

走进科学殿堂·物理篇

空间

从相对论到M理论的历史

关洪 著

清华大学出版社

走进科学殿堂·物理篇

空间

——从相对论到M理论的历史

关洪 著

清华大学出版社

北京

内 容 简 介

本书通俗地介绍了物理学里的空间概念,包括了在经典物理学、狭义和广义相对论以及量子力学中的空间概念。一方面,注重区分空间(和时间)的哲学论辩和科学界说,避免陷于非科学的空谈;另一方面着重介绍百年来物理学基本理论的进展,例如空间为什么是三维的论证、相对论中空间和时间的统一、量子力学里的态空间、内部变量(自旋等)和内部空间(同位旋等)、宇称不守恒、内部对称性;最后亦涉及大统一理论、超弦和膜理论的大意。本书图文并茂,兼顾科学性和趣味性,叙述生动活泼,文字浅显流畅。所用到的不多公式基本上限于初等数学的范围,对象可以是大学一二年级学生,也可以是高中毕业文化程度的读者。

图书在版编目(CIP)数据

空间——从相对论到 M 理论的历史/关洪著. —北京:清华大学出版社,2004
(走进科学殿堂·物理篇/宋成斌主编)

ISBN 7-302-08395-9

I. 空… II. 关… III. 物理学—普及读物 IV. O412.1-49

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 026641 号

出 版 者: 清华大学出版社

<http://www.tup.com.cn>

社 总 机: 010-62770175

地 址: 北京清华大学学研大厦

邮 编: 100084

客 户 服 务: 010-62776969

责任编辑: 宋成斌

版式设计: 刘祎森

印 装 者: 清华大学印刷厂

发 行 者: 新华书店总店北京发行所

开 本: 148×210 印 张: 8.625 插 页: 1 字 数: 182 千 字

版 次: 2004 年 5 月第 1 版 2004 年 5 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 7-302-08395-9/O·355

印 数: 1~3000

定 价: 18.00 元

本书如存在文字不清、漏印以及缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话:(010) 62770175-3103 或 (010) 62795704

前言

空间

——从相对论到M理论的历史

读者们看到的现在这本书是第二稿。第一稿写成之后,由于某种原因没有能够按原计划出版。尽管如此,我仍然受益于提出由我来写作这个论题的建议。我非常感谢清华大学出版社的好意,他们接过了这个选题,使这部书稿得以顺利出版印刷。在同清华大学出版社的合作中,我对原稿文字做了大幅度的修改和补充,并且重新选择和制作了书中的大量插图。

书中正文共分 10 章,另有 3 篇附录。本来附录 A (高维空间向低维空间的投影)和附录 C(关于“不可能图形”的一种数学游戏)是附属于第 3 章,附录 B(手性)是附属于第 9 章的。但是它们的内容同后面各章没有什么逻辑上的紧密联系,可以单独抽出来阅读,或者在第一次通读全书的时候暂时略去,以后再找时间看。附录 A 里后一部分内容,是根据作者在中国高等科学技术中心(CCAST)举办的“蛋白质结构分析中的一些问题”研讨会(2002 年 11 月,北京)上所做的报告写成的。

这是一本科学普及的小书。要写好科普作品并不容易。费曼(R. P. Feynman)在他的一本关于量子电

动力学的普及著作《QED: 光和物质的奇异性》的“致谢”辞里写道:“许多‘颇受欢迎’的科学普及之类的作品之所以看起来相当简洁,只是由于它们所写的东西与它们声称要写的是两码事,它们对于声称要写的东西作了相当大的歪曲。但是对我们论题所怀的敬意不允许我们也这样做。”我对此深有同感。因此,本书的内容宁肯被认为不容易接受,亦决不曲解科学。换句话说,我决不为了迎合有些人要求容易看懂或者书籍容易卖出去的愿望,就去篡改科学的概念。特别是涉及到量子力学的原理,原则上是不应当也不可能运用经典力学的观念或者日常生活的经验去恰当说明的。事实上,只要抛弃成见而按照我们的思路,本书的内容应当是不难懂的。何况,关于一些物理空间性质以及基本粒子种类的简略介绍,不会比植物学或者动物学更难掌握。退一步讲,同量子力学有关的内容,只约占全书的三分之一。如果第一次读起来有困难,也不会影响对书中大部分内容的理解。

最近我读到了一本帕斯捷尔纳克(B. L. Pasternak)的传记。书中引述了帕斯捷尔纳克在开始创作他影响深远的作品——《日瓦戈医生》这部长篇小说的时候写的一封信,信中说道:“我已年老,……总不能把自由表述自己想法的事一拖再拖,……总不能还像八岁儿童那样生活:对自己的能力抱着消极态度,同时对周围的人保持良好的关系。”噢!说得真好。我的年纪也大了,的确应当对自己的能力有信心,而不必在乎别人会有什么样的看法。倘若我写的东西都是别人讲过又讲过了的,那又怎么会值得你们花费时间看呢?

