第二推动丛书

可怕的对称

现代物理学中美的探索



[美] 阿·热著

苟坤、劳玉军 译

可爱的对称

●第一推动丛书●

[美]阿·热著 荀坤 劳玉军译

湖南科学技术出版社

湘新登字004号

可 怕 的 对 称

——探索现代物理学中的美

〔美〕阿·热著

荀坤 劳玉军译

责任编辑：李永平

*

湖南科学技术出版社出版发行

（长沙市展览馆路3号）

湖南省新华书店经销 湖南省新华印刷二厂印刷

*

1992年2月第1版 1996年1月第6次印刷

开本：850×1168毫米 1/32 印张：10.5 插页：4 字数：272.000

印数：28.001—38.000

ISBN 7—5357—1063—8

N·23 定价：9.80元

老虎！老虎！燃烧的火焰，
游荡在那黑夜的林莽，
什么样超凡的手和眼
才能铸造你这可怕的匀称？

——威廉·布莱克

总　序

科学，特别是自然科学，最重要的目标之一，就是追寻科学本身的原动力，或曰追寻其第一推动。同时，科学的这种追求精神本身，又成为社会发展和人类进步的一种最基本的推动。

科学总是寻求发现和了解客观世界的新现象，研究和掌握新规律，总是在不懈地追求真理。科学是认真的、严谨的、实事求是的，同时，科学又是创造的。科学的最基本态度之一就是疑问，科学的最基本精神之一就是批判。

的确，科学活动，特别是自然科学活动，比较起其他的人类活动来，其最基本特征就是不断进步。哪怕在其他方面倒退的时候，科学却总是进步着，即使是缓慢而艰难的进步。这表明，自然科学活动中包含着人类的最进步因

素。

正是在这个意义上，科学堪称为人类进步的“第一推动”。

科学教育，特别是自然科学的教育，是提高人们素质的重要因素，是现代教育的一个核心。科学教育不仅使人获得生活和工作所需的知识和技能，更重要的是使人获得科学思想、科学精神、科学态度以及科学方法的熏陶和培养，使人获得非生物本能的智慧，获得非与生俱来的灵魂。可以这样说，没有科学的“教育”，只是培养信仰，而不是教育。没有受过科学教育的人，只能称为受过训练，而非受过教育。

正是在这个意义上，科学堪称为使人进化为现代人的“第一推动”。

近百年来，无数仁人智士意识到，强国富民再造中国离不开科学技术，他们为摆脱愚昧与无知作了艰苦卓绝的奋斗，中国的科学先贤们代代相传，不遗余力地为中国的进步献身于科学启蒙运动，以图完成国人的强国梦。然而应该说，这个目标远未达到。今日的中国需要新的科学启蒙，需要现代科学教育。只有全社会的人具备较高的科学素质，以科学的精神和思想、科学的态度和方法作为探讨和解决各类问题的共同基础和出发点，社会才能更好地向前发展和进步。因此，中国的进步离不开科学，是毋庸置疑的。

正是在这个意义上，似乎可以说，科学已被公认是中国进步所必不可少的推动。

然而，这并不意味着，科学的精神也同样地被公认和

接受。虽然，科学已渗透到社会的各个领域和层面，科学的价值和地位也更高了。但是，毋庸讳言，在一定的范围内，或某些特定时候，人们只是承认“科学是有用的”，只停留在对科学所带来的后果的接受和承认，而不是对科学的原动力，科学的精神的接受和承认。此种现象的存在也是不能忽视的。

科学的精神之一，是它自身就是自身的“第一推动”。也就是说，科学活动在原则上是不隶属于服务于神学的，不隶属于服务于儒学的，科学活动在原则上也不隶属于服务于任何哲学的。科学是超越宗教差别的，超越民族差别的，超越党派差别的，超越文化的地域差别的，科学是普适的、独立的，它自身就是自身的主宰。

湖南科学技术出版社精选了一批关于科学思想和科学精神的世界名著，请有关学者译成中文出版，其目的就是为了传播科学的精神，科学的思想，特别是自然科学的精神和思想，从而起到倡导科学精神，推动科技发展，对全民进行新的科学启蒙和科学教育的作用，为中国的进步作一点推动。丛书定名为《第一推动》，当然并非说其中每一册都是第一推动，但是可以肯定，蕴含在每一册中的科学的内容、观点、思想和精神，都会使你或多或少地更接近第一推动，或多或少地发现，自身如何成为自身的主宰。

《第一推动》丛书编委会

目　录

前　言……（1）
致　谢……（4）

I　对称与设计……（7）
　第一章　对美的追求……（9）
　第二章　对称与简单……（14）
　第三章　镜中的世界……（28）

I　爱因斯坦的遗产……（57）
　第四章　时间与空间的联姻……（59）
　第五章　幸福的思想……（84）
　第六章　对称性统治设计……（103）

I　光环中的明星……（109）
　第七章　作用量……（111）

第八章 女士与虎…… (121)
第九章 学会去读这本伟大的书…… (131)
第十章 对称性的凯旋…… (142)

N 了解他的思想…… (159)
第十一章 夜晚森林中的八重路…… (161)
第十二章 艺术的回报…… (194)
第十三章 终极设计问题…… (219)
第十四章 力的统一…… (238)
第十五章 微气中生…… (265)
第十六章 造物主的精神…… (285)

第九章附录…… (294)
注释…… (297)

前　言

在《可怕的对称》中，我想讨论的是给20世纪物理学带来活力的美学动机。我的兴趣不在于解释现代物理的实际内容，而是要带给读者一种理性框架的概念，基础物理正是运行于此框架中。

阿尔伯特·爱因斯坦曾经说过，“我想知道上帝是如何创造这个世界的。对这个或那个现象、这个或那个元素的谱我并不感兴趣。我想知道的是他的思想，其它的都只是细节问题。”

作为一名物理学家，我非常醉心于爱因斯坦所表述的这种感受。正当当代绝大多数物理学家忙于解释特定现象之际，少数爱因斯坦的理性的后继者却变得更加雄心勃勃了。他们进入了夜幕笼罩着的森林，探寻着自然的基本设计，并且狂傲不羁地宣称，已经发现了一些蛛丝蚂迹。

引导这一探索工作的是这两大原理：对称性和重整化。重整化是关于具有不同特征长度的物理过程间的相互联系的。尽管也会谈到重整化，但我的重点将放在基础物理学家用以审视大自然的统一美学观点——对称性上。

在过去几年中，人们对现代物理学的兴趣不断增长，介绍“新”物理学的著述甚丰。现在，我们大都知道存在着数以百亿计的星系，每个星系中又包含有数以百亿计的恒星。我们被告知，世界可用亚核粒子的说法去解释，大多数这种粒子的寿命只有百亿亿分之一秒。知道了这些的读者会觉得惊讶和迷惑，是的，现代物理的世界古怪得让人赞叹！那些用希腊字母命名的粒子无视经典的决定论，合着量子的音乐跳起了吉特巴舞。但最终，读者可能还是会带着一种只被简单地灌输事实的感受离去，这些事实本该是让人惊叹的，但却变得让人厌倦了。

本书是为那些并不满足于了解事实而在理性上也有好奇心的读者写的。我想象中的读者可能是：某个我年轻时认识的人，某个建筑师、艺术家、舞蹈家、股票经纪人、生物学家或律师，某个对基础物理学家所置身的理性和美学框架感兴趣的人。

这并不意味着本书不解释现代物理的惊人发现。在能够对现代物理学的理性框架作有意义的讨论之前，我必须对这些发现作出解释。然而，我希望读者不要仅仅满足于与某种令人吃惊的事实做点头之交，也要有框架的观念，离开这种框架，事实也只不过是事实。

我并不试图详尽地、面面俱到地描述对称性在物理学中的历史。任何把主要进展归功于少数个人的看法都

不能称之为历史，任何夸大个人作用的断言都绝对不能接受。在谈到现代粒子物理的某些进展时，杰出的物理学家谢利·格拉肖（Shelly Glashow）曾经评论说："花毯是许多工匠共同织出的，每个工人的贡献都不能从整个作品中分辨出来，那些松散、错乱的织线已经被掩盖住了。粒子物理中的情况也是如此……'标准理论'并不是完美地出现在一个，甚至也不是三个物理学家头脑中的，它同样是许多实验和理论物理学家共同努力的结果。"然而，在象本书这样的通俗读物中我只得简化历史。我相信读者能够理解。

——于圣塔·巴巴拉

1986年4月

致　谢

首先，我要感谢我的妻子格里琴（Gretchen）。她的尖锐批评以及她的爱所给予的支持是我能完成此书的基本保证。她是我的第一个读者和严格的批评者，只要她说："这我看不懂！"，我就得回去重写。

我的朋友基蒙·比勒(Kim Beeler)，克里斯·格罗斯贝克（Chris Groesbeck），马萨（Martha），弗兰克·里特曼(Frank Retman)，迪安·舒福特(Diane Shuford)——一个心理学家，一个学艺术史的学生，一个律师和两个建筑师，分别读了手稿的各个部分，以确保外行人也能读懂此书。

已经发表过物理方面通俗读物的两个有名望的同事赫恩茨·帕杰斯(Heinz Pagels)和史蒂夫·温伯格(Steve Weinberg)，都鼓励我不要放弃写一本关于对称性的书的想法。在写作和发表的各个方面他们都给了我不少的忠告，并将我引荐给了他们在出版界的朋友。

我要感谢李政道、赫恩茨·帕杰斯和史蒂夫·温伯格。他们阅读了本书的手稿并提出了有益的和鼓励性的意见。我还要感谢西德尼·科尔曼(Sidney Coleman)、弗兰克·威尔茨克(Frank Wilezek)读了本书第十二章，默里·盖尔曼(Murray Gell-Mann)读了第十一章，比尔·别勒克(Bill Bialek)读了长条校样。

我有幸能有查尔斯·利文(Chasles Levine)作本书的编辑，他的支持对本书的出版是必不可少的。在我需要保证时他使我放心，在我需要批评时他便向我提意见。渐渐地，我就把他当成了自己的朋友。

编辑凯瑟琳·肖(Catherine Shaw)显然也干得不错，因为为了解答她所提出的问题，我不得不花近2个月的时间来作改写。在读不懂时她就叫到："这我不懂!"结果是，这本书变得越来越容易读了。抄誊编辑罗伯塔·弗罗斯特(Robesta Frost)对手稿作了进一步的加工和润色。

在该工作的早期，马丁·克斯勒(Mastin Kessler)提过很有益的建议。

我的代理人约翰·布洛克曼(John Brockman)和卡汀卡·马聪(Katinka Matson)的劝告也使我受益匪浅。

后面所列出的艺术家们使本书在视觉上更有吸引力，在表达上也更清楚。

我非常高兴有海伦·米尔斯(Helen Mills)来作本书的设计指导。我们在第十二章将会遇见他的兄弟罗伯特(Robert)。看来在一个家庭中也会倾向于有某种平衡和对称。

最后，我要感谢德布拉·维特莫娅(Debra Witmoyer)，丽莎·洛佩兹(Lisa Lopez)，格温·卡特农

(Gwen Cattron)、凯蒂·多里穆丝 (Katie Doremus)、卡伦·墨菲 (Karen Murphy) 和克雷夏·沃诺克 (Kresha Warnock) 打印了手稿的各个部分。

插图作者

波尼·布莱特 (Bonnie Bright)，图 3.4、5.2、6.3、7.2、7.3、7.4、10.2、10.3、11.1、11.3、12.1、12.2、12.3、14.2、15.2。

迈克尔·卡伦 (Michael Cullen)，图 3.5、3.9、9.1、11.7、13.2、14.1、14.4。

黄纪军 (Ji-jun Huang)，图 15.1。

埃里克·加恩克 (Eric Junker)，图 5.1、5.3、5.4。

乔·卡尔 (Joe karl)，图 2.1、2.3、4.2。

佩吉·罗伊斯脱 (Peggy Royster)，图 4.3、13.1。

克拉拉·韦斯 (Clara Weis)，图 4.1。

格里琴·热 (Gretchen Zee)，图 2.2、7.1、9.2、10.1。

I

对称与设计

第一章　对美的追求

我记得最清楚的是，当我提出一个自认为有道理的设想时，爱因斯坦并不与我争辩，而只是说，“啊，多丑！”。只要觉得一个方程是丑的，他就对之完全失去兴趣，并且不能理解为什么还会有人愿在上面花这么多的时间。他深信，美是探求理论物理学中重要结果的一个指导原则。

——H. 邦迪（Bondi）

美先于真

我和我在基础物理学界的同事们是爱因斯坦的理性的后继人，乐于自认为我们是在探求美。有些物理方程丑得让人不愿多看一眼，更不用说把它们写下来了。毫无疑问，终极设计者只会用美的方程来设计这个宇宙！我们宣称，如果有两个都可用来描述自然的方程，我们总要选择能激起我们的审美感受的那一个。

“让我们先来关心美吧，真用不着我们操心！”这就是基础物理学家们的呼声。

读者也许会把物理看成一个具有精确预言性，而不适于审美沉思的科学。其实，审美事实上已经成了当代物理学的驱动力。物理学家已经发现了某些奇妙的东西：大自然在最基础的水平上是按美来设计的。我希望与你们分享的正是这种奇妙的感受。

训练我们的双眼

什么是美？冥思苦想美学的含意的哲学家们已写出了不少大部头的著作，但审美价值的绝对定义依然含混不清。就某一事物而言，时尚也在变化，鲁本斯的优雅的太太们就不再能为杂志封面增辉了。审美观也因文化而异，东西方的风景画各自受不同传统的影响。布拉门托（Bramante）和贝聿铭的建筑各自以不同的风格体现了美。既然在人类创作界对美并没有一个客观的标准，我们在谈论自然之美时究竟要采用的是什么美学体系呢？我们怎样去判断自然的设计呢？

在本书中，我希望解释当代物理学的审美要求如何建立起了一个能用公式严格表达出的美学体系。就象我的艺术史教授曾经说过的那样，一个人必须“训练他的双眼”。对于建筑鉴赏家来说，指导文艺复兴时期的建筑和指导后现代派建筑的都是同一个原理。同样地，物理学家也必须训练他们的眼力，以看出指导自然设计的普遍原理。

内在美和外在美

当我在海边（或更可能在贝壳商店）发现一个鹦鹉螺时，它的美吸引了我。但一个生物学家可能会告诉我，这种完美的螺旋形状只不过是贝壳生长速率不等的结果。作为一个人，知道这以后也丝毫不会减少我对美丽的鹦鹉螺的迷恋，但作为一名物理学

家，我被驱使去超越我们所能见到的外在美。我想讨论的并不是翻卷的波浪的美，也不是弓伏在苍天的彩虹的美，而是存在于最终支配着各种形态下水的行为的物理学定律中的更深沉的美。

如果我是设计者

对自然的考察越深入，她就越显得美，这一深刻的事实深深地震慑了自爱因斯坦以来的物理学家。为什么会是这样呢？我们完全可以发现自己是生活在一个丑陋的宇宙中，生活在一个正如爱因斯坦所说的“无论如何思考都无法领悟的混沌世界”中。

沿着这样的思[illegible]学家心底的那种宗教情感。在判断一个[illegible]论是否合适时，爱因斯坦会问，如果我[illegible]式来创造宇宙吗？对基础设计的这一信[illegible]家。

音乐和歌词

物理学通俗读物的作者们常常向我们介绍的是特定的物理现象，他们往往是用现代物理学的奇妙的发现来打动读者。而我更感兴趣的是传递当代物理学的理性和审美框架的观念。让我们来看一看歌剧，歌剧迷们很喜欢图兰多特（Turandot），但主要并不是因为它的歌词，这个荒唐的故事是因普契尼的音乐才风行起来的。另一方面，如果对故事情节一无所知、甚或只听其管弦乐部分，要把一出歌剧听完也是相当困难的。音乐和歌词是相互补充的。

同样，大量物理现象（歌词）如果不是放到当代物理学的美学框架（音乐）中去谈论的话，也将会是枯燥的，而且也无特别的启发性。我打算给读者听现代物理的音乐，即指导物理学家的审美要求。但是，就象去掉声乐部分歌剧就会变得毫无意义一样，不涉及特定物理现象的美学讨论也不会有什么效果。因而我也得





图 1·1 （上）葛饰北斋（1760—1849）“从神奈川看富士山。”
（下）雪花的显微照片。
在不同层次上水所表现出的美。

把物理学的歌词过一遍。不过，说到底必须承认，不论是作为一名基础物理学家还是作为一名歌剧爱好者，我都更偏爱音乐而不是歌词。

地方法规与宪法原则

在一些物理书中，被滥用的“物理定律”一词的含意肯定被误解了。在民法中，人们要区分地方法规和宪法原则。在物理学中也一样，有必要区分这样那样的定律。例如胡克定律，它表明拉伸一个金属弹簧所需的力正比于弹簧被拉伸的量。这是一个唯象学定律的例子，是观察到的经验规律的一个简单陈述。在本世纪30年代，金属理论问世了，胡克定律就可用金属中原子间的电磁相互作用来解释。胡克定律只针对一个特定的现象，而对支配电磁学的基本定律的理解则可使我们能够解释各种迷惑人的现象。

在中学学到象胡克定律一类的东西时，我得到这样一个印象：物理学家们试图找到尽可能多的定律去解释物理世界中所观察到的每一现象。其实，事实正好相反，我和我在基础物理学界的同事们是正在朝使定律尽可能少的方向努力。基础物理学家的雄心是，用单个基本定律去取代大量的唯象学定律，以达到对自然的统一描述。这种对统一的向往就是《可怕的对称》的中心主题。

第二章　对称与简单

我想知道上帝是如何创造这个世界的。对这个或那个现象、这个或那个元素的谱我并不感兴趣。我想知道的是他的思想，其它的都只是细节问题。”

——A. 爱因斯坦

自然一瞥

假定一个建筑师醒来后发现自己被关进了一个陌生的房间里。他冲向窗口，向外看去；这里瞥见一座塔楼，那里瞥见一个立柱；显然，他被困在了一个宏伟的大厦内。不久，对职业的迷恋就战胜了恐惧，所能看到的都是这样的美，他被迷住了；同时也感觉到了一种挑战，他要从所能见到的东西出发去推出这个大厦的基本设计！这个大厦的设计者会是一个要把复杂的东西堆积在一起的狂人吗?他会不讲韵律或不问原由地在这里建一个侧厅，那里竖一堵山墙吗？他会是一个平庸的建筑师吗？这个被囚禁的

建筑师心中怀有这样一个难于言明的信念，那就是，这个世界上第一流的建筑师基于简单和统一的原则设计了这个大厦。

我们也是一样，醒来后发现自己处于一个陌生而美丽的宇宙中。那些辉煌和丰富的物理现象总使我们惊讶不已。随着物理学的进步，物理学家们发现，现象的不同并不要求解释的不同。到了这个世纪，物理学家的野心变得更大了。他们目睹了从不停歇的量子舞蹈，窥视到了空间和时间的永恒秘密，已不再满足于解释这个或那个现象。自然的基本设计是美的和简单的这一信念已经深入物理学家们的骨髓。自爱因斯坦以来，对世界最终可用美和简单来理解的这种信念一直支持着他们。

基础物理学的进步是突发式的。理解是在缓慢积累的基础上突然生成的，而整个领域的景色将因新的理解而焕然一新。本世纪 20 年代量子力学的创立就是一个很好的例子。1971 后的若干年大概也可称得上是狂热创造力的一次爆发，由此产生了对自然的更深刻的理解。在振奋和极端自负的情绪中，一些物理学家甚至提出已经瞥见了自然的终极设计。对这种说法我们将作考察。

这一瞥暴露了这样一个惊人的事实：自然的基本设计表现出简单的美。爱因斯坦是对的。

朴素的美

“美”一词被赋予了一定的内涵。在日常生活中，我们对美的感受是依赖于心理、文化、社会甚至常常是生理等因素的。物理学显然不会关心这一类的美。

自然在她的定律中向物理学家展示的美是一种设计美。因强调几何对称，这种美在一定程度上使我们想到了古典建筑。物理学家在审视自然时所用的美学体系也是从这种朴素的几何确定性中吸取精髓的。请在纸上画出一个圆，一个正方形和一个矩形。快，哪一个图形更能使你愉悦？按古希腊人的观点，多数人大概会选择圆。当然，正方形、甚至矩形也不会没有热忱的崇拜者。但存

在一个客观的判据，它按圆、正方形、矩形的次序来排定三种图形的名次，按此次序：圆具有更高的对称性。

或许我不该问哪一个图形更美，而该问哪一个图形的对称性更高。但是，按古希腊人对球形以及它们所构成的天体的完美性的雄辩论述，我还是要继续将对称等同于美。

对称性的精确数学定义涉及到不变性的概念。如果一个几何图形在某些操作下保持不变，就说这个图形在这些操作之下具有不变性。例如，圆在绕它的中心旋转时是不变的。作为一个抽象实体，不管我们把它转17°还是转其它角度，这个圆都不会变。而正方形就不一样，只有绕它的中心转90°、180°、270°和360°时（考虑对几何图形的影响时，转360°和转0°或不转是等价的）才保持不变。矩形的对称性比正方形的还要低，只有绕它的中心转180°和360°时才保持不变。

除旋转以外，反射也能使这三个简单的几何图形保持不变。同样还是圆的对称性更高，对所有过圆心的直线的反射它都保持不变。

另外还有一种对物理学来说更方便的描述对称性的等价方法。这种描述方法不再去旋转一个几何图形，而是问同一个几何图形在两个相互旋转了一定角度的观察者看来是否一样。显然，如果我把头转过17°正方形就偏了，但圆依然保持不变。

河狸的课程

你把它放进锯末里煮；
你把它放进胶液里腌；
你把它和蝗虫一起放到烈酒里泡；
但千万不要忘记——
要保持它对称的形状。

——刘易斯·卡罗尔（Lewis Carrol）

“河狸的课程”，选自“The Huvating of the Snask.”

在几何学中，要问一个几何体在什么操作下保持不变是完全不成问题的，但物理学并不是处理几何图形的。那么，对称性是怎样进到物理学中的呢？

象几何学家一样，物理学家可能会问，在不改变物理现实的前提下我们能对它“做”些什么呢？这样提问题显然不很恰当，但它提出的确实是物理学的一个基本问题：处于不同观察位置的物理学家眼中的物理现实是一样的吗？

来看一下这样两个物理学家，其中的一个由于某种原因，总是把头偏离竖直方向 31°来看这个世界，另一个则和常人一样。经过几年的研究，这两个物理学家分别将他们的观察结果总结在几个物理定律之中，最后来对比他们的结果。如果他们的定律是一



图 2.1　一个艺术家眼中的“河狸的课程”。

致的，我们就说物理定律在转过 31°之后是保持不变的。现在，那个古怪的物理学家再把头偏到其它方向，重新开始他的研究。最终，这两个物理学家会作出这样的猜测，不管视点偏离多少角度，他们的结果总会一致。今天的物理学家已经相信，在任何角度的转动下物理定律都将保持不变。因此，我们说物理定律具有旋转

对称性。

旋转对称

历史上，物理学家最早意识到的是与我们实际所生活的空间有关的旋转和反射对称性。在下一章，我将向你们讲述有关反射对称的奇特故事。作为一个特别简单和直观上可接近的物理对称的例子，这里我要讨论旋转对称性。

我已经给旋转对称下了一个有些长但精确的定义：即，在旋

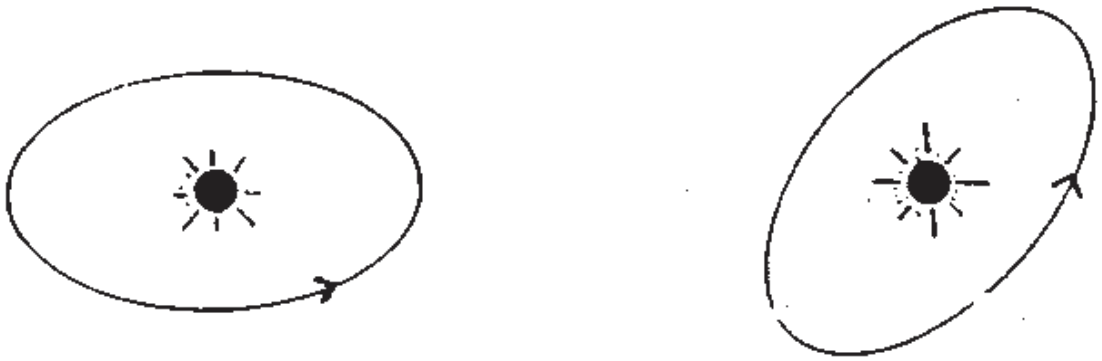


图 2.2 在经典物理中，旋转对称仅仅告诉我们，将一个行星系转过任意角度得到的轨道也是一个可能的轨道。而古希腊人却错误地认为，旋转对称意味着轨道是圆形的。

转我们的视点时，物理现实 保持不变。对旋转对称所作的定义在理性上的明晰性，对使我们免于重犯古希腊人所犯的错误是必要的。我可以简单地说物理现实是完美的，就象一个圆或一个球一样。确实，这个含混但醒目的陈述或多或少地带有意解古人原意的味道，而正是这种陈述引导他们得出了行星轨道必须是圆形的这样一个错误结论。旋转对称的正确定义根本不要求行星的轨道一定得是圆形的。

显然，说物理学具有旋转对称性，是指它在空间并无特别的取向。对具有现代意识，特别是看过星际战争电影的人来说，没有一个方向具有相对于其它方向的内在优越性这一说法，几乎成了哲学上必然的东西。要指着某个方向说，这个方向是特别的，就

显得荒唐可笑。但是，事实上就在不久以前，人们都确实相信有一个特殊的方向。有很长一段时间，人类对物理世界的认识总是摆脱不了重力的影响，意识到“上”与“下”并无内在意义也是一个使人震动的发现。虽然古希腊的埃拉托色尼（Eratosthenes）曾经猜测地球是圆的，但我们真正理解旋转对称性实际是从牛顿觉查到苹果不是掉到地上而是落向地心开始的。

我们还得说，物理学是建立在经验基础之上的，所以旋转对称性也只能由实验来建立。在 30 年代，美籍匈牙利物理学家尤金·维格纳（Eugene Wigner）将旋转对称性应用到象原子的光发射一类的量子现象，得出的结论可用实验测量来验证。实验物理学家实际上并不会偏着自己的头，他们可以通过在发光原子周围放几个光检测器来达到同样的效果。记录下各个检测器接收到的光的计数率，并与维格纳用旋转对称预言的理论计数率相比较。

直到现在，实验总是支持旋转不变性的。如果明天的报纸报道说这个受钟爱的对称性不存在的话，物理学家们将会不知所措。没有什么东西比我们关于空间的基本概念更少引起争论了。

我们直观上知道空间是光滑连续的，基本粒子就是在其中运动和相互作用。这个假定支撑着我们的物理理论，也还没有什么实验现象与之相违。然而，空间不光滑的可能性也不能排除。例如，一片肉眼看上去完全光滑的、没有结构的银，在更精细的探测下就可以看见它的原子构成的格子。空间本身也会是一个格子吗？不知道。因为我们的实验手段还没有精密到能探测空间的不均匀性。

因此，物理学家把对称性的概念发展成了一个判断自然设计的客观判据。给出两个理论，物理学家一般会觉得对称性更高的那一个要更美一些。当观察者是物理学家时，美意味着对称。

物理定律的对称

区分物理定律的对称性和特定情形下的对称性是极为重要

的。例如，按传统，学物理的学生都被要求推导电磁波在圆柱形金属管中的传播公式。尽管电磁定律具有旋转对称，但在这个问题中显然只有圆柱形对称：金属管的轴在空间定义了一个特别的方向。研究特定现象的物理学家通常更容易注意到特定情形下的对称性，而不是物理定律本身的对称性。与此相反，在本书中我们对基本定律的对称性更感兴趣。为了强调这一点，让我们来看另一个例子，在观察苹果下落时，基础物理学家感兴趣的事实是，重力定律在空间并无特殊取向，而并非地球近似为球形，地球真要是茄子形的物理学家也不会在乎。

区分物理定律的对称性和特定情形下的对称性，是牛顿的伟大学术成就之一，我们知道，它使物理学得以形成。虽然这种区别一旦指出后也很明显，但由于在日常生活中我们仍然是用对称一词来指特定场合下的对称性，所以也容易引起混淆。当我们说一幅油画表现了某种对称性时，指的是画家对画面的安排，这当然与支配颜料中分子运动的物理定律的对称性毫无关系。在本书中，我试图用具体类比来解释抽象概念。读者必须记住，我们感兴趣的总是物理定律的对称性，而不是具体物体的对称性。

春之简释

我在这一章的开头说过，物理学家们已经瞥见了自然设计的美与简单。但物理学家的简单指的是什么呢？

在向着简单性的行进中，物理学总是大刀阔斧的。物理学之所以成为物理学是因为能从各种复杂现象中找出简单本质。

从历史上看，为了物理学的进步，许多“为什么”式的问题只得换成“如何”式的问题。“一块石头在下落时为什么会加速”？古人认为，这块石头也象马一样是急于回到家中。从伽利略开始的物理学，就不再问石头为什么会下落，而是去测量它怎样下落。

当我们还是孩子时满口都是“为什么”。而对每一个为什么的回答马上又引出了新的为什么。“为什么树叶在春天会这么绿？”，

是这样，教授解释说，树叶中含有一种复杂的原子团，叫叶绿素，它和光以一种复杂的方式相互作用。这种叶绿素吸收了除人眼感觉是绿色的那些光以外的大多数光，于是树叶看上去就是绿色的了。这种解释会使普通的外行人觉得乏味（今天，许多物理学家也一样）。最终，对此问题和许许多多其它类似问题的解释都将归结为电子与光的基本粒子——光子如何相互作用。

物理学家大约从 1928 年开始，并在 50 年代早期完成了电子与光子间相互作用的现代理论。彻底理解电子与光子的相互作用已经有 30 多年了，然而，还是有人禁不住要问，为什么这两种基本粒子要以这种特别的方式相互作用呢？这个问题也已经得到回答，物理学家们现在知道，电子和光子的这种相互作用完全是由一种叫规范原理的对称性原理确定的，这种原理遍及整个自然。显然，物理学家现在又可以接着问，自然为什么要这样敬重规范原理呢？当代物理学在这里停住了，这个问题实质上相当于问为什么会有光。对此所作的讨论都融成了一团充满各种推测和沉思的迷雾。

在一些为什么取代了另一些为什么时，物理学就已经取得了不小的进步：一个为什么取代了许多个为什么。我不仅能用电子-光子相互作用理论来解释春天草木的青翠，而且还能用它来解释弹簧的伸长，更不用说激光和晶体管的行为了。事实上，几乎所有我们直接感受到的现象都可以用电子与光子间的相互作用来解释。

物理学是最最简约的科学。与此相反，我们在生物学通俗读物中读到的解释虽然也吸引人，但完全不能说是简约的。用生物化学过程来作的解释常常比问题本身所涉及的现象更复杂。

当代物理学正着手向进一步的简化进发。我们对自然探究得越深，她就越显得简单。这个结果确实是惊人的。因为并无先置的理由使我们能期望，这个包含极多迷惑人的复杂现象的宇宙，最终只是由几个简单的规则支配的。

简单生出复杂

假定下一届建筑师罗马奖(Prix de Rome)竞赛出的题是设计宇宙。一看是要设计宇宙，许多人大概就会把设计搞得过繁，以便他们设计的宇宙能够展示出各种各样让人感兴趣的现象。

用复杂设计来产生复杂行为并不难。在幼儿时代，当我们拆开一架复杂的机械玩具时，往往能看到隐藏在其内的齿轮迷阵。我最爱看美式足球，因为它丰富多彩。但它之所以这样复杂，是因它的比赛规则大概是所有运动中最复杂的。同样，象棋复杂也是因为它的规则复杂。

自然的复杂是源于简单，这一点已越来越清楚。可以说，宇宙的运行更象东方的围棋而不象象棋和美式足球。围棋的规则很简单，但变化却很丰富。杰出的物理学家谢利·格拉肖把当代物理学家比作并不知道比赛规则的观众。经过长时间的观察和艰苦的努力，这些观众已经看出了一点道道，开始能猜出规则可能是什么样的了。

就象物理学家所看到的那样，自然的规则是简单的，也是难解的：各种规则微妙地搅在了一起。这些规则间的复杂关系在许多情况下会产生奇特的效果。

在美国有一个全国足球联合会，每年它都要开会，对上一个赛季进行回顾并修订比赛规则。这一运动的每个观众都知道，即使只对其中一个规则作看起来无关紧要的修改，都会剧烈地影响比赛的精彩程度。只要稍稍限制一下防守队员对进攻队员的合理冲撞，比赛就会变成是进攻占主导地位了。年复一年，比赛规则一直在更改。以确保攻守间的基本平衡。同样，自然的规律看上去也是作了精巧平衡的。

恒星演化就是这种平衡的一个例子。一个典型的恒星起源于质子和电子气。在引力作用下，这种气体聚成一团，电力与核力在其中进行着激烈竞争。读者大概还记得，电力是同性相斥的，因

而质子会因它们之间的电排斥力而相互分开。另一方面，质子间的核吸引力又要使他们聚到一起。在这种争斗中，电力稍稍占了上风，而这一事实对我们来说是非常重要的。如果是两质子间的吸引力要稍强一点的话，它们就会粘到一起并放出能量，接着发生的是剧烈的核反应，恒星的全部核燃料将在短时间内被耗尽。这样就不会发生稳定的恒星演化，更不用说文明了。事实上，核力的强度只足以把质子和中子粘在一起，而不能粘住两个质子。粗略地说，在一个质子能与另一个质子相结合之前，它必须先使自己变成中子。这种转变是受所谓弱相互作用控制的。就象“弱”这个词所暗示的那样，由弱相互作用控制的过程是非常缓慢的。结果是，在一个象太阳那样的典型恒星上，核反应是以稳定的速度进行的。这种炽热的稳定燃烧的火球给我们带来了光明和温暖。

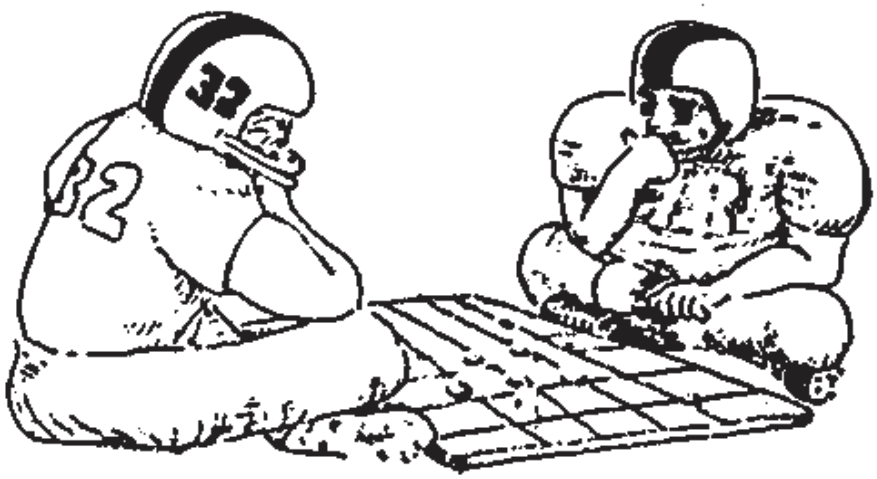


图 2.3　美式足球规则很复杂，而围棋规则很简单。

关键点是，与美式足球比赛规则不同，自然的规则是不能任意改动的，它们为同一个普遍的对称性原理所统辖，相互间连成一个统一的有机体。

自然的设计不仅简单而且是最大限度的简单。这就是说，如果设计再简单一点的话，宇宙就会变得单调无味。理论物理学家有时候以设想自然设计的对称性再少一点的话宇宙将会怎样来自娱。这种脑力游戏得到的结果是：为了防止整个大厦坍塌，不能去动其中的任何一块石头。否则，象光从宇宙中消失这一类的事

就不是什么玩笑了。

大数规则

简单的基本规则能够生成复杂现象的一个原因是，自然中事件的数目非常巨大，一滴水中就包含了数目难以想象的原子。年幼的儿童非常着迷于大数，在被教到象“千”和“百万”这样的词时他们就很快乐。他们想知道是否还有比1百万更大的数目。我三岁的儿子在学到无限是最大的数时就很高兴。但对于年幼的儿童来说，“千”、“百万”、甚至“百”都是“许多”的同义词。这使我想起了乔治·伽莫夫(George Gamow)说的关于一个匈牙利人数数的故事，这个匈牙利人的计数范围只限于1、2、3和“许多”。伽莫夫是一个伟大的美籍俄国物理学家，他首先提出宇宙起源于一个大爆炸并对普及物理学作出了很大贡献。

尽管物理学家能够谈论和计算很大的数，但人类心智还不能真正领会与自然所玩弄的巨数相联系的现实。即使是在报纸上看到的一些相对小一些的数，如果不把它们化成按人计算的形式，我甚至也理解不了。做过这种事情的读者会惊奇地发现，报刊上引用的那些数字往往是没有什么意义的。

对于具有很多粒子的系统和只具有几个粒子的系统的行为会完全不同，这一点社会学家肯定不会感到惊讶。在这个电子时代，我们迫使电子以受控集体疯狂的方式四处冲撞。为在磁带上记录一个拍节的摇滚舞影象，比地球上人口还要多的原子必须按正确的次序排好。

还是一个孩子的时候，我们就想知道为什么会有这么多的砂粒躺在海滩上。今天，物理学界的某些最深刻的思想家也已经开始思考：为什么宇宙中会有如此众多的粒子？

从逻辑上讲，宇宙中的粒子数问题完全不同于设计的简单性问题。假想的罗马奖竞赛中的一个宇宙设计者在设计好支配粒子间相互作用的几个简单定律之后，可以在宇宙中随意放入数目适

当的粒子，比如说，放入 3 个质子和 3 个电子。他或她也许还会放入几个光子，比如说 7 个光子。当然，这样一个宇宙是相当平淡无味的，但也不能从逻辑上排除这种可能。实际上，据估计在所能观察到的宇宙范围内，质子的总数目大约为 10^{78}，光子的总数目为 10^{88}。读者大概知道，10^{78}可写成在 1 的后面加 78 个 0。这数真是大得荒唐！其它不管，先得问是谁来安排这样多的质子呢？

可以说，宇宙包含了成亿万的粒子。但为什么呢？这个问题有时候被称为“族问题”（population question），它和“巨大问题”（vastness question）以及“长寿问题”（longevity question）密切相关。为什么宇宙这样大？这样老？如果按亚核粒子从生到死的时间尺度来衡量，宇宙已经生存了很长的时间了。为什么宇宙不在自然定律所揭示的基本时间内完成膨胀与坍缩？直到最近，大多数物理学家还是认为这些是不可回答的问题。但是，亏得有后几章将要叙述的令人激动的新进展，某些物理学家认为，他们或许能给出一些答案。

力量的倍侣制

神秘极了，不仅所能观察到的宇宙范围内所含粒子的数目非常大，而且由基本定律本身引出的数目也很大。按照现代物理学，粒子间有四种相互作用：电磁作用、引力作用、强作用和弱作用。

电磁相互作用维系住了原子，支配着光和无线电波的传播，引起化学反应，防止我们穿过墙壁和沉入地下。在原子中，带负电荷的电子因原子核中带正电荷的质子的吸引而不再飞走。引力相互作用使我们不会飞向空间并维持着行星系和星系的稳定，支配着宇宙的膨胀。强相互作用维持了原子核的稳定。弱相互作用导致了某些放射性核的衰变。虽然强相互作用和弱相互作用在自然的基础设计中非常重要，但它们在日常现象中并不起什么作用。我们前面说过，所有四种相互作用在恒星的稳定燃烧中都起到了至关重要的作用。

就象“强”和“弱”这两个词所暗示的那样，强相互作用比电磁作用强得多，而弱相互作用则比电磁作用弱得多。但最引人注目的是，万有引力比其它三种力都要弱很多。两质子间的电力比它们之间的引力强大约 10^{38}倍，这又是一个大得荒唐的数。

具有讽刺意味的是，我们通常感受最深的是自然中至今所知的最微弱的力——万有引力。虽然两个原子间的万有引力小得可怜，但我们身体的每一个原子都被地球的每一个原子吸引，这些力累加起来并不是一个小数。在这个例子里，所涉及粒子数目的难以置信的大，弥补了万有引力的难以置信的弱。与此不同，两个粒子间的电力是吸引还是排斥，取决于它们 所带电荷的符号。日常生活中的大块材料，包含了数目几乎严格相等的电子和质子，所以，这样的两块物体之间的电力几乎就被完全抵消了。

物理学家把四种相互作用强度有巨大差别这种现象称作相互作用的僧侣制。附带说一下，“僧侣制”最初是指古希腊神话中酒神狄俄尼索斯（Dionysus the Aseopogite）创立的一种把天使分成三个区，每区又分为三个等级的组织系统。现在我们划分的是物质的基本相互作用。

自然在组织自己的僧侣制时考虑得非常周全。在研究一种相互作用时物理学家通常可以忽略其它相互作用，这样他们就能把四种相互作用都理清。由于现实是象洋葱一样按层组织的，我们对它的认识就可以分层进行。我们可以不必理解原子核而能理解原子。原子物理学家不必等待核物理学家，核物理学家也不必等待粒子物理学家。物理现实并不需要同时被全部理解。谢谢您，大自然。

自然中两种概念上完全不同的大数现象：巨大的粒子数目和基本相互作用在强度上的巨大悬殊，在宇宙中产生了大得有些可怕的尺度范围：从光子要花亿万年时间才能穿过的两星系间的真空区域，到只能凭想象去体会的一滴水中的两个原子间的距离。我们人类睥于微小与宏大、短暂与永恒之间的中央位置。在 1 秒钟内，某种不稳定的基本粒子可以生死的次数和宇宙诞生以来的秒

数大体相同。我们视原子之小犹如星系视我们之小。在从 10 分之 1 秒到 100 年的人类经验的时间尺度内，我们生活、死亡，创造艺术和科学。

对称性指导

尽管物理世界表面上显得很复杂，我们还是能看出自然的基本设计是简单的和可理解的。后面我将叙述，物理学家正如何开始通过推测自然在她的设计中所可能用到的对称性来译解大自然的基本设计的。

从历史上看，物理学家首先意识到的是与我们实际生存的空间有关的对称性，即旋转和反射对称。下一章要讲述的是关于反射对称的奇妙故事。由于旋转和反射对称已经牢牢植根于我们的直感，在讨论旋转对称时我们没有使用物理学家关于对称性的有力而又美妙的语言。再往后，当我们遇到自然设计中更抽象的对称性时，这种语言就变得必不可少了。

第三章　镜中的世界

亲爱的礼仪小姐：
　应该怎样递食物，
　是从左边递还是从右边递？
尊敬的读者：
　装食物的盘子应该从左往右递。

心境与对称

在过去几年里，我常常观察我儿子安德鲁与他的朋友一道玩积木。一直到了某个年龄，儿童都还只会把一块积木累在另一块上。但经历了一次如皮亚杰（Piaget）所描述的那种飞跃之后，他们搭出的东西就突然开始显示出明显的左右对称。这些小孩长大后如果当建筑师的话就会建出象图 3.1、3.2 和 3.3 那样的建筑物。

建筑学实际上是建立在左右对称的基础之上的。不对称的建

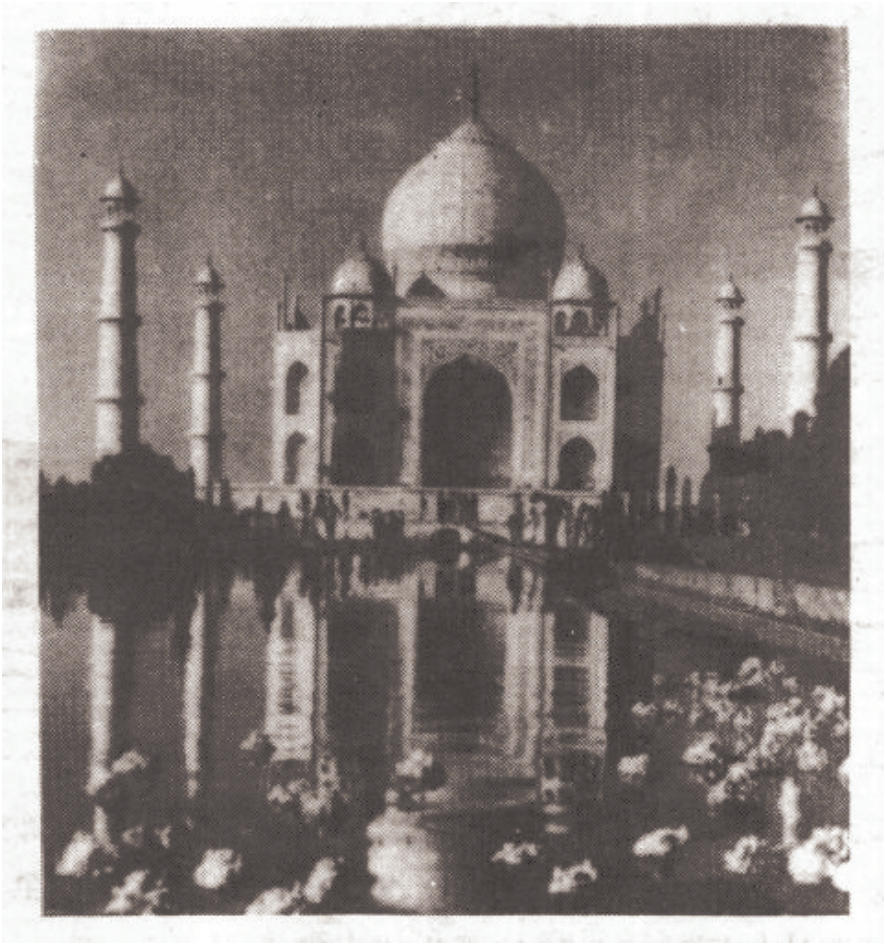


图 3-1　严格的对称使泰姬陵具有恢宏的气度。

筑物被认为是古怪的，需要作出解释。例如，查特里斯(Chartres)大教堂就不对称得让人发笑。它的修建时间太长了，以至建筑风格都发生了变化。

不足为怪。现代建筑学，带着我们这个世纪的反叛特征，产生出了许多富于变化的、不对称的建筑物。但是，现在建筑学界正流行的后现代派思潮，在一定程度上是要恢复某些象左右对称这类的经典原则。

人体本身就具有显著的左右对称。早在儿童时代，我们就开始使用把世界分成左边和右边的说法。显然，是生物演化把左右对称强加给了人和大多数动物的身体。眼和耳的对称排布对于视听的立体接受是必须的，而双腿的对称安置则是为了便于直线行走。有趣的是，我们在电影中看到的天外来客也往往具有左右对

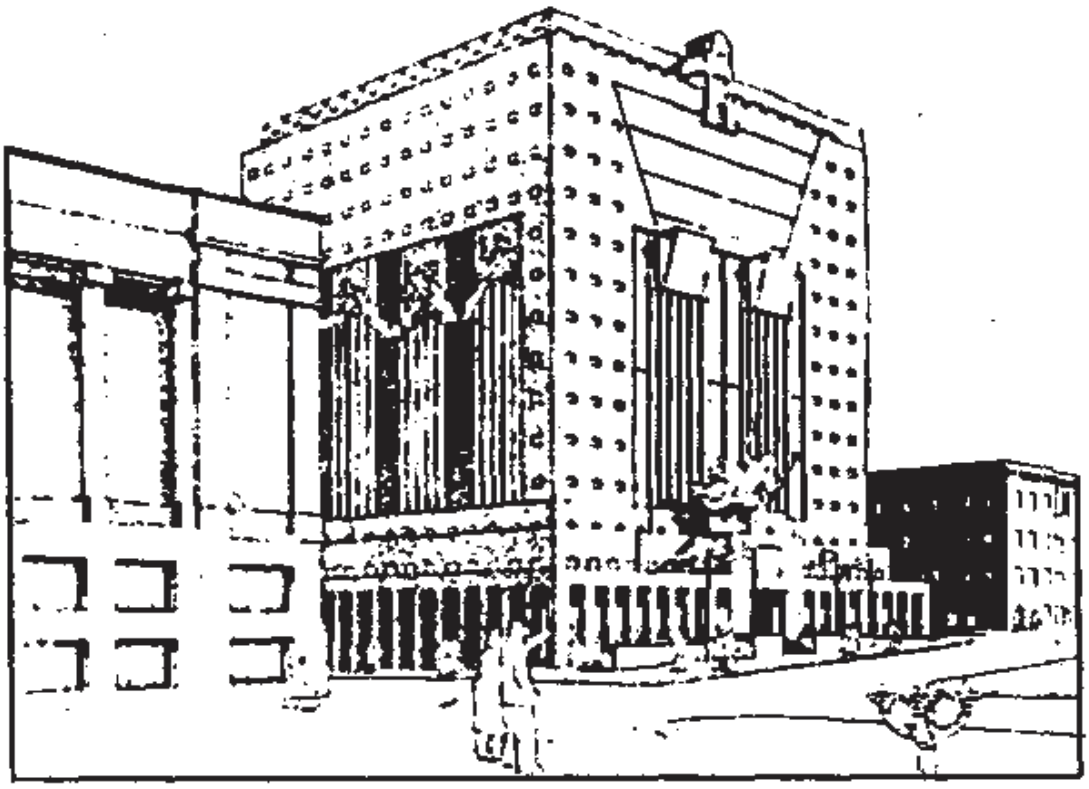


图 3.2 波特兰的公共服务大楼，是后现代派重新注重对称的一个例子。

称的形体。确实，左右对称在生物世界是这样盛行，以至于偏离这种对称的任何发现都是稀奇的和让人着迷的。

人的大脑分为各具不同功能的左右两半，是左右不对称的一个众所周知的例子。另一个例子是，母鸡的一个卵巢萎缩而没有任何功能。我所知道的最让人吃惊的例子，大概要数生活在美洲热带水域里的那些鳉花鳉科的小鱼。盖·穆切（Guy Murchie）是这样描述它们的：

> 它们的最不寻常之处是雄性性器官。这明显是由腹鳍演化而来的，其长度可达鱼身长的一半。在勃起时，它膨大，摇摆着向前伸长，在某些种类中它的顶端几乎能和鱼鼻子持平，但偏左或偏右 30° 左右。有些种类的雄鱼的交配器具有指状附器。可以想象交配器肯定可以非常方便地摸索着进到雌鱼的殖泄孔中。有些雄鱼还有一对梳状的抱爪（好象是由侧鳍演化来的），用来在交配时抱住雌鱼。但是，



图 3.3　查特里斯大教堂：罗马式的塔尖（右边）建于 12 世纪，哥特式的塔尖（左边）建于 16 世纪。一般认为，这个教堂的两个不对称的塔尖标志着中世纪建筑的开始和结束。

> 雄鱼的殖泄孔非得生在和雄鱼的交配器的偏向相适的那边不可，要么生在左边，要么生在右边。否则就不能接受雄鱼的交配器，整个努力就都将是徒劳的。

左右对称的结构会给人一种良好的心境。我们只要环顾一下四周的普通建筑物就会知道，它们的设计者是多么离不开左右对称的原则。但人们也不是就不能接受其它更奇特一些的东西。

西方油画的编年史充分反映了这两种倾向。让我们来看一幅典型的文艺复兴时期的宗教画，一对圣徒被严格对称地安置在处于中心的主体（神）的两边。通常，处于主体右边的圣徒在神界的地位要比左边的高。在画有保护圣徒的时候，通常是一个男人和他的妻子，男的几乎毫无例外地是跪在右边。还有一个传统是，在经典的绘画中光线通常是来自主体的右边。非常有意思，许多著名的画家为了迎合各种人的口味，也很乐于让他们的艺术违反这些传统。例如伦勃朗就不会去费心作那种使他的画面与重右轻左的标准传统相符的必要调整。在此，我想对读者作一小测验，按你的记忆，在米开朗基罗绘于西斯汀教堂天花板上那幅描写人的创生的名画中，上帝是用左手还是用右手托摸亚当的？

男人上衣的钮扣钉在右边，而女人的则是钉在左边。标准的解释是，当男人处于险境时能迅速用左手撕开上衣，而用右手拔出剑来。对于惯用右手的人来说，钉在右边的钮扣解开和扣上都要更容易一些。贵妇人们当然不会自己穿衣和脱衣，而是要仆人侍候，这样钮扣钉在左边就更方便了。

爱丽丝和那喀索斯*

现在让我们回到物理中来。自然是否也会象晚宴上年长的客人一样在乎左与右的差异呢？如果自然并不在意，物理学家就说自然是宇称不变的或反射不变的。这里让我给宇称不变性精确地下一个操作上的定义。选一个你最喜爱的物理现象，从弹子球的碰撞到原子的光发射都行。把一面镜子放在所发生的现象前，然后来看在镜子里所见到的过程是否违反我们所知的自然定律？如果不违反，我们就说支配这一过程的物理定律是宇称不变的。作定义时的仔细选词是为了避开那些没有内在物理意义的左右不对称。

---

* 那喀索斯：恋上自己在水中的影子的美少年。

说物理学是宇称不变的并不是指镜子里的世界和我们的世界完全一样。我照镜子时在镜子里看见了一个象我一样的人。但是，他的心脏是在他的右边，他手上的表也是反着转，甚至他的DNA分子的双螺旋线也是沿另一个方向盘绕。但关键点是物理学定律并不禁止一个人把他的心脏长在右边。如果供给他（以及他的祖先）的生物分子总是和供给我们的生物分子互为镜像，他的双螺旋线也就真会沿另一个方向盘绕。尽管生物学家们没有能力造出这样一个人，钟表匠们要造出一个逆时针旋转的表倒很容易。这种表受具有宇称不变性的物理定律支配，同样能精确计时。

对物理学家来说，我们的心脏稍稍偏向左边只不过是生物进化的一种偶然性，并无内在的物理意义。早期的钟表匠只不过是约定钟表的指针按现在这种方式转动而已。同样，某些有机分子的螺旋是沿哪一个方向，被认为并不具有实质性的意义。化学家们可以生成自然中所发现的分子的镜像分子，并且这些分子确实具有同样的物理性质。容易想象，在生命刚出现时两种有机分子都存在，由于统计涨落，某一种类型的分子数目会稍多一些。后来这种数目上的差距逐渐拉大，最后另一种分子被消灭。

在《爱丽丝漫游奇境记》的续篇《穿过镜子》中，刘易斯·卡罗尔清楚地描绘出了我们中大多数人都有过，特别是在童年时有过的幻想。我曾经以极大的兴趣研究过我的小儿子与他在镜子里的象的关系。到了某个时候，年幼的儿童会突然意识到镜子里的象并不是一个独立的人，从此他们就以成年人的眼光来看镜子里的东西。那喀索斯显然是一个少见的人物。

爱丽丝爬进壁炉上的镜子，发现自己到了另一个世界，……。卡罗尔的幻想为我们讲述宇称不变性提供了一个生动的素材。让我们跟着爱丽丝进到镜子里的世界吧。

每一件事都和镜外的世界稍稍不同，让人觉得好笑，但这与我们没关系。我们要去找一位物理学家，问问他所知道的粒子间的基本相互作用是怎样的。如果他给出的物理定理与我们的一致，我们就说自然并不区分左与右。

珍爱的信念被动摇了

如果我就自然设计是否具有左右对称对大街上的行人进行民意测验的话，我推测，除了“不知道”和“不关心”这类让测验人烦恼的回答外，至少也还有几个人会回答“或许没有”。然而，直到1956年，物理学家们一直把自然不区分左与右当成是理所当然的。19世纪的物理学家曾经将这一信条提交实验验证，一直都没有发现自然偏爱左或偏爱右的迹象。20世纪的前几十年，随着原子物理学和核物理学的诞生，宇称不变性的假定也得到了若干实验的验证。直到1955年前，宇称不变性还被当成物理学家所热爱的几个神圣原则之一。物理学家们不愿意设想自然会偏爱左或者偏爱右。认为自然会接受象社交界女主人要把尊贵客人的位子安置在右边这样一类毫无道理的习俗似乎是荒唐的。但物理学界随后就被震撼了。

到50年代中期，物理学家们发现了一些新粒子，它们的行为很难预测，以至于恼怒的物理学家给它们取了一个绰号，叫“奇异子”。实验物理学家用刚刚在纽约长岛布鲁海文国家实验室建起的加速器非常仔细地研究了这些奇异子。亏得澳大利亚物理学家R. H. 达里兹 (Dalitz) 的仔细分析，才搞清了某些奇异子在衰变时会表现出非常迷惑人的行为。

1956年4月，在纽约州的罗切斯特召开的高能物理会议上，广泛讨论了奇异子的这种奇特行为，但没有人能提出一个让人满意的解释。美籍华裔* 物理学家杨振宁作了一个关于奇异子的小结报告。在杨振宁报告后，讨论很热烈，这时理查德·费曼 (Richard Feynman) 提出了一个马丁·布洛克 (Martin Block) 曾经问过他的问题：宇称是否是不变的。在达里兹的分析中，这被

---

* 原文如此，但李政道和杨振宁是作为中国人获诺贝尔奖的，他们当时未入美国籍。

当成一个隐含的假定，而这是成问题的。杨振宁回答说，他正和另一位美籍华裔物理学家李政道一起开始分析宇称不守恒的可能性，但还没有得到结果。

事后来看，宇称不守恒，即自然要区分左与右的说法确实是摆脱困境的自然出路。然而，自然是左右对称的这样一种观念牢牢地占据了物理学家的头脑，宇称不守恒被他们认为是回答这个神秘问题的最不可能的一个答案。

李政道和杨振宁继续拚命地研究这一问题。杨振宁在后来回忆说，他觉得就象“一个在黑暗的房子里摸索着寻找出口的人”。在1956年5月的早些时候，杨振宁去拜访李政道。没有找到停车的地方，他们就开车绕哥伦比亚大学转，李政道是这所大学的教授。他们一边转一边讨论起了宇称不守恒的可能性。最后他们烦了，不再讨论下去，而在一家中国餐馆前把车停下来。与奇异子的角斗和寻找停车场的双重挫折肯定给了他们心灵某种特殊感应，因为历史是这样记录的，他们一坐下来就为这样一个关键点所触动：所有支持宇称守恒的实验事实要么来自与电磁相互作用有关的过程，如原子的光发射；要么来自与强相互作用有关的过程，如两个原子核的碰撞。而奇异子的衰变则不同，到1956年已经确定它是受弱相互作用支配的，这种相互作用导致了原子核的某种放射性衰变。

李政道和杨振宁的基本观点是，自然在她的很多定律中是尊重宇称的，但在支配粒子间弱相互作用的定律中却不是这样。想想我们法律体系中的一个基本原则，被告在被证明有罪以前被假定是无罪的，判决也只是对某些罪而言的，对另一些罪则不成立。就象司法哲学家肯定会在这种观念面前畏缩一样，物理学家也认为自然有选择地冒犯宇称，在哲学上是相当使人难堪的。

接下来的几周时间，李政道和杨振宁对已有的所有涉及到弱相互作用的实验作了详细的数值分析，得出的结论是，宇称可能不守恒，但还没有一个实验给出了证明。他们的下一个任务就是要设计一个能灵敏地验证宇称是否守恒的实验。在6月，他们发

表了具有历史意义的论文，对弱相互作用中宇称守恒提出疑问并给出了解决这一问题的实验构想。

镜子里的世界和我们的世界一样吗？

李政道和杨振宁提出的实验之一涉及到一个旋转的原子核。有很多种原子核是在原子内不停地旋转的。如读者所知，原子就象一个袖珍的太阳系，原子核象太阳，围绕着它转动的电子象行星。电子轨道的半径比原子核的半径大很多，因此轨道上的电子在我们以后的讨论中不起什么作用，它们离得太远了。

在继续下面的讨论之前，我想先解释一下物理学家是如何标记旋转物体的旋转方向的。用左手握住一个旋转的物体，让 4 个手指指着物体表面旋转的方向，我们就把大拇指所指的方向定义为物体旋转的方向。例如，物理学家说图 3.4A 中的芭蕾舞演员的旋转方向是“向上”的，而 3.4B 中的演员则是“向下”的（在此例中，“向上”与“向下”是相对于地球表面的，当然，这种定义即使对在太空旋转的物体也同样可行）。使用左手来作定义纯属习惯，这和一些国家汽车靠路的左边行驶，一些国家靠右边行驶道理相同。这里重要的是有了一种能方便地标记物体旋转方式的方法。有人可能想到用“逆时针”和“顺时针”这种说法，但这依赖于我们从哪一面来看这些旋转的物体。让我们用美式足球来作一个形象的比喻，当投球手向攻击手作长传时，他们对橄榄球是顺时针还是逆时针旋转的看法是不一致的。

读者可能会觉得上面根本就没讲什么实在的东西。为了使我们清楚地知道下面要讨论什么问题，还是有必要讲得多一点。

李政道和杨振宁建议研究一个旋转的放射性核的衰变。一个核可以看成是一群堆积在一起的中子和质子。放射性核中质子和中子的排布并不稳定，在一给定的时间间隔会有一定的几率发生放射性衰变。如果这种衰变是弱力引起的，单位时间内发生衰变的几率就非常小。这正是弱力被称作弱力的真正原因。核在衰变

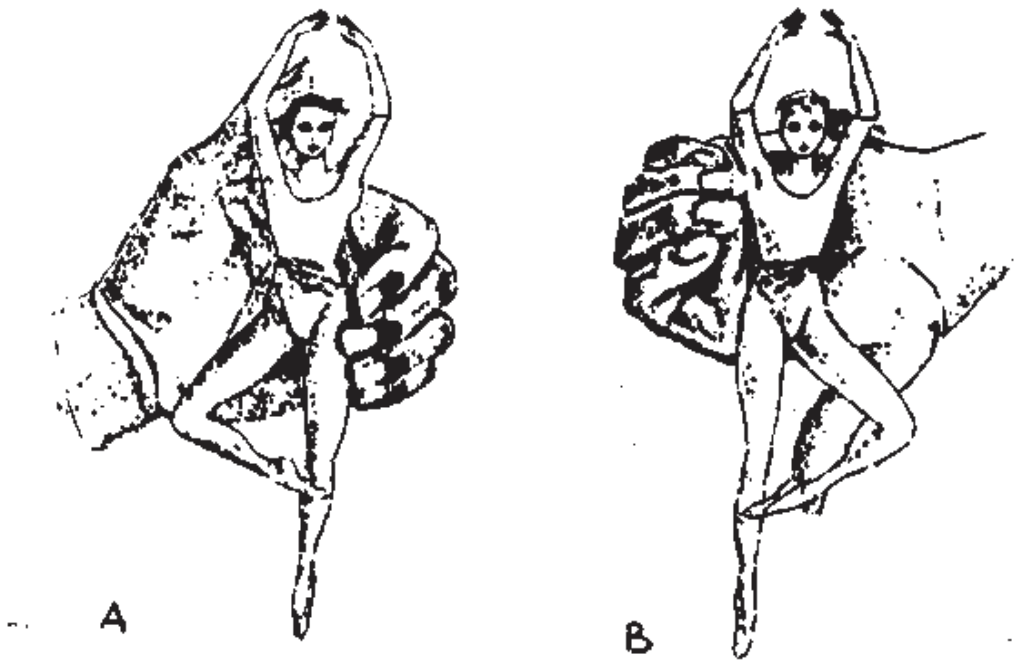


图 3.4　请注意艺术家如何用一种形象的方法来标记两个作脚尖立地旋转的女芭蕾舞演员的旋转方向。依照正文中所述的习惯，称左边（A）的旋转方向向上，而右边（B）则称向下。

时放出一个电子和另外一种粒子，这种粒子叫中微子，它不能被实验检测出来。这个电子以很高的速度飞出，并不会与相距很远的原子轨道上的电子相混淆。

如前面的解释，旋转的核定义了一个方向，我们现在可以问，电子是沿这个方向还是沿相反的方向射出？为了看清对这个问题的回答如何表明了自然是否冒犯了宇称，我们要运用前面解释过的判据并将我们的世界所发生的事与镜子里的世界所发生的事作对比。

假定电子沿核的旋转方向飞出，来看一下镜子里的情况会怎样（见图 3.5）。如同镜子里的表针是逆着转一样，镜子里的核的旋转方向也是相反的，因而电子出现在与核的旋转方向相反的方向上！当一个物理学家观察这个衰变时，他的同事也同时在观察镜子里的衰变。他们关于决定放射性核衰变时电子出现在哪个方向的定律总是相反的。如果大自然尊重宇称的话，电子出现在核

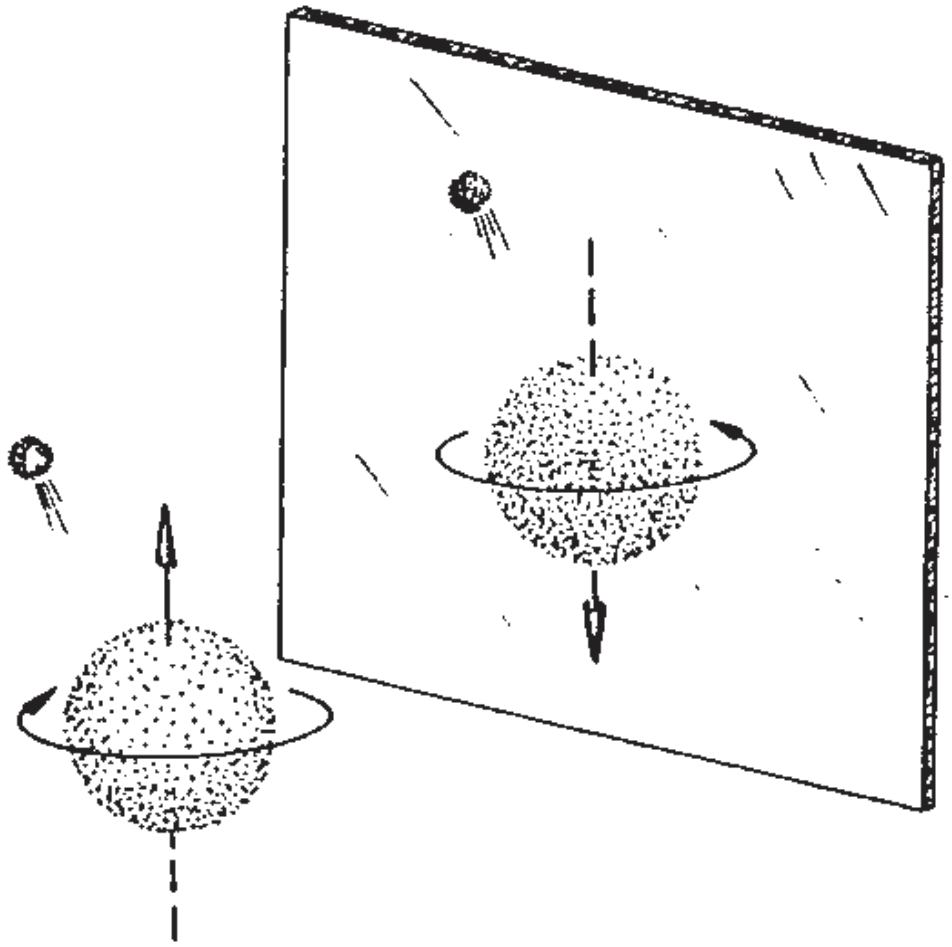


图 3.5 一个旋转的核（用大球表示）发射出一个电子（小球）。在我们的世界中电子出现在核的旋转方向的几率是多少，在镜子里的世界中电子出现在核的旋转的反方向上的几率就是多少。在实际的实验中，统计了大量核所发射的电子的方向，如果电子倾向于沿核的旋转方向出现，我们就说宇称不再守恒，因为在镜子里的物理学家看来电子倾向于沿核的旋转的反方向出现，我们的世界和镜子里的世界受不同的物理定律支配。

的旋转方向和核的旋转的反方向上的几率应相同。在实际的实验中涉及到许许多多的核，人们是通过观察许多来自不同衰变的电子来看它们出现的方向是否有择优性的。

显然，为了建立一个参考方向，核需要是旋转的才行（然而，这并不意味着宇称不守恒只能在涉及旋转粒子的过程才能观察到）。值得指出，所提出的这个实验一点也没有涉及到奇异子；这样，对它的解释就不至于被当时并不清楚的奇异子动力学弄得含

混不清。

吴女士和上帝的左手

李政道和杨振宁的下一步就是要说服一个有此能力的人来做这个实验。物理学杂志上充斥着各种各样的实验构想，但是，作为一个实验工作者必须确信自己所要做的实验确实重要，以使为此所作的巨大努力不至于白费。

对托勒密（Ptolemy）来说，推测尼罗河是发源于非洲中部并不必付出什么代价，但伯顿（Burton）和斯佩克（Speke）却为此付出了生命和才智。在接触了一些大都持怀疑态度的实验物理学家之后，李政道和杨振宁找到了弱相互作用实验的权威人士之一吴健雄，并设法说服了她。这样事情就有了希望。

吴女士，就如物理学界都知道的那样，是一个了不起的人物。她于著名的满清王朝覆灭后仅 1 年的 1912 年生于中国，被称为“实验核物理的执政女王”，并成为美国物理学会的第一个妇女主席，为女实验工作者进入这个男人占统治地位的领域开辟了一条道路。她的实验以细心和简明著称，被她的同事们称之为具有女性风格。吴女士为李政道和杨振宁所言深深打动，她取消了夏季旅行计划并立即开始工作。这就导致了自然第一次向一位女士亮出了她的“手征”。

吴女士象爱丽丝一样，是在看镜子里的世界。在这样做时，她遇到了一些麻烦。虽然事情在理论物理学家看来相当简单（见图 3.5），但实验物理学家所必须面临的现实复杂性却令人生畏。例如，没有谁会给吴女士一个单独的旋转的核，而包含在实验样品中的数目巨大的核各自是沿不同的方向旋转的。在室温下，原子总是在剧烈地振动，即使核的旋转方向在某一时刻都沿一个方向排好了，也会由于热扰动而很快指向不同的方向。所以，她不得不在低温下做实验以减少热扰动的影响。而这就得使用复杂的制冷装置。我们大家都知道，复杂装置是很容易出故障的（理论和

实验物理所吸引的人的个性是相当不同的，各自具有不同的脾气和能力，在这块肥沃的田野上，社会学家可以进行能得到累累硕果的研究），于是，吴女士就与华盛顿国家标准局的一群低温物理学家合作，因为从那里可以获取所需的制冷设备。

到 1956 年 12 月，她和她的合作者们发现了宇称不守恒的强烈迹象：在受弱相互作用支配的衰变中，电子飞出的方向有择优性。芝加哥大学的瓦伦丁·特勒格弟（Valentine Telegdi）领导的一个小组，通过做李政道和杨振宁提出的另一个实验，独立地得到了同样的结论。

在 1957 年 1 月 4 日星期五，李政道向他的一群同事描述了吴健雄的实验的最后结果。吃午饭时，讨论变得特别活跃，这时哥伦比亚大学的一位实验物理学家利昂·利多曼（Leon Lederman）突然意识到，他或许可以在 π 介子的衰变中检测到宇称不守恒。π 介子是当时已发现了几年的亚核粒子。这个晚上的晚些时候，他打电话给现在 IBM 工作的著名的实验物理学家理查德·伽文（Richard Garvin）。两天以后的早晨，这两个激动的物理学家已经设计和建立起了他们的实验装置并开始收集数据。但是正当他们认为他们也看到了上帝的左手时，装置坏了。他们找了另一个实验物理学家来帮忙，并一起修好了实验装置，然后又马不停蹄的工作。到星期二早上 6 点，利多曼就打电话给李政道说，自然确实是有手征的。

现代物理实验通常是很庞大的，有时需要多国合作，要上百名的物理学家持续工作几年。利多曼等人的实验肯定是创下了用时最短记录。利昂·利多曼现在是设在伊利诺思巴塔维亚（Batavia）的巨费米国家加速器实验室的顾问。你可以想象他是如何工作的。

宇称不守恒的消息震惊了物理学界。这就好象一个讲礼节的上流社会的贵妇人犯了一个难言的过失一样。公众也着迷了。例如，当时的以色列总理本·伽里恩（Ben-Gurion）就问过吴女士，宇称和瑜伽有什么关系。《纽约时报》就宇称不守恒的意义发表了

社论。这一新闻经过社会的慢慢过滤后就被断章取义和曲解了。当我还是一个小孩时，父亲的一个商人朋友就告诉我，两个中国物理学家推翻了爱因斯坦的相对论，而他并不知什么是相对论。

吝啬鬼和他的幽灵

宇称不守恒的发现深刻地改变了我们原先对自然的看法，我们对物理世界的理解产生了即时和深远的影响。宇称不守恒被证明是建立一个弱相互作用理论所必须的、被遗漏了的部分。

为理解 1956 年时弱相互作用理论的状况，我们不得不回到 30 年代早期。当时，英国物理学家 C·D·埃利斯（Ellis）仔细地测量了从衰变的放射性核发射出的电子的速度。这涉及的物理过程和吴女士及其同伴所做的实验相同。但在物理中情况常常是这样，在不同的实验中要测量不同的物理量。埃利斯并无使放射性核排整齐的困难任务，但在另一方面，他得测量电子的精确能量，而这在吴女士的实验中又是不必要的。

埃利斯是在一个极不寻常的环境中成为一个物理学家的。他在第一次世界大战中当军官时很早就被俘了。在监狱，他结识了一个倒霉的英国人詹姆斯·查德威克（James Chadwick）。我们后面还要谈到的在物理学的发展中有过很大贡献的查德威克当时还很年轻，他是去柏林跟以发明计数器而著名的弗里兹·盖革（Fritz Geiger）学习研究放射性的。战争爆发时他被德国人当成间谍抓了起来。为了摆脱烦恼，查德威克开始教埃利斯学习物理。而埃利斯从此就迷上了物理，以至在战后放弃了他的军人生涯。

在埃利斯做他的实验时，理论物理学家们认为他们知道发射出的电子的能量会是多少。不管怎样讲，著名的阿尔伯特·爱因斯坦告诉了我们，质量可以如何按 $E=mc^2$ 的公式转化成能量。知道了放射性核的质量和它衰变后的核（子核）的质量，运用简单的减法和爱因斯坦的公式就可算出跑出的电子所应有的能量。我们把这个能量记作 E^*。

太怪了！埃利斯发现，跑出的电子并非总具有相同的能量（虽然这些能量一般总是比 E' 小）。在一个衰变中跑出的电子可能很慢，而在另一个衰变中又可能很快，但基本上不会有 E' 的能量。失落的能量到哪里去了呢？爱因斯坦会错吗？

给出这个难解之谜的谜底的是沃尔夫冈·泡利（Wolfgang Pauli），这个快活和肥胖的物理学家在 20 世纪物理学的舞台上扮演了一个吝啬鬼的角色。泡利是一个说风凉话的大师。据说每当听说一个新的物理结果时，他会悲伤地评论说，“它居然没什么错”。他也悲叹地发牢骚，说物理学太难了，他该去做喜剧演员才对。有许多关于泡利的故事在物理学界流传，其中受人欢迎的一个是说，他死后去请求上帝透露他的设计（物理学家中的一个标准幻想），在听完上帝的诉说之后，泡利竟说，“这居然没什么错”。

在 1933 年，泡利提出，有一种至今还不知道的粒子，它既不参与强作用，也不参与电磁作用，因而带走了丢失的能量逃脱了检测，象一个穿黑衣的窃贼一样消失在黑夜之中。这种神秘的粒子后来被取了一个意大利名字“中微子”（neutrino），是第一个在实验发现它之前就已经被预言存在的粒子。今天，粒子物理的理论家们在假定实验上未知的粒子的存在时就过于放任，泡利的勇敢只有在考虑到当时的历史场合才值得赞赏。

泡利推算出中微子具有奇特的性质。在量子物理中，人们谈论的是几率。由于据推测，中微子只通过弱力参与相互作用，它与它遇到的电子或核相互作用的几率是非常小的（这就是弱力被称为弱力的真正原因）。知道了弱力有多弱后，泡利得出结论，一个中微子可以象幽灵一样穿过整个地球而不与之发生相互作用。反过来，我们这些有血有肉的人就不能穿过一道墙，因为我们身体里的原子肯定会与墙中的原子发生电磁相互作用。

由于对自己及对别人的苛刻，泡利在写给一位朋友的信中说，他犯下了一个物理学家所可能犯下的最大的过错：推测出存在一种不能提交实验物理学家作验证的粒子。但是，他过于悲观了。在

1955 年，美国物理学家 F·雷尼斯（Reines）和 C·考万（Cowan）设法“看到”了一个中微子。今天，粒子加速器可以例行地射出一束中微子，并且可以观察到其中的几个与其它物质的相互作用。（为产生中微子束，实验物理学家首先产生一束亚核粒子，它们在飞行过程中衰变出中微子。）读者可能很奇怪，会觉得这怎么可能呢？其实，尽管一个中微子和一个核相互作用的几率小得难以想象，但终归不是零。为抓住这小小的几率，人们可以在中微子束前堆上大量的核，然后耐心等待。一次，美国海军报废了一些旧战舰，并把这些废铁送给了实验物理学家。即使有这样大一堆铁，为了抓住一个与原子发生相互作用的中微子，实验物理学家们也不得不等了几个月。

