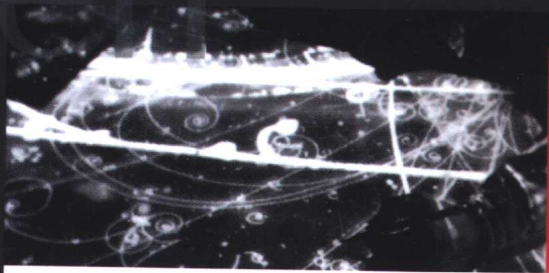


Golden Fleece



寻觅 基元

探索物质的终极结构

赫拉德·特霍夫特/著 冯承天/译



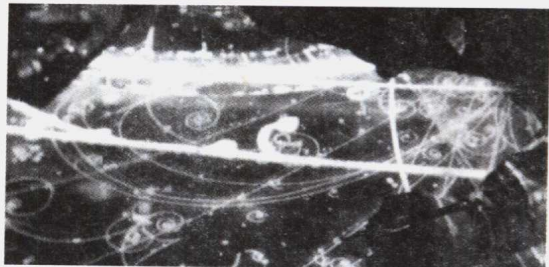
金羊毛书系

G O L D E N F L E E C E S E R I E S

上海科技教育出版社

Golden

Fleece



基本

探索物质的终极结构

赫拉德·特霍夫特/著 冯承天/译



金羊毛书系

G O L D E N F L E E

上海科技教育出版社

DE BOUWSTENEN VAN DE SCHEPPING

(In Search of the Ultimate Building Blocks)

by

Gerard 't Hooft

Copyright © Gerard 't Hooft 1996

Chinese translation copyright © 2002 by

Shanghai Scientific & Technological Education Publishing House

Published by arrangement with Prometheus/Bert Bakker

ALL RIGHTS RESERVED.

上海科技教育出版社业经 Prometheus/Bert Bakker

取得本书中文版版权

责任编辑 柴元君 装帧设计 桑吉芳

金羊毛书系

寻觅基元

——探索物质的终极结构

赫拉德·特霍夫特 著

冯承天 译

上海科技教育出版社出版发行

(上海冠生园路 393 号 邮政编码 200235)

<http://www.sste.com>

各地新华书店经销 上海新华印刷厂印刷

ISBN 7-5428-2860-6/N·469

图字 09-2000-550 号

开本 787 × 1092 1/25 印张 9 插页 2 字数 203 000

2002 年 11 月第 1 版 2002 年 11 月第 1 次印刷

印数 1-5000

定价: 18.00 元

发 凡

传 说在离希腊很远很远的黑海岸边,有个地方叫科尔喀斯,那里有一件稀世之宝——金羊毛。它是国王献给战神阿瑞斯的礼物,战神把它钉在圣林里,并派一条昼夜不眠的火龙看守着,因为神谕告诉他,他的生命跟金羊毛紧紧地联系在一起。很久以来,金羊毛一直被看作稀世珍宝,多少英雄豪杰为了得到它而踏上了艰险的路程,但他们没有一个能成功,很多人甚至连宝物的影子都没看到,就倒在漫长的征途中了。后来,英雄伊阿宋组织了一个远征队,决心去取金羊毛。国王要伊阿宋驯服两头铁角铜蹄、鼻孔喷火的神牛,套上犁具翻垦圣林的土地,并播种一着地就会变成铁甲武士的毒蛇牙齿,然后才能到巨龙看守的地方去取金羊毛。伊阿宋得到国王女儿美狄亚的帮助解决了神牛和武士,又靠着天才歌手俄耳甫斯的七弦琴声催眠了巨龙,终于拿到了那挂在高高橡树顶上的金羊毛。

这个故事就是古希腊神话中脍炙人口的“伊阿宋智取金羊毛”,千百年来,它一直为人们所传诵。从此“金羊毛”就成了至高无上的珍贵物品的代名词,象征着历尽艰险才能获得的财富。而那些能够勇往直前、努力实现自己理想的英雄们,就被称为“金羊毛英雄”,受到人们无限的崇敬。

在现代科学的发展史上,最有资格被称为“金羊毛英雄”的,无疑是那些摘取了最高科学荣誉——诺贝尔奖的人。他们以自己的聪明才智,以自己的顽强毅力,献身于科学事业,最终取得了普通人难以企及

