

EINSTEIN'S DREAM

Searching for
The Theory of Everything



爱因斯坦 与 万物之理

统一路上人和事

张天蓉◎著

一场伟大的理性历险
追寻宇宙万物运行奥妙的统一理论

清华大学出版社



EINSTEIN'S
DREAM

Searching for
The Theory of Everything



爱因斯坦 与 万物之理

统一路上火和事 张天蓉◎著

清华大学出版社
北京

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

爱因斯坦与万物之理:统一路上人和事/张天蓉著.--北京:清华大学出版社,2016

(原点阅读)

ISBN 978-7-302-42066-8

I. ①爱… II. ①张… III. ①物理学史—世界 IV. ①O4-091

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第263619号

责任编辑:胡洪涛 王 华

封面设计:蔡小波

责任校对:王淑云

责任印制:李红英

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦A座

邮编:100084

社总机:010-62770175

邮购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印装者:三河市金元印装有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:148mm×210mm 印张:8.5 字数:188千字

版 次:2016年3月第1版 印次:2016年3月第1次印刷

定 价:39.00元

产品编号:066904-01

本书定名为《爱因斯坦与万物之理：统一路上人和事》，其内容叙述的并不主要是爱因斯坦本人的工作和成就，而是记录了众多理论物理学家们在追求探索“统一理论”的道路上留下的足迹。

自古以来，科学家们就追求理论的完美，牛顿力学的经典理论算是实现了物理理论统一的第一座丰碑，法拉第和麦克斯韦将“电、磁、光”三者，统一在一组漂亮而对称的方程式中。爱因斯坦在成功地建立了两个相对论之后，便萌生了“统一大梦”，企图寻找一个能够解释万物的理论，但最后以失败而告终。至今又过去了大半个世纪，数千名物理学家前仆后继地追随爱因斯坦的梦想，探求万物之理。在这条坎坷的统一路上，看起来颇有进展却仍然未得其果。

几十年来，与统一大业有关而发展起来的理论模型不少：基本粒子标准模型、宇宙大爆炸学说、描写相互作用的规范场、量子引力、超弦理论、

超对称、M 理论、大统一论、万有理论，哪一个算得上是统一理论呢？都是，又都不是。这所有理论中固然有不少交叉和重复，但即便所有理论的总和，也远远够不上是“万物之理”。

也许所谓的万物之理并不存在！实际上，每提出一个新理论，解决了某些老问题，又往往会产生出许多新的未解之谜。其实这就是科学发展进步的正常途径，寻找万物之理，不过是代表了人类追求探索大自然秘密的一个循环上升而无限逼近的过程而已。

此外，物理学是基于实验和观测的科学，正如著名物理学家温伯格所说：“物理学并不是一个已完成的逻辑体系”。过去和现在不是，将来也不会是。物理理论必须不断地改造和修正，不断地革命，才能符合从实验和观测中得到的新数据。

尽管万物之理难以企及，但是，追求美是人类的天性，追求一个统一的“万物之理”便是这种天性在物理学中的体现。

20 世纪 80 年代初期，广义相对论量子化的研究曾经引人注目，在得克萨斯州大学奥斯丁分校的相对论及理论物理中心，荟萃了研究量子引力的几位大师级人物，其中有：费曼的老师约翰·惠勒，引力量子化的奠基人布莱斯·德威特，霍金在英国的博士指导教授丹尼斯·夏玛。此外还有属于年轻一辈的几位。后来，又来了诺贝尔奖得主温伯格教授。笔者当年在那儿读博士期间感觉受益匪浅，也亲眼目睹了物理大师们孜孜不倦地寻求“万物之理”的奋斗精神。

几十年一晃而过，几位老一辈的物理学家已经作古，当年的年轻人也人到中年，仍然在继续努力，探索不止。

为此，笔者将这本小书奉献给渴求了解物理统一理论的广大读者们，并以此纪念那些为求万物之理而辛勤耕耘默默奉献的无数物理学前辈们！

引言 物理理论的简约之美 //001

第一篇 从牛顿到爱因斯坦 //013

1. 统一路上话牛顿 //015
2. 法拉第和麦克斯韦的忘年交 //019
3. 时间、空间成一统 //026
4. 惯性、引力、流形与几何 //030
5. 突破维数的疆界 //037
6. 外尔——苏黎世一只孤独的狼 //045

