 1 达因的力作用下使物体移动 1 厘米路程所做的功或给出的能量。下面讨论的也是达因。

描绘出将质量为 9×10^8 吨的物体的速度每秒增加每秒 10 千米,或许这样想一下有所帮助, 9×10^8 吨近似于美国人口总重量的 5 倍。

场和尔格

对质量转变为能量是普遍存在的这一点往往不容易理解。在擦燃火柴时,在火焰中,在灯光中,在天线的辐射中,在每一次化学反应中,包括正在阅读这一页书的过程中,这同样变换都在发生——只是变换比例无法探测出来。

19 世纪的所有物理学家中只有迈克尔·法拉第对狭义相对论宇宙可能不会感到惊奇。他的场和力线具有单位电磁能量的 3×10^{-10} 尔格的物质。这种存在于空间的微量物质中电磁辐射的每个光子所携带的作用量子 6.77×10^{-27} 尔格是它的不可约简的最小原子。它是物质实体的延伸,物质中的能量浓缩到每克 9×10^{20} 尔格。

用麦克斯韦的话来说,法拉第的力线可以看作“属于物体的,在某种意义上是物体的一部分,所以它对远处物体的作用不能说是‘在该物体不存在的地方发生的作用’。”作用——电磁辐射——如法拉第预料的,在空间中以光速传递。他进一步会赞成麦克斯韦对他的“每个物体受到的力和电的作用决定于紧靠它的力线”产生的效应这一观点的评价。这些观点的证实要等到阿尔伯特·爱因斯坦来研究,以更长远历史的眼光来看,他继承了麦克斯韦,就好像法拉第之于牛顿。

狭义相对论并没有赢得物理学界及时的认可,也没有因此对作者的通宵欢呼。不过,认同还是来得够快的。据阿伯拉罕·佩斯所说,正是马克斯·普朗克在文章发表后不久对其中一点提出质问。普朗克是第一个将狭义相对论带到正式的学术讨论会上讨论,也是第一个主持关于相对论博士论文讨论的人。1906 年,当时还不知道他的业余工作的情况下,爱因斯坦的级别被提升为

专利局的“二等技术专家”。

数学家赫尔曼·闵可夫斯基 (Hermann Minkowski), 是爱因斯坦在苏黎世的受到他的学生的称道的一位老师, 他首先正式承认狭义相对论发展的物理实在的新概念。时间和空间不再绝对地处在物理学之外; 它们现在像物质和能量一样参与到物理世界的事件中, 并且可以用方程式来描写它。1908 年 9 月在科隆召开的第 80 届德国自然科学家和医生大会上, 闵可夫斯基发表了新的时空几何学 [见第 187 页图], 他宣告:

我要在各位面前展示的时间和空间的观点已经从实验物理学的土壤中生长出来并茁壮成长。它们是最基本的。从今以后, 独立的时间和独立的空间都注定要逐渐消失到阴影之中, 只有两者的联合仍旧继续成为一种独立的实在……不排除 [狭义相对论的两点假设] 的有效性是世界的电磁图像的真实核心, 洛伦兹发现并被爱因斯坦进一步揭露的这种世界的电磁图像现在已经全部暴露在光天化日之下了。

狭义相对论逐渐渗透到学术界的意识中的过程——就是物理学革命的进程——可以由爱因斯坦的学术职位的连续提升表现出来。1908 年, 爱因斯坦第一次得到伯尔尼大学的一个不重要的无薪教师的职位。同时他发表了题材广泛的论文, 包括将量子理论引进固体物理学的第一篇文章。1909 年, 日内瓦大学授予他第一个荣誉学位。布拉格大学于 1911 年聘请他担任教授。一年以后, 他高兴地回到他的母校, 苏黎世联邦技术学院担任教授。他在那里可以重新和他的重要合作者数学家马赛尔·格罗斯曼 (Marcel Grossman) 合作, 共同克服他在研究广义相对论中遇到的困难。同时, 在 1913 年, 爱因斯坦被邀请担任柏林大学没有教学任务的教授, 这是恺撒·威廉皇帝研究院领导下的普鲁士科学院中的研究职位。

在那一段时期,狭义相对论和量子论征服了欧洲的物理学领域。对于这样重大的“范式移动”,7年或8年不能算是很长的时间。给定了客观的主题和一致同意的理由,科学界乐意地达成了一致。爱因斯坦在柏林的职位上待到1932年,直到阿道夫·希特勒(Adolf Hitler)攫取德国最高权力的前夜,他移民到美国。

广义相对论

1916年,在第一次世界大战的最黑暗的日子里,广义相对论的发表启动了一连串的连锁事件。通过国际科学界的通信渠道,这一期的普鲁士科学院进展也送达远在西方战线的另一端。在剑桥,阿瑟·斯坦利·爱丁顿(Arthur Stanley Eddington)开始计算到发生日全蚀的日子,他安排好计划在1919年5月29日日蚀穿过地球中纬度地区的时候,来证实广义相对论的结论。爱丁顿和格林尼治皇家天文台的安德鲁·克罗美林(Andrew Crommelin)分别在非洲海岸边的普林西比岛和大西洋彼岸巴西北部的索布拉尔设立太阳照相机。

在11月初的一次伦敦皇家学会和皇家天文学会正式的联席会议上,英国天文学家宣布证实了星光在太阳引力场中弯曲:恒星表观位置的位移符合广义相对论所预言的近于2弧秒[见第19页图]。这等于牛顿预言的0.75弧秒的大约两倍。皇家学会主席J·J·汤姆孙概括这一历史事件说道:“证实了牛顿假定的光会被物质偏折[见第54页]……本身在科学上就是第一等重要的事件;更为重要的是这个数值的大小支持了爱因斯坦提出的引力定律。”

爱因斯坦在他生命的其余年代一直是世界上最著名的科学家。他尽到了一个具有幽默和正直性格的大智者自觉的责任。他从不放弃任何有利时机讲述他的目标和信念。有一次,在1940年,他同意利用他的至高无上的权威来影响国家的决定。

爱因斯坦考虑到希特勒的科学家也懂得 $E = mc^2$ 将意味着什么，他答应签署了那封由同事起草要求他签名的信，这封信力促富兰克林·罗斯福 (Franklin D. Roosevelt) 启动了后来所谓的曼哈顿计划。

爱因斯坦对“形式原理”的追求并没有因 1905 年的成就而终止。虽然狭义相对论对机械力和电力有全面的了解，但其中还不能容纳引力及其表现出的超距作用。对电动力学研究将年轻的爱因斯坦带进了科学的主流。在他将电磁学和引力结合在统一的形式原理的研究工作中，他却是孤独的。

开始只有很少几个同时代人对经典引力有着活跃的兴趣。由于他与科学界隔绝，他不知道有一个同时代人对这种力进行了一项重要的研究。哥廷根的罗兰·冯·厄缶 (Roland von Eötvös) 对令牛顿为难的质量的二重性的矛盾性质找到了很好的理由。在运动第二^①定律中，质量是以物体的惯性或对力起的阻抗作用来测度的；就是这同一个质量也是物体的引力，即吸引力的测度。厄缶做了一个改进了的卡文迪什实验，他将两个不同金属的重球放在扭秤平衡杆的两端。这些相互产生引力作用的质量在地球的引力场中原是没有区别的，它们作为在绕太阳的轨道上转动的地球上的惯性质量也应该没有区别。无论太阳在厄缶实验的“上面”或在它的“下面”，都无法在扭秤的平衡中看出扭力变化的迹象。这两种质量在很高的精确度上是相等的。如果早些知道厄缶实验的结果，爱因斯坦可能会更早地得到广义相对论。他可能老早就确信产生引力和惯性的两种质量不仅相同和等价，并且两者本来就是同一个东西^②。

① 译注：原文为“第三”，不对。

② 译注：原文写的是引力和惯性两种“力”，不妥。应为引力质量和惯性质量相同。

“……最快乐的思想”

在1907年,专利局占去了他的白天,爱因斯坦有了“我一生中最快乐的思想!”他回忆道,这“以下面的形式出现……对一个从屋顶自由下落的人来说不存在——至少在紧靠着他的周围环境中——引力场。”(爱因斯坦的着重点)。相应地,引力场只不过是一种相对的存在,就好像磁场是电荷运动所产生。失重的宇航员进一步证实了爱因斯坦给予他的不幸的观察者的经验;他们在失重状态中感觉到好像地球引力场被“关掉”了,这时向地球表面落下的加速运动和起飞时给他的使他保持稳定轨道运动的匀速运动正好平衡^①。

爱因斯坦得出结论:在引力场中经验到的力就好像在加速运动的参照系中的观察者感觉到的离心力一样,是一种“赝力”。向下引力作用产生的感觉,通常可以用向上加速的电梯中的观察者仿制出来。理解引力的途径必须通过研究时空中的加速运动。

能量的引力

爱因斯坦从考虑“能量的引力”开始进行研究。这必要的“赝”性质来源于狭义相对论揭露的辐射能量的惯性。接着有“光速不变原理的常规表述只在不变的引力势场中成立”。为了使从这根本上的直觉中得到的结果有意义,爱因斯坦必须学习一种新的几何学。

能量的引力在引力红移中被观察到:从太阳中的元素辐射的光谱线比之于地球上元素的光谱线向光谱的低频,即红色端有微

^① 译注:在地球的引力场中之所以感觉到重力是因为我们要用力抵抗使我们下落的引力,而自由下落的宇航员不需两腿用力站住,因为地板和自己一同以同一加速度下落,宇宙飞船能不断绕地球运行是因为飞船有足够的水平速度,在自由下落的同时向前飞行,结果就是绕着地球运行。

小的位移。爱因斯坦认为这点位移可以解释为在它的发源地,即太阳的引力场中辐射的频率就已经降低了。同样由于惯性的增加,在匀速或加速运动的参照系中观察到时钟走得比较慢。在太阳或其他星体中“时钟”是辐射频率本身;观察到的星体上发出的某一光谱线的频率比地球上光源的同一光谱线的频率低。振动在时间上的拉长反映光在发射时的惯性受到太阳质量的曳引,虽然这种曳引很微弱。相应地,爱因斯坦发现“光速不变原理的常规表述只在不变引力势场的空间中成立”。

在他将电磁场和引力场耦合的过程中,爱因斯坦发现四维时空不能用普通的几何学。他只是物理学家而不是数学家。他在晚年,为量子理论建立在巴洛克式的数学大厦上而苦恼,他主张,“我作为一个学生不清楚为什么通向更深刻的物理知识的道路必须和最复杂的数学方法联系在一起。”他转而求助于他的同学和朋友马赛尔·格罗斯曼,后者当时是苏黎世的数学教授。

非欧几何学

格罗斯曼给他介绍四维几何学就在书架上、已经准备好为他的目的服务。那是 19 世纪 40 年代高斯的学生乔格·黎曼 (George F. B. Riemann) 的著作。无法形象地构思在二维以至三维的纸上勾画出四维及更多维空间的图像;不过可以向读者保证,甚至最高明的几何学家也无法使它们具体化。不过,这样的空间还是可以用相应的笛卡儿坐标或解析几何的代数方程加以正确的描述。就像要画出地球表面足够大地区的地图则一定要用球面几何来代替平面几何,所以黎曼构建了他的四维几何来想象宇宙远处物体的排列。他知道光从那里以有限的速度传播过来,不过他没有把时间定为第四维。

卡文迪什实验演示了物质是引力场的源,就像后来证明电荷是电磁场的源一样。在那个实验中,测定引力是每克 $6.67 \times$

10^{-8} 达因。不过，它并不产生量子力场的拉力，也不产生斥力。爱因斯坦在黎曼几何中引进引力表明，这个力使四维时空弯曲。弯曲的程度，引力场的局部弯曲的力线的紧密程度，决定场中每克物质受到力的达因数，随产生引力的物质的密度和质量而改变，每克的达因数是 不变的常数。在足够大的尺度上观察，引力现在被看作会引起质量在时空的四维梯度中的加速或减速运动，这四维时空就在围绕着这些物质的引力场之中。在物质运动的时候场中会激起波动，以光速在宇宙中传播——这就驱除了超距作用，从而令牛顿伤心。

星光轨迹和抛物线

星光暴露了时空的弯曲。它沿着时空短程线——以光速沿最小的距离和时间的轨道——在星体和地球之间传播。太阳附近的时空弯曲是通过星光轨迹的偏折所引起的恒星表观位置的移动而被观察到的。星光的短程线相当于平面几何中的直线，这是两点间最短的距离。球面上的短程线是通过球心的平面和球面的交线——航海家的“大圆”^① [见第 19 页图]。星光在宇宙的引力迷宫中弯来弯去，沿着广义的伽利略抛物线轨道传播。这种短程线是黎曼四维几何学（不可能形象地想象出来）中的直线，我们观察到的是星光轨道在时空的引力场中成了弯曲的轨迹。

就像在球面上，其实无论在什么形状闭合的曲面上都同样，时空是没有边界但是有限的。这原是 高斯自己研究出来的，这告诉爱因斯坦如何决定宇宙的极限曲率。高斯已经证明了三（或更高）维空间中表面的“内禀”曲率是可以从二（或更高）维几何的分析中求出。因此，如果发现三角形的三个内角之和大于两个直角，这肯定表示三维中表面的曲率为正，或许它就是球面。爱因

^① 译注：geodesic 一词在数学和物理学中被译为短程线，在大地测量学中被译为测地线。

斯坦知道,宇宙时空的内禀曲率是宇宙密度的函数。这留待观察来确定。

爱因斯坦在他的方程式中发现了另一个令人头痛的不确定因素。方程式暗示宇宙正在膨胀也可能正在收缩。为使宇宙稳定,爱因斯坦在方程式中引进了一个假定的因子。他的“宇宙项”是现在困扰宇宙学家的暴风眼。

爱丁顿于 1919 年证实的星光偏折是纪念广义相对论并把阿尔伯特·爱因斯坦神化的一件十分浪漫的事。然而,在太阳系的力学中爱因斯坦已经找到对他的理论更为可靠的测试。当人们对太阳系的观察已有可能达到足够高的精度时,就发现水星近日点(轨道上距离太阳最近的一点)在移动,或者说轨道每个世纪的进动大约为 574 弧秒。在 1900 年,根据经典理论的计算证明,每个世纪进动的数值应为 531 弧秒。水星进动的观察值与计算值之间的差值 43 弧秒几乎完全符合爱因斯坦按照太阳引力场中最陡峭的(因为最靠近太阳)曲率梯度求出的水星运动。

广义相对论涉及如此广阔的范围,很难进行实验室实验来验证。支持广义相对论的天文学观察只能勉强满足爱因斯坦的格言:“只有经验才能检验真理!”在整个世纪中,物理学家和天文学家设计出能得到更加精确答案的实验来挑战广义相对论。

20 世纪 60 年代,哈佛大学的罗伯特·庞德(Robert Pound)和格兰·里布卡(Glen Rebka)在地球的中等引力场中演示了引力红移。他们证明了在 70 英尺高塔的底部,铁的放射性同位素发射的狭窄的、近乎“单色的” γ 射线的频率低于在塔顶发射的频率。他们测量的结果与理论预言相差在 5% 以内。1970 年,欧文斯谷无线电天文台和哥尔德斯通空间跟踪站共同在加利福尼亚理工学院的合作赞助下,由两组天文学家测量了在靠近太阳的天空中观察到的类星体(有非常大红移的类似于恒星的天体)表观位置的移动。观察的是类星体辐射的无线电波,因为这不需要等

到发生日蚀来遮挡太阳,因此有足够的时间调整到较高的精度。测量结果与爱因斯坦的预言相差在 5% 以内,比之于 1919 年的星体观察有了相当大的改进。

马萨诸塞大学的天文学家在脉冲双星(伴随着一个高速旋转的中子星的发射脉冲无线电波的脉冲星)中发现了测试广义相对论的真实的实验室。他们用波多黎各阿雷西博的 1 000 英尺射电望远镜对在轨道上绕着不发光的伴星运动的脉冲星连续观察了 5 年。他们发现,和水星近日点的移动相似,双星绕引力中心运动轨道的近星点在移动,测量结果和理论精确相符。这个测量可以做得非常精确,因为在一个地球年内星体和它的伴星旋转 1 100 圈。对从这两个天体发射的光的引力红移的多次测量有力地证实了对太阳所作的观察和庞德—里布卡实验,这些都证实了理论。在对宇宙说来只有一刹那的 4 个地球年中,他们也观察到并测量了转动周期的减小。这和理论的另一命题符合一致,它证明了质量转化成引力波能量而减少,就好像质量转化成电磁波那样^①。

难以捉摸的形式原理

广义相对论同时也成为天文学发展变形而建立的观察宇宙学的普遍理论。观察宇宙学从 1924 年爱得温·鲍威尔·哈勃(Edwin Powell Hubble)的观察开始,他证实了仙女座星云是位于银河系以外的空间中的一个像银河系一样的星系,也像银河系那样挤满了几十亿颗恒星。不久以后,所发现的星系以几十亿计。新的种类的宇宙红移加到引力红移上,证明这个突然膨胀的宇宙还在膨胀之中。所有这些以及有关宇宙的新知识都来自可见光以外的电磁波。广义相对论早已作好了准备。

^① 译注:罗素·赫尔斯(Russell Hulse)和乔·泰勒(Joe Taylor)因首次发现脉冲双星并进行了研究而获得 1994 年诺贝尔物理学奖。

狭义相对论将力学和电磁学统一起来。它将时间和空间合并成时空,这是电磁场的物理变量,也是电磁波作用在量子中的物质化。广义相对论将引力和惯性融合起来,它给时空以物质存在产生的引力场结构。可是,场论不承认作用量子。在这两个概念世界之间还没有架起桥梁。认识要求将它们统一起来,否则就应说明它们分开存在的理由。在这空虚的深处是粒子和场对立的二象性。对爱因斯坦来说,这一深渊是认识上的一个重要的问题。由他自己的研究开启并吸引他的同时代人的作用量子,作为一个研究前沿阵地却没有引起他的兴趣。

最令爱因斯坦感到烦恼的是在量子理论中接受概率作为物理世界中事件的完备解释。他继续从事于寻求决定这些事件的经典定律,坚定地相信事件都是完全确定的。1916年以后,爱因斯坦不再参与经验所及的有关自然界最近和最远处的量子理论的深入研究。总之,物理学已经从牛顿秩序的不完全命题上取得很大的成就。“对大多数人来说,暂时的成功”,他写道,“带来的是更多确信的力量而不是对原则的思考”。

爱因斯坦把他剩下的研究生命用在试图完善普遍的形式原理的表述上,这是他在1905年很有信心地提出的目标。1949年在他70岁时发表的广义的引力理论中,他认为他已经找到一种至少能将狭义相对论的电磁场和广义相对论的引力场统一起来的方法。

爱因斯坦在为《科学美国人》写的文章中承认这一理论是“启发式的”。它还没有得出“可以面对经验的结论”,他希望这会引出“新数学方法”的发展。

爱因斯坦的后继者现在已经进一步增强了达到他提出的目标的信心。他们希望找到自然界各种力的统一性,但不是通过爱因斯坦心目中的数学方法而是在量子理论中。归根结底,这要等到引力量子现身。

第三章

光和物质

我们观察能力的精细程度以及相伴的干扰的微小程度都有一个极限,这是事物的本性中固有的极限。

狄拉克 (P. A. M. Dirac)

马克斯·普朗克提出了物质和光相互作用的量子。阿尔伯特·爱因斯坦在量子中发现了能量和物质的等价;他在光速不变中发现时间和空间融合在时空的物理实在中。到世纪中叶,他们的继承人在重新调整后的物理学的基础上,立即继续深入认识我们的感官熟悉的身边世界中各种各样事物的基本物理规律。

量子电动力学——它的首字母缩略词为 QED——能完全描述电磁力的作用。因此,它说明了核以外原子的结构以及自然界中存在的 92 种不同的原子在周期表中的排列次序。并依次解释了化合物中原子的自组织构造。总之,QED 能完全描写光和物质的相互作用。

通过初级的有机分子的化学键产生的光合作用俘获太阳光的能量,以维持地球上的生命。光和物质的另一相互作用是周围世界将可见光谱中各种颜色的光选择反射到我们眼中。到了视网膜上,又通过另一种相互作用激发了视觉。生命是活细胞中大

大大小小的分子之间的量子交换。物理学家已经在 QED 中,得到了人类生存的狭小宇宙环境中的终极理论。

在上一世纪的后半叶中,物理学家将 QED 的概念推广用于探索它本身适用的范围之外。他们想证实在自然界复杂性的基础中仍旧会找到秩序和简单性,但这种信念不时受到打击。首先,他们遇到了当时还不知道的两种自然力。其次,原想用来分出终极粒子的“原子粉碎机”却轰击出了许多寿命短暂的粒子。在这些新粒子衰变过程中,物理学家第一次遇到自然秩序结构上的不对称性。

企图用量子色动力学的理论整理出实验发现的杂乱无章的规律,向物理学提出了新的任务。从寻找不能再分的物质粒子的探索转变为研究物质怎样会成为这个问题的上。这里先谈谈宇宙学,它追溯到遥远的过去,接近于我们观察到的宇宙开始的一瞬间。到了那里,进入我们视野的是幽灵般的对称性。对称是知觉和认识的中心。一种大家熟知的对称性是方程式两边平衡。在自然界中到处都可以觉察到对称性,有辐射对称,例如水母,左右对称的如脊椎动物。对称性可以在物理世界的基本秩序中找到,也可以在守恒定律中发现。幽灵般的新的对称性是最根本的规律。平时对称性不被人注意,但当它被破坏时就会显示出来。宇宙的原始核中只有高温度和高密度。在下一时刻,接连发生对称性的破缺——即相变,就像水变成冰或者变成蒸汽——出现了人类现在的经验所知道的物质——能量和粒子——波粒二象性。

QED 概念机构的结构促成了 20 世纪前半叶最光辉、最有毅力的、才能出众的人一代又一代合作。QED 的方程式在人类经验中最小的误差范围内经受了实验的检验。从这些理论本身引出的技术给这些实验带来前所未有的精确性。和计算机芯片有关的固体电子学及光纤光缆等等 20 世纪超级智力的成就使得技

术、经济和文化以史无前例的速度改变。

20 世纪 30 年代在哥伦比亚大学的拉比建立了美国最早的新物理学培养中心。半个世纪以后，他承认：

我觉得我这一代和现在的一代没有认真花时间去努力使相对论和量子力学这种超常的现象能够被受过教育的人和知识分子接受。我肯定这是可以做到的，因为我就是这样接受它的。之所以没有能够使广大受过教育的公众接受这些科目，我认为这是由于将科学，特别是将物理学排除出中学课程之外的后果。除非在这一方面付出艰苦的努力，真正艰苦的努力，否则未来的前景是暗淡的。

很少人知道在多种多样的事物、过程和经验之间深刻的统一性已被 QED 认识到了。以某种方式共享这个经验是第三个千年开始的时候充满活力的理由。

永不静止

量子物理学探究原子大小 (10^{-10} 米) 和原子事件 (10^{-21} 秒) 的物理实在。在忙碌的原子内部约 10^{-30} 立方米的范围内，很难想象 10^{-36} 立方米的粒子待在同一地点的时间会长于 10^{-20} 秒。在一般经验的立方米世界中，按比例增加的时间相当于几十亿年。小到那个程度，粒子永远——R·P·费曼在加利福尼亚理工学院课堂上用的叠句——“蹦蹦跳跳”。只要它们不再一同蹦跳，经典物理学定律在这里就同样有效。对这种相应的表面上的无序性，量子物理学的任务就显得有意思了。到了这个限度，仍旧证实在量子事件中观察到了经典物理学中重要的守恒定律。

被打入地狱的戴维·玻姆 (David Bohm) ^①, 原是一位美国物理学家, (在 20 世纪 50 年代“原子秘密”的喧嚣声中) 被驱逐到英国伦敦伯克贝克学院。这对他来说打开了宽阔的大门: “在量子精度的水平上, 物体不再有任何本身独具的“固有”性质 (例如波动或粒子性); 相反, 它和与其相互作用的系统不可分地共同分享所有的性质。进而言之, 由于给定的客体, 例如电子, 在不同时刻与不同的物体相互作用因而实现了各种潜在的可能性, 它在不同的形式 (例如波动或粒子) 之间不断变换, 它可以通过这些不同的形式的任何一种来表现自己。

玻姆用“例如”, 或许他认为, 在量子尺度上的时空事件可能包含除了可以被人类察觉得到的波动和粒子以外, 还有其他的形式。他并不认为这遥远的世界可以看作是与身边熟悉的世界没有关联的。与此相反, 玻姆坚持认为: “量子力学的潜在可能只能通过明确定义的经典事件才能变为现实。进而言之, 这种依赖关系是相互的。因为只能根据组成系统的分子的量子理论, 才可以认识系统的大尺度行为。无论大尺度或小尺度的性质, 都需要用更为基本的不可分的单位的互补观点来描述, 即把系统看作一个整体。”

这一种情况是必然的, 否则量子世界就在经验可及的范围之外。激发量子事件的仪器在引出力学的、电或电磁的效应时就使它们变为可觉察的了。正如他们所做的, 在这些效应中把量子事件显现出来了, 所以说在所有时刻、任何地点都可觉察到量子事件。

在高高的天空中, 太阳光子通过保护生命的臭氧层时激起氮

^① 译注: 玻姆是犹太人后裔, 在第二次世界大战期间曾参加曼哈顿计划的工作, 大战后任职普林斯顿大学。1949 年, 他拒绝在非美活动委员会作证反对奥本海默而被逮捕, 并受到控告。后虽被宣告无罪但却被普林斯顿大学解雇, 在美国无法找到工作, 只能去巴西, 后去英国任教。

和氧分子外层轨道上电子的振荡。正如法拉第证明的,电荷振荡时辐射电磁波。在远离太阳的地方,碧蓝的天空看上去在发光;这是再次发射的太阳光。在地上,太阳的白光都被吸收,以热的形式重新辐射出去。黄红色波长的太阳光谱峰值处的能量被叶绿素分子吸收,几乎所有地球上的生命都依赖这些能量。叶子将未被吸收的太阳光再发射出去,其中最强的是绿色波长。叶子和花朵,颜料和染料,金子和银子的原子与分子有选择地再辐射太阳光中某些频率的光,被人感觉到的就是光谱的颜色。“反射”就是再发射。在量子世界的级联事件中没有被动的中间阶段。

牛顿发现很容易把光想象为某种质量足够小并具有动量的微粒[见第54页]更为简单。早在19世纪,托马斯·杨通过演示光的波动性质给经典物理学带来了麻烦[见第62页]。1908年,乔弗雷·泰勒(Geoffrey I. Taylor)在剑桥大学做了一个实验,证明光既是粒子又是波动。^①他用一个微弱的光源,光通过双狭缝以后使照相底片曝光,计算表明每次只有一个光子到达,两个光子先后间隔可多达1个小时。这样,曝光几个星期后,底片上显示出托马斯·杨的波动干涉条纹[见第115页图]。任何对光既是波动同时也是粒子的怀疑都被这以后50年罗切斯特大学的罗伯特·普夫里哥(Robert Pfleeger)和列奥纳德·曼德尔(Leonard Mandel)的实验消除了。灵敏的计数器表明单色激光的光子一个一个地到来。可以证明,在给定点上干涉条纹的强度相应于一个接一个地到达的光子的数目。因此,波动性质是和每一个光子相联系着,并非许多光子的集合才显示出波动性。

某些原子的量子行为可以通过抑制其无规则蹦跳而被观察到。低温可以实现这种抑制作用,就好像在所有元素的相变时看

^① 译注:乔弗雷·泰勒(1886—1975年)英国物理学家、数学家。1908年毕业于剑桥大学三一学院。1909年发表研究量子的文章,但译者未查到曾做过这里所说的光子衍射实验。

到的那样,某些化合物(如 H_2O) 随着温度降低一步一步从气态到液态到固态。氦一直保持气体状态,直到非常低的温度 4.2 K。20 世纪 30 年代,在剑桥的皮奥特尔·卡皮察(Pyotr M. Kapitza) 证明,氦向绝对零度继续冷却到 2.2 度就会出现稀奇的相变,变成超流体。现在它变成另一种不可思议的协调一致的状态,氦原子会沿着容器壁往上爬升形成一层薄膜。它们会进入放在装有液氦容器中的空试管内,直到内外液氦表面平齐为止。它们以声音的速度传热就好像陡峭波的脉冲一般。在这样冷的世界中不会有观察者来记录经典物理学定律被如此破坏。这些定律都是在地球上允许发生生命过程的狭窄的温度范围内获得的[见第 6 页图]。应该认识到在物理世界的其他地方也会发现惊奇的事物是很自然的。

在公众的心目中,首先是量子理论征服了物理世界,以后又进一步探索使原子核结合在一起的“强”力——它的“强度”现在大家都很熟悉了。这种自然界的第三种力在 1931 年第一次被测量到是在原子核直径 10^{-14} 米范围以内起作用。核力反抗电磁斥力将核粒子结合在一起,在很近的距离上达到最大值。在 20 世纪 30 年代还遇到另一种短程力,称为弱力。它的作用可以看作和强作用相对立。弱相互作用参与从原子核内发射粒子的过程。

或许值得注意的是,直到不久之前,自然界的这两种力一直不知道,但它们的发现也不是突然发生的。人们首先掌握了机械力和电磁力。只是到那时他们才制造出达到短程力作用范围的仪器。

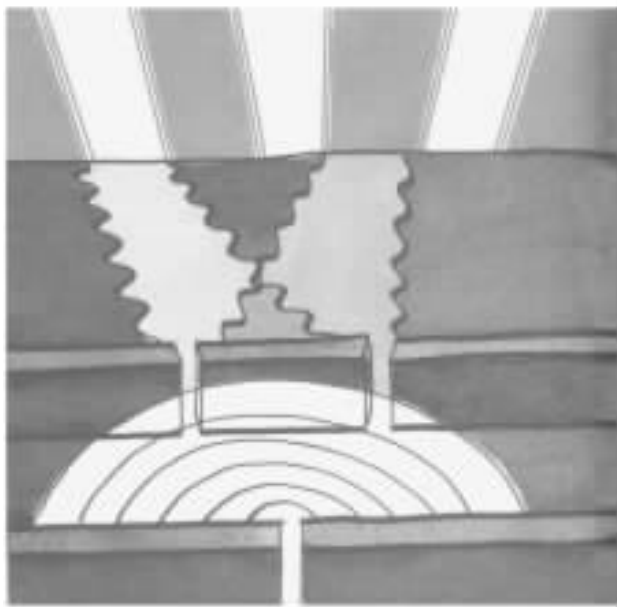
在过去的 25 年里,理论物理学家已经将几种力和众多的粒子整理出一些规律。他们已将两种短程力纳入 QED 的概念系统。每一种新的力有它自己的量子理论。它们的作用量子——电磁力的量子,即光子的堂兄弟——已经被实验发现了。

弱力已经和电磁力统一并为实验所证实。“电弱”力和强力

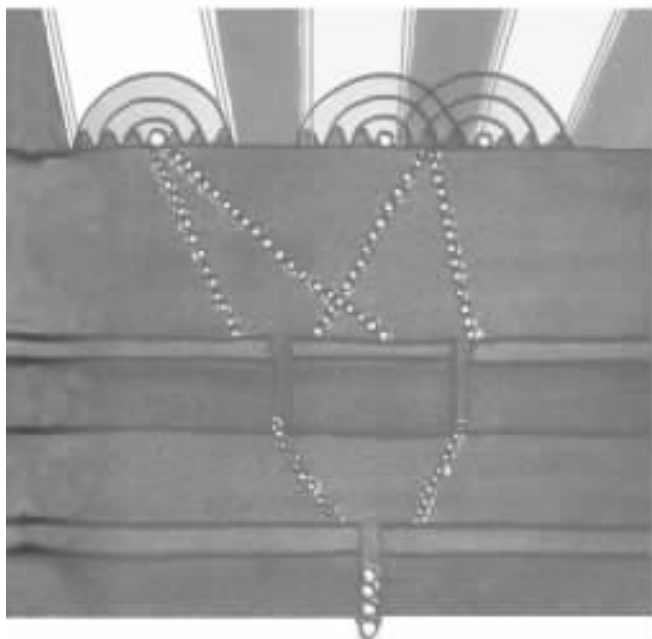
的统一被称作“大统一理论”，写成 GUT。不过，检验这个假设的实验要求能量达到当前加速器技术能达到的 10 倍以上。

没有不可分的原子

探寻最终的不可分的原子的努力终于使人们领悟到根本不存在这样的东西。普通的物质不是约简成一种，而是 4 种不同的粒子，每两种一类，夸克和轻子两类，这些是到现在为止还不能再分的粒子。如果说 4 种粒子的发现表示只有一种粒子的经典观念的失败，那么 4 种是足够了。所有普遍经验中自然界的多样性都是两种夸克和两种轻子通过 4 种力的相互作用产生。



光的波动性于 1817 年在杨氏实验 [见第 62 页] 中得到证实。在密闭的房间里，他使光通过一个垂直狭缝。光再通过小房间里的另两个垂直狭缝。光在房间的远端墙上产生明暗相间的垂直条纹。杨证明从两个狭缝出射的光波通过不同的距离后到达同一点时如位相相同，则互相加强产生亮条纹，如它们到达同一点的位相相反，则互相抵消成为暗条纹。



光的粒子性于 1908 年在泰勒做的这个实验中得到演示 [见第 112 页]。在关闭着的房间里,他用一个非常微弱的光源,设法使光源每一次只发射一个光子,可能要几个小时才发射一次。经过好几天曝光,远处墙上的照相底片记录下经典的杨氏条纹。泰勒和别人验证的实验都表明,每个光子都通过两个光缝(它的波动性),然后经过不同的距离到达照相底片,记录下同一个光子经过两条光路后位相相同或位相相反^①。

现在已经知道,这些粒子都有各自的反粒子。但反粒子不是通常物质的构成部分。它们在自然界中很少出现。在建造出用来研究这些特殊的物质粒子的加速器中制造出了反粒子,由此知道普通物质的粒子来源与这些物质有关。即使要寻找的粒子减

^① 译注:这个实验实际上是证明单个光子的波动性,而不是证明光的粒子性。光电效应及康普顿效应演示光的粒子性。

少到只有一种——如在大统一理论 (GUT) 中预示的那样,夸克和轻子融合为一——肯定还有它的反粒子。

正如将要看到的,普通物质的夸克和轻子加上另外两代,质量和能量一代比一代更大的夸克和轻子所造成的复杂粒子,是 20 世纪 50 年代物理学混乱的原因。加速器束流在极短的时间在靶的微观区域内造成了这样的条件,这条件和在恒星内部,以及在恒星和星系的生命过程中的突变的事件中发现的条件十分相似。随着加速器能力的增加,在它们靶上引发的事件的能量达到更小、更密和更热的宇宙更早时期普遍存在的条件相同。

粒子物理学的研究道路是从原子内部的研究开始到宇宙历史的早期阶段,最后和宇宙学研究汇合到一起。广义相对论预言不稳定的宇宙。银河系以外第一个星系的确认表明宇宙在膨胀中。将宇宙历史的录像带倒放回去,可以看到宇宙的年轻时代一定更小、更热,整个宇宙充满了物理学家加速器的靶上在短时间内能达到的那样大的能量。计算表明,至今所能达到的最高能量相当于观察到的宇宙历史上第一秒钟时的能量。粒子物理学家希望能在第一秒钟的更早些时刻中找到符合大统一理论的条件,可以将 3 种量子化的力统一为一种原始的力。

宇宙学家希望从创世大爆炸进程中的宇宙时间的第一刹那中找到可以看作观察到的宇宙的大尺度结构的事件。他们开始和粒子物理学家合作寻求最终的统一:怎样将粒子物理学家的 3 种量子力和宇宙引力统一起来。理论预料这种统一出现在能量比 3 种量子力统一的能量更大两个数量级的尺度上。最终的统一还没有完成,至今它还远在实验所能及的范围之外,粒子物理学的“标准模型”和广义相对论还只能分别说明有关所有实验和观察所知的物理世界。

不要问是什么而要问从何而来

问题不再是:最终的粒子是什么?而是:这种粒子从何而来?

物质和能量本是同一物,更准确的问题是:物质粒子的静质量从何而来?

静质量区别于粒子因获得运动能量所添加的质量,例如在粒子加速器中得到了能量而增大了质量。因为无论多少能量都不能使粒子的速度超过光速,用于使粒子加速运动的能量都转变为它们的质量。光子,即电磁量子,没有静质量;它总以最高速度飞行,从不静止。不过它具有有效质量,这来自产生它的能量。按照狭义相对论方程 $m = E/c^2$ ——熟知的 $E = mc^2$ 的反函数。静止的或以匀速运动的物质粒子具有经典的由它在引力场中位置决定的牛顿势能;它具有静质量。这就是它之所以成为物质粒子的原因。狭义相对论证明静质量具有另一种势能:转变为辐射能的势能。

1990 年以来,随着理论和检验理论的加速器能力的增强,静质量的来源问题已提到日程上并接近于解决。人们在宇宙据以构成的幽灵般的对称性的破坏中发现了静质量的起源。宇宙创造后对称性的最后一次破坏——实验所能达到的最早的一次——使弱力从电磁力中分离出来。所谓的希格斯 (Higgs) 粒子是在当时宇宙能量中占主要地位的量子,在这一事件中它获得了静质量。这一假设的检验需要达到超导超对撞机所能产生的巨大能量—— 4×10^{13} 电子伏特,即 40 太电子伏特,40 TeV——这台机器原打算建造在得克萨斯州的瓦萨哈契。

1994 年,正当超导超对撞机建造到一半时,计划被 130 届国会取消了。美国政府公开支持物理学的情况从未得到过选民的拥护。受到核武器的威力的威胁,军事建设要求过分庞大的冷战武器发展预算,以用于资助大学 and 新的国家实验室的物理学研究。能源部、准军事的原子管理机构继续提供主要的支持。正如埃尔温·薛定谔 (Erwin Schrödinger) 于 1953 年意识到的,“各个国家的国防部”的开支加速了“消灭人类的计划的实现,这些人

和我们都是心连心的。”选民们在很早以前就应当从物理学界听到罗伯特·威尔逊 (Robert R. Wilson), 在伊利诺斯州巴塔维亚的当时国内最强大的加速器的设计者, 在国会的证词: “这无助于……保卫我们的国家, 除非硬说它对保卫国家有价值。”

电子的发现

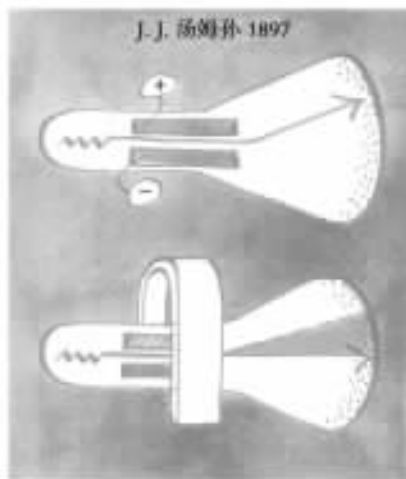
直到 19 世纪末电子的发现为止, 原子一直没有受到物理学家的注意。迈克尔·法拉第关于电化学的工作为此项发现提供了关键性的线索 [见第 72 页]。1881 年, 物理学家赫尔曼·冯·亥姆霍兹 (Hermann von Helmholtz) 观察到: “现在, 法拉第定律的最令人吃惊的结果或许就是: 假如我们接受基本物质是由原子组成这一假设, 我们就不能避免得出这样的结论: 正电和负电也各有基本的组成部分, 它们的行为就像电的原子。”

其他人也都信服这个观点。德国吹玻璃工人赫尔曼·盖斯勒 (Hermann Geissler) 设计的真空泵将玻璃容器中的气压降低至 1 个大气压的几分之一。在这样的容器两端装上电极, 在两电极间加上高电压, 威廉·克鲁克斯 (William Crookes) 使得里面的稀薄气体发出辉光。辉光的颜色依赖于气体的种类 (今天的“霓虹灯”在全世界范围内激励着经济活动)。

克鲁克斯将电压加得足够高, 气压降至足够低, 他看到弥散的辉光变成从负电极发射出来, 聚集成一束细的射线。用磁场使“阴极射线”发生偏转, 他发现射线带负电荷。在法国, 琼·佩兰 (Jean Perrin) 发现将一片金属片插入射线中, 会在绿色辉光中投射出阴影金属片, 并且得到负电荷。越来越多的观察者推测阴极射线是运动着的带负电的粒子, 爱尔兰物理学家乔治·约翰斯通·斯通尼 (George Johnstone Stoney) 于 1874 年将它取名为“电子”。

在 1897 年, 剑桥大学卡文迪什实验室的 J·J·汤姆孙确证

了电子的存在。他在阴极射线管中在与射线路径成直角的方向上安装了第二对电极 [见本页图]。电场使射线往正极板的方向偏转。然后他测量出克服磁场造成的、使射线在相反方向偏转所需的电场力。从而,汤姆孙获得了现在已都熟悉的射线中的粒子的电荷对质量的比值。他得到这个比值为 1.77×10^8 库仑/克。



电子的荷质比是 J·J·汤姆孙于 1897 年 [见第 118 ~ 119 页] 测定的。此前克鲁克斯已得到真空中从高压电极上发射出发辉光的束流 [见第 118 页]。电场使束流偏向正极 [上图], 这表明束流是带负电的粒子。通过测量出抵消偏转的磁场强度, 汤姆孙求出了电子的荷质比为 1.77×10^8 库仑/克^①。

在莱顿,彼得·塞曼 (Pieter Zeeman) 将钠焰放在强电磁铁的磁极之间。用衍射光栅,这光栅或许也是罗兰提供的,他观察到钠的明亮的黄双线因磁场力的作用而变宽。场强的变化会造成一些元素的光谱线分裂。洛伦兹和塞曼一同计算出磁场强度与

^① 译注:原文数据有误,经译者改正。

光谱线宽度的改变(波长除波长^①)的比值。这也是测量电子电荷与质量比值的另一种方法。它与汤姆孙的结果符合得很好。这个实验也明确地演示了电磁辐射由带负电荷的电子的运动所产生。

从荷质比不能分别得出电子的质量和电荷,荷质比没有出现不同的数值。不过,可以将这个数值与 1830 年迈克尔·法拉第得到的氢的相应数值比较一下。他证明通过 96 500 库仑电量在电解槽负极上就能收集到 1 克带正电的氢[见第 59 页图]。由此得到,要收集到 1 克电子需要这些电量的 2 000 倍。电子的荷质比(1.77×10^8)差不多比氢的荷质比(9.65×10^4)大 2 000 倍 [$1.77 \times 10^8 / 9.65 \times 10^4 = 1.834 \times 10^3$ ^②]。因此,电子比最轻最小的原子——氢原子轻 2 000 倍。现在更精确的值是电子质量为氢原子核(即质子)的 $1/1836$,这样微小静质量的电子是物质的粒子,也是电的最小单元。

这表明原子是由更小的粒子组成。质量微小的电子和具有原子绝大部分质量的粒子各带有相反符号的电荷而结合在一起成为电中性。在阴极射线管里面,由于电势差而将金属阴极中的电子硬拉出来形成射线。下一个问题是电子在原子结构中处于什么样的位置上。

X 射线和自发放射性

两个意外的发现开通了解决这个问题的道路。威尔亥姆·康拉德·伦琴(Wilhelm Konrad Roentgen)在慕尼黑发现,放在阴

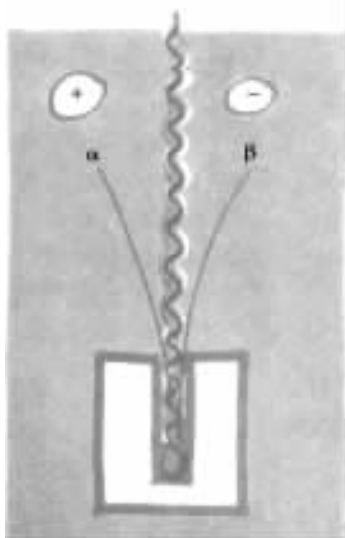
① 译注:在光谱学中通常用光谱线的波长宽度 $\Delta\lambda$ 和该谱线中心波长 λ 之比 $\frac{\Delta\lambda}{\lambda}$ 来表示谱线宽度。

② 译注:原文中这个式子漏写 10^8 和 10^4 两个因子。

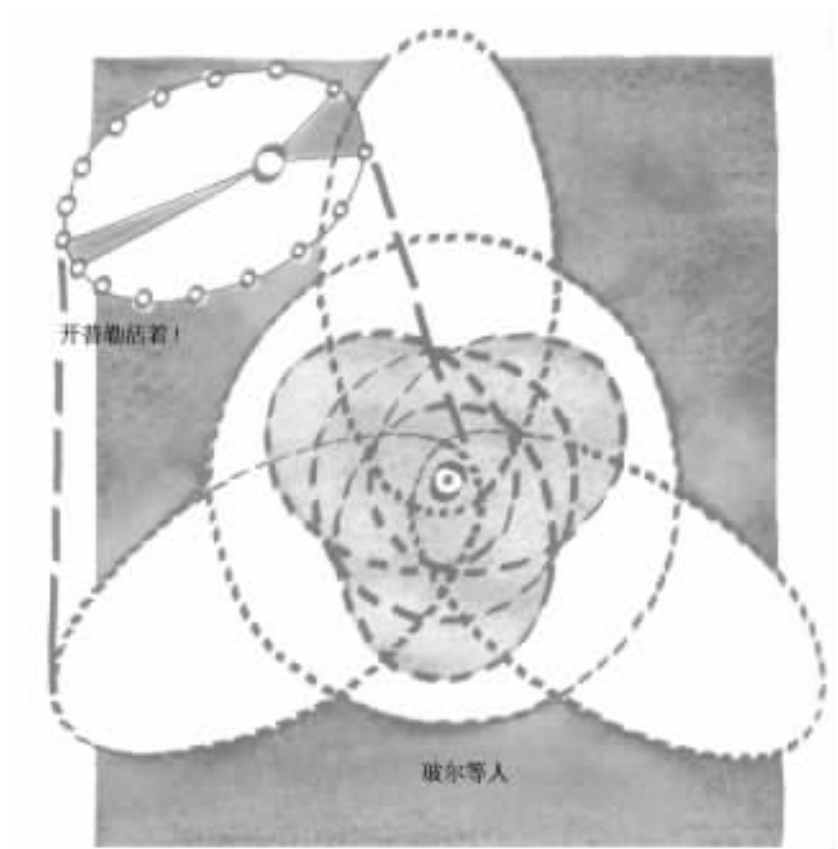
极射线管中的荧光物质会发光^①，特别是当他放一片金属片在射线中荧光更强。用不透光材料试图挡住这种辐射的实验表明它的穿透力极强。不能用磁场使它偏转表明它是真正的辐射，这是在电磁波谱的紫外光以外的辐射。伦琴发现了 X 射线。1895 年，他用第一张 X 光照相——伦琴夫人右手骨骼的 X 光照相——演示了它的应用潜力。

伦琴的发现鼓舞了巴黎的亨利·贝可勒尔 (Henri Becquerel) 于 1896 年去寻找他正在研究的荧光材料是否除发射可见光外也发射 X 射线。他在为遮蔽太阳光的照射而用厚厚的黑纸包着的照相底片上放一小块含铀的矿石，他指望太阳光会激发荧光。他得到的回报是底片上的斑点。有一张底片遗忘在一只抽屉里，上面还放着一块矿石。他得到的更重要的回报是整块矿石模糊的黑色图像。

贝可勒尔的发现后来被皮埃尔和玛丽·居里 (Pierre and Marie Curie) 发现的另两种放射性元素：钋和镭得到了证实。又发现它们各自都有特征的发射率。样品中的每一个原子在任何时候都有某个百分比的平均发射概率。对这些自发的辐射没有现成的解释。也想不出方法来解释为什么样品中某个特定的原子会在某特定时刻发射。对这种不确定的，并且也是自发的事件在经典物理学中还没有过先例。

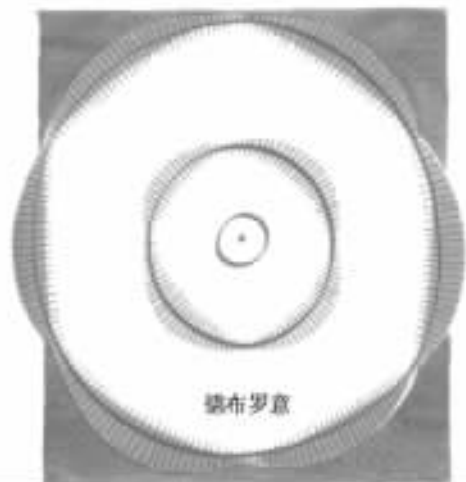


^① 译注：这几句话不准确。伦琴发现 X 射线时是德国伍兹堡大学教授。他在研究阴极射线的时候，一次在黑暗的实验室里，用厚纸板包住阴极射线管使其不漏光，但他却于无意中发现房间另一边的荧光物质发光，从而发现 X 射线。



像太阳系的原子模型的类比图，用这张图形象地描绘直径为 10^{-8} 米的原子中直径只有 10^{-12} 米的微小的原子核和象征性的电子轨道。玻尔证明，电子被限制于特许的能级或“轨道”上，这些是普朗克常数的整数倍所规定的 [见第 126 页]。索末菲证明，在椭圆轨道上运动的电子服从力学定律角动量守恒，像开普勒的行星一样在同样的时间内扫过相同的面积 [见第 49 页和第 127 页]。

恩斯特·卢瑟福 (Ernest Rutherford), 他是来自新西兰的 J·J·汤姆孙的学生, 对这种辐射作了深入的研究。他发现至少有 3 种性质不同的辐射从铀和钍中发射出来。他称为“ α ”辐射的被确认为是一种微粒——重的带正电的粒子。他的“ β ”射线就是汤姆孙的电子流。他也辨明“ γ ”射线是真正的辐射, 而且比伦琴的 X 射线的频率和能量更高 [见第 121 页插图]。1903 年卢瑟福和他在麦克吉尔的同事弗里德里克·索第 (Frederick Soddy) 一同证明, 发射特定的 α 或 β 射线后, “形成的原子的物理和化学性质完全不同于原来的原子。”原来的元素变为化学上完全不同的元素。卢瑟福和索第证明了炼金术士的野心, 即将废物变成金子是可能实现的。他们还肯定了威廉·普鲁特 1815 年的猜想 [见第 62 页]: 各种各样的元素一定是由不同数目的终极原子所组成, 这种终极原子非常像氢。



电子轨道的圆周, 根据德布罗意指出的, 总是等于电子波长的整数倍 [见第 130 页]。电子在轨道上绕行的能量是普朗克量子的整数倍的函数。就是这种“作用”抵消了原子核的正电荷施加的静电力。里面轨道上的两个波长表示存在两个量子, 有较高能量的外层轨道上有 4 个量子。

不久之后卢瑟福在英国曼彻斯特大学证实 α 粒子是氦的离子,其质量为氢原子的 4 倍。他想出了一种利用这种粒子近距离观察原子内部具有原子绝大部分质量的带正电荷的成分的方法。

具有法拉第的形象思维的天赋,卢瑟福在他研究的原子内部看不见的维度中能得心应手。他针对怀疑电子的物质性的人宣布:“怎么,我可以像看见我前面的汤匙一样清楚地看见这个小家伙!”卢瑟福知道,靶原子和 α 粒子的正电荷相互排斥会使 α 粒子从靶上散射。通过它们的散射角的测量就可以得到有关靶的大小的一个概念。

从这以后,散射实验一直是粒子物理学的主要手段。今天用粒子加速器、闪烁计数器和计算机来做这项工作只不过是卢瑟福最先设计的实验按比例扩大——扩大好几个数量级——并将实验自动化。在 1911 年,他在铅块上打一个小洞,在底部放一些放射性元素小块,从小洞中射出 α 粒子来。将 α 粒子瞄准金箔靶子。他用一个荧光屏来探测反弹的 α 粒子。荧光屏像低倍显微镜上的滤波片那样装在旋转的架子上,可以将它绕着靶旋转到所要测量角度的位置上[见第 125 页图]。

按照汤姆孙提出的模型——正电荷弥散在整个原子体积中,负电荷被束缚在原子表面——只会产生小角度散射的花样。卢瑟福吃惊地发现有一些 α 粒子以很大的角度被弹开,甚至有一些沿着入射的方向被反弹回来。“就好像你对着一张薄纸发射一颗 15 英寸的炮弹,结果炮弹被弹回来打中你自己的头!”

卢瑟福的计算证明“原子的正电荷集中在很小的中心部分或所谓的原子核上,负电荷分布在相当于原子半径的整个球体内。”他算出“核”的直径为 10^{-12} 米。卢瑟福还发现了亥姆霍兹猜测的带正电荷的粒子。电不仅是以分立粒子的形式发生作用;现在还发现原子是由带电粒子所组成。



原子核是被轰击的靶子,自从 1911 年卢瑟福将 α 粒子瞄准原子核 [见第 124 页] 以来所用的能量越来越高。根据 α 粒子从靶子反弹的角度他算出原子核的直径为 10^{-12} 米,为当时估计的原子直径的 10^{-4} 。第一台粒子加速器,“电压倍增器”,质子在其中通过一次高电压加速后达到 0.6 MeV 能量 [见第 141 页]。用这台仪器,科克劳夫和沃尔顿完成了证实 $E = mc^2$ 的第一个实验。

根据爱因斯坦在 1905 年最早的两篇论文中的一篇所建议的实验方法求出原子的直径为 10^{-8} 米。以后的测量确定为 10^{-10} 米。比之于 10^{-12} 米,立体几何学表明核只占据原子体积的一小部分 ($10^{-12}/10^{-10} = 10^{-2}$ ①; $10^{-2} \times 10^{-2} \times 10^{-2} = 10^{-6}$)。电子占据的体积更小,小到可以忽略不计的小部分。卢瑟福发现原子内部原来是真空,是广阔虚空的空间。按比例将原子核放大到太阳的大小,从原子核看到最近的电子轨道在冥王星之外。原子的质量都集中于小小的原子核上。可以算出原子核的密度大到难以想象,为水的密度的 10^{14} 倍。一滴原子核材料的重量超过海洋中所有船只的总重量。

① 译注:原书中此式写错,现已改正。

当然，日常经验中很难看到物质是由像太阳系那样的原子构成的。阿瑟·斯坦利·爱丁顿是一位早期的新物理学普及者，他举他的书桌为例：“绝大部分是空虚……在这空虚中……许许多多电荷以极快的速度飞来飞去……如果它们紧紧地堆在一起……那它比桌子本身的体积的十亿分之一还要小……当我将纸放在书桌上时，书桌中带电粒子以极大的速度从下面猛烈撞击纸张，纸张就来来回回地振动着保持在近乎稳定的水平上。”

卢瑟福的太阳系原子本身就有深刻的问题。库仑证明的静电力按距离平方而减弱。因此，静电力在电子和核之间无限靠近的距离时达到最大。按照经典力学，电子绕原子核的轨道运动的动量——或者说速度——必须达到足够的数值才能抗拒如此大的力。在轨道上运动的物体必定有加速度。按照经典电动力学，加速运动的电荷必定产生辐射。由于辐射电子就要不断损失能量，因此，电子就要以越来越快的速率螺旋形地盘旋，最后落到原子核上。曾以他的紫外灾难向马克斯·普朗克提出了挑战[见第68页图]的吉姆斯·金斯，计算出这样的原子组成的宇宙寿命只有 10^{-20} 秒。

量子轨道上的电子

尼尔斯·玻尔是到卢瑟福的实验室来学习的丹麦学生，他认为普朗克对金斯的第一个灾难的解答可能和这第二个灾难有关联。原子是一个违背经典物理学的永动机。它的电子在稳定的轨道上运动而不会螺旋式地旋转而落到原子核上。玻尔转而提出无限多轨道中有哪一些是可允许的这样的问题。

爱因斯坦证明过，携带足够能量的辐射量子——其能量等于频率乘以普朗克常数 h ——能够从与其作用的原子中踢出一个电子[见第86页]。原子能感应的只是能与其发生共振的某些特定频率的辐射及量子能量。玻尔大胆地假设电子轨道的稳定性

也受作用量子 $h = 6.6 \times 10^{-27}$ 尔格·秒所制约。电子的质量乘以速度再乘以它在轨道上运动时到核的距离就成了经典力学中的“作用”^①,就是这个作用在运动的时候抵消了带正电荷的原子核的电磁吸引力。玻尔假设这种电子的作用必定等于 h 或为 h 的某个整数倍数。原子发射或吸收的辐射量子所具有的能量正好等于允许的电子轨道之间的能量差。

氢原子发射的线光谱的辐射频率也就是辐射的能量,在光谱学中已经作了精确的测定。玻尔假设,原子发射的光子能量等于允许的轨道间的能隙,从而求出了这些轨道的能量差。他发现轨道和轨道间的能量差确实与整数乘以 h 有关^②。显然,当氢原子中的电子从允许的较高轨道跳到较低的轨道时,发射一个给定频率的辐射量子,相反,如果吸收一个辐射量子,电子就从较低的轨道跳到较高的轨道。如果能量足够的话,电子就要摆脱原子核的束缚而飞走,这就是爱因斯坦光电效应。

电子并不是从一条轨道移动到另一轨道;而是在一个地方消失,在另一个地方出现,而且不能保证这一定是同一个电子。当然,这种不连续的跃迁对于熟悉的连续运动的世界来说是很陌生的。这可以看作辐射量子不可分性的证据。这种不可分性可以看作是作用的原子^③ 6.77×10^{-27} 尔格的不可进一步分解的表示。有了玻尔的帮助,普朗克的量子就保证了宇宙预期生命为 10^{20} 秒。

1914 年,慕尼黑的阿诺德·索末菲 (Arnold Sommerfeld) 对玻尔的原子作了重要的改进。电子在轨道上运动的速度非常高,因此需要考虑狭义相对论:必须计入电子的质量增加。在氢和其他

① 译注:这就是电子轨道运动的角动量量子化: $mvr = nh$ 。其中 m 为电子质量, v 为电子速度, r 为轨道半径, n 是一个正整数。原文表达有误,译者已作适当改动。

② 译注:原文表达有误,经译者改正。

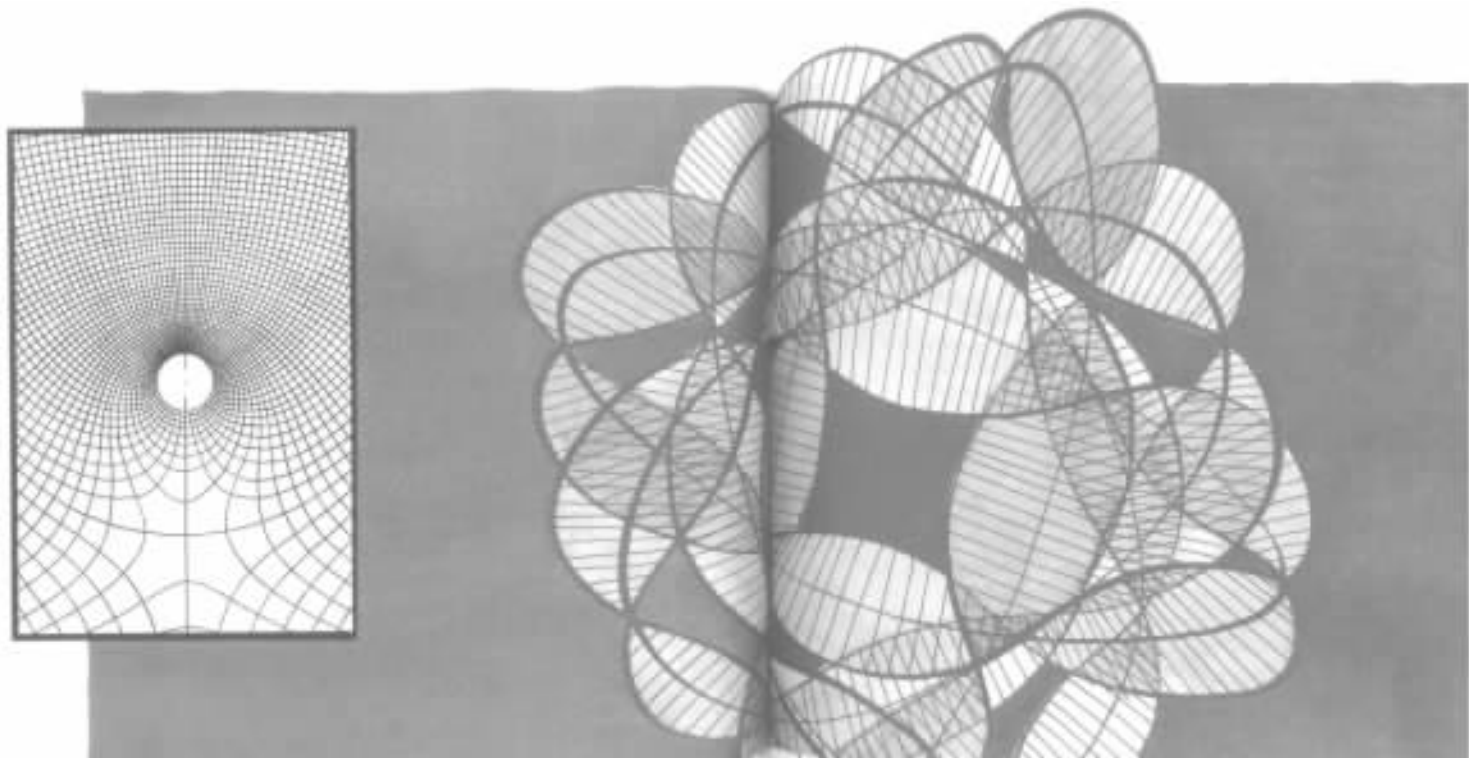
③ 译注:原文 the atom of action, 译为“作用的原子”。这里原子的意思是不能进一步分解的最小单位,不是通常意义上物质的原子。

元素的原子光谱中,许多光谱线有“精细结构”。这首先是皮埃特·塞曼于 1896 年观察到的,光谱线的这种十分细小的分裂可以用强磁场产生。索末菲认为这一定是由于电子的相对论能量和质量改变引起的,这是它们速度变化的证据。给出这种信号电子一定是在椭圆轨道上运动,在远离原子核的地方慢下来,在靠近核的地方变快。根据索末菲的假设,计算出的结果和观察值很好地符合一致。简单说来,电子服从开普勒三定律;就像行星绕太阳运动一样,它们遵循角动量守恒定律 [见第 49 页]。

随着太阳系原子模型在公众的心目中确立,对时空中量子秩序的进一步探究很快就对卢瑟福—玻尔—索末菲模型作出了修改。首先,玻尔原子只有一个电子。这个模型不适合于比氢原子重的,有两个、三个或包含更多电子的原子。必须证明玻尔假设“为什么”在更深的层次上也有效。稳定轨道决定于常数 h 这一点,需要某种类似于法拉第为化学家的纯粹概念上的化学价提供电荷这一类的东西来具体化。

比喻的必要

在第一次世界大战以后的 20 年内,随着量子论的完成,进一步确认了它在支配物质内部微观世界的地位,也需要从日常经验作出更精妙的比喻。于是,荷兰物理学家塞缪尔·高斯米特 (Samuel Goudsmit) 和乔治·乌伦贝克 (George Uhlenbeck) 赋予电子以量子“自旋”,这是说明电子磁矩所必需的。这个自旋是使两个电子在同一轨道上绕核旋转成为可能的另一个量子数。因为这是被沃尔夫冈·泡利前一年发表的“不相容”原理所禁止的。泡利证明两个电子不能占据同一能级——比喻作轨道——就像经典物理学说的没有两个物体能同时占据同一空间一样。然而,只要使一个电子自旋向上、另一个向下,高斯米特和乌伦贝克使两个(不能更多)电子占据同一轨道成为可能。有了这样的修



原子中电子波云图描绘了海森伯、薛定谔和狄拉克的工作。再也找不到这样形象的比喻能比海森伯的矩阵方程更简洁地描写原子结构的量子力学 [见第 126 页]。薛定谔波动方程加上海森伯不确定原理和德布罗意波长法则决定了电子的轨道,将原子核包围在多少有些对称的电子波云中间 [见第 130 页]。一个电子就适合于这个目的:以光速的 10^{-2} 在 3×10^{-10} 米的轨道上旋转,1 秒钟旋转 7×10^{15} 次,因此每时每刻在每个地方都产生效应,将原子核包在它的波里面。狄拉克对这非实在的电子云提出了法拉第-麦克斯韦-爱因斯坦场的实体 [见插图以及第 96 页]。这表明它的电磁场以电子和原子核之间不断交换虚光子的方式使永动机不停地运动 [见第 125 页]。在自发发射时,虚光子变成真实的光子。

改,原子模型中就可适应要多少电子就可以有多少电子在椭圆或圆形轨道上运行,以保证最重的那些原子中全部电子负电荷总能和原子核的正电荷中和 [见第 129 页图]。

圣路易斯华盛顿大学的阿瑟·霍利·康普顿 (Arthur Holly Compton) 于 1923 年演示了量子的动量或惯性的证据。这证明爱因斯坦在科学报告会上对量子理论的贡献:光子具有与其电磁能量相当的有效质量并且也包含机械动量。对频率为 6×10^{18} 赫兹的“软”X 射线,一个量子带有动量 10^{-19} 克厘米秒⁻¹,它的有效质量为 10^{-30} 克。这大约相当于电子静止质量 10^{-27} 克的千分之一。

康普顿效应是一种超光电效应。康普顿将 X 射线射向金属箔,发现电子以非常高的速度被轰击出来。更重要的是,他发现 X 射线以较低的能量从靶上反射,其波长变得更长。反射——或再发射——后的辐射能量和 X 射线传递给电子的能量相平衡^① [见第 92 页图]。康普顿效应相当于经典物理学中的弹性碰撞。在这种碰撞中,两个弹子各自带走自己分得的一部分能量,保持碰撞前后能量守恒。这证实了量子的粒子性。这个假设受到许多物理学家的抵制,包括普朗克和玻尔,最初也表示怀疑。

电子的波动性

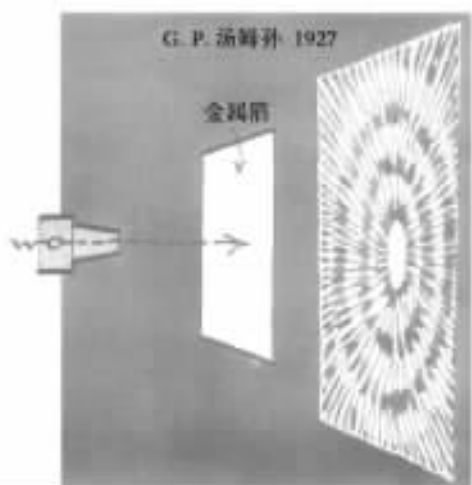
1924 年路易斯·德布罗意 (Louis de Broglie) 写的一篇历史性的博士论文解释了电子“为什么”沿量子化的轨道运行。他引用狭义相对论并提出,如果辐射量子具有质量——如康普顿效应所证明的——那么电子一定具有辐射能的性质,例如有波长。电子的速度高则能量大;它的波长就短或者频率高。

德布罗意相应地假定,稳定轨道的圆周必定正好等于占据该

^① 译注:意为散射后 X 射线的光量子频率变低,量子能量减少。多余的能量交给电子,电子动能增加。康普顿效应是光的粒子性的证据。

轨道的电子的波长(或它的整数倍)[第 123 页图]。在经典力学中这种波就是驻波,它因而会自己再生;这样就可以解释轨道的稳定性,至少可以作为一种比喻。正如玻尔提出的电子的质量和速度以及稳定轨道的周长(即德布罗意的电子波长)的乘积一定等于常数 h 的整数倍。无论波长是短还是长,所允许的轨道的周长满足自己相干涉的条件。

电子波动性质的证明要等到 1927 年戴维森和革末在贝尔电话实验室做的实验。他们将电子束射到晶体上。可以当作衍射光栅的晶体点阵将电子波按频率分选出来。 $J \cdot J \cdot$ 汤姆孙的儿子乔治·汤姆孙 (George Thomson) 在同一年做了类似的实验并得到相同的结论[见下图]。



电子的波动性是 1927 年 $G \cdot P \cdot$ 汤姆孙的实验证实的,他是证明电子的粒子性的 $J \cdot J \cdot$ 汤姆孙的儿子[见第 119 页图]。电子束穿过金属箔,在照相底片上记录到像杨和泰勒用光波做的实验所得到的类似的干涉条纹图样[见第 114 页和第 115 页图]。戴维孙和革末使电子从晶体点阵上衍射证明了波动性和电子波长对电压的关系[见第 42 页]。

不确定原理

与此同时,维尔纳·海森伯(Werner Heisenberg)想办法消除力学的比喻和电子轨道以满足德布罗意的解释的要求。这位23岁的坚定的实证主义者只依据原子能量状态的光谱证据提出原子的形式数学描述。他的抽象的非图像的方程^①成功地表示出光谱学记录的所有能量状态。这立即引起他在哥廷根的年长的同事们马克思·玻恩(Max Born)、帕斯库阿·约旦(Pascual Jordan)和沃尔夫冈·泡利的兴趣,海森伯的“矩阵力学”很快就成为所有关于原子的已有知识的普遍理论,甚至还进一步包含更广泛的内容。

海森伯并不拘泥于他的实证主义,以下面描述的思维实验向外行的公众说明他的“不确定原理”:为了在显微镜中观察电子要用光子来照明。所用光子的频率高,它的波长就短,显微镜测定电子的位置就更加精确。通过带有能量的光子和电子碰撞来测定电子的位置时,光子会将部分动量传递给电子,使得电子动量的测量成为不确定。波长较长、能量较低的光子引起电子动量的变化较小,但电子位置的测定变得较为模糊。

不确定性不能归因于实验的设计。不存在麦克斯韦妖。人们只能限于在时间和空间中,在量子尺度上和任何实验的对象交换能量。能量的交换必定会干扰观察,而 h 是“扰动最小”的极限[狄拉克,见第108页]。

受到德布罗意的启发以及由于不喜欢矩阵力学,奥地利物理学家埃尔温·薛定谔在1926年提出了原子的完全波动方程模型。它令德布罗意波在围绕原子核的所有三个维度中的各个平面上振动并且以电子波云包围原子核[见第129页图]。

^① 译注:原文为 apictorial equations. 这不是物理学的专业名词,是作者杜撰的。意谓抽象的,无法用形象的方式描绘的方程式。

从而薛定谔方程按海森伯不确定原理将电子的位置以波包的形式弥散开来。这种波包是由一定宽度的频率范围内的波组成。

从海森伯和薛定谔之间可以看出不确定的根源在于物理世界的结构。第一个不确定是电子表现为电磁力场中的波包还是表现为带电粒子。要消除不确定性决定于我们打算寻找电子的哪一种身份。使用某种仪器设备,电子的作用就像波动,于是我们可以测量它的动量。用另一种仪器设备,电子的作用就像粒子,可以测量它的位置。

伪认识论

量子理论中的不确定性重新激起了关于外部实在的实在性的哲学上的争论。假如实验选择了波或选择粒子,实验难道就不能确定所观察的实在的性质吗?某些教条的实证主义者认为确实如此。还有另一些人发现事件及观察之间的界线有些模糊。仪器本身难道没有参与到事件中去吗?甚至还包括科学家在内?还有科学家的观察者?

科学界内部这种争论鼓励了“后现代主义”关于知识的基础的讨论。量子不确定性难道没有将诗人的悟性和物理学等同起来?观察者参与到被观察的事件中这难道不是重新唤起古代东方文明整体的自然观?

