

邵丹
邵亮
邵常
邵贵

著



量子引力 QUANTUM GRAVITY
—A new regime of the spacetime with gravity
——空时与引力的新体制

长江出版传媒
湖北科学技术出版社

邵 丹
邵 亮
邵 常 贵

著



量子引力

QUANTUM GRAVITY

—A new regime of the spacetime with gravity

——空时与引力的新体制

长江出版传媒
湖北科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

量子引力：空时与引力的新体制/ 邵丹，邵亮，邵常贵著. —武汉：湖北科学技术出版社，2015.6

ISBN 978-7-5352-8352-8

I. ①量… II. ①邵…②邵…③邵… III. ①引力量子理论—研究 IV. ①O412.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第280496号

责任编辑：兰季平

封面设计：王 梅

出版发行：湖北科学技术出版社

电话：027-87679468

地 址：武汉市雄楚大街268号

邮编：430070

(湖北出版文化城B座13-14层)

网 址：<http://www.hbstp.com.cn>

印 刷：武汉壹点印刷责任有限公司

邮编：430070

787×960 1/16

25.75印张

350千字

2015年6月第1版

2015年6月第1次印刷

定价：78.00元

本书如有印装质量问题 可找本社市场部更换

内 容 简 介

本书使用圈量子引力中发展出的圈线法，在不引入广义相对论与量子力学基本原理之外的其他假设下，独立地和系统地探索了空时与引力。

从量子水平到宏观和宇观，对空时与引力二者施行了彻底地分离表述，且探讨了它们之间的内在联系。

构建了一种空时与引力双变量度量统一理论，并将引力与空时进行了全面量子化。提出了实现引力量子化和重整化的一种新方略与原则，且做出了较深入和完整的体制构建与进程推演。从微观等价类量子化描述与宏观宇宙自然选择的不同层次，阐述了空时与引力形成的无背景规范统一体制以及可能的存在状态，同时论证了狭义和广义相对论与这一理论间的关系，及它们在宇宙中的地位。

书中对空时在物理学中的可能作用、空时与引力的性状和本源、以及它们与物质间的关系，开展了系统研究，并提出了系列新观点。

该书采取逐步深入的方式，展开全面的论述，是一部从多角度较完整地阐述引力量子化的著作。

时奥序不乱，

空瀚界无疆。

宇宙行大象，

量子踏蛮荒！

作者

前 言

引力的量子化，是物理学中的一个根本和经典的基础课题。历史上，曾由 Feynman, Utiyama, Wheeler, DeWitt, Faddeev 以及 t' Hooft 等多位著名物理学家，率先提出过多种量子引力理论。然而，皆因遇到不可克服的困难，这些耗时长达数十年以上的探索，都最终被停止了下來。

20 世纪最后一二十年，Ashtekar 放弃了以往采用的用通常场的量子化方法直接把广义相对论量子化的做法，在他的《Non-perturbative Canonical Gravity》一书中，首先将广义相对论变革成了以他的新变量作为基本变量的正则体系，从而为空时与引力的量子化研究奠定了新的基础，并带来了曙光。此后，Ashtekar, Rovelli, Smolin 和 Tiemann 等人，又把这一广义相对论的经典正则体系与量子力学相结合，推出了一种无背景且非微扰的全新空时与引力量子化理论，即圈量子引力 (Loop Quantum Gravity)，完成了量子引力研究史上的一次新跨越，使空时与引力的量子化探索获得了重新启航，并得到了举世公认的发展 (见 Rovelli 著《Quantum Gravity》一书)。

目前，圈量子引力中关于空间与时间的量子化理论，体制上已基本形成。对于引力的量子化，则是正在以全新的组合量子化理念及空间等价类手段，对它的无背景的微观生成、离散分布、时间跃迁以及相互作用等，开启了物理学上里程碑式的新探索，并取得了进一步成果。圈量子引力使用的深刻观念与不同方法，为空时与引力量子化研究打开了一扇崭新的大门，同时也在物理学其他领域的探索中产生了影响。它将是本世纪理论物理学中的一个具有深远意义的重要和根本的前沿发展方向。

