DOI:10.13405/j.cnki.xdwz.2009.05.004

量子引力和弦论在中国

李　淼

直到20世纪60年代，爱因斯坦的广义相对论一直是理论物理中理论色彩最浓的一个分支，那时广义相对论的主要实验验证是水星近日点进动、太阳引力场中的光线弯曲、引力红移。直到宇宙学和涉及强引力场的一些天体物理问题成为实验观测对象后，广义相对论才成为和其他物理理论（如粒子物理）类似的学科。与此同时，人们开始尝试将引力和量子力学结合起来，这就是著名的量子引力或引力量子化问题。

在西方，最早研究引力量子化问题的有费曼和德威特（DeWitt），他们的尝试虽然不成功，却留下了一些重要概念和方法，例如后来在研究规范场论量子化中起到重要作用的鬼场、引力的正则形式等。其实，比费曼和德威特更早对量子引力感兴趣的是狄拉克，他研究了引力的正则形式，由此还发展了含有局域对称性和约束的动力学系统的研究方法。这些工作都成了经典。费曼的老师约翰·惠勒（John Wheeler）也有一些早期贡献，例如以他和德威特命名的引力波动方程（即波函数所满足的哈密顿约束方程）。威特曼、特霍夫特在成功研究了规范场量子化之后，也尝试过研究引力量子化，得到了一些引力不可重正化的结论。

弦论则发端于1968年Veneziano散射振幅。这个散射振幅满足一些很特别的要求，例如所谓s道和t道对偶。人们发现，Veneziano振幅不能从只含有限个场的局域场论导出（这些场论中的散射振幅不可能具有对偶性）。将这个振幅分解为通常的费曼规则给出的图，中间态包含无限多个粒子，这些粒子的自旋和质量没有上限。人们很快推广了Veneziano振幅，但目的都是描述强相互作用过程。Nambu和Susskind等人证明所有这些振幅描述的其实是弦和弦的散射过程，人们就这样偶然地发现了弦论，弦论不同于局域场论，但可以满足量子力学的一切要求。直到数年之后，Schwarz和Scherk，以及Yoneya独立地发现中间态总是包含一个质量为0，自旋为2的粒子，而且低能相互作用就是引力相互作用。他们建议弦论可以被看作量子引力理论，因为在20世纪70年代中期，引力量子化依然是一个难题。



这三位先驱的建议并没有吸引到多少同行们的注意力，一个客观原因是量子场论和基于规范场论的弱电统一甚至大统一理论的研究如火如荼，20世纪70年代中期是量子场论的黄金时代。直到大约十年之后，Green和Schwarz证明了超弦理论可以没有反常，从而原则上可能是有限的，弦论才通过所谓第一次革命成为量子引力的主流理论，同时，量子引力本身也成为理论物理研究的主流分支。

由于众所周知的原因，中国错过了20世纪60年代末70年代初弦论研究的第一次热潮，但少数理论家如张宗燧和戴元本等人研究了S矩阵和色散理论，Veneziano散射振幅就源于后者。

简略回顾研究量子引力的最初历史之后，我们解释一下为什么要研究引力量子化，换言之，为什么引力也需要遵从量子力学规则。

有些人认为，引力可能像热力学那样，是一种宏观理论，从而可以规避量子力学；就是说，还有更深层次的满足量子力学的理论，但引力本身是一种宏观的有效理论。另一个例子是，从流体的分子原子理论出发，导出流体力学的基本方程，这些方程完全是宏观的，其中很多物理量只是宏观概念，例如密度、粘滞系数。

我们有很多理由不认为引力只是一个宏观有效理论。一个最直观最简单的理由是紫外灾难，我还没有发现在我之前有人叙述过这个理由。理由如下：将引力场放在一个空腔里，给一个经典波长截断，能量是TVk_c^3。为了避免这些能量塌缩形成黑洞，得$k_c^3<(1/TL^2G)$，取空腔体积是可观测宇宙的大小，则有$k_c^3<T^{-1}(10^{-5}\text{eV})^4$。温度越高，截断波数越小，