物理学家接受了他们的实验结果,这些实验证明独立于观察者之外的电子与内层世界的量子背景相互作用,它有时候像粒子,它有时候像波动。当然,按照严格的实证主义的标准,他们的信念是站不住脚的。对于没有被同样事件的观察所证实的事件什么也说不出。证明电子是粒子的观察对这次观察事件以前和以后时刻的电子状态什么都不知道。和对月亮的观察完全不同,量子维度上的实验不能证明他们两次都看到了同一个电子。进

而言之,可以在同一时刻对月亮作两次不同的测量。然而,对它长期进行研究的物理学家却都能轻松自在对待电子的易变身份——粒子或者波动——就像天文学家看待月亮的实体性一样。外行的观察者也同样会冷静地适应这种情况。

戴维·玻姆向他的学生推荐更加冷静的姿态。他注意到,甚至不用仪器的帮助,感官所直接感觉到的世界的知识也充满了不确定性。应用于确定运动中物体的位置的微积分方程式中有牛顿的从来没有缩减到零的“无限小”。玻姆的学生已准备好会听到这样的断言:“我们不可能看到一个粒子同时具有确定的动量和确定的位置。量子理论表明根本就用不着尝试去测量一下,因为这样的粒子根本就不存在。”

考察一下表面上对立的海森伯和薛定谔的方程式,立刻就可以看出它们在数学上是一致的。它们都可以用来表示量子理论的完成和扩充所提出的同一问题。

一位名叫狄拉克(P. A. M. Dirac)的电机工程师在英国经济萧条中对职业前途失去了信心,1926年他到剑桥大学寻求一个物理学的研究职位。他的赞助人得到了丰厚的回报。在波和粒子的单调乏味的方程式中以及其他像海森伯的图像比喻中,他将量子力学和狭义相对论统一在“量子场论”中。狄拉克方程改进了德布罗意的驻波,能更好地维持电子永动机。电子与由它的自旋和轨道运动产生的充满真空的电磁场不断地交换能量量子——“虚光子”,从场中取出维持其运动所需的能量并将光子放回场中以保持平衡。电磁力的强度及电子质量决定交换周期,按照不确定原理求出其数值为 10^{-21} 秒。只在方程式中可以看出,虚光子的存在仍旧保持能量守恒定律有效^①。然而,自发发射的

① 译注:带电粒子产生的电磁场可看作带电粒子放出和收回虚光子。带电粒子间相互作用可看作粒子间交换虚光子,好比足球运动员将足球互相传递那样。按照不确定原理,在一定短的时间内发射又接着收回虚光子不违背能量守恒定律。

虚光子有时候成为实在的光子而宣告它们的存在。

海森伯—薛定谔—狄拉克模型提出了新的原子的比喻性图像。从它的 10^{-10} 米直径可得出其周长为 3×10^{-10} 米。在玻尔的氢原子稳定状态的最低能级中,电子以每秒 2.2×10^6 米的速度运动,这是光速的万分之一。电子以这速度每秒绕行 7×10^{15} 次,这也是它的德布罗意频率。薛定谔方程取消了单一的轨道,电子在 1 秒钟时间内在原子核周围每一个地方都出现过。代替太阳系模型,现在是有些对称的负电荷云围绕着集中在中心一点上有同样数量的正电荷的核。卢瑟福的真空中充满了能量,狄拉克的虚光子进进出出,各自短暂地存在着。[见第 129 页图]。

化学家的价在这里成为物理的实体。电子就是价。在分子中,它大多数时间都平均地分属于两个原子核,两个原子轮流地交替变成正负离子状态。当电子处在两个原子中间时,它的负电荷平衡了相距大约 10^{-10} 米,即一个原子直径距离的两个正电荷的相互排斥力。

狄拉克的新表述成功地说明了当时所知道的元素的线光谱中的反常现象。电子的磁矩起源于它的电荷的相对运动,正如年轻的爱因斯坦关于狭义相对论的论文中“电动力学部分”清楚地说明的。在虚光子交换中,磁矩被狄拉克计算出的数值 1 “g” 所代替。1948 年,实验得出 g 的数值为 1.00118。

卢瑟福发现的原子核和离它最近的电子之间的真空在狄拉克方程中变成星际空间及星系际空间的真空与最远距离的星系中原子内部真空相连续。对所有虚空,发光的真空空间中充满了引力场和电磁场——还包括下面就要讲到的希格斯 (Higgs) 场——的能量。这一情景中也出现场的虚粒子的连续喷发和迅速消失,量子物理学中的真空像经典物理学的以太一样有很重的

负荷并且是真实的实体^①。

反物质

物理学界之所以对狄拉克方程不信任和感到困惑,还有一个原因,它还假设存在着带正电荷的反电子。这是第一个首先在方程式中出现的粒子。对所有其他粒子都是先有实验证据,然后再要求找出和原来存在的秩序间的数学联系。现在是先有数学上的发明,再到实验中寻找对应的物质。

为了设法减少他的同事们中的惊慌,狄拉克就说这种粒子是电子腾出的“空穴”;这样在数学上就完美无瑕了。“正电子”的存在是美国物理学家卡尔·安德森(Carl Anderson)于1930年证实的。当时他正在观察宇宙射线——从宇宙某处射来冲进地球大气层的高能粒子——和大气层原子碰撞所产生的粒子的簇射。他的探测器中的磁场会使电子向一个方向偏转,而正电子则向相反方向偏转。

狄拉克还发现了比粒子更多的东西,反物质的发现实际上将物理学研究的粒子数目增加了一倍。它仍旧保持物质—能量的守恒。当粒子和反粒子碰撞时,它们互相湮灭产生高能量的光子。它的逆过程,足够高能量的光子会产生粒子——反粒子对。

现在量子理论已是包括物理世界中电磁学统治的领域在内的完整的最终理论。有几位热心的研究人员,卡文迪什实验室的俄国物理学家乔治·伽莫夫以及美国的爱德华·康顿(Edward U. Condon)和罗纳德·格内(Ronald Gurney),他们发现,这理论在解决有关原子核的问题时也是有用的。物理学界吸收了许多

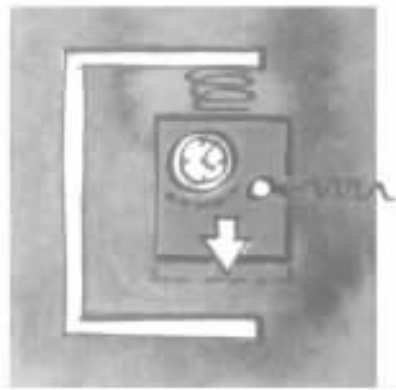
^① 译注:按狄拉克理论,真空充满了电子,所以不显示出任何可测量得出的效应。当真空中一个电子得到能量跃迁到正能量状态中,就可以测量到一个电子。真空中留下一个空穴,可测量到一个正电子。正电子是电子的反粒子。以后真空理论又进一步发展,真空可以看作充满了各种粒子。

热情的青年人,这些年轻人积极地推广并应用这一理论。

在众多研究人员参加的定期的国际会议上,常常听到年长者的疑虑,他们之中主要是阿尔伯特·爱因斯坦。如果物理学满足于在不同时刻测量位置和动量,甚至还可能不是同一个粒子,那么它不就不能保证对物理世界作出完整的描述了吗?按照这样局限目标的理论会导致设计出错误的实验。

对爱因斯坦的忧虑,敏感的尼尔斯·玻尔作出了反应。玻尔宣称实验决定理论。分别确定位置和动量表现出自然界“并协”的面貌。两个测量结果合在一起才给出物理世界的完备描述。

在 1930 年的会议上,爱因斯坦提出一个思维实验,演示物理学不受并协性约束。一只理想的钟 [见本页插图] 会打开一个悬挂在理想的弹簧秤上的理想盒子的理想快门,以接收单个辐射量子,用钟和秤 (用来测量量子的能量—质量) 就能同时测量时间和能量两者。玻尔根据狭义相对论本身来进行反驳:在理想的钟下落时会得到理想中的质量,这样一来它的走时就不那么理想了 [见第 95 页]。



爱因斯坦再一次介入,当时他流亡在美国,他和在美国的两位年轻的追随者想出另一个理想实验来支持他们的论据。概括

地说,两个自旋相反的粒子在一个事件中互相分开。爱因斯坦和他的朋友就问,测定其中一个的自旋(的方向)能不能告诉你另一个的自旋(的方向)?如果回答是肯定的,那么就表明通过实验引起一个粒子的波函数坍缩,同时也引起了另一个粒子的波函数坍缩。爱因斯坦认为这是“超距作用的幽灵”而应该摒弃。

爱因斯坦—玻多尔斯基(Podolsky)—罗森(Rosen)思维实验不止一次地做成了真实的实验。分开的粒子确实表现出预料中的相反的自旋。许多实验结果不承认爱因斯坦的观点,这些结果归结为难以解释的“缠结状态”^①。

量子电动力学直到1948年才获得它现在的完美状态。它的完善源自第二次世界大战中雷达火力控制和航海仪器的发展,从而精通微波波谱学这一关键问题。在哥伦比亚大学,I·I·拉比的学生们应用掌握的无线电技术得到波长为3厘米和更短的微波。1945年,维立斯·兰姆(Willis Lamb)用这种设备测量了会引起氢能量状态改变的量子,狄拉克曾估计出它的波长为2.74厘米。兰姆发现其数值为3.3厘米。理论和实验之间的差别为20%;它还包含电子本身的质量。物理学界立即转过来重新审查理论的基础。

很快就找到了线索,问题不在于基础而在于将实验和理论比较的数学方法。弗里曼·戴森(Freeman Dyson),费曼和朱利安·许温格在美国,朝永振一郎在日本都证明了方程式中电子的电荷和质量的值可以“重整化”。实质上是通过将最后实验结果代替原有理论计算出的无穷大,重整化重新设置了下一轮实验和再计算的理论项。

电子磁矩中的狄拉克“g因子”证实了这一策略的成功。兰

^① 译注:“entangled states”译作“缠结状态”。自20世纪70年代以来,许多物理学家用光和其他粒子,在各种条件下做了实验。多数实验不支持爱因斯坦的观点。缠结状态在量子移物、保密通信、量子计算机等许多方面都将得到重要的应用。

姆的同事波利卡普·库什 (Polycarp Kush) 在 1948 年用这同一台微波设备得出 g 的第一个实验值为 1.001 18。最新的计算得到 1.011 596 521 90。最新的实验值为 1.011 596 521 93。两个数值最后两位数字都有一些不确定性,理论和实验间的符合现在已达到小数点后面至少 8 位数。

费曼将重整化称做“愚蠢的过程”,并且对重整化理论数学上是否合理感到怀疑。不过,他却很容易地证明它确实行得通。20 世纪 60 年代将 QED 包含到质子结构中的亨利·肯达尔 (Henry W. Kendall) 和沃尔夫冈·潘诺夫斯基 (Wolfgang K. H. Panofsky) 宣称:

现在包括在量子电动力学中的电和磁的定律描绘同一个,也是唯一的一个物理学领域;对从宇宙起、小到 10^{-15} 米的维度内,检验该理论整个实验范围内的单纯定量描述都被证明为有效。

量子理论常被引证为初次的“范式移动”,是抛弃旧的并接收新的思想的翻筋斗。事实上,常数 h 源自和经典理论相矛盾的对炽热固体发出的辐射的颜色的测量。在光电效应中,量子显示了它的物质实在。量子场论仍旧保留由经典的守恒定律支配的物理量——质量、能量和电荷——并且还考虑到对称性,从而它将新认识的量子世界中的事件和更为熟悉的身边的世界联系起来,并使两个世界在它们各自的极限范围内相互协调。

原子核的研究路线是在找出一种理论的同时进行有条理的实验研究。从 1911 年分离出原子核起,卢瑟福和卡文迪什实验室在解决原子的结构问题上一直领先。在第一次世界大战前,他的年轻的同事莫斯莱 (H. G. J. Moseley) 探测了重元素的电子内壳层,并建立了现在的认识基础,即氢以上的原子核内有带正电荷的和中性的两种粒子;带正电荷的粒子的数目,即其“原子序数”决定原子的化学身份;它们和中性粒子的总数决定“原子量”。

某一元素化学性质相同的“同位素”以重量来区别,这是由原子核中的中性粒子的数目的不同所决定的。剩下的问题是要确认中性粒子的身份。莫斯莱的工作建立了门捷列夫周期表中元素的电子壳层的组态,包括当时还没有分离出来的元素。

1915年,年方27岁的莫斯莱在进攻加利波利“欧洲的薄弱点”的战斗中阵亡。据说这可以说明当时严峻的条件。为此恩斯特·卢瑟福响应了海军大臣的要求。年轻的温斯顿·邱吉尔(Winston Churchill)要求卡文迪什实验室将研究工作放在一边,解决反潜艇战的问题。卢瑟福告诉他:“这里比你的该死的战争更重要!”实验室后来确实也帮助进行了用于深水炸弹的潜水艇目标定位的研究^①。

氮变为氧

卢瑟福的下一个目标是测量原子核中将质子和中子结合在一起的力。他首先寻找可以克服电磁斥力的较高能量的 α 粒子。他从同位素镭C'发射的粒子中找到所要的 α 粒子。他选择氮作为靶。它的核中只有7个质子,对于同位素镭C'产生的快速粒子来说,它的势垒相对较低。

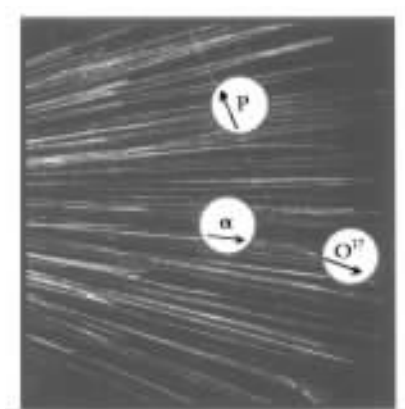
在充满了氮的容器中,卢瑟福在距 α 粒子源一定距离处看到了闪烁。他正确地推断,在碰撞中有一些粒子不是从 α 粒子中就是从氮原子核中分离出来了。卢瑟福通过磁偏转证实了飞出来的粒子是质子,这是人的力量第一次从原子核中撞出来的粒子。

后来的实验表明反应的另一产物是氧同位素 ${}^17_8\text{O}$ 。 α 粒子中的一个质子和两个中子结合到靶原子核中,氮转变为氧,说得更正确一点是原子量为17的氧同位素。抛出一个质子使粒子方程

^① 译注:研究课题实际上是水中超声波搜索和定位。卢瑟福是最早研究并解决这个问题的人。但因为他在科学的其他方面更大的成就,加上他本人谦虚的品格,所以卢瑟福这方面的贡献鲜为人知。

平衡： ${}_7\text{N}^{14} + {}_2\text{He}^4 = {}_8\text{O}^{17} + {}_1\text{H}^1$ 。对这样的炼金术，爱丁顿感动地说出：“在卡文迪什实验室可能实现的事情在太阳里面大概不会太难做到。”

不久以后，卡文迪什实验室中利用云室使得观察这类反应变得十分便利，这是威耳逊 (C. T. R. Wilson) 的天才发明。在云室的饱和蒸汽中粒子一路上凝聚水珠显示出踪迹。卡尔·安德森就是在云室中辨认出正电子踪迹的。这种踪迹比闪烁更容易看到，它不仅传达有关反应的更多信息，并且还可以照相。 α 粒子——氮碰撞的云室照相是布莱克特 (P. M. S. Blackett) 在 1925 年得到的，完全证实了 1919 年的发现 [见本页插图]。



现在，质子本身就是攻击原子核的合适的炮弹。它单个正电荷就比 α 粒子的两个电荷受到靶核的正电荷的斥力要小。计算表明，通过 100 万伏特电势差加速后质子会得到惊人的能量。卢瑟福交给约翰·科克劳夫 (John Cockroft) 和沃尔顿 (E. T. S. Walton) 一个任务，建造第一台粒子加速器。

到 1931 年，他们用“电压倍增器”得到 0.6×10^6 伏特的高压。有这样的力量，他们将质子加速到数量级为 10^5 电子伏特的能量。电子伏特，“eV”——电子通过电势差为 1 伏特的间隙所获

得的能量——是很小数值的能量。需要 10^{23} eV 才能点燃 100 瓦的电灯泡 1 分钟。不过,这些能量分散在炽热的灯丝的几百万个原子和它的周围环境中。如要将这样多的能量注入加速器中粒子束的单个亚原子粒子上,这就超过了当前技术所能达到的 11 个数量级。

科克劳夫和沃尔顿将质子瞄准从氢算起的第三号元素锂和第五号元素硼。在云室中,锂在碰撞点上产生双分叉的轨迹,这表示分裂成两个 α 粒子。从硼产生的三分叉轨迹是 3 个 α 粒子的证据 (${}_3\text{Li}^7 + {}_1\text{H}^1 = 2{}_2\text{He}^4$; ${}_5\text{B}^{11} + {}_1\text{H}^1 = 3{}_2\text{He}^4$)。

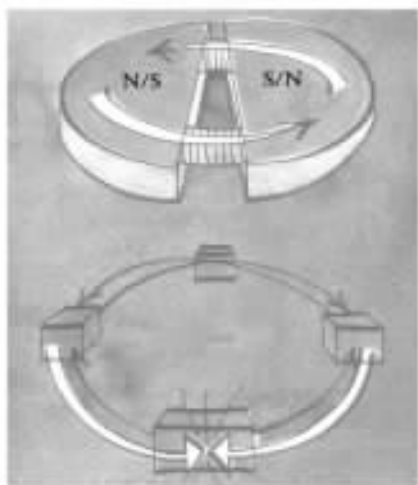
锂和硼的分裂第一次实验证明了狭义相对论方程 $E = mc^2$ 。粒子轨迹的长度给出两个 α 粒子的总动能:17.3 百万电子伏 (MeV)。锂原子加上质子的质量比 $7 + 1$ 原子质量单位稍多一点,准确地说是 8.026 3 原子质量单位。两个氦原子是 8.007 7 原子质量单位。其间的差数 0.018 6 原子质量单位由 $E = mc^2$ 算出,等于 17.2 MeV。反应中的质量损失正好相当于反应能量。

进一步知道,这些能量是使原子核中的粒子结合在一起的强作用力的强度的测度。使粒子束缚在原子核中的能量大小是百万电子伏特的量级。比之于日常经验中电磁力产生的化学键的 1 到 10 电子伏特,电磁力只有强作用力强度的 0.5×10^{-2} (0.05) 倍。

卡文迪什实验室的成功激起所有的工业国都要建造“原子粉碎机”。1936 年罗伯特·范德格喇夫 (Robert J. van de Graaf) 为麻省理工学院建造的静电起电机达到其 4 倍的能力。使公众感到惊异的是 15 英尺高的两个球形电容器终端之间跳过的闪电,以及容纳它们的飞机库的结构。

伯克利的加利福尼亚大学的恩斯特·劳伦斯 (Ernest O. Lawrence) 发明的回旋加速器打开了通向真正高能的道路。回旋加速器通过对粒子脉冲式输入电力的方法,使射弹粒子加速。用罗

伯特·威尔逊的话来说,它是通过“给它的一系列的小推动、而不是一次大推动”来使粒子加速的。在第二次世界大战以前就已经加大了对物理学的支持,按照这一原理,粒子被加速到几百万电子伏特(MeV) [见本页图]。



粒子加速器根据第一台回旋加速器 [上图] 的原理,通过给粒子许多次强力的推动,已经达到太电子伏特的范围。在回旋加速器中,电子在两个 D 形盒中运动,垂直于 D 形盒的磁场使电子沿圆形和螺旋形轨道运动。当粒子从一个“D 形盒”中通过隙缝进入另一 D 形盒中时受到电场加速,当粒子从另一隙缝回到原来的 D 形盒时,两个 D 形盒间的电场变号,使粒子再次加速 [见第 142 页]。将相反方向加速的粒子对撞首先是新西伯利亚科学城的布德克实现的 [见第 149 页],用这种方法使加速器的有效能力加倍,但以产生的碰撞数目减少为代价。

1932 年,詹姆斯·恰德威克 (James Chadwick) 证明了中性核粒子的存在,在这以前它已被命名为“中子”。他发现这种粒子在某些放射性元素衰变时发射出来。在原子核外的中子被证明是不稳定的。它的半衰期为 10.3 分钟。在这段时间里,一半的中子放出 β 粒子,这是卢瑟福在放射性元素的蜕变中首先观察到的 [见第 123 页]。发射出去的电子带有负电荷,原来的中子变

成稳定的质子。最新的测量表明质子的半衰期不少于 10^{32} 年。在原子核中一个中子吸引原子核外面电子壳层中的一个电子转变为质子,该原子核经历这样一次 β 衰变后变成具有新的化学身份的原子。

β 发射提出了一个问题,这个问题是于 1930 年被沃尔夫冈·泡利解决。爱因斯坦在回顾关于狭义相对论时提出,周期性地称量放射性元素样品的重量可以证明质量是否会转变为能量,并且可以验证 $m = E/c^2$ [见第 97 页]。本来可以通过 β 发射的质量减少确证这个方程,但测量得到 β 发射的电子能量是连续的分布曲线。其能量最大值满足质量—能量守恒。还有一些能量丢失了^①。泡利提出超过的质量是被一种没有观察到的粒子(现在称作中微子)的能量所带走,这种粒子没有电荷并且只有很小的或没有静质量,它以足够快的速度——或相当的能量——运动,使能量收支平衡。

这种粒子直到 20 世纪 50 年代才探测出来。因为完全不带电并且质量也非常之小,中微子几乎不和其他任何粒子作用。泡利对 β 发射的解释的其余部分都如此成功,所以物理学家都赞成中微子假设以使收支平衡,经过了 25 年后才在实验中证实其存在。^②

弱力^③的发现

令人烦恼的 β 发射引起罗马的恩里柯·费米 (Enrico Fermi) 在 20 世纪 30 年代初发现了第四种力,“弱力”。他把 β 发射看作所有时间都在原子核微小的半径之内起作用的量子力学过程。

① 译注:原文有误,这一句已经译者改写。

② 译注:20 世纪 50 年代,美国的弗里德里克·莱恩斯 (Frederick Reines) 和克莱特·柯温 (Clyde L. Cowan Jr.) 实验证实中微子存在。

③ 译注:弱力的正式物理学名称为弱相互作用,下面讲到的强力和电磁力也应为强相互作用和电磁相互作用,译者一般根据作者原文译作弱力,强力……有时也译成弱相互作用。

根据狄拉克方程,质子和中子通过交换虚电子(或正电子)和新的泡利粒子不断地改变身份。有时虚电子和中微子可能获得能量变成 β 发射中的真实电子和中微子。

对这种新的力,费米建立起全量子力学的模型。在原子的带电粒子的相互作用中,这种力需要正的和负的两种量子。它们的有效范围是在原子核内部作用,大约为核粒子的直径 10^{-15} 米的数量级。由于它在如此短的距离上起作用,根据不确定原理要求有一种有质量的量子,其质量反比于它的作用范围,因而是非常大的(相反,光子的作用范围是无限大,所以静质量为零)。费米没有指出弱力量子的质量应有多大。有质量的量子的虚交换只能以低的频率进行,他估计为 10^{-9} 秒,相比之下电磁力为 10^{-21} 秒。半个世纪以后,找到了这种量子,发现它的质量远远大于质子^①。

费米推广量子理论成功后不久,东京大学的汤川秀树于1935年提出强力的量子理论。这里核子之间虚量子也要交换,并且强力的场要满足能量守恒定律。汤川考虑到力的强度,力的作用范围为 10^{-15} 米,以及由此得到核子和场之间虚交换的周期为 10^{-23} 秒,于是他计算出这种量子的静质量约为300倍电子质量。为了将带正电荷的质子和电中性的中子结合在原子核中,要求汤川的“介子”——介于质子和电子之间的中等大小的粒子——既有中性的也有带正电的和带负电的。

在量子理论的早期阶段,对关于自然界的老问题有了深入的认识。首先对星光有了一个解释。爱丁顿和别的天体物理学家证明恒星由氢和氦组成,在它们的受引力作用压挤的内部,平均温度达到 $1.5 \times 10^6 \text{K}$ 到 $3.0 \times 10^6 \text{K}$ 。在这样的温度下,原子的电

^① 译注:弱作用粒子 $W^{\pm}$ 和 Z^0 于1983年在欧洲原子核研究中心被发现,对这项发现作出主要贡献的有卡罗·鲁比亚(Carlo Rubbia)和西蒙·范德梅尔(Simon van der Meer)等。

子全被剥离。它们组成高密度的“等离子体”，这是正电荷处于高速运动下牛顿力学相互作用的气体。至于质量足够大的恒星内部，康奈尔大学的汉斯·玻特 (Hans Bethe) 于 1938 年发现，这里的压强和温度已足够使氢原子核通过若干个步骤聚变为氦原子核——质子变成 α 粒子。这种聚变反应以不同的方式，通过 3 种氢同位素的不同组合进行。他证明，为了每产生一个氦原子核，参与的氢原子核的质量损失必定转变为 1.4 MeV 到 20 MeV 的能量。

原子的裂变

在 20 世纪 30 年代末，物理学界的注意力从上述这些问题转移到完全相反的两种核反应——裂变和聚变是相反的两种反应。随着恰德威克在 1932 年分离出中子以后，由于中子不难获得，进一步推动了这方面的探索。

中性的中子轰击带正电的原子核时不会遇到势垒。1932 年，恩里柯·费米系统地将周期表上的元素的样品依次暴露在从不稳定元素钷放射出来的低能，或“慢”的中子中。当他的调查做到周期表上最重的元素铀时，中子的轰击产生了莫名其妙的结果。在反应的碎片中，费米以为他探测到比铀更重的短寿命“超铀”元素的痕迹。因为在他的议事日程上还有关于其他元素的更为急迫的问题，他的铀的实验暂时只停留在这种猜测上。

在重元素的原子核中，每个核粒子的结合力很快下降。自然界的铀有 3 种同位素： ${}_{92}\text{U}^{238}$ (99.3%)， ${}_{92}\text{U}^{235}$ (0.7%)， ${}_{92}\text{U}^{234}$ (0.01%)。于是，结合力需要抵抗相互的静电排斥力将 92 个质子聚集在原子核中，再要分别加上 146, 143, 142 个中子。这就是为什么较重的元素容易发生自发的放射性衰变。最不稳定的铀同位素是 U^{235} ，易于被慢中子破坏。

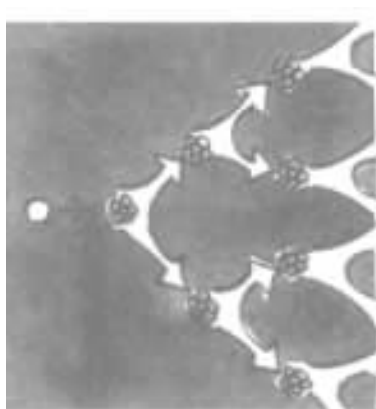
1939 年初，尼尔斯·玻尔在美国参加科学会议时收到物理

学家莉莎·迈特纳 (Lise Meitner) 的加急电报。电报是从斯德哥尔摩发出的,她是从她的祖国德国,当时已是第三帝国,逃亡至此。她在柏林的同事奥托·哈恩 (Otto Hahn) 和弗里茨·斯特拉斯曼 (Fritz Strassman) 重复了费米的铀实验,并告诉她一个前所未有的结果。她和她的当时在英国的侄子,物理学家奥托·罗伯特·弗里希 (Otto Robert Frisch) 一同证实了这一结果: U^{235} 原子核吸收了一个慢中子后“分裂为”为两个子核:原子序数为 56 的钡和原子序数为 36 的氙 ($56 + 36 = 92$, 铀的原子序数)。可以算出在这一反应中每一次裂变的质量损失为 0.2 原子质量单位——相当于 200 MeV 的能量。电报上还指明,更重要的是在反应中还产生两个新的中子。

从法西斯意大利逃亡到美国的费米和他的哥伦比亚大学的新同事们确证了这一发现。在那一年秋天,玻尔和约翰·惠勒发表了一篇关于核裂变的文章。不久之后,在匈牙利物理学家利奥·齐拉德 (Leo Szilard) 的强烈要求下,有关这个题目的文章在科学杂志上都推迟发表,直到第二次世界大战结束以后。

齐拉德在 1933 年德国国会大厦失火后的早晨,——“乘上第一趟火车”,他说——逃离柏林来到美国。1936 年他在伦敦时研究过由于中子的侵入引起原子核不稳定的灵敏度。有一天在人行道上散步时,他回忆道,脑海中出现一个想法,就是一个中子引起的核反应可能放出两个新的中子。在下一轮中这两个中子会释放 4 个中子;这 4 个中子会倍增到 16 个中子……在这样的链式反应 [见第 148 页插图] 中,齐拉德看出里面有一种机制,可以将储藏在原子核静质量中的巨大能量以剧烈爆炸的方式释放出来,他将这个想法在英国专利局申请到了一个专利并指明对英国海军部保密。就是这个齐拉德,他起草了一封请爱因斯坦签名的信,这封信说服了富兰克林·罗斯福启动核武器的生产计划。

到战争结束,物理学家们复员了,以世界的目光看待他们下一



步的任务。他们不可思议的事业已经制造出绝对的武器,而现在不用花钱就可以供应用不完的能量。特别是在美国,物理学家得到从国家,尤其是从军方,按他们的要求提供的预算。曾在欧洲学习过的美国物理学家和许多从欧洲逃出来的他们的老师共同工作,将美国的大学建造成为量子物理学的伟大事业的新的中心。

他们事业的规模立即指数式地增长。战前在伯克利由劳伦斯建造的 184 英寸的回旋加速器是美国最后一台由慈善事业(洛克菲勒基金会)资助的这类设备。战后它的第一台后继者的直径以英尺计量,以后是几百英尺,最后是建造在伊利诺斯州巴达维亚地下的一台,其直径有 1.25 英里,它的圆周近 4 英里。

较长的圆周的较小的曲率减少了辐射能量损失,粒子沿圆形轨道运动时的损耗是由于使粒子从直线运动偏离的加速度。损失的能量从被偏转的粒子束以辐射的形式沿切线方向射出,它的频带很宽,被称为“同步辐射”。这个名称来自第一次注意到出现这种辐射的加速器的类型。较大的直径可以减少同步辐射的损失,可将加速器能量中较高的百分比传送到靶子上。在加利福尼亚州,斯坦福的直线加速器 LINAC 在它的 3 千米长的直线通道中加速电子,避免了这种能量损失。然而,它的峰值能量受到通

过这段距离所能达到的速度的限制。在圆形加速器中,粒子可以沿圆周运动转许多圈,转的圈数愈多受到的威尔逊“推动”^①的次数就更多。

这种设备再也不能放在大学的实验室里面了。巨大的加速器本身就是大学联合管理的国家实验室,只有联邦金库才能支持。自 1945 年以来的 40 年中的每 6 年加速器的输出能量增加一个数量级。输出从 5 MeV 到 500 MeV 逐步升高,经过二、五、十,然后是几百 GeV (G 是吉咖,或 10 亿;即 10^9 eV) 到巴达维亚的加速器为 TeV (T 是太拉,或万亿;即 10^{12} eV)。

量子理论应用于研究低温下物性的成就大大提高了开动加速器的电功率,从而大大提高了产生的 MeV 和 GeV 数。超导电性成倍地增加磁场强度,这种磁场控制粒子束,以保证它以更高得多的动量沿高能加速器圆周轨道运动。

产额的真正量子跳跃来自加速器束流的对撞。指向固定靶的能量损耗转换成碰撞生成物向前运动的动量。进一步说,在靶上的有效产额随着功率增加急剧减少:10 GeV 束流得到 2.9 GeV;100 GeV 束流,10 GeV;到 1 TeV,只有 35 GeV。在对撞束中能量潜在地加倍。这种策略是格许·布德克 (Gersch I. Budker) 在科学城首先实现的。科学城是 20 世纪 50 年代苏联物理学家在西伯利亚的新西伯利亚附近建立的。巴达维亚的太瓦特隆 (Tevatron) 加速器以及可与之相匹敌的欧洲原子核研究组织 (CERN) 的加速器中的对撞束,都达到接近 2 TeV 的能量。不过,自然界必然要求付出代价:得到的碰撞数远远低于对固定靶的碰撞。可以设法将一些能量用于提高“亮度”^②,以补偿碰撞的减

① 译注:参见第 143 页罗伯特·威尔逊的话。

② 译注:加速器的亮度 (luminosity) 是每秒粒子碰撞数目的量度,其单位是:厘米⁻²秒⁻¹。太瓦特隆加速器的亮度比所期望的低,科学家们采取一系列措施,以提高亮度。原文这句不明确,译者已作适当改动。

少,亮度表示聚集成一束的粒子脉冲中粒子碰撞的数目;这个策略使碰撞数目增加,但是碰撞的能量较低。在实验允许的条件下,粒子和反粒子的碰撞互相湮灭的能量又加到加速器的功率中。

卢瑟福的荧光屏和低倍望远镜以及威尔逊云室早已让位于其他的能记录一次实验中产生的上亿次事件的传感器和计数器。在 CERN 的加速器上演示弱力量子的决定性实验中,3 层楼高的仪器沿着轨道移动到零点。它装上几立方码的传感器,能计数并记录飞行中带电粒子的踪迹,还装有成吨的能捕获一大群带电和不带电的粒子的材料。计算机获得数据的洪流,相当于每个实验中都要阅览国会图书馆的部分藏书,从中找出并报告要寻找的事件。就是说要在数月及数年中发生的数千事件中找出所要的事件。

苏联是唯一的具有靠自己的力量发展粒子物理学所需的使能量不断升级的工业规模的美国以外的国家。在欧洲日内瓦附近,一个多国的联合组织 CERN 建立了巨大的 TeV 加速器,瞄准了零点的 15 TeV。

粒子的多重性

1947 年,对汤川 1935 年预言的强作用力量子的确认表示物理学家战后又回到他们的正常专业工作上了。英国物理学家鲍威尔 (C. F. Powell) 在这项成就中用宇宙线代替加速器粒子束。在一次玻利维亚的安第斯山脉高山考察中,他捕获了 270 倍电子质量的粒子,这种粒子在各个方面都符合汤川粒子的要求。加速器实验不久就证实了这种介子和核之间的强相互作用。正符合所预言的原子核强作用力量子,这种介子,或称 π 介子使基本粒子和量子的名单更趋完美而不是弄得更复杂。

中性 π 介子并没有破坏这幅图画,它在 10^{-14} 秒内衰变为两

个 γ 光子。不过,正 π 介子和负 π 介子在它们存在的 2.6×10^{-8} 秒内都会衰变为一个中微子和一种完全新的粒子,称做 μ 介子,或 μ 子。 μ 子是轻子家族中电子的大型堂兄弟,它带有负电荷(其反粒子带正电荷),质量等于 210 个电子质量。在 2.1×10^{-6} 秒内蜕变为一个电子或正电子以及两个中微子。

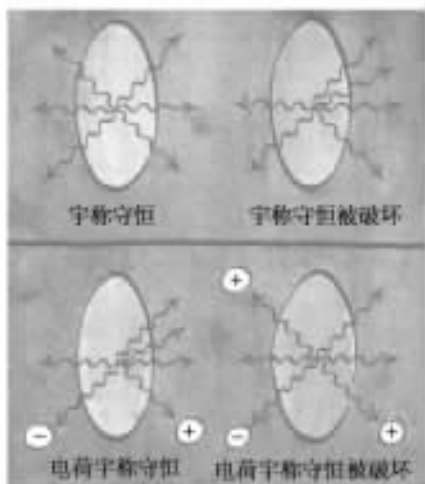
引述拉比关于 μ 子的话来说:“谁安排了这些?”在整个 20 世纪 50 年代,新粒子的数目——同样不稳定的、短命的——增加到几百种。随着战后加速器联机,粒子束流不仅仅只是简单地从靶上散射。它们能击碎靶核并将它们自己的能量用在散射中,创造新粒子。加速器射束注入它们的靶上的能量愈高,从靶上散射出的不稳定的粒子的质量愈大。在不到 1 秒的不同时间里,粒子通过多种渠道衰变成熟悉的稳定粒子,如质子和电子,为使方程式平衡还要有中微子和电磁能量的光子。把重子(质子、中子以及更重的粒子的称呼)和介子按照它们的相互作用力、质量、寿命以及蜕变产物进行分类,并用希腊字母依次给它们命名,到 1985 年,已经有了 400 种粒子。

守恒律破缺

1957 年,物理学界遭受到出乎意外的,或许是更为严峻的信念的考验:即“推翻宇称守恒”。没有什么比守恒定律被推翻更严重的事了。哥伦比亚的李政道和普林斯顿的杨振宁在共同研究弱力时,怀疑它可能违反自然界的一种基本对称性,具体地说就是宇称。宇称可以比作手征性,左手征或右手征。在时空连续统中没有上没有下,没有南没有北。宇宙对左手征和右手征应当是相同的、没有区别的。然而,李和杨提出, β 放射时从中子中放出电子破坏了“宇称”对称性,即 β 放射显示出方向的优先性。

哥伦比亚的吴健雄对这一假设做了试验。在她的精巧实验中,她得到国家标准局的低温实验室的支持。她在超导磁铁的超

强场中放进钴的放射性同位素的样品。磁场使得有自旋的钴原子核中很大百分比的一部分的自旋指向北极。这样的指向表示它们的自旋大部分向左（或大部分向右）。这个实验的目的是要揭示这些样品中排列整齐的原子核是优先地向北（或者向南）射出电子还是随机地向北和向南发射电子。李和杨的怀疑被证实了；电子沿两个方向中的一个特定方向射出，其流量足以排除随机性。在这些原子核中的中子是右手征或者是左手征，并非没有区别 [见本页图]。



宇称守恒的推翻出乎意外地破坏了自然界的对称性。正如宇宙不分上下一样，物理过程应当既不偏好左手也不偏好右手 [上左图]。在衰变中某些粒子偏好于向某一方向射出粒子 [上右图]。对称性在粒子反常衰变中宇称与电荷联合改变而重新恢复。以后实验又发现电荷—宇称超对称性的违反，这可以从大爆炸时物质稍多于反物质得到解释 [见第 226 页]。

李和吴的哥伦比亚的同事利昂·莱德曼 (Leon Lederman) 曾将该大学的 400 MeV 加速器用作“ π 介子工厂”来研究其他问题。这启发他考虑 π 介子到 μ 子的衰变也可能违背宇称守恒。在这情况中，产生出来的 μ 子自旋或者全都向左，或者全向右。假如

这些 μ 子在以后的衰变中发射出的电子有一个优先方向,这再一次违背了宇称守恒。这两次的违背确证了宇称守恒定律不成立。这正是从实验得出的结果。弱相互作用中宇称不守恒。

在以后的实验中,莱德曼和他的哥伦比亚同事梅尔文·施瓦茨 (Melvin Schwartz) 和杰克·斯坦伯格 (Jack Steinberger) 将布鲁克海文国家实验室的更强大的加速器转变为 μ 子工厂。用 40 英尺废弃的装甲钢板装置来吸收掉原始 π 介子、 μ 子和它们产生的电子以及其他粒子,他们过滤出两种中微子。这两种中微子是已知的电子反中微子和一种新的 μ 子中微子。

弱作用力强度已被证明只有强作用力的 10^{-14} 。4 种相互作用力中只有这一种在所有已知粒子的相互作用中都存在 [见第 161 页图]。现在发现它参与宇称守恒的破坏。

任何自然界的对称性的破坏都逼迫人们作出紧急反应。因为这意味着宇宙秩序将被破坏。一次,当吴健雄被邀请在一个高能物理学会议上报告时,她以下面的话开始,她风趣地说:“我是靠弱相互作用的力量来到此地的。”

爱因斯坦证明了物质是不守恒的;守恒的是物质—能量的超对称性。理论物理学家在电荷—宇称 (CP) 守恒中寻找这种超对称性。他们指出的证据是:正电子,即电子的反粒子的发射与通常的 β 衰变中发射电子的宇称相反,破坏了左右手征性的宇称。电荷和宇称在 CP 超对称性中可能守恒。然而,普林斯顿的瓦尔·菲奇 (Val Fitch) 和詹姆斯·克罗宁 (James Cronin) 主持了一个实验,该实验表明,弱相互作用中并非百分之百地一律保持 CP 对称。

这种电荷对称性的破坏受到天体物理学家的欢迎。他们一直在问,宇宙如果不受守恒定律和对称性支配,而它的存在依赖于物质和反物质的不对称性,将会得到怎么样的结果? 只在加速器靶上的高温和高能量密度中反物质粒子会短时间出现,并立即

和物质粒子相互湮灭。菲奇—克罗宁实验说明物质超过反物质只是很少一点点。计算表明,在宇宙历史的最初时刻,物质粒子多出反物质粒子的数目是它们总数的 10^{-8} 。从它们出现的一刹那就开始互相湮灭,最后剩下多出的是 10^{-8} 的物质粒子。莱德曼看到,这多出的一点点,“就是我们现在观察到的宇宙中的所有物质,包括我们自己”。

力的多重性

弱力现在和物质的起源有关;就是和粒子的静质量有关。但是弱力至少是一个多余的力。共同作用下形成自然界的统一秩序的 4 种力的数目并非不能减少。

弱力和电磁力的统一理论是哈佛的史蒂芬·温伯格和在意大利的里雅斯特的巴基斯坦物理学家阿布杜斯·萨拉姆 (Abdus Salam) (萨拉姆在的里雅斯特建立了一个独立的研究生院,选拔发展中国家的有前途的青年物理学家来学习,然后送他们回国,可以独立进行研究以及教育他们国家的后代) 同时独立完成,并在 1967 年各自发表。温伯格—萨拉姆的研究吸收了朱利安·许温格和他的研究生谢尔顿·格拉肖的研究成果,许温格想求出弱相互作用中带电量子的质量。1961 年,格拉肖提出费米的带电量子一定有不带电的同胞兄弟,他估算了它的质量。受弱力作用的粒子因而就像受强力作用的粒子一样可通过 3 种量子相互作用。

所期望的统一要归功于爱丁堡大学的彼得·希格斯 (Peter Higgs), 基本的假设是静态能量场——既不吸引也不排斥——充满了宇宙真空。粒子的静质量就是从这个仓库中取得的。

20 世纪的物理学家站在成功的边缘,就好比 19 世纪的物理学家将电和磁统一在电磁力中。“电弱”理论将相互作用的多样性减少了一种。这种前景重新树立起物理学任务是可以完成的

信心,将会发现自然界秩序的基础是终极的统一以及原理的简单性。

实验物理学家已经开始工作了。电弱理论预言包括“弱中性流”的相互作用。它的能量达到了当时在 CERN 和巴达维亚的最强大的加速器的能量——在 100 GeV 的范围。证据还是十分间接的,因为实验要求将一束毫无特色的中微子射向靶子,这样就能放射出下一代没有特色的中微子。在巴达维亚、CERN 和哈佛共同任命的卡洛·鲁比亚 (Carlo Rubbia) 领导下的小组于 1973—1974 年在两台加速器上十分确定地获得了弱中性流的证据。这也证明了格拉肖首先提出的弱相互作用的中性量子的存在。现在在得克萨斯大学的温伯格在他的完整的理论表述中称它为“Z”粒子——来自零 (zero), 并且他希望能是“最后的”粒子。

电磁相互作用和弱相互作用的统一从而得到了证实。在 1983—1984 年,鲁比亚和他的同事们在 CERN 和巴达维亚的加速器实验中正的和负的“W” (来自弱 weak) 以及中性的 Z 粒子现身了,这些加速器的能量又已跃升了一个数量级台阶。这些量子的质量被发现是出乎意料地巨大;它们的质量不再是用 MeV,而是用 GeV 来表示。两个 W 粒子的质量都是 80 GeV, Z 粒子的质量甚至大于 91 GeV。这里遇到了最重的粒子,它们表明实验中的相互作用能量增加时弱力的强度很快增加。这种强度的增加会造成它和电磁力的强度在另外几个数量级上会合,它们的会合会导致和它们的轻子,即电磁相互作用的电子和弱相互作用的 μ 子熔合。

电弱理论的成功大大地鼓舞了寻找电弱和强相互作用统一的大统一理论 (GUT)。理论上预测电弱相互作用的强度增加到更高的 10^{15} GeV 的能量时将要与强力会合。在电弱和大统一理论中,各种力的不断积累与会合将导致希格斯场理论发挥积极的作用,希格斯场——和第一个首先在方程式中出现的粒子,即正

电子相似——是第一个来源于方程式的场。在冷静期待的实验验证中,大家认为加进希格斯场“就是为了自动破坏对称性这个特定目的”。

在粒子物理学家和宇宙学家合作产生的新宇宙学中,希格斯场被认为处于中心位置。在加速器靶上的温度及能量密度下,其能量与宇宙创始瞬间的能量相当。所有其他东西都从这真空能量中产生。在时间的第一瞬间,整个宇宙处于难以想象的密度和温度的无差别能量和无特色的对称性中。在后来发生的对称性破缺或相变中,在温度和密度开始有了差别条件下产生了宇宙。其中最后发生的是电弱力分裂,将弱力和电磁力独立出来,这是现在实验所得到的。在现在实验所能达到的范围之外是大统一理论所假设的电弱力和强力分离的相变。

如果实验能证明存在着希格斯场,那就必定有希格斯量子。从 W 粒子和 Z 粒子的质量可以预期有一种质量更大的希格斯粒子。现在要求加速器的能力至少有一个量级跳跃,再提高两个数量级,从 100 GeV 跳到 10 TeV 的范围。对如此强大的加速器投资还有另外的要求。与静质量起源相联系的希格斯场和粒子,也和弱力的情况一样,是强力研究的中心问题。对宇宙学家来说,透彻地认识宇宙的创始和演化是有同样意义的。因此,在沃萨哈其(Waxahachie),100 千米的隧道中储存着灌溉水。早些模拟出原始的希格斯场的希望驱使 CERN 机构在 27 千米隧道中安装新设备,以及完成现在正在进行的将巴达维亚加速器能量增加一倍等一些措施。

强作用力的研究一直在进行着,现时它还和指导性的理论不相一致。很快就发现,能力不断增强的加速器并没有将原子分裂为更为基本的粒子,与此相反,却制造出包含的粒子数目更多、质量也更大的复合粒子。

理论家只能做低级的分类工作。工作的第一步是将这些寿

命短暂的粒子加以区分和归类。它们被分成两组：中等质量的介子，就是汤川 π 介子的家族，以及质量大的“重子”，即质子和中子家族。20 世纪 50 年代后期，大部分时间和精力都花在将这些种类按照其质量、电荷、自旋、寿命、衰变途径及最后产物等性质分成族。

夸克八重态

1961 年，加利福尼亚理工学院的默里·盖尔曼 (Murray Gell-Mann) 和以色列陆军上校兼特拉维夫大学校长、物理学家尤瓦尔·奈曼 (Yuval Ne'eman) 应用高级的群论数学各自独立地发现重子族可以分成 8 个超族。盖尔曼把这超族系统称为“八正道”^①。用这佛的教导作比喻激发起了当时不安分的大学生对物理学暂时的兴趣。直到 1964 年，盖尔曼才发现这个数字 8 的物理学意义。他是和当时已在 CERN 的加利福尼亚理工学院的同事乔治·兹韦格 (George Zweig) 同时做这项工作的。他们发现只要用 3 个不同的实体就可以组成这 8 组粒子，每个粒子都由 3 个成员组成。盖尔曼把这种实体称做“夸克 (quark)”，这一次是詹姆斯·乔伊斯 (James Joyce) 在《芬尼根的彻夜祭》一书中的文学引喻。

盖尔曼觉得开始时仅仅把夸克当作记账的工具是太局限了。后来承认它们是预期的基本粒子，这表示接受了这种电磁异端^②。为了能使质子有正电荷——或者中子是中性的——这 3 种夸克必须带有分数电荷，这在自然界中还从来未曾被观察到。

3 种夸克被分别命名为“上”、“下”，这没有任何理由，还有

① 译注：Eightfold Way 这个词在佛学中是“八正道”或“八正法”。基本粒子物理学的中文名称为“八重态”。英文中也写作 octet。

② 译注：因为理论要求有的夸克带有 $1/3$ 的电子电荷，有的具有 $2/3$ 电子电荷，所以称为“电磁异端”。

一种“奇异”，这是因为如果假设在某种重子中存在奇异夸克，它的衰变时间就会延长，这叫做“奇异性”。按照理论，两个每个都带有 $2/3$ 正电荷的上夸克和一个带有 $1/3$ 负电荷的下夸克组成带有 $3/3$ ，即单位正电荷的质子。相应地，一个上夸克和两个下夸克组成中性的中子。3 种夸克和它们的反夸克的其他组合足够用来组成整个重子表。夸克也组成介子。真像异端邪说，费曼发现富兰克林正巧也将电荷的单位定为 3。

弱力量子在这里发挥作用了。W 粒子和夸克耦合起来就改变它们的电荷。中子衰变为质子时 [见第 144 页]，一个 W 量子将一个下夸克变换成一个上夸克。从而新的质子得到 $3/3$ 整数正电荷，还有一个电子和一个中微子从舞台上离开。

下夸克和上夸克与奇异夸克的不同组合，可以和粒子表上有记载的稳定和暂态的粒子以及还没有记载的暂态介子和重子相对应。1964 年发现的最奇异的可能的粒子，由 3 个奇异夸克组成的欧米茄负超子， Ω^- ，第一次证实了盖尔曼—奈曼—兹韦格方案。

将夸克作为真实粒子来接受就需要协调一种颇为尴尬的情形：还没有人已经看到过或肯定将来会看到夸克。窥探相互松解开的夸克的努力对加速器能力的增强施加了巨大的动力。然而，当它们的能量到达 GeV 标度的最高端时，加速器却将越来越高比例的能量用来产生质量更大的粒子，而夸克仍旧隐藏在这些粒子中。

既然不可能使夸克单独亮相，于是物理学家只得转而让它留在原地来证明它的存在。1967 年做的实验是一种新型的散射与几何学实验，卢瑟福在 1911 年就是通过这样的实验测量了原子核的直径。麻省理工学院的亨利·肯达尔 (Henry Kendall) 和吉罗姆·弗里德曼 (Jerome Friedman)，还有里查德·泰勒 (Richard Taylor)，用斯坦福直线加速器 (SLAC) 的 20 GeV 的电子束作为他们的探针。他们的顾问理论家费曼将他们追寻的质子靶内的粒

子称为“部分子”，这是比夸克更加明白易懂的名称。

实验安排成这种样式，使得电子能够“感觉到”质子内部的部分子，如果它的确存在的话。将电子加速到足够高的速度，它可以巧妙地克服隐藏着部分子的质子的电磁吸引力，入射电子会释放一个光子到部分子上，然后以较低的能量离去，离开时的角度也和入射角度不同。有成千上万个电子从这样的碰撞中反弹回来，记录下反弹电子的能量和角度，这个实验不仅证实了质子中存在 3 个部分子——即夸克，也证明了它们都是电子般的点状粒子，所以是不能再分的，至少在用来探测它们的能量范围内无法再分。实验也发现它们不停地相对跳动。

有一种将夸克黏合在一起的力导致它们的跳动。现在知道将核子捆绑在一起的强相互作用是将核子内部的部分子——即夸克粘合在一起的力的残余。曾经观察到强相互作用降低到零，甚至在其最大强度的 10^{-15} 米半径之内可能变为排斥力。现在认为这种行为发生在核子内部强力相互作用的原来位置上。SLAC 电子探针发现，由于部分子的跳动，使它们相互距离比阈值 10^{-15} 米更近时强相互作用的强度下降。这种力在 10^{-15} 米处突然升到最高，再注入能量想将夸克拉开，却产生了新的粒子。

量子色动力学

或许因为强力的范围实际上是无限制的，好像电磁力的光子，因为电磁量子没有静质量。强相互作用有多种量子而不是一种量子，夸克间的强力有 8 种量子作媒介。机智但是不标准的语言学家盖尔曼给它们取名为“胶子”。胶子的多样性适合于将带有各自分数电荷的夸克黏在一起。为了使质子中可以有二个上夸克存在而不违背泡利不相容原理，盖尔曼设定强力荷有不同的“颜色”。盖尔曼的比喻用牛顿发现的光的三原色——红、绿和蓝。3 种颜色代表 3 种力“荷”及其反对物。在质子中，红色和蓝

色的上夸克再加上绿色的下夸克成为白色,就是没有颜色。同样,一个红色夸克和一个反红色夸克组成没有颜色的介子。“没有颜色”是强力满意的整数荷,这使得夸克组合物都呈白色。

胶子给夸克以颜色。在盖尔曼的方案中,每个胶子带有一种色和一种反色。它们的发射和吸收要改变夸克的色;于是,吸收一个红—反绿胶子就将一个反红色夸克变为反绿夸克。如果有9种这样的组合是可能的话,其中8种就得到盖尔曼所谓的“量子色动力学”中的各种相互作用。

盖尔曼和他的同事们引用的丰富的比喻说明了粒子和力之间的关系和身份可交换性。对于“粒子”和“力”,戴维·玻姆的警告是适用的:“在精确度的量子水平上,客体并不具有内在的性质……相反,它和与它相互作用的系统不可分地共同拥有它们的所有性质。

色荷将胶子和其他力的量子区别开来。胶子都是相互吸引的。它们具有的巨大能量在它们相互作用的强烈程度中显示出来。在加速器靶上,它们衰变为重子和介子的“喷注”,分别沿3个方向喷射出来。这就是客体和它们相互作用的系统共有的不可分的性质。量子色动力学按照它们的性质来分析夸克和强力胶子,实验就是根据这些性质发现它们相互作用着。

至此,在探索物理世界基础的统一性和简单性方面,终于得到了两代夸克和相关的轻子。上夸克和下夸克与电子和它的中微子共同组成平常能量水平上的稳定和不稳定的原子核。 μ 子和它的中微子以及奇异夸克是下一代。它们在从加速器涌现出的第一批不稳定粒子中展示它们的存在。然而,这一代中缺少了奇异夸克的伙伴,而在第一代中下夸克就有上夸克作为伙伴。

格拉肖和哈佛的霍华德·乔治(Howard Georgi)发展的电弱

和强力大统一理论要求有第四种夸克,格拉肖给它命名为“粲”(charm^①),它与奇异夸克相配以配全第二代粒子。确实,这个方案留下了发现第三代和更多世代粒子的可能性。

粒子	符号	质量	电荷	寿命	稳定性	相互作用
电子	e	1.0×10^{-31}	-1	∞	稳定	电磁、弱、引力
中微子	$\bar{\nu}$	$0.05 \sim 0$	0	$?$	稳定?	
质子	p	1836.1	$+1$	10^{32} 年	稳定	
中子	N	1838.6	0	10.3 分	$\approx \lambda p$	

相互作用	强度	范围	作用时间	量子	静质量
电磁	0.05	∞	10^{-21} 秒	光子	0
强	1	10^{-16}	10^{-25} 秒	胶子	$??$
弱	10^{-17}	10^{-11}	10^{-10} 秒	$W^{\pm}, Z^0$	$80 \sim 90$ GeV
引力	10^{-39}	∞	$???$	引力子?	0

4种粒子和以及它们的4种相互作用力构成普遍经验中物理实在的基础。粒子质量是用J·J·汤姆孙用的交叉参照测定法确定的,电子的电荷与质量的比值约为法拉第对氢离子——质子——测得值的2000倍。粒子之间作用力的强度也同样用交叉参照比例表示,设强作用力为1。图中写出的很微弱的引力是两个粒子间的引力作用。

实验物理学家着手搜索第四种夸克。1974年11月,在强大的布鲁克海文加速器上,由丁肇中领导的哥伦比亚小组的实验和布尔顿·李希特(Burton Richter)领导的斯坦福小组在SLAC的实验,同时得到创造当时最重记录的粒子。在SLAC,碰撞的电子和正电子射束达到所需的能量,3 GeV;电子和正电子湮灭得到的高能光子再物质化成为(另外一种)粒子,它的发现者称它为 ψ ,

① 译注:charm原意为魅力或魔力,粲是它的译音。

“psi”。丁称它为“J”。格拉肖高兴地称它为“charmonium”，根据计算结果，这是他提出的粲夸克及其反夸克组成的。到1976年，由一个“裸的”粲夸克和一个下夸克组成的粒子的发现消除了对第四种夸克存在的怀疑。从此，这一粒子家族的另一方面受到强烈关注。到1.8 GeV，它与夸克质量增加数量级的趋势相符，从底夸克0.005 GeV质量向上每一步跨过一个数量级。有了4种夸克以配合4个轻子，对称性因两个相匹配的家族的存在而得以恢复[见本页图]。

物质粒子		相互作用			
身边的世界					
高能物质		普通物质	电磁	强 弱	
轻子	ν 子 18 650 eV	μ 子 100 eV	电子 e 0.5 eV	-1	0
	中微子 $\lambda \pi$	中微子 $\lambda \mu$	中微子 λe	0	0
夸克	底 4.75 GeV	奇异 200 eV	下 10 eV	-1/3	8
	顶 174 GeV	粲 1 800 eV	上 10 eV	+2/3	8

物质和能量列在这个表中，表中还列出作为日常经验中物理实在基本的相互作用以及可观测宇宙创始第一秒时状态中的相互作用。最终的（根据现在的认识）物质粒子分成两大类，轻子和夸克，它们的质量用能量单位表示，质量和能量是可以相互转换的。引力没有列出，理论上假设的引力量子至今在实验上还没有找到，这里列出的所有项目都已被实验证实。

对称性的恢复是暂时的。斯坦福的马丁·佩尔（Martin Perl）想要看一看用 SLAC 加速器在电子—正电子射束碰撞所能达到的高能量水平上是否能产生质量很大的、通过弱相互作用而不是强

相互作用衰变的粒子。他使用一台他在伯克利的同事设计的“全能”探测器,在 1975 年得到了被他称作“ τ ”粒子的证据,“ τ ”相当于拉丁文中的“ t ”,表示第三(third)种电子。不久在德国汉堡,在新的强大的加速器上确证了这一发现。虽然 τ 中微子尚待发现,但 τ 轻子和可能的第三代夸克需要认真对待,无需多说, τ 子的质量被证明比 μ 子的质量更大。 τ 子——这一代粒子的电子——的质量等价于 $1\,860\text{ eV}$,比质子还要重。

1977 年,第五种夸克的发现是对伊利诺斯州巴达维亚的世界上最强大的加速器投资的回报。在靶上可达到的能量为 400 GeV ,比 SLAC 的能量高两个数量级,利昂·莱德曼和他的同事证实质量为 9.5 GeV 的最重的新粒子的存在。被称作“尤普西隆(upsilon)”(ν)的粒子是新的质量为 4.75 GeV 的 b ,”beauty”(美)或“bottom”(底)夸克和它的反夸克的组合物。

为了和美夸克或底夸克配对,一定有一个“truth”(真)或“top”(顶)夸克。它的存在直到 1994 年才被证实。在那个时候,巴达维亚加速器上安装了超导磁铁,它的能力又提高了一个数量级,达到 1 TeV 。用对撞束的方法,可以加倍到 2 TeV 。发现顶夸克的等效质量为 174 GeV [见第 162 页图],比底夸克质量大两个数量级,比组成普通物质的上夸克和下夸克的质量大 $5\sim 6$ 个数量级。看来,顶夸克能回答一个问题,它的质量如此接近于希格斯量子质量的较低估计值,从而在它们和下一代介子和重子之间不再留下余地。2000 年 7 月,在巴达维亚, τ 中微子的成功产生完成了 3 代粒子。现在可以肯定,下一个追寻的目标就是希格斯量子。

“上帝粒子”

那原本会成为得克萨斯州沃萨哈奇头等重要的事情。 40 TeV 的超导超对撞机原想用来在 1 TeV 能量左右寻找莱德曼称作“上

帝粒子”的东西^①。在能量近于 10^3TeV 的条件下,希格斯粒子很可能会确定希格斯场的存在。这也是电弱统一的双重肯定,并且也会成为证明大统一理论的道路上的一座里程碑。静质量的起源,也就是人类熟知的日常生活中遇到的物质的起源,相应地会得到有实验支持的理论解释——也有可能得不到。如果超导对撞机真的建成,并进行实验,今天或许会更加肯定轻子和夸克有共同的祖先。莱德曼的亵渎上帝的言词,如果可以这样说的话,还是很中肯的^②。

CERN 新的加速器和巴达维亚正在改进的加速器可能会,也可能很快就会找到希格斯粒子。胜利会鼓舞人们对于将加速器能力再提高一个,甚至两个数量级的投资。电弱和强力的会合将在更高的 10 个或 11 个数量级以上。由于已接近于现在的实验极限以及取消对较近的能量投资,这使成长中的一代物理学家的才能不得不限定于理论方面。

相应地,理论是丰富多彩的。他们在理论上建立或跳过包容自然所有 4 种力的最终统一的大统一理论。斯蒂芬·温伯格——注意到了电弱力和强力“只”在比 3 种力和引力合成一种力的能量低两个数量级时统一起来——提倡的绕过这一困难的策略。

理论的“超对称”族为每一种有静质量的粒子和反粒子及量子引进了超级伙伴。它将粒子族和量子族进一步融合在一起成为一个实体;它指望将引力和 3 种有极性的力更自然地协调一

① 译注:美国的超导超对撞机于 20 世纪 80 年代初开始酝酿,并建立专门的组织研究其可行性,提出实施计划。1987 年,美国总统批准建造计划,在美国能源部管理下开始各方面的准备工作。1991 年开始建造第一座主建筑,直接参与此项工作的有美国和其他国家的数千名科学家和工程师。1993 年美国众议院决定停止该项目。

② 译注:因为超导超对撞机的项目已经停止,原文中这一段都用虚拟语气,而汉语中没有专门的虚拟语气表达方式,译者为表达这些目前做不到的事,作了少许增添。

致,并且要提供多种新的粒子来说明使宇宙学家困惑的看不到的“暗”物质。它的一些命题可能是超导超对撞机(SSC)所能达到的范围之内。其中一个证据将会在巴达维亚和 CERN 产生希格斯粒子的实验中找到。超对称物质的“特殊的”形态包括在爱伦·谷斯(Alan H. Guth)提出的大爆炸的暴胀开始的过程中[见第 227 页]。新的创世记的修正版得到所观察到的各向同性的 2.725 K 宇宙背景辐射的有力支持,在银河系平面上面和下面天穹的所有地方的歧离都不大于百万分之五十。

“弦”和“超弦”理论通过在四维时空上再加上六维就可以保证 4 种力的统一。弦代替了点粒子,摆脱了困扰着点的无穷大。外加的六维将弦卷在四维时空中 10^{-33} 米直径的粒子中间。在方程式隐喻式的运算中,弦在关键模式上的振动产生了力和粒子。

这样的理论将物理学家分成不同的哲学派别。某些资深物理学家比别人更赞成他们后继者的事业。斯蒂芬·温伯格不久之前被邀请到哈佛作演讲时用霍华德·乔治的 5 行打油诗愉快地宣布实证主义的观点:

斯蒂夫·温伯格从得克萨斯回转家门,

带回维度之多难倒了我们。

好在多出的这些维度

都被卷进了小球

它小到毫不影响我们。

不久前,虽然没有能达到检验大统一理论的实验所需的能量,格拉肖还是承认理论可以继续发展,直到两个数量级以上的量子力和引力的最终统一。根据弦理论的复杂性还是可以设计一个可能的实验——就像爱因斯坦说的“结论可以超越在经验之前得到”。

因为超夸克也可以看作纯夸克的祖先,在加速器中达到宇宙创始第一秒时的能量就能再产生出超夸克,粒子物理学家抓住机

会和天体物理学家合作。他们是已经参与宇宙学研究的粒子物理学家。他们将共同研究无休无止的宇宙线——高能粒子——的暴雨，它们从遥远时空中的突变事件发源，又冲进地球大气层。

发现宇宙线中有很小百分比的部分具有加速器能达到的最高的能量范围。它们的到来是通过它和外层大气中原子碰撞产生第二代和第三代粒子簇射而得知的。地面上足够大的探测器阵列（“足够大”=覆盖半个康涅狄格州的成千上万个探测器的阵列）可以观察这种事件。如果可以聚集这方面投资的资金，那么经过一二十年的等待和计数，探测器可能记录到可能是希格斯粒子到达的事件。如果确是这样，粒子物理学家和宇宙学家的合作可以达到创世大爆炸的第一秒中最初 10^{-20} 秒，这是我们的观察的宇宙出现的时刻。

第四章

时间和空间

我们不自量力去思考宇宙
而全部牛顿的世界只是沧海一粟

达西·汤普生 (D'Arcy Thompson) ①

粒子物理学家在和宇宙学家合作时将引力摆上了他们的议事日程。在大多数过去的世纪中,他们可以忽略人类从经验得知的这第一种自然力。他们致力于研究最先通过闪电认识的电磁学。然后到了 20 世纪,他们发现了两种短程力,弱相互作用和强相互作用。他们在量子场论中已经成功地将 3 种力包括在概念体系——量子场论——中,在这个体系中他们研究得最完满的是上述第一种力。对这些力在地球上物质结构中的作用的探究有助于对遥远的宇宙中巨大尺度上发生事件的了解。即使在那遥远的地方,粒子物理学家还是可以忽略引力,因为它在两个带电粒子间的作用只是电磁力的 10^{-39} 。它甚至比弱力还弱,只是两个粒子之间弱力强度的 10^{-25} 。

然而,现在他们不得不考虑引力了。在将 3 种量子力统一的

① 译注:达西·汤普生(1860—1948年),英国生物学家、自然学家和生物数学家。

粒子加速器实验中，他们发现他们回到了接近宇宙刚开始的历史时期。在那里，他们和宇宙学家会合了。他们发现宇宙学家用的是一种完全不同的概念体系。这就是广义相对论。这是纯粹的场论，它将宇宙的四维时空构建在它所包含的的质量的引力场中。质量的加速运动激起场产生出以光速运动的波。在这个理论中还没有认识到它们作用的量子。然而，广义相对论却能说明宇宙学家知道的所有有关被无所不在的引力束缚着的宇宙的结构和历史。

“只要引力还是一种没有量子化的力”，阿得雷德大学的保尔·戴维斯 (Paul Davies) 说，并且人人都同意，“在物理学的心脏部分就有令人泄气的不和谐音。”

引力

伽利略的“重量”是人类力的经验，是工作和疲劳的经验，引力构建了地球上的三维空间。物体的下落决定了垂直坐标，人们根据它画出水平线。一天两次的潮汐证明了太阳、地球和月亮之间的引力束缚。可以看到引力在生物进化的所有时间里都影响了从比目鱼到老鹰的所有生命形态的样式，还有，引力使得两脚动物的人类直立起来。

天文学家不会不将引力放在他们注意的中心。现在，作为观测宇宙学家，仪器赋予他们强大的力量，他们看到了引力——起作用的力——是宇宙的最高组织者。与其他 3 种力不同，引力随着在它的作用下质量不断结集而逐步增大。正如天文学家在 20 世纪所知道的，引力使 1 000 亿颗恒星在漩涡星系的臂上旋转并蜂拥在它的中心部位，还知道在椭圆星系中密集大量的物质。它将千百个宇宙岛聚集在星系团和超星系团中。在观测到的 150 亿光年到 200 亿光年的宇宙半径内，估计引力控制了大约 1 000 亿个星系。

在本银河系——近到 20 世纪 30 年代还是我们的全部宇宙——中，尘埃和气体组成的不透明星际云宽达数光年，是在引力的单向作用下聚集起来的。这里引力开启了量子力。在星际云中较密的小球上，引力随着在它本身作用下聚集起来的物质的质量和密度的增大而增大，最后使物质坍缩成原恒星。在互相挤压的物质中的压力和热使恒星炽热，最先发射电磁波谱中红外波长区的辐射。

然后，被挤压到一堆的原子达到更高的密度，引力点燃了强力和弱力的热核炼金术。赤裸的、宇宙中最丰富的氢原子的赤裸的原子核，聚合成氦原子核，这是仅次于氢的第次丰富的原子。在热核反应中损失的质量变成能量，产生出抵抗压力的热——恒星中赤裸原子核的高速运动——足以抵抗引力的向内拖曳的力量。此时，星光辐射出电磁波谱中的可见和不可见光。

质量大约相当于太阳的中等大小的恒星在 100 亿年左右的时间内燃烧掉大部分的氢，这个数量和它们的大小尺度相适合。在作为红巨星短暂生命中它消耗完了最后一点氢，暴胀到原来大小的 250 倍。在太阳的情况中，它要膨胀到地球轨道以外。接着引力又使红巨星坍缩到小行星的大小，同时将大部分物质喷射到星际空间中去。被喷射出来的质量将几乎所有的氢归还到宇宙的元素库存中，还贡献很少量的氦和其他元素，这些元素是这种类型的星体在它的生命过程中烹调出来的。于是产生了“白矮星”，这个星体靠以前燃烧的残余热量并急骤地坍缩发光。在引力的作用下，原子互相挤压到其间不留一点空隙。为了抗拒引力对星体物质进一步的作用，就要量子力学发挥作用了。根据泡利不相容原理，电子拒绝被压挤到同一能级上 [见第 128 页]。一立方厘米中可包含 10 吨这种星体物质。白矮星逐渐冷却下来，它的光暗淡下去，就变成黑矮星。

质量高达 3 倍太阳质量的较大的恒星的燃料消耗完以后，就

坍缩成为由核粒子组成的密度极高的星体。它们要发展到这一步首先要爆发成为超新星,将大部分物质喷射到空中,在几天的时间中它们的发光亮度盖没整个星系。在这种星体的一生中,在它们内部巨大的引力以及热核爆炸中暂时的巨大压力作用下,周期表中其余大多数元素在反应中合成了。超新星剩余的巨大质量坍缩成为中子星,这是比白矮星更小的天体。相应地,更大得多的引力将电子挤压进质子中,将质子转变为中子。中子星的半径为 10 千米,密度为白矮星的 10^8 倍:每立方厘米 10 亿吨,相当于原子核的密度。

这些是束缚在物质中的能量,在整个宇宙历史中稳定发射的和爆炸式发射的星光总共只烧掉原初质量的大约不到万分之一。热核反应炉的灰烬——比氢和氦更重的所有元素——组成了现在已知的物质总质量的大约千分之一。这些成分的一个样品就是被引力压缩成为太阳系中地球上的固体。

在恒星晚年的中子星或白矮星时期,引力会提取出比它们在长得多的时期中热核辐射产生的能量更多的能量。由于角动量守恒,引力坍缩使星体的转动加快,周期从几天减少到几分、几秒,甚至只有几毫秒。星体成为一个发电机,它的磁场强度相应地增大。辐射场带走了附近星际的大气,假如它有伴星的话,也会带走伴星的气体,好像五彩缤纷的烟火胜过了以前所看到的恒星景象。暴露这些天体存在的辐射就是粒子物理学家很熟悉的“同步辐射”,这种辐射从在圆周轨道上加速的粒子束那里窃走了能量 [见第 148 页]。

引力将随着在它本身的作用下汇集起来的物质质量和密度的增大而无限地增大,就像在星系的中心的情况那样,最终压倒它所能及的范围内的每一样东西。人们认为,超过 3 倍太阳质量的恒星最终要坍缩成黑洞。物质—能量的粒子都消失在一个“奇点”之中,这是一个无限小的点,守恒的只有它们落进黑洞的

角动量和它们的净电荷,甚至光子也都无法从黑洞中逃逸,所以称之为黑。

黑洞提供了辐射能源的最佳解释,这种辐射——都在可见光波段——照亮了观测宇宙中的所有其他天体。像类星体(quasars),这是类似于恒星的天体(quasistellar objects)的缩写,现在已经认为质量很大的准星系。类星体发出同步辐射流,人们认为,这种辐射是几千倍太阳质量的物质被加速到近于光速后、落入类星体中心的黑洞而消失的加速过程中发射的。

几何动力学

总的来说,引力是宇宙中至高无上的力。不过,引力并不是人类日常经验中所说的那种力——像爱因斯坦说的从屋顶上掉下来的倒霉的“观察者”所感受到的,以及宇航员可以感受到的失重[见第102页]。亨利·卡文迪什证明了物体施予的引力正比于该物体所拥有的质量。它没有像量子力场那种样式的拉力,也没有斥力。广义相对论方程式表明,引力以完全不同的方式起作用。物体的引力并不是直接作用于另外的质量上,而是影响它们漂浮在其中的时空。当然,引力也给人以像作用于物体上的力一样的感觉。身体也同样感觉到离心“力”。这不是真正意义上的力,而是在身体偏离直线运动时经受的一种感觉。

分离的、绝对的时间和空间是经典物理学中事件的舞台。然而,光速这个“不能超越的极限”使它们合并成为四维时空。在狭义相对论中,转变为运动物体速度——在时间和空间中测量的变量——的能量使物体质量在速度接近极限的光速时无限地增大[见第94页]。在广义相对论中,恒星和星系的引力场构成了动力学的中介时空。

引力——约翰·A·惠勒恰当地称它为“几何动力学”的力——使时空与其中的质量成比例地弯曲。物体沿着时空中的

梯度加速或减速的轨迹形成的短程线,显示了宇宙中各个地方运动着的质量产生的引力场的轮廓。当辐射能量的光子以最高的速度沿短程线运动时,其波长和有效质量会增大或减少。把短程线比作直线,即平面几何学中两点间最短的距离,四维几何学将时空以不同曲率扭曲。

地球引力场的曲率半径大约是 10^{11} 米,相当于到太阳距离的三分之二。在三维空间中,沿这样大的半径的曲线运动,即使走了很长的距离,也还是难以觉察到它的弯曲。在地球引力场的四维时空中,自由下落的物体沿时间方向很快加速,5 秒钟内速度达到每秒 49 米。但每秒 49 米除以光速得到空间方向上觉察不出的数值 1.6×10^{-7} ,它的弯曲仍旧小于可感知的程度。虽然如此,人们还是发现这点弯曲是可以探测出来的,并且知道要特别注意这个现象。

质心周围的时空弯曲的曲率半径随着质量和密度的增加而变短。密度是决定曲率半径的非常重要的因素。太阳质量为地球的 300 000 倍,它是一个巨大的物体;它的曲率半径只是地球的 4 倍。黑洞中心的密度趋向无限大,曲率半径接近于几何点的曲率半径。落进去的物体被加速到光速。黑洞存在的证据来自观测到粒子在掉进去时发射的辐射频率增加。最近,观察到光的波长变长,然后在黑洞边界上消失,甚至连光子也不能返回出来。

几何动力学不像在地球上那样需要通过肌肉用力得到冲量来改变物体的动量^①。四维时空中没有静止的物体或静止的点。宇宙中每一个地方不受约束的物体都像惠勒说的那样,在局部时空的引力场中自由下落。宇宙中没有“上”、“下”或其他任何坐标,说不出它们落向何处,只能说它们在作相对运动。这里不需

^① 译注:这一句原文意义不明,可能有错,译者已适当改写。

要牛顿力学的“力的表达式”[见第 45 页和第 47 页]来描写物体运动。在宇宙的尺度上以及在量子事件的尺度上,运动是自然的状态。

在地球表面上的物体被地面挡住,不让它自由下落,当发生塌陷、跳跃或从突起表面上被推下时,下落又重新开始。地球上所有物体都随着地球一同在太阳的引力场中自由下落,并随着太阳一起在银河系的引力场中下落,同时还随着银河系一同存在于周围宇宙中的物质的引力梯度中自由下落。

牛顿运动定律正确说明了地球上普遍经验中运动与质量、速度和距离的关系。为了居住者的方便,物体是静止还是作匀速运动总是相对于地球参照系来说的;克服物体惯性的力的作用,使物体从静止开始加速运动。牛顿的引力只要作很小的修正后就可以说明太阳系的力学。广义相对论要对无法比拟的更远的尺度上的宇宙作出解释。

牛顿的物理学和爱因斯坦的物理学在各自的领域中说明世界是如何运动的。新物理学质问世界是由什么东西构成的以及它为什么成为这个样子。经典物理学和新物理学在大尺度的和小尺度的广阔范围内相互交错;在两个极端情况下守恒定律都成立。

广义相对论受到检验

在 20 世纪 70 年代,全神贯注于不连续量子的物理学家面临连续场的经典概念的威力。他们对物质性质的探索将他们引导到宇宙学。他们对广义相对论进行新的、严格的实验检验。爱因斯坦的伟大发明在更小的误差范围内仍然正确。

例如,哈佛大学的庞德—里布卡实验中应用量子物理学的技术验证地球上中等引力场中的引力红移[见第 105 页]。在普林斯顿大学,罗伯特·迪克(Robert Dicke)和卡尔·布朗斯(Carl

H. Brans) 领导一个改进的厄缶实验。他们的结果比他们原先所预期的更好地符合广义相对论。为此目的,利用放在月亮上反射激光的“角反射器”有可能使测量地球到月球上的 400 000 千米距离的误差达到 30 厘米以内—— 7×10^{-10} 的误差。从而地球和月亮可以用来做一次宇宙厄缶实验 [见第 101 页]。两个物体向着太阳的加速运动以同样的速率进行,其误差范围在 30 厘米以内。

麻省理工学院的欧文·夏皮罗 (Irwin Shapiro) 利用太空计划来演示光在引力场中受偏折引起的时间延迟。他和他的同事用维京火星着陆器上装的转发器交换无线电信号,比较行星在靠近及远离太阳的天空位置上信号传递的时间——模仿罗麦观察木星卫星的星蚀来测量光的有限速度的方法 [见第 55 页]。根据理论,测量到的信号来回时间的变化偏离达 0.002 秒。现在用测量从类星体发来掠过太阳的辐射受到的偏折的方法已经测量了太阳引力场对各种角度的电磁辐射引起的偏折。



1979 年发现的“双类星体” [见本页插图] 戏剧性地演示了引力质量存在时的时空弯曲。看到的两个类星体被发现实际上原是一个;由于光线通过看不见的物质周围的弯曲空间产生折射,

光从两个方向弯折而形成两个像。这种引力透镜的探测已经成为一种技术。用多镜面的望远镜以改进对银河系内看不见的物质引起的时空弯曲的测量。这些看不见的物质是在会发光的物质以外的,它们提供的引力场是组织银河系以及凝聚星团中的星系所必需的。

20 世纪 70 年代得到了或许是广义相对论最关键的预言的可靠证据。由于它们的存在而引起时空弯曲的物质在加速运动时必定发射以光速运动通过弯曲时空的引力波,这种波尚待探测。“中等强度”的引力波将物质压缩和拉长 10^{22} 分之一。从超新星发射的波可引起的变形为 10^{18} 分之一。这在 10 亿千米长的物体上有 10^{-3} 毫米的变化。这样微小的效应在好几年中一直狡猾地躲开了马里兰大学的约瑟夫·韦伯 (Joseph Weber) 的精巧的实验测量。

在 20 世纪 70 年代,利用波多黎各阿雷西博的 1 000 英尺射电望远镜,对脉冲双星进行了 6 年的研究,终于得到引力波的确定的证据。约瑟夫·泰勒 (Joseph Taylor) 和他的麻省理工学院的同事们通过对绕着中子星伴星旋转的另一中子星的靠得很近的高速运动的轨道的收缩的测量证实了能量损耗于发射引力波 [见第 106 页]。

为了解决“物理学心脏部分的致命的矛盾”,理论提出“引力子”的假设,引力子是引力波的量子,有了它就能使自然界的 4 种力全部统一。引力子包含在量子场理论中,宇宙学家现在用量子场来想象宇宙。现在还不能设计出探测引力子的实验;除了在理论中,它还没有可觉察到的效应。

在这期间,广义相对论站稳了自己的脚跟。“至今,还没有发现和爱因斯坦的引力几何理论原则上的背离。”约翰·惠勒在 1970 年写道,“还没有听说有反对这个理论的观察证据能经受住时间的考验。”

宇宙过去和未来

粒子物理学家和宇宙学家通过实验和观察提出了一种理论，曾经有一个时候整个宇宙只在引力控制下。当时质量—能量——或者在那个时候出现的无论什么——都集中在几乎是无限小的时空曲率半径范围之内。那时的 1 立方厘米宇宙包含 10^{100} 克物质，或相当于 10^{120} 尔格的能量。温度为无法测量的 10^{32} K。引力，如果还不存在其他与它有区别的力的时候也可称之为引力的话，或许压倒了热运动的强度。所谓的大爆炸开始启动。一连串的相变——例如固体变为液体状态就是一种相变——使粒子进入量子力相互作用的状态；质子和中子突然从高能粒子的混沌中出现。

原初爆炸一直继续到今天，发展成为宇宙膨胀。至高无上的引力控制整个局面。直到最近的观察才迫使人们考虑这种可能性，这种观察是指观测到的宇宙的密度，这引起了宇宙学家的关注。广义相对论证明，在某个临界密度下时空是平坦的，这种情况下宇宙膨胀不断地继续下去。密度高于这个临界值时，可以证明时空的曲率是正的；膨胀将要达到一个极限，然后宇宙就要在一次“大挤压”中收缩。密度低于这个临界值，曲率是负的，宇宙会指数式地一直膨胀下去。宇宙的大小、年龄和膨胀速率等都不支持平坦宇宙的假设。如果开始的时候的密度不等于临界值，或高或低只要相差很小一点点，时间会很快放大这一微小歧离，从这开始宇宙就会一直蒸发或者坍缩。

密度的问题一直悬而未决。考虑到所观察到的其他各种迹象所指示的宇宙年龄和膨胀速率，发光的物质只占所需要的物质数量的百分之一。现在这个问题因为发现了引力可能受到迄今为止还不了解的排斥力的竞争的证据而进一步蒙上阴影。中等距离上星系红移的精确观察表明，按照宇宙的时间尺度，宇宙的

膨胀现在还在加速。假设有一种“暗能量”。这可能是从希格斯场中涌出的真空能量，希格斯场是粒子静质量的源泉[见第 155 页]。

这样的事件在广义相对论中已经有过预示。在 1917 年，爱因斯坦受到一篇题为“广义相对论的宇宙学考虑”的文章所激励，在这个题目的论文中，在他原来的方程式中引进一点修正。他的使宇宙不致坍塌而保持稳定的“宇宙项”的作用就是排斥力。

创世大爆炸的设想从粒子物理学实验得到有说服力的证据，这在上一章中已经叙述过了。观测宇宙学提供了两个确定的证据：宇宙红移和宇宙微波背景辐射，支持了大爆炸的设想。

宇宙红移

红移是从观察数千个星系的光谱得出的。这些光谱的谱线都无例外地向红色，即光谱的长波一端移动。这是退行的声源发射的声波，如火车头的气笛声或者现代的有 18 个轮子的牵引拖车的喇叭声；声波的波长变长就是大家都熟悉的多普勒效应。从宇宙中的光源发射的光波中也观察到同样的波长变长效应。宇宙红移的解释始自进一步观察到的红移随发光的星系到地球的距离增加而增加这一特点。光在很久很久以前从这些星系发射出来。红移的每一点增加，表明发射该光谱的那部分宇宙不仅更年轻，并且更小和更密。这是宇宙本身在膨胀，光在膨胀的时空中以不变的速度传播，星系的光谱线波长变长的数值正比于星系与观察者之间的距离。光从星系发出的时间更早，时空的膨胀就更大，红移也就更大，星系的表现退行速度也更大。然而，如果没有对某一星系距离的精确测定，那么关于星系在空间中的运动，红移什么也不能告诉我们。进一步，我们这个被限定在固定观察点上的观察者必须想象，如果另一星系中也有观察者在观测我们

的星系的话,这另一星系的观察者会测量出我们这个星系有同样数量的红移。

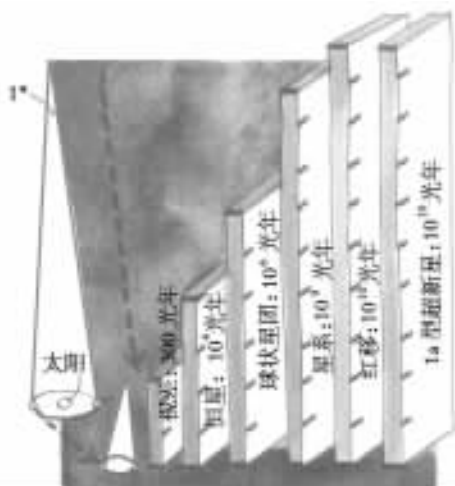
观测宇宙学的第二个贡献是直接证明宇宙从原初原子突然膨胀,即大爆炸。对乔治·伽莫夫于1930年代首先提出的大爆炸这个事件的反映是,康奈尔大学的拉尔夫·阿尔法(Ralph A. Alpher)和罗伯特·赫尔曼(Robert C. Hermann)预言必定有一种回音作为辐射背景自始至终充满了宇宙。1965年,这种辐射的偶然发现证实了这一预言。从观察到的宇宙创始时发生的这种信号的光谱以及宇宙温度都显示出非常接近于理论计算得到的数值。

现在对宇宙的认识使人类面对另一次哥白尼革命。人们现在已经认识到他们在空间中并没有占据任何特殊的地位,并且他们的存在在时间上也没有任何特殊性。有生命的物种出现在宇宙中也已有100亿年或150亿年的历史。剧烈的事变,变小和变暗,他们以前能想象的都在本地银河系中发生并且还将再次发生。几千万个像太阳那样的恒星产生又消亡。太阳本身注定要在大约50亿年后死亡而变成红巨星。人类这一物种和个人都必须被看作终于要死亡的。显然,宇宙将继续它的自发进程直到人类观察者消亡以后很长的时间,其实这在他们出现的很久以前就已经存在了。

然而,现在知道宇宙给予人类的遥远未来比任何人曾经设想过的都更长远得多。看来,要达到任何目的都有足够的时间。现代开始的对发展文明的努力,在更近的当代更进一步组织起来以获取客观知识。现在正是时候,人们或许能学到足够的东西以保证将来的开放,抵制那些妨碍明天的习惯和制度。

只是到20世纪,天文学才真正到达太阳系及最靠近的星体以外的宇宙。只在最近的400年前,几乎在每个人的观念和想象中,天空是一个镶嵌着固定不动的恒星的圆顶。到哥白尼

把地球放在绕太阳运动的轨道上以后才有可能测量到恒星的距离。他看到从太阳的这一边和从太阳的另一边观察时恒星的表观位置有所改变。他试图测量视差的角度,即测量这种表观位置的变化[见本页图]。但他失败了,他认为零结果是因为角度太小而仪器不够精密的缘故。第谷·布拉赫试图用他自己的精密仪器做同样的测量。他用他的零结果来证明哥白尼将地球从宇宙中心移开是错误的,并且他修改了托勒密体系以适应椭圆轨道,他的计算就是将行星放在椭圆轨道上求出来的。



视差法测量较近的恒星距离,从这定下了所有的宇宙标度[见第180页]。从地球绕太阳轨道相对两端观察视差角1弧秒为星体的距离3.26光年。远到这标度的0.01弧秒处,即距离为300光年内的100 000颗恒星和球状星团都可算作是在用几何学可测量的范围之内。利用这些在可测距离上的天体的“绝对”亮度为相对亮度标度定标。红移[见第185页]标度得到在1a型超新星[见第210页]的闪光轮廓基础上建立的新标度的支持。

一些观察者和思想家想象天空更大、更广阔,恒星分布在空间中,离开地球很远,并且距离也不同。这被看作是一种异端邪

说,1600 年乔尔丹诺·布鲁诺 (Giordano Bruno) 为此在火刑柱上被烧死。在 1660 年前后,克里斯琴·惠更斯 (Christian Huygens) 从数学的角度来研究这些夜晚天空中的点光源,证明恒星一定是距离遥远的太阳。然而,天空又继续关闭了 1 个多世纪。迟至 1835 年,经验主义的领袖人物奥古斯特·孔德 (August Comte)^① 断言“实证主义哲学的领域全部都在太阳系范围之内,宇宙的研究在任何实证的意义都是不可及的。”

星体的视差

只在 3 年以后的 1838 年,客观的测量穿透了天穹。在柯尼希堡大学,弗里德里希·威廉·贝塞尔 (Friedrich Wilhelm Bessel) 用约瑟夫·冯·夫琅和费 (Joseph von Fraunhofer) 制造的可以精确测量被指向物体角度的新式仪器测出天鹅星座中标号为 61 的恒星的视差。他确定该星的星位角大约是 0.3 弧秒,从而求出天鹅座 61 的距离接近于 10 光年。

从地球轨道的相对的两端观察,距离 3.26 光年处的星体所张的角度正好是 1 弧秒,3.26 光年距离规定为长度单位 1 秒差距。离开地球,在这个距离以内,除了太阳以外,没有其他的恒星。最近的恒星是半人马座 α 星,距离地球 1.32 秒差距或 4.3 光年。贝塞尔观察了几百颗恒星后发现,只有很少几个距离地球比较近,其中大多数比天鹅座 61 远得多。这些数字说明为什么甚至连第谷也不能测出恒星的星位角。天文学家宁愿用秒差距 (宇宙学家用兆秒差距:3.26 百万光年) 而不用光年作为测量单位。因此,或许他们在头脑的想象中始终牢记几何学,他们在研究宇宙的时候最后要将更长得多、更不坚固的标尺用于这种几

^① 译注:孔德 (1798—1857 年),法国哲学家、社会学家,实证主义的创始人。

何学^①。

到 1875 年,测量了 5 000 颗恒星的视差,将已知的宇宙扩展到几百光年。由于照相底片的发明和改进,导致人们发现所有以前人类经验中被认为是“固定不动”的恒星实际上在天空中向各个方向运动。将相差好几年前前后拍摄到的照片加以比较,天文学家发现,有好几千颗恒星在星图上处在不同的位置。当然,绝大多数恒星始终“固定不动”,这是因为太远而探测不出它们的运动。运动的星在照相底片上的像的“自行”——垂直地穿过视线——可以准确测量出来。测量这些星体的红移可以知道它们离开地球运动的速度。将两种测量结合起来就可以求出到它们的距离。于是,到 19 世纪末,几何学将宇宙可观察的边界延伸到了 3 000 光年。

对距离可靠的几何测量使得测量“本身的”或“绝对的”恒星亮度成为可能。从恒星光谱的相同,可以得出本身亮度的相同,就有可能从那些探测不出自行的恒星的视亮度估计出它的距离。将与距离平方成反比地减小的恒星视亮度和已知距离的同样的恒星的本身亮度相比较就可以测量它的距离。天文学家现在有了可用于测量超过几何学可应用范围的天体距离的标尺。

在 20 世纪初,哈佛天文台的亨丽瓊塔·李维特 (Henrietta Leavitt) 的发现大大扩展了这一标尺的应用范围。在该天文台秘鲁的南方站积累了大量的麦哲伦星云 (费迪南·麦哲伦 (Ferdinand Magellan) 的航海家曾经注意到这个“云”在南方天空发出的弥散光) 的照片。将相隔几天或几星期拍摄的照片加以比较,李维特发现星云中有一些星体的视亮度一天又一天或

^① 译注:在广义相对论的弯曲时空中,时空标度随引力场强度而变。标尺是会弯曲、会伸缩的。

一周又一周地变化。连续比较 25 颗这种星的图像，她发现它们的表观亮度和变化周期之间有一个线性关系。它们都在麦哲伦星云中出现，表明它们都离开地球同样的距离。李维特知道，它们的相对视亮度一定和它们的相对本身亮度相对应。

(几年之后，哈佛天文台聘用来担任比较星体光谱的工作的另一位女天文学家对天文学作出了另一项重要贡献，从而给宇宙学设定了一个条件。从太阳光谱中铁的发射光谱线的显著地位以及它在地球上的丰富存在，尤其是在产生地磁场的地核中特别多，可以断定铁是最丰富的一种元素。从塞西丽娅·佩恩·加波斯金 (Cecilia Payne Gaposchkin) 编制的大量恒星的光谱表可以看出，氢是宇宙中最丰富的元素。经过一些争论，她的发现终于被承认了。在宇宙原子总数中，氢原子的数目最多，约占 93%，其次为氦，约占 7%。其他所有元素，包括铁在内，总数只是这个整数下面的一个小数而已。)

变星被发现是装饰本银河系的球状星团中普遍存在着的。在这些星团中，100 000 到 100 万颗恒星团聚在自身引力的系统中。在加利福尼亚州的威尔逊山天文台，哈洛·夏普莱 (Harlow Shapley) 安装了 60 英寸望远镜，这是加利福尼亚巨型望远镜的第一台，用它普查已知的 100 个球状星团。他采用李维特的周期——光度关系来确定到它们的距离。他根据相对亮度求出的最近的星团的距离，算出这些星团中变星的本身亮度。夏普莱用这标尺测量出银河的南方地平线上在人马座大星云中聚集的星团中的三分之一天体的距离。他求出这个地区离地球为 17 000 秒差距，即 55 000 光年。

夏普莱的发现在 1918 年发表以后，其他一些大尺度的观测也开始进行了。恒星集中在银河中这一事实使 19 世纪的一些天文学家认为宇宙可能具有砂轮般的形状，从地球上看到银河是从边缘上望去。夏普莱的观察将这砂轮的圆心放在当时还

难以想象的距离以外，太阳和地球放在靠近它可见的外部边缘不显著的位置上。1922 年，已经是哈佛天文台台长的夏普莱审查了李维特的麦哲伦星云照片。可以很清楚地看出她的大部分变星都位于这些星云的球状星团中。夏普莱对星团视亮度的测量表明星云距离地球 75 000 光年。地平经度测量确认它们位于银河系平面以外。显然，麦哲伦星云是在银河系之外的恒星系统，它虽比银河小一些，但仍旧可与银河系相比较。