我感谢方在庆教授向我提供了A. I. Miller的近著《爱因斯坦和毕加索》(Einstein, Picasso—Space, Time, and the Beauty that

Causes Havoc, Basic Books, 2001) 一书的原文版本和中文译稿(中文译本将由上海科技教育出版社出版), 在本书第 3 章和第 4 章的写作中运用了这部著作中的一些资料和观点。

我还感谢刘有延教授关于准晶体对称性以及刘兰芳教授关于植物学知识的热心指教。

最后, 我对清华大学出版社宋成斌先生的愉快合作表示衷心的感谢。

关 洪

2003 年 7 月于广州

目 录

空间

——从相对论到M理论的历史

- | | | |
|--------|------------------|------|
| 第 1 章 | 什么是空间和时间? | /1 |
| 第 2 章 | 空间和时间的科学界说 | /23 |
| 第 3 章 | 空间为什么是三维的? | /43 |
| 第 4 章 | 空间和时间的融合 | /65 |
| 第 5 章 | 四维空时里的引力几何化 | /87 |
| 第 6 章 | 五维空时里的统一场 | /109 |
| 第 7 章 | 量子力学的状态空间 | /129 |
| 第 8 章 | 内部变量和内部空间 | /151 |
| 第 9 章 | 三维空间里的反演 | /173 |
| 第 10 章 | 从大统一到 M 理论 | /195 |
| 附录 A | 高维空间向低维空间的投影 | /215 |
| 附录 B | 手性 | /233 |
| 附录 C | 关于“不可能图形”的一种数学游戏 | /249 |
| 结束语 | | /263 |

Contents

Space

----- The History from Relativity to M-Theory -----

- 1 What are space and time? /1**
 - 2 The scientific definitions of space and time /23**
 - 3 Why the space is 3-dimensional? /43**
 - 4 The merging of space and time /65**
 - 5 The geometrization of gravity in 4-dimensional space /87**
 - 6 The unified field in 5-dimensional space /109**
 - 7 The space of states in quantum mechanics /129**
 - 8 Intrinsic variables and intrinsic spaces /151**
 - 9 The reversal in 3-dimensional space /173**
 - 10 From GUT to M-theory /195**
- Appendix A Projections from higher to lower dimensional space /215**
- Appendix B On chirality /233**
- Appendix C A mathematical game with "impossible figures" /249**
- Postscript /263**

什么是空间和时间？

空间这个名词，有多种不同的意义。它可以指一个物体之中或者多个物体之间的空缺、罅隙或者间隔；可以指自然物或者人造物内外的空旷所在；也可以指我们生活着的地球表面之上的空域，亦即同“大地”相对应的“天空”，例如大气层或者大气层之外的“外层空间”，以及脱离地球甚至太阳引力场影响的“宇宙空间”。后者常常被称为“太空”，它本来的意思是“极高的天空”，听起来不大像一个科学术语。我们觉得，不如把“宇宙空间”直接简称为“宇空”，意思更加清楚明确。

本书主要从物理学的角度谈谈空间这一个基本概念。它是在物体或者物质系统及其

演化的描写中普遍使用的一个概念,并不拘泥于物体内外或者天上地下。亦即是说,物理学里说的空间,可以是被物体占有或者充实着的,也可以是不被任何物体充实而空置着的。换句话说,每一个具体的物体总是占着一部分空间区域,而其余的空间区域对它来说就是空的。

运动着的物体所占有的空间是变动不居的,描写这种变动的就是时间。你也可以说,任何一个具体的物体,从它诞生至灭亡,总是占着连绵不断的一段时间。空间常常同时间相提并论。在英语里就把 space(空间)和 time(时间)这两个名词组成了一个复合词 space-time;我国有关机构在 1977 年发布的《英汉物理学词汇》(科学出版社)里,把这个复合名词定名为“空间-时间”。我们在本书里谈论空间的时候,亦不可避免地要提到时间的概念,但那只是作为广义的空间结构里的一个维度,不作详细的展开。好在论述物理学里时间概念的著作已经出了不少,读书可以自行参看。相形之下,专门谈论空间概念的读物还不多,本书就是这样的一次尝试。

但是,不晓得是什么缘故,在 2002 年正式发布的新版《英汉物理学词汇》(北京大学出版社)里,又将名词 space-time 改成“时空”这一简称。有人说,“时空”这一叫法,反映了“汉语的习惯是把时间放在前头”,也不知道有什么根据。我们经常看到的却是相反的情况。例如,我们一直在广泛使用的“宇宙”这个名词。古语说:“四方上下曰宇,古往今来曰宙”。亦即是说,“宇”表示空间而“宙”表示时间。并且,这句话里已经表明了,在整个世界里,“宇”(空间)有前后、左右、上下这三个维度,而“宙”(同“久”,即时间)则只有从过往到未来这一个维度。由此可见,自古以来,汉语的习惯也是把空间放在时间前面,这一点

