

现代物理学基础的思考之十一：统一场论

李学生 (Li Xuesheng)

山东大学副教授，理论物理教师，中国管理科学院学术委员会特约研究员，北京相对论研究联谊会会员，中国民主同盟盟员（作者为中国科学院高能物理所研究员）

xiandaiwulixue@21cn.com, 1922538071@qq.com

摘要 (Abstract): 本文章分析探讨了现代物理学的重要问题，统一场论，供参考。

[李学生 (Li Xuesheng). 现代物理学基础的思考之十一：统一场论. *Academ Arena* 2017;9(13s): 606-655]. (ISSN 1553-992X). <http://www.sciencepub.net/academia>. 11. doi:[10.7537/marsaaj0913s1711](https://doi.org/10.7537/marsaaj0913s1711).

关键词 (Keywords): 质点; 电荷; 引力; 电力; 空间; 方程

目录

第一章 科学统一性思想溯源

- 1、牛顿力学前科学统一性思想溯源
- 2、牛顿的统一性思想
- 3、麦克斯韦的科学统一思想
- 4、彭加勒的科学统一思想
- 5、爱因斯坦的统一性思想一窥

第二章 相对论和量子力学的统一进程

- 1、当代物理学家对于现代物理学基础的批判
- 2、爱因斯坦对于引力场与电磁场统一性的探索
- 3、爱因斯坦后对于引力场与电磁场的统一的研究
- 4、相对论和量子力学之间的矛盾浅议
- 5、狭义相对论与量子力学的矛盾
- 6、广义相对论与量子力学的矛盾
- 7、引力场的量子化及其局限性
- 8、相对论与量子力学统一的意义及展望

第三章 统一场论的进展

- 1、强相互作用、弱相互作用与电磁相互作用的统一
- 2、量子色动力学的进展及其局限性
- 3、大统一理论的困难
- 4、现代物理学对于统一场论研究的基本思路
- 5、弦理论在现代物理学中的重要性
- 6、超弦理论简介
- 7、超对称问题简介
- 8、弦理论的局限性
- 9、弦膜圈说发展的历史回顾

第四章 统一场论展望

- 1、引力场与电磁场统一途径展望
- 2、量子几何与现代物理学
- 3、经络理论的实质

第一章 科学统一性思想溯源

1、牛顿力学前科学统一性思想溯源

物理学是研究物质的最简单运动规律的科学，其最终目的是：找到物质运动、变化与相互作用的内在联系，以最少的假设，通过分析、推理解释所有相关实验结果，预言新的实验现象。早在文化灿烂的古希腊时期，原始唯物论者就把纷繁复杂的大千世界的统一看成是顺理成章的。泰勒斯（活跃于公元前580年左右）

认为世界是由水组成的，道尔顿(1766-1844)的科学原子论把原子作为构成世界的基本粒子，奥斯特瓦尔德(1853-1932)把能作为物理世界的统一本原。统一思想不仅是哲学的基本思想，而且也是的基本思想。

(1)、古希腊时代的统一性思想

古希腊时代，自然哲学家们把自然现象的无限多样性的统一看作是顺理成章的，并且在特定的物质和物质范畴中探索着这种统一。泰勒斯经过研究发现，这种特定物质具有水的特质。他的学生和追随者又通过分析和验证逐渐把这种基本物质的性质表述的更加精确，并使这种物质兼具统一性和不灭性。人们后来又假定了许多种基本物质组成世界的本源，这些物质的混合和分离就会形成不同的物质，从而引起自然界的绚丽多彩的变化。到了留基伯和德谟克利特时期，他们认为这种物质是不可分割的原子。在他们看来物质和自然界的万物的区别不是由于其内在性质，而只是在于组成它们的原子的多少、形状、位置和运动的不同，所以他们用原子学说来解释各种各样的自然现象。毕达哥拉斯学派的学者在研究琴弦的振动时发现，只有当两根弦的长度互相成简单的有理数比例时，就会发出和谐的声音。他们从中得到启发：既然在音乐的和谐中数的结构是它的本质核心，那么我们周围自然界中一定也存在着这种内在的和谐，那门就可以从数学核心中找到自然界的本源。因此，毕达哥拉斯学派提出了统一的数量说，并对这种统一作数的解释。

(2)、哥白尼的统一性思想

哥白尼时代的统一性思想第一次取得了丰硕的成果。在那个年代，在当时观察所要求的精确度范围，托勒密的地心说虽然解释事实是非常成功的，但是在几何学观点上其弱点是均轮和本轮的繁复性，使得编制历表的所依托的理论非常繁琐，这种客观情势使人们关注天文学理论的变革。哥白尼深受毕达哥拉斯学说影响，所以在他看来，宇宙应当符合数学的和谐性，而且这种和谐性越简单以数学研究看来就越好，也越接近于自然。他说“…在这极美丽的庙堂中，谁能把这个火炬放在更好的地位，使它的光明同时照到各个体系呢？有人把太阳叫做宇宙的灯，有人称作宇宙的心，更有人称作宇宙的统治者，都没有什么不适当。……这样我们就发现在这样有秩序的安排下，宇宙里有一种奇妙的对称，轨道的大小与运动都有一定的谐和关系。这样的情形是用别的方法达不到的。”所以，哥白尼用太阳取代地球位为宇宙的中心，所有的行星包括地球均以太阳为中心转动。这一伟大的变革使得各大行星运动获得了统一性。哥白尼的日心说体系是的行星运行具有了确定性和统一性。

(3) 开普勒的统一性思想

哥白尼体系执着的坚持希腊古典的正圆运动观念，这使它不得不继续沿用本轮、均轮组合法，以获得与观测现象的相符。开普勒对数学的爱好、对自然界效的和谐的神秘感受，始终支配着他对于天空奥秘的探索活动。正是哥白尼体系那令人赞叹的数学的和谐和美使他直觉到它就是真实的宇宙图景。但是当他着手研究弟谷所遗留下来的天文观测资料时，他发现如果按照哥白尼体系里天体运动是匀速的和遵循正圆轨道的，则不能准确得到弟谷所测算的结果，于是1618年开普勒出版《哥白尼天文学概论》，将他已经发现的火星运动二大定律推广到了太阳系的所有行星，而且同时公布开普勒第三定律将所有行星的运动与太阳紧密地联系在一起，彻底清除托勒密和哥白尼体系中运用的一大堆本轮和均轮，确立了太阳系的观念，实现了开普勒定律对所有行星运动的统一，完成科学史上一大伟业。自17世纪的伽利略开始，物理学家的职责就在于用公式来解释自然的力量，寻找能够描述自然力量在时空中支配物质方式的数学语言。科学发展的最终目的就是要建立一个单一的科学理论体系来描述整个宇宙的物质存在与运动变化。

2、牛顿的统一性思想

爱因斯坦(Einstein)说过：“至今还没有可能用一个同样无所不包的统一概念，来代替牛顿的关于宇宙的统一概念。而要是没有牛顿的明晰的体系，我们到现在为止所取得的收获就会成为不可能。”物理学史上的第一次大综合：牛顿万有引力定律。

17世纪，牛顿“站在巨人们的肩膀上”，把地面上物体的运动（伽利略）和天体运动（开普勒）统一起来，揭示了天上地下一切物体的普遍运动规律，建立了经典力学体系。

恩格斯对牛顿给予这样的评价：“牛顿由于发现了万有引力定律而创立了科学的天文学，由于进行了光的分解而创立了科学的光学，由于创立了二项式定理和无限理论而创立了科学的数学，由于认识了力的本性而创立了科学的力学。”

力的概念诞生至今已有 2000 多年的历史，尽管现在人们都知道力是物体间的相互作用，是物体运动状态发生变化的原因，但人们仍然无法进一步弄清力究竟是一种什么样的作用，力的产生是一种什么样的具体原因。力的概念仍然难以被人理解、物理意义不确切、其本质也没有被揭示出来。

著名物理学家牛顿在开普勒和伽利略的研究基础上，创立了的运动三定律把大至辽阔宇宙中的恒星，小至微小粒子的物质的运动统一了起来。对于苹果落地与行星运转这两类极不相同的现象，也找出了支配它们

的共同的力——万有引力，并且对开普勒定律中行星按照椭圆轨道运行给出了合理的解释。牛顿还把在月球方面所得的结果推广到其它行星的运动上去，使得整个太阳系的错综复杂的运动就统一到一个理论中了，从而建立起一个包括天体运动、潮汐涨落和堤上物体运动在内的自然现象做出统一解释的经典力学体系，在人类认识史上构造出第一个系统而又统一的科学图景。

单值决定论是以经典力学中的动力学规律为基础，认为世界上大到恒星，小至沙粒的一切物质，只要给出精确的初始条件，就可以根据物理中的既有规律单一的测算出它在之前和之后的状态。正如拉普拉斯所描述到：“如果有一种智慧能了解在一定时刻支配着自然界的所有的力，了解组成它的实体各自的位置，如果它还伟大到足以分析所有这些事物，它就能用一个单独的公式概括出宇宙万物的运动，从最大的天体到最小的原子，都毫无例外，而且对于未来，就像对于过去那样，都能一目了然”。对于牛顿来说，“自然界是一本打开的书，一本他读起来毫不费力的书”。牛顿用具有思辨特征的概念(质点、绝对时空等)和微分定律，揭示了自然界的完整的因果性链条，成功地把“天上的力学”和“地上的力学”统一起来，构造了一个逻辑完备的理论体系，从中能够逻辑地、定量地演绎出范围很广的现象，并且能同经验相符合。必须把那些从各种现象中运用一般归纳法导出的命题看作是完全正确的。

在《自然哲学的数学原理》的序言中，牛顿明确地提出了他的科学纲领：“我把这部著作叫做自然哲学的数学原理，因为哲学的全部任务看来就在于从各种运动现象来研究各种自然之力，而后用这些力去论证其它现象……，我希望能用同样的推理方法，从力学中推导出自然界的其它现象。”

物理定律来源于人们对简单性与和谐性的追求，而物理定律的应用却是对复杂性的追求。大多数物理学家认为物理定律日臻完善，而人类却已进入复杂性研究的黄金时代。由于牛顿的引力论和力学，促使拉普拉斯提出下述观点：“一种智慧存在，在任一给定时刻如能知道所有的自然力和构成宇宙的所有物质的瞬间位置，而且能分析所有的有关数据，则能用公式描述世上最大物体和最微小原子的运动。对其而言，没有东西是不可确定的，历史和未来在其眼前展现。”

3、麦克斯韦的科学统一思想

物理学史上的第二次大综合：18世纪，经过迈尔、焦耳、卡诺、克劳修斯等人的研究，经典热力学和经典统计力学正式确立，从而把热与能、热运动的宏观表现与微观机制统一起来。

物理学史上的第三次大综合：19世纪，麦克斯韦在库仑、安培、法拉第等物理学家研究的基础上，经过深入研究，把电、磁、光统一起来，建立了经典电磁理论，预言了电磁波的存在。

1855年麦克斯韦发表了《法拉第的力线》，这是他第一篇关于电磁学的论文。在论文中，麦克斯韦通过数学方法，把电流周围存在磁力线这一特征，概括为一个数学方程。1862年，麦克斯韦在英国《哲学杂志》上，发表了第二篇电磁论文《论物理的力线》。《论物理的力线》不是法拉第观点单纯的数学解释，而是有了创造性的引伸和发展。麦克斯韦从理论上引出了位移电流的概念，这是电磁学上继法拉第电磁感应提出后的一项重大突破。麦克斯韦由这一科学假设出发，推导出两个高度抽象的微分方程式，这就是著名的麦克斯韦方程式。这组方程不仅圆满地解释了法拉第电磁感应现象，还作了推广：凡是有磁场变化的地方，周围不管是导体或者介质，都有感应电场存在。方程还证明了，不仅变化的磁场产生电场，而且变化的电场也产生磁场。经过麦克斯韦创造性的总结，电磁现象的规律，终于被他用明确的数学形式揭示出来。电磁学到此才开始成为一种科学的理论。

在自然科学史上，只有当某一科学达到了成熟阶段，才可能用数学表示成定律形式。这些定律不仅能解释已知的现象，还可以揭示出某些尚未发现的东西。正如牛顿的万有引力定律预见海王星一样，麦克斯韦的方程式预见电磁波的存在。因为，既然交变的电场会产生交变的磁场，而交变的磁场又会产生交变的电场，这种交变的电磁场就会以波的形式，向空间散布开去。

