



量子空间

QUANTUM  
SPACE

*Loop Quantum Gravity and the Search for the  
Structure of Space, Time, and the Universe*

[英] 吉姆·巴戈特 / 著

(Jim Baggot)

齐师傍 / 译

## 图书在版编目 ( CIP ) 数据

量子空间 / ( 英 ) 吉姆·巴戈特著 ; 齐师傍译 . --  
北京 : 中信出版社 , 2019.11  
书名原文 : Quantum Space  
ISBN 978-7-5217-1054-0

I. ①量… II. ①吉… ②齐… III. ①量子力学-普  
及读物 IV. ①O413.1-49

中国版本图书馆CIP数据核字 ( 2019 ) 第208885号

Quantum Space by Jim Baggott

Copyright © Jim Baggott 2018.

Quantum Space was originally published in English in 2018.

This translation is published by arrangement with Oxford University Press.

CITIC Press is solely responsible for this translation from the original work and

Oxford University Press shall have no liability for any errors, omissions or inaccuracies or ambiguities in such translation or for any losses caused by reliance thereon.

Simplified Chinese translation copyright © 2019 by CITIC Press Corporation

ALL RIGHTS RESERVED

本书仅限中国大陆地区发行销售

### 量子空间

著 者 : [ 英 ] 吉姆·巴戈特

译 者 : 齐师傍

出版发行 : 中信出版集团股份有限公司

( 北京市朝阳区惠新东街甲4号富盛大厦2座 邮编 100029 )

承 印 者 : 北京楠萍印刷有限公司

开 本 : 880mm × 1230mm 1/32

印 张 : 12 字 数 : 256千字

版 次 : 2019年11月第1版

印 次 : 2019年11月第1次印刷

京权图字 : 01-2019-4184

广告经营许可证 : 京朝工商广字第8087号

书 号 : ISBN 978-7-5217-1054-0

定 价 : 59.00元

版权所有·侵权必究

如有印刷、装订问题, 本公司负责调换。

服务热线: 400-600-8099

投稿邮箱: author@citicpub.com

献给卡洛·罗韦利和李·斯莫林

谢谢你们把故事托付给我

## 序言

让我们直奔主题吧：这是一本关于圈量子引力（loop quantum gravity）的书。圈量子引力是当代物理学家尝试发展量子引力理论的方法之一，它触及我们对空间、时间以及物理宇宙的了解的极限。有人希望前沿科学总能写成科普书籍供大众读者消遣，但我要先声明一件事：圈量子引力同所有其他量子引力理论一样，没有得到任何观测或实验证据的支持。<sup>1</sup>

你可能会问我，那你凭什么觉得读者会对这样的理论感兴趣呢？

理由如下。毋庸置疑，在21世纪的开头几十年，我们面临着很多巨大的经济、政治与环境难题，有些还极其顽固，难以处理。但在我们理解时间与空间的本质、理解物理实在的内部构造方面，量子引力理论是我们这个时代最大的科学难题。<sup>2</sup>它讨论的是关于存在本质的“大问题”。解决这个问题不仅需要深厚的科学专业知识，也需要洞察力与灵感出现的独特瞬间，还需要整个物理学史上的人物都无法超越的智力创造性。

原因很简单。如今，我们很幸运，我们拥有两大极其成功的物理学理论。第一个是阿尔伯特·爱因斯坦提出的广义相对论，它描述了弯曲时空中物质的大尺度行为，告诉我们引力的工作机制：物质告诉

时空如何弯曲，弯曲的时空告诉物质如何移动。这一理论是如今大爆炸宇宙学标准模型的基础，我们用它描述宇宙的演化：从最初的“开端”（根据如今的证据，大概在138亿年前）到今天。支持该理论的证据有很多，美国的激光干涉引力波天文台（LIGO）以及意大利的室女座引力波天文台（Virgo）探测到的引力波，只是众多证据中最近的一项。