第二篇 奇妙的量子世界 //053

1. 普朗克放出量子精灵 //055
2. 薛定谔的紧箍咒 //061
3. “不确定”的海森伯 //067
4. 哥本哈根的灵魂 //070

5. 狄拉克玩数学 //073
6. 泡利——上帝的鞭子 //079
7. 自旋的奥秘 //086
8. 造物者的灵符 //091
9. 费曼的游戏 //097
10. 粒子和场 //104

第三篇 对称和群论 //113

1. 少年天才创群论 //115
2. 奇妙的旋转 //125
3. 何谓“李代数” //132
4. 数学才女论守恒 //140
5. 对称破缺之谜 //144

第四篇 粒子动物园 //149

1. 追寻世界的本源 //151
2. 从炼金术到周期率 //154
3. 原子模型 //159
4. 粒子家族大爆炸 //163
5. 基本粒子知多少 //170

第五篇 标准模型 //173

1. 规范理论的诞生 //175
2. 杨—米尔斯理论 //184
3. 上帝是个左撇子？ //191

4. 俘获上帝粒子 //198
5. 弱电同道 //205
6. 夸克世界五彩缤纷 //212

第六篇 大爆炸、统一论及其他 //219

1. 观察时间的起点 //221
2. 世界为什么是这个样子 //225
3. 暗物质和暗能量的启示 //230
4. 群星灿烂 //237
5. 顽固的引力 //242
6. 轮椅上的奇迹 //245
7. 威滕的菲尔兹奖 //248
8. 期待革命 //255

参考文献 //259

引 言

物理理论的简约之美

统一的意思就是使事物简单化。从多变少，由少归一，便谓之统一。

爱因斯坦在解释了光电效应、提出两个相对论之后，便开始了对统一场论的研究。大有“躲进小楼成一统，管他冬夏与春秋”之势，这一“统”就是三十余年，到死方休。爱因斯坦将其后半生都献给了物理学中的这场“统一之梦”。然而，他为此独自奋斗三十余年却未得其果。

尽管“统一场论”一词始于爱因斯坦，但其思想却始于麦克斯韦和法拉第的电磁场理论。事实上，如果略去“场论”二字，只谈理论之统一，那就应该追溯到牛顿时代了。

爱因斯坦逝世后，物理学家们在这条统一之路上，又走过了一个甲子的历程。在六十年的风风雨雨、点点滴滴中，理论物理学家们究竟作了些什么？统一之路如今走到了哪里？前途如何？本书作者从介绍牛顿力学、量子力学开始，到数学中的群论、对称守恒原理，再

介绍标准模型、规范理论、量子场论、费曼路径积分、费曼图等，让读者对理论物理中的“统一”大框架，特别是主流物理界公认的“标准模型”，有一个基本认识。最后，也探讨一下统一理论与大爆炸宇宙学、暗物质、暗能量的关系，以及标准模型的困难和局限，并简要地介绍包括弦论、M理论、弦网等概念，让读者不仅领略到理论的美妙和科学家的追求，也体会到科学研究的艰辛，更激励着年轻人保持探索自然规律的愿望和好奇心，踏进科学的大门。

物理学中的统一之路，实际上追求的是一种简约之美。

把复杂的事情简单化，是一种本领和智慧。简约并不简单，大智若愚、大道至简，用简去繁、以少胜多。中国清代有位书画家郑板桥，被称为“扬州八怪”之一，他在书斋中挂了一幅自写的对联，题曰：“删繁就简三秋树，领异标新二月花”，以此表明他的书法及文学理念，主张以最简练、清晰的笔墨和不同凡响的思想表现出最丰富的内容。

而物理学家的“统一”，归纳起来有三个方面：一是物理规律的统一；二是物质本源的统一；三是相互作用的统一。

因而，物理学家所追求的简单化、统一化，听起来与郑板桥追求的书画笔墨及文字之“简约”，如出一辙。两者实质上也就是所谓“奥卡姆剃刀”原则的变换说法，同属“简约之美”。

奥卡姆不是人名，而是英格兰的一个村庄。14世纪时，那里出了一位叫做“威廉”的逻辑学家。此人流传下来的东西不多，唯有这一句话脍炙人口——Entities should not be multiplied unnecessarily。可用中文将其翻译成一段八字格言：如无必要，勿增实体（奥卡姆剃刀原则）。意思是说，删除一切没必要的多余“实体”，留下最精炼的

部分。

对于理论物理，这一原理最好的表述是：当你面对着导致同样结论的两种理论，选择那个最简单、实体最少的！物理统一理论中的实体，可被理解为基本规律、粒子和作用力。也就是说，统一，就是用最少数目的物理规律来描述自然现象；用最少数目的“不可分割基本粒子”来构成所有的物质；用最少种类的“力”来描述物质之间的相互作用，这才符合奥卡姆剃刀原则，符合简约之美！

