



开放人文

THREE ROADS TO QUANTUM GRAVITY

[美] 李·斯莫林 著 李新洲 翟向华 刘道军 译

Lee Smolin

宇宙的本源
通向量子引力的三条途径

上海世纪出版集团

宇宙的本源

——通向量子引力的三条途径

[美]李·斯莫林 著

李新洲 翟向华 刘道军 译

世纪出版集团 上海科学技术出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

宇宙的本源: 通向量子引力的三条途径 / (美) 斯莫林著; 李新洲, 翟向华, 刘道军译. —上海: 上海科学技术出版社, 2009. 1

(世纪人文系列丛书)

ISBN 978-7-5323-9523-1/N · 273

I. 宇… II. ①斯…②李…③翟…④刘… III. 引力量子理论 IV. 0412. 1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 107443 号

责任编辑 姚晨辉 何慧琳 吕 芳

装帧设计 陆智昌 朱赢椿

宇宙的本源——通向量子引力的三条途径

[美] 李·斯莫林 著

李新洲 翟向华 刘道军 译

出 版 世纪出版集团 上海科学技术出版社

(200235 上海钦州南路 71 号 www.ewen.cc www.sstp.cn)

发 行 上海世纪出版集团发行中心

印 刷 上海江杨印刷厂

开 本 635 × 965mm 1/16

印 张 14.5

字 数 147 000

版 次 2009 年 1 月第 1 版

印 次 2009 年 1 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5323-9523-1/N · 273

定 价 28.00 元

世纪人文系列丛书编委会

主任

陈 昕

委员

丁荣生	王一方	王为松	毛文涛	王兴康	包南麟
叶 路	何元龙	张文杰	张英光	张晓敏	张跃进
李伟国	李远涛	李梦生	陈 和	陈 昕	郁椿德
金良年	施宏俊	胡大卫	赵月瑟	赵昌平	翁经义
郭志坤	曹维劲	渠敬东	韩卫东	彭卫国	潘 涛

出版说明

自中西文明发生碰撞以来，百余年的中国现代文化建设即无可避免地担负起双重使命。梳理和探究西方文明的根源及脉络，已成为我们理解并提升自身要义的借镜，整理和传承中国文明的传统，更是我们实现并弘扬自身价值的根本。此二者的交汇，乃是塑造现代中国之精神品格的必由进路。世纪出版集团倾力编辑世纪人文系列丛书之宗旨亦在于此。

世纪人文系列丛书包涵“世纪文库”、“世纪前沿”、“袖珍经典”、“大学经典”及“开放人文”五个界面，各成系列，相得益彰。

“厘清西方思想脉络，更新中国学术传统”，为“世纪文库”之编辑指针。文库分为中西两大书系。中学书系由清末民初开始，全面整理中国近现代以来的学术著作，以期为今人反思现代中国的社会和精神处境铺建思考的进阶；西学书系旨在从西方文明的整体进程出发，系统译介自古希腊罗马以降的经典文献，借此展现西方思想传统的生发流变过程，从而为我们返回现代中国之核心问题奠定坚实的文本基础。与之呼应，“世纪前沿”着重关注二战以来全球范围内学术思想的重要论题与最新进展，展示各学科领域的新近成果和当代文化思潮演化的各种向度。“袖珍经典”则以相对简约的形式，收录名家大师们在体裁和风格上独具特色的经典作品，阐幽发微，意趣兼得。

遵循现代人文教育和公民教育的理念，秉承“通达民情，化育人心”的中国传统教育精神，“大学经典”依据中西文明传统的知识谱系及其价值内涵，将人类历史上具有人文内涵的经典作品编辑成为大学教育的基础读本，应时代所需，顺时势所趋，为塑造现代中国人的人文素养、公民意识和国家精神倾力尽心。“开放人文”旨在提供全景式的人文阅读平台，从文学、历史、艺术、科学等多个面向调动读者的阅读愉悦，寓学于乐，寓教于心，为广大读者陶冶心性，培植情操。

“大学之道，在明明德，在新民，在止于至善”（《大学》）。温古知今，止于至善，是人类得以理解生命价值的人文情怀，亦是文明得以传承和发展的精神契机。欲实现中华民族的伟大复兴，必先培育中华民族的文化精神；由此，我们深知现代中国出版人的职责所在，以我之不懈努力，做一代又一代中国人的文化脊梁。