第二个极其成功的理论就是量子力学。量子力学描述了最小尺度——分子、原子、亚原子、亚核粒子尺度的物质与辐射的性质和行为。在量子场论的外衣之下，量子力学的基础是粒子物理标准模型。整个宇宙中可见的组成部分（包括恒星、行星以及我们自身）都是由基础模型中的夸克、电子，以及传递力的光子等粒子结合在一起组成的。标准模型也告诉我们大自然的其他三种力——电磁力、强相互作用力和弱相互作用力是如何作用的。位于瑞士日内瓦的欧洲核子研究中心（CERN）发现了希格斯玻色子，这是支持量子力学的众多证据中最近的一项。

然而，尽管这两个理论都是极为成功的伟大的智力创造，这两个标准模型也充满了漏洞。有很多现象不能用这两个理论解释，也有很多问题是它们无法回答的。它们的成功似乎只带来了一个结果，就是让我们的宇宙变得更为神秘难解，甚至完全匪夷所思。似乎我们了解得越多，理解得就越少。

这两个理论在根本上是不相容的。在艾萨克·牛顿的经典力学中，物质的存在与事情的发生都在一个绝对空间与时间的“容器”中，这个“容器”作为背景而存在。如果我们把牛顿宇宙中的一切事物都拿掉，理论上还应该留下一个空的容器。广义相对论则把这个容器拿掉了：在爱因斯坦的宇宙中，空间和时间是相对的，不是绝对的，而理

论则是“背景无关”的。时空是动态的，它之所以存在，是因为它是物质与能量之间物理相互作用的结果。

量子力学有些地方看起来极为奇怪，但其至今提出的一切预言都已被验证。它的表述方式不同于广义相对论：与物质和辐射的基本粒子相关的相互作用，都被假设发生在一个绝对时空的容器之中——正是广义相对论所消灭的那个容器。也就是说，量子力学是背景相关的。

总结一下，我们有一个背景无关的经典（非量子）的时空理论，又有一个背景相关的关于物质和辐射的量子理论。我们最成功的两大物理学理论建立于不相容的时空观上，它们有着不同的结构：广义相对论的时空是在物理学定律的基础上与之共同产生的，而量子力学的时空则是事先预设的、绝对的。

虽然有这么两套互不相容的描述，但据我们所知（以及所能证明），我们的宇宙只有一个。广义相对论和量子理论的不相容性之所以是个问题，就是因为我们相信宇宙在诞生初期（大爆炸之时）处于量子尺度，自然应该能被量子力学解释。也许你觉得我们无法解释宇宙的起源以及其极早期的状态也没什么，但鉴于物理学在近百年里取得了如此辉煌的成就，我们理当对它有更高的期望。我们需要一个量子引力理论。

看到这里，你开始感兴趣了吗？

中国古代哲学家老子曾经说过：“千里之行，始于足下。”要想得到量子引力理论，第一步就是要认识到，要想将量子力学与广义相对论统一起来，我们需要找到一种新的时空结构，即一种新的看待时空的方式，这种方式要能同时在各种尺度上与物理学理论兼容。

有了这样一个目标，下一步就是选择走哪条路了。我们是从预设

绝对时空结构的量子力学出发，还是从时空与之共同产生的广义相对论出发呢？

在过去的40年中，关于这两条路孰难孰易的判断分歧，已经将理论物理界分成了水火不容的两派。如果你尝试梳理一下所有尝试发展量子引力理论的方法的来龙去脉，就会发现这条分界线是清晰可见的，它分成了本质上不同的两支：一支是弦论，一支是圈量子引力理论。<sup>3</sup>两派之间的差异并不是广义相对论研究者与粒子理论物理学者之间的差异，因为不管哪一派都频繁地借用了广义相对论与量子场论的思想与技巧。

然而，不得不说，理论物理学界如今正为粒子理论物理学家所主导，而粒子理论物理学家确实更倾向于弦论。在过去的20年中，擅长公关的弦论研究者撰写了大量的大众科学书籍，因此几乎没有读者意识到还有另一条通往量子引力理论的路。比方说，就在近期的一本关于引力的科普书中，圈量子引力仅出现在一个脚注里。<sup>4</sup>这一现象的形成有多个原因，我会在下文中讨论其中一部分。