本书的目的是，介绍圈量子引力中目前关于引力量子化的新的研究理念、方法以及主要前沿进展。叙述过程中不采用广义相对论与量子力学原理之外的其他假设，不涉及与这些假设和猜想相关问题的讨论，也不以未被公认的

实验与观测为根据；而是以如上这两种理论本身为依据，力图从更根本的角度揭示空间、时间及引力的实质，并开辟和展示它们的发展道路。

书中对空时与引力进行了明确的区分，二者是两种完全不同的概念。在微观和宏观分别探讨了空时与引力各自的性质与关联，以及它们的宇宙学意义。同时，对二者各自分别进行了全面量子化。

为便于从渊源上对引力量子化进行了解，书中前三章对经典空时理论遇到的困难，场的量子化历史，以及历史上的引力协变量子化和正则量子化的有关内容，做了某些简要回顾与评述。由于圈量子引力中的引力量子化，需要利用空时量子化作为表述与计算基础，第4章至第6章，作为进行引力量子化的准备，特别是为了理论的完整性，对圈量子引力中的空时量子化，也做了一些必要的介绍。主要是阐明了圈线法在空时量子化运动学与动力学体制的建设上，取得的较为系统的研究成果，以作为而后几章理论发展上的依据。这方面更基本和全面的内容，可参阅书后有关论著。本书的引力量子化，分两个阶段进行。第7章，作为实施引力量子化的第一阶段，借助三角剖分方法，论述了形成离散自由引力扰动的空间激发机制，而后探讨了引力沿空间的组合分布和随时间的阶梯跃迁模式。第8章，作为引力量子化的第二阶段，即引力相互作用量子化阶段，首先介绍了引力子传播子等问题。采取 Rovelli 的空时组合剖分并移植粒子物理定域相互作用的做法，同时利用空时与引力分离表述原则下的（纯）引力圈线网，对自旋泡沫表述的离散引力的散射问题进行了描述，初步在圈线法条件下，对引力散射问题做了表述，并得到了具有接近低能物理行为的圈量子引力的引力子传播子。其后，在第9章，以微观空时与引力组合度量作为基础，提出了一种双变量度量空时与引力统一理论，分别得到了空时与引力的两组场方程，并讨论了这一理论的纤维丛模式。第10章，研究了这种双变量理论来自组合空时质地的引力相互作用的量子化与重整化问题。特别是探讨了空时自身与引力无广义相对论关系的微观和宏观的动力学可变性质，以及这种性质与引力和引力量子化间的关联。通过 Gauss-Bonnet 定理，利用 Faddeev 和 Popov 的规范场量子化手段，把来自圈线法量子化空时的空时规范场的曲率平方型抵消项输入到引力量子化程式之中，提出了一种以空时规范场的动能抵消引力发散的新的引力协变量子化方法，并对不同发散类型进行了全面消除，从而实现了量子引力的重整化。同时，探讨了空时与引力的对称性，特别是微分同胚群与引力扰动的规范性质。阐明了广义相对论与双变量度量空时与引力统一理论，实际

上都是规范理论，规范场则是引力扰动。初步探讨了特强引力条件下，引力扰动与空时度量扰动之间可能出现的量子关联，及可能的宇宙现象。第 11 章，对双变量理论的引力方程与空时方程进行了求解，论证了这种解的存在将使这一理论从体制和表象上全面动态覆盖相对论。特别是以解双变量度量理论的空时方程为线索，阐述了空时自身的与引力和物质无关的度量改变的性质与意义。从而使这一双变量度量空时与引力统一理论，系统地发展成为一种双变量度量量子引力。第 12 章，进一步揭示了空时与引力的规范性质及其与引力重整化的关系，描述了这种量子引力中，宇宙空时区域可能存在的状态，及其与广义和狭义相对论之间的关系，以及二者在其中的嵌入与地位，并探讨了空时对物质的独立性。从而明确，Mach 原理在双变量度量理论与广义相对论中并不成立。同时简要讨论了由纯空时自身可能引起的宇宙膨胀。