上海世纪出版集团
世纪人文系列丛书编辑委员会
2005年1月

宇宙的本源

序 寻求量子引力

这本书讨论的是所有问题中最简单的一个问题：“何谓时空？”尽管科学的进步可以用由此而产生新答案的革命性来度量，不过，这仍是最难回答的问题之一。现在我们正处于这样一场革命之中，人们正在考虑的关于空间和时间的新思想不是一种而是几种。这本书打算作为一份前沿报告，其目的是以这种方式将这些新思想串连起来，使感兴趣的读者能够跟上这些非常令人振奋的进展。

空间和时间是难以思索的，因为它们是人类所有经验的背景。存在着的每一样事物总是存在于某处，某时不发生的事件就不发生。所以，就像人们可以生活于本土文化中而不对其前提提出疑问一样，生活于时空中而不问其本性也是理所当然的。但是在每个人的孩提时代，至少有那么一瞬间，他们都会想到时间。时间会永远行进下去吗？是否曾有最初的时刻？是否会有最终的时刻？假如有过最初的时刻，那么宇宙又是如何创生的？在创生之前的一刻发生了什么？假如没有最初时刻，是否意味着所有事件之前就已经发生了？对于空间

同样可以问：空间会永远延伸下去吗？如果空间有尽头，那么它的另一边是什么？如果没有尽头，那么人们能清点宇宙中的事物吗？

我相信自有人类起，人们就一直被问到这些问题。几万年前那些在山洞洞壁上绘画的人，晚餐后围坐在篝火旁，如果没有互相问到这些问题，才会使我觉得奇怪呢。

在过去 100 年左右的时间中，我们已经知道了物质是由原子组成的，而原子又是由电子、质子和中子组成的。这给我们上了重要的一课——人类的感知虽然有时很了不起，但还是太粗糙，不允许我们直接看到大自然的建筑砖块。我们需要新的工具去看最小的东西。显微镜让我们看到了构成我们及其他生物的细胞，但是要看到原子，我们必须观看至少再小 1 000 倍的尺度。现在我们可以利用电子显微镜看到原子。利用其他工具，例如粒子加速器，我们能看到原子的核子，我们甚至已经看到了组成质子和中子的夸克。

所有这些都是极其精彩的，但仍可提出许多问题。电子和夸克是最小的可能客体吗？或者它们自身是否由更小的实体组成？当我们继续探求下去时，我们总能发现更小的事物吗？或者存在一个最小的可能实体吗？我们不仅可用这种方式考虑物质，也可用同样的方式考虑空间：空间看起来是连续的，但它真的是这样吗？一份空间体积能分成尽可能多的部分吗？或者空间有最小单元吗？有最小距离吗？同样，我们想知道时间是否是无限可分的，或者时间是否有一个可能的最小单元。存在可能发生的最简单的事吗？

直到大约 100 年前，这些问题才有了可使人接受的答案。它们构成了牛顿物理学理论的基础。20 世纪初人们了解到，这座大厦尽管在科学和技术的那么多的发展中起到了很大的作用，但要对空间和时间的这些基本问题给出答案，它却完全无能为力了。牛顿物理学

被推翻后，这些问题有了新的答案。它们来自新的理论：主要是来自爱因斯坦(Albert Einstein)的相对论和玻尔(Niels Bohr)、海森堡(Werner Heisenberg)、薛定谔(Erwin Schrödinger)及其他许多人创造的量子理论。但这只是革命的起点，因为这两种理论中的哪一种都不足以完整地作为物理学的新基础。这两种理论都非常有用，能够解释许多事情，但每一种都是不完整和有限的。

量子理论的创造是为了解释为什么原子是稳定的，不会立即瓦解，就像用牛顿物理学描述原子结构所做的一切尝试一样。量子理论也说明了观测到的物质和辐射的许多性质。在分子以及更小尺度上，它的效应尽管不排除牛顿理论的预言，但却有着根本不同。相反，广义相对论是关于空间、时间和宇宙学的理论。它的预言与牛顿理论预言的强烈不同主要在于极大尺度上，证实广义相对论的那么多的观测都是来自天文学。然而，当面临原子和分子行为时，广义相对论似乎失败了。同样，量子理论似乎与构成爱因斯坦广义相对论基础的对空间和时间的描述相矛盾。因此，人们不能将这两种理论简单地并在一起构造一种单一的理论，用以展示从原子到太阳系甚至超越整个宇宙的全部世界。

