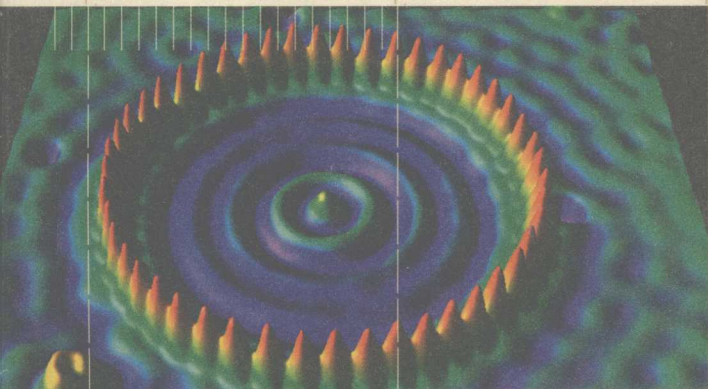




物理系列

The Quantum
Quark

量子夸克

[英] 安德鲁·华生 / 著 刘 健 雷奕安 / 译



第一推动

湖南科学技术出版社

0572.3/2

2008

物理系列



The Quantum
Quark

量子夸克

[英] 安德鲁·华生 / 著 刘健 雷奕安 / 译



第一推动

湖南科学技术出版社

The Quantum Quark by Andrew Watson

© Andrew Watson 2004

All rights reserved including the rights of reproduction in whole or in part in any form. Simplified Chinese edition copyright: 2006 Hunan Science & Technology Press

湖南科学技术出版社通过剑桥大学出版社独家获得本书中文简体字版中国大陆地区出版发行权

本书根据剑桥大学出版社2004年版本译出

著作权合同登记号: 18-2006-036

版权所有, 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

量子夸克 / (英) 华生著; 刘健, 雷奕安译. —长沙: 湖南科学技术出版社, 2008.4

(第一推动丛书)

书名原文: *The Quantum Quark*

ISBN 978-7-5357-5236-9

I. 量… II. ①华…②刘…③雷… III. 夸克—普及读物
IV. O572.3-49

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 049993 号

第一推动丛书 物理系列

量子夸克

著 者: [英] 安德鲁·华生

译 者: 刘 健 雷奕安

责任编辑: 吴 炜 戴 涛

出版发行: 湖南科学技术出版社

社 址: 长沙市湘雅路 276 号

<http://www.hnstp.com>

邮购联系: 本社直销科 0731-4375808

印 刷: 长沙化勘印刷有限公司

(印装质量问题请直接与原厂联系)

厂 址: 长沙市青园路 4 号

邮 编: 410004

出版日期: 2008 年 4 月第 1 版第 1 次

开 本: 880mm×1230mm 1/32

印 张: 16.25

字 数: 396000

书 号: ISBN 978-7-5357-5236-9

定 价: 39.50 元

(版权所有·翻印必究)

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，即使是缓慢而艰难地进步，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的所需的知识和技能，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，无数仁人志士意识到，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。科学是超越宗教差别的，超越民族差别的，超越党派差别的，超越文化的地域的差别的，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

前言

掂一下这本书，你就能感觉到地心引力的作用。看到这一页字，你会意识到光的存在：引力和电磁力对我们来说，都是再熟悉不过的东西了。但是大自然还操纵着另外两种我们不怎么熟悉的力。要了解这两种力的机理，就要在进行高倍放大后，在特别精细的尺度上观察世界，这时日常事物都会呈现出更为基本的组成部分。这两种我们不太熟悉的力，分别叫做强相互作用力（strong force，简称强力）和弱相互作用力（weak force，简称弱力）。强力使组成物质的最基本成分结合在一起，为我们的太阳提供动力，而弱力则参与放射性过程。物理学家们已经提出了一套理论，来说明强力怎样在最基本的层次上产生作用，本书的内容就是关于这套理论的。这套理论就是量子色动力学（quantum chromodynamics），或简称为 QCD。它是人类智慧最伟大的成就之一。

研究强相互作用力的物理学分支叫做粒子物理，或者也可以叫做高能物理。高能物理学家也研究弱相互作用力，但是我们要耍个小把戏，把有关弱力的东西，连同包括引力在内的所谓大



统一理论都放到一边。就像一本历史书，可能仅涵盖了英国历史，而不是整个欧洲的历史一样，本书的主要目的是介绍量子色动力学及其基本规律和发展历程。就像一本讲述英国历史的书并不能记载所有的英国历史一样，本书也不可能面面俱到。为了方便更广大的读者，与其他介绍粒子物理的书相比，本书更加详细地探讨了量子色动力学及其相关内容。