牛顿曾经感叹过：“我能计算天体运行的轨道，但无法计算人类的疯狂”。

奥卡姆剃刀原则也许难以描述多变的社会现象及复杂的人性，但将其用于科学时的优越性却毋庸置疑。几百年来，这一原理在科学上得到了广泛应用，从牛顿的万有引力到爱因斯坦的相对论，再到如今的标准模型，在漫长的统一之路上，奥卡姆剃刀原则已经成为重要的科学思维理念。

然而，物理学中的统一理论，即用以描述物质世界的“最少数目”的标准，是随着时间而变化的。随着科学技术的不断进步，实验手段的不断改进和发展，各种理论得以建立和完善，我们对大自然的理性认识也深入到不同的层次。这一切，使得在科学发展的不同历史时期，会有不同意义下的不同的“统一理论”。它们犹如在一条曲折流逝的河流中，在一定位置出现的一片片平静的港湾。河流总是从这些港湾和支流中，不断地吸取精华、去除糟粕，川流不息地奔向大海。

牛顿的力学定律加万有引力，毫无疑问是物理学中第一个“统一理论”。牛顿之前的物理学，已经有了许多独立的、貌似互不相关的物理定律：伽利略发现了惯性原理，还通过著名的比萨斜塔实验

证实了自由落体所遵循的规律；开普勒在研究第谷留下的大量实验及观测资料的基础上，提出了行星运动三定律；惠更斯和胡克，当时在力学、光学等多个领域也都有所建树。然而，是牛顿第一个认识到这些零零落落的孤立定律之间深刻的内在联系。他将这些分散的“支流”汇总在一起，完成了物理学上的第一次理论统一。

与那些“孤立”定律不同的是，牛顿三大定律所描述的是“所有”物体在力的作用下的运动规律。这里的物体，可以是地面上的沙粒，也可以是宇宙中的天体。牛顿用锋利的“奥卡姆剃刀”，将物体的大小、形状、质地、软硬之类不重要的具体性质通通砍去，只留下一个质量 m 。因此，所有的物体都变成了一个质点，它们在力的作用下，都符合同样的运动规律。

场论的思想，始于麦克斯韦和法拉第的电磁场理论。法拉第在进行并记录了大量电磁实验结果的基础上，提出了“场”的概念。而精通数学的麦克斯韦，则希望用微分方程来描述和总结这些实验规律。最初，麦克斯韦面对着二十多个方程式，其中包括由库仑、高斯、法拉第、安培等人研究总结的各种实验现象，还包括电介质的性质、各种电磁现象的规律等。麦克斯韦大刀阔斧地挥舞着“奥卡姆剃刀”，剃去了冗余重复的部分，再加上必要的新概念，最后将它们提炼简化为4个对称而漂亮的矢量方程式，将电、磁、光三者“统一”于一个经典场中。

后来，爱因斯坦的狭义相对论又将时间和空间的概念统一于一个四维的时空框架中。此时，时间和空间不再是绝对而单独的存在，而是通过洛伦兹变换互相联系在一起的整体。从狭义相对论的时空概念中能得到尺收缩、钟变慢的结论，这与以太中的洛伦兹理论得到

的结论一致。那么,以太的“实体”于此是多余的,因此,它被爱因斯坦用“奥卡姆剃刀”无情地剃去了。爱因斯坦留下了两条他认为必要的实体:相对性原理和光速不变,并建立了狭义相对论。再后来,他又将相对性原理扩展,用等效原理把引力质量和惯性质量等同起来,将引力效应与时空几何统一起来,建立了广义相对论。

物理学的一次又一次进展,原来都是和一次又一次的“统一”联系在一起,难怪爱因斯坦最后要将其半生的努力都献给统一大业。

在爱因斯坦刚建立广义相对论的年代,弱相互作用和强相互作用尚未登场。爱因斯坦当时对前景的估计应该是颇为乐观的,他也许会想,电磁力和引力是如此相像:它们同样是远程起作用(20世纪30年代开始,就有了对近程起作用的、现在称之为“弱相互作用”的描述),都符合距离的平方反比率,只要能将电磁力融入广义相对论的引力框架中,不就大功告成、统一起来了吗?