1865年，他发表了第三篇电磁学论文。在这篇重要文献中，麦克斯韦方程的形式更完备了。他并且采用一种新的数学方法，由方程组直接推导出电场和磁场的波动方程，从理论上证明了电磁波的传播速度正好等于光速！这与麦克斯韦四年前用实验推算出的结论完全一致。至此，电磁波的存在是确信无疑了！于是，麦克斯韦大胆地宣布：世界上存在一种尚未被人发现的电磁波，它看不见，摸不着，但是它充满在整个空间。光也是一种电磁波，只不过它可以被人看见而已。

一位著名的现代物理学家曾感叹说：“麦克斯韦的思想是太不平常了，甚至象亥姆霍兹和波耳兹曼这样有异常才能的人，为了理解它，也花了几年的力气。”爱因斯坦在自传中说：“在我求学的时代，最吸引人的题目就是麦克斯韦的理论”，“特殊的相对论起源于麦克斯韦的电磁场方程”。1931年，在纪念麦克斯韦诞生100周年时，爱因斯坦把麦克斯韦的电磁场贡献评价为“自牛顿时代”以来物理学所经历的最深刻最有成效的变化。”

4、彭加勒的科学统一思想

在50年间，我们生活在著名德国数学家的定理上，我们从各个角度应用、研究它们，但是没有添加任何基本的东西。正是彭加勒，第一个粉碎了这个似乎是包容一切的框架，设计出展望外部世界的新窗户。——达布

彭加勒正是在《科学与假设》中通过对非欧几何学的深入研究以及对经典力学和经典物理学的慎密考察揭示出，科学的基本概念和原理不是经验的直接归纳，而只能以经验事实为指导，通过精神的自由活动(其产品即约定)来创造。

彭加勒通过对数理科学的基础进行了敏锐的、批判性的审查和分析后得出：几何学的公理既非先验综合判断，亦非经验事实，它们原来都是约定。物理学尽管比较直接地以经验为基础，但它的一些基本原理也具有几何学公理那样的约定特征。例如惯性原理，它不是先验地支配我们的真理，否则希腊学者早就知道它了，它也不是经验的事实，因为人们从来也不能用不受外力的物体做实验，因而无法用实验证实或否定它。经过最终分析，它们化归为约定或隐蔽的定义。因此，彭加勒得出结论说：在数学及其相关的学科中，“可以看出自由约定的特征”；他进而指出：“约定是我们的精神的自由活动的产品”，“我们在所有可能的约定中进行选择时，要受实验事实的引导；但它仍是自由的，只是为了避免一切矛盾起见，才有所限制。”

彭加勒在考察了物理学的理论后认为，物理学有两类陈述——原理和定律。定律是实验的概括，它们相对于孤立的系统而言可以近似地被证实，原理是约定而成的公设，它们是十分普遍的、严格真实的，超越了实验所及的范围。彭加勒还阐述了约定主义的方法论意义。他说，当一个定律被认为由实验充分证实时，我们可以采取两种态度。我们可以把这个定律提交讨论，于是，它依然要受到持续不断的修正，毋庸置疑，这将仅仅以证明它是近似的而终结。或者，我们也可以通过选择这样一个约定使命题为真，从而把定律提升为原理。在彭加勒看来，经典力学和经典物理学的六大基本原理(迈尔原理即能量守恒原理、卡诺原理即能量退降原理、牛顿原理即作用与反作用原理、相对性原理、拉瓦锡原理即质量守恒原理、最小作用原理)就是这样形成的。彭加勒提出约定主义并不是无缘无故的。

相对性原理是人类长期生活与科学实践经验的总结，是众多科学巨匠智慧的结晶：伽利略(Galileo Galilei)、博斯科维奇(R. J. Boscovich)、艾弗里特(J. D. Everett)、牛顿(Isaac Newton)、麦克斯韦(J. C. Maxwell)、洛伦兹(H. Lorentz)以及庞加莱(H. Poincare)。伽利略是经典力学相对性原理的确立者，而Poincare则是包括光学与电磁学在内的这一原理的第一个明确表述者：庞加莱1895：“我们的经验揭示了一系列丰富的事实，它们可以总结为如下的公式：要想确定物质的绝对运动是不可能的，或者更准确地说，要想确定物质相对于以太的运动是不可能的；我们所能发现的只是物质相对于物质的运动。”彭加勒1899：相对性原理不仅是近似成立的，而且应该是严格成立的；也就是说，基于光学现象的绝对运动的不可探测性不仅在二阶误差或三阶误差上成立(一阶误差当时已被证明不存在)，而且理论上应该是无误差的。他于1900年再次重复了上述思想。事实上，彭加勒不仅赋予了相对性原理以精确的实质性内容，而且给予了这个原理现在通行的名字。庞加莱1902(《科学与假设》)：“相对运动原理——有时人们尝试着把加速度定律跟一个更普遍的原理联系起来。任何系统的运动都应该遵从相同的规律，不管它的运动是以固定的坐标为参照还是以做匀速直线运动的坐标为参照。这就是相对运动原理。我们被迫接受它有两个原因：一、最普通的实验证实了它，二、相反的假设或想法被我们的头脑所严重地抗拒。”彭加勒1904(《数学物理原理》)：“相对性原理即是说，物理规律，不管是由固定的观察者来看还是由做匀速直线平动的观察者来看，都是一样的，从而我们没有也不可能有什么办法发现我们是否被该运动所带走。”

彭加勒看到，无论是经验论还是先验论，都不能圆满地说明科学理论体系的特征。为了强调在从事实过渡到原理时，科学家应充分有发挥能动性的自由，他于是提出了约定主义。约定主义既要求摆脱狭隘的经验论，又要求摆脱先验论，它顺应了科学发展的潮流，反映了当时科学界自由创造、大胆假设的要求，在科学和哲学上都有其积极意义。

5、爱因斯坦的统一性思想一窥

统一性思想不仅是哲学上，也是科学上的重要思想。20世纪大师爱因斯坦的学术生涯中处处体现出了这一光辉思想，世界是和谐统一的，也成为爱因斯坦心目中最高、最神圣的追求目标。自然界是统一的物质世界，反映客观世界本质和规律的不同理论之间应该具有逻辑上的统一性。如果不同理论之间出现了逻辑上的不统一，那就说明这些理论本身没有真实地反映自然界的统一性。这个时候我们就应当重新审视我们的理论，在统一性思想的指导下，从不同理论的矛盾冲突中探求它们的统一性，建立新的理论体系来实现现有理论体系的统一性，当然这是一个无休止的过程。作为一位战斗在最前沿和富有哲学素养的科学家，爱因斯坦“最晓得，也最确切地感觉到鞋子究竟是在哪里夹脚的。”狭义相对论、广义相对论的创立以及统一场论的探索

都是为了消除不同理论之间或内在的不一致。

1901年,爱因斯坦在给格罗斯曼的信中说,他曾想把原子之间的引力推广到气体分子之间,找出分子引力与牛顿的超距作用力之间的内在联系。他说:以那些看来同直接可见的真理十分不同的各种现象中认识到他们的统一性,那是一种壮丽的感觉。爱因斯坦有关布朗运动的著名论文,提出通过分子无规则的布朗运动测定原子大小的方法的建议。这篇论文的成功在很大程度上也要归功于对统一性的追求。在这篇论文的开始爱因斯坦指出,在古典热力学中存在着这样一个理论上的不统一性:溶质有渗透压而悬浮体则没有。爱因斯坦最辉煌的理论、人类知识宝库中的重要财富。相对论理论,其中统一性思想更是熠熠闪光。狭义相对论在运动学的水平上把力学运动和电磁运动统一起来,把互相独立的时间和空间的量度与物质运动状态联系起来,得到了比较统一的理论。

1916年,爱因斯坦从全新的观点出发创立了新的引力理论——广义相对论,这一新的引力理论是建立在等效原理和广义协变原理的基础之上,这是人类对引力认识的第二次升华。爱因斯坦创立的广义相对论的美妙在于,它将空一时几何和引力场统为一体,认为时间、空间会因物质的存在和分布变得不平直,即发生“时空弯曲”。根据广义相对论,空间、时间的弯曲结构决定于物质的能量密度、动量密度在空间、时间中的分布;而空间、时间的弯曲结构又反过来决定物体的运行轨道。这使人们对于时空和引力有了一个全新的认识,也是人类认识自然界历史上的一次巨大飞跃。引力场的研究从此获得了前所未有的发展,新的观念也不断涌现。自从广义相对论问世以来,又有许多人提出过新的理论,但到目前为止,经得起实验和观测检验的,仍然只有爱因斯坦的广义相对论最为简洁。Thirring, Feynman, Weinberg和Diner等曾企图修改洛伦兹协变张量理论,虽然克服了各种困难,但最后的形式仍然与广义相对论完全等效。

广义相对论和量子理论在各自的领域内都经受了无数的实验检验,迄今为止,还没有任何确切的实验观测与这两者之一矛盾。广义相对论和量子理论是现代物理学的两大支柱。二十世纪物理学家的一个很大的梦想就是把这两大支柱合而为一。在量子理论发展早期,广义相对论是除电磁场理论外唯一的基本相互作用场论。引力一直只能作为经典场,即无量子涨落的场来处理,把它纳入量子理论的框架就成为量子电动力学后一种很自然的想法。

统一性思想是一种在人类思想结构中的科学与哲学信念。爱因斯坦从青少年时期就对统一性思想有着浓厚的兴趣,在他的科学研究生涯中始终不渝地坚持着这一光辉的思想。正是在科学研究中坚持统一性的思想,爱因斯坦创立了相对论,把电场和磁场统一起来了、把质量和能量统一起来了、把牛顿力学方程作了相对论的修正,使牛顿力学方程和麦克斯韦方程真正和谐起来。另外,在统一性思想引导下爱因斯坦还把引力现象也纳入了相对论范畴,建立了相对论引力场方程,将狭义相对论推广到了非惯性系中,形成了广义相对论。统一性思想是他在科学研究领域奋斗不息的力量之源,也是他不断追求真知的人生目标。在爱因斯坦心目中,统一性思想就是为这种“内在和谐”的世界提供统一的理论,追求自然界的和谐统一是爱因斯坦理性思维的重要特征,也是爱因斯坦创立一个个科学理论的思想动机。综上,在科学上统一性思想是爱因斯坦科学探索的最高目标,在哲学上统一性思想是爱因斯坦哲学思想的精髓,在方法论上统一性思想是爱因斯坦科学方法的核心。一直以来,关于爱因斯坦的哲学思想和爱因斯坦相对论的解释科学界和哲学界一直都在进行积极的探索,也从未间断,并取得了丰硕的研究成果。一次,《纽约时报》花了整整一版印上了令专业人士都费解的数学符号,并郑重地宣布:“爱因斯坦的新理论试图包括:行星的旋转,光线的疾驶,地球的引力,钻石的光泽,镭元素的不稳定性,轻的氢和重的铅,通过线圈的电流,物质,能量,时间,空间。”经过数十年的努力,物理学家们还没有将广义相对论和量子力学成功地结合起来,这个问题应是二十一世纪物理学家面对的最大挑战。

相对论及一系列重大科学理论建立后,爱因斯坦所信仰的心中的上帝彼此作用着的物体相对运动构成的世界,呈现出了它那和谐统一的面目,使他欣喜不已。然而宁静和喜悦是短暂的,因为引力作用和电磁作用的区别在科学中还保留着,这同他的世界和谐统一的理想格格不入。它又是那样地引人注目,似乎上帝在同爱因斯坦开玩笑,然而又不是玩笑。不久,在基本粒子的运动中发现了一些特殊性,它们也不能纳入上述世界理想和谐的图式中。测不准原理——粒子的位置和动量不能同时精确地规定,不仅与经典牛顿力学而且也与后来的爱因斯坦力学相背离,因为在它们那里粒子的位置和动量可以由初始条件及其互相作用同时地规定。

