

量子引力研究进展简介

凌 意

(中国科学院高能物理研究所 100049)

一、问题简介

广义相对论是描述时间、空间与引力的理论，既是对狭义相对论的重要推广，也是继牛顿万有引力定律之后发展起来的最重要的引力理论。它一方面将狭义相对论中“所有惯性系都是平权的”的相对性原理，推广到了“所有参考系都是平权的”的广义协变原理，要求物理定律在任何参考系下都形式不变；另一方面它又将时空几何与物质分布紧密结合起来，克服了牛顿万有引力定律中引力是一种瞬时超距作用的根本性困难。广义相对论的理论核心是 100 年前爱因斯坦所构建的引力场方程，至今它已经成为人类了解时空与引力本质、探讨宇宙起源与演化和发展航空航天技术的基石。

在 20 世纪理论物理的发展大潮中，狭义相对论与量子理论的融合导致了量子场论的产生，如今它已成为粒子物理学家探索微观物质世界最重要的理论武器。但是广义相对论能否与量子理论融合起来，建立一个能够描述引力相互作用的量子引力理论呢？这依然是当前理论物理研究中的一个基本问题。

二、历史回顾

其实爱因斯坦本人在构建了引力场方程不久，就已经意识到了这个问题。此前，麦克斯韦建立电磁场方程，描述了电磁场的分布、传播与电荷、电流等电磁场源之间的关系。20 世纪在量子理论建立后，人们继而非常完美地解决了电磁场量子化的问题，将电动力学与量子理论很好地协调了起来，形成了一门全新的理论——量子电动力学，这使得人类对于电磁相互作用的认识有了本质飞跃。引力场方程的结构与电磁场方程类似，描述了引力场的分布与物质源之间的关系，也正是基于这种类似性，爱因斯坦等人预言了应该有类似于电磁波一样的引力波的存在，找到引力波存在的直接证据依然是当前物理学和天文学的主要任务之一（其相关进展请见本刊 2015 年第 5 期登载的《引

力波探测和引力波天文学》）。同时，量子理论的巨大成功使得人们相信自然界本质上是量子的，我们应该将引力场量子化，并建立一个类似于量子电动力学的量子引力理论。

这当然不是需要构建量子引力理论的唯一理由。20 世纪理论物理的发展加深了人类对微观粒子世界和宏观宇宙的认识，也同时加剧了构建量子引力的紧迫性。从粒子物理与场论来看，人们认识到自然界所发现的力都可以归结为引力、电磁、强、弱四种相互作用，而前两者为长程力，也被我们日常生活所感知，而后两者为短程力，是基本粒子之间结合和转化的基础。在理论上，人们对这几种相互作用的本质有了重要认识，那就是发现除了引力以外，其他三种相互作用都可以用规范理论来描述，而且在一定的能标之上，这三种相互作用可以被纳入到一种统一场论中，从而认为这几种看似不同的相互作用其实有着共同的起源，这跟人类认识到电和磁其实都是电磁场这个实体的不同表现形式非常类似。粒子物理学家在统一场论的征途中取得了辉煌的成就，乃至大家坚信，引力相互作用也应该被纳入到统一场论这个大家庭里来，当然前提就是引力场也必须量子化。另一方面，从广义相对论的理论发展来看，人们逐渐对时空几何特别是星体结构、黑洞性质和宇宙演化有了更深入的了解，但同时也遇到了在经典框架内很难解决的基本理论问题，这些问题暗示了广义相对论的不完整性，似乎只有与量子理论结合起来，才能看到解决这些基本困难的线索和曙光。其中几个突出的问题有宇宙奇点问题、黑洞裸奇点问题和信息丢失佯谬问题等。奇点意味着时空曲率的无穷大，而根据广义相对论理论，在很多星体的坍塌晚期和宇宙演化的开端，（裸）奇点的出现似乎无法避免，大家推测这可能是我们把经典广义相对论理论应用到了其不再适用的范围的缘故，例如在