的科学成就,并因而赢得了崇高的荣誉。他们的精神令人敬佩,他们的成就令人叹服,而他们在奋斗过程中所展现出来的科学精神、科学思想、科学方法,无疑更是后人应该认真学习和借鉴的。可以说,这些才是真正堪称无价之宝的“金羊毛”。

“金羊毛书系”正是为了这个目的而策划的一套科普丛书。它荟萃了近半个世纪以来许多诺贝尔奖得主的科普著作,其中既有这些科学大师对自身亲历的重大科学事件的回顾,也有他们对所在领域的最新科学进展的通俗介绍,还有对科学与社会、文化之间的关系的深刻思考。它们充分体现了这些诺贝尔奖得主的独特见地和睿智,是这些科学巨匠们留给我们的宝贵财富,值得我们好好挖掘。

中华民族正在走向伟大复兴之路,“科教兴国”早已成为全社会上下的共识。希望“金羊毛书系”的读者们,能够在接触这些科学大师的同时,领略其中的科学智慧,感悟其中的科学真谛,从而进一步攀登新的科学高峰,去收获属于自己的“金羊毛”。

内容提要

这是物理学史上最富有创造性和最激动人心的时期之一。从1965年到1990年,理论物理学家和实验物理学家一起奋斗,越来越深入地探究了实在的基本结构,越来越清楚地认识了宇宙中万物的终极基元。本书是对这一时期的第一手描述。

特霍夫特的研究工作贯穿了这个几乎史无前例的发现时期的始终,并对促进这一课题的发展作出了许多贡献,为此,他和韦尔特曼荣获了1999年诺贝尔物理学奖。在本书中,他从他个人的角度阐述了物理学家通过发展现在所称的标准理论,而了解物质结构的整个过程。在本书的后半部分,他对比现在已知存在的更为小的结构,对黑洞、大统一,以及对这些课题在今后可能的发展方向都作了预测。

对20世纪物理学中最扣人心弦的领域之一在最后25年中的进展的这一精彩的个人描述,将使物理工作者、学物理的学生,甚至那些对有史以来最令人激动的那些科学探索故事感兴趣的、受过教育的普通读者得益匪浅。

作者简介

赫拉德·特霍夫特,著名物理学家。1946年7月5日生于荷兰,1972年获荷兰乌得勒支大学物理学博士学位,1977年起任乌得勒支大学教授。因在“解释电磁相互作用和弱相互作用的量子结构”方面所做的贡献而获得1999年诺贝尔物理学奖。

前言： 一份辩护词

如果对于支配世界的自然规律没有一个很好的认识，那就很难投身于终极的小世界中去，甚或谈及它。我们在那里发现的一些力决定了我们希望研究的那些微小粒子的运动方式，以及它们的所有其他性质。我们是否能以及如何能去确实地观察到它们，也将取决于这些力。

而这并不容易，因为自然规律是复杂的。在这一领域中，越来越多的专家在一种非“常人”所能领会的数学呓语中寻求庇护，除非他或者她也是该圈中之人。为了能真正欣赏物理规律的严密逻辑，我们实际上不能回避数学。然而，我们物理学家感到有必要与任何愿意听讲的人分享我们的所有优美发现的乐趣。为此有人劝我们回避一切数学，而这正是我将勉强去做的。

阐述对物质的最小微粒研究的 25 年是我的目的。在那 25 年中，我开始把人类作为一个整体已受其支配的自然看成一个智力测验，看成一个供我们摆弄的巨型拼图游戏。我们一次又一次偶然找到一些新的片断，或大或小，它们能与我们已有的那一些结合得极好。我想与你们同享我们在这些时刻所感到的胜利的喜悦。

因此我需要做的就是将数学转变成平易的语言。这肯定是可能做到的，但是我们将失去整个图像中的一部分，尤其是当我试图去用公式表示一些“论证”（它们通常用来证实某些理论或描述是正确的，而否定

另一些)时更是这样。如果你们——我亲爱的读者,感到不可能听懂我的论述,那么你们当然可以怪我不好,然而,我也要辩解一下:把数学公式变为平易的语言而没有一点哄骗,有时是不可能的。

在许多情况中,我甚至不会尽力去给出一个精确的解释,一个对理论物理的课题并不熟悉的读者,可能不得不单凭信仰去接受我的许多阐述。此时我的建议是:力求能得出关于这些情况的一个粗略的概念,而避开得到这种学识以前的(常常是非常广泛的)历史上的所有细节。