这本书讲的是一条少有人走的路。它从广义相对论出发，借用了量子色动力学（QCD）中的一些思想，也包含致力于让结果与量子场论相容的探索。在路的终点，我们会看到空间的结构变成了量子的，而非连续的。就像量子力学中的物质和辐射一样，它是一块一块的。这一结构是一种由互相连接的引力“圈”形成的“自旋网络”系统。这些圈的形状有根本上的限制，它定义了普朗克长度尺度上的面积量子数和体积量子（普朗克长度约为 $1.6 \times 10^{-35}$ 米，即质子直径的 $10^{20}$ 分之一）。

不同的自旋网络，也就是圈的不同连接方式，定义了空间形状的不同量子态。自旋网络的演化（即一种形状和下一种形状之间的连接

的变化)就产生了自旋泡沫 (spinfoam)。在叠加态中加入自旋泡沫,就产生了一个新出现的时空,即一种由量子物理学定律共同产生的结构。

这就是圈量子引力理论,简称LQG。这一理论已经诞生30年了,目前全世界大概有30个研究组在研究它。始于相对论的这条路很难走,崎岖不平。这条路上还有很多有待克服的困难,尤其是要找到一种方式,使这一理论提供一个或更多明确的经验检验。但正如LQG的主要构建者之一卡洛·罗韦利(Carlo Rovelli)不久前所解释的那样:“在我看来,量子引力领域的状况……比25年前好太多了,而且它还在日新月异地发展,我对它很乐观。”<sup>5</sup>

科普读者可能从李·斯莫林(Lee Smolin)写的书中了解过圈量子引力,他是圈量子引力的另一位主要构建者,在2000年出版了《通向量子引力的三条途径》(*Three Roads to Quantum Gravity*)一书。他在2006年首次出版的《物理学的困惑》(*The Trouble with Physics*)和最近出版的《时间重生》(*Time Reborn*)中也简要提到了圈量子引力。罗韦利则在他的畅销书《七堂极简物理课》(*Seven Brief Lessons on Physics*)和《现实不似你所见》(*Reality is Not What It Seems*)中提到了圈量子引力。

我写这本书,是为了纠正公众观念的偏倚。我想要说服读者:圈量子引力不仅是一个好的理论,而且还提供了一条除弦论之外的真正的、可靠的通往量子引力的道路。为了实现这个任务,我将与你分享斯莫林和罗韦利在他们自己的畅销书里没有提到的更多细节。我不仅要让你基本了解圈量子引力理论是如何看待空间、时间和宇宙的,还要告诉你它为何要讲述这些事情,又是如何讲述的。

在调研和写作这本书时,我很幸运地得到了斯莫林与罗韦利的

大量鼓励和支持，听到了他们的深刻见解。这本书讲述的是他俩的故事，但我还要说明的是，圈量子引力理论是多位理论物理学家通过多年的努力才建立起来的。我已经尽了一切努力以通俗的方式把他们的工作呈现在读者面前，而如果我让这个群体中的任何一位物理学家感觉自己的贡献没有得到良好的展现，甚至被忽略了，那么我提前向他们表示歉意。出于同样的原因，这本书专注于讲述斯莫林与罗韦利两位主要贡献者的故事，它不是为了全面总结圈量子引力名下的每一项贡献而写作的。<sup>6</sup>

这本书由三部分组成。第一部分是故事的背景，告诉我们斯莫林与罗韦利在学生时代学习的相对论、量子力学与大爆炸宇宙学的内容，以及他们成为成熟的理论物理学家后这些领域的发展状况。如果你已经对这部分背景知识比较熟悉了，可以放心地跳过这部分内容，这不会影响阅读（但我还是希望你不要跳过）。第二部分讲述了圈量子引力理论的诞生与演化。它始于20世纪50年代末将相对论与量子力学统一起来的尝试，阿贝·阿什特卡（Abhay Ashtekar）发现的“新变量”使它成为可能。到20世纪末，阿什特卡、斯莫林、罗韦利（以及其他很多人）的合作产生了面积与体积量子，以及自旋泡沫的数学形式。第三部分介绍了该领域迄今为止的新进展。它总结了用圈量子引力来计算我们熟悉的物理量的尝试，以及该理论对于量子宇宙学与黑洞物理学的意义。在旅程的这一部分，我们还会遇到量子力学的诠释问题，以及时间的实在性（或不实在性）的问题。