泡利还推算出中微子是没有质量的，因为在埃利斯的实验中的电子偶尔也确实会有能量为 E^* 的情况。如果中微子有质量，那么根据爱因斯坦的质能关系，必须把能量 E^* 的一部分用来产生中微子，这样留给电子的能量就要比 E^* 小。根据电子、放射性核和子核（放射性核衰变后变成的）的旋转情况（称自旋），泡利还推算出中微子具有自旋（即自身在旋转）。美国小说家约翰·阿普戴克（John Updike）对中微子着了迷，写了一首关于它的诗。就我所知，这是仅有的一首由文学家所写的关于亚核粒子的诗：

中微子啊多么小，
无电荷来又无质量，
完全不受谁影响。
对它们地球是只大篾球，
穿过它犹如散步，
象仆人通过客厅，
如光透过玻璃。
它们冷落精心装扮的气体
无视厚实的墙
　　冷漠的钢和坚硬的铜。
它们凌辱厩里的种马

蔑视阶级的壁垒
穿过你和我！就象那高悬的
无痛侧刀，它们落下
　　切过我们的头又进到草地。
在夜里，它们进到了尼泊尔
从床底窥视
　　一对热恋的情侣。
你呼其奇妙！
　　我呼其非凡！

——约翰·阿基博克“宇宙的尖刺”

罪犯

泡利的躲闪不定的粒子原来正是恩里科·费米（Enrico Fermi）在1934年建立弱相互作用理论时所需要的。费米用精确的数学语言综合了已知的东西。在随后的20多年里，理论物理学家们一直试图改进他的理论，但由于他们总假定宇称具有不变性，其结果当然不会妙。

一旦知道宇称被侵扰了，理论物理学家就可以自由地写出那些过去不能写的方程，于是理查德·费曼和默里·盖尔曼（Murray Gell-Mann）以及罗伯特·马夏克（Robert Marshak）和乔治·苏达山（George Sudarshan）在1957年独立地提出了关于弱相互作用的一个基本正确的理论。

经过进一步的立案侦察，理论物理学家可以认定，四处逃避的中微子是应对侵扰宇称“负责”的罪犯。下面我就来解释为什么要指控中微子。

对于一个沿一条直线运动的旋转的粒子，我们可以问它的旋转方向（如前面的定义）是与运动的方向一致还是相反，如果一致，物理学家就称这个粒子是左手征的（left-handed）。如果相反

则称为是右手征的。（理论物理学家一开始是把这种手征称为“screwness”，但美国头号物理学刊物“物理评论”《The Physics Review》的编辑们坚持要使用更有尊严的术语“helicity”和“Chirality”作为只是稍稍不如40个法兰西科学“院士”威严的语言保护人，他们赢了，但在和物理学界的进一步的斗争中他们又失去了赢的份额。

螺旋性，或者说手征，只有对于一个无质量粒子才能被定义成一个内禀性质。为什么不能定义一个有质量粒子的手征呢？假定我们看到一个有质量粒子沿某个方向运动，譬如说，向东运动。对于一个向东运动的速度比这个粒子更快的观察者来说，这个粒子是向西运动的。由于手征描述的是旋转与运动的相对方向，所以我们和那位向东运动的观察者对于这个粒子的手征的看法就不一致。相反地，象中微子那样的无质量的粒子总是以光速运动，按照爱因斯坦的相对论这是所可能的最大速度。既然没有一个观察者的速度能超过一个无质量的粒子的速度，无质量的粒子的手征就是一个内禀性质。例如，无质量的光子既可以是左手征的也可以是右手征的。如果自然尊重宇称的话，所有粒子都应有两种手征。但实验确实表明，中微子还有一个古怪的性质：它总是左手征的。中微子被当场捉拿住了！30年来，实验物理学家一直在寻找右手征的中微子，但总是徒劳无功。

非常有意思，我们后面还会遇到的德国数学家赫曼·魏尔(Hermann Weyl)早在1929年就在研究我们今天用来描述中微子的方程。但他的工作不能为物理学家们所接受，因为它们违反了宇称守恒。但在1956年，魏尔的方程又吃得开了。

我已经提到过，尽管物理学家们为宇称不守恒所震动，但宇称有选择地不守恒使他们受到的震动更强烈。在对中微子提出了指控之后，这种选择性在一定程度上变得可理解了，因为中微子只参与弱相互作用（还有引力作用）。但泡利依然心烦意乱，在一封给吴女士的信中他写到：“现在，当第一次震动过去之后，我开始去收集……那些震撼我的东西……[现在这种东西是]上帝在

强烈地表达他的意愿时仍然表现出左右对称。”20 年后，物理学家才能够第一次深刻理解困扰泡利的问题。已经证明：为了使宇称不守恒只限于弱相互作用，其它三种相互作用必须具有一种特殊的结构。

进到反物质世界

情节越来越曲折了。1956 年夏天，李政道和杨振宁收到了芝加哥大学物理学家伦哈德·奥默（Reinhard Oehme）写来的一封信，信中提出了物质与反物质间的对称性问题。回溯到 1929 年，杰出的英国物理学家保罗·艾德里安·莫里斯·狄拉克（Paul Adrian Maurice Dirac）由于预言了反粒子的存在而使物理学界大吃一惊。到 1956 年反粒子的存在已经被确认了，反电子（称正电子）和反质子均已被发现。

当一个粒子和它的反粒子相遇时就会相互湮灭，释放出巨大的能量，这些能量接着又物质化为其它粒子。如今，在遍及世界的加速器上观察和研究粒子与反粒子的湮灭已是家常便饭。例如，就可以产生出一束反质子，并使其与质子束碰撞。反质子的存在以及它可以和质子湮灭这样的事实早已不是人们感兴趣的东西了。物理学家们现在感兴趣的是，从这种湮灭中会产生出什么新型粒子。

一个粒子和它的反粒子质量完全相同，但电荷相反。因此，电子带负电荷，正电子带正电荷。知道让人难以捉摸的中微子不带电荷后，好奇的读者可能会问，怎样才能区分一个中微子和它的反粒子呢？让我们来给出一种可能的区分方法。带正电荷的 π 介子有时会衰变成一个正电子和一个中微子。它的反粒子，带负电荷的 π 介子会衰变成一个电子和一个难以捉摸的粒子；我们就把这种粒子定义为反中微子。

狄拉克的工作指出，物理定律平等地对待物质与反物质。为精确起见，让我将电荷共轭操作定义为：将参与某一给定物理过

程的所有粒子分别用它们的反粒子取代的操作。例如，在电荷共轭变换下，两质子的碰撞就变成了两个反质子的碰撞。根据定义，电荷共轭并不改变粒子的运动和旋转方式。例如，电荷共轭变换下左手征的粒子为一个左手征的反粒子所取代。

对给定的物理过程施以电荷共轭操作就得到了所谓的电荷共轭过程。如果电荷共轭过程和它的源过程发生的几率相同，就说支配这一过程的物理定律是电荷共轭不变的。这样说虽然有些绕口，但却是自然并不偏爱物质也不偏爱反物质这一观念的精确表述（见图 3.6）。

就象可以想象镜子里的世界一样，我们也可以想象一个由反物质构成的世界。电荷共轭不变性意味着，如果我们的一个物理学家可以和反物质世界的一个物理学家交换看法的话，他们对物理定律的观点会是完全一致的。例如，由反电子、反质子和反中子构成的反碳原子有和碳原子完全一样的化学性质。由反原子构成的日常生活用品也和由原子构成的相应的物品有同样的性质。我们不能造出大块的反物质只不过是因为没有什么容器能装它们。

到 1956 年，电荷共轭不变性已为大量的实验所证实。但随着宇称不守恒的发现，奥默以及其他人自然会问电荷共轭不变性是否也可能不成立。

人们可以再次通过考察中微子来解决这个问题：电荷共轭不变性意味着反中微子也应具有纯的左手征。因此，实验物理学家就去“看”反中微子。他们发现它实际上是右手征的。弱相互作用还违背电荷共轭不变性！

非常奇怪，此时用纯理论也能解决这个问题。一个理论物理学家只需作几行数学推导就可以得出这样的结论：1957 年提出的描述弱相互作用的理论确实不具有电荷共轭不变性。这正显示了理论物理的一个最鼓舞人的方面，一个“好”的理论有它自己的生命，是受一种神秘的内在逻辑支配的。初看，宇称和电荷共轭的不变性是两个逻辑上无关的问题。然而，当我们在一个理论中

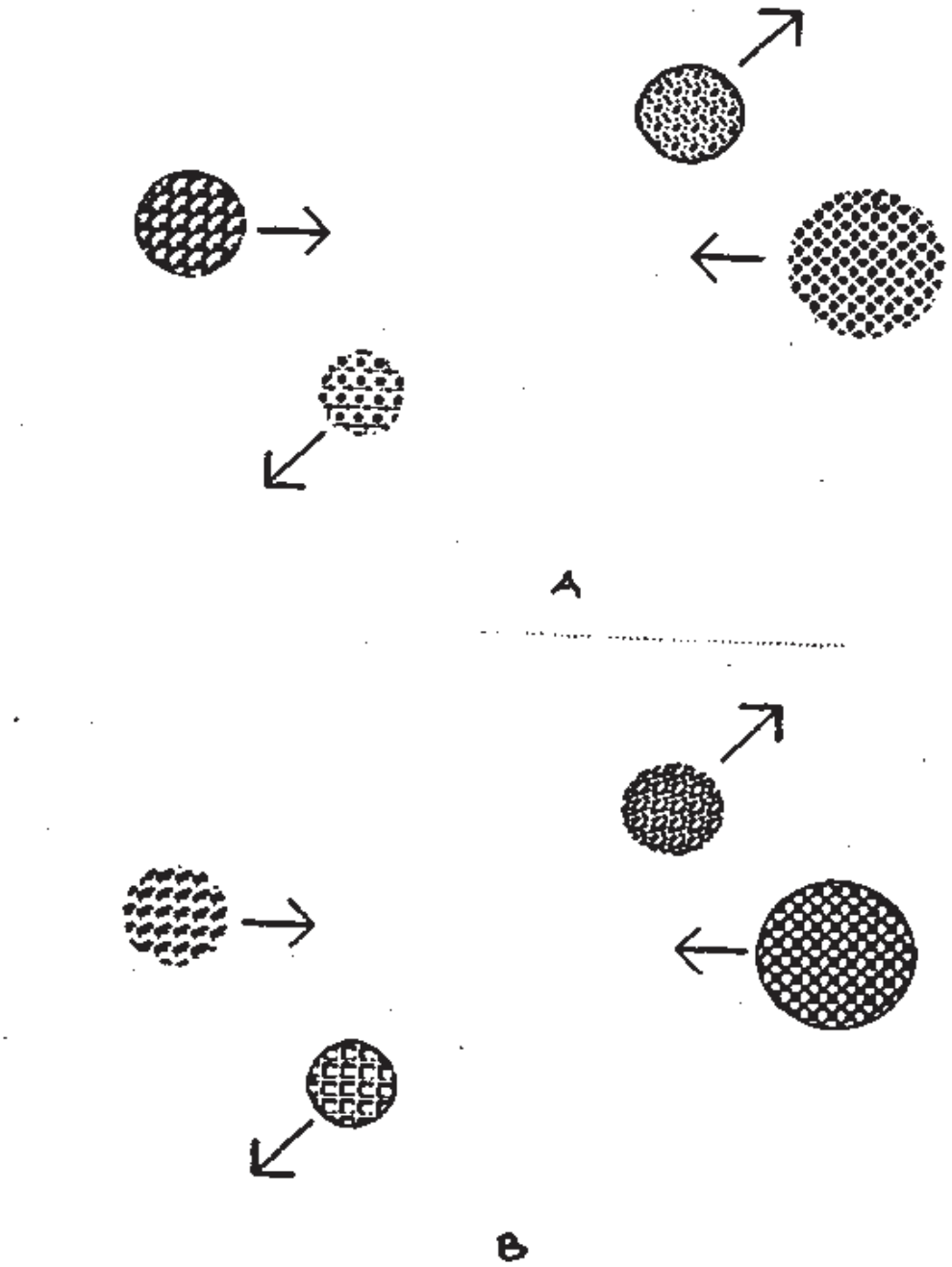


图 3.6 （A）两个粒子（较大的圆）碰撞后转换成两个其它粒子（较小的圆）的物理过程的示意图。
（B）图（A）所示过程的电荷共轭过程：对于某一粒子，艺术家用其图案的黑白反转来代表它的反粒子。电荷共轭不变性说图 A 中的过程和图 B 中的过程发生的几率相等。这精确地陈述了我们的世界不能与反世界相区分。

体现了宇称不守恒时（这个理论当然也考虑到了其它已经确认了的物理事实和定律），这个理论就会反过来告诉我们，电荷共轭不

变性也不成立。

物理学中伟大的理论中所包含的内容远比理论物理学家第一眼看上去所能想象到的多得多。从哲学上讲，说某个物理学家发明或者创造了某个理论是站不住脚的。更恰当的说法是他或她仅仅是发现了一个具有许多数学上的关联的、一直就存在的理论。有些关联可能立即就被注意到，但另一些则可能要隐藏数十年，或许——谁也说不准——永远也发现不了。

撩拨人的反常

自然同时违背宇称和电荷共轭不变性提示我们，如果建造一种奇妙的镜子，它不仅把左反射到右，而且还同时把物质变为反物质，那么，支配镜子里的世界的物理定律就可能和支配我们世界的物理定律相同。换句话说，尽管大自然违反了电荷共轭（简作C）不变性和宇称（简作P）不变性，但在组合操作CP下她可能是不变的。这种可能性在17世纪荷兰画家皮托·德·胡赫(Pieter de Hooch)的一幅作品中得到了艺术的体现。图3.7所示的这幅描写荷兰庭院的画仅仅在反射下并不能保持不变，但如果再让妇女转过身体，将明暗互换一下等等，就可近似保持不变。20世纪荷兰画家M. C. 埃希尔（Eschor）以他在反射再加上互换明暗的操作下保持不变的绘画（见图3.8）使物理学家们着迷。

面对P和C的破裂，物理学家们至少还能由相信CP不变性不会被违背来获得一点点安慰。但是，几年以后这块“安全的毛毯”也被抽走了。奥默与李政道和杨振宁合作给出了检测CP不变性的可行的实验方法。1964年，瓦尔·菲奇（Val Fitch）和詹姆斯·克罗宁(James Cronin)领导下的普林斯顿大学的一组实验物理学家宣布，他们看见了自然违反了CP不变性。那时我正在普林斯顿念大学，记得一天晚上一个教授把我们召集到一起，宣布了这个消息。每一个人都很激动，并为自然因犯了一个不得体的错误而再次被抓住感到震惊。自然如此撩拨人的反常大概是促使我



图3.7 皮托·德·胡赫，“镶有白釉蓝彩陶房子的庭院”，1658。这幅画使我想起了CP（电荷共轭和宇称）操作。在右边的妇女面朝我们，而在左边的妇女背朝我们。右边的妇女以明亮的调子呈现在暗的背景中而左边正走向一亮背景的妇女则呈暗的色调。（参见图3.6）

决定学物理而不是学艺术史的原因。

克罗宁、菲奇等的里程碑式的实验涉及到检测一种叫K介子的奇异子的衰变。基于量子物理学的分析预言，如果CP不变性成立，K介子将衰变成两个π介子。在大多数情况下，K介子确实如CP不变性所预言的那样衰变成两个π介子。但这些来自普林斯顿的耐心的物理学家注意到，在几千次衰变中有一次K介子会衰变成三个π介子！

作为一个理论物理学家，我对K介子衰变的细节本身的兴趣

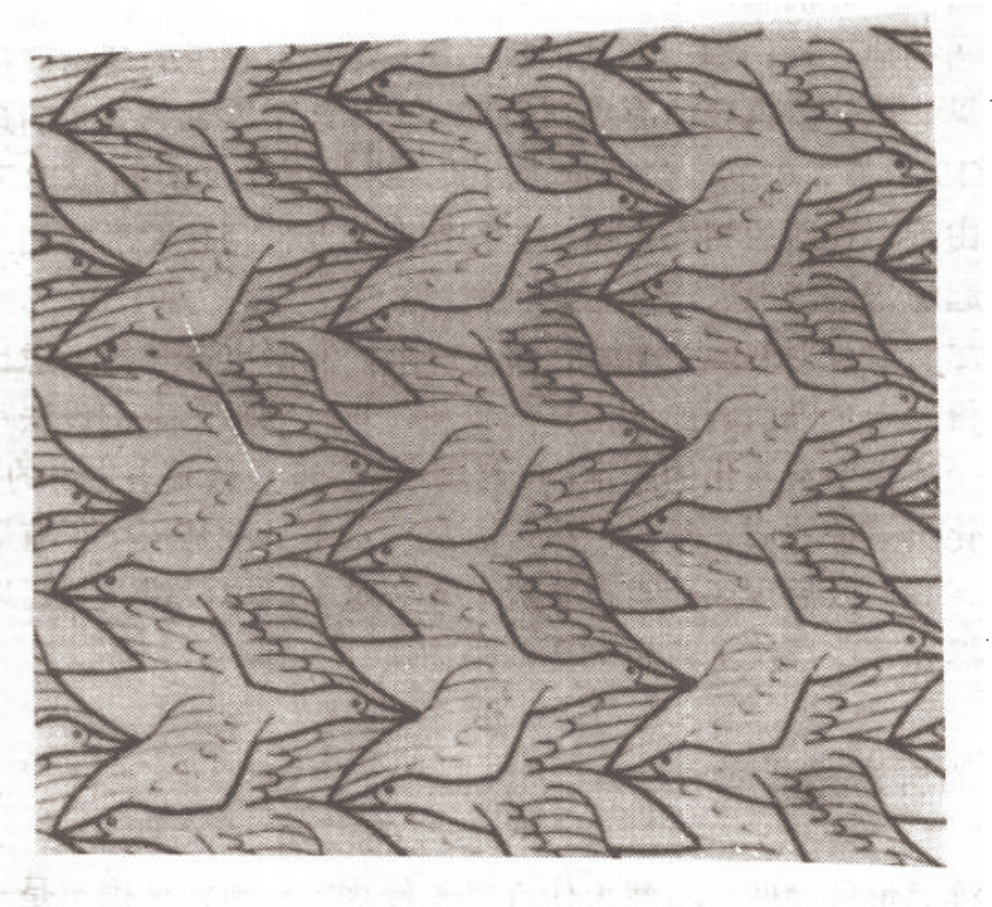


图 3.8　M. C. 埃希尔，“用鸟来规则分割平面的研究”，1938。

不会超过对一种很少听说的化学药品的化学性质的兴趣。使我感兴趣的是，自然又一次偏离了我们对她的期待。

宇称破坏尽管出人意料，但就所“看到”的每一个中微子都是左手征的而绝没有右手征的这种意义而言，它是普遍的和绝对的。在违背宇称不变性时自然所表现出的明晰的确定性，终归还是使某些理论物理学家得到了某种安慰。然而，让人烦恼的是，自然显得有些懒散，她只是隔很长一段时间才于一点违背 CP 不变性的事，弄得那些好探究别人隐秘的物理学家们不知所措。

自 1956 年以来，在每一个涉及弱力的过程中都观察到了宇称不守恒。然而，经过了 20 年的尝试，实验物理学家依然没有能在除 K 介子衰变以外的其它过程中发现 CP 不守恒。或许我们很快

就会听到新的消息。*

同样地，理论物理学家们也不能就 CP 不守恒的理论取得一致意见。虽然就象我前面提到的那样，体现了宇称不守恒的理论已于 1957 年完成了。包括我在内的许多物理学家认为，CP 不守恒是由于一种新的相互作用、一种比弱相互作用还要弱的相互作用引起的。但其他人不同意此种解释。

尽管缺少对 CP 不守恒的深入理解，根据宇宙学的考虑已经可以得到一个吸引人的结论。几年前，理论物理学家们设法写出了一个描写宇宙演化的剧本。按此剧本，宇宙是从无中生出的，然后演化出某种物质，最后产生了人类。这本身就是一个很有趣的故事，我们以后也还会再接着说。只要这个剧本没错，就足以说明自然在某些层次上肯定会更偏爱物质。

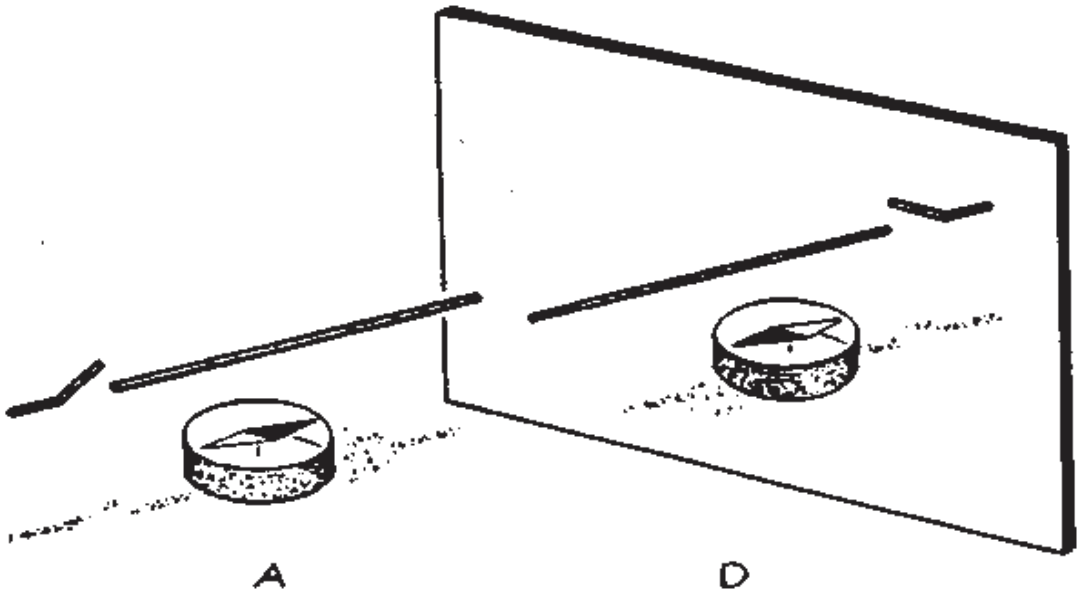
他所高兴干的

读者也许会问，自然为什么要去侵扰宇称呢？这确实是一个问题，但谁知道答案呢？自然就象通常的笑话中的怪物一样，高兴干啥就干啥。

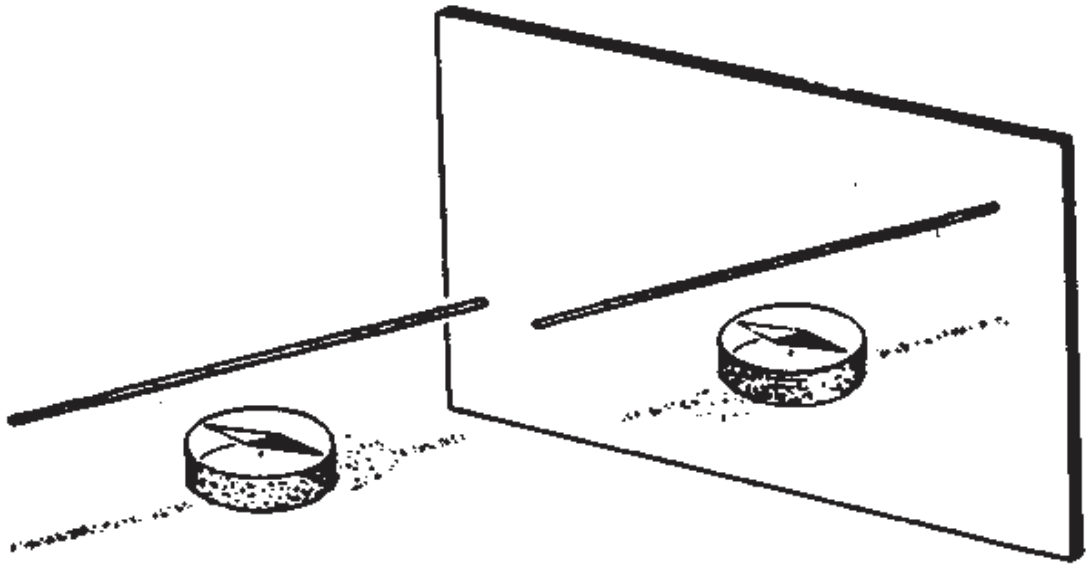
我也算这样的物理学家中的一个，他们仍然深深地感到自然实际上还是尊重宇称的。《纽约时报》关于宇称的社论使用的标题是“表象与实在”。这个社论的作者是否在通过这一标题来暗示这家报纸持的是自然只是看起来违反了宇称不变性这样一种高见呢？或许这个社论的作者作了某种浮士德式的交易，他或她所泄露出的要比所知道的少得多。

奥地利哲学家和物理学家昂斯特·马赫（Ernst March）曾经给表象和实在作过美妙的说明。以受到列宁的攻击而闻名的马赫是一个极端的实证论者，他潜心于研究由物理学所提出的哲学问题，他所作的冥思深深地影响了爱因斯坦。马赫写到，在儿童时

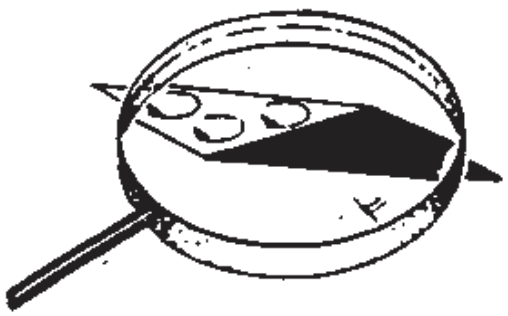
* 已经有新消息了，据说在涉及 Bottom 夸克的过程也已观察到 CP 不守恒。



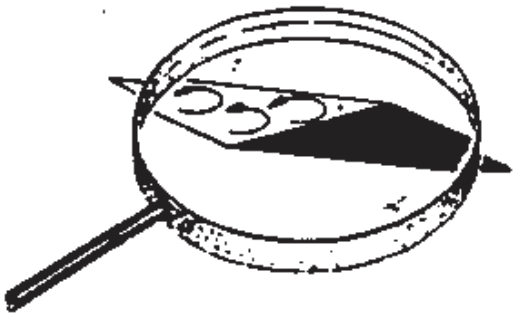
A　　D



B　　E



C



F

图 C、F 中标志电子旋转方向的回线有误。

图 3.9 深深地困扰少年马赫的现象：在图 A 中沿罗盘的指针方向置一导线，导线的两端接上一个电池（未画出）。开关断开时表明导线中没有电流流过。在图 B 中开关合上了，电流沿导线向远离镜子的方向流出。流经导线的电流会使罗盘指针偏转这一事实很使马赫不解。他坚信自然既不会偏爱右边也不会偏爱左边，因而罗盘的指针应该保持不动，否则将表明自然会偏爱某一边。考虑到镜子里的世界所发生的事这个谜就更难解了。（见 D 和 E）习惯上很多罗盘的指针都涂有两种不同的颜色以区分南端和北端。为了明确起见，艺术家把南端画成了白色的。在我们的世界电流是从镜子流出来的，而在镜子里的世界电流是流进镜子里去的。面对镜子站着使电流流向你，你会看到罗盘指针的南端会指向你的左边（B）。然而你在镜子里的像看到的是，罗盘的指针的南端指向他的左边，虽然他看到的电流也是流向他（E）。

然而，这种震撼人心的宇称不守恒只不过是一种幻觉。如果我们象艺术家在图（C）画出的那样微观地考察图 B 中的罗盘指针，就会“看到”，罗盘指针的磁性实际上是来源于许多沿同一个方向旋转的电子，如果我们从上往下看它们是顺时针旋转的，艺术家用三个回旋线来表示。哪一端是南端哪一端是北端是由电子的旋转方向决定的。这个佯谬现在通过考察镜子里的世界的罗盘指针（E）获得了解决。由于镜子的反射，（E）中的罗盘指针的电子的旋转方向在从上往下看时是逆时针的，如图（F）所示。因此，在镜中的世界，涂成白色那一端实际上是北端。黑白色的标记使我们错误地把北端当成了南端！换一句话说，在上一个自然段的最后一句话中“南”字应该换成“北”字，镜中的物理学家看到的是罗盘指针的北端指向了他的右边。

一个更深刻的理解是否也会揭示我们今天在弱相互作用中观察到的宇称不守恒也是一个幻觉呢？

代，当他知道一旦在罗盘旁的导线中通上电流，罗盘的指针就会转动时（见图 3.9），他的心被深深地扰乱了。因为实验的安排是完全对称的，罗盘指针应该是既不偏这边，也不偏那边，而保持不动。年少的马赫因宇称看起来被破坏而感到不安。但是，如果我们微观地检测一个磁体，就会发现它只不过是一片所有电子的旋转方向都沿一个方向排好的金属，电子旋转的方向指着罗盘指针的“北极”端。假定我们垂直于导线放一面镜子并爬到镜子里去，我们就会发现，在镜子里的磁体中的电子旋转方向反转了，因而镜子里的磁针的南北极互换了。对图 3.9 的仔细研究表明，事实上电磁学是尊重宇称的。困扰少年马赫的宇称不守恒只是一种幻觉。

先是魏尔，后来还有杨振宁，以马赫的理性的创痛作类比，提出在更深层次的理解下，我们可能会发现自然确实是尊重宇称的。

我相信他们是对的。确实，有几个理论物理学家已经提出了一些看上去可行的方案，在这些方案中，自然在更深的层次上将显示她是公正地对待左和右的。在后面的章节中我们将讨论其中的一些方案。

在我们观看一幅东方地毯的时候，它的所有左右对称性都会一览无遗。我们还要继续寻找自然为我们织出的花毯的精细的对称性。就象作艺术鉴赏一样，对称性越精细就越能让我们觉得愉悦。

II

爱因斯坦的遗产

第四章　时间与空间的联姻

理性的基础和惊人的结论

有几乎整整300年的时间，物理学家对对称性的认识还仅限于旋转和反射不变性。由于这两种对称都能立即觉察到，物理学家不会劳神费力去将对称当成一种基本的概念。确实，在20世纪以前的物理学中很少提到对称性。

1905年爱因斯坦提出了狭义相对论，这使我们对时间和空间的认识发生了一场革命。我认为爱因斯坦的理论第一次发现了自然一直在忍痛隐藏的对称性。就象我们在这一章将要看到的，要从自然的设计中辨认出相对论性对称性需要相当高的鉴赏力。

对物理感兴趣的外行人长期以来一直为爱因斯坦所得到的让人吃惊的科学幻想般的结论所吸引。然而，在本书中我要明确区分物理结果与物理理论的理性基础。

爱因斯坦的理论的理性基础是对对称性的威力的深刻理解，

正是在此基础之上，他才得出了这个理论的实际的物理结果。

是的，爱因斯坦给出的物理结果确实让人难以置信：质量与能量等价，时间与空间联姻。对此谁不会感到吃惊呢？因此，大多数介绍爱因斯坦工作的通俗读物要强调这些奇异特征是很自然的。但这样处理的结果往往失之于没能突出我认为是爱因斯坦的真正辉煌的理性遗产的东西，即，他对对称性的看法。是爱因斯坦使对称性得以成为现代物理的明星。

顺溪徐下

相对性的概念并非源于爱因斯坦，而是深深植根于我们对运动的日常感受。例如，在牛顿力学中就已经引入了相对性的概念。

伯克利主教（Bishop Berkeley）（1685—1753）这个怀疑在附近没人走过时森林深处的大树倒下是否会发出响声的人，担心人们不能在没有其它物体存在时判断一个物体运动与否。每个乘过火车的人大概都会有这样的经验：火车半夜停在一个黑暗的站上，你看一本杂志入了迷，没有注意到火车是否已经开动。当你抬头向窗外望去，看到旁边的一列车正在缓缓滑行。在没有引擎噪声和运动引起的振动时你能判断是旁边那列车在动还是你所乘的这列车在动吗？要回答这个问题，你只得去找一个建筑物，或者一个站台上的服务员。在其它一些寻常的场合也会有类似的经验，如，在跑道上滑行的飞机上，顺溪徐徐漂流的小船上等。宋代诗人陈与义（1090—1138）在一首描写一条小船在一有风的天出游的四行律诗中写到：

飞花两岸照船红，
百里榆堤半日风。
卧看满天云不动，
不知云与我俱东。

在这种情况下，诗人的运动的概念和物理学家的是一致的。对



图 4.1　当代艺术家再现 12 世纪关于运动的相对性的解释

诗人来说，把云描述成静止也是相当精确的。

伯克利主教的观点是，当我们说一个物体在运动时，实际上是指它和另一个物体之间的距离在随时间改变。火车上的乘客在看到站台工作人员退行时知道自己正在运动。

在通货膨胀的经济环境中，我们关心的是我们的收入是否相对于我们的邻居增加了。如果每个人的收入都以相同的速率增长，就没有谁能在经济上有所改善。如果我们相对于邻居的收入幸运地增加了，我们的邻居就会感到收入相对于我们下降了。因此，主教感到奇怪，既然说运动是因为一个物体和另一个物体之间的距离的改变，我们为什么就不能说是另一个物体沿相反的方向运动呢？总之，两物体间距离的定义并不偏向其中的哪一个物体。从物理哲学的观点看，火车上的乘客要说站台服务员、站台和与站台相连的整个地球都一道向后运动也是完全可以的。

从实际观点看，说火车在运动当然是更方便。但是，我们必须记住，“通常所用”的描述更方便的唯一原因是地球比火车大得

多。今天，通过电视实况转播我们能在家里看到在太空中抓着一颗失效卫星的宇航员。在这种情况下，宇航员和卫星的质量不是太悬殊。当这个宇航员推一下卫星时，我们看到他漂离这个卫星，但我们也可以完全等效地说，卫星正在漂离他。

在对运动的日常感受中，我们常常得到噪声和振颤的提示。但想象一下遥远将来的一艘在远离任何星系的太空中航行的宇宙飞船。由于到那时工艺已达到完美的境地，根本听不见引擎的噪声。从飞船向外看也只有黑暗的天空。我们怎样才能知道我们是在稳定行驶还是静止不动呢？按照伯克利主教的观点，我们是不能对此作出判断的。绝对的运动是不能定义的。

现在，假定我们看到另一艘宇宙飞船飞过来。是我们向着它运动呢还是它向我们运动？要说清楚不可能，所以这个问题没有意义。我们只能说我们的飞船在相对于另一艘飞船运动。

从某种意义上讲，我们现在就处在一艘高速航行的飞船上。我们的整个星系正以每秒 200 公里的速度（比子弹的速度还要快得多）向室女星系团运动。然而，我们都感受不到，这里无引擎噪声可言了。但是，是我们在运动还是室女星团在向我们银河系运动呢？

以一常速作相对运动是关键之点。只要宇宙飞船的驾驶员“加一下油门”，我们就知道我们在加速。对这点我们几乎每天都有体验。只要汽车一加速，乘客就会感到被向后拽。

所有这些伽利略都已经完全理解了，只是他谈论的不是宇宙飞船，而是旧式帆船。

把运动的相对性当作一种对称性

定义绝对运动的不可能性可被当作所谓的相对论性不变性的表现。就如宇称不变性告诉我们不能区别我们的世界与镜子里的世界一样，相对论性不变性告诉我们要区分静止和稳定运动是不可能的。为了避免以后混淆，让我们对此概念作一精确定义。

考虑两个相互以一个不随时间变化的速度作平稳的相对运动的观察者，我们将这种类型的运动称作常速运动。作为一个例子，我们可以设想一个相对于站台以每秒 30 英尺的速度平稳运动的火车。如果有一个坐在车厢后面的乘客以每秒 10 英尺的速度向车

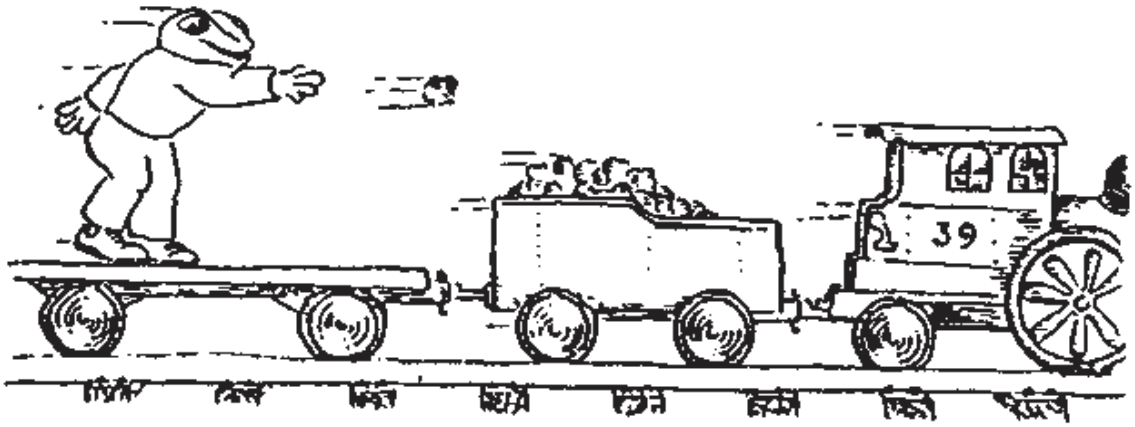


图 4.2　在一个以每秒 30 英尺平稳运动的火车上，一个司炉工以每秒 10 英尺的速度向前扔一块煤。站在地上，我们看到这块煤以每秒 40 英尺的速度向前飞行。

厢前面扔出一个球。对站在地上的站台工作人员来说，这个球的速度是多少？我们很多人凭直感就知道，对站台工作人员来说，这个球显然是以每秒 30＋10＝40 英尺的速度向前运动的。一般说来，由两个以常速相对运动的观察者所测到的每一个物理量，不管它是小球的速度还是一杯咖啡的温度，都有一个公式相联系。在我们的例子中，如果由乘客和站台工作人员测到的小球速度分别用 v 和 v′标记，火车相对于站台的速度用 u 标记，则有，$v' = v + u$。（对前面给定的数值，u 等于每秒 30 英尺，v 每秒 10 英尺，v′每秒 40 英尺。）联系两个不同观察者测到的速度、能量、动量、温度等等所有这类公式的全体被称为伽利略变换。

现在，假定两个观察者是两个想要决定物理定律的物理学家。比如说，乘客和站台工作人员都想确定支配小球运动的规律。相对论性不变性说，尽管两个以常速相对运动的观察者所测到的各种物理量可以不同，但他们都将得到同样的物理定理。因此，在

我们的例子中，尽管乘客和站台工作人员对小球有多快的看法不同，但他们必定都会得到小球遵从牛顿运动定律的结论。

相对论性不变性的这种定义以精确的语言表明，要指出两个相对运动的观察者中哪一个是在真正运动，从物理上讲是不可能的。如果在两个以常速相对运动的观察者看来，物理定律是不同的，那么自然就区分了这两个观察者。

在前面的章节中，我谈到了头相互倾斜的观察者，在镜子“外面”和镜子“里面”的观察者。在这一章中我谈论的是相对运动的观察者。在所有这些情形中，基本的对称性的观念是一样的。对称性问题就是问不同的观察者感受到的物理实在的结构是否相同。

关于运动物体的电动力学

由于强调了爱因斯坦理论的古怪的方面，某些科普读物使得相对论听起来要比实际上更神秘。事实上，相对论代表了由 19 世纪对电和磁的理解所形成的观念的合乎逻辑的、几乎是不可避免的进步。

如果不理解它的某些电磁学根源，要确切理解爱因斯坦的理论是不可能的。不管怎样，爱因斯坦以如今难见的谦虚，只是将他那篇创纪元的文章冠以“关于运动物体的电动力学”之题。因此，我想和读者一道去回顾一下电磁理论的历史。

青蛙与磁石

电现象和磁现象很早就为人所知了，奇妙的琥珀和磁石让古人着了迷。把琥珀放在皮毛上摩擦后它就能吸起碎发和纸屑。（小孩们都知道塑料梳也同样能行。）至于磁石，我们知道它是一块自然磁化的铁矿。古代中国人已经知道使用它来制造磁性罗盘了。

威廉·吉尔伯特（1544—1603），这个伊丽莎白一世的皇家物理学家是第一个辨别出电力与磁力的人，他的工作澄清了许多误解。从吉尔伯特以后，电现象和磁现象就被分别研究了。

进步是缓慢的和零散的。例如，路易十四的一个恃强凌弱的朝臣，也是当时的最重要的科学家夏尔·弗朗索瓦·德·西斯戴尔耐·迪费伊（Charler Fransois de Cisternay du Fay）为了让宫庭的官员们寻欢作乐，就让人身体带电从手指上放出火花。（那时的物理学家要更疯狂！）

1785 年，查尔斯·奥古斯汀·库伦（Charles Augustin Coulomb）（1736—1806）确定了两个带电物体之间的电力与它们之间的距离平方成反比。对电力的这种定量描述被称为库伦定律。

下一个进步是 1789 年解剖学家雷吉·伽尔凡尼（Luigi Galvani）（1737—1798）在解剖一只青蛙时“偶然”发现的。他发现，用两种不同的金属接触青蛙的两腿时蛙会抽搐。我们现在知道，这是因为有一个电脉冲穿过了蛙的两腿，动物可以产生电流。确实，我们的神经和肌肉都是由电脉冲控制的。

随后，生物学家考恩特·亚历山德罗·伏打（Count Alessandro Volta）（1745—1827）又迈出了把生物学和物理学分开的决定性的一步。伏打证明，电的产生并不必依赖于青蛙，青蛙可以用一种化学液体代替。把两个金属片插进装有适当化学溶液的槽内就会产生电。电池就这样诞生了。

由于电池提供了可控制的电流，物理学家就可以系统地研究电和磁了。1819 年，汉斯·克里斯琴·奥斯特（Hans Christian Oested）（1777—1851）大概是出于偶然，发现当电流流经一条导线时，附近的罗盘指针就会摆动（见图 3.9）。就象我们曾经谈到的那样，奥斯特所发现的这一表面上违背了宇称不变性的现象，曾深深地困扰过少年马赫。电流能产生磁场！电和磁是有关的。于是物理学中立即又出现了一个新术语：电磁学。

奥斯特的惊人发现开创了一个科学和技术都以让人眩目的步伐进步的最让人激动的时代。想象一下，在伽尔凡尼的那只青蛙

丧生后不到100年，人们就能够打跨越大西洋的电报。在大体是从1825年到1875年的50年中，象电极、电动机和发电机一类的东西都被发明了。这些东西提供了现代文明的基础。

让我们回到物理学。发现电和磁这两种现象有关又引出了许多新问题。

在奥斯特的实验中，是电流使得磁体运动，那么反过来会怎样呢？让磁体固定，通有电流的导线会运动吗？答案是肯定的。利用这一现象可以制造电动机。

如果奥斯特的发现证明电可以产生磁，那么磁能产生电吗？如果让磁体绕导线运动，会在导线中产生出电流吗？答案也同样是肯定的。运动的磁体产生电。

物理学就是这样在飞速发展。我们可以想象维多利亚时期的物理学家如何在实验室中用导线、磁铁和伏打电池（早期的电池），以火一样的热情尝试着用所有可能的手段去揭示自然的一个又一个的秘密。

力场就在你周围吗

在这一时代的所有物理学家中，迈克尔·法拉第（Michael Faraday）（1791—1861）常被认为是最伟大的一个。他不仅在实验室里显示了他的天赋，而且还把“力场”或简作“场”这一重要而又内容丰富的概念引入了理论物理。

和当时的大多数物理学家不同，法拉第并不是生长在一个舒适的环境中，而是出生于一个狄更斯式的贫穷的家庭。他先给一个书店当听差，后来升为学徒。在包装一套“大不列颠百科全书”时，他被偶然发现的一篇关于电的文章吸引住了。在维多利亚时代的伦敦，常有公开的教育讲座，一般是每次收费1先令，但对这个年轻人来说这还是太贵了。幸运的是，著名的汉弗莱·戴维爵士（Sir Humphred Divy）开始在新落成的皇家研究所开设免费讲座了。它们很大众化。接受了教育的公众对科学的兴趣很浓，



图 4.3　迈克尔·法拉第（根据原始的肖像画绘出）。力场用一些箭头来表示，这些箭头指明了，如果把一个带电粒子放到箭头所在处，这个粒子所要运动的方向。

电确实给公众充足了电。（在许多国家中，这种举办免费讲座的传统一直坚持至今，我所知道的大多数物理中心都夸口，有一两个激进的外行人定期参加讨论和学术会议。）

法拉第虔诚地听着这些讲座，并且终于有机会接近了戴维。再幸运不过了，戴维当时正好需要一个实验助手，并且他几个月后

到欧洲各科学中心旅行还将把法拉第带上。所以，法拉第最后还是受到了令人羡慕的教育。狄更斯式的剧本就此完结了。然而，戴维太太极为势利，她坚持要法拉第和仆人一起吃饭，总是把事情弄得很不愉快。法拉第还得常常干一些该贴身男仆干的事。不过，从科学和其它方面看，这还是一次激动人心的旅行；当时拿破仑正在全力进行战争，作为“敌国科学家”，他们得靠“卫兵护送”穿过封锁线旅行。

戴维的年轻助手很快就建立起了自己的声誉，新的发现一个接着一个，并且压过了他的恩师。嫉妒是一种很强烈的人类情感，师生之间很快就滋生了不合。其中一件事是戴维试图阻止法拉第成为皇家学会的会员，但失败了。凭自己的成就，法拉第为荣誉所包围。这位谦虚的学徒拒绝了爵士的封号和皇家研究院以及皇家学会主席的职位。即使是戴维也不得不承认，发现法拉第是自己的最大成就。

但是，法拉第所发现的、今天每个看过星际战争影片的小孩都知道的力场是什么呢？

按日常生活的经验，我们倾向于认为，只有象推一扇门那样，当两个物体有接触时才能施加力。牛顿的万有引力定律已经引入了力的超距作用的观念。但是，这种“超距作用”的概念深深地困扰着许多思想家。这意味着，不管在什么时候，地球都必须同时“知道”太阳的位置和“感受”到相应的力。电磁学现象所显示的这种超距作用就更引人注目，尽管为空间隔开，磁体间还是存在相互作用这一事实深深地吸引着儿童，也同样吸引着物理学家。

和他的许多先辈和同辈一样，法拉第也在苦思这个哲学问题，并且在最后得到下面的图像：

他提出，电荷产生了一个围绕自身的电力场。当另一个电荷被引入这个电场时，这个电场就会对被引入的电荷施加一个作用力，其大小遵从库伦定律。

这种图像的要点是电场被看成一种独立的实体：电场是由一

个电荷的存在产生的，并不依赖于是否引入了另一个电荷来感受这个场的影响。类似地，也可以想象一个磁体或电流产生了一个磁场。因此，法拉第引入了一种中介物：两个电荷并不是“直接”相互作用的，而是各自产生一个电场，它们再各自作用到另一个电荷上。

一个实用主义的物理学家容易认为这种图象一点也不增加我们的知识，因而对之不屑一顾。确实，法拉第的看法在任何意义上都不能算是对库伦定律的解释，而只是用另一种方法重新表述了这一定律。法拉第假定一个电荷产生的电场强度随距离的下降遵从库伦定律。

但上面这种看法忽略了这样一点，法拉第的图像的实际内容就象已经被证明的那样，在于电磁场不仅可以被看成独立的实体，而且就是独立的物理实体。例如，物理学家们后来就知道，谈论电磁场的能量密度是有明确的物理意义的。就象我们将要看到的那样，场的观念在苏格兰人詹姆斯·克拉克·麦克斯韦（James Clerk Maxwell）（1831—1879）手中结下了硕果。

电讯，法国哲学家和鸽子

由于是半路出家，法拉第也有一个自己也承认的盲点——数学。他不能把自己直观的想法转化为精确的数学语言。与此相反，一个显贵家族的后裔麦克斯韦则受到了他那个时代所能提供的最好的教育，因此能够用精确的数学语言来完美地综合电磁学的全部成就。但在开始他的工作以前，麦克斯韦却下了这样一个结论：“在通读法拉第的《电学实验研究》之前，没有在这一学科（电学）中看到一点数学。”

当代某些年轻理论物理学家非常迷恋数学，他们大概会很重视麦克斯韦的评论。麦克斯韦确实是把法拉第的缺陷当成优点的。他写到：

> 因此，法拉第以他透彻的理解、对科学的献身

> 精神和实验上的经验，避免了重复那种曾使法国哲学家们取得过成就的思维过程，并且只得用一种自己的符号主义的方法来对自己解释这些现象，而不是采用一种至今为止学者们一直还在采用的语言。

这里，麦克斯韦是用“符号主义”来指实际上是被法拉第称作“力线”的场的说法。更早一些的时候，麦克斯韦说过，“〔法国哲学家〕泊松（Poisson）和安培（Ampère）〔对电学〕的处理方式技术性很强，谁要想从这种处理中获取帮助，就必须在数学上受过彻底的训练。已经成年的人再进行这种训练是否有益是很值得怀疑的”。确实，今天理论物理学引入深奥复杂的数学的速度，使许多“成年的”物理学家对麦克斯韦的话深有同感。

理论物理的美国学派传统上强调物理直觉，而以牺牲数学上的严密为代价。我将避免探寻这种强调的历史和社会根源，这既是哲学的长处，同时也是它的短处。总的说来，欧洲物理学家在现代数学方面要比他们的美国同行受到更强有力的训练。法国哲学家，现在指的是法国物理学家，在许多美国人看来仍是不可理解的数学化。当然，被一代人当成是空想的东西常常被他们的下一代当成是起码的。泊松等人所用的数学在今天看来犹如儿童游戏，并为每个学物理的大学生所熟知。

上帝说要有光，就有了光，但光是什么呢？

在上世纪中叶，麦克斯韦已经掌握了关于电磁学的全部知识。一个世纪的艰巨实验的最后结果已经被提取和总结成以各个研究者命名的定律。麦克斯韦把它们全部汇集到了 4 个被称为麦克斯韦方程组的数学式子中。这些方程给出了电场和磁场如何按空间和时间变化。例如，一个方程是说，在磁场随时间变化时电场如何随空间变化。它同简洁的数学语言表达了法拉第的电磁感应定律：当磁体绕一导线转动时，就会产生一电场，此电场推动导线中的电荷运动就产生了一个电流。另一个方程是说围绕一个电荷

的电场如何随距此电荷的距离下降，因此重新表述了库伦定律。

正如一个面对一桩复杂刑事案件的侦探。他花了几周时间来收集证词，最后坐下来检查这些证词是否相互一致。嗯，男管家的证词不可能全真。但是……哈哈！如果男管家说的是上午 12 点而不是下午 12 点的话，那么每件事都能解释通了。麦克斯韦也同样是坐下来问他写下的 4 个方程是否相互一致。嗯，这个不可能对——它和其它三个相互矛盾！麦克斯韦高明地注意到，只要稍稍修改一下这个爱生事的方程，这 4 个方程就都能和睦相处了。

用这 4 个正确的方程武装起来后，麦克斯韦就能走得更远了。凭着一时的灵感，他获得了物理学中的一个真正让人吃惊的发现：电磁波的存在。概略地说，如果我们处于一个电场随时间变化的空间区域，那么在邻近的空间就会产生磁场。这个磁场也是随时间变化的，它又产生电场，就象投进池塘的石子激起的水波一样，电磁场以波的形式传播出去，电能和磁能相互转换。

麦克斯韦可以由他的方程精确地算出电磁波的速度。在他那个时代，光的速度已经由陆地上的实验和天文观察精确地测出了。从理论上得到的电磁波的值和测到的光速值极其相符！因此，麦克斯韦推断，光这种神秘现象只是电磁波的一种表现形式。从此，光学作为物理学的一个领域被归属到电磁学研究之下。

从牛顿和惠更斯（Huygens）开始的物理学家所总结出的光学定律，全部可以由麦克斯韦的方程组推出。以前，人们的眼光只限于电磁波谱的一个很窄的窗口，以后，所有形式的电磁波都属于我们的研究范围。电讯从此诞生了。

物理学家们常常用电讯的诞生来说明为基础研究提供资金的重要性。容易想象，那些负责安排改进通讯的基金的皇家海军的官员会认为，支持那些成天在昏暗的实验室围绕青蛙腿和导线瞎忙乎的怪人是愚蠢的。官员们显然会觉得把钱花在饲养良种信鸽上会更合算。

麦克斯韦的发现结论性地表明了场的物理现实性和独立性。我们周围的空间确实充斥着许多匆匆忙忙来回穿梭的电磁场。最

初源自法拉第一闪念的场的概念已经变得无处不在了。近几十年来，物理学家们已经接受了所有物理现实都可用场的术语来描述这样一种观念。我们以后也还要谈到这种观念。回想一下物理学家们在哲学上隐约地对超距作用的假设感到不舒服是如何引出了场的概念是很有趣的。

大问题

让我们再回到爱因斯坦和相对论性不变性。那是在19世纪末，物理学家们理所当然地要为他们成功地理解了电磁学而骄傲。现在可以向爱因斯坦和其他物理学家提出一个价值6万4千美元的问题了。* 我们已经看到，牛顿力学在伽利略变换下是不变的，或简称具有伽利略不变性，那么，麦克斯韦方程也具有伽利略不变性吗？

为了回答这一问题，让我们再回过头去看那列以每秒30英尺的速度平稳运动的火车。假定乘客不是向前扔出一个球而是射出一束光子。如果用C来标记火车上的物理学家测到的此束光的光速，那么，伽利略不变性告诉我们，在地上的物理学家测到的此束光的光速应为C加每秒30英尺。

且慢！我们应该还记得麦克斯韦是能由他的方程算出光速的。

这些方程综合了奥斯特等人的实验结果。例如，其中一个实验就可以是测量以这样或那样的速度变化的电场产生的磁场的强度。但是，不管是火车上的物理学家还是地上的物理学家，在做奥斯特的实验时都应得到完全相同的结果，否则，他们感受到的就会是两种结构不同的物理实在。接下来这两个物理学家可以请他们各自的搞理论物理的同事来按麦克斯韦方程计算光速。如果

---

* 美国电视常有一种智力测验节目。受试人在答对一个问题之后可选择领取奖金和继续回答下一问题。若下一问题回答正确则奖金加倍，若不正确则无任何奖励。6万4千美元是答对所有问题，也即是最后一个问题的奖金。因而常用此来指最后也最难的问题。

这两个理论物理学家都够格的话，他们应该算出同样的结果。因此，如果麦克斯韦方程是正确的，那么，无论是火车上的观测者还是地上的观测者测到的光速都应该是一样的！光的这种奇特行为表明，物理学不可能是伽利略不变的。

麦克斯韦的方程组迫使我们得出一个和日常生活的直感极不相符的结论：所观测到的光速与观测者的运动速度无关。假如我们要去追赶一个从我们身边呼啸而过的光子。我们坐进宇宙飞船，开动引擎直到速度表指示的速度达到了光速的十分之九。但让我们大吃一惊的是，当我们向窗外望去时，那束光子还是以光速呼啸前进。光子真是一个无与伦比的田径明星。

关键点是，光速是自然的内禀性质，是从随时间变化的电场会产生磁场和随时间变化的磁场也会产生电场推出来的。反之，如果在我们的例子中被掷出的是一个球，它的速度就会依赖于投掷者的肌肉力量和投掷的倾角。

爱因斯坦和时间

物理学不是伽利略不变的。那么是什么不变的呢？

为了回答这个问题，我们还得再回去看一看对称性。对称性由逻辑上不同的两个部分构成：不变性和变换。要说物理定律是不变的，我们必须指出使得物理定律保持不变的变换。对旋转对称性来说涉及的变换是旋转；对反射对称性来说所涉及的变换是反射。在讨论旋转和反射对称时，相应的变换是什么并没有什么问题，所以我们没有强调对称性的这两个不同的部分。例如，严格地讲，我们应该说，在 1956 年以前我们相信物理学在通常被称作反射的变换下是不变的。

在讨论相对论性不变性时，我们已经假定相应的变换是伽利略变换。面对电磁学在伽利略变换下不是相对论性不变的这一结论，一个蹩脚的物理学家可能会打算放弃相对论性不变性的说法。但这好象又不妥，因为光速是不变的。面对这种含混不清的评论

式的境况，爱因斯坦大胆地坚持物理学一定是相对论性不变的观点，而这又迫使他必须放弃伽利略变换。这样，抛弃的是一种具体的变换而不是相对论性不变性这一概念。

如果考虑到伽利略的速度变换是基于我们对时间性质的基本理解这一事实，就可以看出爱因斯坦想法的大胆了。让我们再回到那列火车。当我们说火车是以每秒 30 英尺的速度行驶时，意思是当对于站台服务员来说 1 秒钟流逝了时火车走了 30 英尺。当我们说球被以每秒 10 英尺的速度向前抛出时，意思是当对于乘客来说 1 秒钟流逝了时，此球相对于坐在火车上的掷球者向前运动了 10 英尺。牛顿和其它所有人都作了一个没有言明但显然合理的假定，即当对于乘客来说 1 秒钟流逝了时，对站台工作人员来说流逝的也严格地是 1 秒钟。这样一种时间被称为牛顿绝对时间。如果时间是按牛顿绝对时间给出的话，站台工作人员就会得出结论：在 1 秒钟流逝了时抛出的球向前飞行了 30＋10＝40 英尺。

因此，爱因斯坦只得舍弃所钟爱的绝对时间的观念，代之以常速相互运动的两个观察者感受到的时间流逝是不同的。

由于火车速度比光速小得多，所以乘客几乎感受不到绝对时间的不对。然而，在粒子加速器中，亚核粒子的运动速度接近光速，爱因斯坦的革命性的时间观念现在每天都得到验证。完成了相对论性不变性的数学描述之后，爱因斯坦就能够预言，在实验者看来，高速运动的亚核粒子的寿命要比那个此时相对实验者静止的粒子的寿命长。当我们说粒子是以高速运动时也同样可以说是实验者以高速相对于粒子运动。粒子在分解前能生存多长时间是特定种类粒子的固有性质，但按实验者的钟所测到的粒子寿命则依赖于实验者相对于粒子的运动速度。相对运动的速度越快，所测到的寿命就越长。

不幸地，或者是幸运地，爱因斯坦的理论并没有提供一条通向长寿的捷径。火车上的乘客的寿命在用车站上的钟测量时变长了，但乘客自己体验到的寿命，即用火车上的钟测量到的寿命并没有变。事实上，相对论认为无论是乘客还是站台工作人员都不

处于比另一方更特殊的地位，在乘客看来，站台工作人员的寿命也变长了。每个人都觉得别人活得更长！

由于时间的这种奇特性质，引入“固有时间”是方便的和自然的。设想宇宙中的每一个粒子都带着自己的时钟，一个给定物体的固有时间被定义为由这个物体所带的时钟记录的时间。显然，固有时间是对时间流逝的仅有的一种有内禀性质的度量方式。例如，当物理学家们在一本教科书中列出某种亚核粒子的寿命时，他们指的是用粒子自身的钟测得的寿命，而不是实验者测到的寿命。如果是由实验者测到的寿命，还必须说明粒子与实验者之间的相对速度，这种寿命不是一个内禀的物理量，因此，会因不同实验而异。

就如我们前面说过的那样，对于一给定的时间间隔，固有时间总是比其他观测者测到的时间短。物理学家说运动使时间膨胀了。对我们每个人来说，自身感受到的时间总是比其他任何人感受到的短。在我们的例子中，乘客自己感受到的寿命要比站台工作人员感受到的短。观察者和被观察物之间的相对速度越大，观察到的时间和固有时间之比就越大。对于以最大极限速度运动的光子来说，永恒只是一瞬间。这正是驾驶高速汽车的人所梦想的。事实上，光子携带的钟是被钉死了的，光子的固有时间绝不变动。

光的古怪行为让公众惊讶和着迷。关于时间相对性的最著名的诗大概是 A. H. R. 布罗（Buller）发表在滑稽杂志《混合甜饮料》（Punch）上的一首五行打油诗：

小姐年轻叫明亮，
步子轻灵快胜光；
沿着相对论幽径走，
今早才出门，
昨日便已回。

诗人的纵情显得有些出格了：爱因斯坦的方程是禁止一个人在离开之前就返回的！能作得最好的就是象光子一样，返回时的固有时间与出发时一样。

16 世纪的时间和运动

明亮小姐的奇异旅行使我们想起了另一次著名旅行——麦哲伦（Magellan）的旅行。那次旅行，时间也和预期的有出入。在经历了 3 年的环球航行之后，麦哲伦的船队终于看到了一个葡萄牙岛屿。按航海日志，那是 1513 年 7 月 9 日星期三。但是登陆宴会很让人作难，因为岛上的人坚持说那天实际是星期二。这一为当今乘飞机旅行的人所熟知的时差现象确实让当时的知识界非常费解。这当然只是人们记录时间的一种习惯的结果，和相对论没什么关系。麦哲伦和那个葡萄牙岛屿上的人感受到的固有时间的差异在我们的时间尺度是觉查不到的。（实际上，麦哲伦在菲律宾就已经被刺死，但按学术上的传统仍然给他这个荣誉，虽然他在他发起的这次航行的半途已经死去。）

一种新的时间和空间的变换

物理学家们爱说，爱因斯坦把时间和空间归并成了“时空”。为了理解其中的含意，我们还得学习物理学家是如何描述时间的奇特行为的。

与历史学家记录一个事件的方法一样，物理学家也是通过指明所处的时间和空间来记录物理世界的事件，即指定与事件相应的 t，x，y，z 四个数。时间 t 是从彼此同意的某个事件开始测量的，这和西方历史学家通常把耶稣的生日作为时间的参考点很相象。其它三个数 x，y，z 标记事件在三维空间的地址，是从某个大家统一的参考点开始测量的。

在我们的例子中，对一个给定的事件乘客用 t，x，y，z 标记，站台工作人员用 t'，x'，y'，z' 标记。确定空间时间的变换定律就是给出联系（t，x，y，z）和（t'，x'，y'，z'）的数学公式。伽利略变换断定 $t=t'$，时间是绝对的。象我们已经看到的那样，爱

因斯坦被迫抛弃了伽利略变换。但是，只有当他找到另一个能使物理学在其中是相对论性不变的变换时，他对相对论性不变性的坚持才有意义。

在此，找出这种变换只是一个数学练习。只需要满足：(t, x, y, z) 和 (t', x', y', z') 之间的变换关系应使得两个以常速相对运动的观察者观测到的光速相同。引人注目的是，这个练习只需用到高中代数。确定时间和空间的变换是物理学史上最简单的计算之一！物理学家们把这种变换称为洛伦兹变换，以纪念荷兰物理学家亨德里克·安东·洛伦兹（Hendrick Antoon Lorenz）(1853—1929)。

在洛伦兹变换中，t' 不再象在伽利略变换中一样简单地等于 t，而是由一个包含有 t, x, y, z 的数学表达式给出（当然也应包括两个观察者间的相对速度 u）。当 u 和光速 c 相比很小时，我们可以期待 t' 近似等于 t。但一般地说，t' 不仅依赖于 t，还依赖于空间坐标 x, y, z。时间的变换依赖于空间。在同样意义下，空间的变换也依赖于时间。因此，时间和空间，空间和时间就联姻了。从此以后，物理学家就把时间和空间看成一家人，称作“时空”。

修正主义的力学

洛伦兹不变性是电磁理论的一个要求：光传播的特有方式。

麦克斯韦的全部电磁理论在洛伦兹变换下是相对论性不变的，或简作洛伦兹不变的，这大概并不足为怪。现在重要的问题来了：既然力学是描写粒子在时空中的运动，我们的新时空观显然要求修改力学，使之也是洛伦兹不变的。电磁学这个新学科迫使物理学家去修改物理学中原先被认为是最保险的一个较老的领域。这倒很象一部侦探小说，一个新线索最初看上去与案情毫无关系，但它最终还是迫使侦探去修改原先已经确信了的那些假设。

因此，爱因斯坦开始去修补牛顿力学，并且得到了一个关于能量特性的惊人结论。人人都知道 $E=mc^2$，但当时爱因斯坦是怎

么知道的呢？爱因斯坦发现，为了使力学在洛伦兹变换下保持不变，他必须修改能量和动量的定义以及它们之间的关系。

在牛顿力学中，能量正比于动量平方：一个物体运动得越快，它的能量就越大。当一个物体静止时，换一句话说，当它的动量是零时，它的能量就是零。爱因斯坦改变了这种关系，使得当一个物体静止时它还具有它的质量乘以光速平方那样大的能量：

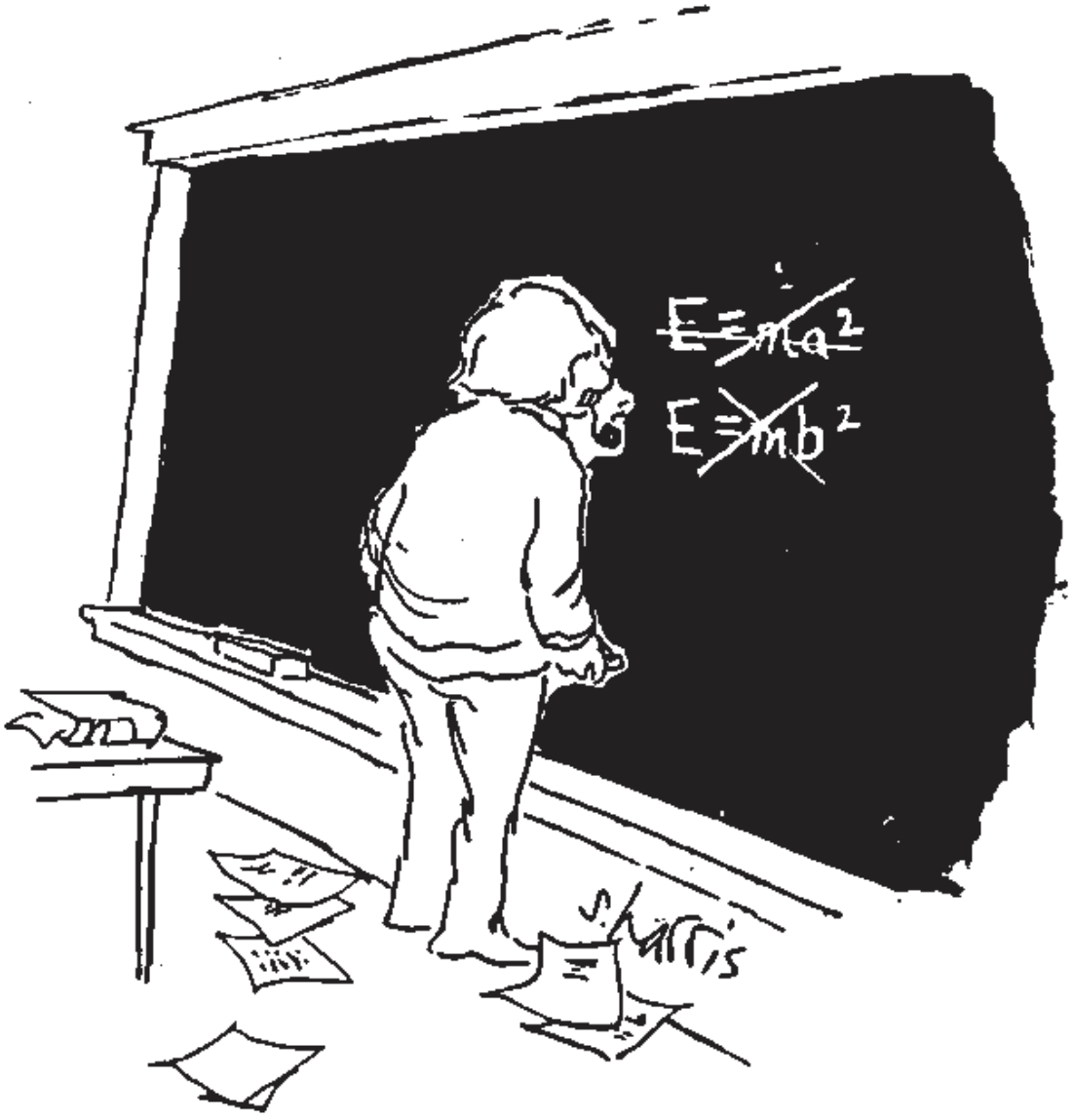


图 4.4 爱因斯坦是如何推导他的公式的？

$E=mc^2$。由于 c 比通常所能获得的速度大得多，这个所谓的静止能量远比牛顿能量大得多。

爱因斯坦的推理细节并不重要，重要的是通过逻辑的、一步一步的推理过程，人类理智能够发现自然的一个最深层的秘密。

请注意，爱因斯坦的公式并没有说如何释放隐藏在质量中的能量。在1938年，当两个德国物理学家奥托·哈恩（Otto Hahn）和弗里兹·斯特拉斯曼（Fritz Strassmann）试图劈裂一个原子核时，戏剧性地显示了释放这种能量的实际可能性。人类从此学会了释放包含在物质中的巨大能量。前景对我们立即变得不可把握和可怕。我们是利用爱因斯坦的公式去探索其它星体，还是用来毁灭我们居住的这个行星？全球的政治领袖们是否有勇气销毁或削减他们的核武库？我们会用静止能量去把人类从那些贫穷国家中的许多人一直还在忍受的繁重的体力劳动中解放出来吗？

象通俗读物中常常做的那样，把爱因斯坦的公式和核能等同起来是一种误解。总之，爱因斯坦是由研究物体如何运动来得到他的公式的，核物理根本没有进入他的推理。爱因斯坦的结论是根据时空性质推出的，所以可普遍应用于所有过程。事实上，在烧一截木头时，如果我们仔细地称量了木块、灰烬、炭碴和闪着火焰的热气的质量，就会发现，有一小部分质量消失了：它们被转变成能量了。爱因斯坦的公式不仅与核能有关，而且也可应用于我们的日常生活。我们可以这样说，虽然在1938年以前人类就一直知道如何释放隐藏在质量中的能量，但能释放出的能量非常微小。

爱因斯坦的发现对于研究亚核世界是很重要的。在前一章中我们就已看到，泡利就是用爱因斯坦的公式来推导中微子的质量的。在基本粒子的碰撞过程中，质量和能量的互换是很平常的。例如，两个能量很高的质子碰撞，除了这两个质子外，还可产生其它17个被称为介子的粒子。由于两个相撞的质子的能量转换成了介子的重量，这一过程质量并不守恒。在日常生活中，当两个弹子球相互碰撞时，其中之一可能会裂成碎片，但如果我们看到四散的弹子球碎片中还混有17支粉笔的话，一定会大吃一惊。

质量转化为能量的可能性也澄清了一个长期悬而未决之谜。在19世纪，物理学家们不能理解恒星为何能容纳这么多燃料来供它们长时间燃烧。我们现在就知道，恒星之火是以它的巨大的质量为燃料的。

内在联系：对称性的威力

虽然爱因斯坦的公式很重要，但从理性的观点看还是不如对称性的力量吸引人。对我来说，爱因斯坦的公式只是相对论的一部分歌词，而基本的对称性、相对论性不变性的观念则提供了音乐。

修改牛顿力学并不是应该由爱因斯坦做的事，它是洛伦兹不变性所要求的。在前一章，我谈到过物理学理论的内在生命在于它们有待发现的秘密的内部联系。现在这个故事就很好地说明了这一点。当我开始学物理的时候，给我留下的最深印象是：那些表面上看起来毫无关系的现象在更深的层次上却是有相互联系的。其它学科更接近于我们对世界的直观感受，因而可能会更有力和更容易理解。跋涉于山岭，我会被所见的景观迷住，对地质力作用的理解会给我快乐。然而，知道了我看到的如此宏大壮观的峡谷是远古河流凿出的后，虽然增加了我的理解，但并不让我特别吃惊。但物理学却能做到！恒星的长寿、光的奇妙、罗盘指针总指北和蛙腿的抽搐，所有这些都是相关的并受同一对称性原理统治这一点，才真正让我吃惊！

狄拉克1929年关于反物质的预言提供了对称性如何指导物理学家探索自然秘密的又一个著名例子。到20年代末期，物理学家们已经发现了支配原子中电子的薛定谔方程。薛定谔方程不是洛伦兹不变的，然而，由于在原子中运动的电子的速度比光速小得多，它能很好地描述已知的原子性质。但是，狄拉克象他以前的爱因斯坦一样，坚持认为所有的物理学都应是相对论性不变的。因而，他着手使薛定谔方程具有洛伦兹不变性。让他大吃一惊的

是，修改后的方程具有比薛定谔方程多一倍的解。经过一段时间的困惑后，狄拉克意识到附加的那些解是描述一个与电子性质相反的粒子的，这就是反电子，今天叫正电子；3 年后这种粒子便为卡尔·安德森（Carl Andesson）所发现。

一种对称性的发现比一种特定现象的发现意义重大得多。象旋转不变性和洛伦兹不变性这样的时空对称性，统制着整个物理学。我们已经看到，诞生于电磁学的洛伦兹不变性使力学也产生了一场革命。由于万有引力使得粒子运动，一旦粒子运动的定律被修改，我们关于万有引力的概念也必须改变。下一章我们将看到爱因斯坦如何试图使得万有引力是洛伦兹不变的并得到了更让人吃惊的结论。

走向统一

物理学家们梦想能对自然作一个统一的描述。对称性以它强大的力量把物理学中那些看上去毫不相关的方面捆在了一起，因而和统一的观念紧紧相联。电磁学的故事很好地表明了我们用走向统一一词所指的意思：一开始，发现电学和磁学各是电磁学的一个方面；后来，光学也成了电磁学的一个部分。

我在高中时读到的一本旧物理书说，物理学包括力、热、光、声、电磁和万有引力六个部份。事实上，到了 19 世纪末物理学只剩下两个领域了：电磁学和万有引力学。那时，“走向统一”的情况如图 4. 5 所示。走向统一可以说是从牛顿开始的，他坚持天堂的物体和天体受同样的定律支配，地上和天上的力学是统一的。后来知道了声是由于空气的波动引起的以后，又意识到它可用牛顿力学的概念来研究。在 19 世纪，神秘的热最后也被理解为分子的无规运动。象摩擦力这类的两物体间的机械相互作用被追溯到构成这两个物体的原子或分子间的电磁相互作用。如果力学指的是对粒子运动的描述，那么我们就可以说它已经被归属到其它相互作用的领域之下了。

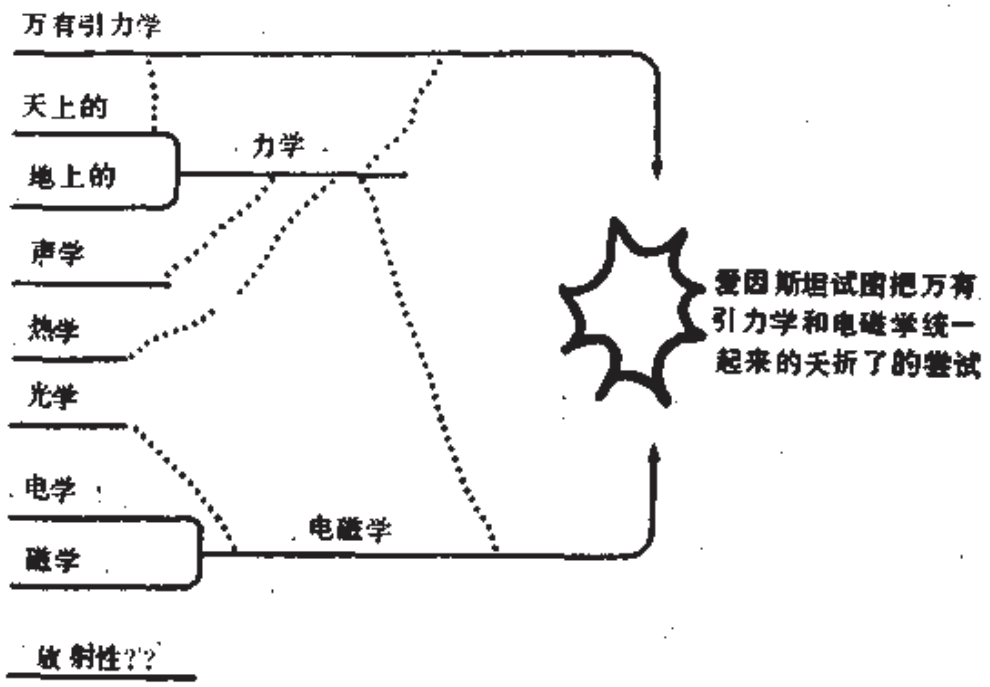


图 4.5 到了 19 世纪末，整个物理学被统归为两种相互作用：电磁学和万有引力学。刚被发现的放射性显得与此不适。爱因斯坦很自然地想要把电磁学和万有引力学统一起来。由于当时并不知道还有强作用和弱作用，他的努力当然就逃脱不了失败的厄运。

在第二章中我说到过，物理学家对自然探索得越深，自然就显得越简单。相对论性不变性就是说明这一奇特现象的一个例子。爱因斯坦的力学一旦掌握后，实质上要比牛顿力学更简单，可能会使读者吃惊。但在用过具有洛伦兹不变性的方程后，我就觉得牛顿力学的方程很别扭而且还残缺不全，无论是时间和空间还是能量和动量都没有被放在等同的地位。牛顿的方程不能使我愉悦是因为它们只是爱因斯坦的方程的近似。自然怎么会去关心一个拼凑起来的近似方程看上去是不是美呢？同样地，知道了电磁学的相对论性不变性之后，基础物理学家现在写麦克斯韦方程组就象写一个方程那样紧凑。当我还是一个学生时，在每次考试前我都得记麦克斯韦方程组。唔，让我们来看一下，一个随时间变化的磁场产生一个随空间变化的电场……那……它随时间变化吗？

