

Jim Baggott
Higgs
The Invention and Discovery of
the 'God Particle'

希格斯

“上帝粒子”的发明与发现

吉姆·巴戈特 著

邢志忠 译

Philosopher's Stone Series

哲人石
丛书

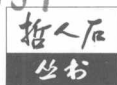
当代科普名著系列

2000年,斯蒂芬·霍金和美国物理学家凯恩打赌,认为希格斯粒子不可能存在。2012年,霍金输了100美元。而希格斯本人足足等待了这个粒子48年。



上海科技教育出版社

013070587



Philosopher's Stone Series

当代科普名著系列

0572. 3-49

02

希格斯

“上帝粒子”的发明与发现

吉姆·巴戈特 著

邢志忠 译



上海科技教育出版社



北航

C1678105

0572.3-49
02

图书在版编目(CIP)数据

希格斯:“上帝粒子”的发明与发现/(英)巴戈特(Baggott, J.)
著;邢志忠译. —上海:上海科技教育出版社,2013.8

(哲人石丛书.当代科普名著系列)

书名原文:Higgs: The Invention and Discovery of the ‘God
Particle’

ISBN 978-7-5428-5719-4

I. ①希… II. ①巴… ②邢… III. ①粒子物理学—普及
读物 IV. ①0572.3-49

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 163510 号

**Higgs:
The Invention and Discovery of the 'God Particle'**
by

Jim Baggott

Copyright © 2012 by Jim Baggott

Chinese (Simplified Characters) Translation Copyright © 2013

by Shanghai Scientific & Technological Education Publishing House

"Higgs: The Invention and Discovery of the 'God Particle',

First Edition" was originally published in English in 2012

This Translation is published by arrangement with Oxford University Press

ALL RIGHTS RESERVED

上海科技教育出版社经 Andrew Nurnberg Associates International Ltd. 协助
取得本书中文简体字版权

责任编辑 郑华秀 傅勇
装帧设计 汤世梁

哲人石丛书
希格斯
——“上帝粒子”的发明与发现
吉姆·巴戈特 著
邢志忠 译

上海世纪出版股份有限公司 出版发行
上海科技教育出版社
(上海冠生园路393号 邮政编码200235)

网址: www.ewen.cc www.sste.com

各地新华书店经销 上海商务联西印刷有限公司印刷

ISBN 978-7-5428-5719-4/N·876

图字 09-2013-391 号

开本 635×965 1/16 印张 15 插页 4 字数 201 000

2013年8月第1版 2013年8月第1次印刷

印数 1-4 000 定价: 38.00 元

建立在杨—米尔斯场论 (Yang-Mills field theory) 基础上的标准模型 (standard model), 是人类理解物质世界的微观结构及其相互作用力的集大成之作, 它的点睛之笔当属布劳特—昂格勒—希格斯机制 (Brout-Englert-Higgs mechanism)。该机制保证了电弱规范对称性的自发破缺, 不仅使电磁力与弱核力从此分道扬镳, 以及绝大多数基本粒子因此获得质量, 而且预言了存在“上帝粒子”——希格斯玻色子 (Higgs boson)。2012 年 7 月 4 日, 一个酷似希格斯玻色子的新粒子终于在欧洲核子研究中心的大型强子对撞机上现出原形。本书遵循历史发展的脉络, 以简洁生动的语言回顾了基本粒子物理学的百年家史, 讲述了寻找“上帝粒子”之旅中交织着成功与失败的传奇故事, 展现了科学家无与伦比的探索精神、人文情怀和鲜明个性。

