

首次从一位内部人士的视角生动描述了发现的整个过程。

——彼得·希格斯，2013年诺贝尔物理学奖获得者

希格斯粒子是如何找到的？

来自史上最大物理实验的内部故事

[英] 乔恩·巴特沃思 / 著 黄日俊 / 译

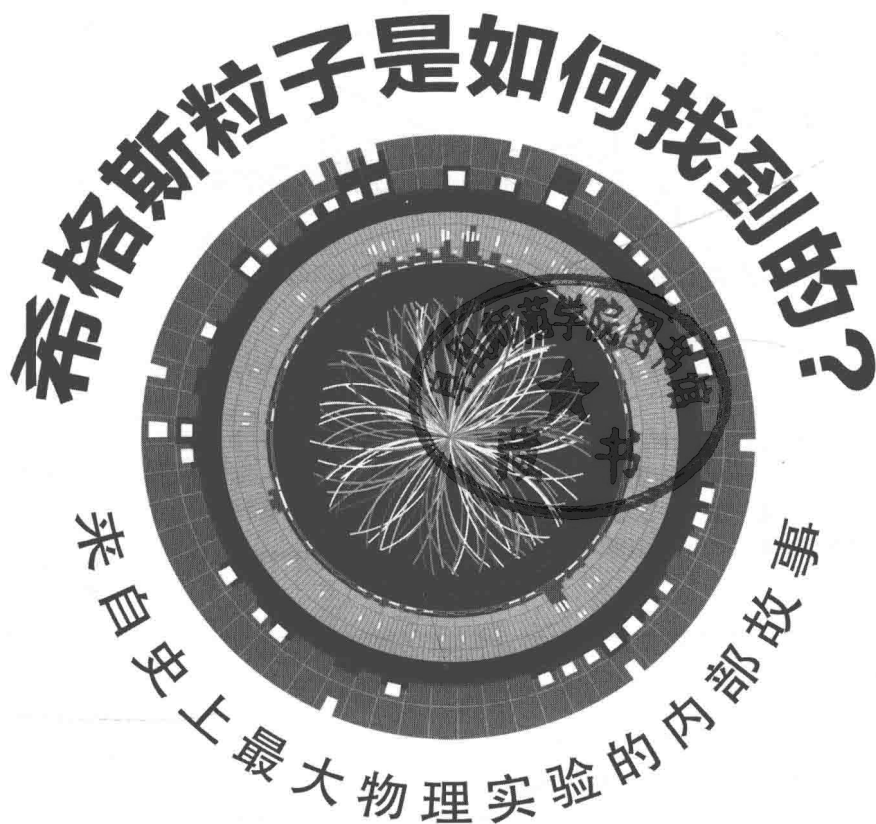
Smashing Physics



中国工信出版集团



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS



[英] 乔恩·巴特沃思 / 著 黄日俊 / 译

Smashing Physics

人民邮电出版社
北京

图书在版编目(CIP)数据

希格斯粒子是如何找到的? : 来自史上最大物理实验的内部故事 / (英) 巴特沃思著; 黄日俊译. — 北京: 人民邮电出版社, 2016. 1

(图灵新知)

ISBN 978-7-115-40546-3

I. ①希… II. ①巴… ②黄… III. ①强子—对撞机—普及读物 IV. ①O572.21-49

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第232151号

内 容 提 要

在这本首次由内部人士讲述希格斯玻色子发现过程的书中, CERN 资深物理学家乔恩·巴特沃思将带你深入体验发现的整个过程, 了解人类有史以来建造的最大最复杂的实验设施——大型强子对撞机(LHC)——背后的科学、技术、政治和文化, 并感受现代粒子物理大型国际合作项目中的生活点滴。