有了相对论性不变性，就可以用一个方程来描述电磁场随时空的变化。我觉得这种有完整对称性的方程就象一个圆的形状那样容易记。

从实质上讲，高等物理比初等物理更简单——这是一个很少向外行人透露的小秘密。许多人被高中或大学物理难住了，因为他们所见到的只是与自然的内在要素，她的美、她的对称性和她的简单性没有多少关系的畸变了的唯象学方程。

第五章　幸福的思想

实在的结构不会变

1905 年，爱因斯坦以一个具有洛伦兹不变性的力学体系震撼了物理学界。但他的任务还没有完，物理学中还有一个研究得很清楚的领域——引力理论，还必须将其变成洛伦兹不变的。

爱因斯坦关于电磁学和相对论力学的工作，作起来就象热刀切黄油一样——至少回顾起来象是这样。与此相反，使牛顿的引力理论具有洛伦兹不变性的工作却难住了爱因斯坦，经过整整 10 年的奋斗，他才得到了他的常常被称为广义相对论的引力理论。

爱因斯坦的这两部分工作具有同样的理性起源，这就是把洛伦兹不变性强加给物理学。严格地说，相对论本身并不是一个理论，而是对物理学理论的一种要求。

许多物理学家认为“狭义”和“广义”相对论这种说法的用词糟透了。爱因斯坦后来也希望自己用的是“不变性理论”这一

说法。他对那些抓住“相对性”一词不放并将它和其他事情扯在一起的作家特别恼火。例如，小说家劳伦斯·德雷尔（Lawrance Durrell）声称他的代表作《亚历山大四重奏》（The Alexandria Quartet）的“四层形式”是基于时间和空间的相对性结构的。在《巴尔萨扎》（Balthazar）中，他声称相对论应对抽象画、无调性音乐和无格式文学负直接责任。要解释德雷尔和其他人为什么不用他们在艺术上的成就来为自己辩护，而要端出相对论来这一点，超出了我和其他理论物理学家的能力范围。又例如，有人就见到过如下荒唐的陈述，声称爱因斯坦证明了真理是相对的。事实上，如我们所见到的那样，爱因斯坦的工作的全部要点，在于不同的观察者应该感受到同样的物理实在的结构，这样就可以从中总结出不因人而异的真理。

幸福的思想和下沉的感觉

到1905年，导致法拉第和麦克斯韦得出电磁场的那种对超距作用的反感，也导致了物理学家开始用场来描述引力。类似于电磁学的情况，物理学家们也勾勒出这样的图像：一个有质量的物体，如地球，将在周围产生一个引力场；另一个有质量的物体，可以是一个球或月亮，感受到这个场并有相应的反应。

撇开用场表述的新公式不谈，牛顿的引力理论有200多年的时间没人碰过了，它顽固地抵抗爱因斯坦使它具有洛伦兹不变性的努力。突破性的想法出现在1907年，那时爱因斯坦正在伯尔尼（Bern）当专利职员。当被他后来称作“我的生活中最幸福的思想”突然进入他的脑海时，他正在专利办公室做着白日梦。

在解释究竟是什么使爱因斯坦这样幸福之前，我必然提醒读者一个关于万有引力的众所周知的事实。当伽利略（假定如此）从比萨斜塔上扔下两个质量不同的铁球并见到它们同时堕地时，他证明了具有不同质量的物体以同样的速度下落。如果没有空气阻力，一片羽毛和一个铁球将以同样的速率下落，这种看法让伽利

略和牛顿时代的人感到困惑，但它确是无可辨驳的真理。

从伽利略开始，许多物理学家，包括著名的19世纪后期的匈牙利人罗兰·洛朗德（Roland Lorand）、厄缶（Baron Eötvös of Várárosnamény）和近来的美国人罗伯特·迪克（Robert Dicke）以及俄国人弗拉基米尔·布拉津斯基（Vladimir Braginsky），都以日益提高的精度证明了关于重力的这一事实。牛顿通过假定作用在一个物体上的万有引力正比于它的质量，把这一事实综合进了他的理论。在牛顿力学中，在力F的作用下，质量为m的物体的加速度由著名的公式F＝ma给出，其中字母a代表加速度。因而在计算下落物体的加速度时质量被约去了。换句话说，牛顿把为什么物体都以同样的速率下落的问题转化为为什么万有引力正比于质量。在爱因斯坦着手建立一个相对论引力理论时，他坚持新理论必须能解释所有物体都以同样速率下落这一基本事实。

象理论物理中的许多深刻思想一样，爱因斯坦的这个幸福的思想是非常简单的，它是基于通常乘坐快速电梯时胃的感受。当电梯向上加速时，它的地板把我们的身体往上推，由于胃与我们身体骨架附着得不是很紧，所以就跟不上，会有短暂的向下“沉”的感觉。可能有人会争辩，不是胃沉向电梯地板，而是电梯地板“掉”向我们的胃。快速加速的轿车中的乘客以及太空时代的宇航员也会有相似的体验。

爱因斯坦想象一个象电梯一样的盒子浮在远离任何引力场的空中。在盒子中，各种各样的东西，不妨说是些铁球，也同样漂浮在这个完全寂静的太空中。假定这个盒子开始以一个常加速度加速，这些铁球会依然浮着，而无视这个盒子的“地板”正以越来越快的速度向它们冲来。但对于坐在盒子地板上的观察者来说，就象是这些铁球正掉向地板。接着这些铁球将在完全相同的时刻碰到地板。这和伽利略的观察结果一样。

爱因斯坦因此而得出了等价原理：在一个足够小的空间区域，一个观察者感受到的物理效应，与另一个在没有引力场情况下相对于他以常加速度运动的观察者所感受到的物理效应是不可分辨

的。换句话说，加速度会“骗”你，使你认为自己处于引力场中。所需的加速度当然依赖于所要“模仿”的引力场的强度。

请注意，爱因斯坦并没有说苹果下落是因地球向上加速。如果是这样，地球另一面的苹果将向上“落”。爱因斯坦仅仅是说苹果的下落可以用苹果树加速向上来等价描述。这就是要说“在一个足够小的空间区域”的原因。等价原理只能用于一个大小和方向都是均匀的引力场。在我们的例子里，围绕苹果树的空间显然没有大到需要考虑地球曲率的地步。就象我们在第十二章将要看到的那样，等价原理的这种局域特征对当代理论物理学的思想具有深远的影响。

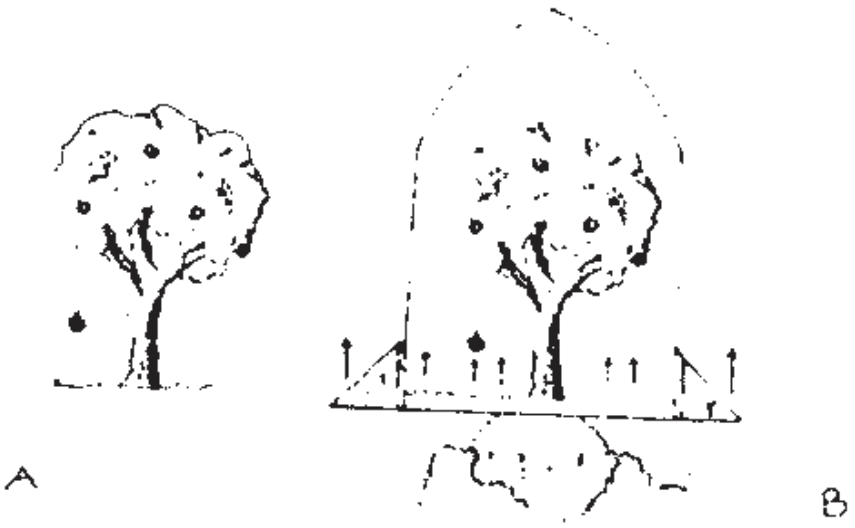


图 5.1　(A) 一个苹果从树上掉下来。(B) 一个疯狂的物理学家把一颗苹果树种在了火箭上，并把火箭开到太空中一个远离任何万有引力场的地方，然后使火箭以一个常加速度加速。一个浮在火箭外的观察者会说，火箭内的地神向上去接住了苹果，而一个在火箭内部的观察者会说是苹果从树上掉到了地上。爱因斯坦断言，没有一种物理测量能把 (A) 中的下落和 (B) 中的下落区分开来。

爱因斯坦的这个直觉使得物理学家们感到非常幸福。等价原理为我们进一步理解自然提供了一个强有力的、极省事的方法。例如，如果我们想知道在有 重力时的电磁学定律，以便研究光子在黑洞附近的行为，我们就该重复 19 世纪的全部实验，仔细地测量

重力对电磁学现象的影响。幸运的是，等价原理使我们幸免于此。我们只需要建立一个对一个以常加速度运动的观察者运用的麦克斯韦方程组就行了。

一般地说，一旦我们掌握了没有重力时的物理学定理，无论是支配水流动的唯象学定律还是支配中微子行为的更基本的定律，借助于等价性原理我们都可以立即得出有万有引力时的这些定律。

广义协变

爱因斯坦关于等价原理的最初的想法源自常引力场的情形，例如影响我们日常生活的重力。然而，大多数引力场并不是均匀的，地球的重力场随距地心距离的增大而减小，我们之所以觉得重力是均匀场是因为在我们的日常生活中和地心的距离变化不大。现在就让我们跟着爱因斯坦去看看如何把等价原理运用到一个随时空变化的引力场。

爱因斯坦的构想非常简单：把空间分成若干小区域，每个小区域都小到其中的引力场可以看成是常数，这和地理学家在绘制地图时处理地球表面弯曲问题所用的方法很相似。地理学家把地球表面分成若干小块，使得在地图使用者所需的精度内每一块都可近似地看成一平面。因此，一幅军用地图所覆盖的区域非常小。（当然地理学家还有其他技巧，如用等高线来标记局部地貌特征，但这里我们并不关心这种技巧。）

为了看清这种构想是如何实施的，假定我们正浮在深空中，远离任何引力场。如果要研究的是常引力场，我们知道该怎么办：雇一个助手，让他坐到以常加速度加速的宇宙飞船中去，把所见到的情况向我们报告。但我们现在要研究的是处于变化的引力场中的物理学，例如相互绕对方旋转的一对黑洞附近的物理学，见图5.2A。

多亏爱因斯坦的幸福思想，我们不必去作寻找一对黑洞的太

空旅行。爱因斯坦指示我们想象着把黑洞对周围的时空分成一些小区域，使得在每一个小区域中引力场可视为不变的和均匀的，然后让我们的思绪自由驰骋。在每一区域，我们都放置一个假想的飞船，然后雇用许多的助手把他们各派到一个飞船上去，并且按每一区域的引力场强度，以相应的常加速度开动每一个飞船（如图 5. 2B 所示）。（把时间分成小段的说法是一种虚构，意思是说，我们的实验过程必须足够短，以使得在这一过程中可以认为引力场没有变化。）我们现在只需读一下我们的助手们的报告，就可知道在相互绕对方旋转的一对黑洞的引力场中的物理学。

我们刚才所做的事被称为假想实验。我们根本用不着离开家，我们所要做的全部事情只是回答已知的物理学在一个作常加速运动的观察者看来会是什么样的。这是一个纯粹的技巧问题，对吧？实际计算只是一个相当直接的座标变换练习。

回想一下我们在前面的章节中是如何考察两个以常速度相对运动的观察者的。令 (t', x', y', z') 和 (t, x, y, z) 分别标记两个观察者看到的某一事件的时空座标，我们知道有一组被称为洛伦兹变换的公式可以把 (t', x', y', z') 用 (t, x, y, z) 表示出来。这里我们考虑的是两个相对作常加速运动的观察者，也应该有一组联系一个观察者所用的座标 (t', x', y', z') 和另一个观察者所用座标 (t, x, y, z) 之间关系的公式，显然这种关系依赖于两个观察者间的相对加速度。特别引人注目的是我们可以不必追究这组公式的细节，便能对以后的进展作迅速的了解。

在我的这个例子中，令 (t', x', y', z') 为我们的助手所使用的座标，(t, x, y, z) 为我们使用的座标。由于这是一个假想实验，用不着花一分钱，我们可以把区域分得很小并雇上成亿万的助手。当我们改变 (t, x, y, z) 时，或换句话说，当我们从一个区域移向另一区域时，我们就从一个助手移到了另一个助手。因此，座标 (t', x', y', z') 随 (t, x, y, z) 变化的方式依赖于给定的黑洞对周围引力场的特征。

一个引力理论必须能处理所有可能的引力场，因此我们得考

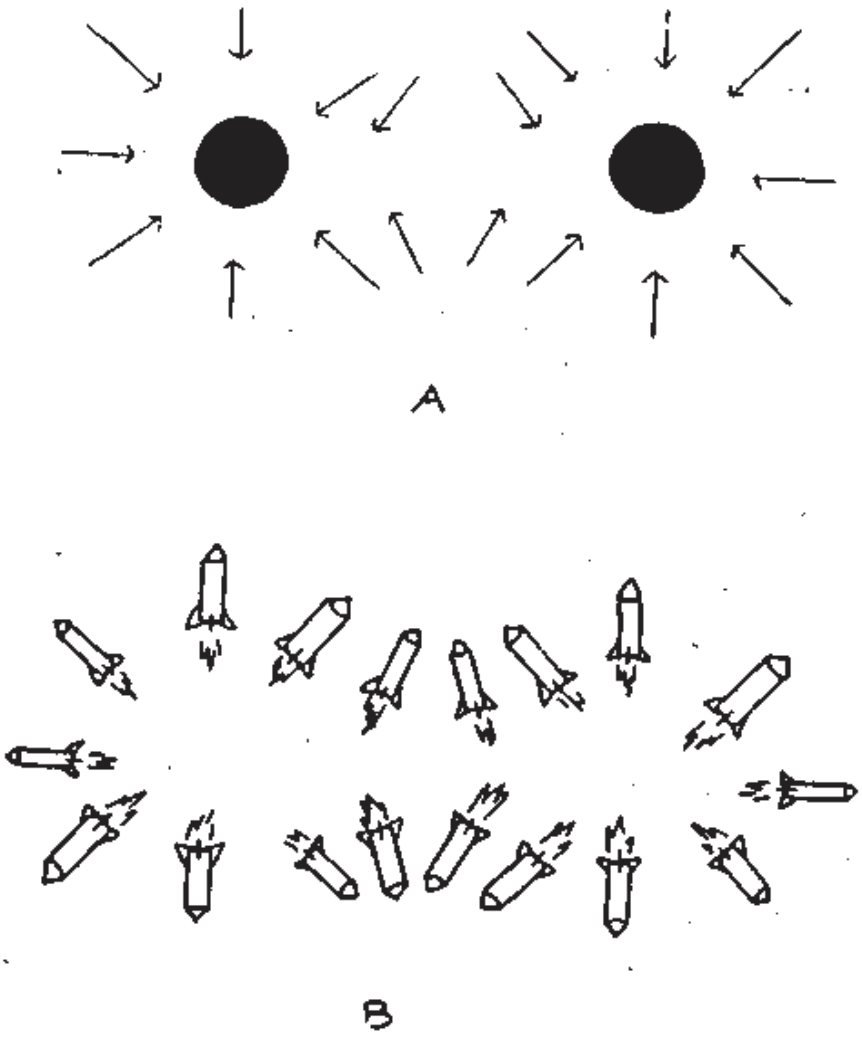


图 5.2 （A）两个黑洞周围的万有引力场：每一箭头所示的方向是在此箭头处放一物体时该物体的下落方向。
（B）根据等价原理，为了研究这两个黑洞附近的物理学，我们可以在远离任何引力场的太空中让许多火箭作加速飞行，并向每一火箭派一研究助手。当火箭的加速度和黑洞附近一点的引力场使一物体产生的加速度相反时，火箭内的助手所看到的物理现象就是黑洞附近这点的物理现象。

虑座标 (t', x', y', z') 依赖于 (t, x, y, z) 的所有可能方式。(t', x', y', z') 以一种任意的和一般的方式，即以任何我们乐意的方式依赖于 (t, x, y, z) 的 (t, x, y, z) 到 (t', x', y', z') 的座标变换，被称为广义变换。与此不同，在洛伦兹变换中两组座标是以特定的方式相联系的。

从所有这些我们能得出什么结论呢？假定我们要研究在任意引力场中的物理学。按前面的讨论，我们只需研究没有引力时的物理学，然后再简单地做一个广义座标变换。

爱因斯坦因此要求物理定律在广义座标变换下应保留它们的结构形式。这个基本要求被称作广义协变原理。

读者很容易想象，广义协变是如何限制了这个世界所可能有的理论。让我们来看实际运用时的情况。假定经过多年的思考和实验后，我们得到了一个典型的以方程形式表述的描述各种物理量如何随 (t, x, y, z) 变化的物理定理。但是，另一个物理学家走过来说他不喜欢我们用的这种座标，他愿意选用 (t', x', y', z') 来描述时空，(t', x', y', z') 与我们的 (t, x, y, z) 有什么关系要完全随他的愿意而定！并且，当我们把我们的方程用 (t', x', y', z') 重新表述出来后，它必须和原来的方程在结构上是一致的，必须具有同样的结构。大多数方程都经不起这种检验！因而都必须被排除。因此，如果我们接受广义协变原理，我们只需考虑有限的一类理论。

微妙的差别

作为对称性来说，洛伦兹不变性与广义协变性之间有着微妙的差别。洛伦兹不变性断言，两个作匀速相对运动的观察者感受到同样的物理实在，这是和旋转不变性情况一样的对称性。广义协变性当然不会荒唐地说作加速运动的观察者看到的也是同样的物理实在，它说的是，这个作加速运动的观察者，可以把他和未加速的观察者所体验的物理实在的差异解释成是由于一个引力场引起的。广义协变性是引力特性的一种陈述。杰出的美国物理学家史蒂夫·温伯格 (Steve Weinberg) 曾提议把广义协变性当作一种动力学对称性，以强调这种区别。在这本书中，我仍依照物理学家中的习惯，还是简单地把广义协变性当作一种对称性。

座标变换带给我们的不同感受

描述时空的座标选择和地图册中在一张平坦的纸上描述圆形地球的座标选择之间的类比在某些方面是贴切的，但在另一些方面容易引起可怕的误解。在一个标准的莫卡托（Mercator）世界地图中，靠近两极的区域被拓宽了。确实，我们大多数人渐渐地觉得在北大西洋有一块叫格陵兰的巨大陆地。制图学上与座标不变性对应的说法是：格陵兰的实际面积不可能仅仅依赖于它在地图上看上去有多大。反之，物理学家则坚持物理现实不能依赖于座标。

在最近的一个引人注目的工作中，德国历史学家阿诺·佩托斯（Arno Peters）强调了“欧洲中心”的莫卡托投影法如何扭曲了我们对地缘政治的感受。考虑到世界被划分为“富裕的北方”和“贫穷的南方”，佩托斯指出，由于大多数“贫穷的南方”处于赤道附近（经济历史学家会补充说这个事实正是“南方”贫穷的原因），在莫卡托地图中相对于“富裕的北方”来说，它们看上去比实际上要小。佩托斯发表了一幅新的真实反映各国面积大小的新型世界地图，在这种所谓的佩托斯地图中，世界看起来大不一样了。非常有意思，但也不足为怪的是，佩托斯写到，他的地图的发表在欧洲挑起了一场“制图学史上前所未有的热烈的公开讨论”。

引力理论

广义协变性是一个非常严格的要求。确实，正是因为这种严格性，爱因斯坦才找到了正确的引力理论。亏得有了他的幸福的思想，爱因斯坦才在1907年发现了描述有引力存在时的物理学的方法，这当然得事先知道无引力情况下的物理学是什么。那么，支配引力场本身动力学行为的物理学又是什么呢？

这个问题让爱因斯坦作难了几年，他得不到任何实验的指导，因为引力极弱，要对引力场的动力学作直接的实验验证，并不象鉴别引力场中运动物体动力学那样容易。

那么爱因斯坦能做些什么呢？

爱因斯坦自己的智慧产儿，广义协变原理急速地赶来救驾了。从历史上看，为理解广义协变原理，爱因斯坦着实烦恼了很长时间，但一旦理解了它，他几乎就能立即写出支配引力场的物理学。

这里是一个粗略的类比：假定要让一个建筑师猜测一个大厅的几何形状，除非有了诸如几张该大厅的局部照片之类的“实验输入”，他才能开始他的工作。但如果这个建筑师被告知，这个大厅在绕其自身中心旋转 60°的倍数的角度时保持不变——这确是一个强有力的信息，这个建筑师就立即能把大厅所可能的形状限制为六边形，十二边形，十八边形等等，最简单的猜测是六边形。在物理学中也是一样，加上一个对称性后立即就局限了可能性。在物理学家中有一个未言明的法则，要求在所有等效的东西中，选择最简单的一个——这个法则一直都很有效。

扭曲的时间和空间

爱因斯坦的工作中大概没有哪一个方面能比关于弯曲的时间和空间的奇谈更能扣住公众的想象力了，而实际上，时空弯曲的概念直接来自于等价原理。

看一看这个著名的谜语，一个猎人向南走了 1 英里，然后向东走了 1 英里，最后他转向北，在又走了 1 英里后回到了原来的出发点，并射中了一头熊。这熊是什么颜色的？

谜语中所给的距离和角度立即告诉我们地球肯定是圆的。一般说来，只要我们知道任意两点间的最短距离，就可以精确得出表面是如何弯曲的。当然我所讲的是实际的或内禀的距离，这与我们使用的是何种地图无关。廷巴克图和加德满都之间的实际距离，是一个乘飞机的旅行者所可能走的最短航程。

相似地，在物理学中，时空中任意两点间的内禀距离，只能是一个旅行者从一点到另一点所花费的固有时间。按照等价原理，一个处于重力场中的观察者眼中的物理学，与一个在无重力场情况下作加速运动的观察者眼中的物理学完全等同。我们已经知道火车上的乘客感受到的固有时间和站台工作人员感受到的是很不相同的。推而广之，一个正在加速的观察者将有另一种固有时间。因而，引力场的出现将改变时空中各点的相对位置。

假定我们手上有一张所有飞行时间都被人改动过的航班时刻表，如果注意到给出的从加德满都到廷巴克图的飞行时间实际上比从加德满都到新德里的还要短，我们就会得出结论，有人扭曲了地球表面，使它不再是球形的了。同样的原因迫使爱因斯坦得出了引力场扭曲了时空的结论。

光的弯折

时空的扭曲有一些出人意料的推论。在欧几里得几何中，两点间的最短路径是直线。但对一任意的弯曲空间，直线的说法不再成立。然而，谈论最短路径依然还是有意义的。就象一个要在弯曲的洋面上作航程最短的航行的航海家，被迫在空间划下一个弯曲的航迹一样，从遥远的恒星向我们飞来的光子，也会因经过太阳的引力场而被迫走一个弯曲的路径。

在 1911 年，爱因斯坦预言，在日全食时，掠过太阳旁的星光会被扭弯。(为使这种弯曲效应强一些，希望星光尽可能接近太阳，但为了看见太阳附近的星光，需靠日全食来遮住太阳的强光。) 由于引力极弱，所预言的弯曲只有千分之二度。(作为一个理论物理学家，1910 年那个时代的天文学家并不认为这是一个不可测量的小量，这一点给我留下了深刻的印象。)

看到等价原理如何不顾光子并无质量而强求引力必须影响它，是很有启发性的。让我们把一个研究助手麻醉到失去知觉，然后把他放到一个飞船中，并把这个飞船送向太空。我们以一个适

当的常加速度加速这只飞船，使得当这位助手醒来时还以为他仍在地球上。(记住，在这些假想实验中，我们不花一分钱，这架飞船的内部可以装饰得和这个助手的起居室一模一样!)现在我们要这个可怜的家伙把一束光射到墙上，由于飞船在加速，在光子到达墙面之前，墙已经“向上”(把飞船加速的方向称为“上”)运动了(见图 5.3)，因此这个光束将到达在飞船没有加速时它所应到达的那点之下的另一点。但这个助手认为他仍在地球的引力场中，因而得到了引力把光子往下拉的结论!

等价原理就是这样的：你可骗某人，让他认为自己处于引力场中，他所见到的物理就被(爱因斯坦)称为引力场中的物理。记住这点为下次愚人节用!

青史留名

> 他们说，要学会如何切割钻石得花三代人的时间，要学会如何制造钟表得花整整一生的时间，在整个世界仅仅只有 3 个人完全理解了爱因斯坦的相对论。但橄榄球教练要让人确信，上面这些技能没有哪一个在复杂程度上能与在全国橄榄球联赛中打四分位相比拟。我的意思是，钟表不会对你构筑防线，钻石不会发动闪电快攻，而爱因斯坦则可以成天地思考。$E=mc^2$ 不会改变模样。
>
> ——J. 默里，运动专栏作家，“洛杉矶时报辛迪加”
>
> 1984. 11. 4

尽管他在当专利职员时所作的冥想引起了物理学界的重视，但在 1911 年“爱因斯坦”还不是一个家喻户晓的词。非常有意思，当天文学家们要去验证爱因斯坦关于光的弯曲的大胆预言时，历史的偶然事件协力使爱因斯坦得以青史留名。第一次是在 1912 年，一场突发的暴雨洗劫了阿根廷日食考察队。后来一支得到强大财政支持的德国考察队到了克里米亚，准备观察将发生在 1914

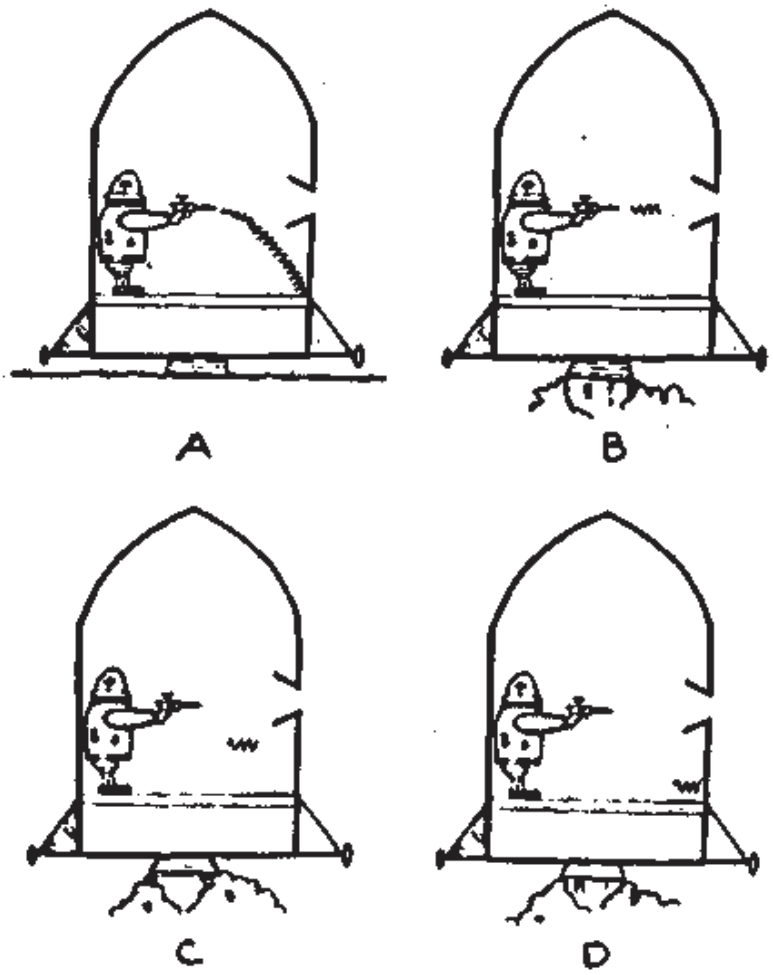


图 5.3 (A) 一个在一艘停放在密度极高的行星上的宇宙飞船上的机器人，瞄准对面窗口发射了一束激光。为了清楚起见，艺术家夸大了把光子往下拉的引力场的强度。
(B) 此飞船现处于远离任何引力场的太空深处，并以常加速度作加速运动。机器人瞄准窗口发射了一束激光。
(C) 在这束光飞向对面窗口时，宇宙飞船的地板也以越来越快的速度向上运动。
(D) 因而，这束光射不出窗户，而是射到对面的墙根。如果这个机器人有视觉的话，他会看到这束光的轨迹和图 (A) 中的是一样的，因而验证了等价原理。这个机器人说不清自己是处于静止的引力场中还是在作加速运动。

年 8 月 21 日的日食，但 8 月的枪声隆隆作响了。狂怒的爱因斯坦在写给一个朋友的信中说，“只是可悲的人的阴谋”阻止了他的想法得到验证。

事实上，爱因斯坦是幸运的。在 1915 年末，他发现自己犯了

一个错误。爱因斯坦（其它地方都正确）忽略了扭曲的空间的一个特殊效应，他原来预言的弯曲量只是正确值的一半。

1919年，战争结束了，两个英国考察队分别到了巴西和西班牙属几内亚（Guinea），他们对日食的观测明确地肯定了爱因斯坦的理论。如果历史不是这样，爱因斯坦会多少有些窘迫。这个理论的不可理解的神秘性和实验的明确的可理解性，征服了这个厌战的世界。新闻转向了一个与饥荒、布尔什维克和赔款无关的事件。伦敦《时报》以“科学中的革命/宇宙的新理论/牛顿的观点被推翻/重要宣言/空间被扭曲”为标题透露了这一新闻。《纽约时报》报道说，在这个世界上有12个（他们竟然数过了）聪明的人理解了这个新理论。爱因斯坦立即变成了著名人士，受到来自世界各地的领导人的接见。

扭曲的时间

尽管，时空可以被扭曲在1919年就已经确定了，但它至今仍然常常出现在那些带有科幻意味的科普文章里。引力扭曲时间在1960年由哈佛大学的R. V. 庞德（Pound）和G. A. 雷勃卡（Rebka）在一次陆地上的实验中验证了，他们试图证明在引力场中的不同点，例如在塔的顶部和底部，时间以不同的速率流逝。

庞德和雷勃卡不必到远处去找一个适合的塔，就象比萨斜塔一样，哈佛大学物理系也有自己的塔。利用等价原理作一简单计算，就可预言在连着哈佛大学物理楼的塔的塔顶和塔底的两只钟1亿年后将会相差1秒。要检验出如此细小的差别，庞德和雷勃卡必须最大限度地施展他们的才干。

这两位实验物理学家是用一个光子作时钟的。我们都知道电磁波以一定的频率振荡，正是这个事实使我们能选择自己喜爱的广播和电视节目。因此，以确定频率振荡的光子可用来作一个时钟。庞德和雷勃卡从哈佛塔顶往下发射一束光子，并在塔顶和塔底仔细地测量它们的频率。如果时间在塔顶和塔底以不同的速率

流逝，那么光子从塔顶传下时频率将会象实际所发生的那样会有微小改变。这个实验明确地肯定了爱因斯坦的理论。几年以后，庞德取笑说，当他把沉重的实验设备在塔中搬上搬下时才理解了引力的真正含意。

黑洞

因而宇宙中有一些极大的天体是看不见的。

——拉普拉斯侯爵皮尔·西蒙

足智多谋的实验物理学家一直在不断地验证和支持爱因斯坦关于引力的观点。不幸，在陆地上和太阳系附近的实验，由于牛顿的和爱因斯坦的理论差别太小而受到限制。只有在象黑洞周围那样的区域，两种理论才会有很大的差别。

黑洞抓住了公众的想象力。实际上，黑洞的想法既不新也不特别深刻。早在 1795 年，与法兰西观象局和国家研究所都有交往的德·拉普拉斯（de Laplace）侯爵，就提出过，即使是光也可能不能运动得快到足以逃离极端致密的天体。高密度的天体会把光拉回去。

光不能从一个高密度的天体逃逸是每个人都同意的明显结论，真正的问题是，这样一个物体是怎样形成的。标准的说法认为，是由一个大质量的恒星在燃尽它的核燃料后坍塌造成的。在 1939 年 J. 罗伯特·奥本海默（Robert Oppenheimer），G. 沃尔科夫（Volkoff）和 H. 斯尼多（Snyder）指出，一个质量足够大的星体不能阻止自身的坍缩，最终将达到拉普拉斯所想象的临界密度。这里牛顿和爱因斯坦有根本的不同。在牛顿力学中，人们可以说星体上的物质可以变得足够紧密以阻止坍缩。但是与这种紧密性相联系的是需要很多能量（注意压缩的弹簧会放出能量）。按照爱因斯坦的观点，这些能量等价为质量，又将产生一个附加的引力场，而这个引力场又加速了坍缩。按爱因斯坦的理论，即使从原理上讲，也不能防止黑洞的形成。

不听话的人

在几英里的距离内，大地平坦理论和大地球形理论的差别是可以忽略的。但随着一个人旅行的距离越来越长，两种理论的差距就变得越来越大，直到最终绕了地球一周之后，他就会发现两种理论是完全不同的。与此相似，当我们把宇宙看成一个整体时，牛顿和爱因斯坦的理论就完全不同了。由于在爱因斯坦的理论中空间是弯曲的，我们就可以象环球航行一样环宇宙航行，乘上一个飞船，保持一直向前（即走最短路径），经过极久远的时间后，就可能回到原来的位置。在这种情况下，宇宙是有限的，被说成是“封闭的”，就象一个球那样弯曲。宇宙也可能象马鞍一样弯曲（想象马鞍无限扩展出去）。在这种情况下，宇宙是无限的，一个空间旅行者可以保持永远向前而不会重回任何他曾经到过的地方。这种宇宙被称为“开放的”。

显然，天文学家不能通过直接观测来确定宇宙是开放的还是封闭的。与古希腊人确定地球是平的还是圆的方法相似，物理学家和天文学家需要把直接观测的结果和间接的物理推理相结合，以作出最好的决断。就读者的知识而言，立即能得到的证据倾向于宇宙是开放的。

1917年，在提出引力理论不到两年之后，爱因斯坦又在物理学中开辟了一个激动人心的领域：现代宇宙学。经过了上百万年的进化，人类心智终于可以超越星系而去理解宇宙本身了！爱因斯坦意识到，既然天体的运动都受引力支配，那么一个完整的引力理论应该能够告诉我们整个宇宙的动力学。

今天，天文学家告诉我们，宇宙充满了均匀分布的星系。1922年俄国的亚历山大·弗里德曼（Aleksander Friedmann）解出了一个由物质均匀填充的宇宙的爱因斯坦方程，证明了宇宙要么在膨胀，要么在收缩。

我们可以想象这种说法会引起什么震动。宇宙总被想象成不

变的或永恒的。确实，爱因斯坦本人也是如此墨守静止宇宙的观点，以至认为自己的宇宙方程是不完整的。在1917年的文章里，他实际上已修改了他的方程，以允许其有静止解。料想他后来会把这一改动称为他一生中“最可悲的错误之一”。

在陪审团制定爱因斯坦犯有不相信他自己的理论的罪之前，我必须赶来提醒陪审团注意，在1917年天文学家的知识相当有限。在当时他们甚至还没有确定，除了我们银河系外还有其他星系存在。但进步是非常快的。

到了1929年，放弃了律师职位而去研究天文的美国天文学家埃德温·哈勃（Edwin Hubble），确定了星系间是相互背离飞行的。到了1935年，宇宙正在膨胀已成了天文观察的事实。1946年，乔治·伽莫夫提出了宇宙产生于大爆炸的想法。

这个想法其实很简单。我们想象着把宇宙膨胀的电影倒着放，这样银幕上看到的星系就是相向着飞行。最后，所有的粒子都聚到了一起。突然胶片断了。如果我们再把电影正过来放，就会看到宇宙中的所有粒子都是从一点爆炸式地冲出来的。大爆炸的图像成功地解释了观察到的某些宇宙特性。

对于爱因斯坦的错误，有一个很难理解的脚注。1917年，爱因斯坦在他的理论中加上了一个被称作“宇宙常数”的项，使得宇宙“停止”了膨胀。既然宇宙确实在膨胀，宇宙常数这一项就不该有。但是，直到目前为止，也还没有一个人能找出一个理论上的论据来证明这一项不该有。这一困难，即“宇宙常数问题”，是今日物理学中最深刻的未被解决的问题之一。

神秘的迷宫

爱因斯坦的错误再次说明，在一个伟大的物理理论的内部结构中，含有它的创造者都梦想不到的秘密。理论应该指引理论家，而不是反过来。爱因斯坦的理论就把我们从乘电梯时胃下沉的感受引导到宇宙的膨胀。这和只被简单地构建来“解释”具体现象

的唯象学理论形成了鲜明的对照。那些制作这种理论来拟合数据的理论物理学家，从中得到的东西和他们放进去的一样多，是他们指引了他们的唯象学理论，而不是反过来。这种唯象学理论可能有很强的实用性，但是关于其它现象，如果说它们还能告诉我们点什么的话，也只是很可怜的一点点，我对它们基本上不感兴趣。

它必须是

爱因斯坦的理论，以它使人敬畏的完美，为理论物理学树立了一个典范。这个理论的出发点植根于日常生活经验，但它的结论却和直感大相庭径。只要给出所有物体都以同样速率下落，人类理性就能建立一个理论。由此理论，象时间的引力畸变、宇宙的演化一类的原来只有神仙才知道的黑色秘密，就会自然地、逻辑地流露出来。

爱因斯坦的引力理论带有一种不可避免的意味。一个特定的理论只有唯一可能的一个，这种说法对物理学来说还是新的。例如，牛顿说两物体间的万有引力与它们的距离平方成反比，从纯逻辑的角度看就显得有些任意，为什么这个力不与距离或距离立方成反比呢？

牛顿并不认为这个问题是不可回答的，他提出的定律只是简单地陈述依照对现实世界的观察得到的结论。所不同的是，一旦爱因斯坦确定广义协变是必须的，引力理论就完全确定了。

爱因斯坦的首席传记作家阿伯拉罕·派斯（Abraham Pais）曾贴切地评论说，如果说爱因斯坦的狭义相对论以其完美性使人想起莫扎特的作品，那么他的引力理论则充满了贝多芬作品的力度。贝多芬作品第 135 号最后一个乐章题有："Musz es Sein? Es musz sein."（它必须是吗？它必须是。）艺术就其完美性来说，必定有一种必然性。

完美的艺术肯定是不能被更改的，有谁敢，或更进一步，有

谁想过要重写贝多芬的第九交响乐呢？在理论物理学中这种结构更严密。物理学家不象音乐家那样尊重权威，一代代物理学家是带着要改进爱因斯坦理论的眼光来摆弄他的理论的，但没有一种方法能在不放弃广义协变原理的前题下，对这个理论作实质性的修改。在对称的美学原理下人们可以修饰爱因斯坦的理论，但不能更改他的结论。



图 5.4 理解了艺术的必然性的两个同胞。

第六章　对称性统治设计

一个睿智的、年长的同事曾经对我说，他每隔10年看一遍托尔斯泰的《战争与和平》，而且每一次都觉得它是一本不同的书。最伟大的文学巨著具有不同层次的含意：它们所告诉读者的东西依赖于读者的经验和情感。我在10岁时天真地认为《威尼斯之死》是一本关于谋杀的侦探小说，但后来发现不是这么回事后就失望了。长大以后，我吃惊地发现，作品中含有非常丰富的符号主义。

在高中时我并不是仅对刑事侦探小说感兴趣。一天，我找到了一本讲述爱因斯坦理论的科普小册子。象一个典型的门外汉一样，我被爱因斯坦博士的宇宙的稀奇古怪的方面所吸引。后来到了大学，在我掌握了足以理解爱因斯坦理论的物理和数学知识后，我惊叹他所涉及到的数学的精巧，而把那些奇怪的结论看成是他的理论的完美的逻辑结论。但是随着我学到的物理越来越多并开始做研究时，才最后意识到爱因斯坦留给我们这一代物理学家的真正遗产，只不过是做物理的一种新方法。

基础物理的发展框图

为了欣赏爱因斯坦的洞察力，让我们先来回顾一下19世纪理论的精华——电磁学理论发展的脉络。

经过摆弄青蛙腿和导线，物理学家看到自然的行为有一定规律，并且可由一组方程来描述。这些方程一旦写下就唱出了一首歌，它耐心地等待有人来听。最后，一个聪颖的年轻人走来了，听出这些方程在说它们是洛伦兹不变的。然后这个年轻人又意识到这个对称性要求对整个物理学进行修改（关于电磁学和狭义相对论发展的图解见图6.1）。

在爱因斯坦完成狭义相对论之后，他和他的同时代人赫尔曼·闵可夫斯基（Hermann Minkowski）还明白了，图解中的箭头也可以倒过来。假定在黑夜里被秘密告知这个世界是洛伦兹不变的，我们能不用进实验室一步就推出麦克斯韦方程并因此推出电磁学的事实吗？

在很大程度上我们能！洛伦兹不变性是对自然的一个强有力的限制。麦克斯韦方程是如此复杂地为这个不变性所关联，以至于只要给出其中之一，我们就能推出其它的来。

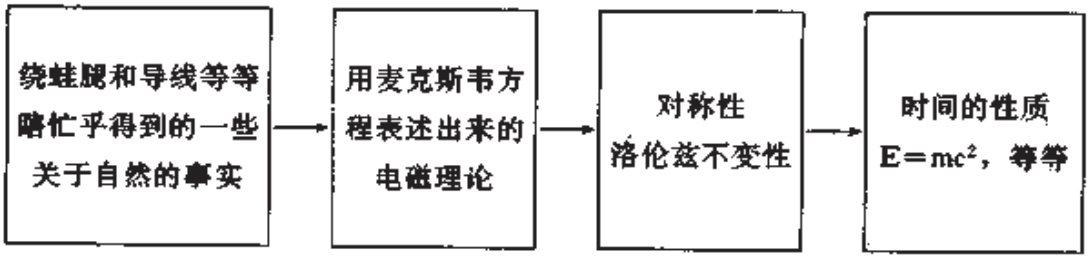
下面就让读者品尝一下所涉及到的推理的味道。

我们被给定了一个联系时间与空间、电与磁的对称性。假定我们知道了麦克斯韦方程组中的一个方程，比方说是与库仑定律相应的那个方程，你可能回想起了库仑定律是描述一个电荷产生的电场是如何随着离开它的距离下降的。换句话说，我们有了一个描述电场如何随空间变化的方程。在洛伦兹变换下，这个方程精确地演化为描述电场如何随时间、磁场如何随空间、以及相应的其它麦克斯韦方程。

这种对称性讨论的实质也可以简洁地表述出来：既然这种对称性把时间和空间统一成时空，电场和磁场统一成电磁场，一个单单描述电场随空间变换的方程就不能成立。确实就象我们在第

四章中说到的，这样的方程只能是描述电磁场随时空变化的统一方程的一个部分。建筑学上也有类似的情况。如果建筑师被告知房间具有六角对称性，而且他又得到了一面墙的照片，那么他就能明白无误地推出整个房间的设计式样。在物理中，涉及到的数学更复杂，但指导思想还是一样的。

在菲力浦·罗斯（Philip Roth）的《幽灵作家》中，有一个人物是一个著名的作家，他告诉另一个人物说，他总是在午饭前写一个句子，午饭后，他就轮换这个句子，他的一生都花在在头脑中翻来复去倒腾句子上。在很大程度上，理论物理学家也一样是在他们头脑中反复倒腾逻辑结构。因而，爱因斯坦和闵可夫斯基意识到可以把图 6.1 中的箭头反过来，把对称性当成出发点。

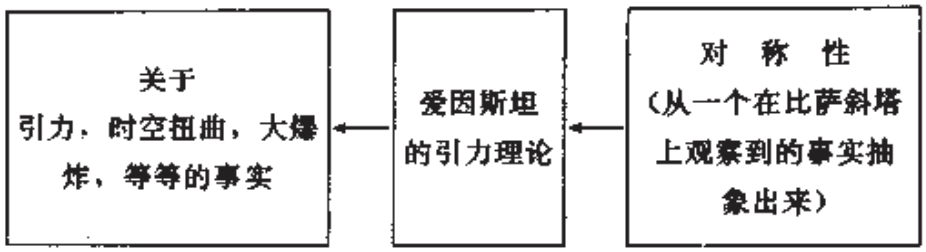


19 世纪基础物理学发展框图

图 6.1　大量的实验事实被总结成方程，而这些方程又揭示了自然设计中用到的一个对称性。一旦看出这个对称，又引出了一些新的如质量转换为能量一类的可从实验得到验证的事实。这些新事实和电磁学中的事实间的联系并不是很明显的。

一次俯冲捕食

爱因斯坦领悟了对称性的威力，并把它用于发展自己的引力理论。他不是根据五花八门的实验事实吃力地总结出这个理论并从中找出一个对称性，而是提出一个足以决定他的理论的对称性。他的工作程序如图 6.2 所示。



20 世纪基础物理学发展框图

图 6.2 爱因斯坦在发现他的引力理论时所遵循的逻辑过程。请与电磁学和相对论的发展过程相比较（图 6.1）。

对称性使爱因斯坦找出引力理论只是一蹴而就的事，只需一次俯冲就捕到了他所要的引力理论。为了能对此作出评价，让我们来看看如果物理学家们象他们中有些人试图做的那样，按照 19 世纪的方法来研究引力，情况会怎样。经过对行星轨道进行多年的仔细研究，天文学家得注意到它们与牛顿定律所预言的有极其细微的差异。为了对此作出解释，物理学家将对牛顿的引力定律作细小的修正。更仔细的研究又表明这还是不行，物理学家们又被迫对牛顿的引力定律作更细小的修正。但是，即使物理学家们能正确确定所有的修正项，要看出所有这些修正可以组合起来，产生出一个完全不同的理论，在数学上也还是一个天才的突破。而处于中间阶段时，这个理论是一个复杂的大杂烩。这就好象一个建筑师设计了一个方形建筑，而他的委托人实际上是想要一个圆形的。每次建筑师提交图纸，委托人都要要求作一些改动，但拒绝告诉建筑师他究竟想要的是什么。这个建筑师不断地改动他的方形的设计。终于，当设计变得越来越圆时，他可能会意识到委托人想要的是圆形的设计。

夜晚的声音

我认为爱因斯坦对对称性如何支配设计的理解，是物理学史上真正深刻的见解。今天的基础物理基本上是遵循爱因斯坦式的工作程序而不是遵循 19 世纪式的。在研究基础设计时，物理学家是从一个对称性出发，然后看它的结论是否和观察结果相符。

读者可能会问，在玩爱因斯坦的游戏时，物理学家如何找到那个合适的对称性呢？可以推测，没有人会在黑暗里对着我们的耳朵悄悄告诉我们，自然织进他花毯里的是什么对称性。如果一个委托人想要具有某种对称性的设计，又不把这种对称性告诉建筑师，这个建筑师得怎样才能找出这种对称性呢？

显然，人们可以从已知实验事实中抽取对称性，这正是爱因斯坦所用的方法。困难在于确定和提出那个与对称性关系最大的事实。从许多与引力有关的已知事实中，爱因斯坦抓住了所有物体无论质量如何都以同样的加速度下落这一事实。例如，他并没有使用两物体间的引力与它们之间距离平方成反比这一事实。这个以及所有其它已知事实都是作为加在引力上的对称性的结论出现的。

随着受到的约束越来越少，物理学家们越来越大胆地使用的一种处理方法是，去听与审美有关的那个半脑的意见。为了理解上帝的心灵，他们去探寻自己的心灵，因为那里构造了对称和美。在寂静的夜晚，他们静候那些能告诉他们关于尚未梦想到的对称的声音。

说到刚才用到的类比，我们可以想象建筑师如何苦思委托人所说过的话，试图从中找出与委托人想要的对称性有关的线索。这种处理大致相当于物理学家从观察结果中抽出对称性。但是，这个建筑师也可以采用一个更大胆的方法，事先作出他所能想到的最合谐的设计，然后只能希望委托人与他分享共同的审美感受。

在第四部分，我将解释这两种处理方法如何都被物理学家所采用并产生了很好的效果。

在夜晚的森林里

在关于相对论的工作中，爱因斯坦处理的是电磁和引力两种相互作用，它们在日常生活的宏观世界有所表现，而且我们对之已经有了相当程度的直观理解。但就在爱因斯坦进行他的工作时，

物理世界的秩序也正在瓦解，已经发现原子和核的世界跳的是另一种舞步。经典物理的平稳的华尔兹为量子物理的吉特巴所代替，新的相互作用统治着这一陌生的微观世界，对此物理学家还没有直观的感受。世界并不象那些19世纪晚期自负的持决定论观点的物理学家想象的那样简单。物理学家们进入了夜色朦胧的森林，那里能听到的只是把他们引入难以摆脱的诗论的森林妖怪的歌声。

在黑暗中，燃烧的猛虎，以它威武对称的身躯，犹如希望的灯塔出现了。基础物理学家越来越依赖于此虎。今天，在包括我在内的许多基础物理学家的工作中对称性的考虑起着中心的作用。



图6.3 黑夜森林中那只燃烧的猛虎。

III

光环中的明星

第七章 作 用 量

在科学中，人们得试图说出前人不曾说过的话；在诗中，人们则可以说前人已经说过的东西，但要说得更好。这就基本上解释了为什么好的诗和好的科学理论都同样稀少。

从表面上看，诗和物理极为不同。然而，某些理论物理学家也象诗人一样，把自己的创造力用于去说那些前人已经说过的东西，但用一种不同的方法。把某一方面的物理学理论用一种新的方法表述出来，并不能使我们的知识有所增加。因此，那些更实用主义的物理学家往往不理睬他们的工作；基本上也是由于同样的原因，诗也常常被冷落。在诗中和在理论物理中都一样，新的东西往往比老的更繁琐、更臃肿；所以在多数情况下，这种粗鲁的冷落也不是没有道理的。但是，偶尔也会有一首结构更精美、格调更清新的诗篇会比以往的诗都更明晰地表现了主题。在物理学中也是一样，那些更多更准地抓住了自然的内在逻辑的公式也时有出现。

在牛顿的公式中，注意力集中在每一时刻粒子所处的状态。作

用在粒子上的力使得粒子的速度按牛顿定律 F＝ma 变化。因此，我们知道粒子在下一个时刻的速度，并可推出粒子的位置。通过重复这种手续，我们就能知道粒子在将来的速度和位置。简单地说，这是每个初学物理的学生都必须掌握的标准方法。因为我们留意的是某一时刻和下一时刻的物理量的差异，这种方法就被称作微分方法。描述这些物理量的变化的方程被称作“运动方程”。

另一方面，作用量方法则是总观粒子所走的路径，并探寻粒子“用来”选择这一特别路径而不是其它路径的根据。

长时间以来，作用量方法一直只被当成牛顿公式的一个精巧的替代物。在此期间，物理学的内容依然是用微分形式的运动方程描述的。然而，我们这代理论物理学家最终还是拥抱了作用量方法，而抛弃了微分方法。我们变心了，因为作用量方法更美，它使我们更容易对基础设计的对称性进行研究。

匆忙的光

当一个游泳者站在水池中时，他的腿看起来变短了。把汤匙插进一杯水里也可看到同样的现象。这个现象很容易用光通过两个透明介质的界面时会发生偏折来解释，这里两种透明介质分别为水和空气。在图 7.1 中，一束光从游泳者的脚趾尖传到水面的 A 点，偏折，然后传到观察者的眼睛 E。根据来光方向，观察者的大脑判断游泳者的脚趾尖是在 T′ 处，因而腿显得短了。

为了对为什么光从水到空气时传播方向要偏折有一个更深刻的理解，数学家费马（Fermat）（1601—1665）在他去世那年提出了一个相当神秘的原理，被称作费马原理。这个原理说，光所选择的是使它到达目的地所花时间最短的那条路径。

在图 7.1 中，直线路径 TBE 在距离上比光实际所走的路径 TAE 更短。但光在水中要比在空气中走得慢，TAE 这条路在水中的一段要短一些，这样就可省下时间来走 AE 这段更长一些的路程。那 TCE 这条路会不会更省时呢？这条路在水中的一段 TC 更

短了，但在空气中的 CE 段更长了。显然，存在一条最佳路径。

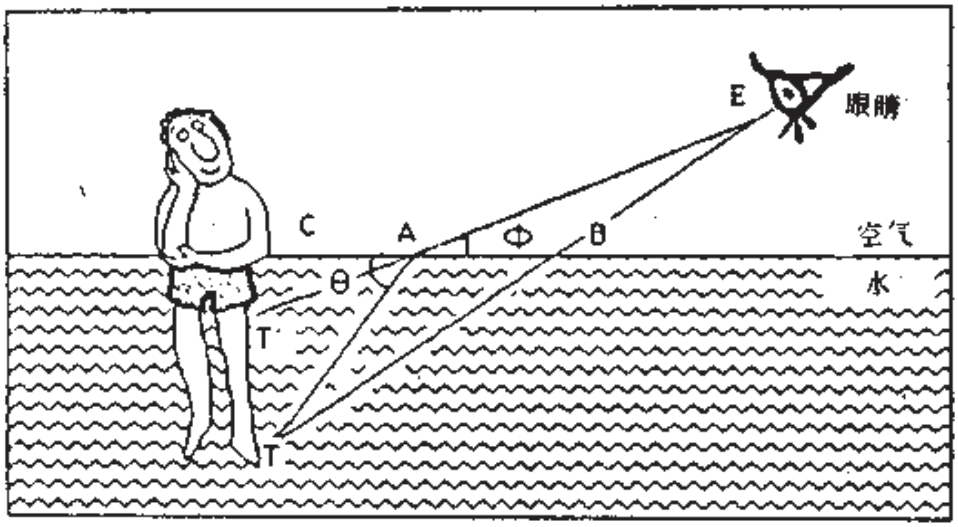


图 7.1　匆忙的光：在从游泳者的脚趾尖传到观察者的眼睛时，光选择的路径使它能用最短的时间到达目的地。由于光在水中传得慢，所以它走 TAE 路径，而没有走距离最短的 TBE。于是，观察者好象觉得脚趾尖是在 T′ 点。

赛车手也得作同样的选择。在这个高速公路的时代，最省时的路线往往不是最短的路线。从巴黎到威尼斯就有几条路可走。一个赛车手既可能经苏黎士横穿瑞士，也可能绕法国南部而行，这得看天气。

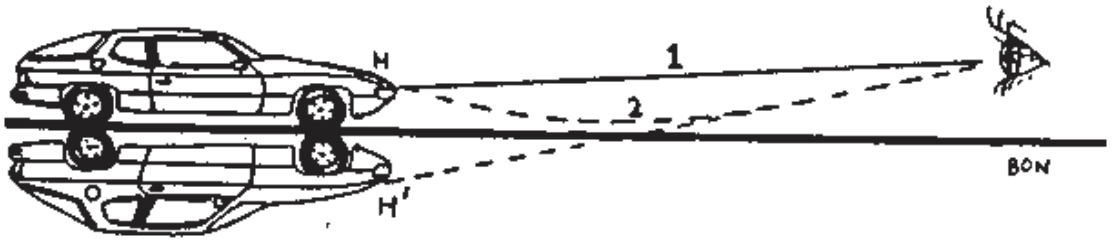


图 7.2　夏天的幻景：从车罩 H 发出的光，先下弯经接近地面的热空气向前传播，然后再上弯，最终的效果是沿路径 2 到达观察者的眼睛。观察者的大脑根据来光方向认为它是来自 H′。另一束光经路径 1 直接从 H 到达眼睛。从车上的每一点传到观察者眼睛的光都以这样两种方式传播。因此观察者就看到了车的一个反射像。大脑这个不可思议的器官由此推出路一定是湿的。

（说到赛车手，我想说常见的光学幻景也可用光生性匆忙这个原因来解释。在热天开车，常可看到远处的汽车在路上的“倒

影”。我们的大脑太容易上当了，它还当前面的路是湿的呢。这种现象之所以出现，是由于接近路面的空气比上部的更热，而光在空气中的速度依赖于温度。）

费马原理给那个时代的人留下了如此深刻的印象，以致他们急切地要去找出力学中类似的原理。在光学中，最短时间原理使我不必记忆那与图 7.1 中 θ、ϕ 有关的并不特别有启发性的公式。同样，人们希望在力学中也能有一个类似的原理来代替原来的牛顿运动方程。

一个正确的被称作最小作用量原理或作用量原理的原理不久就由皮埃尔·路易·莫里·欧·德·莫珀图易斯（Pierre Louis Moreau de Maupertuis）（1698—1759），约瑟夫·路易斯（Joseph Louis），科蒙特·德·拉格朗日（Comte de Lagrage）（1736—1813）等发现了。

作用量

通过考察一个粒子在 T_A 时从 A 点出发，在 T_B 时到达 B 点这样一个典型过程，就可清楚地看出作用量原理的含意。在作用量原理的方法中，我们不仅要考虑粒子从 A 到 B 所可能走的所有路径，而且还要考虑它走这一段路程的所有可能方式。因此，对于一个特定的路径，粒子可先慢走，然后加速一会儿，再慢下来，然后再加速。物理学家把一定时间内走过这一路径的每一种特定方式称为一个“经历”。在作用量原理中，所有可能的经历都必须被考虑。（和在给定介质中速度是确定的光子不同，有质量的粒子的速度是与环境有关的变量。因此，作用量原理在这方面不同于费马原理，而要更一般些。后来物理学家确实就把费马原理理解为作用量原理的一个特例。）

我们下面就接着陈述作用量原理。

给每一个经历指定一个被称为“作用量”的数。例如，一个经历可以被标上 95.6，另一个经历可被标上 123.45。作用量原理

说，粒子的实际经历是作用量最小的那一个。就象费马原理能确定光的径迹一样，一旦我们确定了作用量，这个原理就为我们确定了粒子的实际径迹。

物理学可以用作用量原理的公式表述。如果能找到一个公式来算出一给定物体在任一经历下的作用量，我们就完全把握住了这个物体的运动情况。例如，一个牛顿粒子的某一经历的作用量是这样计算的：从它的动能中减去势能，然后将这个量对从 T_A 到 T_B 的整个期间累加起来。(在牛顿力学中，动能是仅与粒子运动有关的能量，而势能则是一种“贮存起来的”可转换成动能的能量。例如，在地球表面附近的物体因重力的牵引而具有势能，物体离地越远，它具有的势能就越大。当物体下落时，它的势能就转换成动能。) 作用量的计算很象会计计算某一生产方案的总商业利润。他从一周的毛收入中减去总成本，然后把这个量对整个财政年度的 52 周累加起来。商人自然要选择一个最优的经历使总利润最大。

伟大的下落

让我通过一个物体的下落来说明作用量是如何起作用的。如图 7.3 所示，张三先生必须在一给定时间内从 A 点跳到 B 点，并使他的作用量最小。显然，不按直线下落对张三先生没有什么好处。弯曲的路径要比直的更长，这样张三就得走快一些，于是他的动能、作用量都增加了。一旦张三决定了要直接下落，他也还得从无穷多种可能的经历中选出作用量最小的那一个。为简单起见，张三先生可从比较两个策略大体相反的经历入手：一种是开始落得慢些，然后逐步增加速度；另一种是开始落快一些，然后再逐步慢下来。请记住，作用量是动能减势能并对经历作累加。由于势能随到地面的距离的增加而增加，在高处花的时间多会有好处，因为这可以减去更大的势能。因此，张三的下落是先慢后快。借助于初等力学，可以证明，张三的最佳策略是以一常加速度加

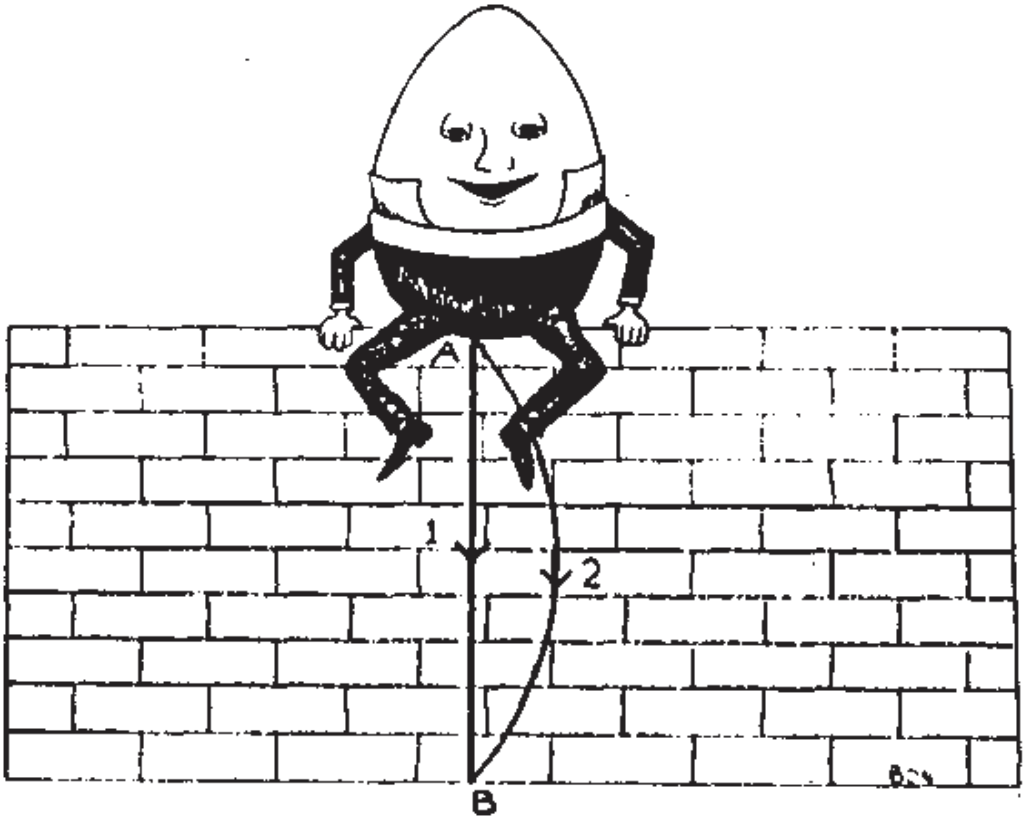


图 7.3 张三先生必须决定哪一种经历使他从 A 到 B 的作用量最小。路径 2 不能使他的作用量最小。

速下落。

读者可能会觉得，在这种情况下，作用量的方法实际要比微分形式的方法更复杂。情况也确实是这样。在后一种方法中，张三的加速度可由牛顿公式立即算出。但是，当物理学的知识超过牛顿力学时，作用量方法的优越性就越来越明显了。

神灵指路

我必须强调指出，力学的作用量原理所表达的东西既不比牛顿力学的多，也不比牛顿力学的少。作用量方法虽然更紧凑、更美，但它在物理上和牛顿的公式是完全等价的。

然而，这两种方法的着眼点是完全不同的。在作用量方法中，

采用的是一种结构性的观点，是比较粒子从这里到那里所有可能走的路径和经历。

对于17和18世纪的人们来说，最短时间和最小作用量原理提供了让人感到安慰的神灵指路的证据。有一个声音告诉宇宙中的每一个粒子去走最有利的路径和选择最有利的经历。由最小作用量原理会引发出一大批半哲学、半神学的作品是不足为怪的。这些作品尽管很迷惑人，但最终仍被证明是虚幻的。今天的物理学家通常采取一种保守的、实用主义的态度，他们仅把最小作用量原理看成是物理学的一种更紧凑的表述方式，而对由此引出的半神学的解释不加理睬。

餐巾上的世界

作用量原理在物理上被证明是适用于整个宇宙的。自牛顿以来的所有物理学理论都可以用作用量的语言表述出来。作用量的公式也更简洁和精巧。例如，麦克斯韦的四个电磁学方程就可用一个简单的作用量——一个使我们能对每一描述电磁场如何变化的经历算出一个数的公式来表述。同样，爱因斯坦的引力理论的十个方程也可精巧地概括到一个简单的作用量中去。(在爱因斯坦得到他的引力方程后不久，他自己和德国数学家大卫·希尔伯特(David Hilbest)就独立找出了相应的作用量。)这就是说，尽管运动方程可以很复杂，可以有很多个，作用量公式只有一个。

读者应该理解，整个物理世界是用单个作用量描述的。每当物理学家掌握了物理学的一个新领域，譬如说电磁学，他们就在描述这个世界的作用量公式中加上一个用来描述这个新领域的项。因而，在物理学发展的任一阶段，作用量是一些分离项的累加。我们可以指着其中的一些项说，这项是描述电磁的，那项是描述引力的，等等。基础物理学家的志向就是要把这些分离的项统一成一个有机的整体。机械师修理他的引擎，建筑师修改她的设计，基础物理学家则是要修补这个世界的作用量。他把这项换

一下，把那项改一下。

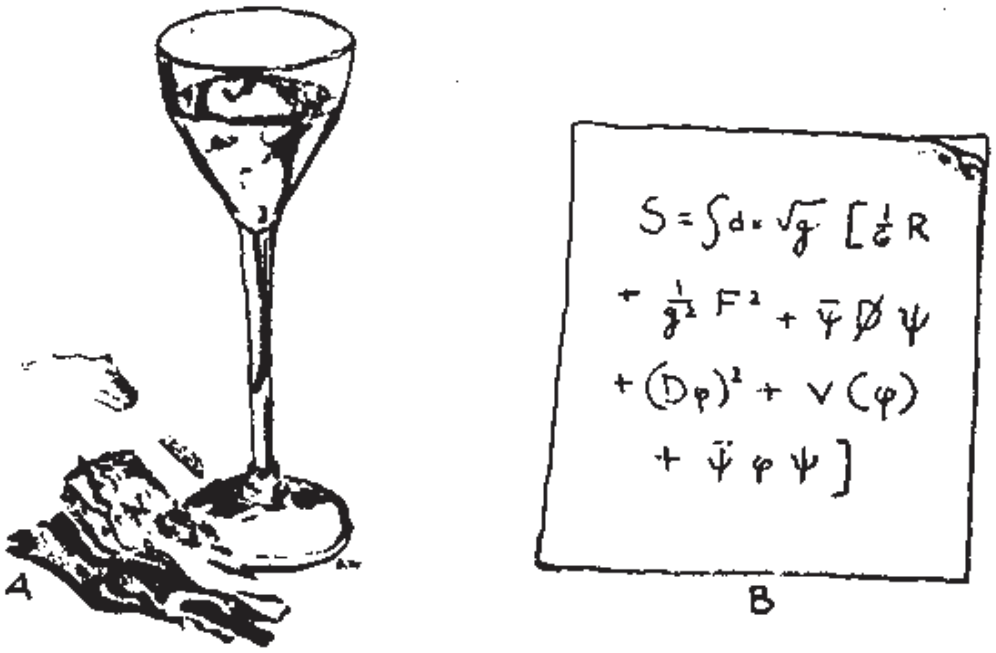


图 7.4 (A) 基础物理学家梦想在一张餐巾上写下整个宇宙的设计。作用量公式可以使表述非常紧凑。
(B) 今天，大多数物理学家相信这个作用量就和这张餐巾上所写的差不多。为了理解其上每一项的意义，你得到有名望的研究生院学习多年。然而，你也会留意到等式右边的那些加号：这个作用量是由许多部分加到一起的。例如，第一项$\frac{1}{G}R$代表万有引力，第二项$\frac{1}{g^2}F^2$代表其它三种相互作用。这表明物理学还没有能做到对自然的完全统一描述。正象第十六章所说的，物理学家正尽力找出一个能把上面作用量中的六项都归成一项的更紧凑的作用量。

我们对物理学的探索可以归结为是要决定一个公式。当物理学家梦想在一张餐巾上写下关于整个宇宙的全部物理学理论时，他们指的是要写下宇宙的作用量。要写下所有运动方程则要占多得多的地方。

不变的作用量

虽说言以简为贵，但我们偏爱作用量的最主要的原因还不是它的简洁。让我们回到中心论题对称性上去。在讨论对称的概念时，我曾小心地说，对不同的观察者物理实在可以不同，但物理

实在的结构必定是相同的。作用量原理使我们能够给出“物理实在的结构”一语的精确含意。

为了说明这一点，让我们回忆一下第六章中关于库伦定律在洛伦兹变换下如何变换的讨论。库伦定律的数学方程具有（电场）＝（电荷的函数）的形式。在洛伦兹变换下，等号两边的量都变了，但始终保持等号成立。站台工作人员看到是电场的东西，在火车上的乘客看来就会是电场和磁场的混合，库伦定律就变成了奥斯特定律。

按物理学家的行话，并不说这个方程是不变的，而说它是协变的。方程两边都以同样的方式变化，而不是都保持不变。结果是，尽管涉及到的物理量都变了，但它们之间的结构关系仍然不变。打一粗略的比方。假想有一桩婚姻，配偶双方性格都逐年“变化”，在少见的情况下，夫妻双方都沿同样的方向以同样的速率变化。虽然夫妻双方都有所变化，但他们的关系依然如故。不幸的是，心理学家告诉我们，大多数人际关系并不是随时间协变的。（当然就更不会是不变的。）

和运动方程不同，作用量在洛伦兹变换下保持不变。作用量是保持不变的。确实，说物理学具有某种对称性是指，在作过与这种对称性相应的变换后作用量保持不变。结果，对任一经历，不同观察者给它标记上的都是同一个数，譬如说 95.6，这样对作用量原理所要选择的是什么经历，就不会有任何分歧。简而言之，作用量体现了物理实在的结构。

为检测基础设计中是否具有某一对称性，必须依次检查用微分形式写出的许多运动方程的协变性。而在作用量表述中，任务则变得相当容易，只需检查作用量的不变性。

从作用量考虑

随着量子力学的出现，另一个使我们偏爱作用量表述方式的基本原因又出现了。就象我将在第九章中解释的那样，作用量的

表述形式很自然地适合于描述量子物理。

由于已经提到的和尚未提到的一些原因，在基础物理学的领域，作用量的表述方式已经把运动方程挤到一边去了。在我自己的工作中就算有，也极少处理运动方程以及相应的诸如力和加速度一类的概念。

有些物理学家乐于相信宇宙的终极设计者是从作用量的角度来考虑问题的。

第八章　女士与虎

自然不会发表他的设计

和建筑师不一样，自然并不会去四处讲解他的设计的对称性。这些对称性得由理论物理学家把它们推导出来。有些对称性，如宇称和旋转不变性，在直观上很明显。我们认为自然应该具有这些对称性，如果他没有的话我们就会感到吃惊。另一些对称性，如洛伦兹不变性和广义协变性，要更精巧一些，而且也不是基于日常生活经验就能看出来的。但是，不管在什么情况下，为了找出自然所具有的某种对称，我们必须将由这种对称导出的推论和实验的观测结果作比较。

找出一个对称性的可观察推断的难度依赖于这个对称性。这一任务也因实验者所能获取的实验现象的范围有限而变得复杂。因而，据某些可能存在的对称性所作出的推断，大概永远也不能得到直接验证。

在前一章中，我们已经知道，一个物理学理论可以被总结成一个被称为作用量的量，并且这个理论的对称性就明白地表现于，在各种变换之下作用量的不变性。

爱因斯坦宣称，对称性能够制约作用量的形式。然而，物理学家常常遇到这样的情况，他们并不知道所涉及到的全部对称性，而他们确实知道的那些对称性又不足以限制作用量的形式。尽管作用量可能具有的形式已经大大受到限制，它们也依然有许多种可能的形式。即使要求每个建筑都必须具有左右对称，建筑师也可以设计出无限多种建筑来。

遇到这种情况，物理学家只得依次考察每一个“候选的”作用量，以确定它们的物理含意。这确实是一个艰巨的工作。在极端情况下，要从一个几笔就能写出的作用量中把所有的推断抽取出来，如果不说要花几十年的话也得花几年的时间。

现在如果有人走过来说：对于一个特定的对称性，人们可以不必知道作用量的具体细节而立即知道它的某些推断，物理学家们将会欣喜若狂！

痴迷的爱因斯坦

在本世纪早期，确实有人走来了：她就是数学家艾米·诺特尔（Emmy Noether）。她的深刻的结论一直是物理学家关于不变的作用量的最一般的陈述。她去世后，爱因斯坦在《纽约时报》上写了一篇悼念她的文章，说：

> 纯数学是一种逻辑理念的诗篇。它寻求的是以简单的、逻辑的和统一的形式把最大可能的形式关系圈汇集起来的最一般的操作观念。在这种接近逻辑美的努力中，人们发现了那些为更深入、更透彻地理解自然定律所必须的精神法则。

这个艾米·诺特尔是谁呢？她的“精神”发现又是什么呢？要想知道答案，得听我解释物理学的守恒定律。

没有不要钱的午餐

物理学中的守恒定律说，你得到的只会和你给出的一样多。大自然说，没有不要钱的午餐。能量是守恒的，永动机是不可能造出来的。

直到上世纪和这世纪交接的时候，永动机还仍然相当风行，并常在博览会中展出。那些想当发明家的人，被可以造出一种不需燃料而永远运转的机器这样一种想法迷惑住了。由于现实世界的机器总免不了有摩擦阻力，要维持机器的运转必须提供一些附加的能量。那些表面上看起来能永远运转的机器，最终都被揭露出是具有欺骗人的结构。例如，有些机器内有暗藏的辅助装置，有些则是有暗中操纵等等作弊现象。

如同会计学中的收支平衡一样，在物理学中守恒是一个重要的概念。会计先在一个账户的初始余额上加上这个账户的所有收入，然后从中减去所有支出，最后要核查得到的总数是否等于总的结余。自然的会计就是她自己，她算账的速度飞快，并且从她一生下来一直干到现在。实验物理学家们就象独立的审计员一样，一直在对自然的账目作现有技术所允许的最精细的核查，而且至今为止还没有发现任何差错。能量守恒定律还从来没有不对的时候。观察两个弹子球的碰撞，如果分别测量两个球在碰撞前和碰撞后的速度，计算与这些速度相应的动能，实验者就会发现，尽管每一个球的能量都由于碰撞而变化了，但总能量在碰撞前后是守恒的。

随着我们的实验者对弹子球速度的测量精度的提高，他终于发现了碰撞前后的能量有细小的差别。有很小一部分动能不见了！自然会不会象今天潜伏在银行里的计算机窃贼一样，把每一账户上四舍五入舍去的最后一位微小的金额归到她自己的名下了呢？不，不是这样，自然只不过是把这一小部分金额转到其它账号上了。我们不懈努力的“审计员”现在用更精密的仪器测出了被碰

撞产生的声音带走的能量。此外，他还检查出弹子球和桌台都稍稍变热了。考虑到所有形式的能量后，账本仍然是平衡的。

能量守恒的概念大大减少了物理学家的计算量。让我们来看一个简单的例子，一个钟摆的摆动。知道了任一时刻作用在摆锤上的重力后，借助于牛顿定律我们就能算出摆锤的速度如何变化。依次在不同时刻进行计算，我们就可知道摆锤在轨迹上任一点的运动状况。然而，如果认识到当摆锤来回摆动时，能量也在动能和势能之间来回转换的话，事情就变得比较容易。回想一下第七章说过的关于势能的话，就会知道，摆锤离地面越高，它的势能就越大。摆锤在达到最高点的那一刹那是静止的，动能为零，势能最大。当摆锤处于最低点时，动能最大，而势能最小。如果不考虑象空气阻力那样的细小的影响，总能量是守恒的。在摆锤轨迹的任一点上，我们都可以简单地由从总能量中减去与这一点相应的势能而得的动能来算出速度。这不同于需要跟踪任一时刻摆的运动情况的微分形式的处理方法。用守恒定律处理问题不仅简单，而且从某种意义上讲，在理性上也更让人满意。

任何一个在高中受到过物理教育的人都知道，还有其它守恒定律。例如，动量就是守恒的。近来，报道美国总统选举的政治作家们也以暗示存在某种守恒的口气谈到动量。经过初步竞选，有一个候选人被说成是具有“大动量”，这就表明他的对手多半没什么指望了。

在现代物理中，能量守恒和动量守恒也具有很大的实用意义。物理学家们把电子、质子这类粒子在巨大的加速器中加速到极高的能量，并使它们相互碰撞，以探测自然的秘密。这些碰撞产生了各种各样的沿不同方向飞出的粒子。用这种方式，物理学家们已经发现了许多过去一直不为人们所知的亚核粒子。有些新发现的粒子寿命极短，以至于即使它们几乎以光速运动，在分解成其它更稳定、更为人们所熟悉的粒子前都不会留下可检测到的径迹。

例如，一个实验物理学家可能会探测到有一个电子和一个质

子高速飞出。他假定电子和质子是来自同一个源，来自一个分解了的母粒子。借助于守恒定律，在测量了这个电子和质子的能量与动量以后，这个实验物理学家就可以确定那个没被看见的粒子的能量和动量。知道了先为牛顿提出，后来为爱因斯坦修改了的粒子的能量、动量和质量间的标准关系后，这个实验物理学家最后还能算出这个未被看见的、分解了的粒子的质量。

我们在这一章早些时候用到的会计的类比是很不妥当的。虽然有时候要做到这点是不那么容易，账本显然还是应该保持平衡。然而保证这种平衡只不过是验证了我们具有正确计算的能力，而能量和动量在所有物理过程中都守恒这一事实，则要深刻得多。它告诉了我们某些关于自然的内部设计的信息。

但能量是什么呢？其实，守恒的更准确的含意是，任给一组描述一个物理系统如何随时间变化的方程，我们都必定要能从中找出一个一直保持不变的物理量。最初，我们并不知道一个自由运动的粒子的动能是否正比于它的速度、速度平方或速度立方等等。更一般地，对于一个给定的作用量，怎样才能决定什么量是守恒量呢？