埃德温·哈勃 (Edwin Hubble) 用威尔逊山新的 100 英寸望远镜，并应用李维特—夏普莱标尺测量在仙女座中看上去是一个弥散光斑的星云中球状星团的距离。仙女座星云的第一个大型望远镜照片已经被当作大型望远镜拍摄到的许多类似漩涡星云的典型 [见本页插图]，图上看到的是正面略微倾斜的螺旋星云。100 英寸望远镜能分辨出其中较亮的个别的一些星体。它还能更容易地分辨出球状星团，它们像在银河系中的星团一样围绕着系统的中心——旋臂就从这恒星密集的核心向外伸展出去。哈勃红移的测量将星云放到百万光年的距离上，这个距离比麦哲伦

星云更远两个数量级。

在这样远的距离上，照相底片上星云的宽度应为 50 000 光年。说一句题外话，仙女座星云是一个大小可以和一度被认为组成整个宇宙的银河系相比较的“岛宇宙”。当时还有许多其他漩涡星云和椭圆星云被记录在天文学照相上，它们也应被看作是在银河系之外、距离更远得多的岛宇宙。

哈勃将岛宇宙称为“星云”(nebulae)，这是天文学中第一次使用这个术语。夏普莱称它们为“星系(galaxies)”。今天，这个术语令人回忆起他和哈勃竞争是谁首先打开通向更遥远、更广大的宇宙之门的荣誉。

如果说银河系已失去了它就是全部宇宙的地位，但还是可以想象，从正面看上去它也会像仙女座大漩涡一样光辉灿烂。从银河的壮丽景象可以推知，我们是从边缘观察本地的岛宇宙。现在认为银河系只是等待我们去发现的无数的星系中的一个。100 英寸望远镜在银河平面以外的两极天空中捕捉到的每一个光斑中能记录下来的新星系的数目被证明是照相底片曝光时间的函数。应用高精度的大型仪器使望远镜指向同一颗引导星，夜复一夜，望远镜可以补偿地球的运动，使这颗星一直落在照相底片的同一位置，用这种方法可以将曝光时间延长到比一个晚上几个小时的最佳观测时间更长得多。

这种恒星体系按照其位形可以分成 3 类。其中有常常会引人注意的螺旋状星系，天文学照片对地球从不同角度拍摄到这种天上的风车，从侧面到正面都有。在它们的发强光的中心核中聚集了估计平均总数为 1 000 亿颗恒星中的 900 亿颗。发光的星体连成的带和发光与不发光的尘埃及气体组成的破碎云团形成了它们的卷曲的螺旋形臂。拖曳的旋臂和扁球形核给人以旋转的感觉，这正巧也被多普勒移动所证实。

只有发光的核而没有旋臂的椭圆星系数量较少。还有数目

不少看上去不规则形状的星系，不规则程度最小的看上去像没有核的旋臂。从分类到研究演化是一个巨大的飞跃，提出了星系的发展序列：从不规则形状经过螺旋形到扁球状。在这种推测中还没有计入许多小的未成形的集合体，这也常出现在天文照片中。

哈勃研究了大量的星系样品——不是研究它们的图像而是研究表示它们特征的辐射光谱。星系的光谱是 100 英寸牛顿望远镜焦点上的反射光栅反射到底片上经过长时间曝光后得到的。阿瑟·斯坦利·爱丁顿形象地用“鱼雷形的黑斑”来形容天文照相底片上所成的这种光谱线的像。大家最熟悉的是钙光谱中的两条发射谱线。在地球上的钙光谱中，这些谱线出现在远紫外区中。在通过遥远的星系中几十亿颗恒星的较冷的外层大气时，这些发射光谱线的能量被吸收掉了。因此，记录下来的是布满底片的微弱的星系连续辐射光谱中相应的暗吸收线[见第 30 页图]。哈勃发现这两条线移向光谱的红色一端，出现在可见光谱区域内。哈勃将这种“红移”归因为多普勒效应，因而得出这些星系正在离开地球的结论。

膨胀着的宇宙

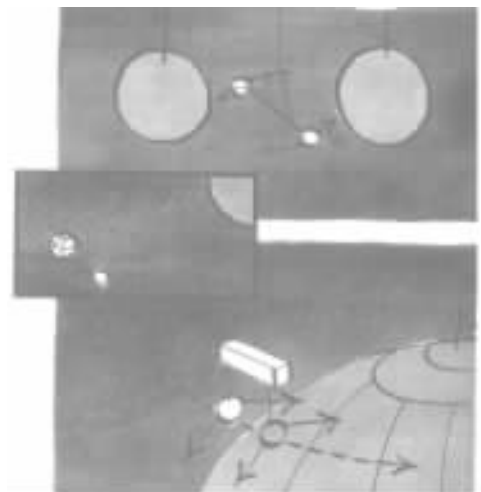
1929 年，哈勃宣布了一项更为重大的发现。他的调查证实所有星系都有红移。他进一步发现，在星像的亮度减小和它们的红移增加之间有一个准确的正比关系。当然，亮度是距离的指示。测量得到两个量的正比关系表明，星系退行的速度必定随它离开地球的距离增加而增加。

哈勃的普查表明宇宙在膨胀着。领悟到从远距离的星系发射到达地球的光是很久以前从星系发出的，这说明宇宙有它的历史。它的膨胀有一个开始，这需要作出解释。它还有一个终结，这又引发深思。

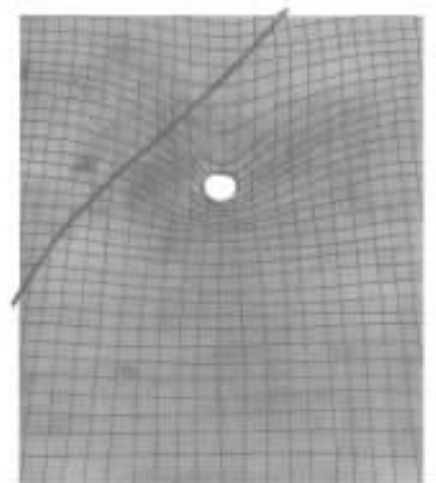
从红移与距离相关的哈勃定律可以知道,以不变速度传播的、从远距离星系发出的现在到达地球的光来自较现在更早时期的宇宙,在一张天文照片上,在任何时刻任何距离上的宇宙的大小都增大同样倍数[见第30页图]。红移和距离的不变关系再加上用远距离星系的亮度来校准,就可以求出宇宙的年龄和大小。

哈勃首先算出他的常数为,距离每增加100万秒差距,速度就增加每秒558千米。但由此得到的宇宙历史太短;膨胀得越快,膨胀到测得的一定大小所需的时间就越短。用每秒差距558千米和按当时估计的宇宙大小估算出的宇宙年龄比起对某些恒星估算出的可信年龄,甚至比地球本身的年龄来都太年轻。通过辩论和进一步测量,现在将哈勃常数定在每百万秒差距60千米每秒到80千米每秒。

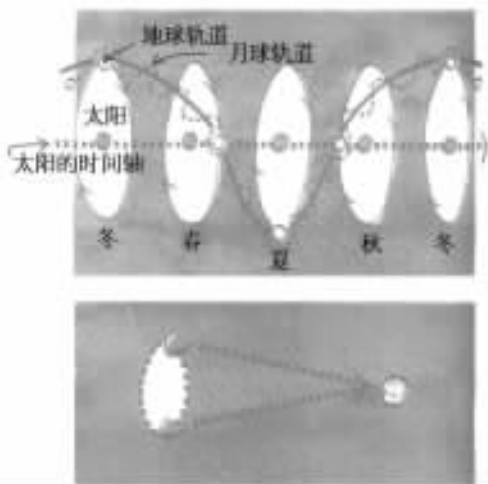
对于膨胀宇宙,广义相对论是现成的理论,它完全可以将结构和动力学联系起来,但其中还存在着在1917年困扰爱因斯坦的不确定问题。他的方程式可以描写膨胀的宇宙,也可描写收缩的宇宙,但不能描写静态的宇宙。引力是抵抗膨胀的起反面作用的力,使加速减缓。然而,对一个收缩的宇宙,引力就起正的作用以加速其坍缩。对于静态宇宙,则必须在方程式中加上一项负的力——反引力。当我们观察到的宇宙像星系砂轮时,要建立宇宙模型就没有多少理论可以依据了。出于美学上对平衡的偏爱,也或许受到古代的和时下流行的、希望有一个永远平静的宇宙的观点所激励,爱因斯坦在1916年发表的方程式中引进了必要的修正项。几年之后,爱因斯坦向伽莫夫和惠勒承认这“是我一生中最大的错误”,宇宙的膨胀可能是广义相对论最著名的证明。



卡文迪什实验 [左图] 于 1798 年测定了引力常数。他通过观察两端各有一个小铅球的扭力棒在铅球靠近另两个质量很大的球时发生的扭转, 求出引力常数为 6.75×10^{-8} 达因厘米² 克⁻² [见第 52 页]。1908 年, 厄缶证明了引力质量和惯性质量等价: 在地球的引力场中两个相等的质量与在绕太阳的轨道上运动时的惯性质量没有区别 [见第 101 页]。一个超级厄缶实验, 用激光测量地球—月球的距离得到了同样的结论 [见第 173 页]。



时空弯曲是由引力所引起的, 这是爱因斯坦证明的, 这说明了引力的所有观测效应, 包括牛顿曾经预言过的星光路线的偏折效应, 牛顿的理由虽然相似但也有些不同 [见第 54 页和第 104 页]。物体的速度沿着时空曲率的梯度增加和减少, 以最快的速度传播的辐射能的波长相应地增大或减小。1916 年对日蚀时恒星视位置移动的测量确证了爱因斯坦的预言。



时空的形象化,这里将一维分派给时间,图上的水平线是时间轴。地球在空间相对于太阳运动,月球同时相对于地球运动,图中画出地球围绕着太阳运动一年的时间线,在这期间太阳在空间静止不动[上图]。在光速决定的时空锥中观察到宇宙[下图]。假如过去的两个事件[它们的时空锥在左边]对光的传播来说分得太开,宇宙就可能是不均匀的[见第226页]。

宇宙项

从那以后几十年的宇宙学发展中爱因斯坦的宇宙项被称为“宇宙常数”。它现在成为研究引起宇宙膨胀中明显存在的加速度的中心问题。作为必要的排斥力的表达,宇宙常数与粒子物理学家的静质量及从许多其他东西来源的真空能量有关。还有,这种力被认为在大爆炸以及在此后继续进行的膨胀中起作用——所有这些都可用加进宇宙项后修正的广义相对论来说明。

对他“改正后的”广义相对论的静止宇宙,爱因斯坦很早以前就受到进一步的肯定。荷兰天文学家威廉·德·西特(Willem de Sitter)精心设计出一个不变的宇宙。德·西特模型对宇宙学贡献了至今还完全成立的各向同性原理。这个原理将宇宙看作是均

匀的。任何区域看上去都是相同的,没有任何特别优越的位置,就如人们曾经认为他们自己占据着宇宙的中心位置那样。德·西特也同样把宇宙当作时间上是各向同性的。他的宇宙是稳恒态宇宙,其密度永远不变。

亚历山大·弗里德曼(Alexander A. Friedmann)从原始的广义相对论方程式中揭露了宇宙的膨胀。1922年,在哈勃报告他的观察之前7年,弗里德曼根据方程式证明,从任何观察点上观察,宇宙中物体的视速度必定随着距离的增加而增加。

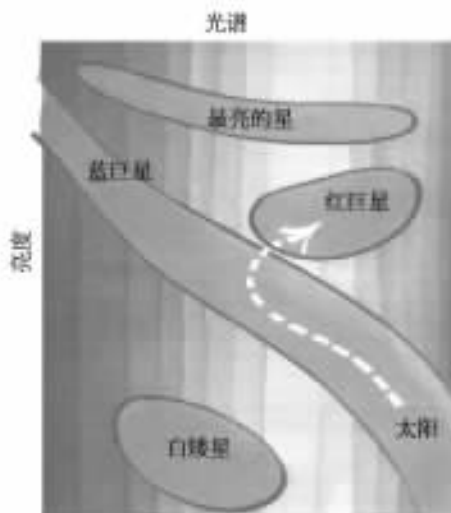
当德·西特发表相应的宇宙修正模型时,爱因斯坦承认:“如果没有准静态的世界,那么就要去掉宇宙常数!”他又不愿提出可能还有第五种力在宇宙中起作用,并且就包含在他的伟大成果中。

到1930年,乔治·拉美特(Georges Lemaitre),具有从加利福尼亚来的消息的有利条件,绕过广义相对论建立了一个膨胀着的、正在老化的、充分发展的宇宙的模型,它从一个原始的“原子”发生一次巨大的爆炸开始。

仪器设备的进步现在已经使宇宙学成为一门观测科学。理论在可想象的最重大的问题上直面经验。第一个问题是宇宙的年龄。哈勃常数最新的计算结果是从地球的距离每增加百万秒差距,速度增加每秒60千米至每秒80千米,由此确定宇宙的历史有130亿年至150亿年。这对于产生宇宙中的其他观察到的特征面貌来说是足够长了。

对于恒星的年龄,无论是地球上的物理学还是天文学都有可靠的证据。上一世纪初,天文学家就开始将恒星按其光度及其光谱分类。他们基本上分出两类恒星。大多数靠近的恒星是“正常的恒星,如太阳;它们被认为具有很长的寿命。有较高光度和较大质量的恒星——质量相当于两三个,或更多的太阳质量的恒星——被认为具有成比例地短的、并且更不稳定的生命。恒星的

自然历史在“赫—罗图”中描绘出来。这原是由丹麦的艾纳·赫芝普伦 (Ejnar Hertzsprung) 和普林斯顿大学的亨利·诺里斯·罗素 (Henry Norris Russell) 远在两地合作制成,以后其他人又作了许多改进 [见本页图]。



赫罗图描绘恒星生命的历史。横坐标表示恒星表面温度和颜色,温度从右到左增加,颜色则由红到蓝;纵坐标是恒星绝对亮度,从下到上增加。太阳在“主星序”带中向左移动,同时向上,大约 50 亿年以后进入红巨星区域。有一些类似太阳的恒星演化成上面区域内的蓝巨星。引力坍塌使大多数主星序的恒星变成白矮星,白矮星在图中下面的区域 [见第 169 页]。

在 20 世纪 30 年代中期,根据核物理学的知识,芝加哥大学的舒伯拉曼尼安·钱德拉塞卡 (Subramanyan Chandrasekar) 和汉斯·玻特解释了太阳怎样会发光。赫—罗图上现在又增添了许多恒星。质量大到太阳那样“正常的”恒星在它们第一个 50 亿年到 100 亿年内沿“主星序”演化。它们以大约相当于太阳本身的亮度发光,维持表面温度在 6 000 K 左右,直到它们只剩下很少的氢可以转变为氦以及用来发射星光。在这转折点上,恒星变得

更大、更亮,也更红。现在它们开始燃烧制造出来的氦和外层剩余的氢。经过几十亿年的演化,它们沿光度坐标加速向上移动,质量较大的恒星演化速度更快,作为红巨星不断膨胀和发光数百万年。最后,爆发性地(在大约 100 000 年内)转变为蓝巨星,表面温度升高到 12 000 K。在较短的时间内,有一些恒星在红巨星状态和蓝巨星状态之间振荡。这些变换过程,对一个中等的恒星来说,在最后坍缩成为白矮星之前,有 100 亿年至 150 亿年的历史,这要依它们的质量而定。

星族

20 世纪 40 年代,哈勃的同事沃尔特·巴德(Walter Baade)开始对遥远的仙女座星系中的恒星进行系统的普查,现在仙女座星系已经可以分辨出足够多的星体。在第二次世界大战结束时,巴德用远离城市灯光的帕洛马山上的 200 英寸望远镜装备进行普查,普查进入高速运行状态。巴德在比较对光谱颜色有选择性灵敏的照片上的恒星图后,发现在星系核心部分的恒星光谱和在臂上的恒星光谱之间有显著的差异。在星系的臂上,他发现许多比太阳更蓝、质量也更大的恒星,但大多数的恒星和太阳的亮度相同,都沿着主星序发展。那里的恒星数目类似于我们头顶上的恒星,据推测这个位置就在银河系的臂上。

巴德将这些恒星归类为“星族 I”。两个星系中的光谱都是“太阳的”类型,它们的光谱和太阳光谱一样,里面有地球上发现的重元素的谱线。巴德将这作为证据,证明这些是掺合着以前几代恒星中合成的元素的青年的恒星。在它们坍缩成白矮星或中子星时,它的前几代将核合成的产物喷射到星际空间云中[见第 195 页图]。新星和超新星提供碳,碳催化太阳中氢聚合成氦的反应,也对它的行星上合成较重的元素的反应起催化作用。哈洛·夏普莱的科普报告很出名,他有一次在科普报告中说“我们

是恒星材料做成的。”

巴德在仙女座的核中和从帕洛马山上看到的我们的银河系的核中都发现完全不同的恒星。他看到那里有 90% 的恒星靠近主星序,而不像旋臂中只有 10%。核中的恒星更红也更亮,在主星序上位置更远。他发现在球状星团中也同样有许多恒星围绕着核以及星系平面外的晕圈中。相应地,这些恒星比太阳附近的恒星更古老,或许像星系本身一样老。在这些恒星的光谱中没有发现氦以上的元素的证据。巴德将这两个星系核中的这些星归类为“星族 II”。他对星族 II 星团的研究使宇宙年龄一下子增大了。巴德发现银河系中尘埃和气体的存在使这些较老的星团的亮度减弱,就将本身亮度定为两倍的夏普莱计算值。这一发现使到仙女座漩涡星云中星团的距离增大了一倍。观测到的宇宙,即使用接近于他原来估计的数值的哈勃常数来推断,现在观测到的宇宙的年龄近于 50 亿年。

稳恒态宇宙

在 20 世纪 50 年代早期,与当时从观测宇宙学收集到的动力学的、改变着的宇宙的的证据相反,剑桥大学的弗雷德·霍伊尔(Fred Hoyle)、汤麦斯·哥尔德(Thomas Gold)和赫尔曼·邦迪(Herman Bondi)发展了有挑战性的“稳恒态模型”。这种模型也承认德·西特的第二种各向同性的有效性:即密度永远是常数。为了抵消观测到的膨胀,霍伊尔和他的同事们提出,由于新的物质会不断产生而使宇宙的密度保持常数。对这一假设,他们不能提供物理根据;不过,他们可以证明在一间普通房间大小的空间中每 1 000 年只要创造出一个氢原子就足够了。对于这不断创造的理论,他们用这种理论有简单省事的优点来辩护:可以不需要去解释或考虑创始和终结的问题。

他们争辩说,观测所及的星系看上去全都和银河系的年龄相

差不多。对于那些遥远的星系，当望远镜能看到它们的时候，一定会证明单位体积的空间中它们的数目都相同。也可能由于它们发出的光子在时空中经过较长的传播时间而相应地看上去更老一些。

与“大爆炸”宇宙——这是霍伊尔的一直在使用着的贬义词^①——相反，稳恒态宇宙学家可以指出演化模型中所必需的创造的一刹那有严重的漏洞。伽莫夫曾提出在最初几分钟内就已经合成出元素周期表中所有的元素。他的创造氢和氦的方案在现在的理论中一直保留下来，并被这两种元素的丰度所支持。作为大爆炸直接产物的氢和氦组成观测宇宙中静质量的 76% 和 24%，其他所有元素的质量和相对丰度都因在小数点后面被舍而不见。

伽莫夫猜想较重元素的合成是来自中子的俘获以及卢瑟福 β 衰变使中子转变为质子 [见第 143 页] 等过程。中子俘获使原子量为 4 的氦中每次增加一个质子变为更重的元素。设自由中子的半衰期为 10 分钟，这必须在大爆炸后最初几分钟内完成，这时正在冷却下来的大爆炸等离子体中质子和中子刚刚沉淀下来。

元素的核合成

然而，霍伊尔高兴地看到伽莫夫的假设刚迈出第一步就绊了一跤。没有原子量为 5 的稳定元素。也没有原子量为 8 的稳定元素。这些元素不存在说明伽莫夫建立氦-4 以后的元素有一个难以克服的壁垒：每次俘获一个中子就无法超过氦-4，更不用说铍-8 了。

为了寻找支持稳恒态宇宙模型的根据，在霍伊尔的推动下，加利福尼亚理工学院的粒子物理学家威廉·福勒 (William Fowler)、天体物理学家乔弗里和玛格丽特·伯比奇夫妇 (Geoffrey and

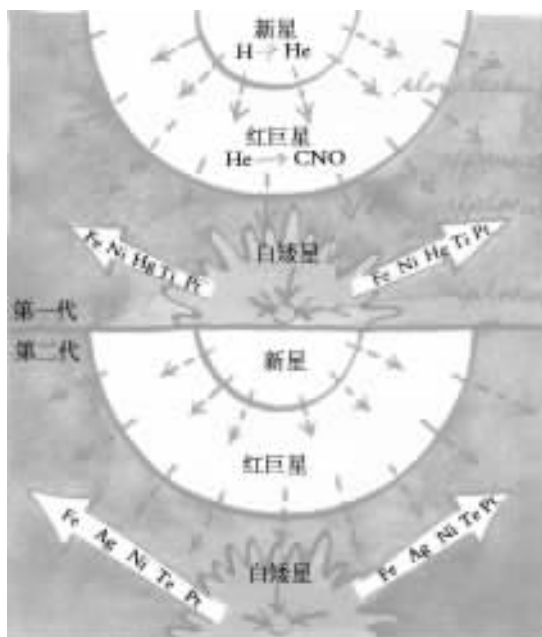
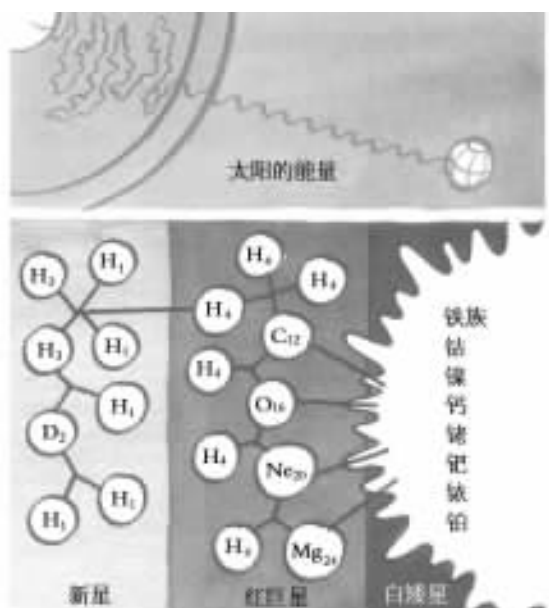
^① 译注：大爆炸一词英文原文为“Big Bang”，意为“嘣”的一声巨响。

Margaret Burbidge) 做出了新的实验发现。应用低 MeV 范围的加速器,在实验中再现了温度为 1 亿 K 的恒星内部的条件。这个温度是恒星在变成红巨星阶段的过程中核心里面氦燃烧的温度。第一步,两个氦原子核暂时聚合成高度不稳定的铍-8 原子核。它的很短的半衰期可以说明比氦重的元素的稀有性。然而,确实有很小的百分比的铍-8 俘获了第三个氦原子核组成碳-12。然后核合成过程通过进一步的氦俘获,继续进行下去,从碳产生氧-16,氖-20 到镁-24,一直往上增加。核合成的主线是以偶数核的丰度比介于偶数核之间的奇数核的丰度更大为标志。

氦消耗完结以后发生恒星核的坍缩。引力坍缩使温度升高到 50 亿度 K。于是,开始发生较重的原子核的聚变,以这种或另一种组合方式合成直到铁-56 以及各种铁族元素。许多恒星物质持续地向星际空间喷射,同时发生红巨星缓慢地坍缩为白矮星的过程——也可能以超新星的形式突然喷发——将这些恒星中核合成的产物用于新一代恒星中。在这些恒星中,每一次将一个质子加到较重的原子核中就可以填补所谓的氦隙,产生出元素周期表中大多数其余的元素。剩下的元素是通过其他过程制造出来的,离开了主线,如核裂变和核散裂,或者核子从原子核上剥落下来。

霍伊尔作为天体物理学家的成就也不能支持他的宇宙学。20 世纪 50 年代,在可见光谱以外的天文观测资料指数式地飞快增加。在不可见的射电光谱波长范围的观察与稳恒态宇宙相抵触,并最终将它抛弃。

观察到的空间单位体积中星系的数目并不保持常数,而是随观测距离增加而不断增加。这与宇宙较年轻时较小也较密的假设相符合,并且越远的星系越年轻的证据也在不断增加。但是由霍伊尔提出、由福勒和伯比奇夫妇证明的关于元素的合成的演化模型站住了脚。霍伊尔很好地示范了一个失败的假设也可能对成功的假设的提出做出贡献。



元素的热核合成产生星光的辐射能并通过一代又一代恒星演化不断进行。在大爆炸中形成的氢和氦是原始的材料。在第一代恒星的核心中,氢生成氦的热核聚变产生的辐射能量的光子[最上面的图]通过包围核心的高密度区域缓慢地逃逸出来。在第一代恒星中发生质子(H)的逐次聚变,首先产生有一个中子的氢同位素氘(D),然后产生氦-3(He^3)最后得到氦-4。氢聚变结束,恒星膨胀到红巨星的直径。于是,开始氦聚变,产生偶数原子量的核:碳、氧、氖和镁。在恒星坍缩成白矮星的过程中,这些元素聚变成铁及相关的元素,爆炸使热核反应的产物抛射到星际云中。第二代恒星聚合了这些元素,每一次加进一个质子以合成其余的大多数元素。超新星爆发[第207页]产生最重的一些元素,其中有些是不稳定的。

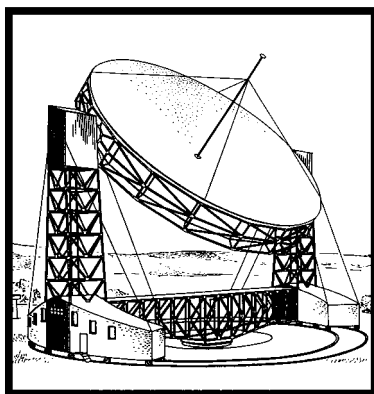
宇宙背景辐射

宇宙背景辐射的发现解决了两种宇宙学的争论。在霍伊尔的稳恒态理论中没有有关这方面的假设,并且除了随初始事件之后发生的时空膨胀以外,也无法对它提出更合理的解释。阿尔诺·彭齐亚斯(Arno Penzias)和罗伯特·威尔逊(Robert Wilson)于1965年在贝尔电话实验室作出了这项发现。当时他们在搜寻为早期航天时代国际通信系统设计的巨大号角形天线的静电噪声的所有内部来源。即使他们将线路都冷冻到超导的温度,天线中仍旧出现不知从何而来的嘶嘶声。

与此同时,在普林斯顿大学,罗伯特·迪克和他的同事们正在用一个小得多的号角形天线设法接收这种噪声。他们意图用这台仪器寻找预料中的宇宙辐射背景。他们要寻找的信号比他们的天线中的噪声还要弱1 000倍。在得知了普林斯顿的工作后,彭齐亚斯和威尔逊向迪克通报了他们遇到的问题。贝尔实验室天线中的嘶嘶声正好符合理论的预期。7厘米波长的信号证明,宇宙从标准理论的大爆炸时的 10^{32} K开始膨胀到现在已冷却到大约2.5K。

用来解决宇宙学问题的新的射电天文学从此将宇宙半径增大到巴德测得的3倍。相应地延伸到更遥远的过去。现在,射电望远镜一直在不停地观测大规模的物质—能量变换过程,这些过程都与宇宙的膨胀以及宇宙中天体的组织过程相伴发生。所有的星系看上去都在这种迅猛变换过程中集拢和消散。在银河系内部以及较靠近的星系中,射电望远镜发现了较远距离上这类事件的缩尺模型。在较近的年代及较近的空间中同样的过程消耗更多的恒星质量。证明其中有巨大力量参与的这些事件也在射电波以外的波长区域中给我们消息。

建立于第二次世界大战以后的射电天文学的物理设备说



明了大学物理学家战时服务的业绩。他们为战争发展了电磁学技术。在雷达技术中掌握的微波的“准光学”性质使射电天文学家能用巨大的抛物面反射镜从天空收集相关波长的微弱电磁波，将其汇聚到天线上。典型的 0.000 02 英寸波长的光波是 200 英寸哈耳望远镜直径的 10^{-7} 。对一架射电望远镜，要将同样波长对直径的比例用到重要的 21 厘米波带区，就需要 2 100 千米直径的反射镜。能够做到的小得多的 100 米到 300 米的射电望远镜已经相当大了 [见本页图]。20 世纪 50 年代射电天文学首次亮相就注定是一门大科学。只有政府才能提供它的巨大设备。政府对粒子物理学家所做的事也同样为宇宙学家做到了：在英格兰焦德雷尔班克的著名的 250 英尺可操纵抛物面天线，在西弗吉尼亚州格林班克的 140 英尺可操纵天线，以及波多黎各阿雷西博的 1 000 英尺固定反射式天线。

在 21 厘米波段——这一波段之所以重要是因为星际的氢原子发射这个频率——上，阿雷西博望远镜的分辨率为几个弧秒。这是在这个波长上它可以测量出的最小物体的角直径。这比太

阳或月亮所张的角度 30 弧分更小 1 000 倍。射电波段更高的分辨率可以通过将两架或更多的天线协同工作得到,分开最远的天线距离的分辨效果相当于望远镜的单个反射镜相对边缘的距离,对于足够长的基线上分开排列的接收天线,其分辨率比任何光学望远镜更好,可以获得小到 1 弧秒的几分之一的分辨能力。用新墨西哥州索柯洛的甚大阵列射电望远镜得到了弥漫射电源的极其详细的图像。超级计算机进一步发展了这种技术,可以收集处理从排列在 21 英里基线上的 27 个相联结的 25 英尺可操纵反射镜阵列得到的信号。还有其他多种策略将这种点辐射源在足够小的可能误差范围之内定位,再用光学望远镜经过长时间曝光来捕捉这些点光源。

为了用更短的波长,即比可见光谱的频率更高的辐射来探测宇宙,天文学家要感激超级大国的冷战太空计划。大气对这种高能量的辐射的不透明性庇护了地球表面上的生命。火箭和气球将最早的 X 射线望远镜带到大气层以外,现在仍旧在继续发射以进行短暂但却是多产的考察。现在安装在人造卫星上的仪器都可调整到可见光区远端以外的所有感兴趣的频率范围进行连续的观察。

可以接收可见光谱另一端以外的红外线望远镜也可安装在人造卫星上——高度到 CO_2 温室以上。不过,地面上的带有大型镀金抛物面反射镜的红外望远镜在红外波长区也发挥了重要的作用。

量子技术大大增加了天文学在光学波段能达到的范围。多镜面望远镜现在已经大大超过了 200 英寸反射镜的哈尔望远镜的聚光本领。通过电子反馈的联合成像可以使四面或六面巨大的反射镜像单个反射镜一样发挥作用。用同样的反馈方法可以部分抵消大气的汹涌起伏,这种不规则的起伏是以地面为基地的天文学的致命伤。夏威夷岛上冒纳开亚山顶的开克望远镜的两

面有效直径为 10 米的反射镜比得上哈尔望远镜的 5 米^①。好几台其他仪器也在运行中,有效直径超过 8 米的也正在建造中,其中最大的安装在智利的欧洲南方天文台,要将效果相当于 16 米的反射镜瞄准银核。

在这些以及其他的巨大望远镜中,照相底片已经让位于“光电探测器”。最好的天文学照相底片只能吸收聚焦其上光的很小的一部分。“电荷耦合”器件能对前后相隔 1 秒钟到达的光子作出反应,并能记录比照相能记录到的弱得多的天体。在照相底片“过曝”的条件下,这种器件还是能没有限制地保持感应的线性关系。1 000 乘以 1 000 的阵列的分辨率和任何照相底片同样高。它们保存入射光的数字记录,这就可能以任何所要求的方式用计算机处理这些数据,例如从整张图像中减去给定波长的光。

伽利略直接看到的东西是现代天文学家从他们的仪器做的第三、第四和第五手记录推论出来的。对光年尺度上宇宙事件的认识与地球上加速器的靶上得到的物质结构和反应过程的认识有密切的联系。天文学家也已经能够将加速器中得到的 10^{-16} 米尺度上的知识和用他们的强大的新式仪器从深远的空间获得的惊奇的事物联系起来。

银河系

在最近的半个世纪内,大型射电望远镜一直用于描绘粗看上去是空空洞洞的星际空间中射电望远镜可以观察到的银河系的主要结构特征。有一些物质——主要是氢,但也有离子、原子、分子和其他元素的尘埃粒子——存在于银河系的平面中,平均密度

^① 译注:开克望远镜 (Keck telescope) 包括两台同样的相距 85 米的望远镜。每台望远镜都装有直径 10 米的抛物面反射镜,每面反射镜由 36 块镜片组成,每一镜片的取向由计算机控制以达到最佳效果。两台望远镜联合可作干涉测量,分辨率相当于 85 米口径的望远镜。

为每立方米百万个原子。这比迄今为止地球上所能获得的最佳的真空更好。然而,地球和银河系中心之间 3 万光年到 4 万光年距离内有相当多的这类物质,从而阻挡了银核中 900 亿颗恒星的光辉,使它们不能被我们看到。组成这个系统中被观察到的质量的大约 5% 的这类物质在恒星熔炉中不断地周转,既可用作恒星的原材料,也是恒星的废弃物。星际大气的密度在靠近银核以及沿旋臂中增大 100 倍和 1 000 倍;在尘埃云中多到增加了 10 000 倍。这只是地球上标准压力下和气体的标准体积中密度的 10^{-15} [见第 62 页]。

每 1 000 年左右,处在星际空间的一个氢原子(H)会和一个漂浮运动着的电子靠得足够近,从而使氢原子激发,根据不确定原理,或许在一或两个世纪以后它会发射 21 厘米波长的光子^①。氢分子(H₂)是通过一氧化碳(CO)的特征替代辐射来检测的,一氧化碳在丰富的氢中只含有很小一部分,它和 H₂ 的稀少的碰撞会发射这种特征辐射。还有,星系间空间是如此深,替代辐射是连续的,用射电望远镜测绘出的整个银河系内(除了远离银核的区域)中性氢原子和氢分子的分布图描绘了系统的主要特征,特别是旋臂的存在和延伸。在没有经过训练的观察者眼中,它看上去就像仙女座星云一样。

分布图表示银盘平面中离中心 10 000 光年的银核的边缘到距中心 40 000 光年的太阳附近以及接近于近 50 000 光年银河系周边之间氢的分布。原子和分子在旋臂中密度都很高。在银核的边缘,星际大气的测量给出了银盘的深度或厚度为 1 000 光年。从这里它逐渐变薄,到太阳的地区厚度为 500 光年。

① 译注:氢原子中原子核和电子的自旋平行或反平行情况下具有略微不同的能量,形成靠得很近的两个能级,这两个能级间跃迁发射 21.1 厘米波长的电磁波。这种跃迁平均 1 100 万年才发生一次。但星际空间是如此辽阔,所以总有足够强度的 21 厘米波可以被我们检测到。

从 1 000 光年及更小的地方到整个系统的直径 100 000 光年处的厚度的比例,看上去像一个薄薄的银盘。900 亿颗星族 II 恒星使银核隆起,形成厚度为 10 000 光年左右、直径为 20 000 光年的一个扁球体,因此,银河系看上去是一个脆弱的天体。

21 厘米谱线的多普勒位移表明从银河系的“上面”,即从银核的“北极”看去它沿逆时针方向旋转。局部地,恒星的固有运动使它们奔向各个方向。无论它们相互之间和相对于银河系的坐标系沿什么方向以及以多大的速度运动,在这个系统内的所有天体都被带着整个一起转动。对太阳来说,它离银河中心的距离很远,一银河年等于 250 百万地球年。较靠近中心的地方,旋转的周期较短。在太阳的 20 银河年左右的时间里,银河系的位形改变了许多次,在地球上看到的星座的重新排列的发生次数则更多了。

围绕着银核,射电望远镜发现电离氢的高温环状云以每秒 100 千米的速度向外运动。同时绕着中心旋转的这些物质可能形成新生的旋臂。将星际大气的密度及它从一个区域到另一区域的相对运动测绘成图后看出,至少有 4 条主要的旋臂随着银河转动。它们表明银河系比仙女座星云绕得更紧。有 100 亿颗星族 I 的恒星分布在这些旋臂上 [见第 191 页]。

恒星由宇宙尘组成

射电天文学发现遮蔽银河中星体的巨大低温尘云有重要的作用。在长时间曝光的天文照片上发现了惊人的景象,可以看到这些尘云被里面的亮星局部加热到电离和白炽的状态。在这尘云中大部分区域的密度为每立方米 10 亿个分子或更高。它们主要由氢组成,也富含碳、氮和氧,这些元素组成除了氢和氦以外的宇宙物质的四分之三。CHON,分别是碳、氢、氧、氮,可以认为是活细胞物质的第一级近似分子式 [见第 240 页]。在至今仍然是

我们知道的唯一的有生命的行星地球上,除了地壳中富含氧以外,这些元素的含量都相对贫乏。弗雷德·霍伊尔在他的科学幻想小说《黑云》中,根据这些元素在宇宙中的丰度猜测尘云中充满了生命和智慧。

事实上,在这些尘云中已经发现 100 多种由这些元素化合而成的,我们熟悉的“有机”化合物。简单的两个、三个和四个原子的分子,如一氧化碳、水和氨都很丰富,合成进行到甲醛、甲醇和乙醇以后,产生多达 10 个以及更多的原子的碳链,甚至还有焦油化学的碳环化合物。估算表明,在一个典型的尘云中的乙醇能填满地球的体积;然而,它被像氰化氢这类分子所污染。

宇宙尘起着在云中聚积这些化合物的作用。宇宙尘的尘云内部对恒星的高能辐射起屏蔽的作用,这种辐射能促进尘云化学键合作用,但也会促使它们更快分解。硅酸盐、石墨和氧化铁尘埃微粒提供了表面,显然起了催化作用,在这些表面上原子连接成更大更长的分子。

巨大分子的复合物是银河系中质量最大的物体之一。在典型的情形中,有 100 000 个太阳质量的物质分散在这种沿着旋臂伸展的一缕尘云中。对比较容易到达的银河区域采样调查表明,有 4 000 缕尘云。它们的化学多样性表明,这些尘云中的物质已经在不止一代的恒星中轮回了多次。在银河系旋臂中星族 I 恒星的成分中元素平均的相对丰度确实证明都存在同样的效应。

恒星不断地将它们的物质返回星际空间,在不易觉察到的质量减少中,太阳向它周围的行星吹送粒子风,这时不时地干扰地球上无线电和电话通信。从主星序上升的巨星,在它们从一种热核循环转换成下一种核反应过程中喷发出质量庞大的物质。燃烧完了的恒星在坍缩成白矮星或中子星的过程中仍旧将它们大部分的质量遗留给下一代。经过一定时间,或许是 100 000 年,此后它们成为我们看到的银河系中最美丽的景观之一:膨胀着

的、发光的、球形的“行星状星云”，宽有几光年，由喷发出的物质形成。就是这种物质聚合成为巨大的分子复合体。

恒星的诞生

巨大分子云的复合体对无线电波长的透明性导致恒星的形成成为天体物理学的一个主题，在这里观察走在理论的前面。自从詹姆斯·金斯在上一个世纪之交用经典物理学的分析来讨论这个问题以来，向内和向外的压力的不平衡使得这一过程难以全面说明，其中的困难可以这样来表述：气体云的密度为每立方米 10^9 个分子，普通的恒星的核心中的密度大约为这个数值的 10^{25} 倍，之间相差的数量尺度太大。

旋臂的结构和成分为一种恒星形成的模式提供了重要线索。最热、质量最大的恒星（用 O 和 B 来标记）沿着旋臂拖曳的边缘周期性地出现，这里的分子云密度较高。这种恒星的形成被认为是由于银核中巨大的引力扰动引起的沿旋臂传播的密度波通过时激起的。O 星和 B 星在 1 000 万年中烧完了它们的燃料，它们的生命大约只等于地球上银河年的两个星期。有了这些星体就能说明分子云的反复变动。在几个地球银河年内不断生成又毁灭的这类星体的数量和银核中年老的长寿命恒星的数目相当。

在旋臂的其他地方通过随机过程形成恒星。哈佛天文台的弗雷德·惠普尔 (Fred Whipple) 证明光致迁动，就是光子的机械力作用 [见第 92 页图]，推动尘云中的分子和尘埃粒子聚集成为密度非常高的区域。靠自身的引力凝聚起来成为博克球状体 (Bok globules)。到临界密度时这种球状体发生引力坍缩。这是以哈佛天文台的巴特·博克 (Bart J. Bok) 的名字命名的，他首先注意到这种天体，并注意到它们是在恒星形成的过程中出现的。

现在，在毫米波段工作的射电望远镜和在红外光谱区工作的望远镜协同工作，使恒星可见的点火过程进入了我们的视野。在

猎户星座中有显眼的亮云位于局部的巨大的分子复合体之中。它们对射电波长区的穿透性揭露了内部深处明显存在着的新恒星。它们被电离气体的发光云所包围,其中有一些显然是从初生的恒星中释放出来的。

在 20 世纪 80 年代初的观察表明,一个博克球状体坍缩成一颗恒星必定要喷射出落到它里面的大部分物质。除了毫米波和红外波长区之外,在其他波段都看不到的巨大分子复合体内部,有一些向 180 度相反的两个方向喷射物质的天体。在好几个案例中已经可以辨认出气体和尘埃的圆盘在这些天体的赤道平面上自转。其证据是来自该盘的退行边缘的红移辐射和向着我们运动的边缘的蓝移辐射。由盘中物质密度和磁场共同产生的压力可以说明在坍缩球体两极的物质喷射。数百个这种显然是初生的恒星已被观察到了。它们提供了就将谈到的本地星系中恒星坍缩为中子星以及在远处宇宙中包括整个星系在内的灾变过程所呈现的壮丽景象的缩尺模型。

理论认为,太阳质量的 0.08 是点燃和维持产生星光的热核反应必需的最小值。有一些因太小而不能发光的较小的恒星,一定聚集在分子云中。说明银河系引力场所需要的“局部的”丢失质量也暗示着这些星体的存在,但是即使在近代天文学的增宽了的波谱范围中,还没有看见它们。这种很小的称为棕矮星的恒星必定辐射它们引力坍缩产生的热,但迄今为止还没有被探测到。它们一定也有磁场等待着我们探测。巨大的气状行星木星的质量为太阳质量的 0.01,发射微弱的红外辐射并且具有磁场。它代表了许多可能隐藏在巨大的分子复合体中的不成功恒星的缩微模型。

探测到围绕着初生恒星自旋的圆盘证实了太阳系起源的理论图像。圆盘的转动按照重量分拣出气体和尘埃。将较重的粒子和元素集中到恒星近旁。盘中这里和那里随机聚集的物质又

在引力作用下进一步聚集起来。这种聚集发展成压倒的增长，扫拢了分布在盘中更大的范围内的物质。到达相当于月球质量的一个临界质量时，这个聚集物围绕它的引力中心发生坍缩。向内陨落挤压所产生的压力和热量使温度增高到材料的熔点。此时这些材料形成一个适合引力的球对称性的一个球体。较重的金属元素，特别是相对丰富的铁，落到新行星的中央核心中；较轻的元素，像铝、硅和氧就升到表面。

太阳系中金属的和石头的小行星的绕行意味着在其历史初期形成过许多这样的原行星，并且在撞击中互相破坏。后来它们的星子碎片被归拢，但并不完全。现在它们还和较大的行星一同绕着太阳在轨道上旋转。看来地球和一个早期的原行星经历过一次九死一生的遭遇。和一个来到地球轨道附近的天体邂逅，甚至可能是一次小角度的撞击，这是目前对月球来源的最好解释。

在对其他太阳系的寻找中已经发现至少有 24 个恒星有行星绕着它在轨道上旋转，这些恒星离地球都足够近，在地球上可以观察到它们。证据——不完全的掩星或者它们的位置在看不见的行星的引力场作用下移动——表明这些行星质量相当于木星或更大。其他像我们的一样的行星可能存在的浪漫故事等待着更精密的观察手段的出现。

地球的例子确实使人自然而然地想到如有一个适当大小和成分的行星，它正好在距一颗合适的恒星——例如太阳——的合适距离上，就不可避免地会出现生命。然而必须承认，通过自然选择过程使地球上产生有意识的宇宙观察者是极端稀罕的事件。可是，银河系中有 1 000 亿颗恒星，这种事件决不会只是唯一的。

这种可能性的深刻的含义支持了过去 40 年中有组织地探索地外智能存在的证据。1959 年，康奈尔大学的菲利普·莫里森 (Philip Morrison) 和吉乌赛伯·柯可尼 (Giuseppe Cocconi) 建立了

一个学会,观测是否有银河系中其他地方的文明发出的信号,“探测它们的手段现在已经有了。”他们推荐监视中性氢原子的21厘米谱线,这条谱线在绘制银河系图中是如此重要,它的重要性“是宇宙中每一个观察者一定都知道的”。今天,搜寻地外文明(SETI)研究所调动了200多万美国家庭中的计算机屏幕保护程序,并编制了寻找21厘米和其他精心挑选出来的谱线的信号的程序,这些都用来处理1000英尺阿雷西博望远镜接收到的信号,并不断地向伯克利加利福尼亚大学的中心报告^①。

对于要发现银河系中的浪漫史来说,单星作为候选者的希望较小。恒星创始时,有三分之二的机会产生双星:两个恒星在它们相互的引力场中绕着共同的中心旋转。有时候,在恒星诞生时会遇到偶然的机会,有3颗星或4颗星像这个样子被束缚在一起。银河系内辐射的筛选结果为零,但并不排斥在1000亿个其他星系中存在河外智能的可能性。不过,还没有用于探测河外信号的现成方法。

恒星之死

人们对于恒星之死的了解已经很久了,相比之下有关它们的诞生现在已经明白的还更少。中国天文学家在1006年、1054年和1181年3次记录了“客”星的出现。第一次报告说一颗相当于半个月亮那样的非常亮的星;它亮到可以在地面上投射出影子。当时,欧洲文明的历史对那几个世纪中的重大事件都有记载,但却没有留下这些事件的明确记录,而且,中国人将这些事件在他们的天体图中的位置确定得十分准确,现代天文学家今天还

^① 译注:这一计划是利用世界各地千千万万联结因特网的计算机的闲置计算能力来共同搜寻地外文明的庞大工程。参加者可免费下载程序,自己的计算机在不使用时,该程序像运行屏幕保护程序一般自动运行,和其他计算机联合分析阿雷西博望远镜的信号,处理能力比当前最大的超级计算机更强大。

可根据记录在天空中找到其残迹。欧洲天文学家记载的是这些“超新星”出现以后的另两个,是在 1572 年和 1604 年出现的,分别称为第谷和开普勒的超新星。不管是否能观察到,估计每秒种内在宇宙某处就有一颗超新星爆发,在本银河系中每 30 年至 50 年就会发生一次。

结局成为超新星的那些恒星必须至少有太阳质量的 1.4 倍甚至更大些;从一些残余碎片估计,人们相信有一些的质量比 10 个太阳质量还更多。亚利桑那大学的亚当·巴罗斯(Adam Burrows)根据现代的知识作了一个生动的描写:

通过氢不断燃烧产生越来越重的元素,而存活了可能已有 1 000 万年的恒星的核,在 1 秒钟之内从像地球般大小的一个物体爆聚为城市般大小的一个东西,其密度超过了原子核的密度,其速度达到光速的 $1/4$ 。到原子核的密度时物质几乎是不可压缩的,于是恒星核开始反弹,重新返回到陨落前星幔的大小,像一个活塞产生很强的冲击波前……冲破陨落前的星体帐幔范围的限制……于是发生了超新星爆发。剧烈的爆发使质量非常大的恒星瓦解,将新合成的重元素抛洒到星际介质中……在周围的星系气体中吹出一个有几个秒差距大小的空洞,发出可以和它的母星系相比的光亮达数月之久,宣告超新星出现。

许多这一类超新星事件的描述都来自大麦哲伦云附近 SN1987A 的爆发。这是在 1987 年,用近代设备武装起来的天文学家仔细观测的第一颗超新星。这些设备包括捕捉难以捉摸的中微子的两套设备。一套在俄亥俄州的盐矿井里面,另一套在地球另一边日本的地下深处的神冈中微子观测站。他们在同样的 0.01 秒内捕获了爆发产生的同一次中微子喷射。被记录下来的中微子是高速通过捕捉装置的大量中微子中极少的一点点样品,

并且是穿过地球的中微子洪流中更加少得多的一点样品^①。计算表明,从 150 000 光年以外射来的全部中微子流携带的能量等于只在 10^{-13} 光年以外的太阳所发射的同时间内到达地球的中微子能量。

考虑到在 150 000 光年处 SN1987A 对地球的张角,这只是它发射的全部中微子流中极少的一部分,由此可以得知,这种中微子喷发实际上带走了超新星发射的全部——99%——的能量。在爆发的高密度内部深处,高能光子的碰撞产生正负电子对和正反物质对。在它们相互湮灭的时候向相反方向放射出中微子对,中微子无阻碍地穿透任何所遇到的物体,在虚空中无止境地传播。

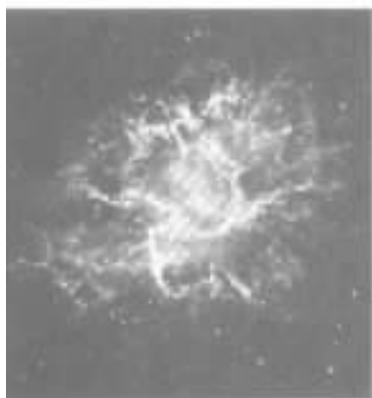
俄亥俄州盐矿中的“IMB”中微子探测装置——是在欧文的加利福尼亚大学、密执安大学和布鲁克海文国家实验室合作的冒险事业——和神冈粒子观测站的主要的目的都是测定中微子的静止质量,如果它是有质量的话。这将在假定的电子、 μ 子和 τ 子、中微子之间交换身份中得到证实 [见第 162 页]。中微子也可能是要寻找的丢失质量。

对已有记载的超新星的位置的调查,再用近代物理学去解释所发现的东西,现在除了其中的一个,其余的都从超新星状态被降级为新星。在 1054 超新星的位置上,早期的天文学照相揭示了壮丽的蟹状星云。不久之前,射电天文学在这里面发现一颗中子星。这确认了星云是超新星喷射出来的星体物质的云,并且它还在高速膨胀之中。这是银河系的许多天体中第一个被确认为

① 译注:关于 SN1987A,日本东京大学宇宙线研究所“神冈宇宙素粒子研究施設”报告在 15 秒种内探测到 12 个中微子,估计在这段时间内通过探测器的中微子数目约为 10^{16} 。在美国,布鲁克海文国家实验室安装在南达科他州一个废弃金矿中的探测器在 6 秒种内探测到 8 起中微子事件。估计这次超新星爆发表射 10^{58} 个中微子。20 世纪 50 年代布鲁克海文实验室在俄亥俄州石灰石矿建立中微子探测装置,效果不理想,60 年代又在南达科他州建立更大的设备。

超新星的位置。罗伯特·奥本海默 (J. Robert Oppenheimer)，他当时有一个伯克利加利福尼亚大学和加利福尼亚理工学院联合任命的职位，证明一颗足够大的恒星成为超新星爆发以后会留下一颗中子星，所有这些都是依据广义相对论得出的。这是他预言足够大的恒星坍缩为黑洞的过程中的一个中转站。

根据这种理解可以判定天鹰座中的 SS433 或许是在地球上出现人类以前发光的超新星的残留物。其中有一颗拖着从它的伴星得来的吸积盘并自旋着的中子星，产生相当于太阳输出的百万倍的能量。吸积盘将陨落进去的物质转变成向 180 度的两个相反方向喷射出去的高速粒子喷流。在与旋转轴倾斜 20 度的星体磁场推动下，喷流伴随着进入星际大气远达几千光年的冲击波，激发出极强辐射，引起观察者的注意。喷流随着中子星的自旋而跟着转动，向地球发送变化着的信号，对着我们的喷流发出的辐射有蓝移，而背向的喷流产生红移 [见第 212 页上图]。



蟹状星云 [见本页插图] 中的中子星是一个脉冲星：即它产生包含所有波长的快速变化的能量输出。它的比太阳的磁场更强 10 000 亿倍的磁场相对于它的旋转轴有一倾斜角度。从被观察到的辐射脉冲的频率得知，它的自旋速率为每秒 30 次。这个

巨大的发电机产生的电磁波将星际大气中拉扯进来的粒子加速到相对论的速率。相应地,从这个光源发射的主要是同步辐射,是从 X 射线起,包括可见光到射电波段的连续光谱。这种辐射明显区别于恒星生命中的热核反应及电磁过程中产生的有发射和吸收的线光谱的特征辐射。

在另外两个历史上记录下来的事件以及两个最近发现的行星状星云的位置上,天文学家在任何波长上都没有发现里面有可觉察的中心天体。通过射电天文学,第五个这种星云在仙后星座中被发现了,当时是银河系中最强的射电源。对其中巨大的双星的研究表明,两颗星可能在不同的年龄阶段。一个或许已到了白矮星阶段,而另一个正膨胀成红巨星。白矮星——随着它的旋转速率加快及引力场和电磁场增大并伴随着其直径的收缩与密度的增加——吮吸它的伴星的物质,然后再抛进吸积盘中。

吸积盘中的物质沿磁力线流到白矮星的两极。在白矮星表面上聚积了足够的物质阻止热从它内部逃逸出去。内部温度的增高引起热核喷发。白矮星在几天或几个星期中突然变亮成为一颗新星——观察到的比超新星更加频繁地发生、有多达 10 倍的事件被观察到。有些白矮星不断重复这一循环。

有几颗白矮星在一次事件后就结束了它们的生命——超新星发生频率的 $\frac{1}{10}$ ——比超新星更亮 10 倍以上。这些是留下中央空的行星状星云的白矮星。它们最近已被提升为 1a 型超新星。它们的红移提供了新的宇宙标度,它指示宇宙膨胀的加速度。

对附近星系中的这些事件的观测表明,它们都达到同样高的本身光度。进一步可以看到,它们的光度的升高和降低描画出一条特征曲线。这就可能确切地辨认更遥远的星系中弱得多的 1a 事件。通过将红移为 0.5 到 1 的星系的光度与本身标准相比较,可以对这些星系的距离进行可靠的测定。这些距离被证实大于

按以前不太可靠的标度测得的距离。这些年龄为 10 亿年至 20 亿年的星系——它们的年龄由红移确定——比起在它们的时空外面的更古老的星系来退行速率更快。

这就是出自对爱因斯坦宇宙常数以及不得不作出的关于宇宙中存在着至今尚不了解的“暗能量”的推测产生兴趣所进行的观察。

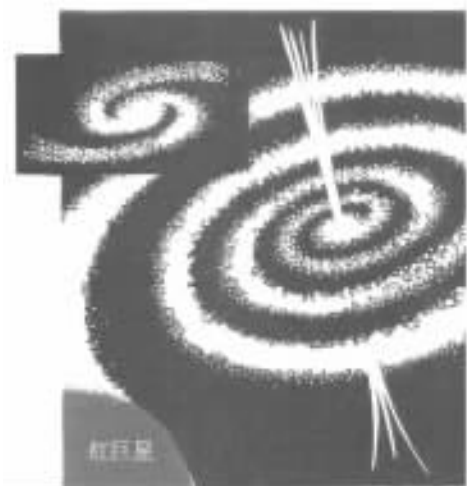
既然已经知道了超过太阳质量 3 倍的恒星如何结束生命，于是就开始寻找黑洞。因为理论预言大于 3 倍太阳质量的恒星必定会消失成为黑洞。这个思想是 18 世纪里维伦·约翰·米歇尔 (Reverend John Michell) 首先提出来的。受到艾萨克·牛顿的星光会在太阳的引力场中偏折的预言的影响，米歇尔试着作了一个计算，推导出足以使光的粒子不能从它的表面逃逸的恒星质量。在广义相对论的方程式发表以后不久，德国天文学家卡尔·史瓦西 (Karl Schwarzschild) 领悟到这些都预言了黑洞的存在。

奥本海默和加利福尼亚大学伯克利分校的哈特兰·斯奈德 (Hartland Snyder) 于 1939 年给出这一理论现在公认的表述形式。坍缩的恒星不断增大的质量加大了引力场。到临界密度——这时质量坍缩到所谓史瓦西半径或引力边界——从坍缩着的恒星和它的场中逃逸的速度等于光速。一个等于太阳质量的天体，其半径只有 3 千米，如果是地球的质量，半径只有 9 毫米。设想存在这样的“迷你” (mini) 黑洞，理论要求，具有足以克服物质结构中抵抗压力的量子力的质量必须正好大于 3 倍的太阳质量。在通过引力边界坍缩后，质量继续坍缩到消失点。然而，引力边界仍旧存在。

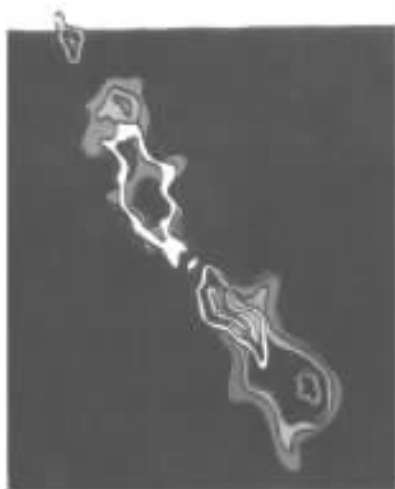
理论指出，黑洞可能在物质加速通过引力边界而消失的过程中发射适当波长的辐射而暴露自己。在白矮星和中子星双星模型中，天文学家寻找有一个黑洞作伴星的双星的证据。多年来，最佳的候选者是在天鹅座中的一个天体。从这个源发出的同步辐射和热辐射流强烈地暗示存在着一个吸积盘，一个黑洞正在通

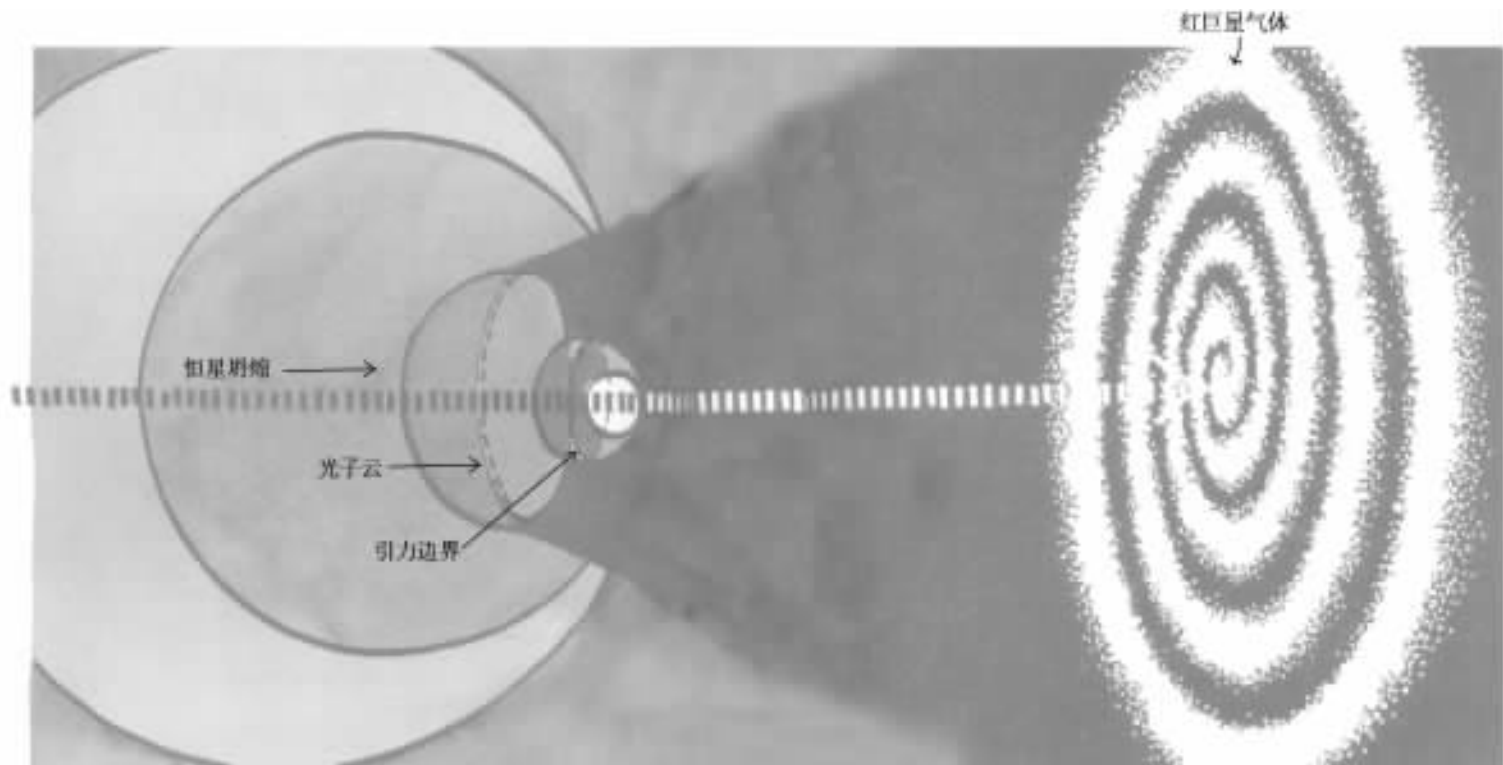
过这个吸积盘吮吸它的伴星。这个天体原先叫做天鹅座 X, 在发现天鹅座中还有另外两个强辐射源以后, 这个天体现在就被命名为天鹅座 X1。天鹅座 X3 已被证明是原始成员中有一个中子星的双星。它不只产生同步辐射和热辐射, 还将粒子加速到超过超导超对撞机所预期达到的能量。没有粒子能从天鹅座 X1 逃逸出来, 因此加强了它作为黑洞的候选者的地位。

吸积盘可以在各种尺度上形成, 从单个恒星到整个星系 [见本页下面的图以及第 203 页和第 219 页]。图中是一对双星坍缩成的白矮星; 这个自转发电机的磁场将红巨星伴星 (图中左下方) 中的物质拉到吸积盘中。电磁力使物质从它的两极喷射出去成为喷流。被加速到相对论性速率的陨落粒子发出同步辐射 [见第 169 页]。插图是一颗新星将尘埃云物质拉进吸积盘中 [见第 204 页]。



吸积盘喷流发自主天鹅座 A——旋转着落入其中心质量很大的黑洞中 [见第 219 页] 的一个椭圆形星系——两端都伸展几百万光年。这种宇宙中最庞大的辐射源的类星体最先被射电望远镜检测到。从这个天体的辐射分布图中发现, 最强的辐射源在喷流终点的巨大瓣中明显携带着星际与星系物质。射电图使光学望远镜容易找到在这些天体中心的由于距离太远而显得非常弱的星系。





恒星坍缩成黑洞是引力造成的,图上画出的是这一事件的“时间线”[见第 188 页图]。这种坍缩发生在超过 3 倍太阳质量的物质聚集体上[见第 170 页和第 211 页]。在消耗完热核燃料以后还保持能抵抗引力的热运动的恒星爆发成为超新星[见第 207 页]。残余的质量进入加速坍缩着的星体中并且要通过两个临界直径。第一个,在与表面相切的轨道上的光子在可据以决定黑洞位置的云中被捕获。第二个,随着密度不断增大,在一个所谓“引力”半径处的逃逸速度达到了光本身的速度,光子无法从这里逃逸出去而重新落回黑洞中(这就是黑洞为什么是黑的原因)。最后,引力甚至超过了粒子组成的物质的内部“压力”。剩下的是它们的净电荷以及作为黑洞的“奇点”的角动量。黑洞将它的红巨星伴星的气体拉进吸积盘[见第 212 页上图]。

银核

我们附近最有希望存在黑洞的位置在银核中,银河系 90% 的质量都集中在这里。不过这只是对银核感兴趣的一个方面,为此在南半球部署了能力越来越强的一些仪器,包括欧洲天文台联合会正在智利建立的直径为 16 米多的反射镜望远镜。

在过去 20 年中,借助于调频到 21 厘米氢原子辐射的射电望远镜及红外波段望远镜,观察者穿过 40 000 光年的中间干扰的星体和星际物质一直看到银核的内部。距离中心 10 000 光年的最外层的特征是电离氢的云环,在银河系的平面中以大约每秒 100 千米的速度向外运动。在这个环的里面,在恒星高密度聚集的银核中,星际大气显得很薄,好像那里的东西在这些古老的星族 II 恒星的凝聚过程中被消耗掉了。在离中心 5 000 光年处出现一个氢原子和氢分子组成的盘,相对于银河平面倾斜一个角度。在这个盘中有 10 000 K 的电离氢的热点,还有显然是新产生的蓝白色超巨星。再进去,在距中心 30 光年处发现另一个温度较低约 5 000 K 的另一个电离氢组成的环[见第 218 页图]。

银河系中恒星聚集密度最大的地方是在直径 10 光年的中央球体内。已经探测出其中有绕球心转动的、其质量大约相当于太阳质量、直径为 3 光年的电离氢的云。这些云被认为是密集的恒星相互碰撞的残留物。它们以 10 000 年为周期旋转,这比被正中心的某种物质的引力束缚着的内部星体物质转动得更快。中心的物体显示为明亮的红外辐射源。看上去,在直径 3 000 万千米以内——大约地球轨道直径的六分之一——包含 5 000 万个太阳的质量。内部深处可能是一个超大质量的黑洞。

如果那里面的确有一个黑洞,这个天体现在还处在静止状

态。当它像向外运动的外层电离气体环那样活动的时候,可能在银河系的旋臂的产生中起作用。

伸展的银河系

新的天文学仪器证明,银河系的引力场从假定存在的中心黑洞一直伸展到其周围遥远的空间。球状星团和暗弱的古老恒星在银河盘及隆起区域以外的分布形成包围银河系的扁球形“晕”。它的直径为120 000光年,中央的厚度为100 000光年。理论在一定程度上相信晕是银河系伸展的薄盘稳定的原因,旋转的盘被晕的巨大质量镇着。

太阳相对于麦哲伦云的运动已被仔细地测量过了,4个近旁的不规则矮星星系和10个位于晕外远距离处的球状星团都包含在直径为300 000光年的球体以内。这些天体也被银河系拖着一起旋转,只是它们的旋转速度较低。1974年,爱沙尼亚塔图天文台的爱纳斯多(J. Einasto)和他的同事们估计银河系的引力场约束着包裹在球形“晕”内的晕和银河系中分布着的近2兆个太阳的质量[见第219页图]。

爱纳斯多的计算求出本地丢失质量等于7倍可见质量。星团和不规则矮星系中的恒星都很古老也很暗。散布在整个巨大的晕中的孤立恒星发出的光可能弱到看不见。较新的测量提高了银河系外沿的旋转速度。这一修正支持了系统的引力场伸展遍及整个银河晕的假设。进一步,观察到7个靠近的星系都呈现同样的与它们的外周不同的内部旋转,这意味着在它们延伸的引力场中有巨大的看不见的物质在起作用。

在它们扩展的晕中的星系本身的形成必定是由引力和角动量守恒的共同作用引起。在物质坍缩过程中,脱离缓慢旋转的晕进入最最中心的高密度区域时,加速的旋转将星系转成扁平的轮子状。

银河系相对于邻近星系的运动暗示着有一个共同的引力场。作为宇宙积木块的银河系趋向于聚集成星团，星团组成超星团。星团也是自引力系统。在某些星团内部的射电源发出稀薄的星际大气电离的信号，这表示在这些星系间有巨大的引力的潮汐作用。在某些超星团内部深处，可以看到星系聚集为超星系。

类星体和遥远的宇宙

对星系分布的普查显示，超星团排列成一条线，挂在天幕上像围绕着巨大的空洞形成的泡泡。这里均匀性的宇宙原则局部不成立。然而，在足够大的时空体积中描绘星系分布时，均匀性又恢复了。

这种星系图所及的宇宙半径为 50 亿光年。随着数目不断增加的称作“类星体”（从“类星射电源”得名^①）的天体的发现和仔细观察，从而进入了更为深远的时空。从它们输出的很强的同步辐射辨认出它们是新的一类宇宙天体。在辐射中没有发射或吸收谱线，所以无法知道它们的红移。因此，不能断定它们是在银河系内部、因而也是“恒星”，还是在银河系之外，可能是一种新的星系。

这种很强的射电发射源是 1946 年，由位于英国玛尔文的皇家雷达群首先观察到的。那里的观察者将军事装备应用于和平事业，在天鹅星座中发现了这个射电源（正巧又在这个星座里面）。几年之后，巴德和弗里茨·兹维基（Fritz Zwicky）在哈耳望远镜的星图中辨认出这个射电天体是一颗勉强可见的星体。巨大的能量输出表示可能发生了一次星系碰撞。兹维基曾经观察到从这一类碰撞中增大的能量输出在照相上清楚地描绘出来，而

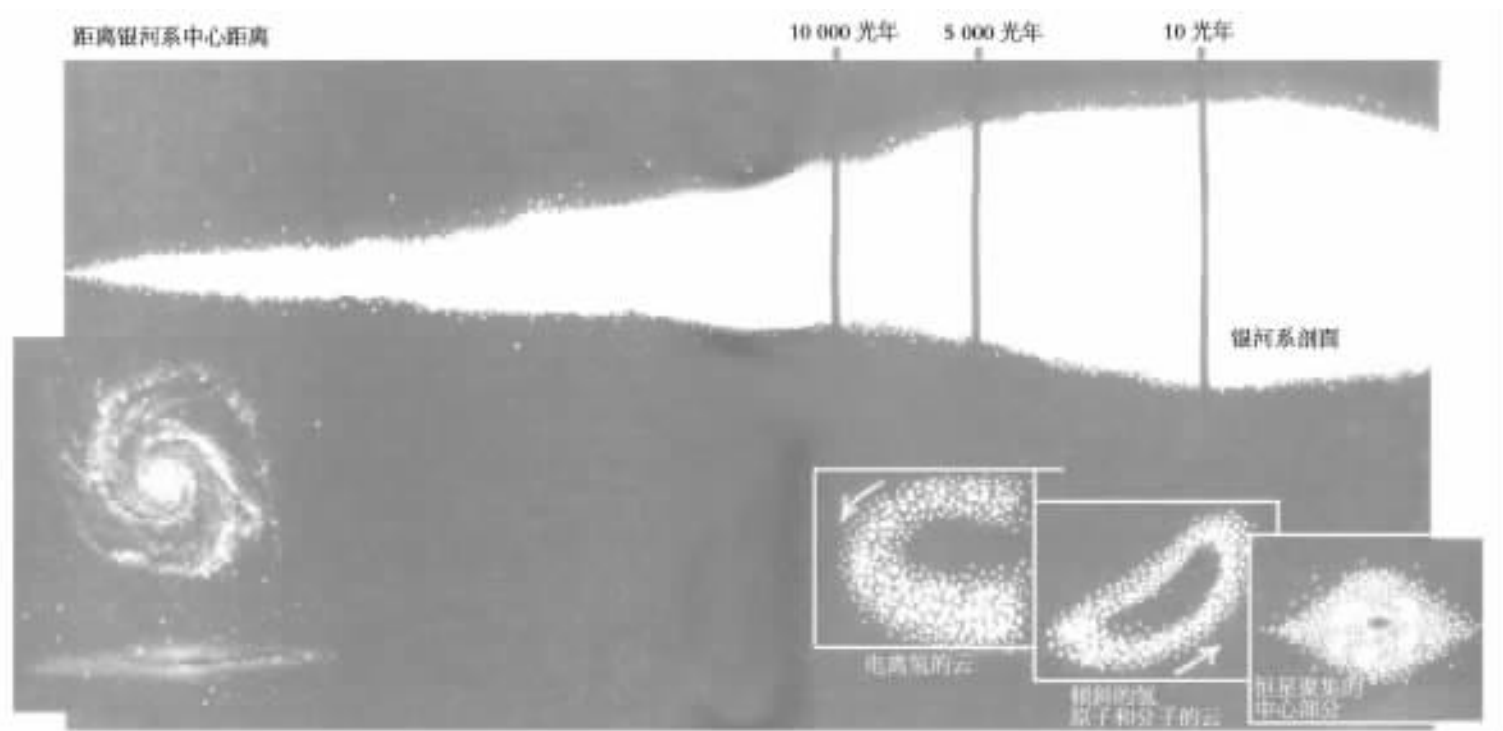
① 译注：类星的英文名字 quasars 是从 quasi-stellar radio sources 缩略而来。

这个天体的照相却没有显示出增大的能量输出。

由于星系十分庞大，星系的碰撞是最大的能量发生器，那个时候已有证据表明这一点。星系直径与这些天体分开的典型间距的比值只有 $1/1\,000$ ，它们间的碰撞应该认为是很少发生的，但也不是绝对没有。而所占的空间比它们本身的体积大 10^{25} 倍的恒星之间的碰撞更是罕见。

在 20 世纪 50 年代中，射电望远镜探测到许许多多射电波段范围内明亮的点源。它们中有很多具有可以和天鹅座 A 相当的能量。假如这些源是在银河系之外，它们的绝对射电光度要比当时已被归类为射电星系的许多已辨认清楚的、极度活跃的椭圆星系高几个数量级。这些射电源和射电星系中有一些的输出周期性地变化。这给这些辐射发生器的大小规定一个外部极限。将它看作单个源，天体不能比光在变化间隔时期内传播的距离更大。几星期、几天甚至几小时的周期表明，这些射电源中的发生器紧密到足以放到星系里面。

用定位的不确定可以减少到一个弧秒的射电干涉仪，使得在密集的星场照片中找出这些射电源成为现实可行。和对应的可见天体相印证后得知它们都是些巨大的椭圆星系。经过多达 7 个小时曝光得到的光谱提出了另一个问题。发射和吸收线都表明没有其他天体的光谱和它相类似。1963 年，帕洛玛山威尔逊天文台的马尔登·施米特 (Maarten Schmidt) 发现一个强大射电源在近紫外的发射光谱线可以和已认证的高激发态的氢的远紫外光谱线相配。由这样大的红移将类星体到地球的距离定为 20 亿光年到 30 亿光年。因此类星体必定在银河系之外，它们不是恒星而是星系的亲属。



银核曾被南半球观察机构联合组织在所有波长段研究过[见第 214 页]。在离中心 10 000 光年的最外层的特征是以大约每秒 100 千米的速度在银河系平面中向外运动的电离氢的云环——可能是初生的旋臂。后面是以很高的密度聚集着的古老的星族 II 恒星。在离中心 5 000 光年处出现氢原子和氢分子的圆盘,它相对于银河系平面倾斜一个角度,上面有电离氢的热斑和显然最近生成的蓝白色超巨星。在离中心 10 光年处是银河系中恒星聚集最密的地方。它们之间发生的碰撞明显地产生了电离氢的云,它绕中央明亮的红外辐射源旋转。在不到 3 000 万千米的直径内——地球轨道的 $\frac{1}{6}$ ——看来包含 5 000 万个太阳的质量,其中深处可能有一个超大质量的黑洞。



球状“晕”，直径为 300 000 光年，显示银河系的引力场在邻近空间中所达到的范围 [见第 215 页]，其中的天体被银河系拖着旋转。最重要的是麦哲伦云；有稀薄的物质流从较大的云向银核流去。在里边较近处，银河系被“晕”包围，这晕主要由球状星团组成。在晕中的引力质量估计约为 2 万个太阳质量，远比可见物质的多得多。

类星体光亮的来源

除了少数几个以外，所有类星体的辐射看上去都来自相当远的距离。为了维持它们极高的绝对光度哪怕只有百万年这样短暂的宇宙时间，也需要将总共 1 亿个到 10 亿个太阳质量全部转换成能量。到底是什么样的过程能如此快地将这样大量的物质转变为能量？用新墨西哥州索柯洛的超大阵列射电干涉仪对较近的类星体作仔细的观察，得到了惊人的答案。

对于天鹅座 A 中射电源星团的能量梯度的精确测量所描绘出的计算机图像表明，它的辐射分散在几百万光年宽的星系际空间中。最先记录到这种天体存在的射电能量主要来自分开几千万光年的两个射电源，它们每一个都膨胀到几千立方光年大小。大约在两者的中间有一个紧密的射电源恰好和一个椭圆星系重

合,这是本星系团中最亮也是最大的。从这个星系向一个方向伸展出喷流,能用射电波段非常清楚地判定这些是近于光速运动的粒子。必定有一束指向相反方向的喷流,但还没有被直接观察到。不过,有证据表明,在星系的相反方向上有两束喷流穿透了几百万光年的星系际空间。在这射电波喧闹的巨大空间中,聚集了它们本身物质的激发粒子组成的云,还有许多被撞击、被激发的粒子从星系际大气延伸出去[见第212页下图]。

对这些以及对其他类星体所呈现的景象的普遍解释是在这些星系中心有一个超大质量的黑洞。这个被认为是以相当大的速率旋转的黑洞将星系的物质吸进它的引力场成形的吸积盘中,吸积盘中快速运动的带电粒子产生的围绕着自转轴的强大磁场将物质射入高速喷流中。有相当数量的星系静质量在这过程中转变为辐射能量。星系中有许多大块物质穿过引力边界消失在更大的超大质量黑洞中。类星体—星系消耗它自己。现在已知道的这一类天体的寿命不会超过1亿年。

观测宇宙的边缘

马尔登·施米特的红移测量告诉我们,类星体是距离遥远的天体,当然这也意味着我们看到的辐射来自很早以前。他的同事爱伦·桑达奇(Alan Sandage)立即开始寻找不是首先在射电光谱中发现而是先从光谱和红移中发现的天体。他巧妙地设计他的天空普查,通过光谱探测这种暗弱的天体,他确实在拥挤的星场中找到了它们,它们的数目比强射电类星体的数目更多。在标准光谱的紫外波段中,最大强度的光谱线红移到可见光谱中段,而减弱的光谱证实其本身极高的绝对光度。好像是从点源发出的辐射表明这些天体是另一类星系,现在把它们归类为类星体。它们的核中有巨大的能量活动性。除了引力没有其他的力能产生这些能量,最大的可能是黑洞的作用。未必一定存在的黑洞却好

像在宇宙的发光能量的发生器中起了主导的作用。

在 20 世纪 60 年代晚期,类星体,包括射电喧闹的和射电宁静的两类在内,总数达到 1 000 个;这就有可能用统计学方法来研究它们。施米特发现大多数类星体离地球 130 亿光年以及更远,因此看到的是它们在 130 亿年之前的情形。空间中单位体积内的数目比起例如天鹅座 A 中的那种较近和较为现代的类星体来要多 1 000 倍。10 年以后已经探测到 1 500 个以上的类星体,施米特和桑达奇报告有几个类星体是 150 亿年以前发的光。

20 世纪 70 年代晚期,马柯姆·史密斯 (Malcolm G. Smith) 和帕特里克·奥斯玛 (Patrick Osmer) 领导的在智利西罗·托洛洛的美洲国家天文台对南部天空的普查证实了有几个比 130 亿年更古老的天体确实是可以被探测到的这一发现。在一小块天空中,这次普查确定了 150 个当时尚未记录下来的类星体的位置,这些类星体的红移告诉我们,它们的年龄都几乎相同,即大约 130 亿年。这些天体中最远的(大约总数的 $1/4$) 不会比 150 亿年更老。

这些观测意味着宇宙的历史中有一个“类星体时代”的可能性。此地需要回忆一下,较近的宇宙和遥远的宇宙一样老,并且在遥远的地方的观察者面前呈现了早期历史的同样景象。在较近的宇宙中,130 亿年以前的自己吞吃自己的类星体已经消失了,或许消失在它们的黑洞里面。或者,某些或全部星系的历史中可能有过一个类星体相。如果是这样的话,有一些类星体可能存留下来,转变为更加稳定的椭圆星系。在附近寻找中间的“原始”星系的工作已经开始了,但如何认证它们还难以说清楚。

从假设的类星体时代来的辐射中找不到任何和当时的银河系相似的“正常的”星系存在的证据。在它们星系核中,对较年轻的星族 II 恒星本来应该沿着主星序演化,发出的光比今天的更亮。但是它们在可见光谱区的主要辐射输出都会红移到低于现

在探测到的红外和射电波谱区域。

对类星体时代的认识将观测宇宙学推向遥远的过去,接近于近来对其进行观测的壮观的初始时期。在这一工作中研究的极端的红移有一个有启发性的例子是,斯隆数字天空普查^①的报告中的一个具有代表性的天体。斯隆数字天空普查是总部在亚利桑那州阿帕切的天文台联合组织领导的。氢原子光谱的赖曼线系 α 线,是在远距离类星体的暗弱辐射中一条重要的谱线。在地球上它的波长是 1.216×10^{-5} 厘米,在远紫外区。这条光谱线在代表性的类星体中移过整个可见光谱区域直到红外区,其波长变为 8.3×10^{-5} 厘米。将它们相除 (8 300 除以 1 216) 得到红移为 6.82 倍。按照现在一致同意的哈勃常数——每百万秒差距每秒 60 千米至 80 千米——宇宙年龄为 140 亿年加减 10 亿年,相应地,红移将类星体发出辐射的时间定为宇宙历史的第一个 10 亿年末。

大爆炸的回声

追溯到更加遥远的过去,观察宇宙学触及到原初大爆炸本身的回声。这就是阿尔法和赫尔曼预言的,彭齐亚斯和威尔逊于 1965 年发现的普遍存在的背景辐射。人造卫星对天空中波长在 0.2 毫米到 80 厘米之间光谱范围的辐射强度的普查并根据黑体方程式求出它的温度为绝对零度以上 2.73K,根据遥远的时空,即时空开始的时候的红移——1 500 倍!——计算出当时辐射温度大约为 3 000K。现在看到的是 300 000 年时的宇宙。当宇宙膨胀到它的半径变为 4 500 万光年时,辐射密度下降到低于物质密度。质子和 α 粒子冷却下来并变得足够慢,慢到电磁力可以吸

^① 译注:Sloan Digital Sky Survey 是正在进行的一项计划,要绘出 1/4 天空的详细星图,确定包括 1 亿个天体的位置和绝对亮度,还要测量 100 万以上的星系和类星体的距离。这项计划企图解答有关宇宙的一些基本问题。

引住电子,从而使它们得到氢和氦的身份。辐射能的光子开始它们无休无止的旅行,其中有很少一点点来到膨胀着的宇宙中太阳系占据的小小的空间及其行星地球上,这里今天被测出接近于 0 K。