目前，圈量子引力是一种开放的和深刻的物理学前沿基础理论。国际上有越来越多的人投身于它的研究。

本书的特色是，从空时量子化直到引力量子化的计算与阐述（即从第 4 章至第 12 章），全部采用圈量子引力中作者发展出的圈线法完成，并自成体系。从而为圈线法在量子引力的探索中，确立了一条基础通道。书中较系统地包含了作者近些年来利用这一方法取得的关于空时和引力量子化的某些研究成果。

对于不需了解场的量子化历史的读者，可略去第 3 章，或直接从第 4 章开始阅读。对于侧重了解引力量子化的读者，可尝试从第 7 章阅读。

邵 亮 邵 丹
汤逊湖玉龙岛水云居
武汉

2012 年春节 2015 年 2 月

目 录

第 1 章 经典空时理论及困难	(3)
1.1 绪言	(3)
1.2 广义相对论成功的关键	(4)
1.3 广义相对论的局限	(6)
1.4 传统空时观遭遇的挑战	(8)
第 2 章 关于物质场的量子化	(12)
2.1 波粒二象性	(12)
2.2 场的量子化与粒子	(14)
2.3 引力场的量子化	(16)
2.4 圈量子引力	(17)
第 3 章 引力量子化回顾	(21)
3.1 广义相对论的协变量子化	(22)
3.1.1 广义相对论的拉氏函数	(22)
3.1.2 Feynman 规则	(24)
3.1.3 粒子相互作用的 Feynman 图	(27)
3.1.4 广义相对论协变量子化小结	(29)
3.2 4-导数引力的协变量子化	(30)
3.2.1 经典 4-导数引力	(30)
3.2.2 4-导数引力的量子化	(33)
3.3 引力量子化的其他理论	(37)

3.3.1	广义相对论的正则量子化	(37)
3.3.2	扩展圈表象和自旋结网圈表象量子引力	(39)
3.4	引力量子化点评	(40)
第 4 章	空间的量子化	(45)
4.1	空间量子化基础	(45)
4.1.1	圈量子引力图景	(45)
4.1.2	圈线法的数学原理	(47)
4.1.3	量子化正则广义相对论的基本变量与约束	(52)
4.2	引力态空间 H 及其测度	(55)
4.2.1	引力态空间	(56)
4.2.2	引力态空间的测度	(59)
4.3	组合结构中的量子化面积	(61)
4.3.1	一般面识谱	(61)
4.3.2	完备面积谱	(67)
4.4	组合结构中的量子化体积	(69)
4.4.1	体积算符的圈变量表示	(70)
4.4.2	圈算符本征作用的证明	(72)
4.4.3	体积算符对顶角的本征作用方程	(74)
4.4.4	顶角体积谱	(76)
4.5	圈量子引力中的非对易几何	(84)
4.5.1	面积算符的非对易性	(84)
4.5.2	自旋网顶角的结网算子	(88)
4.5.3	体积算符与结网算子表象	(90)
第 5 章	圈量子引力的约束方程与时间	(95)
5.1	微分同胚约束算符对自旋网态的作用方程	(96)
5.2	Hamilton 约束算符对自旋网腿态的作用	(101)
5.2.1	Hamilton 约束算符对引力态的作用概述	(101)
5.2.2	Hamilton 约束算符对自旋网腿态的作用	(102)
5.3	Hamilton 约束算符对自旋网顶角态的作用	(107)
5.3.1	由二元恒等式得到的 Hamilton 约束算符对顶角态的作用	(108)