在诺特尔到来之前，物理学家们求助的是试探法，他们不停地摆弄着手中的方程，直到发现某个不随时间变化的组合量为止。考虑由两个相互作用力依赖于它们之间距离的牛顿粒子构成的这样一个最简单的系统，譬如说，这两个“粒子”可以是地球和太阳。在猜测它们的能量会是什么时，物理学家首先可能会试探如下一种组合：将每个粒子的质量乘上它的速度的平方，然后把这个量对两个粒子加起来。

遵照牛顿定律，一个粒子的速度的变化率由作用在其上的力除以它的质量给出。由此，我们的物理学家很容易计算他的试探量是否改变。结果发现它确实会变。但如果这个物理学家足够聪明的话，他可能会注意到，如果在他的组合量上再加上一个与两粒子间距离有关的量后，得到的总和就不会改变。一个守恒量就这样被发现了，他把它叫作能量。我们的物理学家很幸运，他第

一次就猜得不很离谱。如果他用的是速度的立方而不是平方，或者他没有乘上粒子的质量，那么不管他怎样摆弄都找不出一个守恒量。有些读者可能会想起高中课本只是简单地指出能量是什么，然后再来验证它确实是守恒的。其实，实际过程并不是这样。

如果物理学家只能采用试探法来寻找守恒量的话，事情将是极为讨厌的，在需要考虑更抽象的作用量的今天就更是如此。而且，事先谁也不知道作用量里究竟包含了多少守恒量。

艾米·诺特尔的生活和时代

艾米·诺特尔现在来救驾了。阿玛丽·艾米·诺特尔(Amalie Emmy Noether)(1882—1935)是一个伟大的数学家，但在那个时代，她不得不为获得能成为自己想成为的人的权利而奋斗。尽管法国在1861年，英国在1878年，意大利在1885年开始允许妇女进入大学学习，在世纪交接的时候，一个德国妇女要想受到较高的教育还是有很大困难。很能说明问题的一个例子是，当时的一位学术界著名人士就大叫，允许妇女进入大学是“道德沦丧的可耻标志”。诺特尔坚持读完了大学，并取得了博士学位。但她仍然不能谋到任何一种学术职位。

杰出的数学家大卫·希尔伯特（作为爱因斯坦引力理论的作用量的发现者，我们在前面已经提到过他。）很赏识她的才能，并在1915年邀请她加入他们在哥廷根的工作；那时哥廷根是德国的头号学术中心。希尔伯特试图为她争取到无偿讲课的权利，但没有成功。有人差不多在这样叫喊：“一开始她们想上学，现在她们竟想开课了！”开课的要求被当局以“与法律不相宜的要求”为由而拒绝了。在1908年通过的一项条例规定，只有男人才有开课的权利。在教务会上，哲学家、历史学家们都无动于衷，恼怒的希尔伯特嘴里叫着“这是大学，不是澡堂！”而冲出门外。

第一次世界大战并没有给德国带来多少好处，但却给它的社会带来了变化。在1918年，妇女的法律地位得到了改善。经过教

务委员会组织的口试，艾米·诺特尔终于获得了讲课的权利。那些旧式思想的卫护者们抱怨说，那些保卫过祖国的士兵和那些已经经历过许多苦难的人们今天又不得不听一个女人讲课。

对称和守恒

就是在教务委员会考察诺特尔能否胜任无偿讲座工作的那段时间，她提出了她的著名定理。她一直在研究那些在对称变换下保持不变的作用量。这种类型的作用量显然应有一些特殊的性质，但会是些什么性质呢？

这里区别一下象旋转那样的连续对称和象宇称那样的分离对称是很有益的。就如其名字所暗示的那样，与连续对称相应的变换是可以连续地改变的。对于旋转对称，我们可以连续地改变旋转角。然而，对于宇称对称，只有一个反射变换和一个不变变换。

凭着灵感，诺特尔意识到，作用量的每一种连续对称性都将有一个守恒量与之对应。对称和守恒这两个物理学家所钟爱的概念事实上是联系在一起的！

这种联系不仅是深刻的，而且，如我所强调过的，也是极为有用的。实验上每观察到一个守恒量就立即告诉了我们，自然的设计中含有一个与这个守恒量相对应的连续对称性。从 18 世纪后期起就已经知道电荷守恒了。在诺特尔发现了她的理论后，物理学家们又重新去验证电磁理论，并寻找与电荷守恒相应的对称性。在寻找过程中，对这个有近一个世纪历史的理论的认识变得更深刻了。这个被及时发现的对称性被称为“规范对称性”。在后面几章中，我们将会看到，规范对称的观念确确实实为物理学家提供了开启宇宙之门的钥匙。

诺特尔的灵感在众多方面帮助了物理学家。当物理学家们开始探索核及后来探索亚核世界时，并不知道作用量象什么样，但他们可能会注意到某些量是守恒的。诺特尔的定理告诉他们，作用量必定具有相应的对称性。现在，物理学家至少能大致猜出作

用量会是什么样的。后面，我们将会看到这种谋略的成功运用。如果说以前的物理学家象一个试图辨认出自然的花毯上的对称性的半瞎艺术批评家的话，艾米·诺特尔则使他们的双眼得以复明。

反过来，如果知道所有使一个给定的作用量保持不变的对称变换，我们现在就能立即知道应该有多少守恒定律。回想过去物理学家们用试探法寻找恒量是多么艰难啊。再也用不着试探法了！艾米·诺特尔解决了如何决定守恒量的问题。

诺特尔的定理之美在于它不依赖于作用量的细节。因此，在同样的对称变换下保持不变的作用量，必须会具有同样的守恒定律。物理学家再也用不着依次找出每一个作用量的守恒定律。

万变不离其宗

人们知道能量和动量守恒已经有上百年了，但物理学家们从没有把它们明显地和对称性联系在一起。借助于艾米·诺特尔的灵感，让我们来看一下，与这两个守恒量相应的对称性是什么会很有启发性。既然能量和动量是如此普遍，相应的对称性也必定会具有绝对普适的特性。那它们能是什么呢？

利用诺特尔的定理，人们发现，如果物理定律不随时间变化，能量就守恒。用更技术性的语言，这个条件就是，在时间漂移（或用正确的术语“平移”）下作用量保持不变。而这正是我们对物理定律所作的要求。我们要求昨天、今天和明天的物理学都要是一样的。

通过考虑一个能量看起来好象不守恒的简单例子，我们就很容易理解能量守恒所需满足的条件。想象在操场上有一个秋千，大人将坐着小孩的秋千推送出去。你可以说，在小孩看来物理定律是随时间变化的。小孩“感到了”作用在秋千上的力在变化，当然觉得能量不守恒。但这不过是因为我们把着眼点放在秋千的运动上了。当我们考察由秋千、大人和地球构成的一个更大的系统时，能量当然是守恒的。

关于动量守恒，诺特尔的定理说了些什么呢？它说，如果作用量在空间平移下保持不变，动量就守恒。用通俗的话说就是，如果物理学在这里、那里，在所有地方都一样，动量就守恒。让我再次用一个简单的例子来作说明。假定我向一小山滚一个球，当球爬上斜坡时它失去了动量。动量看起来不守恒。这同样是因为我们只把着眼点局限在球上。这个球所“感受到”的物理定律确定是随空间变化的，依赖于它是否在斜坡上。事实上，当我向一个方向滚球的时候，借助于使我附于地球的重力和由此产生的摩擦力，我也使得地球在朝相反的方向运动。当球爬上斜坡慢下来时，地球向相反方向运动的速度也减慢了，整个系统的总动量是守恒的。

另一个基本守恒定律说，角动量是守恒的，奥林匹克花样滑冰比赛中的一个动作最精巧地说明了这一定律。当一个滑冰运动员收回她的手臂时，角动量守恒定律要求她转得更快。诺特尔的定理揭示，角动量守恒是由于空间的旋转不变性。不管这个滑冰运动员面向哪一个方向，物理定律都是一样的。

能量、动量和角动量守恒是学习物理时最先遇到的几个定律。它们共同支配着从星系的膨胀到电子绕核旋转的物理世界中每一事物的运动。很多年来，我都没有问过这些守恒定律来自何处，它们似乎是如此基本，以至不需作任何解释。后来，我听说了诺特尔的灵感，这给我留下了深刻的印象。这些基本守恒定律是来源于物理学在今天、昨天和明天；这里、那里和所有地方；东方、西方、南方和北方都一样的假定，这一启示对我来说，就象爱因斯坦所说的那样，实质上是来自精神的。

这个特别的启示是我的物理生涯中最值得纪念的。我一直为人类智慧对自然的理解力所吸引，但很少遇到象诺特尔那样的灵感。这些灵感使我快乐、敬畏和动情，因为作为绝对真理，它们既深刻又简单。另一方面，作为一个物理学家，我并不觉得一个核或一个晶体在这样那样的环境中的行为本身有多大意思。在对宇宙的唯象学知察中，现在大家感兴趣的东西，以后的人往往不

再会有多大兴趣。现在这代基础物理学家就已经把20年前粒子物理的发现当成是，按爱因斯坦的话说，“这样或那样的现象”。但是，对称性与守恒定律之间的联系将是永恒的。

第九章　学会去读这本伟大的书

如果不理解它的语言，没有人能够读懂宇宙这本伟大的书，它的语言就是数学。

——伽利略

对称性的数学

对基本对称性的研究归结起来就是对诸如反射、旋转、洛伦兹变换以及其它不改变基础物理作用量的变换的研究。

为了描述变换的结构性质，数学家和物理学家已经发展出了一种被称为“群论”的语言。这里，我想介绍一些群的基本概念以供后面使用。后面两节必然要更数学化一些。确实，它们是《可怕的对称》中数学性最强的章节。幸运的是，你不必掌握数学上的细节也能理解本书的其余部分。重要的是，你能对我后面将使用的术语有所理解。本章末尾将把讨论的要点归纳出来。

其实，一旦克服了最初的恐惧心理并去认识这些术语，你会

发现群论是自然和直观的。假定要你去研究一组变换，你自然地会想知道些什么呢？你大体上想知道两类信息。首先，你想知道相继作两次变换后的效果相当于作了一个什么样的变换。这告诉了你不同变换间的相互联系。其次，你想知道这些变换是如何把各种各样的物体联系在一起的。我将按这两个自然的思路来进行讨论。

组合变换

给定 T_1、T_2 两个变换，我们自然就会考虑，如果先作 T_1，然后再作 T_2，情况将会怎样。物理学家称这种组合变换为 $T_1 \times T_2$。在早先提到的河狸的课程中，刘易斯·卡罗尔考虑了两种变换，煮和腌。如果 T_1 是煮，T_2 是腌，那么变换 $T_1 \times T_2$ 就是煮了以后接着再腌的操作。为了能使讨论更连贯，让我们来考虑旋转。例如，T_1 可以是绕某个轴转 17°，T_2 是绕另一个轴转 21°，那么，$T_1 \times T_2$ 就是先作旋转操作 T_1，再接着作旋转操作 T_2 后产生的旋转效果。

我们可以将把两个变换组合成一个变换的操作看成某种乘法。确实，通常的数值乘法可以认为是这种组合操作的特例。例如，如果一个投资者在 1 年内使他们钱翻了 3 倍，我们就可以说，他把他的每 1 个美元“变换”成了 3 个美元。假定第二年他又使他的钱翻了 5 倍，这个组合的变换把每 1 美元转换成了 15 美元，我们可以把这个组合变换称作 3×5。

在普通乘法中，数字 1 扮演了一个特别的角色：每个数字乘上 1 都还是等于这个数字本身。当我们组合变换时，什么事也不做的变换也扮演了一个特别的角色。这个变换被称作“全同变换”，用 I 标记。例如，对旋转来说全同变换就是转动 0°，或者说根本不转。

除了一个重要的差别外，变换乘法遵从与普通乘法一样的规则：尽管 $3 \times 5 = 5 \times 3$，可 $T_1 \times T_2$ 不一定等于 $T_2 \times T_1$。次序也是有讲究的。这倒不特别让人吃惊，我们的日常生活中到处都是要

按一定顺序执行才有效的操作。容易推测，在卡罗尔的例子中，是先煮还是先腌结果是不同的。为了恢复这个讨论的学术严谨性，让我们还是来看旋转的情况。

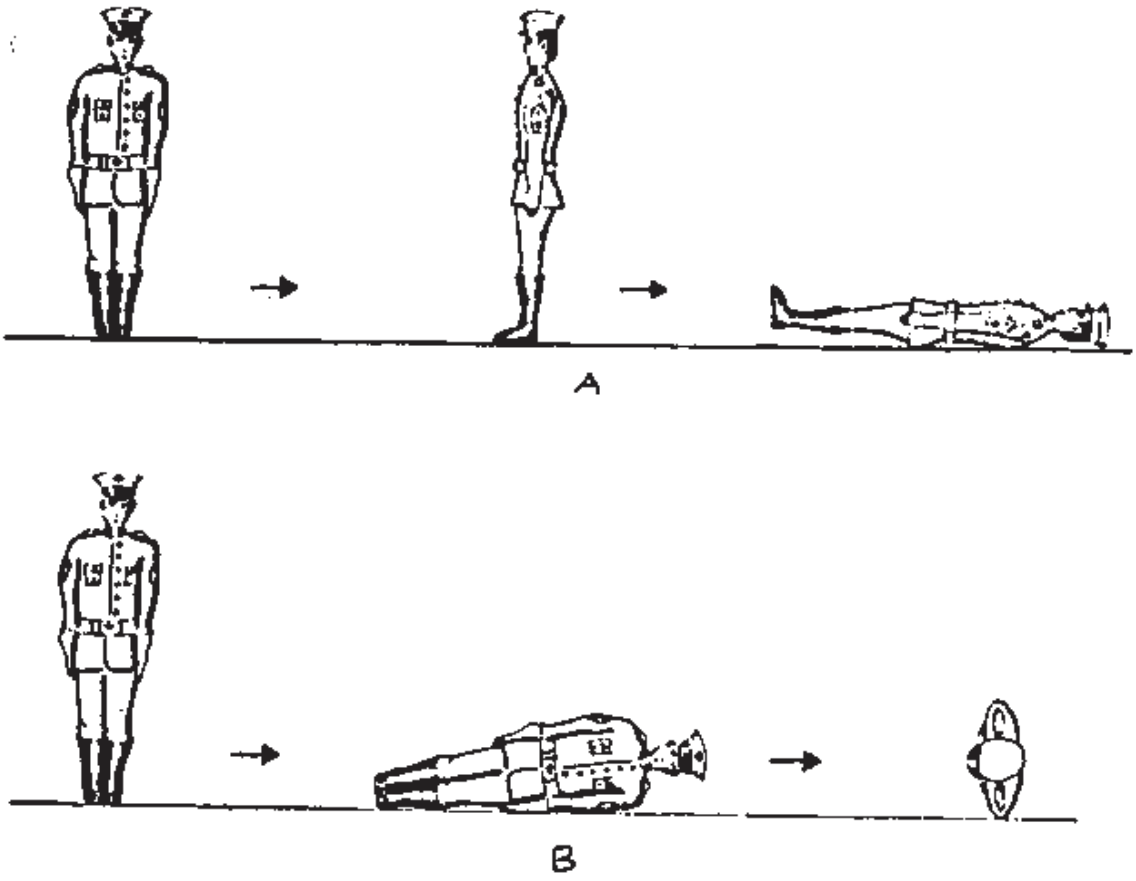


图 9.1　(A) 一个海军陆战队训练营的新兵在执行训练中士所喊的两个口令。　(B) 如果这个中士调换一下他口令的次序结果会怎样呢？

为清楚起见，让我们来看一个海军陆战队训练营中面向北方站着的新兵。当负责操练的中士叫到，“绕竖直轴向东转 90°”（我想在这种训练中应该有更技术性的术语），我们的新兵就转到面向东。假定中士接着又叫到，“绕南北轴向西转 90°”，我们的新兵又将向后躺下，头指西，脚朝东。但如果中士颠倒他的两次口令的次序情况又会怎样呢？你很容易验证，我们的新兵最后将是侧卧在左臂上，头指向北方。次序是有讲究的。为此缘故，各届学物理的学生都嫌恶学习旋转。

物理学家很幸运，在 19 世纪，数学家们就已经在“群论”的

名义下把变换的乘法研究清楚了。你刚才就已经知道了，群论涉及到一种与次序有关的高等乘法。

与那些被象原子那样的实际物体和象作用量那样的物理量所吸引的物理学家不同，数学家更愿意以抽象的方法来考察群。在儿童时代，我们都经历了一个与此相似的抽象过程。我们首先学到，如果有 3 个篮子，每个篮子里装有 5 个苹果，那么总共就有 15 个苹果。随后，我们又知道了，就乘法而言，篮子里放的是 5 个苹果，还是 5 个橙子，甚或是 5 只猫都无关紧要。就我的观察，孩子们很容易作出这种抽象，他们很快就能脱离开具体事物学会乘法。同样，数学家也是脱离开具体事物和场合来研究群论的。

为了说明前面关于抽象的讨论，我可以用第三章讨论过的两种对称性，即宇称对称和电荷共轭对称来作例子。对于宇称对称，涉及的变换是把我们的世界反射成镜像世界；对于电荷共轭对称，涉及的变换则是将每一个粒子用它的反粒子替代。对数学家来说，与这两种对称性相应的变换的乘法规则在结构上是完全相同的。两次镜像反射将把我们带回到原来的世界，而两次电荷共轭变换也将使一个粒子回到它本身。数学家会说，在每种情况下都有一个变换 T，使得 $T\times T=I$。换句话说，在每一种情况下，只要你连续变换两次，都将回到你原来的出发点。就象我们大家都能不管篮子里装的是猫还是苹果而照样做我们的乘法一样，数学家将把注意力集中在群的乘法关系上，而不管物理学家正在考虑的是宇称、电荷共轭或是，就此例而言，阴阳互换。

到了现在，我才准备给出群的定义，一个群只不过是可以通过乘法联系到一起的一组变换。如果某人要向我们描述一个群，他必须告诉我们这个群中含有什么变换，并指导我们如何把这些变换乘到一起。就象普通的乘法完全是由我们幼时学背的乘法表所规定的一样，一个群也是由它的变换和乘法表规定的。例如，最简单的群只包含两个变换，I 和 T。乘法表只有四款：$I\times I=I$，$I\times T=T$，$T\times I=T$ 和 $T\times T=I$。

确实，前三式只相当于将 I 定义为全同操作，再简单不过了。

这个群被称为 Z（2），它和物理学家的宇称和电荷共轭有关。

作为另一个例子，被称为 SO（3）的群所包含的变换（亦称元素），是三维空间中所有可能的旋转变换。乘法规则则定义为相继进行两次旋转操作。

这使我想起了一个故事。有一个客人随他的朋友一道去参加一个笑话俱乐部的聚会。一个会员叫道，“*C*—46!”，其他人都会心地笑了起来。另一个站起来叫道，“*S*—5”，引得所有的人都笑了起来。这个迷惑不解的客人问道，这是怎么回事？他的朋友解释道：“所有可能的笑话，当然不能计细小的差别，都已经被归类编上号了，我们心里都知道这些编号指的是什么。”同样，所有的群都被数学家们分类编号了。当一个物理学家到我办公室来时，他可能咕哝着 SO（3）或 E（6），我将会赞同地点头。这位物理学家是正在告诉我，他猜测自然在他的设计中用的是他所说的那种对称性。

让我在这里顺带把上面那个故事的包袱抖出来。最后，有一个人站起来叫道，“*G*—6!”，这时每一个人都捧腹大笑起来。这个客人问，究竟是什么笑话会如此可笑。他朋友答道：“哦，这是乔·史蒙，他笨透了，还不知道根本没有 *G*—6 这种类型的笑话呢!”类似地，如果我在一次讨论会中提到 G（6）的话，我的同事们一定会吃惊得竖眉瞪眼。总之，所有的群都已被分类编号了。

但就算是这样和物理又会有什么关系呢？就如前面解释过的那样，物理学家对不改变作用量的变换很感兴趣。这种变换被称作对称变换。如果 T_1 是一个对称变换，T_2 是一个对称变换，那么 $T_1 \times T_2$ 也是一个对称变换。按定义，这个陈述就是正确的。如果 T_1、T_2 都不改变作用量，那么先作 T_1，再作 T_2 后当然也不会改变作用量。换句话说，对称变换构成了一个群。因此，研究对称性的物理学家自然地被引向了与群论有关的著述。当然，群Z（2）是太简单了，以至于不需要学多少高深的数学就可以完全看清它的结构。但当物理学家遇到更复杂的群时，他们还是很感激把它们研究清楚了的数学家。

我们的数学家可以脱离开宇称和电荷共轭而抽象地来研究Z（2）群这个例子，虽然平谈，但强调了这样一个事实，即与过去的、现在的，以及还没有梦想到的物理理论相关的所有可能的群的结构，都已经被数学家们研究过了。数学不必等待物理学。

表　示

就如这章的引言所说，我下面就要研究一个给定群的变换如何把各种各样的物体搅和在一起。这些被搅和在一起的物体，被说成是为这个群提供了一个表示。

粗略地说，一个群的表示就是这个群的一个模型，非常类似于一个大楼的建筑模型。我们认为这个模型代表了实际建筑的结构安排，它所强调的是结构。例如，两个侧厅的相对尺寸在模型中和在实际建筑中应严格相等，但所用纸板的颜色可以和实际建筑所用的石头的颜色完全不同。

为了发展群表示的概念，同时也为了明确起见，让我们把目光对准三维空间的旋转群SO（3）。

用三个具有一定长度的箭头来指明空间的三个方向，一个指东，一个指北，一个指上（见图9.2）。为说起来方便，让我用$\vec{X}$、$\vec{Y}$和$\vec{Z}$来分别标记这三个箭头。我们能够用某种类似$a\vec{X}+b\vec{Y}+c\vec{Z}$的东西来标记空间的任一方向。其中，$a$、$b$、$c$是三个数。可以认为这三个数构成了给机器人的一个指令。接到这个指令的机器人先向东移a厘米，再向北移b厘米，然后两向上移动c厘米，它的移动方向就是由$a\vec{X}+b\vec{Y}+c\vec{Z}$所指示的方向。因而，箭头$\vec{X}-\vec{Y}$指向东南方，箭头$\vec{X}-\vec{Y}+2\vec{Z}$指向东南偏上与水平面成55°角的方向。$a\vec{X}+b\vec{Y}+c\vec{Z}$这种形式的箭头被称为$\vec{X}$、$\vec{Y}$、$\vec{Z}$三个箭头的线性组合。

现在我们已经学会了如何标记一个方向，为继续讨论旋转作好了准备。我们可以通过指出$\vec{X}$、$\vec{Y}$、$\vec{Z}$三个基本箭头被旋转到了什么方向来描述一个旋转。换句话说，一个旋转把$\vec{X}$、$\vec{Y}$、$\vec{Z}$这三

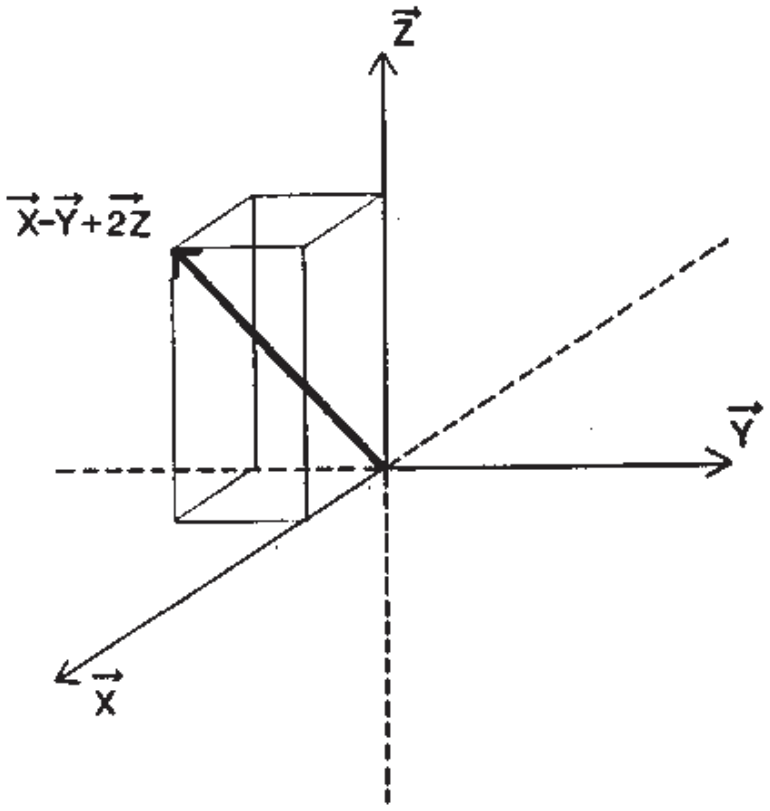


图 9.2　箭头的加减：三个箭头 $\vec{X}$、$\vec{Y}$和 $\vec{Z}$分别指明东、北和上三个方向。为了确定由线性组合 $\vec{X}-\vec{Y}+2\vec{Z}$这个箭头所指的方向，可先向东走一个单位长度，再向北反走一个单位长度（即向南走一个单位长度），然后再向上走两个单位长度，你实际所走的方向就是这个组合箭头所指的方向。

个箭头的每一个都变换成了这三个箭头的线性组合。

这里并没有什么深刻的东西。相反，我只是在以一种精确的方式表达出旋转把空间的三个方向搅和在一起了这样一个概念。

在这个例子中，一个旋转由它对三个基本箭头的作用来表示。或者说，这三个基本箭头提供了 SO（3）的一个表示。由于这个表示实际上是由 SO（3）的定义提供的，因而被称为“定义表示”，有时也称为“基本表示”。

你可能会觉得，这些长长的讨论只不过是叙说了一个显而易见的事实：一个旋转是用它对三个基本箭头的作用定义的。其实，你只要稍微耐心一点的话，马上就能看到研究这个表示的引人注目之处：利用定义表示，我们可以构造出更大的表示。

要这样做，我们就得象孩童时代学乘法一样，扔掉篮子、苹

果、橙子、小猫和箭头这样的具体事物，把定义表示看成是由三个抽象“实体”提供的。经过一次旋转，这三个实体的每一个都变成了它们三个的线性组合。为了跟踪这三个实体，我们必须给他们取上诸如张三、李四、王五、或红、黄、蓝一类的名字。在书中，我们可以把这三个实体表示成Ⓡ、Ⓨ、Ⓑ。（可以认为它们分别为红、黄、蓝三种颜色，如果这样会帮助理解的话。）假定我们还有另外三个也是按定义表示变换的实体，为了与上面的三个实体相区别，记为：🅁、🅈、🄱。纯粹是因为说起来方便，我们分别把这两种实体看成“圆的”和“方的”。

现在我们已经可以通过把这两个定义表示的复制品胶合起来得到一个更大的表示了。将一个圆实体和一个方实体胶合在一起就可得到九个新的实体，即：Ⓡ🅁、Ⓡ🅈、Ⓡ🄱、Ⓨ🅁、Ⓨ🅈、Ⓨ🄱、Ⓑ🅁、Ⓑ🅈、Ⓑ🄱。注意，我们要区分由一个红圆实体与一个黄方实体胶合而成的Ⓡ🅈和由一个黄圆实体与一个红方实体胶合而成的Ⓨ🅁。经过一个旋转，九个实体的每一个显然都会变换成它们的线性组合。

从表面上看，我们已经构造出了一个含有九个实体的表示。但得等一下！尽管我们这里确实有由旋转相互联系到一起的九个实体，然而，从逻辑上讲，这并不意味着任一给定的实体都可以变换成其它八个实体的每一个。

让我打一个有些异想天开的比方。在漫不经心地读了一个童话故事之后，一个外星人可能会得到这样一个印象，青蛙、王子、南瓜和四轮马车是可以相互转换的。其实，如果他读得再仔细一点的话就会发现，这四种东西可以分成两对，青蛙和王子可以互换，但不能变成南瓜和马车。事实上，通过适当的组合，我们就可以把这九个实体分成三个氏族：一个氏族含有五个实体，一个氏族含有三个实体，还有一个氏族只含有一个实体。这九个实体是按下面的意义划分的：经过任一旋转，属于第一个氏族的五个实体只在它们之间相互变换。换句话说，这五个实体变换成它们之间的线性组合。它们提供了一个五实体的表示。类似地，处于

同一氏族中的三个实体提供了一个三实体的表示，那个单独的实体则提供了一个一实体的表示。

这使我想起了在苏格兰乡村集市上的情况。如果我们让所有有亲戚关系的人站在一起，人群就会按氏族分开。得承认，这个比方并不很妥当，因为变换的概念没有被考虑进来。

这九个实体可以分成不同的氏族是很容易理解的。其实，从逻辑学的观点看倒该问为什么不能分开。因为并没有什么可指望的原因能保证由胶合得到的九个实体的每一个都可以变换成任一其它实体。感兴趣的读者可以在本章附录找到解释。

通常数学家们不说“一个五实体的表示”，而说“一个 5 维表示”。这里“维”的说法容易引起混淆。所以需要澄清一下，我们正讨论的是 3 维空间的旋转群 SO（3）的表示。SO（3）群有一个 1 维表示，一个 3 维表示，一个 5 维表示，而且还可有一个 17 维表示。因而数学家的维既指空间，也指表示。3 维空间的旋转可以把五个或十七个实体联系起来是数学家想到的，你我大概都想不到。

综上所述，我们说，通过把两个 3 维表示胶合起来构造出的 9 维表示，分裂成了一个 5 维表示、一个 3 维表示和一个 1 维表示。这一事实可由方程 $3\otimes 3=1\oplus 3\oplus 5$ 标记。一个表示只是简单地用一个与它的维数相同的数目标记。胶合到一起这一行为用$\otimes$表示。（注意，既然实体不会白白消失，由方程 $3\otimes 3=1\oplus 3\oplus 5$ 去掉圆圈后得到的方程 $3\times 3=1+3+5$ 肯定也是成立的。）

通过把两个定义表示胶合在一起，我们又遇到了一个 5 维表示，其中，旋转是由它对这五个联在一起的实体的影响表示的。重复这种把表示胶在一起的操作，数学家们就得到了一个给定群的所有表示。学会了如何做 $3\otimes 3$，我们就能接着学习做 $3\otimes 5$、$5\otimes 5$ 等等。因而得到 $3\otimes 5=3\oplus 5\oplus 7$，$5\otimes 5=1\oplus 3\oplus 5\oplus 7\oplus 9$，等等。（这里我们遇到了一个 7 维和一个 9 维表示。）

有一些人实际得花很大精力来学习把表示胶合在一起的规则。对我们来说，重要的不是学习这些具体规则，而是要明白可

以有什么样的表示完全是由群结构决定的这一事实。例如，SO（3）有3维和5维表示，但没有4维表示。要异想天开地构造出SO（3）的一个4维表示，并不是物理学家所能胜任的。

我们对SO（3）的讨论也可以推广到一般的群。我们在后面谈论大统一时将看到，有些物理学家已经提出宇宙的终极设计是建立在10维空间的旋转群SO（10）的基础之上的。我们可以象前面一样，从10维定义表示出发，把两个定义表示胶合到一起。在这种情况下的结果是：$10\otimes 10=1\oplus 45\oplus 54$。

群论要点

让我总结一下这两节的要点：

1. 对称变换的乘法并不是物理学家随心所欲的创造，而是由对称操作自身的性质决定的。

2. 一个群的乘法结构可以用若干实体的变换来表示。所涉及到的实体的个数被称作这个表示的“维”。

3. 可能有的表示维数是由群的结构规定的。例如，SO（10）群有一个45维表示，但没有44维或46维表示。

4. 我们可以把两个表示胶合到一起得到其它表示。

他读的是何种数学书？

随着物理学家对自然的探索日益深入，各种整数开始出现了。例如，我们在后面一章将看到，质子还有七个“堂兄弟”。质子和它的七个堂兄提供了一个对称群的8维表示。象微积分一类的更传统的数学，完全不能解释为什么会出现这种特定的整数。在我们的现有数学框架中，只有群论能解释为什么某些数目会出现，而另一些则不会出现。

各种各样的整数的出现第一次提醒了物理学家，自然在进行他的设计时用到了群论和作了对称性的考虑。物理学的最后一个

目标，就是要决定自然选择的是什么群。

外行人一般会推测，理论物理学家使用的是极复杂的数学。描写科学家的漫画常将他们置于写满复杂公式的黑板前。尽管这一图景可能准确地描写了在某一研究非常复杂的现象的领域工作的物理学家，但如果有人去偷听两个基础物理学家的工作谈话的话，他更容易听到他们正在交流 $10\otimes10=1\oplus45\oplus54$ 之类的常识。

在上一世纪临近结束的时候，许多物理学家感到描述物理的数学越来越复杂。其实，物理学中所用到的数学不是越来越复杂，而是越来越抽象。上帝的思维似乎是抽象的，但并不复杂。而且他看来也喜欢群论。

第十章　对称性的凯旋

一个明星诞生了

大约在世纪交接的时期，物理学家们发现了经典物理学在原子的微观世界不成立的种种困扰人的迹象。他们最终意识到，牢牢植根于我们日常生活直感的经典物理学，只不过是更基础的量子物理学的一个近似。当物理学的戏剧从经典的一幕转向量子的一幕时，已经被爱因斯坦推为明星的对称，再次被推到了更耀眼的舞台跟踪灯的光环中。首先，我要向读者介绍神秘的量子物理，然后再解释量子物理如何把对称塑造成了主角。

世界的稳定性

让我们按其中的一条脉络来回顾一下量子物理的发展史。

在1911年，物理学家们确定了原子可以被描写成有若干个电

子绕核旋转的袖珍太阳系。但电子是带电的，按照麦克斯韦的电磁理论，当一个电荷改变运动方式时，它要辐射电磁波。例如，当电子跌跌撞撞地流过一个灯泡的灯丝时，就以光的形式发射出电磁波。我们能够用麦克斯韦的理论来计算运动电荷辐射电磁能的速率。

按麦克斯韦的理论，原子轨道上的电子因不断地改变它们的运动方向，会很快辐射电磁波并失去能量而螺旋式地碰到核上。所以，按经典的观点，原子应该在很短的时间内就坍塌。然而，事实上原子是非常稳定的——确实，我们的世界正是基于这一事实而存在的。

这个由于原子的发现而带来的危机，最后由丹麦物理学家尼尔斯·玻尔（Niels Bohr）解决了。玻尔在1917年大胆断言，原子中的电子只能占据某些轨道。这完全背离了当时已经建立的物理学。在经典物理中，电子占据的轨道可随它的能量而连续变化。然而，按玻尔的观点，电子只能具有与它所可能占据的轨道相应的能量。一个电子在原子中的能量因此而被说成是“量子化的”。

有了玻尔的规则，电子就不再能连续地失去它的能量了。反之，它得通过“量子跳跃”到达能量较低的轨道。在玻尔的图像中，世界的坍塌就被简单地避免了，因为当电子到达能量最低的轨道后就没有地方可跳了。

和玻尔同时代的人觉得他的图像难以接受，但在世界已经存在了不短的时间这一压倒性的实验事实面前，他们也没有其它选择。然而，仍然还有很多困惑人的问题。例如，如果说电子只能占据某些轨道，那么在从一个轨道跃迁到另一个轨道的过程中，它究竟处于什么状态呢？物理学家们最终意识到，这一类问题的回答，必然会涉及到经典和直观的连续运动观念。他们决定不再追问了。

当电子从一个轨道跃迁到另一个轨道时，为满足能量守恒定律，它发射出的电磁波能量应等于两轨道间的能量差。因而，由原子中电子跃迁发射出的光子，只能具有某些确定的能量。这和

所发射出的辐射可以具有连续能谱的经典图像极不相同。事实上，实验肯定了发射出的辐射只能具有某些确定的能量。

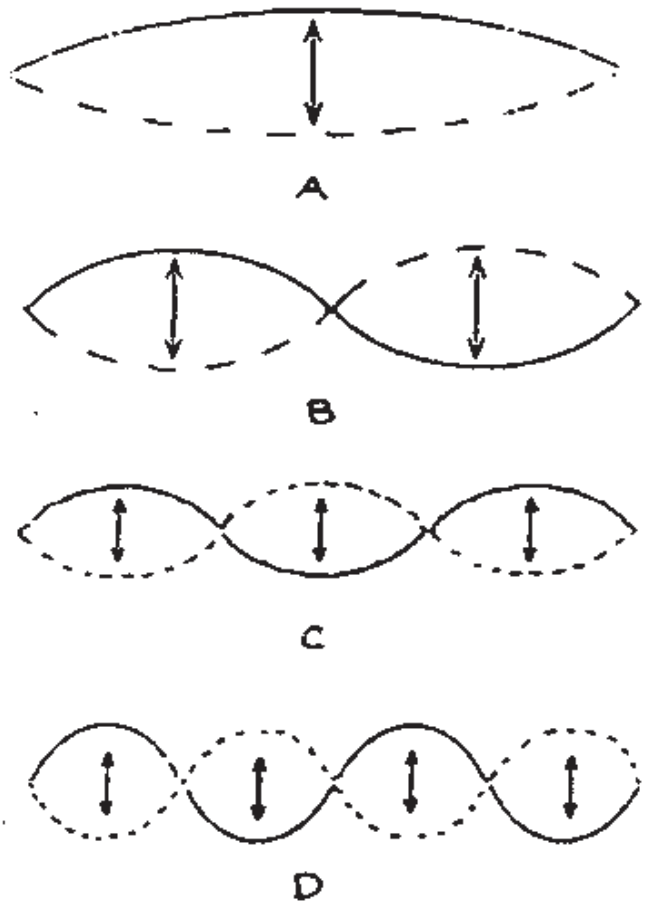
法国的新波

怎样才能理解这个困惑人的能量量子化问题呢？

在1923年，法国的路易·德布罗意“王子”(Prince Louis de Broglie）提出了一个卓越的看法。为了理解这个王子的观点，让我们先讨论一下音乐中的物理。在拉小提琴时，它的弦就会振动，从而产生了音乐（如图10.1所示）。如果把波长定义为两个波峰间的距离的话，所可能的波长显然是由弦长D决定的。我们从示意图可看到，波长只能是2D，D，$\frac{2}{3}$D，$\frac{1}{3}$D，等等。只有某种特定的波长才可能存在这一事实，自然地解释了乐器为什么会有确定的音调。我们可以说波长是量子化的。

德布罗意觉得，波长量子化这种纯经典的现象，可能与原子中的能量量子化有关。他想象电子实际上是一个绕原子核传播的波。从图10.2我们可以看到，如果这个电子波绕行一圈后要首尾相接的话，它的波长就只能取某些确定值。这一简单的想法就使得量子力学问世了。那时，马克斯·普朗克（Max Plank）和阿尔伯特·爱因斯坦以及其他物理学家，已经确定了光子的能量和动量是由它所对应的电磁波的波长决定的。德布罗意把这个结果运用到电子中，证明了他的观点精确地产生了玻尔的能量量子化规则。

但是，物理学家们被这个王子提出的新波的特性弄糊涂了。德布罗意提出了一种他称之为“领航波”的东西，这是一个指导电子前进的守护天使。奥地利物理学家厄文·薛定谔（Erwin Schrödinger）写出了描述德布罗意波运动的方程。他认为电子实际上是延展的，可以产生波动，在此意义上，一滴水只要足够大，也可充满一个环形管子产生波动。然而，给出的解释和实验事实



振动的弦的波长是“量子化的”

图 10.1　一个振动的小提琴弦的波长是“量子化的”，原因不过是弦的两端是固定的。如果 D 是弦的两固定端间的距离，波长就只能是 2D，D，$\frac{2}{3}$D，$\frac{1}{2}$D（分别由 A、B、C、D 所示）等等。例如，波长就不能是 1.76D。

最相符的是德国物理学家马克斯·玻恩（Max Born）。他提出，这种波代表的是在一特定地点找到电子的几率。在此波振幅最大的地方，即波峰和波谷处最容易发现电子。而电子仍被描绘成一个点状的物体，而不是薛定谔所认为的弥散的流体。

这一革命性的看法标志着物理学中绝对的决定论的终结。现在，几率成了在最基本的层次上控制物理学的东西，从而引得象爱因斯坦那样有地位的物理学家悲叹“上帝不会掷骰子”。确实，爱因斯坦不顾实验证据的支持，也不顾他自己就是量子物理的主要建造者这一事实，顽固地拒绝接受量子物理。



图 10.2 一个法国王子眼中的绕核旋转的电子波：因为电子波的首尾要相连，所以它的波长是量子化的。

从这儿到那儿

为了理解量子世界的几率特征，让我们回到赛车手从巴黎到威尼斯的旅行。假定他到了威尼斯，并宣称他走的是耗时最少的那条路。如果我们也具有与他同样多的关于路面条件和汽车性能方面的知识，就可以精确地决定他走的是哪一条路。这一情形代表了经典物理学：最小作用量原理精确地告诉了一个粒子从 A 点到 B 点走的是什么路径。

现在让我们来想象一下，如果赛车手遵从量子定律会是什么情况。量子的情况大大不同了。当这个赛车手到达威尼斯时，他不再能宣布他走的是最快路径。他只能说他经过幕尼黑的几率是百分之几，经过马赛的几率是百分之几。同样，如果张三先生遵从量子动力学的话，他与地面的幽会就不必走作用量最小的路径了。他也有一定的几率走与我们的日常直感相违的路径，比如，出发时很快，接近地面时慢下来。他甚至可能不走直线而经一个弯



图 10.3　艺术家关于上帝掷骰子的描写

曲的路径到达地面。与经典物理不同，量子物理只能告诉我们物体走一个特定路径的几率。当然，对宏观物体来说，量子物理的或然性就近似变为经典物理的确定性。

物理学家相信量子物理的几率解释，因为它已经得到许多实验的验证。在实际的实验中，电子是由电子枪射出的。电子枪是这样一种装置，它使电子从一段被加热的导线中跳出。(在每个电视机后都有一个电子枪，读者可能知道，它是用来轰击荧光屏以产生光点的。)实验者在距电子枪一定距离外放置了一排电子检测器，每当一个检测器被一个电子击中时，它就会发出信号。在电子枪和检测器之间置有一个开有两个狭缝的屏。现在第 5 个检测器发出了接收到一个电子的信号，我们要问电子穿过的是哪一个狭缝。

如图 10.4 所示，如果这个电子的行为象一个经典物体，例如，

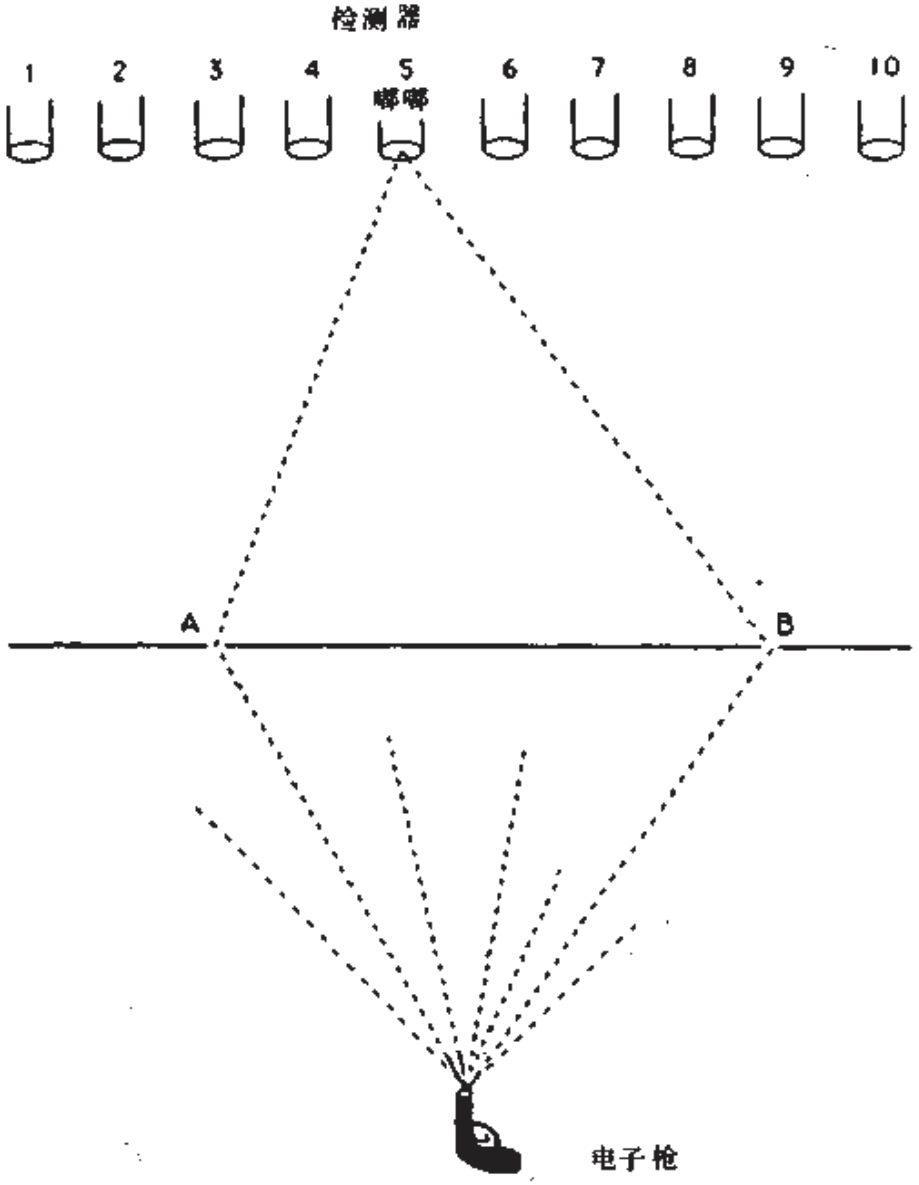


图 10.4 用电子来做的弹道学实验：一个开有 A 和 B 两个狭缝的屏置于电子枪和一排电子检测器之间。第 5 号检测器正好发出一个接收到电子的讯号。在经典世界中，我们可以决定电子经过的是哪个狭缝，但在量子世界却不能。

象一个子弹的话，我们就很容易确定它穿过的是哪一个狭缝。警察局里的弹道学专家正是靠这个吃饭的。但是如果电子就象它实际所为的那样，遵从的是量子定律，那么，即使在原理上也没有什么办法能够确定它实际经过的是哪一个狭缝。量子物理能决定的只是电子穿过每一个狭缝的几率是多少。

我得详尽地阐述这个要点。凭日常的经典直觉，我们很容易

想象，只要在每一条可能的道路旁安置上几个侦探，就能找出赛车手实际所走的路线。那么，为什么我们就不能简单地在每一个狭缝旁安上一个每当有电子经过就能咔嗒作响的装置呢？答案是这样，在量子的王国，间谍行为对电子的扰动是如此之大，以至于在这个例子里电子将不再到达第 5 个检测器，而跑到不知什么地方去了。

确定性和不确定性

这种对电子的剧烈的不可避免的影响，为说明所谓的测不准原理提供了一个实例。这个原理有时被解释成，当我们观察一个系统时必定会破坏它。这种说法本身很容易为一个爱把玩具拆开的儿童简单地理解。这种理解含有经典物理中也存在不确定性原理的意味。而事实并不是这样。不确定性原理实际上是很难捉摸的。

在经典物理中，我们作用在系统上的扰动可以尽可能地小。为夸张地强调这一点，让我们回过头去看那个赛车手。当侦探们被派去确定这个赛车手实际所走的线路时，他们可以简单地在每一条所可能走的路上布上地雷，以后再去看哪条路上的地雷爆炸了。但也没有什么东西能阻止他们使用眼睛这台精巧的仪器来探测来自赛车手身上的光子。

当我们研究微观领域时，光子对电子的影响必然是相当显著的。这是因为现在每个粒子都被描述成一个几率波。读者或许还记得，为了解释能量的量子化，德布罗意王子不得不假设原子中电子的几率波的波长和它的动量有关，因而也和能量有关。波长越短，电子所具有的动量就越大。这中间就包含了测不准原理的要诣。

为了确定电子在什么地方，我们必须“看”它。换句话说，我们必须引入另一种粒子，譬如光子，使得从电子上弹回的光子进入到某个检测器。我们探测电子位置的精度受到相应的光子的几率波的波长的限制。我们对电子位置的测量越精确，所用光子的

波长就必须越短。然而，按照德布罗意的理论，光子就必然会具有更大的动量。因而，电子位置的精确测量不可避免地意味着，在测量之后我们对电子的动量情况几乎一无所知。不确定性原理并没有说我们既不能精确测量位置也不能精确测量动量；它只是说，我们不能同时精确测量位置和动量。更精确地，应该说，我们对位置的测量越精确，对动量的测量也就越不精确，反之亦然。引人注目的是，量子物理能够给它自身的固有不确定性以精确的数学解释。

不同于普通骰子的骰子

欢迎到奇特的量子世界来，这里没有人知道粒子是怎样从一个地方到另一个地方的。物理学家变成了公布各种可能发生事件的几率的赌注登记者。

动力学是或然性的而不是确定性的这个性质，绝不是量子世界的唯一特性。确实，作为一个物理学家，我对关于量子世界的通俗讨论常常终止于此感到很奇怪。其实老天爷不仅仅掷骰子，而且掷的还是非常奇特的骰子。下面就让我们来看看他掷的究竟是什么样的骰子。

当掷出一枚骰子时，得到 1 的几率是 1/6，得到 2 的几率也是 1/6。现在问得到 1 或 2 的几率是多少？我想无论是赌徒还是非赌徒都同样知道答案显然是：1/6＋1/6＝1/3。在日常生活中，为了得到发生事件 A 或 B 的几率，我们只需简单地把发生 A 的几率和发生 B 的几率相加。

量子的骰子则怪得让你吃惊。假设我们被告知，量子的骰子掷得 1 的几率是 1/6，掷得 2 的几率也是 1/6。与平常掷普通骰子时的情况不同，我们不能得出得到 1 或 2 的几率是 1/3 的结论！正确的答案是，掷得 1 或 2 的几率介于 0 和 2/3* 之间！

---

* 原文将 2/3 误为 1/3。译者注。

说一个事件发生的几率是 0 是指这个事件不可能发生。量子的骰子与我们的直觉完全不符。掷得 1 的几率是 1/6，掷得 2 的几率是 1/6，而掷得 1 或 2 的几率则可以是 0。这怎么可能呢？这不合情理！如果我们的情理指的是建立在宏观世界的生活经验之上的情理的话，这确实不合情理。量子世界确实很奇特。

在量子世界，为了获得 A 或 B 发生的几率，人们并不是把发生 A 的几率和发生 B 的几率相加，规则要比这更复杂。尽管读者肯定不必掌握这些量子规则，我还是要把它们说出来，让你们多少了解一点其中的味道。量子物理的定律决定的，实际上是一个被称为给定事件将发生的“几率幅”的量。为了获得这个事件发生的几率，要把这个几率幅平方。规则是，把事件 A 发生的几率幅和事件 B 发生的几率幅相加，得到 A 或 B 发生的几率幅。把这个几率幅平方就得到 A 或 B 发生的几率。相加的是几率幅而不是几率。

进入作用量

量子物理的基本定律给出的是一系列事件发生的几率幅。让我们再一次来考察粒子在一定时间间隔内由被称为“这里”的一点运动到被称作 X 的另一点这样一个基本问题。(在物理中，一旦掌握了这一基本问题，就能接着得出涉及很多粒子和场运动的更一般的公式。)

回想一下，在经典物理中粒子走的是作用量最小的路径。在量子物理中，我们只能给出粒子走某一路径的几率幅。引人注目的是，“作用量”的理论结构在量子物理中继续处于中心地位。量子物理的基本定律说，走某一给定经历的几率幅由与这一经历相应的作用量决定。

为了找出粒子到达 X 点的几率幅并由此算出几率，我们将按前面的讨论，把所有可能到达 X 点的经历的几率幅累加起来。因此，如果大体知道粒子在“这里”，我们就可以决定它在以后任一

时刻到达 X 点的几率幅。

尽管我们再不能象在经典物理中一样精确预言粒子要到那儿去，但我们仍能预言它到任一点的几率。因而，说量子世界是非确定性的并不完全正确，只不过是绝对的决定论被赌徒式的决定论所代替。一个赌徒不能知道掷出一枚骰子后会得到什么数，但他知道在千千万万次投掷中，得到 1 的次数大约占了 1/6。同样，物理学家也可以预言多次测量的平均值。

人们很容易理解，为什么象爱因斯坦那样的经典物理学家会感到深深的困惑。因为，为了预言一个粒子的运动，我们必须"读出"这个粒子将来所有可能的经历，然后把它们"加"到一起。这个真理比我们最大胆的想象还要怪异。

累加经历

上面所讨论的量子物理的表述被称作"累加经历"或"路径积分"方法。(大多数教科书和通俗读物用的是薛定谔的波动力学表述或魏尔纳·海森堡(Werner Heisenberg)在 1925—1926 所给出的矩阵表述。) 路径积分表述始于保罗·狄拉克，后来大约在 1950 年为理查德·费曼所发展。它的一个好处是直接引入了作用量，使经典物理和量子物理间的联系变得明显。

路径积分的表述方法对于讨论对称性是非常理想的。我们在第七章中学到，如果经典物理具有一个对称性，那么作用量在与此对称性相应的变换下是不变的。由此引出，既然量子物理和经典物理都由同样的作用量支配，它们就也应有相同的对称性。由于这一原因和其它原因，在过去的 10 年到 15 年中，就基础物理的讨论而言，路径积分已经基本取代了老的波动力学和矩阵表述。

在路径积分表述中，量子物理的要诣可总结成两个基本规则：(1) 经典的作用量决定了一事件系列发生的几率；(2) 这一事件系列和另一事件系列发生的几率，由与这两个事件系列相应的几率幅决定。

给出的这些规则代表了量子物理的奠基者们所取得的惊人成就，其中所包含的思维过程只能被称为天才的量子跳跃。

量子定律自身并不完全成其为一个理论，它只是为在量子王国建立相应的理论提供了一个方法。把这一方法运用到牛顿力学可得到量子力学，运用到麦克斯韦的电磁理论可得到量子电动力学，运用到爱因斯坦的引力理论可得到量子引力学。但是，量子电动力学的作用量仍然是麦克斯韦的作用量，具有它的所有对称性。

有时候，量子理论被说成是一种能获取可与实验结果比较的预言的方法。这种说法忽略了这样一点，因为我们完全有理由争辩说，物理学本身就是获取与实验相符的预言的方法集。如果说量子定律相当于一个方法，在同样意义下，牛顿定律也构成了一种方法。说牛顿定律是因和我们的日常直感更相符而得到更好的“理解”，是一种循环论证。真正的情况是，现在可以把牛顿定律理解成量子定律在一定情况下的近似。物理学家的希望是，有一天，我们现在所有的方法能由另一个形式上更精美、更简明、应用上更广泛的方法所导出。再说一遍，最终我们在与自然对话时将不再用“为什么”，而只用“怎样”。理论物理学家试图知道他的思想，但就我所知，他们绝不能知道他为什么要这样想。

同时在这里和那里

经典物理和量子物理的深刻差异，强烈地体现在我们如何描述系统在一个给定时刻的“状态”。系统的状态这种说法是很自然的，例如，在奥运会开幕前体育评论员往往爱谈论某个运动员或运动队的竞技状态。为简单起见，让我们考虑单个电子时的情况。

在经典物理中，电子的状态由它在某一时刻的位置给定。例如，如果电子在巴黎，我们就说电子处于|巴黎>态；或者，电子在罗马，我们就说电子处于|罗马>态。（习惯上，物理学家用符号|名字>来标记一个态，这里“名字”用来指明所谈论的态。）

在进到量子世界后，我们不再能指出电子的位置，而是换之以指出在给定时刻电子出现在空间任一点的几率幅。例如，可以通过指出，电子处于巴黎的几率幅是1/2，处于罗马的几率幅是1/10等等，来标明电子所处的|“巴黎”>态。因为最容易在巴黎发现这个电子，故继续使用巴黎态这个名字，但用引号来提醒我们自己，电子只是倾向于出现在巴黎。类似地，另一个电子所处的状态可以被称为|“罗马”>。其含意可通过指出电子出现在各点的几率幅来确定，譬如说，在此例中就可指明电子出现在罗马的几率幅是1/2，出现在巴黎的几率幅是1/10，等等。量子物理学家的工作就是将所有可能的态分类，并决定随着时间的流逝电子怎样从一个态跃迁到另一个态。

然而，在这里我们感兴趣的是另一点，即在神奇的量子王国，我们可以将态叠加起来！例如，我们可以考虑|“巴黎”>+|“罗马”>这样一个态，其含意是：电子处于巴黎的几率幅是1/2+1/10，处于罗马的几率幅是1/2+1/10，等等。实际上，我们能将两个态按我们所需的任何比例叠加起来。因此，a|“巴黎”>+b|“罗马”>的含意是，电子在巴黎的几率幅是a×1/2+b×1/10，在罗马的几率幅是a×1/10+b×1/2，等等，其中，a、b是我们选择的两个数。

态可以叠加到一起，是量子世界的另一个古怪特性。在经典物理中，把两个态叠加到一起完全没有什么意义。|巴黎>+|罗马>态是什么意思？从经典观点看，电子不能同时处于巴黎和罗马。

担任主角

最后，解释对称性如何在量子世界中确立自己的明星地位的时机来到了。正是态可以叠加在一起才使得对称性的考虑在量子物理中比在经典物理中更有力。为了明确起见，先让我们看看经典物理。

考虑一个绕恒星运转的行星轨道，旋转对称告诉了我们什么呢？如我前面所说，旋转对称并不要求轨道必须是圆的，而是说不管我们把这个轨道转过什么角度，所得的轨道都是一个可能的轨道，见图 2.2。这个结论相当明显，也不特别使人感兴趣。

相反，考虑一个绕原子核运动的电子轨道。我们认为，由 SO(3) 所描述的旋转不变性是成立的。在量子世界中，我们不再能谈论精确的电子轨道，而只能谈电子态。假定一个量子理论家已经把电子绕核旋转的所有可能态都分了类。现在，假定我们的电子处于|1>态。

让我们将原子旋转一个任意角度，并用|R1>来标记得到的新态。旋转对称的定义告诉我们，|R1>也是电子的一个可能态，并且它一定是一个与|1>具有同样能量的态。为了看清这一点，我们可以考虑旋转观察者，而不是旋转原子。然而，最好还是让我们比较一下相互旋转了一个角度的两个观察者的感受，就象在第二章时一样。一个观察者见到的是|1>态，另一个观察者见到的是|R1>态。说物理学具有旋转不变性是指它不偏向这个观察者也不偏向那个观察者。因而，|R1>与|1>必定具有同样的能量。

这时，我们清醒的头脑中就出现了两种逻辑的可能性：要么|R1>严格就是|1>，要么不是。

假定|R1>等于|1>。这就是说，当我们旋转原子时，电子的状态保持不变，即电子的分布几率不随旋转变化。换句话说，处于|1>态的电子的几率分布是球对称的。相互旋转过不同角度的观察者看到的都同样是状态|1>。

第二种情况更有意思，|R1>不等于|1>，一般说，它是|1>和其它态的线性组合。为明确起见，让我们假定涉及到了用|2>，|3>，|4>，|5>标记的另外四个态。换句话说，|R1>可用线性组合 a|1>+b|2>+c|3>+d|4>+e|5>表示。(这里 a、b、c、d、e 当然依赖于我们作的是什么样的旋转。)

现在假定我们旋转|2>态。出于同样的考虑，我们可以期待旋转态|R2>等于线性组合 f|1>+g|2>+h|3>+i|4>+j|5

>，其中，f、g、h、i、j 取决于所作的旋转。我们可以继续旋转|3>、|4>、|5>态，它们每一个经旋转后得到的态都将等于|1>、|2>、|3>、|4>、|5>5 个态的线性组合。

钟响了

现在钟在我们心里响起来了。这个讨论好象相当熟悉。确实，这里的情况和我们在讨论群表示时遇到的完全一样。这里，在旋转操作下，量子态|1>、|2>、|3>、|4>、|5>被变换到它们的线性组合。因而它们提供了旋转群 SO（3）的一个 5 维表示。

在前一章中，我们谈到过抽象实体，或箭头、或其它相互变换成线性组合的任何东西。引人注目的是，19 世纪抽象的数学讨论，在量子态的变换中被从物理上实现了。群的内在数学结构并不依赖于我们谈论的是抽象“实体”还是量子态，甚或是苹果和小猫。

在上面，为了使表示明确起见，我假定了|1>属于一个|5>维表示。一般地说，量子态|1>可能属于群所允许维数中任一维数的表示。例如，它可能与其它 8 个态一起属于一个 9 维表示。一个给定态究竟属于那一个表示依赖于物理细节。

量子物理中的群论

在量子物理中，对称性和群论的讨论对实验观察究竟意味着什么呢？

我们已经知道，原子中电子的量子态属于旋转群的表示。旋转对称告诉我们，属于同一表示的所有电子态具有同样的能量。就如我已经指出的那样，这是因为属于同一表示的态可以被旋转互换。因此，在我们的例子中，可以选择一个旋转，使得|1>被旋转成|2>。换句话说，可以找到一个使得|R1>等于|2>的旋转。实验物理学家确实观察到不同的量子态具有完全一样的能量。

读者应该记得，所允许的表示维数是由群的结构决定的。例如，旋转群没有4维表示。如果实验物理学家在原子中观察到4个一组的具有同样能量的量子态，由群论他们就该知道，一定能找出具有同样能量的其它态。

从实验上讲，原子中电子态的能量是由电子跃迁到一个较低的能量状态时所放出辐射时的能量推出的。假定电子从一个属于5维表示的态跃迁到一个属于7维表示的态，一共就有5×7＝35（普通乘法！）种不同的可能跃迁。如果没有群论，这35种可能跃迁都必须逐一研究，原子物理学就将是一门冗长乏味的科学。幸运的是，我们可以不经冗长的计算就能由旋转对称和群论立即知道这35种跃迁中每一个的相对几率是多少。（从实验上讲，某个跃迁所放出的辐射强度直接正比于这个跃迁发生的几率。）就象我在第二章中强调过的那样，基本的旋转对称简单地要求，头相对偏转了一定角度的两个观察者必须感受到同样的物理实在的结构。这个看起来无关痛痒的要求，足以确定这35种可能跃迁的相对几率。

随便提一下，群论可以强迫某些跃迁的几率为零。换句话说，旋转对称禁止电子作某些特别的跃迁。物理学家把这称作选择定则。一般地说，开始看起来有不少可能的跃迁，但在作了对称性的考虑后就会发现，实际能发生的没有几个，其它的都是被禁止的。

事实上，选择定则是对称与守恒的联系所明显要求的。依照艾米·诺特尔的理论，一个对称性的出现意味着一种守恒定律。正如那些能量不守恒的过程是被禁止的一样，某种量子跃迁被禁止，是因为它们违反了相应的守恒定律。

在历史上，研究原子的物理学家曾陷入过一个容易引起混淆的繁乱的实验数据的泥潭。有许多态具有同样的能量，在从一个能态到另一个能态的众多可能跃迁中，有一些比另一些发生得更频繁。杰出的美籍匈牙利物理学家尤金·维格纳最终意识到，借助于旋转对称和群论，可以从繁乱中找出秩序来。

对称性在量子王国中的凯旋

让我们稍稍停下来，把已学到的东西整理一下。在经典物理和量子物理中，对称性都限制了基本定律的可能形式。但在量子物理中，对称性走得更远。尽管把两个不同的轨道叠加起来的说法在经典物理学中没有什么意义，但由于量子物理的几率解释，我们可以把量子态叠加起来。一个态在作了一个对称变换后变成了一些量子态的线性组合。经过一个抽象的反过程，在量子世界实现了19世纪的群论的反刍。（这就好象一个文明已经创造出了乘法的规则，后来只不过是意识到，实际上可以把这些规则用于计算篮子里的苹果有多少一类的事上。）如果对称性是名符其实的话，属于同一表示的态就必须具有同样的能量。对称性还给量子态间的量子跃迁制定了规则。因而，在量子物理中，对称性不仅告诉我们关于基本定律的情况，它还告诉我们与实际物理状态有关的东西。

IV

了解他的思想

第十一章　夜晚森林中的八重路

亚原子森林中的双胞胎

当爱丽丝跑入模棱两可之地时，她被迷惑住了。1932 年，爱丽丝的同胞詹姆斯·查德威克漫游了一个新开发的原子森林，他自己也奇遇到一个模棱两可之地。这次奇遇的结果是，他后来被封了爵位。

查德威克是我们在第三章碰到的一个不幸的战俘，他发现了前所未闻的粒子即中子。就强大的原子核力量而言，中子的习性与质子的习性完全相同。自查德威克发现中子以后，物理学家已经发现，亚原子中不但包括面目相同的双胞胎，而且包括面目相同的 3 胞胎甚至相同的 8 胞胎。象爱丽丝一样，物理学家们被搞得莫名其妙，他们也被迷惑住了。大自然想告诉我们什么呢？

1930 年之前，物理学家们就已开始研究原子核。仁慈非凡的大自然使这一探索行动成为可能：她刚好提供了天然放射性物质

这种必要的工具。放射性是1896年由法国物理学家安东尼·亨利·贝克勒尔（Antoine Henri Becquerel）无意中发现的。

人们不久便了解到，放射性物质中含有不稳定的核子，这些核子千方百计进行自我重新排列，并在排列过程中发射出各种各样的粒子。我已经指出，观看一件物体的过程包括用光子轰击该物体和用我们头上就有的那种极佳的光学探测仪捕捉被散射的光子。粒子加速器只不过是制造一种使视觉基本过程得以延伸的巨大仪器罢了。要观察物质的内部结构，我们就必须用具有足够能量能穿透物质外层的粒子，来轰击那些物质。当物理学家们还没有想到制造加速器的时候，放射性物质在一段时间内便提供了一种天然的高能源。利用这些天然“加速器”，物理学家们开始把各种各样的物质放在已知的放射性源中。

1930年，德国物理学家W·鲍德（W. Bothe）和H·贝克（H. Becker）发现，当某些材料接触到放射性源时，它们就发出一种神秘的辐射。那时，物理学家们相信，世界是由电子、质子、光子和引力子构成的。人们认为，一个物质原子是由无数个围绕核子旋转的电子构成的。核子则被认为由质子以及可能还有电子构成。查德威克被德国人的报告弄得迷惑不解，他作了一系列的实验，表明这种神秘的辐射包括一种那时仍不被人所知的粒子。这种粒子呈电中性，因此，后来被称为中子。

在观察一个乒乓球和高尔夫球碰撞时，通过利用能量和动量守恒，我们可以很容易地确定两个球的相对质量。通过仔细观察中子同各种各样的原子核碰撞，查德威克以同样的方法测出了中子的质量。令他大吃一惊的是，得出的中子的质量几乎同质子的质量完全相等。中子和质子两者简直难以区分。

并非只是无所事事的随营人

进一步的实验很快证实，一个原子核是由一定数目的质子和中子组成的。在鲍德和贝克的实验中出现的情况是，由放射性源

发出的高能辐射把一些电子轰击出去。

原子的化学性质由在核子外围旋转的电子数目来确定。电子数和质子数相等，所以，原子总体上呈电中性。因而，中子在原子的化学性质中不扮演任何角色。例如，碳原子总是包含着 6 个质子，它含有 6 个而不是 5 个或 7 个质子这一事实就赋予碳原子以“碳性”。这种碳性包括它那独特的喜欢结合的癖性，因而在生物学中发挥了极其重要的作用。但是，人们观察到，碳原子可以有从 4 到 9 个中子数不等。在物理学的戏剧中，中子被分派扮演什么角色呢？在强大的质子身边，难道中子仅仅是一个无所事事的随营人员吗？很难说。结果，人们发现，没有中子，原子核就不稳定。

一个平衡法则

原子核的稳定性，推而广之，整个世界的稳定性，是随大自然的一种踩钢丝平衡法则的变化而变化的。因为质子带电，所以它们彼此排斥。在一个原子核中，质子间的电排斥对原子核构成撕裂的威胁。因此，原子核的存在本身就迫使物理学家们得出结论，即原子核内部的质子和中子由于一种强大的相互吸引力而结合在一起。一般地，物理学家们把质子和中子称为核子。形成核子之间的吸引力的新的相互作用被称为强相互作用，因为经过计算，它比电磁相互作用约强 100 倍。

因此，人们可能会认为，如此微弱的电力会被完全淹没在原子核中。但是，大自然玩了一个有趣的花招。电磁相互作用虽较弱一些，却有着较远的作用。我们记得，两种电荷之间的作用力随其距离的平方的增加而减弱。与之相对照，两个核子之间的强相互作用却以更大的幅度在减弱，以致两个核子只在实际相邻时才吸引。人们认为，强相互作用是短程的，电磁相互作用则是长程的。在一个熙攘的鸡尾酒会上，通过短程音响相互作用，一个人只能同他身边站着的人闲聊，但通过长程光学相互作用，他却

能够向位于房间对面惹眼的陌生人挤眉弄眼。

人们可以把原子核想象为一个装有核子的袋子。核子彼此间具有强烈的吸引力，但每一个核子又只能吸引其邻近的核子。比此弱得多的电排斥力，却能从一个质子触及到原子核另一侧的质子。原子核为一对势均力敌的职业拳击手提供了煞有趣味的舞台。一位拳击手出拳力量大但够不远，而他的对手拳头够得远但力量较弱。显然，在一个大原子核中，电排斥力有可能取胜。例如，铀原子核带有 92 个质子和 140（或 140 左右）个中子。即使掉一只帽子，它也可能发生裂变。电排斥力把原子核撕裂。在撕裂的过程中，它释放出一定量的能量。我们人类就是努力在各方面利用这种能量。当然，我们在某些方面利用它们会比另一些方面的利用更为明智。另一方面，两个很小的原子核可以发生聚变。有些人认为，在这一聚变过程中释放出来的能量，对人类的未来将是至关重要的。

我们很幸运，绝大部分现存的原子核是完全稳定的。在这些各种各样的原子核中，强相互作用和电排斥二者势均力敌，哪一方也不能取胜，把对方击倒。中子在这一对峙中起着关键的作用。在稳定的原子核中，带中性电的中子能够帮助强相互作用完成任务，同时也不增加电排斥力。例如，氦原子核带有 2 个质子和 2 个中子。中子如不在场，氦原子核就会分裂。正如在第二章中所解释的，恰恰因为这种大自然所执行的平衡法则，我们才能够沐浴在温暖的阳光的稳定照射之下。

在物理世界中，可见结构本质上依赖于所有基本相互作用的存在。这太令人惊奇了。如果没有强相互作用，原子核就不会存在。可能存在的唯一的原子只能是由 1 个质子和 1 个电子构成的氢原子。宇宙则仅仅由氢气和一些自由游移的中子构成。如果没有电磁相互作用，那么原子就不会存在，宇宙则只是包括一团核子和自由游移的电子。两团核子相遇时就会粘着在一起，形成更大的一团核子。最后，宇宙中所有的物质就会形成一大团核子。

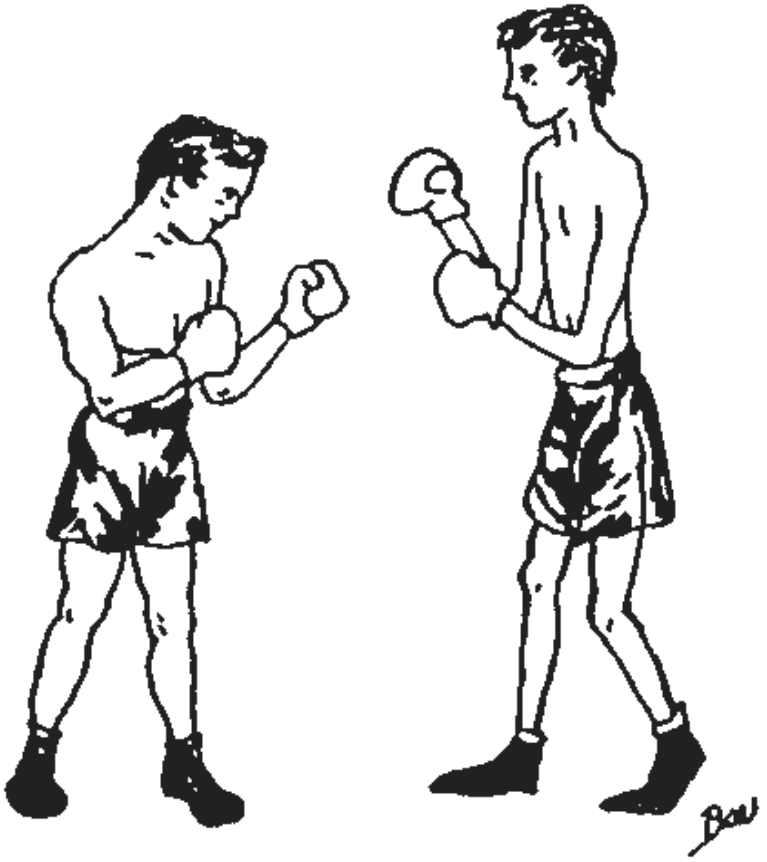


图 11.1　原子核为一对势均力敌的职业拳击手提供了舞台。

弱相互作用

在 20 世纪 30 年代期间，人们越来越清楚地认识到，另一种仍不为人所知的相互作用即弱相互作用，造成了某些原子核的放射性。弱相互作用的发现使人们最终得到了一系列物理学中已知的基本相互作用。我们已经结合讨论了弱相互作用和宇称不守恒，在后面的一章中，我们将更详细地讨论弱相互作用，这里，我只指出，弱相互作用的力程比强相互作用的力程短 1 千倍。由于它们的力程短，所以，与电磁相互作用和引力相互作用相比较，强相互作用和弱相互作用不显现于宏观现象之中。当然，电磁相互作用和引力相互作用的力程都很长。

大自然显示一种对称

通过阐明中子如何对宇宙的健康运行起着关键的作用，我现在已经恢复了它的自尊。但是，中子在质量上为什么同质子那样接近则仍然是个谜。在前面的讨论中，没有什么东西要求中子和质子具有相同的质量。经过计算，质子和中子的质量分别约为938.2MeV 和 939.5MeV，它们的差仅为千分之一！(顺便提一下，1MeV 即 100 万电子伏特，是加速通过 100 万伏特电位差的一个电子所获得的能量。由于爱因斯坦取消了质量和能量之间的差别，许多物理学家都习惯上用能量单位来计算质量。)

进一步的研究表明了另一个使人吃惊的事实：通过计算，2 个质子之间、1 个质子和 1 个中子之间以及 2 个中子之间的强相互作用是近乎相同的。除了一个带电而另一个不带电这一几乎可以忽略的事实之外，中子和质子的习性是完全一样的。以上事实之所以可以忽略，是因为作用在一个单个核子上的电磁作用力是非常弱的。

我们在这里同两个难以辨别的人相逢了：他们言行相似，体重在千分之一的范围内相同，但是其中一个蓄着大胡子而另一个没有蓄胡子。

1932 年，沃纳·海森堡(Werner Heisenberg) 大胆地提出：大自然在明确暗示，中子之谜只能通过大自然设计中的一种基本对称来理解。当然，人们并不认为海森堡是一个保守的物理学家。海森堡开始想象：如果他能够摒蔽掉电磁相互作用、弱相互作用和引力相互作用的话，那么会发生什么情况呢？我在第二章中，已经提到了在研究一种给定的相互作用时怎样玩摒蔽或忽略较弱的相互作用这一十分有益的把戏。海森堡猜想，中子和质子在质量上将变得完全相等。电磁性造成了质子和中子之间的微小的质量差，这种猜想不无道理。因为电磁作用力比强作用力弱 100 倍，所以，我们可以天真地期望它的效力约为百分之一或更小。

在前一章中，我解释说，各种各样的原子状态可以经旋转而相互转变。旋转对称保证这些状态具有完全相同的能量。我们记得，这不过是说，两个观察者如果转换观察角度，他们就必然推断出物理实在的相同的结构。总之，在对称这种说法中，该点是其平凡而深刻的本质。正是受到旋转对称的启发，海森堡才假设：质子可以“旋转”成为中子，强相互作用在这种情况下具有不变性。

海森堡的逻辑推理与我们讨论旋转对称和原子状态时所使用的逻辑推理恰恰相反。从牛顿时代以来，我们的直觉要求旋转对称。对于量子物理，旋转对称意味着，各种各样的原子状态必须具有相同的能量。另一方面，海森堡以查德威克的惊人发现即质子和中子具有几乎相同的质量（根据爱因斯坦的说法，因而具有相同的静止能量）为起点，推导出了隐藏在大自然设计中的对称性的存在。

在第六章中，我们曾问，想玩爱因斯坦游戏的物理学家们怎样才能到达第一个方阵。在下面的事例中，一个实验事实唱出了一种美妙的悦耳动听的对称性曲调。

海森堡的对称被称作“同位旋”，但由于各种各样的历史原因，我们在此不加讨论。与之相应的群被数学家们称作 SU（2）。“2”这个数字提醒我们，此群是通过使两个立体相互变换来确定的。

此时此刻我必须插一句，在叙述和介绍同位旋时，为了不打断叙述的流畅，我在历史的精确性上做出了牺牲。正如在物理学史中经常发生的情况一样，同位旋的发展充满了错误的概念和混乱的思想。为了澄清事实，证明同位旋是一种对称，许多物理学家都做出了贡献。然而，我发现把同位旋全部归功于海森堡是非常方便的。在这里，我沉浸在对历史的删改之中。当然，物理学课本甚至也通常犯同样的毛病。对该章作的一个注解简述了同位旋的历史。

