

当代量子引力及其哲学反思

薛晓舟

【作者简介】薛晓舟(1930-)男, 河南师范大学理论物理所教授。河南师范大学理论物理所, 新乡 453002

【内容提要】本文从量子引力概念的分析入手, 介绍了当代量子引力研究的进展, 评析了其取得的主要成就, 并对之作了简略的哲学反思。

【摘要题】科学与哲学

【关键词】超弦/M理论/圈量子引力/哲学反思

【正文】

(中图分类号) N94 (文献标识码) A (文章编号) 1000-0763(2003)02-0101-05

本文分四部分。首先明确什么是量子引力? 其次给出当代量子引力发展简史, 更次概述当代量子引力研究主要成果, 最后探讨量子引力的一些哲学反思。

一、什么是量子引力?

当代基础物理学中最大的挑战性课题, 就是把广义相对论与量子力学协调起来[1]。这个问题的研究, 将会引起我们关于空间、时间、相互作用(运动)和物质结构诸观念的深刻变革, 从而实现20世纪基础物理学所提出的空间时间观念的量子革命。

广义相对论是经典的相对论性引力场理论, 量子力学是量子物理学的核心。凡是研究广义相对论和量子力学相互结合的理论, 就称为量子引力理论, 简称量子引力。探讨量子引力卓有成效的理论, 主要有两种形式。

第一, 是把广义相对论进行量子化, 正则量子引力属于此种。第二, 是对一个不同于广义相对论的经典理论进行量子化, 而广义相对论则作为它的低能极限, 超弦/M理论则属于这种。

圈(Loop)量子引力[2]是当前正则量子引力的流行形式。正则量子引力是只有引力作用时的量子引力, 和超弦/M理论相比, 它不包括其它不同作用。它的基本概念是应用标准量子化手续于广义相对论, 而广义相对论则写成正则的即Hamiltonian形式。正则量子引力根据历史发展大体上可分为朴素量子引力和圈量子引力。粗略来说, 前者发生于1986年前, 后者发生于1986年后。朴素量子引力由于存在着紫外发散的重正化困难, 从而圈量子引力发展成为当前正则量子引力的代表。

超弦/M理论的目的, 在于提供已知四种作用即引力和强、弱、电作用统一的量子理论。理论的基本实体不是点粒子, 而是1维弦、2维简单膜和多维brane(广义膜)的延展性物质客体。超弦是具有超对称性的弦, 它不意味着表示单个粒子或单种作用, 而是通过弦的不同振动模式表示整个粒子谱系列。

圈量子引力和超弦/M理论之外, 当代量子引力还有其它不同方案。例如, Euclidean量子引力、拓扑场论、扭量理论、非对易几何等。

二、当代量子引力研究进展

我们主要给出超弦/M理论和圈量子引力研究的重大进展。

1.超弦/M理论方面[3]

弦理论简称弦论, 虽然在20世纪70年代中期, 已经知道其中自动包含引力现象, 但因存在一些困难, 只是到80年代中期才取得突破性进展。

1)80年代超弦理论

弦论发展可粗略分为早期弦理论（70年代）、超弦理论（80年代）和M理论（90年代）三个时期。我们从80年代超弦理论开始，简述其研究进展。

1981年，M.Green和J.Schwarz提出一种崭新的超对称弦理论，简称超弦理论，认为弦具有超对称性质，弦的特征长度已不再是强子的尺度（ $\sim 10^{-13}$ 厘米），而是Planck尺度（ $\sim 10^{-33}$ 厘米）。

1984年，Green和Schwarz证明[4]，当规范群取为SO(32)时，超弦I型的杨-Mills反常消失，4粒子开弦圈图是有限的。

1985年，D.Gross,J.Harvey[5]等4人提出10维杂化弦概念，这种弦是由D=26的玻色弦和D=10超弦混合而成。杂化弦有E₈×E₈和SO(32)两种。

同年，P.Candlas,G.Horowitz,A.Strominger和E.Witten[6]对10维杂化弦E₈×E₈的额外空间6维进行紧致化，最重要的一类为Calabi-丘流形。但是这类流形总数多到数百万个，应该根据什么原则来选取作为我们世界的C-丘流形，至今还不清楚，虽然近10多年来，这方面的努力从来未中断过。