宇宙爆聚回到过去,这是观测宇宙学的追踪线路,更加明显地,成为倒着叙述宇宙创造的故事,可以将创造过程翻译成沿相反方向叙述的版本是因为经验——观察和实验——将现在和过去的宇宙连续地联结起来。观测宇宙学将故事回溯到最初的 300 000 年。理论上将那时宇宙的温度和密度的增加及其半径的减少外推到开始的 100 秒。理论包括了这些过程并得到粒子加速器的实验证据验证。过去半个世纪中加速器能力的增加将这故事回溯到更早的第一秒钟的时候。从此,理论——理论的发展得到加速器实验的支持——达到创世大爆炸的开始时刻。

大爆炸：标准模型

应当回忆一下,这个看似不可能的创造故事是要回答 20 世纪 30 年代因领悟到宇宙在膨胀而提出的素朴问题：膨胀是如何开始的？乔治·伽莫夫的大胆答案提出了可以检验的假设,就是激烈的开始必定有回声。1965 年发现的宇宙背景辐射引起许多人的深入研究并改进了大爆炸理论。创造的故事现在可以继续讲下去了。

按照故事的标准模型,这个模型到 20 世纪 80 年代初期才得到一致赞同,大爆炸在 10^{-37} 秒时突然开始 [见第 225 页图]。这个策略回避了考虑 0.0 秒时宇宙的状态,这时候我们熟悉的物理学一点都用不上了。

在 10^{-45} 秒时,宇宙呈现出那种幽灵般的对称性。其他方面都没有任何特色,它的大小是肉眼看不见的,热到 10^{37} K,密度为每立方厘米 10^{100} 克或相当于 10^{120} 尔格,它的体积只有无限小的

一小点。对这个难以想象的实体来说,现在宇宙中的中子星和黑洞可以看作它按一定比例放大的模型。

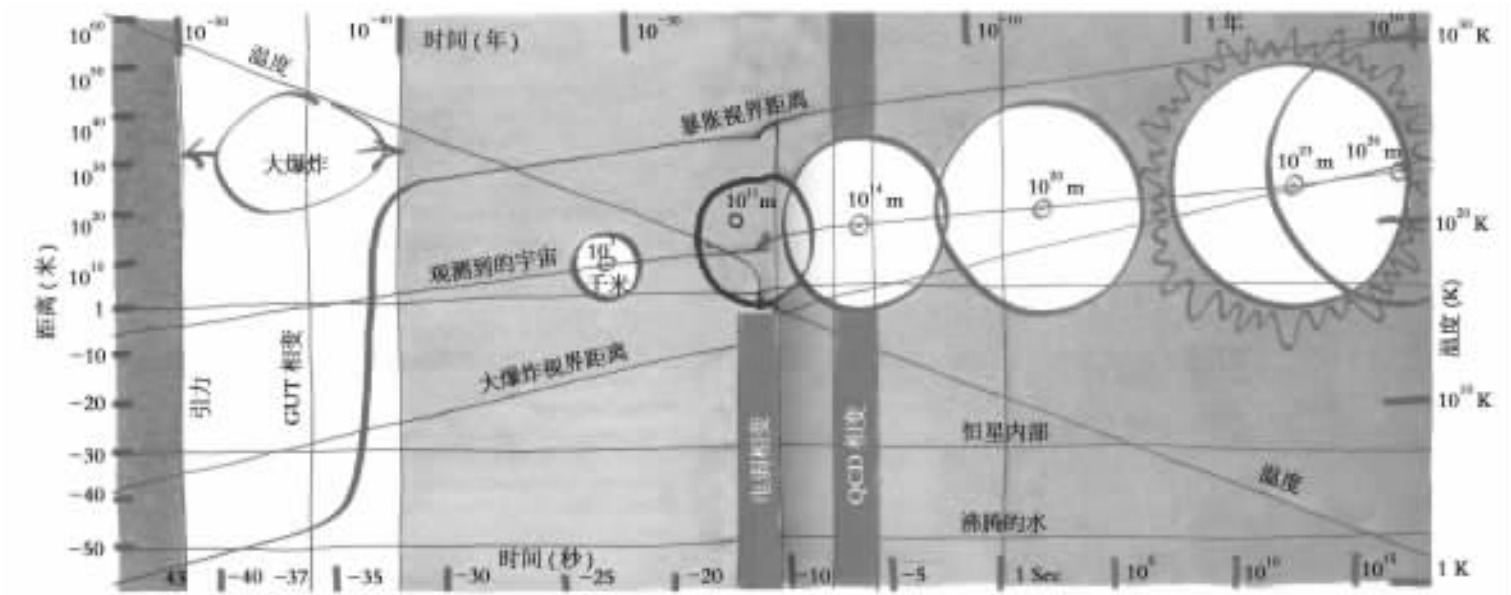
在大爆炸进行过程中,相变——像水沸腾而汽化或结成冰——破坏了无特色的对称性,将引力从量子力中分离出来。半径达到 10^{-3} 厘米时肉眼仍旧看不见,密度减小到每立方厘米 10^{91} 克,温度降到 10^{32} K。对应的能量为 10^{19} GeV,这一能量至少比最雄心勃勃的加速器技术所能达到的能量还高出 12 个数量级。大统一相变在 10^{-37} 秒以后发生,这将强相互作用和电弱力分开。到半径刚刚超过 1 厘米时,密度减小到每立方厘米 10^{79} 克,温度降到 10^{29} K,相当于 10^{16} GeV,仍旧在实验所能达到的范围之外。

即使在理论中,这些数字也都是不很确定的:如半径、温度和能量,可能相差一个数量级;时间有两个数量级的误差;密度误差有 4 个数量级。这些数据都是从加速器得到的证据外推得来的。

下一次相变是从实验推论得出的。在 10^{-12} 秒时半径为 100 百万千米,温度迅速降至 10^{16} K,相当于 10^3 GeV 的能量,这能量是巴达维亚加速器最先达到的。密度急骤下降到每立方厘米 10^{29} 克。这时电弱相变发生了,对称性的破坏将电磁力和弱力分离开来。夸克、轻子和重量子从充满了宇宙的密度很大的希格斯场能量中取得它们的静质量。

加速器所达到的大爆炸

这一事件的证据是从 1973 年到 1984 年间在巴达维亚和 CERN 的加速器上得到的[见第 155 页]。原来指望这一事件以在超导超对撞机的靶区中出现希格斯粒子来证实。这种“上帝粒子”可能于 2005 年以前,在现在夸口可以达到 10^3 GeV (1TeV) 好几倍能量的巴达维亚加速器上,或者在正在 CERN 建造的大型强子碰撞机的 27 千米环中出现。



宇宙创始大爆炸在这里按数量级标度列成图表。在最初的大爆炸情节中,在 10^{-45} 秒钟时宇宙是密而热的实体,此外并没有任何特色,直径很小,所以看不见 [见第 223 页]。伴随着宇宙突然膨胀和冷却的“相变”,使 4 种力和 4 种粒子以及由它们组成的原子 [见第 161 页和第 162 页图] 在第一秒钟末成为存在的实体。在 10^{-43} 秒时,引力从量子力分离出来;在 10^{-37} 秒时,强相互作用从电弱力分离出来。这些事件的能量比实验所能达到的能量还高 10 个数量级。在 10^{-12} 秒时,电弱力分解为弱相互作用和电磁相互作用,并且物质也从能量分离出来。现在宇宙温度为 TeV 加速器能量级别,再现这些事件的实验正在进行中。在 QCD 相变中,物质粒子分别取得轻子和夸克的身份。加速器已模拟出这种事件,产生了两代高能粒子,普通的物质就是它们的“后代” [见第 116 页和第 160 页]。图中圆圈表示关键时刻膨胀大小的对比。在 10^{23} 米和温度 3000K 时的“火球”是在宇宙背景辐射正好红移到 2.725K 时观察到的。辐射的“黑体”均匀性支持的大爆炸情节还要加上“暴胀”来修正理论 [见第 227 页]。从小于 10^{-50} 米暴胀到 10^{25} 米保证了观察到的宇宙的均匀性并使它所有部分都很好地“在视界距离”以内,这个距离是光在宇宙整个生命的 150 亿年左右的时间内传播的距离 [见第 188 页图]。

在宇宙膨胀到半径为 1 000 亿千米或 0.1 光年的 10^{-6} 秒时, QCD——量子色动力学——相变给粒子以轻子和夸克的身份。这将宇宙带到 20 世纪 50 年代至 20 世纪 60 年代期间加速器所探索的状态。在物质—反物质湮灭之前的短暂时间内, 温度维持在 10^{13}K 暂不下降。残留下来的微量过剩的物质通过 QCD 相变和外来的核粒子结合。这些核粒子是加速器能量达到 MeV 范围时喷出的激发态夸克所组成。

从第一秒钟到最初的第一个 100 秒, 减速的膨胀使宇宙半径增大到 10 000 光年。温度和密度相当于恒星内部的温度和密度。上夸克和下夸克从冷却过程一开始就结合成质子和中子。在这宇宙能量还很高的时候, 有些初生的质子进入自组织的第一阶段, 组成今天宇宙中看到的各种物质。有一些质子和中子在强相互作用下束缚在一起形成氘原子核, 即氢的稳定同位素。大量成对的质子和成对的中子结合成为 α 粒子。中子被束缚起来就可以避免衰变。其余的中子经过半衰期 10.3 分钟后变为质子; 于是质子的数目差不多增加了一倍。

再经过 300 000 年, 宇宙继续膨胀到半径为 4 500 万光年。带电粒子: 电子、质子, 氘核和 α 粒子等组成的高密度的等离子体遮挡了辐射。现在, 随着温度降到 3 000 度 K, 辐射密度降低到小于物质密度。电子和质子或和 α 粒子结合得到氢和氦的身份。电中性的氢和氦的气体对于辐射是透明的。相当于 3 000 K 能量的光子照亮了宇宙, 接着再膨胀两个数量级后将宇宙背景辐射红移到 2.725 K。

在标准大爆炸模型中也有不正确的地方——这不是指新来的观察者也一定会发现的, 就是想象难以想象的紧密时空及相应的难以想象的最初 10^{-45} 秒的温度和密度。问题在于这个故事无法说明观察到的宇宙的均匀性。如果观测到的宇宙是均匀的, 它的分开最远的部分在以前有一个时期一定相互联系着。标准大爆

炸模型中宇宙的爆发比光更快——在一开始的百万分之一秒半径就增大到 10^{14} 米。早期宇宙的各个区域一定要被“视界距离”分开,超过这个距离,即使在宇宙当时短暂的生命中,光也不能传播到达[见第 188 页图]。这样的膨胀速度并没有违反任何定律。光速是有极限的,但空间的膨胀不必要受这种极限的限制。相应地,即使在这宇宙进入大爆炸时的微小半径内,也不是所有的区域都在同样的时间中经受同样力的作用。进一步说,爆炸使得现在距离最大的区域分开如此之远,因而用光向处于宇宙一角的观察者的我们报告或从我们向另一个角落上的他们作报告都嫌太远。

暴胀

为了克服大爆炸中上述这一个以及其他的一些缺陷,当时在斯坦福直线加速器中心、现在在 MIT 的爱伦·谷斯鼓起勇气深入到第一秒钟之内,追溯到它最初的 10^{-43} 秒。他领悟到大统一理论中超对称理论预言的特殊物质形式有负的引力作用:排斥力。当然,这样的力已经包含在 1917 年版本的广义相对论的宇宙常数中了。如果早期的宇宙只包含一小块特殊形式的物质,这一小块物质由于引力的排斥作用就要指数式地扩展开来,暴胀到包括整个可观测宇宙。

在谷斯当时提出的宇宙创造的暴胀模型中,宇宙的膨胀开始是很慢的,然后急骤加速。这和标准模型中的膨胀不同,标准模型中突然开始高速膨胀,然后在引力作用下迅速减慢。宇宙从半径小于 10^{-50} 米开始,以比光速较小的速度暴胀,这就允许这个小小的宇宙成为完全均匀的。排斥力接着起作用了。在 10^{-33} 秒时发生了第一次相变,宇宙暴胀到半径超过 10^{20} 米。

在 1981 年 1 月发表的这一假设中,谷斯承认有一个内在的问题:飞速的暴胀可能被类似于水的沸腾那样的无序所阻止。

随机泡沫的形成会使假设的暴胀中试图解决的各向同性问题失效。在大约 1 年之内,当时在莫斯科列别捷夫研究所、现在在斯坦福大学的安德烈·林德 (Andre Linde) 对这个问题提出一个解决办法,不久就被宾夕法尼亚大学的保尔·斯坦哈特 (Paul Steinhardt) 和安德雷斯·阿尔布莱特 (Andreas Albrecht) 证实是合理的。他们指出并非所有相变都一定像水的沸腾那样发生。对作为基础的粒子物理学给出的特定假设,暴胀的相变可以平稳地、均衡地进行。在大约 10^{-35} 秒,暴胀时代结束时,一切都连续地变换为按大爆炸的剧情发展,这得到紧接着第一秒的第一个太分之一后的实验物理学的支持。

暴胀的第一声巨响消除了“简单的”大爆炸中理论发现的欠缺从而受到欢迎。它现在因测量到的背景辐射的各向同性而得到强有力的支持。“宇宙背景探索者号”人造卫星从 1989 年 11 月开始对银河平面的上面和下面整个观测宇宙中辐射波长进行了 4 年的精确测量。从 0.5 毫米到 0.5 厘米的波段中没有观察到任何波长有与温度为 2.725 K 的理想黑体曲线之间有大于一百万分之五十的歧离。宇宙视界中的辉光被证明为“最光滑”、“最平坦”、在观察到的所有东西中是最没有特征的。对这种纯粹的各向同性的最好解释是初生宇宙的突然激烈的暴胀。

现在的兴趣转到背景辐射分布图中与各向同性百万分之五十的偏离。最近 10 年中发展的技术使得对出现背景辐射调制的区域绘制精确的轮廓图成为可能。这项赌注是很高的。这些区域中被认为包含着星系和宇宙大尺度结构演化的种子。通常认为,正在诞生的宇宙中密度微小变化的区域浓缩成现在观察到的在宇宙冷却下来并且密度减低时发生的质量聚集。这些数据来自以地面为基地的高分辨率仪器,到目前为止它和暴胀理论的预言符合得非常好。人们期望尚在计划阶段的装在科学考察人造卫星上的仪器也将得到同样的结果。

于是，粒子物理学家和宇宙学家对宇宙及其开创时的历史得到了一致的图像。从许多没有完成的事情引起了对已完成的工作的不满意。首先是丢失物质的性质。它可能是和观察到的发光物质同一类的物质，但其辐射低于现在的仪器所能探测到的水平，或者它已经消失在黑洞中。假如难以捉摸的中微子可以被证明拥有最小的静质量，它们就可能在丢失质量中占重要的部分。部分地由于这方面的兴趣，设计了以下实验，从在巴达维亚和日内瓦的巨型加速器发射中微子束，直接穿过地球表面弧线的弦上的岩石，射到位于安大略和意大利地球表面上的探测器。从经典的广义相对论考虑，丢失质量可能是一种出乎想象的物质，起着宇宙项中反引力的作用以保证静态的宇宙。在超对称和弦理论的新物理学中提出的各种“暗物质”粒子可能符合这种要求。从为捕捉希格斯粒子而设计的实验的粒子爆发中可能找到超对称性假定的物质和反物质粒子的超级伙伴 (superpartner) 存在的第一个证据。

暗能量

或许在研究丢失质量的性质之前先要研究排斥力的性质。宇宙膨胀的加速是根据 1 a 型超新星标度所作的精确测量令人信服地证明的。“暗能量”产生的这种作用力可能是真空能量的另一种表现，物质粒子从这种能量获得静质量并和它交换虚粒子。这个力可能一直在起作用，从暴胀和大爆炸开始，直到现在宇宙的膨胀，看来还在加速进行。

这些新问题的解决可能依赖于——或者它可能保证——3 种极性力的量子理论与引力场理论之间概念裂隙的弥合，如果没有这种裂隙的话，它们就会很好地协同作用。爱因斯坦自己不懈的努力尚无法将这些力结合在统一的场论中。所有想象的、观察的和实验的努力都无法将引力归入量子理论的表述中，已经提出的

建议都还需要检验。在“建立在巨大简单性前提的基础上的概念体系”中,对实在的理解还没有达到探索期待的目标。

它也没有把物理学当作是有限的。“暴胀宇宙”现在已如此可信地确立起来了,留给你思考的是一个比观测可及的宇宙更大得多的宇宙。原始核的暴胀可能将视界距离放到观测可及的距离之外 20 个数量级处。在暴胀的宇宙内部,现在观测宇宙呈现的状态中就包括了 20 世纪观测到的银河系的状况。原初宇宙暴胀了 10^{20} 倍,为无数其他宇宙留下了空间。这些其他的宇宙可能按照不同的日程表经历它们生命的历史,甚至还可能遵循不同的物理定律。这种推测中的天体至今还是在可信的经验之外,也是现在无法讨论的。

还有另一个宇宙探索的目的。斯蒂芬·温伯格曾观察到,“随着我们发现的物理原理越来越基本,而它们看上去和我们的关系却越来越少”。

20 世纪的工作表明,人类的存在局限于一个极小的、短暂的宇宙的圣殿中,这宇宙到处都是物质和能量的难以想象的规模巨大、反复流转的舞台,这个宇宙已经历了我们在这里对它进行观测的很长时间以前就已经开始的历史。它还将继续存在到太阳、地球和我们都消亡以后很长的时间。假如基本物理原理和我们还有一些关系的话,它只是允许我们存在的普遍占优势的条件的少数例外。我们现在已经不再去寻找布满星星的天空存在的目的。新的认识告诫我们要珍爱地球上的生命。人要将他们的存在归功于前智人祖先,他们在短暂存在的初期意识中发现了这种目的。本书现在转向讨论生命和人类的起源。

第五章

活的细胞

因此我们不必为普通的物理定律
解释生命遇到困难而泄气。

埃尔温·薛定谔

这是叙述大爆炸以来宇宙半径膨胀到超过 1 000 万光年时开始的新的创造故事。能量密度的相应减少使电磁辐射光子可以自由地照亮当时的宇宙万物。在那个时代,除了密度仍旧很高的能量以及氢和氦以外,其他什么也没有。实际上今天宇宙中的所有原子都是氢,大约占 93%,还有氦大约占 7%。

“实际上所有的”是将宇宙中百分比数值在小数点以下的原子都忽略而不计算进去。这一点分数是引力第一次使星体坍缩以来所有辐射的星光的灰烬。氢和氦聚变成元素周期表中所有较重的原子核。这些较重的原子组成了宇宙中所有已知的物质质量的 10^{-3} (0.001) 还不到。亘古不灭的星光只带走原始质量的 10^{-4} (0.000 1)。热核反应在产生星光的同时,也一直在使赤裸的氢和氦原子核走过通向复杂性的物质组织的第一步,终于产生了在宇宙的小小一角落上的有意识的观察者。重原子核中达到大约 80 个质子和 120 个中子,这样大的集合开始超过强力和

弱力维持复杂性的能力。更重的原子通过放射而崩溃。

就这样在星体中集合起的物质从此以后通过电磁力的作用进一步实现它们的潜在功能,这种电磁力就是约束完整原子外部电子的力。在星系广大的星际空间中,至少有 5% 的星系物质——主要当然是氢——以完整无损的原子和分子状态存在。原子和分子组成化合物并聚集成为尘云中的固体微粒,这种尘云遮蔽了星系旋臂中的星光。这些云中包含长长的有机化合物名单。它们可能遮蔽了另外一些坍缩成棕矮星的巨大的物质聚集体,这些棕矮星还没有足够大到可以发光。这种星体可能在其内部及其周围提供了对无机化合物和有机化合物都合适的温度和压力范围。

我们的本太阳系模型暗示电磁力在一颗恒星的伴星系统中最佳地显示出它的精湛的艺术技巧。无人驾驶的卫星和地面上的雷达揭露了其他类地行星以及木星和土星的类地卫星的奇异地貌。这些奇观的原子组织者是氧。氧是由恒星中氢和氦制造出来的最丰富的元素。氧加上其他 89 种元素中在太阳系中相对丰富的 4 种元素——硅、铝、镁和铁的化合物组成太阳的行星的固体岩石材料。

在地球上——也可能在太阳其他的一个或更多的岩石行星上——氧和氢结合起来,再加上两种次丰富的元素,碳和氮,使物质的组织达到另一个水平的复杂性。原来,生命和星光一样都是自然的。正是电磁的作用将氢、氧、氮和碳通过它们的 1 个、2 个、3 个和 4 个外层电子分别将这些元素组合成复杂精巧的结构。在实验室里,这 4 种元素可以在细胞外面自发地结合起来组成细胞的分子。在地球历史的早期这种分子组合成能够自我复制的活细胞。

后来出现了有意识的观察者。法国天文学家皮埃尔·奥热 (Pierre Auger) 把生命看作宇宙中能量和秩序衰退耗散中的“驻波”,高度组织的物质和能量——较低的熵——的浪花,通过这些

过程发生着热力学第二定律描绘的宇宙熵增加。

20 世纪刚开始时的探索生命的现代历程中发生了科学史中的惊人巧合。1900 年,3 位植物学家同时各自独立地发现有性生殖的遗传是量化的。从一个亲代得到的一种特性在后代中按原样出现;这种特性不会和从另一个亲代得来的相应特性混合。我们是我们祖先遗传的复合物,不是混合或掺合。

德国的卡尔·柯伦斯(Carl Correns),奥地利的埃利希·彻马克(Erich Tschermack)和荷兰的雨果·德·弗里斯(Hugo de Vries),在检查他们准备要发表的论文的时候,同时独立得到另一个更惊人的发现,在 34 年前就已经有人发表了他们的发现。

孟德尔的基因

在布吕恩(现在是捷克共和国布尔诺)的奥古斯丁修道院的花园里,格里高尔·孟德尔(Gregor Mendel)做了很长系列的豌豆杂交实验[见第 234 页图]。他发现了子代豆荚中的豌豆要么是绿色要么是黄色,不会出现黄中带绿或绿中带黄的,要么是光滑的,要么是皱的,而不是稍微有点皱。证据确凿,孟德尔设计他的实验以检验他的预感,就是一种特性通过一个被他的后继者称为基因的因子不变地从一代传到下一代。基因的概念被证明为和原子一样合理、一样真实。

在提出基因假设的时候,格里高尔·孟德尔还提出了在整个 20 世纪中都一直影响着生命科学的一些问题:在亲代的基因中如何表达遗传给后代的性质?基因从亲代传到后代时如何保持不变?基因的概念在动物到植物到组成动植物的细胞,到细胞的大分子以及到细胞中的小型器官“细胞器”中都留下了踪迹。这些将分子排列起来使细胞具有生命的、有序的、相续的各种生物化学反应都在基因的分子结构中被编成了密码。

细胞是组织成生命状态的物质的不可进一步约简的单元。

它是最小的生物,能够用它的环境中的能量和物质进行自我组装,还能够进行自我繁殖。最早的细胞产生出至少两种一直存留到现在的主要细胞类型。更接近于原始的并且构成地球上生命的物质总数的一半以上的是细菌。它们是两类中较小的,解剖学上也是较简单的;某些细菌生物是多细胞的。细菌也称作原核生物,它的意思是“以前”或“还不是”有核的。有核的细菌是有“完善的”核的真核细胞,实际上组成了所有看得见的生物、动物、植物和真菌,加上种类繁多的真核原生生物(protoctista)^①界的生物,这些是单细胞,也可能是多细胞的真核生物,甚至还没有



遗传是基因特性的组合而不是混合[见第233页]。豌豆中光滑和黄色的基因[上左图]是显性的;绿色和皱纹基因是[上右图]隐性的。在第一代杂交中显性基因占优势:所有的豌豆都是光滑—黄色。在第二代[下图]中,一半豌豆是光滑—黄色;其中有 $\frac{1}{5}$ 每个都带有隐性基因,绿色和光滑,或者皱纹和黄色的, $\frac{1}{10}$ 带有两种隐性基因,皱纹和绿色。基因在传播中保持可能有利于它们的特性,抵抗环境的改变。

^① 译注:protoctista一词译者未查出正式的中文译名。protoctista指生物学分类中不能归入动物、植物或真菌的那些真核生物。它包括真核微生物和它们的后代,如藻类、有鞭毛的霉菌等等。试译为真核原生生物。

辨明它们到底是动物、植物还是真菌。作为“活的细胞”，真核细胞组成的人类通常称为真核生物。

孟德尔基因的基因座

20 世纪初期，研究发现真核细胞中自复制的核是孟德尔基因的基因座。到世纪中叶，DNA 分子使基因具体化了。于是，认识的道路开通了：遗传经验如何从亲代细胞传达下去？它如何在细胞物质的制造中表达？它是如何复制并传递到下一代的？

包裹着细胞的膜不只是容器，它本身还是有活力的细胞器。细胞通过膜不断地、有选择性地从周围环境中摄取它本身物质所需要的原材料。从细胞遗传的表达中制造出的其他的细胞器提供了维持这种活力必需的能量。还有另一种细胞器，非常像另一些原核细胞或真核细胞，能够从太阳获得能量，一次捕获一个光子。被光子激发到较高轨道上的每一个电子以后又逐级下降，沿排列在细胞器中的大分子的能量阶梯每一次发生一个量子跃迁，产生将空气、水和土壤带到活的有机体装配线上并赋予活力的能量。例如，在活动的人体内， 10^{14} 个细胞在 1 年中将太阳光子变换为相当于 150 千瓦小时的机械能——加上更多得多的热能。

细胞的细胞器和大分子已被证明能够脱离细胞执行它们的生命功能。它们的亚结构和分子的各组分已被证明能够自组装它们自己。古代技术以及重要的工业就都依赖于“有机”质的这种能力。

另一方面，细胞的大分子和细胞器怎样协调细胞本身和多细胞生物的生命中的活动还难以解释。地质的记录指示，活细胞中发生能量交流开始于 35 亿年以前，这时地球刚刚冷却到足以保存液态的水。现在所有活着的各种各样的细胞共有的特征数目越来越少，这点受到了注意。这些很少的共同特征一定是那些首先产生这些特征的生物残留下来的。从那开始，遗传的记录得意

地宣告细胞对它周围环境中遇到的新资源具有机会主义地应对的能力。

因此,大多数生命的秘密隐藏在它的最早的 30 亿年左右的历史中,为积累经验这些时间是足够长了。这是按照人类的步伐来量度的时间。对于原子和分子反应时间 10^{-15} 秒来说,能有效积累经验的时间用地球的历史 10^{17} 秒表示更为合适。从地壳物质中吸取新的元素作为它的组成材料并从太阳得到了能量,于是细胞在地球的各个纬度上都安了家。在多细胞的真核生物出现以前,或许是 7 亿年以前,原核生物占据了大气、水和地壳,创造了生物圈。从此它们改造地球上的环境以适合它们的繁荣生存。此后,细胞变得更加多样化,更高度的组织秩序,并在它的多细胞后代中增强了自主性。细菌这个先驱者始终存在,它们为后代保证了地球环境并成为有意识的观察者的幸存者的例子。

自复制,能量的转化以及将新的经验一同结合到基因中从而推动了进化。达尔文根据托马斯·马尔萨斯的邪恶观点认为生存手段的斗争和最适合者的选择在物种起源中有至高无上的作用。达尔文发表《物种起源》时,将新的生物放在竞争中是产生变异的根源这种观点还是难以理解的,这理论在孟德尔报告他的发现前 7 年又经过了半个多世纪才被承认。

孟德尔开始的研究工作使人们用新的眼光来审视进化。变异和选择两个方面——变异提出计划,自然选择作出决定——还不够。大多数生命的第一次实验和创造本身就注定要失败。甚至从一开始,选择的力量——物理环境——在被生物占据后就开始发生变化。新的物种开辟了新的生态位,它们本身又将新的生态位提供给更新的物种。变异并不“解决”环境给予的生存“问题”,这是种群遗传学家理查德·列昂丁(Richard Lewontin)观察到的。生命本身创造了今天地球上生命的环境。

最适合的东西现在更为自然地定义为存活后代的载体。

每一物种的遗传都是提供研究的特殊案例。变换能量，自复制以及在自复制的基因中加入新的经验：这些能力是活的物质所独有的。只有活的生物才会进化。宇宙中其余部分只具有历史。

在1800年以前，安东尼·范·列文虎克（Antonie van Leeuwenhoek）用比玻璃珠稍好一点的玻璃透镜制造的显微镜发现了在“从沟渠和小河中取出的水”中都可以找到“游动着的微小动物”。这一观察，现在虽然一点也不奇怪，但却是那个时代的登月探险。英国的克里斯托弗·皮特（Christopher Pitt）抓住了这一瞬间：

通过它小小的凸面，一个新的世界被我们察见，
除了撒拉弗^①的眼睛以外，以前从未被人看见！
它一直躲藏在黑暗中不让人类发现
将上帝的一半奇迹装进小小的一点。

一个世纪以后，利用在列文虎克的“小凸面”基础上改进的显微镜，观察者能看见一个细胞分裂成两个细胞而增殖。植物学家马西阿斯·雅各布（Matthias Jakob）和动物学家西奥多·施旺（Theodor Schwann）看到了组成植物和动物组织的细胞。可以看到组织细胞——不是自由游动的微小动物——被各种专门的、相互依赖的结构束缚在一起组成生物。后来，鲁道夫·弗乔（Rudolf Virchow）提出细胞理论：细胞只能来自细胞——*omnis cellula e cellula*。

有少数几个认真的观察者仍在讨论生命自发产生的民间传说。蛆和苍蝇生自腐肉；发酵败坏了酿酒和肉汤，留下沉淀物。路易斯·巴斯德（Louis Pasteur）通过一个简单的实验解决了这个问题：肉汤暴露在空气中就腐败了，把它封闭起来就不会腐败。

^① 译注：撒拉弗（Seraph）是基督教《圣经》中守卫上帝宝座的六翼天使。

为了说服认为封闭起来后就抑制了自发产生过程这种反对的观点,他让空气通过弯弯曲曲的管子以除去空气中带有的、他认为是引起腐败的单细胞生物。

巴斯德断言,这种腐败以及他为酿酒工业进行监控的发酵只在活的细胞存在时才会发生。巴斯德和弗乔共同提议研究遥远的过去某个时代生命起源的问题。

对于在分子水平上来认识生命,巴斯德也作出了非常突出的贡献。从不完全的发酵以及从某种葡萄酒中,酒石酸结晶常常沉淀下来。巴斯德注意到这种沉淀物质能使偏振光的偏振方向作微弱的旋转,有时候向右,有时候向左。设法将它们分离出来后,他发现在沉淀中有两种晶体的混合物。一种使光的偏振面强烈向右旋转,另一种使之强烈向左旋转。他从这个证据提出假设:酒石酸分子具有三维结构,向右或向左扭转或卷曲,这对它们的化学与生物活性起着一定的作用。

细胞和细胞核

到20世纪开始时,在当时的显微镜下的细胞——真核细胞——看上去是包围在细胞膜中透明的“原生质”小球。在几乎是没有特征的内部有一个较暗的小斑点首先引起了观察者的兴趣。这个“细胞核”处在生命标志的中心位置[见卷首插画]。

在适当的时候,细胞核看上去会稍微增大一些。然后从细胞一端的一点出现半透明的扇形伸出的射线通过原生质(现在叫做“细胞质”;cytoplasm; cyto = cell),到达细胞另一端的一点重新汇聚。细胞核在垂直于射线轴的方向上拉长。接着它分解为一些微小带状物,这些带状物分成相等的数目,向相对的两极运动,看上去像是被正在缩回的射线拉过去。接着“有丝分裂纺锤体”的射线消失;两组带状物又分别结合成细胞核。细胞中相当于赤道

位置的一圈向内收缩到一点。一个细胞就变成了两个细胞^①。

观察者一定会感到惊奇,什么样的生命力安排了这些事件。曾经存在的细胞消失了。它的生命现在激活了两个细胞。一个细胞或者多细胞生物死亡之时,除了生命以外,以前曾经存在的每一件东西现在仍旧存在。

不列颠生物学家达西·汤普生(D Arcy Thompson)在他1917年发表的明白易懂的论文《论生长和形式》中谈到:“主要的力……以及我们的主题决定要我们处理的物质的主要性质……至少和我们熟知的物理现象十分相似。”他举出一个例子,单个细胞的微小尺度是被物理学决定的。表面张力规定了一个极限,超过该极限细胞和雨滴都不能存在。微小的尺寸引起表面张力和分子间的力足以克服重力的竞争,保证了细胞的第三维。扩散和渗透引起细胞内和外部世界的物质交流。还必须注意到“有可见和不可见的作用发生在活细胞中,我们已有的知识还不能用任何已知的物理力来确切描述它们”。

有些人从生命中寻找物理学以外的力,生机论直到20世纪中叶还在争辩。

医生对传染病的关心导致19世纪认识了细菌是另一种活细胞。现在知道,其他生物对人类有威胁的生物只占已确认的、种类的数目还在不断增加的各种细菌的很小的百分比。它们在互相支持的群落中繁殖兴旺,哪些地方有水或者只要足够潮湿,它们就能从空气、水和岩石中制造出它们的构成物。原核生物的遗传物质是串联成一圈的“类核”,并且赤裸地漂浮在细胞质中。

① 译注:这一段关于细胞有丝分裂的描述不明确。真核细胞有由核膜包围的细胞核,核内有细丝状的染色质,染色质包含DNA。当细胞分裂时染色质变成细长的染色体。细胞分裂开始时,核外的中心体分成两个,向周围辐射出微管,两中心体移向细胞两极,微管联成纺锤体,核膜消失,染色体在细胞赤道圈处排列,通过纺锤体与两中心体相连,染色体分裂为二,分别移向两极的中心体。赤道圈细胞膜收缩,细胞分裂为二,各自重新生成细胞核将染色体包在里面。

除了少数几种以外,其余原核生物都包在坚韧的多糖囊中;它们在这里面可以抵抗有害的环境而存活。各种细菌的种类包括古代最早的活质聚集体的直接后代,这种活质聚集体存在于和生命起源时地球上相近的环境中。

到 19 世纪末,医生和细胞生物学家受到存在着能传染疾病的更小的有机体的证据所困扰。这种“滤过性病毒”可以通过其微孔小到足以滤去最小的细菌的滤纸。

活质的构造

在 19 世纪中叶,化学家对活质的构成作了粗糙的分析。这是他们从多细胞的哺乳动物,人和他们的家畜的食物需要中学到的。他们相信,只有生物才能制造出这类物质,他们把科学的这一新的分支称为有机化学。当时有机分子在星际空间中还未曾被探测到。地球上,这些分子被证明为主要是由空气和水的元素所组成。

这些元素结合成 3 种熟知的有机化合物:从空气中的二氧化碳得来的碳和从水中得到的氢共同组成脂肪族碳氢化合物。在稍大一些并比较复杂的淀粉类碳水化合物分子中包含从水中得来的氧,以及碳和氢。最大的、其结构有无限多变种的是蛋白质。它们的成分有大气中最丰富的气体,氮。在许多蛋白质中还发现硫,硫在蛋白质的错综复杂的结构中为许多不同位置上提供原子间很强的键力。简言之,这 3 类有机分子分别由 CH , CHO , CHON 和 CHONS 构成。

1869 年,在孟德尔发表他的著作之后 3 年,弗里德里希·米歇 (Friedrich Miescher) 在目录中加上第四种有机化合物和第六种元素。从细胞核中他分离出元素磷,他认为这和蛋白质有关系。米歇将这种化合物称作“核素”。这一发现的意义要等到重新发现孟德尔的著作及随后发生的事件到来时才能理解。于是我们

有了 CHONSP。

加利福尼亚大学圣巴巴拉分校的地质学家兼地质史学家普雷斯顿·克劳德 (Preston Cloud) 在编制的更为详细的目录中指出：“完全脱水的读者 [按重量计] 大约含有 48.4% 的碳, 23.7% 的氧, 13% 的氮, 7% 的氢, 3.5% 的钙, 1.6% 的磷, 1.6% 的硫, 以及少于 1.5% 的其他 10 来种元素。”钙来自骨骼, 其他 10 来种元素是：钠、钾、镁、铁、锰、钴、硼、铜和锌。

正是有 4 个价的电子或 4 价的碳给予有机分子以无穷的多样性。有机化学家发现仅仅知道分子的元素成分——糖： $C_6H_{12}O_6$ ；乙醇： C_2H_6O ；醋： $C_2H_4O_2$ ——还不是故事的开始。重要的是要知道哪一个原子和哪一个原子相连。除了碳不仅以线性长链的形式将它们联结起来, 还有两只手的氧和三个角上的氮以形成四方形的、五角形的、六角形的以及其他的二维和三维构形。

这种化合物的化学多样性在 1897 年有意料之外的表现。爱杜华德和汉斯·布赫纳 (Eduard and Hans Buchner) 兄弟提取酵母培养液, 想研究它在医学中的用途。他们在这提取液中加上糖作为防腐剂。使他们惊讶的是, 和巴斯德的权威观点相反, 这个混合物旺盛地发酵并产生出乙醇。

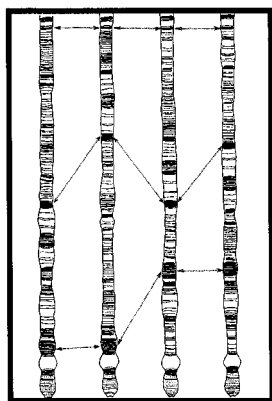
在细胞外面存在着具有有生命细胞作用的有机化合物。布赫纳兄弟的“zymase” (希腊文“酵母”) 吸引了下一代的有机化学家对它的活性成分进行分离和辨认。

除了对细胞研究有兴趣以及有机化学中的进展以外, 有才能的年轻的生物学家也对整个动物提出了问题。1900 年, 哥伦比亚大学的托马斯·洪特·摩根 (Thomas Hunt Morgan) 从事于割去部分身体的再生的研究——这是包括节肢动物、昆虫以及其他具有外部骨骼的动物, 还有少数内骨骼的蜥蜴等动物特有的能力。孟德尔的发现使摩根的注意和才能转移到遗传学上。他很快就证实了普遍存在的黑腹果蝇的遗传服从孟德尔定律——由此足

以推定其他动物以及植物也都应该如此。

许多现代的遗传学知识都要归功于果蝇。果蝇本身用于这个方面十分理想。它的增代时间是 12 天,得到结果比孟德尔的植物快得多。还有,果蝇的唾液腺中的染色体在变态到蜕变期时会膨胀。用低倍显微镜观察是很方便的。

1903 年,一个机灵的研究生沃尔特·萨东 (Walter S. Sutton) (他后来成为外科医生) 提请摩根注意果蝇的某种遗传特性的遗传和它的染色体中的一些细节之间的相关性。到 1911 年,这种相符使摩根相信基因可能组织在染色体上沿着一条线的序列中。显微镜的改进完全证实了萨东在世纪中叶的先见。在育种实验中被控制的特性可以在带状的黑腹果蝇染色体上标定位置 [见本页插图]。



在 1927 年,摩根的学生赫尔曼·马勒 (Herman Muller) 将果蝇暴露在中等强度的 X 射线中,成功地引发果蝇中熟知特性的突变。众所周知,高能辐射会损害组织细胞。这种辐射使早期大意的研究人员受到皮肤灼伤、患局部的癌性肿瘤和白血病。毫无疑问,这些都意味着抽象的基因概念在染色体内排列成一线的某种分子中具有它的实在性,它们在细胞的短暂的生命中的关键时刻

及最终的复制中发挥作用。还有,在非致死的突变中可以看到要加以考虑的遗传改变的根源,并伴随着孟德尔揭示的基因分配及重组。

有机化学家同时也发现米歇的核素中的磷与蛋白质无关,而与另一完全不同的化合物有关,他们把它称为脱氧核糖核酸(简称为 DNA)。这种 DNA 具有复杂的结构,以某种方式包含 5 碳糖(脱氧核糖),一个磷酸以及两对含氮化合物。在 20 世纪 20 年代,罗伯特·费尔根(Robert Feulgen),一位德国生物化学家,用了专用于 DNA 的鲜亮品红染料后报告说染料和 DNA 都被限制在植物和动物细胞的核中,这强烈暗示 DNA 很可能是基因的物质。

然而,DNA 的功能还没有表现出来。同时,蛋白质——肌肉、骨骼、腱、皮肤和毛发的主要成分——突然出现在细胞化学中,成为重要的角色。布赫纳对酿酶的分析产生出 14 种中间产物,从糖到最后产物乙醇以及副产品二氧化碳。对一连串相继产生的 14 种中间产物的化学反应的研究最后认出 20 种或更多的“酶”,这些是起催化作用的蛋白质。

像无机的催化剂一样,酶参与并加速——催化——别的分子间的化学反应,并始终保持它们自己的身份不变。化学家发现在酶的结构中特定的位置上连接着有活力的键。酶通过它们的“底物”将它们自己结合到化合作用中,然后将底物键合到它的目标上。就这样,酶使有机化合物分子间的反应加速了百万倍到万亿倍。这样一来,就将一个分子和另一分子以适当的方向和适当的速度相遇的机会提高了相应的数量级,从而影响了它们的结合。人们发现,酿酶以惊人的配位顺序通过 14 种中间产物的合成和分解,使糖发酵成为乙醇和 CO_2 。

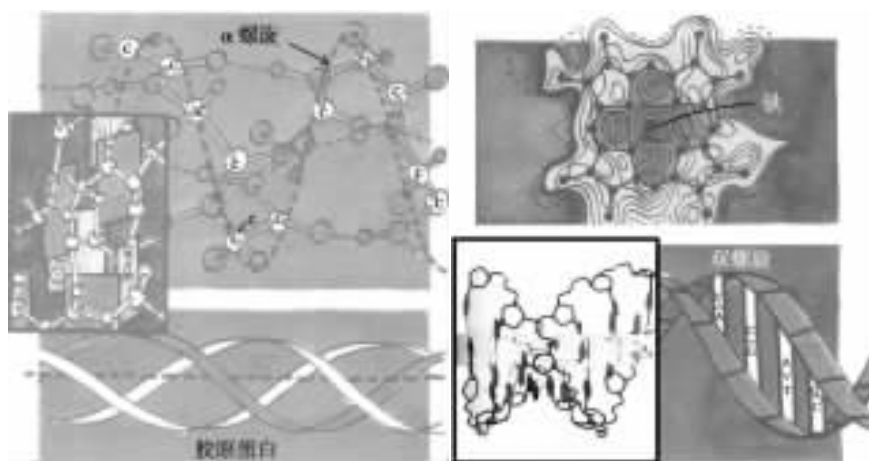
在 20 世纪 20 年代晚期,康奈尔大学的詹姆斯·萨姆纳(James B. Sumner)和洛克菲勒医学研究所的约翰·诺思罗普

(John Northrop) 成功地分离出酶,得到的酶是如此纯粹以至可以以结晶的形式沉淀出来。能够结晶说明它们的分子的大小和形状都相同,所以可以紧密地结合在晶体中。化学分析证明它们都是蛋白质。它们是大的蛋白质,分子量为 10^3 到 10^4 [“克分子量”或“摩尔”;见第 72 页]。

发现蛋白质功能的多样性对于已经开始的对它们的构造的认识给出了新的意义。已经知道,蛋白质由亚单元“氨基酸”组成。100 个到 1 000 个氨基酸被“肽键”联结成“肽”链。在许多已知和可能的氨基酸中有大约 20 种被辨认出是有生命的细胞的蛋白质的组成部分。它们的分子量不同,从甘氨酸的 75 到色氨酸的 204。

各种氨基酸之间的区别在于不同分子量和不同构型的“侧基团”。它们相同的氨基酸基团在联结时脱去一个水分子。这过程实际上是一个氨基酸“远端”弱联结的一个氧 O 与另一氨基酸“近端”的两个氢结合形成 H_2O 。在这个反应中安装上的肽键和将“头”上露出的碳和“脚”上露出的氮结合起来[见第 245 页左图]。决定性的键被胃蛋白酶断裂,这是化学家发现的在胃里面帮助消化——破碎——蛋白质的一种酶。化学家从合成塑料的经验中已经学到有关同样的“单体”,如氨基酸联结成“聚合物”链的知识。沿着蛋白质链编结上去的侧基团使蛋白质相互区别并赋予蛋白质以各自的活性。

对于获得这些知识的研究者来说,很明显,蛋白质,特别是酶所具有的功能的特异性和多样性必定与 20 种氨基酸组合实际上可能的无穷数目有关。这个无穷引起了另一个无穷,这来自对酶的功能决定于氨基酸沿着链长的联结顺序的认识——就像元素的顺序决定化合物的特性。如果将蛋白质作为基因的物质还需要仔细斟酌。



高度复杂结构的大分子,这里是4个有代表性的例子,这些大分子引起了活细胞中的生命进程。氨基酸的亚单元以同样的角度“头对脚”地互相连接起来[见插图],生成螺旋,在蛋白质中形成“ α 螺旋”,这是亚单元排列成三维结构的最小的安排方式[见第244页]。组成哺乳动物组织40%的胶原蛋白由3个套叠起来的 α 螺旋卷成一个右手螺旋[见第251页]。卟啉结构是参与能量交换过程的分子的共同结构。4个氮原子形成爪状,抓住一个金属原子,在血红蛋白中是铁,在叶绿素中是镁[见第253页和第267页]。金属原子贡献出自由电子参与光合作用和呼吸中的能量交换过程。双螺旋(克里克-沃森模型在左边)在一个螺旋中将蛋白质中的氨基酸顺序编码,每一组3个(不会有4个)碱基组成一个编码一个氨基酸的“密码子”。第二个螺旋携带反密码子[见第254页图]。

烟草花叶病毒

确定基因物质关键的一幕发生在洛克菲勒研究所。约翰·霍普金斯大学的威廉·亨利·韦尔许(William Henry Welsh)和宾夕法尼亚大学的西蒙·弗莱克斯纳(Simon Flexner)曾追随约翰·洛克菲勒(John D. Rockefeller)在1901年建立一个研究所,从事于探究生命的性质。从基础水平上的理解肯定会对当时医学科学和实践所面临的最难处理的问题得出答案。这个问题是

从过滤性病毒的研究提出来的。

研究所在新泽西州的普林斯顿建立了一个温室实验室，用于研究植物病毒。把它作为这一类病毒的模型，温德尔·斯坦利在那里将烟草花叶病毒作为研究对象。在1935年，应用了他的同事诺思罗普提出的技术，将酶蛋白质结晶，他得到第一个分离出来的过滤性病毒。斯坦利证明烟草花叶病毒非常像是蛋白质和作为细胞染色体的核酸相结合所组成的。然而，在这种病毒中的核酸并非DNA而是核糖核酸或RNA，其中用核糖代替脱氧核糖。斯坦利在病毒的选择上是很幸运的。棒状的烟草花叶病毒足够长， 3×10^{-7} 米，在当时所用的第一代电子显微镜中可以记录下它的图像。斯坦利证明，病毒的丝状RNA包在蛋白质外壳中。

从叶子的提取物中分离出病毒并随后加以提纯，他能使病毒以结晶的形式沉淀下来。然而，当他将这提纯的核酸—蛋白质溶液注射到烟草叶子中去后，它变“活”了。它接管了叶细胞的遗传机器，成批地制造它自己，并且在叶子上显现出有特色的枯萎的镶嵌图案。斯坦利偶然发现一张枯萎叶子细胞中结晶的“内含体”会使它失去活性。在斯坦利实验室中，杀死细胞并使叶子枯萎的烟草花叶病毒，通过一次又一次系列过程表明，它本身就是没有细胞的基因，它能在下一张烟叶的细胞中再复制自己。对核酸的兴趣又复活了，因为它好像就是基因物质。

斯坦利也注意到这项工作的另一含义。病毒，他说，使我们感到“如果不是不可能至少也很难在有生命和无生命的东西之间画一条清楚的分界线……生命现象的原则突然失去其存在，但仍旧是所有物质固有的性质”。

1955年，斯坦利像任何人都想做的那样，装配出了一个生物。当时在加利福尼亚大学伯克利分校，他和他的同事们将病毒分解成它的组成部分，它的蛋白质外壳和RNA丝。然后他们再将它装配起来——就是说安排好各组成部分可以自我重新装配

的环境。这重新组装起来的病毒完全能感染烟草。

DNA：遗传分子

现在的化学家对 DNA 结构已经有了较多的认识。5 碳糖加上磷酸基团丢弃了水分子后联结成长链,就像氨基酸肽基团在蛋白质中所做的那样。每一键连接到 4 个含氮化合物中的一个,形成“核苷酸”,就好像侧基团决定氨基酸的特性。4 个含氮化合物称作“碱基”,有两类碱基:一对六角形的“嘧啶”和一对较大的、几何形状更加复杂的“嘌呤”,这种结构复杂到足以执行重要的功能。

1945 年,又是在洛克菲勒研究所,奥斯瓦尔德·艾弗里 (Oswald Avery) 和两个年轻同事柯林·麦克劳德 (Colin Mcleod) 和麦克伦·麦卡蒂 (Maclyn McCarty) 提出一种专门适合于 DNA 的标度。艾弗里从 20 世纪 30 年代开始就着手发展一种“抗血清”以对付肺炎球菌,这项研究继承了世纪初弗莱克斯纳开创的工作,他发展了一种对付脑膜炎球菌的抗血清。弗莱克斯纳的抗血清能中和细菌产生的毒素从而大大降低了当时流行的脑膜炎病人的死亡率。然而,肺炎球菌显示出难理解的遗传变异性。肺炎球菌的品系会通过变异产生不同变种的毒素以抵抗原来有效的抗血清。

英国细菌学家弗雷德·格里菲思 (Fred Griffith) 于 1928 年已经证实肺炎球菌的这种变化可以通过暴露在另一种菌株中引起。他的实验对象是赤裸的肺炎球菌,它不封闭在通常细菌的细胞壁中。他将包含浸透了这种有毒的肺炎球菌菌株碎片的溶剂注射到老鼠身上。由于受到有毒的肺炎球菌菌株的感染,老鼠很快就死亡。

艾弗雷和他的同事们转向肺炎球菌的遗传的研究,他们将由供体菌株中得来的蛋白质,包括从细胞核中的 DNA 分离出来的

蛋白质，滴注到靶菌株的培养液中。这样做并没有引起靶菌株毒素的改变。不过，从供体菌株得到的 DNA 会引起靶菌株的遗传转化：它的后代立刻产生出供体菌株的毒素。

历史性的实验也暗示另一种遗传性变异的模式。后来认识到，通过 DNA 多少有些偶然的交换，在一个生态系统中的细菌会共享它们的遗传资源。

受到艾弗雷发表的文章激励，其他实验室的研究很快就证实了 DNA 是遗传分子。在斯特拉斯堡，安德烈·布瓦万 (André Boivin) 和罗杰·范德雷利 (Roger Vendrely) 证明了在哺乳动物、鸟类和鱼类的组织的真核细胞中，DNA 的平均内容物在不同物种中是不相同的，但对于给定的物种是相同的。洛克菲勒研究所的阿尔弗雷德·米尔斯基 (Alfred Mirsky) 和汉斯·里斯 (Hans Ris) 用一种测量单个细胞的 DNA 含量的技术从鱼和哺乳动物组织细胞的化验中得到同样确定的结果。

布瓦万和范德雷利以及米尔斯基和里斯以后又进一步证明了精子或卵的 DNA 内容物是同样的动物的组织细胞的一半。这个结果和性细胞携带生物染色体数目的一半这种知识符合一致 [见第 290 页图]。在冷泉港实验室，阿尔弗雷德·赫歇 (Alfred Hershey) 和玛莎·切斯 (Martha Chase) 证明了噬菌体——感染细菌的病毒——将它的 DNA 的 80% 注射到细菌内部，留下它的蛋白质的 80% 在外面。

夏格夫法则

1949 年，哥伦比亚大学的欧文·夏格夫 (Erwin Chargaff) 作出的发现，强烈暗示着 DNA 中两对碱基，即两个嘧啶和两个嘌呤，在传递遗传信息中的作用。他证明，在所有 DNA 样品中，胸腺嘧啶（一种嘧啶）的浓度总是和腺嘌呤（一种嘌呤）的浓度相匹配，并且另一种嘧啶（胞嘧啶）的浓度总和另一种嘌呤（鸟嘌呤）

的浓度相匹配。他还发现,胸腺嘧啶—腺嘌呤的组合对胞嘧啶—鸟嘌呤的组合的比例在从不同的生物体得来的 DNA 样品中都是不同的。“夏格夫法则”表明了遗传密码的储存方式。

虽然蛋白质酶作为遗传物质已被否定了,但还是发现 DNA 的主要功能是制造蛋白质酶。红色面包霉菌,脉孢菌等可以在包含已知的化合物:如硝酸盐、磷酸盐以及其他一些无机化合物的基础上,再加上一些糖和其他活细胞提供的一种维生素 B 的培养基上生长。因而,几乎是从空地开始,脉孢菌基因保证了可以制造出全部物质——包括 20 种氨基酸以及由它们组成的蛋白质酶,这些酶又转而催化它们的合成。

对加利福尼亚理工学院的乔治·比德尔 (George W. Beadle) 和爱德华·塔特姆 (Edward L. Tatum) 来说,脉孢菌为高能辐射诱发的突变实验提供了广泛的遗传靶。脉孢菌被这类实验所接受是由于当它在只带有一组染色体的无性孢子阶段时能大量繁殖。在这个阶段诱发的突变可以作为其后代遗传的一个单位与有性阶段中它与另一个突变品系杂交的后代分离出来。为维持残缺的菌株的生存,必须给贫瘠的培养基提供营养,这种营养成分能识别辐射删除的基因。比德尔和塔特姆用这种方法建立了“一种基因,一种酶”法则。一种基因负责一种酶的合成,这种酶催化一种特定的化学反应。

分子建筑学

为了证实巴斯德关于生物分子中三维结构的意义的猜测,化学家们一直在探索核酸和蛋白质的生物化学活性与其结构的关系。富于想象力的化学家开始谈到酶配合它们的底物就好像钥匙和锁相配。然而,分子的“二级”结构是物理的属性而不是化学的属性。这个问题的解决需要物理的手段。这些手段加上物理学家对生命科学中问题的掌握,导致对基因及其在蛋白质合成

中的行为的认识的下一步进展。

毫无疑问,这一进展由于洛克菲勒基金会支付的科学预算而加速。在沃伦·韦弗的鼓动下,这些基金用于“科学手段和技术的全方位应用……这些技术在物理科学中已发展得非常好,完全可以应用于有生命的物质。”韦弗在1958年退休时,分子生物学已是一门公认的学科。那一年的4位化学以及生理学和医学诺贝尔奖的得主都是在他管理时期早期资助的领受者。

资助革命

韦弗的赞助不仅给予研究者——鲍林、比德尔、莫诺特(Monod)以及其他——也给予他们所用的工具的制造者。一个主要任务是分离非常相似的分子。1906年,一位年轻的俄国植物学家米哈伊尔·兹威特(Mikhail Tswett)发现“如果……叶绿素溶液通过吸收剂柱过滤……这种吸收剂柱是将吸收剂紧紧压进细玻璃管而形成的,色素会按照吸收的次序从顶到底分成不同颜色的带。”这被称为“色层法”的技术在韦弗的资助下进行了改进,成为区分蛋白质及其中的氨基酸、核苷酸以及所有其他在生命科学中有兴趣的所有其他分子的主要工具。

在这种新方法的早期,将一张滤纸的边缘浸在未知物质的溶液中,当溶液迁移进入滤纸的纤维中时,它就按分子质量递减的次序释放出溶解在溶液中的分子。然后,将这张滤纸相对于第一系列分离的痕迹成直角的方向悬挂起来,用另一种溶剂将分离物再分离一次。可通过电流,利用电泳改善这种分子的差别性迁移。被分离出来的分子可以从滤纸上分离出来进行分析或用放射性“示踪”元素标记的方法原位辨认。今天,复杂的自动色层法已是一种羽毛丰满的技术了。它的基本原理用于基因测序,每个碱基的成本持续下降,并被用于治疗学的制造业中大量分离分子。

20 世纪 30 年代,剑桥大学的物理学家贝尔纳 (J. D. Bernal) 用 X 光衍射研究无机晶体的结构以推测蛋白质的结构。通过用 X 射线结晶学方法,加利福尼亚理工学院的林纳斯·鲍林提出“ α 螺旋”是这种结构的关键特征。鲍林的形象思维能力能看出,任何和它本身的复制品相连接的不对称图形,必定形成从头到脚都有同样角度的螺旋[见第 245 页图]。他认识到螺旋是氨基酸可能在其中自组织的最简单结构。他就着手在蛋白质晶体的 X 衍射照片上出现的斑点和条纹中寻找螺旋,他找到了。他在螺旋的每一圈中数出 3.6 个氨基酸。

在胶原蛋白——动物组织中最丰富的蛋白质——里面螺旋是三重的。由 3 种氨基酸组成的 3 个左旋的 α 螺旋缠绕形成右旋的超螺旋[见第 245 页图]。正如剑桥大学的马克思·皮鲁兹 (Max Perutz) 所证实的,由盘绕着的卷组成的胶原蛋白的原纤维提供了皮肤、结缔组织、骨骼、腱和韧带的纤维材料;占了人体组织总量的 40%。胶原蛋白产生数量的减少,特别是在结缔组织中,是生物年龄增长最可靠的征兆。

酶蛋白质中的 α 螺旋中一小段可以笔直伸展,自身折叠起来。有一些小段解开并在重要的位置上通过硫键交叉联结,形成近似的球体。这是大多数酶的形状。顺序与折叠为其“活性部位”提供恰当的氨基酸侧基或基团的组合,这活性部位可以和酶底物上的反应部位联结。

就像巴斯德的一种酒石酸晶体一样, α 螺旋一律使偏振光向左旋转。这是因为组成它的氨基酸向左的不对称。实验室中合成可以产生右旋的氨基酸,它们可以与每一种“自然界的”左旋氨基酸匹配。还有,在化学合成方法制造出的氨基酸中,右手和左手的两种都有,并且比构成细胞中蛋白质的氨基酸种类多得多。显然,在生命的历史初期,某种决定性的事件喜爱左手氨基酸更甚于右手。

功能与结构

1959年,在剑桥大学·约翰·肯德鲁(John Kendrew)和他的同事们在第一次分辨出蛋白质的二级结构时,也分辨出在其中参与作用的少数几个“三级”结构。他们研究的蛋白质是肌红蛋白,这是肌肉中暂时储存从血液中的血红蛋白释放出来的氧的分子。他们能够准确地确定这个分子约2600个原子——在150个氨基酸中——的每一个原子在3维空间中的相对位置。 α 螺旋折叠起来将抱铁血红素基团安放在4个角上,在总长度的大约四分之三以上的多肽链仍保持 α 螺旋构型[见第245页图]。

血红素基团显示三级结构。碳原子的“卟啉”环将4个氮原子固定在内环位置上。在一种构型中,氮抓住一个氧化铁分子,另一种构型中氧化铁释放出氧。这种抱金属卟啉的结构表示细胞中参与能量交换过程的所有分子的特性。在这种过程中,铁或其他金属准备好一个或更多的电子可以发生作用。

密码的编码

对细胞物质制造过程的酶催化作用的认识将遗传的一般概念用特殊生物化学功能来加以说明。正如此德尔和塔特姆已经指明的,遗传器官必须转达整个酶的协同作用的设计。换言之,认识酶的性质依赖于组成它的氨基酸联结的顺序,这也相应地暗示遗传器官可能怎样传达酶的设计方案。很清楚,基因必定以某种方式使其结构体现这一顺序,确保它在酶合成中的表达及复制的顺序移交给下一代细胞。

加利福尼亚理工学院的马克斯·德尔布吕克(Max Delbrück)给这个大家都同意的猜测以莫尔斯电码那样简单的形式表述。点和画这两个符号4个一组就足以将英文字母编码,还要加上空格。DNA聚合物中某种类似的亚结构组织用来编码氨基酸序

列,蛋白质中只有 20 个氨基酸。

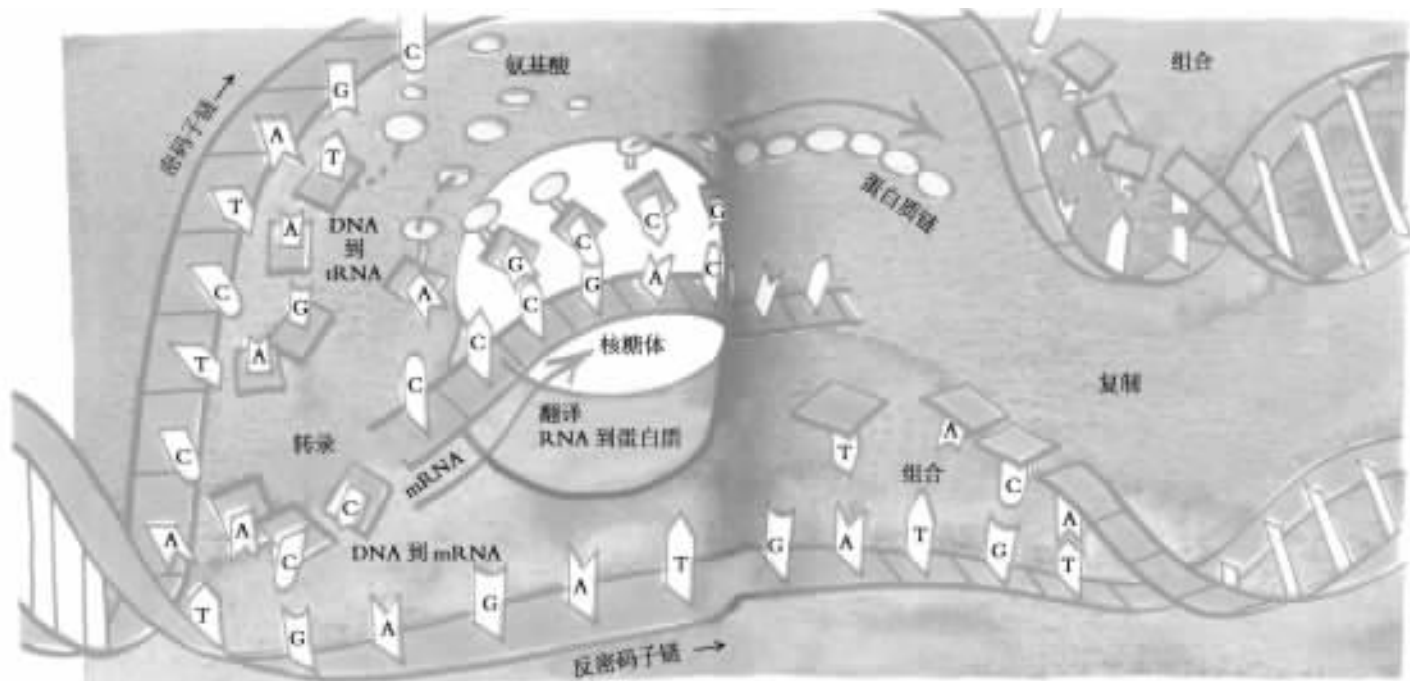
对 DNA 分子结构的分析——吉姆斯·沃森 (James D. Watson) 的《双螺旋》成为一本由一位科学家写的空前的最畅销书。沃森在印第安纳大学得到博士学位,赫尔曼·马勒 (Herman Muller) 在这里主持遗传学研究。在这一历史性的发现中他和弗朗西斯·克里克一同在布拉格的实验室中学习 X 射线晶体学。他们正确推断核苷酸中的碱基,嘌呤和密啶相互联结形成旋转楼梯,它们穿过由两个螺旋形的磷酸—糖链形成的内部深井相联结。正如沃森在他的书中交代的,他们的工作由于同在剑桥大学的贝尔纳的学生罗莎琳·富兰克林 (Rosalind Franklin) 和毛里斯·威尔金斯 (Maurice H. Wilkins) 得到的 DNA 分子的精确的结晶学相片而变得更容易。用“交代”一词,是因为当时它的作者还没有发表这些图片之故。在另一方面,当克里克和沃森于 1953 年发表论文时,上述两位研究人员还没有认识到它的意义。

DNA 的沃森-克里克模型满足所有的期望。DNA 链将蛋白质的氨基酸序列用碱基的线性顺序编码。在双螺旋中也找到了为将密码传达到下一代,它如何被复制的说明。

遗传密码

在解开遗传密码的许多早期尝试中,乔治·伽莫夫也提出了一种解释。他注意到,如果 4 个碱基——像夏加夫法则那样联结,他生动地比喻为像黑桃和梅花联结、红心和方块联结——聚成 3 个一组成为三联体,不管每一个三联体中实体的顺序,可能的组合数目是 4^3 , 4 个碱基排列成三联体,就足以排列 20 种氨基酸组成的变化无穷的蛋白质链中的任一种序列。

自然界立即证明自己比伽莫夫更加丰富、更加稳妥。更加丰富:如果考虑序列,可能的三联体数目变为 4^3 或 64。更加稳妥:64 种三联体提供氨基酸编码中足以抵抗偶然事件的冗余度,蛋



转录、翻译和复制，编码在 DNA 的双螺旋中的遗传信息在这图中描绘出来。进入蛋白质结构的 20 种氨基酸的每一个都用 4 个 DNA“碱基”中的 3 个组成的序列编码 [见第 253 页]。在密码子螺旋中按碱基三联体的序列将无限多种不同的蛋白质中的一种的氨基酸排列次序编码。这种序列将反密码子螺旋中互补的碱基三联体顺序誊录到长长的信使 RNA (mRNA) 带上。同时，DNA 密码子带中的碱基三联体——对应地与它们的反密码子三联体匹配形成转移 RNA (tRNA) 分子 [见第 256 页]。在核糖体处，通过相匹配的 tRNA 三联体将转录翻译成蛋白质。每个 tRNA 三联体都携带着它对其编码的氨基酸，tRNA 三联体与它互补的、并按照蛋白质中氨基酸编码顺序排列的 mRNA 三联体相配，从而翻译成蛋白质 [见第 257 页]。通过密码子链和反密码子链中碱基和它们的互补碱基相匹配，一个双螺旋被复制产生两个双螺旋。

白质由数量很多的氨基酸组合而成。64 种可能的三联体“密码子”中有 61 种确定 20 种氨基酸,同一种氨基酸可由几种不同的三联体表示。其余 3 种三联体都作为符号,称为“终止密码子”,它们给 DNA 长链中基因的终点定位。DNA 密码子通过构成氨基酸字母。DNA 链上密码子通过排列氨基酸的序列拼写出一个蛋白质词汇。

专有的嘧啶和嘌呤搭档的碱基配对传达遗传信息。在一条螺旋上的胸腺嘧啶只能和腺嘌呤结合,这是它在另一条螺旋上的嘌呤搭档。相应地,胞嘧啶只能和鸟嘌呤结合。写成或读作 T 对 A 以及 C 对 G 的亲合性更为便捷。一条螺旋上碱基的序列就这样在另一条上排列出和它互补的碱基:密码子 TAG 和 ACT 在双螺旋的一条边上和在另一边上的“反密码子”ATC 和 TGA 匹配。于是在两条带上的序列用相反的意思表示出来。

在复制中,DNA 的三级结构起作用了。两条带分离开来,使密码子链可以结合反密码子,反密码子链结合密码子。每一条 DNA 母带将双螺旋中的遗传密码复制出来,将密码转移到下一代的两个成员中。

碱基序列在遗传表达中的关键作用在突变机理中的表现使人感到兴趣。ACT 序列的重新排列必定合成不同的——也可能不会合成——氨基酸使酶失效。在 20 世纪 60 年代早期,当时在芝加哥大学的利奥·斯齐拉德 (Leo Szilard) 指导一位研究生研究一个问题:复制率是不是影响 DNA 链中的突变率?看来复制过程为在全部链的长度上发生的偶然的取代和缺失提供了机会。

艾伦·诺维克 (Aaron Novick) 在细菌的培养过程中,通过喂养和饥饿、加温和冷却来加快或延缓培养的细胞周期,发现突变率是一个常数,即不依赖于生殖率。直到最近才发现这种几乎是没有任何误差的结果依赖于从 DNA 到 RNA 的关键的碱基序列的转录中的主动纠错功能,加速复制率也简单地加速了校对。

地壳中的放射性元素产生的放射性背景使突变偶然性的净发生率放大了约 10%，比之于用癌症发生率表示的错误率，由于人类行为造成的错误更大得多。

DNA 转录到 RNA

分子生物学家都很高兴，因为他们发现 DNA 字母表是不难辨认的。可是再下去事情就一点也不简单了。不要以为 DNA 是直接指挥酶的活动和它们的催化反应，细胞可以更近似地看作由相互交织的反馈回路协调的几千个分子实体的相互关联的变量和瞬时量子相互作用的系统。活动的组织者并不是 DNA 双螺旋，而是单螺旋的 RNA。编码在 DNA 中的遗传信息先转录到 RNA。编码在 DNA 中的遗传方案和该方案在细胞的生物合成活动的实现之间几乎全靠 RNA 传递，DNA 双螺旋本身的复制需要 RNA 做中介。DNA 是遗传档案，RNA 是遗传过程的执行者^①。

基因转录到 RNA 时，一种特殊的酶，RNA 聚合酶——当然这是编码在 DNA 中并且早先在 RNA 介入下就已制造出来——首先锁定在标识 DNA 上的一个启动端点的碱基序列上。于是双螺旋中的一段被解开，暴露出 DNA 中或长或短的一段碱基序列。RNA 聚合酶将核苷酸和基因上反密码子的“编码”链相配对，组成信使 RNA，或称 mRNA。这种酶在分子间不同作用力大小差别的推动下沿着 DNA 链将核苷酸与它们互补的反密码子 DNA 碱基配对。在 mRNA 的长线上（其中尿嘧啶代替了胸腺嘧啶），整个基因序列在不到 1 分钟的时间内被誊录下来。同时，RNA 聚合酶根据 DNA 密码链，吸引用于装配大量转移 RNA 分子的核苷

^① 译注：双螺旋 DNA 在复制时在某些蛋白质作用下解旋，碱基对分开成为两条单链。两条链上的碱基各自连上互补的核苷酸。在 DNA 聚合酶作用下核苷酸连接成新链，形成两条双螺旋，其中不需要 RNA 做中介。原书表述有误，RNA 是在转录制造蛋白质时起重要作用。

酸,这种转移 RNA 分子每个只有 3 个碱基的长度。每个这种转移 RNA 分子,或称 tRNA,是单个氨基酸的反密码子。

1977 年,马萨诸塞理工学院的菲利普·夏普 (Philip Sharp) 和冷泉港实验室的理查德·罗伯茨 (Richard Roberts) 同时发现真核细胞的 DNA 中有一长段没有意义的序列,它们打断了有意义的密码序列。他们怀疑这些是早期的真核细胞世代中残存的病毒化石。转录到 mRNA 上时将无意义的“内含子”和编码基因的“外显子”一同编了进去。当时,在马萨诸塞理工学院的詹姆斯·达内尔 (James E. Darnell) 于 1963 年证明,在细胞核内部的刚誊录下来的 mRNA 包含大约 5 000 个碱基,相比之下详细说明一个蛋白质平均只需要 1 000 个碱基就够了。细胞核内某种编辑过程中会将内含子从 mRNA 分子中剔除,并将外显子片段按正确的次序拼接起来。核膜将未加工的 mRNA 的处理分别放在称做核仁的亚区室中进行。

科罗拉多大学的托马斯·塞切 (Thomas Cech) 在 20 世纪 80 年代早期发现,至少在某些 RNA 转录过程中,RNA 可以对它自己进行编辑。将它从蛋白质中分离出来后,这种 mRNA 会自动删去其内含子并将有意义的外显子按正确的次序拼接起来。于是证明了 RNA 能履行酶的功能,代行蛋白质在这一段中专有的控制权。塞切和其他人不久观察到,RNA 不需要酶的参与就可以进行自复制。我们就会看到,这一发现将 RNA 放在生命起源探索的中心地位上。

RNA 转译成蛋白质

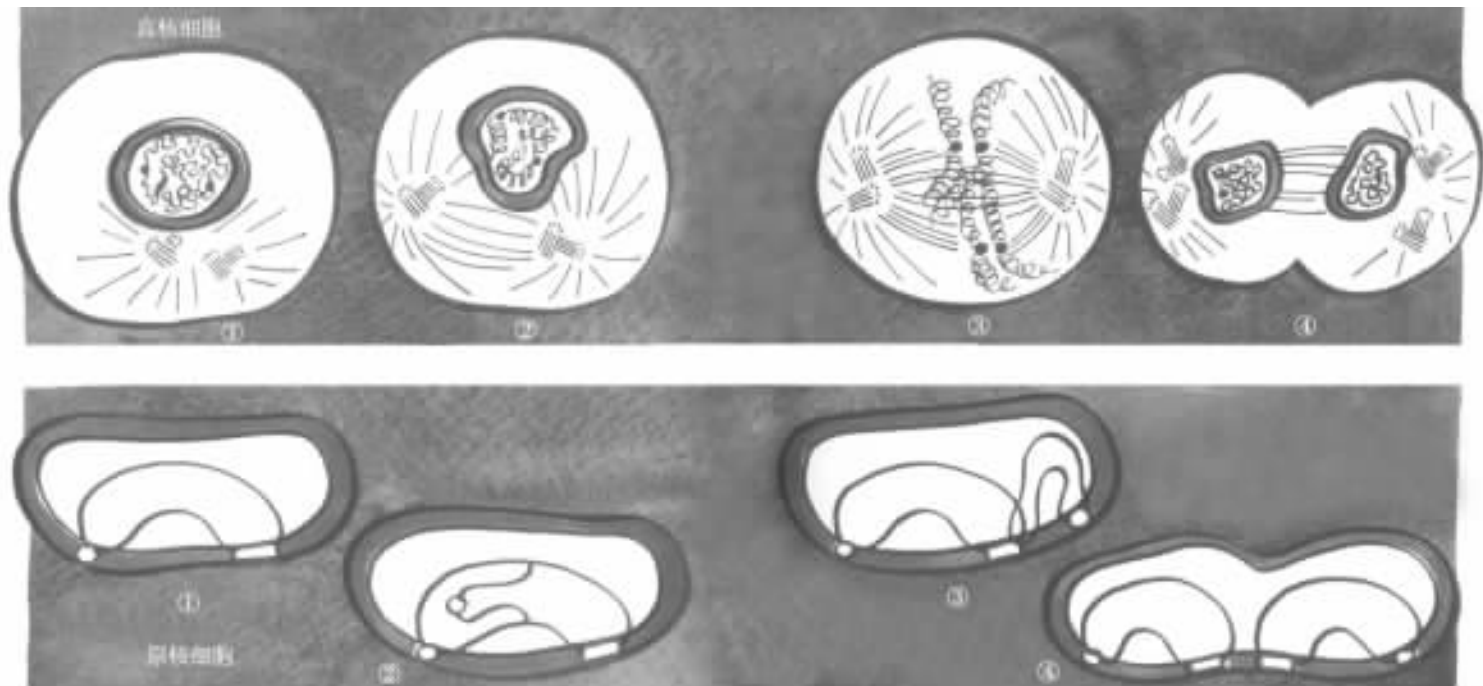
在真核细胞里,功能 mRNA 在编辑过程中通过核膜进入细胞质。mRNA 设法到达核糖体聚簇,大约 100 000 个核糖体分散在内质网折叠形成的巨大表面上。在这里,誊录在 RNA 核苷酸上的密码子序列被转译成它们编码的蛋白质中的氨基酸序列。

核糖体是一种很小的细胞器,引导这种转译过程。它由蛋白质及另一种类型的 RNA,称做核糖体 RNA 或 rRNA,两者大约各一半组成。在高倍电子显微镜下, 10^{-24} 立方米的核糖体看上去像是较大和较小的两种粒子的团聚体。这两种粒子分别称做“50 s”和“30 s”,这是按它们在超离心机中的沉淀速率来命名的。对它们 10^{-8} 米大小的结构——原子大小的数量级——现在用 X 射线晶体学方法已分辨出这些粒子在转译过程中各自的作用。

夹紧在粒子之间的 mRNA 丝上的,位于 30 s 粒子中的 rRNA “受体”激活下一个 mRNA 密码子。它吸引了携带适当的氨基酸的 tRNA 的互补反密码子臂。tRNA 的酶促反应臂将氨基酸放在 50 s 粒子的“肽”位置上,这里有一个 rRNA 催化肽键将氨基酸安装到出现的蛋白质链上。从“出口”位置释放 RNA,寻找另一个氨基酸分子以联结到下一个蛋白质链上。

在 mRNA 单链上,10 个或更多的核糖体可以同时以这种方式装配多个蛋白质拷贝。大约有 100 万个核糖体以这种方式被召来。2 000 万个 tRNA 分子,以维持细胞中以每秒 100 万个肽键的速率合成蛋白质 [见第 254 页图]。

遗传信息的转录和转译在原核细胞中也同样进行,但是不需要编辑 mRNA 链。细菌中没有内含子来打断它的平均 1 000 万个碱基对。挂在原核细胞类核上的 DNA 链固定在细胞壁里边膜的两个地方。DNA 到 mRNA 的转录开始于一个固定位置并同时沿两个半环继续进行到另一固定位置为止。当转录进行时,核糖体安置未展开的 mRNA 链并引进 tRNA 将 mRNA 的转录转译成蛋白质。类核的碎片将在细菌的细胞质中自由漂浮着发生作用。许多细菌中的这种“质粒”转移到另一个细胞时会与持有它们的遗传伙伴相对独立地起作用 [见第 290 页图]。



真核细胞和原核细胞的分裂是以不同但是类似的过程进行的,这反映了进化中一项重要的革新 [见第 284 页]。在原核细胞中,一个环形的“拟核”固定在细胞膜内部的两个点上①,携带着原核细胞基因;复制从一个固定位置开始②并同时在两个质粒位置上进行。复制出来的质粒找到新的固定点③,共同的固定点分开,接着细胞分裂④。原核细胞的基因在小小的自由飘浮着的“质粒”上携带着。真核细胞基因是挂在像一条丝状的、两端自由的染色体上 [见第 242 页],它在细胞核内分裂。同时,中心体 [见第 262 页] 在细胞核外分裂①。两个后代中心体向细胞核的相对两端运动②。然后,核膜渐渐消失。“有丝分裂”纺锤体的细丝状射线从中心体上辐射出来,并被联结到复制出来的、新的分离开的染色体的“着丝粒”上③,当细胞最终分裂为二时,这个新的染色体又被封进核膜中④。

概率产生的秩序

遗传过程的可靠性以新的和预料中极其多样的方式提出关于生命的本性的问题。物理世界中的秩序取决于阿伏伽德罗常数—— 6.02×10^{23} 摩尔⁻¹——起伏的统计^①。在《双螺旋》之前 10 年出版的《生命是什么》一书中，埃尔温·薛定谔提出一个“朴素的物理学家的”问题：

从统计物理学的观点来看，我们怎么能调和这个事实，即基因结构似乎只包含比较少的数量的原子（1 000 的数量级，可能还更少），然而它却表现出最有规律的、最守法的活动——并有如此的持久性和永久性，这就是一种奇迹。

为了描绘“持久性和永久性”，这位维也纳物理学家引证哈布斯堡王朝嘴唇的例子。这个“特别难看的下嘴唇”最先出现在 16 世纪的家族肖像中，并且和活到 21 世纪的哈布斯堡王朝后裔一致。薛定谔试图从作为基础的物理学来说明这种可靠性，他观察到细胞的大分子好像是“非周期性晶体”——某种意义上的固体。他用祖父钟^②为例。对这一不容置疑的固体，他说，室温相当于绝对零度；量子的不确定性一点也不会干扰它的计时。

细胞的分子生理学的时间和空间范围处在祖父钟的牛顿世界的时空和服从量子电动力学的不确定的概率世界的时空之间。这里，在 DNA、RNA 链上和其他大分子中的成千上万个原子在“蹦蹦跳跳”[见第 110 页]。将它们束缚在一起并将它们互相联结的化学键在各个平面上振动，在它们的平衡位置附近拉长和压缩。正的和负的电荷有差别地沿着链长分布着，和在它们作用范围内的其他分子上的电荷相互作用。在这些力的推动下，聚合酶

① 译注：因为阿伏伽德罗常数是一个非常大的数，所以偏离它的起伏比起这个数值本身小到可以忽略不计，这导致宏观物理世界的稳定和秩序。

② 译注：grandfather clock，就是落地大摆钟的另一名称。

“读出”DNA 的反密码子链并装配互补的 mRNA 密码子链。一切都正确无误,很可能在很久以前就已经完成了这个故事,随机活动无疑是有限度的,或许是由大分子的“非周期性”结构所组织起来的,自从薛定谔写他的书以来有关这方面的知识已经知道了很多。给出电磁力的反应时间 10^{-21} 秒,比之于每秒只完成 10^6 个肽键来有足够的容限,因此每一肽键完成前分子来得及许多次缠绕而成超螺旋,发生许多次分子间的虚假接触。量子生物学还只刚刚提出第一个面对实验的问题。

于是就要研究细胞解剖学——从分子解剖学开始——和细胞生理学。很清楚,长系列反应中的相互依存以及系列步骤不能用混合在溶液中的酶来引导。真核细胞中的几乎是空的 1 900 个小球现在转换成有较为复杂的结构和较不明显的功能的膜、韧带、管、瓣、泵和细胞器等密集的动荡的集合体。在分子细胞生物学中,细胞学和生物化学结合起来了。分子解剖学家能分辨出这些细胞器中的阵列,其中的酶已安排好准备进行连续循环反应。

迟至 1950 年还认为细胞膜不过是外壳,现在知道细胞膜原来是有活性的细胞器。电子显微镜表明细胞膜的许多地方向内折叠,从而细胞膜将细胞内部和外部分开的接触面相应地增大了,并且还使外部深深凹陷进去,看上去似乎是在细胞内部。和向内折叠的细胞膜相联结的并且是其延伸的内部中膜片起“内质网”的作用。细胞膜的全部内外表面使细胞的表现表面增加了许多倍。巨大数量的核糖体散布在内质网的巨大表面上进行它们的活动。电子显微镜的静物图像不能告诉我们膜在执行其功能时不停的起皱、折叠和展开、产生和消失。

化学和电子显微镜都证明细胞膜是由两层圆柱形的“类脂”组成,这是一种碳氢化合物分子。类脂分子的疏水端都在膜的截面的中线上互相靠在一起。脂分子亲水的,即可沾水的一端面向着细胞的里面和外面,与水相接触。一个动物细胞的膜由