我还要提醒你最后一件事情：同弦论或M理论框架一样，圈量子引力仍然是一个发展中的理论。它还没有完成，有很多问题我们还不能回答。斯莫林与罗韦利自然是该理论的热烈支持者，尽管我努力平衡各方面的观点，我所采用的语句仍然会不可避免地反映他们的热

情。但我们千万不能被热情冲昏了头脑。在圈量子引力理论的发展道路上，有很多其他理论物理学家在不同的阶段加入，但他们如今都已对其失去了信心。20世纪90年代末的乐观态度如今已经变成了更冷静（也更悲观）的评估分析，有些物理学家已经完全离开这一领域，去研究其他课题了。我希望读者至少能意识到理论物理学家面临的是一个多大的挑战——追寻量子引力理论绝不是胆小的人可以做的事。在这本书的结尾，我加入了一篇斯莫林、罗韦利和我的三人谈话记录，我们回顾了近期的发展历史，也展望了未来。

现在，理论物理学的发展正处于紧要关头。科学上的伟大革命塑造了我们对现实的理解，进而深刻地改变了我们对空间、时间以及对宇宙的理解。下一场革命，是否已经近在咫尺？

如果李和卡洛不是如此地信任我，并将他们的故事托付于我，这本书就不可能完成。我要感谢他们对这项写作计划付出的努力，他们在我写草稿时就是俯身于我背后浏览内容的读者，指引我走向正确的方向，在我犯错误时纠正我。之前我已提醒过大家，这本书里的所有观点都只是我的观点，虽然李和卡洛同意其中大部分观点，你也不应该假设他们同意书里的所有观点。

除了李和卡洛以外，我还要感谢众多科学家，他们在繁忙的工作之余挤出宝贵的时间审读我的草稿，纠正了许多错误的结论和诠释，并加上了他们自己的深刻见解。他们包括：宾夕法尼亚州立大学的阿贝·阿什特卡、加州大学河滨分校的约翰·贝兹（John Baez）、宾夕法尼亚州立大学的马丁·博约瓦尔德（Martin Bojowald）、墨西哥国立自治大学的亚历杭德罗·科里基（Alejandro Corichi）、开普敦大学的乔治·埃利斯（George Ellis）、马里兰大学的特德·雅各布森（Ted Jacobson）、诺丁汉大学的基里尔·克拉斯诺夫（Kirill Krasnov）、路易

斯安那州州立大学的豪尔赫·普林 (Jorge Pullin), 以及哥伦比亚大学的彼得·沃伊特 (Peter Woit)。

现在, 圈量子引力理论的构建远称不上已经完成。这意味着, 哪怕是一直紧密参与该理论发展过程的理论物理学家, 对于该理论中很多悬而未决的问题都未必有一致的结论。为了对这个几乎一切观点都可能受到质疑的课题进行尽可能一致且易读的叙述, 我不得不在内容的呈现方面做一些选择。我很确定自己在这个过程中犯了一些错误, 也乐于承认自己犯下的错误。

我还要感谢我在牛津大学出版社的编辑莱瑟·梅农 (Latha Menon), 以及珍妮·纽吉 (Jenny Nugee) ——她为最终呈现到你们手中的这本书的英文版做了大量的工作。如果没有他们的努力, 这本书的内容不可能这么丰富。