1986年，提出建立超弦协变场论问题，促进了对非微扰超弦理论的探讨。在诸种探讨方案中，以E.Witten的非对易几何最为突出[7]。

同年，人们详细地研究了超弦唯象学，例如E₆以下如何破缺及相应的物理学，对紧致空间已不限于C-丘流形，还包括轨形(Orbifold)、倍集空间等。

人们常把1984-86年期间对超弦研究的突破，称为第一次超弦革命。在此期间建立了超弦的五种相互独立的10维理论，而且是微扰的。它们是I型、IIA型、IIB型、杂化E₈×E₈型和SO(32)型。

2)90年代M理论

经过80年代末期和90年代初期，对超弦理论的对偶性、镜对称及拓扑改变等的研究，到1995年五种超弦微扰理论的统一性问题获得重大突破，从此第二次超弦革命开始出现。

1995年，Witten在南加州大学举行的95年度弦会议上发表演讲，点燃起第二次超弦革命。Witten根据诸种超弦间的对偶性及其在不同弦真空中的关联，猜测存在某一个根本理论能够把它们统一起来，这个根本理论Witten取名为M理论。这一年内Witten、P.Horava、A.Dabholkar等人发表论文，给出IIA型弦和M理论间的关系[8]、I型弦和杂化SO(32)型弦间的关系、杂化弦E₈×E₈型和M理论间的关系等。

1996年，J.Polchinski、P.Townsend、C.Bachas等人认识到D-branes的重要性。积极进行D-branes动力学研究[9]，取得一定成果。同年，A.Strominger、C.Vafe应用D-brane思想，计算了黑洞这种极端情形的熵和面积关系[10]，得到了和Bekenstein-Hawking的熵-面积的相同表示式。G.Callon、J.Maldacena对具有不同角动量与电荷的黑洞所计算的结果指出，黑洞遵从量子力学的一般原理。G.Collins探讨了量子黑洞信息损失问题。

1997年，T.Banks、J.Susskind等人提出矩阵弦理论，研究了M理论和矩阵模型间的联系和区别。

同年，Maldacena提出AdS/CFT对偶性[11]，即一种Anti-de Sitter空间中的IIB型超弦及其边界上的共形场论之间的对偶性假设，人们称为Maldacena猜测。这个猜测对于我们世界的Randall-Sundrum膜模型的提出及Hawking确立果壳中宇宙的思想，都有不少的启示。

2.圈量子引力方面[12]

1)二十世纪80年代

1982年，印度物理学家A.Sen在Phys.Rev.和Phys.Lett.上相继发表两篇文章，把广义相对论引力场方程表述成简单而精致的形式。

1986年，A.Ashtekar研究了Sen提出的方程，认为该方程已经表述了广义相对论的核心内容。一年后，他给出了广义相对论新的流行形式，从而对于在Planck标度的空间时间几何量，可以进行具体计算，并作出精确的数量性预言。这种表述是此后正则量子引力进一步发展的关键。

同年，T.Jacobson和L.Smolin求出Wilson圈解。在引进经典Ashtekar变量后，他们在圈为光滑且非自相交情形下，求出了正则量子引力的WDW方程解。此后，他们又找到了即使在圈相交情况下的更多解。

1987年，由于Hamiltonian约束的Wilson圈解的发现，C.Revल्ली和Smolin引进观测量的经典Poisson代数的圈表示，并使微分同胚约束用纽结(knot)态完全解出。

1988年，V.Husain等人用纽结理论(knot theory)，研究了量子约束方程的精确解及诸解间的关系，从而认为纽结理论支配引力场的物理量子态。同年，Witten引进拓朴量子场论(TQFT)的概念。

2)二十世纪90年代

1990年，Rovelli和Smolin发表论文指出，对于在大尺度几何近似变为平直时态的研究，可以预言Planck尺度空间具有几何断续性。对于编织的这些态，在微观很小尺度上具有“聚合物”的类似结构，可以看作是J.Wheeler时空泡沫的形式化。