5 000 万至1 亿个类脂分子组成。这种成对的分子能在膜的高低起伏的曲面上自由地相对运动,细胞膜具有二维流体的结构。

依靠细胞膜可以明确地区分细胞内外。它抵抗从两边来的渗透压力。它维持内部和外部之间因离子的浓度差而产生的电位差。十几种不同种类的数百个蛋白质做成的阀和泵起着膜的两个方向的被动和主动的转运作用。膜的二维流动性可以使这些细胞器迅速地运动到邀请它们去服务的地方。膜本身会凹进去而陷入里面,让特定的物质从外面进入,并且也可以对粒子进行拓扑反转操作,将它排斥到外面。

在细胞核引起观察者的注意后,发现了真核细胞的繁殖使用的第一个细胞器。这就是有丝分裂纺锤体。提供这种纺锤体是构成细胞骨架的微细管的网和基质的一种功能。肌肉的这种比喻性的骨骼是由肌动蛋白和肌球蛋白组成的。这些相同的蛋白共同产生哺乳动物肌肉中的收缩力。内质网贯穿在膜的皱折中,这种肌骨骼系统支持并调整细胞的形状。

有丝分裂纺锤体

微管是由两种微管蛋白成对组成的“二聚体”所构成。在实验室的玻璃器皿中,这种二聚体自发地自组织成片状。然后它们卷成细管,在自然形成的螺旋的每一圈有 13 个二聚体 [见第 264 页图]。微管外半径为 2.5×10^{-9} 米,内半径为 1.5×10^{-9} 米,其长度延伸 10^{-6} 米,长度为厚度的 1 000 倍。用作细胞骨架的细管忽隐忽现,有时显出棍棒般的坚硬性,有时像带子般柔软。它们的功能也像传输物质的管子,尤其是在长度可达一英尺或更长的神经细胞的轴突中。

在细胞繁殖时会显示出微管在起作用。当染色体被复制的时候,在细胞核旁边的一个细小的细胞器,即中心体开始复制它自己。组成一个中心体的两个中心粒——每个都是一个粗短的

圆柱带着另一根粗短的以直角方向伸出去的圆柱——变成 4 个。这些粗短的圆柱体各由 27 根微管组成，它们结合成 9 组三联体并围成截面呈圆形的一圈。在复制时，子代中心体迁移到细胞的相对两侧。从中心体抽出的微管形成有丝分裂纺锤体，它们各自将复制出来的互补的染色体对中的一个，联结到对称地处在相对的位置上的中心体上，染色体沿着微管支架分离开来。这一出戏表示的过程被研究细胞演化的学者林·马格利斯 (Lynn Margulis) 称为“不依赖于 DNA 的遗传系统”。

中心体的 9 组三联体结构也在动体的结构中起作用。在许多可动的真核细胞的膜的下面，从中心体伸出截面完全不同的微管阵列 9 组成对结合的细管对围绕着一个紧靠在一起的一对细管 [见第 264 页图]。一束这样的细管集合形成像鞭子般的波动足——波浪形运动的“足”，用它推进单细胞的真核生物在它们所生活的液体介质中运动。哺乳动物的精子就是用一个波动足推进的。在不动的组织细胞上，例如在呼吸系统中，有同样截面的纤毛搅动着，使周围液态介质不断运动。在内耳迷路中，纤毛伸出在内部液体中，发放表示头部在三维牛顿空间中方向的神经脉冲信号 [见第 353 页插图]。

ATP :细胞中的能量转化

在细胞的生命中，能量的转化必须被看作像基因的复制及基因协同作用中经验的积累同样都是生命的必需过程。细胞把化学键能转化为其他各种形式的能量。化学键能转交给肌肉中的肌动蛋白和肌球蛋白就能够转化为机械能。在神经脉冲中则转化为电能。它维持穿过细胞膜的渗透压并推动主动转运过程。在萤火虫和腐烂的木头的“磷火”霉菌中，化学键能转化为光而辐射出去。一种无处不在的分子在细胞中化学键能转化的每一个位置上取得或释放出化学键能。

腺苷三磷酸,或称 ATP,是由 DNA 和 RNA 核苷酸中的一种嘌呤,即腺嘌呤和核糖(和腺苷一起)以及 3 个磷酸基的链结合而成。在它的能量转化活动中失去一个磷酸基,ATP 变成 ADP(腺苷二磷酸)。减去两个磷酸基后,它变成腺苷一磷酸或 AMP。4 个 RNA 核苷酸中的一个参加到遗传生物合成中是不奇怪的。

每将一个磷酸基联结到 AMP 上所需要的能量从第一个到第三个逐渐增加。将第三个磷酸基联结到 ADP 分子上转变成 ATP 要加入 1 eV 的能量。这也是 ATP 交给细胞中需要能量的过程中的能量数值。在这过程中 ATP 失去第三个磷酸又回到 ADP,准备再次成为 ATP。

卡尔·罗曼(Karl Lohman)于 1930 年在海德堡大学首先从肌肉中分离出 ATP。在试管中第三个磷酸键断裂时释放出热量。而在细胞中,这能量将参与反应的分子中的电子提升到较高的能级而不变成热能损失掉。这种电子运动中的效率使人想起金属接近于温度绝对零度时出现的超导性。

光合作用和呼吸

将第三个磷酸基联结上去并加入能量造成 ATP 这种“磷酸化”作用,在最近半个世纪中后期已经被证明是推动地球上生命的能量经济运转的关键反应。光合作用捕获太阳的辐射能,用来从无机的二氧化碳和水制造出有机分子并把氧放到空气中。第一个转化是将能量加进 ATP 分子中。反之,细胞的呼吸引进氧来燃烧有机分子,从而获得 ATP 的化学能,在这过程中产生水和二氧化碳。释放的能量首先用于接上第三个磷酸基得到 ATP。就这样,植物和动物(以及原核生物)的生命借此维持它们共同存在的互补过程,建立起巨大的地球大气中氧和二氧化碳的周转[见第 328 页图]。

可以看到,呼吸和光合作用是氧化和还原两种基本的化学能

量交换反应的生理学模式。氧化还原反应,或简称为“redox”(氧化还原),是使一个或多个电子从一个反应物转移到另一反应物。氧化是一个反应物送出电子,产生能量;还原是给一个反应物增加电子而消耗能量。因为电子转移既需要电子的施主也同时需要受主,氧化和还原总是一同发生的。

差不多两个世纪以前,当光合作用和呼吸的互补循环最早被认识到时,初级的碳水化合物分子式 CH_2O 表示光合作用是将二氧化碳(CO_2)中的碳和水(H_2O)结合的过程。在20世纪30年代早期,加利福尼亚州的霍普金斯海洋实验室的范尼尔(C. B. van Niel)在用蓝—绿和紫色细菌进行光合作用的历史性研究中纠正了这种错误的认识。他证明这些细菌利用硫化氢 H_2S 将(氢原子中的)电子引进它们的光合作用反应循环中。硫和氧都是二价;它们在许多类型的化学反应中,发现它们可以相互交换的。这种细菌光合作用的废物是硫而不是氧。简单地说,在紫色细菌的光合作用中 H_2S 代替 H_2O 为反应提供必要的氢。马丁·卡门(Martin Kamen)在加利福尼亚大学圣迭哥分校用 ^{18}O 同位素标记水分子,确凿证实了植物中的光合作用利用 H_2O 为 CH_2O 提供两个带有电子的氢原子, ^{18}O 是从空气中而不是从 CH_2O 中得到的。

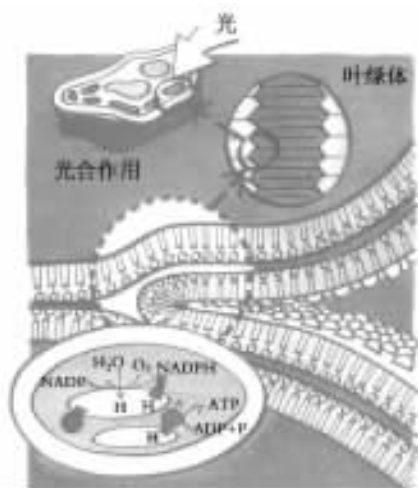
在吸收能量的反应中放出氢,而在产生能量的反应中接受氢的氧在水和空气之间穿梭往来。在空气中来回穿梭的碳:从大气中的 CO_2 获得,通过光合作用生成 CH_2O ,然后通过呼吸成为 CO_2 并重新释放大气中。

在光合作用和呼吸作用中的 ADP 到 ATP 磷酸化过程中,有许多同样的酶参与的同样的反应。它们电子的能量—运动转化的分子媒介是带有金属的卟啉及糖—磷酸辅酶,有像 AMP 那样的、与包含在遗传学中的这类辅酶有关的核苷酸。这些酶和媒介物为在细胞的——除细胞核本身以外——两种结构最精巧的细胞器中能发挥高度有序的一系列作用而排列。正如将要看到的,对

真核细胞的进化有重要意义的是这个事实：即每一个这种细胞器携带着它自己的发育不全的 DNA 以及附带的 RNA 及酶，这些细胞器补充细胞内部复制和在细胞繁殖中的功能。

光合作用的细胞器

在光合作用细胞器内部 [见本页图]，叶绿体，即叶绿素分子，俘获太阳光子。叶绿素是另一种结构的实体。平面的卟啉环就像肌红蛋白中的血红素基团，在其氮爪上抓住一个镁原子；在环上联结着一根长长的碳链尾巴。分子被调制到一个黄红波长的光子——太阳光能量的峰值波长——可以使镁原子释放出一个电子。



光合作用将太阳光能转化为化学键能。一个太阳光子将叶绿素分子中松散地束缚在镁原子上的一个电子激发到较高的能量状态。像晶体般有序排列在细胞膜中的叶绿素分子使激发态的电子进行两种循环，需氧的和厌氧的，将它们的能量固定在将磷原子结合到 ATP 和 NADP 的有能量的化学键中。这些循环的分子中介体排列在膜的间隙中。

在叶绿素的试管溶液中，电子发射荧光闪光释放出太阳能。

在细胞中,叶绿体保证了有机分子阵列中光激活的电子能量有控制地释放。叶绿素分子嵌在细胞膜中,在电子显微镜下观察,可以看到它们以晶体般的秩序堆积起来。热电子立即被一系列细胞色素中的第一个装到带上。这些也是在爪上抓住铁的卟啉,它们不损失能量地将电子传输到具有叶绿体的原材料和适当的酶及辅酶的位置。每一个电子在这里都将其能量用于生成化学键。在光照耀下进行的反应中,能量首先用于制造 ATP 分子。然后在黑暗中,循环反应将 ATP 的能量变换为糖和葡萄糖中更稳定的键能。这是用于制造许多细胞物质并且也是所需能量来源的原始材料。

有清楚的证据表明,在光反应中将照射到叶绿素分子上 75% 的光子能量转换为 ATP 键中的化学能量,这是通过中央电站的原动机将矿物燃料转换为电能的比率的两倍,幸好分子的功能如此有效。按照耶鲁大学的赫钦孙 (G. E. Hutchinson) 的估计,陆地上 5 层深的叶子和海洋中 1 毫米深的浮游植物将地球上的生命及其太阳能源之间建立起了脆弱的联系。在它们活动的地方,它们吸收到达地球表面每平方米 1 000 瓦的太阳能的 0.1%。

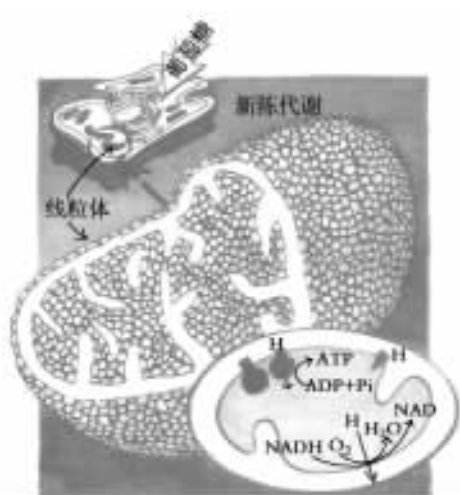
在 20 世纪 50 年代,丹尼尔·阿农 (Daniel Arnon) 和他的同事们在加利福尼亚大学伯克利分校分析了光反应。他们的工作做得非常踏实:他们使叶绿体在植物细胞外面、在实验室的玻璃器皿中进行光合作用的整个循环。他们的工作弄清了在光反应中进行的光合作用是光磷酸化。在 ATP 的第三个磷酸键通过两条途径吸收太阳能,这两条途径是通过两种不同的叶绿素。从叶绿素 a 中释放出的热电子使一个 ATP 分子磷酸化并使一个电子携带者吡啶核酸 PN 还原为 PNH_2 。这种反应循环“光合系统 II”从水捕获两个氢原子并将剩余的氧放到大气中。在出现植物之前,蓝细菌的巨大家族就以这种光合作用的模式——再加上需氧细菌的呼吸——开始重新组合地球的大气了。

绿色的叶子和一群细菌捕获了电子中附加的太阳能,这是叶绿素 b 通过光合系统 I 的厌氧菌的途径进行的。热电子在封闭的循环中,从细胞色素到细胞色素,最后回来中和留在叶绿素原来位置上的正电荷。在反应进行过程中,用维生素 K 和复合维生素 B 的一种作为反应催化的辅酶,热电子逐级交出它的激发能给两个 ATP 分子。

PNH_2 释放出 H_2 给上向暗反应,这个反应中通过做功将两个电子结合到碳里面。通过两种光合系统增加了能量的 3 个 ATP 释放出这个还原过程所需要的能量。也是在加利福尼亚大学伯克利分校的梅尔文·卡尔文 (Melvin Calvin) 在 20 世纪 50 年代研究出暗反应详尽的细节。他证明了六碳葡萄糖链的装配是通过多次周期性的反复作用产生的一系列中间化合物进行的,每一个反应都是被特殊的酶或多种酶所促进。他发现,许多这种反应和它们的酶在氧化磷酸化的“柠檬酸循环”中分解葡萄糖链的反向循环中发挥它们的作用。

卡尔文和他的助手发现葡萄糖并不是所谓的卡尔文循环中的唯一产物。在他们用作实验对象的 guinea-pig plant,一种真核单细胞藻类中,他们发现有 30% 的碳直接合成某些氨基酸以及脂肪酸。由最终产物是什么决定的 20 步到 30 步循环程序排列的复杂性表示高度的空间秩序性,酶和电子载体必须按这个秩序排列在光合作用最终阶段的叶绿体中。

一个并不比叶绿体更复杂的细胞器引起光合磷酸化制造出来的葡萄糖的氧化磷酸化 [见第 270 页图]。线粒体只在,但并不是在所有的真核细胞中产生呼吸作用。通过氧化磷酸化,植物燃烧掉它们制造的 50% 的葡萄糖。另外的 50% 用来支持动物界和真菌界。



呼吸将葡萄糖中的化学能转化为将第三个磷结合到 ATP 上的键能。ATP 这个能量载体使能量可以方便地转化为机械能、电能或生命产生的其他各种形式的能量 [见第 270 页]。排列在线粒体外膜上的分子介体在需氧的与厌氧的循环中提取葡萄糖的能量；这能量用来在线粒体内膜上进行 ATP 的合成 [见第 271 页]。大多数 ATP 能量用于在外膜上合成葡萄糖。

呼吸细胞器

循环从六碳葡萄糖厌氧——非氧化的——分裂为乳酸的两个三碳分子开始。这一操作通过 6 个中间产物进行，并消耗掉 2 个 ATP。然而它又产生了 4 个 ATP，净赚 2 个。用克分子表示的热力学收支账表明两个净摩尔 ATP 携带 24 000 卡能量。按照工程标准，这个变换的效率是相当好的一个数值，为 43%。

这一葡萄糖的初步分解只使葡萄糖发酵成为乳酸，它产生的能量足以维持原核生物界中许多生物的生存。在人类机体中，乳酸在肌肉中聚集带来早期的酸痛感，它可以通过“深呼吸”来缓解，这表示特有的氧化磷酸化的激活。

需氧的，真正的“呼吸”，在氧化磷酸化的阶段中，使氧参与

两个乳酸的完全氧化并重新获得原初的物质,二氧化碳和水。这也称为“柠檬酸循环”,因为减去第一个碳使两个乳酸变成柠檬酸,对它的认识是生物化学中的重要里程碑。为表示对树立这一里程碑的科学家的敬意,它更常常被称为克雷布斯循环。牛津大学的汉斯·克雷布斯(Hans Krebs)于20世纪30年代做出了这项研究成果,完成了40年前布赫纳兄弟开始的探索。

氧化磷酸化的需氧阶段保证了葡萄糖分子中所有6个碳的氧化。光合作用使每一个碳上联结两个氢的化学键产生的能量最终获得36个ATP分子。从1摩尔葡萄糖完全燃烧产生的690 000卡能量说明,这个过程中俘获了相当多的能量。在1摩尔ATP中给第三个磷酸键的能量已知为12 000卡,12 000卡乘以36得到432 000卡,效率大于60%。加上两个ATP从葡萄糖第一次厌氧分解得到的能量,求出氧化磷酸化的总效率为66%。这是最先被光磷酸化过程所固定的太阳辐射的75%中的66%。因此,ATP先后两次在磷酸化中捕获的净太阳能超过了40%。

当克雷布斯在进行研究的时候,赫尔曼·卡尔克(Herman M. Kalckar)在丹麦,贝里泽(V. A. Belitzer)在苏联,各自独立地同时注意到看来是在动物组织中进行的呼吸作用的化学过程。将基本肌肉组织或肾悬浮在水中,它们供给葡萄糖和氧。他们观察到浸在组织溶液中的磷酸盐在基本组织中进行呼吸时消失。他们发现,失去的磷酸盐与多种有机分子结合,特别是现在熟知的ATP分子。卡尔克正确地假设ADP磷酸化成ATP是和呼吸作用共同进行的。现在对ATP普遍作用的认识从此沿许多不同的研究线路进行。匈牙利生理学家阿尔伯特·僧特·杰奇(Albert Szent György)发现,ATP为肌球蛋白和肌动蛋白的相互作用提供化学能,再转化成引起肌肉收缩的机械能。

在电子显微镜下,线粒体呈现像飞船身体般的样子。从其截面看去,它是由两层膜组成;内层膜高度卷曲和折叠大大增加了

它的表面积 [见第 270 页图]。在整个膜上,酶按照有序的相互关系进行工作。一个哺乳动物的组织细胞中可能有 50 个左右的线粒体,当它参与生物体制造活动,例如在肝脏中时可达 500 个。

威斯康星大学的戴维·格林 (David E. Green) 和他的同事们在 20 世纪 60 年代证明了氧化反应在外层膜上进行。在 NPH_2 分子上,在这些反应中俘获的电子过渡到里边。内层膜的表面积由于折叠而变大,就有可能在很大的或更大的体积范围内,在 ADP 中加入能量而使其变成 ATP。ATP 分子立即转运到外层膜,然后它们的大多数在外层膜上将能量释放出来用以合成蛋白质,其余的 ATP 分子来到细胞中需要能量的其他位置。

真核细胞的解剖学和生理学决定了几乎所有的用肉眼可以看见的以及许多太小而看不见的生物结构的基本方案。在这基本方案基础上的变种,单细胞的、自由生活的真核细胞显示出最先使列文虎克着迷的外观和行为。通过有选择地关停所有各种功能中的某一些,真核细胞组成多细胞生物,每个细胞对整体作出某一特定的贡献。

关于活细胞还有许多要研究,没有一个课题比从单细胞产生多细胞生物更重要。很久以前,研究者从动物界早期生物胚胎发育的初期观察到发生了一系列完全相同的事件。在受精卵细胞第十次分裂前后,几千个子细胞形成一个空心球体称为“囊胚”。在一边,细胞向内折起,在囊胚内形成一个空囊,称为“原肠胚”。从这一点开始分别向 33 个不同方向发展,通向从节肢动物到海绵、从脊椎动物到软体动物等一些完全不同的终点。

原肠胚折叠后细胞立即开始分化,发育成各种不同类型的组织和终末器官。例如,从一个果蝇的“成虫”上取出的细胞移植到另一个果蝇的早期胚胎上,可能会在成熟后的果蝇头上生出一条腿而不是触角。无性繁殖演示了组织细胞保持它们的物种基因的全部补体。将一个组织细胞核转移到一个去核卵中会唤醒

基因的全部能力。

分子生物学以新的方式提出胚胎发育的问题：包含在 DNA 线上的信息怎样会产生特定的三维生物体？巴塞尔大学的沃尔特·盖林 (Walter J. Gehring) 提出了这个问题，并对这个问题的解答开了一个头。他在果蝇 DNA 的一个碎片中认出一簇基因聚簇，这基因聚簇控制了许多其他基因所生成的器官的空间结构的表达。这基因聚簇中的突变会使果蝇腿长到头上触角的地方。“同源框”聚簇现在已经在寻找过的每一个生物体中都被发现了，从蠕虫到人类。显然，同源框基因以某种方法通过蛋白质合成来调整染色体中另一个位置上的基因的阻抑和启动程序表。

遗传密码和进化

每一个细胞在它的基因中携带了所有生物的共同遗产，无论它们具有从真核细胞开始或是从原核细胞开始的不同。同样的 DNA 和 RNA 根据同样的字母制造 20 种氨基酸。RNA 密码子 UUA、UUG、CUU、CUC、CUA 或 CUG 过多地将亮氨酸按字母表中的“e”编码。遗传词典中的核酸的生命力也并不更弱，参与激活它的能量转换中的 AMP 也一样。就像在词典中的拼写一样，同样结构的酶蛋白在完全不同的生物体中完成同样的任务。较简单的碳氢化合物及碳水化合物在结构中发挥更为低级的功能并且可用作燃料。

确实，这里有着共同历史和共同起源的证据。在不多几年中这种观察将是很平常的事情。到 20 世纪 70 年代中期，实验室第一次成功建立起辨认 DNA 或 RNA 链中的碱基序列的常规手续。常规工作的机械化使得排列出生物物的整个基因组中碱基的序列成为可能。到这次千年交替年代，已经完成了 6 个基因组中的碱基的测序，与千年的交替相伴随的是人类基因组的两个不完全“草图”的发表。其一是商业利益入侵的产品（在美国专利局已

收到 20 000 个以上的 DNA 序列专利的申请并已颁发了近 800 张证书),这些已成为药物学的巨大财富。另一是 20 世纪 70 年代初期开始的实验室国际合作项目的产物,这个项目由于提出将人类基因组保持在公共的领域中,并保证所有发现能立即公开发表的条件而得到基金会基金支持的公共基金投资。这个“草图”包括具有最多达 30 亿个碱基的排序以及攻克其余难题的战略计划。下一步必须将内含子从外显子中区别出来,辨别基因的身份,然后弄清它们的功能,但并不打算去研究基因对蛋白质所有的编码,有兴趣也是复杂的是,想象如在同源框中那样的基因组如何从 DNA 一维链上的编码,实现三维的生物体。

大科学企业已对人类认识做出了它的第一项重要的贡献,它现在有可能对人类基因组中基因的数目作出可信的估计:大约 30 000。这比果蝇的基因组数目更大。然而,这只是详细说明智人所需数目的一部分而已。

这个发展的经济利益意味着它已经创造了技术。“基因组学”(Genomics)将所有客观知识的力量中最可怕的力量交到人的手中。人类急切地要向自然界秩序所规定的他们的位置的意义和目的挑战,他们或许更直接地是要掌控这种力量对开放的自我管理社会的挑战。

物种起源

查尔斯·达尔文在提出自然选择表述后的极度痛苦的 30 年中,手头一直没有这种进化的证据。当时地质学家假定的地球年龄几乎不能给予存在的物种沿着不断分开和汇聚的进化路程进化所必要的时间。化石记录虽然提供了稍多有关以前已经消失的整个物种群的证据,但还不足以证明进化论。这些记录默默地躺在比威尔士寒武纪地层更老的岩石中,寒武纪地层是当时知道的保存化石的最古老的岩石。

有一段经常引用的段落，达尔文自己说明他的发现是对他的生命的历史观点最严重的挑战：

以具有无与伦比的功能的眼睛为例，它可以对不同的距离聚焦，可以调节使不同数量的光进入，会校正球面像差和色差，如果假设它是通过自然选择形成的，我坦白地承认，这看上去像是最最荒谬的。

活细胞漫长的历史解答了这个谜。现在地质学的记录提供了对达尔文来说是不可达到的时间，在这段时间内可以完成从千变万化的活细胞开始的多样化和更新。可辨别的最早的生物化石将生命的起源推前到地球历史的第一个 10 亿年末，也可能在这 10 亿年内，这时期恰当地被称为冥古代 (Hadean Period)。这时地球的引力场还正在扫拢太阳坍缩留下的和行星从中诞生的尘埃云中的瓦砾碎片 [见第 203 页和第 317 页]。

氧被排除在任何可能的最初的大气之外。氧的高度化学活性使它和地壳中其他元素紧紧地结合在一起，在地壳中它差不多占原子数目的一半。如果没有现在覆盖在上层大气的臭氧层，太阳光的高能光子能量就要毫不减弱地直达地球表面。在这个贫瘠的环境中生命开始了。

实验探究

俄国地球化学家奥巴林 (A. I. Oparin) 在 20 世纪 20 年代想说服他的同事们，他说人们关于非生物有机化学已经懂得足够多，可以在科学探究中提出生命的起源问题了。他认为，首先需要“有一个明确的边界……一个膜……一个外壳”将原始细胞和它的周围环境分开。他观察到漂浮在水上的脂会自发地形成空心的泡囊。在英格兰，霍尔丹 (J. B. S. Haldane) 和贝尔纳领会到了奥巴林的研究，并看到可能存在于原始海洋的“稀薄的热汤”中的化学资源提供了实际的可能性。海洋中不能酿造出来的东

西可能是来自地球之外。流星的轰击带来许多含碳的颗粒状陨石。在它们含碳的碎片中发现了太阳系尘埃云中有在发生引力坍缩以前合成的有机分子。

生命起源的实验探究是从哈罗德·尤里 (Harold Urey) 建议的计划开始的。20 世纪 50 年代初芝加哥大学的斯坦利·米勒 (Stanley L. Miller) 在尤里的指导下,使假设的原始大气混合物——水蒸汽,甲烷 (CH_4) 和氨 (NH_3) ——在石英管中通过一个电火花隙进行循环。经过一个星期后,容器里的水变成粉红色。水就是在这容器中被煮沸气化后进入封闭的石英管的大气中的。分析发现了溶液中同其他 5 种化合物一起的还有 5 种氨基酸。

米勒的工作激起的实验在许多实验室中一直延续到今天,从无生命中产生的生命单体的目录单不断加长。这些化合物从其他假定的最早的大气中产生出来,这种大气基本上都包含二氧化碳和氮,被认为比尤里的富氢混合物更接近原始大气。没有被遮蔽的太阳辐射被认为是引起这种合成的主要能量来源。当时地壳中含有的较高的放射性、较为温暖的地表温度,以及在骚动的、热而潮湿的大气中的闪电也为这同一种效应提供能量。难以理解的是,最早的大气稀薄但却富含二氧化碳,成为一个贮藏从微弱的太阳来的热量的温室。

这种进化的生物前化学阶段的实验没有制造出比氨基酸单体和核苷酸的亚组装件更高级的物质。肽链很容易水解,就是肽键与水结合而分解。更易和水作用的是有效的系列反应,在这系列反应中 5 个甲醛分子 (已知存在于星际空间中的一种化合物) 结合形成连接 RNA 链的一个核糖分子。奥巴林的泡囊在此地起作用了,它将脆弱的分子封闭在更为合适的溶液中。所以从烹调的意义上讲,也可以通过港湾和其他浅水中蒸发来还原稀薄的有机溶液。佛罗里达大学的西德尼·福克斯 (Sidney Fox) 于 20 世

纪 50 年代证明,通过将氨基酸溶液加热使它干燥,会产生多达 50 个单位长的聚合链。聚合作用和键的稳定性也可能因黏附在矿石表面而提高。这种表面会加强氨基酸自组织的倾向。苏塞克斯大学的约翰·梅纳德·史密斯 (John Maynard Smith) 提议用一种原始的“比萨饼”来代替霍尔丹的汤。

RNA 和“核糖-生物”

RNA 可以催化它自己的复制过程,并且 RNA 核苷酸参与能量转化和生殖等一些行为表现都表明它们是遗传分子。“只要在原始汤里恰当地贮备了基本材料、能源和催化剂”,克里斯琴·德·杜夫 (Christian de Duve) 断言,“就可以在若干年的时间中产生 RNA”。他注意到“信息可以通过能量进入”。约翰·梅纳德·史密斯用 RNA 核苷酸组成他所谓的“核糖-生物”。很快,他们又偶尔碰到“铁—硫世界”并开始建立起蛋白质化学。

无论原始生物是怎样开始的,最早的原始生物的遗传密码可能是相当简单的。有人认为少到只要有 12 个,甚至少到只有 4 个氨基酸就足以进行完全自我维持的生命过程的转换了。从非生物的物质合成这些东西都很方便,因为这些东西和被认为只能从细胞化学过程中产生的较大的、精心制作的氨基酸有很大的差别。精氨酸被过多地用 mRNA 密码子来表示,在 mRNA 的精氨酸密码子中,第三个碱基看来是完全多余的: CGU、CGA、CGC、CGG。从这 4 个看出,只要中间的碱基再加上另一个就足以表示十几种最常被用到的氨基酸。估计 50 个基因就能携带最小细胞初级的新陈代谢方案。细胞在不断增长的有机化学的精湛技巧及自然选择引进 DNA 来储存信息之前就已经进化到了相当复杂程度。DNA 可以用作经验的档案馆,要感谢它的磷酸键的高度稳定性。然而,这个优点被 RNA 多种多样的功能所抵消了。

实验一直没能重复出 RNA 核苷酸的生物前合成。莱斯利·奥格尔 (Leslie Orgel) 在索尔克研究所多年从事于这方面的努力后承认：“糖 [即核糖和脱氧核糖] 在似乎可能的条件下的形成以及它们和核苷的结合还没有成功……核苷和核苷酸的起源还是生物前合成中的主要问题。”

面临这种绝境，另有一些研究者寻找其他途径，给核苷酸以生物合成的迟到产物的地位。在共同祖先的后面，它们寻找原细胞，细胞就是从原细胞进化而来的。他们假定有共同的核糖原型之前的原始生物有其他的原始材料。纽约大学的罗伯特·夏皮罗 (Robert Shapiro) 提出，只要抛弃核苷酸，考虑一种全蛋白原细胞。复制是通过某种像小型“双手征”的蛋白质那样的物质完成的，这种“双手征”蛋白质催化 tRNA 分子和它们编码的氨基酸之间的联结。在原细胞中，这些促进物只需要能辨别被复制的蛋白质链中同样的氨基酸。

哈罗德·莫洛维兹 (Harold J. Morowitz) 从奥巴林的脂肪酸泡囊开始。膜上的“原始色素”会利用太阳光能量合成和聚集更多的膜，从这开始并且更进一步当泡囊的大小超过表面张力的作用时，就使泡囊增殖。膜的壁垒使泡囊内外成分的差别得以不断发展。在很长的时间内，这些反应小室能维持蛋白质或核苷酸化学运行。或许是对这些不同环境条件中许多次启动所作的自然选择，终于产生了共同的祖先。

即使生命的起源仍旧难以理解，但夏皮罗还是强烈要求他的同事们珍视这个探索的乐趣。“但是”，他还补充说，“我们可能比我们想象的还要更接近于答案”。

无论这是“几年中的事情”或是几千年中发生的事，生命不容置疑地出现了。不论通过怎样的途径，生命在不大于 300 000 年到 500 000 年的一段时期的最后还是出现了。地质学的记录揭示，这正是从地球冷却到足以保留液态的水的时候起直到岩石中

出现最早的生命迹象时的一段时期。

最早的化石细胞

哈佛大学的埃尔索·巴格霍恩 (Els0 Barghoorn) 和现在在加利福尼亚大学洛杉矶分校的威廉·肖普 (J. William Schopf) 根据 20 世纪 60 年代晚期化石细胞的发现, 将生命的历史推到更古老的年代, 这种化石细胞保存在南非共和国与斯威士兰之间的边界处、已详细绘制地质学地图的“无花果树”矿区中的还没有变形的古代沉积岩中。这些沉积物沉积的时间被可信地确定为 32 亿年以前, 或许更早到 33.6 亿年前。在这沉积岩的微薄透明层中, 他们辨认出棒状和球形的原核生物并伴随着可能是生物材料的线状长丝。这些显微化石的化学分析显示了对碳和氧的同位素选择性的选择, 这和不同于非生命化学的生命化学相联系。

1980 年在澳大利亚, 在西北荒漠中称为“北极”的沙漠热点附近, 肖普在另一种少见的 35 亿年前 (不过, 这个时间还不能完全确定) 的古老沉积岩中发现光合作用细菌的证据。岩石粒子结晶的日期可以确凿地断定, 但沉积岩日期却不能明确断定。在这一层中包含的看上去是无数的光合作用的蓝细菌所造成的像细丝织成的垫子状的叠层。这种叠层累积成堆。在潮汐池塘中直到今天还不会受到觅食的蛞蝓和软体动物侵害。

化石的证据回溯到地球历史的第二个 10 亿年的开始时期。澳大利亚“北极”日期的确定将会有力地支持巴格霍恩的意图, 把球形“无花果树”细菌认作光合作用“蓝—绿海藻”或蓝细菌。证据表明, 在很早的时期进化就已经跳越了一道很大的障碍。活的细胞可能生活在空气和水中。

利用太阳

由于光合作用参与制造精巧的分子器官, 最早的生物想来和

最新的人类这一类“异养生物”相同,这类生物依赖于现成的物质供应。假设它们从之产生的稀薄的热汤中富含这些现成的物质。由于它们的成功,这种异养生物的生活需求很快就超过了物质的供应。自然选择偏爱可以自己维持生命的“自养生物”。现在看来,自养生物一定在马尔萨斯危机出现以前就产生了,甚至它们可能率先出现。

生物的化石提供了这种早期的进化阶段最好的资料。遥远的祖先原核生物今天仍存活在生物界的隐蔽场所和冷僻的角落里,并且仍在所有植物的领域中继续生存着,这里的条件十分近似于它们最早出现时的环境。许多这样的古细菌在缺少现成的有机化合物的环境中制造它们自己需要的全部给养。有一类产甲烷菌,从氢——在它们从地球的引力场中逃逸之前的原始的大气中非常丰富——得到所需的能量。ATP 有点像卡尔文循环,它为葡萄糖发酵新陈代谢提供能量。今天这类繁多的“化能自养生物”对地球生态系统作出了它们的贡献。在动物的肠子中,在污水和在海洋的沉积物中,在湖泊和沼泽地中,这些地方甲烷像鬼火一样燃烧,或许最多的是在地壳深处温热、潮湿的裂缝中都有它们的踪迹。

另一类就是古细菌,生活在大陆和海底的含盐温泉中。已知有一些在 $70 \sim 75$ 的温度——哺乳动物体温的两倍左右——中大量繁殖,并且还可以在温度高到 88 时存活,但是它们在 55 时就要被“冻”死。这种适热菌利用硫还原 CO_2 , 得到能量,用于组成它们的物质的起始分子。从它们新陈代谢时,代替 H_2O 释放出来的 H_2S 将腐败的鸡蛋的气味加到从沼泽地发出的气味中。从这些后代的表现可知,最早的自养生物从无机化合物中找到了合适的能源。

当最早的细菌能够利用太阳能从大气的 CO_2 中固定碳时,它们就成为完全的自养生物。今天在喜盐的细菌中发现的捕获光

子的色素与脊椎动物视网膜中的视紫红质有关系；透过蒸发盐的盘子向天空注视，就可以看见粉红的颜色。蓝细菌的出现使生物界向着从现成的有机或无机的必需品的定域供应解放出来前进了一大步。在它们有生命的后代的光合器中，早期的叶绿素利用光系统Ⅱ进行光合磷酸化，就像植物所做的那样，最早的先驱者用 H_2S 来代替 H_2O 以提供必需的电子。这些革新者的后代仍旧繁荣地生长着，它们在富硫并缺氧的环境中开动不生氧的光合作用。

最后，它们通过光系统Ⅱ将空气和水都翻了个身以后，蓝细菌如所预料地占领了整个植物界。它们输出的氧首先被容量大的氧库，像硫化物气体和铁等保护起来，在大气中和海水中的氧极容易和这些物质化合。长时间内，它们在它们自己的细胞质中发展了自由氧的酶阱。另一类生物在它们产生的氧的压力下随时调整它们本身。在这种适应的过程中，有一些变成了厌氧发酵的新陈代谢产物的需氧新陈代谢。今天原核生物在进行多种需氧新陈代谢，当然还有更多种类的厌氧新陈代谢。

在克雷布斯循环中，每克分子葡萄糖产生 36 个 ATP 而不是只产生 2 个，需氧新陈代谢在全世界盛行起来。它们的厌氧的前辈消失了，或许这是所有已消亡的事件中消灭得最彻底的，或者已退却到它们现在占据的生态位中。在下一个 10 亿年中，通过捕获和转化太阳能，需氧菌——自养生物和异养生物——以其最初的生物圈覆盖了整个地球。在所有大陆上，蓝细菌和它们的叠层石出现在 25 亿年以前的沉积岩中。

进化中的共生

生物的化石再次告诉我们进化过程中下一个巨大转变。这些化石是两种关键的能量转化细胞器，从这些细胞器和细胞核本身辨明这是真核细胞。叶绿体和线粒体各留下了它们自己的痕

迹,但积极主动的遗传器官是 :DNA、RNA、核糖体、卟啉、传递电子的分子以及转录和转译的酶。在各个情况中,保留的遗传器官在其“宿主”细胞里面的细胞器的复制中起作用。细胞器的后代在细胞分裂时被下一代所继承。

在 20 世纪 80 年代,在从分子生物学得到令人信服的证据的很早之前,有几位细胞生物学家猜测,叶绿体和线粒体可能一度是独立生活的生物。这些细胞器都包装在它们自己的膜中,这就足以让它们独立生活了。

这一证据表示真核生物的进化绕过冗长的遗传突变进程走了捷径。有人提出这些细胞器通过进入祖先的原核细胞成为相互支持的原核生物共生群集,经过很长时间后变成真核细胞。这种包含许多不同种类相互依赖的群集今天在原核生物中也被观察到,譬如在土壤细菌群落中和一些异常的地方,如节肢动物和脊椎动物的消化道中。在原核生物亲密共生的群集中也发现了真核生物。

关于真核细胞是嵌合体——像狮身人头的司芬克斯或半人半马的怪兽那样的、两种或多种不同生物的融合——这一假设,在波士顿大学待了很长时间,现在在马萨诸塞大学阿姆赫斯特分校的玲·马格里斯(Lynn Margulis),作出了有洞察力和有说服力的贡献。“有细胞核的细胞起源的连续内共生说”占去了她的全部职业生涯。没有人比她知道更多有关看不见的原核生物和真核原生生物界(protoctista),它包括许多种类的单细胞和多细胞的真核生物。她还精通地球的自然史。在它们各自独立的和联合的群落中,她鉴别出共生群落的演员及发展的情节,这保证了进化加速的意见成为共识。

马格里斯指着地衣:一种光合作用的蓝细菌或绿色水藻,一种真核生物,和真菌细胞的丝状体组成一群;它们一起形成新的更为复杂的生物。多到 10 000 种的地衣证明了这种群落的出现

的频率和优势。更多这种群集在珊瑚礁中繁荣生长着——一直到现在还生长着。在这里,珊瑚虫和光合作用真核原生生物共生的动物构成了整个海洋群落。

对今天地球上的生活至关重要的是土壤细菌的根瘤科和豆科植物之间的共生关系。和许多蓝细菌及某些芽孢杆菌一样,根瘤菌从空气中将氮固定在有机化合物中。没有真核细胞具有产生这种酶化学的能力。工业上从大气中固定氮需要300个大气压和500 的温度范围。这是根瘤酶系统特有的能力,豆科植物的根须从土壤中将根瘤菌吸引到它们的细胞壁里面,“受到感染”形成小瘤。根瘤菌转化成巨大的固氮细胞,为整个植物提供氮化合物,并通过土壤供应给不能和根瘤菌组成共生群集的植物。豆科植物与其他植物和固氮细菌的共生群集,和固氮细菌一同加强了每一生态系统:没有有机地固定氮就没有蛋白质!

马格里斯在白蚁后肠里面小的群落中发现了引起线粒体进化的一种共生群集的直接证据。在那里,大量不同的种类的真核原生生物的细胞有细胞核但缺少线粒体,这可看作不同种类的细菌的整个群落。第一个印象是,寄居生物中有一些看上去就像线粒体,而它们中有一些帮助它们的寄主在局部低氧供应的条件下存活。多核变形虫(*pelomyxa palustris*),一种大的居住在沼泽地的多核的真核生物,和3种不同的内在化的细菌共生,这3种细菌中的两种是产烷生物。可以杀死共生生物的抗生素也能杀死这种原生生物。马格里斯引证一个靠得如此近的群集,可以当作单个细菌,并且还有一个名字叫欧密利安斯基甲烷芽孢杆菌(*methanobacillus omelianski*)。现在知道它是一个生活在一起的细菌群集,它将氢和二氧化碳作为废物排出,一种叫甲烷芽孢杆菌(*methanobacillus*)的在其新陈代谢中吸收二氧化碳和氢,排出甲烷。

细胞核的起源

当然，正是膜包围着的细胞核和参与其复制的细胞器——植物和动物细胞的有丝分裂纺锤体中的最为精巧——将真核细胞与原核细胞区别开来。对于这种细胞器系统的起源，共生群集没有为它自己提供现成的模型。马格里斯和她的同事们直到最近才辨认出表现出关键性转折情节的活化石。他们提出，古细菌和真细菌的共生融合为真核生物系打下了基础。

两种细菌的区别来自宿主细菌的核糖体 RNA 的碱基序列，这是伊利诺斯大学的卡尔·沃斯 (Carl R. Woese) 指出的。他证明了这两个原核生物的世系“互相之间并不比它们和真核细胞之间更加相像。”“古细菌”(Archaebacteria) 是他用的词，其中包含明显自养的产烷生物以及喜盐、喜酸的细菌，它们在近似于它发源的冥古代世界的环境中一直坚持到今天。根据细菌家系的这种分裂，沃斯进一步断言：“地球上实际上有 3 种生物原始种系发育的群集而不是两种。”马格里斯坚持只有两种：原核生物和它们的后代真核生物，这样得到生物的 4 个新的界 (kingdom)，加上植物界总共有 5 个界^①。她给予古细菌以祖先细菌亚界的地位。

马格里斯接受了沃斯的古细菌—真细菌的区别，她提出真核生物从古细菌继承了蛋白质合成的酶的基因，从真细菌继承了微管的内部和外部游动性系统——在植物和动物细胞中显然是有丝分裂纺锤体 [见第 286 页图]。古细胞作出的贡献在安大略马克马斯特大学的古普塔 (R. S. Gupta) 的有关蛋白质中氨基酸序列的研究工作中完全被证实了。古普塔序列进一步证实了真细菌作出的贡献，虽然他并没有赞同马格里斯以游动的波动螺旋体

^① 译注：生物的 5 个界是：原核生物界、真核原生物界、真菌界、植物界和动物界。

科作为命名。

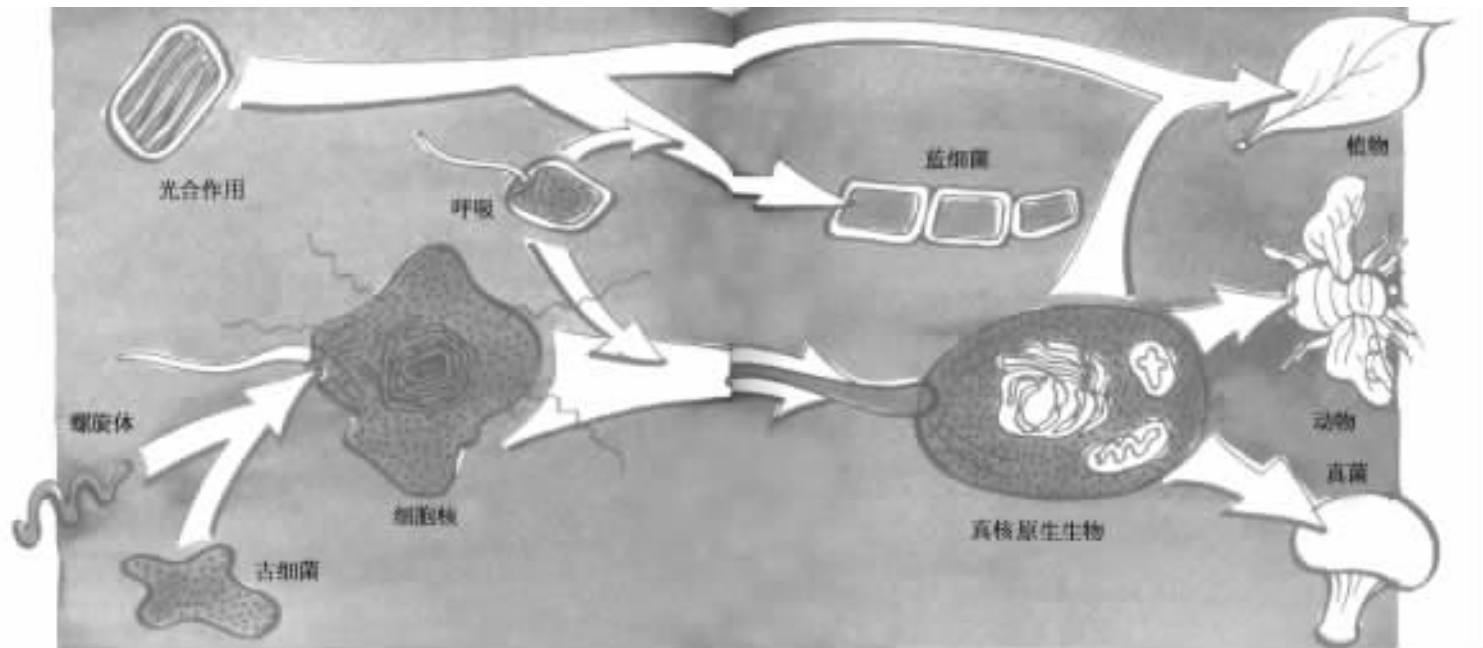
马格里斯情节中的古细胞没有保护它的柔韧膜的壁。万能的自养生物生活在——像它今天的后代那样——温暖的、酸性的、并且含硫的水中。它们在那里可以利用硫或氧（假定局部浓度不超过 5%）作为最终的电子受主，形成 H_2S 或 H_2O 。真细菌的螺旋体是一种厌氧的异养生物，它需要 H_2S 并避开氧。它的发酵新陈代谢的回报是产生富碳的生成物和它的同伴所需要的元素硫。螺旋体的波动足帮助它的同伴离开高浓度的氧并向着供应碳的地点游动。两种生物长时间的融合因古细胞没有细胞壁而更为方便。当同伴的 DNA 合并到在形成的细胞核中时，螺旋体就消失了。显然，如此多的真核细胞的波动足和纤毛以及有丝分裂纺锤体是它以前存在的最好证据。

今天，世界上至少在从内西伯利亚到千岛群岛到新几内亚的 6 个矿泉的微生物菌落中隐蔽枝硫菌 (*Thiodendron latens*) 的样本非常丰富。“枝硫菌 *thiodendron*”这个名称叫人联想起它的推进系统是长纤维状的细丝，意味着这是一种生物。经过仔细观察，发现这个物种已经从名单上划去了。这是脱硫菌 (*Desulfobacter*) 的共生群集，它代替了马格里斯的古细菌的方案，是一个大到足以用肉眼可以看见的螺旋体。马格里斯从生活在更为险恶的环境的同伴中寻找古细菌的群集。

伙伴之间逐渐的融合显示在 20 多个被归类为古单细胞真核生物 (*archaeoproctista*)^① 的多种真核生物中。这些古老的真核细胞中没有一个是包含线粒体。其螺旋体伙伴变成鞭毛（希腊文



① 译注：proctista 是单细胞真核生物。archaeoproctista 译作古单细胞真核生物。



真核细胞源自原核细胞的共生,从有螺旋体的古细菌共生群集开始[左下角]。螺旋体对古细菌首先提供物资,其次是游动性。扩展的群集引起它们遗传机件在细胞核内融合,螺旋体成为协调染色体复制的有丝分裂纺锤体以及某些情况下作为运动器官的波动足和许多真核生物中的纤毛。这种群丛在活的生物向完全融合过渡的各个阶段中都被观察到了[见第 287 页]。有核的真核细胞后来从含有需氧细菌的共生群集中获得引起呼吸的线粒体。动物界和真菌界直接从各种各样的真核原生生物中出现,并从真核原生生物和光合作用细胞的群集中产生出了植物界。蓝细菌同样出自光合作用细菌和含有需氧新陈代谢细菌的共生群集。

细胞鞭),就是嵌合体的推进细胞器[第 285 页插图]。在许多这种很显然是比较早的生物中,鞭毛连接到两个同伴都贡献出它们的基因的细胞核上。在细胞分裂的时候,这个“核鞭毛”(karyomastigont)作为一个单位进行复制,和螺旋体的残余起着类似于被复制的核鞭毛的分离过程中微管机件的作用。显然较在其他晚些时候的生物中,细胞核和鞭毛分离开来,从螺旋体线继承下来的细管开始发挥其他的功能,包括染色体的对称分裂。大约经过几百万年,在组成真菌、植物和动物的细胞中,从鞭毛系统不断进化成有丝分裂纺锤体。

无论是作为真核原生生物或是动物和植物的专门组织的细胞,真核细胞的细胞膜上伸出的纤毛和波动足的结构都证明了早期共同祖先的进化中这类事件曾经发生过。有丝分裂纺锤体和祖先的鞭毛的联系可由中心体的结构所确定,看得出纺锤体的细管就是从中心体辐射出来的。它的截面和发动推动系统的细管的动体相同。中心体在一些细胞中好像有双重职责:它还用作完成细胞分裂波动足的动体。

对于由一束线形染色体箍住的原核细胞单个类核的移动过程,还没有看清楚它的细节。显然,自然选择喜欢将收集的遗传信息有条理地归档。梅纳德·史密斯提出,真核细胞从原核细胞的生活方式分离的过程中的时间是实质问题。基因在闭环位置上的有自由端的染色体上的排列有利于更有效地利用时间。在所有好像都有同样 DNA 的染色体上,复制酶“读出”DNA 序列的有效速率是相同的。在单个原核细胞环上需要大约 20 分钟。在同样的 20 分钟内,对真核细胞的核内的染色体可以进行多次读出。真核细胞可以在有限的生命中复制多得多的遗传信息容量。

在真核细胞的染色体中内含子的存在意味着复染色体排列提供的容量被浪费了。它意味着还有排列的另一种优点。有一些证据和推测认为在真核细胞品系的遥远过去,因病毒感染而装

上了内含子。RNA 病毒就这样把它们的身分转录到 DNA 碱基中,抢劫它们宿主的财产,在真核细胞受到感染后存活了下来,而病毒的残余成为杂质被保留下来。这种侵入在原核细胞的单链中被毁灭掉,没有留下痕迹。在各种情况下都表现出内含子有某种功能,它控制编码在外显子中的遗传信息。它们可以通过盘绕和展开,在不用的时候让外显子贮藏起来不发生作用,需要的时候使它们显露出来发挥作用。

在原核细胞环的位置上染色体束是打开的,至少在结构上如此,可以加上和减去染色体。这样的安排便于使两种生物在它们共生群集进程中的基因融合。然而,进化并不是为所追求的长远目标所驱动,而是被眼前可选择的利益所驱动。更深入地研究列文虎克的微小动物将会告诉你这个故事。大部分还没有被勘查过的真核原生生物界肯定会给出线索并令你惊奇。

线粒体在许多古老的核鞭毛体品系中不存在。然而,有一些已经得到这种产生能量的细胞器。下一步在成列的内共生现象中的情节在真核细胞和需氧细菌异养生物的共生群集中有许多活的模型。为在细胞中安置叶绿体,注定要创造出海藻类真核原生生物以及从它们进化出来的植物界,有生命的模型依次演出它们各自的剧目。

有丝分裂和减数分裂

大家都一致同意,有性生殖的进化一定是按照由哈佛大学的克利夫兰(L. R. Cleveland)首先提出的方式进行的,最先出现的是带着一组染色体的细胞。然后像现在这样,在贫瘠的环境中细胞吞吃同类。这样存活下来的后代常常带有两组染色体。两组染色体可能由于染色体加倍而无法进行有丝分裂,而染色体加倍在某些情况中被证明是有益的事件。在某些物种中,各有单独一组染色体的两个细胞融合是从无性生殖转变为有性生殖的第一

步。染色体倍增以及有丝分裂,接着就产生两个各有两组染色体的细胞。此后,这两个细胞通过有丝分裂得到 4 个后代,每个都只有一组染色体。来自两个第二代的这种分裂结果的 4 组染色体将带有第一代两个祖代细胞给予的基因的不同样式配合 [见第 290 页图]。

在植物和动物——包括人类——所有的有性生殖中,卵细胞和精子细胞是有丝分裂的产物;各有一组染色体。卵和精子结合产生“合子”(或称受精卵),它被赋予两组染色体,各来自它的双亲。根据孟德尔定律,此后,亲本基因的表达保证了没有两个个体(除了同卵双生双胞胎,来自合子分裂成多细胞开始时的第一次分裂)会有同样的一组基因。种群中各种遗传特性相应地显露在表达自然选择的多样性中。从这些变异的来源,进化加速地——生命历史 35 亿年的最后 $1/5$ ——产生了现在极其多样的地球生态系统。

原核生物不喜欢有性遗传带来的好处。然而,它们以各种方式共享并交换基因。基因交换通过接触进行,就是两个细菌“接合生殖”;通过噬菌体的运输,通过病毒对细胞的感染将基因从一个细菌带到另一个细菌中;并且还不断地将遗传分子泄漏到集群的流动环境中。

细菌基因交换

在 20 世纪 50 年代早期,乔舒亚·莱德堡 (Joshua Lederberg) 在威斯康辛大学演示了种群的遗传资源中多样性的优点。他用一片无菌的天鹅绒布片挤压培养平板上的菌落以采集样品。然后将这样品贴在含有抗生素的培养基上,结果样品中只有少数几个菌落存活。从原先的平板上同一菌落分离出来的细菌在被抗生素毒化的培养基上也产生出后代,这证实了原来的种群在暴露到这种强力的选择剂之前就已经存在能抵制抗生素的基因或一

组基因。这种性质一直没有表现出来,直到抗生素选择出耐抗生素品系变成种群,例如人类种群同样面临随意开出抗生素处方的问题。相反,已经证明,没有遇到选择物的种群的某一特性经过许多代以后会减少。不过基因始终蛰伏在种群的遗传资源中。更早一些,莱德堡在耶鲁和塔特姆一同工作的时候就证明了细菌的基因一定以真核细胞的染色体同样有组织的序列样式挂在细菌质粒上,无论这种细菌是多么成熟。由此可以进行由细菌之间基因的原性生殖的交换所保证的分类和重组。

蒙特利尔大学的索兰·索内 (Sorin Sonea) 争辩道,细菌在它们盛行的遗传杂交中不存在有断然区别的物种,只形成连续地逐渐变化的单个物种。细菌学家可以提出的最好物种的定义是要



真核细胞基因在有丝分裂中被传送,通过将两组染色体加倍 [上左图],每一个后代细胞中都分到两组。有丝分裂支配组织细胞和真核原生动物的生殖。减数分裂通过从每一亲本运送一组染色体到卵或精子来进行有性生殖;它们的结合将两个亲本染色体组合起来 [见第 289 页]。细菌通过接合作用交换基因 [下左图],间接地通过病毒传递 [中图] 以及随机地通过流动的环境传递。

拥有共同性质的 85%。这不是一个持久不变的差别,并且肯定不能定义真核细胞超界中的“物种”。索内提出把细菌看作是一种遍及全球的超个体。他观察到,一个细菌是“不完全的生物”,它的存在依赖于局部生态系统中聚集的细菌“嵌合体”所提供的相互支持。

物理学限制了单个细胞的大小。几何学证明,体积按半径的立方增加,而表面积按半径平方增加。细胞内部包含的物质很快超过了可以从外面扩散进来的物质的最高限度,最先是氧。多细胞组成的生物,最适当的但仍是微观大小的细胞可以在宏观尺度上协同作用。线度的增大就要求各专门组织中细胞分化。反之,组织的分化引起整个动物生命形式的分化。现代存在拥有的生命形式的多样性高峰只在当今时代才达到,它和蓝鲸大小的峰值同时到达。

多细胞使生物变大

在巨大的生物——比较而言,其中也可以算上人类——中,在功能上联系外部世界的许多细胞的表面和它们的体积保持同步变化。肺通过肺泡展开巨大的表面积便于气体交换;肺泡是如此的小,它的表面张力使它们在呼吸的排气时缩小。肠道的卷绕折叠和绒毛使暴露的表面增大许多倍,便于一个分子一个分子地吸收营养物。支持生物体其余部分组织中的辛勤工作的细胞与单独存在的细胞相比,体积和暴露在外部世界中的面积比例相同。

近代自然史提供了多细胞生物开始的许多种模型。从单细胞的阿米巴到它的后代,由许多细胞组成的粘菌,这是看上去好像蛞蝓或者赤裸的蜗牛爬在湿润的树林中潮湿的表面上的一大团细胞。在它们的协同存在中,好像一种超生物那样整体一起运动。当它们生命循环需要的时候,它们会黏连长成一根竿子,从主要菌落往上爬。在竿顶上,一些细胞形成子实体,孢子从这里

散开建立新的菌落。菌落中任何一个细胞都可以生长成一个菌落,其中有一些成员会分化形成子实体和孢子。某种粘细菌演出同样的生命循环,在潮湿的土壤中生长,像独立生物个体一样运动并产生子实体,从子实体中分散出成千上万的细菌后代。在叠层石的垫子上,有细丝的蓝细菌从很早以前就已经表现出某种应当把它看作宏观多细胞生物的特性,它有细胞的分化并且编排了细胞死亡的程序。

马格里斯引证集群藻类的团藻(volvocine)群作为展示多细胞生物发展的一系列步骤,从相同细胞的空心球到细胞分化成专门用于特定功能的生物体。在这一群中最基本的是不同种的性原细胞,它们形成4~32个无性系细胞的盘,被一种明胶黏在一起。它们同步搏动的纤毛推动共有的身体四处活动。任何一个细胞都可以形成一个新的菌落。

团藻本身是一个500~600 000个细胞的空心球,这个数目依赖于物种。在这些物种中真正的多细胞生物特有的性质开始出现了。只有某些细胞仍旧能够独立生存和繁殖。另一些细胞则交出它们所带的基因的全部能力,专门表达遗传内容的某些特性,这种特性为整个生物的生命作出贡献。在某些物种中,如在一个别的团藻中的生殖细胞专门化成为卵和精子。它们的融合导致球形生物中所有细胞共有的特性的交流。这些成为整个生物特性的孟德尔杂交,整个生物成为生殖的一个单位。

就是这种真核细胞品系在进化的创造中使多种的可能性得以实现。这可以在广大的真核细胞帝国的4大界中看到。真核细胞从基础的真核原生生物界开始,进化到真菌界、植物界和动物界,它们在看得见的世界中宣告它们的存在。无论如何,它们的存在仍旧依靠古代原核生物的生命过程,原核生物在地球上的生物量仍然超过了动物、植物和真菌。

第六章

地球的历史和生命的进化

漫长的 6 000 年变成一只厨房钟

拉尔夫·瓦尔多·爱默生 (Ralph Waldo Emerson)

“阿波罗号”上的宇航员在 20 世纪 60 年代拍摄到照相上的地球,看上去,如阿奇博尔德·麦克利什 (Archibald MacLeish) ①说的,在黑洞洞的太空中显得“很小,是蓝色和美丽的”。到那个时候,地球的 45 亿年历史中至少有 35 亿年有生命在活动。活的生物改造了地球以适合它们自己的生存。照相显示出它们的创造:包围地球的“生物圈”的蓝色美丽的大气。

地球上偶然的环境组合——地球的大小和成分以及它和一颗有恰当的辐射的恒星之间的距离——使得原子有可能以高度有机的方式装配起来。宇宙中大多数原子的电子都被剥光了,并且由于引力作用克服了它们在恒星的高温等离子体中的强烈相互排斥而聚集到一起。在离太阳 150 百万千米的地球上,已从它引力坍缩时的高温冷却到原子的电子壳层能够保持完整。轻元

① 译注:阿奇博尔德·麦克利什 (1892—1982 年),美国文学家,发表过许多诗集、散文集和剧本。第二次世界大战时期任职政府机构。曾作为美国代表参加联合国教科文组织的领导工作。

素——氢、氧和氮，在 75K 以上都是气体——被引力约束在它们的逃逸速度以下。氢和氧相互吸引，自组织成为水。在地球早期历史上，水里面的轻元素加上碳总共 3 种元素组合成巨大的能自我复制的分子。不久之后，这种分子又组织成能自己活动、自我复制的活细胞。

在 10 亿年中，地球被笼罩在最早的生物圈中。当时的活细胞由多种物质所合成，这种物质除了由从空气和水中得到的 4 种元素所组成以外，还有从地壳中得来的元素多达 24 种。生命成为地质力。俄国“地生物学家”弗拉基米尔·魏纳德斯基 (Vladimir I. Vernadsky) 早在 20 世纪初就杜撰出“生物圈”这个词，他把生命称作“最强有力的地质力”。地球历史经历了 45 亿年到了今天，陆地上见到的绝大多数岩石都曾经被魏纳德斯基所说的“过去的生物圈”中的活细胞处理过。

如果地球本身在地质学上不是有活力的话，生命就不可能以如此方式宣告它们的存在。生命在 35 亿年骚动的地球历史中进化。只到最近的半个世纪，通向这段历史的大门才被打开。直到这个时候，人们才认识到地球表面上尺度大到大洲和大洋那么大范围的地形特征。

有一座山峦起伏的山脉，绵延 75 000 千米，差不多可以绕地球两圈。它一直没有被发现，因为它是从大洋底部升起的。山脉被峭壁峡谷劈开并以经常发生地震为其特征。海洋中处处都有火山喷发，温泉喷射出一股股冒着烟雾的富含硫磺的过热水。

海底劈裂的山脉表现出了新近认识到的地质力对地球表面上的作用。这种力来自脆性的地壳下面地幔深处的可塑性岩石受热驱动的对流——一种缓慢的沸腾。这种力的水平作用协同引力的垂直作用制造并再造出世界地图。在漫长的过去年代中，地幔岩石中的对流单体上下翻动沿地球表面拖曳着大陆通过各种纬度，并将它们组合成超大陆，然后再将它们拆散，在这循环过

程中将海洋封闭又打开。

在这近 30 亿年的历史中,细菌的存在产生越来越大的威力。它们复制的链式反应在不到 1 个小时的时间内就能完成一次循环,带着生命的地质力充满全世界的海洋。每个细胞每秒钟能接上 100 万个肽键,每个键有 3.2 eV 能量,这大大加速了地球上能量的周转。魏纳德斯基和他的同事们将有生命的各群落的自由能比作熔融的熔岩流在温度较低的但更大的空间范围中散布。有选择地结合来自大气、水和岩石中的元素,各种专门化的并相互支持的细菌生态系统将重新构成的地球上的物质分散到海底的沉积物中。最近认识到的周期性的周转和地壳的更新表明,这种生态系统促进岩石的花岗岩化以及大陆的建成。当时地球上海洋的细菌生态系统吸收太阳的能量并依靠氧的化学亲和力,开始重组大气,将地球包裹在它的第一个生物圈中。或许在 15 亿年以前,原核生物通过共生产生了真核细胞。舞台已为新的生物各界的精巧作品——植物界、动物界和真菌界——安排好让它们征服大陆并在最近半个世纪内重写了历史。

板块构造

世界地图上海脊和地震的分布描绘出现在地幔中周转的对流单体的边界。地壳沿着这些边界断裂成 8 个“构造板块”。在对流单体活跃的地方,譬如在中大西洋下面,它们协同向上滚动,抬起并劈断了洋底。熔岩从地幔向上流入裂缝。当新的岩石冻结到山脊两面的地壳中时,对流单体水平方向的回流将构造板块拖离山脊。

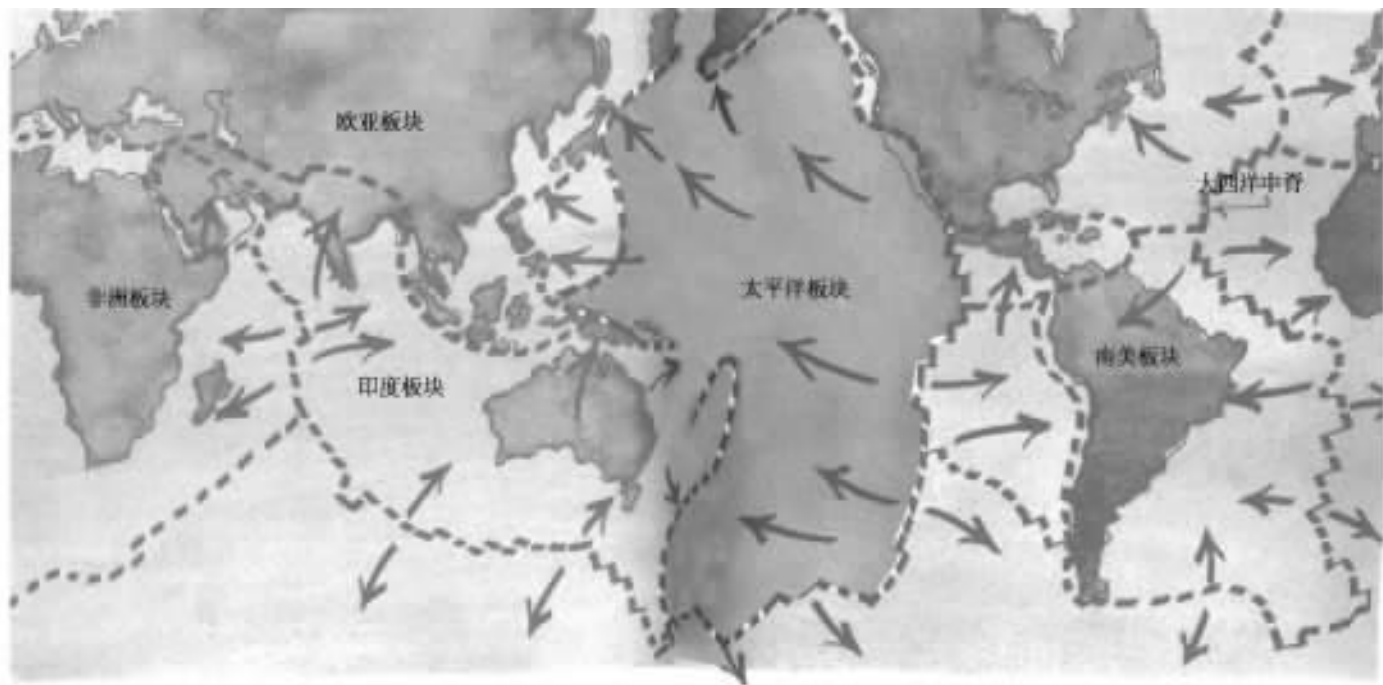
就像巨大的木筏,这些构造板块漂浮在塑性的地幔上。其中有 6 个花岗岩的大陆壳和密度大而薄的玄武岩洋底壳的板块连接在一起浮动。上面没有载着大陆的两个洋底壳板块位于浩瀚的太平洋下面。在一个板块上的大陆壳和另一板块上的洋底壳

相撞,例如,沿着北美和南美的太平洋海岸,大陆壳压到洋底壳上面。在这些边缘很深的沟中,洋底壳插入地幔,在那里熔化,抵消并平衡洋中脊上岩石的增加 [见第 297 页、第 298 页图。]

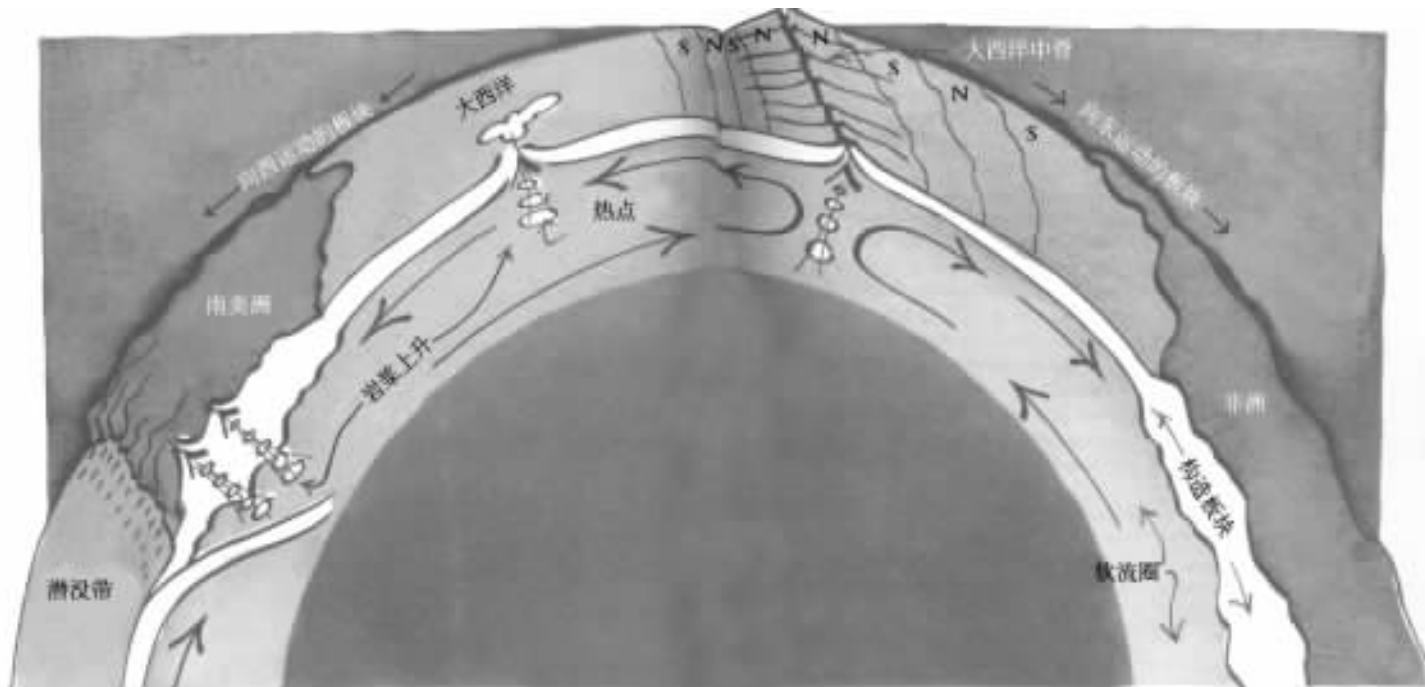
地震是洋底壳沿陡峭的斜坡向内部越来越深处下降的信号。600 千米至 700 千米深度是最深的地震源的位置,下降的板块到这里不再是固体状态。在那里的热和压力下地壳和海底沉积物在岩浆中熔化,这种岩浆比周围地幔还更热。岩浆中由于加进了从生物圈来的岩屑中较轻的元素也变得比较轻。它通过地幔和陆壳的裂缝上升。火山和熔融的花岗岩的“深成”侵入岩构成了巨大的连绵不断的山脉,它几乎不间断地从阿拉斯加一直延伸到火地岛。

地壳——地球的岩石圈——就这样循环翻腾,好像地球的大气圈和水圈那样。大气通过活的生物组织保持了大气中氧的 21% ;二氧化碳的含量接近于能产生温室效应的 0.03% ,以调节从太阳得到的热量的流进和流出。水文学的循环将水从海洋升举到大陆的上空,再冲刷大陆流入海洋。地壳的循环将大陆上的坡积物和聚集在海洋沉积物中生物圈的岩屑带到地幔深处。在岩浆中重新组合后,这些材料再回到火山和山脉的大陆壳中,这些山脉就是从大洋沟中升起的岛屿。

在过去的 2 亿年中,最后的超大陆——即泛古陆,它由北半球的劳亚古陆和冈瓦纳大陆连在一起所形成——的解体造成大西洋和印度洋不断地变宽 [见 297 页图]。劳伦高原 (北美洲) 和欧亚板块都曾经在劳亚古陆上连在一起,现在从大西洋中脊向两边以大约每年 2 厘米的速率互相分离。在南大西洋中,扩展着的海底同样将曾经在冈瓦纳大陆上联结在一起的非洲和南美洲海岸线分开。印度洋的开启将印度、非洲和澳大利亚等冈瓦纳大陆的碎片向北推动远离南极洲。



海底山脊和构造板块表示出易碎的地壳下面塑性的地幔中对流单体的周转,地壳在过去 30 亿年中不断地将大陆组合起来又将它破坏,将海洋打开又封闭。遍及全球的板块向远离海脊的方向运动。在北美这样的大板块中,厚厚的大陆壳拖着薄的洋底壳的后缘运动 [见第 296 页]。在它们的西边,北美和南美板块压到洋底壳上面,这些板块在大陆下面深处潜没和熔化,使得从火地岛到阿拉斯加的山脉升起。华盛顿州圣海伦山 1980 年的喷发就是这种活动的证据。围绕着太平洋的西面,火山活动和地震的另半个“火环”标志着欧亚板块下面的大太平洋板块以及其他洋底板块正在下降,从新西兰到阿留申群岛的弧形列岛和群岛就从这洋底板块上兴起 [见第 299 页]。



大西洋中脊处对流单体的上翻流在地壳上增加了新的岩石，带走背负大陆的构造板块并使大洋加宽 [见第 296 页]。厚的大陆壳下面的软流圈和薄的洋底壳下面的软流圈之间的热梯度引起底部白热的地幔岩石向洋中蠕动并向上翻起，举起地壳并使它断裂。对流单体上部的水平回流，将构造板块向两个方向带离山脊。山脊中新岩石的增加被太平洋板块向大陆下面地幔深处下降所抵消。洋底壳以及其中掺杂着来自生物圈的含有大量轻元素的沉积物在那里熔化。由此可知，生命过程对南美和北美太平洋沿岸伸展的连绵的山脉中返回地表的岩石的“花岗岩化”作出了贡献 [见第 299 页]。岩石圈经历的循环周转和大气圈和水圈的循环相类似。

这些背负大陆的板块的运动使太平洋从各个方面向里缩小。围绕着太平洋,活火山和反复发生的地震——“火环”——表示大陆板块的侵入及海洋板块的水下碰撞。在太平洋西面,这种广泛的活动可以用从地图上南极洲到阿拉斯加的弧形列岛和火山岛形成的一条链描绘出来:新西兰群岛、波利尼西亚和密克罗尼西亚弧形列岛、印度尼西亚、菲律宾和日本群岛、堪察加半岛和阿留申弧形列岛。



喜马拉雅山脉和高加索山脉,还有更往西的阿尔卑斯山脉和比利牛斯山脉,这些都是因大陆壳和大陆壳之间碰撞而向上冒出来的。印度洋的正在伸展开来的海底将印度次大陆向青藏高原挤压。巨大的欧亚板块南部下面较小的板块的下降使喜马拉雅山脉向上隆起。浅的地中海和黑海是被向北运动的非洲板块填塞的古代海洋的残迹。比利牛斯山脉、阿尔卑斯山脉和高加索块状山的断层是非洲和欧亚板块接缝的位置。

阿巴拉契亚山脉和乌拉尔山脉证实了泛古陆的集合体中较早时期大陆板块的碰撞。在从那时起的漫长历史中,冰川作用以及更多侵蚀的连续过程将以前曾经是很高的山脉轮廓变平坦。

另一种造山作用的模型是夏威夷岛的海山。这种海山从地

幔中的“热点”上升到海平面以上。熔融地幔的热柱向上挤压海底造成周期性喷发的火山[见第 299 页插图]。从东南方向指向西北方向——太平洋板块漂移的方向——许多岛屿沿着热点上面板块的海峡排列。在链条的前面,淹没在水中的海山是过去事件的见证。沿着这条岛屿链,最大的、上面的火山还在活动的夏威夷岛是最年轻的。

可以对描绘大陆和海洋以及它们地形的地图作出上述这种令人惊奇的解释。板块结构理论的局部的、描述性的地质科学提出了世界范围内可预言的普遍理论。它不仅解决了全球性的问题,也解决了曾经困扰科学的局部的难题。只靠引力本身从来不能满意地解释地槽的形成。这种深处沉积岩中水平方向挤压产生的褶皱在建造通过美国东部大陆的州际公路系统的时候,由于开挖得很深而曝露出来。现在得知,这些地层是离岸的大陆沉积物,这些沉积物是在 250 百万年以前与泛古陆组块中的欧亚大陆和非洲大陆碰撞时重新褶皱、向上隆起升高到大陆上面的。在这里,和岩石结合在一起暴露在视野中的是魏纳德斯基的过去的生物圈。

对地球历史的新认识将地球历史和生命的进化统一在一个总的编年史中。太阳光温暖了地球,但只在浅表上。地球本身的热维持了生命并推动对流单体翻腾。这是行星引力坍缩产生的热[见第 203 页和第 317 页]。岩石的低热导率使热量在极长的时期内从内部深处缓慢而稳定地增加。在上部地幔中的,更多是在大陆壳中分凝出来的长寿命的放射性元素的衰变也作出了它们的贡献。在这些元素的第一个组合半衰期内贡献较大,这是太阳光还很弱的第一个 10 亿年。从地球内部来的热将足以维持地球上的生命,直到太阳转到红巨星的演变轨道上[见第 169 页]。

现在辨认出的最早的地球岩石是在南格陵兰岛的伊苏阿(Isua)发现的可上溯到 38 亿年前形成的岩石。月亮上的岩石是 46 亿年以前开始形成的。从太阳消耗氢燃料的速率证实,有生

命支持的地球还有它前面的一半历史。

按照惯例,我们将新发现的漫长的过去分为 3 个时间段。最近的是显生宙(可以见到生命),从 5.7 亿年前开始至今,这段时期发生了许多重要的事件。在这前面的 40 亿年可以平均地也有些随意地划分为元古代(较早的生命)和太古代(原始的)。直到最近半个世纪,这几十亿年都是空白。甚至放射性测定岩石年代的方法还不能确定它们经过了多少时间。只到最近才开始查出极为稀少的化石记录。解读岩石中生物地球化学的记录的工作也才刚刚开始。

最早的生命迹象

很久以前构造的周转抹去或深深掩埋了地球的最初地壳。伊苏阿的岩石中已经有了生命的迹象。这种岩石是大面积的沉积地层,这几乎是这样年龄的、还没有发生完全变质的唯一的岩石。沉积物表明大气和水圈已经使陆壳受到侵蚀。细颗粒的、富含氧化铁的红色岩石的地层和更纯的石英的硅酸盐颗粒地层交替安置。“条带状铁建造”表示还有某种别的东西。世界别的地方历史较晚的这类地层反映了光合作用维持的生命的局部群落季节性的盛衰。伊苏阿地层中生物发生的确认表示在地球历史的第一个 10 亿年内生命就已开始了。

从别的地方得到的生命证据给出的开始时间稍晚一些。在澳大利亚的“北极”位置,产生生命迹象的年代可追溯到 35 亿年前,在非洲的“无花果树”矿区的沉积岩追溯到 33 亿年前[见第 279 页]。不久之后,原核生物的群体建立了局部的生态系统。遍布于全世界的 25 亿年前的古老岩石中,生命在化石细胞以及在蓝细菌群落的称为叠层石的大化石中留下了它存在的确凿证据。

进而言之,太古代晚期的沉积物中记录了还没有完全编入目录的原核细胞生物化学的多样和精巧。正像一位生物圈演化的

早期研究者、加利福尼亚大学圣巴巴拉分校的普雷斯頓·克勞德觀察到的：“一旦生命在地球上出現，地球化學記錄再也不會相同了。”細菌從岩石中溶解出或從溶解在水中的物質中得到像硫、磷、鈉、鉀、鐵、鎂和錳等元素。它們已經將岩石圈和大氣及水圈結合在一起創造了生物圈。

世界的現代生物圈繼續依靠原核生物固定有機化合物中基本的元素。真核生物只能從空氣和水中得到3種元素——氫、氧和碳，但無法從岩石中得到任何東西。它們甚至必須依靠原核生物從空氣中固定氮。

太古時代留下來的沉積岩表明，原核生物生態系統已經佔領了世界上所有大片陸地的陸上水。它們在所有太陽照亮的海洋上部200米範圍內繁榮生長。今天在這個範圍內可以計算出細菌濃度為每毫升500 000個，在洋底的沉積物中聚集的細菌濃度是這個數值的很多倍。沿着洋殼裂隙流動的熱硫磺泉中幾乎可以肯定它們已建立起了最近在那裡發現的各種生命群落的基础。這些生態系統證明了原核生物在陽光照不到的地方維持生命的生物化學能力。細菌甚至移居到陸地上。今天在沙漠裡這種會因偶然的降雨而蘇醒的生物將表面的砂粒結成硬殼，可抵抗風的侵蝕。

在專化成特定的新陳代謝的原核生物集居的地方，它們集聚了多種岩石圈元素：鐵、錳、鎂、鋁、硫和磷。這些礦藏今天被用來為人類利益服務。

地球歷史的發現

比之于人類生命的短促，5 000年曾被看作是很長的時間。在整個18世紀中，各種災難，無論是洪水、地震還是火山爆發，都足以說明地形表觀上的騷動。在那個世紀結束之前，詹姆斯·赫頓（James Hutton）以畢生的精力研究他的祖國蘇格蘭的地形，并

发表了著作《地球的理论》。在这两卷本的巨著中，他列出了他在岩石中看到的自然界的演替目录。第一个提到的是火成岩，这是从地下深处的熔融状态冷凝而成的。岩石碎裂成为砂粒，砂粒又固结成为沉积岩。在足够的压力和温度下，但还没有热到使它熔化，沉积岩进一步固结成为变质岩。赫顿给这 3 种岩石取了这些名字，并提出岩石从一种状态到另一种状态的演替必定“均匀地”进行，在整个时间内要经历冷凝、融化、侵蚀、沉积物的集聚和固结，以及偶然的火山侵入。这些过程造成了地形地貌。雨水和霜冻以及雨水冲刷山岳并将冲下来的泥土散布在泛滥平原上；河流从陆地流入海洋。需要的只是时间。至于时间，赫顿看到的是“没有开始的痕迹，也没有结束的前景”。