最初的四章构成了对分子、原子和原子核世界的一些已被接受的认识的总结。关于导致这一知识的、极为激动人心的研究,本书就从简了。在那时,本书的作者甚至还没有用上尿布呢!而且他更乐意把对它们的论述留给搞科学史的专家们。* 本书是关于随后所发生的那些事的。

在最近的 25 年中,我们对“基本粒子”的认识推广了,以至于有一些研究者已经开始推究这一研究的“终结”:所有粒子和力的终极理论,即所谓的万物之理(Theory of Everything),或 TOE。想到这样一个囊括一切的理论本身,难道还不足以暴露出人们对自己的能力有着不着边际的过高评价?或者说对我们宇宙的无限复杂性同样有着一个肆无忌惮的过低估计?关于这一点,我在后文将会有所说明。简短地说一下,这种看法并不像它听上去那样荒诞不经。

本书并不打算对我们关于基本粒子所知道的一切作一个历史性的一般考察。这一方面的书已经有了,而且有许多书是写得很好的。**我也不打算去写一本有关粒子物理的系统的入门书,*** 尽管本书写成以后却与此有点雷同。应好多读者的要求,我在正文后面添加了一

* 例如参见:A. Pais, *Inward Bound, Of Matter and Forces in the Physical World* (Oxford, Clarendon Press / New York, Oxford University Press, 1986)。

** 例如参见:Robert P. Crease and Charles C. Mann, *The Second Creation: Makers of the Revolution in Twentieth-Century Physics* (New York, Macmillan, 1986)。

*** 例如参见,Anthon Hey and Patrick Walters, *The Quantum Universe* (Cambridge University Press, 1987), 或者 Leon M. Lederman and David N. Schramm, *From Quarks to the Cosmos, Tools of Discovery* (New York, The Scientific American Library, 1989)。

个术语简释。本书仅仅打算写成我个人对这一领域中某些发展的阐述。我的目的是，使用那些我希望合情合理的、人人都能懂得的词语，与你们分享我自己以及我的同行们的热忱。

我在本书中提到名字的那些人，他们以这种或那种方式，在按我想概述的方式发展物质最小粒子的图像的过程中，都起到过重要的作用。他们全是一些我钦佩他们所作出的贡献的人，尽管在这个小小的选择过程中，仍将会有许多疏漏。在提名或未提名上面的差错，我先在此致以歉意。

你们很可能会原谅我的一点民族自尊心。在这一课题上有许多荷兰研究者立功成名，我将提到他们中的许多人。而我个人的作用看起来会比其真实的要大，毫无疑问，这不是那么可宽恕的。可我不能彻底避免。毕竟，我想按通过我双眼所看到的来揭示基本粒子的概念，而近距离看的东西看上去当然也就被夸大了。

我在物理学界中已经达到的地位使我能给出下面的详细叙述，然而，如果没有许多人的强力影响，我是绝不可能达到这一地位的。首先有我高中的老师利尼亚克(W. P. J. Lignac)博士以及我的叔叔范坎彭(N. G. van Kampen)教授；然后是我论文的指导老师韦尔特曼(M. J. G. Veltman)博士。他们中的每一位均与我分享了他们对于我们这一物质世界本质的一些见解，而从他们的观点中逐渐形成了我自己的观点。还有为数众多的、我喜欢与他们讨论的杰出物理学家，他们帮助我去感受取得突破性新见识的那种无穷乐趣。

在写成本书的整个过程中，我得到了我的家庭的支持，即使在多次度假之中，我的大部分注意力都没有放在他们身上，而是集中在一台小型的笔记本电脑上。当我自以为我已把全书翻译成英语了，我又得益于迈兹(Robin Mize)太太的巨大帮助，是她协助我改好了我蹩脚的英语。



录

前言：一份辩护词	xi
1. 开始去小世界的旅程：裁纸	1
2. 到达分子和原子	4
3. 不可思议的量子之谜	10
4. 令人眼花缭乱的速度	18
5. 1970 年前的基本粒子园	24
6. 生与死	35
7. 古怪的 K 介子	39
8. 看不见的夸克	47
9. 是场还是靴袪	52
10. 杨—米尔斯大宝藏	63
11. 超导的空空间：希格斯—基布尔机理	73
12. 模型	82

13. 强力中的色	92
14. 磁单极子	104
15. 吉普赛人(J/Ψ)	110
16. 标准模型的光辉	117
17. 反常	129
18. 靠不住的完美	138
19. 称量中微子	141
20. 大沙漠	147
21. 彩色	151
22. 大统一	156
23. 超引力	162
24. 十一维时空	168
25. 系住超弦	172
26. 进入黑洞	180
27. 尚未诞生的理论……	188
28. 最小者的规则的支配性	192
术语简释	198