1993年，J.Iwasaki和Rovelli探讨了量子引力中引力子的表示，引力子显示为时空编织纤维的拓朴修正。

1994年，Rovelli和Smolin第一次计算了面积算子和体积算子的本征值[13]，得出它们的本征谱为断续的重大结论。此后不久，物理学者曾用多种不同方法证明和推广这个结论，指出在Planck标度，空间面积和体积的本征谱，确实具有分立性。

1995年，Rovelli和Smolin利用自旋网络基[14]，解决了关于用圈基所长期存在的不完备性困难。此后不久，自旋网络形式体系，便由J.Baez彻底阐明。

1996年，Rovelli应用K.Krasnov观念，从圈量子引力基本上导出了黑洞熵的Bekenstein-Hawking公式[15]。

1998年，Smolin研究圈和弦间的相似性，开始探讨圈量子引力和弦论的统一问题。

三、当代量子引力理论主要成就

1.超弦 / M理论方面

1)弦及brane概念的提出

广义相对论中的奇性困难、量子场论中的紫外发散本质、朴素量子引力中的重整化问题，看来都起源于理论的纯粹几何的点模型。超弦理论提出轻子、夸克、规范粒子等微观粒子都是延伸在空间的一个区域中，它们都是1维的广延性物质，类似于弦状，其特征长度为Planck长度。M理论更推广了弦的概念，认为粒子类似于多维的brane，其线度大小为Planck长度。为简单起见，我们把brane也称作膜。超弦 / M理论中，用有限大小的微观粒子替代粒子物理标准模型中纯粹几何的点粒子，这是极为重要且富有成效的革命性观念。

2)五种微扰超弦理论

这五种超弦的不同在于未破缺的超对称荷的数目和所具有的规范群。I型有N=1超对称性，含有开弦和闭弦，开弦零模描述杨-Mills场，闭弦零模描述超引力。II A型有N=2超对称性，旋量为Majorana-Weyl旋量，不具有手征性，自动无反常，只含有闭弦，零模描述N=2超引力。IIB型同样有N=2超对称性，具有手征性。杂化弦是由左旋D=10超弦和左旋D=26玻色弦杂化而成，只包含可定向闭弦，有手征性和N=1超对称性，可以描述引力及杨-Mills作用。

3)超弦唯象学

从唯象学角度来看，杂化弦型是重要的， $E_{[8]} \times E_{[8]}$ 是由紧致16维右旋坐标场(26-10=16)而产生的，即由16维内部空间紧致化而得到，也就是说在紧致化后得到D=10，N=1， $E_{[8]} \times E_{[8]}$ 的超弦理论。

但是迄今为止，物理学根据实验认定我们的现实空间是三维的，时间是一维的，把四维时空(D=4)作为我们的现实时空。因此我们必须把10维时空紧致化得到低能有效四维理论，为此人们认为从D=10维理论出发，通过紧致化有

$$M[10] \rightarrow M[4] \times K$$

此中K为一丘流形，此内部紧致空间维数为 $10-4=6$ ， $M[4]$ 为Minkowski空间，从而得到4维Minkowski空间低能有效理论。其重要结论有：

(1)由 $D=10, E[8] \times E[8]$ 超弦理论（ $M[10]$ 中规范群为 $E[8] \times E[8]$ ）紧致化为 $D=4, E[6] \times E[8]$ 、 $N=1$ 超对称理论。

(2)夸克和轻子的代数 Ng 完全由K流形的拓扑性质决定：为Euler示性数 χ ，系拓扑不变量。

(3)对称破缺问题。已知超弦四维有效理论为 $N=1$ ，规范群为 $E[6] \times E[8]$ 的超对称杨—Mills理论，现实模型要求破缺。首先由第二个 $E[8]$ 进行超对称破缺，然后对大统一群 $E[6]$ 已进行破缺，从而引力作用在 $E[8]$ 中，弱、电、强作用在 $E[6]$ 中，实现了四种作用的统一。

4) T和S'对偶性

尽管五种超弦理论在广义相对论和量子力学统合上，取得了不少进展，但是五种超弦理论则是相互独立的，理论却是微扰的。尽管在超弦唯象学中，原则上一丘流形K一旦固定下来，在 $D=4$ 时空中所有零质量费米子和玻色子（包括Higgs粒子）就会被确定下来，但是一丘真空态总数则可多到数百万个，应该根据什么原则来选取一丘真空态，目前还不清楚。T对偶性和S对偶性的提出，正是五种超弦理论融通的主要桥梁。