宇宙的极早期，物质密度与能量都如此之高乃至不仅物质的量子效应不能被忽略，引力场本身的量子效应也不应该被忽略，我们应该有一个完整的量子引力理论来描述这一特殊阶段的时空几何与物质。而信息丢失佯谬问题的提出，与 20 世纪 70 年代霍金辐射的发现有着直接关联，可以说这是引力物理研究中的重要里程碑。通过研究黑洞背景下物质的量子性质，人们发现黑洞不仅具有温度，能通过黑体辐射向外传播能量，而且具有与黑洞视界面积成正比的熵，从而展现出丰富的热力学性质，霍金辐射的发现将量子引力研究带入了一个崭新阶段。首先，黑洞具有熵这个事实意味着黑洞具有微观自由度，那么黑洞熵的统计起源是什么？一个经典时空背景下的量子场论并不能给出答案，回答它需要量子引力来揭示时空本身的量子行为与微观结构。其次，霍金辐射使得黑洞的温度越来越高，乃至蒸发晚期变得发散，这种发散暗示着经典广义相对论的失效，需要结合量子理论来理解黑洞蒸发的终极命运。当然，霍金辐射带来的最大困惑是信息是否会随着黑洞完全蒸发而永远丢失掉？这是一个至今依然没有答案的基本问题。最后，我们还可以从另外一个角度来看构建量子引力理论的意义，那就是对于量子理论中测量问题的理解，在标准的量子理论中，测量是理解实在的一个必要环节，本身是利用经典仪器对量子系统进行操作从而导致波包塌缩的过程，但是波包是如何塌缩的，现有量子理论无法解答，有人提出，量子引力对于理解量子理论中的测量问题也许有帮助，并为量子力学是否是完备的这一问题的提供终极答案。

但是，现实中人们在尝试构建量子引力理论的进程中遇到了许多无法克服的困难，乃至到今天依然未能构建一个完整自洽的量子引力理论。那么，构建量子引力理论为什么要远远比构建量子电动力学困难呢？我们可以粗略地从概念层面和技术层面来回答这一问题。首先从概念层面来看，广义相对论不仅仅是关于引力的理论，同时还是描述时间与空间的几何结构的理论，这种双重身份使引力量子化问题变得非常复杂。大家都知道，电动力学讨论的是在固定时空背景下电磁场的运动和演化规律，其描述电磁场的基本变量是电磁势（一阶张量场，俗称矢量场），而量子

电动力学需要解决的主要问题就是直接将电磁场量子化，至于其“运动”、“演化”本身，有着毫不含糊的定义，如运动便是指空间上的变化，演化便是其时间上的变化等。这里的时空背景，好比如是舞台，而电磁场量子化后的光子，就好比如是演员，他们各司其职，区别明显。观察光子的运动与演化，就好比如观看演员在舞台上弹唱表演（图 1）。而广义相对论中，描述引力场的基本变量是度规，数学上它的地位如同描述电磁场的矢量势，只不过是一个二阶张量场，但概念上有一重要区别，那就是度规场不仅仅包含了引力的信息，还同时包含了时空几何的信息！要知道，要描述量子化后引力场的运动和演化，我们必须知道如何来定义它的运动和演化，简单说来必须知道如何来测量和描述引力场在空间和时间上的变化，而这种变化其实又要由被量子化的度规来刻画，套用上面的比喻，就是说量子引力遇到的问题，是如何将“既是演员，又是舞台”的度规场量子化的问题。



图 1 在量子电动力学中时空几何是舞台背景，而光子及其他粒子是演员。

当然并不是所有的物理学家坚持要这么看，至少在微扰的层面上，我们总可以把描述引力与时空几何的度规分成两个部分，一部分用来描述背景时空以充作舞台，另一部分用来描述引力并讨论将其量子化，物理学家们确实就这样做了多年的不懈努力与尝试，这刚好让我们过渡到技术层面来看量子引力为什么这么困难。刚才提到的这个方案，我们常称为量子引力的微扰方法，但最终并没有成功，是因为人们发现微扰量子引力是不可重整化的。重整化是量子场论中的一个核心思想，简单说来，就是在微扰计算中人们往往会得到发散的结果，这在物理上当然是无法接受的，

纪念广义相对论创立 100 周年

后来物理学家最终发展了一套方案，能够将计算中遇到的所有无穷大吸收到有限的几个物理参数中去，从而总能得到有限的结果，且与实验数据非常吻合，这种方法在场论中被称为重整化，但是人们发现这种方法最终无法解决微扰量子引力中的发散问题，这里遇到不同类型的发散无法用有限的物理参数去吸收，也就是物理学家常说的引力无法重整化。当然，这里说的引力不可重整化是基于爱因斯坦的广义相对论理论，后来人们尝试构建了一些推广的引力模型，例如引入一些高阶导数项，发现个别引力理论是可以重整化的，但是这些理论的真空又不稳定，从而并不能真正成为完整的量子引力理论。