吉姆·巴戈特(Jim Baggott, 1957—), 一位成功的科普作家。先前从事纯学术性的研究, 现在的职业是私人商业顾问, 但依然保持着对科学、哲学和历史的广泛兴趣, 并在业余时间继续致力于这些方面的写作。其作品获得了广泛好评, 包括: 《量子故事: 40 个关键的历史时刻》(*The Quantum Story: A History in 40 Moments*)、《原子的故事: 物理学的第一次大战以及 1939—1949 年间的原子弹秘史》(*Atomic: The First War of Physics and the Secret History of the Atom Bomb 1939-49*)、《实在之新手指南》(*A Beginner's Guide to Reality*)、《无可估量: 现代物理学、哲学和量子理论的内涵》(*Beyond Measure: Modern Physics, Philosophy and the Meaning of Quantum Theory*)、《完美的对称: 富勒烯的意外发现》(*Perfect Symmetry: The Accidental Discovery of Buckminsterfullerene*) 和《量子理论的内涵: 化学和物理学学生的学习指南》(*The Meaning of Quantum Theory: A Guide for Students of Chemistry and Physics*)。

献给安吉 (Ange)

2012年7月4日,酷似希格斯玻色子(Higgs boson)的新粒子在日内瓦的欧洲核子研究中心(CERN)被发现了。这一消息如同具有传染性的电子病毒,瞬间传遍了全世界。各种新闻媒体都大肆报道了这个高能物理学的最新胜利。该发现成为报纸和电视的头版头条新闻,成为许多晚间新闻报道的焦点,并触发了亿万观众和听众的好奇心。CERN的实验信号与某个粒子的性质一致,这个粒子最初是在1964年被假设或“发明”出来的,并最终在48年之后以数十亿美元的代价被发现了。

那么,有什么值得大惊小怪的呢?希格斯玻色子是什么东西?它为什么如此重要?如果这个新粒子确实是希格斯玻色子,那么它能告诉我们哪些关于物质世界和早期宇宙演化的秘密呢?真的值得付出所有的努力去发现它吗?

人们可以在粒子物理学的所谓“标准模型”(standard model)的故事中找到这些问题的答案。顾名思义,标准模型是物理学家用于解释所有物质的基本组分和相互作用力的理论框架,其中相互作用力要么将物质结合在一起,要么使之分崩离析。它是物理学家数十年不遗余力的集大成之作,象征着他们为了解释我们周围的物理世界而付出的最大努力。

标准模型还不是一个“万能理论”(theory of everything)。它无法解释引力的本质。近年来你也许读到过一些奇奇怪怪的物理学新理论,它们试图统一所有的基本相互作用力,包括引力。超对称(supersymmetry)和超弦(superstring)就属于这类新理论。尽管成百上千的理论学家致力于此类研究项目,但这些新理论依旧处于思辨和推理阶段,没有或几乎没有得到任何实验证据的支持。虽然

人们承认标准模型自 20 世纪 60 年代末期* 建立伊始就一直存在着瑕疵,但它暂时仍然是粒子物理学最行之有效的理论。

希格斯玻色子在标准模型中很重要,因为它意味着希格斯场(Higgs field)的存在,而希格斯场是一种原本不可见的、遍及整个宇宙的能量场。假如没有希格斯场的话,那么组成你、我和可观测宇宙的基本粒子就不会有质量。假如没有希格斯场的话,那么就无法生成质量,也无法构建任何东西。

似乎我们应该对希格斯场的存在心怀感激。这是希格斯玻色子(即希格斯场所对应的粒子)之所以被大众媒体夸大为上帝粒子(God particle)的原因之一。实事求是的科学家都十分鄙视“上帝粒子”这个名称,因为它夸大了希格斯粒子的重要性,并把公众的注意力吸引到物理学和神学之间的关系上,而这有时令人感到很不舒服。然而,它是一个深受科学记者和科普作家喜爱的名称。

许多关于希格斯场的理论预言结果在 20 世纪 80 年代初期的粒子对撞机实验中得到了证实。可是对场的推断并不等同于探测它的信号——场粒子。因此,搞清楚希格斯场很有可能无处不在这件事是非常令人欣慰的。也许希格斯玻色子还没有被发现,这也是很有可能的。果真如此的话,其寓意对于标准模型而言将具有潜在的颠覆性。