不难解释为什么相对论与量子理论难以合并在一起。一个物理理论必须不单是在世界上存在何种粒子、何种力的简单目录。当我们进行科学研究时，在我们环顾四周开始描述我们的所见之前，我们必须对我们正在做的事做出某些假定。我们都会做梦，而在醒着时，绝大多数人都会毫无问题地将梦与实际经历区分开来。我们都会讲故事，但绝大多数人相信现实与虚构有区别。结果，我们根据它们与现实的关系所做不同假设的基础上，以不同方式谈论梦、小说和我们的通常经历。这些假设略微因人而异，因文化而异，并且它

们也会受到各种艺术家的修改。如果不清楚地说明，不管有意无意，结果会混乱和迷失方向。

同样，物理理论因它们对观测和现实所做的基本假设的不同而不同。如果我们不仔细地将它们说明清楚，那么，当我们试图比较不同理论对世界的描述时，就会或将会产生混乱。

在这本书中，我们将以两种非常不同的基本方式涉及理论。第一种是它们对空间和时间是什么这个问题所给出的答案。牛顿理论是关于这个问题的一个答案，广义相对论则是颇为不同的另一个答案。我们立刻就会看到这些答案是什么，但重要的事实是爱因斯坦永远改变了我们对空间和时间的理解。

另一种不同方式的理论在于观测者怎样认为他们与所观测的系统的关系。必定存在某种关系，否则观测者将意识不到系统的存在。但是，在对观测者和被观测者之间关系所做的假设上，不同的理论可以并且的确是强烈地不同。特别地，在这个问题上，量子理论做出了与牛顿理论根本不同的假设。

问题在于量子理论在根本改变了关于观测者与被观测者之间关系的假设时，却毫无变更地接受了牛顿(Isaac Newton)对何谓时空这个问题的旧答案。相反的情况恰好发生在爱因斯坦的广义相对论中，时空的概念根本改变了，而牛顿对观测者与被观测者之间关系的观点却保留了下来。看来每种理论至少是部分正确的，而它们又各自保留了另一种理论与之冲突的、来自旧物理学中的假设。

因此，相对论和量子理论只是现在即一个世纪以后还未完成的革命的第一步。要完成这个革命，我们必须找到一种单一的理论，将从相对论和量子理论获得的洞察力结合在一起。这个新理论必须以某种方式将爱因斯坦引入的时空新观念与量子理论告诉我们的观测者

与被观测者之间关系的新观念融合起来。如果这种融合是不可能的，那么必须将这两种理论都摒弃，去寻找时空是什么以及观测者与被观测者之间关系这些问题的新答案。

新理论仍然可能是不完备的，但它已经有了名字：叫做引力的量子理论。这是因为它的关键之处应包含把作为我们对原子和基本粒子理解基础的量子理论扩展到引力理论。目前，引力是在广义相对论的范围内得以理解的，广义相对论告诉我们引力实际上是时空结构的显示。这就是爱因斯坦最令人惊奇和最深邃的洞察力，当我们赞同它时，我们可以对它谈论许多。现在我们面临的问题(用基础物理的行话说)是将爱因斯坦的广义相对论与量子理论统一起来。这种统一的产物就将是引力的量子理论。

当我们有了量子引力，它就会对时空是什么这个问题提供新的答案。但那不是它的全部。引力的量子理论还将是一个关于物质的理论。它将包含在过去的一个世纪中获得的对基本粒子和支配它们的力的全部知识。它也必须是一个关于宇宙学的理论。当我们有了它，它就将回答现在看来非常神秘的关于宇宙起源的问题，例如大爆炸是最初的时刻呢，还是从先前存在的不同世界的转换。它甚至可以帮助我们回答这样的问题：宇宙是否注定含有生命，或者我们的存在是否仅仅是某种侥幸事件的结果。

当我们进入到 21 世纪，在科学上已没有别的挑战性的问题能比得上对这个理论的完善化。你可能会想，正如许多人已经在想的那样，这是否太困难了——它是否仍将保留那些一直未曾解决的不可能性的问题，如某些数学问题或知觉的本性问题。如果你曾经留心这个问题的范围，你采取这种观点就不足为奇了。许多好的物理学家也是这样。25 年前，当我在大学里开始从事引力的量子理论研究