自 20 世纪七八十年代，人们开始寻求全新的方法来实现引力场的量子化。基于以上回顾与分析，我们能够小结，构建量子引力的出路主要有以下三种途径，一种方案是放弃微扰方案，采用非微扰的方法来构建量子引力，而第二种方案则通过分析不可重整化的根源并受粒子间渐进自由的启发，不再视基本粒子是空间质点，而是一维乃至高维延展体，第三种方案则是修改爱因斯坦的广义相对论理论。现在这三种方案成为构建量子引力理论的主流，其代表分别是圈量子引力、超弦理论和 Horava-Lifshitz 引力理论。

三、当前的研究现状

圈量子引力是采用非微扰方法来处理引力场量子化的代表。其基本思路沿袭了由狄拉克所提出的正则量子化一般方案，后来也与路径积分方法相结合，提出了自旋泡沫与历史求和等协变方案。非微扰量子引力秉承了广义协变性这一广义相对论的核心思想，坚持“度规既是演员又是舞台”这一原则，由此带来的一个重要推论就是量子引力必须是一个微分同胚不变的量子场论。早期的正则量子引力方法以传统的度规为基本变量，已经认识到引力系统的这种特殊性，它直接导致引力是一个天生的约束系统。它具有两类约束，一类是微分同胚约束，一类是哈密顿约束，尽管此前有一套标准的方法来量子化具有有限多自由度的约束系统，但是把它应用于无限多个自由度的场论系统时，就会遇到很多无法克服的困难。

圈量子引力采用了一组新的变量来取代原来的度

规，发展了一套以联络动力学为基础的新方案，在处理这类问题上取得了突破性进展，其理论核心，便是放弃原来局域的场算符，而取而代之以非局域的场算符，并在此基础上发展出一套来描述引力量子态的圈表示、和乐表示和自旋网络表示理论。特别是自旋网络态能够构成引力希尔伯特空间的一组完备基，使得圈量子引力在运动学水平上趋于完整，并在理解时空的量子性质上取得重要进展。以自旋网络为基础人们可以得到量子引力中可观测量如面积、体积的本征分立谱，原则上为描述时空的微观结构提供了直观图像。正如同量子力学告诉我们，原子是构成物质结构的基本单元，而原子的特征能级由一些分立不连续的谱线所组成，量子几何告诉我们，时空同样具有微观结构！我们日常生活中所感受到的连续时空，在微观下其实是由分立的、具有原子样基本结构的碎块所组成（图 2）。这种图像给出了黑洞熵的统计解释，也对量子宇宙学产生了重要影响，近年在此基础上发展起来的圈量子宇宙学发现在简化模型中宇宙奇点可以避免，取而代之以反弹宇宙模型，这为理解宇宙的起源开辟了新途径。当前圈量子引力的核心问题依然是动力学问题，技术层面上在于怎样处理哈密顿约束方程的量子化，而概念层面上在于怎样理解时间的产生和时间箭头的流向。

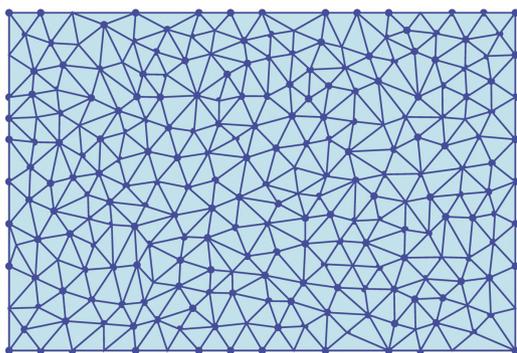


图 2 我们日常生活中所感受到的连续时空，在微观下也许是由分立的、具有原子样基本结构的碎块所组成。

超弦理论的出发点是视基本粒子不再是点状物而是一维弦乃至高维延展体，由此出发基本粒子间的相互作用不再是质点间瞬时发生的分离与聚合现象，而是一维弦之间的分离与聚合，在时空中体现出非局域性（图 3）。这种非局域性秉承了广义相对论中时空