我是从 2010 年 6 月,即希格斯粒子被发现的两年之前,开始写这本书的。当时我刚刚完成另外一本书的手稿,书名为《量子故事:40 个关键的历史时刻》。正如书名所表明的那样,它是一部关于量子物理学从 1900 年到今天的历史。该书概括了标准模型的发展与希格斯场及其粒子的发明。几个月前,CERN 的大型强子对撞机(Large Hadron Collider)达到了创纪录的 7 万亿电子伏的质子-质子对撞能量。于是我推测,它在未来的几年之内有可能做出某种发现。幸运的是,我被证明是正

*在英文原版中,此处将标准模型的建立时间误写为 20 世纪 70 年代末期。——译者

确的。

《量子故事》一书出版于2011年2月,它的部分内容在本书中将有所体现。

感谢梅农(Latha Menon)和牛津大学出版社的代表们,他们当时做好了准备,要冒险出一本关于还没有被发现的粒子的科普图书。我一直通过正式渠道密切关注着CERN那里的实验进展,但是我要感谢数位高能物理学的博主,包括吉布斯(Philip Gibbs)、多里戈(Tommaso Dorigo)、沃伊特(Peter Woit)、法尔科夫斯基(Adam Falkowski)、斯特拉斯勒(Matt Strassler)和巴特沃思(Jon Butterworth)。我还要感谢巴特沃思、泰绍里(Sophie Tesauri)、吉利斯(James Gillies)、庞塞(Laurette Ponce)和埃文斯(Lyndon Evans),他们花了很多时间与我交谈,并与我分享他们对实验进展那种与日俱增的兴奋感。我也要向米勒(David Miller)教授和沃伊特教授表示感谢,他们阅读并评论了本书的初稿。感谢温伯格(Steven Weinberg)教授,他也通读了本书的初稿,并在他的序言中友好地表达了个人观点和展望。由于作者水平有限,本书的错误在所难免。

巴戈特

2012年7月6日

英国雷丁

许多重要的科学发现都会有通俗读物追随之至,以便将这些发现解释给一般读者。但这本书的创作在很大程度上是期待一个发现的到来。我还是头一次遇见这种情形。2012年7月,欧洲核子研究中心发现了一个似乎是希格斯玻色子的新粒子,此消息刚一宣布,这本书就已经准备好出版了。这一点证实了巴戈特和牛津大学出版社所具备的非凡活力和进取心。

这本书的迅速出版也证明了普通大众对上述发现的好奇心。因此,如果我在这篇序言中补充一些我个人对CERN所取得的成果的见解,那也许是很值得的。人们常说,寻找希格斯粒子的关键之所在是解决质量起源的问题。诚然如此,不过这样的理由还需要某种程度的强化。

时至20世纪80年代,我们拥有了一个关于所有已观测到的基本粒子以及作用在它们之间的力(引力除外)的完善理论。该理论的基本元素之一是一种如同家庭关系的对称性(symmetry),这种对称关系处于电磁力和弱核力这两种力之间。电磁学负责描述光的行为,而弱核力则允许原子核内部的粒子在辐射衰变过程中改变它们的身份或特性。该对称性把这两种力结合在单一的“电弱”(electroweak)结构中。电弱理论的一般特征已经得到了充分的检验,其有效性并非CERN和费米实验室(Fermilab)的最新实验所关注的焦点;即便发现不了希格斯粒子,这种有效性也不会成为大问题。

可是电弱对称性的后果之一在于:假如不在理论中加入新东西,那么包括电子(electron)和夸克(quark)在内的所有基本粒子都将是无质量的,而这当然与事实不符。因此,理论学家只好在电弱理论中加些什么,某种新的物质或场,它尚未在自然界或我们的实验室中被观测到。寻找