1. 开始去小世界的旅程:裁纸

让我们从用我们的肉眼所能看到的,以及我们都已习惯的那些物理定律来开始我们到微小的世界的旅程吧。拿一大张纸来,并把它折成一架飞机。你可能会决定把这一张纸裁成两半来做两架小一些的飞机。你甚至可能把这些较小的纸再裁开来做更小一些的飞机。除了飞机会越来越小以外,你用的纸的性质,以及把它折成一架飞机的折法几乎都不会不同。然而,当你继续把纸裁得越来越小,你逐渐就会发现,折飞机会变得越来越困难了,而且一度有用的一张纸最终将变成一些小碎片。曾经“能折成一架飞机”的这个性质已丧失殆尽了。

当我们最初有一桶水,然后把水倒到更小的桶里时,我们也会遇到相仿的情况。水的一些物理性质,诸如“从高往低流”,会始终存在,直到我们剩下的水不足一滴时。此时你不能把水从高处倒到低处,你不得不猛力甩掉它们。

每个玩玩具车或玩偶的小孩都知道,人们可以在较小的尺度中模仿大千世界。作家斯威夫特(Jonathan Swift)就是根据这一点来讲述他的有名的故事的。一个名叫格列佛(Gulliver)的探险家漫游了由非常小的人居住的小人国(Lilliput),在那里样样东西都小:大自然、植物、以及动物都按比例缩小。他本人在那里却被看成是一个巨人——“人山”。甚至他撒了一泡尿,居然还成功地扑灭了皇宫中的一场危险的大火。

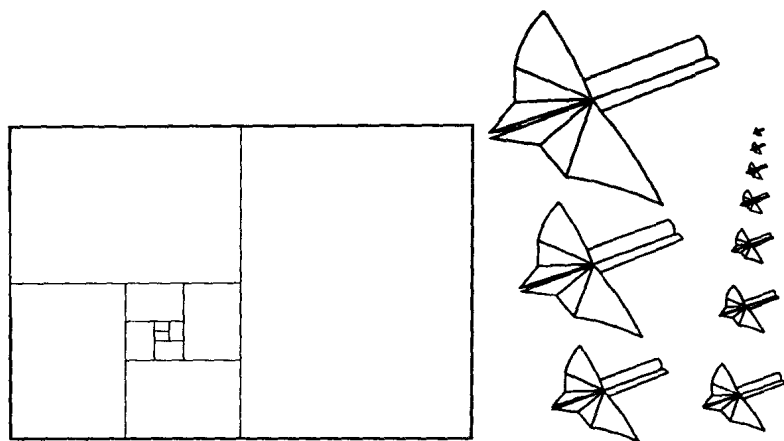


图1 裁纸以及由纸折成的飞机。

在另一次旅程中,命运的神奇力量把格列佛带到了一个大国(Brobdingnag)的国家,那里的人民、一切其他生物和所有无生命的东西都比格列佛所习惯的要大得多得多。在那里格列佛是一个侏儒。一个名叫格柳达克利奇(Glumdalclitch)的小姑娘很疼爱他。最后格列佛在居住的笼子里被一只老鹰叼走,并把他抛在大海中。他被一些通常大小的水手从海中救起,他们听他讲述了他的故事,但是并不相信。

他们不相信他,这是对的。不管这些故事讲述得如何地好,它们都会引出一些令人迷惑的问题来。例如说,我们知道小蜡烛的火焰与大蜡烛的火焰差不多是一样大的。小人国的蜡烛的火焰有多大?而且你想得越多,你就会提出更多的问题:小人国和大人国的雨滴各有多大?那里水所服从的物理定律是否不同于我们这一世界中的水所服从的物理定律?而物理学家最后也会问:那些地方的原子有多大?它们会与格列佛身体中的原子经受何种化学反应?