◆ 著 [英] 乔恩·巴特沃思

译 黄日俊

责任编辑 楼伟珊

责任印制 杨林杰

◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市丰台区成寿寺路11号

邮编 100164 电子邮件 315@ptpress.com.cn

网址 <http://www.ptpress.com.cn>

三河市海波印务有限公司印刷

◆ 开本: 880×1230 1/32

印张: 9

彩插: 2

字数: 222千字

2016年1月第1版

印数: 1-5 000册

2016年1月河北第1次印刷

著作权合同登记号 图字: 01-2014-6524号

定价: 39.00元

读者服务热线: (010)51095186转600 印装质量热线: (010)81055316

反盗版热线: (010)81055315

广告经营许可证: 京崇工商广字第 0021 号

版 权 声 明

Smashing Physics

by Jon Butterworth

Copyright © 2014 by Jon Butterworth

Simplified Chinese translation copyright © 2016 by Posts & Telecom Press.

All Rights Reserved.

本书中文简体字版由 Jon Butterworth 授权人民邮电出版社独家出版。未经出版者书面许可，不得以任何方式复制或抄袭本书内容。

版权所有，侵权必究。

献给苏珊娜、利昂、费利克斯以及伊迪

推荐序

2012年7月4日必定成为人类科学史上一个重要的日子。这一天，两个开展大型强子对撞机（LHC）物理研究的重要国际合作实验组ATLAS和CMS，在LHC运行三年后同时宣布在各自的探测器上均发现了物理学家，乃至全人类期盼已久的所谓“上帝粒子”——希格斯粒子存在的迹象。

LHC及其配套的六个探测器由八十多个国家的近万名科学家，历时二十年，花费逾百亿美元于2008年在日内瓦的欧洲核子研究中心（CERN）建成并试运行，次年开始正式运行。CERN是国际著名的粒子物理、核物理研究机构，始建于上世纪五十年代，地处瑞士与法国交界的日内瓦乡村。几十年来，CERN建造了包括著名的大型正负电子对撞机（LEP）在内的若干不同类型的粒子物理、核物理实验装置，产生过多项具有里程碑意义的重大科学研究成果，甚至现在风靡全球、人们日常生活不可或缺的万维网（WWW）也发端于CERN的实验室。当年它只是科学家为了数据传输和交流方便而发明的一项辅助工具而已，足见这个研究机构对科学发展和社会进步产生的影响之大。

LHC是CERN目前正在运行和最为重要的实验装置，其主要科学目标包括精确检验粒子物理的标准模型、发现标准模型的最后一块基石——希格斯粒子，以及寻找超出标准模型的新物理信号等。为了避

免实验受到外界因素的干扰，同时也为了尽可能地减少对环境造成不良的影响，周长 27 公里的 LHC 建在 CERN 地下近百米深处。它是有史以来人类建造的最庞大、最复杂的科学装置，也是迄今为止能量最高的对撞机。这台庞然大物将两团质子相向加速到光速的 99.999 999 1% 后使它们对撞，其能量足以再现大约 137 亿年前宇宙诞生之初万亿分之一秒的高密高热状态。LHC 运行所消耗的电量大致相当于一个中等城市的用电量，其能量之大由此可见一斑。

LHC 高能质子-质子对撞实验装有四个大型探测器，ATLAS 和 CMS 就是其中的两个多功能探测器，它们也分别是相应实验合作组的名称。这两个重达万吨左右、有六七层楼高的巨型探测器通过探测质子-质子碰撞碎裂后的次级产物检验各种理论模型给出的预言，例如标准模型中的希格斯粒子及其性质，并寻找新的实验现象。这两个合作组分别有数千名来自世界各国的科学家在开展合作研究。这样规模的科学实验本身就是一个科技奇迹。试想，近万名科学家组织起来，用如此巨型的实验装置，研究尺寸只有 10^{-13} 厘米、重量仅 10^{-24} 克的质子碰撞，这难道还不够神奇吗？！