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

也就是说截断波长越大。由此可见，假如引力无须量子化，那么引力的波长不能太小，和引力实验所能达到的最小尺度矛盾。

我们可以列出引力必须量子化的更多的理由：

1. 宇宙的开始有奇点，黑洞塌缩有奇点。

2. 黑洞熵的存在隐含引力的全息原理，这个原理包含引力和所有其他相互作用。

3. 在暴涨宇宙论中，密度涨落由曲率涨落所引起，而后者与标量场一起作量子涨落才能实现。

中国对量子引力的研究开始于文革末期，主要代表是引力的规范理论的研究。由于那时我还处于中学和大学前期学习阶段，我不可能列出所有参与研究的人。下面是一个不完全名单。北京：陆启铿，郭汉英、吴咏时，张元仲、安英、陈时、邹振隆、黄鹏，李根道，张历宁；兰州：段一士；合肥：闫沐霖；西安：侯伯宇。

特别需要提一下的是郭汉英、吴咏时和张元仲三位老师的文章《引力规范理论的一种方案》，我这里引用后来一位研究这段历史的一位学者的评论：“除了陆启铿纤维丛与规范场的关系外，1972 年杨振宁在北京大学报告后，郭汉英、吴咏时、张元仲等研究了一种以洛伦兹群为规范群的引力规范理论。这是第一个挠率场作为动力学场的引力规范理论。”这个工作早于国外类似的工作。杨振宁先生阅读这篇论文后在论文上留言（大意）：“中国这三个年轻人的工作很不错。”

几年后，中国学者还进行了引力量子化的研究，特别是闫沐霖老师，他研究了带挠率的规范引力的费曼规则和量子化。稍后，周光召和吴岳良还尝试用规范理论统一包括引力在内的所有相互作用。

接着就到了弦论的第一次革命，1984 年和 1985 年。那时我在中国科学技术大学做研究生，当时学习的是超引力，这是在弦论成为时尚之前的流行理论。那时，很多人相信超引力由于具有超对称性可能是可重正化的理论，特别是含有极大超对称的 N=8 超引力。那时，没有人能够证明这一点。最近，开始有人猜测极大超引力理论的确是一个微扰层次上的有限理论，至少一直到 8 圈图是有限的。超引力在 20 世纪 70 年代下半叶到 80 年代上半叶火了一阵后，一夜之间为超弦理论取代。原因很简单，虽然超引力表面上看来量子性质不错，但拥有足够大规范对称性（从而可以容纳标准模型）的理论通常不具备手征性，手征性是弱相互作用的特征。而超弦理论的量子性质更好，并且在找到 Calabi-Yau 紧化后，可以具备手征性。

超弦的第一次革命同样在中国引发研究热潮。虽然那时中国的理论物理界相对较小，但几乎所有研究量子场论的人或多或少地卷入了超弦理论的研究，下面我给出一个同样不完全的名单。按照单位来分，教授们包括：戴元本、郭汉英、朱重远、黄朝商（理论物理研究所）；汤拒非（科学院研究生院）；宋行长、赵志勇、章德海（北京大学）；汪容（浙江大学）；侯伯宇、侯伯元、王佩（西北大学）。学生们包括：朱传界（研究生院）；吴可、吴岳良、谢彦波、熊传胜（理论物理研究所）；李淼、高洪波、高怡泓、卢建新（中国科学技术大学）；虞跃、沈建民、徐开文、胡宏亮（浙江大学）；陈伟（复旦大学）；陈一新、岳瑞红（西北大学）。

1985 年之后的两年间，理论物理所的老师们举办了几次超弦工作月，我参加了 1986 年的一次。中国的大多数研究弦论的学生就是在这些工作月期间起步的。那时，中关村还很“乡村”，学生们到了半夜饿了，整个中关村大街上（现在成了北四环）只有一家可以吃到饭，而且只能吃到炒饼。回顾那些时光，虽然“艰苦”，实在是好时光。

那时，理论物理所的郭汉英老师主要研究弦场论，记得浙江大学的虞跃等人跟着郭老师研究弦场论。黄朝商、章德海等老师研究弦世界面，也有不少学生做这个方向，因为这是当时最为热门的方向。除了弦场论和世界面，那时中国研究者们还对如何推广 Virasoro 代数感兴趣。

至于我自己，是从读了闫沐霖老师带回的一篇预印本之后起步的，那个预印本就是 Candelas，Horowitz，Strominger，Witten 的关于弦论中 Calabi-Yau 紧化的文章，声称找到一个四代的模型 (quintic CY)。我也是从那时起学了一些代数几何知识，虽然后来在研究工作中没有起到多大作用。