6 希格斯粒子也就是寻找下述问题的答案：这种我们所需要的新东西到底是什么呢？

寻找这种新东西并非只是一个在高能加速器周围守株待兔的问题，静等着看究竟会出现什么。电弱对称性作为基本粒子物理学的基本方程式所具有的严格性质必须破缺；它一定不能直接用于我们实际观测到的粒子和力。从南部阳一郎 (Yoichiro Nambu) 和戈德斯通 (Jeffrey Goldstone) 完成于 1960—1961 年的工作至今，人们知道这种对称性破缺在许多理论中都是可能的，不过它似乎不可避免地伴随着新的无质量粒子的产生。但众所周知，这种无质量的新粒子并不存在。

是布劳特 (Robert Brout) 和昂格勒 (François Englert)，希格斯 (Peter Higgs)，以及古拉尔尼克 (Gerald Guralnik)、哈根 (Carl Hagen) 和基布尔 (Tom Kibble) 在 1964 年独立完成的三篇论文^{*}，证明了这些无质量的南部—戈德斯通粒子 (Nambu-Goldstone particle) 在某些理论中可以消失，它们的作用只是为传递力的粒子提供质量。这就是在弱作用力和电磁力的统一理论中所发生的事情，该理论是由萨拉姆 (Abdus Salam) 和我本人在 1967—1968 年提出来的。但这依旧留下了悬而未决的问题：到底是什么新型的物质或者场造成了电弱对称性破缺？

存在两种可能性。一种可能性是存在迄今尚未观测到的、遍及真空的场。就像地球的磁场可以把北方和其他方向区分开来一样，这些新的场把弱作用力和电磁力区分开来，给予传递弱作用力的粒子和其他粒子以质量，但保持传递电磁力的光子 (photon) 无质量。这些场叫做“标量 (scalar)”场，意思是它们与磁场不同，在普通的空间中无法识别方向。这种一般性的标量场被戈德斯通采用，以举例说明对称性破缺；它们后来也被引入那些发表于 1964 年的三篇论文中。

当萨拉姆和我把这种对称性破缺用于发展新式的、关于弱作用力和电磁力的电弱理论时，我们假设对称性破缺源于这种标量型的、遍及全

^{*} 简要起见，我将把这一工作称为“发表于 1964 年的三篇论文”。

空间的场。[格拉肖(Sheldon Glashow)以及萨拉姆和沃德(John Ward)此前已经假设过这种电弱对称性,但它没有被当做相关理论的方程式的严格性质,因而致使这些理论学家当时没有引进标量场。]

那些由标量场导致了对称性破缺的理论,包括戈德斯通的工作、发表于1964年的三篇论文以及萨拉姆和我的电弱理论中所考虑的模型,都有一个后果:虽然一部分标量场只起到了赋予传递力的粒子以质量的作用,但是其他标量场会成为新的物理粒子而出现在自然界,它们可以在加速器和粒子对撞机中产生出来并被观测到。萨拉姆和我发现,需要在我们的电弱理论中放进四个标量场。这些标量场中的三个在赋予 W^+ 、 W^- 和 Z^0 粒子以质量的过程中被消耗掉了,而这三个粒子就是我们的理论中传递弱作用力的“重光子”(这些粒子于1983—1984年期间在CERN被发现了,而且实验发现它们具有电弱理论所预言的质量)。其中一个标量场遗留下来,它表现为一个物理粒子,即该场的能量和动量所形成的实体。这就是“希格斯粒子”(Higgs particle),一个物理学家们苦苦寻找了近30年的粒子。

但是总有另外一种可能性。或许根本就不存在遍及整个空间的新标量场,也不存在希格斯粒子。相反,电弱对称性也许是由强作用力破缺的,这种力被称为“彩力”(technicolor force),作用于一类新粒子,但是这些新粒子太重了,还没有被观测到。类似情形在超导中出现过。这种关于基本粒子的理论是在20世纪70年代末由萨斯坎德(Leonard Susskind)和我本人各自独立地提出来的,它会导致一大群新粒子的出现,是“彩力”将这些新粒子结合在一起。这就是我们所面临的选择:标量场?还是彩色(technicolor)?