粒子物理中的所谓“标准模型”是由温伯格 (S. Weinberg)、萨拉姆 (A. Salam) 和格拉肖 (S. L. Glashow) 于上世纪六十年代完成的，可以说是目前人类对微观世界认识方面的最高理论成就。几十年来大量的高能物理实验表明，标准模型是描述 TeV 能标以下基本粒子及其相互作用（引力除外）规律的正确理论，模型的创立者也因此获得了诺贝尔物理学奖。标准模型虽然由温伯格、萨拉姆和格拉肖最终完成，但实际上在其建立的过程中，许许多多科学家锱铢累积的研究铺垫也是必要的。这其中，有些成果非常重要，是标准模型建立不可或缺的，譬如杨-米尔斯理论、对称性自发破缺和希格斯机制等。

希格斯机制的建立过程也几经波折，最终由布劳特 (R. Brout)、恩格勒特 (F. Englert) 和希格斯 (P. Higgs) 于上世纪六十年代初完成。

通过希格斯场和希格斯机制，原本没有质量的基本粒子在宇宙冷却的过程中获得了质量；希格斯场也通过自相互作用获得了质量，对应的粒子即是标量希格斯粒子。

标准模型是如此成功，建立半个多世纪以来经历了各种检验，均没有遇到什么严重的挑战。在此过程中，模型所预言的各种现象不断被证实，模型所需的基本组员也陆续被发现。2012年前，唯一的缺憾就是希格斯粒子还未找到，尽管多数粒子物理学家都认为，它一定存在，存在于某个尚未被探寻的角落。发现希格斯粒子对于标准模型的确立、粒子理论的进一步发展、宇宙学研究等许多方面都有深刻影响，这就是为什么在五十年前希格斯粒子被预言后，高能物理学家屡挫屡进、孜孜以求的原因；是为什么2012年在LHC实验上发现希格斯粒子的迹象后物理学家欢呼雀跃、科学界迅即将其确立为当年最重要的科学发现的原因；也是为什么次年诺贝尔物理学奖就授予希格斯机制的提出者希格斯和恩格勒特的原因。（遗憾的是，另一位希格斯机制的奠基人，布劳特博士没能等到五十年后他的预言被证实的历史性时刻。）这也再次提醒我们，科学理论是对自然的解释和描述，正确与否最终要靠实验来检验。如果得不到实验检验，再漂亮的理论，不论它看起来是多么玄妙，也不过是个假说，不会有长久的生命力。

《希格斯粒子是如何找到的？》一书的作者是伦敦大学学院(UCL)物理和天文系主任、CERN资深物理学家乔恩·巴特沃思(J. Butterworth)教授。自2008年LHC开始运行伊始，他便带领UCL团队在ATLAS实验组开展研究。他是一线科学家，是在希格斯粒子发现过程中做出了实质性贡献的亲历者，对“上帝粒子”的发现过程有切身体会，故事讲述出来真实、可信、入木三分。在书中，巴特沃思教授向读者介绍了LHC及ATLAS探测器、粒子物理标准模型和希格斯粒子，以及LHC实验中众多物理学家是如何孜孜不倦地工作的，包括其中的欢笑和泪水。你可以把这本书看作是希格斯粒子发现的回忆

录，也可以视为巴特沃思教授那段工作岁月的记事簿，还可以把它当作介绍粒子物理的科普书。从字里行阅读者可以感受到巴特沃思教授对粒子物理的满腔热情，等待实验结果出现时的激动和焦虑，给我们讲述基本概念时的耐心和期望，探讨问题时的严谨、缜密和忘我般地直抒胸臆，以及由于实验结果不理想而表现出沮丧等科学家的真性情。本书语言通俗而严谨，通过带领读者“游览” CERN、“观察”探测器内部结构、“参加”世界各地的大小会议等方式，讲解粒子物理的基本知识和当今高能物理实验的研究现状，走进一位粒子物理学家的生活，和他一起感受 LHC 的魅力，理解和探索粒子物理之美。

阅读本书就像看电影一般。影片中“镜头”时远时近，场景不断切换，捕捉那些在 LHC 上发现希格斯粒子过程中台前幕后的有趣事件。它的“取景地”遍及世界，从瑞士日内瓦到印度孟买，再到美国芝加哥，甚至还有南极大陆！影片中既有严肃高端的国际高能物理大会，有英国财政部外科学家们的抗议示威，也有汉堡莱泊帮（Reeperbahn）酒吧中一群醉醺醺的物理学家跳舞的画面，栩栩如生，引人入胜。不管我怎么说，用句老话，要想知道个中滋味，读者还得亲自品尝（鉴赏）。