总之，从 1984 年到 20 世纪 80 年代末，中国理论物理界培养了一批年轻人。这些人现在是中国研究弦论、引力和宇宙学的主要力量，部分人则跨入其他领域。

从 20 世纪 80 年代末到 90 年代中期，西方的高能物理发展几乎处于停滞时期，粒子物理实验无新的发现（t 夸克的发现除外），宇宙学的一系列实验

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

处于准备期。弦论研究进入低潮。相应地，在中国，弦论的研究几乎完全消失，宇宙学研究的热潮远远没有开始。

1994~1995 年间，在西方发生了弦论第二次革命，西方之外还包括印度。Ashoke Sen 坚持研究弦论中强耦合/弱耦合对偶数年，1994 年得到 Seiberg 和 Witten 的重视，后者关于超对称规范场论的工作轰动了整个理论界。1995 年，Witten 发表了关于弦论的强弱对偶的文章，弦论的第二次革命开始进入高潮。

1997~1998 年间，中国的弦论研究开始复苏。可惜的是，整个 20 世纪 90 年代，学生们几乎脱离了弦论研究，几乎没有人能够立刻进入弦论和 M 理论的主流研究。到了 21 世纪，中国才真正介入了弦论研究的主流。现在，几乎每年都有弦论方面的人回国，我们自己也培养出越来越多的年轻弦论研究者，他们当中有些人在国际上已经初露锋芒。

宇宙学在弦论第二次革命后进入黄金时代。一系列微波背景辐射的实验，IA 型超新星的研究导致的宇宙加速膨胀的发现，宇宙学也发生了革命。弦论和宇宙学研究结合起来，是目前理论物理界一个重要方向。

第二次革命引起的弦论研究的多元化：对偶、M 理论、膜、黑洞、非微扰量子场论、AdS/CFT、AdS/QCD 和 AdS/CMT，特别是 AdS/CMT，是目前大有潜力的研究方向，这里 CMT 指的是凝聚态理论。通过全息原理，一些强耦合系统等价于一个高维的引力系统，这个方向很有可能带来凝聚态理论研究的突破。

宇宙学的研究也非常丰富，一些研究方向是：暴涨理论、暗能量、膜宇宙、宇宙弦、非高斯性。在所有这些方向上，中国人都做出了一些不俗的成绩。

现在，除了理论物理研究所，还有以下单位有弦论/量子引力的活跃力量：中国科学技术大学，北京大学，复旦大学，浙江大学，北京师范大学，西北大学，南开大学，宁波大学，南昌大学，高能物理所，南京大学，成都电子科大，中央财经大学。

现在和西方一样，弦论研究和量子引力研究非常多元化，这和 20 世纪 80 年代完全不同。弦论研究除了传统的问题外，还有 AdS/CFT、夸克胶子等离子体、黑洞、暴涨宇宙学、暗能量……

特别需要指出的是，弦论之外，还有其他量子引力理论的研究，例如 loop gravity，从事这方面工作的有：北京师范大学的马永革、南昌大学的凌意小组。

不过，虽然弦论和量子引力的研究较 20 世纪 80 年代有较大的发展，但无论总体力量还是每个单位的力量，看起来还都有势单力薄的感觉。例如，大多数单位只有一个人从事这方面的研究。另外，在弦论领域，还没有特别原创性的工作。相反，在邻近的宇宙学领域，从事弦论和引力研究的人都能够做出一些原创性的研究，例如我们有自己的一些暗能量模型。

下面是我个人对中国未来的弦论/量子引力的一些看法：

1. 和美国相比，中国的理论物理研究还很弱。未来的一代从人数和质量上肯定要胜过目前 40~50 岁的一代。

2. 不要完全跟着西方的主流跑，日本人和印度人做得就很好。

3. 当中国经济在世界上占的比重越来越大，中国人在基础科学方面的贡献所占的比重也将会越来越大，弦论/量子引力这样的纯粹知识性的追求当然也需要提高。

4. 粒子物理（以 LHC 为代表）、宇宙学在下一个十年充满机遇，弦论/量子引力的研究要特别注重与实验的挂钩。

5. 更加具体地说，我们应该重视可能出现的新物理、暗能量和暗物质的理论研究。

6. 弦论目前已经出现二级学科之间的交叉，特别是凝聚态物理中的一些问题已经成为弦论的研究对象。

7. 过去 10 年我一直相信，弦论以及量子引力的发展已经不可能依赖内部的逻辑发展，今后粒子物理和宇宙学实验对发展弦论、量子引力将起决定性的作用。

（中国科学院理论物理所　100190）

注：本文是李淼教授在《量子力学在中国》研讨会上的报告

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net