现在, 让我们开始这趟旅程吧。

吉姆·巴戈特

2018年7月

## 缩略语列表

ADM	阿尔诺威特-德塞尔-米斯纳
ATLAS	超环面仪器 (LHC 中的探测器之一)
CDM	冷暗物质
CERN	欧洲核子研究组织
CMS	紧凑 $\mu$ 子线圈 (LHC 中的探测器之一)
COBE	宇宙背景探测器
CODATA	国际科技数据委员会
GeV	吉电子伏特
GUT	大统一理论
$\Lambda$ -CDM	$\Lambda$ -冷暗物质
LHC	大型强子对撞机
LQC	圈量子宇宙学
LQG	圈量子引力理论
MeV	兆电子伏特
MSSM	最小超对称标准模型
NSF	美国国家科学基金会
QCD	量子色动力学
QED	量子电动力学
SLAC	斯坦福直线加速器中心
SUSY	超对称
TeV	太电子伏特
WMAP	威尔金森微波各向异性探测器

## 前言

### 理解大自然的奥秘， 无法抗拒的渴望

理论物理对于它的研究者来说有某种独特的吸引力，这么说应该并非全无道理。研究这个领域需要敏锐而富有创造力的思维，也需要一种能够理解深奥概念与复杂数学的特殊天分。某种程度上可以说，是这类人自己选择了投身理论物理研究。这类人中的大多数对物质财富并没有多少兴趣，但如果我们要深入讨论这个处于理解现实本质与物质存在最前沿的学科领域，我们就必须承认，理论物理需要研究者有另外一个共同的性格特征。

理论物理钟爱叛逆者。

这么说吧：如果你要改变我们对时空本质结构的理解，如果你要颠覆世界，推翻我们对于更大宇宙的看似毫无问题的现有认识，你就不能在意别人怎么想。

许多叛逆者是为了逃离尘世生活才选择了理论物理。在这里，他们可以远离现实生活的不公、纷繁复杂的人事，以及少年时与旁人的格格不入，他们可以最大程度地发挥自己的直觉。如果说其他领域鼓励一定程度的叛逆思维，那么理论物理远远不止于此——叛逆思维是必备条件。

在俄亥俄州辛辛那提的沃尔纳特希尔斯高中，16岁的李·斯莫林

对革命政治、摇滚明星、数学、建筑学和他的女朋友（排名不分先后）都兴致盎然。他的老师们觉得他脑子不够灵光，建议他不要选高阶的数学课程，而作为一名叛逆者，他为了证明老师们错了，在短短一年时间里完成了三年的课程。这个举动在有些人看来也许算不上激进，也不像玩摇滚或者出版地下报刊那么具有颠覆性，但这让斯莫林发现高阶数学课程“也挺好玩儿的”<sup>1</sup>。

在高二的时候，他对建筑学产生了兴趣，并邀请了离经叛道的建筑师、系统理论学家理查德·巴克敏斯特·富勒（Richard Buckminster Fuller）来他所在的高中做报告。富勒设计的短程线穹顶让斯莫林对一个名叫张量分析的数学分支领域产生了兴趣，而他又在阅读与此相关的书籍的时候接触了爱因斯坦的相对论，以及爱因斯坦本人。

高三那年，斯莫林的世界崩塌了：他追的摇滚乐队解散了，他的女朋友跟他分手了，而他的“政治革命”也没能实现。他的化学挂了科，而他在物理学上似乎缺乏天分，因此没能选上物理学的课。斯莫林决定退学。

就在这个时候，他在公共图书馆里读到了改变他一生的那本书，书名叫作《阿尔伯特·爱因斯坦：哲学家-科学家》（*Albert Einstein: Philosopher-Scientist*），由西北大学的哲学家保罗·阿瑟·席尔普（Paul Arthur Schilpp）编著，初次出版于1949年。这本书的第一章是67岁的爱因斯坦写的自述，爱因斯坦称其为“类似于写给自己的讣闻”<sup>2</sup>。他的文字直接写进了梦想破灭、万念俱灰的斯莫林的心里。