有了这些问题,格列佛的故事就站不住脚了。《格列佛游记》中的世界不能存在的真正原因是:当你改变尺度时,大自然的规律并不是精确地保持不变的。在一些灾难影片中这一点有时是明显的,那儿一波浪潮或一幢燃烧着的摩天大楼也许是在一个按比例缩小的模型中模拟

出来的。当把时间的标度因子选为尺寸的标度因子的平方根时,通常就能得到最好的结果,因此,如果摩天大楼是以 1:9 的尺度建造的,那么我们就必须以真实速度的 $1/3$ 来放映该影片。但是就算是这样,内行人的眼睛还是能辨别出电影中所发生的与真实世界中所观察到的之间有所不同。

总结一下吧,支配我们的物理世界的规律有两个重要的方面:在你改变尺度时,大自然的许多定律是不会变的,不过还有许多现象,它们并不是相应地改变的,诸如燃烧的蜡烛和水滴。这一情况最终的言外之意是:极小物体的世界与通常的世界将会是完全不同的。

2. 到达分子和原子

当然在活生物的世界中,尺度着实造成了重要的区别。在许多方面,老鼠的解剖正是象的解剖的翻版,然而一只老鼠没有多大困难就能爬上一块几乎竖直的石块(而且甚至它从一个几倍于它大小的高处摔下来,也不至于受太严重的伤),而象却不能表现出如此的技艺。极为一般地说,当我们研究越来越小的物体时(不管它们是有生命的还是无生命的),引力的作用就变得越来越不重要了。

当到达单细胞生物时,我们看到对于它们而言,根本就没有上下之间的差别了。对于它们,水的表面张力远比引力重要得多。例如,只要注意到表面张力正是一滴水形成其形状的力。与单细胞生物的尺度相比,水滴是非常大的,显然在这一尺度上,表面张力是非常重要的。

表面张力是下述事实的一个结果:所有的分子和原子都以一个我们称之为范德瓦耳斯力的力相互吸引着。范德瓦耳斯力仅有非常短的力程。精确地讲,在距离 r 时,这个力的强度近似地正比于 $1/r^7$ 。这意味着,如果你把两个原子之间的距离减半,那么它们彼此赖以吸引的范德瓦耳斯力将是原来的 $2 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2 = 128$ 倍。当原子和分子彼此挨得非常紧时,通过这种力,它们会非常牢固地束缚在一起。

范德瓦耳斯(Johannes Diderik van der Waals, 1837 ~ 1923 年)1873 年毕业于莱顿大学。他的博士论文使他出了名。论文是用荷兰文撰写

的,名为“Over de continuïteit van de gas- en vloeistofoestand”(“论气态和液态的连续性”)。在那时,虽然分子和原子的存在还根本未被人们所广泛接受,但是范德瓦耳斯却表明了:只要假定这些非常小的粒子每一个都占据空间中的一定体积,以及假定只要它们彼此被分得足够远则它们就相互吸引,那么我们就能够很好地理解气体和液体所具有的性质。这项工作给了著名的英国物理学家麦克斯韦(James Clerk Maxwell)极为深刻的印象,他评论道:这篇论文已激励了许多研究者开始去学习“低地荷兰语”。* 1910年,范德瓦耳斯荣获诺贝尔奖,然而“低地荷兰语”却从未成为国际承认的一种科学语言。过去数世纪中的国际科学语言是拉丁语和希腊语;其后又是德语、法语和英语。现今所有的科学都发生在英语之中,尽管有人对此感到遗憾。

单细胞植物和动物的大小是用微米(micrometer,或“micron”)来度量的,这里1微米是1毫米的 $1/1000$,它的大小约为人们通过一个普通的显微镜能看到的最小细节的大小。微生物的世界是令人神往的,只不过这不是本书的目的。我们必须继续我们到小世界中去的旅程,直到到达原子和分子本身。在这里,范德瓦耳斯力必须让位于一些更为精妙复杂的力的王国——化学中的力。

化学家把原子视为或多或少呈球状的一些客体。它们的直径为1个或数个埃,1埃是1微米的 $1/10\,000$,或者说 10^{-10} 米(1米的百亿分之一)。1个原子的质量** 几乎全部集中在其中心的一个称为原子核的小颗粒上。关于这一点,后面将讲得更多。

在短距离时,原子之间的力将变得极为复杂;原子看上去好像它们装备着能彼此抓住对方的钩子和环。几个原子能用这一方式组成的一个坚实的小团体,称为分子。

* 参见 H. B. G. Casimir, *Haphazard Reality* (New York, Harper & Row, 1983)。

** 尚不熟悉“质量”概念的读者可以比较粗糙地使用下述概念:地球上任意物体的质量等于它们的重量(质量也用克或千克来度量),但是它们的重量是地球将该物体向下拉向地面的力。在宇宙飞船中,你的质量与你在地球上的质量是一样的,但你的重量却几乎为零。