管窥内部世界

海森堡的同位旋不同于我们所生活的实际空间中的旋转，因此，我们在上面的一个段落中使用了引号。事实上，海森堡在一个抽象玄妙的内部空间中看到了一种旋转；“旋转”和“空间”两个词语都是形象的用法。

在对称作为物理学中的一个基本概念的发展过程中，同位旋标志着一块醒目的里程碑。

物理学家从前在思考对称时，他们想到的是时间空间的对称。在我们对时间空间的直接观念中，宇称、旋转、甚至洛伦兹不变性和广义协变性多少已根深蒂固。现在，海森堡以雷霆之势开辟了一个玄妙的内部空间。原来，在这里也可以进行对称运作。

旧思想的卫护士肯定会发现海森堡的提法难以被其接受。人们一向认为，时空的种种对称无疑是精确的。海森堡翩翩来到这里，却提出一种明显不精确的对称。时空的对称是普遍的：它们适用于一切相互作用。同位旋对称则只适用于强相互作用：质子和中子具有不同的电磁特性。

随着时间的流逝，海森堡的内部对称的思想好象已不再那么富有革命性。对后来的几代物理学家来说，内部对称和时间空间对称看上去是同样的自然和真实。

我已经强调指出，对称原则告诉我们，尽管物理实在在不同的观察者看起来在表面上并不相同，但实际上，它在结构层面上却是相同的物理实在。例如，此时此刻，有一位观察者看到了 1 个质子，而另一位观察者一开始就从同位旋的角度观察，他可能会坚持说他看到了 1 个中子。他们都很正确。就好象对一位观察者是“上”的东西，另一位观察者却可能是“下”。因此 2 个质子之间的强作用和 2 个中子之间的强作用应该是相同的。人们观察到的这一事实之所以顺理成章，是因为对于一位观察者来说好象是 2 个质子，而对另一个观察者则是 2 个中子。

群论的全部力量

我们论述的这种模棱两可的情形一旦被假设为一种对称，那么群论的全部力量就会在物理学上发挥出来。我们可以计算出SU（2）的各种表示，或者在一本数学书中把这些表示查找出来。第七章的一般考察意味着，对与强相互作用的任何粒子——从原子核到各种亚原子粒子——都必须属于SU（2）的一个表示。人们认为，属于同一表示的粒子是一种多重态的组成部分；更具体地说，是一种两重态、三重态、四重态等等的组成部分。一种多重态的各个组成部分都必须具有相同的能量或质量。这一点毋庸置疑。

根据艾米·诺特尔的说法，一个守恒量必定与同位旋对称相关；它被简称为同位旋。电磁相互作用的粒子带电荷。同样，强相互作用的粒子带同位旋，同位旋不守恒的强相互作用过程是禁止的。此外，各种给定过程的相对几率是由群论确定的。这种情形与我们在前一章讨论旋转对称时遇到的情形完全相似，而且必定相似，因为起决定作用的数学是不依赖于物理学而存在的。

强相互作用太强

我们一旦弄懂了同位旋这一物理概念，随后它的具体应用与我们的论述就没有特别的联系了，所以最好留待原子物理学家加以研究。严格地说，我们的重点是，在前面的论述中用实验可以证实的预言是同位旋对称性的独有的结果。我从未提到强相互作用理论可能是什么。这与此没有关系。

如果有人企图建立强相互作用理论，同位旋的确会对该理论的可能的形式施加严格的限制。但是，即使有人有一种理论，那也没有多大的用处，因为根据定义，强相互作用很强。

学物理的学生常从教科书中得到一种印象，即物理学关心的

是严格解。为了说明各种物理原理，教科书的作者自然倾向于论述那些有可能找到解的简单而理想的情形。在实际实践中，物理学家们不得不求助于一种叫作微扰的方法。例如，为了计算出地球绕太阳的运行情况，物理学家起初会忽略其它行星，然后他再计算出其它行星对地球的大体影响。因为其它行星的影响很小，所以，这种方法效果不错。

量子物理学的基本思想与此类似。当两个电子散射的时候，这两个电子发生相互作用的几率仅仅约为 1/137。这一数字 1/137 是凭经验得出的，它测出了电磁相互作用力，称为电磁耦合常数。让我们假设两个电子确实相互作用。当它们分离时，它有一种量子几率，描写它们可能的再次相互作用。两个电子两次相互作用的几率是（1/137）×（1/137），即约为万分之一。因此，我们可以忽略两次相互作用的影响，或把它作为一种很小的修正对待。对物理学家来说，幸运的是，四种基本相互作用中的三种有弱耦合，因此，可以使用微扰方法。

大自然是善良的——但并非尽善尽美。在强相互作用中，耦合常数基本上为 1。因此，当两个核子散射时，发生两次相互作用、三次相互作用等等直到无穷，与一次相互作用具有同样的可能！在这里，微扰法一败涂地。物理学年鉴中充满了运用第一原则来计算两个核子之间的作用力的徒劳企图。原子物理学家们最后放弃了这种企图，采取了一种准唯象学的方法，即把经过实验测出的两个核子之间的相互作用力作为一个给定条件，然后再设法计算出原子核的特性。

著名的足球运动员常常以其诨号而广为人知：如哈维·“太矮”·马丁和埃德·“太高”·琼斯。对理论物理学家来说，强相互作用“太强”，但力程“太短”。

容忍无知

对称的力量和光辉在于允许我们可以不顾及建立强相互作用

理论中的困难。对自己的无知，我们能够容忍和不理睬。

在历史上，我们对自己的无知的容忍态度具有相当大的重要性。多数粒子都参加一种以上的相互作用。(如，质子就参加所有四种基本的相互作用。) 在研究弱相互作用时，物理学家们遇到了许多过程，它们涉及到的粒子也发生强相互作用。幸运的是，通过使用对称，集中研究弱相互作用的物理学家控制了强相互作用这头怪物。结果，在 20 世纪 70 年代初之前，弱相互作用得到了彻底的阐释；物理学家们再也无须等待一种强相互作用的完整理论。

在图 11.2 中，可以看到强相互作用的情形。

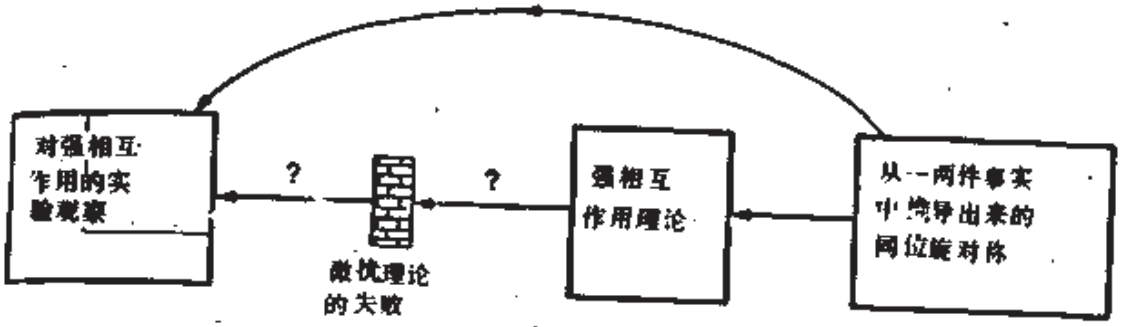


图 11.2　从 20 世纪 30 年代到 70 年代初强相互作用研究的图景。

当然，与仅仅考虑对称相比，一种完整的理论可以告诉我们更多的东西。对称告诉我们，在同一多重态中的状态必定具有相同的能量，但它却不能告诉我们那种能量是什么。因此，严格说来，在图 11. 2 中，从对称出来的线路绕过了理论箱，该线路只能引导我们进行一些实验性的观察。我们已把它作为设在实验性观察箱中的一个小一些的箱标了出来。

介子

尽管强相互作用力禁止我们建立一种有意义的理论，它却并不妨碍我们理解相互作用的本质。20 世纪 30 年代初，日本物理学家汤川秀树对强相互作用和人们所清楚的两种相互作用作了比

较，他很想知道强相互作用的力程为什么短。

正如我们在第四章中指出的，场的思想取代了超距作用的思想。我们把两个电荷之间的电力描述为一个电荷同由另一个电荷发生的电场“对话”的结果。在量子物理学中，场的能量集中在波包中，电磁场集中在光子中，引力场则集中在引力子中。因此，根据现代物理学，当两个电子在场中时，其中一个就会以一定几率放射出一个光子，另一个则把该光子吸收掉。这一过程迅速重复着。在两个电子之间的这种光子的交换就产生了我们观察到的电力。同样，在我们的身体和地球之间不断进行的引力子交换，把我们固定在地球上。正如月下老人和穿梭往来的新外交官一样，光子在双方之间不知疲倦地穿梭往来，把一方的意图传达给另一方。

自早期物理学以来，力的概念一直是属于最基本的和最神秘的概念。因此，当物理学家们终于把力的起源理解成由于一个粒子的量子交换的结果时，他们就感到相当满意了。

以理解力的本质为条件，汤川在 1934 年决定，必须为强相互作用提供一个“婚姻中间人”。汤川大胆地假设了一种新粒子。这种粒子后来称为 π 介子，或简称介子。就这样，他预测出了介子的特性。这真是令人吃惊。因为这一奇迹，他被授予了诺贝尔物理学奖。让我们来考虑一下在一个原子核中多少有些静止的两个核子。其中一个核子以一定几率幅放射出一个 π 介子，另一个核子则吸收该介子。正如月下老人一样，这一介子在两个核子之间穿梭往来着。让我们注意一个放射 π 介子的核子。等一等！好象出了点差错。这种假设的放射过程违反了能量守恒定律！根据爱因斯坦的理论，一个静止的粒子甚至同样有一定能量，其能量等于其质量乘以 c^2。既然一个处于原子核内的核子具有的能量等于其质量乘以 c^2，它怎么会放射出一个 π 介子而仍然保持作为核子呢？况且即使该介子几乎不运动，它也必定至少有着它的质量乘以 c^2 所得的能量呢！

汤川成功地把这一表面上的困难变成了自己的有利条件，令人大为惊讶。通过巧妙运用测不准原理，他成功地解释了强相互



图 11.3　π介子作为一个老媒人，一个穿梭往来的癖好受到体重限制的胖姑娘。

作用的短程问题，并预测出了π介子的质量。这里，起关键作用的是量子物理学。

贪污犯

我已经解释过，测不准原理告诉我们，我们不能任意精确地同时测量一个粒子的动量和位置。与此相似，我们也不能完全精确地测出一个过程的能量和该过程所用的时间。(我们记得爱因斯坦的论文中的有关概念之间的相互关系：一个粒子在空间中的位置同它在时间中的位置相关；它的动量同它的能量相关。因此，看似有理的是，动量和位置作为一对，能量和时间作为另一对，它们遵循着测不准原理。) 如果我们完全确定核子放射π介子的时间，那么我们就测不准有关的能量，我们也不知道能量是否守恒。测不准原理允许能量只是短暂的不守恒。

这种情形使我想起了贪污。贪污的一个基本原则是，窃取的钱越多，贪污盗窃行为就会越早被人觉察。π介子象一个企图逃脱的贪污犯一样，但不是携款而逃，而是携能量而逃。与实际生活中的贪污犯不同，π介子总被大自然生擒活捉并要求退还其能量。

恰如艾米·诺特尔所阐述的那样，大自然要求在整个过程中能量守恒。在这种情况下，两个核子的相互作用也守恒。因此，π介子必须被一个核子迅速吸收。说到贪污，介子企图带走的能量越多，它就越快地被捉住。

大自然非常警觉，所以，即使介子以光速运行，它也不能在放射和吸收之间远逃。汤川就这样解释了原子核力程短的原因。如果两个核子相隔太远，它们便不能意识到彼此的存在。如果使用另一个比喻的话，我便可以说，π介子可能正象一个月下老人，象一个因身体过重而行动不便的肥胖的媒婆。如果双方居住的距离相隔过远，她就不愿意插手其间。

很明显，原子核的力程是由π介子的质量确定的。π介子企图偷走的最少能量是同其质量相关的静止能量。它确定了允许介子从一个核子到另一个核子的最大时间。基于知道原子核的力程，汤川预测说，π介子的质量应该是核子质量的十分之一。

顺便提一下，因为我们知道光子没有质量，我们现在懂得了电磁相互作用力程长的原因。尽管我们从没有探测出引力子，但是我们相信它也是没有质量的，因为引力相互作用的力程也较长。

一个自负的保守者

预测到存在一个具有某些特性的基本粒子，是理性头脑的一种最高行动。狄拉克（Dirac）和泡利（Pauli）做到了这一点，几年后，汤川也做到了这一点。他们的所做所为同当时物理学界盛行的社会风气背道而驰。汤川后来写道，在已知的物质界线之外思考就是“趾高气扬，就是不惧怕神怒”，而且“几乎在潜意识中对这些思考强烈禁止。”

在大自然面前自负，然后又看到它表示友好，在这其中有着极大的满足。对理论物理学家来说，很不幸，这是一种非常渴求得到但又很少得到的乐趣。最近，汤川已不再谈论的那种禁律正处于统治地位，理论家们无拘无束地预测着新的粒子。的确，这

种情形越演越精，以至我这一代理论家中的一些人沉溺于发明新粒子，而其原因无非就是为了探索这些粒子的结果。只要这些粒子的结果存在，他们就纵情探究。

有趣的是，在绝对意义上，泡利对中微子的假设和汤川对介子的假设虽然很勇敢，相对而言却代表了一种保守的姿态。当时一些著名物理学家面临着原子核之谜时，他们据理力争，说量子物理学定律在此失去了效力。经典力学毕竟在原子这架天平上失灵了。认为量子物理学在原子核这架天平上失灵也许有些道理，当然，同原子天平相比，原子核天平要小几万倍。推翻经典物理学的那些革命者在热切谋划着推翻他们自己的革命，这在政治史中即使出现也是鲜见的。

战后的繁荣

在迄今的讨论中，我们考察了处于一个原子核内的两个核子。由于缺乏能量，π介子穿梭于两者之间。但是，如果我们使两个核子以高能发生碰撞，由于核子所带的多余的动能，它在仍然保持能量的同时足可产生一个π介子。在20世纪40年代末期，π介子就完全是以这种方式发现的。

结果，π介子仅是战后发现的许多粒子中的第一个。在战后的出生高峰期内，实验物理学家们忙碌地发现了一个又一个的粒子。1947年，首批声名狼藉的“奇异”粒子出现了。我们如此称呼这些粒子，只不过因为物理学家们从来没有期望看到它们。(对我这一代物理学家来说，奇异粒子并没有任何特别奇异之处。)

核子作高能碰撞时就会产生奇异粒子。实验研究表明，这些以前从未料及的粒子从来都不会单独出现，它们是成对产生的。例如，当一种被称为K^0的奇异粒子产生时，它总是伴随着粒子Σ^+。原子核碰撞从来都不会仅仅产生K^0，或两个K^0，而总是K^0和Σ^+。我们已经积累了很多这样的经验性规律。

最后终于水落石出了：所有这些经验性规律可以总结为一种

守恒定律。一种称为“奇异数”的新的物理量在强相互作用过程中是守恒的。让我们把奇异数和电荷相类比。它是一些强相互作用的粒子而不是其它粒子所具有的一种物理属性，这与一些粒子带电荷而另一些粒子不带电荷的道理是相同的。人们认为质子、中子和介子带零奇异数。新发现的粒子带有不同程度的奇异数，如+1，−1，等等。从此，“奇异”一词对物理学家来说有了一种具体的意义。

现在，让我们看一看奇异数守恒为什么能够解释实际的守恒。让K^0有奇异数+1。因为核子具有零奇异数，所以它们不能单独或成对地产生K^0。现在，如果Σ^+带有奇异数−1，那么我们就能够阐明K^0和Σ^+一起产生的原因了。

奇异数守恒这一思想是很简单的，但含糊不清，不过，它是使得计算原理成立的先决条件。例如，如果要使该原理成立，实验家们最好不要看到单独或成对地产生Σ^+。通过这一方法，该原理在无数个过程中得到了检验，并发现它是成立的。

当物理学家们又一次利用诺特尔在对称与守恒的关系上的洞察力时，他们立即得出结论：奇异数守恒预示着同位旋之外的一种对称。我不久将要再谈及这一点。

名字的含意是什么？

> 如果我能记住所有这些粒子的名字，我就会成为一名植物学家。
>
> ——E·费米

在命名所有的新粒子时，物理学家们感到趣味横生。在给粒子分类时，他们把强相互作用的粒子称为“强子”，该词的希腊文词根的意思是肥胖或厚实。（因此，与“强子”词根相同的鸭嘴龙就是一只特别强大的恐龙。）核子、π介子和奇异粒子全是强子。诸如电子和中微子这样的不强相互作用的粒子被称为“轻子”，该词在希腊语中是瘦、脆弱、小的意思。（因此，在希腊，该词是指最

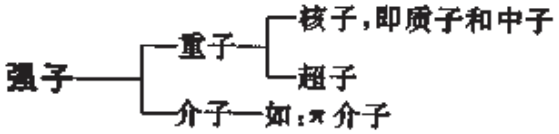
没有价值的硬币，一个脸面瘦长的人称为“leptoprosopic”，该词和 lepton“轻子”的词根相同。）

人们进一步将强子分了类。后来简称为介子的 π 介子之所以如此命名，是因为它在质量上介于核子和电子中间。（词根 meso 是中间的意思，这当然是众所周知的，如 mezzosoprano 即女中音和 Mesopotamia 即美索不达米亚。）与介子的特性相似的新粒子称为介子（mesons）。与此相比，核子和那些与核子的特性相同的新粒子称为“重子”，该词在希腊语中是重的意思。（在音乐中，我们有男中音，词根与重子的相同。）结果证明，这些新词在某些情况下是不确切的。我们现在知道，一些介子比一些重子更重。即使如此，实际上，介子这一名称是人们在受到启发后选择的，它还表示中介者的意思。在一个迷人的、多语种的双关语中，中国的物理学家把 pion 称为介子。中国字“介”是中介者的意思，但是，它也碰巧令人想到希腊字母 π。

由于核子出现在一般的物质中并起着更重要的作用，所以，把它们同其它重子区分开来是很有益处的。因此，重子进一步分成核子和超子。上面提到的 Σ^+ 就是一个超 p′ 子。还有一个超子称作 xi，由希腊字母 Ξ 指代。人们认为，超子是以“西格马齐的心上人”（The Sweetheart of Sigma Chi）这首歌命名的，只不过对父姓作了适当的改动罢了。

讲到名字，我也可以指出，中微子（neutrino）是通过在中子（neutron）后加上意大利语中的昵称词尾“-ino”（例如婴孩即 bambino 一词的词尾）得到的。在意大利举行的一次讨论会上，当讨论泡利的中微子提法时，有人把他的中性粒子同查德威克的粒子混淆了。费米不得不解释说，泡利的粒子就是那个“小粒子”。

当然，对读者来说，为了畅通地读下去而掌握这些词汇并没有什么必要。为了您的方便起见，我提供了图 11. 4。我们的历史叙述到此，光子和引力子即光和引力的粒子分别自成门类。



轻子——如：电子、中微子
光子
引力子

图 11.4 在1960年左右时的已知粒子

整理一下零乱的粒子

因此，简而言之，在20世纪50年代末期，用以代表粒子的花哨的字母已斐声于物理学界。这就需要用某种组织原则来整理一下所有零乱的粒子。

同位旋帮了很大的忙。正如我所说的那样，对称的力量非常大，所以我们立即知道，所有的强子必定属于同位旋多重态。实验证明这是正确的。例如，物理学家发现了三种π介子：π^+、π^0和π^-。如记号所示，π^+带有一个正电荷，π^0是电中性，而π^-则带有一个负电荷。因而，通过它们的电磁特性，这三个介子是可以区分开的。但就强相互作用而言，它们是完全相同的。正如我们所期望的那样，它们都几乎具有相同的质量。经计算，π^+和π^-的质量为140MeV，π^0的质量则为135MeV。恰如质子和中子这两个粒子形成一个两重态一样，这些介子形成了三重态。就这样，所有的强子都形成了同位旋多重态。

正如上面提到的那样，诺特尔的洞察力和奇异数守恒就意味着，强相互作用比同位旋有着更大的对称。

一群双胞胎和三胞胎

假设你正在拜访一群双胞胎和三胞胎。你在这里遇到一对双胞胎，在那里碰到一组三胞胎。在这对双胞胎和这组三胞胎中间，你立即便注意到一种密切的家族相似的因素。结果发现，他们的确出自同一个家族。20世纪50年代末期，粒子物理学家们觉得，查德威克向他们介绍了一群双胞胎和三胞胎。他们意识到，亚原

子核粒子不但出现在两重态和三重态中，而且它们如同一个生物家族的成员那样显然具有联系。

这里是对人们在 1960 年左右所知道的原子核粒子的一个总结。物理学家们共发现了 8 种重子。首先，它们是核子双胞胎，及我们的老朋友质子和中子。然后就是 Σ 和 Ξ 超子。象 π 介子一样，Σ 共有三种：正、中、负，分别由 Σ^+、Σ^0 和 Σ^- 表示。Σ 超子属于同位旋三重态；Ξ 超子属于同位旋两重态。最后，称作兰姆达的超子由希腊字母 Λ 表示，属于同位旋单态。

物理学家用图 11.5 对此作了总结。这种重子每一个都由描绘在一个二维网格上的一点来表明。由水平线连结在一起的各点相应的重子属于相同的同位旋多重态。在同一条水平线上的重子具有相同的奇异数。因此，核子有奇异数零，Σ 和 Λ 有奇异数 −1，而 Ξ 有奇异数 −2。

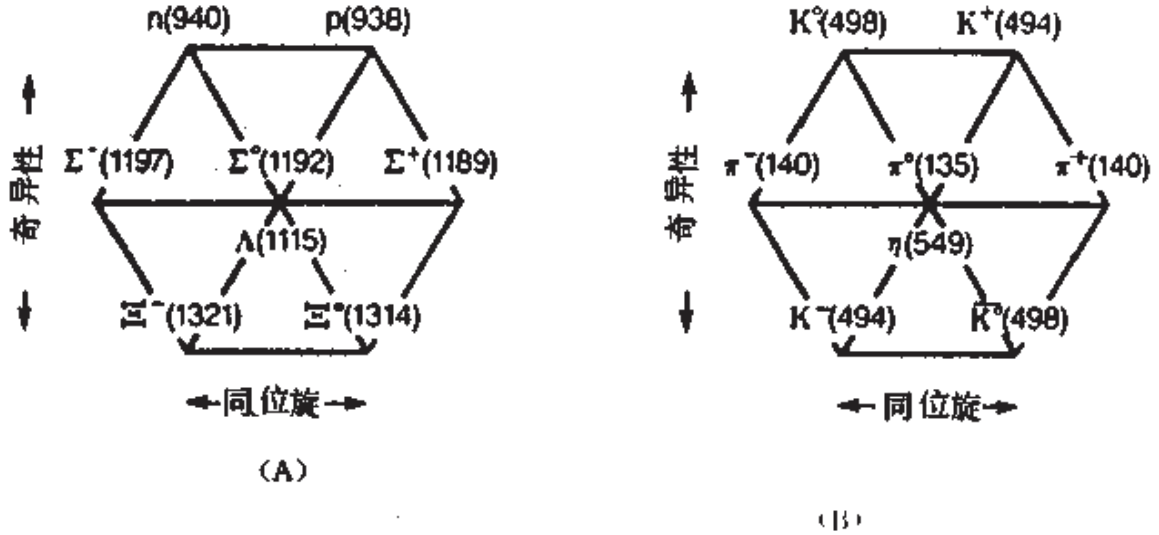


图 11.5　(A) 8 个重子即质子、中子和它们的 6 个姊妹根据其同位旋和奇异性被注在图上，形成了八重态这一几何图形；(B) 八个介子也形成了八重态。

介子的情况与此非常类似。物理学家们发现了 8 个介子。除了以上的 3 个 π 介子外，有 4 个称为 K 介子的介子，属于两个同位旋两重态。还有一个介子称作 η 介子，独属于一个同位旋单态。(实际上，当时人们只知道 7 个介子，后来在 1961 年才发现 η 介子。)

图 11.5 中，在表示一个给定的重子或介子的字母之后的括号内，每一个重子和介子的质量都用 MeV 单位标了出来。正如由同位旋对称所支配的那样，同一个同位旋多重态的成员几乎具有相同的质量。令人惊奇的是，所有 8 个重子大体上具有相同的质量，其差别在 20%至 30%之内。它们的确有如同一家族般彼此相似。

介子也大体上具有相同的质量，约为几百 MeV。介子似乎轻得有些异乎寻常。尽管如此，人们可能会争辩说，8 个介子在一级近似下是相关的。

同样，记住这一堆亚原子核粒子对读者来说几乎没有什么必要，这与一个人没有必要背诵属于脊索动物门下的哺乳动物一纲中的一打左右的目一样。所应知道的一件重要的事情就是，无数种哺乳动物可以系统地分门别类，而进化原则把所有这些门类都维系在一起。在这里，读者同样只需掌握这一点，即亚原子粒子好象是相互联系的。

物理学的心理史

大自然用所有这些相象的粒子在暗示：她的设计拥有比同位旋更大的一种对称。在 20 世纪 50 年代中期之前，人们展开了一场确定这一更大的对称的竞赛。

人们非常了解诸如同位旋这样的内部对称的物理现象：如果基本作用量在某种群变换下具有不变性的话，那么就有相互变换的量子态，从而代表了该群的乘法结构。物理学家们把这些量子状态作为粒子加以观察。正如以前我所解释的那样，如果对称精确，相互变换的粒子必定具有相同的质量。人们所观察到的重子的质量（还有所观察到的介子的质量）只是近于相等，在这一程度上，物理学家们知道，如果有一种对称的话，这种对称甚至必定比同位旋近似更大或更粗糙。

如果向后看一看的话，寻找这一更大的对称的工作就不会显得那么艰难了。总之，海森堡已经揭示了内部世界，而且数学家

们早就为所有可能的变换群分了类。因为有 8 个重子和 8 个介子，物理学家们只须找到一个带 8 维表示的群。结果发现，带这样一种表示的群很少。

人们只会希望事情如此容易！小学生们学的是一种循序渐进的科学纲要，在这里，人们收集了所有的事实。啊，在现实世界中，并非所有需要的事实都为人知晓，而并非人们知晓的所有事实都是真实的。例如，在 20 世纪 50 年代末，实验（现在我们知道是错误的）表明，在一个宇称变换中的 Λ 重子同其它 7 个重子的习性不同。重子家族好象包括 7 个而不是 8 个成员，Λ 是外面的奇客。首先，许多物理学家倾向于接受这一结论，因为那时人们只知道 7 个介子（如前面所提到的）。的确，一些最著名的物理学家强烈争辩说，重子和介子家族各包括 7 个成员，几名物理学家被引入歧途，他们对带 7 维表示的群进行了毫无成效的研究。

错误的实验构成了理论家生命中的一种灾难。当今，要做能为大自然那隐秘的设计提供线索的实验需要勇敢的努力，它们还涉及许多国家的研究团体。在竭尽技术寻求微弱的信号时，许多实验得出了错误的结论，这是可以理解的。决定相信哪一个实验的能力越来越成为粒子理论家所必需的才能之一。

各种心理社会因素也阻碍了对更高的对称的寻求。这里要求那些已经发现同位旋与确切的时空对称相比并不富有魅力的人接受一个甚至更粗糙的对称。对老一代物理学家来说，他们的核物理学特别涉及到在几个 MeV 上测出的能量。各种重子之间和介子之间出现的质量分裂是很大的，在一些情况下可达到几百 MeV。对旧思想的卫护士来说，π 介子和 K 介子不可能有血缘关系。但是，一代人称之为巨大的，另一代人则称之为微乎其微。我这一代物理学家对涉及到几万 MeV 能量的实验已经习以为常了。

由于这些及其它的原因，对更大对称的寻求采取了一条艰难的路途。的确，曾有几名物理学家基本上得出了后来证明是正确的对称群的结论，但是，他们却被老一辈的同事说服了。

大自然的恶作剧

在科学中存在着错误的起点和许多死胡同。不久以前，日本物理学家坂田昌一（Shoichi Sakata）尝试着研究了一个对称性更高的群，而所选择的群就是最明显的选择：他从海森堡的 SU（2）转到数学家列出的名单上的下一个群即 SU（3）。（我们记得，SU（2）在其定义表示中使两个客体相互变换。一般说来，SU（N）群在其定义表示中使 N 个客体相互变换。）

1956 年，坂田提出，质子、中子和 Λ 超子在 SU（3）的定义表示中变换为一个三重态。这种提法自然概括了海森堡的 SU（2）。在 SU（2）下，质子和中子变换成为一个两重态。两个难以分辨的人物中又加入了一个与他们面貌相似的人物。但是，其它 5 个重子随之又不合适了。把它们硬塞进来的企图遭到失败，很明显，SU（3）群被排除了。令人迷惑不解的是，大自然不是按顺序从 2 个核子进到 3 个，而是从 2 个核子跳到 8 个重子。

最后，在 1961 年有了突破。加州理工学院的著名物理学家默里·盖尔曼和以色列驻伦敦大使馆的武官尤瓦尔·尼曼（Yuval Neéman）独立地得出，更高的对称群就是 SU（3）——奇怪，奇怪！蹊跷的是，重子并非属于 3 维的定义表示，而是属于 SU（3）的一个 8 维表示。大自然在设法欺骗我们。

从坦克到 SU（3）

一个外交武官如何发现了具有强烈引力的更高对称呢？尤瓦尔·尼曼年青时对物理学很感兴趣，但由于历史事件的缘故最后参了军。据说他在以色列的秘密情报机构起过非常重要的作用。1957 年，32 岁的尼曼意识到，如果他要成为一名物理学家的话，那么时间已经不多了，因此，他向那时的国防部长毛舍·达扬（Moshe Dayan）将军请了两年假，到一所以色列大学学习物理。

而达扬派遣尼曼到以色列驻伦敦大使馆担任武官，这一职务使他能够搞一些业余研究。

在伦敦，尼曼拜访了皇家学院的著名巴基斯坦物理学家阿布杜斯·萨拉姆（Abdus Salam），让他看了自己的外交证件和由达扬署名的一封信。使尼曼极为荣幸的是，对此惊讶不已的萨拉姆收了他这个弟子。但是，1958 年 7 月，中东战争重新爆发，尼曼不得不重又把物理学搁到一边。现在我们知道，除了进行某些其它活动以外，尼曼策划了把 S 一级潜水艇和百人队队长式坦克运到以色列的行动。最后在 1960 年 5 月，作为一名退役的上校，尼曼在 35 岁时成为萨拉姆小组中年龄最大的学生，开始投入研究工作。在他的回忆录中，尼曼感谢他的妻子接受了他从外交官到研究生的变化及在收入上的相应损失。顺便提一下，尼曼现在搞物理的时间较少了。几年前，他在以色列建立了自己的政党，后来成为以色列内阁成员。上次我见到他时，我们没有谈论物理，而是他向我解释了，在我想做的情况下如何从事建党工作。

到达涅槃境界的八重路

一旦对称群和表示选择确定下来，物理学家们就能够象前一章中讲到的那样，用群论研究实验的蕴涵。对称禁止各种亚核过程，而允许其它一些过程。各种被允许的过程的相对几率是确定的。就这样，象进入一个边远城镇的法律工作人员一样，物理学家们能够把某种秩序强加到亚核世界之上。

为使重子和介子归入 8 维表示或简称为八重态，我们必须对该表示是否含有正确的同位旋多重态加以核实。或者说，由于对称 SU（3）包含同位旋，我们可以提 出哪些同位旋表示包含在八重态中的问题。参考那群双胞胎和三胞胎，我可以对此给予类比。假设我们遇到了 8 个同胞兄弟。我们可以提出他们如何分为双胞胎和三胞胎的问题。例如，他们可以分为两对三胞胎和一对双胞胎（8→3＋3＋2），或者可以分为两对四胞胎（8→4＋4）。在计算

SU（3）群论以后，人们就会发现，八重态包含一个三重态，两个两重态和一个单态（8→3+2+2+1）。但是，这恰恰同以下观察完全相应：在8个重子中，Σ超子形成一个同位旋三重态，核子和Ξ超子形成两个两重态，而Λ超子单独形成一个单态。这一点同样适用于介子。这里的重点是，找到一个8维表示还不够；在利用错误的群中，8个重子可能有不同的区分（例如，按照8→3+3+2区分）。

把SU（3）最后确定为更高的对称的狂喜，恰如所有板具突然拼在一起时拼板游戏迷们的感受。盖尔曼高兴地把这一原理命名为八重路，这里，他运用了佛教中通过涅槃境界的八重路的典故。（顺便提一下，这八重是：正确的信仰、正确的决心、正确的言谈、正确的举止、正确的生活、正确的努力、正确的思考和正确的喜悦。）

没有必要离开家门

尽管它有许多成功，八重路还是遭到了一些怀疑，部分原因是因为它缺乏上面提到的那种心理社会的果断。但是，1964年，由于戏剧性地发现了一种新粒子，怀疑便消声匿迹了。

自20世纪50年代初以来，物理学家们发现了一些极为短命的称为共振态的粒子，在1962年之前，人们已知道9个共振态。图11.6总结了这一情形。象在图11.5中一样，在给定的一行内的共振态由同位旋相联，不同的行又由八重路相联。

正如我所强调的那样，对称性思维的威力恰在于以下事实，即在目前的情况下，要随口说共振态肯定属于对称群的一个表示，我们并不必要知道有关共振态的强相互作用物理学的详细情况。以这种方式推理时，八重路的追随者们便匆匆寻求起SU（3）是否具有一个9维表示来。它没有！但是，它的确有一个10维表示……怪哉！

默里·盖尔曼抓住了这一群论事实，并于1962年预言：一种

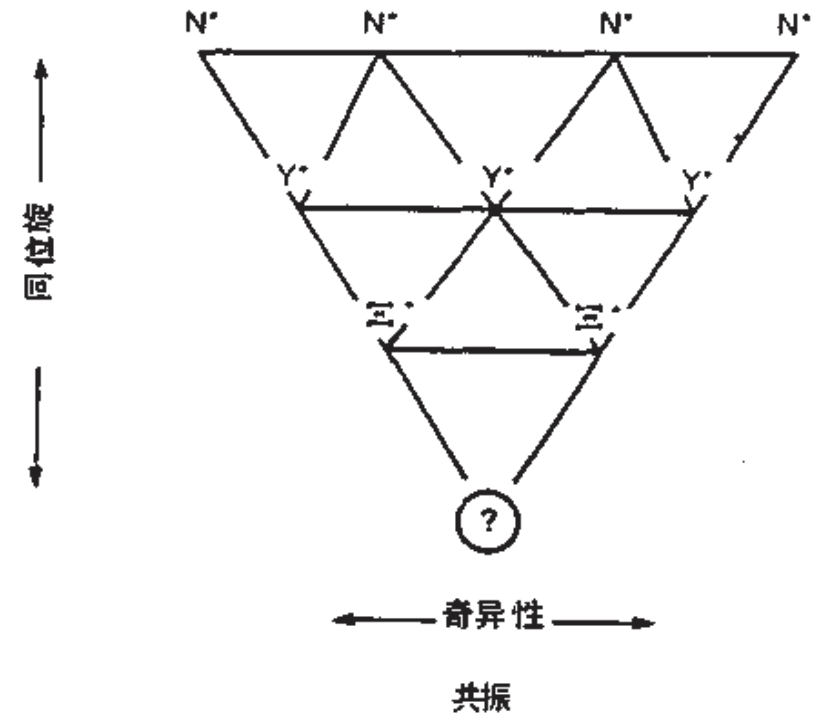


图 11.6 按其同位旋和奇异性排列的 10 种共振形成一种几何图形，叫做十重态。1962 年，已知共振只有 9 种。八重路规定了第 10 种共振的存在，以填充用问号标出的空缺。

迄今未知的共振态一定存在着。他把它叫做负奥米加，写作 Ω^-。甚至更为令人难以忘怀的是，盖尔曼运用对称性思维能够预言 Ω^- 的所有相关的特征。这种理论物理简直可以同夏洛克·福尔摩斯（Sherlock Holmes）仅仅瞥一眼就能推断出一个拜访者的过去经历相媲美。有许多实验室对此作了观察。当然，他们发现了 Ω^-，其特性与盖尔曼所预测的一模一样。由于对物理学的这一贡献和其它一些基本工作，盖尔曼被授予了诺贝尔奖。

18世纪法国物理学家皮埃尔·马保梯（Pierre de Maupertuis，我们在前面讨论作用量时遇到过），为了证实牛顿关于极地附近的地面很平坦的理论，曾长途跋涉到拉普兰（Lapland）并幸存下来。之后，伏尔泰对他开玩笑说："Vous avez confirmé dans les lieux pleins d'ennui/ ce que Newton connût sans sortir de chez lui."（牛顿没有离开家门就知道的/你在充满艰险的地方证实了。）在这种情况下，我们可以用同样的话来谈及上述这些实验家。

理论家们在最好的情况下，用几行推理就预测出大自然的习性，这一向使我惊讶不已。人类智慧的最纯洁的产物常常简单得惊人。

从高级烹饪得到的启发

对称性的威力给盖尔曼留下了极深的印象，他为了寻求更多的对称勇往直前。一个运动员怎样在对称赛中赶在前面呢？请想一想历史的先例吧。实验性观察加速了同位旋和八重路的发展。洛仑兹不变性产生于麦克斯韦理论。但是，在20世纪60年代初，由于八重路已经清楚地阐释了人们所观察到的强相互作用的粒子的图形，由于没有一种强相互作用的理论，盖尔曼发现，这些先例中没有一个对他有所帮助。他怎么能够继续下去呢？

盖尔曼大胆地采取了新的策略，并把它描述为受了一种高级烹饪技术的启发："把一片野鸡肉放在两片小牛肉中间烹调，然后再把两片小牛肉扔掉。"

盖尔曼想象着摒蔽掉世界上所有的相互作用。没有了相互作用，粒子就会在互不影响的情况下完全自由自在的四处飘动。描述这一情形的理论叫做自由粒子理论。它是极平常的理论，有关场论的任何教科书的第二章都会首先讨论这一理论。盖尔曼研究了自由粒子理论的作用，以便确定它的各种对称。然后，他提出，当各种相互作用重新启开时，这些对称可能仍然成立。

从表面上看来，这一程序显得很荒谬。当然，自由粒子理论并不描述我们的世界。但是，盖尔曼的态度是，一旦"对称"——野鸡肉——被提炼出来，自由粒子理论就要象小牛肉一样被扔了出去。

在现实世界中，如作观察的话，那么我们就可能期望对这样提炼出来的对称作相当粗略的观察。而对粗糙的同位旋和八重路感到极为反感的旧思想的卫护士，还要再次受到震惊。

当然，味道如何，尝一尝才知道。小牛肉对野鸡是否有所帮

助？结果证明，从盖尔曼提炼出来的对称中推理出实验性的结果需要杰出的才智，但是，这些结果同观察情况都相符合。

这一显然荒谬的程序的出人意料的成功——即从一个确实并不能描述大自然的理论来提炼出与大自然相关的对称的成功——为物理学家们提供了一个有关强相互作用的特点的重要线索：有关强相互作用的正确理论，必定只具有与自由粒子理论相同的对称性。

三夸克

八重路建立以后，物理学家们继续对大自然为什么没有利用三维定义表示即 SU（3）三重态感到迷惑不解。大自然仅仅要欺骗坂田吗？

盖尔曼在 1963 年 3 月访问了哥伦比亚大学。在午餐中，在哥伦比亚任教的著名物理学家鲍勃·塞勃(Bob Serber）对三重态的神秘缺席向盖尔曼提出疑问。盖尔曼回答说，按照三重态变换的粒子必须是具相当非凡的特征；具体来说，它们的电荷会比电子带的电荷小。这样的粒子从来都没有见过。

次日清晨，在仔细考虑过这个问题之后，盖尔曼得出结论，即这样的粒子有可能躲过了探测。结果，盖尔曼和乔治·茨威格独立地提出：大自然的确使用了定义表示，相应的基本粒子的确存在。盖尔曼把这 3 个粒子统称为“夸克”，并依次命名为上夸克、下夸克和奇异夸克。盖尔曼告诉我，他起初在脑子里有个声音：他想把这些三重态粒子称作一种象“克沃克”的东西。一天，当他悠闲地浏览着詹姆斯·乔伊斯（James Joyce）的小说《菲尼根斯·威克》时，他读到了“Three quarks for Muster Mark!”这句话。但使他感到失望的是，乔伊斯可能想用“quark”（夸克）一词同“Mark”或“bark”压韵，而不是同“kwork”压韵。然后他意识到，该书叙述了一位酒店老板的梦幻。因此，他认为 3 夸克是指 3 夸脱。就这样，他进而引入了夸克。

使用在第九章中引入的词汇，我们就可以说，3 夸克形成了 SU（3）群的定义表示。盖尔曼和尼曼在 1961 年用三个“抽象的实体”的说法谈到了定义表示；而在 1964 年，盖尔曼和茨威格又可以谈论由夸克实现的定义表示了。19 世纪物理学中的抽象的智力游戏，在 20 世纪的夸克世界中得到了实现。

第九章讨论的把定义表示组合到一起的群论过程，现在可以看成是把夸克实际结合了起来，SU（3）群的理论自然意味着，发生强相互作用的粒子即强子是由夸克和反夸克构成的，这与一个原子由电子和原子核构成，一个原子核又由质子和中子构成相同。例如，把 3 个夸克放到一起，我们只须打开一本群论书就会发现：$3\otimes3\otimes3=1\oplus8\oplus8\oplus10$。换句话说，把三个定义表示组合到一起，产生了一个 1 维表示、两个 8 维表示和一个 10 维表示，从而表明，8 个重子和 10 个共振态可以从 3 个夸克中形成。与此相似，一份对介子特性变换的研究表明，一个介子是由一个夸克和一个反夸克组成的。例如，π^+是由一个上夸克和一个反下夸克组成的。

我可能要强调，不论夸克是否存在，八重路总归是成功了。正如已经再三宣称的那样，对称性思维的威力完全不依赖于有关力学的详细知识。

顺便提一下，夸克一词经过推敲味道非常鲜美，因此立即被物理学界所采用。但是，盖尔曼不得不为上、下和奇异夸克奋斗着。因为，大多数物理学家，特别是在东海岸的物理学家，对坂田的理论仍记忆犹新（在该理论中，基本实体是质子、中子和兰姆达超子），所以，他们把这 3 个夸克称为 P 夸克，N 夸克和 Λ 夸克，用大写字母书写。我记得，普林斯顿的一位老物理学家曾感慨地说，在加利福尼亚的人可能会颠三倒四或者奇奇怪怪，但是在新泽西这儿却不会！对盖尔曼的意愿不管不顾的这种情况，一直持续到 20 世纪 70 年代中期。例如，要在第十四章讨论的关于大统一理论的第一批论文，就是用这种“东海岸”标号写出来的。我曾经在迈阿密的一次会议上发言，而盖尔曼是那次会议的主席。每当我提到 P 夸克时，盖尔曼就会说“上夸克！”（这使我想起一

个可笑的电视商业广告，在该广告中，一个男人吃早饭时忙活着打开一盒人造黄油。这人说，“黄油!”，而人造黄油就回答说，“人造黄油!”)。这样过了一会，我不得不告诉盖尔曼，让他安静一下，并提醒他迈阿密是在东海岸。该地区最后终于投降，并很情愿地采用了这些名字：上、下、奇异。

信心的消失

从几个夸克中形成了许许多多的强子——又是简单性的胜利。然而，在 20 世纪 50 年代末和 20 世纪 60 年代初，简单性的方法是否继续适用于强相互作用这一点毫不清楚。

从费米和杨振宁开始，又经过坂田，物理学家们都试图选出一些特殊的强子，然后由这些选出的强子组合成其它强子。然而，在实验中，一个强子和另一个强子极为相象，所以这个方法失败了。部分由于保守的缘故，一些重要的物理学家认为提出强子由什么组成这一问题是徒劳的。他们建议在一个巡回的、逻辑的构架中构筑物理学。当问及强子 A 由什么构成时，他们就回答说是强子 B 和强子 C。当问及强子 B 由什么构成时，他们就又回答说是强子 A 和 D。以此类推，他们希望这一过程将会结束，比方说在强子 P 点上结束。人们会发现，从 A 到 P 的所有强子可以被认为是互相构成的。强子的数目将是固定的，它同对称和群论没有任何关系。

根据这种观点，世界就是这样，因为它就是这样，这是一个象庄子似的东方哲学家才可能会有的思想。世界的结构是由所有现象之间必要的相互联贯确定的。一个以这种观点为基础的物理学派从 20 世纪 50 年代末一直到 20 世纪 70 年代初泛滥起来，它获得了“自举”这一具有启发意义的名称。人们把世界描绘成抓住它的靴攀自举的现象。科学哲学家们应该举办户外集会，研究这种由于简单性而失去信心的现象。

夸克禁闭

夸克构成强子的理论作为一个具体的模式，证明是有很大的益处：它帮助物理学家想象强子并给它们分类。例如，一个强子的奇异性的程度，就是由它所含有的奇异夸克的数目衡量的。通过假设奇异夸克的质量比上下夸克的质量大，人们可以清楚地说明奇异强子质量更大这一经验性规律。只要强相互作用不能改变夸克的特点，其中的奇异性守恒就可得到清楚的说明。也就是说，通过强相互作用，一个奇异夸克不能变为一个下夸克（或一个上夸克），反之亦然。在一个强相互作用过程中，如果产生了一个奇异夸克，它就必定伴随着一个反奇异夸克。再如，让我们考察一下包括两个上夸克、一个下夸克的质子和包括两个下夸克和一个上夸克的中子。如果上夸克和下夸克具有近乎相同的质量，同位旋就会很容易得到说明。（具有讽刺意味的是，海森堡原来认为，质子和中子之间的质量差完全是由电磁性引起的，现在，人们相信，这种思想不完全正确。该质量差部分应归于上夸克和下夸克之间的质量差。）

以盖尔曼在预测 Ω^- 上的竞赛记录为基础，许多实验家冲出去寻求夸克了，但他们都空手而归。尽管如此，几乎所有的粒子物理学家都相信夸克，因为无数次试验表明，当考察强子的行为时，它们好象是由夸克构成似的。在最富有说服力的一次试验中，在斯坦福直线加速器中心，电子在一个 1 英里长的加速管的加速下达到很高的能量，然后，电子散开的方式很清楚地表明，它们被质子散射开来。每个质子内的 3 个粒子反弹回来。为了说明问题，让我们在稍微不同的情况下借用一下由乔治·加缪（George Gamow）发明的一个类比：一名海关官员怀疑在大捆的棉花中有走私的钻石。他掏出手枪，开始对着棉花捆射击。如果一些子弹弹回并散开，检查者就可肯定里面藏有硬东西，同海关检查员一样，通过对质子散射电子并观察它们散开，物理学家们相信原子

里面有某种象夸克似的粒子。

然而，事实仍然是，没有人亲眼见过夸克，这种情形引起了对存在的意义的哲学思索。再打个比方：当我摇动一个婴儿玩的拨浪鼓时，我绝对肯定里面藏着珠子或象珠子似的东西。通过倾听音调和通过变化摇动拨浪鼓的方式，我可以推算出珠子必定有多硬，甚至会大胆猜想里面有多少珠子。我自己的立场是：即使我不能把拨浪鼓摔裂开来实际地看一看它们，珠子也一定存在着。与此相似，物理学家们相信，夸克存在着，但是，它们被永远限制在里面。

夸克被如此限制着，这一思想前所未闻，真令人震惊。当物理学家们认为物质由原子构成时，敲下一个原子并对它单独进行研究是很容易的。与此相似，人们可以随时从原子中敲打出电子，从原子核中敲打出质子和中子。但是，由于某种原因，我们就是不能从强子中敲打出夸克来。

由质子散射出的电子的性质表明，质子内部的夸克以一种相当奇特的方式相互作用着。如果两个夸克相互隔得很近，它们就象是几乎自由自在似地行为着；也就是说，好象它们几乎不相互作用。但是，如果它们隔得太远，一种强大的力量就会突然设法把它们拉到一起。物理学家们在想象这一行为时，稀奇古怪地想到夸克之间有一条线把它们连在了一起。当两个夸克之间靠得近时，该线很松，并且两个夸克彼此意识不到对方。但是，如果两个夸克试图相互远离对方时，这条线就突然拉紧。

在经典物理学中，这条线就应该断开。然后，这些夸克就会彼此解放。但是，当我们在这里拉离夸克时，作为我们用力的结果，我们把能量放入了这条线，这同拉一根橡皮条会把能量放入其中是一样的。就象爱因斯坦的质量——能量关系所表明的那样，这条线中的能量将增长，直到它超过同一个夸克和一个反夸克相应的能量。这时，此线本身有足够能量产生一个夸克和一个反夸克。即使此线断裂，我们仍不能把一个夸克解放出来。此线断开的两端分别系于一个夸克和另一个夸克上（参看图 11.7）。我们只

是成功地敲打下来一个介子。

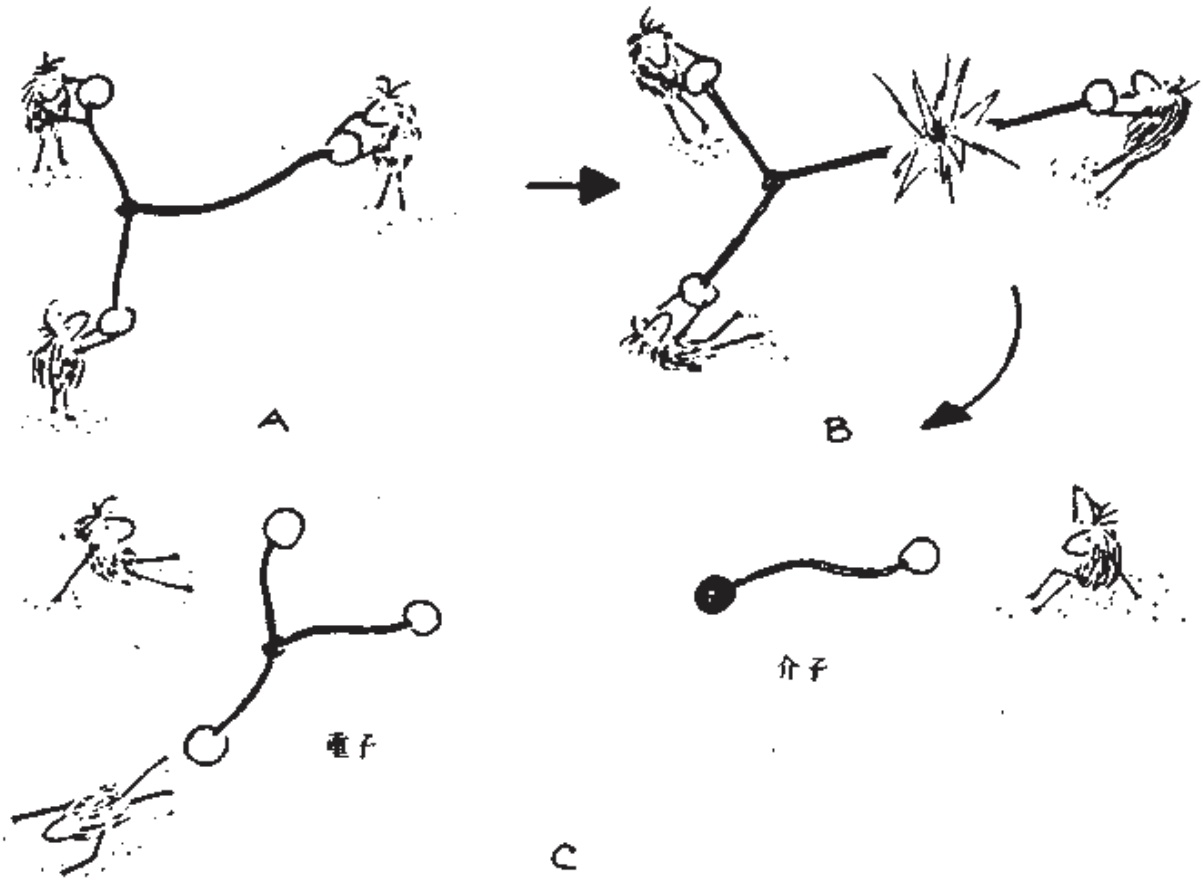


图 11.7 (A) 三个毛茸茸的家伙用力拉着一个重子内的三个夸克，试图把一个夸克拉出来。

(B) 把三个夸克维系在一起的线拉紧并最后崩断，因而释放一股能量，用爆炸来象征。

(C) 释放出来的能量转化为一个夸克和一个反夸克（用一个黑球表示）。这三个毛茸茸的家伙刚好弄出一个介子。夸克永远被限制的猜测，意味着通过拉断线释放出的能量永远转化为一个夸克和一个反夸克。

夸克的提出说明了物理学发展常常要走的艰难路程。请考虑一下对自举和简单性的探讨。实际上，盖尔曼仍然是一个主要的自举者。我曾向盖尔曼提出过有关夸克和自举的问题。他回答说，一切都是非常令人迷惑不解的。作为一名优秀的自举者，他相信，所有观察到的强子是由彼此组成的。那么观察到的强子又怎么能由夸克组成呢？这难道不意味着夸克反过来也是由观察到的强子组成的吗？为了逃避这一令人费解的谜，盖尔曼最后下结论说，他可以仅仅肯定：夸克是不能被人观察到的，因而也就不是一个

“能够观察到的强子”。夸克可以更基本。啊哈！顺着这条线索思考使盖尔曼相信，夸克应该是永远受到限制的。

在这一章中，我们看到物理学家们为了避免探讨强相互作用而使用了对称。正如在图 11.2 中的原理所表明的一样，这是一种规避的策略。但是，人们有时会不得不面对强相互作用。在下一章中，我将讨论物理学家们怎样驯服强相互作用这只野兽，并解释了夸克的怪戾行为。

第十二章　艺术的回报

佐伊：来，我来剥皮。
布鲁姆：（他象一个打量着她那按照对称剥去皮的梨子的小商贩般受了惊，迷惘地抚摸着自己的后脑勺，感到无比尴尬。）如果她知道的话，有人会极为嫉妒的。

——詹姆斯·乔伊斯，《尤利西斯》

莫扎特宫庭中的廉价品

当我想到物理学中关于对称的学术史时，我喜欢描绘两派思想，这两派思想在它们致力于对称这一点上是统一的，而在它们对对称的特点的观点上却是截然不同的。一边站着爱因斯坦和他的学术后裔。对他们来说，对称是美的化身，是同时空的几何形状结合在一起的。爱因斯坦所熟悉的各种对称——宇称、旋转、洛伦兹不变性以及广义协变性——是精确和绝对的，是凝固在完美

之中的。另一边则站着海森堡，他的同位旋把精确的对称的美学原则打碎了。海森堡的对称是近似的，是独立于时空之外的。同时空对称不同的是，同位旋只受到强相互作用的尊敬。

近似对称的思想使爱因斯坦和他的后裔们感到大为震惊。把大自然描绘成“近乎美丽”和“几乎完美”好象是亵渎性的和矛盾的。整整一代人的美学直觉受到了伤害。当这一代物理学家们刚刚从同位旋的震惊中缓过来时，甚至更为粗糙和近似的八重路又随之到来了。但是，海森堡和他的追随者们能够指出它的结果——亚原子核的零乱秩序井然了。他们没有首先确定强作用就沿着对称的旗帜行进到了亚原子森林的深处。他们利用同位旋，后来又利用八重路为杂乱无章的实验性观察结果分了类，并对这结果作了合理的说明。

到 20 世纪 60 年代时，有关对称的各种讨论几乎完全集中在亚原子核世界的近似对称上了。当然，爱因斯坦所熟知的绝对的和精确的对称性继续受到人们的最高尊敬。物理学家们都喜欢完美的对称；问题只不过是，这一奇特的想法的成效，在广义相对论中好象已经竭尽了，或者说已经达到了光辉灿烂的顶峰。

尽管时空若不是由精确的对称来统治，人们就会感到深为不安，却并没有什么强制性的规则要求物质粒子也必须遵守精确的对称。因而，物理学家们达成了统一的世界观，即大自然提供了一种精确的时空，它有精确而完善的对称性统治者，为由杂乱而近似的规则激励的一些零散的粒子提供了活动的场所。我画了一张图，描绘出在莫扎特的奥地利宫廷中开办的一个廉价品市场的深乱局面，以说明以上问题。

退却但不溃败

当把对称的现代发展看作两种倾向和观点之间的紧张关系的结果时，我运用了历史学家的一种把戏。在这种情况下，关于对称的观点虽有所不同，却并不对立。进一步来说，喜欢把大自然作为

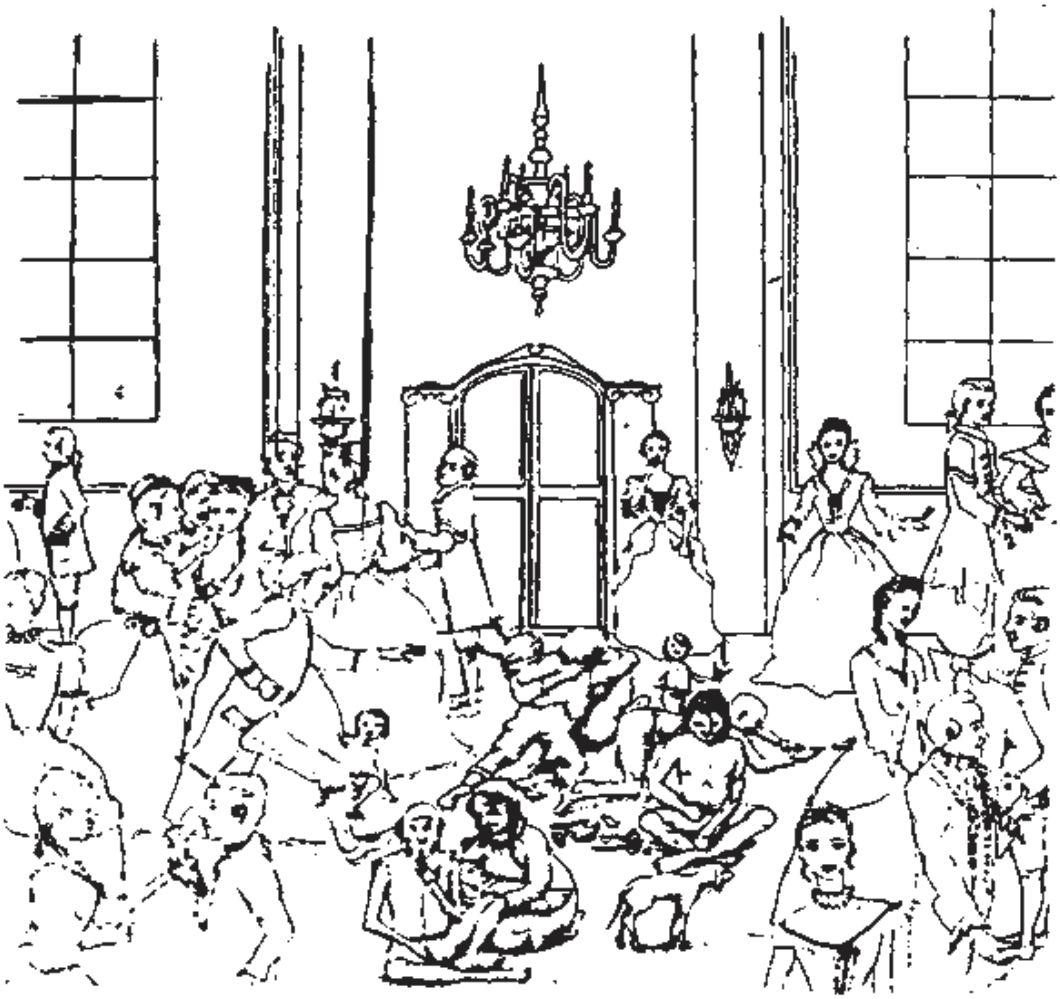


图 12.1 莫扎特的奥地利宫庭中的廉价品市场。

最高仲裁的物理学家们并不象其他思想家那样乐意进入战壕之中。尽管如此，关于大自然“应该”怎样把对称性揉进他的设计中去有两种观点，将其明确地分开描述是很方便的。因此，我还要继续谈到爱因斯坦和海森堡，谈到艺术的精确和实用主义的粗糙。

完美的对称这一唯一真正的神的信徒们退却了，但是他们并没有被击败。尽管完善对称的旗帜被时时举起，但是，这一派的坚决支持者几乎在 40 年的时间内处于低潮。然后，他们在 20 世纪 70 年代初又呼喊着返回来，最后完全占领了基础物理学。这次艺术的回报可以编出一个惊心动魄的故事，我在本章和下面的章节中还要对此加以叙述。

反攻

1954 年发动了反攻，其中，我们只能把它描述为由杨振宁和罗伯特·米尔斯写的一篇划时代的论文。我们前面在讲到宇称时就遇到过杨振宁。这篇论文提出一个好象与现实世界没有任何关系的理论。

杨振宁和米尔斯发明了一种新的、具有令人眩目的数学美的精确对称。这种对称并非象历史上的情况那样受到实验观察的启发；它是以美学为基础的一种学术创造。

在完美地说明爱因斯坦那条对称决定设计的原则中，杨振宁和米尔斯说明了，他们的对称完全决定作用的形式。除了广义协变性受到伽利略的观察的启发之外，这种情形令人想起爱因斯坦对引力理论的确定，而这里的对称完全是从学术思索中产生的。

啊，与引力的情况不同的是，杨和米尔斯发现的作用与在 20 世纪 50 年代看到的现实世界并不相符合。精确对称的存在本身意味着许多组特性完全相同的粒子。但是没有人看到过这样一组粒子。

进一步来说，正如光子一样，现在称为规范玻色子的一组粒子，由于对称的缘故而没有质量（以后还要更多地讨论规范玻色子）。这就是说，要产生一个有质量的粒子，人们必须提供同其质量相等的能量。因此，与一个有质量的粒子相比，一个没有质量的粒子更难产生。例如，光子就很容易产生。（这里因为我们的世界充满了光。）世界并没有充满无质量的规范玻色子，这使杨和米尔斯感到非常尴尬。

寻找一个世界

象皮兰德类（Pirandello）作品中的人物一样，杨和米尔斯也在寻找一个世界加以描绘。他们的论文并非只是要解释从前没有

解释的现象，并把它作为送给完全对称的神的赞歌。该论文好象在说，“瞧，这是人类的头脑能够梦想出来的最美好的理论。如果大自然在她的基础设计中没有选用这一理论，那么我们物理学家只能对大自然感到失望。”

杨和米尔斯提出的精确对称现在被称为“非阿贝尔规范对称”，这一名字的读音是令人很不舒服的。以该对称为主的理论或称为非阿贝尔规范理论，或称为杨-米尔斯理论。

当杨-米尔斯的理论最初出笼时，理论物理学界认为它的确美好。但是，对于它有什么用处，没有人，甚至杨和米尔斯也没有哪怕是最模糊的概念。大多数物理学家只是咕哝着说，我们没有生活在一个非阿贝尔规范的世界中是很糟糕的。他们无可奈何地耸耸肩，就又继续自己正在做的工作了，该理论因而休眠了。

在20世纪60年代末，当我在研究生院学习时，学校没有讲授非阿贝尔群论。研究强相互作用的物理学家们都把重点放在现象学理论上，以便寻求对实际观察到的细节问题作出合理的解释。这些研究中所体现的实用主义哲学，与爱因斯坦有深刻感受的美学哲学是完全相对立的，这样一些理论虽然在合理解释数据时很成功，却事实上粗糙而丑陋。

在本章后面，我将首先解释非阿贝尔规范对称，然后讲述一个令人振奋的故事：物理学家们怎样终于意识到大自然和爱因斯坦的学术弟子们都崇拜同一个神——大自然的结构是围绕着非阿贝尔规范对称设计的。

将数股线织成挂毯

我已将20世纪物理的发展作为一种学术史作了讲述。在这一思想史中，从爱因斯坦、诺特尔和海森堡的工作中出现的各种因素结合形成了非阿贝尔规范对称的概念。

局域变换的想法出自爱因斯坦有关引力的思想。我们记得，爱因斯坦对付一个任意引力场的策略，是将时空分成越来越小的部

分，以便在每部分的区域内，引力场对不断增长的精确度是一个恒量。这样，最后的结论是，人们为模拟引力场所做的坐标变换是随不同的点而变化的。一个随不同的点而变化的变换对称就是所谓的局域性。

另一方面，一个不随不同的点而变化的对称被称作普遍对称。就普遍对称而言，为了使物理现实的结构保持不变，宇宙中的每一个人就都必须做完全相同的变换。

同位旋不变性提供了一个普遍对称的范例。海森堡假定，强相互作用物理学在从质子到中子或从中子到质子的变换下是不变的。强相互作用 不能区分质子和中子。也就是说，在近似值内人们忽略了三个较弱的相互作用，至于人们把两个核子中哪个称为质子，哪个称为中子是无关紧要的。但是，一旦我们决定称哪个为质子，我们就必须在整个宇宙中坚持这一选择。换句话说，如果我们做一个把质子旋转成为中子的同位旋变换，为了使这一作用保持不变，在整个宇宙内，我们必须处处都做同一旋转。

对称变换中的局域性一旦经过明确的阐释，就成为一个看起来完全自然的概念。如果我在地球上作一个对称变换，在月亮阴暗一侧或远在三个星系之外的另一个物理学家，就应该能够作另一种对称变换。由此看来，由于很多物理学家对普遍对称的不感兴趣，才使得杨和米尔斯提出了他们的理论。

现代思想中渗透一切的另一股思潮是关于守恒和对称之间的既深且密的联系。诺特尔的洞察迅速促使人们寻求与电荷守恒相关的对称，如物理学家赫曼·魏尔（Herman Weyl）就作了寻求。该对称结果相当奇特和有些抽象。为了我们自己的目的，只需知道存在这样一个变换即可。

受到爱因斯坦的启发后，魏尔决定要求与电荷守恒有关的对称是局域的。令他感到吃惊的是，他发现这一要求导致了一个引人注目的结果。

前面提到过，理论物理学家们梦想着，把世界的作用草草写在鸡尾酒会上用的一块餐巾上。该作用当然会包括描绘电磁相互

作用的一个词语。总之，我们知道存在电磁相互作用。为了理解魏尔的工作，请想象一下一个失去专业能力和忘记在作用中包括电磁场的物理学家。这时魏尔走过来瞧了瞧餐巾。“嗯，让我检查检查这一作用，看看与电荷守恒有关的对称是否是局域的。”（严格讲来，我不应该在没有电磁场的情况下使用“电荷”一词。你愿意叫它什么就叫什么吧，例如，把它叫作“电子数”；这并不影响论证。）实事上，在没有电磁性的作用中，该对称就不会是局域的。它就是普遍对称。极为令人惊讶的是，魏尔从反面表明，如果人们需要这一对称是局域的，那么他们就将不得不包括电磁场——因而包括光。

这是一个惊人的发现。为了了解光的特性，物理学家们做了很多工作，但他们一向认为，为什么有光这一问题，是在他们的认识范围之外的。这一个“为什么”已经被为什么魏尔的对称必须是局域的问题取代了。一个为什么已经被另一个更深奥的为什么取代了。认识了这一点，我们便可更接近了解万能的缔造者的思想了。我们现在可以在美学的基础上论证对称为什么应该是局域的问题。当宇宙的缔造者设计我们的宇宙时，他是怎么想的？他会说，“让它有光！”或他会说，“让对称是局域的！”吗？

局域对称的力量已经表现在爱因斯坦的引力理论中了，引力理论毕竟是局域对称理论的初始范例。魏尔的局域对称把光子强加在魏尔身上，局域坐标不变性也同样把引力子强加在爱因斯坦身上。假设我们从来未听说过引力，但是决意要求世界的作用在局域一般坐标变换下不变，那么我们会发现我们必须发明引力。

魏尔把他的对称命名为规范对称。“规范”一词来自中古拉丁语“gaugia”，是指木桶的标准尺度，这一意思在诸如“火车轨道标准”和“标准衬衫”这样的现代用法中保留了下来。令人好奇的是，该词进入物理学的永久词汇中，只是魏尔犯了一个严肃而又可以解释的错误。我们现在知道，与电荷守恒相关的对称是涉及量子几率振幅的变换描述的。魏尔是在量子物理学出现之前工作的，所以，他和其他任何人一样从未梦想到几率振幅。魏尔受

到了爱因斯坦有关几何的论述的启发，提出一种变换，其中，人们可以改变时空各点之间的物理距离。魏尔想到了两个铁轨之间的距离或规范——他的对称从而以此命名。他向爱因斯坦说明了自己的理论，但是他们俩对该理论没能成功地描述电磁性都深为失望。当量子时代开始时，魏尔的理论迅速得到了修正。同时，规范对称一词尽管用词不当，却保留下来。(顺便提一下，物理学家们仍不知道魏尔原来的对称是否同世界相关。)

总之，包括电磁性在内的世界的作用拥有一个叫规范对称的局域对称。在传统的教科书中，人们向学生们展示了描述电磁性的作用并告诉他们："瞧！有一种局域对称。"当今，基础物理学家们象爱因斯坦一样，喜欢把这一逻辑倒过来说，局域对称确定了作用的形式，对称支配着设计。

规范对称的故事说明了物理学怎样变得更为简单。我记得，作为一名学生，我曾不得不记住麦克斯韦的四个方程。后来，我只须记住描述电磁场在时空中怎样变化的一个方程，而这一个方程与圆的形状几乎一样易于记忆。现在，我只要说"规范对称"，电磁性就确定了。

最后，海森堡走来，为理论物理学家们欢呼雀跃开辟了一个全新的内部世界。但是，正如我们已经阐述的那样，他为自己的内部世界提出的对称是近似和丑陋的，所涉及到的变换是一种普通的变换。

杨和米尔斯把这些不同的线股总汇起来。他们接受了海森堡的内部世界的思想，但是他们坚持它是精确的。然后，他们使这一精确对称变成局域对称。这一思想是产生于爱因斯坦又经过魏尔发展的。其结果被称为非阿贝尔群规范对称。

量子场论

我在这里应该指出，基础物理学是自 20 世纪 30 年代以来用量子场论的语言系统地阐述的。在量子时代之前，我们在描述大

自然的过程中把粒子和场区分开来。电子和质子这样的粒子产生电磁场和引力场。这些场反过来又作用于粒子并对它们的运动产生影响。为了确定一个粒子的动力学，物理学家们必须在一个给定的时间给出该粒子的位置。与此对照，为了确定一个场的动力学，物理学们就必须在一个给定的时间上给出空间每一点上的一组数值。在电磁场的情况下，这些数值就是那些描述探针在该点可测出的电磁力的大小和方向的数值。因此，人们可以对一个遍布在时空中的场加以描绘。

量子时代到来以后，粒子和场之间的这种区分取消了。粒子现在由支配它们运动的几率振幅波描述，而这些波是在时空的每一点上都已给定的。也就是说，量子世界中的粒子也由场来描述。法拉第的场的概念占据了整个物理学。

在量子场论中，作用是从这样结合在一起的场中构造出来的，即它将满足对称所要求的一切。例如，要建立一个描述电子和光子相互作用的量子场论，只须把电子场和光子场（即电磁场）结合成一个满足洛伦兹对称和规范对称的作用即可。一旦人们学会怎样做，它确实非常简单。

构造手册

为了进一步解释杨-米尔斯理论，让我讲一讲构造作用量的方法。选取数学家们所熟知的任何一个群，并以该群为基础假定一个内部对称（该群不一定象海森堡的论文中那样必须是SU (2)）。坚持在局域对称变换下作用量不变，那么作用量就是杨-米尔斯作用量。（可以这样理解，即作用量在象洛伦兹对称这样的确定时空的对称下也不变。）顺便提一下，魏尔描述的那种电磁作用量，只是一个杨-米尔斯作用量的特殊情况。

在魏尔的讨论中，局域对称要求，电磁场的出现伴随着无质量的光子。在一个非阿贝尔群规范理论中，局域对称要求一定数量的场存在，每一个场同一个无质量的粒子相联系。如果你遵照

上面讲的方法来构造杨-米尔斯作用量，你就会发现，不管你怎么努力，除非你增加这些额外的场，你就不能使作用量局域不变。象光子场强加于魏尔一样，它们也强加于杨和米尔斯。

我们看到，在有 9 个共振态的条件下，象八重路这样的普遍对称如何要求第 10 个共振态的存在。让我们作一个粗略的类比。如果一个建筑师的雇主坚持建造一幢带有五棱对称的大楼，而设计中已经包括 4 根柱子的话，那么这位建筑师就会不得不加进第 5 根柱子。局域对称甚至比普遍对称的要求还要苛刻；它不但需要新粒子，而且规定这些粒子是没有质量的。

让我粗略地说明一下这是为什么。局域对称允许在不同的时空区域中作不同的变换。具体地说，暂时假设同位旋是一种局域对称。我作出把一个核子称为质子的选择。而月亮另一侧的人却作出了把我称为质子的核子称为中子的选择。要把有关我的选择的信息传达给我在月亮上的朋友，就需要 一个长力程的场。我们记得，没有质量的粒子是与长力程的场相联系的。因此，规范理论中没有质量的场的出现并不完全令人吃惊。顺便提一下，这是一种需要打手势的解释。在物理学中，一个不完全令人信服的论点之所以费解，是因为典型地表述这一论点的那个人必须打许多手势。

杨-米尔斯理论中的没有质量的粒子被称为“规范玻色子”。一旦我们决定了一个群，规范玻色子的数目也就完全确定了。正如我提到的那样，电磁理论是杨-米尔斯理论中的一个特殊情况。它只有一个规范玻色子——光子。

规范动力学

尽管规范对称需要规范玻色子，它却不需要与规范玻色子相互作用的粒子。理论物理学家们可以在他们认为合适时把它们放进去。每一个粒子都同一个场相联系。在内部对称下，这些场相互变换，因而构成了该群的一个表示。我们记得，群变换杂乱地

收集起一堆实体。在一个给定表示中，实体的数目是完全由群论确定的。我们能够选择我们喜欢的任何表示，但是一旦做出选择，场的数目也就完全确定下来了。

现在，可以非常简单地描述一个非阿贝尔群规范理论的基本动力学。当一个粒子放射或吸收一个规范玻色子时，它就变成另一个粒子。也就是说，一个规范场使粒子相互变换。

以上的描述可能会使读者想起我们对群表示的讨论。数学家们很久以前就想到了在一个表示中作用于抽象实体的群变换。这里，这些抽象的实体不是被小猫或苹果所取代，而是被粒子和与它们相联系的场所取代。实际上，粒子是由于规范玻色子而相互变换的。能看到数学家们的抽象思维在物理世界中最终地实现，会是怎样一件令人兴奋欢欣的事情啊！

但是，我走得太快了。我还必须把杨-米尔斯的理论怎样发现了一个需要描述的世界这个故事告诉大家。

作为亡命之徒的物理学家们

故事回溯到 20 世纪 50 年代，从构造一个强相互作用的理论的长期困难开始。微扰法在对付强相互作用中完全失败了，好象我们将永远不能在细节上确定强相互作用的确切结构似的，我们能够尽力做到的是探索强相互作用的对称。我可能应该强调说，物理学没有失败，而是物理学的计算方法失败了。强相互作用太强了，就是这样。20 世纪 60 年代初，一些物理学家在绝望中甚至鼓吹研究强相互作用时放弃简单性。正如我已经指出的那样，这证明是物理学史中的一种频率突增，人们终于证明简单性是正确的。那么物理学家们究竟又是如何成功地驯服强相互作用的呢？

由于我在某种程度上参与了惊人的思索，形成了我们对强相互作用的看法，所以我将从个人的观点来讲述这个故事。无论如何也不应该把下面的故事作为强相互作用的现代理论史，它只是我个人历史的亲身体验。就象一个下台换装的演员首先就不知道

当他不在时台上发生了什么事一样，我也许不能描述其他物理学家怎样看待这一阶段。

1970年春，当我就要得到我的物理学学位时，物理学家罗曼·杰克伊（Roman Jackiw）问我是否愿意当年夏天在科罗拉多州的阿斯彭（Aspen）度过一些时间。每年夏天，来自世界各地的理论物理学家都聚集在阿斯彭的科罗拉多一落基山脉的壮观景色中交换思想。我自然抓住了这次机会。当我抵达时，我了解到，作为一名没有经验的物理学者，我已经被安排住进了一个地下室，但当我发现我将与以思想深邃闻名的物理学家肯·威尔逊（ken Wilson）住在一起时，我感到又惊又喜。我给那时的未婚妻打电话说，我现在可以完全沉浸于英雄崇拜的激情中了。我常常在体育报中读到，一名新足球运动员描述自己发现与自己自从初中就一直羡慕的一名伟人肩并肩踢球时的感受。对，一名物理学家，在他得到学位的头几年中感受与此大体相同。

地下室没有再分成一个个的房间，所以我和肯·威尔逊熟识了。我们每天晚上共进晚餐，我从他那里学到了很多物理学的知识。那时，肯·威尔逊刚刚完成一大批工作，后来，这为他赢得了诺贝尔奖。他请我把初稿看一遍，并指出我不清楚的那些段落。