5.3.2	由重耦定理得到的 Hamilton 约束算符对顶角态的作用 ..	(109)
5.4	重耦定理与非对易几何	(117)
5.5	时间	(118)
第 6 章	空时动力学跃迁	(123)
6.1	引力态的 Feynman 跃迁	(123)
6.1.1	自旋网的 Hamilton 演化	(124)
6.1.2	“曲面的 Feynman 和”跃迁振幅	(127)
6.2	空时多面体跃迁演化	(132)
6.2.1	基本顶角四面体跃迁	(132)
6.2.2	自旋网的 2+1 维空时多面体跃迁	(134)
6.2.3	自旋网的 3+1 维空时多面体跃迁	(137)
6.2.4	$n(\leq 4)$ 维空间三角剖分中的对应关系	(139)
6.3	时间的多通离散渗透模型	(141)
第 7 章	自由离散引力扰动的形成	(149)
7.1	空时的 4 单形跃迁	(150)
7.1.1	空时 4 单形	(150)
7.1.2	空时 4 单形 Pachner 跃迁	(151)
7.2	空时体积起伏与度量涨落	(153)
7.2.1	空时体积的跃迁起伏	(153)
7.2.2	空时度量涨落与跃迁振幅	(154)
7.3	空时中离散引力扰动的生成	(156)
7.4	空时与引力的组合度量模型	(160)
7.5	引力扰动的空间分布	(163)
7.5.1	引力圈线网概述	(163)
7.5.2	初始连接引力扰动的分布 $\Gamma_{0 \rightarrow I}^4$	(165)
7.5.3	交叉连接产生的引力扰动的组合延伸	(167)
7.5.4	小结	(169)
7.6	引力扰动的的时间跃迁与引力空时自旋网	(171)
7.6.1	引力扰动的 (1 \rightarrow 4) Pachner 跃迁	(172)
7.6.2	引力扰动的 (2 \rightarrow 3) Pachner 跃迁	(176)

7.7 引力组合分布小结	(179)
7.7.1 空时与引力的统一度量	(179)
7.7.2 引力扰动在空间时间中的量子化分布	(181)
第 8 章 圈量子引力的引力离散相互作用散射理论	(185)
8.1 圈量子引力的引力子散射理论	(186)
8.1.1 连续引力场的 n -点散射函数	(186)
8.1.2 离散空时引力场的 n -点散射函数	(188)
8.2 圈量子引力的引力子传播子	(191)
第 9 章 空时与引力双变量度量统一理论	(199)
9.1 空时与引力双变量度量统一理论的作用量	(200)
9.1.1 双变量组合度量	(200)
9.1.2 空时与引力统一理论作用量的构成	(201)
9.2 空时与引力双变量度量统一理论的纤维丛表述	(209)
9.2.1 物理学中的规范场及纤维丛模式	(209)
9.2.2 双变量度量理论的纤维丛表述	(211)
9.2.3 空时规范场与丛上作用量	(215)
9.3 空时与引力双变量度量统一理论的经典场方程	(218)
9.3.1 统一理论的引力场方程	(218)
9.3.2 统一理论的空时度量场方程	(222)
9.3.3 空时与引力统一理论的几何	(226)
9.4 双变量度量统一理论中空时与引力的基本表述	(230)
9.4.1 双变量统一理论中空时与引力的形式	(230)
9.4.2 双变量统一理论与广义相对论的对接	(233)
9.4.3 组合度量理论的超常物理意义	(235)
第 10 章 空时与引力统一理论中引力相互作用的量子化及世界图	
景	(241)
10.1 空时与引力统一理论中引力相互作用的量子化	(243)
10.1.1 空间时间量子化对引力量子化的意义	(241)

10.1.2	统一理论引力量子化概述	(243)
10.1.3	统一理论的引力量子化	(247)
10.2	统一理论引力量子化的重整化	(255)
10.2.1	引力相互作用发散的形式	(255)
10.2.2	规范不变发散的消除—作用量的结构重整	(257)
10.2.3	非规范不变发散的消除	(264)
10.2.4	空时与引力统一理论场方程的重整	(270)
10.3	空时与引力的二元世界	(274)
10.3.1	世界的组合特征	(274)
10.3.2	双变量统一理论与相对论	(278)
10.4	空时度量与引力扰动的量子特征	(283)
10.4.1	空时度量的星乘积表示	(283)
10.4.2	四面体的量子性质	(285)
10.4.3	量子四面体中空间圈线与引力圈线的作用	(286)
10.4.4	量子四面体中空间圈线与引力圈线间的关系	(289)
10.4.5	特强引力与空间局部膨胀	(291)
10.5	空时与引力统一理论的规范性质	(297)
10.5.1	$SO(3,1)$ 规范对称性简述	(297)
10.5.2	微分同胚与引力扰动的规范性质	(299)
10.5.3	相对论与双变量统一理论的规范场体制	(304)
10.5.4	双变量度量统一理论规范性质简图	(308)
10.6	空时与引力统一理论的体制	(310)
10.6.1	空时的度量特征与引力重整化	(310)
10.6.2	双变量度量空时与引力统一理论的体制发展概略	(312)
10.6.3	空时度量在双变量统一理论中的作用 (续)	(314)
第 11 章	统一理论场方程的解及对相对论的覆盖	(321)
11.1	双变量度量理论场方程求解的规制	(321)
11.1.1	4 维空时的 Gauss 坐标	(321)
11.1.2	双变量在空时与引力方程求解中的独立性及规制	(323)
11.2	双变量度量理论两组方程的一种源外静态解	(325)
11.2.1	双变量度量理论的空时方程及一解例	(325)