均变过程的时间

支持赫顿的理论的证据很快就收集到了。收集者发现整个化石生物群落，特别是在寒武纪的岩石中，寒武纪这个名字来自罗马人对威尔士的称呼。按照逻辑，较近的岩石在较古老的岩石上面，可以看到群落一定在很长的时代中按时间先后层层叠起。

19 世纪初，由于古生物学的奠基者乔治·居维叶 (Georges Cuvier) 的显赫的权威，一些思想家否定了赫顿的伟大洞见。居维叶把化石记录的不连续看作是灾变，这种不连续层打断了化石群落的连续变化。承认上帝介入的可能性的灾变说一直到 19 世纪末还存在。

查尔斯·赖尔 (Charles Lyell) 的野外考察、学术研究和不知疲倦的鼓吹，最终确立了进行创造工作的均变过程所必需的时间。赖尔从尼亚加拉瀑布的马蹄形轮廓中记录的变化计算出尼亚加拉河要用多长时间冲击岩石才能将其磨损并使瀑布向上游移动形成现在的轮廓，并且从相反过程的记录，计算密西西比三角洲沉积所需的时间。赖尔建立了软体动物和腕足动物的碳酸

钙和磷酸钙壳组成最普通的化石的前后相续的次序。他用化石和矿物成分的“指数”辨认沉积岩地层，这些地层分别在相距很远的不同地点显现在地面上。他证明了西西里岛上的瓦德诺多（Val de Noto）的地层比英国克拉格的地层更年轻，而克拉格又比法国波尔多的地层更年轻。

赖尔命名的地质学的纪和世的名字到现在还在使用，他对各个纪和世所假设的时间框架非常接近于今天用他无法预料到的技术所作的测量。大约有 200 万年时间的“全新世”前为“第三纪”，时间跨度又长了整整 1 个数量级。第三纪前，时间延伸到没有尽头的过去，直到寒武纪岩石中化石记录消失之前。

地质学家发现了一个无人居住的地球。在几乎全都是最近才搞清楚的难以想象的漫长时代里一直没有人类，也不存在长着脊椎骨的动物。在很长的时期内海洋养育着各种各样不同品种的初等无脊椎动物。人类的存在是地球历史中几乎可以忽略的最近时期中短暂一幕。对他的思想的担忧显然推迟了查尔斯·达尔文撰写《物种起源》的时间。他出生在英国高层中产阶级的家庭，当时这样的一些家庭都是无忧无虑地生活在怀着仁爱之心的神的面前，但达尔文自己却不愿意过这种生活。

“贝格尔号”的航行

出自对自然历史的天赋兴趣，1831 年，年轻的达尔文自愿签约，受雇作为博物学家进行为期 5 年的海岸线调查的考察旅行，这使他有环游世界，他能够沿途上岸进行自己的探险。

在火地岛，他被来欢迎他们前去考察的裸体的土著吓得逃走。他想象不出“野蛮人和文明人之间到底有多么大的差别”。

在加拉帕戈斯群岛，他因发现自己“被新的鸟、新的爬行动物、新的贝壳、新的昆虫、新的植物所包围”而陶醉。然后，穿过太平洋，他在塔希提岛、新西兰、澳大利亚、塔斯马尼亚岛、马尔代

夫等地上岸采集标本，在回家的路上他又经过圣赫勒拿岛、阿森松岛和佛得角群岛——所有这些在《贝格尔号的航行》一书中都有生动的描述。

达尔文把生命的其余时间都用在认真研究他在航行中学到的东西。他已收集到了使他确信自然选择这一假设的证据。特别是在加拉帕戈斯，他看到了进化的作用。本来应该是单一物种的燕雀明显地发展出半打的不同物种，占据着不同生态位，在分离的种群中繁殖，各自的行为和外表都不相同，特别是它们嘴的外形。陆地龟的一些物种按不同的种群各自独立地生活在几个不同的岛上，它们的形态和行为也产生同样的趋异特征。

自然选择

进化就这样在漫长的岁月中，没有任何看得出的计划、设计或目的，产生了所有这些比无脊椎动物品种较少的脊椎动物，其中还包括人类。还有从其他方面来的证据支持这个有吸引力的假设，这些证据都是达尔文在他的家乡唐斯做研究时收集的。他在那里度过了 20 年，总是在同一条花园小径上来回踱步，直到年轻的博物学家阿尔弗莱德·拉塞尔·华莱士威胁到他的优先权时，他才被迫于 1859 年发表他的著作。

自然选择的假设在 18 世纪最后 10 年已经广泛流传。达尔文甚至还不是第一个提出这一主题的达尔文。他的祖父欧拉斯姆·达尔文 (Erasmus Darwin)，他是家族财富的奠基人，一个博学的人，生活舒适、讲究吃喝的人，并且是一个本人有显赫头衔的人，他写了一系列文章，水平最高的是在那个世纪末在《Zoönomia 或有机生命的定律》上发表的。认为生物之间通过竞争选择出的存活者，也就是“最合适者”才能生产下一代。生育力和种群增长超过了给养，就导致竞争。这个观念吸引了他同时代的人托马斯·罗伯特·马尔萨斯的兴趣。根据他的推测，老达尔文也认

为，在一代中才能的使用与否会影响这种才能是否会遗传到下一代这种可能是存在的。

当时在英格兰，年轻的达尔文正在做他的航行，但上述思想已经被称作达尔文思想了。在法国，谢瓦利埃·德·拉马克（Chevalier de Lamarck）接受了老达尔文第二个思想。由于每一代改进上一代获得的特性使得生活型从不大完美进步到更加完美。长颈鹿的颈子的伸长是为了能够达到较高的树枝的结果。拉马克就这样将获得性状的遗传归纳成一种谬论，这鼓舞了鲁德雅德·吉卜林（Rudyard Kipling）写了《对极了》的故事。不管这些进化的假设的困窘，另一些英国作者还继续讨论包含在欧拉斯姆·达尔文的为生存而竞争的真正意义上的自然选择的思想。

在《物种起源》一书中，查尔斯·达尔文在他自己观察到的有说服力的证据和他在自然史方面的学识基础上建立了自然选择的概念。达尔文被尊崇为近代生物学的奠基者是恰当的，他的伟大著作给这个描述性的科学第一个可理解的理论表述。今天，进化是在至少 35 亿年地球历史中被观察到的事实。进化论说明了这个时代对事实最好的理解，并且不断积累的证据都确证了它。

即使在他的伟大著作的第一版中，达尔文也同意通过获得性状遗传而进化的可能性。在以后的几版中他承认这和自然选择并存的可能性。成熟的达尔文显然对公众的争论作出了让步，也对他自己对于创造的历史中的设计与目的的追求作出了让步。由于和维多利亚时代争论的妥协——当时分派给科学的任务是获得有用的知识，留给宗教的是规范目的和价值——他的遗体才可以埋葬在威斯敏斯特教堂。

自然选择在任何情况下都是不完全的进化理论。它不能解释受自然选择的特性的来源，在当时流行的遗传的假设模式中——亲代的特性在后代中混合——可以证明在几代中就可以将新的特性冲淡而最终消失。在“近代的综合”中使进化论更完

备,则要等到再发现孟德尔的基因之后。

地球内部

直到 20 世纪中叶,地质学也是根据一个不完全的基本的理论工作的。垂直的引力被认为是使大陆壳和海洋及它下面的洋底壳处在均衡稳定状态中的原因。地质记录,表明大陆在海平面以上的高度由于覆盖的冰川重量而被压低。这种平衡的改变被认为是大陆板的块断作用及偏斜所引起。这可用来解释不是由于火山喷发而造成的山脉的形成,例如,阿巴拉契亚山脉。这种事件确实在形成局部地形中起作用,但如现在所知道的,这不足以说明大规模活动的结果。

非洲和南美洲的大西洋海岸线边缘就像拼图玩具一样正好可以拼合,这最早是在 17 世纪的地图上就明白地显示出来了。在最早审视这地图的人中,有一些人的头脑中出现了大陆漂移这一离奇的概念。但是对于这种水平方向的力作用的证据找不到合理的解释。

引力能足够好地说明地球的内部结构。按照重量分拣元素,最重的富元素铁集中到中央,较轻的元素向上浮起,最后进入地壳 [见第 309 页图]。为了研究地震,物理学家在 20 世纪初就发明了地震计。地震发出地震波——类似于声波的压缩波——沿各个方向传播通过地球。地震计的完善使声波为地质学家服务,很像光谱仪使光波为天文学家和物理学家工作一样。地质学家找到了观察地球内部的方法。

地震波 [见第 308 页插图] 的速度随着通过地球内部沿途的温度、压强、密度和元素成分而改变。在表面上,压力将原子压紧而热使原子分开。对地震波的分析,再加以其他方面的考虑得知地幔中从地面往下第一个 700 千米范围内温度的升高最陡峭。在第一个 100 千米处达到 1 000 ,在大约 200 千米处达到



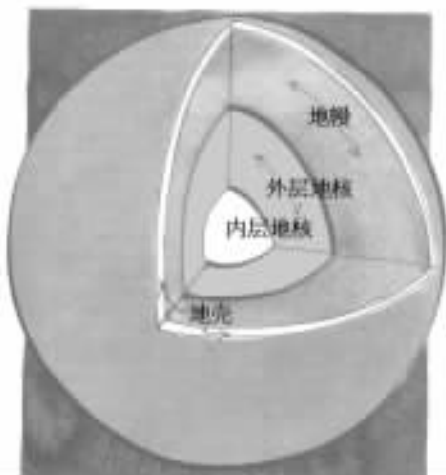
1 500 °C，在 700 千米处达 2 000 °C。从这里到地核，即地壳下面 3 000 千米，每下降 1 千米，温度就上升略少于一度，估计最后达 5 000 °C。

在最大压强制服了热的力量的地方，在大约半径为 1 500 千米以内的地球最内层的地核中是主要成分为铁的固体。包围在这外面的地核部分，大约在 2 200 千米深处，是熔化的铁。这里热的力量超过了压力。在这外层地核中巨大吨位的铁的缓慢对流周转引起了巨大的电流，产生了地球的磁场。地震波传播到内层地核及外层地核之间的边界上突然变慢，表示这里发生从固体到液体状态的物相变化。

在外层地核到地幔之间的边界上速度突然增加，标志着从液态到固态的过渡。地震波通过 3 000 千米深的地幔岩石时速度随压强的变化相对平稳，直到地表以下 700 千米。在上层区域内速度并不完全像地核边界上变化那么突然，但这提供了那个区域物相变化的证据。它们被地幔岩石中的元素混合物弄得模糊，这里不像地核中是比较纯粹的铁。在温度急骤上升的带状区域内，重力将残留在地幔中的放射性元素集中在一起，它们较大的重量被结合在一起的较轻的元素抵消。

温度和巨大的引力压强是地球内部的特征，物相的改变表现出地球表面上的相变过程中看不到的物质行为。在行星内部，物

质处于许多不了解的状态中。正如帕赛·布里奇曼首先证明的，物相的改变可能压碎外电子壳层。外层地核虽然是流动性的，但也有高度的坚实性。然而，即使那里的压力占优势，但在估计约 5 000 °C 温度下热运动破坏了铁的晶体结构。铁像液体般流动，虽然这在人类的时间和距离的尺度上是感觉不出来的。



地球的内部结构反映了引力对其组成元素的分拣以及在热和压力间改变着的平衡条件下从固态到液态再到固态的相变。最重的富元素铁下沉到中心地核，近 3 000 千米直径的固体和约 2 100 千米深的液体。锰、铁和其他金属的氧化物组成“镁铁质的”塑性“地幔”，有 3 000 千米深；硅、铝和其他较轻金属的氧化物组成脆而易碎的“硅铝质的”地壳 [见第 314 页]。

在 20 世纪 20 年代，在拥护大陆漂移这一“荒谬”观念的认真的地质学家的认真鼓吹下，正在显露出来的地质学图景被打乱了。那个时候，在南半球大陆上工作的地质学家认识到他们已经在南非、印度、澳大利亚和南美洲的煤层中发现了同样有特色的化石植物群。有一种被称作舌蕨类植物 (Glossopteris)，这个名称来自最惹人注目的特点，即各种各样的种子蕨的舌状的叶子，这种植物的化石也被最早到南极洲探险的地质学家在南极洲的煤

层中发现。瑞土地质学家爱德华·苏厄斯 (Eduard Suess) 对这些发现提出一种谨慎的解释：南方大陆曾经通过大陆桥结合成一整块大陆。根据印度富含舌蕨类植物的煤矿区域的地名，他把这假设中重新构成的大陆称为“冈瓦纳大陆”。

然而，地壳均衡原理使假设的大陆桥的较轻的大陆岩石沉入海底成为不可能。在 1908 年，美国地质学家亨利·泰勒 (Henry B. Taylor) 提出南方大陆曾经聚合在整块巨大的冈瓦纳大陆上。在地下的力量作用下大陆分裂，它分成的子大陆漂移到了地球上现在的位置。至于大陆漂移的机理，他作出了有先见之明的假设：应当仔细研究海脊，这些海脊是铺设第一条越洋电报和电话电缆时就已经在中大西洋遇到过的。

大陆漂移

一位气象学家为大陆漂移最后的争论框定了问题。阿尔弗雷德·韦格纳 (Alfred Wegener) 在他写的《大陆和海洋起源》一书中表明地质学可以在野外研究，也可以在图书馆里研究。他在德国一个外省的大学里他的根据地查阅文献。他积累的证据表明不仅是南方，并且北方大陆也一定曾经联结成一片超大陆，他将它取名为泛大陆。他指出在活着的和化石的植物群与动物群之间的相似性，特别是现在温带和极地陆块煤层中的热带植被中；他又指出在现在分离的大陆陆块上地质地层横渡大洋的连续性；他还指出共同冰河作用的断层——所有都为这些大陆的统一而作证。

韦格纳还对认识地球上大尺度地形作出了另一基本贡献。从陆块的平均高度和已知的海洋平均深度，他区分地壳上的两个水准。这些水准相当于明显不同的大陆和洋底的地壳。他将大陆描画成在洋底上高 5 千米的平顶山。

韦格纳的著作发表于 1915 年，当时并没有受到很大的注意，

直到第一次世界大战结束。然后开始了争论，一直延续到 20 世纪 50 年代。南半球的地质学家找到了支持韦格纳的新证据。南非地质学家亚历山大·杜·特瓦 (Alexander du Toit) 在韦格纳的冈瓦纳大陆的地图中非常接近的两个区域，非洲和南美洲两者的最南端都发现同样的活的蚯蚓属。中龙属 (Mesosaurus) 的化石在南非和南美洲都曾发现。在美国自然史博物馆的阿尔弗雷德·罗麦 (Alfred Romer) 证明，中龙属是淡水爬行动物，它不可能游过大西洋。

从南半球得到的证据对大多数兴趣集中于北半球的地质学家来说，并没有引起足够的重视。在还缺乏任何可以说得通的机理来解释的情况下，大陆漂移不被看作是异端的话至少也是疯狂。必需的水平力的证据还隐藏在海底。

直到第二次世界大战结束后才开始对未探明的地区——在地图上占地球表面的 70%——进行系统性的考察。哥伦比亚大学的拉蒙特观察站的莫里斯·埃温 (Maurice Ewing) 和布鲁斯·希曾 (Bruce E. Heezen) 到海上去测绘大西洋中脊的地图。斯克里普斯研究所和加利福尼亚大学圣迭哥分校的罗杰·里维尔 (Roger Revelle) 和亨利·美纳德 (Henry W. Menard) 将太平洋底，包括它的海沟、海山和异常的东太平洋中脊都画在世界地图上。

地质学家在声呐的新技术方面受惠于美国军方，声呐曾在海军作战中起过决定性的作用。地质学家从地表附近爆炸产生的声波在地下深处岩层反射的回波来区分不同的地层。声呐发射声波脉冲，可以通过测量回声来回的时间来确定靶的位置，测量海深和测量距离。在海军研究办公室的慷慨支持下，数艘装备声呐、重力仪、地磁仪和其他遥感仪器的研究船开往海上。

在 20 年内，沿着有规则排列的栅格线单调地来回航行，声呐逐点地探测整个地球的海底。在绘制海底地图的同时，声呐意外

地发现洋底壳厚度有 4.7 千米的非常微小的变化。回声也测量了分散在洋底上的沉积物的厚度。

在大家都熟悉的大陆和海洋地图上,大陆占地球表面的 29%。众所周知,大陆架从海岸边延伸到海洋中一定的距离。展示洋底的新地图表明大陆壳占据地球表面的 40%。大陆架倾斜伸出到大洋下面,到 300 千米远深度为 1 000 米处突然陡峭下降成海底深渊。大陆平顶山就像韦格纳所想象的那样,高出海底 5 000 米。

最突出的是,新的完全的世界地图展示了全部延伸达 75 000 千米的裂谷型海脊。沿着它现在最活动的 25 000 千米的一段,海脊平均宽度为 1 300 千米,升高 2.5 千米。另外,还用一些仪器和声呐协同工作,揭示沿着这些海脊延伸的强烈活动。热敏器件测量到海脊两边很强的热流。重力仪在这里发现重力减弱,表示有物质向上流动。地震仪记录许多浅表的地震。地震波传播较慢说明在裂谷型海脊两边有熔融的岩石,这证实了声呐和热敏器件读出的结果。

在北大西洋,海脊升到海平面以上成为冰岛。裂谷表现为地堑,从北到南穿过岩石岛的很深的裂缝。好像为了证明海洋学家的推断,1963 年新的火山岛苏特西突然冒出海面,正好在冰岛的南面。

在太平洋两边的海沟处,仪器记录到互补的读数。热流弱而引力较强,地震波从正在下降的大洋板块的陡峭倾斜下、深度不断增加的地震源发出。

钟和罗盘

从洋底钻探出来的岩芯样品中发现,在大陆壳和大洋壳之间有惊人的新的差别。没有哪个地方的海洋玄武岩比 2 亿年更老,比之于用于量度大陆花岗岩和玄武岩的极长的年代来,这是很年

轻的岩石。并且在海脊的两边,发现洋底壳的年龄以不变的比例随离海脊的距离增加而增长。覆盖在上面的沉积物在海脊处较薄,也说明它比较年轻;它们的年龄随沿大陆架底部的深度增加而增加,在大陆架底部,海底沉积物和从大陆流下来的沉积物相混合。

放射性计算时间的流逝,用它能十分可靠地揭示岩石的年龄。物理学家已经证明每一种元素都以它自己固定不变的速率衰变并产生特定的子代和孙代元素[见第 120 页]。在洋底上冷却的玄武岩——或侵入陆壳中的火成花岗岩——中带有这种放射性元素的微量样品。从岩石中任何一种这类放射性元素和它子代元素的比例可确定它冷却和结晶的时间。

地质学家由于发现了岩石中的罗盘也同样受惠于物理学家。在熔融状态中,铁一类磁性元素的原子顺着地磁场排列。它们不仅像指南针一样指向地磁北极,它们也相对于水平面倾斜一个角度,这个角度依赖于它们到磁极的距离。冷却将这些罗盘针的方向凝固起来。

20 世纪 50 年代初,固定在岩石中的残余磁性吸引了伦敦大学学院的布拉开特(P. M. S. Blackett)和伦柯恩(S. K. Runcorn)及 MIT 的帕特里克·赫尔利(Patrick M. Hurley)的注意。他们改进的设备可以测量很弱的磁性。他们从全世界收集岩石,他们做得非常仔细,将每个样品的磁针指向都各各标记在地图上。他们发现,在同一大陆上不同时代不同纬度上的化石罗盘的指北方向都不相同。在肯定地球磁极本身并没有发生这样的变动后,布拉开特、伦柯恩和赫尔利满意地指出,岩石样品中磁针指向方向角和倾角的变化是由于大陆漂移。

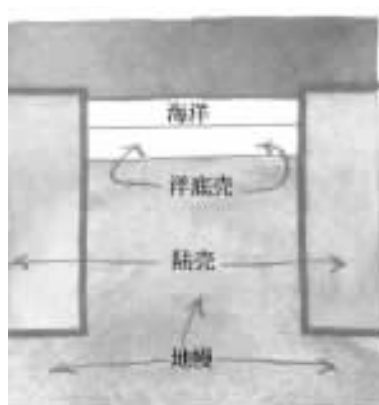
最后,还是岩石中的罗盘解决了大陆漂移的问题。从陆地上岩石的剩余磁性得知——由于还不知道的原因——地球磁场的极性在很长的不规则的时间间隔内要翻转。在大西洋海底,以后又

在印度洋海底,用遥感磁强计探测发现这种翻转对称地记录在断裂的海脊两边沿南北向的宽阔水道上。从一条水道到另一条水道,剩余磁性交替地指北和指南 [见第 298 页图]。一次又一次逆转,就好像磁带上那样,新的海洋地壳记录下了占优势的极性。毫无疑问,大西洋和印度洋都变宽了。

有少数几位地质学家——MIT 的爱冈·奥洛万 (Egon Orowan)、马里兰大学的沃尔特·埃尔沙塞 (Walter M. Elsasser)、加利福尼亚大学伯克利分校的约翰·弗胡根 (John Verhoogen) 以及莱顿大学的维宁·曼尼兹 (F. A. Vening Meinesz) ——一直在研究说明大陆漂移的机理,大陆漂移已经被精确的物理证据令人信服地证实了。根据地球内部的地震学图像、岩石学、地球化学、高压物理学和固体物理学的经验知识,他们设法提出一个可以说得通的假设。1952 年,维宁·曼尼兹写了一篇文章总结了他们的工作,文章描述了大家一致同意的板块构造的推动机理。

重力计和地震仪很早以前就测出大陆的花岗岩地壳平均厚度为 34 千米,比 4.7 千米的均匀厚度玄武岩洋底厚得多。大陆壳很像从熔融的铁矿中浮起的熔渣,主要由硅组成——硅和铝与氧的化合物——它被称作“硅铝质的”。相反,密度大的洋底壳主要由锰和铁与氧的化合物组成,被称为“镁铁质的”。这与地幔的成分相近,这比与水结合成晶体结构的地壳更有韧性。在地壳的结晶中水排除了气体而变得脆弱。

地壳均衡要求在陆壳中想象出一个柱体的重量等于对应的海洋中 5 千米深的水柱加上沉积物的平均深度 1.3 千米,加上 4.7 千米大洋地壳的厚度,再加上足以平衡这两种质量的地幔岩石深度 [见第 315 页插图]。大陆壳的硅铝质岩石的密度大约为地幔和大洋地壳的镁铁质岩石的 0.8。就像冰山 (其密度为水的 0.9) 顶端,只有大陆柱的顶部漂浮在地幔以上。大陆在 5 千米深的海洋以上平均升高 300 米。在这平衡中,由于大陆表面的升



高,地壳的底部必定要相应地沉入地幔作为补偿;否则只能升起较低的高度,就像融化的冰山那样。

两种壳的底部以莫霍洛维契奇不连续面(简称莫霍面)为标志,在这不连续面上地震波的速度突然增加。在薄的大洋地壳下面,地幔的比较硬的顶层覆盖在莫霍面上,使结构板块的底部变光滑,大洋地壳和较厚的大陆壳在这里连接,譬如沿美洲大陆的东部边缘就是这样。

水平方向的沸腾

维宁·曼尼兹的文章中解释水平力是根据观察到厚的大陆壳不只是地幔顶部的绝热毯并且也是加热毯。在地壳深处,放射性元素的衰变也在地幔中加进这些元素产生的热量。大陆下面的热量相应地增加了。相反,热量通过薄薄的大洋地壳逃逸。于是在地壳中出现了热梯度:从温热的大陆中部到毗邻的冷的海洋中部。

由于这个梯度,热量由热的物体通过传导流向冷的物体。不过,热也通过介质内部的和介质本身的机械运动而流动。加热使水沸腾的过程中通过对流带走热水中的热比水的热传导更快。

曼尼兹和他的同事们想到地幔中热的传输也一定是同样的情况。当然岩石不会像水一样流动。不过岩石像其他固体一样会蠕变。热和冷的轧制、挤压和锻造都利用金属的蠕变性质。在 1 000 的白热温度下，地幔的岩石成为有延展性的并且能使它发生蠕变。热在地幔中通过蠕变的传递比通过热传导更快，并使岩石形成对流单体而翻滚。

对流单体在地幔上部 700 千米内周转，并会发生反常相变。考虑到地球圆周长为 40 000 千米，这是非常宽的一个带，从中部大陆和海洋中部一个典型的单体延伸几千千米，这个对流单体和它对流周转的深度或许只有几百千米，这就可以看作水平方向；沸腾是侧向发生而不像开水壶中那样垂直地发生。底部第三层附近的岩石，也就是对流单体向着洋中脊侧向蠕动，它在这里遇到从大洋另一面来的对流单体。向上运动——假如是熔解了的就会向上流动——的两个单体都产生热量并带给地壳新的岩石。滚动着的对流单体离开海脊的时候拖动结构板块和大洋地壳下面地幔的固体层。在变软的地幔上层的所谓软流圈中，显然便于对流单体的水平运动。在大约 70 千米深处，温度的增加超过了压力的增加。地震波速度往下直到 130 千米处才恢复。

当然，对流单体是以地质学的速率滚转——以每年几厘米的速率。装载在地球人造卫星上的仪器测出北美洲大陆就是在这个速率向西北方向移动。

将要变成地球的原行星吸积星子而不断增大，这些星子由于原行星引力场的延伸而被归拢。到达一个临界质量后，原行星进入引力坍缩阶段。坍缩产生的巨大热量中再加上岩石中长寿命的和短寿命的放射性元素在它们第一个组合的半衰期中衰变产生的热量。温度达到了熔点。由于引力场的对称性，熔融的行星成为球形。经过几百万年，引力将铁和其他重元素慢慢地通过熔

融的行星吸引到地核中。较轻的元素相应地向表面迁移。玄武岩的地幔岩石在表面冷却下来时成为最早的地壳，逐渐渗入较轻的元素，生成结晶。在结晶过程中，它放出气体成为最初的大气，并形成浅的海洋覆盖了整个表面。较小也较多的对流单体在比较软的地幔中搅拌较深，使地壳向外膨胀，也将它的一部分向内部拖曳。

冥古代

水的分离和大陆的出现当时以行星间的作用力为媒介。在冥古代，地球还在扫拢在它的引力场范围内的星子。较大的陨星的撞击戳破薄薄的原始地壳。从最早的镁铁质成分多于硅铝质的大陆壳的内部，熔融岩浆向上涌出形成火山爆发。“克拉通”（稳定地块），大陆地盾的核，就这样形成现在地球上海平面以上陆地面积的20%。在以后25亿年的进程中，围绕着克拉通产生了陆壳，从下面建立起大陆。

从月球岩石的年代确定它表面大多数环形山形成于太阳系历史的最初5亿年。月球、水星、金星和火星上的环形山的持久存在证明它们的内部没有被搅动翻腾得像地球上一次又一次地重新形成表面。火星上很少几个熄灭的火山是古代地质活动的标记。还有，火星轨道飞行器最近探测到火星表面的残留磁性，证明火星曾经有过磁场。如果是这样的话，这个较小的行星的质量在它的第一个10亿年内就不能保持较高的温度以维持其核心处于熔融状态。人造卫星和机器人登陆器将无疑继续探索可能是从那些年代开始的生命的迹象——也探索可能还存留在火星地壳上水里面的生命。

65个陨石环形山——或“古陨石坑”——罗列在地球现在的表面上，它们的产生年代都在最近。正如将要看到的，地外物体的撞击在生命的进化中起了一定作用。

放射性钟可近似确定地球大陆壳形成的时间。在格陵兰的伊苏亚年龄为 3.8 宙^①的沉积岩中,发现了锆石颗粒。这种准宝石由于硬度和抗磨损而著名。它的铁和镁的含量较低,而轻金属和硅酸盐含量较高,显然是一种大陆矿石。通过伊苏亚锆石中的铀和它衰变成的铅的比例推断出它结晶的时间在 44 亿年之前。由此可将最早的大陆壳凝固的时间定在地球历史的第一个 2 亿年之内。

最古老的岩石

40 亿年前生成的锆石颗粒在北美洲、澳大利亚、南极洲和非洲的古代沉积物和砾岩中都被发现。这是最早的陆壳克拉通起了大陆成长的核心作用的证据。还有其他大陆地块必定在同样早的时间出现,但是还没有发现古代的岩石。风化、沉积和砾岩化等均变过程将最早的岩石重新加工,并将它埋葬到几千米深处而被后来生成的陆壳覆盖。

克拉通的岩石的原型是劳伦地盾的所谓绿岩,在北极和加拿大近北极的广大区域内因最近的冰河作用而暴露出来。这是再循环的材料的砾岩,比原始的岩石年轻,但却是最古老的岩石中分布最广的。它同样由于古代的冰河作用暴露在澳大利亚。玄武岩比花岗岩更多,镁铁质比硅铝质更多,从天空鸟瞰这些铺路石就好像时间的开始。

古代克拉通得到最彻底的研究的是南非的威特沃特斯兰德区下面的卡普瓦尔克拉通。这个地区之所以受到认真的研究是因为它的岩石中生产出人类手中所有金子的一半——40 000 公吨。金是“亲铁的”——爱铁的——并且它的沉淀和镁铁质岩的铁和镁结合在一起。自从 19 世纪 80 年代的威特沃特斯兰德的

^① 译注:宙(eon 或 aeon),10 亿年(10^9)为 1 宙。

淘金热以来,由于对这最初 30 亿年在这克拉通上累积起的 12 千米深的岩石的洗劫——不在同一地点——导致研究地球历史和生命进化的无价宝藏的发现。

变质的沉积物中的锆石证明了卡普瓦尔克拉通是原始的。在较晚的卡普瓦尔沉积物中,在无果树地区,埃尔索·巴格霍恩辨认出最早的化石细胞,确定为 32 亿年以前。因此在卡普瓦尔沉积物中得到了生命的证据,(根据碳 12 和碳 13 不对称的比例)时间可回溯到比 2 亿年更早,到 34 亿年以前。普雷斯顿·克劳德把这当作一系列的生态系统的第一个标志,他根据这生态系统系列追踪研究以后 10 亿年中沉积下来的卡普瓦尔沉积物。

对于有意识的观察者来说,34 亿年前的地球只有一个凄凉空虚的海洋风景。浅的无尽的海洋几乎不会被稀薄大气中的风吹皱。它主要被潮水的涨落所搅动。那个时候地球自转较快,一天只有 8 个小时。地势低的荒芜的克拉通各自分散在海面上。海洋是阴沉沉的,包含从地壳中蒸发溶解出来的元素,特别是锰、铁和硫。从海下热的硫磺泉和构造板块边缘的火山中流出来的初生水保持海水中矿物的含量不变以抵消海水中物质变成沉积物而析出。洋底及岸上的火山散发出的气体更新了一氧化碳、二氧化碳和氮组成的大气。从火山下降的气流的大气中携带着氯化氢、硝酸和硫酸,这些都包含在水蒸汽的云雾中。

大气所含元素中最少的是氧。未被屏蔽的太阳的高能辐射不断地分解大气中的水分子,使氧原子游离出来。这些氧原子立即和氢或者和其他未被氧化的裸露的或已还原的元素再次反应,这种元素在大气中到处都有,并且还溶解在海水中。氧消失得如此快,它在大气中存在的数量不会超过现在大气中普遍含量的 10^{-14} 。活的组织在以后 30 亿年以上的进化中产生了现在的氧含量为 21% 的大气。

地球上的生命从哪里开始可能永远都不知道。生命什么时候开始也将一直无法确定。伊苏亚和卡普瓦尔的沉积物中有已知最古老、最原始的生命迹象。作用于同一大气上——以及下落的陨石——的同样的能源以无生命的有机化合物玷污各处的海洋。在克拉通的海岸线边上的浅水塘中,水的蒸发使这些化合物的浓度增加。比共同的祖先更早的原始生物可能在许多地方发展起来。

今天,沿着大西洋中脊和东太平洋隆起处的“海底黑烟柱”硫磺温泉的环境中繁荣的生态系统意味着可能产生生命的另一类地点。这些群落中充满了真核生物——磷虾、蛤蜊和多毛虫。在太阳光远远照射不到的地方,它们部分地被生命的碎屑和溶解在来自上部世界的水中的氧维持。它们也从起着相当于植物的作用的化学自养细菌得到营养。如果这种细菌的生态系统在生命开始阶段是在海洋底上发展起来的话,大洋壳的周转就会抹去所有的痕迹。它们存在的论据是今天它们支持着的洋底的生物群落。

天降吗哪^①

不管生命什么时候在什么地方开始,它必定首先局限在局部的生态系统中,从古代较早到较晚的时候的卡普瓦尔沉积物中,碳同位素比例的改变表明生命存在的不断增加。根据当时流行的关于生命起源的观念,普雷斯頓·克劳德推测有一种最早的异养生物的生态系统,这种生态系统也被同样是现成的有机化合物所滋养,在这种有机化合物中必定产生生命。这种生态系统的生命会因厌氧古细菌为模型的自养生物的出现而扩展——即使不

^① 译注:基督教《圣经》《出埃及记》第十六章中以色列人经过旷野时神耶和華赐给他们的食物,白色,形如芫荽菜籽,称做吗哪(Manna)。

是开始。氢或化合物中的氢,例如和硫化合成 H_2S ,这些化学自养生物保证使电子推动需要能量的 ADP 磷酸化成 ATP。在第三个磷酸键上的能量用来固定初级的有机化合物 CH_2O 中的碳,以支持它们的厌氧微生物的发酵新陈代谢。在这些低效率的后阶段产物上异养生物的群落估计会繁荣生长起来。

克劳德从 3.35×10^9 年以前的沉积物中的碳 12 同位素比例的进一步偏差中,发现开始了第二个卡普瓦尔生态系统。在这时候,化学自养生物开始利用太阳光能量制造它们的营养物。从它们的活化石中推断出它们可能已经用叶绿素 a 武装起来了。它们用这种分子收集太阳光能量供给化学自养生物利用 H_2S 提供的氢将碳还原。它们通过它们加速的新陈代谢的后阶段产物来利用太阳光能量以支持生态系统。

氧的危机

对于卡普瓦尔克拉通中生态系统 3 的到来,克劳德的标准是沉积物中第一个条带状铁建造的出现。在这些地层中,铁氧化时俘获的自由氧除了需氧的非循环的光合体系 II [见第 268 页] 的副产品外,没有其他来源。它们现在的后代在氧短缺的时候和地点能转换到 H_2S ,这些最早的光合自养生物能用 H_2O 代替 H_2S ,从中获取氢,将空气中二氧化碳的碳还原。它们可以生活在世界任何地方的空气和水中。它们只要从所在的局部生态系统中获得必要的微量元素,这些微量元素是它们自己不能从环境中的有机化合物中得到的。

克劳德把 BIF (条带状铁建造) 称作“地质学家的 DNA”。BIF 出现在全世界所有的 25 亿年前的太古宙结束之前生成的岩石中。在卡普瓦尔沉积物中,它们出现在大约 33 亿年前。这个重大的发展之后不到 1 亿年的时间内出现了卡普瓦尔克拉通上的第一个生命。这里,沉积物中勉强能辨认出自我维持并相互支持

的生命群落的开始,就是这种生命群落改造了整个地球表面。已知的唯一较早的 BIF 来自伊苏亚的沉积物。

最早的细菌光合作用将自由氧释放到环境中,对它们周围的各种生物构成威胁。为了抵抗这种有毒的元素,所有我们熟悉的生物现在都用内部的酶防御来保护自己。在每个细胞里面,这些防御物立即能将自由氧的游离原子束缚起来。

在需氧光合作用发生后,原始生命没有防御自由氧的内装保护机构。然而,保护是由地幔岩石中蒸发出来的分得很细的铁粒子提供的,这些铁粒子在海水和沉积物中富集起来,将氧俘获成氧化铁使得毒物离开循环。

或许是由于当地水中铁的供应周期性地耗尽,放氧光合作用细菌的种群就消亡了;随着底层水季节性涌出而恢复铁的供应,种群又复苏了。在间歇时,释放氧的物质启动厌氧光合作用,这就是它们今天的后代所做的[见第 281 页]。这种周期性的振荡说明条带状铁建造中的薄层结构。

今天在世界各地都能见到的条带状铁建造,这证明需氧光合作用的突然成功,证明了水中铁的丰富,也证明了保证生命抵抗氧所需要的时间。工业文明只刮去 33 亿年前开始的覆盖在所有大陆上 BIF 的顶层。在超过 10^{14} 吨的沉淀中,铁储藏在卡普瓦拉克通中,在澳大利亚内地的哈墨斯雷和纳比鲁盆地,在巴西的圣保罗州,在东部加拿大和乌克兰。工业革命迄今为止还只从位于美国和加拿大苏必利尔湖区以及西欧的容易开采的 10^9 吨的沉淀中开采铁矿。

原始的细菌藻类为抵御氧的威胁发展了现在普遍的酶防护剂。不久,一种或多种品系按这种策略继续改进。它们使副产物的氧参与到需氧光合作用产物的需氧新陈代谢中。无疑,最初的这种新陈代谢循环中缺少克雷布斯循环[见第 271 页]的效率。需氧新陈代谢改进了的效率无论如何是太古宙最后 1 亿年中各

地生命的迹象的证据。丝状蓝细菌菌落出现在所有大陆上的叠层大化石中。在卡普瓦尔克拉通上,蓝细菌的出现早在 32 亿年前,如果埃尔索·巴格霍恩确定的无花果树区化石细胞的年龄可靠的话。由此决定了克劳德的第四生态系统的开始的年代。

在太古宙的末了,这个生态系统将地球包在第一个生物圈中,按照林恩·马格里斯的判断,原核生物当时已经发展出它们现在实行的所有各种新陈代谢的方式。在适当的地方适当的时间里随机的突变为它们的新陈代谢所影响到的范围内带来新的资源。细菌在有机化合物中结合了现在贡献于真核生物生命过程的从岩石圈中得来的所有元素,例如,骨骼中的钙;酶中的铜;血红蛋白里的铁,叶绿素里的镁;电解质中的钾、钠和锂;还有起其他作用的各种微量元素。细菌在海洋底上及海水中大量生存并使陆地上的淡水也适宜于它们居住,它们使水、空气和土壤中的元素不断循环,就像它们今天还继续在做的那样。

地球的第一个生态系统

应该给原核生物的需氧光合作用产物的需氧新陈代谢这一生物化学创新奖励一顶桂冠。它们通过这种创新开始改造大气,到太古宙末期它们将氧的浓度从 10^{-14} 提高 11 个数量级,达到了现在普遍的水平 10^{-3} 。蓝细菌成为占优势的生物,它统治了下一个 10 亿年,比其他生物统治地球的时间长好几亿年。如果说曾有一个恐龙时代,元古宙可称为蓝细菌时代。

在太古宙和元古宙之间 40 亿年有点随意划分的前显生宙或前寒武纪确实标志着地球历史上的转折点。在太古宙的进程中,地球由于对流单体的搅拌而冷却下来,这使得较轻的元素从深处的地幔岩石中分离出来进入上层地幔。这些元素在相互作用的放热反应中熔化成为岩浆的巨大深潭。这些深潭恰巧形成在能保温的克拉通的绝热层中。在太古宙末了的几亿年中,火山爆发

和大量的深成岩中涌升出“近代的”硅铝质花岗岩，淹没了原始的镁铁质玄武岩。元古宙产生了现在存在的陆壳的 60%。接着可能是 2 亿年的间歇形成了新的陆壳。然后，发生了深成岩涌出的另一次发作，在下一个 2.5 亿年中，陆壳体积增加了近 50%，为现在的体积的 85%。

板块构造的起始

太古宙陆壳的形成使得克拉通的陆块成为有如大洲般的大小。它们大到足以盖住热的逸散并将地幔对流单体的上升流限制在它们的下面。然后开始了板块结构的循环，从此以后就要重新绘制地球上的地图了。太古宙初期地幔的对流就不断推动着克拉通。卡普瓦尔克拉通上的放射性年代测定和罗盘证明它在北纬 72 度和赤道之间随机运动，这时正是它最早的生态系统相继发生的时候，它大约在 30 亿年以前重新向北漂流到纬度 30 度，然后在元古宙开始时又回到赤道。

在板块结构理论发展的初期，多伦多大学的图索·威尔逊 (J. Tuzo Wilson) 作了一个相关的观察。他认为热量一定聚集在巨大陆地，特别是超大陆中央的下面。最近的海洋中央因距离太远而不能在洋底裂谷的对流单体的底部建立起向外的热流梯度。对流单体被超大陆中央下面的热流推动因而向上滚动而不是向下。在相反方向的滚动最终使地壳断裂，同时将大陆撕开。碎片之间出现新的海洋，使它们和其他的大陆板块碰撞。威尔逊预言，在适当的时候这些碎片又组合成新的超大陆。威尔逊循环现在已被下述一些证据所确证，这些证据包括一些巨大的陆地长时期中聚合又分离，以及在最近的 10 亿年中地球上所有大片陆地实际上曾经组合成至少两片超大陆等。

在不管什么纬度上的陆块周围，近岸处海洋浅水的面积和体积的大量增加相应地增大了生命在其中繁荣兴旺的环境。已经

发现蓝细菌的叠层大化石在所有大陆的岩石中的丰度不断增加。

在这些年代中进化进行得很慢。原核生物在太古宙建立起它们多样的生物化学,到元古宙还看不出它们大小有什么增加以及它们的形状有何变化。它们的形状从圆球形到细针状,还有波动螺旋体引起的变种。原核生物在各个局部的群落中,为了相互支持它们各自的遗传能力共同协作。

索兰·索内观察到,“一个细菌不是一个单细胞生物;它是一个不完全的细胞。”按照他的理解,“完全的细胞”是细菌的群落,各自在局部的环境中开发它的生态位,贡献出它的新陈代谢的后阶段产物,以作为群落的供养,并且相应地享受其余成员为供养它所作出的贡献。总之,群落是一个嵌合体。对于局部地区的嵌合体来说,从岩圈的分解可提取出像钙、钾、钠和硅这些必需的元素,以及所需的微量和痕量的元素。光合作用细菌提供有机分子。在必需的物质缺少时,群落的成员通过使局部有效性极大地倍增来浓缩这些物质。已经证明原核生物可以在它们附近的环境中将锰的相对浓度提高 120 万倍,铁提高 650 000 倍。

原核生物群落迅速地使参与它们新陈代谢的物质中的元素周转达到最大值。在各个地方,生命的密度至少受到局部地区能提供的最短缺元素数量的限制。饱和的环境对生物施加自然选择的压力作为回报。对原核生物的压力被它们的基因的转移所化解,这对它们来说是很容易的。原核生物之间物种形成不仅是不确定的,并且也是易变的[见第 289 页]。具有可变性、适应性和嵌合性的原核细胞超生物组成了整个地球大部分生物,它们在整个海洋中也不断增生。

有着对太阳来的能量控制权的无所不在的蓝细菌保证了局部生态系统中碳化合物的供应,无论它们从哪里得到太阳光、空气还是水。反过来,它们为遗传中转移局部的专门生物化学能力所需要。广泛的能力的范围使原核生物群有资格并拥有直到现

在还具有的称呼：“无比的生态学多面手。”它们也被斯科普和同事们内容广泛的《地球最早的生物圈》一书中指出：

蓝细菌极难消灭……干燥的植物标本中的普通木耳念珠蓝细菌 (*Nostoc commune*) 贮存了 107 年之后又会复活。有报道说巨颤蓝细菌 (*Oscillatoria princeps*)、细致颤蓝细菌 (*O. subtilissima*) 和小颤蓝细菌 (*O. minima*) 浸在 -269 的液氮中 7.5 个小时后仍然存活。好几种蓝细菌被证明在核爆炸试验中放置在离爆炸中心 1 000 米处也能存活。在这个距离上地表泥土没有完全被核爆炸剥光；在这些核幸存者中有微鞘蓝细菌 (*Microcoleus vaginitus*)，这是钴照射实验中也能存活下来的品种……辐射剂量比真核细胞微海藻的致命剂量还大两个数量级。

大气中的氧

在 20 亿年以前，由于世界范围内蓝细菌的繁殖对空气和水的循环的影响，在大气中氧的浓度又增加了一个数量级，达到 10^{-2} 的普遍水平。这许多氧的存在也反映了依赖于光合作用自养生物的异养生物中内部酶防御的发展进步。现在自由氧清除海洋中的铁。条带状铁建造的沉积让位于红色层中的铁和 BIF 二次氧化的沉积。厌氧的原核生物退却到它们现在占据的生态位中避难，当然除了为后来受真核生物宿主供养的原核生物以外。

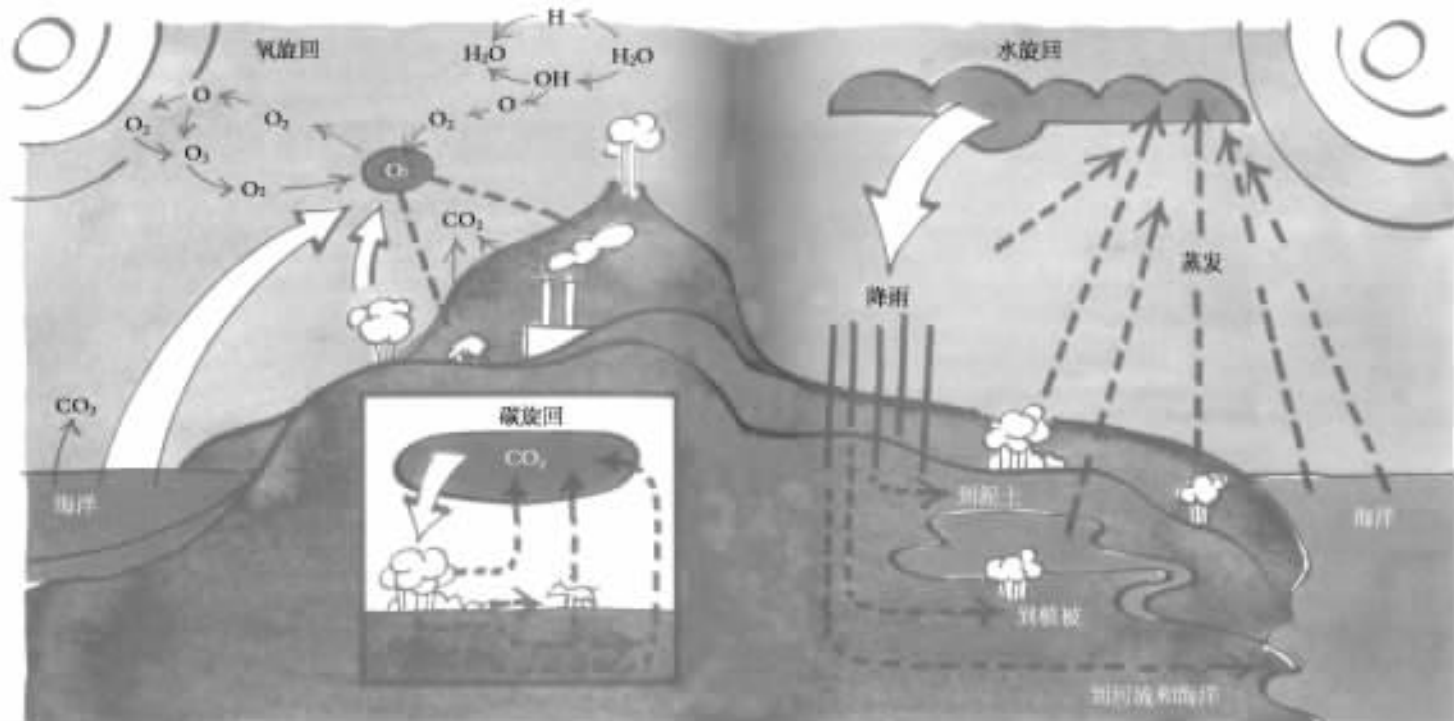
足够的氧升入上层大气开始形成地球上臭氧层帐幔。臭氧层使到达地球表面高能辐射的强度降低，并产生了太阳光普照下“受光”带中越来越多的各种各样生命的栖息地。与此同时，大气中由于氧化的新陈代谢产生的副产物二氧化碳浓度的增加，开始阻挡住地球表面对太阳光的再辐射。这些因素再加上被保存的从太阳来的能量流的增多，抵消了从地球内部流出的热量的

减少。

在 15 亿年以前沉积下来的沉积物中发现比前 20 亿年的原核细胞明显更大的细胞。在以后的 3 亿年中,这些巨大的细胞更加普遍。随着所谓疑源类的出现,它们的形状多样化了,发展出了有刺的外骨骼。到 12 亿年以前,真核生物无疑已经出现。进化过程开始比以前的 30 亿年中原核生物前进的步子大大加速了。

在真核生物发生中,进化发现了一条捷径,这在第五章中已经谈过。真核细胞是一种嵌合体,是共生原核生物存在的结果,来自相互依赖的细胞的融合。异养的真核细胞——组成动物和真菌的细胞——从它们的解剖学角度上说是融合两个不同的原核细胞。按照同样的推断,自养的真核细胞——植物和海藻的细胞——合并了 3 个。线粒体本是变换成一个真核细胞的细胞器的原型的共生体,它管理需氧呼吸的复杂循环。安装在真核细胞中的线粒体数目正比于它的能量需要,线粒体向它提供的能量输出差不多就等于同样数量的需氧的原核细胞所提供的。在真核细胞的单个细胞中,包含了细胞内原核生物的共生群丛,地球为它的到来已经作好了充分的准备。

仅仅根据 15 亿年以前最早的这种巨大的——与原核细胞相比——细胞的尺度,就可以断定它们真核细胞的身份。装备一个细胞核和有丝分裂纺锤体以处理其复制的复杂性,这种细胞具有无限制的获得遗传信息的能力。从这些生物产生了 4 种完全不同的生物界,以补充它们的祖先原核生物,扩大了生物圈并使之多样化。



大气圈和水圈的旋回周转被生物圈大大促进了。水 (H_2O) 中的氢释放出来用于植物中葡萄糖 (CH_2O) 的光合成, 氧则放到大气中 [见第 266 页]。从动物和植物的呼吸作用它成为 CO_2 回到大气中 [见第 270 页]。在高空的臭氧层中, 在 O_2 变成 O 和 O_3 (臭氧) 的循环中吸收高能辐射, 保护了下面生物圈中的生命。大气中的氧由于生命过程而得以保持, 如生命不存在时就会很快消失。 CO_2 中的碳循环, 从大气通过光合作用到 CH_2O , 再经过呼吸作用变成 CO_2 。植物和动物的组织在土壤中腐烂, 将多数 CO_2 交回大气。人类的活动使碳的周转增加 25%。海洋拥有地球上 15 亿立方千米水的 97% 75% 的淡水被禁锢在极地冰层和高山冰川中。通过大气中 0.03% 的水蒸气, 太阳能推动海洋和陆地之间的水周转。

4 个新的生物界

真核生物界突然出现了。最早的古生物学家对寒武纪岩石中化石的突然出现感到惊奇,其年代现在确定为 5.7 亿年前。他们把更古老的地层都归入一个叫做“前寒武纪”的神秘和未知的过去时代。这个生物界的全盛时期现在已经追踪到寒武纪之前 1 亿年左右留下的化石。

在 5 大界的分类系统中,原核生物用更为熟悉的名字——细菌来称呼。把不算作真核生物的其他一些生物——例如阿米巴和疟原虫——就称做真核原生生物。最早的真核生物的直系有多细胞的动物界和真菌界。当然,这些异养生物界中没有一种能够在第五种生物界,即自养植物界不存在的条件下生存。甚至无所不在的、变幻无常的蓝细菌也不能满足它们对氧的大量需求。植物也能大量供应有营养的葡萄糖,这是细胞呼吸燃烧的燃料。

动物界如阿米巴,以及植物界都从真核原生生物界中出现,这表示这个真核原生生物界好像一个包罗万象的容器。它也包括真菌界的类似物。对其全体成员进一步的了解得知,还有从细菌的共生习性中产生的其他创造被隐藏了起来。有一些被它们的原始共生体纳入除最结实的原核生物外所有生物都共享的生态位中。它们的嵌合体的才能表示出原初的合作者的复杂性。某些真核原生生物,例如海草和红藻“海藻”,是多细胞生物并为常去海边的人所熟悉。

早期真核生物向着形式的多样性——像螨和鲸的差别——的进化过程中发生过多关键性的转变。一是有性生殖 [见第 289 页]。直到那时,遗传交换大多是随机进行的。随机交换的趋势是均一性,原核生物统治的相对无特征的地球就证明了这一点。有性生殖通过个别的生物开通了基因流通的渠道。亲代基因在受精卵中的混合保证了没有两个后代(从一个受精卵分裂变成的

双胞胎除外)完全相同。总之,趋势是多样化。对于种群来说,性别保证了特性的基因库的散播,这种特性被当时给定的以及后来又改变的环境的选择所青睐。

带着包含不断增加的遗传信息图书馆的染色体的真核细胞开创了生物化学中创造的新时代。它们塑造了在原生生物的全部书目上没有的分子。一个又一个的细胞品系开始合成巨大的聚合物。一种早期的创造是壳多糖:一种坚韧的角化物质,由捆绑在蛋白质阵列中的多糖链组成。壳多糖为大多数关系疏远的无脊椎动物提供结构材料。它组成了节肢动物——即所有的昆虫、蜘蛛和甲壳纲动物——的外骨骼。它是蜗牛、蛤和其他软体动物,以及扇贝及其他腕足纲动物的刺毛、关节和壳的材料。壳多糖在真菌和绿色海藻的细胞壁中出现,表示这种聚合物最可能最早是由共同的祖先合成的。有刺的外骨骼表示疑源类。对于脊椎动物,角朊起了和壳多糖十分相似的作用。蛋白质聚合物是毛发和指甲、蹄和角、乌龟壳和鲸须的“骨骼”材料。

一些植物的祖先开始制造纤维素,一种多糖。以后出现的植物合成出木质素,这是将树木中的纤维素结合在一起的一种胶。这两种物质支持绿叶使它能接受太阳光。这些物质现在组成了整个地球上所有真核细胞的生物量的50%或更多。

真核细胞生物化学中的一项早期创造是有机分子中碳酸钙和磷酸钙的结合。珊瑚礁,多佛的白色悬崖和全世界各地的白垩沉淀表明了这种真核原生物的活动程度。“生物矿化”产生了最早的硬化石,软体动物和其他海生无脊椎动物的壳和外骨骼。以后,它就被用来建造脊椎动物的内骨骼。

生物化学中许多这种创新一定是由真核细胞解剖学中有了细胞核以后的关键的创新:即细胞膜的发展所引起的[见第261页]。细胞膜不仅仅是容器,细胞膜还是将细胞和周围世界联系起来的积极活动的器官。

第一个捕食者

对于进化限于同质性中的原核生物所在的星球来说，真核细胞膜引起了革命。细胞膜的灵活性可以通过吞噬作用吸纳营养。这是粒子的吞食，这和原核细胞通过渗透吸收分子不同，因为大多数原核生物被限制在它们的僵硬的蜡囊中。细胞膜和粒子或猎物的接触处会凹进去，将猎物或粒子拉进细胞内部。通过吞噬作用，一个真核生物可以吞下整个活的原核生物。真核细胞膜将捕食引入进化过程中。

捕食是产生多样性的力量，它并不是，尤其是在细胞膜作中介时，“牙齿和爪子上大自然的红色”。大自然应被看作是结出共同果实的许多生物种群的和谐协作，或许不能要求像人那样抑制冲动。

古生物学家把寒武纪多细胞生物的突然出现称为“古生物学的最最难解的问题”。现在搞清楚了，真核细胞的异养生物解答了这个问题。通过蓝绿藻的供养，它们打开了通向多细胞生物界的道路。这是约翰·霍普金斯大学的史蒂文·斯坦利（Steven M. Stanley）提出的对这生命历史中的转折点的有说服力的解释。

这是新的生态科学的原则，“发生”——比捕食更为自然的词——给生态系统带来多样性。观察表明热带雨林中的食植动物的多样性和当地的植被的高度多样性有密切关系。在冈瓦纳大陆上，最后冰封的 2 亿年以前，在这些古老的森林里有足够时间可以实现植物物种以及它们的捕食者的高度多样化。树木倾向于生长在靠近亲代的地方。然而，食植动物总是局限于宿主植物的范围。在热带雨林中，每种食植动物会引起特定的树种产生可观察到的分散，因此可以谈论每公顷树种的多样性。三叶胶橡树上的食植昆虫和寄生真菌限制了它在亚马逊本土的种植。还有，旅行者知道西伦盖蒂大平原将有蹄动物的多样性归因于捕食

它们的猫科动物——狮、豹和猎豹——的多样性。

实验证实了这种观察。在一个海洼地中去除了主要的食肉动物后得到的结果是，那里的食植动物的多样性很快减少。逃离捕食动物后获得安全的大多数成功的食植动物就会排挤掉其他食植动物。同样，消除了海里食植的海胆后会让占优势的海藻种群接管整个领地。食肉动物和食植动物随机相遇，吃掉了更多的数量的较多的猎物，为它们的竞争者扩展了生态空间。这种生态系统中的周转如此可信地发生，如同发现非线性方程的普遍规律一样。

蓝细菌在没有捕食者能把它们全部都吞吃光以前就已占领了海洋。重大的进化在大约 10 亿年中改变了细菌世界。异养真核生物和它们的多细胞后代的出现，并在进化中越来越快的多样化过程，使得生物的多样化达到顶峰，不久以前终于迎来了人种的出现。

第一个多细胞生物

现在知道的出现在沉淀下来的沉积物中最早的多细胞生物大约是在 7 亿年以前——在前寒武纪最后的 1.3 亿年中——的劳伦超大陆的西岸。这些沉积物是隆起在北极圈下面加拿大西北地区马更些山脉中。20 世纪 80 年代末加拿大地质学家发现并研究的生物化石是在 2.5 千米深的地层中找到的。它们充分地展示这些动物群在以后 1 亿年的进化。

马更些生命形式，特别是较晚的一些的，曾在世界上 25 个不同的地点被发现，从北冰洋的斯必兹伯根到澳大利亚都有。由于 1949 年在澳大利亚首先发现这种动物群的所在地，因而将其命名为爱地亚卡拉动物群。

另一个岩石中的证据引起的一个发现几乎和多细胞生命的出现一样令人惊奇。它表明进化的浪潮发生在地球变成对生命

最不友善的时代，而不是地球上开始出现生命以来的任何时候。在每一个地方，世界范围的冰川作用的废墟都包含化石的沉积物。因为上述岩石在斯匹次卑尔根群岛^①上，它被称作瓦兰吉冰川时期。

地球上最长的冬天

最近对刚果克拉通中古代事件后果的研究弄清楚了这次冰川作用是地球上最长的一个冬天。大量的冰块漂浮在中纬度的海洋上。在这些纬度的大陆边缘，冰川一直碰到海底，就好像今天南极洲东部冰川那样一直达到海底。地球成了一个“雪球”。

在马更些遗址，冰川压在含有 7 亿年前最早的化石的沉积岩上。在这个地层下面是更早的全世界范围的冰川作用的岩屑。

这次冰川作用的证据是 20 世纪 50 年代中收集起来的，当时古地磁学开始绘制元古宙晚期大陆块的迁移图。岩石中的钟和罗盘表明所有主要的陆块在 10 亿年前曾经结合成一整块横跨着赤道的超大陆，称作罗得超大陆，劳伦古大陆就在其中央。南极洲克拉通当时在赤道以北，它毗连劳伦古大陆西侧。当南极洲克拉通漂移离开后，劳伦古大陆西侧变成它的西海岸，它们之间开放出一片海洋。沿着这些含有化石沉积物的海岸现在成了由落基山脉延伸的马更些山脉远处高耸的岛屿 [见第 335 页图]。

随着超大陆的分裂开始了漫长的冰期。几百万年的冰川作用和几百万年的解冻相互交替，漫长凛冽的冰川时期结束的同时出现了最早的多细胞生物。在当时整个时期内，岩石中的钟和罗盘都表明主要的陆块漂移到中纬度。地质学家现在解决了这个问题：冰川怎样使大陆保持在赤道南北 30 度范围内？答案来自生物学和地球物理学。这再次表明地球上现有的生命如何严重

^① 译注：斯匹次卑尔根群岛在挪威。

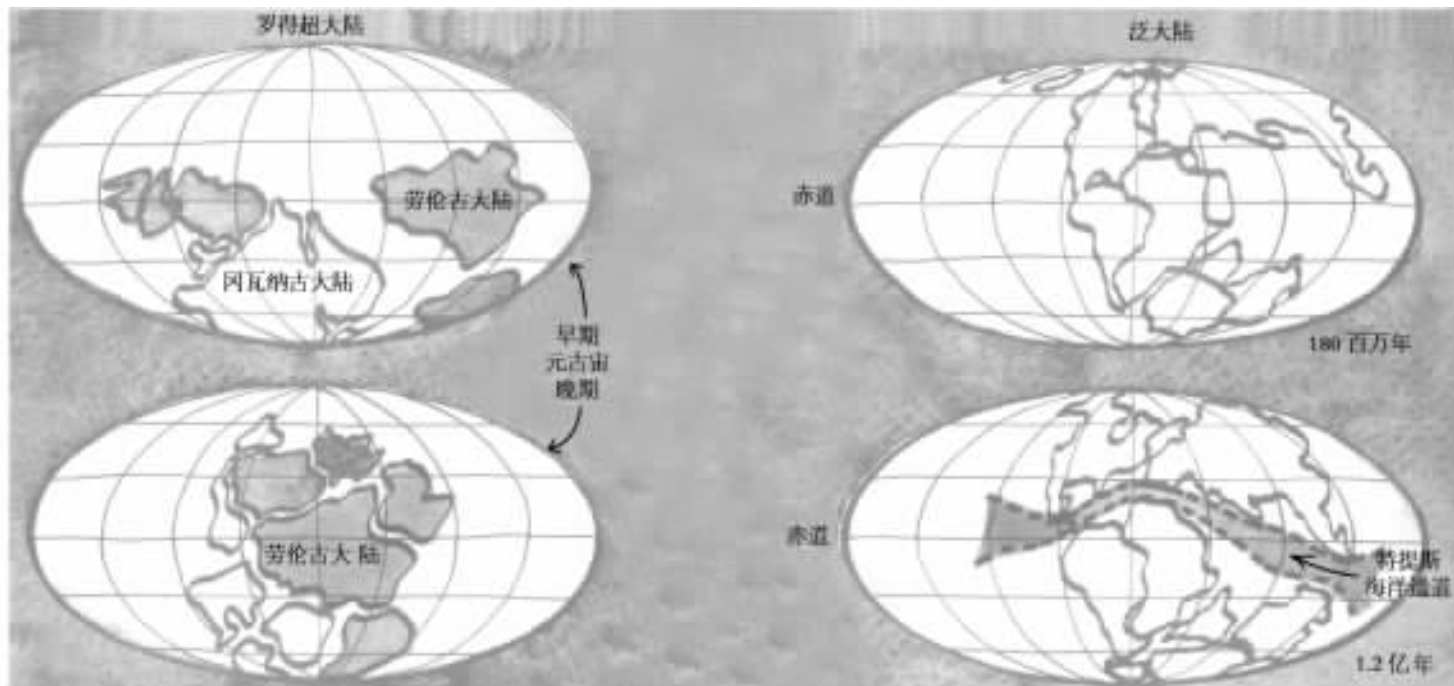
地关系到地球上的生命。剑桥大学的布赖恩·哈兰德 (W. Brian Harland) 已在收集到证据之前于 1964 年作出了回答。1992 年, 约瑟夫·柯许温克 (Joseph L. Kirschvink) 以现在的证据所确认的形式发展了它。

太阳辐射主要通过中纬度的海水的吸收使地球温暖。经过元古宙冰期的晚期, 反射和排斥太阳光的陆块取代了在这些纬度上收集热量的水的大部分面积。这使全球温度降低。同时也是自相矛盾的, 生命的繁荣生长使全地球温度降低得更多, 超大陆的分裂使大陆的海岸线增加。这意味着有更多的生命居住着。光合作用用去大气中的二氧化碳——碳通过生态系统后最终埋葬在海底——超过了火山喷发到大气中的二氧化碳。温室被破坏引起温度降低到冰点以下, 甚至在赤道处也如此。最早的雪增加了地球的反射率, 即反照率。失去控制的正反馈过程中反照率的增加进一步降低了地球上的温度, 使冰川扩展到全世界。

在生命差不多要停止的时候, 活火山的活动使得超大陆分裂, 恢复了二氧化碳温室。冰库融化了, 循环又重新开始。

这样的情节在刚果克拉通中被揭露出来的末期冰川的记录中找到了有力的证据。哈佛大学的保尔·霍夫曼 (Paul F. Hoffman) 和他的同事们在 1998 年把这个故事重又讲了一遍, 特别是关于第二期冰川, 在沉积岩中的碳同位素的比例为这提供了主要线索。

在冰川作用以前的时期, 这个比例反映出生命的生气勃勃。在有机化合物中固定的碳构成了海底碳的数量的一半。正好在冰期之前, 测量记录中这一比例突然减少, 至少在局部地区, 生命过程肯定是停止了。没有比最早的元古宙更年轻的沉积物具有这种只有无机碳的沉淀才能造成的比例。因大陆的侵蚀造成沉积物相应减少表明气候本身中水循环的停止。水蒸气从大气中凝结出来。



8 亿和 2 亿年前的超大陆是生命进化中出现关键性进展的地方。在更古老的时期，南美洲、非洲、印度和澳大利亚的原始大陆的核心，称做罗得超大陆的克拉通最早组合在冈瓦纳古大陆中。在地球的第一次冰期，从南极区域产生冰川，但不是从南极洲克拉通产生的，当时这里还处在劳伦古大陆西北海岸的位置。这个海岸现在是加拿大落基山脉的马更些山区，这里有 7 亿年前沉积下来的后来发展成为植物、动物和真菌的已知最早的多细胞生物的化石 [见第 337 页]。在泛大陆中可以辨出现代的大陆。作为爬行动物和哺乳动物的祖先的各种各样兽孔目动物的物种统治了未被触动的大陆，这些物种渗透到从南极到北极、岸上和世界海洋，即泛大洋的每一生态系统中。恐龙在因泛大陆断裂而形成的热带特提斯海洋通道繁荣生长 [见第 347 页]。

马更些沉积物包含使我们返回到早期元古宙的特殊证据。条带状铁建造经过 20 亿年后再次沉淀在那里的沉积物中。

回到刚果克拉通,压在这下面的地层包含被冰川作用冲洗过,在冰川退却时沉淀下来的石子和其他碎屑。第二层冰川后的沉淀被无机碳厚厚地覆盖着。碳酸盐的“压顶石”显示了温室突然重新出现。生命仍处在低潮时期,碳从地幔通过火山喷出后又直接埋葬到海底。它的沉淀由于水圈循环的恢复和大陆的侵蚀而加速。局部的测量表明,地幔在全世界范围内产生足够的碳,将地球埋在深达 5 米的碳酸盐中。通过这种沉积作用,埋藏的被活细胞处理过的碳中的同位素的比例变化得很慢。

最佳的估算表明,冰川作用延续达 900 万年。或许不难想到在这个时期中只有原核生物能坚持下来。真核生物必须在某个地方找到温暖的避难所,或许就在沿着火山和板块活动加热的大陆岸边。

退却中的原核生物

整个记录看来都有利于居维叶的科学灾变说[见第 303 页]。它确实促进了生命形式多样性突然涌出的另一生态学的解释——与发生相伴随。900 万年的冻结清理了蓝细菌独占的海洋。对于存活的各种生物——当然包括蓝细菌——解冻的地球是一个公平的竞技场。真核细胞的异养捕食者的存在使独占者留在海湾。以前出空的生态位开放给新的真核自养生物,植物界的先驱者绿藻。

在马更些沉积物中发现的化石是地质学中稀罕的偶然事件,这里保留下了软组织的痕迹。生物矿化已经制造出了海生无脊椎动物的壳,这些壳是寒武纪 1.3 亿年以后的海底地层的标志。最早的马更些化石只能勉强被辨认出是生物。它们在页岩和细粒砂岩中的痕迹是一些环,环的直径为 1~3 厘米,截面为 0.2 毫

米。还有一些同样直径的盘，沿着盘的圆周有一个环，盘中央隆起。少数有辐射状脊。这可能是它们在其中生成的泥土或沙粒偶然弄出的机械损坏。但如果这样来解释的话它们实在太多，并且容易辨认，形状上又重复。同样的原始的形状出现在俄罗斯、中国、纳米比亚、澳大利亚和其他地方发现的更易辨认的较晚的埃迪卡拉集聚的化石中。在 6.5 亿年至 6.2 亿年前，多细胞生命在全世界范围内传播开来。

最早的，时间在 7 亿年前的马更些化石属于 3 种分类群或类型，而不是生命历史的 3 种不同阶段。这些环形和圆盘形的生物肯定有它们更简单的祖先。最不复杂的活的多细胞动物 *Trichoplax adhaerens*，用肉眼只能勉强看见，如果它留下任何痕迹的话，也只可能留下完全没有任何特征的化石痕迹。马更些的冰川期前的生物已经把过去的 *Trichoplax* 精心制作成辐射对称的形状。像 *Trichoplax* 那样，它们无疑组成了尚未显出差别的组织，或许只是排列起来吸收营养和氧的两层细胞。马更些的样品可能只代表广泛多样的生物的无穷小的一部分，显然这许多种类的生物比起马更些沉淀物中的生物更难相互区分出来。

在冰川期以后的马更些化石中还有在其他埃迪卡拉位置发现的形状。短短的 5 000 万年时间——比起以前的 30 亿年来是足够短了——形状上产生了相当精巧的变化。有类似于今天潜水员熟知的海鳃般的蕨类植物。还有像水母般的类水母体生物的痕迹。更加精巧的是环节动物蠕虫的部分的化石。从它们的后代或类似的生命形式可以推断出进化已经通过了重要的里程碑。通常可以认为是动物的动物基本身体构造的轮廓已经出现了。

进化中的行为

计划开始实行了，由未分化细胞的组织围成空腔，就像在海绵中那样。在胚胎发育的“囊胚”阶段，所有动物在短时间内部

是这种样子的空腔。类水母体的腔体包含在另一个腔,即体腔中,并且各有不同的组织。从环节动物中的类水母体的辐射对称性发展出今天人们最熟悉的各种动物左右对称的特点。这些蠕虫也表现出多数动物都有的3种类型的组织分化——外胚层、中胚层和内胚层,大致相当于皮肤、肌肉和消化道。进一步,蠕虫具有骨骼:围绕着肠腔的体腔中液体的液压骨骼。用它们分开的肌肉系统挤压液体在体腔内前后移动,蠕虫能够钻进海底的缝隙中。这种行为开始在进化中起作用了。

对未来的进化十分重要的是埃迪卡拉“遗迹”化石。它们更为经常地出现在沉积物中而没有留下蠕虫化石的痕迹。海洋蠕虫在今天的海底留下这种痕迹。它们和其他吃海泥的生物引出碳循环的关键阶段。它们消化埋藏的碳并产生二氧化碳返回大气中。它们的前寒武纪晚期的祖先提供同样的服务,肯定帮助推动了最后一次冰川时期末了温室的恢复。

从赖尔收集开始以后的一些年代中,寒武纪——5.7亿年到5.1亿年前——的岩石中产生了数以吨计的化石。在所有这些时间内,古生物学家识别出其中保留下来的生活型并将这些生命形式分类。他们几代的努力现在获得了重要的结果。寒武纪的各种生命形式已具有今天活在世界上动物界的30门到40门中除了一种以外所有的动物的代表。除了少数几种无脊椎动物门以外,所有的动物都仍旧留在它们开始出现的地方,即在海底,许多固定在海底成为植物。寒武纪后出现的一个动物门也是一种固定的海洋动物,称为苔藓虫门,这样称呼它是因为这种动物很像绒毛状的苔藓植物。

在分类学中,门是界以下的第一等级。门是按照身体轮廓的主要差别来相互区分的,譬如,可以从脊椎动物和所有无脊椎动物的不同看出,也可以从海鳃、软体动物和苔藓虫的差别看到。门的数目是30还是40依赖于分类学家是“主合派”还是“主

分派”而定。

对前寒武纪岩石的新认识使古生物学家观点空前一致。证据表明,动物界的各门在不到 2 亿年内从早期马更些沉积物中保存的生活型的无特征的集聚分化出来了。

其他化石宝藏表明寒武纪作过比今天人类存在更感到迷惑的、更为广泛多样的生活型试验。这是 1909 年史密森学会秘书、古生物学家查尔斯·沃尔考特(Charles D. Walcott)于加拿大阿尔伯达省的班夫附近发现的勃捷斯页岩。这些化石躺在劳伦古大陆西海岸,大约在马更些沉积南面 1 500 千米并在它 1.8 亿年之后。由于另一个幸运的偶然事件使现在已变硬的动物软组织得以保存下来。从山上挖掘出来并带到史密森学会研究的勃捷斯页岩在那里和其他研究所里作了仔细研究。从可分成 120 种不同的类型的形形色色的解剖学模型明显看出,已经使用了它们的单细胞和多细胞的真核生物祖先创造的所有聚合物。它们可以让观察者辨认出是属于现在活着的哪一种动物门。

20 世纪 70 年代,剑桥大学惠廷顿(H. B. Whittington)和他的学生将 120 种解剖结构分类成 18 种有明显的特点的不同门。在这 18 门中他们设法将其中 8 门和现今存活的各门联系起来。活着的门中除了两种以外,其他所有的都被限制在海中和海底:类水母体、海鳃和环节动物,从埃迪卡拉时代延续至今;以及可以归类为腕足动物、软体动物、棘皮动物、刺细胞亚门动物和其他熟悉和不熟悉的水生动物的各个门。此外,还有节肢动物的祖先。从海里、陆上和空气中的节肢动物后代的丰富多样性和不同的大小表明这是所有各门中最成功的。

人最感兴趣的是脊索动物门的 60 种样品。在这一门中有脊椎动物的 8 个纲,哺乳动物的 35 个目;灵长目的 7 个科,人猿和人属的 4 个属。



一个更加奇怪的念头促使哈佛大学的斯蒂芬·杰伊·哥尔德 (Stephen Jay Gould) 提出一个问题,假如脊索动物门是 10 个勃捷斯页岩 [见本页插图] 门中今天没有被发现的一种,若骰子以另一种方式滚动,他得出结论,进化就不会产生人类或类似于人类的具有意识智能的生物。在勃捷斯页岩中凝结了使达尔文对之退缩的盲目的力量的作用。

“近代综合”中的进化

对从近代综合中认识到进化作出贡献的那些人的功绩是看到了进化从它的开始起的整个故事。达尔文只限于考虑它的结果。从新的视角来看,进化显示了孟德尔的生命形式世代遗传的千变万化的力量。

当然,化石记录是不完全的。大多数动物生活并死于江河流域,这种地方地质上的变迁在人类一生中也可以亲眼目睹。骨头和坚硬部分可提供证据,偶然的机会有保存了这些记录。无论如何,统计采样明白地揭开了中心主题。进化的章节在寒武纪之后

一次又一次地重新编写出各门的分化和精确化的原始情节。每一门都实现了在马更些沉积中差不多是无特色的化石的某种潜在可能形式的一种。这些门从勃捷斯页岩中比较明显的潜在可能性中辐射形进化出新的形式。此后,通过一连串级联式的放大并实现了潜在可能,进化产生了生活型的多样性,现在这些都可以从最晚出现的生物分辨出来。

地球有很长的历史,寒武纪后 5 亿年可以用烟火技术专家放出烟火的壮丽景色来比喻。一个火花又辐射出一阵火花。比喻的说法是任何情况下在新达尔文主义的自然选择原则比马尔萨斯主义的修枝剪刀更受人欢迎。

乔治·盖洛德·辛普森 (George Gaylord Simpson) 是近代综合的主要作家。他在 20 世纪 30—40 年代在美国自然史博物馆时作了马的进化的权威性研究。它从后寒武纪晚期的小型四趾的始祖马开始。从那时开始,进化到单趾的现代大型有用的马属,是直线式的“进展”。事实上,辛普森追踪的进化转变表明一点也没有转向。在一系列的“适应的辐射形进化”中,为数众多的三趾的属,然后是二趾和一趾的动物,“机会主义地”占据了南北美洲和欧亚大陆环境中不同的生态位。这种辐射形进化来得很快,各为几百万年。它们表明没有迂回曲折而只是适应当地的环境。这些存留下来的种起源于草地遍布于北方大陆时适应于放牧吃草的动物。除了马属和差一点灭绝的普氏野马,其余的灭绝过程经过了比初始辐射形进化更长得多的时间。

辛普森在马的进化中发现一条普遍定律。进化以不同的步调进行。辛普森根据希腊文杜撰出一些词汇,如 bradytelic (进化缓慢的) 和 hypobradyltelic (进化次缓慢的),将元古宙进化的速度区别于显生宙的 horotelic (进化中速的)。一般情况下,随着新的形式的开始及其属和种辐射形进化到新的生态空间,进化加速为

tachytelic (进化快速的)。到生态空间达到饱和,它又变慢到 horotelic (进化中速的) 的速度成为优势。辛普森定律今天以哥尔德的更普及的名称“点断”进化而为大家所熟悉。

在辛普森的时间表上,寒武纪结束之前出现的所有现有的动物门必需被看作第一次 tachytelic (进化快速的) 辐射形进化。只考虑脊椎动物门,下一轮在 1.75 亿年中出现了脊椎动物的 8 个纲中的 5 个:无颌鱼;称做盾皮鱼的有颌有甲的并已绝灭的鱼类;软骨鱼;硬骨鱼和两栖动物。

水中的里程碑

在无颌鱼中,脊椎动物的主要组织和内部器官都已经有了。这一门中两个不灭的纲的代表:七鳃鳗(又名八目鳗)和盲鳗一直存活至今并受到解剖研究。最早在环节动物蠕虫中看到的三层细胞已经完全分化。进化在所有脊椎动物的胚胎发育中不断重演,外胚层产生了皮肤的表皮组织和中央神经系统并且还有牙齿珐琅质、毛发和指甲的角朊。中胚层生出骨骼、肌肉系统和心血管系统;从内胚层生出胃肠系统和附器。令人惊奇的发明是脊椎动物的眼睛,按工作状态安放好了。有颌鱼下面出现的脊椎动物的四足轮廓已经完备。可以看到,脊椎动物发展的所有这些里程碑都是在水中进行的。

水和陆地之间的距离由于鱼的漂浮气囊用作肺的适应性变化而缩短了。今天在通过埃弗格莱兹地区公路上,肺鱼成了道路冤鬼。两栖动物就是从它们产生的。开始时的生命仍旧是没有腿的、有鳃的水生动物,两栖动物在水中完成了它们成为呼吸空气、居住在陆地上的四足动物的变形。

两栖动物来到陆地上居留是在大约 3.8 亿年以前。它们又产生出脊椎动物的另外 3 种纲。首先出现的是爬行纲,从它们又产生了哺乳动物和鸟类。

在两栖动物和爬行动物之间关键的转变是生殖方式。两栖动物的交配和鱼一样是在体外。卵和精子随机地在周围的水中融合。在那种充满敌意的环境中,在胶质包裹着的卵中进行着胚胎发育过程。爬行动物的受精是在体内。交配选择的高级行为在这里进入了自然选择的过程。壳包着的卵保护胚胎和最早的羊膜营养。它在多种生态位中孵化并且在已可以不在亲代的照顾下出壳。

辐射形进化到下一层次,就是目,这一层次进展更快。在第一个5 000万年中爬行纲出现6个目,在下一个5 000万年中又出现10个目。两个目进入海洋,一个目到天空。陆地的目有各种化身——有会爬树的像松鼠那样的爬行动物,有的像会掘地洞的鼯鼠,有的在沼泽地食草的河马,有的像吃植物的长颈鹿——在每一生态空间都有。对于适当大小的食肉动物来说,食植动物为它们提供交叠的生态空间。著名的恐龙是这16目中的两个目,其中之一鸟臀目恐龙(“鸟的臀部”)变成了鸟。3个目——海龟目,就是乌龟;有鳞目,蛇和蜥蜴;鳄目,鳄鱼和短吻鳄——从2亿年前的爬行动物时代存活至今。

到那时候哺乳动物纲从最早的爬行动物6个目中的1个发展出来。如果进化是有计划的,那就不会出现爬行动物时代。兽孔目爬行动物比恐龙更加“高级”。这是说,它们在各个方面更像是哺乳动物而不像爬行动物,除了一点:它们是产卵的动物。它们在骨骼结构上像哺乳动物,它们明显地具有哺乳的热血动物的优点,新陈代谢保持其体温不受周围环境的影响。这些朝气蓬勃的动物经历了适应的辐射形进化,在不到1 000万年的时间内产生了20科食植动物、食虫动物和食肉动物。在5 000万年中它们是数量最多的“优势种”大型动物,栖居于泛大陆的超大陆上所有生态系统中。

然而,兽孔目除了一个科以外都在3亿年以前不明原因而在

全世界突然绝灭。它们绝灭后将世界留给了恐龙。从存活的二齿兽产生了哺乳动物。哥尔德会把这说成是对于人类的骰子第二次幸运一掷。

哺乳动物主要的选择优势当然是它们的生殖方式。大约 2.5 亿年前,二齿兽的后代完成了从羊膜卵到胚胎的变换,强迫胎儿待在母体子宫中一定时期,并让婴儿待在有乳腺的乳头旁边。过渡的哺乳动物存活了下来。鸭嘴兽产卵,但给它的雏兽喂奶。有袋目动物——美洲大陆上的袋鼠,中国竹林中的大熊猫^①,澳大利亚的袋鼠和其他有袋动物——将发育未全的胎儿放在一种外子宫,即育儿袋里,在这里面哺乳以完成它们的胎儿的成长。

即使在恐龙控制地球的时候,哺乳动物也产生了 3 个目,但都在恐龙统治下灭绝了。大家都同意在 6 500 万年前的一颗陨星将哺乳动物从恐龙的存在中挽救出来。在 1 000 万年中,哺乳动物的 18 个目辐射形进化到空出的生态系统中,在以后 2 000 万年中又出现 8 个目。有两个目的哺乳动物又回到海中,一个目飞上天空。总之,在 6 500 万年中哺乳动物纲中出现 32 个目,20 个目存活至今,它们有很大的差别,从鲸到象,从非洲旋角大羚羊到狮子,从蝙蝠到鼯鼠。

近 20 个目的哺乳动物中包括数目众多的科,其中有 4 500 个物种。科的种类繁多,像裂足类的熊,浣熊,狗,猫,鬣狗和灵长目;属,如狮子和老虎的区别;种,阿拉斯加棕熊和灰熊。反复回转,或辐射形进化与灭绝,在这些水平上在较短的平均时间内,当然也在很大的范围内产生变异。化石记录表明,哺乳动物的物种在几百万年内不断出现又绝灭。