人类大脑的一个有趣的特点是，在真正深刻的思想家中，一些是明晰的阐述者，一些则几乎不能被人理解。我必须坦白说，为了理解威尔逊，我费尽了脑筋。

看一看世界

威尔逊关心的是我们怎样描述世界。当然，在从不同的长度比例上观察世界时，世界看上去也就不同了，读者对此是很熟悉的。增大显微镜的分辨力，看上去是迷雾般的结晶，就会显现出细微的结构。在从日常生活里找出的例子中，与我们在一个较精细的分辨下所看到的景色相比较，我们在一个给定的分辨力下对世界的所见，这个观察并不能告诉我们更多的东西。然而，量子

场论的逻辑结构非常复杂，所以，它能够把在一个长度尺度下的描述与另一个长度下的描述联系起来。如果给定一种对世界的描述，物理学家们实际上能够稍微解释世界在更精细的分辨下看起来会怎样。威尔逊的工作实质，就是讨论量子场论的逻辑结构允许我们讲多少话。

在前一章中，我曾提到，在四种基本相互作用中，每一种都有一个衡量相互作用长度的耦合常数来表征。（在量子物理学中，两个粒子相互作用的几率确定相互作用的强度。）在 1970 年，物理学家们都习惯于把耦合常数当作常数来考虑，这是该词中内在的意思。但是让我们借助操作法，设想我的一个实验同事实际上是怎样确定电磁相互作用的耦合常数的。好，例如，他将使两个电子发生碰撞，并通过多次重复这一实验来确定将实际上相互作用的电子的几率。这一几率在本质上确定电磁耦合常数。这种操作的确定清楚地表明，耦合常数将依赖实验者用来使两个 电子碰撞的能量。另一个在不同的能量上重复这一测量的实验者将得到一个不同的耦合常数。所谓的耦合常数，根本就不是一个常数，而是随着测量它时所用的能量值的变化而变化的。因此，我将从此使用更合适的词，即耦合强度或简单地使用耦合，而不再使用耦合常数。

我们记得，在量子物理学中，我们用作探针的任何粒子的波长，随着粒子能量的增大而减小。因此，在用更精细的分辨力研究大自然时，物理学家们简单地在更高的能量上使粒子发生碰撞。这种讨论告诉我们，当我们用不同的分辨力来观看大自然时，各种相互作用的耦合强度就会发生变化。

确切地说，威尔逊工作的一个方面就是探讨这种变化。有趣的是，量子场论的内部逻辑起码在原则上允许我们确定耦合强度怎样随能量的变化而变化。形象地说，物理学家们认为，当人们改变他们测量耦合强度中所用的能量时，耦合强度“运动”着。结果证明，随着能量的变化，耦合强度极慢地运动着。在从物理学始初一直到 20 世纪 60 年代末所研究的能量的整个范围中，电磁

耦合强度只稍微动了动。这解释了为什么耦合强度一向被认为是常数这个问题。

虚弱的时刻

1970年秋，在我同肯·威尔逊相遇之后，我作为博士后到了普林斯顿的高级研究学院。我在那里的一个朋友使我相信，由于我来自简单性继续受到高度尊重的哈佛大学，我在自己的教育中可能力不从心。我认为我最好暂时试一试非简单性。在1971年之前，我没有回到运动耦合强度的思想。1971年夏，我的论文导师、以天才的阐述者闻名的西德尼·科尔曼（Sidney Coleman），作了一些关于运动耦合强度的讲座，并运用科特·卡伦（Curt Callan）和科特·西蒙泽克（Kurt Symanzik）给出的框架，成功地把该课题讲得一清二楚。我细致地研究了科尔曼的讲稿，但是被他那相当悲观的结论搞得泄了气。唯一可见的计算程序，又是以微扰论为基础的。结果，只有当耦合很小时，人们才能够确定耦合强度的运动。因此，物理学家们在对付强相互作用时，同以前一样不知所措。强耦合会运动，但是它象朗费罗的箭一样，物理学家们不知道它在哪里。

1972年春季的一天，我正躺在长椅上重读着科尔曼的讲稿，我突然想到：也许大自然比我们想象的更善良。我的想法是，如果我们用不断增大能量的方法观察强相互作用，强相互作用耦合可能会运动到零。如果这样，强相互作用毕竟能够被驯服。马克·太强先生或许可能有他自己的虚弱时刻。

但是，为了看看这是否会实际出现，我面临着同一个老问题，即由于强相互作用耦合太强而使我不能作出任何有意义的计算。我需要另一个策略。我决定向自己提出下面这个问题。假设强耦合在某一能量级上变得很弱：在我们增大能量时，它是倾向于变强呢？还是倾向于变弱？现在，我能够用微扰论作这个计算，因为通过假设，强耦合已经变弱了。让我作一个粗略的类比。尽管

我不是一个社会经济学家，我却能够胸有成竹地想象，预测一个给定的贫穷家庭是否会变得更加贫穷，要比预测一个中产阶级家庭是否会变得更富或变穷容易得多。

乍看起来，这一假设似乎非常奇怪，我已经提到的那些老一代的物理学家们对此作出了相当否定的反应。强耦合一向是强的。要问如果强耦合弱的话会发生什么情况，可能会令人模模糊糊地想起一个老笑话。在这个笑话中，故事人问道：如果他的伯母是一个男人的话，她会在圣诞节给他什么呢？

尽管如此，我认为这一想法很值得研究。如果计算表明曾经是弱的耦合将变得更弱，物理学家们就至少能够希望强耦合在某一点上会倾向于零。我前面曾讲过，带有零耦合的一个理论称为“自由”理论——其中的粒子会独立于其它粒子而自由运动。当一个理论在越来越高的能量上加以检验时，其耦合强度向零移动的这一理论被称作“渐进自由”理论。

读者可能得到这样的印象，对渐进自由的寻求完全是由遐想引起的。我们愿意让强相互作用在更高的能量上变弱，以便我们能够对付它。这几乎是正确的，但不完全正确。在 1970 年左右，已经有所暗示，这至少是事后认识到的，即强相互作用在高能量上可能变弱。实验物理学家已经把能量很大的电子从质子上散射开。在夸克的情形中，电子给质子中的一个夸克以很大的推动。在前一章中我已经讲到，实验结果表明，当受到推动的夸克呼啸着从其它夸克旁边飞过时，它几乎不同其它夸克发生相互作用。渐进自由能够很自然地解释这一现象。

寻求自由

因为我不知道，其他任何人也不知道，强相互作用理论可能是怎么回事，所以对于我如何会提出计算的问题，有心的读者可能会感到迷惑不解。为了进行下去，我的主意是看一看所有可能的理论。那么，那些渐进自由的理论就会成为一种强相互作用理

论的很有吸引力的候选者。在寻求渐进自由的过程中，人们最终可能也会找到强相互作用理论！

因此，我开始了思维的行程，为了寻求渐进自由而依次观察着每一种理论。这很象是寻宝，由于我事先不知道有无珍宝可寻，所以，这也就变得更加令人兴奋。

不幸的是，我所观察的理论中没有一个是渐进自由的。例如，当电磁过程的相应能量增大时，电磁耦合随之增大。（后来证明，这一事实对于从整体上理解宇宙是至关重要的。）我感到相当失望。

1972 年秋，我加入了纽约洛克菲勒大学的教学研究队伍。这对我个人来说是令人兴奋的。我新近结婚，我和我的妻子从普林斯顿摆脱出来，住进了一个扑朔迷离的大都市。这对粒子物理学家来说也是一个令人兴奋的时刻。物理学家们开始相信电磁相互作用和弱相互作用能够结合成一个杨-米尔斯理论。（在下一章中，我还要讲到这个故事。）基础物理学家又把注意力集中到杨-米尔斯理论上来了。因为已经提出的电磁相互作用和弱相互作用的结合还没有在实验上得到证实，许多理论物理学家为构造这些相互作用的理论争先恐后，搞得走火入魔。人们几乎不知道是研究强相互作用还是研究电磁相互作用和弱相互作用，还是象我一样，即品尝纽约的夜生活。

我决定每样都做一点。我在这里将只把我对自由的寻求告诉读者。我那时寻求自由时，我已经研究了我在研究生院学到的所有理论。但是，我还没有研究杨-米尔斯理论，每一个人现在都把它同电磁和弱相互作用联在一起谈论着，所以我决定下一步研究它。

1972 到 1973 年冬，我听到了电闪雷鸣般的消息，即自由找到了。普林斯顿大学的戴维·格罗斯（David Gross）和他的研究生弗兰克·威尔泽克（Frank Wilczek）与哈佛大学西德尼·科尔曼的研究生戴维·波利泽（David Politzer）各自独立地发现杨-米尔斯理论是渐进自由的。这个消息是使人惊心动魄的——我们最后

可能会制服强相互作用！此后不久，我在费城举行的关于另一课题的一次会议上见到了肯·威尔逊和科特·西蒙泽克，我记得我们如何兴奋地谈论着这一消息。我和西蒙泽克乘同一辆火车赶回来，我们一同谈论着耦合运动和渐进自由。

当我回到纽约时，我努力想找到渐进自由的实验结果。那时，实验物理学家正在研究一个电子和一个正电子——反电子——湮灭为强相互作用的粒子。人们很早就知道，物质和反物质湮灭为一团能量，而粒子就是从这些能量中物化出来的。我使用了这一程序，因为与读者可能会想到的相比较，它的理论描述极其简单。由于渐进自由，电子-正电子湮灭为强相互作用的粒子的几率，应该随着发生碰撞的电子和正电子的能量的增大而减小。(汤姆·阿波尔奎斯特（Tom Appelquist）和胡沃德·乔治（Howard Georgi）与戴维·格罗斯和弗兰克·威尔泽克也独立地做了相似的工作。)

然后我拜访了一位实验物理学家，使我大失所望的是，我了解到这种几率实际随着湮灭能量的增大而增大。那么，我们的自由梦也就不过如此！然而，这一理论非常迷人，我还是发表了自己的文章。后来，人们发现那些实验是错误的。

格罗斯和威尔泽克以及稍后的乔治和波利泽，在我上面提到的实验中开始着手解决理论上更难的电子被质子散射的问题。他们的理论计算和具体实验的一致，表明大自然确实享受渐进自由。

同时，戴维·格罗斯在普林斯顿大学为我提供了一个教职，所以我在1973年秋重又回到静谧的田园式的新泽西州。(顺便提一下，上一年有人为我提供了与此相似的一个职位，但由于奇怪的命运作祟，我却去了纽约。)在普林斯顿大学，我同萨姆·特瑞门(Sam Treiman)和弗兰克·威尔泽克一起工作，研究了渐进自由对高能中微子被质子散射的具体影响。

现在，渐进自由已经被稳固地确定下来；物理学家们已经驯服了强相互作用。格罗斯、威尔泽克和波利泽发现的渐进自由堪称理论物理学的一个伟大胜利。

渐进自由的故事说明了在爱因斯坦的信徒中盛行的思想，即致力于美的理论自然会富有许多美的性质。更进一步，人们能够证明，杨-米尔斯理论在我们的时空中仅仅是一种渐进自由理论。

很好。杨-米尔斯理论是渐进自由的。但是我们怎样运用它来描述强相互作用呢？该理论是在一种精确对称上构造起来的，但很显然，强相互作用的已知对称都是近似的。要描述这个世界，该理论就必须寻求一种精确对称作基础。要解释这一对称是怎样找到的，我必须回到 1967 年。

一切美好的事物都是三个三个的

到 1967 年时，大多数物理学家都开始相信夸克。为了试验一下夸克的思想，理论物理学家们喜欢计算涉及到夸克的在物理上可观测的量。但是，由于夸克之间的强相互作用，无人知道如何进行下去。然后，在 1967 年，斯蒂夫·艾德勒（Steve Adler）和贝尔·巴丁（Bill Bardeen），还有詹姆斯·拜尔（James Beu）和罗曼·杰克伊（Roman Jackiw），在一篇才华横溢的论文中表明，在涉及强相互作用的大批过程中，有一个量可以计算出来，即电中性介子的寿命。这里，各种因素碰巧合在一起，使强相互作用的未知影响全部抵消了。物理学家们万分喜悦，同时也迷惑不解。当计算结束时，人们发现中性介子分解的振幅比从实验测量推算出的值少一个值为 3 的因子。

物理学家们对此感到困惑，但他们很快便意识到，如果存在着三倍于他们原来以为的夸克种类的话，这一偏差就可以得到解释！在上一章中，我向读者介绍了上夸克、下夸克和奇异夸克，诸如此类。突然间，这些夸克每一个好象都有三样。盖尔曼使用了“色”这个形象的词语来描述这种奇特的三重性。人们认为，每一个夸克以三种颜色出现——红、黄、蓝。因此，有一个红色上夸克、一个黄色上夸克和一个蓝色上夸克，一个红色下夸克，等等。（读者应该懂得，颜色一词是形象的用法。）支持这种夸克三重性

的证据不久便找到了。这种情形是使人极为难堪的。大自然为什么这么奢侈与浮华呢？诗应该是简洁明快的。

色对称

一旦物理学家们深思一下杨-米尔斯理论能够描述强相互作用的可能性，大自然使夸克分成三色的目的也就立即昭然若揭了。一个上夸克当然和一个下夸克有所不同，例如，它们具有不同的质量。但是假设黄色上夸克、红色上夸克和蓝色上夸克都具有完全相同的质量，假设下夸克和奇异夸克以及其它任何夸克的情况与此相似，那么我们要构造一种杨-米尔斯理论所需要的精确对称也就具备了！20 世纪 60 年代末看上去是奢华的东西，结果证明是大自然的意味深长的目的。

该对称涉及到把一种颜色的一个夸克变换成一个同种而不同色的夸克。不同色的夸克具有完全相同的质量，这一事实说明了物理学家们为什么花了很长时间才弄懂这种奇特的三重性。总之，我们可能向一个邻居点头问好，多年之后却发现她是模样完全相同的三胞胎中的一员——我们一直看到的是三个不同的人！包括莎士比亚在内的戏剧家们，就使用了这种手法使他们的故事情节复杂化或迷惑观众。

顺便提一下，为了避免不得不总是说“同一种夸克”，物理学家们发现，说每一种夸克具有味道和颜色两种属性更为不便。到此为止，我已经介绍了上、下和奇异三种不同的味。每一种都以三种颜色出现，因而共有九种夸克。请设想一个冰淇淋商店，这里的顾客非常挑剔，他们不但要求 31 种味道，而且要求每一风味的冰淇淋有着最合适的颜色。一个蛋卷冰淇淋的价格可能会随味道的不同而变化，但是对一个给定的味道来说，不管颜色怎样，价格是一样的，人工颜色是廉价的。值得玩味的是，夸克的世界好象是以同一种方式建立起来的。不管一个夸克的颜色怎样，其质量是相同的，但随味道的不同而有所变化。

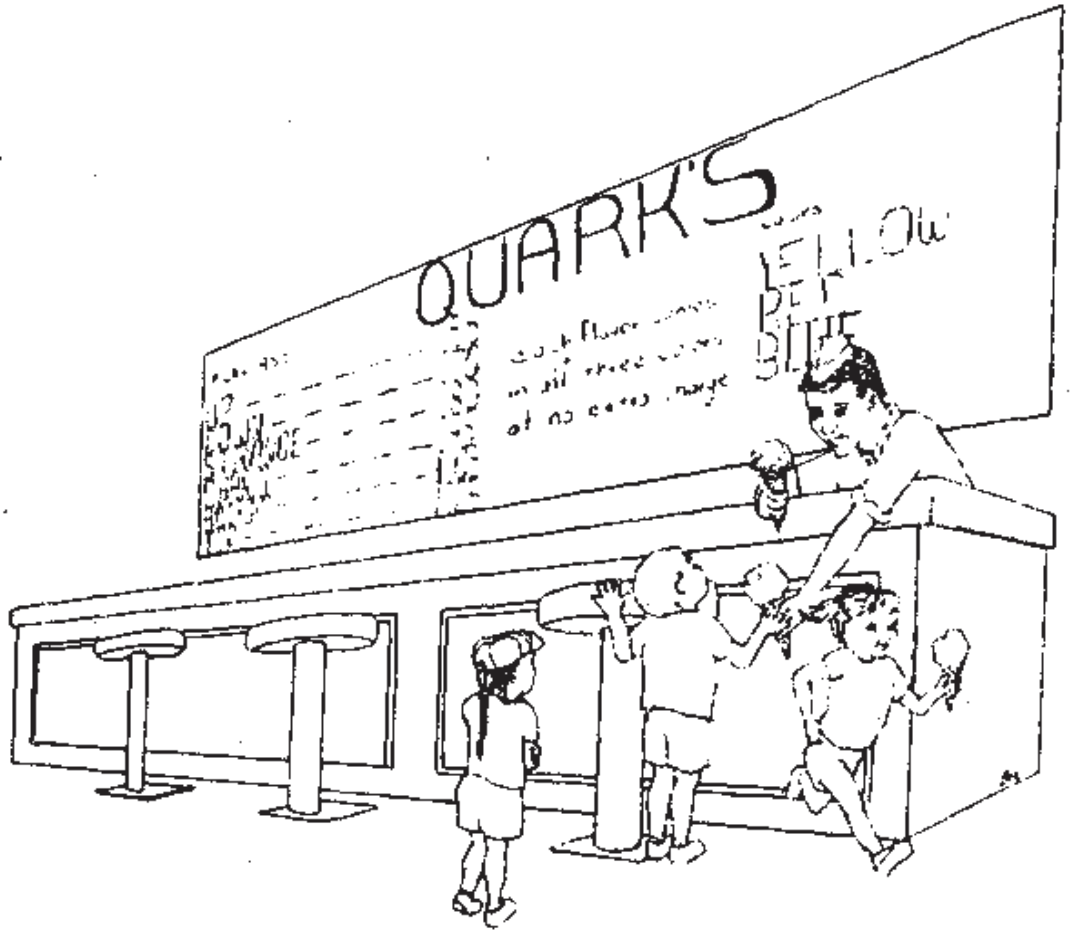


图 12.2　夸克营业室：现有三味，每味三色。上夸克为最便宜的味；顶夸克最昂贵。每种夸克无论何种色，价格相同。

在这种语言中，杨-米尔斯对称改变了一个夸克所带的颜色，而没有改变味道。

在该对称下，三种不同的颜色相互变换着。因此，相应的群就是 SU（3），有时被称为色 SU（3），以便区别于八重路的 SU（3）。

盖尔曼把包括在理论中的几种规范玻色子命名为“胶子”，因为它们被认为把夸克胶结成强子。夸克之间的作用力通过胶子的交换来传递，这与带电的粒子之间的电磁作用力通过光子的交换来传递一样。这种强相互作用的理论现在称为“量子色动力学”。

自由和奴役

渐进自由意味着，当两个夸克在高能量上发生碰撞，或者说根据量子物理学，当它们彼此靠近时，强作用力就变弱。这些夸克变得几乎彼此意识不到对方，它们不受对方的影响。(这解释了渐进自由一词——夸克彼此靠得越近，它们就越“感到”自由。)因此，人们可以用微扰论来计算那些夸克互相靠近的强相互作用过程。当然，这种奇迹般的情形首先促成了对渐进自由的寻求。因为这些计算结果同观察结果相符，量子色动力学现在几乎普遍被接受，并称之为强相互作用的正确理论。

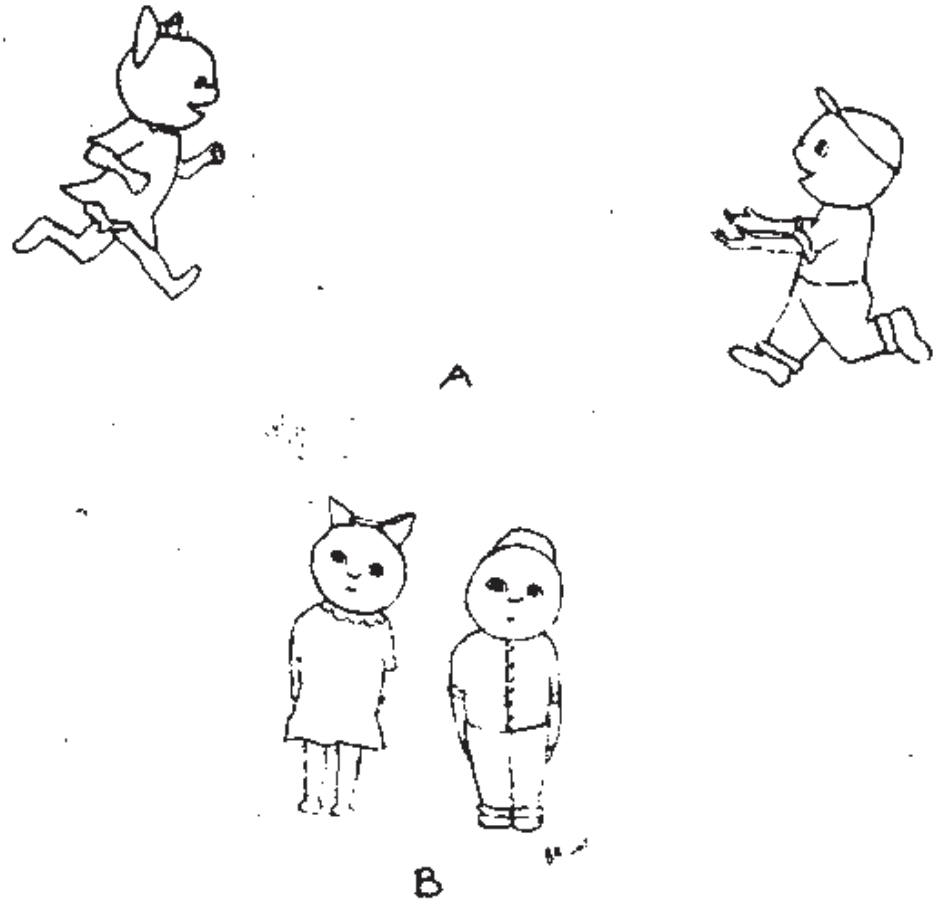


图 12.3 夸克如同一些恋人一样：当它们彼此远离时（A），它们彼此想念，但当它们紧密相处时（B），它们却几乎彼此都意识不到对方的存在。

然而，自由的反面就是奴役：当两个夸克彼此离开时，耦合

强度就不再为零。今天人们一般相信，耦合强度变得越来越强，而且阻止两个夸克相互分离。这种现象称为“紫外奴役”。（紫外这个形容词的来源完全是历史性的，我们在这里不谈论。）

紫外奴役巧妙地解释了以下事实，即没有人见过夸克，夸克被禁闭在强子内。

夸克的行为与一些情人一样。当他们远远相隔时，他们满腔热情地相互渴望着对方，发誓说什么也不能使他们分离。但是他们彼此一亲近，他们的热情便被漠然的态度所取代，彼此竟几乎不交流。

夸克之间的相互作用与我们关于粒子之间的相互作用应该是怎样的直觉是完全对立的，而这样一种直觉是从其它相互作用的研究中建立起来的。例如，两个电子之间的电磁相互作用随着电子相互分开而减小。我们从玩弄磁铁中了解到，当我们分开两块磁铁时，它们之间的相互作用就渐渐变弱。但是当你把两个夸克拉开时，它们之间的相互作用则渐渐变强！

根据量子色动力学，如果夸克受到奴役和限制，那么胶子也是这样。的确，实验物理学家们从没有见到过胶子。

量子色动力学奴役和限制这种现象从来都没有被证明过，正是因为物理学家们首先就不能处理强相互作用力。但是，理论物理学家们已经收集了大量的详细证据支持这种思想。一些理论物理学家认为这种奴役不是绝对的；也许，如果人们用足够大的力气拉这些情人，他们可能会被分开。

表象和实在

量子色动力学大幅度地修正了我们对强相互作用的理解。我们曾认为强相互作用力是通过介子传递的，但事实上，夸克之间的强相互作用力，在深一层次上是通过胶子来传递的。胶子把夸克胶结为核子、介子和其它强子。由于介子在它们之间的交换而引起的两个核子之间的作用力，仅仅是一种更深层次的物理实在

的现象性表现。作为一种类比，我们可能会想到相互靠近的两个复杂的生物化学分子。一个分子的一部分脱开这个分子并附到另一个分子上。某些生物过程完全是以这种方式进行的。但很清楚的是，分子之间的这种相互作用，只是电子和原子核之间的基本的电磁相互作用的一种现象性表现。正如基础物理学家们曾经从分子移到原子、从原子到原子核、从原子核到强子一样，他们现在从强子移到了夸克。

作为一种理论，量子色动力学在物理学史中没有先例。目前的理解是，该理论中的基本结构即夸克和胶子不可能直接观察到，甚至原则上也是如此。

回报是彻底的

旧的强相互作用对称即同位旋和八重路，现在被证明是偶然对称，关于强相互作用的本质，它们几乎什么也没有告诉我们。在夸克这种图景中，同位旋变换使上夸克和下夸克相互变换，而八重路变换则使上、下和奇异夸克相互变换。它们改变味道，而并不改变颜色。它们只有在这三个夸克具有近乎相等的质量这种程度上才对称。我们目前的理解是，不同味道的夸克的质量不是由强相互作用决定的，同时也没有内在的原因使它们相等。事实上，正如我要在下一章中讲的那样，在过去10年里还发现了其它味道的夸克，而它们的质量与上、下和奇异夸克是很不相同的。另一方面，同味但不同色的夸克总是具有完全相同的质量。

强相互作用的本质是由杨-米尔斯的精确对称支配的，而不是由同位旋与八重路的近似对称支配。杨-米尔斯对称产生于爱因斯坦和魏尔，并且受到几何逻辑的影响。回报是彻底的。

学会相加

我已经讲述了艺术回报的故事，而我必须返回来填补故事情

节中的一个空白。寻求渐进自由涉及到检验所有可能的理论——这好象是一项人们将不得不终身致力的工作。幸运的是，大自然对我们又是很善良的。结果没有很多理论要检验。让我解释一下。

在关于量子物理的一章中，我们了解到，要研究一种给定的理论，就必须把所有可能经历的振幅加到一起。是的，这是可怕的一大堆加法。一颗粒子或一个场可能会面临无限种可能的经历。人们到底怎样作这种加法呢？我们中那些立志成为基础物理学家的人，必须花相当长的时间学会把无限数目的振幅加到一起。

让我通过把无限个普通数加到一起，使读者对此有所领略。假设有人要我们把 1＋2＋3＋4＋5＋……加起来。这些省略号表明我们必须无限地加下去。很明显，和数没有什么意义，它变得越来越大，以至无限。再假设，有人要我们把 1＋1/2＋1/3＋1/4＋1/5＋……加起来。在这种情况中，当我们不断加下去时，我们加起来的数变得越来越小。尽管如此，结果和数也趋向无限。尽管加起来的每个数变得越来越小，积累起来的结果却是巨大的。但是，假设现在有人要我们确定 1－1/2＋1/3－1/4＋1/5……。我们在这里可能会有一次机会。交替出现的正数和负数在一定程度上互相抵消，加减数目变化得很慢。例如，在加上 1/3,943 之后，我们下一步就在和数上减去 1/3,944。总的结果是将把微小的数 1/15,551,192 加上去。在这种情况下，和数过了很长一段时间几乎没有增长。事实上，它最后接近了一个很好定义的数，等于 0.693…。我们得到了一个有意义的答案。

这个故事的寓意是，为了把无限数目的振幅加起来，理论的结构必须使得振幅倾向于相互取消。进一步来说，这种取消是微妙的。在上面的例子中，如果我们把一些减号变成加号，甚至我们在每一百个算术符号中改变一个减号，那么就可以说，总数将不再是有意义的，而是重又接近无限。当我们考察一种量子场论时，所经历的无限性只有当作用量具有非常特别的属性时，所有这些振幅的和才有意义。

象我一样地思想

这是绝对难以令人置信的。先决条件是，物理学家们能够写出无限多种作用量。强加的对称使可能性大大减少了，但是，一般来说，仍有许多可能的理论。我们现在了解到，在大多数这样的理论中，我们不能把振幅加起来，就和我们不能确定1+2+3+4+5+…是一样的。如果我们能够有意义地把一个量子场论中的全部振幅加起来的话，那么，该量子场论就被认为是“可重整的”。极为令人惊奇的是，作用量能够采用的可能形式只有三种或四种，这取决于人们怎样做。寻求渐进自由之所以可能，完全是因为人们只须检验一小部分可重整的场论。

我发现，令人惊奇的是，物理学成功地缩小了终极设计的可能形式，他把一个谜摆在了我们的面前。他说，“猜一猜我的设计吧”。但有这么多的可能！然而他给我们看了对称，然后他又给我们看了量子物理学，以及它那些关于把所有可能的经历的振幅加起来的种种规则。“瞧，如果你考虑对称和量子的话，就没有那么多的可能！”

在杨-米尔斯理论提出之后，很多理论物理学家都投身于研究人们是否能把无限数量的经历的振幅加起来的问题。最后在1971年，一名才华横溢的年轻荷兰物理学家杰拉德·特胡弗妥(Gerard t'Hooft) 指出，人们的确能做到这一点：杨-米尔斯理论是可重整的。这一发现具有里程碑般的重要性，因为它意味着杨-米尔斯理论作为一种量子场论是有意义的。在这一章中，我们看到，这种意识打破了有关强相互作用的绝境局面。在下一章中，我们将会看到，这一发现给我们对大自然的理解带来了一个新纪元。

第十三章　终极设计问题

对称末端

物理学家们在使用对称来揣摩造物主的思想时取得了惊人的成功，他们几乎好象发现了他所喜欢的语言。

他们从宇称和旋转不变性着手，然后得出了一种精确的非阿贝尔对称。他们亲眼目睹了精确对称对近似对称的胜利。他们跟随着燃烧之虎经过了长途的跋涉。现在该让他们给出决定了。

想象 20 世纪 60 年代初的物理学家对对称作出反应，他也许会对未来的近似对称感到悲观。现在看起来，海森堡那一度令人震惊的想法，在应用中具有固有的自我局限。由同位旋联系在一起的质子和中子，几乎具有相同的质量。由八重路联系在一起的 8 个重子，多少具有相同的质量。如果有一种比八重路更近似的对称，与其相联的粒子将具有很不同的质量，以致于我们很难认识到它们有联系。主顾要求一位建筑师为他建造一幢圆形大楼，而

建筑师设计了一幢六角大楼。他告诉主顾，“瞧，这几乎是圆形的”，而主顾很可能难以辨认出这种对称的近似圆。说句实在话，一个粗略近似的对称即使可以辨认，也是没有什么用处的。

设计中的一个问题

精确对称又怎么样呢？我们那些只是估量问题的物理学家怎么也不能想象，他们只有如此才可能通过终极设计的路途。基本问题是，对称意味着统一，而世界却呈现出多样性。

这是一个设计中的问题。请想象一下地毯织工。如果他坚持精确的圆形对称，他就会编织出一块非常单调乏味的圆形地毯。唯一可能的设计，是一堆同心的圆形带子。如果不严格要求对称的话，他就可能作出更有趣的设计。

我们的世界五彩缤纷、趣味横生，它并不象单调乏味的圆形地毯。

在音乐中，统一和多样性之间的紧张关系常常是很容易感觉到的。

当我此刻讲到多样性时，我讲的并非是我们在周围看到的各种令人莫名其妙的宏观现象。正如在第二章中讨论的那样，物理学家们已经成功地把宏观现象约化成了电磁相互作用的各种表现形式。我在这里讲的是粒子相互作用层面上的世界的多样性。强、电磁、弱和引力四种相互作用具有极为悬殊的耦合强度，而且它们在其特殊属性上也完全不同。一堆各式各样的轻子和夸克参与了一种或多种这样的相互作用。在这些粒子中充满着一个个的夸克。夸克发生强相互作用，形成强子，轻子却不是这样产生的。电子比质子轻 2 千倍；中微子却是没有质量的。电子发生电磁相互作用；中微子却不发生这种作用。诸如此类。恰恰是这种性质的多样性，使得我们所看到的世界成为可能的结构。

对称与多样性

在20世纪60年代末，由基本相互作用和粒子呈现出的多样性似乎表明，完美的对称在大自然的设计中是没有地位的。但是，爱因斯坦的理性弟子们，一想到上帝更喜欢近似对称作用而不是更喜欢完美对称作用，就诚惶诚恐。表面上看来，他们只能委屈地承认在世界的作用量中没有什么统一的、能把四种基本相互作用联系在一起的对称。强相互作用比在强度上次之的电磁相互作用强100倍。强词夺理地说一轴比另一轴长100倍的椭圆近似于圆形是站不住脚的。同样，希望找到把这两种相互作用维系到一起的一种近似对称，好象也是站不住脚的。

对于终极设计者来说，障碍就在这里。对称是美的，而美是悦人的。但如果设计完美而对称，那么就会只有唯一的一种相互作用。基本粒子就会完全相同，从而也就会是彼此不可分辨的。这样的一个世界是可能的，但它又会非常单调和乏味：就会没有原子、没有星星、没有行星、没有花朵、也没有物理学家。

我们的悲观的物理学家觉得，近似对称和精确对称都不会告诉我们很多有关终极设计的东西。对他来说，对称的思想好象已经竭尽了。也许燃烧之虎只能把我们引导至此。

你或许会说，嘿，等一会儿。我们刚刚看到杨和米尔斯引人注目地朝一个新方向走去了。他们没有持续不断地寻找更多的近似对称，而是坚持认为大自然运用着精确对称。多年之后，在强相互作用中的确发现了一种隐秘的精确的杨-米尔斯对称。那么，我们的物理学家为什么在精确对称上笨拙得有如狗熊呢？

确实，我们的物理学家没有预见到一种隐藏在强相互作用中的精确对称的可能性。然而，导致他的悲观情绪的那种推理基本上是正确的。强相互作用中的精确规范对称，迫使胶子没有任何质量并且彼此不能分辨。它使具有同一味道从而具有同一质量的夸克联在一起，却不把味道不同的夸克联在一起。因此，在缺乏

一种全新概念的情况下，精确对称不能把完全不同的相互作用维系起来。

一种不可能的要求

对称和多样性之间的这种差别深深地击中了我们的美学感知。完美的对称引起平静、稳重甚至死亡。几何使人肃然起敬，但不会引发人的生机。现代雕塑使我相信它是调和几何与有机的一种持续斗争。托玛斯·曼（Thomas Mann）在他的著作《魔山》中表述了这种差别。书中的一个人物汉斯·卡斯托普（Hans Castorp）几乎在一次暴风雪中消亡。雪花对他好象是：

> “衬于他们隐秘的光辉中的一簇簇迷人的小星星……，没有一个象另一个那样……而是自成一体——这是它们共同的特点：不可思议、反有机、否定生命——它们每一个在形式上都绝对是对称的，是如冰一般有规则的。它们太有规则了，适于生命的物质从没有规则到这种程度——生命原则看到这种完美的精确就会颤栗，它发现这是致命的，正是死亡的精华——汉斯·卡斯托普觉得他现在懂得了古代的建筑师们为什么有意地和秘密地在他们的柱形结构中细微地变化一下那绝对的对称。”

我们也喜欢世界偏离绝对对称的冷酷的完美，以便使差别巨大的相互作用能够互相对立，产生一个具有趣味横生的多样性的世界，一个具有有机美的世界。但是我们不能迫使我们自己想象他，喜欢椭圆而不喜欢圆，于是便偷偷地作了许多变化。

终极设计者既要统一又要多样性，既要绝对完美又要喧闹的生机，既要对称又要缺乏对称。他好象在对自己提出一个不可能实现的要求。

酒瓶的智慧

物理学家们可能会发现他如何解决了这种不可能的设计困境，我认为这是对人类智慧的盛赞。我现在就解释一下。

当我们讲到对称时，我们就会不自觉地想到那些用在设计和建筑中的几何图形对称。一种几何图形或者具有某一对称，或者不具有。解决终极设计者的问题的方法，通过思考几何图形是想不出来的。

这一解决方法在一只酒瓶的底部却能够找到（在酒喝光之后），如图 13.1 所示。

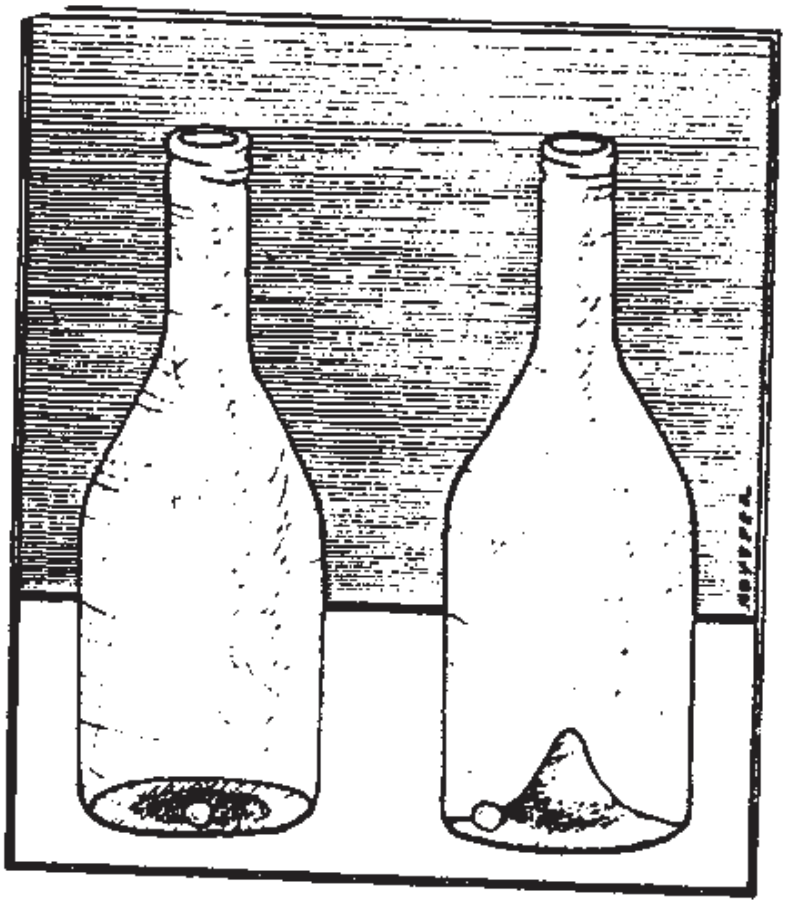


图 13.1　酒瓶的智慧：（左）一个不带凸出部的瓶子，（右）一个带凸出部的瓶子。

许多瓶底都象空碗一样。把一小块石子投入瓶中，显然，石

子会最后落在中间。但是一些瓶子有某种隆起部分——技术上称为踢——这种踢位于瓶底，如图 13.1（右）所示。把一块石子投入一个带踢的瓶子，并看着它最后落到踢边上的某一点上停住。

这是什么呢，你说这是儿童游戏，这样做是相当可笑的。但是，实际上，我们从中学到了有关对称本质的某种很重要的东西。如果我去掉标签，那么带踢的和不带踢的瓶子在围绕瓶轴旋转下都是对称的。与此相比，在带踢的瓶子中的石子，由于它在边沿上的位置而选择了一个方向。旋转对称被“破缺”了。石子和瓶子的构型在围绕瓶轴旋转下并不是不变化的。瓶子中的石子可能会指向东、或偏西北。（当然，这正是一般旋轮的一般操作原理。）

自发的对称破缺

为了理解这一课，我们必须懂得，当在物理学中讲到对称的时候，我们并不是想到几何图形的对称，而是想到作用量的对称。以下是关键的一点。在给定一种作用量的情况下，我们必须确定由该系统遵循的实际经历，不管它是一颗粒子也好，还是整个宇宙也好。如果我们讲的是量子物理学，而不是经典物理学，我们就必须确定更可能的经历。无论在哪一种情况中，即使对称变换不使作用量有什么变化，它们有使具体的经历发生变化的可能，也有使具体的经历不发生变化的可能。

在酒瓶的比喻中，石子和带踢的瓶子之间的相互作用中，在一个方向和另一个方向之间没有什么偏爱。然而，当石子最后停下来时，一个具体的方向就被选定了。石子和瓶子之间的相互作用同世界的作用相对应，而石子的最终位置同世界遵循的实际经历相对应。

如果所遵循的实际经历并非象带踢的瓶子中的石子所示的那样，在使作用量不变的对称变换下不变，物理学家们就说该对称被“自发地破缺”了。自发的对称破缺的说法是同明确对称破缺的说法相对应的。如果作用量本身只是近似于对称，物理学家们

就会说该对称是明确破缺的。

为了理解明确对称破缺，让我们回到酒瓶的比喻。我们让吹玻璃工在他的技术中稍作疏忽，以便使瓶底不完全对称；离中心的某个地方有一凹陷部分。把一块石子投进去，它最后就会停在这个凹处。这种情形是同诸如同位旋和八重路这样的近似对称相对应的。很明显，作用量正象瓶子一样是不对称的。人们也把明确对称破缺描述为“用手”破缺。人们把破缺了的对称引入作用量。

读者可能会问，“所有这些又有什么深奥的呢？”好，大家承认，酒瓶的比喻过于简单了，它不能展示有关物理学的全部奥妙。这个概念是多么深奥呢？我只仅仅说，直到20世纪60年代初，粒子物理学中的最优秀的头脑都没有产生自发对称破缺的思想。在那以前，当遇到一种破缺的对称时，物理学家们就只认为作用量是不对称的。

终极设计者运用自发对称破缺可以解决他的问题：他能够有一种同时展示对称和缺乏对称的设计了！他能够写下一种完美对称的作用，而又可使实际经历不对称了。

自发性并不是用手放入的

物理学充满了可以描述为自发对称破缺的范例的情形。让我举一个海森堡特别研究过的相当著名的例子。请看一看一块磁矿石。在微观层面上，矿石内部的原子在不停地旋转着。象在第三章中解释的那样，每一个原子的旋转方向明确表示一个箭头。因此，每一个原子可以看作带有一只箭头，看作一种小型指南针。在一种磁性材料中，原子之间电磁相互作用的净效应是这样的：一种作用力倾向于使两个相邻的原子所带的磁针指向同一个方向，这与两个彼此相邻的条状磁铁指向同一个方向是颇为相似的。实际上，一块磁铁就是一块矿石，其中所含的无限个磁针都指向同一方向。

但是，电磁相互作用在旋转上是不变的，它并不表现出对任何具体方向的偏爱。那么，在一种带磁物质中，一个具体的方向到底是如何选定的呢？答案很显然。假设我们能够安排使无限个磁针指向无论哪个方向，混乱之后不久便秩序井然了。在某个地方，一堆磁针就会或多或少地都指向同一方向，而且它们会劝使相邻的磁针最后指向同一个方向。基础物理学中内在的那种旋转对称，被自发地破缺了。

自发对称破缺也可以在一些社会倾向中看出来。例如，假设在某一时间人们对他们喝什么样的水并不在乎，但然后由于同群压力，两个人在社交中倾向于喝同样的水。一个个人的喜好可以用指向那一具体种类的水的箭头表示。同群压力可以表现为有排列两位个体所带箭头的倾向的一种相互作用。最简单的前提就是，该相互作用是旋转不变的：人们并没有他们自己的喜好，而是倾向于喝他们的朋友所喝的东西。以下故事，读者可以自己玩味。

平静和兴奋

但这些例子只能是启发性的。对诸如在一只酒瓶中的一块石子或在一块磁铁中旋转的原子这样的实物，基础物理学家是不感兴趣的。他们感兴趣的是世界的基本作用及世界的构型。

那么，这些物理学家所使用的“世界的构型”这个词语到底是指什么呢？不，他们不是讲宇宙的实际构成、星系的分布和定向、或可以直接观察到的任何事情。为解释这一概念，我首先必须用几句话讲一讲场论。

正如在上一章中所说，现代物理学是用场的语言来描述的。由于科幻小说的影响，“场”现在被赋予了一层神秘力量的光环，但是，由一名在数学上没有受过教育的书籍装订学徒工发明的场的基本概念却非常简单。我们记得，一个带电粒子在时空的任何给定点上都会感到的电磁作用力的强度，构成了电磁场的特点。也就是说，在一个具体时间上的一堆数目构成了一个场的特点。

在研究场时，物理学家们遵循着一种首先描述这一处于平静中的系统的策略。例如，如果电磁场处处为零，它就处于平静状态：即，如果没有电磁作用力，它就处于平静状态。在我们的石子处于瓶子里这一比喻中，我们首先确定石子最后在哪里停下。然后我们才可以问，如果我们稍稍击一下石子会发生什么情况。通过研究石子嘎啦嘎啦转动时的样子，我们了解了瓶底。与此相似，物理学家们提出了如果他们给电磁场一“脚”时会发生什么情况的问题。电磁场嘎啦嘎啦转动；如果与转动相关的能量集中在很小的区域内，他们就称其为能量光子集合。物理学家们说，电磁场从平静中兴奋了起来；光子则被称为电磁场激发。

通过研究激发的本性，物理学家们可以了解统辖一个给定场论的作用量。尽管要掌握现代场论的全部奥妙精微，尚须相当大的献身精神，这一基本策略却是相当自然而完全容易理解的。这与儿童用来努力认清一个不熟悉的物体的那种策略是同一类别的；她把物体摇来晃去，使其作响，并观察激发的本性。

我现在可以说出物理学家们用世界的构型所表达的含义：这是对平静中的世界的一种描述。

在 20 世纪 60 年代之前研究过的场论中，场在平静状态或在技术上称之为基态的情况下总为零。这同在不带踢的瓶子中的石子的情况相对应。在平静状态中，石子和中心的距离为零。场的大小同石子的位置相对应，而这一位置是以石子到瓶中心的距离来计算的。请考虑一下使作用量不变的对称变换。在这些变换之下，一个为零的场仍旧为零。在我们的类比中，瓶子绕轴进行的旋转使瓶子不变。如果石子位于零即位于中心，它在这些旋转中就仍位于零。

在平静状态中，如果一个场不是零又怎么样呢？这同在带踢的瓶子中的石子的情况相对应；当石子最后停下不动时，它处于与中心的距离不为零的位置，并因而选择了一个它所喜爱的方向。

为写起来方便起见，我把处于平静状态中而不为零的场称作希格思场（彼得·希格思（Peter Higgs）是研究过自发对称破缺

的物理学家中的一个)。不为零的希格思场就象石子一样选择了一个方向。

让我们考查一下使作用量不变的对称变换。一般情况下，这些变换会改变希格思场。在带踢的瓶子中，绕瓶轴的旋转使瓶子不变，但改变石子的位置。如前所述，尽管石子和带踢瓶子之间的相互作用是旋转不变的，处于平静中的石子的构型却并非如此。与此相似，改变希格思场的那些对称变换被自发破缺了。

现在，这一策略已很清楚了。物理学家们可以从世界的一种对称作用量着手，一种对称作用量类同于一个带踢瓶子，而不类同于一个不带踢的瓶子。在自发对称破缺后，从作用量中得出的实际物理规律就不再会对称了。当然，世界的作用必须设计得使诸如洛伦兹不变性这样的一些令人珍视的对称保持不被破缺。象前面指出的那样，自发破缺优于明确破缺的一个方面是，对称破缺的方式是由作用量控制的，而不是由物理学家控制的。

对无的研究

顺便提一下，平静中的世界是你能见到的最寂静的地方。这儿没有任何粒子，物理学家们称其为真空。当然，构成星星和你、我的粒子就是激发。真空就是消除所有激发的世界。

为了确定自发对称破缺的方式，物理学家们已用相当大的精力致力于研究真空，因而引起了基础物理学变为研究虚无的怪事。

在了解到一种具有完美对称的作用量可能表现出完全不对称之后，我们将继续讨论由于我们对自然对称破坏的理解而成为可能的那些巨大发展。我这里是指一种划时代的意识，即弱相互作用和电磁相互作用实际上是相联系的。要叙述这件事，我就必须再多告诉你一点关于弱相互作用的事情。

一个体胖的婚姻中间人

一眼看去，弱相互作用好象不可能同电磁相互作用联系在一起，它比电磁相互作用弱得多。请设想一下中微子那可怕的漫不经心的样子，并与光子那喜好合群的品性相对照，后者同任何带电的粒子都相亲近。电磁相互作用的力程长，而弱相互作间的力程极短：只有当两个粒子实际相挨时，两个粒子之间才能产生弱相互作用。甚至在本质上由强相互作用的力程确定的原子核尺度这一量级上，弱相互作用的力程也是很微小的。

我们记得，在第十一章中，人们认为，两个粒子之间的相互作用，是一个中介粒子在两个粒子之间不断穿梭往来的结果，是婚姻中间人千方百计把互有好感的双方拉到一起的结果。相互作用的力程是由中介粒子的质量确定的。因此，原子核相互作用的力程短是因为介子质量大的缘故。如果弱相互作用的中介者比介子的质量大得多的话，弱相互作用那极短的力程可能会得以解释。弱相互作用的中介者称为“中间矢量玻色子”，由字母 W 表示。尽管汤川（Yukawa）在他那经典的论文中已经探讨了弱相互作用的中介子，W 玻色子是几年前才发现的。实验小组负责人卡洛·鲁比亚（Carlo Rubbia）和西蒙·凡·得·梅尔（Simon Van der Meer）在 1984 年被授予了诺贝尔奖。W 的质量是介子质量的几百倍；作为一个婚姻中间人，W 太胖了，不能走太远的路！

尽管只到最近才发现 W，但粒子物理学家们在弱相互作用的结构确定之后不久，便能够推演出它的许多属性了。为使弱相互作用具有它那些被人观察到的属性，它的“婚姻中间人”就必须以一种规定的方式行动。令人惊奇的是，W 在某些方面同电磁相互作用的介子——光子很相象。例如，W 和光子以同一速率旋转。但是，在其它方面，W 和光子具有明显的不同之处。光子没有质量，而 W 是在实验中为人所知的质量最大的粒子中的一种。当一个粒子射出一个光子时，宇称守恒；但是，因为弱相互作用并不

尊重宇称，所以当一个粒子射出一个 W 时，宇称令人震惊地不守恒。这种情况甚至比查德威克同两种难以分辨的事物相遇更令人迷惑困窘。请想象一下在一次集会上遇到两个面目完全相同的人的情况。但是，其中一个轻得几乎没有什么重量，而另一个则是你曾遇到的最重的人。他们有关系还是没有关系呢？

相同强度

到 20 世纪 50 年代，一些物理学家提出，W 和光子之间的相似表明，弱相互作用和电磁相互作用是有些关系的。强度上的巨大差异对这种解释形成了第一个障碍。在量子物理学中，正如在第十一章中所见到的那样，一种相互作用的强度是以由一定距离分开的两个粒子发生相互作用的几率振幅来测量的。直到如今，我们认为相互作用是一个介子在两个粒子之间穿梭往来的结果，这一几率振幅等于三个几率振幅的乘积：一个粒子放射介子的振幅、介子到另一个粒子的振幅和另一个粒子吸收介子的振幅。(在量子物理学中，就同在日常生活中一样，发生一系列事件的几率就等于每一事件个别几率的乘积。)这一事实指出了一条绕过截然不同的强度这一障碍的路径。也许一个粒子放射一个 W 的振幅，并不比粒子放射一个光子的振幅小，但是 W 的质量很大，所以它从一个粒子到另一个粒子的几率振幅是很小的——它累得只想返回。这可以解释弱相互作用为什么如此弱。

这种论点让我们能猜想 W 的质量可能是多少。假设我们猜想一个粒子放射一个光子和放射一个 W 的振幅是相同的，那么弱相互作用和电磁相互作用之间的相对强度则仅仅由 W 的质量确定。因此，为了再产生我们观察到的强度的比，我们可以只计算 W 必定具有的质量。

规范玻色子的一种姐妹关系

几个物理学家，特别是朱立安·施温格（Julian Schwinger）、西德尼·布鲁德曼（Sidney Bludman）和谢利·格拉肖，都更进了一步：他们猜测光子和 W 玻色子都是一种杨-米尔斯理论的规范玻色子。要赏识他们的勇气，我们必须注意，在 20 世纪 50 年代末，杨-米尔斯理论与什么相关联是完全不清楚的。

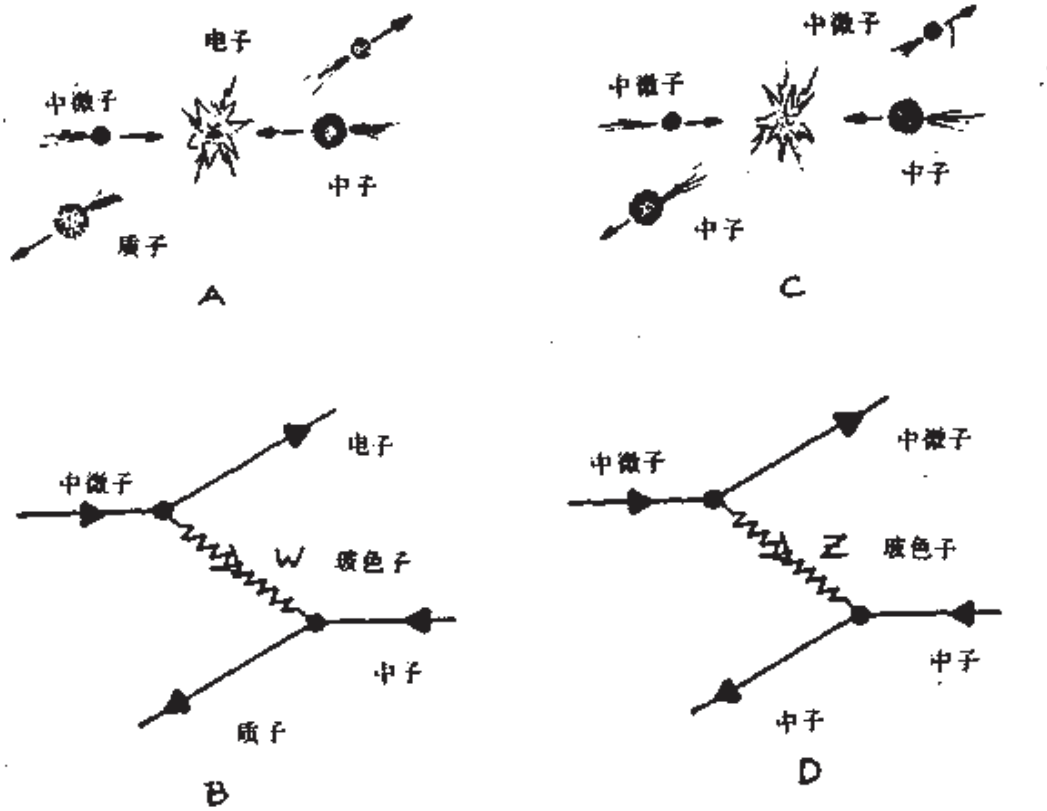


图 13.2　一个艺术家对一个中微子和一个中子的碰撞的概念。可以出现两种反应：（A）一种带电电流过程，其中，一个电子和一个质子飞出。（C）一种中性电流过程，其中，一个中微子和一个中子飞出。带电电流过程是在 1961—62 年间观察到的，而中性电流过程则是在 1973 年观察到的。物理学家们不画如 A 和 C 中那样的图，而是画如在 B 和 D 中所标示的图，即“费曼图”（Feynman diagrams），以便更细致地描绘发生的情况。在带电电流过程（B）中，中微子射出一个 W 玻色子并将本身变为一个电子。W 玻色子则将中子转化为一个质子。在中性电流过程（D）中，中微子射出一个 Z 玻色子但保持为一个中微子。Z 玻色子然后被中子吸收。

在杨-米尔斯理论中，在放射或吸收一个规范玻色子时，一个粒子就变换成为另一个粒子。这一事实同弱相互作用自然吻合。在放射性这种原型弱过程中，我们观察到一个中子分解为一个质子、一个电子和一个中微子。理论家们把中子描述为放射一个 W 并把自己变换为一个质子（或者在一个基本层面上，中子内的一个下夸克放射一个 W 并把自己变换为一个上夸克）。或者让我们考查一下另一种典型的弱过程：一个中微子和一个中子发生碰撞，变成一个电子和一个质子（参看图 13.2）。我们又把中微子描述为放射一个 W 并把自己变换为一个电子，而中子则吸收由中微子放射的 W 并把自己变换为质子。对弱相互作用的研究，变成了当一个粒子放射或吸收一个 W 时对会发生什么事情的研究。

在这一点上，我们必须决定对杨-米尔斯理论使用什么群的问题。群的选择确定了规范玻色子的数目和它们的属性。布鲁德曼试用了最简单的群，即我们的老朋友 SU（2），但是，由此所得的理论同我们所观察的形态不相吻合。格拉肖坚持下来，继续研究下一个最简单的群，即群 SU（2）×U（1）。该群基本上就是 SU（2），但附有一些其它的变换。

一个失踪了很长时间的胞妹

格拉肖成功地解释了我们所观察到的电磁和弱相互作用的形态，但是，他也得到了份外的东西：SU（2）×U（1）对称任命了一个多余的规范玻色子，现在称为 Z 玻色子。

当一个中微子放射或吸收一个 Z 玻色子时，根据这一理论，它仍是一个中微子。（因此，当一个电子、一个中子或任何其它粒子放射一个 Z 时，仍然是其本身。）Z 玻色子在这一方面同光子相似：当一个粒子放射或吸收一个光子时，它没有变化。但是，与光子的放射或吸收不同，Z 的放射或吸收违背宇称。

Z 的中介产生了一种前所未闻的相互作用。例如，当一个中微子和一个中子发生碰撞时，这一相互作用就会引起中微子和中子

相互散射，因为 Z 在中微子和中子之间的往来并不会引起一个粒子发生变换。这一过程现在称为“中性电流过程”，它和标准弱过程截然不同。在标准弱过程中，互相碰撞的中微子和中子被变成了一个电子和一个质子（参看图 13.2）。很清楚，中性电流过程甚至比标准弱过程更难测定，因为出现的是一个幽灵般的中微子，而不是一个易于测定的电子。部分是由于这种困难，部分也是由于在实验界普遍流行的一种怀疑情绪，实际上直到 1973 年才得以测出中性电流过程。

我必须强调，爱因斯坦的对称支配设计的声明具有全部效力。有一个导致前所未闻的一组过程的多余的规范玻色子是对称强加于格拉肖身上的。一旦他决定选择一个对称，他就再也没什么可说的了。

美好但忘却了

中性电流过程的探测，戏剧性地证明了一种杨-米尔斯理论能够描述电磁和弱相互作用的思想。但是在 1961 年的时候，形势看上去肯定令人相当失望。实验学家们从来都没有见过一种中性电流过程。再说，格拉肖面临着明显不能逾越的困难，即在一种杨-米尔斯理论中，规范对称迫使所有的规范玻色子不具有什么质量。

由于不知道另外该做些什么事情，所以格拉肖仅仅明确地破缺了规范对称，并用手把 W 和 Z 的质量放入了作用量中。这样一来，他失去了测量的能力，因为他在本质上可以随意放入任何质量。由于 W 和 Z 在任何意义上都不是近似于没有质量的，所以他不得不大大地破缺对称。结果，作用量远非是对称的。还记得那个想把六棱形大楼当作一幢近似于圆形的大楼交差的建筑师吗？

更糟糕的是，用手破缺对称是一种粗糙的过程，它把使理论可以重整的微妙的抵消搞得一踏糊涂。我们还记得在前一章中对重整性的讨论和把无限个连续数目加起来的问题。例如，我们可

以确定 1－1/2＋1/3－1/4＋1/5…。用手破缺对称与把所有的减号变成加号并因而使总和数毫无意义很相似。在格拉肖的论文中，人们没有办法把无限个经历加起来，因此该理论没有什么意义。

由于这些困难，人们对格拉肖的论文敬而远之，所以，除了一少部分想保持这种信仰的人以外，它不久便被大家忘却了。1964年，我们在第十一章中遇到过的约翰·沃德和阿布杜斯·萨拉姆企图复活这一理论，但没有成功。是的，杨-米尔斯理论确实有些美好，但是，大自然对美又有什么关心的呢？庸俗的菲利斯人正处于上升阶段。

来援救的自发破缺

在当时，著名美籍日本物理学家南部一郎（Yoichiro Nambu）也把自发对称破缺理论介绍进了粒子物理学。我在前面提到过，盖尔曼用“把野鸡肉放在两片小牛肉中间”的方法发现了一些强相互作用对称。盖尔曼的方法如此荒诞无稽，许多物理学家根本不期望这些对称有什么关联。的确，强相互作用现象在这些对称之下好象并不是不变的。后来证明，这些对称事实上在世界的作用量中是存在的；然后，它们自发破缺了。

在1964年左右，由于自发对称破缺成功地适用于强相互作用，所以，在几个独立的小组中工作的各种各样的物理学家——菲力蒲·安德逊(Philip Anderson)、杰洛德·古拉尔尼克(Gerald Guralnik)、卡尔·黑根（Carl Hagen）、汤姆·基堡尔（Tom Kibble）、弗朗西斯·恩格勒特（Francois Englert）和理查德·布卢特（Richard Brout）以及彼得·希格思（Peter Higgs），想看一看如果一个规范对称自发破缺会发生什么情况。

你会想起，在规范理论中，规范对称要求相应的规范玻色子没有质量。那么并不惊奇，当一个规范玻色子自发破缺时，相应的规范玻色子的质量就增大。这在今天被称为希格思现象。

在一个被自发破缺的规范理论中，一些规范玻色子变重而另

一些仍然没有质量，这一事实只不过是医生为拯救格拉肖那垂死的计划而开的药方！W 和 Z 玻色子可以变重，而光子仍然保持无质量。因而，整个思想可能生效。

至少事后令人惊讶的是，希格思一伙没有把他们的考虑应用于弱相互作用和电磁相互作用。他们把自己的工作看作自发对称破缺中的一种有趣的游戏，仅此而已。格拉肖的系统不但在濒临绝境，而且已被人忘却了。拥有合适药品的医生们并没有在病人的身边。如果我们把自己置入正确的历史环境之中，这种令人惊奇的错综复杂的事件的心理社会原因也就不难理解了。在 20 世纪 60 年代中期，对爱因斯坦的门徒来说，艺术的回报仍然是一种梦幻。唯象学处于支配地位，规范对称远非粒子物理界关心的焦点。

最后，在 1967 年，阿布杜斯·萨拉姆和斯蒂夫·温伯格各自独立工作，妙思突涌，他们运用希格斯现象解释了弱相互作用和电磁相互作用之间的差异。

那时，温伯格正用自发对称破缺的想法来研究盖尔曼的“带小牛肉味的野鸡肉”的对称。他千方百计把希格斯现象应用于这些强相互作用的近似对称中。正如他在自己的诺贝尔奖演说中所回忆的那样，一天当他正驾车驶向自己的办公室时，他突然领悟到他在把正确的思想应用于错误的问题。(顺便提一下，一般情况下我避免与理论物理学家们驾车同行，当我和妻子外出时，她总是坚持由她驾车而行。因为有一次，在从普林斯顿大学的高级研究所出来的路上，我由于对一个问题入了神而撞坏了自己的车。)温伯格一意识到希格斯现象的关联性，便能迅速找到电磁相互作用和弱相互作用的统一。

与此同时，萨拉姆多年来都在思考弱相互作用的对称属性。我已经提到，他和约翰·沃德在 1964 年同对称群 SU (2) ×U (1) 进行了肉搏。很明显，这次较量给他们以很大的挫伤，所以萨拉姆转而研究起其它问题来。事实上，发现希格斯现象的物理学家们中的汤姆·基堡尔是萨拉姆在皇家学院的同事。正如萨拉姆在他的诺贝尔奖演说中所回忆的，基堡尔教给了他希格斯现象。在

一次深不可测的创造行动中，萨拉姆最后于1967年把这些不同的因素汇在了一起。

自发对称破缺的运用方法是粗糙的。格拉肖不得不用手加入W和Z玻色子的质量。这同吹玻璃工在酒瓶瓶底吹出一凹处极为相似。另一方面，应用自发对称破缺，该理论把W和Z玻色子的质量告诉了我们。

有趣的是，萨拉姆和温伯格在一段时间里已经对自发对称破缺都很熟悉了。温伯格在皇家学院作为萨拉姆的客人度过了1961—1962学术年。为阐释自发对称破缺，他们同英国物理学家杰佛里·古德斯登一起进行了工作。令人惊奇的是，在萨拉姆和温伯格意识到自然对称破缺与截然不同的相互作用的统一相关联时，多年的时间已经流逝了。我认为，原因很清楚：正如温伯格所提到的，他和其他人跟 在南部一郎身后，把注意力集中到了破坏强相互作用的近似对称上。

萨拉姆和温伯格的建树没有立即使理论界欢欣鼓舞。事实上，我记得，当我作为一名新研究生见到温伯格的论文时，我的一位教授阻拦我阅读它。正如我再三提到的，基础物理学由唯象学统治着。理论界对此缺乏关注还有另外一个原因。实际上没人知道怎样把一个杨-米尔斯理论中的无限经历数加起来。

正如在前一章所提到的，荷兰物理学家特胡弗妥最后在1971年表明了怎样做这种加法。对自发对称破缺的运用也是粗糙的。如果有人用手野蛮地破坏对称，那么使这种加法成为可能的那些微妙的相互抵消即被毁坏。我记得当特胡弗妥的突破的消息从欧洲传到我们这儿时，我和我的同事们是多么的兴奋和欢喜。西德尼·科尔曼欢呼道："特胡弗妥的突破使温伯格·萨拉姆的青蛙摇身变成了一位人们齐声赞美的王子！"电磁相互作用和弱相互作用的一种理论终于造就了，现在它被简称为标准理论。

一个新纪元

标准理论是物理学历史发展中的一个分水岭，它在我们了解大自然中开辟了一个新纪元。物理学家们把所有的物理现象简化成了四种基本的相互作用，它们起初看去如此截然不同，好象没有对称可以把它们联接起来。但是，大自然只不过试图蒙骗我们，它把作用量那风姿绰约的对称掩藏了起来。的确，象杨-米尔斯的规范玻色子一样，光子、W 和 Z 是相联的，它们在对称群下相互变换。就象在出生时分开的一组完全相同的三胞胎的成员一样，它们在自发对称破缺之后彼此只保持一种模糊的相似。然而，我们可以想象一下涉及到比 W 和 Z 的质量大得多的能量的物理过程，以便我们可以有效地认为 W 和 Z 是没有质量的。在这些过程中，W 和 Z 声称它们同光子有亲属关系。对，我们是你的姐妹，我们和你一样强地同粒子结合在一起！只是因为在低能量时，我们被自己的质量拖了下来，所以你认为我们很弱。因此，电磁相互作用和弱相互作用 不再作为实物存在：它们统一成为一种单一的弱电相互作用。

我在本章的开始部分提到的物理学家对于对称的力量太悲观了。这并不是通往对称之路的终点，而只是起点。

第十四章　力的统一

我们想的一样

电磁相互作用和弱相互作用的统一，标志着我们在了解大自然的历程中的一个新纪元的曙光。重要的并不是我们终于成功地理解了放射性或者中微子那些古怪的行为，也不是我们现在对电磁性有了更深的了解。重要的是，我们现在有勇气认为我们能够有一天知道他的思想了。

在近似对称支配基础物理学的近 40 年期间，相信美和完美的人策划着他们的反攻倒算。融进弱电统一中的理性因素是长期的过程形成的。

这种探索开始于爱因斯坦对于对称的欣赏和他对于局部变换的执着坚持。这一火炬由魏尔举了下去，他受到了诺特尔发现的深刻的精神法则的激励。海森堡则揭示了一个充满内部几何和对称的新世界。杨和米尔斯在这一遗产上继续建设，理解了自发对

称破缺。这些不同的因素终于在“标准理论”中汇到一起。实验强有力地证明了这一理论，这具有巨大的影响和解放力。大自然告诉我们：我们跨上了正确的道路。尽管我们微不足道，但他和我们在思考相同的东西。

命中注定的团聚

正如一个杨-米尔斯理论所述，现在电磁相互作用和弱相互作用已经统一为一个单一的电弱相互作用。物理学家们想知道有关强相互作用的情况。在第十二章中，我们看到物理学家们如何发现了，强相互作用也为杨-米尔斯理论所描述。因此，想象弱电相互作用和强相互作用可能更进一步相互统一，就是很自然的了。

光子、W 和 Z 泪流满面地团聚了。她们这时满怀希冀地望着 8 个胶子。你也是我们那长期走失的胞妹吗？无论如何，我们都是杨-米尔斯规范玻色子啊。不，我们不可能生于同一个娘胎，这就是回答。你们很弱，而我们很强！作为强子内部黑暗世界的信使，我们浑身是劲地生活着。

但等一等！渐进自由说。对，你们胶子的确是受到你们自己的力量桎梏的紫外奴隶，但是随着你们的能量的增长，你们就会渴望自由。也就是说，当我们眼望能量不断上升的世界时，电磁力变得越来越强，而强作用力变得越来越弱。在某一能量层面上，电磁力就会变得同强作用力一样强。统一是可能的！

我这个光子曾经以为，当我穿越跋涉在世界的永恒孤寂中时，我是孑然一身的。我看到 W 和 Z 又胖又重，我怎么能同他们有联系呢？但事实上，他们并非生来过重；他们的质量仅仅是自发对称破缺的结果。在足够高的能量上，我们三个都是没有质量的。在甚至更高的能量上，我们就会变强，而你们胶子就会变弱。在某一奇高的能量上，事实将表明我们都是同胎胞妹。

大统一

强相互作用、电磁相互作用和弱相互作用在某一能量尺度上会统一，这种提法称为“大”统一，以区别于弱电统一。

在1973年左右，人们都在谈论我们或许能够更进一步把四种基本的相互作用统一起来这一思想。但是，正如我们所知，历史从来都不是呆板或没有生气的。对于弱电统一仍然疑云缭绕。怀疑者抨击整个理论框架，称其为不是以实际观察作坚实基础的一屋子卡片。在理论物理学中，嘉奖归于那些勇士，他们在过河时，不等看清下一个垫脚石是否结实就起身跳跃而起。他们常常得到落水的下场，但是他们有时又比其他任何人都先抵达彼岸。

1973年，乔吉史·帕提（Jogesh Pati）和阿布杜斯·萨拉姆大胆地提出了大统一的理论。1974年，胡沃德·乔治和谢利·格拉肖各自独立工作，也大胆地提出了大统一的理论。两种理论在一般哲学观点上相吻合，但在细节上不同。乔治和格拉肖提出的理论更严谨，因此也就更富预测性，我在此要集中加以论述。

一次大跃进

在一篇经典论文中，胡沃德·乔治、海伦·奎恩（Helen Quinn）和斯蒂夫·温伯格计算了要实现强相互作用和弱电相互作用之间的命中注定的团聚所需的能量。因为我们知道每一耦合如何随能量的变化而变化，所以要确定它们，在什么能量上相等只是一个初等算术题。我们记得，耦合运动得很慢——在耦合中产生一个小小的变化，需要在能量上发生很大的变化。事实上，它们运动得非常缓慢，所以只有在10^{15}乘以核子质量所得的巨大能量上它们才会相等。（当然，10^{15}这个数就是令人头晕目眩的1,000,000,000,000,000。）

物理学家们都要把每一个物理过程与一个特殊的能量尺度相

联，这一能量尺度被确定为由一个参加该过程的典型粒子所带的能量。(例如，两辆麦克牌卡车相撞所涉及到的全部能量可能是非常令人震惊的，但是，由卡车里的一个单个核子所带的典型能量实际上却非常小。) 10^{15}乘以核子质量所得的能量被称为大统一能量尺度。要知道该能量尺度有多大，我们可以指出，在一个原子核反应中释放出的典型的能量，仅仅约为核子质量的百分之一。或者请设想一下，在世界最大的加速器上，粒子已经被加速到了几百倍于核子质量的能量——这是人类制造的最大的能量。

从传统上说，通过稳步地从一个能量尺度移到下一个尺度，物理学已经取得了进步。在这里，通过在一篇短文中作简单的计算，理论物理学家就成功地跃进到一块崭新的天地。在这块天地里，四种基本相互作用中的三种达到了统一。

长期走失的胞妹

大统一思想把光子、W、Z 和 8 个胶子合到一起，作为一单个杨-米尔斯理论的规范玻色子。光子、W 和 Z 是一个有群 SU (2) ×U (1) 的理论的规范玻色子，而胶子是一个有群 SU (3) 的理论的规范玻色子。我们记得，SU (3) 是通过使三个客体相互变换定义的，SU (2) ×U (1) 或 SU (2) 是通过使两个客体相互变换定义的。现在我们可以开始进行物理学史中最重要的一个计算：3+2=5。结论是，我们需要一个能使五个客体相互变换的群。我们需要 SU (5)。

因此，乔治和格拉肖提出了使用带有对称群 SU (5) 的一个杨-米尔斯理论的大统一。群一旦确定，规范玻色子的数目就由群论完全确定。依次清点表明，除了光子、W、Z 和 8 个胶子之外，还有另外两个规范玻色子，简称为 X 和 Y。在那悲喜交集、泪水纵横的团聚时，胶子终于认出光子、W 和 Z 是自己长期失散的胞妹，另外其它两个也出头露面了。以后我要解释这两个玻色子在宇宙的演化中可能扮演的重要角色。这里，我要强调的是，无论

我们喜欢与否，X 和 Y 都在场；群论要求它们在场。这种情形与格拉肖发现弱电相互作用需要 Z 玻色子时所遇到的情形是完全相似的。

要有大统一

让我总结一下。乔治和格拉肖提出，终极设计者从以 SU（5）为基础的一个杨-米尔斯理论着手。在大统一这一级上，对称自发破缺分为色群 SU（3）和格拉肖、萨拉姆和温伯格的 SU（2）×U（1）。也就是说，杨-米尔斯理论分为两个杨-米尔斯理论，其一以 SU（3）为基础，另一个则以 SU（2）×U（1）为基础。在这一阶段上，X 和 Y 玻色子获得巨大的质量——在大统一能量级即在约 10^{15} 乘以核子质量的能量级上获得巨大质量，并向仍然没有什么质量的胞妹们即向胶子、W、Z 和光子道别。当我们在能量上落下来时，我们到了弱电能量级，即达到了几百倍于核子质量的能量。以 SU（2）×U（1）为基础的杨-米尔斯理论则自发破缺，而在光子依然没有质量的同时 W 和 Z 变重。在 SU（5）内的所有同胞规范玻色子中，只有光子和 8 个胶子在低能量上显示为没有质量的激发。胶子被桎梏在紫外奴役之中，剩下光子只身流浪，把光铺撒到我们的世界上。

当他说，“要有光！”时，也许他实际上说，“要有带着它所有的规范玻色子的一个 SU（5）杨-米尔斯理论，要让对称自发破缺，还要除一个以外让所有仍然没有质量的规范玻色子卖身受紫外的奴役。这最后一个规范玻色子是我最喜欢的一个。让他前往照亮我所有的创造物！”这听来一点都不富有戏剧性，但这可能更接近真理。

一种天衣无缝的嵌合

宇宙之中其它的基本粒子即夸克和轻子又怎样呢——它们怎



图 14.1　一个布莱克的上帝把光带入世界

么与此相嵌合呢？在 SU（5）变换下，夸克和轻子被认为是互相变换的，或者使用数学语言来说，夸克和轻子被认为组成了 SU（5）的表示。

SU（5）的一些表示的维数是什么呢？我们记得，表示的维数就是属于该表示的实物数。当然，定义表示是 5 维的。在第九章中，我们学会了通过把表示胶合到一起来构筑更大的表示。那么，就让我们把两个定义表示胶合到一起吧。

我们用第九章中的图示法想象一下把一个圆和一个方胶合在一起。要用 5 种可能的颜色中的一种颜色给该圆和方染色。因为我们的圆的颜色有 5 种选择，方的颜色也有 5 种选择，因此我们共有 5×5＝25 种组合或实物。在第九章的附录中，我解释了怎样把这些实物分为所谓的偶数和奇数组合。让我们来看一看奇数组合，即形为Ⓡ[Y]－Ⓨ[R]（R＝红色，Y＝黄色，诸如此类）的组合。为使该组合不消失，我们必须在圆和方上使用不同的颜色。让我们数一数。圆的颜色有 5 种选择，对于其每一种选择，我们的方

则有 4 种颜色选择。我们好象有 5×4＝20 种组合。但是，由于Ⓡ Ⓨ和Ⓨ Ⓡ出现在同一种组合中，所以我们必须除以 2，以避免数 2 次。也就是说，如果我们把上面组合中的红色和黄色倒过来，我们就会得到Ⓨ Ⓡ－Ⓡ Ⓨ，这不是一种新组合，而只是我们已有的组合加上一负号：Ⓨ Ⓡ－Ⓡ Ⓨ＝－（Ⓡ Ⓨ－Ⓨ Ⓡ）。所以我们共有20/2＝10 种奇数组合。我们有一个 10 维表示。

如果读者对这种数法有点不放心的话，也许看一下下面数学上完全相同的一个问题会有所裨益。在一次校级网球比赛上，一个队带着写有 5 名运动员的名册抵达了。在双打赛中，教练可以让多少不同对队员上场呢?他可以让红先生和黄先生作为一对,以此类推。因为他显然不能让红先生和自己作为一对，他可能会认为共有 5×4＝20 对。又由于让红先生和黄先生作为一对和让黄先生和红先生作为一对是一样的，因此，事实上该教练只有 20/2＝10 个不同对队员。

数学就谈到这里——让我们回到夸克和轻子上来并数清它们。由于一些我们以后还要解释的原因，我们先不管奇异夸克。轻子是由电子和中微子组成的。我们有上夸克和下夸克，但是请记住，每一种夸克味道以 3 种颜色出现，因而我们实际上有 2×3＝6 个夸克。其次，请记住第三章中的一点，即违反宇称的流氓中微子总是向左边转。与此相对照，其它粒子能够向左右任何一方旋转。在量子场论中，人们把一个场同每一个旋转方向联系在一起。也就是说，电子同两个场相联，而中微子只同一个场相联。(魏尔弄清了这种把场和旋转的粒子联系起来的神秘方式，而这些场有时就称为魏尔场。)我们终于可以数清同夸克和轻子有关的所有场了。6 个夸克和电子，每一个有 2 个场，所以有（6＋1）×2＝14 个魏尔场。加上中微子场，我们就共有 14＋1＝15 个场。

但是，天啊，这完全同 5＋10＝15 相等!! 夸克和轻子完全同 SU（5）的 5 维和 10 维表示相合!