在M理论的孕育过程中，对偶性起了重要作用。弦论中存在着一种在大小紧致空间之间的对偶性。例如II A型弦在某一半径为 $R[A]$ 的圆周上紧致化和II B型在另一半径为 $R[8]$ 的圆周上紧致化，两者是等效的，则有关系 $R[B] = (m[2,s]R[A])^{-1}$ 。于是当 $R[A]$ 从无穷大变到零时， $R[B]$ 从零变到无穷大。这给出了II A弦和II B弦之间的联系。两种杂化弦 $E[8] \times E[8]$ 和 $SO(32)$ 也存在类似联系，尽管在技术性细节上有些差别，但本质上却是同样的。

A.Sen证明，在超对称理论中，必然存在着既带电荷又带磁荷的粒子。当这一猜测推广到弦论后，它被称作为S对偶性。S对偶性是强耦合与弱耦合间的对称性，由于耦合强度对应于膨胀子场，杂化弦 $SO(32)$ 和I型弦可通过各自的膨胀子连系起来。

5) M理论和五种超弦、11维超引力间的联系

M理论作为10维超弦理论的11维扩展，包含了各种各样维数的brane，弦和二维膜只是它的两种特殊情况。M理论的最终目标，是用一个单一理论来描述已知的四种作用。M理论成功的标志，在于把量子力学和广义相对论的新理论框架中相容起来。

附图

上面给出五种超弦理论、11维超引力和M理论相容的一个框架示意图[16]，即M理论网络。此网络揭示了五种超弦理论、11维超引力都是单一M理论的特殊情形。当然至今M理论的具体形式仍未给出，它还处于初级阶段。

6) 推导量子黑洞的熵—面积公式。

在某些情形下，D-branes可以解释成黑洞，或者说是黑branes，其经典意义是任何物质（包括光在内）都不能从中逃逸出的客体。于是开弦可以看成是具有一部分隐藏在黑branes之内的闭弦。Hawking认为黑洞并不完全是黑的，它可以辐射出能量。黑洞有熵，熵是用量子态来衡量一个系统的无序程度。在M理论之前，如何计算黑洞量子态数目是没有能力的。Strominger和Vafa利用D-brane方法，计算了黑—branes中的量子态数目，发现计算所得的熵—面积公式，和Hawking预言的精确一致，即Bekenstein-Hawking公式，这无疑是M理论的一个卓越成就。

对于具有不同角动量和电荷的黑洞所计算结果指出，黑洞遵从量子力学的一般原理，这说明黑洞和量子力学是十分融洽的。

2. 圈量子引力方面

1) Hamiltonian约束的精确解。

圈量子引力惊人结果之一，是可以求出Hamiltonian约束的精确解。其关键在于Hamiltonian约束的作用量，只是

在s-纽结的结点处不等于零。所以不具有结点的s-纽结，才是量子Einstein动力学求出的物理态。但是这些解的物理诠释，至今还是模糊不清的。

其它的多解也已求得，特别是联系联络表示的陈-**Simons**项和圈表示中的**Jones**多项式解，**J.Pullin**已经详细研究过。**Witten**用圈变换把这两种解联系起来。

2)时间演化问题

人们试图通过求解**Hamiltonian**约束，获得在概念上是很好定义的、并排除冻结时间形式来描述量子引力场的时间演化。一种选择是研究和某些物质变量相耦合的引力自由度随时间演化，这种探讨会导致物理**Hamiltonian**的试探性定义的建立，并在强耦合微扰展开中，对S-纽结态间的跃迁振幅逐级进行考查。

3)杨-**Mills**理论的重正化问题

T.Thiemann把含有费米子圈的量子引力，探索性地推广到杨-**Mills**理论进行研究。他指出在量子**Hamiltonian**约束中，杨-**Mills**项可以严格形式给出定义。在这个探索中，紫外发散看来不再出现，从而强烈支持在量子引力中引进自然切割，即可摆脱传统量子场论的紫外发散困难。