按照 Einstein 的想法,相对论的发展有两个方向,其一是能够与量子力学相融合,因为“在坚持物理实在只有一个的前提下,不可能存在着物理学的理论基础即是一种场论(相对论的观点),同时又是一种统计性的理论(量子力学的观点),并且二者在一定意义上都是正确的。其二是发展到统一场中去,其目的是要“赋予引力场和电磁场以统一的意义”,“引力理论(从数学形式化观点看来就是黎曼几何)应当推广到把

电磁场定律也包括在内”。从表面上看，这两个方向没有什么联系，但实际上是统一的，就是在物理上坚持物理实在的场论纲领，先统一引力场和电磁场以达到统一场，再用这种统一场去把量子力学也统一起来。看来，这种思维一直在笼罩着 Einstein 以来的大多数物理学家。因此，希望把相对论和量子力学及引力场和电磁场（现在还包括强作用场和弱作用场）统一到一起的努力，就成为了现代物理学的源头和活力，试看现在的所谓量子引力论，超弦理论，现代宇宙学等，都是发源于此的。然而，从因果性原理的角度上看，相对论与量子力学的理论基础，正如我们所看到的那样，是无法达到统一的。相反，相对论与牛顿力学的因果观，从根本上来讲是相同的，它们共同一致的基础是因果性的绝对概念，因此，用时间和空间的形式来描述物体（即质点）的运动就成了它们惟一的途径和方法。这样看来，相对论与量子力学的矛盾，也可以说是传统物理理论与量子力学的矛盾，在这一点上讲，相对论属于传统理论，而我们应该称量子力学以外的理论为经典物理学。如此看来，相对论的两个方向的发展目标，特别是相对论与量子力学的融合，如果不改变传统的绝对的因果观念，显然是无法达到的。然而，把一种相对性的因果观念贯彻到物理学的所有方面，必然要产生新的现代的物理学。

爱因斯坦明确而坚定地指出：物理学的前途在于建立统一场论。只有统一场才能更深入，更完全地解决物理学最终面临的不可逾越的困难，是物理学研究的唯一方向，如果没有统一场就没有物理学，没有“统一场”的建立，物理学最终将面临的不可逾越的困难。

杨振宁说，爱因斯坦有关统一场论的工作并不太成功，但他是如此沉迷于统一场论，这种沉迷将持续对 21 世纪的理论物理学产生巨大影响，他的思想还将统治基础物理学的前沿。杨振宁高度评价爱因斯坦的统一性思想，他说：“曾经有一段时间，在一些人中有这样的印象，认为统一的想法是在爱因斯坦的老年侵袭了他的某种成见。是的，它是成见，但这是关于理论物理学的基本结构应该是怎样的一个有洞察力的成见。我还要加上一句，这种洞察力是今天物理学中经常出现的主题。虽然爱因斯坦在晚年陷入孤独，但美国著名科学史学家霍耳顿在《爱因斯坦，历史和其他激情》的著作中却认为，在爱因斯坦逝世后好几十年的现在，比起在其生命的最后二十年期间所应得到的信任来说，物理学的许多分支更加意识到他那富有生命力的作用。科学家为了认识宇宙最终规律，用科学精神坚持探索，推动了人类文明发展。爱因斯坦崇尚科学，沉稳坚定，不管对方如何占据优势，只要自己认为有理，就坚持。不管最终结果如何，科学家在探索宇宙征途上各种观点的碰撞，却共同推动着人类文明的发展。

第二章 相对论与量子力学的统一进程

1、当代物理学家对于现代物理学基础的批判

统一性思想有着悠长的历史渊源，在人类科学思想发展的历史中，思想丰富而又多彩，但统一性思想则是其中最典型而又古老的一种。从古代哲学家到现代科学家，有的人在探讨纷繁复杂物质世界的组成基质，还有的人在探讨物质世界的运动规律及表现形式。泰勒斯的水，奥斯特瓦尔德的能，道尔顿的原子都曾一度被当作物理世界的统一本原。每一个从事自然科学研究的人，都从统一性思想中获取了研究的动力，当然也包括爱因斯坦。

Einstein 曾经很怀念 Newton 时代，因为那是物理学的幸福童年时代，充满了生机；Einstein 之后也有一些理论物理学家很怀念 Einstein 时代，因为那是物理学的伟大变革时代，充满了挑战。今天的理论物理学依然充满了挑战，但是与 Newton 和 Einstein 时代理论与实验的“亲密接触”相比，今天理论物理的挑战和发展更多地是来自于理论自身的要求，来自于物理学追求统一，追求完美的不懈努力。不管是从科学的角度还是从哲学的角度出发，我们都有理由认为物质世界是高度统一的。

目前物质现象的差异以及物理理论之间的割裂状态主要是由于我们对物质世界还缺乏深入的认识，只有在物质现象和物理理论都统一之后，我们对物质世界的认识才算是彻底的。在宏观世界中总结出来的物理规律，在微观世界中同样适用和有效。从低速状态中概括出的物理学公式，对高速状态也同样适用和有效。若有问题，一般也只是精度的问题，实际上这个问题在得出规律的世界和运动状态中原本也是存在的，只不过问题有时没有表现得那么突出那么明显罢了。公式的修正也是统一性的，若公式适用性表现出明显的局域性，则说明该公式是不完备的，有待进一步的完善。对同一问题若从两个不同的世界或状态中得到两个形式上不同的公式，而又不能合理的过渡，则说明两个公式中至少有一个是错误的。

物理学最基本的目的是寻求自然界物质运动的统一规律，然而现代物理学拥有一个支离破碎的物理理念世界：超宏观的有天文学的“黑洞”，“宇宙大爆炸”；微观的有微观粒子的波粒二象性；介于其间的有狭义和广义相对论。在现代物理学把各个学科的观察分别描述成各种互相独立的力作用系统，而忽略了其中的内在联系。描述物质宏观现象的牛顿动力学无法用于描述微观电子的运动规律，在描述宇观物质现象（如星系的动力学现象）时它也导致了很严重的暗物质问题等。描述物质微观现象的量子力学也无法用于描述宏观物质的动力

学规律，更无法用于描述天体的运动。总而言之，在现有物理学理论体系中，物质的微观规律、宏观规律之间似乎是大相径庭、毫不相容的，这是现有物理学理论体系的主要缺陷。

世界是统一的，它的统一性源于它的物质性。现代科学表明，宇宙具有无穷多的连续系列的层次结构。我们目前所认识的世界可细分为宇观世界、宏观世界和微观世界，不管宇宙中的物质形态是多么的千差万别，表面上的差异是多么的巨大，但蕴藏在物质中的道理是统一的，贯穿于各个层次各个世界，物理学规律因而具有放之四海而皆准的普遍性的意义。

王正行《近代物理学（北京大学教材）》书末结语最后一段告诫：“尽管相对论与量子力学已经取得了很大成功，但我们还不能把近代物理学看成一门已经完成了的物理学。在当代物理学研究中，绝大部分挑战和机会都是属于近代物理学的。在未来的一段时间内，情况肯定还会是如此。我们还不能肯定地预测在什么时候、在什么问题上将会有原则性地突破。不过，如果在实验上发现对相对论或量子力学作原则上的修改，也不会是完全出乎预料的。在迎接 21 世纪到来时，近代物理学基础正期待着原则性的新的突破。”——王正行编著 近代物理学（北京大学教材），北京大学出版社 1995 年，第 570 页

中科院原院长、理论物理学家周光召 2005 年在中科院理论物理所的一次演讲中所说：“像相对论、量子力学或是量子场论这些最基本的理论，到现在为止，仍有迹象表明都不是最终的理论。无论是基本粒子，还是天体物理，都在不断提供很多新的现象，对这些现象，现有的理论完全无法解释。”广义相对论和量子理论在各自的领域内都经受了无数的实验检验，迄今为止，还没有任何确切的实验观测与这两者之一矛盾。有段时间，人们甚至认为生在这么一个理论超前于实验的时代对于理论物理学家来说是一种不幸。Einstein 曾经很怀念 Newton 时代，因为那是物理学的幸福童年时代，充满了生机；Einstein 之后也有一些理论物理学家很怀念 Einstein 时代，因为那是物理学的伟大变革时代，充满了挑战。今天的理论物理学依然充满了挑战，但是与 Newton 和 Einstein 时代理论与实验的“亲密接触”相比，今天理论物理的挑战和发展更多地是来自于理论自身的要求，来自于物理学追求统一，追求完美的不懈努力。

(1) 物理学家对于相对论的质疑

郭汉英曾任中国科学院物理研究所研究员，博士生导师，他在经济物理、场论和数学物理等研究领域成果显著，两次获得国家自然科学二等奖。为了希望中国在跨世纪中出现自己的基础研究大家和独创理论，郭汉英研究员说，目前物理学对宇宙的了解，包括猜想只有 4%，而完全不知的竟占到了 70%。同时郭汉英研究员提出：“相对论体系存在有待验证的假定，基本原理不够完善，相互之间存在不协调；理论和时空观念都有需要改进之处”。

相对论体系作为一个理论体系并没有完成。从前人继承下来的惯性和惯性运动的起源问题尽管有所发展，但并没有解决。1960 年代末以来，发现广义相对论存在时空失去意义的“奇性”，宇宙起源于奇性，星系演化经过黑洞终结于奇性。黑洞不“黑”，任何有序物体掉进黑洞，都变成无序的热辐射发射出来，从而信息丢失。这不仅与物理学理论基础之一的量子力学薛定谔方程的概率流守恒矛盾，也与其他理论冲突。

(2) 物理学家对于量子力学基础的质疑

Einstein 认为：量子论学说是一个不完备的学说，它违反了因果律和决定论。但是，量子力学的创立者们却认为：测不准原理反映了微观世界的客观实际。也就是说，对微观高速运动粒子不允许人们用经典力学的语言进行全方位的描述。Einstein 不但是相对论的奠基人，而且也是量子力学的主要创立者之一，量子力学的哲学基础是 Einstein 实证哲学观的体现。Heisenberg 说：“量子力学的直观诠释迄今仍然是充满矛盾的，这些矛盾涉及不连续性理论和连续性理论、颗粒和波动等观点的争论中。人们由此已经可以得到结论，利用通常的运动学概念和力学概念来对量子力学做出一种诠释，在任何情况下都是不可能的。事实上，量子力学恰恰起源于这样一种努力：打破通常的运动学概念，代之以具体的、由实验给出的一些数之间的关系。”

费恩曼(R. P. Feynman)说过：“我可以放心地说，没有一个人懂得量子力学。按照量子力学的观点看待世界，我们总是会遇到许多困难。至少对我是如此。现在我已老迈昏花，不足以达到对这一理论实质的透彻理解。对此，我一直感到窘迫不安。”盖尔曼(M. Gell-Mann)也说过：“全部现代物理为量子力学所支配。这个理论华丽宏伟，却又充斥着混乱。……这个理论经受了所有的检验，没有理由认为其中存在什么缺陷。……我们知道如何在问题中运用它，但是却不得不承认一个事实，没有人能够懂得它。”

事实上，薛定谔方程作为量子力学的基本方程，只能描述经典位势系统的量子行为，无论是正则量子化，还是路径积分量子化都是如此。经典与量子力学的界限在哪里？量子测量过程涉及突变等非位势系统的特征，这类系统如何量子化？如何建立量子测量理论？这些都是应该解决，而又没有解决的重大问题。

目前量子力学实际使用的“数学语言”是由 Dirac 创造出来的一个“特殊语言”系统，这个“形式系统”的构建者于 1975 年发表了一篇名为《量子力学的发展》的著名演讲，Dirac 首先告诉人们一个极为重要，原

则上（逻辑上）可以彻底颠覆整个量子力学形式表述系统的事实：量子力学中的数学不过是一个有趣游戏。在这篇演讲的最后，Dirac 又特地郑重其事做出如下告诫：我认为量子力学的基础还没有正确地建立起来。即使工具量子力学的规则得出的结果与观测相符合，但毕竟是人为的规则。因此，关于现在的量子力学基础是正确的说法，我是不能接受的。

1975 年 8 月 25 日，狄拉克在澳大利亚悉尼新南威尔大学，关于《量子力学的发展》的演讲时曾讲到：“……上面我已经讲了量子力学发展的问题，并且特别讨论了这个理论与高速运动所必须的 Einstein 力学相结合的问题，这个结合导致产生反物质的概念。然而这个工作并没有解决量子理论的问题，还有许多遗留的问题，这些遗留的问题集中在建立带电粒子和电磁场相互作用的精确理论的问题上。