是同英语一样,也同爱因斯坦(A. Einstein)的相对论里的坐标描写次序一致的。因此,我们不赞成“时空”这种叫法;如果有需要的话,我们就把“空间-时间”这一复合词简称为“空时”。事实上,汉语里“空时”这种叫法并不是本书作者的发明创造。多年以前,我就曾经亲耳听到我国物理学界的老前辈、相对论研究专家周培源先生这样说过。在写作本书的时候,我又查到了周先生主持翻译的、俄国物理学家福克(B. A. Фок)的著作《空间、时间和引力的理论》中文版(科学出版社,1965)正文第1页里,就有“空时理论”这样的说法。在此译本的行文里,亦多处出现“空时流形”一类的称谓。

人类自身的存在和所进行的各种活动,我们直接观察到周围远近的各种现象和过程,都是在空间和时间当中出现和开展的。很自然地,人们很早就开始对空间和时间的本质进行过许多探索和研究。这些思考里面,有一些是哲学性的,有一些是科学性的。

不论在东方和西方,古代的哲学和科学都分得不那么清楚,这两个方面的见解常常是搅在一起的。无论在古代中国还是在古希腊,许多著名的哲学家即“圣人”或者“智者”们,都对空间和时间的观念非常重视,写下了不少精彩的言论。然而,即使到了自然科学蓬勃发达起来了的现代,空间和时间的概念仍然是哲学家们津津乐道的话题。不仅一些哲学家一直以为这个论题属于他们的专利,科学家没有资格在这个思辨性极强的领域上发表意见;而多数科学家亦心甘情愿地让出这块地盘,满足于抄袭和引用哲学家们的言论。本书作者觉得这种情况早就应当改变了。在这本著作里,我们主要从物理学的角度对空间(和时间)的科学概念展开论述,也免不了要发表几点对

哲学家们的议论,以及试图对少数流行的哲学命题作出评说。

在古希腊的哲学家中,对空间的构成基本上存在着两派观点。其中一派是以德谟克利特(Democritus)为代表的原子论观点,主张“一切事物的本原是原子和虚空,别的说法都只是意见”,认为存在着某种无限的空虚空间,无数的原子在空无一物的空间中横冲直撞。长期以来,原子论的学说得不到有力的证据,被认为不过是一种设想而已。原子论在物理学上得到普遍承认,约摸才有一百年的历史。



图 1.1 德谟克利特(Democritus,
约公元前 460—前 370)



图 1.2 亚里士多德(Aristotle,
公元前 384—前 322)

另一派以亚里士多德(Aristotle)为代表,信奉“自然界厌恶真空”,认为空间中无论何处都是充实填满的。例如,他论证说,用手抛出一块石块,石块离手后,它所刺破的前方空气,回头奔绕到石块的后方,靠这种迂回的方式推动石块前进。然而,虚无的真空中不会有什么东西推动物体在其中运动,因此亚里士多德由此推断真空是不可能存在的。可是,谁也没有在

奔跑的时候,感觉到后面有一股风推送着自己的脊背,所以这种说法明显难以服人。



图 1.3 笛卡儿(R. Descartes, 1596—1661)

后来,在笛卡儿(R. Descartes)的宇宙模型里,则认为上帝创造的、无所不在的一小块块原始物质填满了整个宇宙,由于它们的不断挤压和摩擦,形成了包括恒星、行星和以太在内的各类物质。而以太不仅充满着天空,也沿着所有物体内部都必定具有无数微小的孔道渗透到其中去。由此可见,笛卡儿同亚里士多德一样,既拒绝原子,也拒绝真空。

按照我们所熟悉的分类,以上这三位著名的哲学家依次被指认为唯物论者、唯心论者和二元论者。不过,在关于空间性质的这几种设想里,他们似乎都倾向于选择物质性的解说。

人们常常说牛顿(I. Newton)是一位坚定的原子论者,在一定的程度上这也是事实。不过,牛顿不是一位纯粹的原子论者,他亦像笛卡儿那样,认为在空间各处都存在着以太。例如,牛顿像笛卡儿一样以为,一般的物体其实都具有像海绵那样的多孔状结构,好让以太出入其间,只有微观的原子才是实心