4)面积和体积量度的断续性

圈量子引力最著名的物理成果，是给出了在**Planck**标度的空间几何量具有分立性的论断。例如面积

$$A = 8\pi \gamma \sum_i j_i^2$$

其中 l_p 是**Planck**长度， j_i 是第*i*个半整数。体积也有类似的量子化公式。

这个结论表明对应于测量的几何量算子，特别是面积算子和体积算子具有分立的**本征值谱**。根据量子力学，这意味着理论所预言的面积和体积的物理测量必定产生量子化的结果。由于最小的**本征值**数量级是**Planck**标度，这说明没有任何途径可以观测到比**Planck**标度更小的面积（ $\sim 10^{-66}$ 厘米²）和体积（ $\sim 10^{-99}$ 厘米³）。从此可见，空间由类似于谐振子振动能量的量子所构成，其几何量**本征谱**具有复杂结构。

5)推导量子黑洞的熵-面积公式

已知**Schwarzschild**黑洞熵**S**和面积**A**的关系，是**Bekenstein**和**Hawking**所给出，其公式为：

附图

这里**k**是**Boltzman**常量， \hbar 是**Planck**常量，**G**为**Newton**引力常量，**c**为光速。对这个关系式的深层理解和由物理本质上加以推导，**M**理论已经作过，现在我们看下圈量子引力的结果。

应用圈量子引力，通过统计力学加以计算，**Krasnov**和**Rovelli**导出

附图

此处 γ 为任意常数， β 是实数（ $\sim 1/4\pi$ ），显然如果取 $\gamma = \beta$ ，则由式(3)即可得到式(2)。这就是说，从圈量子引力所得出的黑洞熵-面积关系式，在相差一个常数值因子上和**Bekenstein-Hawking**熵-面积公式是相容的。

Bekenstein-Hawking熵公式的推导，对圈量子引力理论是一个重大成功，尽管这个事实的精确含义目前还在议论，而且 γ 的意义也还不够清楚。

四、量子引力理论的哲学反思

我们从空间和时间的断续性、运动（相互作用）基本规律的统一性、物质结构基本单元的存在性三个方面进行哲学探讨。

1.空间和时间的断续性

当代基础物理学的核心问题，是在**Planck**标度破除空间时间连续性的经典观念，而代之以断续性的量子绘景。量子引力理论对空间分立性的揭示和论证，看来是最为成功的。

超弦 / **M**理论认为，我们世界是由弦和**brane**构成的。根据弦论中给出的新的不确定性关系，弦必然有位置的模糊性，其线度存在一有限小值，弦、膜、或**brane**的线度是**Planck**长度，从而一维空间是量子化的。由此推知，面积和体积也应该是量子化的。二维面积量子的数量级为 10^{-66} 厘米²，三维体积量子的数量级为 10^{-99} 厘米³等。

对于圈量子引力，其最突出的物理成果是具体导出了计算面积和体积的量子化公式。粗略说来，面积的数量级是**Planck**长度 l_p 的二次方，体积的数量级是 l_p 的三次方。这就令人信服地论证了在**Planck**标度，面积和体积

具有断续性或分立性，从而根本上否定了空间在微观上为连续性的经典观念。

依据空间和时间量度的量子性，芝诺悖论就是不成立的，阿基里斯在理论上也完全可以追上在他前面的乌龟。类似的，《庄子·天下》篇中的“一尺之捶，日取其半，万世不竭”这个论断在很小尺度上显然也是不成立的。古代哲学中这两个难题的困人之处，从空间时间断续性来看，是由于预先设定了空间和时间的度量，始终是连续变化的经典性质。实际上在微观领域，空间和时间存在着不可分的基本单元。

2.运动（相互作用）基本规律的统一性

20世纪基础物理学巨大成功之一，就是建立了粒子物理学的标准模型，理论上它是筑基于量子规范场论的。这个模型给出了夸克、轻子层次强、弱、电作用的 $SU(3)\times SU(2)\times U(1)$ 规范群结构，在一定程度上统一了强、弱、电三种相互作用的规律。但是它不含有引力作用。

超弦 / M理论的探讨，在于构建包含引力在内的四种作用统一的物理理论。传递不同相互作用的粒子如光子（电磁作用）、弱玻色子（弱作用）、胶子（强作用）和引力子（引力作用），对应于弦的各种不同振动模式，夸克、轻子层次粒子间的作用，就是弦间的相互作用。在Planck标度，超弦 / M理论是四种基本作用统一理论的最佳候选者，也就是所说的万物理论(Theory of everything)的最佳候选者。