不过,遗憾的是,爱因斯坦几十年大统一梦的努力最终以失败而告终。依现在笔者这样的马后炮观点看起来,爱因斯坦至少有两点错误:一是低估了万有引力“桀骜不驯”的本性,二是选错了道,想要用经典场论而不是量子场论来构建统一理论。也就是说,爱因斯坦忽略了更深入研究他自己参与创建的量子理论,也更忽略了量子理论后来几十年的发展。

当然,人们可能会说,从量子场论出发的这条统一之路不也仍然是困难重重,尚未打通吗?的确是这样,但是大多数的物理学家们认为这是一条正确的道路,也是一条无法回避的道路。试想,一个物理学的大统一理论可以不包括已经发展并被验证超过百年的量子理论吗?即使我们尚不知道这条道路的终点在何处,但坚持走下去必将

在历史上留下痕迹，也许是弯曲迂回的痕迹，但将来仍然是“有迹可寻”的。

当年，量子力学中有了薛定谔方程和海森伯的矩阵力学，万有引力有了爱因斯坦的场方程，电磁作用有经典的麦克斯韦方程组。这三套马车在自己的大道上各行其是，的确应该将它们统一在一个单一的数学框架中，这是理论物理学家们喜欢玩的游戏。量子力学的诞生和引力的几何化是当年物理界让人震撼的两大革命；而经典电磁学则在成功地建立了麦克斯韦理论的基础上，正在忙忙碌碌地走向应用。它带来了数不清的专利和许多杰出的工程师，揭开了电气工程中辉煌的一页。对 20 世纪初期的物理学界而言，大多数理论都朝着完善和推广量子力学的方向发展。风云激荡的时势，造就了一个又一个的量子英雄，忙着把诺贝尔奖发给这些对诺老以前闻所未闻的奇怪理论作出贡献的科学家们。与电磁和量子领域非凡热闹的气氛相比较，广义相对论便显得孤独多了，它在默默地等待着天文学中更精确的实验验证资料。

这三组理论并非全无关系，在解决具体物理问题时，有时候三者都需要考虑。但是，它们毕竟有它们自己的用武之地：量子理论适宜探索微观世界；广义相对论在宇宙学中长袖善舞；电磁理论则成功地服务于人类的衣食住行。还有一件人们不应该忘记的大事，是与物理学的两大革命密切相关的那就是在 1945 年 8 月 6 日，于日本广岛爆炸的原子弹。这次爆炸伤及了十几万无辜的生命，造成的后患难以数计，并使得爱因斯坦后悔当年上书罗斯福促成制成原子弹一事。尽管如此，当时原子弹的技术毕竟是被同盟国所掌握，它的爆炸加速了日本的投降和第二次世界大战的结束。否则，世界历史和

中国历史,也许都要被改写了。

从物理学史的观点来回顾 20 世纪初物理学界这两大革命理论,量子力学象征着现代物理的开始,而相对论则代表了经典理论的结束。爱因斯坦统一之梦失败的原因之一,恐怕正是因为他将经典的尾巴抓得太牢了,因而挡住了一部分他用于观察现代物理龙头的视线。爱因斯坦始终不能接受测不准原理等不同于经典现象的量子规律,尽管他扮演的老顽固角色对量子力学的发展也起到了正面推动的作用。但是,参与反推和参与正推总是有所不同的。记得著名的物理学家、诺贝尔奖得主史蒂芬·温伯格对爱因斯坦曾经有过一句非常精辟的评论。其大意是说,爱因斯坦所犯的最大错误不是他自己认为的“在场方程中引入了宇宙常数”,而在于他成为了他自己的理论成就的“囚徒”。他痴迷于他的广义相对论的物理数学之美中,想用这个经典理论一统天下,包括统一他不接受的量子理论。但这在事实上是不可能的。事实上,量子理论的出现是一场比广义相对论更为深刻的革命,因为它跳出了经典思想的牢笼,走出了一条不确定性和决定性融合在一起的现代物理之路。

一个成功的物理大统一理论必定要建立在量子理论的基础上。因此,笔者在第二篇中简要地叙述了量子物理的发展历史和基本概念,带领读者了解量子力学的创建过程,从科学家的物理思想及趣闻轶事中,也同时深入探测微观世界,体会领略神奇的量子现象。

物理理论的建立少不了数学。为了理解物理中的统一理论,一定的数学知识是必要的。实际上,理论物理和数学互相渗透、融合在一起,彼此促进、相辅相成。在本书中,笔者尽量避免写出数学公式,而是代之以通俗的语言,用来描述艰深的数学概念,诸如群论、李群、