你们可以把带粒子的电荷看成集中在一个点上，对这个点上，对这个点模型进行研究。如果你用这样的模型，你就会发现点电荷的能量是无穷大的。这是试图建立粒子相互作用精确理论时出现的典型困难。

假如我们不把量子理论推广得太远，即不把它用于能量非常高的粒子，也不把它用于非常小的距离，那么现在的量子理论是很好的。当我们试图把它推广到高能粒子和很小距离时，我们得到的方程就没有合理的解，相互作用总是导致无穷大的出现，这个问题使物理学家困惑了 40 年，没有取得任何实质性的进展。

正是由于这些困难，我认为量子力学的基础还没有正确地建立起来。在当前这个基础上所进行的研究，在应用方面已经做了极其大量的工作，在这方面，人们能够找出抛弃无穷大的一些规则，然而即使根据这些规则得出的结果与观测相符合，但毕竟是人为的规则。因此，关于现在的量子力学基础是正确的说法，我是不能接受的。”

物理学，实际上是一门实验科学，离开了实验为基础所建立的物理学它就不是物理学。也许，它就是一种纯数学。虽然这种纯数学，在一定条件下，可以在自然界里找到相对应的物理现象，但也绝不能认为它就是一种物理学。

虽然，普朗克、玻尔、海森堡、薛定谔、狄拉克等科学家创立的《量子力学》能够解释一些物理实验，但也存在许多问题。最大的问题：(1)用《量子力学》对物理实验的解释，只能描述它的统计性质，只能描述它们的集体运动规律，不能描述单个粒子的运动规律；(2)《量子力学》无法将电动力学、热力学、化学、生物学<植物学、动物学、医学>、超导理论、热核聚变理论有效地统一起来。即各种物质的各种形态的相互转化，不能用旧量子力学去统一解释，更不能解释新的实验结果。70 多年来，许多有识之士在这方面做了大量的工作，但未能取得实质性突破。

2、爱因斯坦对于引力场与电磁场统一性的探索

爱因斯坦指出引力场与电磁场的区别是：一个是标量场，一个是矢量场。他希望能找到一个总的物理场，这个总场象引力场一样可以用某种几何形式表示，但它是由一个标量场和一个矢量场组成，从标量场中可以引出广义引力理论，从矢量场中可以引出电磁场规律，进而揭示物理结构规律，并把麦克斯韦方程作为其一级近似的结果。于是，绝对统一场问题也就解决了。爱因斯坦这样憧憬这个理论的前景：“如果引力场和电磁场合并成为一个统一的定律，那当然是一个巨大的进步。那时，由法拉第和麦克斯韦所开创的理论物理学的新纪元，才获得令人满意的结果。那时，以太-物质这种对立就会逐渐消失，整个物理学通过广义相对论而成为类似几何学、运动学和引力理论那样的一种完备的思想体系，能够表现自然界的普遍原理，能够使推理一个接着一个出现的精密公式。”郭光灿在《爱因斯坦的幽灵》“跋”中说：“爱因斯坦沉浸在引力几何化的优美思想中无法自拔爱因斯坦的思想中还存在很多经典偏见。正如爱因斯坦自己所言，他不是个革命者。”。既然广义相对论已经揭示引力场是一种弯曲空间，可以用几何化的方法来描述。那么，电磁场也应该可以用同样的几何化方法来描述。1923 年之后，在别人工作的影响下，Einstein 试图进一步推广相对论，企图建立一个既包括引力场又包括电磁场的统一场理论，用以解释物质的基元结构。他先后提出过不少方案，在 1929 年、1945 年和 1954 年曾取得了一些进展，但都只停留在数学的表述形式上，没有得到有物理意义的结果。【1】

Einstein 认为广义相对论仍是不完备的，它只能较为另人满意地把广义相对性原则应用到引力场，而不能用于总场。我们仍不能确切知道在空间中的总场可用什么数学机制来描述，以及总场遵从何种广义不变定律。但是有一点似乎可以确定，即：广义相对性原理将会被证明是解决统一场问题的一个必要而且有效的工具。【5】首先总场是由逻辑上毫无联系的两部分组成——引力场与 electric field，其次与早些时候的场论一样，这个理论迄今未能对物质的原子论性结构提出解释的失败，可能与它至今未能有助于理解量子现象有关。

【5】

在 20 世纪初，广义相对论建立之后，有人就提出建立统一的电磁力与引力的思想。这在当时引起许多物理学家的注意，有的甚至为之忘我的工作，提出过不少的统一的方案。广义相对论是在狭义相对论与牛顿

万有引力场基础上推导出来的，而狭义相对论的诞生又与麦克斯韦电磁场理论相联系，这就自然导致 Einstein 在 1923 年写的《仿射场论》中提出这样一种设想：“难道不可能把这个理论的数学基础作这样一种方式的推广，使人们从这些基础中不仅能够推导出引力场的性质，而且还能够推导出电磁场的性质”。【2】

1923 年，爱因斯坦在给他最早的探索伙伴赫尔曼·外尔的一封信中就强调指出：“这项美妙绝伦的研究应该坚持下去。尽管无情的自然也许正对我们这样的努力暗自好笑——因为它给了我们了解它的愿望，却很可能没有给我们了解它的智慧。” Einstein 1926 年以后直到 1955 年去逝前一直致力于引力场和电磁场的统一，但未能获得成功。直到他 74 岁生日时还对记者说：“由于数学上的巨大困难，要从这些方程得到能使理论和实验相符合的结果，我们还远没有成功。在我的一生中，很可能达不到这个目的了”。【3】

1923 年，爱因斯坦发表《仿射场论》，把黎曼曲率张量 $R_{\mu\nu}$ 分解为对称部分和反对称部分： $R_{\mu\nu} = \gamma_{\mu\nu} + \phi_{\mu\nu}$ ， $\gamma_{\mu\nu}$ 是对称部分，代表引力场， $\phi_{\mu\nu}$ 是反对称部分，代表电磁场。

Einstein 认为，实物与场也应是统一的，实物与场没有本质的区别，它们之间的区别只是定量的。实物便是能量密度特别大的地方，场便是能量密度小的地方，场是唯一的实在。基于这种认识，Einstein 认为可以建立一种新的理论，它的最终目的就是要用随时随地都能有效的结构定律去解释自然界中的一切现象，亦即它不仅能够描述引力场，同时也能够描述物质和电磁场（在 Einstein 提出统一场论时，人们只知道存在引力场和电磁场），这就是 Einstein 的统一场论思想。

Einstein 与英费尔德合著的《物理学的进化》中的“场与实物”一节，清楚地说明了 Einstein 的统一场论观点以及为什么要提出统一场论，摘录如下：“我们有两种实在：实物和场。毫无疑问，我们现在不能像 19 世纪初期的物理学家那样，设想把整个物理学建筑在实物的概念之上。我们暂且把实物和场的两个概念都接受下来。我们能够把实物和场认为是两种不同的实在吗？试就一小粒实物来说，我们想象这个微粒有确定的表面，在表面处实物便不再存在，而它的引力场便出现了。在我们想象的图景中，场和实物存在的区域是突然分开的。但是区别实物与场的物理判据是什么呢？在我们熟悉相对论之前，我们可以这样回答这个问题：实物有质量而场却没有质量。场代表能，实物代表质量。但是我们在熟悉了更多的知识以后，已经知道这样的答案是不充分的。根据相对论，我们知道物质蕴藏着大量的能，而能又代表物质。我们不能用这个方式定性地来区别实物与场，因为实物与场之间的区别不是定性上的区别。最大部分的能集中在实物之中，但是围绕微粒的场也代表能，不过数量特别微小而已。因此我们可以说：实物便是能量密度特别大的地方，场便是能量密度小的地方。但如果是这样的话，那么实物和场之间的区别，与其说是定性的问题，倒不如说是定量的问题。把实物和场看作是彼此完全不同性质的两种东西是毫无意义的，我们不能想象有一个明确的界面把场和实物截然分开。带电体与它的场之间也发生同样的困难，似乎不能有一个明显的定性的判据来分别实物和场或带电体和场。我们的结构定律，即麦克斯韦定律和引力定律，在能量密度非常大的地方就失效了，或者说，在场源存在的地方，即带电体或实物存在的地方，便失效了。但是我们能否稍微改变我们的方程，使它能到处有效，甚至在能量密度极大的地方也有效呢？我们不能把物理学只建立在纯粹是实物的概念基础上。但是在认识了质能相当性以后，实物和场的截然划分就有些牵强和不明确了。我们是否能够放弃纯实物的概念而建立起纯粹是场的物理学呢？实物作为被我们的感觉器官感受的对象，事实上只不过是大量的能集中在比较小的空间而已。我们可以把实物看作是空间中特别强的一些区域，用这种方法就可以建立起一种新的哲学背景。它的最终目的就是要用随时随地都能有效的结构定律去解释自然界中的一切现象。按照这种观点，抛掷出的一个石子就是变化着的场，在变化着的场中强度最大的场的态以石子的速度穿过空间。在我们这种新的物理学中，不容许有场和实物两种实在，因而场是唯一的实在。这个新观点是由于场物理学的巨大成就，是由于以结构定律的形式来表示电的、磁的、引力的定律的成功，最后是由于质和能的相当而得到启发的。我们最后的问题便是改变场的定律，使它在能量密度极大的地方仍不致失效。但是至今我们还未曾有效而可靠地实现这个预言。究竟能否实现，还有待于‘未来’作出决定。目前我们在所有实际的理论解释中还得假定两种实在：场和实物。”文中还指出：“量子物理学仍旧应该保持两个基本概念：实物和场的概念。在这个意义上，它是一种二元论，因此对于实现我们把一切归结为场的那个老问题并没有丝毫的帮助。今后的发展是沿着量子物理学所选定的路线前进，还是更有希望把革命性的新观念引入到物理学中来呢？前进的道路是否也像过去常常走过的那样，突然来一个急转弯呢？” Einstein 认为：我们的任务是要为总场找到场方程。所求的结构必须是对称张量的一种推广。它的群一点也不应当比连续坐标变换群狭小。如果能够做到类似于从狭义相对论到广义相对论所采取的步骤，把群再一次扩充，那该是最美的了。因此他作出，代替对称的 $g_{\mu\nu}$ ($g_{\mu\nu} = g_{\nu\mu}$)，引进非对称的张量 g_{ik} 。这个量是由一个对称的部分 s_{ik} 和一个实数的或纯虚数的反对称部分 a_{ik} 相加而成的。所以 $g_{ik} = s_{ik} + a_{ik}$ ，从群的观点看来， s 和 a 的这种组合是任意的，因为张量 s 和 a 各自具有张量的特征。但是，从整体来看，这些 g_{ik} 在建立新理论中起的作用，很象对称的 $g_{\mu\nu}$ 在纯引力

场理论中所起的作用。空间结构的这种推广，从我们的物理知识的观点来看，似乎也是很自然的，因为我们知道，电磁场同反对称张量 $F_{\mu\nu}$ 有关。在引力理论中，对于一个既定的对称的 $g_{\mu\nu}$ 场，可以定义一个场，它的下标是对称的，从几何学上来看，它支配着矢量的平移。与此类似，对于非对称的 g_{ik} ，可以按照公式 $g_{ik,1} - g_{sk} - g_{is} = 0$ (A) 来定义一个非对称的，这公式同对称的 g 的相应关系是符合的，自然只是在这里才有必要注意 g 和 Γ 的下标位置。正如在 $g_{\mu\nu}$ 是对称的理论中一样，可以由 Γ 形成曲率，并由此形成降秩的曲率 R_{kl} 。最后，运用变分原理以及(A)，可以找到相容的场方程 $=0$ [$=(1/2)(g_{ik} - g_{ki})$] (B1) $=0$ [$=(1/2)(\Gamma_{sis} - \Gamma_{ssi})$] (B2) $=0$ (C1) $+ + =0$ (C2), 其中表示 R_{kl} 的对称部分，则是它的反对称部分。因此，如果(A)得到满足，两个方程(B1)、(B2)中的每一个就是另一个的结果。在 $=0$ 时，这些公式就简化成(A)和(C1)——纯引力场的情况。【4】爱因斯坦曾经说过一句话，表明他相信宇宙是精确设计成的：“上帝是难以捉摸的，但不是心怀好意的。”在这一点上，他同绝大多数物理学家没有能够走在一条道上。对此，德国物理学家玻恩曾经作过这样的评价：“我们中间很多人都认为，这无论对他还是对我们都是一出悲剧，他在孤独中探索自己的道路，而我们失去了我们的领袖和旗手。”这一评价，以及别人认为他后半生的工作大部分是徒劳的断占，只有留诸后世来加以评判了。