植物先出现

如果没有植物首先占领大陆,就不会有这 4 亿年中给脊椎动

^① 译注:大熊猫不是有袋目动物,作者弄错了。

物生命的繁荣提供陆地上的生态空间。在植物出现以前必然先有蓝细菌。它们首先改变陆地上景色。水从高地流到浅水池,汇成小溪流进大河,大河被限制在由于它们的渗入而加固的河岸间。

在陆地上这些条件为最早植物的占领提供了保证,这些植物在 4.3 亿年前覆盖了陆地。它们比没有分化的绿藻细胞形成的盘稍微高级一些。为了防止脱水,它们发展了角质的外层作为保护,这种角质是这些生物暴露在开放的空气中时“碰巧”合成的聚合物。不久,这种原始植物的细胞分化成根、茎和叶的组织。此后,它们很快辐射形进化到新的陆地生态位中。在 5 000 万年中,它们在大陆低地形成相当多不同种类的树林。在发展过程中,它们分化出韧皮部和木质管状组织,它们在维管植物中运送养料和水。

在 5 000 万年的时间中,这些树-蕨森林带来了环境革命。它们的光合作用将大气中氧的浓度提高到现在的 21%。从这以后,陆栖的节肢动物、脊椎动物和真菌的呼吸,加上植物本身的呼吸,使氧含量始终保持在这个水平上。氧逃逸到高层大气中,最终建立起臭氧层。在这里吸收高能太阳辐射,通过不断地使不稳定的臭氧分子 O_3 的键断裂和联结,阻断了高能辐射,保护了地上生命。二氧化碳的周转随着地球上生命的增加而剧增。无论如何,它在大气中的浓度——由火山的输出到光合作用与呼吸的周转,到沉入海洋的它的无机化合物的整个反馈回路所决定——始终稳定在对生命有益的温室效应需要的范围内。

这些森林的存在被 3.6 亿年至 2.9 亿年前形成的贫煤矿层记录下来。煤层和沉积物地层的交替记录下生长森林的沼泽地经历了周期性发生的枯水和洪水。在这些年代中海平面随着冈瓦纳古大陆上冰川的前进和后退涨落 100 次。在这巨大的陆地上,现在的南方大陆已经在南半球组成,从南极到赤道。有时候

极地冰帽涌入热带纬度并在那里熔化。

对水和湿度的需要限制了最早的植被范围。在蕨类和苔藓的有性生殖循环中,精子在水中,在茎上,或在叶子下部使卵受精。相当于从两栖类动物的凝胶包裹的卵到爬行动物的硬壳包裹的卵的变化,产生孢子的植物让位于裸子植物。风带走这些植物的“裸露的种子”——实际上是胚胎——今天从罕见的铁树和银杏以及大家熟悉的针叶树科植物可以知道。在3亿年前开始的第二次快速的辐射形进化中,裸子植物的森林及时取代了蕨类植物森林,点缀了恐龙时代的风景。

开花的植物

再一次像爬行动物转变成哺乳动物一样——也在同一时间——裸露的种子让位给受羊膜保护的被子植物的种子——又是胚胎。这些繁荣生长的植物吸收了动物和风参加到它们的繁殖过程中来。共生使植物和昆虫沿着开辟了无穷多的共同进化的道路。植物寄主和它们的寄生物以及共生生物在几百万年中共同维持它们的生存。花朵的适应功能是吸引昆虫和鸟——例如蜂鸟——以及哺乳动物——蝙蝠。每一种花吸引它自己的传粉媒介,保证它的花粉能有效地散布到其他同种的花朵上。植物也以各种策略罗致昆虫、鸟和哺乳动物散布和播种它们的种子。羊膜的营养支持了种子的发芽。

6500万年以前开始的开花植物的辐射形进化迅速地用它现在的植被装饰世界。落叶的被子植物的阔叶树在温带和针叶树共享林地并倾向于取代它们。草本植物——日常谈话中所说的非木本的开花植物——和草造成陆地风景最大的革新。它们的局部生态系统占据了以前容易被侵蚀的大片土地。草之开始发展出它们连续不断生长的特性是在最近3000万年前,是和吃草的马和有蹄动物共同进化的,这些有蹄动物在数量上超过了吃草

的物种。在最近的 1 万年中,草本植物和草与人类相互支持、共同生存。

4.3 亿年前最早的原始植物布满陆地时,元古宙超大陆的碎块正在重新组合。现代世界地图上的南半球大陆已经联合成冈瓦纳古大陆;当它们漂移到南极时又潜入南极冰帽下面。在以后的 1 亿年内,当两栖类动物变成爬行动物时,劳伦古大陆和已经形成的北欧陆块发生碰撞开始组合成劳亚古陆。在 2.5 亿年前,劳亚古陆和冈瓦纳古大陆的结合使兽孔目爬行动物可以在泛古陆这一整块超大陆上从北极到南极自由漫游。紧接着兽孔目爬行动物之后出现的最早的恐龙与它们共享这一大片土地。它们在大陆的中央沙漠周围,在超大陆的两边找到了它们的栖息地;在每一边都是包围着的泛大洋[见第 335 页图]的世界的海岸。

在大约 2 亿年前大型恐龙出现的时候,泛大陆开始分裂。特提斯海洋通道在劳亚古大陆和冈瓦纳古大陆之间沿着赤道将大陆切断。对陆地上最大的动物来说,只有沿着这热带的海洋通道繁荣起来的沼泽地和水洼地能提供足够的饲料。它们将巨大体重漂浮在浅水中,以减轻它们的肌骨骼系统的负担。恐龙也在沿分割北美洲 2 000 万年的、联结现在向南流的密西西比河和向北流的马更些河山谷的内陆海洋通道找到食物。

在这个时代中,由于劳伦古大陆西北海岸下面的海洋板块的下沉,使得弧形列岛和克拉通的碎片和大陆碰撞。带有最早的多细胞生命的沉积物在落基山脉的马更些山脉的延伸和更南面的勃捷斯页岩中被抬举到高处。

白垩纪灾变

在那些年代中植被的茂盛可以从今天世界上存在的大部分煤矿估计出来。在美国和加拿大,这些 100 米厚的矿层,沿着落基山脉脚下的大陆海洋通道一带的地下埋藏着。在同样年代里,

细菌处理了特提斯海的海洋通道下面缺少氧的深度上的生物，在那里埋藏了世界一半以上的石油。它现在埋藏在从阿拉伯半岛到喜马拉雅山外面的哈萨克斯坦一带欧亚大陆下面的海洋通道的原生水下。

6 500 万年以前，恐龙的乐园明显地突然消失了。化石记录还不能完全肯定，这是因为靠它推定时间的生物采样在统计学上不很可靠。或许有一些不适应恐龙乐园环境的恐龙种类当时已经在绝灭过程之中了。然而，看来没有疑问的是，当时主要的恐龙群体在地质学的一瞬间消失了。普遍认为这种绝灭的原因可能是小行星。物理学家刘易斯·阿尔瓦雷兹 (Luis Alvarez) 和他的父亲——内科医生沃尔特·阿尔瓦雷兹 (Walter Alvarez) 于 1979 年注意到已确定为 6 500 万年前的富铍岩石的薄地层中的证据。有一类陨石富含铍。这种地层现在在地球各处的岩石中都被发现。通过钻取岩心将小行星撞击的位置精确定位在尤卡坦半岛包围的加勒比海湾。尘埃和火山气体遮蔽太阳许多年。人们认为，在漫长的冬天里除了 3 个爬行动物目幸存下来外，恐龙和其他所有的爬行动物都冻饿而死。光合作用的停止以同样的结局结束了裸子植物植被的优势。通向哺乳动物和开花植物繁荣的现代世界的道路已经开通。

灾难和绝种就是以这种样式在进化过程中发挥它们的作用。冰期、暖期，寒冷的海洋和缺氧的海洋一次又一次造成海洋中无脊椎动物大量的灭绝。这些动物生活在它们环境的亲密怀抱中。水传导热量比大气压下的空气快 1 000 倍。冰期的推进和退却也招致陆地上的生物绝灭。不能改变习性的动物和植物遇到前进的冰川就在它的压迫下消灭。最后的冰川和阿尔卑斯山脉的碰撞造成欧洲森林和田野上的物种多样性比北美洲的贫乏得多。在北美洲，并不排除有些类似于欧洲所有的物种也已消亡。

自然选择：一种结果

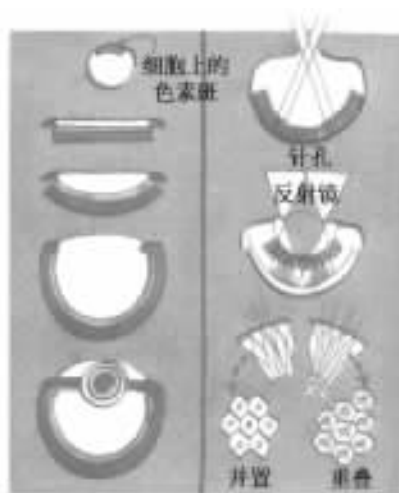
无论进化的成果是多么伟大，这些绝灭的事例不能被看作是自然选择的结果。幸存者之所以能逃避灾害，更多的是靠运气而不是自然选择造成的适应环境的结果。

乔治·盖洛德·辛普森坚持认为，自然选择不是外界对某一门或某一物种进行的手术。辛普森进一步强调，自然选择也不是有意地选择某一物种使其灭绝的处理过程。生命的形式和环境并不是两个对立面，也没有排成一方反对另一方的阵势。自然选择是一种结果，在通常的说法中它被具体化为一种力。生命形式随着环境的改变而改变。生物从自己内部响应来自环境的刺激和压力。作为环境的组成部分，它们自己也改变了环境。

选择的单位，无论是有利的或是不利的，并不是突变或者在大多数时候是单个基因的突变，如在比德尔—塔特姆的脉孢菌实验中那样[见第248—第249页]。或许双眼视觉是一种特性，是生物和环境或多或少的重要联系。这常常表达一种基因的群集。选择不是对个体的特性，而是对繁殖种群基因库中存在的这种特性。就在这种群中，孟德尔对这种群中基因的分类和重组保持这种特性和环境的动力学相互作用。随机情况对特性的这一方面或另一方面有利或不利，依靠随机的命运而定。这是特性和情况匹配的问题，特性和性质的可遗传性以及环境刺激或压力的“强度”的问题。

或许更简单的是把选择看成原核生物在太古宙时期中创造出来的各种各样新陈代谢中创造的积极主动过程。当时，随机发生突变的偶发事件的积累造成生物和环境新的联系，从岩石圈引进新的元素和化合物加以利用。含蓄地说，这种基因被环境唤醒——受到环境的“选择”。

在很长的时间里,进化一直在不断塑造脊椎动物的眼睛。人们注意到这种进化的结果曾令达尔文感到困惑 [见第 275 页]。认为这是“智慧的设计”——眼睛中任何一种特性如果没有所有其余的部分就都不会完成任何功能——是精巧的工匠做出来的。然而从开始的进化痕迹看来,虽然眼睛确实非常奇妙,但也不过是自然的产物 [见本页图]。



复杂性增加的各个进化阶段,这在所有的生物中都会发现,上图说明脊椎动物眼睛结构的错综复杂,这使达尔文感到迷惑 [见第 275 页]。单细胞膜上的色素斑对着光射来的方向;多细胞的动物带色素的细胞都以同样方式对着光;将感光细胞压缩到一个圆形凹坑中可以改进定向性,等等。像脊椎动物的眼睛那样复杂的眼睛也可以在甲壳动物的凹面镜式的眼睛和节肢动物的复眼中看到,复眼产生复合的或者重叠的像 [见第 352 页]。

光和重力一样充满了整个地球的环境。在外膜上一小片光敏色素的斑块给某些细菌和真核原生生物的运动定向以适应环境。有色素的细胞组成的斑块和重力一同调整大多数固着的无脊椎动物的生长。对植物也存在同样的情况。在某些生物中,色素斑压成的凹面改进了对光源的定向能力。已经装备了脊椎动

物的眼睛的蝮蛇,在它们头部鼻子两侧的凹陷中发展出另一对眼睛,这对眼睛对它的猎物发射的红外辐射敏感。可以用带有一个针孔的充满液体的球形凹坑来描绘鲍和鹦鹉螺的眼睛。鹦鹉螺是一种原始的软体动物。在蛤和几种甲壳动物中,一层多糖分子在眼睛背后形成凹面镜,将光汇聚到排列在镜子前的光敏细胞阵列上成像。一些软体动物,像蚌、木虫、蜘蛛和一些其他的节肢动物具有在光孔上带透镜的能够成像的眼睛。章鱼的眼睛更接近于脊椎动物的眼睛,在角膜和虹膜后面有透镜。不过,它的视网膜并不像脊椎动物那样是大脑的延伸,脊椎动物的视网膜在将神经脉冲输进视神经之前已作了初步的信息处理。

大多数节肢动物、昆虫和甲壳动物长着具有许多透镜的复眼。研究者分辨出 5 种不同的设计。最普通的复眼——大多数白昼昆虫、某些蟹和所有较低等的甲壳动物,包括鲎的复眼——的各个透镜成的像一个挨着一个,成为复合像。其他 4 种复眼——在夜出的昆虫、蟹和龙虾以及其他甲壳动物中发现——其透镜所成的像互相重叠。在效果上,叠加使夜间或在深海处接收到的光加强了。

伦德大学的动物学家唐·尼尔森 (Dan E. Nilsson) 将不同种类动物的眼睛与人所造出的各种光学器件的相似性作了比较。经过自然选择的生物“发现”光的同样的用途。动物的眼睛甚至已经具有最新设计出来的光学纤维和角反射器的特点,角反射器是放在月球上、利用地球上发射的激光束检验太阳系中引力作用的。

尼尔森和他的同事,遗传学家苏珊·佩尔格 (Susanne Pelger) 作出一个“眼睛进化所需要的时间的悲观主义的估计”。他们假设对普通的小型水生动物一代的时间为一年,并假定一个繁殖种群中突变和遗传交换适当的常数。他们的模型表明,从光敏斑到照相机式的眼睛的进化过程需要大约 34.6 万年。

用分子生物学家弗朗索·雅各布 (Francois Jacob) 的比喻,进化是 bricoleur。在拉鲁斯辞典中,bricoleur 是房子的主人,他用手头现成的工具来修理东西而不要专业工人 (métiers),管子工、木匠或钟表匠的帮助。



地球的引力将生物浸沉在重力场中比光的作用影响更深远、更恒久。从无颌鱼的时代开始,作为对重力的感应,脊椎动物的内耳中出现一个功能像眼睛一样精致的机件。这是 3 个由骨头圈成的内耳中的环形通道,就是迷路的半规管。3 个环按空间三维互相垂直地安置 [见本页插图]。在环的内部,重的流体中浸着普通的多用途的纤毛,每一根纤毛都是从神经细胞伸出来的。由于惯性,流体的运动总是落后于头部的运动。由此引起的纤毛的弯曲激发了描写三维空间中方位的神经脉冲。

进化是几何学家。这种进化所制造的欧几里德的仪器证明了几何学的客观真理,以及人类在感觉经验之外的想象力达到的宇宙中的数学真理。

对设计的渴望

在像光和重力那样普遍存在的环境刺激中,各种不同的动物

们都会进化出同样的感觉器官,这一点也不觉得奇怪。这种器官设计的趋同现象激发了渴望设计和指导进化的那些人,假定他们的目的和意愿不是为了背离达尔文。剑桥的学生西蒙·康威·莫里斯(Simon Conway Morris),和研究勃捷斯页岩的惠廷顿考虑了全体动物趋同进化的例子。作为“经典的例子”,他以海豚为例,“它从狗一类的动物进化而来但却有鱼一般的形状,因为这是在水中运动最佳的形状”。他也指出“另一个例子,在分离的大陆[分别在北美洲和南美洲]上有胎盘的哺乳动物和有袋动物中都产生出长着锐利长犬牙的大型食肉动物”。

莫里斯走得更远。他支持哥尔德,他争辩道:由于趋同进化也可能在勃捷斯页岩脊索动物品系消亡以后,在某一其他进化品系上也可能产生人类智能。简单说来,他断言“如果像智能这样的品质可以在人类也可以在章鱼中产生……那么或许有进化就有过程 and 方向”。

这很明白,莫里斯虽然没有说出来,但在他心目中指的是章鱼和脊椎动物的眼睛的相同性。尼尔森和佩尔格细心地注意到在34.6万年内眼睛并没有进化。“眼睛本身并没有太大的意义”,他们说。有光敏皮肤斑的蠕虫如果没有鱼的中央神经系统,即使长着鱼的眼睛也没有用处:“蠕虫必须先变成鱼。”莫里斯含蓄而简单地——忽略了其他见到的脊椎动物——争辩说,章鱼有人类一样的眼睛也一定可以被赋予智能。

马更些沉积物中的环节动物确实变成了有脊椎动物的眼睛的鱼。然而,哥尔德认为在成为脊椎动物的形成过程中,不断增长基因的群集是在几百万年中随机地遭遇到的随机的环境刺激和压力的机会主义相互作用中进化。用眼睛和其他器官——包括内耳中半规管——装备起来的脊索动物门的脊椎动物纲辐射形进化到在被它们占领之前还没有规定的生态空间中。

响应莫里斯的哥尔德观察到海豚和鱼以及两种长着锐利长

犬牙的老虎都是勃捷斯页岩脊索动物门中的脊椎动物后代。他问道,“假如祖先的生物不具有这些结构的先兆,我们要对[四足脊椎动物]的进化下多大的赌注?”

从寒武纪以来没有一个门绝灭。古代纲的永久的代表不断提供进化过程中发生的生命形式变换的证据。然而,物种的绝灭像个体的死亡一样自然。当动物群和植物群的栖息地的变化超过了它们适应能力的限度时,它们就会从地球上消失。随着冰期突然开始,栖息地的变化迅速发生。不久,原来生长的物种中不到 10% 仍然活下来。然而,由于最早的生命的延续——包括勃捷斯页岩沉积下来后最早的 1 亿年内的幸存者——再加上最近出现的生命形式,地球上从来都不曾有过现在如此多样的生命形式。

地球从来也没有过现在这样丰富的生命。估计活组织的全部质量达到 1.2×10^{12} 吨到 1.4×10^{12} 吨。总的来说,植物界的组织占了近一半;其中很大的百分比是细胞外的纤维素和木质素。所有的动物界和真菌界的组织加在一起不大于全部生物量的 2% 或 3%。如果吨位数值可作为一种标志,那么进化的最重要的创新是在最早的时期。细菌占生物量吨位数的一半或更多。在泥土和水中,在洋底淤泥中,在大陆上面和大陆深处的没有固化的沉积物中,原核生物就像在地球开始不久的时候那样继续生活着。

第七章

工具和人类进化

文明不能……像一套衣服那样穿在科学身上
——工作服不合适在星期天穿着。

雅各布·布洛诺夫斯基^① (Jacob Bronowski)

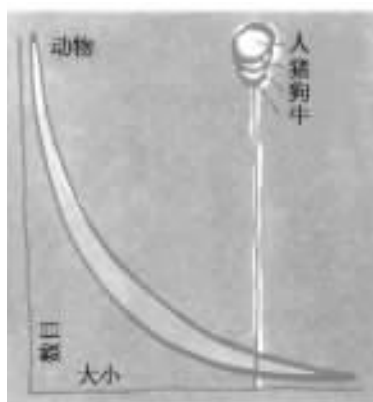
18⁵⁹年《物种起源》的出版激发起公众关于人类起源问题的争论。托马斯·赫胥黎 (Thomas Huxley) 于 1863 年发表的《人类在自然界中的位置》一书中将人类起源作为自然选择的一个案例。他曾有和威尔伯福斯主教 (Bishop Wilberforce) 著名的关于祖先选择——是类人猿还是主教——的辩论，达尔文最后也讨论到这个问题。1871 年发表的《人的世系》指出，解剖学特征明显地表明人类和灵长类有密切联系，并且考虑到幼年期的延长对于人类从灵长类世系分离出来肯定起了关键的作用。

阿尔弗莱德·拉塞尔·华莱士早在他向达尔文提交他的关于自然选择的思想概要之前的 5 年，即 1853 年，就已提出了关于

^① 译注 布洛诺夫斯基 (1908—1974 年)，出生于波兰。波兰被俄国占领时随家移居德国，第一次世界大战后移居英国，就读于剑桥大学，获博士学位。曾任大学数学讲师，对文学有极大兴趣，发表有关文学的著作。1945 年赴日本调查原子弹的影响，以后研究科学的道德规范问题，1950 年后又开始在生物学的一些方面做了许多工作。

人类的起源问题。在《在亚马逊和里奥内格罗的旅行》一书中，谈到他在那里遇到帮助他收集标本的土人，他写道：“自然选择可能赋予野蛮人一个只比类人猿稍微好一点的头脑，可是他的头脑实际上比哲学家的头脑来并不逊色。随着我们人类的出现，就开始出现一种生物，对于这种动物来说，我们称作‘精神’的精妙的力量，变得比身体结构更为重要得多。”

华莱士所说的“精妙的力量”的重要性——它的力量——可以从生命中出现精神的价值来衡量。个体存在的健康意识具有这种绝对的价值。人们已经懂得赋予人生命是为了他们绝对拥有的其他价值。然而，大多数人会支持物种的合理性拒绝反面选择。当意识出现在下降——或升高——的人类系谱中时，越来越多的个体设法克服各种自然选择的种种随机因素。通过教和学的世代相传方式，成功地将存活的策略一代传一代。在人类进化中，社会影响造成的改变速率超过了生物学进化的速率。结果，最大动物之一的人类的总数比大型动物的总数多了至少10 000倍，甚至可能多到100 000倍。其中除了驯养的动物之外，驯养动物在饲养它们的人的照顾下数目也增加到几十亿之多[见本页插图]。



世界人口一半的个体的平均期望寿命大大超过了生殖年限，这是自然选择中唯一重要的年限。特别是物质上最富裕的 20% 人口，他们有许多年月可以参加各种活动而不必为生计忙碌。他们可以有时间去进行探索，并实现每一个人都能够影响人类存在的以往经验的独特才能。

人类现在拥有，并且地球也提供了手段，使享受人类整个生命的机会扩展到世界所有人口。这种手段已经在进行中，就是结束阻碍每 10 个儿童中 8 个儿童的生物学发展的贫穷。

这一前景在 20 世纪中实质上已有了改进。后半世纪中维持生计手段的增加超过了人口的增长。如今天各大洲人民所做的，他们为了活得更长而相应地约束他们的出生率。在人类生物学中，生育的欲望已经受到理智的控制。为了将来能够居住，人们作了合理的计算，只有少些才可能更多些。在这 20% 的能过富裕生活的人群中，家庭更小一些，出生率降到仅够补充或更低的比率。仅次于最富裕生活（以及仅次于活得较长的），人群的出生率同样在很低的水平。世界人口的增长率在 1970 年前后达到高峰时略低于 2%，现在减少了。在最近 10 年中，人口出生率和死亡率在各个地区都开始下降，除了极度贫困的国家，如撒哈拉沙漠以南的非洲外，死亡率停止减小，只在某些国家中又重新增加。

人口转变

整个人口经历着人口转变——从高死亡率和高出生率的近零增长开始，经过人口爆炸转变到低死亡率和低出生率的近零增长 [见第 40 页]。所有国家做的并被联合国综合的生命统计表明，现在世界人口倍增可能是最后的一次。无需多说，较少的人口对地球资源的压力较小。为勉强的生计而奋斗可能超过人类社会秩序的组织能力。公认的趋势表明，人口限定在某一个范围内，

可以使人能够尊严和自由地活着。到 20 世纪末,人类在地球家庭中的这种可能性已经出现。

必须承认,熟知的历史偶然性会使这种可能性打折扣。在同一 20 世纪中,既看到科学时代也看到了前所未有的残暴行为和由于科学所引起的更大程度的残暴行为的能力。

未来也会由于最初为实现它而使用的不正确方法而受到危害。最近世界人口倍增最先是靠每公顷粮食产量的增加而不是由于种植的公顷数的增加所维持的。然而,农田以平均每年 1 厘米的速度被侵蚀而正在失去表土层。在世界上居住人口最多也是最穷的冈瓦纳大陆上,河流带走了留给生物学上维持生命的材料,可溶解的矿物元素,这些元素是 2 亿年前最后的冰川从岩石圈中刨下来的。

环境影响

作为人类能量的解放者的机械能产生的工业文明继续依赖于化石燃料。甚至在太阳能和其他可供选择的能量技术——太阳能转化模式、海洋—温度转化,深处干地热,也不排除核裂变——都已经成熟的条件下也还是如此。在过去 50 年中,由于矿物燃料的燃烧的增加,翻了 4 番,二氧化碳释放到大气中的体积超过气体的自然周转量的 25%。结果是全球变暖,预示世界范围内气候变化和未来的农业灾难的危险。能明显看出来的海平面的升高将危及 $1/3$ 人类的居住地。如果现在的人口倍增是最后一次,人类存在必定影响到所有领域。这就要求能量再翻 4 番。这种增长不可能来自矿物燃料,只能利用其他技术。

人类活动加快了大气中其他气体的循环——例如氮,达到自然周转量的两倍,甲烷还超过它。现在,注入大气中的化合物对于自然界来说是以前没有的——例如,有害的碳氟化合物。关于这种非自然的产物会产生有害的后果是不容争论的。观察已经

证实并且现在也已监测到,南半球高空大气的臭氧层不祥地变薄。地面上高能太阳辐射的增强开始破坏光合作用,这已经从南冰洋中浮游植物群落开始了。这是比南半球皮肤癌发生率的增加更为严重的事情,比地球变暖有更直接的危害。

1989年的蒙特利尔会议以及更为强硬的会后修正条款为的是约束最危险地破坏臭氧层气体的排放。这次国际会议采纳了10年内发表的指出其危险性的科学论文的意见。已经有了基础,希望人类不致失去掌握在他们手中的未来。

“除了我们的思想方法以外,每样东西都在变化。”阿尔伯特·爱因斯坦看到广岛和长崎的灾难后果后如此说。半个世纪以后,这种思想方法仍旧顽固存在着。核武器继续扩散,垂直和水平方向都有。不稳定的无赖国家拥有第一代和第二代核武器是大家都知道的危险。尚未知道的恐惧是第三代和第四代更凶恶的武器还在发展之中。

经济问题

“我们的思想方法”回答了困扰个人和社会的主要的忧虑。这就是经济问题;如约翰·梅纳德·凯恩斯(John Maynard Keynes)所作的定义,“为生存的斗争迄今为止一直是最根本的、人类最紧迫的问题——不仅是人类,也是从生命开始时的最原始的形式起整个生物界的最重要问题”。

劳动的回报的“问题”总是不确定、常常也是不充分的。相应地,从有记载的历史的最早的日子起,组织人类行为的准则和制度保证了回报的不公平的分配。在这样的安排下,只有少数人能够活得较好和较长。他们可以活着进行历史的冒险和高度文明的创造。在这样或那样形式的高压统治下,为支持他们的事业,广大人民群众不得不向少数人交纳他们用来维持生活的有限的物资中的一部分,他们活着的时间长到仅够再生产他们自己。直

到最近，世界人口由于高的死亡率和人类中广大的人群始终维持不变的出生率之间小小的差别而有所增加。

现在对物质世界的征服延伸了匮乏的终点。发展已经引起某种流行准则的修改，随着问题接近解决，经济从物资的生产转到它们的分配。瓦西里·莱昂替耶夫用一个寓言来表述新的经济问题：

亚当和夏娃在他们从伊甸园被驱逐之前，享受着不用工作的高标准的生活。他们被驱逐以后，他们和他们的子孙被罚从早到晚劳作，过着勉强能维持的悲惨生活。过去 200 年的技术进步的历史本质上是通过人类努力工作缓慢而稳步地回到伊甸园的故事。

假如我们突然发现我们自己已经回到了伊甸园……会发生什么事呢？不需要工作就可以获得所有的物资和服务，没有人需要为收入而受雇用。未受雇用意味着得不到工资。结果，在适合于已改变的技术条件的新的收入政策制定出来以前，每个人在伊甸园都要饿死……不去考虑清教徒的“职业道德”……一定会被证明是困难的和费时间的……。在公众和政治上关于就业和失业的谈话中，都是强调收入而不是强调商品的生产，可以看出准则的修改已经开始了。

客观知识

思想不需要改变为新的方式。客观知识的积累将各种不同的未来带入视野。这种知识来自遥远的农业革命以前的时期，在有记录的历史开始时就有的思想方法。客观知识的主体包含人类从开始就累积起来的物理世界中的经验。20 世纪 50 年代在东非发现的最早的石制工具是目前已知的智人最早祖先掌握的客观知识的无可辩驳的证据。

这些 250 万年前的工具表明从原人科分离出智人属。这些数量越来越多、也更多样化和专门化、制造更精巧的石器被称为“更新世最普遍的化石”。更新世是地球历史最近的 100 万年。人为加工过的化石是人的精神所在地的大脑进化的主要记录。直到 20 世纪中叶，都认为智人是第一个工具制造者。工具制造是人类状况的象征。现在已证实早期智人已经制造出了第一个工具。

原人科或人猿在 400 万年前从猿或巨猿分离出来沿着草地栖息，以后散布到整个南非。和最早的工具一同发现的最早的制造工具者的颅骨与很早以前就绝灭了现代人猿亲戚的颅骨没有十分明显的区别。

工具制造是在自然选择引向人类的道路上决定性的适应性变化。这并不是说工具造就了人。可以说，人通过制造工具造就了他自己。

目的的曙光

其他脊椎动物也有会制造和使用工具的。野生的和监禁中的黑猩猩都被观察到会设计出工具并独创性地解决新的情况中遇到的问题。一种达尔文的燕雀用嘴上的刺占据了啄木鸟的生态位。人类和其他制造工具的动物或许只是程度的不同而不是种类的不同。

最早的工具制造者留下的行为的证据在其他动物中没有被观察到。这些确凿的证据表明他们制造工具具有意识的目的。他们是在工场上，如果说在工场内，制造这些工具的。他们“现在”有目的地成批制造工具准备“以后”的将来使用它。进一步，他们应用他们的石制工具作为机床，用作制造其他材料的工具，例如，和石制工具一起发现的骨制工具。这是预计到可以达到下一个目的的目的，逻辑上的串级目的。

像他们的人猿堂兄弟一样，工具制造者是杂食动物：原来是食植动物，也偶然吃肉。这种偶然机会来自大型猫科食肉动物留在非洲草原上的已被杀死的猎物；当这些食肉动物吃饱以后给其他动物留下大量尸体。工具制造者加入豺狗和秃鹫行列，以这种尸体为食。有证据表明，他们割下尸体上需要的部分并把它们带到居住地。在那里发现的动物骨头多数和两种工具在一起：割肉和软骨的刀片及用于砸碎骨头吃骨髓的手斧。

从而，制造工具的目的可以理解为社会的需要：食物分配。这种行为也在其他动物中被观察到——除了两栖动物以外的所有居住在陆地上的脊椎动物。工具制造者大概发现了他们制造工具的目的在社会环境中得到了加强。与其他个体关系中自我意识的出现使得目的跨越了工具的制造，食物的获得及将食物带到居住地之间的时间间隔。

在生物时间的节律——几万年至几十万年——对环境控制能力的提高以及社会行为的进步，保证了无助的人类婴孩时期的延长。在社会影响下人类大脑在子宫之外的胚胎发展时期，随着工具制造的不断改进产生相互反馈而延长了，从而推进了物种的向上演化。在 100 万年或更多的年代中，从吓人的最早的原人的粗重的骨骼、厚实的颅骨、强壮的颌和巨大的犬齿的适应性优势进化到出现轻巧的骨骼、薄的颅骨和硕大的脑的人属。再经过 100 万年，智人出现了，阿尔弗莱德·拉塞尔·华莱士在其中发现了哲学家的精神。

灵长类的出现

在开始制造工具以及哲学家的头脑变得精巧复杂之前很长的时间内，缓慢的生物学进化严格地按物理学定律，将大脑中的线路联结起来。人类进化中的这一阶段最早从大约 6 500 万年前冈瓦纳大陆上灵长类动物的出现开始的。泛大陆这个超大陆

的南面一半正从北面的一半劳亚古大陆分离出来。地球上的灾难使恐龙绝灭并从陆地上清除了大多数裸子植物。灵长类动物和其他哺乳动物一起在被子植物的植被中繁荣起来。它们散布到整个泛大陆；它们的化石曾在北美洲找到。

最早的灵长类动物是老鼠般大小的食草动物和食虫动物。它们在新生森林的树叶覆盖下建立起它们的生态位，它们在那里可以避开大多数哺乳捕食动物而确保安全。在 2 000 万年中数量非常多的灵长类动物的属和种相继不断地产生和绝灭。最初的灵长类动物和所观察到的鸣禽共享林冠，在这里找到的微生态系统可以通过树的种类和微气候以及林冠中不同高度的昆虫种群来加以区别。

在空间环境中生活的选择要求内耳中调整身体平衡的半规管能适应精确调节的要求。伽利略抛物线轨道——垂直方向的加速度很快超过水平运动——控制了反射。从这边到那边距离的主要判断依靠双眼视觉。略带圆形的颅骨包含了相对于身体大小来说是很大的脑，双眼前视以辨别灵长类的同伴，运动中心到视皮层密切的联系是脑自身的组织。

灵长目动物的脑经过许多年代组织起来。由于在树顶活动使后代的骨骼在某一世代品系中进行了重组。最早的灵长类动物是攀附爬行的动物。为获得食物就选择跳跃和抓握。地上的四脚动物的脊柱是水平的桥，到灵长类动物中就变成了支持在骨盆上的起重机。前腿变成前臂，前脚掌变成能抓住东西的手。在这重组过程中，这些灵长类动物完全变成为善于运动的模式——用手臂：一只手换到另一只手，从一根树枝荡到另一根树枝——都靠它们自己的手。

这些发展的成功引起各种各样专门化的目的早期辐射形进化。从那时候存活至今的有不少属和种的代表。现在松鼠般大小的原猴亚目——眼镜猴、狐猴、懒猴——继续按照 6 500 万年至

4 500 万年前早期阶段的灵长类动物的生活方式生活至今。它们在冈瓦纳大陆上森林的林冠遮护下存活下来。直到最近,它们还群集在莫桑比克岛上与世隔绝的避难所中。森林的采伐和居住地的缩小现在是它们在那里生存的最后威胁。

大约 4 500 万年以前,猴子身体长得更大,掌握了用臂吊荡前进的技巧,于是,它们从祖先的品系岔开了。赫胥黎和达尔文注意到的它们和人类的相似性得到了正式承认,它们被称为类人猿。街头拉手风琴卖艺人带着的、会用尾巴把自己悬挂起来的猴子在大约 4 000 万年前从主要的类人猿品系分化出来,被隔离在由于大西洋的形成而产生的冈瓦纳大陆的南美洲碎片上,它们到现代成为新世界猴。

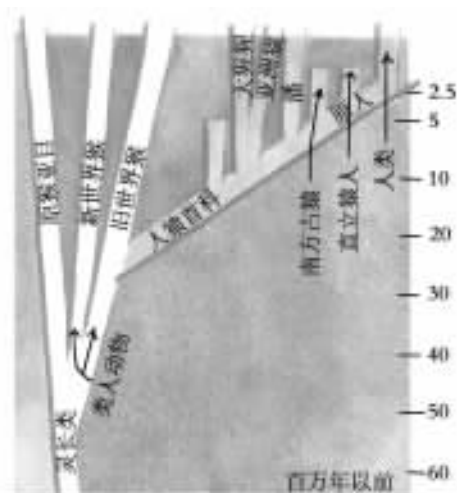
旧世界猴在冈瓦纳大陆的非洲碎片上有更广阔的未来。由它们产生罗猴、恒河猴、狒狒以及在欧亚大陆与非洲的其他品种的猴子。在大约 1 600 万年前,从这些类人猿中出现了更像人的人猿首科无尾猿。

人猿首科

随着当时气候变冷并且变得更干燥,非洲大陆的森林让位于草地。草本植物与禾本科植物开始支持有蹄动物和捕食它们的食肉动物的种群。猿变得更大、更可怕,并从树上下来到有诱惑力的新的居住地,成为生活在地上的食植动物,后来成为森林边缘的杂食动物。它们祖先的适应于树梢活动的骨骼使它们成为不同寻常的四脚动物。在地上,它们可能更接近于两足动物,脊柱与地面成 45 度或更大的角度,用长臂的指关节走路和稳定身体,它们的手逐渐从运动的功能解脱出来而发展了其他有用的功能。正如今天在动物园中看到的,首先它们用手抓取食物并与旁

观者保持一定的距离。普罗猿^①——这些早期无尾猿中最卓越的代表，由伦敦动物园中的著名的大猩猩得名——在大陆向北漂移的时候最先和欧亚大陆碰撞的非洲大陆上繁荣起来，普罗猿的化石在欧亚大陆的许多地方都曾被发现，这是靠指关节走路来迁移的确凿证据。

近代大猩猩大约在 1 000 万年以前从人猿首科的品系分离出来。一种更加纤弱的无尾猿，腊马古猿，在印度的差不多同一时代的化石记录中被发现。腊马古猿曾经被认作是“缺失的线索”而名噪一时，现在知道它是另一种亚洲猿和猩猩的祖先。最早的潘神 (Pan) 黑猩猩，出现在大约 700 万年前的化石记录中。



灵长类系统树扎根于 6 500 万年前冈瓦纳大陆森林的树荫中。在冈瓦纳大陆的原猴亚目的跗猴、狐猴和懒猴今天还生活在树上 [见第 310 页]。类人猿从 4 500 万年前开始辐射形进化；冈瓦纳大陆的分裂使南美洲的新世界猴孤立起来。大约 2 000 万年前原人从旧世界猴分化出来。从 250 万年前开始出现的人属是制造工具的猿人 20 万年前出现智人。

① 译注：普罗猿的英文名字 Proconsul，在英语中原意为总督。



骨盆和颅骨的进化是从原人谱系分离出来的人属的最根本的区别。用指关节走路的大型无尾猿的骨盆中的髂骨伸长,以适应它们以 45 度角站立姿势肌肉的结合。直立猿人的骨盆中的髂骨已经变短了,并且肌肉系统重新组织以适合完全用两足走路[见第 368 页]。大型猿的颅骨有一个较小的盛脑的盒子和重的颜面骨,可以装上适用于咀嚼生的植物的有巨大牙齿的颌骨。

活的灵长类动物的 DNA 碱基的序列证实了化石记录泄露的有关灵长类系统树的材料。DNA 证据同样可用来标志它们各自与人类谱系的距离。越近出现的化石记录和人类的关系就越接近。其中黑猩猩被证明最接近于人类。

威尔伯福斯主教如果知道现在的化石能说明问题,他可能会温和一些。大猩猩既不是,黑猩猩也不是,猴子更不是人类的祖先。所有分枝都从系统树的主线上分叉出来,并决定哪一条是引导到人类的主干。

人猿

人猿,南方古猿,出现在主谱系上 400 万年前。化石记录呈现出自然选择所作的决定性的革新。在骨盆后部的髂嵴在用指节走

路的猿类中升高。在人猿中髌骨缩短了。这一改变加上骨盆上面固定的腿和背部的肌肉的定位使得人猿能舒服地适应两足站立。这就是它们为什么被称做人猿的理由 [见第 367 页图]。

直立行走的南方古猿有了完全自由的手,可以派别的用处。有了可以对立的拇指它们就能拾取、握住并携带东西。手和脑相互作用的反馈打开了新的进化通路。

行走使南方古猿发展到到草原上定居而将森林边缘留给猿。结实的臼齿适合于磨碎粗糙的纤维,这表明它们是食植动物。草原上小型猎物很丰富,还有大型猫科动物捕杀的猎物残骸,于是它们在需要的时候也会成为食肉动物。雄性有 5 英尺高、90 磅重——雌性也有 4 英尺高、60 ~ 75 磅重——有发达的肌肉和巨大的颌,对捕食动物来说它们却不是有吸引力的猎物。

在南方古猿漫长的历史——比智人的历史长许多倍——中到底有多少物种,从化石记录还不能说清楚。它们生活过的地区没有存留下完整的骨骼,只有不多几个不完整的颅骨。任何一个物种都有两种性别,使得区别不同的物种有一定的困难。同一时代至少有两种不同体格的古猿在很长的历史阶段中存在。粗壮的南方古猿有最重的骨头和厚的颅骨。在一些标本中,颊骨宽到可以将耳朵藏起来并固定巨大的颌部肌肉。纤弱的南方古猿留下的骨骼用纤弱这样的形容词只是一种对比说法。看不出从一种体格到另一种体格的变化过程。

所有已知的南方古猿颅骨中的脑的大小为 450 ~ 650 立方厘米之间。这比正常的智人 1 200 ~ 1 800 立方厘米的一半还不到一点。然而,同样重要的是脑和身体的大小之比。南方古猿为 90 磅,与人的差别估计不会比不同人之间的差别更大。脑的大小被证明并不像脑的组织那样重要。

文化革命

路易斯和玛丽·利基 (Louis and Mary Leakey) 夫妇于 1959

年在坦桑尼亚的奥杜威·高治发现一个最早的工具制造者和他（或她）的工具在一起。他们原先将他们发现的遗迹的时间定在500 000年以前。他们后来用更好的物理学方法把这发现定在150万年前。利基夫妇和其他古人类学家此后一直在肯尼亚的图尔卡纳湖西岸寻找证据，结果将制造工具再向更早的过去推进了又一个百万年。

从此，化石记录表明了新物种的生物学进化。从一个转折点到另一个转折点的时间间隔从几千万年缩短到几百万年，再缩短成几十万年。生物学和社会学的进化同步进行。



寻找这些最早的工具需要想象力和谨慎小心相结合。手斧——劈形的石片，其大小适合于在手指间和手掌中握住——是制造工具者的工作的小小的证据[见本页插图]。常常借助于较可靠的工人的手的印记来辨认刀片状的工具。在奥杜威·高治和图尔卡纳湖，特别适宜于制造刀片状工具的原材料是细颗粒的火山凝灰岩。利基夫妇找到了这些原材料的“采石场”，位于他们发现工具地点的几千米以外。这种对石头性质的鉴别能力必须看作一种值得重视的事件，是最早客观知识的积累的开始。

在图尔卡纳湖的一个遗址上，2 683 块被加工过的石头碎片

表现了值得重视的技术成就。通过打击石片并丢弃掉碎片，古人类学家设法改造了几块鹅卵石，可以看出这位工具制造者会精确地“敲打”。他的工具是也在这个遗址发现的用作锤子的一块硬石块。手中有了石锤，他就可以用来敲击拿在另一只手上的鹅卵石，他事先就预料到石块会怎样碎裂。他以前已经反复做过这项工作，他有把握用石块满意地复制出刀片。利基夫妇恰当地把他们的第一个制造工具的原始猿人也称做“手灵巧的人”。这个遗址显然是制造工具的工场。意识中扩展的目的和行为之间联系着，敲石头的人从事于制造。

在图尔卡纳湖的另一个遗址，利基夫妇和他们的儿子理查德(Richard)在240万年至150万年前、前后相差90万年的地层中发掘出和石器在一起的100个原人个体的颌骨及不完全的颅骨和颅骨碎片。他们满怀信心复原了6个个体的颅骨。经认真的鉴定和多方面的讨论，认定其中3个是南方古猿属，粗壮的南方古猿种。有一条相反的证据：没有发现和他们在一起的工具。另外3个颅骨是在尺度上属于纤弱的类型。其中和工具在一起发现的两个可以认为属于直立猿人，现在称做原始猿人。关于第三个编号为ER-1470的颅骨，还没有明确的一致意见。它是完全不同的纤弱的南方古猿属，具有使人感兴趣的巨大体积为775立方厘米的大脑。不过，没有发现和他在一起的工具。

颅骨提供了有关其中曾经盛在里面的脑的组织 and 体积的一些证据。石膏模型表示出颅骨内表面的起伏形状。从凸出的脑膜动脉的特征确定出脑的主要结构的边界。枕叶，就是视皮层的位置，在猿中相对较大。人的颞叶(记忆的位置)，顶叶(感觉综合)和额叶(运动适应和语言中心的布洛卡区的位置)都比较大。

直立猿人

ER-1470 颅骨的颅腔模型表明其中已经消失的大脑“本质上

是人类的”。在找到另一候选者代替他以前, ER-1470 可以看作第一个制造工具者的颅骨, 直立猿人谱系的亚当。

直立猿人的头安装在脊柱的顶端, 不像南方古猿谱系那样头是悬挂在脊柱前面。直立猿人完全直立, 他们的遗迹和南方古猿的遗迹都在一起说明这两个属占据草原上同一生态空间达 100 万年以上。过了那段时间, 南方古猿的迹象消失了。在非洲撒哈拉沙漠以南发现的近 1 000 个营地的位置是直立猿人人口增加的证据。不会早于 100 万年前, 直立猿人跟随普罗猿进入欧亚大陆。还不知道南方古猿是否也曾这样活动, 早期直立猿人在欧亚大陆出现的证据是大量的石器, 南方古猿不会留下这种耐久的证据。

19 世纪和 20 世纪初的古人类学家根据法国南方的一个遗迹认为, 所谓的“阿舍利”文化是最早最原始的他们称之为石器时代的文化。阿舍利文化现在根据奥尔德沃·乔治 (Olduvai Gorge) 起的名字, 被称为奥尔德沃文化。今天已经辨明, 石器是直立猿人的作品。在欧亚大陆上人类进化的记录还要加上 50 万年。

奥尔德沃文化的工具分布遍及大陆各地, 表明直立猿人在欧亚大陆上四海为家。在 80 万年或更多的年代中, 他们在大陆上的领地的北方边界, 在度过大约 65 万年以前开始的更新世的 4 个冰川时期中一定多次退后和前进。早在 70 万年前, 他们冒险进入爪哇, 当时爪哇在第二次冰川时期中由于海平面的降低而和欧亚大陆相连接。1891 年发现爪哇人是庆祝找到另一条失去的线索的节日。现在他已被认定是直立猿人。1929 年发现的北京人同样是值得庆祝的大事, 现在他被确定在 60 万年前, 并肯定归入直立猿人谱系中。

北京西南 50 英里的龙骨山洞穴内, 古人类学家和人类学家在 20 世纪 80 年代初挖掘出从 40 万年到 20 万年前, 前后跨越 20

万年的直立猿人生活的连续记录。发掘揭露出 13 层土地。在每一层中都收集到用火的证据。在底层是“人”使用火的最早的确凿证据。在一起的还有足够的证据,表明会生火的人的存在。此外,更早的遗迹很少有炭的化石。

从较低层发现的手斧是比较大的,宽 8 厘米,重 50 克。刀片是砂石制成的。上层的工具表明意料中的不断进步的趋势,逐步地多样和精巧。多样化和专门化的证据是斧的头部、刀刃,用来钻洞的有尖端的石器以及小的平板状的有锐利边缘的“雕刻刀”,这种雕刻刀可以用拇指和食指握住。敲石头的人已经知道燧石比砂石更好。

古代石器的复制品已经在实验室里制成,并可应用于对它们估计可能的用途上。从他们加工的材料看,这些石器被发现需要进行特定的削凿、研磨和抛光。在高放大倍率下进行比较,弄清了这些古代工具的用处。

从这些证据得知,龙骨山洞穴的这许多工具可用来制造木头、骨头和皮革等材料的物件。箭和矛的头以及 3 000 块兽骨,主要是鹿的骨头,表明他们已经不吃腐肉而开始狩猎。在所有的地层中都发现了种子,这是保存下来的以采集植物为生的证据。

从洞穴中的证据还不能证明直立猿人是穴居人。他们季节性地和间歇地占据龙骨山的和其他的洞穴,这是为了躲避恶劣的天气,特别是寒冷的冰川气候。大多数时间里,直立猿人一直在迁移,追随着迁徙的猎物和季节性的植被,周期地沿着习惯的小径迁移。发现的宿营地表明,他们作为经济单位的家族人数不多于 25 个成员。在他们季节性的迁移中,他们能不受食物和财产的牵累旅行。他们通过从尝试错误的经验方法获得有用的东西和有毒东西的知识,他们依靠周围世界为生。

这些一群群的北京人一定会相遇。这种相遇肯定是受欢迎的事,因为这时他们的儿女们可以和家族以外的人交配。无论是

由于学习到还是由于自然选择，乱伦的禁忌是普遍存在的。在这几万年中整个欧亚大陆共同分享同样的工具发明的经验。由于容易遭受干旱和暴风雨的袭击，捕食动物、意外事故和疾病等，使得只有少数直立猿人能存活到留下后代。然而，这些少毛、裸体的祖先，一代到一代，把他们学到的东西传授给他们的下一代。

在 20 万年以前至 10 万年以前的这段时间里，“原始人”的群体在欧亚大陆西部留下了他们存在的相当多的证据。1856 年在杜塞多夫附近洞穴中首先发现的尼安德特人在西欧到中亚留下了他们的莫斯特文化的踪迹。由粗重的骨骼和厚实的颅骨得知，尼安德特人生理上也是直立猿人。莫斯特文化的成套石制工具暗示着他们会制造庇护所，或许是皮帐篷。其证据是，至少发现一处地方有猛犸象骨头绕着炉子围成一圈。猛犸骨无疑证实了他们的本领和合作狩猎的行为。岩画和用装饰品与工具陪葬证明了他们用符号通信。说话和语言一定已经开始，使教授学到的东西变得方便。在欧亚大陆东部，在爪哇人和北京人以后出现的梭罗人在同样的时期内创造出相当发达的文化。

据耶鲁大学地质年代测定实验室的负责人、生态学家爱德华·小迪维 (Edward S. Deevey Jr.) 的估计，在这段时间前后大约有 350 亿直立猿人工具制造者生活着。非洲和欧亚大陆的人口达到百万。直立猿人所以被看作是一大成功。

迪维把进化的这一个时代称做“文化革命”。和以后发生的农业和工业革命完全类似，它引起人口爆炸。从 250 万年以前很小的繁殖种群增加到上百万人口。横坐标和纵坐标都用对数标度作图可以得到和用同样标度作图的工业革命达到的令人沮丧的人口爆炸曲线相似的曲线。

文化革命必须看作这 3 次革命中最重要的一次。从这次革

命产生了智人。从这以后短暂的时间里,可以明显看出人种进化成为社会性的。进化的间隔短到几万年至几千年。

智人

在 10 万年至 5 万年前,有巨大的脑、光滑的额、轻巧骨骼的智人在整个欧亚大陆上代替了原始人类种群。学者们对这个史前阶段中什么时候以及怎样会出现最早的智人持不同的意见。

有些人认为,无论他们生活在非洲或欧亚大陆,原始男人和女人就地进化成为现代的男人和女人。同一遗传谱系遇到实质上同样的选择压力,遍及整个欧亚大陆的联系锁链,所有人类都沿着同样的方向进化到智人。按照这个方案,繁殖种群的相互隔离可以说明人种中种族的差别。

另一些人坚决主张智人是在 20 万年以前至 10 万年以前由非洲原人家乡的直立猿人进化而来。到那个时代结束时,智人在第三次人猿侵略浪潮——来自普罗猿——中从非洲进入欧亚大陆。遗传学支持这种观念,两个物种共同的祖先生活在非洲。

现在已对世界上主要的人群的线粒体的 DNA 采样进行 DNA 测序。只在容量大的卵的线粒体中转运的线粒体 DNA (mtDNA) 不经历性别的再结合。因此,线粒体 DNA 中的差别是唯一地由于突变。因为突变以不变的速率发生,线粒体 DNA 序列中更替的数目可以作为时间历程中遗传变异的可靠量度。

全世界种群中核酸替代的反向计算追踪世界上所有人种的祖先直到“夏娃”,即 20 万年前非洲繁殖种群中的女性。从夏娃往后计算,在 10 万年以前,更替使欧亚人口种群从非洲种群分开,在 5 万年前将亚洲与欧洲人口种群分开。

遗传学家争辩说,人类种群间种族的差别对原地进化模型所暗示的遗传隔离的几十万年中的发展来说是太少了。说明造成

与其他人种在时间上隔离最远的非洲人种的黑色皮肤最多只需要4个基因——其中还有一个隐性的。智人一定是从一个地方进化出来；以后由于基因漂移分化出所谓的种族。

不充分的化石记录开始表明智人在非洲正好满足适当时间创造智人的适当的地点的条件。在9万年到7.5万年前，智人在非洲出现了；6万年前出现在西亚；4.5万年前出现在东亚。6万年前，智人出现在南部欧洲，和直立猿人尼安德特人在同一时代共同生活，直到4.5万年前。在这两个种群之间没有种间杂交的迹象，可以肯定他们是不同的物种。

对于原地进化的假设，有一个最后的遗传学的反驳：基因有后代；并不是所有的化石都如此。

智人在威士忌星冰川期近于最高峰时期冒险进入欧亚大陆。在4.5万年前到1万年前冰川退落时，他们带着古典的旧石器时代文化穿过整个大陆。大约在3.5万年以前，人们通过了由于冰川使海平面降低露出的白令海峡陆桥。已经发现早在6000年前人类占据火地岛的遗迹。

伊努伊特人^①一定是这群敢于冒险的人群中的一支，他们适应了冰川时期的生活，于是就留在了北极圈。另一批敢冒险的人群在4万年前穿过最后一次更新世冰川期海平面降低后的70千米宽的海洋，到达新几内亚和澳大利亚。当时记录的海洋的宽度肯定是可靠的，这与大约3500年以前开始移居到太平洋岛屿的会制造石器的航海家的航行相比，就相形见绌了。

直立猿人被取代

直立猿人被智人所取代可以看作为新达尔文主义的“为生存而斗争”所提供的经典案例。原地进化到智人学说的拥护者，哈

^① 译注：伊努伊特人就是美洲的爱斯基摩人。

佛大学的威廉·霍威尔士 (William W. Howells) 认为这个观点是理所当然的。近到 1979 年,作为反对直立猿人被取代的证据,他注意到没有发现过洞穴中“有被杀的尼安德特人和上旧石器时代的工具在一起的遗迹”——就是说工具是智人的。

智人有暴力行为是一致同意的。然而,进化主要是通过正面选择而不是删除。在现在综合中,“合适”延续到存活的后代。乔治·盖洛德·辛普森把这个问题直截了当地说了出来:

分化生殖的好处在于通常总是和平的过程,它与斗争的概念不相干。更主要的是包含这样一些内容,例如更好地结合到生态环境中以保持自然界的平衡,更有效地利用得到的食物,更好地照顾年幼者,消除群体内部的不和(斗争),这种不和会妨碍繁殖与环境的可能性的开发,这种可能性的开发不是为竞争的目的或者如果被别人开发则效率会更低。

100 万人口直立猿人的种群曾经占据非洲和欧亚大陆,人口密度每 83 平方千米 1 人。可以允许两个各 100 万人口的种群寻找同类型栖息地,并且有足够的空间给每一个人。南方古猿和直立猿人共享非洲草地有 100 万年。

直立猿人被取代必定是由于智人对辛普森列出的几种类型的行为具有较大优势者。在几万年内,在整个欧亚大陆上,人数逐渐被智人超过的尼安德特人和他们的同类被迫转移到狭小的环境中。

有时两个人种的个人和团伙之间的确会发生暴力冲突。统计上这种遭遇最少的地点是洞穴。在其他地方,时间会抹去所有的痕迹,这种痕迹可能被当作该隐^①的行为而感到遗憾。

① 译注:该隐是基督教《圣经》中亚当的长子,他杀害了他的亲弟弟。

没有原始的语言

最早进入欧亚大陆的智人的颅骨化石很少能告诉我们有关他们的能力和生活方式。最好的认识来自存留至今并得到人类学家研究的石器时代文化所提供的。了解最多的是亚马逊河流域的居民、非洲的俾格米丛林居民、欧亚大陆和北美洲的北极海岸的伊努伊特人。

至于他们的能力,在这些中还从未被发现——也没有在任何一个大陆上遇到的土人中发现——有说着一种原始的语言的人民。说话的能力是智人在生物进化的家庭和氏族的社会背景中的独特状态。不存在所谓原始语言这样的东西。至今每一种研究过的语言都建立在同样深度的句法规则的基础上。基础结构在世界的克里奥耳语中明白地显示出来。

克里奥耳语是说一种没有特定结构并且发展不完全的混杂语言的人的儿童的发明。例如,从其他地方来的工人拾取新到的国家语言中所有基本词汇中极少的几个。如语言学家在夏威夷观察到的,说混杂语言的儿童学到的是父母亲的方言、混杂语和国语的杂七杂八的语言。他们没有统一的模式可模仿,这就建立了他们自己的语言。许多非洲裔美国人的孩子从贫民区带到学校的不合语法的英语是他们的祖先,也就是奴隶出生的第一代孩子讲的一种克里奥耳语。克里奥耳语是标识他们本身的地位的语言。他们各自用他们自己的方式解决同样一些问题,从单数和复数的区别到陈述语气到虚拟语气的区别。

证据强烈支持马萨诸塞理工学院的诺亚姆·乔姆斯基(Noam Chomsky)作出了最主要贡献的理论,所有人类语言都有共同的语法基础。它表示符号通信的能力,这种能力是通过自然选择与大脑相联系或者储存在大脑中的。这个事件一定发生在整个生物进化过程中直到最后智人出现。最早的智人颅骨在长

时间内包藏同样的智力，依靠这种智力累积了现在关于物理世界的全部客观知识。它也创造出了所有的想象世界，从最原始的文化到最高度的文明，这些都充满了人类的头脑。

存活下来的狩猎—采集者中的观察者一直都从他们知道的世界的认识中受到教育。追随着华莱士的足迹到亚马逊河流域进行收集探险的民族植物学家还在仔细研究土著人的口头传说。土著人在极其多样的热带植被中能够区别出好像是无穷数目的各种植物，并且加以利用。他们厨房里的水果和块茎正在进入世界市场。典型的萨满教巫医掌握了神经毒药（用于箭和标枪尖头）、抗生素、避孕药物、治疗精神病的药物以及显然可以抑制癌症的药物的药典。制药工业做着民族植物学的生意。

20 世纪初，和加拿大北极海岸的伊努伊特人生活在一起的维尔贾姆·斯蒂芬森（Vilhjalmur Stefansson）发现，在他们的贫乏和严酷的环境中——访问者遇见了他们的地方——他们总是乐意并慷慨地招待访问者。他们生火是为了烹饪而不是专为取暖。他们过着温饱没有保证的生活，他们的衣服和住所的设计可以保持他们的身体的热量。他们从海豹得到他们的衣服、庇护所、工具、狩猎武器和远洋航行运输的原材料。

在刚果河流域的森林中巴米基·恩德·恩杜拉（bamiki nde ndura）——森林的人民，这是俾格米人对他们自己的称呼——生活得像他们的生态系统的有机组成部分。他们的生活方式不受与森林边缘定居的农村之间长期存在的贸易关系所影响。美国国家自然历史博物馆的柯林·特恩贝尔（Colin Turnbull）是第一个于 1970 年初跟随他们进入森林的人。他估计当时他们的人口是 4 万人。

由大约 30 个家庭组成的家族群的数目约为 100 个，他们各自和平地占据着约 100 平方千米的相互邻接的土地。小型的家庭表示高的婴儿死亡率及石器时代短的预期平均寿命。在与村

庄的贸易中得到的大砍刀代替了原始的石器，他们有一些箭上装有金属的箭头。此外，他们的工具、武器和器具都是用从森林中得到的材料造成的。

没有明显的等级制度统治家族群。每个人都参加到为维持他们的公社生存的任务中，每个人按年龄和性别的不同做出自己的贡献。在一个新的营地，男人提供材料，女人建立起圆顶的盖上树叶的小屋。有女人和较大的孩子参加的猎人们在树林里搜索，将树林中羚羊和小的动物驱赶进张挂在树林中重要通道上的网中。其他的猎人在这用矛、弓和箭杀死猎物。按劳动分工，女人知道到什么地方去寻找果子和可食的根。营地周期性地迁徙，让树林得到休闲。在迁徙时，家族群除了带走他们的金属工具外，其他什么都不带。森林中充满着他们兴奋的谈话和歌唱的声音，这可以使豹和其他食肉动物驱离他们的路线。

没有原始的艺术

智人对欧亚大陆的征服留下了当时的记录及石器时代艺术最壮丽的宝库，这些艺术装饰了法兰西和西班牙的洞穴的墙壁和天花板。拉斯考和阿尔塔米拉的洞穴是 100 个洞穴中最著名的。在这些石器时代的大教堂中，从 3 万年前到 1 万年以前，画家们前后相继工作了 2 年以上。他们最早的作品描画了驯鹿，在最后的冰川期它们向北方迁徙。他们画了披毛的猛犸、欧洲的犏牛和野牛，这些都是现在已经绝灭的野牛，但却是当时的画家感兴趣的東西。在拉斯考洞穴中一个巨大的洞室的顶上有一幅野牛的巨大画像，从鼻子到尾巴有 5 米长。最早的几千年的壁画中也有犀牛和大型猫科动物，这些动物一定都随着最后一次冰川的前进退却到非洲。在所有这几千年中，赤鹿和马（当时还是被捕猎的动物）一直真实地留在他们近旁。

宗教的意义不可避免地渗入到这些画中。这种意义也从人

类生殖器的高度抽象及其图解描绘反映出来。毫无疑问,对物种的食物供应和繁殖的关切激发了艺术家的灵感。无论他们求助于祈祷还是巫术,他们对主题崇敬的心情还是很明白的。野牛的肩膀,赤鹿的角,猛犸的长牙都被恰当地夸大了,这些都说明这些野兽在几万年中自始至终都存在。

拉斯考艺术家是多种技艺的大师。他们的颜料并不是在洞中随手可以得到的。为了得到某些颜料,艺术家要走 20 千米路。他们用石头作杵和臼将用作颜料的矿石碾成细粉,然后在石头的调色板上用洞穴中的水调和颜料。颜色的饱和度用瓷土或磨细的石英调节。幸运地,洞穴里高含钙量的水有助于使颜料附着于潮湿的洞穴的墙和顶上。



在拉斯考发现一束带子——两股粗的绳子,每一股由多股细线绞合而成——证实另一种重要的普遍技艺。在大多数古代居民中只留下纺纱和织布者的工具。美国自然史博物馆的朱尼乌斯·伯德 (Junius Bird) 在秘鲁的莫奇文化的贝冢中发现唯一的在保藏状态中的 3 000 年前的锦缎。他从这得出没有原始的纺织品的结论,就像没有原始的语言一样。石器时代的人穿着纺织品和兽皮。在那个时期某些繁殖力强的雕像,例如著名的维伦多

夫维纳斯 [见前页插图]，装饰在织锦缎上。

在这些千年中，欧亚大陆野外普遍流行的是亚北极气候，偶然间隔着有几个世纪变暖，但经过时间不长，冰川又重新降临。这些时间里人类的经验大多限于在乌拉尔山脉以西，直到大西洋岸边的英伦三岛，当时由于海平面降低，它和大陆是相连接着的。波罗的海还是内陆淡水湖。在冰川最大时，没有树木的冻土带向南一直延伸到比利牛斯山和黑海北岸。

追随着冰川

带着弓和箭的狩猎采集人群追随着驯鹿的迁徙。他们用石尖长矛捕猎猛犸和野牛。他们在冻土带中发现了浆果和块根。在俄罗斯和乌克兰发现的最早的少数几个营地上看到，他们像直立猿人一样，用猛犸骨头固定兽皮覆盖的小屋。猛犸捕完之后，驯鹿为以后的营地提供骨骼和鹿角。

在气候暖和的时期，由于常绿树和白桦的泰加森林^①的前进，冻土带向北方退却。对生活在这更加多样化的生态系统盛衰变化的几个世纪中的这几代人来说，生活比较容易一些。鹿和小型猎物很多，可以直接食用的浆果、坚果、种子和可吃的叶和根都很容易找到。在他们短暂的生命中，他们充分运用他们发现的世界，不论是在冻土带还是在泰加森林。

从北欧平原到乌拉尔找到了 1.4 万年前到 1 万年前的这段时间里 1 200 个营地。有证据表明，有 3 个或 4 个家庭组成一个狩猎群体。经济单位的大小可以作为环境提供的以及据该单位所掌握的技术可获得的资源多少的测度。

据迪维的估计，1 万年以前的人口为 500 万。人类占据的陆地包括现在的新世界和旧世界，人口密度为 25 平方千米一个人。

^① 译注：泰加 (taiga) 指针叶树林地带。

到那时候为止,人类生生死死总共约 300 亿。即使没有野蛮行为和流血斗争,生命还是短暂的:只有 25 年。社会进化的间隔当时缩短到几千年至几百年。

农业社会前的文明

随着大约 1 万年前开始随后迅速推进的大陆冰川向北方退却,欧亚大陆的风景开始改变了。乌拉尔山脉以西,常绿树林和有紧密树冠的常绿树林(裸子植物)和落叶树(被子植物)接替泰加森林。在两、三千年内,森林的北方边界跨过波罗的海——再次成为海——达到斯堪的纳维亚。生物的多样性和新的生态系统的资源——植物生物量的绝对增加——靠植物维持的动物——包括人类——的数量也相应增加。除了鹿以外,森林中大量出现小型哺乳动物,如野兔和松鼠,以及禽鸟,如鸽子、鹌鹑和山鹑。湖、泉水和海洋中有水鸟、鱼和甲壳类水生动物。

这些资源在增多和减少的不断循环中。这种循环首先是季节及重要的猎物迁徙的循环。小型哺乳动物,如野兔的数量,按另一个较长的周期不断起伏,随着它们的捕食者的数目而循环变化,直到捕食者和猎物两者的数量都消亡为止。特别是当新的生态系统不断向北扩展的时期,狩猎—采集群保持他们飘泊不定的生活方式。

过了一定时间,由于环境富饶,产量得到保证,迁徙的生活改为较安定的生活方式。他们在较长时间中占据同一营地。下一个营地离前一个营地很近,只从小河边或海滩搬到有森林的山地。芝加哥大学的罗伯特·布雷德伍德(Robert J. Braidwood)把这称之为“生活在环境中”,定居使人们的福利条件得到改善。

布雷伍德根据上述观点提出,居住在小亚细亚南部的人依靠深入的知识和敏锐的智谋,知道如何使用他们周围世界的资源,从而产生了农业革命。在欧洲北方波罗的海周围森林中,这种优

势建立了另一种延续达两千年的生活方式。在 5 000 年以前,人们开始生活在永久的“种植者”的村落里。从森林和草地、湖泊、溪流和海湾,在半径 10 千米左右范围内,获得食物的增加和食物专门化使得生计有了保证,有时还很丰富。

迁徙的家庭现在成了共同居住的公社。作为同住一家的人,他们分派公共的任务。他们中产生各种专门的分工,有的专司打猎或捕鱼,有的收集植物类的食物,或者从事这种或那种新的必要的技艺。从小亚细亚的村落到斯堪的纳维亚半岛都发现了陶器。这表明寻找食物者的村落已有了储藏食物的需要。

专门化产生了村落间的贸易。在荷兰马斯特里特附近发现的燧石矿,在从 5 000 年前开始的 1 000 年左右时间内估计生产了 10 万结核^①,足够制造 150 百万个以上的斧头。当时贸易也已经开始了。

20 世纪 80 年代,谢菲尔德大学的马瑞克·兹维尔比(Marek Zvelebil)发现了这些村落中与劳动的分工联系在一起的阶级区别的证据。证据来自 20 个富裕的墓地的发掘。莫斯科北面的奥列尼奥斯特罗夫斯基·莫基尔尼克(鹿岛)的发掘告诉我们一个可信的故事。那里富裕的人将熊的牙齿做的项圈一起埋葬,这种项圈是最贵重的;中等阶级的人带着河狸和麋的牙齿串成的项圈埋葬;最穷的人没有项圈。某些男人以特殊的向上直立的姿势埋葬,并带着很多装饰品一同埋葬在他们的坟墓里,这可能表示有宗教上敬畏的意义。

北欧神话故事的源泉是这段原始文明的民间记忆。关于这个故事,里查·瓦格纳(Richard Wagner)在歌剧《尼伯龙根的指环》中用浪漫手法歌颂了古代人们对欧亚大陆的征服。北欧的传说确实综合了史前早期和较晚时期的故事,不过,传说用铁器时

^① 译注:结核(nodule)在矿物学中是指质地坚硬的圆形矿粒。

代的武器武装了他们的战士。在这里面瓦格纳的人和神的英雄遭到采矿人的邪恶部族围攻而毁灭。

现在已被考古学赋予实质性的意义的这些传说中的原始的社会经济单位当时已发展成为氏族。一个典型的氏族包含几十个亲属关系足够远的家庭,可以允许在氏族内部婚配。较简单的时代的有秩序的无政府状态发展成了由首领领导的等级制度,这些首领常常拥有显赫的头衔。

农业文明

同时,生活在另一种环境中的人们开始了农业革命。这个革命使人类日常的口粮有了保证。必须按照罗伯特·布雷德伍德的评价方式来对此进行评估:这是比这更早 250 万年以前我们的人猿祖先开始制造工具以来的第一大成就。通过农业革命,人们从地球上取得的资源不断增加,足以维持至今还在继续的人类数量的增长。据估计,北美洲优良的狩猎土地每 25 平方千米可以供养 5 个人。靠北欧成为种植者的村落居民的技术,每平方千米大约可供养 5 个人。在 5 000 年以前,在小亚细亚,依靠农业每平方千米可以供养 50 个定居者。

大约 1.5 万年以前,在小亚细亚山麓以南有一块地方,它的北部是现在的土耳其,南部是现在的叙利亚和伊拉克,那里的人们开始种植小麦。穿过欧亚大陆,在长江流域,大约在同一时代,人们开始种植稻米。以后的 1 000 年或 2 000 年,人们开始在墨西哥中央高原上种植玉米。在 3 个不同的时代和地点,所有的人显然是在不知道其他人的工作的情况下,各自独立地找到了解决粮食问题的答案。当小麦的种植通过文化接触传播到整个欧亚大陆时,又重新出现一次稻米革命。可能没有发生扩散以加速玉米革命。这 3 次革命因而必须看作与人类在客观知识积累的同时又产生正反馈所引起的社会进化的结果。

所有 3 次革命加速了参与其事的人口增长，这又引起与此平行发展的进一步的社会进化。人们居住在有上百或数百居民的村庄中，这依赖于在步行可达的距离内土地的产量。农业村社能够供养 20% 的离开土地而从事其他新的职业的人口。按等级制度组织起了企业，人类着手使环境满足他们的需要和享乐。终于，这 20% 的人协同创造了农业文明：纪念碑、城市和皇帝，以及历史的创造和记录。

社会的“正常结构”

从一开始，在新的职业中就产生了对道德及肉体进行高压统治的宗教和世俗权力，这种统治保证了那些没有被束缚在土地上的人们的生活。教士们，他们本人往往就是统治者，对资源和产品不合理的分配提供神的支持。他们将哈佛大学荣誉退休教授阿尔弗莱德·诺思·怀特海 (Alfred North Whitehead) 所谓的农业文明中“社会的正常结构”固定下来：少数人境况较好而多数人为半赤贫的状况。

农业文明中的预期平均寿命始终保持在以前的 25 年。按照这一估计，社会中位数年龄为 10 岁左右。对于 10 岁的中位数年龄，人口的 60% 是儿童。对于多数人——80%——预期平均寿命和中位数年龄更低。这 80% 的人使得另外 20% 的人的预期平均寿命和中位数年龄可以 and 现代工业社会的标准相比。

这有特权的 20% 的人统治了儿童社会。无产者，孩子的抚养者和父母，自愿服从权力，信奉宗教的安慰并接受国王的神威，他们把他们的孩子当作抵押品。他们接受他们出生在其中的社会。少数人设法进入 20% 中。在这个时代或那个时代，其他人——罗马的角斗士和奥地利的农民，阿拉巴马的奴隶——此起彼伏地揭竿而起，扰乱和平。

多数人始终处在贫困之中，在他们的一生中劳动生产率没有

很大的差别。差不多在整个有记载的历史时期中,生产能力的增加只能靠增加耕作的土地面积来保证。按照马尔萨斯在 1798 年所说的“自然定律”,生活资料按算术方式增加,而人口与痛苦均衡地增加。在农业文明中,少数人只可能通过牺牲大多数人的利益来提高他们的福利。

小亚细亚在最后的威斯康星冰川衰退以后进入炎热多雨的气候的时代。地中海森林从狭窄的沿海地区向东扩展穿过安纳托利亚高原,延伸到流量增加的底格里斯河和幼发拉底河的分水岭。在山麓,开放的树林联结着伸展的草地。黎凡特的大平原再次成为荒漠,分散在以色列、黎巴嫩、约旦、叙利亚、伊拉克和伊朗之间,多种多样的动物和植物群落开始繁荣起来。

小麦革命

芝加哥大学的考古学家詹姆士·布雷斯特德 (James Breasted) 在 20 世纪 30 年代把这个地区称为新月沃土。它的沙漠风景以无数的一个比一个更大的土丘为特色,阿拉伯语中叫做“土墩”。最近 50 年在此地进行的考古学发掘证实了古代这里十分富饶。20 世纪 70 年代初,在叙利亚大平原的阿布·胡雷拉土墩的发掘有特别重要的价值。在一个遗址发现了农业革命的第一个千年中人类居住的废墟。最下面一层大约是 1.2 万年前,“生活在环境中”的人们已经定居在村落里。各个家庭都生活在窑洞式房屋中,围绕着窑洞地面的孔洞表示支撑墙壁和屋顶的柱子,或许是芦苇和草的茅屋顶。厨房的垃圾堆里有野山羊、绵羊和猪的骨头。薄的有锋利边缘的“半月形的”燧石刀片是许多种工具中最普通的,这或许是装在箭头或矛尖上随着这些猎物带来的。

同样的装在木制的手柄上的刀片是用作镰刀来收割谷物用的。厨房的垃圾堆中有大量的原始谷物,野生单粒小麦,以及少量的野生大麦和黑麦。由于曾用“碾”石磨损而凹下的平石板可

能是用来碾磨谷物的。一些证据支持这种可能性,即当时在阿布·胡雷拉曾种植这种谷物。用细筛和浮选法从长期埋藏的泥土中挑捡出了“植物化石”,这是今天和种植的农作物一同组成近东的人工农业生态系统的一种野草的化石。

由于不知道的原因,几百年后人们抛弃了阿布·胡雷拉的居住地。在1 000年以后,大约在9 500年前后,这里又有了生命,成为包含许多小的村落的地区首府,今天,还有一些村落埋在这地区其他土墩的下面。农业养活的城镇人口增加到数千人。附近受到不常有的雨水冲洗的干涸河床保存了过去灌溉的证据。畜牧业也为社区的财富做出了贡献。牛和猪以及绵羊和山羊都已经得到驯化。

人们生活在土墙建造的房屋里,有秩序地排列成街区,有狭窄的小巷分开,每座房屋有两间或更多的房间。建成的房屋有一个结构上的特点,就是有用来贮藏谷物的灰泥的箱子。较易辨认的是研磨谷物的臼和杵。

黄铜时代及后来的铁器时代

定居的农业村落生活结束了石器时代。小亚细亚有金属含量丰富的铜矿石;塞浦路斯岛得名于金属。许多遗迹表明在大约5 000年前已经实行矿石熔炼。简单的熔炉可达到1 100℃,这个温度足以使铜熔化。矿石中的砷是矿石中的杂质,熔炉炼出了“自然的”铜。不久,工匠就发现他们可以用锡和铜做成合金,就是黄铜。将金属进行铸造,他们制造出了各种黄铜制品,可能是从制造镰刀开始的。下一步是锻造,使武器的边缘锐利,使盾牌和盔甲能抗得住武器。黄铜时代曾经目睹特洛伊的劫掠。

一些熔炉使用铁矿石、磁铁矿或赤铁矿,熔融物质流出时带走了矿石中的杂质。这种熔炉的副产品是海绵铁,这是熔点为

1 200 的铁硅化合物。在整个黄铜时代中,海绵铁被用来装饰金属。在用木炭作燃料的再熔化过程中,工匠们发现铁硬化成钢。用风箱鼓风的熔炉可以达到铁的熔点 1 537 ,他们生产出铁,然后,这些钢成了产品而不是副产品。通过热和冷的锻造,他们把钢锤打成武器和盔甲,强度是黄铜的两倍。在 3 000 年前,铁器时代接着黄铜时代到来了,钢决定了军事优势直到 20 世纪中叶。现在它和铝及铀共享荣誉。

最早的都市文明

在 6 000 年前,水利使农业沿着幼发拉底河向下发展到它和底格里斯河汇合形成三角洲(现在大大减少流量的两条河流在分开很远的河口流入波斯湾)。在千年内,农村的丰收维持了那里的城市——《圣经》记载的吾珥、拉加什、尼浦尔、苏鲁帕克、基什、爱雷克、阿斯马,还有其他十几座城市——人口为 1 万到 5 万之间。在城市中央的金字塔形神塔(ziggurat)——巴别^①的阶梯形的塔就是一座金字塔形神塔——宣告组织经济活动的宗教权力的出现。坚固的住处保证权势者的地位和舒适。城墙外面,不明显的遗迹是多数人的住处。这是世界上最早的城市文明。证据不能证明的是当地人是否说闪米特语,他们的身份现在还不清楚。

他们的文明是从他们的征服者,即苏美尔人的名字知道的。大约 5 000 年前,这些异乡人在轮子上带着青铜来到此地。他们显然来自里海周围某个地方,在那里轮子和带着挽具的马最先出现在雕刻出来的岩画中。

苏美尔人的征服可能是“野蛮人”对农业文明中心的一系列

^① 译注:巴别(Babel)基督教《圣经》,《创世记》第十一章中提到的城市名。诺亚的后代要在此地建造通天塔,惹怒了上帝耶和华,于是上帝就变乱人民的言语,使人们语言不通,互不了解,终于塔未建成。

征服的第一次。另一项重要的技术，即游牧流浪使得农业文明再度受到围攻。

从苏美尔帝国开始有了文字记载的历史。在 6 500 年以前，苏美尔人保存他们的书籍，用最早的书写语言写下他们的法律并记录当时发生的事件。他们用他们发明的楔形文字，在几十万块泥板上保存了文字历史的滥觞。苏美尔帝国延续到 3 500 年前，直到帝国被巴比伦人征服为止。

宾夕法尼亚大学的塞缪尔·诺亚·克莱默 (Samuel Noah Kramer) 认为苏美尔人发明了“陶器工人的旋转轮，金属铸造 (铜和黄铜)，铆接，焊接，雕刻，布的漂洗、漂白和染色……制造涂料、皮革、化妆品、香料”，并且“掌握了对植物、动物和无机来源制成的药物的分类”。在他自己和他的同事的著作中，克莱默为“他们的房屋和宫殿，他们的工具和武器，他们的艺术和乐器，他们的珠宝和装饰，他们的技能和手工艺，他们的工业和商业，他们的纯文学和政府，他们的学校和庙宇，他们的爱和恨，他们的国王和历史”喝彩。

这些都是人类能力、能量和灵感的释放，是农业革命开始后不到 5 000 年内所能做到的。

从幼发拉底河—底格里斯河三角洲开始的农业发展到波斯湾，再进入今天的巴基斯坦的印度河流域。在巴林岛上建立起一个大城市。在印度河流域，新的都市文明的中心在莫汗约—达洛和上游更远的哈拉帕繁荣起来。它们在 1 000 年以后消失了，这是由于受到侵略者蹂躏，而后被分散的村庄所代替。小麦栽培传播到整个印度北部并在从中国传来的稻米革命之前支持了那里的乡村文化。

小麦栽培从利文特扩散到北非。闪米特农夫可能早在 7 000 年前就已将小麦带到埃及。圣经中犹太人被奴役的故事可能就是回忆那个时代。

印欧语

从黑海南岸起向东到里海,是现在的格鲁吉亚和阿塞拜疆,小麦革命支持了另一种发展着的文明。一些学者提出另一种见解,农业革命的发源地在这里;证据可能已被 6 000 年前黑海的洪水淹没。《圣经》的《旧约全书》中的洪水就是记载此事。与这个问题没有多大关系的另一个问题是,第比利斯大学的汤麦斯·甘克莱利泽(Thomas V. Gamkrelidze)和莫斯科大学的伊万诺夫(V. V. Ivanov)证明印欧语是从这一地区发源的。这种语言是世界上一半以上的人口说的语言。从欧洲语言的根词追溯祖先语言的过程的同时,也追踪了小麦革命在欧洲大陆的扩散。在语言学中,鉴别同一语族中共有的和相近的词的方法是通过反向收敛回到原始母语。这一手续类似于建立生物谱系。原始印欧语中有些词,“轮子”wheel(和旋转 roto 相像的词)及“马”horse(和马属 equus 相似),像“axle”(车轴)“yoke”(轭)和“foal”(驹)等一些词的发音和英语与德语中这些词的发音都相似。在一种或另一种分类中,这些词在所有印欧语系中都出现。在子语的根词中,祖语描述高加索山脉脚下的风景的词,以及描写它的动物群和植物群的词都用的是农业的术语。

似乎马是在这里开始被驯养的,轮子也是当时发明的。有轮子的车和上了轭的馬的岩画在外高加索的另一面远离里海海岸的乌兹别克斯坦被发现,时间大约在 5 000 年前。按照克莱默的意见,苏美尔族的后裔从这广大的地区来到幼发拉底—底格里斯河三角洲。

通过缓慢的扩散而不是征服,使农业传播开来。成功迫使增长着的农业人口寻找新的土地。人口扩散主要是通过开垦已耕地边缘的土地进行的。用这种蚕食方式扩展的土地的本土居民不断吸取新的技术。与新技术一起,在他们的语言中也吸取了

印欧语中的农业词汇和新的生活方式的各个方面。

在印度梵语中引进印欧语根词的人民最终超越了印度河流域的城市文明。早在 16 世纪葡萄牙航海者所听到的词汇的一致性激发起以后的语言学家证实语言总科这一概念意图。

农业来到地中海的欧洲远在前荷马时代,是在 7 000 年到 6 000 年以前。它将印欧语词汇,特别是关于新技术的词汇,引进到现在的拉丁系语言中。毫无疑问,车轮发挥了作用,水路运输肯定也加速了迁移。它在黑海北岸的锡西厄文化中留下了里程碑。在圣彼德堡的爱尔米塔什博物馆中珍藏着锡西厄国王王冠上的金月桂树叶。