作为一名基础物理学家，我想象他完全在做着这类既简单又深刻的计算，而又肯定不是做那种整页整页都是令人心烦意乱的

公式和方程的计算。

夸克和轻子天衣无缝地并入 SU (5)，使我和其他许多物理学家相信仁慈的上帝一定在他的设计中使用了 SU (5)。群 SU (5) 可能不是故事的全部，但毋庸置疑它是故事的一部分。这种嵌合甚至比我们那简单的计算所显示的更天衣无缝。如果有人现在仔细观察一下每一夸克和轻子怎样会在理论中的每一个规范玻色子的影响下响应，他就会发现，它们完全按照它们应该的方式作出反应。例如，通过提出每一个夸克和轻子在光子的影响下怎样响应的问题，人们就会确定夸克和轻子的电荷。人们就会发现，群论 SU (5) 给出完全正确的电荷。因此，电子有一个单位负电荷，中微子没有电荷，以此类推。作为一种粗略的类比，我们可能想起拼板玩具中的嵌合。不但所有拼板全部拼合，而且图象也完美地出现了。

这样，大统一解决了物理学中最深奥的一个谜：电子为什么带有和质子所带电荷相反而大小又完全相等的一个电荷？这一事实在使世界成为现有状况的过程中扮演了极为重要的角色：原子以致宏观物体可能呈电中性。在大统一之前，为什么质子和电子的电荷完全相等而相反这一问题被认为是无法解答的。的确，对于这种问题，大部分物理学家甚至都不会加以考虑，他们对电子在这种或那种现象中会如何行为更感兴趣。(夸克的图景也没有回答这个问题，而只是把它变为提出夸克电荷为什么同电子电荷有关的问题。) 在乔治一格拉肖理论中，电子和质子所带电荷大小的完全相等性自然出自群论 SU (5)。

三者汇合

包括我在内的许多物理学家们，只愿在美学的根基上相信乔治-格拉肖理论。但是，物理学最终要以经验证实为根基。令人惊讶的是，大统一的思想能够在实验上得到验证。

请想象一条通向一座山的小路（参看图示）。因为耦合强度是

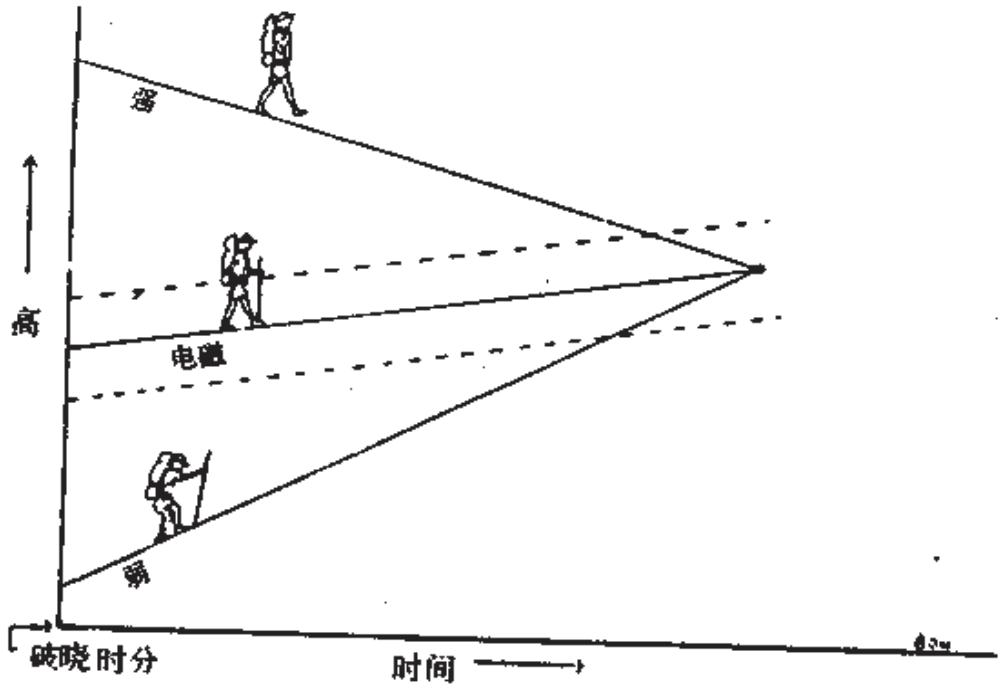


图 14.2 在晨曦来临时，名叫“强”的旅行者开始下山，而两个分别叫“电磁”和“弱”的旅行者则开始向上爬。“弱”开始爬时要比“电磁”低，为了赶上必须行动得更快。我安排了三个旅行者随时间的流逝而所在的高度。在给定其中两个旅行者的起始位置的情况下，三个旅行者同时到达某地的要求清楚地固定了第三个旅行者的起始位置。例如，如果“电磁”从太高处出发（上虚线），她就会在“弱”赶上来之前同“强”相遇。如果她从太低处出发（下虚线），“弱”就会在她同“强”相遇之前超过她。

只能增长或减少的一个数，所以我们可以把一个运动的耦合强度描绘为一个在小路上走动的长途徒步旅行者。耦合强度同该旅行者所处的高度相对应。“强”旅行者从高处出发并继而向下徒步旅行。“电磁”和“弱”旅行者则从山脚处出发并开始向上走。在物理学中，耦合强度随我们用之观察世界的能量级的增长而变化。在我们的类比中，旅行者们随时间的流逝而移动。

要使世界大统一，我们需要耦合强度在某一能量上相遇。如果只有两个徒步旅行者，一个上行，另一个下行，那么他们当然会在某一点上相遇。但是，如果有三个旅行者，两个上行，第三个下行，那么一般情况下，他们三人将不会在同一时间在某一地点相遇。

假设我们知道每一名旅行者移动的速率，也知道两个旅行者

的出发位置，那么三个旅行者全部在同时到达同一地点这一要求清楚地确定了第三个旅行者的出发位置。除非第三个旅行者在完全正确的位置出发，他就不会赶上汇合。

在这一点上，我们又认识到大自然对我们是善良的。我们有三个相互作用要大统一。只要给定三个耦合强度中两个的起始值——也就是在低能量上的值，我们就能够预测第三个的起始值。因此，让世界得以大统一的要求确定了相对于强相互作用和电磁相互作用的弱相互作用的强度。在实践中，人们使用这一论点来预测中性电流过程的强度。实验测量同这一预测很相吻合。

我在第二章和第十章中提到，在某些情况下，宇宙的运行依赖于相互竞争的相互作用的完全不同的强度之间的一种微妙平衡。在很长一段时间里，物理学家们被形成一种等级的各种相互作用弄得莫名其妙，所以一看到大统一很自然地解释了四种基本相互作用中的三种相互作用之间的等级，他们就感到万分喜悦。

略观变化

要完成大统一，我们还得看一看 X 和 Y 玻色子。考虑到我们最强大的加速器只能释放出几百倍于核子质量的能量，我们不能希望实际产生 X 和 Y 玻色子，它们在核子质量的 10^{15} 倍一级上才有质量。我们却可以设法测出它们的效应。这些玻色子做些什么呢？

要回答这一问题，让我们首先回顾一下它们的胞妹们即其它规范玻色子做什么。胶子把一个夸克变换为另一个同味而不同色的夸克；也就是说，当一个夸克放射或吸收一个胶子时，它在其变换中保留了味道而改变了颜色。胶子把轻子单独抛下不管。在另一方面，W 玻色子把一个夸克变换成为另一个同色但不同味的夸克。它也把一个轻子变换为一个不同的轻子。例如，W 玻色子把电子变换为一个中微子；光子把一个带电荷的粒子变换为本身。即，当一个象电子一样的带电粒子放射或吸收一个光子时，它仍

然是一个电子。光子则置电中性的粒子于不顾。最后，Z 玻色子象光子一样把一个粒子变换为本身，但与光子不同的是，Z 玻色子并不将其相互作用限制在带电的粒子上。令人不解，不是吗？或许图 14.3 会对你有所帮助。

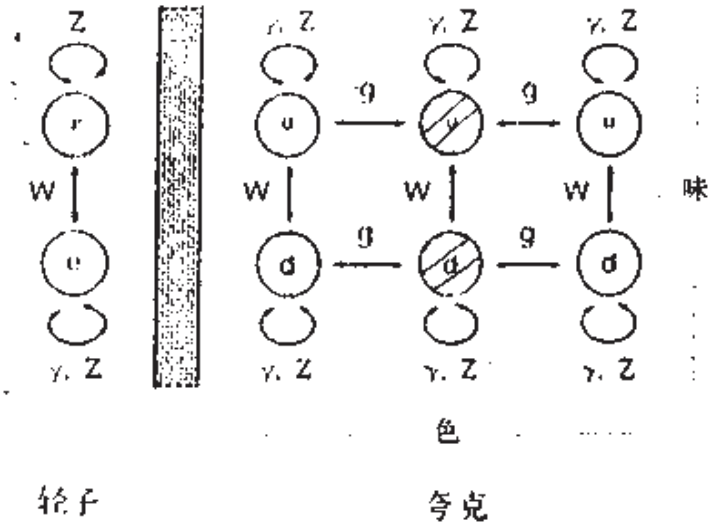
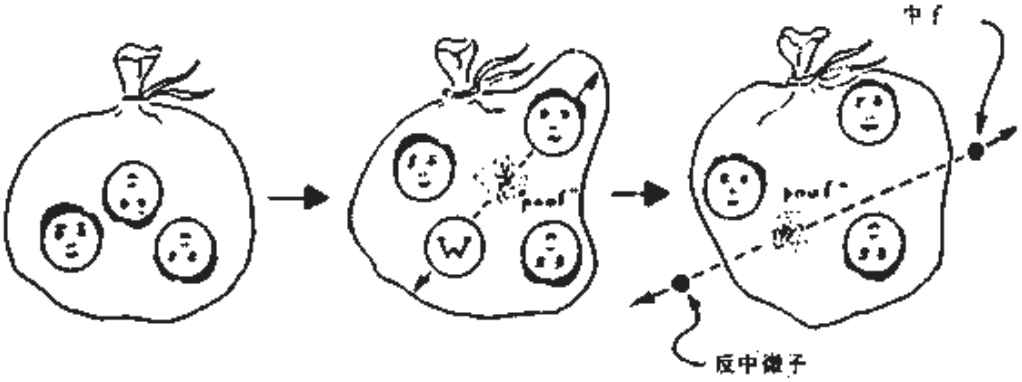


图 14.3 20 世纪晚期的炼丹术：一张表明物质成分通过规范玻色子进行嬗变的图。标为 u、d、υ（希腊文 nu）和 e 的圈分别表示上夸克、下夸克、中微子和电子。每一夸克以三种不同色出现，这用阴影法形象地标了出来。规范玻色子的效应由两端箭头表示，箭头上则标有相应的规范玻色子的符号。如书中所述，W 玻色子使上下夸克彼此变化，但颜色不变。它也使中微子和电子彼此相互变化。与此相比，胶子 g 把一个夸克变为另一个味道相同而颜色不同的夸克。（为简洁起见，我们不再赘述所有的胶子，再者，我们只叙述上下两味；用第十五章里的词来说，我们只叙述属于第一家族的费米子。因此，在该图中，弱相互作用的介子在味“方向”上垂直运转，而强相互作用的介子在色“方向”上水平运转。正如那些在同一粒子上开始和结束的曲箭头所示，当一个粒子放射或吸收一个光子时，它仍保持原样。同 γ 射线一样，光子传统上用希腊字母 γ 表示。最后，和光子一样，Z 使一个粒子转换为本身。注意，中微子是不同光子发生相互作用的唯一粒子。在大统一理论中假设的 X 和 Y 玻色子（没标出），把夸克和轻子的世界联结在一起，目前则被分开了（如砖墙所示）。我想象着一个中世纪的炼丹士画出一个相似的图，如，用一个圈表示土，用另一个圈表示金，用标有蟾蜍血的箭头再把它们联结起来。当然，区别是，我们的图是以事实为基础的。

根据现代物理学，物理世界中的最高现实涉及到变化和变换。一个红色上夸克在这里被一个胶子变为一个蓝色上夸克，一个蓝色上夸克又在那里被一个 W 变为一个蓝色下夸克。W 游荡着，看到了一个电子。啊，它把电子变成了一个中微子。这是一个疯狂

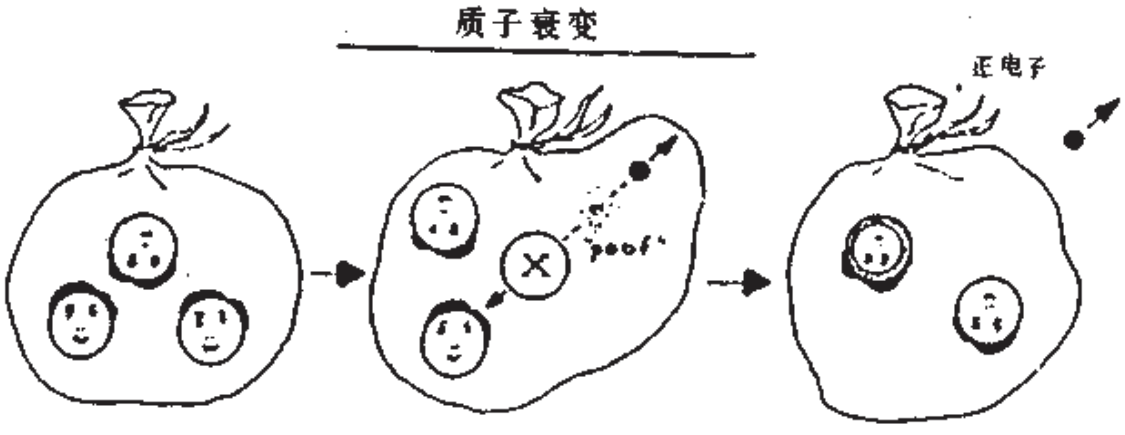
的魔术师的世界。

但是，在变化中有永恒。夸克总是被变为夸克，轻子总是被变为轻子。正如我以前所指出的那样，夸克的变换表现为强子的变换。举例来说，请考虑一下由被胶子胶在一起的一个上夸克和两个下夸克组成的中子，和由胶合在一起的两个上夸克和一个下夸克组成的质子。中子内的一个下夸克可能放射出一个 W 玻色子并把本身变换为一个上夸克。结果，我们现在有了两个上夸克和



(A)

图 14.4　(A) 中子衰变和质子衰变：中子由两个下夸克（由倒立的脸形表示）和一个上夸克（由一个正立的脸形表示）构成，它们装在一只口袋中。突然，一个下夸克放射出一个 W 玻色子并把它本身变化为一个上夸克。W 玻色子然后便分解为一个电子和一个反中微子，而后两个作为轻子从袋中逃出来。留在后面的两个上夸克和下夸克形成一个质子。



(B)

(B) 当它的一个上夸克突然分解为一个 X 玻色子和一个正电子时，质子发生衰变。另一个上夸克吸收 X 玻色子并把它本身变为一个反下夸克，用带有黑边的倒立脸形表示。正电子逃出，剩下的口袋包含有一个下夸克和一个反下夸克，我们认得，后者是一个中性 π 介子。

一个下夸克；即，一个质子。我们实际上观察到的是一个中子“衰变”为一个质子、一个电子和一个中微子（参看图 14.4）。一般情况下，一个中子如果被舍弃不管就会实际上在约 10 分钟内做到这一点。比质子质量更大的中子可以衰变为有能量剩余的质子，这一能量被传给了轻子。与此相比，更轻的质子不能衰变为中子。我们被引导到了一个很有趣的问题：如果夸克只能被变换为夸克，轻子只能被变换为轻子，必然有什么东西使粒子世界得以守恒。但是，是什么使其得以守恒呢？

请设想一下一个其技巧只限于把一个动物变为另一个动物、把一种蔬菜变为另一种蔬菜的魔术师。台上是一只野兔和一只苹果。艺名为 W 玻色子的魔术师一挥他那斗篷，噢，兔子和苹果被变成了一只狐狸和一些酸葡萄。观众轰然大笑，热烈欢呼。噢，狐狸和葡萄没有了，代之以一只老鼠和一只西瓜。但是，无论变幻如何奇异，台上总是只有一只动物和一只水果。

在基础粒子世界中也是这样，W 玻色子的艺术功力是有限的。结果，质子是 绝对稳定的。质子内部包含的 3 个夸克不会仅仅消失在稀薄的空气之中。质子内部的夸克只能变成其它一些种类的夸克，但总是只有 3 个夸克。由于质子是由 3 个夸克组成的最轻的强子，所以没有一种由质子衰变成的强子。质子是永恒的。

这显然是好消息。尽管我们周围的一切都在分解和衰变，而质子仍是块坚硬的岩石，保障着世界的稳定。

得以守恒的是核子的总数，即质子加中子。中子可以衰变为一个质子，但核子数不能改变。实际上，如我们在第十章所了解到的那样，质子和中子通过八重路的堂姊妹们即那些超子也衰变为核子。因此，严格说来，我们必须包括超子并谈到重子数守恒。（我们记得，重子和男中音一样只是一个普通词，用以指质子、中子和超子。每一个重子是由 3 个夸克组成的。）假设把 21 个超子、4 个中子和 6 个质子放在一只箱子里。后来，当我们向里面看时，我们可能会发现 10 个超子、11 个中子和 10 个质子。但是，无论发生什么事情，重子数仍然不变，还是 31 个。夸克不能消失。

质子和钻石都不是永恒的

X 和 Y 玻色子撞入了这个令疑虑烟消云散的图景。在大统一之前，夸克和轻子被分开着，它们分属不同的表示。但在大统一中，12 个夸克和 3 个轻子被抛入了 SU（5）的 5 维和 10 维表示。12 个野人和 3 个传教士要上 2 只小船，1 只船能载 5 个乘客，另 1 只则能载 10 个乘客。不可避免的是，一些夸克和一些轻子将被抛入同一表示。结果，在一个大统一论中，夸克可以被变换为轻子，反之亦然。负责的规范玻色子就是 X 和 Y 玻色子。夸克可以通过与 X 和 Y 玻色子相互作用消失在轻子之中。

一位新魔术师 X、Y 玻色子先生昂首阔步踏上台来。一片欢呼，哦嗬，兔子被变成了一只桔子。在中子内部，一个上夸克放射出一个 X 玻色子并变成一个正电子（正电子即反电子）。X 玻色子漫步走向另一个上夸克，啊，把它变成了一个反下夸克。我们实际上看到了什么呢？我们从两个上夸克和一个下夸克着手，我们又在一个下夸克、一个反下夸克和一个正电子上结束。由于夸克身受奴役，下夸克和反下夸克不能分别出现，而是结合成一个介子。因此，质子分解为一个介子和一个正电子（参看图 14.4）。

最后的灾难

科学家们总是告诉我们即将到来的灾难——太阳将爆炸成一颗超新星，从而把可怜的行星地球吞掉；我们的星系将同另一个星系相撞；等等，等等。那些景像够糟糕的了，而这里是真正的灾难，一种超过其它一切灾难的灾难，在它面前，诸如某一星星在称为银河系的某一星系的边缘附近爆炸这样的琐事，将因微不足道而无地自容：啊，宇宙中的每一个质子都将分解。星星将消失，我们的身体将衰变。就这样，一切的一切都将衰变为一团介

子和正电子的云雾。物质将不再存在。

但是，请放心。这种最后的灾难暂时还不会发生。还记得吗，弱相互作用之所以弱，只是因为 W 玻色子很重。现在，如果一名重 500 磅的胖墩几乎不能转身，请想象一下一个重 5×10^{15} 磅的人会感觉如何呢。X 和 Y 玻色子的效应将比任何弱相互作用效应弱无数倍。用 SU（5）理论作的一次计算表明，质子的寿命约为 10^{30} 年。

一个人在这样一个时标前会头晕目眩，这样一个时标使一个世纪看上去象一眨眼的工夫。我不能真正掌握恐龙在多长时间之前曾在地球上漫游，所以我怎么能了解质子的寿命呢？我不能。我只能给你们提供一些数字。有很好的证据表明宇宙约为 10^{10} 岁。1 年约有 3×10^{7} 秒。因此，宇宙的年龄约为 3×10^{17} 秒。想想自宇宙开始以来有多少秒钟嘀嗒而过吧。现在，假设把每一秒扩展成宇宙的岁数。已消逝的所有时间将还是“只有” $3\times10^{17}\times10^{10}=3\times10^{27}$ 年，比质子的预计寿命短 300 倍。所以，质子的寿命很长。

他如何聪明

我们看到终极设计者是如何的聪明。他要大统一，但他又安排耦合常数非常缓慢地运动，以便它们在极高的能量上相遇。中子在约 10 分钟内衰变，而质子世世生存下去。创造一个只持续 10 分钟的宇宙是一点趣味也没有的！让我们谈谈一个毫无道德的心理社会实验，在该实验中，把同胞姊妹隔离开来放在不同的环境中抚养。在光子满面喜悦地跳舞时，绝望和过重的 X 和 Y 玻色子则痛苦呻吟。对不起，上帝说，我必须使你们二位过重，以便我的宇宙能够持续一会儿！

到盐矿去

要用实验来证实质子的实际衰变好象是完全不可能的。但是，

由于量子几率定律的存在，事实上这种实验是能够做的。在量子世界中，质子具有10^{30}年的寿命这种说法表明，一般情况下，一个质子在分解之前将存在10^{30}年。量子物理学家和保险公司的公务员所用“寿命”一词意义是相同的。一个给定的质子具有下一刻就衰变的一种很小而又不为零的几率。因此，如果我们收集到足够的质子，我们可能会看到其中一个正在衰变之中。的确，如果我们一整年都观察着10^{30}个质子群，我们就应看到它们其中一个在衰变。幸运的是，宏观物质包含有巨大数目的质子。

当宏观物质中的一个质子衰变时，质子衰变成的介子和正电子就同周围的原子相撞，从而在内部产生光的爆发。对光透明的最廉价的材料是什么呢？当然是水。那么，在原则上，一名实验学家只需用水灌满一只足够大的水箱，并用精密的电子摄影机对它严密监视。在实践中，这种操作相当困难。地球表面不断地受到宇宙射线的轰击，这些宇宙射线就是被星系中的磁场加速到高能的粒子束。冲入水中的宇宙射线粒子产生一种背景光，尽管这种光太暗，人类的眼睛看不到，但它可以使那一小部分与衰变的质子相关的光完全黯然失色。唯一的解决办法是把水箱移入地下的深矿井中。大部分宇宙射线粒子将不能穿透地层。

这时，矿井经理们开始收到各种各样的实验物理学家的来信，信中列举了测试宇宙的最后稳定性的种种建议。探测质子衰变的实验机构已在世界各地设立起来。最大的一个要用几千吨水（含有10^{33}个多的质子），是在克里夫兰市附近由一家著名的美国盐产公司即摩顿-赛亚克尔有限公司经营的一个盐矿之中。所做的其它实验分别在印度的考乐金矿区、阿塞拜疆的高加索山区、意大利和法国中间的勃朗峰隧道里、美国明尼苏达州的一个铁矿里、美国犹他州的一个银矿里和南达科他州的一个金矿里。

当我几年前到南达科他州的时候，我去观看了以其井深闻名的赫姆斯蒂克金矿中的一个实验。对于一个过惯案牍生活的理论物理学家来说，这确实是一种难忘的经历。金矿公司的一名安全警官向我讲述了礼仪小姐未谈及的各种各样的细节问题，如在一

个矿井里的正确行走方式。(人们要拖着脚走，以免在黑暗中被绊倒。)我了解到，在一个矿井里，在矿井的纵横交错的井道中，味感提供了紧急情况下最有效的交流方式。装有一种带有幽幽刺鼻味道的化学药瓶放在矿井各处。在紧急情况下，一只药瓶被打烂，报警味就会迅速被风调系统带到矿井各处，风调系统则由安装在矿井口处的巨大风扇驱动。在通过一部分刺鼻的安全设施时，我不得不吸了几口作为警号的药味。下电梯也是值得回忆的：这种感觉如同乘纽约市的地铁垂直行驶在完全黑暗之中一样。不久我便发现自己到了地下 1 英里多深的地方，这里潮湿、多风和阴黑，只有矿工的灯光照亮着我的头盔。然而，实际实验区却很文明，甚至配备着象一台装满可口饮料的冰箱之类的物品，以备来访的理论物理学家享用。

我的实验同事们使用登山设备来灵敏地操作实验，使用潜水设备来潜入水中。由于看不到任何质子衰变，物理学家们就能够给质子的寿命加以更低的期限，因此，如果我对 10^{30}个质子观察 1 小时，而它们没有一个衰变，我就可以得出结论说，质子的寿命一定长于 10^{30}小时。极为遗憾的是，在我访问期间，我没有看到一个质子衰变。在谈到这一点时，我的实验朋友们开玩笑说，我的访问本身就是物理学史中鲜见的一件事。一个理论物理学家仅仅通过除了喝饮料外无所事事便能增加人类的知识。

实验物理学家们以比我更长的时间观察了更多的质子。至今，他们从没有见到任何质子衰变。实际上，在实验中，人们见到了光的爆发，但是，这种爆发好象是由含在宇宙射线内的中微子引起的，而宇宙射线在水中与核子进行着相互作用。1 英里的岩石可以挡住任何人，但却挡不住幽灵般的中微子。质子寿命的下限现在在 10^{31}到 10^{32}年之内。大统一的含义是什么呢？SU (5) 大统一的最初说法预计一个质子的寿命为 10^{31}年，因而这种说法被否定了。但是，物理学家们已经构造了其它几种理论，其中质子活得更长一些。而且，由于质子发生强相互作用，对其寿命的实际计算必须同强相互作用的困难的细节问题展开斗争。

大统一的基本思想富有巨大的诱惑力，所以许多物理学家现在继续相信大统一，甚至同时承认，这一思想的最简单的实现方式在细节上可能并不正确。

物质的生灭

如果质子能灭，那么它也必然能生。如果质子能够衰变为一个正电子和一个介子，那么顺理成章，我们可以把该过程反过来，从一个正电子和一个介子中造出一个质子。这一简单的话语在宇宙学中揭开了一个崭新的篇章。

有关宇宙的几个事实

关于我们所居住的宇宙有两个令人注目的事实：（1）宇宙不是空无物质的；（2）宇宙几乎是空无物质的。要理解这些事实则是基础物理学的任务。

宇宙在我们眼里的形象就是一种各处点缀着一些星系的巨大宽阔的空无。哲学家帕斯卡尔（Pascal）被吓坏了，他说："无垠空间中的永恒静寂把我吓坏了。"我们怎么在量上测量这一令人惊骇和几乎不令人相信的空无呢？宇宙是多么空寂呢？

物质是由核子组成的，但是，仅仅数一数它们在宇宙中的数目，并不说明宇宙中物质的缺乏；我们必须把核子数同其它数做一比较。把光子数用作一种参照是很自然的。现在我们知道每个核子对应 100 亿个（即 10^{10}）光子。也就是说，物质是宇宙中 100 亿个污染中的一部分，否则宇宙会非常纯洁。对于基础物理学家来说，一个没有物质的宇宙是纯洁和雅致的。我喜欢把物质看作宇宙中的灰尘。

上帝并不到处乱抛灰尘

在大统一之前，物理学家们相信绝对的重子守恒。宇宙中的重子数——即质子数，加中子数，加超子数——不能改变。

以此看来，双倍令人惊奇的是，宇宙尽管几乎空无物质，但实际上又并非空无物质。为了说起来方便起见，假设宇宙之中刚好有 537 个重子。绝对重子守恒意味着宇宙总是包含有，而且将永远包含有 537 个重子，不多，也不少。在这种情况下，物理学不能解决宇宙为什么实际上包含了我们观察到的物质量的问题，它应属于神学预测的范围。无论谁开创了宇宙都得抛入 537 个重子。

在这一图景中，无论谁抛入了灰尘，却又决定仅仅抛入少量的灰尘，这令人相当惊诧。其实，他究竟为什么非要抛入灰尘呢？

一个由物质-反物质构成的宇宙

面临着这个难题的一些物理学家编造了一种漂亮的解决方法：他根本就没有抛入什么灰尘。

这种思想要利用已经证明的反物质的存在。从 20 世纪 50 年代初以来，实验家们经常性地观察了成对的粒子和反粒子的出现。我们把反重子数当作具有一个重子数，从而减去一。因此，一对质子和反质子的产生同绝对重子数守恒是完全一致的。

宇宙可以在没有任何重子的情况下创始；然后成对的重子和反重子可以通过已有粒子的碰撞产生。无论这些产生过程可能如何复杂，绝对重子守恒保证总有相等数目的重子和反重子。随着宇宙的进化，物质和反物质通过某种方式分成了不同的区域。根据这种观点，仅仅因为我们的直接相邻地区充满了物质，我们就以为整个宇宙是由物质构筑的，这是错误的。或许同我们的星系相邻的星系是由反物质构成的。

宇宙分为物质和反物质区域这一图景，对科幻小说作家具有巨大的吸引力，但是仔细观察起来这个图景却并不成立。人们在观察中可能期望看到宇宙射线中偶而出现的反粒子，即从另一区域来的侵入者。但是，没有人看到它们。人们可能也期望，物质和反物质在两个区域的边界处激烈湮灭，放射出能量极大的光子。同样，天文学家们没有探测到这些秘密的光子。在理论上，这一图景的倡导者们从没有成功地找到一种会把物质和反物质分开的、令人相信的机制。因此，对重子数守恒的坚信好象妨碍了对宇宙中物质量的理解。

一种困境

物理学家们在大统一之前相信重子数守恒的原因是很清楚的。物质的存在就意味着，质子的寿命比宇宙的年龄还要大，这好象是一个很长、很长的时间。

然而，到 20 世纪 50 年代时，一些物理学家对绝对重子数守恒已觉得有点不舒服。艾米·诺特尔告诉我们，一个局部对称或总对称必须对重子数守恒负责。在 1955 年，李政道和杨振宁指出，负责的对称不可能是局部的，因为局部对称所要求的无质量规范场的长程效应会被看到。因而，对一个赞成在第十二章中列举的美学框架和以怀疑和厌烦的态度来看总对称的物理学家来说，精确重子数守恒就形成了某种哲学困境。因为正如魏尔所指出的那样，电荷的精确守恒（它保证着电子的最终稳定）的确由一种无质量规范场即光子相伴，所以这种困境便显得更为尖锐。

因此，当表明大统一抛弃了绝对重子数守恒并否定了质子的不灭性时，一些物理学家深深感到一种理性的轻松和满足。

物质的创生

如果重子数不是绝对守恒的，那么重子在宇宙早期可能是由

物理过程造成的。无论如何，他不必抛入什么灰尘。灰尘是自己产生的。大统一开辟了理解物质创始的可能性。

很清楚，无须证明，重子不守恒是不够的。物理学的基本定律必须在某一层面上区分物质和反物质。如果物理学的定律对物质和反物质是公平的，宇宙怎能选择进化为一个含有物质而不是一个含有反物质的宇宙呢？

在很长一段时间内，物理学家们相信物理学定律的确对物质反物质不加区分。我在第三章中解释过，在宇称堕落的丑闻爆出之后，物理学家们继续希望大自然仍然遵循CP，即把粒子反射后再变成反粒子或反过来操作，但这种希望破灭了。1964年，人们在K介子的衰变中发现了对CP不变性的一种细微违反。多年来，好象对CP的违反除了K介子衰变外，并不影响任何物理过程。但是，尽管我们仍然没有很好地理解CP违反，但我们现在对于他为什么包括一点少量CP违反已有点线索。他要宇宙包含物理。

在这一图景中，包含在宇宙内的物质量取决于CP不变性被违反的程度。我们现在理解了为什么宇宙是几乎空无物质的：CP违反是很小的。

初看起来，好象物质自我产生得花时间。一个质子的产生要求同一个质子衰变的相同的X和Y玻色子的干预。因此，人们可能认为一个质子的产生会需要差不多10^{30}年。

要解决这种明显的自我矛盾的问题，关键取决于自发对称破缺的思想。请想象一下那些向它们的胞妹呼喊的X和Y玻色子吧，对，我们和你们比起来是令人绝望地过重和虚弱，但是在高能量上，即接近于大统一能量级时，我们的质量可以被忽略掉，我们也象你们一样强壮。

大爆炸之后不久，当宇宙极为炽热的时候，粒子的确带着巨大的能量尖啸着到处游动。甚至X和Y玻色子也觉得灵敏异常。重子产生的过程和电磁过程一样急不可耐地发生了。物质产生了。

我们如何知道宇宙在大爆炸之后不久极为炽热呢？我们都对气体随着它们的扩散会变冷这一事实很熟悉。例如，随着人们顺

一座山向上爬，天气会变冷。与此相似，我们的宇宙随着它的扩展会变冷。在知道宇宙现在的温度的情况下，我们能够向后推断宇宙在过去任何给定时间上有多热。这样，可以很容易地估计，在大爆炸之后约10^{-35}秒时，宇宙中每一个粒子的能量属于大统一能量级。

同时，宇宙继续扩展和变冷。在很短的时间内，X 和 Y 玻色子的能量降低到它们的巨大质量之下，它们因此而变得极为虚弱。它们如太阳一样辉煌的时刻是短暂的，很快就过去了。产生出来的重子在下一个10^{30}年内可以半永恒地存在。

一个不断扩展的宇宙是绝对关键的。在一个静止的宇宙内，X 和 Y 玻色子的强度就会保持不变，重子的诞生和死亡就会达到平衡。在不以任何重子开始的情况下，我们不能产生一种净重子量。

他非常巧妙地把这一切合到一起，给我极深的印象。运用局域对称的原理产生大统一，而大统一又必然破坏重子守恒。包括一点 CP 违反。引入引力，使宇宙扩大。就这样，一个产生自己的灰尘，创造可能的星星、花和人类的宇宙就是这样。

起源

能够弄清物质起源将是极为令人满意的。我们人类总想知道一切事物都是从哪里来的。在本世纪，对起源的那种根深蒂固的寻求变成为原子是如何形成的这个问题。我在第二章中曾说过，质子和中子在大爆炸后几分钟的时候被烤炙为氦原子核。更复杂的原子核则在星座中形成，并在星星爆炸中喷向空间。毫不夸张地说，我们和其它任何东西一样都是星尘。大统一使我们更进了一步。我们最终还是由 X 和 Y 玻色子传递的原始作用力的产物。

在原则上，宇宙中的物质量可以计算。事实上，在给定 K 介子衰变的一种测度的情况下，我们不用出实验室观望便应该能够预测宇宙是否由物质或反物质构成。不幸的是，我们目前对 CP 违反的理解还太浅，这种情况还不允许我们做出这种计算。

时间标尺

我们生得恰逢其时：我们生活在核子产生后的宇宙时代，但又是它们最后消亡之前的宇宙时代。我在图 14.5 中说明了一个物理学家的世界历史。为体现有关的巨大时间，我用对数规划了时间。也就是说，标有 20 的凹口表示大爆炸后 10^{20}秒的时间。我在“时间尺”的左边列举了各种各样对人类有特殊趣味的事件。有一幅画标明人类帝国的建立。

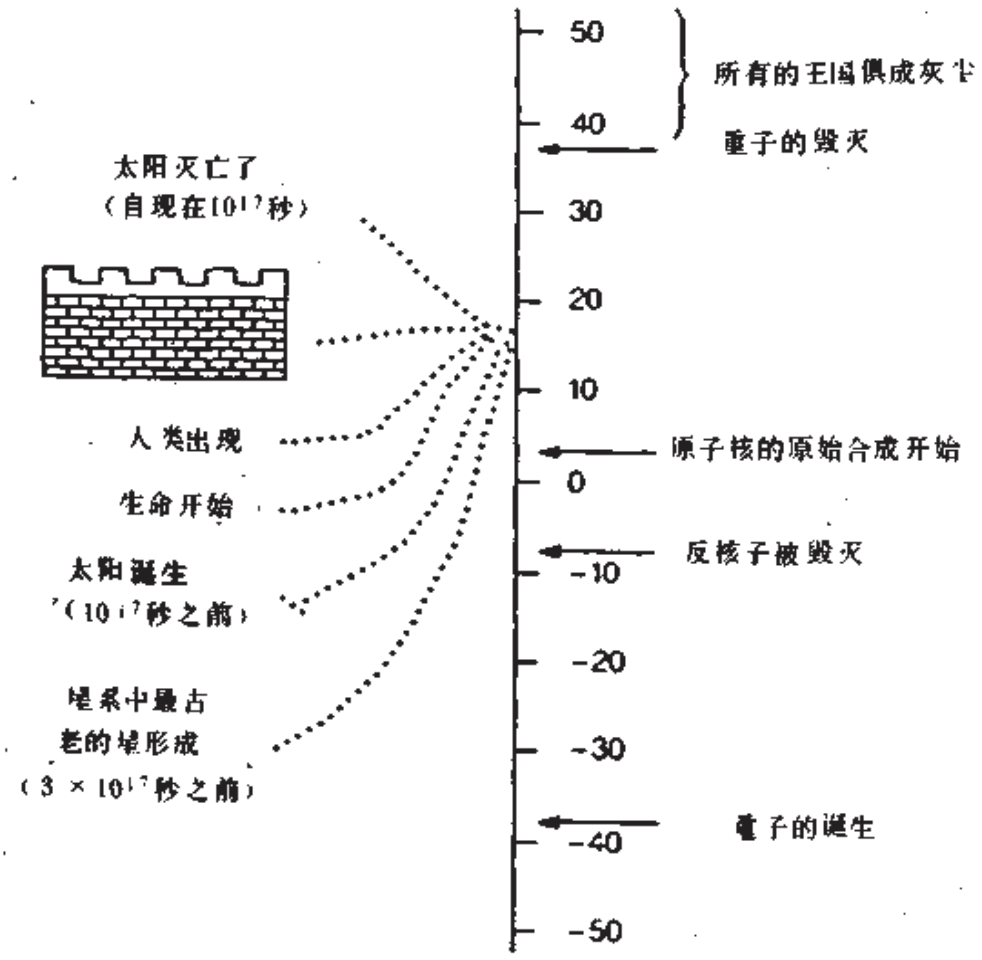


图 14.5 在时间的标尺上，−30 表示大爆炸后 10^{-30}秒；30 表示大爆炸后 10^{30}秒，以此类推。正如目前天文观察所表明的那样，我在画这幅图时，认为宇宙将继续膨胀。标尺左边的象形图表象征着人类历史。

站在冷却的灰渣上

> 世界的进化可以比作刚刚燃放殆尽的鞭炮：一些红火、灰烬、烟缕。我们站在冷却的灰渣之上，看着太阳慢慢消失，我们努力回忆着世界起源的消失的光辉……
>
> ——拉梅特（lemaitre）

我们对物质的产生的理解开启了一个新纪元，在这个纪元中，大统一为宇宙学带来了新的兴奋情绪。我解释过，随着人们在时间上向后推算，宇宙变得越来越热。随着宇宙变热，宇宙中粒子的典型能量就增加。因此，为了理解宇宙中的越来越早的时代，我们必须掌握不断增高能量上的物理学。

大致说来，在大统一之前，宇宙学家们被限制在起始于大爆炸后百万分之一秒的时代。物理学家们一跃而进到大统一能量级。相应的是，宇宙学家们现在能够寻找到远至大爆炸后 10^{-40} 秒的宇宙。

物理学家们声称已精确知道宇宙前期发生的事情，这有时令外行们万分惊讶。事实上，早期的宇宙是用尖啸着到处游动的粒子做的热汤，它比目前的宇宙容易描述得多，说起来，宇宙中的汤现在已经被泼溅和凝固了。在适当能量级上的物理一旦确定，我们就能维妙维肖地描绘出早期的宇宙。

要讲述目前对早期宇宙的研究，就会使我们远远超出本书的范围。我将限制自己，只提到一种特别令人兴奋的思想，即由爱伦·辜斯（Allan Guth）提出的一种膨胀宇宙的思想。让我们回到带踢的酒瓶子。

在炽热的早期宇宙中，粒子带着很多能量尖啸着四处游动；这一思想同在瓶子里到处跳动的石子相对应。随着宇宙的冷却，粒子慢了下来。在瓶子里，石子最后达到一种静止的状态，对称被自然破坏了。现在，假设在踢中心有一小小的凹口。当石子最后

停止时，它可能会落入凹口处。石子将拥有同瓶底上凹口的高度成比例的潜在的能量。与此相似，希格思场在某一段时间内也可能陷入困境，不能达到其静止的自然状态。象石子一样，陷入困境的希格思场就会拥有潜在的能量。

宇宙的扩展是由含在宇宙内的能量驱动的。粗线条地说，我们可以把扩展着的宇宙想象为吹起的一只气球。陷入困境的希格思场所带有的巨大能量引起宇宙极为迅速地扩展，所以我们只能把扩展描述成猛烈的膨胀。据估计，在这一膨胀的时代，宇宙每在10^{-30}秒左右的时间内体积就增大一倍。

我们现在回到前面提到的一些令人迷惑不解的问题：宇宙为什么这么大？它为什么含有这么多的粒子？爱伦·辜斯指出，如果宇宙曾经处于一个膨胀的时代，那么这些和其它一些有关的问题就会得以回答。宇宙在膨胀中变大了。在膨胀中，包含在陷入困境的希格思场中的潜在能量迅速转化成了粒子。

尽管膨胀图景的实际运用遇到了严峻的困难，但是，其基本思想却仍然令人兴奋和富有魅力。它触及和解答了几年前还被认为是物理学范围之外的问题。

粒子物理学和宇宙学之间的交界处，已经作为一种最令人激动的研究领域出现。在我几年前参加的一次讨论早期宇宙的会议上，与会者发言时身穿 T 恤衫，上书“COSMOLOGY TAKES GUTS”（宇宙学需要勇气）——GUT 也是大统一理论的缩略词。那些不相信大统一的人，则被某些人一概论为没有勇气的胆小鬼。

崭新而可能改进了的理论

在自从大统一发明后的许多年中，理论学家们已经构筑了一些其它的大统一理论，以求改进乔治-格拉肖的 SU（5）理论。例如，许多理论家认为夸克和轻子分属于 5 维和 10 维表示这一事实是不令人满意的。他们相信，在一种真正的统一理论中，夸克和轻子属于一个单一的表示。

足以令人奇怪的是，结果证明把已知的夸克和轻子统一在一个15维表示中是不可能的。事实上，研究导向了自然地含有SU（5）的SO（10）群。但是，SO（10）群并不包含一个15维表示；但它包含一个16维表示，已知的夸克和轻子同该表示相合得很自然。群论在告诉我们说，我们漏掉了一个多余场吗？

我们记得，我们数到了与夸克和轻子有关的15个场，因为中微子总是向左旋转。在SO（10）的16维表示中的多余场，结果具有同向右旋转的一个中微子有关的完全恰当的属性，这是极为令人困惑的。因此，群论自然导致物理学家们在SO（10）的基础上考察一个大统一理论。在某一能量级上，SO（10）对称自然分裂为SU（5），右旋转的中微子场在此取得巨大质量，因而解释了右旋转的中微子从未在实验中见到这一事实。

这一理论也告诉我们，当向右的中微子获取巨大质量时，向左的中微子场就被迫获取微小的质量。目前，一些实验家正积极努力确定，长期被认为完全没有质量的向左的中微子实际上是否具有微小的质量。

许多理论家倾向于相信SO（10）理论，但是现在，它还远没有在实验上确定下来。我提到SO（10）理论，以让读者对大统一研究的情况有一个大致的了解。也就是了解对称和群论，了解基本场的数目，了解把它们归入恰当的表示的情况。

设计者的宇宙

在第二章，我指出理论家们在他们的想象中设计宇宙。我现在向读者解释游戏的规则。选取你最喜爱的群；写下以你的群为其局部对称群的杨-米尔斯理论；把夸克场、轻子场和希格思场置入恰当的表示；让对称自发破缺。现在，注意观察对称破缺分裂成什么。（在我们那个酒瓶的比喻中，我们曾观察石子在带踢酒瓶中选择哪一方向。）就本质上说，就是这些，任何人都能玩。若想要赢，人们只须找到世界上最伟大的玩客所用的选择方案。奖品

吗？名誉和光荣，再到斯德哥尔摩镀镀金。

哎，我选择了错误的群，最后没找到任何没有质量的规范玻色子。那么，我的宇宙中就不会有什么光。不行，得再试试。我选了另一个群，但这次我最后找到了两个没有质量的规范玻色子。这个宇宙就会有两种不同的光子。好，另一个可能的宇宙从废纸篓中钻了出来。玩什么呢？

在废墟中生活

根据大统一，我们生活在自发对称破缺的废墟之中。真正的物理学在10^{15}乘以核子质量的能量级上；我们观察到的物理学仅仅代表着这种真正的物理学的只鳞片甲。想到光子仅仅是真正的物理学的许多规范玻色子中的一种，而它的行为则形成了大部分宏观现象的基础，我感到非常茫然。

为了欣赏自发对称破缺的作用，暂时让我们假设上帝用手破缺了对称。如果用建筑作比，那么就让我们设想一幢用最复杂的对称建起来的大楼，并将其毁为瓦砾。物理学家们就可以比作是瓦砾中爬来爬去的聪明的蚂蚁，千方百计重新构筑起原来的设计。物理学就会注定永远是唯象学的。但是，终极设计者好象自发地破缺了对称——甚至在我们仍然限制在可怜巴巴的低能量时，它就使我们能够对真正的物理学略见一斑，这是至关重要的。

第十五章　傲气中生

放眼整个设计

在历史中，我们物理学家自始至终寻求理解一个又一个的现象，这就是物理学的发展历程。苹果为什么掉下来而月亮却不会掉下来呢？那种我们称为光的神秘效应是什么呢？原子核内部是什么呢？但随后，在光辉灿烂和史无前例的一跃中，基础物理学家从在100倍于核子质量或更小的能量尺度上研究能量，跃到了在10^{15}倍于核子质量上考察物理学。我这一代物理学家的傲气是无限的。我们已经大略看到了他如何设计了宇宙，现在我们想象我们也能够设计宇宙。

在我这一领域中的研究特点已经大大改变。在唯象学统治期间，我还在研究生院读书，那时物理学家们正为解决诸如怎样计算两个质子的碰撞这样的问题忙得不可开交。许多这类问题涉及到爱因斯坦所谓的“这种或那种现象”，它们从没有得以解答。基

础物理学家完全不再关心这些问题。他们提出并解答了更深刻的问题：电子电荷为什么同质子电荷完全相等而又相反呢？宇宙为什么不是空无物质的呢？宇宙为什么如此之大呢？

许多物理学家现在觉得，由于对称之光的指引，我们可能会掌握那巨大的图景。在多年集中研究东方毛毯的小条块之后，我们可能终于站在了可以看到整个设计的位置。

目前研究的略况

甚至在他们异常欣快的时候，基础物理学家们也认识到，他们还没有对物理世界达到一种真正统一的理解。首先，大统一不包括引力。即使在把引力撂到一边的情况下，很清楚，乔治-格拉肖理论也不是对大统一的最终结论。尽管一些长期存在的基本问题得到了解答，另一些问题则仍然象以往那样神秘莫测。

在这一章中，我将努力把基础物理学研究的概貌介绍给读者。首先我将集中阐述乔治-格拉肖理论没有解答的一个问题，然后我将概要讲述一些引入引力的企图。

骗子

1935 年，在科罗拉多州的派克斯峰峰顶上工作时，实验学家卡尔·安得逊和塞斯·耐得梅(Seth Neddermeyer)在宇宙射线中发现了一种粒子。起初，他们以为这一粒子是汤川所讲的、现在称之为介子的东西。这种新粒子的质量大体同汤川为介子预计的质量相等。但是，令人惊奇的是，它的行为一点也不象强相互作用的介子那样。经过一番混乱，物理学家们认识到，今天称为 μ 子的这种粒子事实上不是介子，其质量只不过碰巧同介子的质量大约相等罢了。大自然企图欺骗我们。

进一步的研究表明，μ 子和电子具有完全相同的属性。两种粒子之间的唯一不同之处是，μ 子的质量比电子大 200～300 倍。μ

子只是更重的一种电子。由于质量更大一些，μ子通过弱相互作用可以衰变成为电子。

但是，把μ子抛入最后设计有什么意义呢？就我们所知，如果μ子被省略掉的话，宇宙就会仍然按相同的方式运行。μ子是多余的。它稍坐片刻，然后就分解成电子。除此之外，电子能够做到μ子所能做的一切事情。一气之下，著名的实验物理学家艾西达·拉比（Isidor Rabi）喊道："是谁要这μ子？"没有人知道？

令人惊奇的是，在弱相互作用下的μ子的行为同电子的行为相同。当作用于W玻色子时，电子变换为中微子。效仿电子，当作用于W玻色子时，μ子也变换为中微子。在20世纪50年代末进行的一次里程碑般的实验确定，两种中微子并不相同。为了区别它们，物理学家们把一种称为电子中微子，把另一种则称为μ子中微子。

在20世纪60年代，物理学家们慢慢地意识到，奇异夸克对于下夸克，与μ子对于电子是一样的。臭名昭彰的奇异夸克具有和下夸克完全相同的属性。唯一的差别又是奇异夸克的质量比下夸克的质量约大20倍。大自然在重复她自己！

粲的发现

这时，物理学家们作了一个显而易见的猜测，即上夸克也有一种更重的翻版。但这只不过是一种猜测。在20世纪60年代末，谢利·格拉肖同法国籍希腊物理学家约翰·艾利奥普洛斯（John Iliopoulos）和意大利物理学家路西阿诺·麦阿尼（Luciano Maiani）一起工作，他们指出，这一他们称为"粲夸克"的多余的夸克，在一种杨-米尔斯弱相互作用理论中是必要的。规范群的结构就是这样，即除非包括粲夸克，一些强子就会以观察不到的方式衰变。这一理论预测，这些没有观察到的衰变，对认识弱相互作用的一种规范理论在一些年中形成了一种严重的障碍。这一多余的夸克在去除不需要的衰变方面，确实象一种符咒一般灵验。

在1974年，经过实验发现了粲夸克。我记得所有的人是多么兴奋。粲夸克的发现和中性流相互作用的发现一起表明，以局部对称和自发对称破缺为基础的理论纲要的确是正确的。我们想得一样！

设计中的累赘

戈第洛克斯（Goldilocks）漫步走进熊窝里，发现一切都分而为三。桌子上有三只碗，除大小之外其它方面完全一样。物理学家们也同样感到迷惑不解。他们终于想出宇宙是如何构筑起来的：物质是由电子、电子中微子、上夸克和下夸克构成的；一簇规范玻色子和引力子作用于这些夸克和轻子，使它们相互变换；我们从这种构架中得到了光辉灿烂的宇宙！一种超凡与典雅的设计，不是吗？但是，正当物理学家们就要陷入欣羡之际，终极设计者抛入了一大堆粒子，它们显然在宇宙的健康运行中不扮演任何本质的角色。电子在μ子中重复，电子中微子在μ子中微子中重复，上夸克在粲夸克中重复，下夸克又在奇异夸克中重复。（为了区分这两群粒子，物理学家们把它们分别称为电子家庭和μ子家庭。）

这一谜越陷越深。从20世纪70年代中期开始，实验家们发现了甚至更基本的粒子，很清楚，有第三个家庭，它由某种称为“τ”的东西组成：τ中微子、顶夸克和底夸克。τ是电子的甚至更重的翻版，但在其它任何方面又同电子和μ子的行为恰恰相同。与此相似，τ家庭中的其它粒子是电子和μ子家庭中粒子的相对应的复制品。

大自然不但在使物理学家们感到困惑，而且他在考验我们创造漂亮名字的能力！顶和底与上和下听起来非常相近。（我在写《可怕的对称》一书的时候，实验者们声称发现了顶夸克。但是到我就要校对的时候，这一席话却被收回了。）同时，一些理论家们预测，也许根本没有任何顶夸克，并且构筑了自然称之为无顶理论的许多理论。然而，我们中许多人认为，这种术语严重损害了

专业尊严，一些杂志拒绝印刷这一词汇。幸运的是，观察到的底夸克的行为支持顶夸克的存在。由于这种和各种其它的原因，大多数理论家相信顶夸克。

画蛇添足

此时，物理学家们看不到很好的理由在宇宙设计中包括μ子和τ家庭。的确，由于这些家庭中的粒子迅速衰变成电子家庭中的粒子，正常情况下，它们甚至不存在于宇宙之中。既便μ子和τ家庭不包括进来，宇宙也照旧完美地运行着。

拉比那愤怒的问题现在修改成为："他为什么重复自己呢？"他好象用一些不必要的修饰毁坏了他自己那雅致而朴素的设计。在中国，有一个关于一名画蛇艺术很高的艺术家的故事。他的作品很受大家的好评，但是，尽管如此，他却并不满足，他画的蛇对他来说就是有点不对。最后，他抄起自己的画笔在蛇身上画上了一些脚。中国词语"画蛇添足"，现在用来描绘由于多余的修饰而毁掉一种设计的情况。

难道大自然也画蛇添足吗？物理学家们可不这样认为。普遍的信念是，在复制宇宙物质内容的过程中，大自然必然受到了一种深刻的美学原则的驱使，而我们还不能欣赏和了解这种美学原则。

家庭问题

物理学家们有时把电子、μ子和τ家庭描述为一个大家庭中的三代。当一个就足够时，大自然为什么包括三代人，这一谜称为家庭问题。几年前，我在日本被邀请作一些报告。当我谈到家庭问题的时候，听众哄堂大笑。结果我了解到，由于三代人居住在一起而引起的真正的家庭问题，当时正是日本新闻媒介中的一个热门话题！



图 15.1 画蛇添足：一位当代漫画家重新阐释了一个古代中国寓言故事，或多或少地意味着，你领先时应适可而止。

大统一在家庭问题上没有提供一点线索。我们记得，当我在上一章中数到 15 个夸克和轻子场时，我省略了奇异夸克。现在你们懂得了我为什么那样做：我想一次只数一代。每一代都含有 15 个夸克和轻子场，漂亮地合入 SU（5）的一个 5 维表示和一个 10 维表示中。为了提供三代，乔治和格拉肖轻而易举地使出现在他们理论中的表示变成一式三份。但是我们对于表示为什么要一式三份和各个下一代为什么都更重却根本没有更进一步的理解。

家庭问题是当今物理学中最显著的谜之一。此时此刻，我们甚至不能肯定地说刚好有三代：或许有更多代。一些物理学家试图从第一原则来确定家庭的数目。在此，燃烧之虎又来领路了。

镜像

许多物理学家认为，一组对称变换把不同的家庭联在了一起。有人可能会感到，在一个真正的大统一理论中，所有已知夸克和

轻子应该属于一个单个表示，在某种自发对称破缺时，这一表示就会分解为 SU (5) 的 5 维和 10 维表示的三个或可能更多的复制品。令人好奇的是，只有在作为已知夸克和轻子的镜像的多余粒子在场的情况下这才是可能的。群论迫使我们引进一个镜像电子、一个镜像中微子，诸如此类。镜像粒子行为举止好象它们是已知粒子的镜像一般。例如，W 玻色子使电子变换为一个左旋的中微子，但是它却使镜像电子变换成一个右旋的中微子。因为实验家们从来都没有观察到镜像粒子，如果镜像夸克和轻子确实存在的话，它们就必定要比已知夸克和轻子的质量大。

这把我们引向了令人昂然生趣的可能性，即终极设计事实上可能是宇称不变的，而在 20 世纪 50 年代曾震惊过物理学界的宇称违反则是自发对称破缺的结果。他难道在他的设计中包括了镜像粒子，然后就进而打破了这一镜像吗？

站到一边

亚伯拉罕·裴斯在他关于爱因斯坦的权威传记中写道，爱因斯坦这个人的孤僻性格大大吸引了他。在许多方面都可说是爱因斯坦之子的引力相互作用，也显然同其它三种相互作用格格不入。

即使把在强度上的巨大差异搁在一边，引力同其它相互作用好象也很殊异。如果杨-米尔斯规范玻色子作为其它三种相互作用的中介，有人可能会猜想，引力子即作为引力中介的粒子也是一个规范玻色子。但它不是。引力子的行为同规范玻色子的行为很不相同；例如，引力子以两倍于光子的速度旋转。引力子和其它三种相互作用的介子不能直接联在一起。

在粒子物理学中唯象学方法处于统治地位时期，引力常常象是一个被抛弃的弃儿，它受到人们的羡慕但又不被人理睬。因为引力非常弱，所以在微观世界中，其效应完全可以忽略不计。在过去一些日子里，一个人对引力一点也不懂，却照样能够做一个一流的粒子物理学家。甚至今天，许多物理学者无须选择有关爱

因斯坦的引力理论的任何课程，就可得到博士学位。例如，研究固体的电子属性的物理学家，没有丝毫必要注意引力理论。

关于引力作用的观点甚至现在仍有分歧。一些物理学家认为，我们只有把大统一相互作用同引力联系起来才能弄懂它。另一些人则喜欢把注意力集中在大统一理论上，而对引力毫不忧心。无论如何，目前研究中的一个巨大的危险，就包括引诱爱因斯坦之子——引力相互作用加入游戏的种种企图。

求婚遭到拒绝

作为一种经典理论，爱因斯坦的引力美丽而完整，但是，正如他坚决拒绝向量子物理学求助一样，它也再三拒绝同量子成婚。当量子原理应用于爱因斯坦的引力理论，从而得出的量子引力理论没有任何意义：量子引力是不能重整的。也就是说，当物理学家们想方设法求出与一个引力过程相联的振幅的无限数目的和数时，他们遇到了一个与 1+2+3+4+… 相类似的总和。

围绕这个问题，大家众说纷纭。一个极端主义者认为，爱因斯坦之子在告诉我们，量子物理学在某一点上一定不成立。另外一些人觉得，引力理论必须得到修正。谁在拒绝谁呢？

物理学是从引力开始的，但是，富有讽刺意味的是，它可能也以引力结束。在四种基本的相互作用中，人们了解最少的就是引力。

爱因斯坦的寻求

爱因斯坦的经典世界只允许电磁性和引力，爱因斯坦深深相信两者是相互联系的，在表明电磁和引力同样以一个局部对称为基础以后尤其如此。在完成关于引力的伟大论文之后，爱因斯坦把他的科学精力投入了对所谓的统一场论的一种唐吉诃德式的寻求之中，一些传记作家认为这种寻求是悲剧性的。

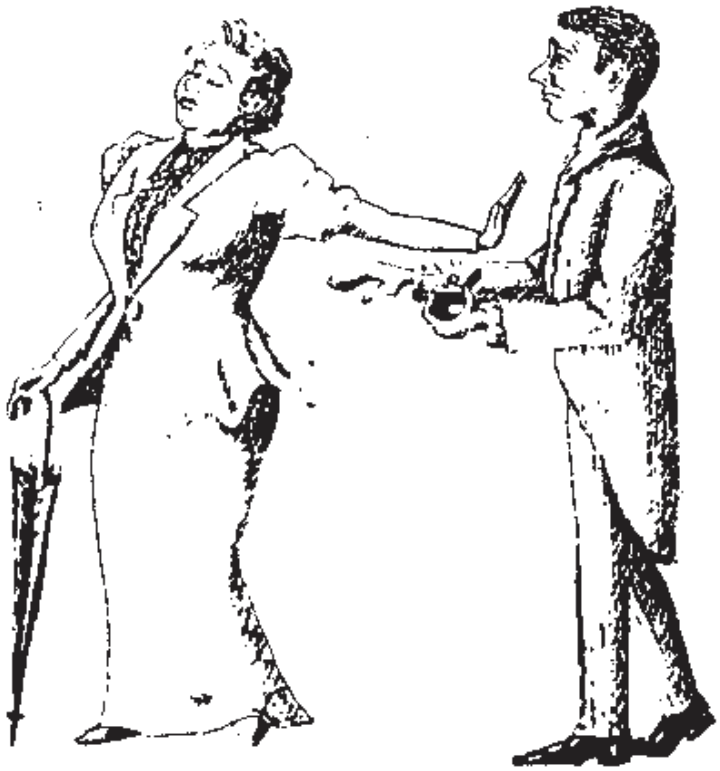


图 15.2　求婚遭到拒绝：爱因斯坦的引力理论拒绝同量子论结合。

对于他的同时代人来说，爱因斯坦的寻求是笨头笨脑和走入歧途的。当爱因斯坦苦苦求索时，世界变成了量子世界。弱相互作用和强相互作用发现了，唯象学慢慢统治了基础物理学。当世界包含着两种似乎与局部对称毫无关系的相互作用时，坚持电磁性和引力的统一就显得荒诞和大为过时了。泡利不无讥讽地谈到过爱因斯坦的徒劳："上帝分开的，任何人还是不要把它结合起来吧。"

但是爱因斯坦最后嘲笑了泡利。在某种意义上来说，大统一实现了爱因斯坦那不可能的寻求。物理学家们已经把上帝好象分开的东西结合在了一起。尽管除去引力以外的其它三种相互作用的统一，的确与爱因斯坦所想的很不一样，但他的统一设计的蓝图今天仍继续使我们浮想联翩。

在这本书的开头，我说过物理学家们坚守着他们的信仰，即大自然最终还是简单和可以理解的。通向简单和统一的运动现在达到了一种强相互作用、电磁相互作用和弱相互作用的统一理论

(参看图 15. 3)。只有引力仍然在统一之外。一种思想使基础物理学家万分兴奋，即离最高设计只有一步之隔了。

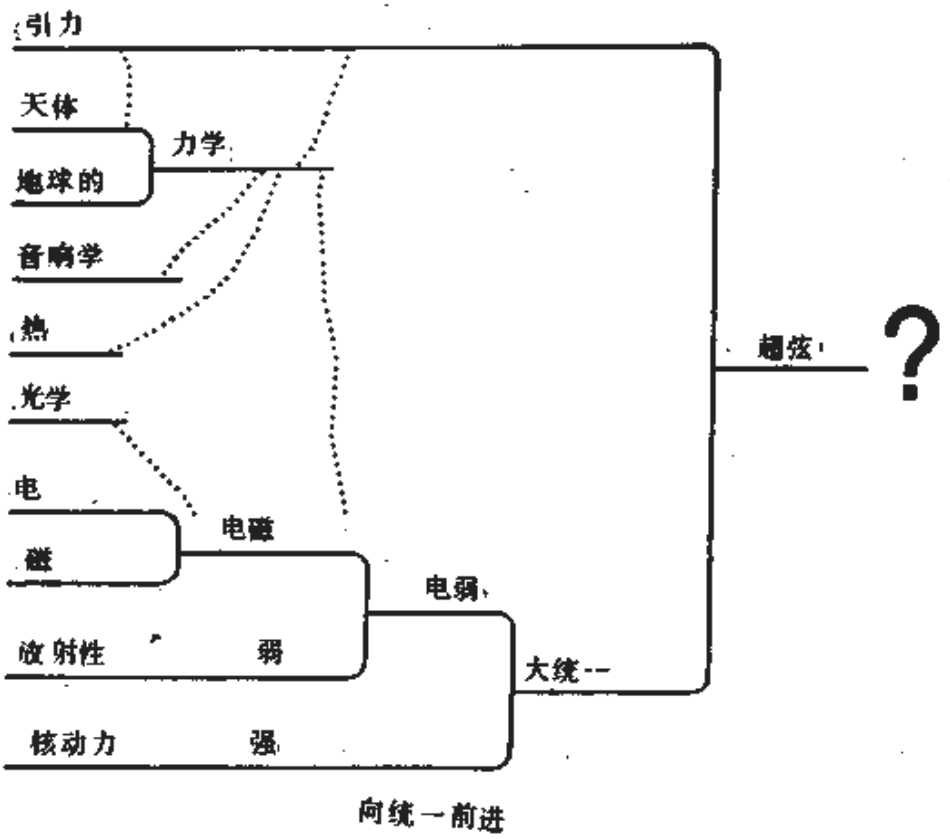


图 15. 3 在 20 世纪晚期中向统一的行进。(请同图 4. 6 比较) 基础物理学家们受到了一种思想的鼓舞，即也许他们同终极设计只有一步之隔。超弦是最后一步吗？众说纷纭。

世界的维数

富有讽刺意味的是，当前把引力与其它三种相互作用统一起来的运动，也许要依赖从历史的垃圾箱里复活的一种思想。1910 年，在爱因斯坦提出自己的引力理论正好四年之际，波兰数学家和语言学家西奥多·卡卢萨(Theodor Kaluza)提出了绝对荒唐的思想，即时空实际上是 5 维的。这一思想由瑞典物理学家奥斯卡·克莱恩 (Oskar Klein) 发展成为所谓的卡卢萨—克莱恩理论。

爱因斯坦把时间和空间结合在一起，而且他把物理世界描绘

为具有 4 维的世界：人们所熟知的空间的 3 维和时间 1 维。但是，正如一般所有人可能想到的那样，对于爱因斯坦来说，空间仍是 3 维的。卡卢萨和克莱恩在谈论某种更为激进的东西。在他们的设想中，空间本身是 4 维的。（时间是 5 维的就合情合理了。）

我们毕生都生活在空间之中，那么我们怎么可能漏掉空间中的另外一维呢？难道卡卢萨和克莱恩想告诉我们有另一个我们可以在其中运动的方向吗？

要弄懂对这些问题的答案，请让我们考查一下一个限制在一只长试管表面上生存的动物。观察的人可以看到，该动物所“居住”的空间即试管表面实际是 2 维的。但是假设试管的半径比该动物能够看到的最小空间要小得多，对该动物来说，因为它只能沿着试管爬行，所以空间就好象是 1 维的。该动物就会认为它生活在一个 2 维的世界中：一维是时间，另一维是空间。也就是说，一只很薄的试管可能会被错认作一条线。更仔细一观察，“线”上的每一“点”结果实际上是一个圆。

卡卢萨和克莱恩提出，在我们运动于其中的熟悉的 3 维空间中的每一点，在更仔细加以观察时，结果也会是一个圆。如果圆的半径比我们能够测量的最小距离小得多，我们就会错误地认为，我们生活在一个 3 维空间而不是一个 4 维空间中。

至此为止，我们的讨论只与几何学有关。物理学进入了卡卢萨和克莱恩的假设，即现在想象为实际上是 5 维的世界，只拥有如爱因斯坦的作用量所描述的那种引力相互作用。

卡卢萨和克莱恩随后问道，这个世界的居民太缺乏辨别力，看不到他们称之为点的东西实则为圆，那么他们怎么会看到引力呢？令他们惊讶不已的是，卡卢萨和克莱恩发现，这些居民们会感觉到两种力，他们把它们解释为一种引力和一种电磁力！在卡卢萨-克莱恩理论中，麦克斯韦来自于爱因斯坦！

更具体地说，如果空间时间真的是 5 维的，那么麦克斯韦的电磁作用就表现为一种爱因斯坦的引力作用。我们可以这样理解这一令人困惑的发现：在一个 3 维空间中的一种力可以拉向三个

不同的方向；无论如何，我们所说的空间 3 维就是这样。在卡卢萨-克莱恩理论的 4 维空间中，引力可以拉向四个不同的方向。对于我们来说，即对于我们这些缺乏辨别力的居民们来说，在与我们所熟知和热爱的三个方向相对应的三个方向中的一种引力就是一种引力。但是，在我们由于太缺乏辨别力而看不到的第四个方向中的引力又如何呢？我们想把它解释为另一种力。

读者可能会把我们的 4 维时空看作是 5 维时空的一个近似表示。当我们从 4 维近似来看时，在 5 维时空中描述物理学的一种作用就会分为几部分。卡卢萨、克莱恩发现，一部分描述引力，另一部分则描述电磁性。



图 15.4 世界之维

从前面的讲述看来，两种不同的力会出现于卡卢萨-克莱恩理论这一事实并不令人惊奇。令人惊奇的是，第二种力具有与电磁力完全相同的特点。

爱因斯坦被惊得目瞪口呆。他写信给卡卢萨说，他从没有意识到空间实际上是4维的。爱因斯坦非常喜欢这种思想。

太小了，我们进不去

在卡卢萨-克莱恩理论中，如果圆半径极小，比质子半径小10^{18}倍，那么引力相互作用和电磁相互作用之间强度上的巨大差别就可以得到合理的解释。该理论用一个小数取代了另一个奇小的数——与其它相互作用相比较而论的引力强度。此时，对于空间的4维中为什么一个如此小而其它三个又完全充溢于广阔的宇宙这一问题，物理学家们没有深刻的理解。但是，在圆半径不到1厘米这种意义上来说，该理论与观察到的情况是一致的。

尽管卡卢萨-克莱恩理论很粗糙，但是同科幻作家们所想象的东西相比较，它肯定是驯服的。不，没有办法在第5维上走一趟。圆非常微小，要挤进去，次原子核粒子都甚至太大了。

这些年来，卡卢萨-克莱恩理论启发了各种各样的疯狂之士，他们不可理喻地滥用“维”一词，并以此为基础提出了许多相似的思想。重要的是，简单地声称时空如人幻想的那样具有无论多少维数是不够的。卡卢萨和克莱恩不得不细致地分析作用量，看看他们在4维时空中会得到什么。是否出现电磁性则不是由他们所判决的事情。

局域对称的统治

卡卢萨-克莱恩理论的最令人震惊的特点即电磁性产生于引力，现在，这被理解为局域对称的结果。我们还记得第十二章中有关局域对称的讨论。爱因斯坦在坐标变换上建立了自己的理论，因而启发魏尔也把电磁性建立在一个局域对称之上，这一对称现在称为规范对称。在卡卢萨-克莱恩理论中，写在5维时空内的作用量拥有一个局域对称，即在5维局域坐标变换下的不变性。当

时空缩变为 4 维时，作用量拥有的局域对称是不能失去的。因此，作用量分裂而成的各部分，不能不是那些称之为拥有局域对称的作用量，即爱因斯坦的作用量和麦克斯韦-魏尔的作用量。

弱相互作用和强相互作用显然是与局域对称毫无关系的两种相互作用，它们的发现把卡卢萨-克莱恩理论扫入了垃圾箱。唯象学爬上了统治宝座，建在几何学之上的卡卢萨-克莱恩理论，好象成了绝望的令人好奇的古董。当我学习物理学时，卡卢萨-克莱恩理论甚至从未被提起过。20 世纪 70 年代的有关引力的主要教科书是不讨论它的。然后精确对称的追随者们喊叫着涌了回来。其它三种相互作用结果都是以杨-米尔斯的精确局域对称为基础的。很自然，寻求引力和大统一的相互作用之间的一种联系的物理学家们，转而研究起卡卢萨-克莱恩理论。但首先，他们必须概括卡卢萨-克莱恩理论，产生出杨-米尔斯作用量。

卡卢萨和克莱恩提出，在我们的 3 维空间中的每一点实际上是一个微小的圆。(请注意，时空现在是 6 维的，球体则是一个 2 维的表面。) 足以令人惊讶的是，杨-米尔斯作用量曝了出来！更具体地说，当从 4 维时空来看 6 维时空时，爱因斯坦作用量就分成了两部分，一部分同 4 维的爱因斯坦作用相对应，另一部分则同杨-米尔斯作用相对应。

数学家们把诸如圆和球这样弯起来的空间称为“紧空间”。在一般情况下，我们可以把我们的 3 维空间中的每一点假设为实际上的一个微小的 d 维紧空间（这样，空间实际上就是〔3+d〕维的，而时空则是〔4+d〕维的）。在给定一个紧空间的条件下，物理学家们就能写出相应的卡卢萨-克莱恩理论。

数学家们已经发明了各种各样的紧空间，一些紧空间的形状非常奇怪，我们几乎画不出来。一般情况下，每一个紧空间在某种几何变换下是不变的。例如，球在旋转下是不变的。的确，几何物体的对称为我们的对称的思想提供了原始动力。令人愕然的是，用在卡卢萨-克莱恩理论中的紧空间的几何对称，表现为杨-米尔斯作用的局域对称。

几何进入物理学

从几何对称到物理对称的这种变换看上去是极其美丽的，但是，很遗憾，只有在数学光辉的映照下才能完全理解它。

在本书中，我自始至终都在努力表达我对爱因斯坦的引力理论和杨-米尔斯关于其它三种相互作用的理论那令人愕然的美的敬仰，用一个俗套语来说，意识到一种理论出自另一种理论，只能描述为绝对地“动人心弦”。

引力是基本的吗？

我必须请读者注意，卡卢萨-克莱恩理论还远没有确定下来，各种各样其它的思想仍然与之竞放。例如，少数人认为，引力根本不是一种基本的相互作用，而只是大统一规范相互作用的一种表现。根据这种观点，规范相互作用产生引力，而不是反过来。这种方法的哲学根据在以下警句中得到了概括：“La lumiére fut, donc la pomme a chu.”（大概来说，要有光，以便苹果可以堕落）。

一些物理学家以卡卢萨-克莱恩理论加剧了重整爱因斯坦的引力理论的困难为根据，对其持批评态度。读者可以很容易懂得，时空的维越大，一个人必须总结的过程就越多。很简单，因为任何给定的过程都有可以进展的更多的方向——而且一个人需要总结的历史越多，这一总数就越不可能有意义。正如我们将看到的那样，一些物理学家现在认为，这种困难可能接近于解决了。

物质和光

物理书籍过去习惯于用物质和光来描述世界。我们的描述已变得更为复杂，但是这种差异却持续了下来。一边是夸克和轻子，

总称为费米子；另一边则是规范玻色子和引力子，总称为玻色子。例如，在图 14.3 中圆表示费米子，箭头表示玻色子。

物质是由费米子构成的，而光的基本单位即光子是典型的玻色子。一个费米子可以放射或吸收一个玻色子，并且在这一过程中它可以或者仍保留不变，或者使本身变换为另一个费米子。在这种意义上，物理学家说玻色子作用于费米子。费米子之间的玻色子的来回往返，产生了我们观察到的力。

在本书中，至此讨论的各种理论对待玻色子和对待费米子很不相同。在一种规范理论中，对称群确定规范玻色子的数目。在另一方面，一个理论家可以自由地把费米子归于对称群的任何表示。

例如，乔治和格拉肖一旦选用 SU (5)，他们就被群论迫使而具有一定数目的规范玻色子。无论乔治和格拉肖喜欢与否，X 和 Y 玻色子都在场。

群论单独不能确定夸克和轻子场的数目：唯一的要求是，它们必须合入群表示。乔治和格拉肖不得不求助于实验观察，以便确认每一代都包含 15 个夸克和轻子场。正如我在前一章所解释的那样，这 15 个场在 SU (5) 的 5 维和 10 维表示中的天衣无缝的嵌合，向我们提供了相信大统一理论的一个主要原因。

此刻，物理学家们不理解终极设计者是怎样选择费米子的数目的。例如，群 SU (5) 就具有一个 24 维表示。一个理论学家很容易想象把 24 个费米子场归入 24 维表示，从而在 SU (5) 的基础上构筑一种大统一理论。由此得出的宇宙尽管与我们知道的宇宙很不相同，却是一个完全可能的宇宙。他为什么选择 15，而不选择 24 呢？

因此，费米子和玻色子之间的差异可以更鲜明地用以下问题来表达：最高设计者是如何决定费米子数和把它们放进去的表示的呢？的确，在规范对称不需要费米子的情况下，终极设计者为什么非要包括它们呢？

对称成为超对称

为了回答这些问题，一些理论学家争论说，必定有一种联系费米子和玻色子的对称，在这个对称下费米子变换成为玻色子，反之亦然。他们争论说，物质和光具有一种共同的渊缘。

为了同我们这个夸张的时代合拍，该对称被其发明者们命名为“超对称”。不可避免的是，超对称的倡导者们有时被称为超物理学家，他们的领域被称为超物理学。

令人失望的是，把已知费米子和已知玻色子联系起来的初始动机毫无结果。结果证明，超对称把已知费米子同仍未知的玻色子联系起来了，把已知玻色子同仍未知的费米子联系起来了。如果超对称是正确的，那么每一个已知粒子就会同一个超伙伴相联系。热心者热情迸发地说，使粒子变成两倍，使快乐也变为两倍。

这许多粒子的突然（假设的）产生，使管理粒子名字登记的人感到茫然。管理登记者在绝望中把夸克和轻子的超伙伴们可怕地命名为“超夸克”和“超轻子”。更可爱的是，他用相应的意大利爱称来称呼玻色子的超伙伴们。因此，光子同小光子相关，引力子同小引力子相关，以此类推。但是，W 玻色子的超伙伴也就变成了难听的名字小 W！

实验家们没有找到超对称所需要的任何这样的粒子。这些超伙伴也许质量太大，用目前在粒子加速器上所使用的能量不能产生它们。此刻，超对称就象 20 世纪 50 年代和 60 年代间的杨-米尔斯理论一样，是一种数学理论，它在寻求着自己的世界并加以描述。