参考文献：

- 【1】范岱年、赵中立、许良英编译 Einstein 文集（第二卷）第1版 北京 商务印书馆出版 1977年 P.2。
- 【2】许良英、范岱年编译《Einstein 文集》第二卷 第1版 北京 商务印书馆出版 1976年 393页。
- 【3】许良英、范岱年编译《Einstein 文集》第三卷 第1版 北京 商务印书馆出版 1976年 392页。
- 【4】许良英、范岱年编译 Einstein 文集（第一卷）第1版 北京 商务印书馆出版 1976年 P.40~42。
- 【5】Einstein 著 方在庆、韩文博、何维国 译。《Einstein 晚年文集》海南出版社 2000年3月第1版。

3、爱因斯坦后对于引力场与电磁场的统一的研究

狭义相对论和量子力学的结合产生量子场论，是目前最成功的理论之一。广义相对论是把引力归结为时空本身的几何性质，从某种意义上讲，广义相对论所描述的是一种“没有引力的引力”。量子力学预言，所有物质形态都满足量子法则，这个原理已被实验检验到小到 10^{-15} 厘米 或 10^{-16} 厘米，但引力不包括在内。

量子力学如将引力包括，有两个层次需要研究：第一个层次是，将一个系统放在一个经典引力场中，这个系统是否还遵循量子力学，如果该系统在其它一切情形下都满足量子力学？这里我们仅要求该系统满足量子力学的一切原理，而引力场只被看成一个固定的重力背景。在这种情形下似乎很难想象量子原理被破坏，因为如果我们假想用另外一种理论取代量子力学，我们至少有两件事情要做：第一，这个理论必须与量子力学结合，因为粒子在其它一切情形下满足量子力学；第二，在某个极限下 我们应得到该系统在引力场中的经典行为，或者得到牛顿理论，或者得到爱因斯坦理论。如果将引力场作为背景场处理，量子力学很容易满足这两个要求，这是一个最经济的选择。将引力包容于量子论的第二个层次是将引力场本身也量子化，也就是要求引力场本身也满足测不准原理，这个理论还没有完全被构造好。目前超弦理论被广泛认为最有希望统一爱因斯坦的引力理论，即广义相对论和量子力学。

1920年，韦尔在 Einstein 统一场论思想启发下，提出了一个将电磁场和引力场联系起来的电磁场几何化的理论，他的基本想法是把电磁场与空间的局部度规不变性联系起来，度规是一个描述空间度量性质的量，就像用尺来测量平面或球面等的几何尺寸。韦尔的理论不仅没有得到学术界的认可，而且也与实验结果不符（《基本粒子及其相互作用》——“从历史角度看四种相互作用的统一”[美]杨振宁 著 湖南教育出版社出版发行）。之后，瑞尼契、惠勒、米斯纳等人也作了很多将电磁场几何化的尝试，都没有获得成功（《广义相对论与引力波》[美]韦伯 著 科学出版社）。有趣的是，Rainich 于 1927 年实现了部分几何化——广义相对论与经典电磁学仅借助一个几何量 $R_{\mu\nu}$ 即可表达出来，而物理内容一般并不改变。60年代初又经 Wheeler 和 Misner 所发展。【1】

另一个统一场论的早期尝试，是 Kaluza 的五维空间法——在平常的三维空间中，我们有两个不同的向量长，即电场与磁场。而在四维空间中，此二场不再是各自独立的，共同构成一个单一的张量场 $F_{\mu\nu}$ 。若推广此概念，我们希望在四维空间中，由度规张量 $g_{\mu\nu}$ 所代表的引力场及电磁张量 $F_{\mu\nu}$ 所代表的电磁场，可以在一个比较高维的空间中，构成一个单一的“统一场”。可是 Kaluza 与 Einstein 的为之努力，并没有得到多大的进展。此外，就是 Sachs 的理论。他保留 Einstein 的概念，只将 $g_{\mu\nu}$ 代以两个四元数的乘积。该乘积可得到十六个独立无关的函数。这多产生的六个函数，可以用来描述电磁场的六个方程式。Sachs 发现，他的理论果然可以导出 Einstein 的引力方程式及电磁场方程式来。【2】

我国的束星北早年也从事过相对论研究，探索引力场和电磁场的统一理论。虽然他没能得到有实质性的

进展,但他的有关研究在当时还是有启发性的。Einstein 对引力场几何化的成功,立即导致这种希望:类似的纯几何概念也可以用于描述电磁场。这个思想导致 Weyl、Eddington 和 Einstein 本人对 Riemann 几何提出修正,以便为电磁场让出位置。由于相同符号的两个质点彼此相吸,而相同符号的两个电荷彼此相斥,所以利用因子 $i=$,就可以在形式上做到这一点。出于这种考虑,束星北研究了复数 Riemann 线元,其中实数与质量(引力)相关,虚数与电荷(电磁)相关。这样得到的理论就特别简单,Maxwell 方程和 Lorentz 作用力定律两者就作为 Riemann 几何的本质相同的结果而出现在一级近似之中,而且电荷、电流密度和电磁势之间的关系立即变得清楚了。【3】

爱因斯坦说:“我竭尽一切为这种新型知识建立物理学理论基础的努力完全失败了。基础似乎一个个被掀翻,无处可以寻到人们据以将理论建立其上的任何坚实的基础。不过我认为非常有可能物理学不是建立场的概念上,即不是建立在连续体上的。如果是这样,那末,我的全部空中楼阁——包括引力论在内——甚至连其他现代物理学也一样,都将荡然无存。下述这一点似乎是十分肯定的:人们能够获得物质问题的一个令人满意的解决之前,必须在到目前为止所发现的的基本结构中,附加以场的连续区概念以外的新的因素。”

参考文献:

【1】韦伯著 陈凤至、张大卫译 广义相对论与引力波 第1版 北京 科学出版社出版 1979年 P.139。

【2】吴大猷著 理论物理第四册——相对论 第1版 北京 科学出版社出版 1983年 P.224。

【3】戴念祖主编 20世纪上半叶中国物理学论文集粹 第1版 湖南 湖南教育出版社出版 1993年 P.566。

4、相对论和量子力学之间的矛盾浅议

在相对论和量子力学建立起来以后,现代物理学已经达到了成熟的阶段。人类对物质世界规律的认识达到了空前的高度,用现有的理论几乎能够很好地解释现在已知的一切物理现象。可以说,现代物理学的大厦已经建成。杨振宁认为,现代物理大厦在过去的世纪已经封顶,其最后一块瓦就是他自己的“规范对称”。在这一点上,目前有情况与上一个世纪之交的情况很相似。因此有少数物理学家认为今后物理学不会有革命性的进展了,物理学的根本性的问题、原则问题都已经解决了,今后能做到的只是在现有理论的基础上在深度和广度两方面发展现代物理学,对现有的理论作一些补充和修正。然而,由于有了一百年前的历史经验,多数物理学家并不赞成这种观点,他们相信物理学迟早会有突破性的发展。现代物理学理论也只是相对真理,而不是绝对真理。应该通过审视现代物理学理论基础的完善性来探寻现代物理学革命的突破口。另一方面,虽然在微观世界和宇宙学领域中有一些物理现象是现代物理学的理论不能很好地解释的,但是这些矛盾并不是严重到了非要彻底改造现有理论的程度。我们应该有勇气对科学体系怀疑和批判,即使是错误的怀疑与批判也更有助于我们了解理论的本质,而正确的怀疑和批判往往意味着新理论的诞生,重生的理论体系终将包容旧体系,并且比旧体系更加全面和完备。

从科学的目的看,科学无非是追求发现自然界的杂多中的统一,或者更严格地讲,追求发现我们经验的多样性中的统一。然后,科学又用统一的自然定律和公式解决各种各样的、纷繁复杂的具体问题。美是多样性中的统一(unity in variety)和统一中的多样性。20世纪自然科学领域许多重大的新发现,呼唤科学家们必须“从新的角度去看问题”,经典物理学的理论框架,应该从“廓清概念”切入,进行新的梳理和整合。在研究过程中应该最大限度地拓宽观察认识问题的视野、宏观地观察认识问题的各个方面、全面掌握各种现象、各种存在之间的相互关系、宏观地思考研究各种问题之间的相互联系。在研究某一问题时,不要将着眼点和思考范围只放在某一个狭小的空间范围内,更不能局限于前人划定的圈子,要将整个宇宙放在视野范围内和思维头脑中。也就是说,研究科学问题,不仅要看到个别点,而且要看到整体、部分以及整体与部分、部分与部分之间的相互关系。这样,问题研究结果就不会出现片面性缺陷。

在各自领域内都分别取得极大成功的量子力学和相对论,是20世纪物理学乃至整个自然科学的两大支柱,但是在人们企图把它们结合的时候却遇到了难以克服的困难。20世纪20年代量子力学建立以后,狭义和广义相对论与量子理论相结合,一直是理论物理学发展的坚实基础。半个世纪以来,这种结合不断发展和深化,也不断接受科学实验的检验。一方面,实验事实充分证明相对论和量子力学在其有效范围内是可靠的理论;另一方面,实验研究和理论进展表明,它们也遇到了一些难以解决的反常问题,其中一些问题是带有根本性的和革命性的,似乎难以容纳在相对论和量子力学的框架内。日本著名理论物理学家益川敏英说,理论物理学的主要任务,是阐述应用物理学中发现的新现象及其产生的原因、所需具备的条件等。

相对论和量子力学的表述形式在其本身范围内提供一切可能经验的适当方法,甚至这两种理论的表述形式也显示了深刻的类似性。事实上,在两种情况下,通过应用多维几何学和非对易代数学来推广经典物理理论而得到的惊人的简单性,本质上是以习见符号 i 的引用为基础的。事实上,仔细分析起来,这些表述形式

的抽象性，对于相对论和量子理论都是同样典型的特点；如果相对论被看成经典物理学的一种完满化，而不被看成在近代物理学发展的促使下彻底修正我们在比较观察结果时的思维方法的一个根本性的步骤，那不过是一个传统问题罢了。狄拉克认为：“我们所能建立的理论是非局域性的，对此当然不能感到满足。我认为应该说，量子论与相对论的调解问题尚待解决。物理学家们目前使用的概念是不恰当的，只是以形式性方式应用这些概念已变得很人为的了。……我感到，如果我们只是应用数学规则，就完全不能有明确的物理概念，这不是物理学家所能感到满意的。……我们必然要期待看到有基本特征的未来发展。”量子力学认为，微观世界可以用量子态，也就是波函数来描写，不是用位置、速度、动量等这些物理量来描写的。量子态的演化确定性地服从薛定谔方程。就像位置、速度这些经典物理量确定性地服从牛顿定律一样。用量子态描写虽然有些抽象，但更合理。说它抽象，是因为量子态是一种数学上的波函数，包含了虚数这样“无意义”的东西；说它更合理，是因为量子态包含了一个客体的“全部信息”。

把量子电动力学推广为普遍的量子场论，用以描述电磁相互作用以外的基本相互作用及诸相互作用的统一，既有成功也有困难。弱电统一标准模型比较成功，但也还不能算是真正的统一理论。它不仅包含两个独立的规范群及两个独立的耦合常数，而且黑格斯机制也未经实验证实。量子色动力学是最有希望的强相互作用模型，但它只能定性地解释渐近自由。SU(5)大统一模型预言的质子衰变也尚无实验证据。这种不令人满意之处是否暗示，相对论和量子论隐藏着某些彼此冲突的基本假设？首先，这种取代不表示相对论错了，而表示以前我们对量子力学的理解错了，也即在量子场论中更加进一步地确定了场（原本的“几率波”）的本体论地位，而废弃粒子本体论地位。由此可得一些列数学上的必然结果。狭义相对论，则没有任何问题。事实上，物理界的一致看法，是量子场论是狭义相对论与量子力学原理的完美结合。在量子场论问题中，狭义相对论没有问题，但广义相对论的量子场论化过程则出现各种问题，从而表明广义相对论的至少部分看法是存在问题的。没有狭义相对论，就没有量子场论，量子场论是量子力学原理和狭义相对论原理结合的自然产物。