新粒子的发现强有力地支持了电弱对称性是由标量场破缺的,而不是由彩力破缺的。这便是CERN的发现非常重要的原因。

但是要想把这一点敲定,还有很多事情要做。建立于1967—1968年期间的电弱理论预言了希格斯粒子的所有性质,除了它的质量以外。利用如今通过实验所获知的希格斯质量,我们可以计算出希格斯粒子以

8 各种方式衰变的概率,并察看这些预言是否能被进一步的实验所证实。这将需要一些时间。

发现一个看上去像是希格斯粒子的新粒子也给理论学家留下了一项艰巨的任务:搞清楚它的质量。希格斯粒子作为一个基本粒子,它的质量并非来源于电弱对称性的破缺。就电弱理论的基本原理而言,希格斯粒子的质量取什么值都可以。因此萨拉姆和我都无法预言希格斯质量的大小。

事实上,我们现在确实观测到了希格斯质量,不过它的数值有些令人费解。这就是人们通常所说的“等级问题”(hierarchy problem)。由于所有其他已知的基本粒子的质量都是由希格斯质量标定的,因此或许有人会猜测希格斯质量应该类似于另一个在物理学中发挥了重要作用的质量,即所谓的普朗克质量(Planck mass)。在引力理论中,普朗克质量是质量的基本单位(它是某些假想粒子的质量,这些假想粒子彼此之间的万有引力与分开同样距离的两个电子之间的静电作用力一样强)。但普朗克质量差不多比希格斯质量大十亿亿倍。因此,尽管希格斯粒子如此之重,以至于需要庞大的粒子对撞机才能把它产生出来,但是我们仍然要问:希格斯质量为什么这么小?

巴戈特建议,我可以在这儿补充一些个人对这个领域中各种思想演变的看法和展望。我将只提及两点。

正如巴戈特在第四章中所描述的那样,菲利普·安德森(Philip Anderson)早在1964年之前就指出,无质量的南部—戈德斯通粒子并不是对称性破缺的必然结果。那么,为什么我和其他粒子理论学家不相信安德森的观点呢?这自然不是说,人们无须认真对待安德森的观点。就所有从事凝聚态物理学研究的理论学家而言,没有人比安德森更清楚对称性原理的重要性,此类原理在粒子物理学中也已经被证明是至关重要的。

我认为安德森的观点总的来说是不太可信的,因为它是基于与诸如

超导等非相对论性的现象所做的类比[也就是说,这些现象发生在可以放心地忽略爱因斯坦(Einstein)的狭义相对论(special theory of relativity)的领域]。但很显然,无质量的南部—戈德斯通粒子是不可避免的,这一点已经被戈德斯通、萨拉姆和我本人在1962年严格地证明了。我们的证明显然依赖相对论的有效性。粒子理论学家无疑相信,安德森的观点在超导的非相对论性情况下是对的,但在基本粒子理论中是不对的,后者必须与相对论结合在一起。发表于1964年的三篇论文表明,戈德斯通、萨拉姆和我的证明不适用于那些含有传递力的粒子的量子理论。其原因在于,尽管在这些理论中物理现象确实满足相对论的原理,可是这些理论的数学表示在量子力学的情况下却不满足相对论的原理。

这个与相对论有关的问题,也是我在1967年以后无法证明萨拉姆和我所做的猜测的原因之所在,尽管我曾做了艰苦的努力。我们的猜测是,那些在电弱理论中出现的没有意义的无穷大都会抵消,其抵消方式与在电磁学的量子理论(即量子电动力学)中一样。类似的无穷大单单在量子电动力学中就已经被证明是可以抵消的。在证明电磁学中的无穷大可以抵消的过程中,相对论是必不可少的。巴戈特在第五章描述了特霍夫特(Gerard't Hooft)在1971年对抵消无穷大的证明。特霍夫特在证明的过程中使用了他和韦尔特曼(Martinus Veltman)发展出来的技术,其中充分利用了量子力学的原理,使得相关的理论可以用一种与相对论一致的方式表达出来。