理论家们已经系统地使各种各样的理论变得超对称了。例如，称为超引力的爱因斯坦的引力理论的超对称理论经扩展后包括了小引力子。

在范围上，比我们至此所考察的对称更广阔的超对称，其结果也有更大的局限性。的确，它具有非常大的局限性，许多超对

称理论因此不能在4维时空中构筑起来。人们在有关数学的迫使下，在更高维时空上考察该理论。令人惊讶的是，超对称把物理学家们带回到卡卢萨-克莱恩理论。

超弦

在最近所有向终极设计的进军中，最雄心勃勃和富有革命性的就是由约翰·舒尔茨、麦克·格林和其他人发展的超弦思想。基础物理学的语言是量子场论，它非常复杂，是在过去200年左右的时间内建立起来的。但是，尽管量子场论在近年达到了精妙而伟大的境界，它最终还是建立在一种简单的直觉思想之上。即粒子就象小球一般，它们可以用数学中的许多点表示。在20世纪60年代末，这种思想发展很缓慢，也许我们应该构造其基本实体在数学上用线段表示的理论。

其结果就称为弦理论。一个基本粒子表示为一小段振动弦。如果该小段弦比我们的探测仪器的分辨短得多，它就显得象一个点粒子。弦理论显著的特点是，弦振动的方式不同，在我们看起来就好象是不同的粒子。以某种方式振动，它就表现为一个引力子；以另一种方式振动，则表现为一个规范玻色子。因此，弦理论带来了真正大统一的希望，其中，引力内在地维系于大统一相互作用之上。

在过去几年中，舒尔茨和其他人把超对称用于弦理论，得到了我们所知的超弦理论。结果证明，超弦理论只有在10维时空内才能得到系统而连贯的阐释。要把超弦理论同观察结果联系起来，就又要动用卡卢萨-克莱恩理论。

如果我们不使用太精微的仪器来探测弦，超弦理论就会有效地简化为自然包括爱因斯坦的引力理论和杨-米尔斯规范理论的一个场论。最近，确切来说是在1984年夏天，格林和舒尔茨发现，超弦理论具有一些富有巨大魅力的属性。具体来说，由于其复杂的对称结构的帮助，量子超弦理论是可以重整的。在超弦理论包

含爱因斯坦的引力理论的情况下，格林和舒尔茨可能会解决重整引力的长期难题。

爱因斯坦之子终于愿意同量子结合了，但是它只作为一个更大的理论的一部分。许多物理学家现在正兴奋异常地研究超弦理论。其他人则仍对此深表怀疑。

巴洛克和洛克克

好，我把读者带到了物理知识的锋芒之上。此刻，我们好象生活在一个百花竞放、百家争鸣的时代，到处是兴奋的气氛。但目前关于终极设计的任何理论能被证明正确与否，还须拭目以待。保守者可能会指出，甚至大统一都还没有为实验确定下来呢。

一个令人忧心的迹象是，尽管乔治-格拉肖 SU（5）大统一理论与观察到的粒子及其行为天衣无缝地相合，这些进一步的发展都激发我们想到迄今仍未观察到的粒子。在艺术史上，巴洛克和洛克克式艺术紧随着文艺复兴。在基础物理学上，在一个统一和简化的时代之后，我们好象进入了一个装饰和复杂化的时代。最近的发展倾向于大大复杂化；具体来说，超弦理论在数学复杂化上大大地跃进了。

尽管有着在复杂化上的这种升级，许多物理学家对未来仍很乐观。在我们无限的傲慢中，我们开始感到，我们站在了真正了解他的思想的门槛之上。

在基础物理学中，目前的研究细节与一般读者无关。重要的一点是，对称在目前考察的从大统一到超弦的种种理论中起着支配作用。这些理论错综复杂，没有人能通过遵循 19 世纪物理学的原理而可能把它们构筑出来。物理学家们必须依赖燃烧之虎。

正如古人所梦想的

在 1933 年作的一个报告中，也就在唯象学方法要统治物理学

的前夕，爱因斯坦讲到："我相信，我们完全可以通过数学构筑的办法来发现作为理解自然现象的关键概念和规律。经验可能提示出适当的数学概念，但是，这些概念肯定不能从经验之中推导出来……因此，在某种意义上说，我相信，正如古人所梦想的那样，纯粹的思想能够掌握现实。"

最新的发展好象证实了爱因斯坦的话。我们目前在理解上的跃进，是坚持美学原则的结果。

第十六章　造物主的精神

时间之流

在前面几章中，我都没有讨论物理学中最为神秘的对称，即在时间反演下物理定律的对称。如果自然界的定律不决定时间之矢，物理学家就称大自然在时间反演下不变。正如我们在讨论宇称时那样，应该给出时间反演不变性的精确且便于应用的定义，从而避免潜在的混淆。对任意一个物理过程拍一部电影，然后倒放。我们在倒放的影片中看到的过程与某一物理定律矛盾吗？如果不矛盾，物理学家就称此过程遵守的物理定律在时间反演下不变。（一个可能的错误的想像认为，时间反演不变性在某种意义上意味着我们能回到过去，这个适于应用的概念显然排除了这一点。）

请注意，时间反演不变性仅仅是说倒映的影片中的过程，也就是说时间反演了的过程是可能的。让我们看一看一个棒球运动员在本垒滑倒的镜头。如果倒着放这个片子，我们会大笑不已：我

们看到一片沙土和灰尘向躺在地上的运动员落去并将他提起。这个过程是极为不可能的，但就物理定律而言，却是完全可能的。随着运动员滑倒在本垒，运动员身上的分子将它们的动量和能量转移给地上的分子。如果我们能设法倒转此过程中每一个分子的运动方向，那么，时间反演了的过程将确实存在。

在该例子中，时间的方向显然令人发笑。设想一下其它情况的例子是很有趣的。观看一个人正在说话的无声片：除非我们懂唇语，否则我们很难判定片子是顺着放还是倒着放。(但如果说话的是意大利人，那他的手势将泄露这个秘密。)

物理学家一般认为，微观物理现象中的时间方向是由涉及到的大量粒子的集团行为决定的。让我们考虑一个著名的例子。把热水轻轻地倒入一杯冷水，我们知道将会发生什么：随着时间的增加，水会变温。在微观水平上看，热水中的分子运动得快，而冷水中的分子运动得慢，当热水和冷水接触时，快分子与慢分子碰撞。不久，所有分子最终以某一稳定的速度运动，既不快也不慢，从而水显出温热。

但分子碰撞时所遵循的物理定律的确是时间反演不变的，任何给定的碰撞都可以倒退着进行。两个匀速运动的分子碰撞以后，一个分子速度加快，另一个分子则缓慢地运动。

当然，没有人观察到温水自动地分成冷水层和热水层。然而，重要的是，物理定律并不禁止这种分离存在。但水分层又是极端不可能的。所有快分子将会发现，它们由于偶然的机会全在顶层，同时慢分子则全在底层。如果涉及到大量分子，自动分离的几率是令人吃惊的。

是的，这个几率令人吃惊地小，却不是零。如果我们长时间地观察一杯温水，时间超过我们宇宙的年龄，我们会发现，水在一瞬间分离成冰和嘶嘶作响的蒸汽。

因为一个复杂的微观现象可以分解成两个分子散射这样的许多微观现象，所以，物理学家得以把注意力集中到微观过程上。自从牛顿时代以来，物理学家们不顾一切地设法倒着进行所有的微

观过程，用以检验大自然是否在基本水平上具有时间方向。人们已经做了大量实验，还未直接观测到不能倒退进行的物理过程。时间反演不变性结果象宇称守恒在某一时期一样，逐渐成为一个不可冒犯的原理。

但物理学家的时间反演不变性不可能是正确的。我们感觉到时间的指向。另外，实验物理学家也发现了一些间接的事实，说明在某种情形下，弱相互作用神秘地破坏了时间反演不变性。

时间反演不变性的丧失

我在第三章已经说过，在丧失了宇称以后，受到极大震动的物理学家进而检验所有“神圣的”原理。他们很快发现，自然界也破坏电荷共轭不变性，发现物质和反物质的行为并非完全一样。

为了以下讨论方便，记宇称为P，电荷共轭为C，时间反演为T。你可能还记得物理学家发现宇称和电荷共轭破缺后，发现了自然界仍遵守组合的CP运算。在CP运算下，左反射成右，同时粒子变成反粒子。但几年以后，实验物理学家于1964年发现，在K介子衰变的弱相互作用中，自然界也偶尔违反CP不变性。

那么，所有这些与时间反演不变性有什么关系呢？在50年代最终证明了一条相当深奥的定理。这个定理说，由相对论量子场论描述的世界可能违反宇称、电荷共轭和时间反演不变性。只要大自然愿意，他可以尽情地那么做，但他决不能违反CPT复合运算下的不变性。更精确地说，作为理论物理学家，我可以很容易地写出违反C、P、T的物理定律，不必介意这些定律是否描述现实世界……然而在某种意义上，如果把左反射成右，用反粒子代替粒子，并颠倒时间的流向，从而将任何物理过程变成另一个物理过程，那么变换后的物理过程仍遵守我的物理定律。

这个定理称为CPT定理，它肯定被列为能被人类思维所接受和证明的最奇怪最深刻的定理之一。自从把相对论性不变性原理与量子原理结合而得到相对论量子场论后，它的家族是完美无缺

的。除非有一个完全不能预料的发展，物理学家极不愿意放弃CPT定理。

有了CPT定理并由实验观察到CP对称性的丧失，我们通过基本的逻辑推理得到，时间反演不变性T必定受到破坏。

总之，物理学家有强有力的间接事实说明，自然界不遵守时间反演不变性，但它很神秘，我们从未在任何地方发现他起作用。不求助于任何定理而说明时间反演不变性的丧失，将更令人满意。实验物理学家希望探测到微观过程和它的时间反演过程的实际差别。

时间与意识

你应该记住，
吻依然是吻，
叹息仅仅是叹息，
基本的事情就是这样，
时间在不断流逝。

——《时间流逝不已》H. 雷珀费尔德

在《可怕的对称》的最后几页中，我不得不放弃讨论时间的反演不变性，因为我对此并不理解，别人也不理解。作为一名物理学家，我明白关于时间反演不变性我对你说了些什么：除了一些亚原子粒子的衰变过程外，自然界的基本定律并不选择时间的方向。胡说，完全是胡说。作为一个头脑清醒的人，我完全明白时间有一个方向。我并不介意物理学家说些什么，时间的流逝并不以人的意志为转移。不管你喜欢还是不喜欢，时间流逝不已。

在物理学中，时间被简单地处理为一个参数：随着时间的改变，不同的物理量根据不同的物理定律而改变。爱因斯坦把时间和空间放在相同的地位来处理，他的工作使时空这个神秘的东西更加深奥难懂。作为头脑清醒的人，我同样明白时间和空间是不

同的：只要我愿意，我可以朝东或朝西走，但我只能朝一个时间方向前进。

屈从于不考虑意识这样一个基本的科学信条，我们正面临着绝境。物理学家谨慎地声明，他们的知识只局限于物理世界。世界可能被分为物理的和非物理的世界，对此我想不出更好的名词了。认识到这一点肯定可以被列为人类文明史上一个重要的转折点，它使西方科学的诞生成为可能。但是最终我们将超越这条界线，我相信对时间反演不变性的深刻理解，将使我们超越它。

当我们混合热水和冷水时，产生了一个时间之矢。而人类意识所感觉到的时间也产生一个时间之矢。它们是一样的吗？说不准什么道理，反正我不相信会发生这种事情。我没有充足的理由相信这一点，但我拒绝承认我们对时间的感觉是一个几率幻觉。

把我们对时间的感觉与某些亚原子粒子的衰变中时间反演不变的破缺联系在一起，这种可能性即便不是绝对不可能的，也是很难站住脚的。K 介子肯定不出现在我们的大脑中。而且，弱相互作用中的一个小小的效应，怎么可能控制大脑的全部工作呢？正如某些人所认为的那样，它能完全由电磁相互作用决定吗？物理学家对此不能提供任何答案。

不可否认，宇宙中存在着意识。一般地说，科学，特别是物理学，显然没有研究这个最为明显的现象。在我们存在中占中心地位的意识仍然是个谜。

最初的端倪来自量子物理学。从量子理论初创时期开始，人们就认识到，观察这一行动不可避免地影响被观察者（测不准原理的定性叙述），物理学家和哲学家已经对意识和量子的几率秘密之间可能的联系作过猜测。对这个论题有许多推测和臆想，但公正地说，占压倒多数的正在工作的物理学家发现，这方面的书面材料，如果不是不能理解的话，便是越来越难于理解。一个电视评论员曾采访著名物理学家 M. 哥德伯格，问他为什么从未在这个领域工作。他回答说，每次他决定思考这些问题时，他坐下来并拿出一张洁净的纸，削好铅笔——然后他想不出任何值得写下

的东西。正如我们目前对有关意识在物理学中所起的作用的理解的总结一样，这是一个很好的总结。

这个讨论最终归结为这样一个问题：科学能否理解生命；也就是说，在理性思维范围之外，是否有“生命力”（暂且这么说）。人类意识仅仅是一系列神经细胞交换脉冲吗？思维的大脑只是一堆夸克、胶子和轻子吗？我不这样认为。我有充足的理由吗？不，只是作为物理学家，我还不至于傲慢到认为物理学无所不包。当他把一切均归于世界的对称作用时，人类的意识包含于其中吗？意识是一种作用或者在对称作用之外？著名的英国天体物理学家 A. 爱丁顿爵士(1882——1944)，在晚年曾被一个奇怪的念头所困扰，他曾这样形容：在海边的一个小渔村里，一个爱好科学的渔民提出这样一条海洋法则：所有的鱼不超过 1 英寸长。但他没有认识到，村里所用的渔网的网眼全是 1 英寸的。物理现实在从我们的网中逃遁吗？我们的网能抓住意识吗？

这是一个头脑完全清醒的现代物理学家在夜晚的遐想，他有点害怕黑暗。但我最好到此为止，回到自己相信的东西上来，比如说对称。

野兽的本性

我们已经和燃烧之虎同行了很长一段路。开始发现天空并非在我们的头顶之上，后来知道对称在我们理解物理世界中起着决定性的作用。从旋转对称开始，物理学家继而使用了更加深奥的对称。但基本观点与动机是相同的。基础物理学家持这样一种信念：最终设计中将充满对称。

我们这个时代的物理学家，不在对称引导下将无法工作。爱因斯坦曾告诉我们怎样在物体突然下降中探求引力的秘密。仿效爱因斯坦，物理学家发现可以用对称来统一地构思物理世界。他们听到对称在耳边低语。随着物理学越来越远离日常经验而接近终极设计者的思想，我们的思想也离开了我们熟悉相处的东西，这

时我们需要燃烧之虎。

对于布莱克关于燃烧之虎的诗，评论家利尼尔·特瑞林指出，在前五行，诗人试图用上帝的天性来解释老虎的天性，但在最后两节，诗人的语气变了，上帝的天性却由老虎的天性来解释。怀着同样的心情，我认为终极设计者天性喜欢对称。

我们应该明白，当代的一些理论如大统一理论或超弦理论，有着丰富的内在数学结构，物理学家必须用对称的所有力量来构造它们。没有整个蓝图，我们没法构思这些理论，我们不能通过拟合一个又一个实验结果来构造它们。这些理论由对称暗示着。

基础物理学中的最新进展，是标志着我们寻求理解我们世界这一工作结束的开始，还是开始的结束呢？乐观主义者宣告，在将来某一天，我们会知道终极设计；而悲观主义者则在咕哝：我们象在玩拼图游戏的人，把四块拼在一起了，却没想到盒子中还有成百块。经典主义者会斥责我们的理论基于审美标准而非严格的事实。它们可能变得毫无结果，就象原子理论在德谟克利特时代一样。

他有别的选择吗？

> 当他评判他自己或别人的科学理论时，他就问自己，如果他是上帝，他能否按这个理论来建造宇宙。这一准则……说明了爱因斯坦对宇宙的根本的简单性与美的信仰。美就在那儿等待着我们去发现，只有对此有深厚的宗教和艺术信仰的人才能构造理论。这些理论的最令人吃惊之处是它们的美，远远在它们的辉煌成就之上。
>
> ——B. 霍夫曼

> 无神论者发现，宇宙建造得如此之美，他们完全不需要创世者。以此否认上帝的存在，据说是对

上帝最好的赞美。

——M. 普鲁斯特

奔向终极设计的基础物理学家，开始面临唯一性的问题。如果我们认为终极设计是最美的一个，我们能说它是唯一可能的一个吗？爱因斯坦曾经说过："我真正感兴趣的是上帝能否用别的方法来建造这个世界；也就是说，逻辑上的简单性必然排除其他可能吗？"在基础物理学中工作的极大多数人都持有这种观点，我们想知道他是否有别的选择。

大统一理论经不住唯一性检验。我们可以用我们喜欢的任何群来构造它，并且群一旦决定了，我们还可以选择费米子所属的表示。如果真的选择了 SU（5），为什么这样选择？如果没选 SU（4）、SU（6）、SU（497），为什么不选择呢？我们不知道为什么？当然，绝大多数选择会导致一个和我们的了解不一样的世界，但这已离题了。

"如果给定了 45 个费米子场，我怎样来描述这个宇宙呢？我能选取 SU（5）并将费米子分成三代吗？或者还有更好的设计？"一些理论家对自己提出了这类问题，并以考虑它为乐趣。不寻常的是，利用基于一般原理的少数几个规则，选择的范围能可观地缩小。但谁来决定有 45 个费米子场呢？

许多基础物理学家相信，利用更加奇特的对称，我们能证明世界的行为只有一种选择。基础物理学家想证明我们的世界是仅有可能的世界，他们被这个极为傲慢的想法弄得神魂颠倒。（事实上，这个观点并不完全新奇。早在 18 世纪，莱布尼兹就被世界为什么以这样的方式存在所困扰。他感到上帝肯定有充足的理由来建造我们这个特殊的世界，而不是其他无限可能的世界中的一个。）

读者不要把证明上帝没有别的选择与另一讨论相混淆，这类讨论被称为"人择原理"。他们声称世界必须这样的，因为在别的情况下，象人类这样的智能生物不可能存在。

例如，请考虑一个星球的爆炸。星球的两个质子间的强相互

作用要把这两个质子拉在一起，同时它们之间的电磁作用力要把它们分开。正如我在第二章讨论的那样，如果强作用力稍强一点，两个质子很快跑到一起来并释放能量。星球不久将爆炸，使稳定的星球演化与生物进化不可能得以进行。

人择原理的讨论的倡仪者提出了内在的平衡，并且叫嚷智能生物的存在要求强相互作用不能超过某一适当的量。如果强相互作用力弱于实在的量，他们试图找到另一种情形，在此情形下，智能生物所要求的舒适遭到严重的破坏。他们希望用这种方式来证明，物理学的基本定律必须象现在这样。

问题是，人择原理的讨论只是说明，为了维持我们知道的那种生活，世界必须达到复杂的平衡。世界以这种方式存在是因为它是以这样的方式存在的。虽然人择原理的讨论经常是非常有趣的，包括我在内的许多物理学家却并不认为它们在学术上是令人满意的。

从人择原理的观点看，终极设计者是一个修补匠，他一个又一个地试着他的设计，不断修改，直到找到一个适于智能生物生存的设计。生活在一个计算机辅助设计的时代，工程师只要简单地按按键钮，便能试着检验许多不同的设计。我甚至能想象他确实建造了无限多个宇宙，对群与表示的无限多种可能选择每一种造一个。嗨，基于 SU（4）的宇宙运转得不太好。基于 SU（6）的宇宙则更糟糕，这个我昨天已试过。嘿！看看这个，基于 SU（5）的，它好象成为一个有趣的宇宙。

象在基础物理学中的许多同事一样，我喜欢爱因斯坦的观点。我喜欢这么想：在知道要在何处建何物后，建筑师能立即宣称只有一种可能。他肯定被美的令人激动的力量所驱使，从而去寻找这个唯一的设计。

上帝没有其他的选择，这个稍微有点神秘的观点至今仍然只是一个心爱的梦想。我们仍在摸索，去发现有关的美学准则，但我们毫不怀疑，对称将照亮我们寻求理解终极设计者思想的道路。

第九章附录

对于有数学爱好的读者，我要表明为什么通过把 SO（3）的两个界定表示胶合在一起而得到的 9 个实体，会分裂为不同的集。

让我们看一看这 9 个：Ⓑ🅁，Ⓡ🅈，Ⓨ🅁，等等。选择任何一个实体，并对换在圆和方格中标明的颜色。实体Ⓡ🅁不变化，但是实体Ⓡ🅈变成了Ⓨ🅁，而实体Ⓨ🅁变成Ⓡ🅈。数学家们握有应付线性组合Ⓡ🅈+Ⓨ🅁和Ⓡ🅈−Ⓨ🅁的关键思想，而不是应付Ⓡ🅈和Ⓨ🅁的关键思想。

这究竟为什么是一个好主意呢？这在于，当我们对换标在圆和方格中的颜色时，数学家们称之为奇数的组合Ⓡ🅈−Ⓨ🅁就变成了同一（Ⓡ🅈 −Ⓨ🅁）相等的Ⓨ🅁−Ⓡ🅈。换句话说，奇数组合变成了减号。与此对应，数学家们称为偶数组合的Ⓡ🅈+Ⓨ🅁就变成了它本身，即Ⓨ🅁+Ⓡ🅈。换句话说，它一成不变。实体Ⓡ🅁、Ⓨ🅈和Ⓑ🅑在这种意义上也是偶数：当标明在圆和方格中的颜色对换时，这些实体没有变化。

因此，我们已经成功地把 9 个实体分成了两个集：一个集包

括3个奇数组合，另一个集则包括6个偶数组合。很清楚，有3个奇数组合；事实上，我们可以容易地把它们列出：Ⓡ[Y]－Ⓨ[R]，Ⓨ[B]－Ⓑ[Y]，和Ⓑ[R]－Ⓡ[B]。与此相似，我们可以列出偶数组合。

很好。现在我们必须研究一下这些组合怎样由一种旋来变换。

请考虑一个把方位 $\vec{X}$ 变为 $a\vec{X}+b\vec{Y}+c\vec{Z}$ 的旋。（正如在正文中解释的那样，a、b、c 就是很好的古老而平凡的数目。）

然后，实体Ⓡ[R] 变换为线性组合：

(aⓇ+bⓎ+cⒷ) (a[R]+b[Y]+c[B])

$=a^2$Ⓡ[R]$+ab$Ⓡ[Y]$+ac$Ⓡ[B]$+ba$Ⓨ[R]

$+b^2$Ⓨ[Y]$+bc$Ⓨ[B]$+ca$Ⓑ[R]$+cb$Ⓑ[Y]$+c^2$Ⓑ[B]

这里没有做出奇幻的事情。我们只须给出 (aⓇ+bⓎ+cⒷ) (a[R]+b[Y]+c[B])。因此，第一个数 a^2Ⓡ[R] 是以 a[R] 乘 aⓇ 得出的，等等。

你瞧，好了，你刚向我表明，朴素的实体Ⓡ[R] 被一个旋变成了一团糟。那么又怎么样呢？

幸运的是，我们无须真正地对付那个糟糕的组合。我们所要做的一切是注意它仅包含偶数组合。例如，实体Ⓡ[Y] 因而好象乘上了 ab 数，而实体Ⓨ[R] 好象乘上了 ba 数，当然，ba 和 ab 是一样的（a 和 b 表示数）。也就是说，出现的是偶数组合Ⓡ[Y]+Ⓨ[R] 而不是奇数组合Ⓡ[Y]－Ⓨ[R]。

等等，这完全是显而易见的！我们在看着一个偶数组合Ⓡ[R] 的变换。要出现一个偶数组合，就要一个减号出现。但是一个减号是不能从稀薄的空气中爆出来的！

我们在此做到了。我们刚刚证明了，偶数组合只变换为偶数组合。与此相似，奇数组合只变换为奇数组合。偶数和奇数组合的分野说明了，为什么在一般情况下，通过把两个表示胶合在一起而得到的一个表示，会分裂成为更小的表示的实质。

我想向读者介绍一下有关的论点以达到自足，而不想继续进行彻底的数学分析。因此，我不会继续说明6个偶数组合为什么进一步分裂为一组5个组合集和一组1个组合集。

让我们看一看我们那可笑的类比来作为总结。地球外的人意识到，他应该按照物体所拥有多少条腿来给它们分类。由于南瓜没有腿，所以它就不能转化为王子。这里，我们更高深复杂一些：我们根据组合是否有一减号来给它们分类。

你已经学到了比你可能意识到的更多的关于群论的知识。例如，在第十三章，我指出，终极设计用到了 10 维空间旋转群 SO (10)。好了，现在你实际上可以设想，怎样把 SO (10) 的两种定义表示胶合在一起。目前，在 10×10 中有 10 种可能的颜色和 100 个实体：ⓇⓇ，ⓇⓎ，等等。有多少个奇数组合呢？让我们数一数。我们可以选出 10 种可能的颜色放在圆里。在圆带色后，我们将剩下的 9 种可能的颜色放在方格里（因为我们在一个奇数组合中不能为圆和方格选择同样的颜色：ⓇⓇ－ⓇⓇ＝0!）。

进一步，由于Ⓡ Ⓨ 和Ⓨ Ⓡ 同在一个组合里出现，所以我们应该除 2，以避免重复计数。因此，我们共有 (10×9) /2＝45 个奇数组合。物理学家们利用这一事实推出，如果世界确实由一个以 SO (10) 为基础的规范理论描述的话，那么就必定有 45 个规范玻色子。（在第十二章中讨论了规范理论和规范玻色子。）

在 100－45＝55 个对称组合中，有一个组合变换成它自己。（我在此不解释这一数学事实。）因此，在 SO (10) 中，我们得到：10×10＝1⊕45⊕54。（瞧，群论并非多么困难。）

注　　释

在下面的注释中，一些是索引性的参考，其它则丰富或补充正文中讲述的内容。

第一章：对美的探索

- 第 9 页 · 引自 Bondi 的段落可以在Einstein: The Man and His Achievement 一书中找到，该书由 G. J. Whitrow 编辑 (New York: Dover, 1973)。
- 第 9 页 · B. Hoffman 在Albert Einstein: Creator and Rebel (New York: Viking Press, 1972) 一书中描述了爱因斯坦判断物理理论的标准。在描述爱因斯坦的工作时，一度曾是爱因斯坦的合作者的本书作者说："爱因斯坦的深邃思想的实质在于他的简单性，他的科学的实质则在于他的艺术性——即他对美的现象的感觉。"
- 第 11 页 · 爱因斯坦在写给他的朋友 Maurice Solovine 的一封

信中，表达了他对显而易见的事实，即世界有一个设计，而设计可以为我们所理解的惊奇。请参看 G. Holton 在Einstein: A Centenary Volume 一书中写到的："精确地说，什么是'思考'？爱因斯坦的回答。"该书由 A. P. French 编辑 (Cambridge, Mass.: Harvard University Press, 1979)。

- 第 13 页 · 当然，唯象学定律和基础学定律之间的区别并无明显界线。爱因斯坦把一度被认为是基础的牛顿的引力定律取来，作为他的引力理论的唯象学的表现。但是，一些理论物理学家最近证明，爱因斯坦的理论可能出自一个更深的理论。无论物理学家们如何骄矜，被一代人尊为基础的东西，可能被后一代人认为是唯象的。

第二章：对称与简单

- 第 15 页 · 在物理学和数学中关于对称的一本经典而过时的参考书，是 H. Weyl 著的Symmetry (Princeton, N. J.: Princeton University Press, 1952)，有中译本《对称》。也请参看 E. P. Wigner 著的Symmetries and Reflections (Bloomington, Ind.: Indiana University Press, 1967)。
- 第 23 页 · 对群星为什么缓慢燃烧的解释，源于 Hans Bethe 和其他人。要看对这一点的精彩的技术性讲述，请参看 D. D. Clayton 所著 Principles of Stellar Evolution and Nucleosynthesis (New York: McGraw-Hill, 1968)。
- 第 24 页 · 在The Rule of large Numbers (大数法则)一节中，我谈到了宇宙中巨大的光子和质子数。读者可能对是谁计数了宇宙中所有那些光子和质子感到惊奇，却从不对谁安排了它们介意。对这些数目的统计，完全是事先没有计划的。约在 20 年前，新泽西州赫姆道尔的贝尔电话实验室的两位工程师 Arno Penzias 和 Robert Wilson，建造了一个灵敏天线。使他们感到沮丧的是，尽管他们付出了巨大的努力（顺便提一下，这包括

周期性地清除一些喜欢在天线上落脚的鸽子留在上面的粪便），但是，它却总是产生一种嗡嗡的声音。结果证明，他们事实上在聆听宇宙之曲。宇宙很象在微波炉中的空间，充满了微波辐射，但当然其密度低得多。这一伟大发现赢得了诺贝尔奖，它也帮助建立了乔治·格拉肖的宇宙起源于大爆炸的理论。在探测微波辐射中，Penzias 和 Wilson 实际上看到了发生在很早很早以前的一次爆炸的微光。微波辐射象无线电和光辐射一样，是一种电磁辐射。从电磁理论中可以知道一个给定强度的微波辐射中的光子数密度，在大略知道宇宙大小的情况下，物理学家只须把两个数乘起来，即可得到宇宙中光子的数量。顺便谈谈，自从星球诞生以来，宇宙中由星球产生的光子数，更不用提由我们所有的电灯产生的光子数，与包含在宇宙微波背景中的光子数相比是极小的。

要确定质子数，人们只需将一个典型星球（如太阳）中的质子数，在一个典型的星系（如我们的银河系）中的质子数，和在可以观察到的宇宙中的星系数乘在一起即可。但是，由于通过测量宇宙微波可以很精确地知道光子的数密度，我们最好通过首先确定质子对光子的数密度比来间接地确定质子数。在早期的宇宙中（根据人类的标准为早期，但根据粒子物理学的标准则为晚期），质子和中子被烤炙成了各种各样的原子核。大部分质子成功地同电子结合，因而形成了氢原子；然而，一些质子同中子发生碰撞并粘在一起，例如，形成了一个氦原子核。一位专业厨师尝一尝一个蛋糕，就可容易地推断出烘制过程中放入的面粉相对于黄油的数量。与此完全相同，天文学家们现在在天空中观察到的氦的量，把光子对质子的比率告诉了我们。顺便谈谈，烹调的比喻在该例中非常形象：在烘制中，化学反应重新组合分子。在早期宇宙中，原子核反应把质子和中子结合了起来。

第三章：镜中的世界

- 第 28 页 · 关于餐桌上传递食物的方向的引语出自 Judith Martin 所著的Miss Manner's Guide to Exctuciatingly Correct Behavior (New York: Warner Books, 1982)，第 130 页。
- 第 30 页 · 对花鳞鱼科的描述出自 G. Murchie 所著的The Seven Mysteries of Life (Boston: Houghton Mifflin, 1981)，第 134 页。
- 第 32 页 · 我想对我在普林斯顿的一个艺术史教授 John Martin 表示感谢，感谢他和我的一次很有裨益的谈话，其中，他告诉我伦勃朗 (Rembrandt) 如何在他的蚀刻画中对左从于右的传统作法毫不在乎。
- 第 32 页 · 男人戴的带条纹的领带提供了另一个关于左和右的人类习惯的有趣范例。在美国近几年出现了条纹从右肩到左臀的习惯。在英国，事情恰恰相反。几年前，一位闻名的美国服装大师 Brooks Brothers 决定开发一种其中条纹方向倒过来的条纹领带。这种新样式只持续了一个季度。Harvard Magazine (1985) 中的一个报告表明，这样一种完全人为的习惯，对我们具有很强的魔力。
- 第 32 页 · 在诸如西点军校举行的军人婚礼上，新娘站在新郎的右边，以免在他拔剑时被碰伤。
- 第 34 页 · 我已经讲述了由 J. Bernstein 在 A Comprehensible World (New York: Random House, 1967) 中阐明的宇称破缺 A Comprehensible World，第 35 页，请参看 C. N. Yang 的 Elementary Particles (Princeton, N. J.: Princeton University Press, 1961)，该书以另一种方式讲述了对称和宇称破缺。
- 第 39 页 · 有关吴女士 (Madame Wu) 的传记简介，请参看 G. Lubkin 发表在 Smithsonian (1971 年 1 月版) 上的 "Chien-Shiung Wu, the First Lady of Physics Research" 一文。关于对

弱相互作用的实验史的讲述，请参看 C. S. Wu 所写的 "Subtleties and Surprise: The Contribution of Beta Decay to an Understanding of the Weak Interactions" 一文，纽约科学院年鉴，第 294 卷，1977 年，《弱相互作用五十年》(Five Decades of Weak Interactions, Annals of the New York Academy of Sciences, Vol. 294, 1977.)

·第 39 页· 吴女士当然有一个迷人的故事要讲述，我事先取得一张停车证，驱车到哥伦比亚大学同她闲聊。吴女士精力旺盛、容貌美丽、仪态华贵。她给人的形象就是人们对一位首席实验原子核物理学家所有的完全学究化的形象。当她回忆起自己一生中遇到的人和事时，她兴奋地挥动着她那双纤柔的手，咯咯笑出声来。

我们很容易便交谈起来。她回忆道，当她还是一个小姑娘时，她惊讶地望着父亲在 1911 年革命中使用的剑和枪。在第二次世界大战期间，她参加了曼哈顿计划的工作（她笑着说："就在曼哈顿这儿，在藏在 136 号大街和 137 号大街之间的一家汽车展览室中的一个实验室里。"）当我问及她那在其中第一次看到的镜像世界和我们的世界之间的内在区别的著名实验时，她双眼一亮，带着明显的快意说，"那太有趣啦"！但是，一个几乎是在满清朝代出生在一个封建的和男人统治的社会中的姑娘，如何最后被称为"实验原子核物理学的执政女皇"，并成为美国物理协会的第一任妇女主席的呢？

吴女士解释说，如出生在座落于长江口的浏河，由于位置优越，浏河镇在历史上为皇家出海远征的出发地点，后来成为中国首批受到西方影响的地方之一。因为积沙严重，该镇最后失去了其作为一个港口的重要性，让位于沿长江而上 20 英里处的另一个小镇上海。吴女士的父亲身赴上海，在一家外国贸易公司里做职员。他被灌输了满脑子各种各样的现代思想，结果，一些年之后，他决定返回家乡，设立一所女子中学，这使他的父亲很不高兴。吴女士回忆说，她父亲在上海学会了装造收音机。从 1930

年左右开始，浏河可以收到上海的广播，她父亲因此为农民装造收音机。

但是，她的孩提时代远非完全平静。由于海岸海盗和军阀的猖獗，浏河再三遭到劫难。然而，她比大部分人要幸运得多，于1936年结束了在南京的国立中央大学的大学学习。令人惊奇的是，这所大学可能建立于1902年。她在一位曾就读于密执安大学的妇女的领导下，在浙江大学对X-射线作了细致的研究，之后，吴女士获得在密执安深造的机会。然而，刚到达旧金山，一个朋友便带她去看伯克利大学，她当即便喜爱上了这里的校园。吴女士进而回忆说，她很想投身于美国生活，她了解到，来自中国的大部分学生由于某种原因都去了密执安。她决定不去。她遇到的一个学物理的学生带她去见雷蒙德·伯执（Raymond Birge），一般来说，伯执现在是以在伯克利大学设立物理系而成为一名受人推崇的物理学家。吴女士回忆说，伯执"非常、非常好"，他甚至在上课已经好几周的情况下还允许她登记入学。

1939年，两位德国物理学家奥托·哈恩（Otto Hahn）和弗里兹·斯特拉斯曼（Fritz Strassmann），成功地使铀原子核发生裂变，从而导致大量能量释放的消息传到美国。发明并改进粒子加速器的伟大的南达科他州人厄内斯特·劳伦斯，让吴女士立即工作。如果没有粒子加速器，现代核和粒子物理学都是不可能的。她被批准工作了，而且当费米建的一个原子反应堆几小时后停止工作时，她获得的专长在后来的曼哈顿计划中便起到了至关重要的作用。在1942年，吴女士在位于田园式的麻萨诸塞州的著名女子院校即史密斯学院任教职。如果厄内斯特·劳伦斯不来拜访的话，这可能就成了她的研究生涯的结束。他说她的确应该做研究工作。不久以后，哈佛大学、哥伦比亚大学、普林斯顿大学、麻省理工学院和其它几个研究中心为她提供了研究职位，这是劳伦斯的影响。她到了普林斯顿大学，发现"男人们非常好"，尤其是核物理学家亨利·史密斯，他努力在全是男性的研究机构中给她安排了一个位置。（后来，她成为被普林斯顿

大学授予荣誉学位的第一个妇女。）当哥伦比亚大学第2年又请她时，吴女士决定搬到纽约。

人们常常向处于这种地位的吴女士提出关于妇女搞物理学的问题。今天的妇女对她们能够做任何事情充满信心，她对此非常高兴。吴女士在想到女物理学家们已经有重要的影响时惊呼，“在如此考验人的环境下，如此少的人却做出如此大的贡献，以前从未有过”！在她的生涯中，每个人对她都很好，她对此感到幸运。与人们可能猜测的恰恰相反，她在中国也没遭到敌对。在她的大学同乡同学中间有一种强烈的意识，即因为中国如此落后，所以男女都应该在各个领域里努力工作。在她抵达美国之后，她惊讶地了解到，妇女被排除在大部分主要大学之外。当许多年之后她的一个女研究生告诉她说，男孩子不喜欢与学习物理的女孩子约会时，她感到更为惊讶。吴女士在伯克利是搞物理的唯一妇女，每一个人都“极富助益和善良”。教她量子物理的罗伯特·奥本海默（Robert Oppenheimer）是一位“十足的绅士”。

其他女物理学家并非都如此幸运，吴女士对此很伤心。在德国工作的一位奥地利物理学家和研究放射性衰变的先锋 Lise Meitner（1878—1968），被迫在物理大楼外的一间木匠房里做她的实验。Meitner 是弄懂原子核裂变的第一个人。当她访问哥伦比亚大学时，吴女士知道老年人应该常洗澡，所以她经常问 Meitner 是否想去。Meitner 歪头回答说，不，她已经练出来了。在木匠房里没有女洗澡间。

- 第 41 页·埃利斯的许多工作都是同 W. A. Wooster 一起做的。
- 第 43 页·“Cosmic Gall”一诗可以在 John Updike 的 Telephone Poles and Other Poems 诗集（New York: knopf, 1965）中找到。
- 第 43 页·作为对昨天的物理学如何能够成为明天的技术的一种阐释，有人提出，可以用虚幻的中微子来探测石油。这个想法是，使一束中微子穿过圆形的地球，并在穿过一定距离时对

它加以研究。由于石油和岩石具有不同的原子核结构，所以穿过的中微子数目将在原则上告诉我们，中微子束是否穿过了一个石油矿。在目前产生和探测中微子困难重重的情况下，这一设想仍富有相当大的未来色彩。但是谁知道呢，中微子可能会有一天使我们能够看到现在仍然还探测不到的地方。（顺便谈谈，另一种粒子束即 μ 子束已被成功地用来探测金字塔内的暗室。）

- 第 43 页 · 在半个世纪之内，为了确定中子是否具有微弱的质量，物理学家们以不断增长的精确度，再三重复使用了埃利斯的测量方法。正如我所阐释的那样，实验围绕着最大的电子能量是否少于 E^*。（一组苏联科学家宣布中子质量不为零。然而，其它实验小组至今未能证实这一发现。）

第四章：时间与空间联姻

- 第 60 页 · 该诗出自《宋诗注释文集》（中文版），诗由陈与义所作（北京：人民文学出版社，1979），第 148 页。本书中的译文由该作者译。
- 第 64 页 · 回顾电磁理论的发展时，我参考了以下历史文献：B. Morgan 所著的 Men and Discoveries in Electricity (London: Wyman and Sons, 1952)；G. Holton 和 D. H. D. Roller 著的Foundations of Modern Physical Science (Reading, Mass.: Addison-Wesley, 1958)；J. C. Maxwell 著的Physical Thought from the Pre-Socratics to the Quantum Physicists，这是 S. Sambursky 编辑的一本文集 (New York: Pica Press, 1975)。
- 第 64 页 · “电的”一词来自表示琥珀的希腊文。
- 第 64 页 · 儿童无一例外地对磁铁着迷。这是一种甚至在两个彼此没有接触的物体之间发生作用的力。为了解释这一现象，罗马诗人卢克莱修提出，从天然磁石中源源流出“一束种子”，“猛力击散”周围的空气。这形成了一种真空，“铁原子长驱直入”其

中。(尽管这一有趣的理论是错误的，卢克莱修表现出自己对真空效应的令人惊讶的理解。)

- 第 64 页 · 1600 年，吉尔伯特 (Gilbert) 在物理学史中最富有影响的一本书里发表了自己的研究成果。事实上，宗教法庭控告伽利略许多罪行，其中就有拥有一册吉尔伯特所著的《磁铁》(De magnete) 一书。顺便提一下，在 Charles Howard 指挥下的英国舰队于 1588 年击败西班牙的无敌舰队也是值得一提的。这种商业和军事利益刺激研究的事情既非第一次，也不是最后一次。
- 第 66 页 · 在电磁场附近电流通过电线是否会引起电线移动的问题，是由威廉姆·沃拉斯敦提出的，现在除了科学史家外已为大家忘记。沃拉斯敦 (Wollaston) (1366—1828)。
- 第 73 页 · 1883 年，当爱因斯坦 8 岁时，美国物理学家阿尔伯特·迈克尔逊和爱德华·莫利受到麦克斯韦向美国海军所作的一次咨询报告的鼓舞而完成一项出色的实验，以确定光速，这同观察家们的测量方法相对来说是一样的。教科书常常把该实验描写为物理学发展中最关键的实验之一，的确，这两位物理学家发现的令人吃惊的结果，在物理界引起很大的轰动。然而，爱因斯坦在他的著作中没有留下他知道迈克尔逊和莫利实验的丝毫痕迹。正如我所解释的那样，他可能纯粹通过理论推理和他们得出了相同的结论。爱因斯坦在 1905 年之前是否知道这一实验的问题，早就引起了科学史家的兴趣。爱因斯坦的主要传记作家亚伯拉罕·佩思 (Abraham Pais) 筛选了许多历史记载，得出结论说，是的，爱因斯坦确实知道。请参看 A. Pais 著的 Subtle Is the Lord: The Science and the Life of Albert Einstein (New York: Oxford University Press, 1982)。
- 第 73 页 · 另一件历史事件涉及到才华横溢的法国人 Armand Hippolyte Louis Fizeau 。1851 年，他测量了流水中的光速，但是，在爱因斯坦的理论发表以前的半个世纪中，他的测量结果没有得到解释。

·第75页·1928年，爱因斯坦向皮亚杰（Piaget）。指出，他应该研究儿童如何感知时间。请参看J. Piaget著的The Child's Conception of Time（New York：Ballantine，1971），第vii页。

·第75页·关于Miss Bright的五行打油诗的作者是一位真菌专家。这在W. S. Baring-Gould著的The Lure of the Limerick：A Uninhibited History（New York：C. N. Potter，1967《五行打油诗的诱惑：一门没有禁界的历史》）里可找到。

·第76页·麦哲伦的航行活动记述在S. 茨威格著的The Story of Magellan（Philadelphia：Century Book Bindery，1983，《麦哲伦的故事》）中。顺便提一下，刘易斯·卡洛尔（Lewis Carroll）是那些在1878年建议采用国际时区来解决麦哲伦如何失去一天之谜的人中的一个。

·第76页·在诸如此类的讲述和物理教科书中，人们有把任何一种给定的发展都归功于一个物理学家的倾向。由于某种需要，人们不会把科学中随处可见的死胡同堆砌罗列进教科书；对这个问题，请参看一篇专业历史文献。

通过对电磁学历史的长篇累牍的回顾，我希望给读者传达世纪之交物理学界流行的一种时代精神。重要的是，电磁理论已经发展到了极高的程度，相对论性不变性问题自然流入爱因斯坦一代人的意识之中。例如，众所周知，艺术史家喜欢拿同一种论调来解释，为什么巴洛克影响会或多或少地自然在不同的国家浮现。与此类似，除爱因斯坦之外，一些物理学家——法国的彭伽勒（Henri Poincare）、荷兰的洛伦兹（Henrich Lorentz）、英国的（George Fitzgerald）、德国的（Woldemar Voigt）和闵可夫斯基（Herman Minkowski）——都对相对论作过深思。然而，爱因斯坦在推导相对论性不变性的深远的物理意义上走得最远。

·第77页·这里的一些要点是写给读者中那些想更多了解爱因斯坦对力学的修正的人。当然，力学的中心思想是，一个运动物体的速度是由该物体运动的距离除以逝去的时间决定的。但

这是什么时间呢？

我们应该采用物体的固有时间呢？还是采用观测者看着物体运动所计的时间？物理学家们摒弃了他们的偏见，把这两种可能的定义分别称为速度和非固有速度。在日常生活中，这种区别是完全可以忽略的。然而，对于高速运动的物体来说，固有和非固有速度可能相差万里。

光子为我们提供了最极端的实例。我们记得，光子携带的时钟总是定在正午。光子的固有时间不变。因此，光的固有速度实际上是无限的。与此相反，光的非固有速度则是完全有限的，约等于 300，000 公里/秒。一些外行人对相对论的一个方面特别着迷：存在着光速强加给的一种速度极限。事实上，这一速度极限指的是光的非固有速度，而不是固有速度。

在力学中，一个运动的物体的动量等于它的质量与它的速度的积，这是一个著名的推算公式。运动着的载货卡车具有比在它旁边运动的带客轿车更多的动量。在思考高速运动的物体时，爱因斯坦不得不确定，动量的定义是应涉及到固有速度，还是涉及到非固有速度。

在物理学中，选用哪一个定义，受到看起来等式应尽可能“纯洁”和对称这一愿望的影响。实质上，在相关的变换下（这种情况下是洛仑兹变换），物理学家需要物理量来进行精妙的变换。固有速度轻松地赢得了这次争夺。在一个洛仑兹变换下，固有速度定义中的共同特性，即运动物体的固有时间毫发未变。也就是说，一个运动物体的固有时间，在定义上是该运动物体的一种内在特性，并不以观测者的改变而改变。另一方面，由观测者计数的逝去时间则有赖于观测者。爱因斯坦选用固有速度来定义动量，这一决择无情地使他得出了他的公式：$E=mc^2$。因为在洛仑兹变换下，能量与动量是相关的，因此，动量的定义一旦确定，能量的定义随之便也确定下来。

另一种重要的考虑是，如果动量是以固有速度而不以非固有速度定义，它便守恒。（请参看第八章中对守恒定律及其同对

称的密切联系的考察与讨论。）

从动量公式，即一个物体的动量等于其质量与其固有速度的积，可以逻辑推导出，一个有质量的物体不能以光速运动。如果它能的话，它就会具有无限的固有速度，也便具有无限的动量。由于相对于固有速度的动量是一种可测的物理量，所以，一个物体不允许带有无限的动量。反之，诸如光子或中微子这样的一个无质量的粒子，要带有一点动量，必须要以光速运动。

第五章：幸福的思想

- 第 85 页 · 爱因斯坦在 1921 年 9 月 30 日写给 E. Zschimmer 的一封信中，表达了他对“相对性”一词的厌恶。（如 G. Holton 所引，出处同上。）
- 第 85 页 · 请参看 lawrence Durrell 著的Balthazar 一书（New York：Dutton，1958），第 9、142 页。
- 第 85 页 · 在他那篇发表在由 G. Holton 和 Y. Alkana）编写的 Albert Einstein，Historical and Cultural Perspectives 一书里的文章 Introduction：Einstein and the shaping of Our Imagination（Princeton，N. J.：Princeton University Press，1982）中，Holton 列举和分析了已经成为我们文化的一部分的爱因斯坦著作中的错误概念。据他估计，成功吸收爱因斯坦的思想的作家是威廉·福克纳（在《声音和骚动》中），Holton 写道，在福克纳那里，“要判断现代物理学痕迹的好坏是徒劳的，因为这些痕迹因素被用来溶进了新的组合。”
- 第 91 页 · S. Weinberg 著的Gravitation and Cosmology（New York：Wiley，1972）。
- 第 92 页 · A. Peters 设计的佩特斯地图是美国友谊出版社（Friendship Press）出版的；在 Harper's 杂志的 1984 年 4 月刊中可以找到对此的描述。感谢 Peggy Gallagher 使我注意参考该杂志。

·第 94 页·顺便谈谈，牛顿突发奇想，认为引力能使光弯曲，而光是由微小的、密集的球体构成的。

·第 97 页·1884 年，哈佛大学修建了美国第一座完全致力于物理学的大楼，吸引了享有名气的美国早期实验学家 Edwin. P. Hall 离开约翰·霍普金斯大学。他做过一些重要的电磁测量工作，但他现在对探测牛顿自由落体定律的可能偏差产生了浓厚的兴趣。为了给他提供设备，哈佛大学在新建大楼装建了一座约 20 米高的塔。自然，Hall 没有发现任何有趣的效应，75 年之后该塔才被派上合理的用场。

·第 98 页·要真正理解黑洞，我们必须把握牛顿和爱因斯坦之间的本质区别。

根据牛顿的理论，一个有质量的物体在其周围产生一个引力场，这就是事情的全部。对于爱因斯坦，情况要复杂得多。自麦克斯韦以来的物理学家们认为，一个给定场含有能量。例如，让我们来考察一下一颗行星周围的引力场。因为根据爱因斯坦的早期著述，能量等于质量，而引力场含有质量，因而也就产生一个引力场，此场又转而产生另一个引力场，此场又产生另一个引力场，以此类推，以致无穷。这种引力场的产生就好象利滚利钱财越生越多。这样，爱因斯坦的理论提供了一种所谓的非线性理论的范例；牛顿的理论则是线性的。正常情况下，出现的派生引力场是很小的，而爱因斯坦与牛顿的理论之间的差别也是很小的。然而，在一个黑洞的周围，许多派生的引力场堆积起来，导致时空的极大偏差。

·第 100 页· Hubble 的工作是建立在 Vesto Slipher 的早期工作和他的同事 Milton Humason 的工作基础之上的。请参看 H. Pagels 所著 Perfect Symmetry 一书 (New York: Simon 82 Schuster, 1985,《完美对称》)。

·第 101 页·爱因斯坦的著述和贝多芬的作品之间的比较出自 A. Pais 著的Subtle Is the Lord: The Science and the Life of ALbert Einstein (New York: Oxford University Press, 1982)。

Pais 对贝多芬的第 135 号作品即 Opus 135 所富有的贴切和巧妙的主题作了一番对比描述。

第六章：对称性统治设计

- 第 105 页·这几页中的数据摘录自 C. N. Yang 的 Einstein and His Impact on the Physics of the Second Half of the Twentieth Century，CERN report，1979。
- 第 106 页·爱因斯坦的理论看起来很简单。牛顿的理论在用牛顿所谓的引力场来表达时看起来也很简单。但是，用牛顿的场来表达的爱因斯坦理论，却成了由无数词藻堆砌起来的惹人讨厌的废物。我可以安全无误地打赌说，离开一种对称原理的帮助，没有人会对这一无穷级数妄加猜度。

第七章：作用量

- 第 115 页·与作用量原理同步发展的数学，已从物理学扩展到了战略规划在其中占有一席之地的其它许多领域。赛跑运动员想决定完成比赛所需时间的历史。的确，此类关于赛跑的分析发表在一家物理杂志上。在我们的讨论中已提到经济学的关联。著名经济学家保罗·沙米尔森 (Paul Samuelson) 在 1970 年 12 月 11 日的诺贝尔奖演说的开始时就讨论了物理学中的作用原理。他继而谈到了其输出被 99 种不同的输入控制着的一家利润不断扩大的公司；他指出：

  “(一个) 经济学家可以在原则上记录…99 项需求把公司购进的每项输入量和描述输入价格的 99 个变数联系起来…贮存界定百维空间中的 99 个不同表面的点滴信息是多么巨大的任务！所看到的需求曲线…本身实则为一个最大利润问题的解决方法（承认这一点便使经济学可以变为实际经营）。”
- 第 117 页·一些人幻想着最小作用量原理既可以适用于非物理

学界，又可以适用于物理学界。他们想象着某地有一家囊括所有可能史料的缩微胶片图书馆。在一段历史中，Romulus 和 Remus 没有被人抚养，而是被一只母狼吞噬掉了。在另一段历史中，拿破仑击败了威灵顿。人们给每一段历史排上了号码。在这无数段历史中，选取了号码最小的一段！

第八章：女士与虎

- 第 122 页 · 有关诺特尔的生活经历，我是从 A. Dick 著的她的传记 Emmy Noether (1882－1935) 一书（本书由 H. I. BLocher 译成译文 Boston：Birkhauser，1981）和由 J. W. Brewer 与 M. K. Smith 合编的Emmy Noether：A Tribute to Her Life and Work（New York：Marcel Dekker，1981）以及她的同时代人写的追忆文章（许多文章都重新发表在以上所述的两本书中）里得来的。Brewer 和 Smith 的著作属系列丛书Monographs and Textbooks in Pure and Applied Mathematics，尽管其大部纯属数学性质的资料，它确实也包含着传记资料。
- 第 127 页 · 根据 E. Wigner 发表在 A. Zichichi 编的 Understanding the Fundamental Constituents of Matter 一书里的一篇文章的说法（New York：PLenum，1978）J. F. C. Hessel 在研究晶体对称上是第一个明确讨论对称的物理学家。A. Kretschman 在 Ann. der Physik 53 (1917)，第 575 页中，最早系统地对此作了讨论。G. Hamel 在 Z. Math. Phys. 50 (1904)，第 1 页；E. Noether 在 Nach. Ges. Wiss. Gö ttingen (1918)，第 235 页；以及 F. Engel 在同刊第 375 页中，以不同程度的概括研究了不变性和守恒之间的联系。
- 第 130 页 · 1933 年 4 月，第三帝国开始一个月后，犹太血统的诺特尔被赶出了大学。她两年后在 Bryn Mawr 学院逝世。

第九章：学会读这本伟大的书

- 第 134 页 · 在我所选的所有数学课中，群论是最有趣的。
- 第 136 页 · 写给碰巧读到《可怕的对称》一书的数学家的小注：我讨论的是旋转群，而不是其覆盖群。

第十章：对称性的凯旋

- 第 149 页 · 在一些作家手中，海森堡的不确定性原理和爱因斯坦的相对性原理遭到了同样的命运。对他们来说，“不确定性”萦回着从未出现在海森堡脑畔的形象。我惊讶地了解到，海森堡的不确定性原理在某些建筑界被到处乱用一气。另一些人则随意发挥，想让它意味什么它就意味着什么。我不想对这一现象作进一步的谴责，而是再次引用 Paul Samuelson 的话，他在他的诺贝尔演讲中陈词：

  “没有什么比让一位经济学家或一名退休工程师努力把物理学与经济学概念强拉硬扯到一起进行类比更真正可怜的了…当一位经济学家在社交界奢谈海森堡的不确定性原理时，这最好须当作一种修辞比喻或词汇游戏，而不是作为对量子力学关系的合理应用。”
- 第 151 页 · 在量子物理学中，几率幅不是由一般数表示，而是由数学家所谓的复数表示的。
- 第 151 页 · 20 世纪 60 年代，Steve Adler 以及 John Bell 和 Roman Jachiw 各自独立发现，在某些环境中，一个量子理论可能不拥有如相应的经典理论所拥有的全部对称。当时，这种理论上的可能性出乎人们的意料之外，因此，它被称作反常。对这些反常现象的研究，现在在我们寻求大自然的对称中起着重要的作用。
- 第 155 页 · 我忽略了电子旋转，这样也就简化了对原子中旋转

对称的作用的论述。

第十一章：夜晚森林中的八重路

·第 168 页·这里是同位旋对称简史纲要。由于中子在质量上与质子如此相近，Chadwich 便自然认为中子由一个质子和一个粘着在其上的电子构成。因此，原子核被认为由质子和电子构成。我们现在知道这一说法是不正确的，它与一些实验观察结果是相矛盾的。要弄懂原子里的一些电子如何做到绕原子核旋转，而同时另一些电子却被吸入电子核内，是困难的。

海森堡提出中子是一种天然粒子，原子核则由质子和中子构成。他随之假定，如果人们对换质子和中子，强相互作用物理学则保持不变。请注意，这种对称比同位旋对称要弱得多。在同位旋对称中，人们把质子和中子变换成了彼此的线性组合。然而，海森堡继而认为中子是附有一个电子的质子。他把质子和中子之间的相互作用根源解释如下：当一个中子接近一个质子时，中子内的电子可能会奔向质子。海森堡推断道，电子通过在质子和中子之间跳来蹦去，可以在两者之间产生一种相互作用。在海森堡的图景中，因为附近没有跳来蹦去的电子，所以两个质子之间没有强相互作用。原子核被人们错误地认为由质子和中子之间的引力结合在一起。

实验物理学家 N. P. Hydenburg、L. R. Hafstad 和 M. Tuve 测试了两个质子之间的强相互作用（步 M. White 早期工作的后尘），并发现它在强度上可与一个质子和一个中子之间的相互作用相比。1936 年，B. Cassen 和 E. V. Condon 同 G. Breit 和 E. Feenberg 各自独立提出，应该把海森堡的互换对称概述为同位旋对称。（我向在这一点上作出颇有助益的论述的 S. Weinberg 致以谢意。）

顺便谈谈，在汤川（Yakawa）的 1934 年的那篇论文中，只出现了带电荷的介子。很久以后（约在 1938 年），N. Kemmer

和 S. Sakata、M. Taketani 以及 H. Yukawa 才认识到同位旋要求带中性电荷的介子这一事实。

- 第 174 页·我引用了汤川（Hideki Yukawa）的自传 Tabibito（The Traveler. Singapore：World Scientifie Publishing，1982）一书里的话，英文版由 L. Brown 和 R. Yoshida 合译。在该书中，Yukawa 描述了他从 1932 年到 1934 年为寻求一种核力理论而遭受的“漫长的苦难岁月”。为了安慰自己，他每晚都睡在不同的房间里。1934 年 10 月的一天晚上，他闪念间意识到了这一问题的要点。
- 第 175 页·说 K°总与一个 Σ^{+}一起产生，我简化了对奇异守恒的论述。再者，Murray Gell-Mann、Kazuo Nishijima、Abraham Pais 和其他人得出，奇异守恒所走过的路，比书中可能示意的要艰难得多。
- 第 176 页·归在 E. Fermi 名下的引语出现在 More Random Walks in Science，该书由 R. L. Weber 编（Bristol，England：The Lnstitute of Physics，1982）。
- 第 176 页·顺便谈谈，物理学家之间的语言纯洁性是有限度的。他们使用了复数形式 leptons（轻子），而没使用希腊语 lepta。
- 第 177 页·实验物理学家 Carl Anderson 和 Seth Neddermeyer 用“mesoton”一词来命名他们发现的一种粒子。物理学家 Robert Millikan 建议把它改为“mesotron”，以便与 electron（电子）和 Meutron（中子）两词保持一致。但是，正如 Anderson 所说，并不是与 proton（质子）一致。就这样，人们采用了拗口的“mesotron”，后来经印度物理学家 Homi Bhabha 建议简为“meson”（介子）。据 George Gamow 讲，一些法国物理学家因为害怕与他们表示房子的一个词混淆而提出了抗议。Meson 的发音同“迷想”一词相同，该词在中文和日文中表示虚幻或幻想的意思。在 20 世纪 30 年代，日本的物理学家们按期会面讨论介子物理学，被称为迷想会议。

结果，Anderson 和 Neddermeyer 发现的粒子并不是

Yukawa 所发现的粒子。为了区分它们，Yukawa 的粒子被称作 π 介子，另一个假冒者称作 μ 介子。后来，人们认识到 μ 介子根本不是什么介子，它象电子一样是一个轻子，其名字简写为 muon（参看第十五章）。顺便谈谈，Yukawa 在他的论文中把介子称为 U 粒子。请参看 Carl D. Anderson 发表在 Laurie Brown 和 Lillian Hoddeson 编写的The Birth of Particle physics 一书中的文章（New Yark：Cambridge Universing Press，1983），第 148 页。我向和我一起对与介子一词有关的历史进行颇有助益的讨论的 S. Hayakawa 和 L. Brown 致以谢意。

• 第 181 页 • 20 世纪 60 年代初期，实验形势一片混乱，在列举在发表于 1963 年的一篇总结报告里的 26 种重子（带有某些特性）中，我们现在知道其中有 19 种是不存在的，这一事实表明了混乱的实验局面。

• 第 182 页 • 读者可能注意到，群 SU（3）和旋转群 SO（3）两者均在其定义表示中涉及三体变换。然而，有关变换对两个群来说则是有差异的。

• 第 182 页 • 为了获取 Yuval Neéman 的生平资料，我参考了他的自传文章 Hadron Symmetry，Classification，and Compositeness（待发表）。再请参看 R. Deacon 所著The Israeli Secret Service（New York：Taplinger，1977），第 318 页。

人们从这一篇半自传性叙述文章中了解到，Neéman 的祖先是 Rabbi ELiyahu the Goan（1720—1797）的信徒，他们代表着犹太教中理性主义和学院集团的锋刃，是“感伤主义”（Hassidrc）观点的“反对者”。

根据 Neéman 发表在 r. ELKana 所编的The Interaction Between Science and Philosophy 里的一篇文章中的说法（Atlantic Heights，N. J.：Humanities Press，1974，第 1—26 页），马克思主义的坚定信徒坂田（Sakata）由于坚持以辩证唯物为基础的自然哲学而误入了歧途。我对 Yuval Neéman 把他的著作送给我表示谢意。

·第186页·Gell-Mann在他的论文（Phys. I，1964，第63页）中提到了高级烹饪。

·第187页·在Gell-Mann题为"Particle Theory from S-Matrix to Quarks"的谈话中，可以找到对发明夸克的个人讲述，这次谈话是1983年9月在Sant Feliu de Guixols，Catalunya，Spain召开的科学思想史第一国际议会上发表的。

·第187页·在质子由两个上夸克和一个下夸克构成、中子由两个下夸克和一个上夸克构成的条件下，我们可以很容易地推算出夸克的电荷。很简单，质子和中子的电荷是通过夸克所含的电荷数计算出来的。我们可以通过把其中一个下夸克变成一个上夸克来把一个中子变成一个质子。我们记得，质子带有一个电荷单位，而中子不带任何电荷。因此，上夸克必须比下夸克再多带一个单位电荷。用Q标记上夸克的电荷，那么下夸克便带有电荷Q－1。质子含有两个上夸克和一个下夸克，那么它就带有电荷Q+Q+Q－1＝3Q－1。由于质子有电荷1，所以我们得到等式3Q－1＝1，可以看出，这用Q＝2/3可得到解释。一些基础物理学中最重要的计算并不是多么困难的。

夸克具有分数电荷使许多物理学家忧心如焚，这就是盖尔曼（Gell-Mann）为什么当初考虑SU（3）的3维定义表示时瞻前顾后的原因。迄此为止，全部已知粒子的电荷等于质子电荷的倍数。

第十二章：艺术的回报

·第194页·詹姆斯·乔伊斯（James Joyce）在1914年时就了解规范对称，这一惊人的发现是由Predrag Cvitanovic做出的。请参看Field Theory Nordita演讲录（Copenhagen：Nordita，BLegdamsvej，1983），第72页。我对William Bialek让我看到这本书表示谢意。

·第194页·我禁不住再写出Joyce讲到规范对称的那一段落。

我肯定许多读者会对其上下文感到好奇。请看端祥。

佐伊：（一本正经地，她的手指插在领带里）诚心诚意吗？得下一次。（她冷笑起来）我猜你动了肝火或是同自己最要好的姑娘闹了别扭。噢，我可以猜出你的心思。

布鲁姆：（心酸地）男人和女人，爱情，它是什么呢？瓶塞和瓶子。

佐伊：（突起怒容）我对三心二意的混蛋恨之入骨。要给满身污血的妓女一次机会吧。

布鲁姆：（懊恼地）我很讨人厌。而你是少不得的妖孽。你从哪里来？伦敦吗？

佐伊：（油腔滑调地）猪猡恣意的猪诺顿，我生在约克郡。（她握住他那抚摸自己乳房的手）我说，托玛小鼠，不要得寸进尺。你暂时有现金吗？10先令？

布鲁姆：（面露微笑，慢慢点了下头）多得多，女神，多得多呢。

佐伊：还有更多的母亲？（她随意地用她那天鹅绒般柔软的手爪拍了他一下）你要来音乐室看我们新买的自动钢琴吗？来，我来剥皮。

布鲁姆：（他象一个打量着她那规范对称地剥去皮的梨子的小商贩般受了惊，迷惘地抚摸着自己的后脑勺，感到无比尴尬。）如果她知道的话，有人会极为嫉妒的。那个绿眼妖精。（迫不急待地）你知道有多难。我无须奉告。

佐伊：（满心欢喜地）眼不见，心不悲。（她拍了他一下）来。

布鲁姆：笑面女妖？摇摇蓝色的手。

佐伊：娃娃！

布鲁姆：（他穿着小亚麻衬衫和皮制长外衣，大

脑袋，一头黑发，双眼紧盯着她那光滑飘动的外衣，用粗胖的手指数着上面的铜扣，他那湿润的舌头吐出来。口齿不清地说）一二参，参耳利。

- 第 197 页 · O. KLein 和 R. Shaw 也论述了同杨和米尔斯相似的思想。
- 第 198 页 · Niels Hendrik Abel 出生在挪威乡间，是一个穷牧师的儿子。他是一名才华横溢的数学家，26 岁时在穷困潦倒中辞世。我们记得，把一个群中的两个变换乘在一起的顺序是有差别的。Abel 的名字是同其中变换相乘顺序不造成什么差别的群联系在一起的，这些群被称为阿贝尔群。物理学家一般对非阿贝尔群感兴趣，即对变换相乘顺序造成差别的群感兴趣；非阿贝尔规范理论一词就是这样出现的。例如，我们的强相互作用理论便是一个非阿贝尔规范理论。通常情况下，现在的物理学家从反面来援引这位数学精英人物的名字，极富讽刺意味。顺便谈谈，电磁性是阿贝尔规范理论的一个范例。
- 第 200 页 · 我所提供的有关“规范”一词的材料是从几本词典中搜集的。然而，《牛津英语典》却声称该词词源无从稽考。它最初出现在 13 世纪的古代法国北部法语中，但在其它的中古语言中却始终不见。（在现代法语中，gauge（规范）拼写为 Jauge。）Week-Ley 同《牛津英语词典》的说法一致，但又把该词词源归于古高地德语，留下了疑窦；请参看《现代英语词源词典》（An Etymological Dictionary of Modern English New York：Dover，1967）。不管怎样，物理学中的规范理论与距离或尺矩无关。
- 第 206 页 · 耦合强度可能会随被研究物理世界的能量级的变化而变化，这一思想是 20 世纪 50 年代初由 E. C. G. Stuekelberg 和 A. Peterman，M. Gell-Mann 和 F. low，N. Bogolyubov 和 D. V. Shirkov 提出的。多半是因为有关论文读起来很难的缘故，物理学界总的说来没有沿这一思想走下去。
- 第 208 页 · 因为耦合强度一旦为零，它便保持为零，所以我把渐进自由理论称为“停滞理论”。

·第 209 页·G. tHooft 也独立地认识到，杨-米尔斯理论是渐进自由的。然而，他的成果没有发表在杂志上，鲜为人知。苏联物理学家 I. B. Khriplovich，也一直在研究杨-米尔斯理论中耦合强度的特性。

·第 210 页·顺便谈谈，我和 Wilczek 一起研究中微子从质子处散逸这件事，标志着我们后来长期合作的开端。我们在普林斯顿一起度过了一些岁月，我们各自的不断膨胀的家庭相互非常要好。现在，我和 Wilczek 两人都在圣塔·巴巴拉（Santa Barbara）的理论物理研究所工作。

·第 218 页·B. W. Lee 和 J. Zinn-Justin 对杨-米尔斯理论可重整也作了论述。

第十三章：终极设计问题

·第 222 页·Thomas Mann，The Magic Mountain（《魔山》），Helen Lowe-Porter 译 (New York：knopf，1927)，第 480 页。

·第 224 页·自发对称破缺的思想是经过相当迂回的路线进入基础物理学的。我们提出的关于瓶子和磁铁的例子表明，许多普通物理现象展现了自发对称破缺，只不过人们常常不特意承认这一事实罢了。1957 年，三个美国物理学家 John Bardeen、Leon Cooper 和 Robert Schrieffer 成功地解释了自 20 世纪初就为人知晓的奇特现象，即超导现象。众所周知，一条金属线对电流的通过表现出某种阻力。但当各种金属冷却到极低的温度时，这种电阻便会奇迹般地消失。Bardeen、Cooper 和 Schrieffer 由于他们的工作而被授予了诺贝尔奖。（顺便谈谈，John Bardeen 因而成为历史上在同一领域两次荣膺诺贝尔奖的绝无仅有的一个，他以前就曾因发现半导体而获此奖。）我不想赘述超导性是如何解释的，但只说它在实质上涉及到自发对称破缺，以飨读者。这一点在苏联物理学家 U. Ginsburg 和 Lev Landau 对该理论的陈述中尤其明显。许多物理学家，著名的如

Stephen Adler、Curtis Callan、G. Jonalasinio、Maurice Lévy、Murray Gell-Mann、Murph Goldberger、Sam Treiman 和 William Weisberger 以及上文中提到的那些物理学家，对我们理解自发对称破缺都有所贡献。

- 第 228 页 · Gell-Mann 的“小牛肉风味的野鸡”对称结果证明，既是明确破缺，又是自发破缺。因此，把这些对称的真相公之于众是一项极其艰巨的任务。

第十四章：力的统一

- 第 244 页 · 一些读者也许想知道 15 个夸克和轻子场不能归于 5 维表示的三种形式。它们能，但这样一来，夸克和轻子就不会具有它们那些可以观察到的特性。这便是当我在书中说嵌合比我们的简单计数所示更天衣无缝时我的意思。即是说，预先谁都不能保障夸克和轻子会带着其可以观察到的特性出现。（再者，如果有人采用这种归属方法，该理论就会遭到歪曲。请参看第十章的注释。）
- 第 244 页 · 很自然，一些爱打趣的人把 SU（5）理论中的夸克和轻子的分配称作“廉价分配”。
- 第 246 页 · 为简化叙述起见，我无所顾忌地用“电磁旅行者”和“弱旅行者”解释了大统一。严格说来，我应该说“SU（2）旅行者”（下行）和“SU（1）旅行者（上爬）。
- 第 246 页 · 三个而不是两个旅行者的存在，可能会令一些读者迷惑不解。尽管电弱相互作用使电磁和弱相互作用统一起来，它仍包含两种不同的耦合强度。请参看前一个注释。
- 第 249 页 · 当我提到中子衰变时，在科学上严格说来是不甚精确的。中子实际上衰变为一个质子、一个电子和一个反中微子。
- 第 257 页 · Gary Steigman 在一篇颇有影响的文章中研究了现有证据，下结论说，物质和反物质宇宙是站得住脚的。
- 第 262 页 · 我以前写过一本关于大统一的书《宇宙中力的统

—》(Unity of Forces in the Universe，2 vol. Singapore：World Scientific Publishing，1982)。尽管它是为该领域内的研究生和研究工作者写的，想进一步了解大统一的一般读者，从中也可窥出当前研究之一斑。

·第 262 页·早在大统一之前，伟大的苏联物理学家和人道主义者萨哈罗夫（Andrei Sakharov）预言，如果重子数目不严格守恒的话，我们就有可能弄清宇宙中物质的起源。西方很少有人了解 Sakharov 的工作。大统一提出后，包括 M. Yoshimura、S. Dimopoulos、L. Susskind、D. Toussaint、S. Treiman、F. Wilczek、S. Weinberg 和我自己在内的一些物理学家重新阐述了物质起源的图景，把它置入大统一的框架之中。我卷入这一问题要追溯到 20 世纪 70 年代初。当时，我正在巴黎长住。我租了一套公寓，它属于名叫 Roland Omnès 的一个合作人，他是一名法国物理学家，倡导充满等量物质和反物质的宇宙。我在那里读到了关于这一图景的论文。后来，我同 Wilczek 一起时断时续地试验了 3 年的时间，看看自发对称破缺是否可能提供物质和反物质宇宙中的一种分离机制，但一无所获。最后，我同 Toussaint 和 Treiman 一起工作，意识到重子不守恒提供了事情的关键。

·第 262 页·在膨胀宇宙思想所面临的许多困难中，经济学家将赞成“优雅的出门问题”：即使宇宙脱离膨胀的时代的问题。A. Linde、A. ALbrecht 和 P. Steinhardt 为解决这一难题发明了原型的一些变体。

第十五章：傲气中生

·第 266 页·基础物理学家们改了题，这件事使我想起了一个关于一名准备博士考试的经济学研究生的长期流传的学术笑话。该生决定查考前些年的考试题来准备考试。他发现年复一年提出的考题是相同的。他大为吃惊。向自己的教授谈及此事时，这

位著名学者告诉该生："噢，一点不错，年复一年提的问题相同，但正确的答案却一年一年变化呀。"

- 第 266 页 · Jabez Street 和 E. C. Stevenson 也独立地发现了 μ 子。
- 第 266 页 · 20 世纪 40 年代，日本的 S. Sakata 和 T. Inoue 与美国的 R. Marshak 和 H. Bethe 扫除了关于 μ 子的思想混乱。
- 第 271 页 · Pais 在他的传记论文中描述了爱因斯坦的孤僻性格（特别在第 39 页）。
- 第 274 页 · Gunnar Nordstrom 和 Heinrich Mandel 也独立地提出了引力的更高维理论（参考 Pais）。
- 第 279 页 · 苏联物理学家和人权活动家萨哈罗夫（Andrei Sakharou）在自己的著作中，首次提出了大统一规范相互作用可能产生引力的思想。包括 P. Minkowski. Y. Fujii、H. Terazawa、S. Adler 和我自己在内的另外一些物理学家，后来重新发现并发展了这一思想。
- 第 280 页 · 费米子是为纪念美籍意大利物理学家恩里科 · 费米（Enrico Fermi）命名的，玻色子则为纪念印度物理学家 Satyendra Bose 命名的。
- 第 281 页 · 在欧洲工作的 Julius Wess 和 Bruno zumino 最先系统地研究了超对称。关于超对称的早期讨论，出现在苏联物理学家 Y. Golfand 、E. Likhtman. D. VoLkov 和 V. Akulov 的著作里。Andrei Neveu、John Schwarz 和 Pierre Ramond 在自己的著作中也提到过超对称。
- 第 284 页 · 爱因斯坦，"On the Method of Theoretical Physics"（《论理论物理学的方法》），1933 年 10 月 10 日在牛津作的赫伯特 · 斯宾塞讲座，发表在 Me in Weltbild 上（Am-S. sterdam：Querido Verlag，1934）。

第十六章：造物主的精神

·第 287 页·CPT 定理是由 G. Lüders、B. Zumino、W. Pauli、J. Schwinger 和其他人发现的。

·第 287 页·先决条件是，CPT 不变性而非 T 不变性在 K 介子衰变中被违反，逻辑上是可能的，但仔细分析实验证据表明，CPT 不变性是受到遵循的。

·第 287 页·我们都对引力场中旋转的陀螺如何运动很熟悉。在寻找违反时间反演不变性的直接证据的时候，实验学家们研究了电场中诸如电子和中子等各种粒子的运动。运动选择了一个方向。

·第 288 页·也有人提出，我们意识中的时间之矢同宇宙的扩张有关。但是，要看出遥遥万里之外的星系的运动如何可能影响我们的意识运动是困难的。

·第 288 页·如要参看关于时间本质方面的代表性著作，请看 The Enigma of Time，该书由 P. T. Landsberg 编介 (Bristol，England：Adam Hilger，1982)。

·第 290 页·当然，我很少讲到人类意识之谜。至于这方面的介绍资料，请看 C. Hampden-Turner 所著 Maps of the Mind (New York：Macmillan，1981)。M. Pagels 在The Cosmic Code 一书中，对量子测量理论作了清楚而通行的介绍 (New York：Simon 82schuster，1982)。在撰写专业物理材料上，Heidelberg 大学的 H. D. Zeh 和 Illinois 大学的 A. Leggett 近年来分析了观察家与量子的关系，很富远见灼识。

·第 291 页·有关布莱克那首诗的评论，请参看 Lionel Tritling 所著 The Experience of Literature (Garden City，N. Y.：Doubleday，1967)，第 857 页。读者可能记得，布莱克那首关于燃烧之虎的诗的尾段和首段中，除了“能够造就你这可怕的身躯?”一句中的“能够”一词改成了尾段中的“胆敢”外，其

它相同。有趣的是，布莱克的早期手稿中首尾段完全相同，都使用了“胆敢”一词。在寻找当代物理学中的对称时，我们当然不应过多地玩味读这首诗，以免影响研究。

- 第 291 页·关于上帝是否有任何选择的引语，是爱因斯坦对昂斯特·斯特拉斯 (Ernst Straus) 说的，可以在 A. P. French 编的 Einstein: A Centenary VoLume 中找到(Cambridge, Mass.: Harvard University Press, 1979)。B. Hoffmann 的引语可以在他的Albert Einstein: Creator and Rebel 一书中找到 (New York: Viking, 1972)。
- 第 292 页·人择原理在过去一些年里受到了严厉的抨击。有关对人择原理的评论，请看 H. Pagels 在The Sciences (Vo. l. 25 no. 2, 1985) 中的那篇文章。