《量子夸克》一书意在使广大读者容易理解书中内容：读者不需要有物理学或数学基础，本书使用的符号也做了最大程度的简化。如同一本俄国名著中会有许多人物的名字令我们感到陌生那样，本书也会有很多晦涩的术语，因此书后提供了详尽的术语表供大家查阅。书后还收录了重大事件的历史年表，以帮助读者勾勒出 QCD 随时间发展的脉络。量子色动力学是一个庞大的课题，许多人为此投入了大量时间和精力，如此多的内容无法全部包罗在本书当中。我希望有关专家们能原谅我略去了一些观点、人物、实验以及参考资料，权且让我们在伟大思想之间信步，做一次轻松的旅行，而不要把本书作为一本教科书来对待。

致 谢

本书的完成离不开许多人的大力支持，太多的人需要感谢，我在这里无法一一列举。但我还是要在这一页对一些人示以谢意。我特别感谢 Tracey 和 Mark Williamson，还有 Graham Keeley，他们在我写这本书的早期为我提供了各种帮助。Arturo Sangalli 和 Rob Penfold 自始至终给了我很多支持和鼓励。剑桥大学的布莱恩·韦伯 (Bryan Webber) 和卡文迪许实验室 (Cavendish Laboratory) 为我提供了所需资料。我还要感谢几位匿名评论专家的帮助，他们找出了我早期书稿中的一些不足之处。还要特别感谢 Elke-Caroline Aschenauer, Christine Davies, Gordon Kane, Donald Perkins, Alexander Polyakov 和 Mikhail Shifman，他们花了大量的时间检查了全书或部分内容，并提供了许多宝贵的意见和建议。由于本人水平所限，书中不免还有一些纰漏以及不准确之处，还望大家谅解和指正。最后，我衷心感谢那些将自己多年珍藏的图片无私提供给我的科学家们。

目 录

> 前言	1
> 致谢	1
> 第一章 力及其相关理论简介	1
> 第二章 对称性	12
> 第三章 量子世界	24
> 第四章 向 QCD 进军	129
> 第五章 QCD 理论的一个数字	318
> 第六章 群居的胶子	341



> 第七章 夸克和强子	361
> 第八章 显微镜下的夸克	387
> 第九章 庸人自扰	434
> 第十章 棋盘 QCD 理论	458
> 附录 1 QCD 年表	482
> 附录 2 小辞典	492

第一章 力及其相关理论简介

在路易斯安那州（Louisiana）的利文斯通（Livingston），坐落着一幢与众不同的“L”形建筑物。它由两条相互垂直的4千米长的臂组成，两臂的远端和两臂连接的拐角处都装有反射镜，激光经镜子反射后在两臂中来回穿梭。在往返多次之后，光线会重新汇合^①。测量结果令人吃惊：建筑物的长度发生了微小的改变。

建筑物的长度为什么会改变呢？难道路易斯安那州自身发生了伸缩？科学家们普遍赞同这个想法。也就是说，如果阿尔伯特·爱因斯坦（Albert Einstein）的引力理论正确，引力波会穿过路易斯安那州，同样也会经过华盛顿州（Washington state）。在华盛顿州的汉福德^②，也有与路易斯安那州一模一样的仪器正在观测这种波动。波动会穿过整个地球。实际上，根据爱因斯坦的广义相对论，波动将穿过时空结构本身。只不过在路易斯安那州和华盛顿州能方便地观察到这种波动而已。

引起波动的振动源非常强，能够使整个宇宙都发生震颤，诸

① 译者注：这是利用激光干涉测量长度。

② 译者注：Hanford，美国华盛顿州南部重要的原子能研究中心。



如恒星的坍塌，甚至是宇宙诞生本身都属于这种振动源。广义相对论预言，这些事件将会发出引力波，这就是科学家们在路易斯安那州和华盛顿州想要探测的那种时空波动。在意大利、澳大利亚等其他一些地方也有探测器在探测这种波动。