再来看第二点。巴戈特在第四章中提到,我在自己1967年发表的那篇提出电弱理论的论文中没有包括夸克,原因是我担心一个问题:该理论可能会预言一些涉及所谓“奇异”(strange)粒子的过程,事实上此类过程并没有被观测到。但愿我当时没有考虑夸克的原因真有他说的那么具体。更确切地说,我当初之所以没有把夸克纳入理论,只是因为我在1967年还根本不相信夸克模型。从来没有人看见过夸克,而且很难令人相信这是由于夸克比质子(proton)和中子(neutron)等已被观测到了的粒子更重,而夸克模型假设这些已被观测到了的粒子是由夸克构

10 成的。

像许多其他理论学家一样,直到1973年,当格罗斯(David Gross)和威尔切克(Frank Wilczek)以及波利策(David Politzer)的工作出来以后,我才完全接受夸克的存在。基于夸克和强核力的理论,亦称为量子色动力学(quantum chromodynamics),格罗斯等人证明了强作用力随着距离的减小而减弱。于是我们中的一部分人意识到,在这种情况下,与我们的直觉相反,夸克之间的强作用力会随着夸克相距越远而变得越强,或许强到足以阻止夸克彼此分开,在任何时候都不会自行其是。这一点还从未被证明过,但人们普遍相信它是对的。到目前为止,量子色动力学已成为一个久经考验的理论,可是从来没有人见过孤立的夸克。

我很高兴地看到这本书从埃米·诺特(Emmy Noether)开始写起,身处20世纪初期的她率先认识到了对称性原理在自然界的重要性。这有助于提醒我们,今天科学家的工作只不过是宏大的科学史诗中承前启后的最新篇章:我们力图猜中自然界的奥秘,并始终使我们的猜测服从于实验的检验。巴戈特的书将会为读者勾勒出这一历史性的科学探秘之旅中形形色色的风景。

温伯格

2012年7月6日

哲人石丛书

当代科普名著系列 当代科技名家传记系列
当代科学思潮系列 科学史与科学文化系列

第一辑

- | | |
|-----------------------------|---------|
| 确定性的终结——时间、混沌与新自然法则 | 13.50 元 |
| 伊利亚·普利高津著 湛敏译 | |
| PCR 传奇——一个生物技术的故事 | 15.50 元 |
| 保罗·拉比诺著 朱玉贤译 | |
| 虚实世界——计算机仿真如何改变科学的疆域 | 18.50 元 |
| 约翰·L·卡斯蒂著 王千祥等译 | |
| 完美的对称——富勒烯的意外发现 | 27.50 元 |
| 吉姆·巴戈特著 李涛等译 | |
| 超越时空——通过平行宇宙、时间卷曲和第十维度的科学之旅 | 28.50 元 |
| 加来道雄著 刘玉玺等译 | |
| 欺骗时间——科学、性与衰老 | 23.30 元 |
| 罗杰·戈斯登著 刘学礼等译 | |
| 失败的逻辑——事情因何出错,世间有无妙策 | 15.00 元 |
| 迪特里希·德尔纳著 王志刚译 | |
| 技术的报复——墨菲法则和事与愿违 | 29.40 元 |
| 爱德华·特纳著 徐俊培等译 | |
| 地外文明探秘——寻觅人类的太空之友 | 15.30 元 |
| 迈克尔·怀特著 黄群等译 | |
| 生机勃勃的尘埃——地球生命的起源和进化 | 29.00 元 |
| 克里斯蒂安·德迪夫著 王玉山等译 | |
| 大爆炸探秘——量子物理与宇宙学 | 25.00 元 |
| 约翰·格里宾著 卢炬甫译 | |
| 暗淡蓝点——展望人类的太空家园 | 22.90 元 |
| 卡尔·萨根著 叶式辉等译 | |
| 探求万物之理——混沌、夸克与拉普拉斯妖 | 20.20 元 |
| 罗杰·G·牛顿著 李香莲译 | |