本书的一大特色是分布于各章节末尾的“术语”，它们是粒子物理的重要概念。巴特沃思教授非常擅长用类比的手法向读者解释专业知识，如行云流水般娓娓道来，让人有一种读着读着豁然开朗的感觉。另外值得一提的是，黄日俊博士的翻译紧跟时代发展，用词很时尚，诸如“三蹦子”、“祖祖师爷”、“直男”、“老大”等，译得恰到好处，读来让人忍俊不禁。他本人是理论物理科班出身，不仅对物理内容的理解很到位，语言文字功夫也相当出色，我认为这是一部优秀的科普译著，相信广大科学爱好者通过阅读本书能够增长知识，得到乐趣。

乔从丰

中国科学院大学物理科学学院

科学是如此一门学科，在其中，即使是此辈之愚者亦能超越上辈之智者。

——马克斯·格卢克曼（Max Gluckman）

目 录

引 言	1
第一章 数据到来之前	3
第二章 重启	40
第三章 高能	62
第四章 标准模型	102
第五章 传言和极限	133
第六章 希格斯粒子的首个线索和一些疯狂的中微子	172
第七章 逼近	200
第八章 发现	226
第九章 下一步做什么？	244
致 谢	275
图片版权说明	277

引言

瑞士日内瓦的梅兰乡间有一家土耳其烤肉店，烤肉店附带有十几张台球桌。2012年7月初，我与英国《第四台新闻》(Channel 4 News)栏目的科学记者汤姆·克拉克(Tom Clarke)在那里边玩台球，边向他以及他的观众解释大型强子对撞机最新发现的重大意义。

上句话包含的信息至今仍令我热血沸腾——大发现，以及巨大的公众关注度：汤姆和众多记者特意安排出一天时间，过来和许多物理学家对话。他的报道成为了7月4日当天新闻的头条。

7月4日我们宣布的大发现是物理学迈出的巨大一步；而对于支持着文明发展的科学而言，此次巨大的公众关注度是一个重要的里程碑，象征着公众与科学之间持续增长的互动达到了一个新的高度。我强调的是科学，不仅仅包括技术，还包括科学的过程——在多大程度上它可以自我调控，以及什么构成了科学绝对真理(很少!)和科学知识(很多!)

我特意提到梅兰，是因为欧洲的粒子物理实验室 CERN 离此地只有五分钟路程。梅兰小镇风景如画，但我和汤姆所在的梅兰城区到处都是公寓大楼，很可能将和世界上的其他许多地方一样，成为充满了涂鸦和难闻气味的钢筋水泥丛林。不过，由于这里是瑞士(差一点就

不是了——约一百米之外就是法国),所以它是一尘不染而又井然有序的钢筋水泥丛林。工作于 CERN 的许多科学家也住在此地。

我任职于伦敦大学学院 (University College London, UCL), 但和全世界许多粒子物理学家一样, 大部分时间我在 CERN 从事研究。UCL 临时公寓就在梅兰, 所以我和我的同事经常在那里生活。特别是, 在 2010 年 10 月到 2012 年 10 月间 (即我们获得首批高能实验数据的那段时期), 我在 CERN 的 ATLAS 实验中主持一个工作组。所以那时候, 我几乎每周都会去梅兰。

这本书不是物理教科书, 不是希格斯玻色子大发现的回忆录, 不是日记, 不是鼓动公众与科学家进一步互动的宣言, 虽然它也确实包含了以上全部元素。你将从中了解粒子物理和粒子物理学家的生活、科学发挥作用 (以及偶尔不发挥作用) 的方式、科研如何谋求自己的生存和繁荣, 以及牵涉其中的许多人, 此外还有大量我的主观看法。我希望这些也能够解释为什么汤姆·克拉克和全球许多媒体会在那个 7 月造访梅兰。