时，我的几位老师告诉我只有傻瓜才研究这个问题。那时只有极少数人在真诚地从事量子引力研究。我并不知道他们是否曾经共进晚餐，但看来是很有可能。

我的研究生导师科尔曼(Sidney Coleman)曾劝说我做别的事。当我坚持我的想法时，他告诉我他将给我1年的时间，如果像他所预期的那样，我没有取得任何进展的话，他将分配我做一个更可行的基本粒子物理项目。然后他给了我极大的照顾：他请了这个学科的先导者之一德塞(Stanley Deser)照顾我，他们两人一起做我的导师。德塞最近已成为一门新的引力理论——超引力的开创者之一，超引力在几年的时间内似乎解决了所有早期努力未解决的问题。在研究生院的第一年内我也非常幸运地听了特胡夫特(Gerardus 't Hooft)的课，他在寻求量子引力方面作出了重要贡献。虽然我没有一直跟随他们的任一方向，但我从他们所做工作的例子中学到了至关重要的一课——那就是，只要你不理睬那些怀疑论者，继续研究下去，就有可能在那些看来不可能的问题上取得进展。毕竟，原子瓦解了，因此引力和量子之间的关系不是本质问题。如果问题出在我们自身，那必定在我们思想中的某处至少有一个，甚至可能有几个错误的假设。至少，这些假设含有我们的时空观念以及观测者和被观测者之间联系的观念。

显然，在我们找到引力的量子理论之前，我们必须首先隔离这些错误的假设。向前推进是很有可能，因为有一种发现错误假设的明显策略：尝试构造理论，并留心它在何处失败。因为到那时为止，所有的方法或早或晚都通向了死胡同，因此有丰富的工作可做。它可能没有使许多人受到激励，但它是一项必要的工作，并且对一个时期来讲，它已足够了。

但是现在情况完全不同了。我们仍然没有达到我们的目标，但是同行们几乎无人怀疑我们已向目标前进了很长一段路。理由在于，自 20 世纪 80 年代中期开始，我们就在寻找将量子理论和相对论结合在一起的方法，这种寻找没有失败，就像以前所做的所有尝试一样。结果表明，在过去的几年中，大部分难题都已解决。

我们所取得的这些进展带来的效应之一是，突然间我们的追求成了时尚。几十年前从事这个课题为数极少的先导者业已变成人数众多的集团，他们专职从事量子引力问题某一方面的研究。的确，我们的人数太多了，就像嫉妒忌的灵长类动物那样，我们已分裂成不同的团体，采用了不同的途径。这些途径被冠以不同的名字，如弦、圈、扭曲、非对易几何以及“拓派”(topi)*。这过于专门化了，已产生一些令人遗憾的后果。在每一个团体中，都有人确信他们的途径是问题的唯一解答。不幸的是，他们中的绝大多数一点儿也不理解其他研究途径的令人兴奋的主要结果。甚至还有这样的情形：采取某种方法的人似乎意识不到他们努力寻找的问题已经有人用另一种方法完全解决了。这种情况的结果之一是，许多从事量子引力某一方面研究的人并没有获得一个足够广泛的关于此领域的认识，即可以容纳最近朝着目标已取得的所有进展。

这或许并不多么令人惊奇——它似乎与癌症研究或进化论的现状没有太大区别。因为问题很难，可以想像，就像登山者们面对着处女峰，不同的人会尝试不同的途径。诚然，某些途径会被证明是完全失败的。但是，至少在量子引力的情形下，最近，几种途径似乎都导致了关于时空本性的真正发现。

* 一个新的数学概念，应用于群论，代数拓扑、几何等方面。——译注

到我写这本书时，所发生的最引人注目的发展是与不同知识的结合有关，这些知识是从不同途径中学到的，从而它们可以结合成一个单一的理论——引力的量子理论。尽管我们现在还不拥有这个单一理论的最终形式，但对它确实已了解了许多，这就是我在后面的章节中将要描述的内容的基础。

我想告知读者，我是一个性格非常乐观的人。我认为再过几年我们将能抵达完整引力量子理论的彼岸。然而我的确还有一些较为谨慎的朋友和同事。因此我要强调接下来的内容只是我个人的观点，并不是从事量子引力问题研究的每一位科学家或数学家都会认可的。我还应当附加指出，仍然有几个难题还没有解决。完成这个拱门的最后石块还没有找到。