狄拉克于1970年说：“相对论要求我们采用一种不同于以前的宇宙图象，一种空间、时间图象，一种不存在绝对时间的四维图象。彼此相对运动着的各个观察者会有不同的时间观念。他们会使用不同的时间轴，而所有这些时间轴都具有同等的权利，自然界不偏袒其中某一个而牺牲其他。但是量子力学的两种形式（海森堡形式和薛定谔形式）都是从运动方程着手，运动方程的观念是：你用数学变数来描述世界在某一时刻的状态，并且列出方程，这些方程会告诉你这些变数是怎样随时间而变化的，然后把这些方程进行积分，你就能够看出，在从初始状态开始的某一未来时刻，世界的状态是怎样的，而且能够把你的结果同实验相比较。现在你会看出，这里我们是在绝对意义上使用了时间概念，而相对论则认为这是不容许的。这里我们就碰到了巨大困难的开头。我们有了相对论和量子论，两个建立得非常完善的理论，每一个在它自己的领域内都是非常可靠的，可是它们彼此之间都难以互相协调。如果两个理论都是正确的，那么会想到，它们马上就应该协调成一个单一的体系。但是相对论和量子力学的情况并非如此，它们之间有一定的抵触。这个抵触是最近四十年来物理学的主要问题。这种辐射对于一个适当的观测者来说，正是从一切方向同等地来到。如果选择另一个相对于前一个观测者运动的观测者，他将看到辐射在他前进的方向上来得强一些，而从他背后来的则没有那么强。因此它仅对于一个观测者来说才会是对称的。这样就有一个优惠的观测者，对他来说，微波辐射是对称的。可以说，这个优惠的观测者在某种绝对意义上是静止的，也许他就是对于以太是静止的。这恰恰与爱因斯坦的观点相矛盾。”

5、量子力学与狭义相对论之间的不协调

物理规律中，物质的变换总是根据当前状态的各种参数决定的，没有对历史的记忆，而且由于光速最大原理，能影响一个质点运动的信息只能是这个点邻近无穷小范围内的信息，这两个特点决定了微分方程适用于大多数的物理规律描述。用微分来描述瞬时的变化率，实际上是一个极限的过程，能对瞬时变化给出很好的描述。就目前来看，用微分来描述变化率是最好的方法。物理上的“定域性”原则现在已经受到了越来越多的挑战，基本可以认为真实的物理至少在一定程度和能级条件下是不满足定域性原则的，这是一系列物理实验的论证结果。从物理上来说，能用微分方程描述的另一个潜在依据就是不存在稳定的时间与空间最小单元。如果存在最小单元，在这个单元中的一切不可取分，状态不可分辨，那么最后我们要用的就可能是差分函数与差分方程，而不是微分方程。大量实验证实，非定域性是量子力学的一个基本属性，但是非定域性将意味着超光速传播，这与狭义相对论的基本假设矛盾。当前，量子引力理论中的超弦理论的时空背景相关性，与圈量子引力理论中的时空背景无关性同时存在，是物理学中潜在的对于时空本质不同态度的一次大碰撞，这种困难预示着物理学需要一次概念的变革，首当其冲的就是时空。时空观念是物理学中最基本的也是最重

要的概念，不同的时空观念将导致不同的理论研究方向，任何对于时空概念的更新和深化，势必对整个物理学产生巨大的革命性的影响。

作为量子论和狭义相对论的结合的量子电动力学和量子场论更是如此。一方面，量子电动力学取得了巨大成功，可以给出与实验精确符合的微扰论计算结果，例如关于电子反常磁矩的微扰论计算结果与实验结果可以符合到十几位有效数字；格拉肖-温伯格-萨拉姆(Glashow-Weinberg-Salam)的弱电模型在很大程度上统一了微观尺度上的电磁作用和弱作用，在相当于 1000 倍质子质量的能量尺度下与几乎所有实验符合；包括量子色动力学在内的标准模型对于强作用的一些性质也能给出令人满意的结果等。另一方面，与实验精确符合的微扰论计算在理论上却并不成立，微扰级数本身一定会发散。标准模型中有 20 几个自由参数需要实验输入，其中包括一些极重要的无量纲参数，如精细结构常数、 μ 介子与电子质量之比等。为了减少参数的大统一理论或超对称大统一理论，往往会导致质子衰变。可是，实验上一直没有观测到质子衰变现象，也没有观测到超对称粒子，这是为什么？超对称如何破缺？为什么有夸克禁闭和色禁闭？为什么夸克质量谱中存在极大的质量间隙？为什么会有三代夸克-轻子及其质谱？理论上作用极大的“真空”到底是什么？理论上计算的“真空”能量，与宇宙学常数观测值相应的“真空能”相比，高出几十到一百多个数量级，这又是为什么？这些问题都难以回答。诺贝尔奖获得者阿尔文(H.O.G.Alfven)认为相对论“不过是一个小摆设”，“抹杀了科学与伪科学之间的界线”。德国资深理论物理学家韦斯雷(J.P.Wesley)博士说：“相对论从来不顶用”。狭义相对论和量子力学协调，也存在许多问题。例如“空间”问题就是二者无法协调的，狭义相对论是描述真实的物理空间中的理论，而量子力学则是定义于抽象的组态空间或位形空间中的理论。这两类空间只有在单体问题中才能勉强统一，而在其余大多数问题中总是不能混为一谈的。还有光速作为光子在时空中的运动速度，就被测不准关系所限制，而且光即是光子又是波，也应符合粒子和波的测不准关系，所以光速作为光子的速度也将是测不准的，在小时空范围和高能时光速应有统计涨落。这一结果和真空中光速恒定原理是不相容的。从最本质的角度来说，爱因斯坦从来不认为存在粒子，他只赞同场的存在，而粒子是场的一种表现。从这个角度来说，站在粒子本体论的立场，粒子物理本就和爱因斯坦的几何纲领矛盾，而从场本体论的立场来说，粒子作为场的激发态，无论是正频还是负频，都和几何纲领一致。就现代物理而言，坚持的是场本体论，所以我看不出有什么矛盾的地方。

如果把带电粒子看作是刚性球，而且只取其推迟解的话，经典电动力学是无论如何都不可能和量子力学的原理统一起来。但抛弃这两个假设，改以应用超前解和认为带电粒子是一种自适应的粒子，那么在原子内部的电子的运动就不在是经典电动力学中那种呆板，毫无生气的粒子的运动，相反，电子的运动相当于不断与原子核交换光子的运动，既发射又吸收，对应于电动力学的两个解：推迟解相当于发射光子，超前解相当于吸收光子。这两个解的线性组合相当于量子力学中态函数的组合，在这种状态下，两个解的波函数组成了一个驻波。因此既不对外辐射能量，也不吸收，处于动态的平衡状态。这样才能够圆满地将电动力学和量子力学协调起来。而且对应于超前解的违反因果律的结果对于 ERP 悖论结果也就有了完整的合理的解释，不但如此，对于原子核的电子跃迁中的卢瑟福质疑和薛定鄂非难也就有了明确的答案。用普朗克常数表示的微观“粒子波”的能量只与其波动频率成正比，而粒子本身的能量又是与其动量的平方或速度的平方成正比，当进行参照系变换速度相应地改变是否同时普朗克常也随之改变、或者是频率与速度改变率的平方成正比。

反映更多粒子的运动，也不能反映更少粒子的运动。因此，方程(3)既不能应以处理粒子的产生问题和消失问题，也不能用以处理粒子间的相互转化问题。

分析几个量子力学与狭义相对论之间“不协调”的问题：

1. 采用量子力学动能算符和动量算符计算微观粒子的动能，得到的结果一般是不一样的，也就是说现有量子力学的动量算符与动能算符不能一一对应。

动能算符和动量算符的不一致体现在物理期望值上，但物理期望值的不同是自然的，因为所谓物理期望值本是对所有可能取值的平均，而动能和动量的关系是非线性的，简单的统计学知识可以知道，非线性的量的统计平均本就不是一一对应的。物理期望值只反映了当一个测量多次重复的时候的一种统计结果（基于量子几率原理的统计，量子力学四大基本假设之一），并不是物理实在，而量子理论的物理实在反映在塌缩前的概率波上，并不反映在统计结果上。

2. 量子力学在曲线坐标系中一直无法合理地定义动量算符。此问题十几年前在国内《大学物理》上有许多讨论，但无果而终。

曲线坐标系绝大多数情况下都是非正交的，此时需要使用的是一般微分流形上的量子力学。虽然此时时空是平直的，但非正交的取消坐标系依然会给出非平庸的联络，从而采用一般正交的笛卡尔坐标系的方法给出的计算结果本就有问题。而对于一般坐标系（也即联络非常零的坐标系），经典物理层面我们很清楚应该

怎么做,但量子体系如何建立依然是一门正在研究的问题,这牵扯到一般微分流形上的纤维丛的量子化问题,是一个正在进行中的课题。所以,不要以为换一个坐标系问题很简单,这个问题即便在经典物理中,也是在广义相对论建立以后才利用微分几何的语言研究清楚的。

3. 将动量算符作用于非本征态波函数,得到非本征值都是复数。坐标空间中动量算符的平均值也是复数,在物理上没有意义(除非等于零)。为了解决复数非本征值和复数平均值问题,现有量子力学将任意波函数用算符的本征态波函数展开,实际上将算符的平均值变换到动量空间计算。其结果是,虽然动量算符的复数平均值问题被消除,但坐标算符的复数平均值问题又出现。问题实际上没有被解决,只是被转移。在直角坐标系中,角动量算符没有本征态波函数和本征值,将角动量算符作用任意波函数,得到的都是虚数。直角坐标系中角动量算符没有意义吗?反之,动能算符对任意波函数作用结果都是实数,我们就没有必要将任意波函数按它的本征函数召开。氢原子定态波函数就是一个例子,它们都不是动能算符的本征函数。

描述自由粒子运动的 Schrodinger 方程如下:

$$\begin{cases} i \frac{\partial \psi}{\partial t} = H\psi \\ H = \frac{\mathbf{P}^2}{2m} \\ \mathbf{P} = -i \nabla \end{cases} \quad (1)$$

其中 ψ 代表波函数, H 代表哈密顿量, \mathbf{P} 是动量算符, m 是粒子的静质量。

假设粒子的速度接近光速,这一表式便不准确。在相对论中,包括静能量在内的粒子的能量 E 和它的动量之间有下列关系:

$$E^2 = p^2 + m^2 \quad (2)$$

因此不难理解,量子力学是非相对论性的,不能用来处理相对论性的问题。在粒子速度接近光速的现象中,粒子的动能可能远远超过它的静能。因此,在这类粒子的相互作用过程中,能量转换可能极大,因而有可能在满足质量和能量相互联系的定律之下导致粒子的产生和消失。宇宙线现象中的电子簇射和介子簇射就是这类例子。然而,量子力学却无法处理这类问题。

描述多体运动的薛定谔方程具有如下的形式:

$$i \frac{\partial \Psi}{\partial t} = \left\{ \sum_{j=1}^N \left(-\frac{\nabla_j^2}{2m_j} \right) + \sum_{k < j} v_{jk} \right\} \Psi \quad (3)$$

其中 N 代表粒子数, j 标志着第 j 个粒子, v_{jk} 标志着第 j 个粒子和第 k 个粒子之间的相互作用。在方程(3)中粒子的数目 N 已经给定。不论波函数 ψ 怎样随时间而变化,它只能描述 N 个粒子的情态。这一波函数不能