但在那之前, 我需要向你介绍很多互相关联的信息, 其中很多或许并不常见。有些信息在它们首次出现之时可能看起来和其他信息没有什么关联, 就好像拼图玩具中孤立的一块, 但随着你在阅读本书的过程中收集到的信息越来越多, 它们将彼此强化, 并最终呈现出完整的图景。如果我称职的话, 你将在阅读故事、收集信息的过程中体会到乐趣, 并因此而感到激动。乐趣和激动的情绪是盘旋于我记忆中的两个主要印象, 而带给我如此美妙体验的就是人类有史以来最大的科学仪器: 大型强子对撞机!

第一章

数据到来之前

1.1 为何如此庞大？

在瑞士、法国边境地下百米深处暗藏着一条环形隧道（彩图 1）。隧道全长 27 千米，里面藏着个庞然大物。它就是我们的主角：大型强子对撞机（Large Hadron Collider, LHC）（彩图 2）。如果你熟悉伦敦，我可以告诉你，27 千米约等于伦敦地铁环线的总长，而隧道大小与伦敦地铁北线相似。要是你还一脸茫然，试试下面的。

让我们来场想像之旅！想像着你正处于瑞法边境的日内瓦国际机场附近，驱车从梅兰（Meyrin）出发，驶向法国乡间。前方是侏罗山脉徐徐而来，后方是日内瓦机场缓缓而去。穿过边境时，你同时也经过了欧洲核子研究中心（Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire, CERN）主楼，它就在左手边。如果看向右手边，你会发现一座巨型木制球形建筑，看起来像是环保的核反应堆（当然它并非核反应堆，而是展览馆，不过显然很环保）。或许在眼角余光处你还会瞥见超环面仪器（A Toroidal LHC Apparatus, ATLAS）探测器控制室所在大楼。如果瞥见了，你定会一眼认出：它的外墙上覆盖着巨大的 ATLAS 探

测器壁画（彩图 3），十分惹眼。

尽管壁画非常壮观，它仍然只有实物大小的三分之一（彩图 4）。ATLAS 探测器非常庞大，它深藏地底，位于 LHC 的一个对撞点上。这些对撞点，顾名思义，就是身怀全球最高能量的两道粒子束对撞之处。ATLAS 探测器身为两个通用型粒子探测器之一，负责粒子束对撞结果的测量任务。

继续驱车前进。若想让旅行更加有趣，可以想像自己正端坐在一辆白色老爷小货车中，车身印着醒目的 CERN 标志。

沿着风光秀丽的侏罗山脉山麓，穿过圣热尼普伊（Saint-Genis-Pouilly）小镇，继续深入热克斯地区（Pays de Gex）。一路下来你都在 LHC 的包围之中。如果你是想像时值冬日，那么你可能会望见前方远处克罗泽（Crozet）的滑雪缆车徐徐上升。那可是侏罗山脉的一处滑雪胜地。（著名的勃朗峰就在背后地平线上，但是别分心，盯紧前方道路。）别停留，继续深入热克斯地区，途中穿过普雷格宁（Pregnin）、维拉斯（Véraz）和布雷蒂尼（Brétigny）。经过约 25 分钟的法国边境小镇自驾之旅（小心别被堵在拖拉机后面，否则就慢了），你就到达了热克斯附近的塞西（Cessy）小镇。此时你会发现自己正处于一条通道上端，通道往下直达紧凑渺子线圈（Compact Muon Solenoid, CMS）探测器，它是 LHC 中另一庞大的通用型粒子探测器。ATLAS 和 CMS 分别由两组相互独立的物理学家设计制造，它们原理各异，互为竞争对手。但殊途同归，它们都有一个共同的使命：尽其所能精确地测量 LHC 中质子对撞产生的粒子。之所以设计两个独立的探测器，就在于既能让它们相互验证，又能让它们正面交锋，多快好省地获得实验结果。