此外，我必须强调，我们的量子引力的任何新理论尚无得到实验检验的可能性。直到最近人们还认为引力的量子理论不能由现存的技术检验，因此，到理论能面对来自实验科学的数据的未来还将需要很多年的时间。然而，现在看来，这种悲观主义可能是目光短浅的。诸如费约拉本德(Paul Feyerabend)这样的科学哲学家已强调新理论通常会建议可用来检验它们的实验新种类。在量子引力中，这种情况正在非常明确地发生。最近，新的实验已得到提议，看来它在不久的将来至少会存在检验理论的某些预言的可能性。这些新实验将应用现存的技术，但却是以一种令人惊讶的方式去应用，在旧理论的基础上，去研究那些可能没想到的但却与量子引力有关的现象。这的确是有真正进步的一个信号。然而，我们必须永远牢记，在这些实验真正实现之前，就像新理论可能表现得那么漂亮和引人注目一样，它们有可能是完全错误的。

在过去的几年中，在从事量子引力研究的许多人中间，兴奋和自

信在不断增长。我们难免有正在逼近这头猛兽的感觉。它还没有在我们的网中，但感觉上好像我们已经将它逼至一角，在我们的闪光灯下，它似乎若隐若现。

在通向量子引力的众多不同的路径中，最近传达信息最多、取得进步最多的是沿着三条主要的道路。假定量子引力应该产生于相对论和量子理论这两种理论的统一，那么，其中两条路或许就不会料想不到了。一条路线起步于量子理论，在这条路线中所用的多数思想和方法最初产生于量子理论的其他部分。那么，还有一条路是起步于相对论，沿着这条路，人们从爱因斯坦广义相对论的基本原理开始，寻求对它的修正以包含量子现象。这两条路中的每一条都导致了解决得很好并且部分成功的量子引力理论。第一条路产生了弦论，第二条道路导致了圈量子引力，尽管名字看起来有些类似，却是一种不同的理论。

圈量子引力和弦论在某些基础上是一致的。它们都认为存在一个物理尺度，在这个尺度上，时空本性与我们的观察有着极大的不同。这个尺度非常小，即使最大的粒子加速器也远远不能达到。事实上，它可能比我们迄今为止已探查的尺度小得多。通常认为它比原子核小 20 个量级(即为 $1/10^{20}$)。然而，我们并不真正有把握它将抵达到何处。最近已有一些非常有想像力的建议，假如奏效的话，将使量子引力效应在目前的实验能力范围内产生。

需要用量子引力描述时空的尺度称为普朗克尺度。弦论和圈量子引力都是关于在这个微小尺度上的时空的理论。我将要讲的故事之一是每种理论给出的图像是如何正在清晰起来的。现在还不是每个人都会同意，但越来越多的证据表明，这些不同的途径是通向同一个极其微小世界的不同窗口。

说到这里，我应该交代一下我自己的情况和偏爱。我是最早从事圈量子引力研究的人之一。我生命中最令人愉快的日子(除了纯私人生活以外)，就是在经过了几个月的艰苦工作后，突然间，我们理解了我们的理论的一个基本要素。与我一起做那项工作的朋友是我终生的朋友，我感到我们对所做出的发现有着同等的倾向和渴望。但在那以前，我从事弦论研究，在过去的4年中，我的大部分工作是在这两个理论之间的非常有活力的领域中展开的。我相信弦论和圈量子引力的基本结果都是正确的，我在这儿将要展示的世界图像是认真地从这两个理论感受到的。

除了弦论和圈量子引力以外，一直还存在着第三条路。这是下述那样的人采取的路径，认为相对论和量子理论缺点太多太不完善，不适于作为起点，而抛弃了它们。取而代之，这些人在基本原理中推敲，试图直接从它们形成新理论。当这些人提到较旧的理论时，他们不怕创造全新的概念世界和数学公式。因此，不像其他两条路，在上面走的人已结成了团体，每个团体都大得足以展示人类群体行为的面貌，这第三条路仅由几个人追随，每个人都在追求他或她自己的梦想，每个人不是预言家就是白痴，他们宁愿要那种本质的不确定性，也不要一大群具有相似目标的探求者共同旅行的舒适。

沿着第三条路的旅行是由这样一些深奥的哲学问题驱动的，如：“时间是什么？”或者“我们如何描述一个我们参与其中的宇宙？”这不是一些简单的问题，但我们这个时代的一些伟大的头脑选定对此激流勇进，并且我相信沿着这条路径也已取得重大进展。新的并且在某种情形下是一些颇为令人惊讶的主意已经被发现了，我相信它们的最大任务就是回答这些问题。我相信他们提供的概念框架允许我们采取下一步骤——继续引力的量子理论研究。