首先,量子态可以分解为多个本征态的混合,但无论本征态如何混合,对应的量子态是固定的。其次,量子态天然地具有不确定性与互补性(互补原理是量子四大基本假设之一,衍生而出的就是不确定关系),因此一个固定的量子态的所有可观测量未必都是实数,这取决于这个量子态究竟是什么状态。第三,在宏观物理中,我们所观测到的状态必然是上述量子态在观测所对应的动力学算符的本征态上的塌缩,也就是说只要你观测了,这个量子态就被破坏,变成了某个由观测所决定的本征态上。这是量子非么正性的主要来源(关于这个问题,近代量子力学的不同诠释给出了不同的描述。这里所采用的是哥本哈根诠释)。因此,所谓“物理意义”,不能依然采用经典物理的“意义”来讨论量子问题,一个坐标本征态可以具有实的坐标本征值,但对应的动量本征值必然不是实的,而且也必然不是动量本征值,而是一个混合值。这是量子力学的基本性质。这就好比骰子,坐标描述了1、2、3这三个面,动量描述了4、5、6这三个面,但在某一个确定的瞬间只可能有一个面朝上,所以要么是坐标面朝上要么是动量面朝上。从哥本哈根流派来说,这就是不确定原理所要求的。而如果站在路径积分的角度来说,这是路径积分的一个自然表现或者说是它的数学必然(经典物理也可以有路径积分表示,从而可以看出经典物理和量子物理的关系究竟是什么。)由于将动量本征态作用在非本征态上,所以得到的其实是多个本征值与处在对应本征态上的概率的统计平均,它当然可以不是一个实数了,因为它不是一个物理态,而物理态是这个非本征态在观测导致的量子塌缩后所处的状态——也就是某个动量本征态上。再次提醒,单次测量的话,必然是出于某个本征态上,而多次测量的话则是前面所述的数学期望值,而数学期望值不是简单的量子概率的统计平均,而是量子概率的模平方的统计平均。

4.量子力学的算符对任意波函数的作用结果必须是实数，只有这样做才能构建逻辑完备的量子理论。事实上狄拉克在他的名著《量子力学原理》中只提实算符或线性实算符，从来不提厄密算符，遗憾的是其他物理学家似乎至今都没有意识到这里存在的问题。厄密算符作用在完备量子态的相应本征态上，自然可以得到一个实的“物理”值，这是厄密算符的特性，也是对“实算符”的数学拓展。而为何不用实算符而用厄密算符？因为量子体系的波函数描述中，波函数本身就是复数形式的，而算符本身必然不是一个数，而是一个算符，而算符作用在复函数上如何保证其必须得到实本征值？这就要求引入算符的厄米性。换言之，只要你采用波动表示，并且采用算符作为物理操作的数学描述，那么“物理性”要求就等于要求算符是厄米的。这是给定物理要求以后的数学必然，也就是说，只要你要求了“物理值为实数”这个物理要求，并假定了“量子力学的基本表述是波函数”这个假设，那么所谓的“实算符”就必然是“厄密算符”，不存在别的选择。历史上除了波动表述，还有矩阵表述和路径积分表述。在矩阵表述中，本来是作用在函数上的算符，现在则成了一个矩阵，此时厄密算符等价于一个实矩阵（在算符的本征态表象下，是一个实对角矩阵）。此时“实算符”就看上去更自然了，因为矩阵必须是实数。

5、Aspect（阿斯派克特）实验

EPR实验：一个母粒子分裂成向相反方向飞开去的两个小粒子A和B，它们理论上具有相反的自旋方向，但在没有观察之前，照量子派的讲法，它们的自旋是处在不确定的叠加态中的，而爱因斯坦则坚持，从分离的那一刻起，A和B的状态就都是确定了。阿斯派克特在1982年的实验(准确地说，一系列实验)是20世纪物理史上影响最为深远的实验之一，它的意义甚至可以和1886年的迈克尔逊-莫雷实验相提并论。它是一个类似EPR式的实验。随着技术的进步，特别是激光技术的进步，更为精确严密的实验有了可能。进入80年代，法国奥赛理论与应用光学研究所(Institut d'Optique Theorique et Appliquee, Orsay Cedex)里的一群科学家准备第一次在精确的意义上对EPR作出检验，领导这个小组的是阿莱恩·阿斯派克特(Alain Aspect)。法国人用钙原子作为光子对的来源，他们把钙原子激发到一个很高的量子态，当它落回到未激发态时，就释放出能量，也就是一对对光子。实际使用的是一束钙原子，但是可以用激光来聚焦，使它们精确地激发，这样就产生了一个强信号源。阿斯派克特等人使两个光子飞出相隔约12米远，这样即使信号以光速在它们之间传播，也要花上40纳秒(ns)的时间。光子经过一道闸门进入一对偏振器，但这个闸门也可以改变方向，引导它们去向两个不同偏振方向的偏振器。如果两个偏振器的方向是相同的，那么要么两个光子都通过，要么都不通过，如果方向不同，那么理论上说(按照爱因斯坦的世界观)，其相关性必须符合贝尔不等式。为了确保两个光子之间完全没有信息的交流，科学家们急速地转换闸门的位置，平均10ns就改变一次方向，这比双方之间光速来往的时间都要短许多，光子不可能知道对方是否通过了那里的偏振器。作为对比，也考察两边都不放偏振器，以及只有一边放置偏振器的情况，以消除实验中的系统误差。

实验结果和量子论的预言完全符合，而相对爱因斯坦的预测却偏离了5个标准方差。在世界各地的实验室里，相同或改进精度的实验都表明：粒子们都顽强地保持着一种微妙而神奇（“超光速性”）的联系。困扰爱、波、罗三位论文作者的“鬼魅般的超距作用”(“spooky action at a distance”)在为数众多的可再现实验中一再地出现。

一) 目前的实验表明量子力学正确，决定论的定域的隐变数理论不成立。贝尔不等式这把双刃剑的确威力强大，但它斩断的却不是量子论的光辉，而是反过来击碎了爱因斯坦所执着信守的那个梦想！爱因斯坦到过世前都没有接受量子力学是一个“真实”而完备的理论，一直尝试着想要找到一种诠释可以与相对论相容，且不会暗指“掷骰子的上帝”。

二) 如果相对论三大理论原则成立，则决定论的定域的隐变数理论成立；实验证明后者不成立，因此，有二个可能的解释，即定域性不成立，或隐变数理论不成立；不管是那一个解释成立，那么，贝尔不等式就没有合理性了，也就是说贝尔不等式没有判断标准上的意义了。从这种逻辑观点来看，相对论者面临放弃定域性（和光速极限关联）或隐变数理论（和决定论有关联）的两难局面。

三) Aspect的实验首先发现了违反贝尔不等式的实例。所以说明，决定论，定域性，实在性，要想三者兼得是不可能的。有人退而求其次，承认信息传递的速度可能超过光速，提出了非定域的实在的隐变量理论。但是Zeilinger做了另一个实验，实验结果证明，至少有一部分这样的理论是不正确的。这个结果暗示了，如果还想坚持决定论的隐变量理论，可能要放弃实在论。

四) 由于相对论理论上把决定论，定域性和实在性组成在一起，以至Aspect实验对决定论，定域性和实在性这三个相对论原则中的任意一个都没有被证伪。但比较有理由认为实验排除了定域实在的可能，也可以说某种“超光速”是可能存在的。

五) 量子理论本身的不完善也可以从这个实验看出来，尽管量子理论的不确定原理可以实验“过关”，

但量子论还是没有一种有说服力的理论来解释这种机制。因此, Aspect实验很有可能启发新的理论出现。

六) 逻辑上来看, 因为Aspect实验否定了量子理论中定域隐变因果论, 而“Lorentz变换”是以定域因果论的原则为基础的, “光速不变”原理是定域因果论的前提原则, 所以, 量子理论范畴上的相对论量子力学面临最大的挑战, 如果承认Aspect实验结果的正确性, 则实质上就否定了相对论量子力学的理论前提。

七) 因为物理理论历史的发展原因, 量子理论上已经融合了一些相对论的理论, 例如, 相对论量子力学就是这种产物, 有时量子论还要借助相对论来自圆其说, 这说明要否定相对论对认同量子论的人来讲, 也是不愿意的事情。相对论者和量子论者可能宁愿不管实验结果, 而采取对Aspect实验模糊态度——只是个选择问题: 放弃决定论, 可以选择量子力学; 坚持决定论而放弃隐变量, 还可以在定域性和实在性之间挑一个。

6、量子力学与广义相对论之间的不协调

在量子力学诞生的早期岁月里, 这些分歧的产生主要源于对量子理论中的波函数的统计性质的理解。因为量子力学的创始人把量子力学理解成是一种完备的理论, 把量子统计理解成是不同于经典统计的观点, 将单一过程与因果律的偏离自我标榜成了“量子力学描述中的统计决定性”。实际上, 理论描述的统计决定性与物理学家长期信奉的因果决定论的实在论研究传统相冲突。在当时的背景下, 对于那些在经典物理学的熏陶下成长起来的许多传统物理学家而言, 对量子力学的这种理解是难以容忍的。这些物理学家仍然坚持以经典实在观为前提, 希望重建对原子对象的因果决定论的描述。这种观点认为, 现有的量子力学只是临时的现象学的理论, 是不完备的, 将来总会被一个拥有确定值的能够解决量子悖论的新理论所取代。量子哲学家普遍地把这种实在论称之为定域实在论, 或者称为非语境论的实在论。从 EPR 悖论到贝尔定理的提出正是沿着这一思路发展的。这种观点把量子论中的统计决定论与经典实在论之间的矛盾, 理解成是量子论与传统实在论之间的矛盾。

1) 微观粒子的基本运动方程(非相对论形式)--薛定谔方程。微观粒子的二象性, 由此而引起的描述微观粒子状态的特殊方法--波函数, 以及微观粒子不同于经典粒子的基本特征--不确定关系。不过, 在今天的理论中, 不确定性不是单一粒子的属性, 而是一个系综相同的粒子的属性。一个物理系统的位置和动量, 可以无限精确地被确定和被预言。至少在理论上, 测量对这个系统本身, 并没有任何影响, 并可以无限精确地进行。在量子力学中, 测量过程本身对系统造成影响。要描写一个可观察量的测量, 需要将一个系统的状态, 线性分解为该可观察量的一组本征态的线性组合。测量过程可以看作是在这些本征态上的一个投影, 测量结果是对应于被投影的本征态的本征值。假如, 对这个系统的无限多个拷贝, 每一个拷贝都进行一次测量的话, 我们可以获得所有可能的测量值的机率分布, 每个值的机率等于对应的本征态的系数的绝对值平方。量子力学中的测量是不可逆的, 测量后系统处于该测量值的一个特征向量上。

2) 根据量子力学原理建立的场的理论, 是微观现象的物理学基本理论。场是物质存在的一种基本形式。这种形式的主要特征在于场是弥散于全空间的。场的物理性质可以用一些定义在全空间的量描述(例如电磁场的性质可以用电场强度和磁场强度或用一个三维矢量势 $A(X, t)$ 和一个标量势 $\varphi(X, t)$ 描述)。这些场量是空间坐标和时间的函数, 它们随时间的变化描述场的运动。空间不同点的场量可以看作是互相独立的动力学变量, 因此场是具有连续无穷维自由度的系统。场论是关于场的性质、相互作用和运动规律的理论。量子场论是在量子物理学基础上建立和发展的场论, 即把量子力学原理应用于场, 把场看作无穷维自由度的力学系统实现其量子化而建立的理论。量子场论是粒子物理学的基础理论并被广泛地应用于统计物理、核理论和凝聚态理论等近代物理学的许多分支。量子场论本质上是无穷维自由度系统的量子力学。相对论认为时空是活跃的, 可弯曲的, 程度由物质的分布决定。但量子力学认为时空是静止和平坦的, 不受物质的影响。

在原子物理学中, 重新审查无歧义应用基本物理概念的基础必要性, 在一定方式上使人想起引导 Einstein 对一切 space-time 概念的应用进行创造性修正的那种形势。这种修正通过强调观察问题的根本重要性, 而给我们的世界图景带来了如此巨大的统一性。在相对论中, 因果描述毕竟是在任一给定的参考系内被保留了下来的, Einstein 最不善于抛弃连续性和因果性来标示表面上矛盾着的经验。在原子能量发生改变的任何原子反应, 都涉及在两个所谓量子定态之间的一种完全的跃迁。这些概念带来了因果性描述的进一步放弃, 因为光谱定律的解释显然意味着, 处于激发态的一个原子, 通常具有跃迁到这一个或那一个较低能态发射光子的可能。但是在量子理论中客体和测量仪器之间的不可控制的相互作用, 却迫使我们甚至在这一方面也要放弃。