11.2.2	双变量度量理论的引力方程及一解例	(332)
11.3	世界 M 的度量特征与双变量度量量子引力	(335)
11.3.1	世界 M 的一种组合度量特解	(335)
11.3.2	双变量度量量子引力及重整化空时度量解的意义	(339)
11.3.3	世界 M 度量的唯一性与解的多样性	(345)
11.3.4	巨大宇宙尺度上弯曲空时造成的观测疑难	(348)
11.4	双变量度量理论两组方程的其他解	(349)
11.4.1	双变量度量理论引力方程的源内静态解	(349)
11.4.2	双变量度量理论的一种源内外组合度量	(351)
11.4.3	双变量度量理论两组方程的转动引力源解	(355)
第 12 章	双变量度量量子引力	(361)
12.1	圈线法与双变量度量量子引力	(361)
12.1.1	量子引力	(361)
12.1.2	空时与引力规范体制及重整化	(362)
12.1.3	双变量度量量子引力的体制 (续)	(366)
12.1.4	宇宙膨胀与空时度量效应	(372)
12.1.5	双变量度量量子引力摘述	(373)
12.2	宇宙三源重图景及马赫原理	(381)
12.2.1	爱因斯坦方程的 Gödel 度规解及意义	(382)
12.2.2	空时几何的独立性	(383)
12.2.3	宇宙三源重规范图景	(388)
12.3	圈线法引力量子化述评	(389)
参考文献	(394)

从宇宙大爆炸、空时奇点、暗能量与暗物质、以及对黑洞存在的预言——到圈量子引力，空时与引力的观念，正面临一场前所未有的深刻变革！

第 1 章 经典空时理论及困难

1.1 绪言

我们知道，人类是宇宙衍生的产物。人类与其他事物不同，是宇宙的具有独立意识和搏击能力的生命体。生命体作为个体，在生存空间与时间上都是有限的，所获得的对外在世界的认识，也是有限的。那么，无限生命体的集群，对世界的认识是否可以无限的和终极的呢？

对这一问题的回答，首先要做一个分析。从条件上讲，在生命体集群的繁衍以及宇宙的演化都是无终止的前题下，人类的认识从能力上，存在着无限发展的可能性。但倘若这两个条件中只要有一个不复存在，那么，人类认识是无限的这种说法，就将变成一句空话。从而对这一问题的回答，也是勿言自明的。也就是说，从认识的发展上看，对这一问题的回答，实际上并不取决于当前回答者自身，而是取决于人类智慧的延伸以及宇宙条件。在当前，过份地强调这一愿望，也是没有更多意义的。若从人类今天所展示的实际认识能力和被认识的物质与空时世界的多样性和无限性上看，我们越发觉得，人类任何时期得到的任何知识，都是有条件的和有局限性的。不需条件和有局限性的认识，实际上是不存在的。我们认识客观世界得到的知识、概念、理论，连同表述它们的方式，多种多样、五花八门，其中一些原理和概念具有对世界极高的抽象和十分根本的主控能力；但所有这一切，也都只是在有限条件下形成的某种程度上的认识，都需要向前发展。所以，人类的认识，只是伴随着人类而存在的一个过程。过程中被认识的事务无穷无尽，而人类所认识到的事务总是有限的。认为人类认识是无限的这一说法，实际上并不