从 ATLAS 到 CMS 一路下来，你都置身于全球最大规模的物理实验中。从瑞法边境的 ATLAS 控制室主楼开始，你就闯进了这个庞大

大物的地盘，而现在你已经横穿它的直径。

LHC 的使命是对撞粒子。不仅如此，它的雄心是让亚原子粒子以有史以来加速器所能达到的最高能量对撞。物理学家试图通过粒子对撞来研究宇宙在极小距离上的结构，而极小距离对应着极高能量（后文会加以解释）。实验对象微乎其微，实验仪器却硕大无朋，简直令人匪夷所思！挖一条长龙般的隧道所费不貲，为什么不造得小一些呢？

这是因为隧道长度决定了粒子束对撞能量的大小！如果你知道研究越小物体反而需要越高能量（如果不知道，至少现在先假装知道），那么只要从日常生活中的物理现象出发，你就不难明白为什么 LHC 需要如此庞大了。

在不受外力的情况下，运动着的粒子将保持匀速直线运动状态。这是牛顿第一运动定律的体现。在日常生活中这并非一目了然（牛顿以敏锐的洞察力将其总结了出来），但一旦想通了，你就会发现它无处不在。

牛顿第一运动定律之所以在日常生活中并非一目了然，是因为地球上所有运动着的物体都受到摩擦力和空气阻力，而且所有物体都受万有引力控制。比如，滚动的球最终会停下来，因为摩擦力和空气阻力消磨了它前进的动力；扔到空中的球最终会落回地面，因为地球引力阻止了它的逃离。

如果摩擦力或引力小到可以忽略不计，情况就比较了然了。又比如，一辆飞驰的汽车（或者还说那辆 CERN 的老爷小货车）若要减速，需要司机脚踩刹车施加一个额外阻力。再举一个和 LHC 更相关的现象：飞驰的汽车若要转弯，轮胎与路面之间的摩擦力必须足够大，否则车子将会打滑。

急转弯时，司机和乘客都会感受到“惯性力”。小货车在转弯，你的身体却试图保持直线运动，所以你会感觉到小货车的一面挤压着你。

从物理的角度理解，你可以认为小货车的一面推着你，改变你的运动方向，强迫你和车子一起转弯。

在物理中，速率和运动方向构成速度。而速度和物体（例如小货车或乘客）的质量构成动量。速度或质量越大，动量也越大。而唯有施加外力，动量才会改变。

关于速度和质量如何具体“构成”动量，我故意说得模棱两可。当速度远小于光速时，“构成”可以近似理解为“相乘得到”——速度和质量相乘得到动量，这是中学物理教科书的标准答案。然而，这并非正确答案。低速运动时，两者只有微小区别，可以忽略不计。但随着速度趋近光速，区别将越来越明显。那时牛顿力学将力不从心，你需要爱因斯坦和他的相对论（详情后述）。当然对于小货车，牛顿力学绰绰有余。

另外，动量的改变越大，要施加的外力也越大。譬如大卡车的刹车制动性能必须要比小货车的更强。由于大卡车更重，所以即使两者以相同速度运动，让大卡车停止而需要改变的动量也越大，因此需要施加更大阻力。

这些常识也可以引申到 LHC 中，因为隧道中疾驰的质子面临着类似的情况。它们是迄今为止在实验室中加速得到的能量最高、动量最大的亚原子粒子。虽然质子的质量微乎其微，它们的速度却极高，所以总是顽固地沿直线前进。为了迫使两束质子在环形对撞机中转弯以便最终对撞，我们就需要对之施加巨大的外力。而施加这种外力的是人类以倾国之力制造的最强弯曲磁铁。

如果最大外力是确定的，我们就需要在加速器能拥有多陡的弯道和质子能得到多大动量之间作出权衡。仍借用小货车的比喻：飞驰的汽车若要转弯而不打滑，车速必须低于某个最高值。弯道越陡，转弯时车速就必须越小，而弯道平缓时则可以开得快些。LHC 设计得如此