(solid, 国内不少译本把牛顿用的这个形容词错译为“固体”。固体是一种宏观的物质聚集状态, 不能用来描写微观原子) 而不含以太的。例如, 牛顿在《光学》这本著作最后的“疑问”里说过: “原始的粒子是实心的, 所以它们比任何由它们合成的多孔的物体都要坚硬得无可比拟。”所以, 在牛顿的眼里, 物质组成的成分既有一颗颗坚实的原子, 又有到处流动并且进出各种物体的以太。此外, 在他关于光的组成的学说里, 既存在着光微粒, 亦存在着光以太。总之, 牛顿并没有像本来的原子论者那样把原子在其中运动的空间看做是一片荒芜。

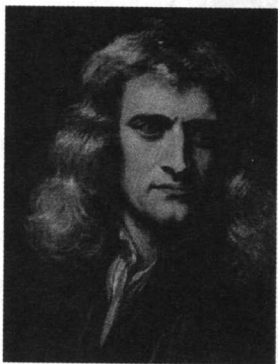


图 1.4 牛顿(I. Newton, 1642—1727)

在 20 世纪的物理学理论发展起来之前, 人们还没有从科学上认识到空间和时间这两个物理量同物质的分布及其运动之间的本质联系, 而是凭着直觉的经验, 误认为空间和时间是脱离于物质而独立的。长期以来, 在物理学家看来, 空间就像一座摸不着的广袤空旷的框架, 时间就像一条看不见的奔流不息的江河, 物理世界就在这样搭建起来的一座至大舞台上, 漂泊于无尽的历史长河之中, 接连演出一幕幕五光十色的活剧来。

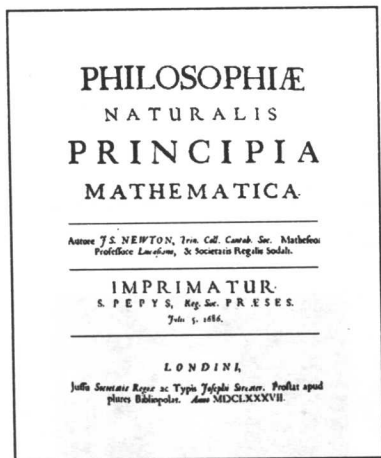


图 1.5 牛顿 1687 年出版的《自然哲学的数学原理》第一版扉页

牛顿也受到这样的一种习惯观念的支配,并且由此抽象出他的“绝对空间”和“绝对时间”的概念。在 1687 年出版的《自然哲学的数学原理》这本划时代的著作,在对一开始的几条基本“定义”所做的“注释”里,牛顿写道:

“……我还没有给时间、空间、处所和运动下定义,因为它们是人们所共知的。需要说明的只是,一般人除了通过可感知的客体之外,无法想象这些量,并且会由此产生误解。为了消除误解,可以方便地把这些量区分为绝对的和相对的、真实的和表象的以及数学的和普通的。

“绝对的、真实的和数学的时间,由其本性决定,自身均匀地流逝,它与一切外在事物无关,又称为‘延续性’;相对的、表象的和普通的时间是可感知和外在的(不论是精确的还是不均匀的)运动延续性的量度,它通常被用来代替真实时间,如一小时、一日、一个月和一年等。

“绝对的空间，其自身本性与一切外在事物无关，它处处均匀，永不迁移。相对空间是一些可以在绝对空间中运动的构架，或者是对绝对空间的量度。我们通过绝对空间与物体的相对位置而感知它，并且通常把它当做是不可移动的空间。例如，地下、大气或天空处的空间，就都是通过它们同地球的相互关系来确定的……”



图 1.6 惠更斯(C. Huygens, 1629—1695)

在牛顿之前不久，惠更斯(C. Huygens)已经明确地表达了运动的相对性原理。按照这一原理，在互相做匀速运动的两个参照系，例如在岸上和在船上的两个观察者看来，物体的碰撞过程表现出同样形式的规律。牛顿肯定已经认识到，如果他的力学定律在一个参照系里有效的話，在另一个对前者做匀速运动的参照系亦是有效的。那么，选择什么样的参照系作为他的基准呢？从以上的陈述可以看出，牛顿把他主张的绝对空间和绝对时间，当做描述物体运动的一种具有绝对意义的参照体系。所有物体在空间上的移位和随时间的变迁，归根到底都是



图 1.7 惠更斯著作中的一张描述相对性原理的插图,图中画出一个岸上的观察者和一个船上的观察者,分别按两个观察者来计算同一碰撞过程

相对于这样的绝对空时而言的。

但是,上述规定里说的,绝对时间本身的“均匀流逝”以及绝对空间的“不可移动”,又是对什么来说的呢?或者说,你怎么知道它一直没有移动呢?还有,既然绝对空间和绝对时间“与一切外在事物无关”,我们又怎能通过外界的事物去感知它们的存在呢?牛顿的上述理想定义在逻辑上的种种漏洞,使人们觉得那只是在理论体系里摆摆样子的虚构概念,并没有什么实际上的意义。



图 1.8 莱布尼茨(G. W. Leibniz, 1646—1716)