印欧语随着从里海向东迂回扩散的农业一同到达北欧——东土耳其斯坦^①也说一种印欧语——沿里海向北进入今天的俄罗斯和乌克兰大平原。在斯拉夫语中还留下根词。整个北欧平原以及在波罗的海周围,种植粮食的居民生活得心满意足,因而延迟了印欧语的渗透。农业技术直到大约 3 000 年前才被掌握。它的成功在波罗的海、北欧、日耳曼,以及英国和凯尔特等语言中记录下来。

稻米革命

寻找最早的稻米培植的遗迹,第一先要来到印度支那半岛。远离覆盖欧亚陆块的北部冰川并得到喜马拉雅山脉雪山顶上融雪流下形成的河流灌溉,这里看上去比中国大陆地区更加适宜。然而,到目前为止认为,在印度支那最早栽种稻谷的遗迹是在 6 000 年前。现在知道,稻米革命始自长江流域,在中国的心脏地区,长江中游的江西省。

最近 10 年的研究发现,从至迟是在 2.445 万年前开始出现

^① 译注:我国新疆维吾尔自治区一带地方。

的人类劳作和社会进化的完整系列,从最早出现的野生稻种到在农田中种植的稻谷,然后是在 9 000 年到 7 500 年前种植的水稻。这一尚在进行中的研究工作的主要鼓动者是理查德·麦克尼什(Richard S. McNeish)。也就是,他在 20 世纪 60 年代确定了玉米革命的地点是在墨西哥[见第 397 页]。

麦克尼什得到北京大学和江西考古学研究所的朋友的帮助,和资助他的事业的实体——安多弗考古学研究基金会——组织了联合考察。对文献进行了调查研究,文献向他们指出江西省乡间的两个洞穴和一个湖泊。

在吊桶环洞中,他们钻探到 15 米深,离开岩石层还有 5 米、6 米。他们逐步辨认出 21 层不同的泥土层。最下面的 3 层没有人工制品。在这上面的两层中找到两件石器。在这上面有 9 件石制工具的一层,根据炉子中的碳,测定它的时间大约在 2.445 万年以前。

在更上面的第五层中,时间定在 1.8 万年前至 1.7 万年前,发现最早出现的野生稻米的花粉和植物化石。在上面的土层中找到的大量新式工具表明稻米已被用作食物。淡水蛤或贻贝的贝壳上面钻了两个孔。一根细绳穿过这两个洞可以把贝壳紧戴在手的中指上;把它拿在手中,凹面向外,贝壳就成了一把边缘锋利的小刀或镰刀,可用来割断稻秆。

在大约 1.1 万年以前的一种更容易栽培种植的稻米的植物化石和野生稻米的化石一同被发现。这意味着什么时候开始种植稻谷是模糊不清的,或许只是粮食和草料那样不易被分清。在这以后的几千年中这两类稻米的相对百分比颠倒过来了。发现的陶器碎片的数量增加。采集粮食的人成为早期的农民。季节性占据洞穴的情况在大约 6 000 年前已经没有了。在那时候人们定居在村落中,通过种植以补充采集食物。

通过对泥土层的探测,在仙人洞中居住的痕迹和从鄱阳湖沉

积岩心中的花粉和植物化石都有类似的发现,还有以后几千年的相当丰富的证据。在底部沉积岩心中没有发现稻米的证据;从大约 1.2 万年前的沉积物中检测到野生品种的稻米;在 4 000 年前,栽种的稻米的花粉和植物化石就很丰富了。在比吊桶环洞中的年代更近的仙人洞的最上面几层沉积物中发现,用于种植稻谷的工具明显地做成炸面饼圈样子的石器,用来加重种稻时用来挖洞穴的棒。

对 10 个不同的人类骨骼的骨头中骨胶原的分析都叙述了同样的故事。在人们吃的食物中碳和氮同位素的比例不同,所以在他们身体组织中也有所不同。甚至通过这种分析得知稻谷的品种互相都有区别,从而食用这些稻米的人的骨头成分也有区别。最古老的骨头表明食物中没有稻米的证据;在次最古老的骨头中出现野生稻米品种特有的同位素比例;再下一个最老的表现出人工种植的种植稻米品种;最后出现的是人工栽培出来的稻谷品种:种植的 (*sativa*) 和印度的 (*indica*)。

麦克尼什和他的同事根据所有这些证据得出结论:从 1.1 万年前至 9 000 年前,在这一地区稻谷的培育一直在进行。在 9 000 年前至 7 500 年前,在鄱阳湖浅滩地区稻谷栽培不断发展。当时,两个主要种植的稻谷品种——日本的 (*japonica*) 和印度的 (*indica*)——已经培育得很成功并且都获得丰收,可以一年两熟。种植稻谷在相邻的湖南省也同时开始了。

一般认为,在 8 000 年前至 7 000 年前稻米的种植推广到印度支那。今天稻米为世界 $1/4$ 以上人口提供主要的卡路里。

秦朝的陶制大军

在 2 300 年前,当秦灭掉其余 6 个“自给自足”的国家以后统一成一个大帝国时,农业支持了今天的中国北方都市文明达 1 000 年之久。不久之前在秦朝的首都西安发掘出土了壮观的陶

制大军,这是在可能是埋葬秦始皇的坟墓周围进行考古挖掘时发现的,这些和真人一般大小的陶制武士终于又得见天日。

在早期的帝国中,稻米不是种植的谷物。当时种植从东南亚传来的谷物。粒子粗大的黍生长在黄河以南的深软而肥沃的黄土地上。由于这个区域降雨的不确定,使得精耕细作的农业和水利工程得到了丰厚的回报。在统一的秦朝帝国,农业技术十分发达,在秦始皇死后不久秦朝被汉朝取代。

围绕一个村庄种植土地的范围和村庄本身的大小主要决定于粪肥供应以及便于运输的距离,甚至在今天还可以见到在中国农村中绿色随着到村庄的距离增加而减弱这样的经济梯度。村落成群地围绕着地方的小镇,地方绅士居住在镇上;镇的大小反映该地区农业输出以及便于货物运输的范围。同样,小镇聚集在有城墙围起来的城市四周,在城市的政治经济支配的范围内,最远的村落通常至多只有几天的路程。官员管理阶层管理公共事务的后勤工作并征收赋税。一个自给自足的国家统治着周围的一些有城墙的城市。正如亚洲内部地区的历史学家欧文·拉铁摩尔(Owen Lattimore)所观察到的,中国文明按照一种标准化模式构造起来。

地主一般通过实物分成来诱使农民劳动。通过出价竞争,耕耘土地的机会给予愿意交出收成的最大份额的农民。中国的“封建主义”用这种策略得到比以往高压统治下更大的收成。另一方面,在较短的时间内完成较大的工程的劳动通过徭役,即强迫劳动来保证。

早在3500年以前就已经开始的中国青铜器铸造也名列世界宝藏的珍品。在2800年前后,用“成批铸造”方法大量生产铁制马具、设备和轴承以及类似的硬件。只在700年前,通过丝绸之路的贸易将磁性罗盘、火药和大炮带到欧洲。虽然,中国数学中几何学较差,但在他们的天文图上把1054年的超新星位置确定

得如此精确，以至现代天文学可以在这里找到它，经过长时间曝光揭露出美丽的蟹状星云。

早在 15 世纪，瓦斯科·达·伽马 (Vasco da Gama) 航行绕过非洲南端之前几十年，19 艘帆船——在 19 世纪以前下水的最大的船只——在宦官郑和指挥下出海。在 19 艘船中，组成护航舰队的较小的 12 艘船中的每一艘都比西班牙大型帆船更大，总共载了 6.7 万人，到达西南太平洋和印度洋；访问了印度、非洲和阿拉伯半岛的海岸；绘制了南方天空星图，3 年后航行回国，以后再也没有出海^①。

这一段历史情节或许能象征性地回答中国为什么没有进行工业革命，中央王朝只满足于对外面世界的兴趣。光辉隐藏在红色的高墙后面，关闭在今天看到的紫禁城内，这代表了享有特权的家族想要的东西。

大约在 2300 年以前，在秦朝统一全中国的时候，印度的阿育王第一次建立统一的帝国。收税的地主也实行和中国的实物分成类似的策略。定居在农业村落中的狩猎采集的部落逐渐发展成为今天印度的种姓社会。有大约 1 万个种姓仍旧保持自己的个性，通过共同自助，保证了印度人口。某些种姓中世代相传制造石器、金属制品和纺织品等高雅的手工艺艺术。今天民间工艺是印度的重要出口商品。内部高原的小麦、种植园中的稻米和低地栽培的稻谷供养了印度文明中的庙宇和王宫，这些也都包围在红色围墙之中。

按照阿尔弗莱德·诺思·怀特海的结论，在中国和印度都永久存在的“被抑制的技术”是“马尔萨斯定律 [起作用] 的精确条件。”总人口 80% 的村民的预期平均寿命保持在大约 25 年左右。

^① 译注：1405 年郑和率船队通使西洋，两年后返回，以后又先后 7 次率船队下西洋，作者所述有误。

这些人口缓慢而稳定地增长了 2 000 年。到 20 世纪,红墙文明控制了近一半的世界人口。

欧亚大陆的内部边疆

从地球人造卫星上看,中国的长城作为农业文明最巨大的里程碑屹立着^①。这是欧文·拉铁摩尔描写的“从太平洋到大西洋的古代文明世界的北方边疆的防御链”的一部分。西南亚洲最早的边境城墙保卫了波斯新生的城市文明。和野蛮人相反,罗马人在大不列颠的中腰,以及莱因河与多瑙河建造了城墙。秦朝皇帝开始修建的长城^②像中国社会边境大多数城墙一样,将他们和外面的游牧民族的交往减到最少的程度,以排斥这些游牧民族。

用贬义的“野蛮人”作为称呼,将游牧民族放在通向农业文明道路上低等的地位上。正如拉铁摩尔证明的,实际上亚洲中部的游牧民族,特别是蒙古人,创造了持久的流动文化,畜牧或许能比农业更能有效地利用自然资源。活跃的畜牧业的存在确保了家畜将贫瘠的牧草转换为人类食物的效率。

游牧民族掠夺定居文明的边境以获得用具,例如武器,供他们流动生活之需。把他们组织成为能征惯战的部落,可以成功袭击定居文明社会的政治制度,也和任何国家首都中看到的一样复杂和肮脏。游牧民族不止一次地在中国建立起他们家族统治的朝代。最著名的成吉思汗在 13 世纪征服了整个亚洲,还进军到达多瑙河。他的孙子突然中止他们对巴格达的围攻,急急忙忙赶回家是为了更重要的事情,选择忽必烈汗的继承人。他们利用日光反射信号通信,在 24 小时内就得到从北京传来的忽必烈的

① 译注:据中国宇航员杨利伟说,他在人造卫星上看不见长城。

② 译注:中国长城在秦以前就开始建造了,秦始皇加以修缮,连贯为一。作者对中国历史不很熟悉。

死讯。

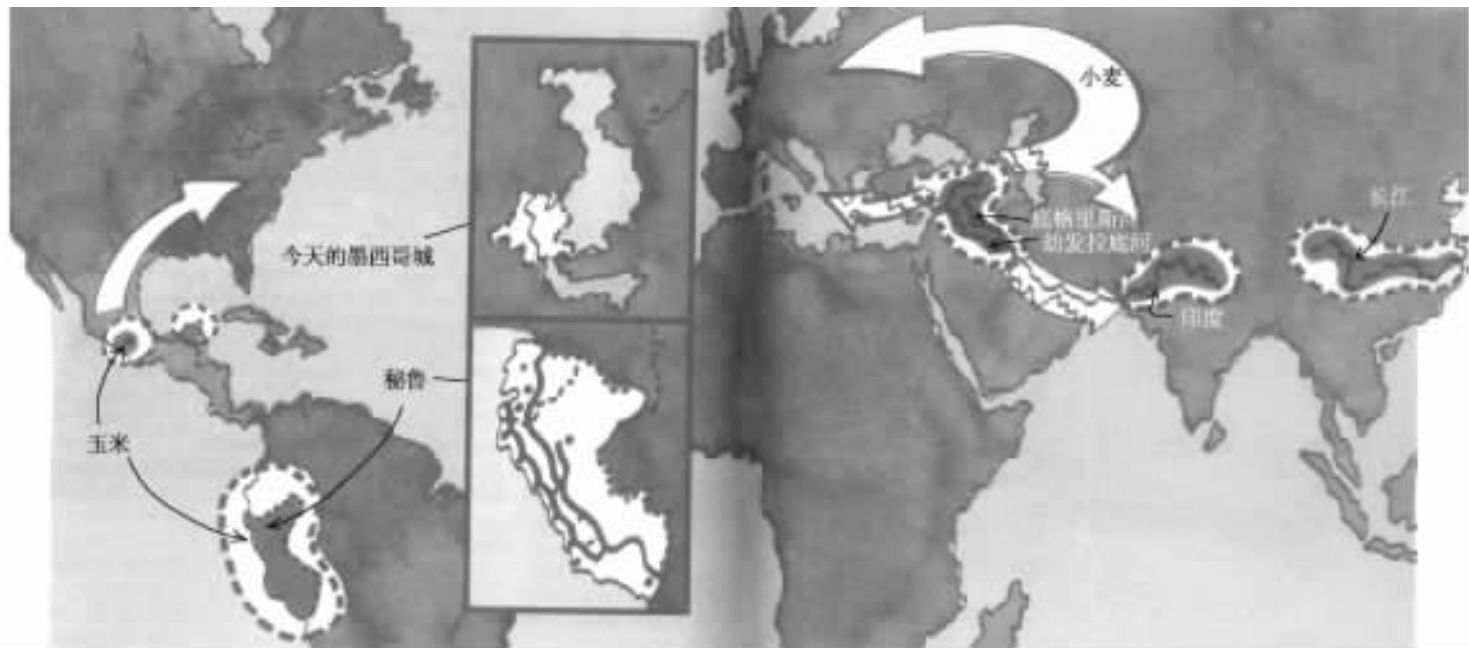
玉米革命

玉米——玉蜀黍——的栽培促成了不可避免的农业革命。当时，旧世界城市文明在新世界中的翻版证明了同一物种的成员经历着同样的社会进化过程。

现在还不清楚什么时候人从亚洲来到西半球。他们在中美洲安家已有 3 万年的历史。到 7 000 年之前，他们已在那里的环境中生活了足够长的时间，可以开始改造它们了。这些是里查德·麦克尼什于 20 世纪 60 年代发动的揭开玉米革命之谜战役的第一个发现。当时作为马萨诸塞州安多的菲利浦学院考古学基金会的负责人，罗伯特·皮博迪 (Robert S. Peabody) 征募了 50 位顾问和合作者组成了多学科小组，其中包括植物学家和地质学家。

不存在任何生长在荒野里的植物和这种现在在全世界都获得丰收的第三大谷物相似。玉米看上去一点也不像草；然而它和小麦、大麦和燕麦都属于同一植物总科，有 5 000 年以上栽培的历史，杂交和杂种的杂交抹去了与这些植物的野生祖先所有的相似性。玉米只适应于农业，不适宜于野外生存。

它的祖先很可能是草本的墨西哥类蜀黍，它的种子藏在小穗中，它的有花粉的纓长在它的主茎顶上。乔治·比德尔将现在栽培的玉米进行逆代杂交实验，从而他自己深信玉米的这一来历。哈佛大学的保尔·曼格斯道夫 (Paul Mangelsdorf) 反驳他，玉米的祖先是它自己，野生玉米已经在从它培育出的后代杂种中消失了。



三大农业革命开始使地球上的物质生产增加到可以支持人类数量的增加。很明显,这3次革命是各自完全独立地发生。1.2万年前在小亚细亚,人们开始培育小麦和其他他们收集到的小型谷物[见第386页]。他们不久就开始定居在村落中,在5000年中,村落农业支持了底格里斯河—幼发拉底河流域三角洲的最早的都市文明。小麦栽培通过海路及印度北方的陆路到达印度河流域。它还扩散到整个地中海盆地,以后又通过俄罗斯大草原进入北欧。大约在同一时代开始的稻米栽培支持了5000年前中国的高度发达的文明[见第391页]。玉米栽培是在大约7000年前从墨西哥山谷南面的高地开始的,大约也在5000年内,农业支持了墨西哥山谷和秘鲁的高度文明。玉蜀黍的栽培在欧洲人来到之前就已传播到北美洲大部分地区[见第397页]。

为了证实曼格斯道夫的预感,1953年在墨西哥内陆山谷的古代湖床——阿兹台克文明的遗址,也就是今天的墨西哥城——进行钻探,得到的玉米花粉的年代在8 000年以前。研究者一致认为野玉蜀黍曾经是干燥的高原上的草,麦克尼什就着手在山谷北坡寻找早期栽培的玉蜀黍。他在那里什么也没有找到。他又转向尤卡坦高原和危地马拉,这里的玛雅文明比阿兹台克更早。但没有发现比3 000年前更早的农业的迹象。他们又选择了特瓦坎高原谷地,麦克尼什和他的同事们确信他们已经看准了目标,这是在墨西哥城以南奥萨卡州的边界。这里,在5个不同的洞穴中和在山谷底上被覆盖的居住层中,3年的挖掘得到上百万件人类存在1.2万年的证据。

从1.2万年到7 000年前,小股狩猎—收集者的家族在特瓦坎山谷漫游。长耳大野兔、老鼠和小鸟的骨头,以及乌龟壳告诉我们它们日常的食物,此外还有季节性的植物类食品。当时还没有绝灭的新世界马和羚羊的骨头表示时不时地会遇上较好的狩猎日。

有一个洞穴中最低一层的是7 000年以前留下的,这里发现5个玉蜀黍“穗”的小画像,不到1英寸长。小的谷粒每4个相配在杆上排成8行,正要变成玉米棒子。穗或穗的残余在每个杆的顶上。这毫无疑问是消失已久的野生玉米。

当然,在培育出来的玉蜀黍上,穗——有花粉的雄性器官——长在茎的顶端,与生种子的雌性穗分开。为了说明器官的分离,曼格斯道夫提出野生玉蜀黍由于偶然或有意地和比德尔喜爱的玉蜀黍的祖先墨西哥类蜀黍杂交。杂交常常在野外发生,玉蜀黍和墨西哥蜀黍有同源的染色体;在每个物种中相应的染色体以同样的序列携带相应特征的基因。采集食物的人可能注意到杂交品种,可能发现谷粒在茎的中间长得很好,墨西哥蜀黍的种子从长在这个位子上的易爆裂的小穗散播开来。这些在起保护作用

的谷壳中的谷粒外面也没有像墨西哥蜀黍具有的硬壳。

在特瓦坎山谷的洞穴中,麦克尼什和他的同事发现了玉蜀黍穗,这表明选择收集的增多以及园地栽种的开始。在 5 400 年前,30% 的玉蜀黍是人工种植的 ;在 4 300 年以前,种植者实行玉蜀黍杂交。山谷底部的发掘表明,在 3 500 年前农村生活已经开始。大量定居人口代替了狩猎—采集的人群。考古学家在这以后,从地下挖掘出 2.5 万个原始的玉蜀黍穗,这些玉蜀黍穗是正在从小的、干瘪的、带穗状的雄花在向今天全世界都熟悉的玉蜀黍变化过程中的最早的品种。

玉蜀黍的种植传播到整个北美洲。1620 年移居到美国的英国清教徒很高兴地在马萨诸塞州发现了它。远在美国的另一角落,近似城市的还没有文字的普韦布洛文化繁荣起来了。在密西西比河流域,筑墩人正在兴旺时期。然而,狩猎—采集的生活方式仍旧继续存在于美洲大沙漠的高地草原,在 100 度子午线处,20 英寸降雨线的西面。游牧部落在这里追踪着野牛的迁徙。他们已经能熟练地驾御马匹,马匹是 16 世纪西班牙征服者重新引进北美洲的。



随着玉蜀黍的大量生产,农村种植园生产出了所有各种蔬

菜,美洲的农业革命将这些贡献给全世界。首先是不平常的茄科植物、马铃薯和西红柿;在全世界,它们产量的吨位数仅次于禾本科植物的谷类,然后是瓜类。迈尔斯·斯坦迪什(Miles Standish)发现一种瓜“像我们的西瓜,只是较小并且质量差一些。”烟草也必须提及。还有苋属植物,这是第一种不是草的果实的谷类食物,可能会在世界市场上有销路。

仍旧有待证明的是野生玉蜀黍不是它自己的祖先。在 20 世纪 80 年代初,杜克大学的玛丽·尤班克(Mary W. Eubanks)成功实现墨西哥玉蜀黍科的一种多年生植物和三囊草的杂交。这种多产的杂种生有小的穗状雄花,就像 30 年前麦克内什在特瓦坎山谷的洞穴中发现的一样。直到 1995 年,在 DNA 的证据得到之前,对她的发现一直有着争议,尤班克又无可争辩地证实了曼格斯道夫的野生玉蜀黍和它的与墨西哥蜀黍第二次杂交得到的后代确实是墨西哥蜀黍和三囊草属的重组合[见第 400 页插图]。

特奥提瓦坎

在 1900 年以前——公元 100 年——新世界农业革命建立了它的第一座城市。特奥提瓦坎的废墟在墨西哥山谷东北的高原上。城市的主要街道有 30 米宽。它沿着正北偏东 16 度至 17 度成一直线,这或许是根据某种现在已失传的天文学原则。街道从月亮神庙开始延伸 4 000 米。月亮神庙是街道北端的一座平顶金字塔,是举行隆重仪式的地点,显然也是行政中心。这个中心的正北面、主要的街道东面有太阳神庙。这是一座基础和基奥普斯^①大金字塔的基础一样大,而高度只有它一半的金字塔。这座庙中精巧的结构不及月亮神,它最突出的是每一层平台表面都有醒目的雕刻装饰着。

^① 译注:基奥普斯(Cheops)是胡夫的希腊名称。

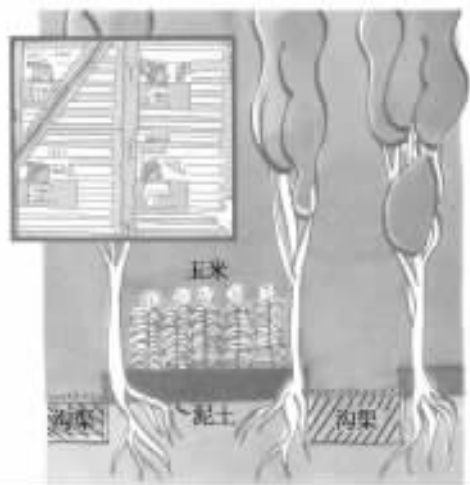
城市的短轴是另一条 30 米宽的街道。它和主轴成直角，在典礼和行政中心两面分别向外延伸 4 000 米。从城市的范围和在它的郊区挖掘出土的文物来估计，特奥提瓦坎肯定曾有 5 万人口或更多。尚未从这没有文字的废墟中发现城市衰落和坍塌的原因。

阿兹台克精耕细作的农业

为供养人口众多的特奥提瓦坎，必须要求新世界农业技术达到无与伦比的高度，在最近一世纪出现了溶液培养法。在城市南面脚下，土地下面保存着曾经称作 chinampas 的墨西哥淡水种植园的干土层。这种样式的种植园在墨西哥市南方的浅水湖地区可以看到，并仍旧用来栽培农作物。这类种植园——或它们的初级形态——中有一些肯定曾经供养特奥提瓦坎，这一点从它们的主要水沟沿着北偏东 16 度至 17 度方向，恰巧与古代城市主要轴线相平行这一点可以清楚地领会到。

在阿兹台克文明的支持下，墨西哥活水种植园达到全盛时期，从公元 1300 年直到西班牙征服者于 1532 年到来为止。墨西哥山谷的月亮湖曾经占有被陆地包围的 5 000 平方千米流域中 1 250 平方千米的面积。在雨季，雨水充满谷底整个成一大湖；在旱季，水的蒸发使水位降低，露出沼泽和泥塘而分成 5 个湖泊。多年的蒸发在北面的较大的湖中浓缩了大量的盐和硝酸盐。从它的南面和西面边缘，泉水将淡水灌入这个系统。墨西哥活水种植园技术在这里繁荣了 2 000 年。今天还保存下几公顷这样的种植园作为实物演示以吸引旅游者。

墨西哥式活水种植园是由 5 米至 10 米宽、15 米至 30 米长的、比水面高出不到 1 米的一些土墩组成。这些土墩被水沟分开，水从长长的水渠流到此地形成一群绿色船坞；用木桩固定篱笆以护住狭窄的土墩；柳木树篱笆护住较宽的一些土墩。今天，



高产量的墨西哥式活水种植园，在墨西哥山谷南端的种植园支持了阿兹台克文明。种植园的布置有点像有许多码头的小船坞，这是在 16 世纪阿兹台克的绘画中的图 [插图]。栽种的树或灌木保持土墩高出水面一英尺至二英尺。这是需要大量劳动力的园艺，沟渠底部泥土是每年要更新的混合肥料。每年进行种植和收获，生产六七种不同的产品 [见第 402 页]。

仍旧和 2 000 年来一样，需要花大量的劳动以维持其高产。在墨西哥式活水种植园中要用船装走旧的上层泥土，然后换上从水渠底上挖出的富含水下植物混合肥料的淤泥。要投入同样多的劳动在苗床上培育每一颗秧苗，然后再一颗一颗地栽种。这种关注对于除玉蜀黍和苋以外的所有种在墨西哥活水种植园中的农作物来说都太过分了。连续种植 1 年可以进行 7 次收获。在阿兹台克时代，种植园也生产丰富的鲜花——金盏花和大丽花。

10 千米长的堤保护南面湖水的新鲜泉水不受到水的主体的盐化作用。15 千米长的沟渠将泉水引到特拉特洛柯和特诺蒂兰岛上闪光的首府——这里现在是墨西哥城周围的活水种植园。这项工程还是受到西班牙征服者的赞叹，虽然这些活水种植园的水渠和水道妨碍了他们的征服。

绝对权力

年复一年祭典上人类的牺牲维护了绝对权力，保证了精耕细作的活水种植园农业及供水工程所需的劳动力的供应。据说，被选到的人可以享受一个星期左右的公众庆祝，据说还可以享用缓解恐惧的草药。征服者在其他时间为这种庆祝活动提供机会和资助。有一次为纠正主要沟渠工程中灾难性的错误，阿贺特皇帝（Emperor Ahuizotl, 1486—1502 年）将负有责任的官员的心脏扔进水里。

在阿兹台克文明的顶峰时期，墨西哥山谷的人口达到 50 万。今天，这个地方是世界上人口最稠密的城市，它的新的和老的建筑正在沉陷到曾经是阿兹台克的月亮湖西岸的沉积物中。

早在 3 000 年前，农村种植园支持了危地马拉和尤卡坦半岛上的玛雅文化的巨大礼仪中心。此地，也像后来在墨西哥山谷中一样，人的牺牲规范了经济过程。在一个礼仪中心，有一个 25 万平方米石砌的平台就是用作这一目的。学者们从一个刻在石头上的有许多图画和抽象符号的浮雕，研究出玛雅人的历史和他们杰出的天文学研究。玛雅天文学家保存了所有看得见的行星的日历。当行星在各自轨道上运动发生会合时就要引起较大或较小的牺牲祭典。日历也记载了如神一般的统治者的登基和去世。

玛雅之所以出名是因为它们的高度文明并不是组织在大城市周围。它在大约 2 000 年前消失。金字塔典礼中心今天还孤独地高耸在浩瀚林海之中。

村社农业在这同一千年中扩散到了南美洲。从秘鲁沿海的山脉流下的许多溪流提供沿太平洋几百千米海岸线居住的居民的水源。高原等高线上的水渠将水从小溪分流到田野。随着人口的增长，水渠工程变得更加巨大。在城市中心进行必要的劳动组织工作。最后，在帝王的权力下，最大的水渠将水从河流谷地

送到 125 千米外的居民区,朱尼乌斯·伯德就是在这些居民的贝冢中发现了他们极口称赞的织锦的碎片[见第 380 页]。根据它实际上的首都名称称呼的契姆文明和帝国,是 14 世纪安第斯印加占统治地位时出现的。

印加文明

印加帝国在 16 世纪从北方的哥伦比亚来到南方的阿根廷,并从太平洋海岸到亚马逊河源头。为了控制这广阔的领土,印加统治者下令建造 1.5 万千米长的公路。在这公路系统中,有两条平行的各 2 500 千米长南北走向的公路,东边一条在安第斯山脉,西边的在沿海地区。它们全部长度的大部分沿着山坡上下起伏按直线前进,在峡谷上架设悬索桥,这些桥由 10 厘米粗的多股缆绳悬挂起来。路面宽度为 3 米,路的两面有齐腰高的墙以遮挡吹过来的雪和沙尘。在不同距离的间隔有大小不同的掩避所供旅行者休息。在这些公路上——路上没有车子——皇家信使通过人员替换可以在两个星期不到的时间内穿过整个帝国。当时,只有罗马的公路系统可以与之相比;到那个时候,罗马的公路已年久失修,欧洲就没有可以和它相比的公路系统了。

在 1 万米^①以上极高的位置,印加帝国建立了用花岗石块砌成的皇城,石块间不用灰浆黏合。作为印加帝国组织和训练下人类力量的见证,造墙用的 10 吨重的石块是从几千米以外好几米深的采石场开采搬运过来的。这些主要靠强壮体力的工作,至多只有半驯养的瘦骨伶仃的美洲驼可以帮助干一点活。为了显示他们绝无仅有的权力和财富,印加统治者将他们的皇宫和庙宇的正面用金箔覆盖起来。

相应地,在新世界,16 世纪西班牙遇到麦克尼什所说的“几

^① 译注:原文如此。应为 1 000 米。

乎和他们自己同样先进的……也和他们自己同样野蛮的一系列文化”。比之于从欧亚大陆内部来的野蛮人对旧世界文明的征服，他们的文化是纯粹的。在巅峰的时期，扩张的印加帝国人口估计达到 50 万。到 20 世纪以前这个地区再也没有达到过这样多的人口。麦克尼什在 20 世纪 80 年代初进行了调查，并标出 2 万多年时间内人类存在和占据的遗迹，从最早的狩猎和采集食物的到来者到印加的占优势的城市文明。旧世界中没有一个地方有可与之相比的可供探究的人类社会进化的记录。人类一直居住在那里，并且随着人口增加，这些记录就被抹去了。

新旧世界之间的收支账目在熔化印加的黄金之后得到一些平衡。西班牙人发现他们的财宝大多是铜做的。印加的冶金学家已经掌握了方法，通过化学处理和锤打使铜金合金中的金贴附到他们制造的物体的表面上，例如覆盖在庙宇和皇宫上的金箔。

在公元 1600 年，世界人口停留在 5 亿。按照迪维的估计，到那时曾经活过并已死掉的共有 300 亿人。每平方千米耕地能供应 100 人的食粮。在世界范围内，地球上的人口密度为每平方千米 3.7 人。预期平均寿命对 80% 的人来说并没有提高，仍旧是 25 年。到下一时期，社会进化转变的时间间隔缩短为几个世纪乃至几十年。

欧洲的预期平均寿命增长了。成年人的数目第一次和儿童人数相当并超过了它。不久，葡萄牙和西班牙的，然后是尼德兰和英格兰的三角旗^①在横帆商船和军舰的桅杆上飘扬着，这在全世界范围内带来的第一个后果是人类生存条件的改变。在以下两个世纪中，随着人口爆炸，欧洲国家给印度和中国以及世界上其余的古老文明国家，只有日本除外，带来的是占领或政治及经济的控制。

① 译注：三角旗是一种航海用的信号旗。

工业革命

工业革命的根源肯定在地中海的古典文明中。尊重经验的科学传统可以追溯到 3 000 年前的巴比伦,那里的天文学家——可以肯定他们的目的是占星术——对用肉眼看得见的行星作了精确的观察,并计算出它们的轨道周期。这里没有把雅典娜神庙隐藏起来的红色围墙;贵族的民主将她的庙宇建立在雅典卫城上,让所有人都能看见。欧洲人将整个中世纪古典文明的文字记录的保存归功于拜占庭和伊斯兰。中世纪包括最后一次罗马的野蛮劫掠到 15 世纪文艺复兴时期城市文明的觉醒。在这整个时代中,大修道院是保存文化的小岛,学者在那里可以自由地认真研究概率——这是要证明的题目——他们甚至可以思考真理——这是已经被发现的。

气候也起了一定的作用。一年只有一次收获和短的生长季节迫使人们相互依赖,或许也限制了权力的执行。在地区的诸族和选举出来的神圣罗马帝国皇帝之间权力分配的空隙中,商业城市以及手工业和学术行会都要求豁免权法案。在波伦亚、巴黎、布拉格、维也纳、牛津和剑桥,从 11 世纪开始,法律和医学等新出现的职业的从业人员和他们的学生一同聚集在教学中心,他们就像在大学里生活。这些科学和学术的专业的独立研究中心将西方文明与以前所有出现过的文明区别开来。

14 世纪的黑死病也起了一定的作用。从君士坦丁堡开始会转变成致命的肺炎的淋巴腺鼠疫横扫整个大陆。流行了整整 10 年,欧洲人口减少了一个吓人的百分比,或许超过了 50%。从此,大陆的人口减少到大大低于温带农业已经达到的承载能力。重新占据被废弃的农场,有较多食物的更多的下一代人成熟起来了。由于劳动力不足而形成较高的价格造成了 20% 和 80% 的人之间的分配一定程度上的均等。由于农业产量提高,能维持的人

口又增加到原来的轨道上，人们在 150 年内有较好的营养状态。

海洋的征服肯定在引发工业革命方面起了作用。葡萄牙航海家打破了阿拉伯对丝绸之路东方的最远一端的中国的贸易的垄断。这些输入物资价格的暴跌使葡萄牙破产，但却激起了大陆的其余国家的贸易。西班牙对新世界的掠夺带来新的活动资本，英国海盗在国王的许可下保证了它的生产投资的再分配。在英格兰与荷兰以外的东印度公司开始掠夺中国、印度以及西南太平洋的群岛。从非洲来的奴隶以波利尼亚出产的布莱船长的面包果为食，开垦了加勒比海岛上的种植园。在北美洲开垦的新农场的产量超过了当地人口和英国人口的增长。

机械能

无论提供的环境条件是什么，工业革命无可置疑地开始了：1769 年蒸汽机发明。没有瓦特 (Watt) 发明的飞球调节器 [见第 53 页]，蒸汽机就不能有效地工作。通过一组齿轮，机器的输出轴带动飞球旋转。通过在离心力作用下使杆子张开的角度调节从锅炉到引擎的蒸汽阀门的大小，从而瓦特建立了反馈控制原理，这一原理指导了工业技术中所有自动调节机器和系统。

这是很好的证据，表明瓦特和他的伙伴马修·博尔顿 (Matthew Boulton) 是自觉的革命者。他和欧拉斯姆·达尔文、约瑟夫·普里斯特利、约赛亚·韦奇伍德 (Josiah Wedgwood, 查尔斯·达尔文的另一个祖父) 以及十几个其他人都参加月亮社的每月一次会议。他们没有留下会议的任何记录，但大家都知道的是他们不限于讨论机器和制造，也不限于自然哲学的一般兴趣。讨论的问题中也有考虑如何用机器和机械能减轻人类存在的匮乏和劳苦。在那个世纪末，他们的讨论得出的预期的后果引发了公众中广泛争论。托马斯·马尔萨斯发表了他的《论人口原理》，他声明反对某些当代人“关于人和社会的可完善性”的推测。他们是

“被自然哲学中的伟大的意外发现所误导……而得到这样一种观念，即我们正达到充满了最重要的改变造成的伟大时代，这些改变对人类将来的命运在某种程度上是决定性的”。

马尔萨斯引证他提到的两个作者之一的马基斯·德·孔多塞 (Marquis de Condorcet) 的话：“很少的土地能生产出更实用或较高质量的更多的物资；物品的制造只要消耗较少的原料并能更好地利用它们……一代比一代有更多的财产。”

马尔萨斯用怀疑的眼光引用孔多塞的声明，“法兰西宪法的原则已经是所有开明人士的原则”。马尔萨斯轻蔑地引用他的同胞，威廉·哥德温 (William Godwin) 怀有希望的预言：“在这样一种社会状态中，即每一个人生活在富裕之中，都同样分享自然的赐予……狭隘的自私原则就会消失。”

人口原理

“人口的增长趋势总是比食物更快”，就是人口原理的荒谬观点。英格兰教堂的牧师马尔萨斯认为这个趋势符合上帝使地球上住满人的目的。“假如这两个 [增长] 趋势平衡，我就看不出有什么足够强的动机可以克服人的懒惰促使他去耕种土地。在任何大片土地上，不管它是多么肥沃，人口可能会停止在 500 或在 5 000，也可以在 500 万或 5 000 万，这都一样”。“人口增长迫切的需要”注定要产生和政治经济及劳苦大众“极度贫困”的不平衡，这些劳苦大众“在生活的大博彩中抽了一个空签”。

人口原理统治了今天公众的观念，成为没有说出来的最终经济问题的表述，它承认人口过剩是人类最后的苦难。过去 40 年中人口倍增到 60 亿，穷人中最穷的 20 亿人的痛苦证实了这种预见。在每一个外交部，这种痛苦和期望成为含糊不清的政策前提。人口的力量引起了一些人反对所有的人的战争。

显然社会进化已经超出农业文化的千年传统。然而，人类价

值的改变是伴随着客观知识的增加以及它的公开展示的技术而来的,这些技术在过去的3个世纪中,从根本上改变了世界人口增长的百分比的物质条件。

奴隶制度成为不道德的

在19世纪60年代的美国经济中,机械能的使用开始超过由人和牲畜提供的生物能量。就在这个10年中,这个国家里废除了黑奴制度。奴隶——在古代雕塑中从未受到注意——在技术上已成为被废弃的东西。经济上的推论是没有竞争力的奴隶制度可以废除。

可以算出一个人年——一个工人一年可以做到的机械能净流出——相当于150千瓦时。美国的中心电站生产的供应市民和机器的电力人均30 000千瓦时,从而使每个公民的力量增加200倍。巴克明斯特·富勒(R. Buckminster Fuller),这位工业主义的道德预言家把这称为“无生命的奴隶”(inanislaves)。

工业技术中应用的各种自然力中机械能占主要地位。新材料的发明使得容纳、运送、检测和控制自然界的极端条件:极热和极冷、高压到高真空、亿万伏高压到微伏电压等都可能做到,从而得以无限制地从岩石层中提取出各种资源;它们的经济效益是这种能量花费的函数。它从可达到的地壳内部以及太阳光中都可得到无限的能量,它使飞机翅膀和轮子竞争。工业化的社会为家庭提供热、光、大部分家具和尽职的全部机械化的家庭服务员。

机械能产生的丰富的物资使得社会上全部人口超过了需要,即使80%和20%的比例不变(或很少变化)。在这些国家中物质缺乏不再是造成贫困的原因。贫穷始终存在是社会经济制度造成的。

18世纪末到19世纪初,欧洲工业革命引起的社会革命赞美思想、言论和结社自由的新鲜经验。在今天工业社会中的幸运的

人们的社会记忆中，已经忘记了在人类的 80% 人群中仍旧存在的苦难。再引用阿尔弗莱德·诺思·怀特海的书中的一段话：

物理自然巨大规模的习性及其铁的定律决定了人的苦难的情节。生与死、热、冷、饥饿、分离、疾病、目标之难于实现，这些都由于它们的限制束缚了男人和女人的精神……自由的本质是目的的可实现性……普罗米修斯并没有给人类带来强迫的自由。他带来的只是火。

并非“永恒的问题”

20 世纪 30 年代，工业化国家的经济陷入大萧条，约翰·梅纳德·凯恩斯请求他的忧虑的同时代人考虑“我们孙子辈的经济的可能性”。“煤、蒸汽、电力、石油、钢、橡胶、棉花、化学工业、自然机器以及大生产的方法，无线电、印刷、牛顿、达尔文和爱因斯坦”，他说，这些使我们看到这样的可能性，即“假定没有大规模的战争以及没有人口的巨大增长，经济问题是有可能得到解决的，至少能够预期在 100 年内可以解决。这意味着经济问题并非……人类的永恒的问题”（凯恩斯的重点）。

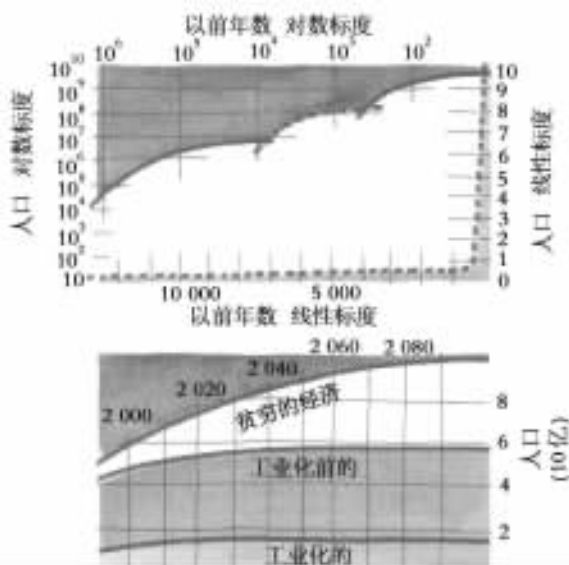
从 1930 年以来，至少有一次大规模的战争，并且世界人口翻了一番还不止。不过经济问题之可能解决已经可以明白地看出来了。由于受到人口原理的攻击，比之于他同时代的那些被马尔萨斯在他的《论文》中驳倒的人，凯恩斯的言论不很肯定地被当作为预言。马基斯·德·孔多塞和威廉·哥德温都预言繁殖力由于实行避孕要降低——这对马尔萨斯来说是令人讨厌的：“不适当的技术用于隐瞒不正当的性关系”——这可以推进经济问题的解决。

富裕的普及

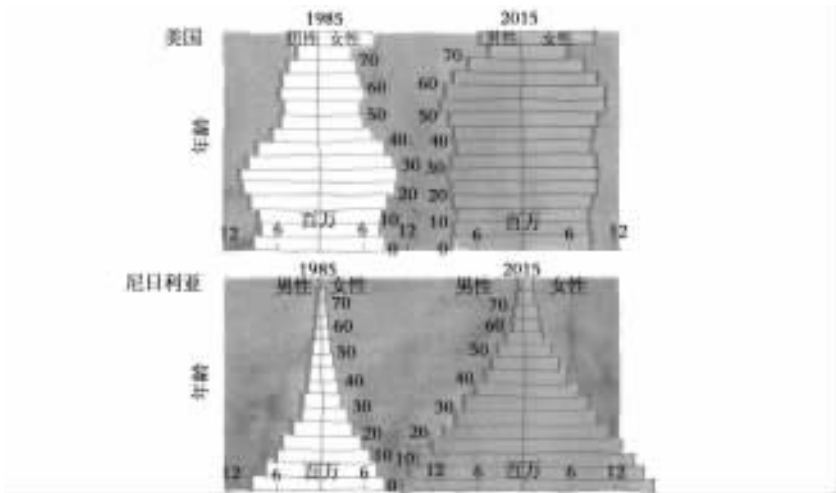
18 世纪由机械能引进开始的富裕的扩散加快了从 16 世纪以来的欧洲人口平均期望寿命的增长速度。儿童死亡率的降低使

欧洲人中达到生育年龄的人数增加。在 19 世纪中叶,在各地引起了人口爆炸,出生率增加和繁殖力减少持平。欧洲和美洲大城市的育婴堂是为适应普遍存在的遗弃和杀婴而建立的,即使在 1750—1850 年间人口倍增的时候也是如此。

在 20 世纪中叶,欧洲人——1600 年的人口是 5 000 万,为当时世界人口的 1/10——增加了 15 倍,达到 7.5 亿,为当时世界人口的 1/3。他们已经移到新世界,并将工业化带到所有各大洲,在全世界每一座新的和老的城市中还有 5 万以上的居民。



3 次人口爆炸伴随着人类生物学的和社会的进化 [上图]。20 万年以前的文化革命使得人口增加到 100 万。农业革命使人口从 1 万年前的 500 万或 600 万增加到 1600 年的 5 000 万。工业革命使人口达到 60 亿。今后人口的增长 [下图] 主要来自现在最穷的 10 亿人口。较先进的工业化前的国家将完成他们的人口过渡,在这一世纪中达到零增长。



人口过渡的过程在这些图中描绘出来,将美国和尼日利亚从 1985—2015 年的人口,按年龄和性别作图。美国的人口出生率在 1985 年达到使人口总数不变的替换水平,生育年龄人群是 20 世纪 50 年代生育高峰时出生的,他们的数目超过了他们的后代。尼日利亚正在人口爆炸的过渡阶段,平均期望寿命延长,图上看到 2015 年生育年龄的人群增大为 4 倍;由于人口出生率的下降,14 岁以下儿童的数目只增加 100% 略多。

工业化国家和地区中平均期望寿命现在已经超过了 70 岁。并不是所有这些地区都属于欧洲文化。它们包括日本、韩国、中国台湾地区、中国香港地区和新加坡等大都市。在所有这些工业化的国家或地区里,人口出生率降到甚至低于人口替换率的水平,即每个生育年龄的妇女一生中生养两个孩子,工业化世界的人口已经完成了人口过渡。在本书第 40 页上已经说过,这就是世界的人口过渡:

a) 高死亡率和高出生率以及预期寿命小于 30 岁(在人类整个前历史阶段)的条件下近于人口零增长。

b) 经过人口爆炸。

c) 又回到人口零增长,这时是低死亡率和低出生率以及预期平均寿命超过 70 岁(数目增加着的现在活着的一代人的经验)。

在所有的工业化国家里已经实现了人口零增长。对于发动工业革命的欧洲人来说,这一过渡需要 3 个世纪。与他们的伟大事业成就一起,日本人在不到 1 个世纪就完成了这一过渡。后来者将在更短的时间里完成这一过渡。

欧洲人的经验表明,过渡这件事产生的效果超出了人口统计本身。预期平均寿命增长——死亡的推迟——人们完成了人口统计学家琼—克劳德·切斯内斯(Jean-Claude Chesnais)所说的“对生命的征服”。当中位数年龄从 10 岁或 13 岁增加到 30 岁及更多时,儿童的人数变为和成年人的人数相同。存活不再是占据人类意识的首要任务。未来居民成为可能。未来居民的父母作了这样的考虑:孩子较少则每人分配到的就较多,于是出生率下降了。工业化国家的人口是世界上最早出现的成年人口,其中儿童占人口总数的 $1/3$ 弱。

活得更长久的人在他们活着的更长生命中维护他们的权利。个人的尊严取代了国王的神权。民主自治的制度并不一定要和工业革命同步进行。所有工业化国家今天都生活在民主选举产生代表的政体中。不过,从未有任何国家的政府因怀疑它本身的合法性而不能行使从人民得到的权力职能。

然而,一些国家生活在农业文明延续下来的国家权力的无政府状态中。20 世纪中,1914—1945 的 30 年战争夺去了活在那个时代人的 10% 的生命。在战争早期,作为对战争的恐怖和愚蠢的反应,工业化国家试图通过国际联盟来组建世界政治体制。在 1945 年,他们组织了联合国。在联合国宪章里,他们自愿承担两项任务。第一是维护和平。这一次,他们受到了新的压力。他们

不可能——他们做不到——保护他们的人民免受导致第二次大战结束的原子弹的威胁。他们的第二项任务是，工业化国家要参与促进新兴国家，即“不发达国家”的经济发展，帮助这些国家从他们的被废继的帝国中站起来。

半个世纪以后，可以看到工业化国家的第一项任务获得了成功，至少是部分的成功。通过安全理事会中的审议以保持参与者进行对话，对相互毁灭的狂妄信念作出合理反应，推迟了下一次原子弹的使用。不过，现在至少有 20 个国家必须计入公开和暗中拥有原子弹的国家名单。按照世界事态的发展趋势，战后的年代随便哪一天都可能变为战前年代。

若干年前，逼近人类存在的危险促使数学家雅各布·布洛诺夫斯基提出这样的忠告：

我们还没有允许科学的宽容或者科学的经验主义影响狭隘的地方主义规则，我们一直依据这种狭隘的规则指导国家的行为……

技术科学的躯体加重我们的负担并威胁我们，因为我们试图只使用它的躯体而抛弃其精神；我们只打算购买科学的尸体。我们受到我们应当控制的自然力量的折磨，因为我们以为对它的控制只需要比它的发现只需要较少的努力和理解。

摆脱贫困

今天组成联合国的各国外交部几乎一点也不记得联合国还有第二项任务了。针对“摆脱贫困”的战斗仍旧是他们战后表示自责和决心而承担的全部义务。认识到人口过渡的意义，这个目标导致对另一个更大目标的认识。经济发展会带动世界其余国家的人口完成人口过渡的历程，并使人口增长最终停止在一个适当范围内，使得地球资源可以维持人的尊严和自由。

尚在执政的政府有信心将他们仍旧掌握的权力转到经济发展的任务上。1946 年美国向联合国全体大会呼吁在纽约成功湖召集以前的轰炸瞄准具工厂的国际会议,讨论资源的保护和利用问题。大会的筹备会议——准备这次大会的事务——启发了哈利·杜鲁门(Harry Truman)在 1949 年 1 月的就职演说中提出第四点计划。第四点计划号召美国对不发达国家的经济发展进行财政和技术援助,大规模的经济援助纲领在马歇尔计划的名义下扩大到西欧。

国内生产总值(GDP)的百分之一

在那一年晚一些时候,联合国大会 200 号决议建立联合国经济发展基金(以后称为特别基金,将首字母缩略词从 UNFED 改成 SUNFED)。它任命一个“专家组”,包括印度和新加坡国家牙买加的经济学家,来“评估不发达国家的经济发展情况”。

他们的报告是第一个关于这种承诺的范围明确估计。它要求工业化国家的援助增加到他们 GDP 的百分之一的水平。作者们解释说“可以有利润地投资到 4%,其数值决定于同时用于改善社会公益事业资金,特别是公共健康、教育、道路和通信”。

一般情况下,用于社会公益事业的资金来自税收。不发达国家因贫穷而不能得到必要的收入。规定了社会教育及通信等基础结构事业的投资,没有人怀疑私人企业真的会响应不发达国家开放的巨大市场,也没有人期望私人资本能提供全部资金。

工业化国家的政府相应地贡献出他们的国内生产总值的 1% 作为无条件转让。这种帮助等于不发达国家国内生产总值的 10% 或更多,这又会引起 10 倍于这个数值的投资,将他们的就业不充分的人力以及尚未应用的资源用到工业革命的基础结构中去。到筹措资金的下一个阶段,发展中国家可以向国际复兴开发银行(即世界银行)请求长期低息的“软”贷款。世界银行由某一

些政府提供资金。在这些投资所建立的基础结构上,私人资本和市场操作就会引起世界范围的工业革命。然后,希望在战后时代的早期,不发达国家到 2000 年能够自立于自足的工业化经济增长上。

一直到 1962 年,约翰·肯尼迪(John F. Kennedy)才批准将美国国内生产总值的 1% 用作经济援助,并呼吁联合国大会宣布 20 世纪 60 年代是“发展的 10 年”。20 世纪 60 年代是以“不幸的 10 年”告终。工业化国家分裂为进一步武装的两大阵营。1945 年承诺的促进各国经济发展的经济援助反而造成了几个忠于美苏冷战的附属国——“外援”成为一个坏名称。这种承诺多次造成了这些附属国之间或其国内的傀儡战争。

贸易,而不是援助

受到通过“贸易,而不是援助”来寻求发展的那些后来被称作“发展中国家”的进展是不平衡的。通过借债,以及通过从工业化世界获得的资金寻找石油及其他资源,或者通过低工资的劳动力的选择性投资获得外国的资金。通过联合国发展计划和联合国技术代理处的多国渠道引进少量基金并同时引进各地的工业革命的最简便的技术:公共卫生和教育。人民健康和识字的统计说明了为最初的经济发展的基础结构在各地的设施所起的作用。

在各大洲,平均期望寿命至少增加 10 年。婴儿死亡率从很高的 1 000 个活产死亡 300 人降低到 100 人。人口出生率随着降低;从 6.5 的指数降到 4.2。世界人口增长率在 1970 年达到高峰值,略低于 2%,而现在降到 1.5%。正如所有求平均的情况一样,这些平均数字抹煞了最先进的发达国家和那些落后国家之间巨大的差别。

人口最多的国家出现在最先进的发展中国家。13 亿人口的中国人的平均期望寿命从 1950 年的 40 岁提高到 70 岁;婴儿死

亡率从 300 降到 32 ;人口出生率从 5.8 降到 2.3 ,已到人口更替率的边缘 ;60 岁以下识字的人口为 98% ,妇女的识字率为男人的一个分数。列为发展中国家的另一极端的是撒哈拉沙漠以南的 30 个国家。他们的 5 亿总人口的统计数字都令人感到泄气 :平均期望寿命 50 岁,婴儿死亡率为 218 ,出生率为 6 ,识字的人为 27% ——男人 33% ,女人 15% 。这些数字比起 1950 年的条件已有相当的改进。然而,从 1980 年开始这些数字又变坏了。在 1980 年左右,艾滋病病毒在非洲出现,这种正在发展到全世界的传染病应使我们从反面受到教育,所有的人都必须负担起人类共同未来的责任。

描写人类共同的现状的统计数字表明,最穷的国家的国内的登录账目——基础结构建设进展的记录——越来越可靠。联合国人口署根据他们的人口研究所的统计作出了世界人口的计算模型。1990 年依据这个模型编制出人口增长的长期规划,于是现在可以提出两个问题 :世界人口什么时候能够通过人口过渡到达人口的零增长?人口最后将达到多大的数目?

为了回答这两个问题,要求模型根据现在开始往后的人口出生率趋势来计划人口增长。根据这个有希望的假设,可以证明将在 2100 年完成这个过渡,人口总数将为 115 亿并达到零增长。如果模型按现在的出生率来计划人口增长,到 2100 年人口将达 220 亿,2150 年人口为 280 亿,并且还要继续增长。模型表明,当达到 280 亿人口时,现在最穷的 10 亿人将有 140 亿子孙后代。

发展要求发展中国家的 48 亿人口通过国内人口过渡,现在主要取决于投资的私人部分流入所谓的“新兴市场”。500 个最大的跨国公司——经营全球 30% 的经济周转额并超过所有发展中国家的国内生产总值总和——是工业化世界和前工业化世界间的主要联系。在整个 20 世纪 90 年代中,他们的年度直接投资达到每年 1500 亿美元,达到了曾经许诺过的拿出工业世界国内

生产总值的 1% 作为援助的数额。

在 20 多年中,私人投资流向的 80% 进入这一市场的 10 个国家中。到 1985 年为止,这 10 个国家的总人口为 6.73 亿。现在这一资金流联系的包括中国的 10 个国家的总人口为 18 亿(曾经受青睐的印度尼西亚落到这 10 个国家的末一位)。中国的低出生率使得人口出生率降到 2.6,已经可以将它归入人口过渡第三阶段的国家。对有 30 亿人口的其余发展中国家的投资还留下 300 亿美元。2000 年世界银行的报告表明,这些资金一点也没有投入撒哈拉沙漠以南的非洲及其 5 亿世界上最穷的人民中,现在这些国家正处在人口过渡的第二阶段——人口爆炸。

可持续发展

在联合国对经济发展的审议中,发达国家已从发展中国家得到了他们自己该得的那一部分利益。在这半个世纪中,联合国大会召集了一系列关于人权的联合国会议;关于儿童、妇女和数目不断增加的老年人的福利问题;以及关于人口、环境和经济发展等问题。从联合国秘书处和技术署保管的这些会议公报与世界统计的本身可以看出人类长远未来的前景及可行性。

在过去半个世纪中,大多数发展中国家已经培养出他们自己的掌握技术尖端的本国知识分子。现在正是这些国家的人民在使 1950 年规划的必要的外国援助的催化作用的骨架上长成丰满身体的时候了。他们的资源开发事业的工程学和经济学研究,他们国家中快速发展的城市的给水和环境卫生系统,交通、通信和电力网等都是错综复杂的现实和专门的问题,这些对援助和要改变的基础结构技术都是必要的。

对这项当今最巨大的工程整体的全面采样评估由联合国环境和发展大会秘书处于 1992 年在里约热内卢进行。着重于估计应该有的基础结构的投资大小的数据库,在 21 号决议中有清楚

的说明,这是大会的主要工作成果。这项关于“可持续发展”的决议,鉴定并标出基础结构建设中的最紧急的任务,包括对由于贫穷和不正确的资源开发所破坏的环境的修复。对这一类任务,外国援助总是有意向的。他们需要从公众筹措资金。他们不必付出利息或红利就可以筹集想要做的事业的基金。

如这些任务还没有完成,世界上的穷国肯定在全球化经济中吸引不到以追逐利益为目的的资金,并且将以环境的退化为代价继续生活在贫穷中。21 号决议包括生态环境和人口,这些问题处在经济问题的边缘或者被忽视。在 40 个最穷的国家里,在非洲和南亚,最优先的规划等待着执行。其中包括阻止沙漠化,开始重新造林,留住和储存不确定的雨季的雨水,恢复土壤以及教育。下一代可能肩负起这些任务并实现工业化,工业化会使他们的人民从他们国家的资源中得到利益。

21 号决议规划援助金额为每年 1 250 亿美元,或为工业化国家 1992 年国内生产总值的 0.7%。在发展中国家,21 号决议表明,这一技术的过渡从潜在的人类资源和物理资源得到 4 倍大的直接投资。已工业化的和发展中的国家联合投资持续 35 年,将会激发在 21 世纪其余年代中将世界经济扩大到 4 倍,这是在两倍人口的世界中福利加倍和消灭最悲惨的贫穷所必需的。

在任何援助的前面,发展中国家指望工业大国革新世界经济的增长。让市场决定投资率。500 家跨国公司正在决定利用什么技术,以及在什么时候、什么地方和为谁的利益利用这些技术。因为市场没有使对环境进行控制的费用内在化的机制,所以它还不能反映人类的需要,目的或希望并不是经济的要求。为响应这样的要求,工业国家中自治的公民必须建立其他的机构。

前面所作的概括——世界人口增长和经济发展的规划要求世界其余国家都通过人口过渡——表明人类社会进化的下一阶段是可实现的。较快的世界经济发展超前于较少的世界最终人口。

如果预计的 115 亿人口看上去过分多了,则解决的方法决定于加速前工业化国家发展所采取的措施。

之所以可能构想出这样伟大的目标是因为我们手头已经掌握了完成这一目标的技术。确定的结果是能够用确定的方法达到的。由最早的工具制造者开创的探索的成功向智人的人性提出了挑战。

注 释

这些最后的注释提供了我用的资料来源的线索而不是引证。可以看出,其中许多都不是原始文献,也并没有全都记录在这里。我把我从中得到乐趣并受到教益的书和《科学美国人》中的文章推荐给读者,不知道我的叙述是否清晰、广泛,是否能引起读者的兴趣,还是反而使他们感到困惑。

CHAPTER 1

To the reaches of the observed universe there is no better introduction than :Morrison, Philip and Phylis and the Office of Charles and Ray Eames, Powers of Ten, SCIENTIFIC AMERICAN Library, W. H. Freeman and Company, New York, 1982. To the ground of knowledge :Hawkins, David, The Language of Nature, W. H. Freeman and Company, San Francisco, 1964 ; von Mises, Richard, Positivism : A Study in Human Understanding, Harvard University Press, Cambridge, 1951, and Bridgman, Percy, Reflections of a Physicist, Philosophical Library, New York, 1955. How science gets done :Merton, Robert K. , The Sociology of Science, University of Chicago Press, 1973 ; and Kuhn, Thomas S. , The Structure of Scientific Revolutions, University of Chicago Press, 1970.

In SCIENTIFIC AMERICAN : Gingerich, Owen, The Galileo Affair, April, 1986 ; Drake, Stillman, Galileo's Discovery of the Law of Free Fall, May 1973, and, with MacLachlan, James, Galileo's Discovery of the Parabolic Trajectory, March 1975 ; Zuckerman, Harriet, The Sociology of Nobel Prizes, Nov. 1967 ; Ingalls, Albert G. , Ruling Engines, June 1952 ; Moore, A. D. , Henry A. Rowland, Feb. 1982 ; Barnard, Chester I. , Arms Race v. Control, Nov. 1949 ; Rideenour, Louis N. , Bethe, Hans A. , Bacher, Robert F. and Lapp, Ralph E. , The Hydrogen Bomb, respectively March, April, May and June 1950 ; Newman, James R. , review of Herman Kahn, On Thermonuclear War, March 1961 ; Blackett, P. M. S. , Steps Toward Disarmament, April 1962 ; Bethe, Hans A. and Garwin, Richard, Antiballistic Missile Systems, July 1972 ; Scoville, Herbert, Jr. , Missile Submarines and National Security, June 1972 ; von Hippel, Frank and Drell, Sidney, Limited Nuclear War, Nov. 1976 ; Forsberg, Randall, A Bilateral Nuclear Weapons Freeze, Nov. 1982 ; Briggs, Asa et al. , Technology and Economic Development, a single-topic issue, Sept. 1963 ; Hutchinson, G. Evelyn, et al. , The Biosphere, a single-topic issue, Sept. 1970 ; Dadzie, K. K. S. et al. , Economic Development, a single-topic issue, Sept. 1980 ; Weaver, Warren et al. , Fundamental Questions in Science, a single-topic issue, Sept. 1953.

CHAPTER 2

Accessible enlargement on much of the story told in this and the next two chapters is offered by George Gamow, himself a considerable contributor to the convergence of particle physic and cosmology that is the

story of Chapter 4 ; see his *One Two Three Infinity, The Great Physicists from Galileo to Einstein, Thirty Years That Shook Physics*, all available in reprint from Dover Publications. In James Clerk Maxwell, *A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field*, Scottish Academic Press, with an appreciation by Albert Einstein, is a bridge from the classical to the new physics. *The Principle of Relativity*, A. Sommerfeld, Editor, Dover Publications, 1952, has the historic papers on Relativity, Special and General, and the reader will be enthralled to discover how far the arguments can be followed. And see Schilp, Paul Arthur, editor, *Albert Einstein : Philosopher Scientist*, Library of Living Philosophers, Evanston, 1949, for Einstein's autobiographical memoir.

In *SCIENTIFIC AMERICAN* : Einstein, Albert, *On the Generalized Theory of Gravitation*, April 1950 ; Cohen, I. Bernard, *Isaac Newton*, Dec. 1955 ; Wilson, Curtis, *How Did Kepler Discover His First Two Laws ?* March 1972 ; Cohen, I. Bernard, *Newton's Discovery of Gravity*, March 1981 ; Wilson, Curtis, *Priestley*, Oct. 1954 ; Duveen, Denis I., *Lavoisier*, May 1956 ; Dyson, Freeman, J. et al., *Heat*, a single-topic issue Sept. 1954 ; Wilson, Mitchell, *Count Rumford*, Oct. 1960 ; Ehrenberg, W., *Maxwell's Demon*, Nov. 1987 ; Cohen, I. Bernard, *Benjamin Franklin*, Aug. 1948 ; Williams, L. Pearce, *Humphry Davy*, June 1960 ; Kondo, Herbert, *Michael Faraday*, Oct. 1953 ; Newman, James R., *James Clerk Maxwell*, June 1955 ; Morrison, Philip and Emily, *Heinrich Hertz*, Dec. 1957 ; Shankland, R. S., *The Michelson Morley Experiment*, Nov. 1954 ; Whittaker, Sir Edmund, *G. F. Fitzgerald*, Nov. 1953 ; Kline, Morris, *Geometry*, Sept. 1964 ; Dyson, Freeman, *Mathemat-*

ics in the Physical Sciences, Sept. 1964 ; Weisberg, Joel, et al. , Gravitational Waves from an Orbiting Pulsar, Oct. 1981.

CHAPTER 3

Selective browsing through Feynman, R. P. , et al. , Lectures on Physics, Addison Wesley, Reading, Mass. , 1963, and close study of Feynman, QED, Princeton University Press, 1985, together with Bohm, David, Quantum Theory, Dover Publications, New York, 1979, calmed and facilitated my apprehension of the quantum world.

In SCIENTIFIC AMERICAN : Weisskopf, Victor F. , How Light Interacts with Matter, Sept. 1968 ; Lifshitz, Evgeny, Superfluidity, June 1958 ; Wilson, R. R. , The Batavia Accelerator, Feb. 1974 ; Jackson, J. David, The Super-conducting Super-Collider, March 1986 ; Andrade, E. N. da C. , The Birth of the Nuclear Atom, Nov. 1986 ; Feinberg, Gerald, Ordinary Matter, May 1967 ; Gamow, George, The Exclusion Principle, July 1959, and The Principle of Uncertainty, Jan. 1958 ; Schrödinger, Erwin, What Is Matter ?, Sept. 1953 ; Dirac, P. A. M. , The Evolution of the Physicist s View of Nature, May 8, 1963 ; Gell-Mann, Murray and Rosenbaum, E. P. , Elementary Particles, July 8, 1957 ; GellMann, Murray and Chew, Geoffrey, Strongly Interacting Particles, Feb. 1964 ; Morrison, Philip, The Overthrow of Parity, April 1957 ; Wigner, Eugene P. , Violations of Symmetry in Physics, Dec. 1965 ; Lederman, Leon, The Two Neutrino Experiment, March 1963 ; Weinberg, Steven, Unified Theories of Elementary Particles, July 1974 ; Rubbia, Carlo, et al. , The Detection of Weak Neutral Currents, Dec. 1974 ; Kendall, Henry W. and Panofsky, Wolfgang, The Structure of the Proton and the Neu-

tron, June 1971 ;Glashow, Sheldon Lee, Quarks with Color and Flavor, Oct. 1975 ;Georgi, Howard A. , A Unified Theory of Particles and Forces, April 1981 ;Freedman, Daniel Z. and van Nieuwenhuizen, Peter, The Hidden Dimensions of Spacetime, March 1985.

CHAPTER 4

Davies, Paul, editor, The New Physics, Cambridge University Press, Cambridge, 1992, brings together the authors who brought the convergence of particle physics and cosmology in a volume accessible, gradedly, to motivated curiosity. Mizner, Charles W. , Thorne, Kip S. and Wheeler, John A. , Gravitation, W. H. Freeman and Co. , San Francisco, 1970 , invites reading by “our fellow citizens who, for love of truth, take from their own wants by taxes and gifts to forward the search into the mysteries and marvelous simplicities of this strange and beautiful universe, our home. ” Weinberg, Steven, The First Three Minutes, Basic Books, New York, 1988 , relates the Big Bang standard model, and Guth Alan, H. , The Inflationary Universe, Addison-Wesley, Reading, 1997 , amends it.

In SCIENTIFIC AMERICAN :Robertson, Harold P. , et al. , The Universe, a single-topic issue, Sept. 1956 ;Greenstein, Jesse, Dying Stars, Jan. 1959 ;Hewish, Anthony, Pulsars, Oct. 1968 ;Thorne, Kip S. , Gravitational Collapses, November 1967 ; Le Corbeiller, Philippe, The Curvature of Space, Nov. 1954 ;Dicke, R. H. , The Eötvös Experiment, Dec. 1961 ;Chaffee, Frederic H. , The Discovery of Gravitational Lens, Nov. 1980 ;Weber, Joseph, The Detection of Gravitational Waves, May 1971 ;Gingerich, Owen, Copernicus and Tycho, Dec. 1972 ;Krauss, Lawrence M. , Dark Matter in the Uni-

verse, Dec. 1986 ; DeWitt, Bryce, Quantum Gravity, Dec. 1983 ; Hoyle, Fred, The Steady-State Universe, and Gamow, George, The Evolutionary Universe, Sept. 1956 ; Webstger, Adrian, The Cosmic Background Radiation, Aug, 1974 ; Bok, Bart J. , A National Radio Observatory, Oct. 1956, and The Milky Way Galaxy, March 1981 ; Whipple, Fred M. , The Dust Cloud Hypothesis, May 1948 ; Sagan, Carl and Drake, Frank, The Search for Extraterrestrial Intelligence, May 1975 ; Osmer, Patrick S. , Quasars as Probes of the Early and Distant Universe, Feb. 1982 ; Guth, Alan H. and Steinhardt, Paul J. , The Inflationary Universe, May 1984 ; Green Michael B. , Superstrings, Sept. 1986.

CHAPTER 5

Thompson, D Arcy, On Growth and Form, Cambridge University Press, Cambridge, [1917]1959, asked the questions central to the century's work. Schrödinger, Erwin, What Is Life?, Cambridge University Press, 1944, asks the naïve physicist's question. Margulis, Lynn, Symbiosis in Cell Evolution, W. H. Freeman and Co. , New York, makes a breakthrough. De Duve, Christian, Vital Dust, Basic Books, New York, 1995, and Shapiro, Robert, Origins : A Skeptics Guide to the Origin of Life, Summit Books, New York, 1986, and Morowitz, Harold J. , Beginnings of Cellular Life, Yale University Press, New Haven, 1992, open that question.

In SCIENTIFIC AMERICAN : Brachet, Jean, et al. , The Living Cell, a single-topic issue Sept. 1961 ; Lewontin, Richard C. , Adaptation, Sept. 1978 ; Dobzhansky, Theodosius, The Genetic Basis of Evolution, Jan. 1950 ; Muller, Herman J. , Radiation and Human

Mutation, Nov. 1955 ; Mazia, Daniel, The Cell Cycle, Jan. 1974 ; Crick, Francis H. C. , The Structure of the Hereditary Material, Oct. 1954 ; Mirsky, Alfred, The Chemistry of Heredity, Feb. 1953 , and The Discovery of DNA, June 1968 ; Gamow, George, Information Transfer in the Living Cell, Oct. 1955 ; Fränkel-Conrat, Heinz, Rebuilding a Virus, June 1956 ; Stein, William H. and Moore, Stanford, Chromatography, March 1951 ; Pauling, Linus, et al. , The Structure of Protein Molecules, July 1954 ; Kendrew, John, The Three-Dimensional Structure of a Protein Molecule, Dec. 1961 ; Cech, Thomas, RNA as an Enzyme, Nov. 1986 ; Lodish, Harvey, et al. , The Assmby of Cell Membranes, Jan. 1979 ; Szent-György, Albert, Muscle Research, June 1949 ; Green, David E. , The Mitochondrion, Jan. 1964 ; Arnon, Daniel, The Role of Light in Photosynthesis, Nov. 1969 ; Gehring, Walter, The Molecular Basis of Development, Oct. 1985 ; Wald, George, The Origin of Life, Aug. 1954 ; Mayr, Ernst, et al. , Evolution, a single-topic issue, Sept. 1978 ; Margulis, Lynn, Symbiosis in Evolution, Jan. 1969 ; Woese, Carl R. , Archaeobacteria, June 1981.

CHAPTER 6

Cloud, Preston, Oasis in Space, W. W. Norton & Co. , New York, 1988, and Schopf, J. William, et al. , Earth's Earliest Biosphere, Princeton University Press, Princeton, 1993, and Stanley, Steven M. , Earth and Life Through Time, W. H. Freeman and Co. , New York, 1982, together recount the realization of the vision of Vernadsky, V. I. in, among other sources, The Biosphere and the Noosphere, American Scientist, Jan. 1945. Simpson, George Gaylord, The Meaning of Evolution, Yale University Press, New Haven, 1952,

states the “modern synthesis. ”

In SCIENTIFIC AMERICAN : Hutchinson, G. Evelyn, The Biosphere, a single-topic issue, Sept. 1970 ; Wilson, J. Tuzo, Continental Drift, April 1963 ; Dewey, John E. , Plate Tectonics, May 1972 ; Dietz, Robert S. and Holden John C. , The Breakup of Pangea, Oct. 1970 ; Eiseley, Loren C. , Charles Lyell, Aug. 1959, and Charles Darwin, Feb. 1956 ; Darlington, C. E. , The Origin of Darwinism, May 1959 ; Siever, Raymond et al. , The Dynamic Earth, a single-topic issue, Sept. 1983 ; Hurley, P. M. , Radioisotopes and Time, Aug 1949 and The Confirmation of Continental Drift, Apr. 1968 ; Runcorn, S. K. , The Earth s Magnetism, Sept. 1955 ; Orowan, Egon, The Origin of the Ocean Ridges, Nov. 1969 ; McMenamin, Mark A. S. , The Emergence of Animals, Apr. 1987 ; Morris, Simon Conway and Whittington, H. B. , The Animals of the Burgess Shale, July 1979.

CHAPTER 7

Whitehead, Alfred North, in From Force to Persuasion in Adventures in Ideas, The Free Press, New York, 1968, and Keynes, John Maynard, in Economic Possibilities for our Grandchildren in Essays in Persuasion, W. W. Norton, New York, 1963, describe “the normal mode of society” and the possibility of a different one. Chesnais, Jean-Claude, The Demographic Transition, Clarendon Press, Oxford, 1992, derives the new principle of population. Bronowski, Jacob, in Science and Human Values, Harper and Row, New York, 1965, makes the case for rescission of the Victorian Compromise [see page 324]. U. N. Conference on Environment and Development, Agenda

21 sets the goal for the 21st century, and U. N. Development Program, Human Development Report 2000, and U. N. Conference on Trade and Development, World Investment Report 2000, all available at United Nations, New York, and show where the world is now. Rothschild, Emma, *Economic Sentiments* : Smith, Condorcet and the Enlightenment, Harvard University Press, Cambridge, 2001, recalls the origin of the science of economics in moral philosophy.

In *SCIENTIFIC AMERICAN* : Eiseley, Loren C. , Alfred Russel Wallace. Feb. 1959 ; Stolarski, Richard A. , The Antarctic Ozone Hole, Jan. 1988 ; Washburn, Sherwood, Tools and Human Evolution, Sept. 1960 ; Leakey, L. S. B. , Olduvai Gorge, Jan. 1954 ; Leakey, Richard E. and Walker Alan, The Hominids of East Turkana, Aug. 1978 ; Howells, William, Homo Erectus, Nov. 1966 ; Devey, The Human Population, Sept. 1960 ; Bickerton, Derek, Creole Languages, July 1983 ; Leroi-Gourhan, Arlette, The Archeology of Lascaux Cave, June 1982 ; Bosch, Perter W. , A Neolithic Flint Mine, June 1979 ; Zvelebil, Marek, Postglacial Foraging in the Forests of Europe, May 1986 ; Moore, Andrew M. T. , A Pre-Neolithic Farmers Village on the Euphrates, Aug. 1979 ; Kramer, Samuel Noah, The Sumerians, Oct. 1957 ; Gamkrelidze, Thomas V. and Ivanov, V. V. , The Early History of the Indo-Europe Languages, March 1990 ; Higham, C. C. W. , Prehistoric Rice Cultivation in Southeast Asia, April 1984 ; Lattimore, Owen, Chingis Khan and the Mongol Conquests, Aug. 1963 ; Mangelsdorf, Paul, The Mystery of Corn, July 1950 ; MacNeish, Richard S. , The Origin of New World Civilization, Nov. 1964 ; Millon, René, Teotihuacan, June 1967 ; Coe, Michael D, The Chinampas of Mexico, July 1964 ; Hammond,

Norman, The Emergence of Maya Civilization, Aug. 1986 ; Protzen, Jean-Pierre, Inca Stone Masonry, Jan. 1986 ; von Hagen, Victor W. , America s Oldest Roads, July 1952 ; Langer, William L. , The Black Death, Feb. 1964 ; Ferguson, Eugene S. , The Origins of the Steam Engine, Jan. 1964 ; Ritchie-Calder, Lord, The Lunar Society of Birmingham, June 1982 ; Leontief, W.W. , The Distribution of Work and Income, Sept. 1982.

致 谢

我感谢那些在我最后的注释中引用的文献的作者,在《科学美国人》杂志中发表了他们这么多的文章,我们感到特别的荣幸。我也要感谢那些没有被引用的文章的作者,他们的工作也同样参与构筑了 20 世纪科学大厦,并且也同样教育了广大读者。我和我的同事们在组织和发行杂志方面感谢曾经帮助过我们的人们,他们中主要是丹尼斯·弗拉纳根(Dennis Flanagan)和已故的唐纳德·小米勒(Donald H. Miller Jr.)。对于那些对杂志作出贡献的人们,我怀着激动和感谢的心情怀念已故的切斯特(K. Chester)、詹姆斯·纽曼(James R. Newman)、爱德华·罗森包姆·(Edward P. Rosenbaum)、斯东(C. L. Stong)和列奥·斯维斯基(Leon Svirsky)。我很高兴能向健在的马丁·加德纳(Martin Gardner)和菲利普·莫里森(Philip Morrison)表示我的感谢,感谢他们和我共同创办了有特色的杂志;还要感谢我的儿子乔纳森(Jonathan),他在我退休后支持了杂志。那些对这本书的手稿从 360 度全方位批评和理解的读者,我姑隐其名,免得尴尬。我感谢并希望他们发现我会把问题弄清楚。

我感谢彼得·布拉德福(Peter Bradford)设计了这本书的版面,他绘制的有关事物之间的关系和概念的图解弥补了文字的单调乏味。还要感谢约书亚·帕塞(Joshua Passe),彼得的左右手,他正确无误地将各页内容组合起来。

现在,在 35 年之后,我要对这本书的“the onlie begetter”^①西蒙·迈克尔·贝西(Simon Michael Bessie)说,谢谢你的坚持。

我把这本书奉献给菲利浦·莫里森,出于我对他的赞美:他是我在这里想要说明的体现科学的美学和人道的价值的科学家—公民的模范。

^① 译注:意为“唯一的促成者”(The only begetter)。源出莎士比亚十四行诗。

译 后 记

“万物怎样来自无？万物又怎样发展到会思考无？”这是本书作者杰拉德·皮尔在本书的第一章开头写的两句话。这两句话概括了本书的叙述思路。皮尔在这本书中总结了 20 世纪中人类在探索宇宙和物质的产生和演化，研究地球上生物和人类的出现和进化，以及人类的过去和未来等方面所学到的知识、获得的成果。书中关于宇宙演化、地球历史和生物进化是按编年史的体例，一步一步展现在读者面前。作者在最后一章中还谈到人类文明的起源和当前的人口问题。这不仅是一本有关科学史的大众读物，也是一本自然史和自然哲学的通俗读物。

自从人类发展到一定阶段，大约 10 万年前或更早的时候，就开始有意识地研究经验所及的世界的运动变化规律，探讨宇宙的本源。企图解答：宇宙是从哪里来的？宇宙为什么是现在这个样子？人类又是从哪里来的？等等问题。到 20 世纪，人们借助于经验科学，对这些问题的认识前进了一大步。但是，也发现还有更多的、更深奥的问题等待着我们去研究。探索是无止境的，这些问题恐怕没有最终的答案。

本书作者不是科学家，所以他在描述科学问题的具体细节上有时会出现不确切甚至是错误的表述。例如，他分不清力和能量的单位。但是在整体水平上，这本书确有它独特之处。本书涉及的科学内容的广度和作者观察问题的角度往往是专业的科学家

所缺少的。每一位科学家都是某一领域内的专门家,如一位科学家能在少数几个领域内有深入的研究就很不容易了。他们对于他们不熟悉的大部分学科也和一般人一样是门外汉。皮尔曾担任《科学美国人》杂志的发行和编辑近40年,由于他的职业地位,他能接触到各个研究领域内许多当代最卓越的科学家,了解他们的尖端研究成果。皮尔的科学知识之广泛确实是大多数科学家所远远不及的。他的广泛的科学知识在一定程度上补偿了他的科学知识深度不足的缺陷,并且还使他不受过分狭隘的专业所束缚,能够放眼在总体的水平上观察科学的发展。也是由于他作为杂志编辑的职业,他对于科学和社会的关系、科学和政府的政策的相互作用的见解往往也是专业的科学家很少有的。皮尔所著的《科学时代》一书不仅可以介绍给广大公众,也值得推荐给有造诣的科学家们一读。

在书的第七章的最后几节,皮尔讨论了世界人口问题 and 经济问题。他以为可以依靠联合国,通过工业国对经济落后的国家进行经济援助和贸易,最后能够解决贫穷和人口爆炸问题。但是,人人都看到,当今世界上战火不断,艾滋病和多种恶性传染病还没有得到有效控制。战争、疾病、愚昧和贫穷总是紧密联系着。科学和技术的发展非但没有缩小世界上的贫富差距,反而加大了这种差距。虽然,皮尔在本书开始就讲到原子弹以及科学家们对滥用原子弹的忧虑。但是,总的说来他对科学技术的发达给人类带来的负面作用谈论较少。他几乎没有谈到由于科学技术的发展而造成的地球环境恶化的问题。生物的蓬勃发展造成了地球上的生物圈,彻底改变了地球表面的环境,生物在这环境中发展进化到人类。科学发达造成了人口不断增加,人类正在逐渐占领所有地球表面,排挤其他物种。人类还在不可逆地消耗和浪费地球资源,破坏人类赖以生存的环境,其后果是加速人类自身的绝灭。正是:“机关算尽太聪明,反误了卿卿性命。”

20 世纪,作为具有最高智慧的生物的人类,除了对周围的世界的认识已有了很大的进步外,对人类自己身体的认识也有了极大的进步。医学的发达、死亡率的降低就是最好的证明。人类不仅要揭露生命之谜,这在本书中已有详细的叙述,人类还要进一步揭露精神世界之谜,这在本书中谈得十分肤浅。20 世纪中,关于脑和精神世界的研究也取得了可喜的成果。心理学已经成为一门科学,脑和神经科学方面也有重大的进展。21 世纪,脑科学和精神世界的研究将成为最重要的研究方向之一。人类就是用我们的大脑来认识宇宙,这是因为人类具有高度的智慧,有发达的大脑。但是,大脑是怎样认识周围世界,怎样产生思想的?这又引起了我们极大的兴趣。但在这个问题上我们将遇到更大的困难。在我们把自己作为主体来认识世界的时候,我们是把自己当作超出宇宙和物质之外的观察者,这是一个很好的近似。人把自己假设为上帝,从宇宙之外客观地描述宇宙和宇宙的变化。而当我们用我们的智慧研究我们自己的精神世界的时候,研究的主体和被研究的对象无法截然分开。只有当我们真正认识了我们自己的精神世界才真正认识了自己。因为人之所以区别于其他动物,高于其他生物正是在于人的高度智慧,有了高度的智慧,人类就能够认识世界。由于人类具有强烈的好奇心、有强烈的求知欲,要满足精神世界的要求,人类才孜孜不倦地探索大自然的奥秘,才会有今天的科学。20 世纪的科学已经发生了重大的变化。21 世纪,科学应该向着有利于将我们的地球造就成适合于万物生长、共同繁荣,清洁平和的环境的方向发展。让我们认真思考和努力探索吧!

译者

2004 年 10 月