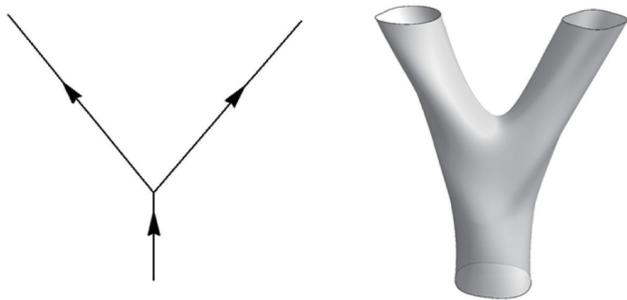


图3 从粒子的相互作用（左）到弦的相互作用（右）

点没有绝对意义的思想，而在技术上很大程度消除了场论重整化中的发散行为，从而为建立量子引力的微扰理论开辟了新的道路。但同时为了保障理论的自洽性，人们必须付出高昂的代价。首先就是理论要求时空背景是高维而不是四维的，其次必须要有超对称。现在大家习惯以两次革命的方式来总结近几十年弦理论的发展过程。弦论的第一次革命发生在 20 世纪 80 年代初，就是在超对称情况下，人们发现在十维时空中存在五种不同的超弦理论；而第二次革命发生在 20 世纪 90 年代中期，人们发现弦理论中非微扰物体 D 膜的存在，进而通过对偶发现看似不同的五种超弦理论可以在更高一维的时空中统一为一个未知的 M 理论，这兴起了另一波研究并了解弦论的高潮。其中最具有代表意义的进展，是利用 D 膜与弦论对偶能明确计算弦的微观态数，为极端黑洞熵提供了非常漂亮的统计解释，其次便是 AdS/CFT（反德西特 / 共形场论）对应的提出更为深刻地揭示了引力与规范理论之间的深刻联系，为检验引力的全息性质提供了具体方案。特别引人关注的是进入 21 世纪后，基于 AdS/CFT 对应而发展起来的 AdS/QCD（反德西特 / 量子色动力学）、AdS/CMT（反德西特 / 凝聚态理论）对偶为研究量子色动力学和凝聚态系统中的强耦合和强关联现象开启了一个崭新的时代。

在以往的著作和文献中，大家都更倾向于展现圈量子引力与超弦理论的不同，并强调各自理论的特点与优势。毫无疑问，无论是在哲学上，还是方法技术上，两个理论似乎完全不在同一个方向上，乃至背道而驰。但是我个人更倾向于向读者指出它们的一些共性。例如不管是圈量子引力还是弦论，都强调时空点不具有绝对的意义，引力的非局域特征都表现得很明显，两者都强调时空的动力学特征，不存在一个独立的固定不变的时

空背景，而在根本目标上，大家都注重引力的非微扰特征，并同意一个最终的量子引力理论，必然是背景独立的。所以最终也许真会如同双方更为开明的物理学家所预期的那样，“两条路有可能在某个地方相会”。

第三种构建量子引力的方案是修改爱因斯坦的广义相对论，或者说修改引力理论。近年有一种修改引力理论得到了大家的广泛关注，被称为 Horava-Lifshitz 引力理论。这种理论的基本思想是大胆推测广义相对论中时空坐标的广义协变性只是在经典低能情形下的一种体现，而在高能区这种协变性可能不被遵守。具体说来，这个理论放弃了时间方向的重参数化不变性，从而存在一个优越的时间坐标和时空分片，同时受传统 Lifshitz 标度理论的启发，假设在高能区时间与空间坐标具有不同的标度行为。由此构建的引力理论在各级展开的计算中是可重整化的，这被认为是构建量子引力道路上的突破性进展，但同时由于该理论放弃了时间与空间平权的思想，不具有洛伦兹对称性，如何在低能极限下恢复洛伦兹对称性成为该理论的一个基本问题，这有待进一步研究探讨。

至今未能构建一个完备的量子引力理论，究其根源，也许是我们还没有完全认清引力与时空本质属性的缘故，为此，近年诸多有关时空与引力本性的探讨同样值得关注。首先是关于引力全息性质的研究，这可以追溯到 20 世纪 70 年代贝肯斯坦关于黑洞熵的提出。其最为显著的特点就是认为黑洞熵与视界的面积成正比，而不同于传统的热力学系统其熵往往与体积成正比，这暗示一定区域内引力的自由度主要通过其边界体现出来，这也是“全息”名称的由来，但全息原理被正式提出还是在 20 世纪 90 年代，具体来说它主要包括两个方面的内容，一个是定性的，就是一个完整的量子引力理论可以被低一维的没有引力的量子场论来描述，另一个是定量的，就是在给定区域内量子引力系统希尔伯特空间的维度与区域边界的面积成正比。对全息原理的支持，主要来自于 AdS/CFT 对应，特别是在一些特定的时空背景下，这种对应可以被严格地检验。至今人们普遍相信全息性质是量子引力的重要乃至本质特征，全息原理也逐渐被认为是量子引力理论的一个基本原理，为此人们还提出了协变熵边界等方案来研究引力的全息性质，此