在Planck时期，物质运动或四种作用基本规律的统一性，正是反映了我们宇宙在众多复杂性中所显现的一种基本简单性。

3.物质微观结构的基本单元的存在性[17]

世界是由物质构成的，物质通常是有结构的，但是物质结构在层次上是否具有基本单元，即德谟克利特式的“原子”是否存在？这是一个长期反复争论而又常新的课题。当代几种不同的量子引力，尽管对某些问题存在着不同的见解，但是关于这个问题从实质上来看，却给出了一致肯定的回答。

超弦 / M理论认为，构成我们世界的物质微观基本单元是具有广延性的弦和brane，并非所谓的只有位置没有大小的数学抽象点粒子。粒子物理学标准模型中的粒子，都是弦或brane的激发。弦和brane的线度是有限短的Planck长度，它们正是构成我们世界的物质基本单元，即德谟克利特式的“原子”，这是超弦 / M理论为现今所有粒子提供的本体性统一。

圈量子引力给出了在Planck标度面积和体积的量子化性质，即断续的本征值谱，面积和体积分别存在着最小值。由于在圈量子引力中，脱离引力场的背景空间是不存在的，而引力场是物质的一种形态，因此脱离物质的纯粹空间也就是不存在的。空间体积和面积的不连续性和基本单元的存在，正是物质微观结构的断续性和基本单元的存在性的最有力论据。

总之，超弦 / M理论和圈量子引力从不同的侧面，对量子引力的本质和规律作出了一定的揭示，它们在Planck标度领域一致地得出了空间量子化和物质微观结构基本单元存在的结论。这无疑是人们在20世纪末期对我们世界空间时间经典观念的重大突破，也是广义相对论和量子力学统合的成果；同时更是哲学上关于空间和时间是物质存在的客观形式，没有无物质的空间和时间，也没有无空间和时间的物质学说的一曲凯歌！

（收稿日期）2001年10月8日

【参考文献】

- [1] G.Horowitz.Quantum gravity at the turn of the millennium.gr-qc/0011089.22.
- [2] C.Rovelli.Loop quantum gravity.gr-qc/9710008 10.Oct.1997.
- [3] M.Kaku.Introduction to superstring and M-theory.Second Editon.Springer.New York,1999.
- [4] M.Green,J.Schwarz.Anomaly cancellations in supersymmetric D=10 gauge theory and superstring theory.Phys.Lett.149B(1984)11.
- [5] D.Gross,J.Horvey,E.Martine and R.Rohm.Heterotic string.Phys.Rev.Lett 54(1985)502.
- [6] P.Candelas,G.Horowitz A.Strominger and E.Witten.Vacuum configurations for superstrings.Nucl.Phys.B258 (1985)46.
- [7] E.Witten.Non-commutative geometry and string field theory.Nucl.Phys.B276(1986)291.

- [8] E.Witten.String-string duality conjecture in various.dimensions.Nucl.Phys.B443(1995)307.
- [9] C.Baches.D-brane dynamics.Phys.Lett.B374(1996)37.
- [10] A.Strominger,C.Vafa.Microscopic origin of the Bekenstein-Hawking entropy.Phys.Lett.B379(1996)99.
- [11] J.Maldacena.The large-Nlimit of superconformal field theories and supergravity.hep-th/9711200.
- [12] C.Rovelli.Notes for a brief history of quantum gravity.gr-qc/0006061.23Jan,2001.
- [13] C.Rovelli,L.Smolin.Descreteness of area and volume in quantum gravity.gr-qc/9411005.
- [14] C.Rovelli,L.Smolin.Spin networks and quantum gravity.Phys.Rev.D52(1995)5743.
- [15] C.Rovelli,Black hole entropy from loop quantum gravity.Phys.Rev.Lett.74(1996)3288.
- [16] J.Gauntlett.M-theory,strings,duality and branes.QMW-PH-98-2.
- [17] 现代物理学哲学问题。薛晓舟、张会。河南大学出版社，P157.1996.