爱因斯坦提到，“大多数人花毕生的时间去追逐一些毫无价值的希望和努力。”他早在少年时期就“深切地意识到这种追逐并不轻松，甚至有些残酷，不过，这在当年被精心地用比如今更伪善和漂亮的字句伪装起来”。爱因斯坦拒绝通过有组织的宗教来获得内心的安宁，

转而从物理学中寻求安慰：

有一个不可知的世界在我们之外存在着，它的存在并不取决于我们人类的主观意愿。尽管它是一个高深而永恒的谜，但值得庆幸的是，我们人类至少可以部分地用观察和思维触及它。这个世界深具魅力，犹如争取自由、得到解放一样，吸引我们的凝视深思。而且不久我就注意到，在这项事业中，许多我所尊敬和钦佩的人找到了内心的自由和安详。<sup>①3</sup>

就在当晚，斯莫林决定成为一名理论物理学家。与爱因斯坦一样，他受“理解大自然奥秘的无法抗拒的渴望”所驱动。<sup>4</sup>“当时我心里浮现出这样的念头：如果我这辈子不能做其他的事情，那么也许我可以成为一名理论物理学家。”<sup>5</sup>

而这可不是什么好的决定。当时，斯莫林已经被罕布什尔学院建筑学专业录取，这是位于马萨诸塞州阿默斯特的一个激进自由的艺术学院，他只得艰难地转专业。幸好他也不是完全毫无准备：他的母亲是辛辛那提大学的英语教授，母亲帮他选上了一门该校的广义相对论研究生课程，由保罗·埃斯波西托（Paul Esposito）教授。这是他上的第一门物理学课程。

炎热的夏天里，斯莫林在洛杉矶的范纳伊斯取暖与空调公司当金属冲压工学徒，在学校与公司之间穿梭，在业余时间则自己阅读基础物理学、相对论和量子力学的相关书籍。

卡洛·罗韦利的理论物理学之路发生在另外一个大洲，在另外一

---

① 摘自《爱因斯坦自述》，富强译，新世界出版社，2012。——译者注

个语言环境中，其细节也不同。但他的经历与斯莫林有一些显著的相似之处。

罗韦利也曾对成年人构建出来的这个既不平等也不正义的世界充满失望。他在维罗纳长大，这是意大利北部的一个城市，离威尼斯不远。当时，意大利的偏远地区蔓延着一股怀念法西斯主义的气氛，罗韦利激烈反对这种思想。他经常与老师发生激烈的冲突，并反抗自己所在的高中权威（这所传统的高中教学生基础的课程，让他们考上大学）。他也渴望逃离自己的家庭：他是父母的独子，母亲对独子的爱可以给人抚慰，也可能会让人窒息。<sup>6</sup>罗韦利迫切地需要喘口气。

他如饥似渴地阅读政治学、社会学和科学相关的书，也看小说和诗歌。20岁那年，罗韦利踏上了一场寻找真理的环游世界之旅。在旅途中，他强烈地感受到了自由，也学到了如何掌控自己的生活并追寻自己的梦想。但当他远离了自己一直以来在各种方面痛恨的故乡以后，他的看法发生了一些转变。意大利的确有很多让他愤怒的地方，但在那里也有很多事物有待他学习。而且他想念他在意大利的女朋友了。

回到意大利以后，罗韦利就进入博洛尼亚大学学习物理学。博洛尼亚大学是全世界最古老的大学，建立于1088年。进入博洛尼亚大学读书对罗韦利来说是个偶然，并非有意计划。读高中时，他在数学和物理学方面表现出了天赋，但他最喜欢的学科是哲学。不过，他不想把哲学当成大学的专业，因为他不相信当时的大学教育系统能帮助年轻的理想主义者重视并严肃对待他所关心的哲学问题。

博洛尼亚城以艺术、文化和历史建筑知名，尤其是红砖屋顶景观，反映了该城市的共产主义政治倾向。而这正合罗韦利的心意。在博洛尼亚求学期间，他与观点相似的朋友们建立了一个有共同目标的团体，他们都信奉后嬉皮士非主流文化。这个群体服用迷幻药，