广义相对论还预言了黑洞 (black hole, 一种坍塌后的恒星) 的存在，其强大的引力连光都无法挣脱。天文学家们无法直接想象黑洞的样子，但他们已经发现了许多有可能是黑洞的天体，像天鹅座 X1 恒星系统 (Cygnus X-1 system) 中的伴星就极有可能是黑洞。天文学家认为，我们银河系的中心也隐藏着一个巨大的黑洞。他们的观测也支持了广义相对论的另一个预言——引力透镜效应 (gravitational lensing)。就是说，如果在地球上观测一个很大的星系，可能会看到星系的多个像，这些像会按照一定的方式排列，并且看起来可能比实际位置更远。爱因斯坦最初的想法是，太阳会使恒星发出的光弯曲，引力透镜效应是这种想法的另一个说法，人们第一次观测到引力透镜效应是在 1979 年^①。而太阳会使光线弯曲的预言，早在 1919 年就已经被证实^②，正是这一成就使爱因斯坦和广义相对论登上了历史舞台。

爱因斯坦理论的出发点，是人们在电梯中得到的日常经验。当电梯开始上升的时候，你能感觉到自己变重了；当电梯开始下降，你会觉得自己变轻了。根据爱因斯坦的想法，引力产生的效果同加速产生的效果是无法区分的。他把这个原理同一种关于弯曲空间的新兴数学联系在一起，得出了一套关于引力的理论。在这套理论中，万有引力源自于质量引起的的时空扭曲。他的广义相对论取代了艾萨克·牛顿 (Isaac Newton) 在 17 世纪提出的引

① 译者注：1979 年，Walsh, Carswell 和 Weymann 发现了首个类星体 0957+561 的引力透镜现象。

② 译者注：1919 年，爱丁顿率领的英国科考队对日食的观测验证了广义相对论的这一推论。

力定律。牛顿的理论只是引力理论的一种特例，只适用于处理诸如苹果落地和行星运动等现象。

万有引力虽然在处理宇宙尺度上的问题时极其出色，但在极小的尺度上却变得有名无实。尽管具有质量的物质之间普遍存在引力，这对于物质世界成员中最微小的基本粒子也不例外，但是引力作用在距离很小的情况下被自然界的其他 3 种力完全淹没了。并且到目前为止，没有人能拼凑出一套合适的理论，用来解释引力如何在极小尺度范围内作用。所以，我们在讲述量子色动力学的过程中把引力忽略掉并没有多大的影响。

无处不在的电

曾经有个小故事，讲的是时任英国财政大臣的威廉姆·格莱斯顿（William Gladstone），问发电机和电动机的发明者迈克尔·法拉第（Michael Faraday）：“电将会有什么实际用途？”法拉第已经认识到自己的发现将会引起重大的社会变革，他回答说：“先生，总有一天您会向人民征收电税的。”

从那时起，人类已经在征服电和磁（两者共同构成了电磁作用）的道路上取得了长足的进步。譬如现在，几乎在全球的每个角落都能够看到流行的肥皂剧，而这一切都离不开电磁学的发展：正是法拉第式的发电机提供了大部分电能，信号通过被称为无线电波的电磁波传播，电磁场控制着电视机中形成图像的电子束。

继引力之后，电磁力成为第二种在科学家面前揭开神秘面纱的力。电荷是电现象的源头，而磁效应的产生，也总可以追溯到电荷的运动。在法拉第发现的指引下，詹姆士·克拉克·麦克斯韦（James Clerk Maxwell）在他的电磁理论中成功地统一了电和磁。他的理论反过来又引发了这样的想法：电磁波就是振动着的



电波和磁波，它们以固定的速度一起传播。整个电磁波谱的范围从低频端的无线电波过渡到可见光，一直延伸到高频端的 X 射线。也就是说，光也是一种电磁波。

电动机、发电机以及无线电波等，都属于被物理学家们称作“经典电磁学”的学科所研究的范畴。之所以称作“经典”，是为了把它与 20 世纪初期诞生的新电磁学相区别。那时人们已经意识到，与之前的想法不同，光以及其他一些物质都不是简单地均匀分布的。实际上按照这个观点，光有时看上去像是由粒子组成的。在极其细微的尺度——原子尺度上，两个带电物体之间的相互作用，是通过交换一种分立的电磁载体实现的。这种电磁载体叫做光子 (photon)，用符号 γ 表示。从本质上来说，微小的带电粒子就是通过交换“光粒子”（即光子）相互作用的。

光子每时每刻都围绕着我们。为简化起见，我们用指数形式表示数字，100 可写成 10^2 ，1000 可以写作 10^3 ，那么，一个家用白炽灯泡每秒中能发出大约 10^{20} 个光子。光子数目如此庞大，而每个光子的能量又是如此的小，根据日常的生活经验，人们总是把这些光子作为一个整体来处理。但是在单个原子尺度上，光与物质粒子之间以及带电的物质粒子之间的电磁相互作用，都是由光的粒子本性决定的。