纪念广义相对论创立 100 周年

方面的探索依然在进展之中。

其次是关于引力流体特征的研究。早在 20 世纪 80 年代初，人们就通过研究黑洞发现引力具有流体特征，因为其近视界几何的涨落可以用流体动力学方程来刻画，而把引力场方程看成一种态方程则始于 1995 年。这些成果对于量子引力理论的构建至关重要，在于它们为理解引力的本质特征提供了新视角。爱因斯坦场方程被看作态方程，或在一定层面体现出流体特征，意味着爱因斯坦场方程也许只是在一定范围内适用的有效理论，而引力本身也许并不是一种基本的相互作用，而只是某种更为基本的力在一定尺度或范围内的集体体现，由此有人在 2010 年左右提出引力是一种熵力的观点，这依然是今天关于引力本质探索的重要议题。

四、讨论与展望

不管最终是哪一条道路能通向一个成功的量子引力理论，一个完整的量子引力理论应该具有以下两个基本特征：一是低能极限下能够回到广义相对论，二是理论能被实验或观测检验，并且具有预言能力。

先看第一点，即如何从一个高能量子几何回到能被广义相对论很好描述的经典时空。引力与量子理论相结合，使得时空几何具有复杂的微观结构，是一个量子多体系统。在凝聚态理论中，一个多体系统随能标变化展现出不同的结构与性质，这常被人称为“演生现象”。最近有关演生现象的研究正在持续升温，乃至人们开始探索把组成物质的基本粒子同样看成是从纯量子世界中产生出来的低能集体模式或凝聚现象。在量子引力中，时空与物质的平等性催生了许多重要的概念与设想，其中之一便是利用演生来描述不同能标下我们所观测到的时空结构与演化规律，比如引力的流体特征，而连续的经典时空正是微观量子几何在低能极限下的凝聚现象，这种观点使得“演生时空”或“演生引力”的研究日趋流行，特别是最近全息纠缠熵的研究为探讨时空的演生机制提供了新途径。

在一个完备的量子引力理论建立之前，谈论第二点似乎为时尚早，但是近年国际上人们提出了许多富有启发的思想和方案，在寻找可观测的量子引力效应的道路上取得了引人注目的进展。其一，现在的天文观测特别是对宇宙微波背景辐射的精密测量，为探索



图 4 皮耶奥格 (Pierre Auger) 宇宙射线观测站为极高能区域的物理规律提供了检验窗口

宇宙的起源与极早期演化提供了第一手资料，也为探索量子引力效应打开了一扇大门。众所周知，宇宙极早期是引力和物质的量子行为表现十分强烈的时期，也正是那些量子涨落导致了宇宙的各向异性、非均匀性和最终的结构形成，现在人们正努力通过对宇宙微波背景辐射的深入研究来探寻量子引力的遗迹。其二，通过对量子引力有效理论的研究，人们发现一些熟知的物理规律在接近普朗克能标的极高能区域可能被改变或修正，比如洛伦兹对称性可能变形或破缺，从而导致描述相对论粒子的能量动量关系（即色散关系）产生修正，另外通常量子力学中的不确定关系在考虑了粒子的量子引力效应后也需要被推广，从而与量子引力中存在一个最小测量长度的观点一致，现在对极高能宇宙射线的观测为检验是否存在这些修正提供了窗口（图 4）。另外，近年空间冷原子计划在国际上受到普遍关注，其有望在微重力环境下获得 pK 量级的超低温，从而使原子冻结以凸显系统的量子效应。空间超冷原子的量子仿真为研究和验证引力中的量子效应提供了条件，如声学黑洞中的霍金辐射、超流体中切向黏滞系数与熵密度比值下限等，而其中最令人关注的，是对引力波的测量和洛伦兹对称性的检验。现在国际上已提出了相应的空间冷原子研究计划，而我国相应的空间计划也在酝酿当中。

总之，在广义相对论诞生后的这一个世纪量子引力的研究取得了长足进展和多元发展，虽然现在依然存在很多困惑和基本困难，但是经过数代物理学家的不懈努力，我们有理由相信描述引力与时空的广义相对论终将与量子理论走向融合，为人类理解自然与宇宙奥秘开辟全新的道路。