构建现有的微观电磁学理论是一项浩大的工程，这项工程从 1927 年开始启动，直到 1950 年左右才全部竣工。该理论被称作量子电动力学或 QED (Quantum Electrodynamics)，它描述了微观世界中光子与物质粒子作用的一般规律。这方面的成果并不是本书将要叙述的内容，本书要介绍的是有关强相互作用力（以下简称强力）的理论，叫做量子色动力学或 QCD (Quantum Chromodynamics)。但是 QED 比 QCD 更简单，并且 QED 的提出比 QCD 早了几十年，它为 QCD 的发展提供了一套基本的模式。从这种意义上来说，了解光与物质粒子之间的相互作用，是理解

QCD 的一种途径。

亚原子探索

芝加哥、日内瓦、斯坦福、汉堡、东京——以上所列举的是世界上最大的几座粒子加速器的所在地。这些分布在全球各地的粒子加速器（除了上文提到的几座外，还有许多加速器分布在其他地方），形成了物理实验的前沿阵地，科学家们期望能通过它们揭示自然界中另外两种力的秘密。这项任务异常艰巨，相关工作量大得惊人，耗费的资源也相当多。除了主要的实验室之外，全世界还有共 6000 多个研究机构和大学在分析实验结果、构建相关理论，为这些实验提供理论支持。总计有上万人全身心地投入到这项探索事业中来，投入的资金达上百亿美元。

那么他们到底在寻找什么呢？化学家们公认，组成物质的可辨认的最小微粒是原子（atom），原子内部几乎全是空的。简单地说，原子大概是个模糊的球状物，内部包含一种带负电的粒子，叫做电子（electron），还有一个带正电的坚硬核心部分，叫原子核（nucleus）。一个原子的直径大约是 10^{-10} 米（这里我们用 10^{-2} 来标记 $1/100$ ，用 10^{-3} 表示 $1/1000$ ）。也就是说，100 亿个原子的直径加起来才 1 米长。原子核的直径仅是原子直径的十万分之一，也就是大约 10^{-15} 米，但它却占据了原子约 99.975% 的质量。

欧内斯特·卢瑟福（Ernest Rutherford）在 1911 年证明了原子核的存在，并在几年之后，猜出原子核内应该有一种叫做质子（proton）的粒子。詹姆斯·查德威克（James Chadwick）在 1932 年发现了原子核的另一种组成部分——中子（neutron）。一个新的物质层次逐渐呈现出来。

质子的质量很小，大约为 1.673×10^{-27} 千克，带正电荷，且



电量与电子所带的负电荷相等。质子通常用符号 p 表示。最简单的元素——氢元素的原子由 1 个电子和只含有 1 个质子的原子核组成。中子的质量与质子质量差不多，大约为 1.675×10^{-27} 千克。中子质量与质子质量如此接近，但又不完全相同，这并不是巧合。中子通常用字母 n 表示，不带电荷。除氢之外最简单的元素当属氦了，宴会上那些能飘在空中的气球，一般都是用氦气吹起来的。氦原子的原子核包含 2 个质子和 2 个中子：原子核中的质子数与中子数都大致相等，而原子中的电子数目，总是等于其原子核中的质子数。

质子和中子是 QCD 理论中的主角，它们会在以后经常出现。我们已经顺便介绍过电子了，电子通常用符号 e 表示，质量只有 9.11×10^{-30} 千克，或者说大约是质子或中子质量的 $1/2000$ 。它所带的电荷是负的，并且电量非常小，约为 -1.602×10^{-19} 库仑。每秒钟内流经家用电缆的电荷所带的电量，大约是电子电量的 10^{19} 倍。到目前为止，大家已经承认电子是真正的基本粒子，它不可分割，并且目前仍没测量出电子的大小。

但质子和中子却与电子不同，这正是所有问题的关键所在。还有另外两种力决定着中子和质子内部的结构，以及质子和中子是怎样结合在一起的。核物理学家们对质子和中子怎样“粘”在一起形成原子核更感兴趣。粒子物理学家们则会研究更深层次的问题，他们主要探讨质子和中子本身的内部结构以及亚原子核世界中力的基本性质。研究人员就是在用那些巨大的粒子加速器做这些事情。

揭开弱力的面纱

时间回溯到 1983 年，在瑞士日内瓦，欧洲粒子物理实验室 (CERN，最初的完整名称为 Centre Européen pour la Recherche