【1】按照广义相对论, 当沿着引力方向移动一段距离 Δq 时, 时钟的快慢就会改变, 即在一段时间 T 中的读数改变一个量 ΔT , 由下列关系式给出: $\Delta T/T = g \Delta q/c^2$ 。在相对论中也能成立的最小作用量原理将成为量子理论进一步发展的指南。【1】

Bohr 讲“在定态中系统的动力学平衡可以借助普通力学来讨论, 但不同定态之间的过渡不能在同样基础上考虑。紧接着后一过程的是各向同性辐射器的发射, 这个发射的频率和能量之间的关系由普朗克理论给

出。任何观测都要干涉到现象的进程，（并需要）最终弃绝因果定律的经典理想和根本改变我们对物理现实这个问题的态度。每个原子现象都是关闭着的，因而观察只能基于通过合适的放大装置获得的登记。这些装置具有不可逆功能，象电子穿透乳胶造成的在照相底盘上的永久记号之类。而正规化的量子力学允许这样一类定义完善的应用，这些应用只采用这些关闭着的现象并必须把它当作经典物理的合理推广。仅仅因为有忽视与测量方式相互作用的可能性，时间和空间的概念从根本上获得了意义。从习惯于要求一个直接视觉化的自然描述中，我们必须准备接受不断扩展的抽象性的需要。最重要的，我们也许可以期待在量子理论和相对论交叉的地方，也就是许多困难仍然没有解决的地方得到一个惊喜。”

广义相对论在微观尺度上违背了量子力学的规则，而黑洞则在另一极端尺度上向量子力学自身的基础挑战。广义相对论中应用的是张量算子，而它是以微分学为基础的，这要求空间是光滑的，但是量子力学要求空间的量子化，必然对广义相对论建立的基础产生冲击，量子力学的基本方程是薛定鄂方程，为一波函数的二阶偏微分方程，因为波函数的标准条件是有限、唯一、连续，所以事实上量子化的结论只是波函数求解时为了满足连续这一标准条件所得出的结果。运用薛定鄂方程证明波尔的定态假设即是例证。因此，在相对论和量子力学还处于兴盛时期的今天，汲取这些理论的真理性的内容，克服它们所面临的疑难，进一步探索自然界的奥秘，就已经提到当代物理学家的议事日程上来了。

广义相对论是一个很特殊的相互作用理论，它把引力归结为时空本身的几何性质。从某种意义上讲，广义相对论所描述的是一种“没有引力的引力”。既然“没有引力”，是否还有必要进行量子化呢？描述这个世界的物理理论是否有可能只是一个以广义相对论时空为背景的量子理论呢？也就是说广义相对论和量子理论是否有可能真的同时作为物理学的基础理论呢？这些问题之所以被提出，除了量子引力理论本身遭遇的困难外，没有任何量子引力存在的实验证据也是一个重要原因。但是种种迹象表明，即使撇开由两个独立理论所带来的美学上的缺陷，把广义相对论和量子理论作为自然图景的完整描述仍然存在许多难以克服的困难。问题首先在于广义相对论和量子理论彼此间并不相容。我们知道一个量子系统的波函数由系统的 Schrödinger 方程： $H\Psi = i\hbar\dot{\Psi}$ 所决定。但是一旦引进引力相互作用，情况就不同了。因为由波函数所描述的系统本身就是引力相互作用的源，而引力相互作用又会反过来影响波函数，这就在系统的演化中引进了非线性耦合，从而破坏了量子理论的态迭加原理。不仅如此，进一步的分析还表明量子理论和广义相对论耦合体系的解是不稳定的。其次，广义相对论和量子理论在各自“适用”的领域中也都面临一些尖锐的问题。比如广义相对论所描述的时空在很多情况下——比如在黑洞的中心或宇宙的初始——存在所谓的“奇点” (Singularity)。在这些奇点上时空曲率和物质密度都趋于无穷。这些无穷大的出现是理论被推广到其适用范围之外的强烈征兆。无独有偶，量子理论同样被无穷大所困扰，虽然由于所谓重整化方法的使用而暂得偏安一隅。但从理论结构的角度看，这些无穷大的出现预示着今天的量子理论很可能只是某种更基础的理论在低能区的“有效理论” (Effective Theory)。因此广义相对论和量子理论不可能是物理理论的终结，寻求一个包含广义相对论和量子理论基本特点的更普遍的理论是一种合乎逻辑和经验的努力。

在这些种种矛盾和非协调的物理现象背后，存在着一个更为基本的自然层面。所有的问题，如不涉及或深入到这一层面是不可能得出一个完整的解来的。统一目前物理理论中的各个局部理论的工作，不应当是建立在通过修改或扩展某一具体定律来实现的。这里需要的是一个更为有力的思想工具，或说是观念。陈一文先生说“当代 Einstein 式国际大师级科学家已经出现，只不过像 Einstein 当初崭露头角时那样，相当时期内未能被科学界主流多数学者发现与认识”。英国当代科学史家 F·查尔默斯在《科学究竟是什么》中写道：在这些领域里自称为“科学家”的人，往往认为自己是遵循物理学的经验方法的……幽禁在他们现代化的实验室里，透过数字仔细端详世界，不能知道他们努力遵循的方法不仅必然是无结果和没有成效的，而且也不是使物理学取得成功的那种方法。

前苏联科学院院士塔姆说：“……我们现在正处在认识自然构造的根本规律的一个新阶段，量子理论、相对论、牛顿理论等等都将作为这些普通规律的一个个特殊情况引伸出来。……无法预言新的彻底的物理理论何时才能建立起来，也不知它将如何建立起来的……但在全世界有成千上万实验工作者和理论工作者奋战在物理学的这块前沿阵地，这个事实使我们相信，这一时刻已为期不远了”。科学体系越是成就辉煌，魅力无限，它的基本理论就越容易被赋予类似宗教里教义的地位。

广义相对论对于万有引力或者弱相互作用（后面分析）起主要作用的宇观领域，把时空看成是不可压缩的超流体，不仅仅是处处连续，而且处处是无限可微分的光滑流形，这是数学家的理想化自由想象，是与量子理论的基本原理（海森堡不确定性原理）直接矛盾的！——相对论建立在 Remann 几何基础上（服从二次型不变性约束），或者建立在 Fensler-Remann 几何基础上（服从四次型不变性约束），但是几何学基础的 $ds=(x_1, x_2, x_3, x_4, \dots dx_1, dx_2, dx_3, dx_4, \dots)$ ，在量子理论中，由于 x 和 $dx=Vx=P_x$ ($dt=1, m=1$ 时) 不可同时精确测定（海

森堡测不准原理限制)，所以，除非把相对论和量子理论都建立在模糊数学--模糊物理（我们在八十年代提出，曾经和李政道教授讨论过）--模糊语言—模糊逻辑的新基础之上，相对论与量子理论的矛盾是明显不可调和的---量子理论仍然使用牛顿的绝对时间空间理论（认为时间空间是可以压缩的超流体，或者是亚普朗克尺度的超微观的量子化的“沙粒”---例如 10^{-48} 次方米以下？），但是相对论却是建立在相对时间空间理论的基础上！因为只有认为时间空间是不可压缩的超流体，并且是处处均匀各向同性，因此才有真空光速不变原理的成立。广义相对论中的时空是非线性的，而量子力学的态叠加原理则要求线性。这个问题目前没有解决方案（三次量子化也只是一个思路，不成熟，更不能解决所有问题）。因为“有一个独立于知觉之外的客观世界”是对物理实在而言的，而在量子理论中，唯一的物理实在是几率波，而不是位置和动量（这是经典物理的概念）。所以量子理论的物理实在不是经典物理里的物理实在，但量子物理本来就没说自己和经典物理完全相符。

在牛顿万有引力定律中恰好有一个基本引力常数 GN，其质量量纲也为-2，与费米常数 GF 类似，它提供了整个物理学的另一个基本能量尺度——普朗克尺度 $MP=1019\text{GeV}$ ，在那里量子引力效应变得非常重要；不仅狭义相对论无法描述引力，而且爱因斯坦的广义相对论也无法完满描述量子引力，所以这是物理学家们预期产生洛伦兹破坏最自然的能量标度。由于标准模型本身的对称结构不包含这样一个尺度，洛伦兹破坏效应就只能作为“高阶效应”出现，受到普朗克尺度倒数的压低，具体讲，就是 E/MP 压低，这里 E 是相关过程的能量。对于 OPERA 实验来说， $E=17\text{GeV}$ ，因此这个压低因子 E/MP 就小到 10^{-18} 量级，远远小于 OPERA 实验声称的 10^{-5} 量级的超光速效应。

从最本质的角度来说，爱因斯坦从来不认为存在粒子，他只赞同场的存在，而粒子是场的一种表现。从这个角度来说，站在粒子本体论的立场，粒子物理本就和爱因斯坦的几何纲领矛盾，而从场本体论的立场来说，粒子作为场的激发态，无论是正频还是负频，都和几何纲领一致。就现代物理而言，坚持的是场本体论。

参考文献：

【1】 [丹麦] N.Bohr 著 戈革 译。《尼耳斯·玻尔哲学文选》 商务印书馆 1999 年。

7、引力场的量子化及其局限性

二十世纪理论物理学面临的一个主要困难，可以用两个字概括，那便是发散……。发散是量子场论中的基本困难。起初人们相信如果狭义相对论是正确的，那么量子力学的形式就应该适当地加以修改。因为从狭义相对论的观点来看，薛定谔方程是明显非洛仑兹协变的。笼统地说，其中方程对时间求的是一阶导数，而哈密顿算符往往是空间的二阶导数，时间与空间处于不平等的地位。为了使得量子力学与狭义相对论协调起来，狄拉克等人创立了量子场论。其场方程，已具有了明显的洛仑兹协变性，同时它不仅可以对点粒子进行描述，而且能够对具有广延性质的物质场进行描述，并将其量子化。这本身绝不能被视为仅仅是量子力学一种简单的推广，同时应看到它本质上的一次飞跃。从物理上看，量子场论能够描述粒子的产生和湮灭，而这是在量子力学中无法实现的，从数学上看，场论中，系统的自由度是无数多的，而量子力学主要处理的只能是有限个自由度的系统，这样一种质的不同，使得两者之间的数学结构，是极不相同的，比如说希尔伯特空间的定义等等。乃至到今天，量子力学的数学结构是已经很清楚了，但是量子场论的数学结构，依然是有待进一步研究的课题。

量子场论中的方程在许多具体问题中已经显得很复杂，乃至无法精确求解。特别是方程中含有非线性项的时候。所以至今，量子场论中发展起来的几套比较成熟了的方法，都是以近似求解为目的的微扰论。这时发散的困难也就体现出来了。其结果是，我们本来期望那样一些应该越来越小的修正项，相反却是无穷大的。这或是由于积分项中的动量趋向无穷大而导致的紫外发散，或是由于动量趋向零而导致的红外发散，而前者是量子场论中所遇到的主要困难。

为了消除这样一些发散项，物理学家引入了一种称之为重整化的方法，部分地解决了这一难题。其基本思想便是把那样一些发散项吸收到一些基本“常”量中去，而那样一些无穷大的常量却是我们永远观测不到的。所能观测的只是那样一些经过重整化了的有限大小的量。但是这样的一种方法并不是对任何一种理论都适用，如果一个理论中的基本发散项随着微扰的展开越来越多的话，那么我们就无法将所有的发散项，全部吸收到那样有限的几个基本常量中去。我们称这样的一种理论是无法重整化的。量子电动力学(QED)很早就被认识到是一个可重整化的规范理论，而严格证明其它理论是否能被重整化，很长一段时间内，是一个没有解决的问题。直到七十年代初，这样的一个问题方被当时还是研究生的特·霍夫特(t'Hoof)和他的导师攻克。他们证明了当时基于规范理论的其它统一模型，都是可重整化的。这样的一个人工作，给 YANG-MILLS 理论带来了第二次青春，同时也使得他们荣获了 1999 年的诺贝尔物理学奖。至今，人们相信描述强，电弱三种

相互作用的量子场论，都是可以重整化的。但是，描述引力相互作用的量子引力，却是无法重整化。这是当今理论物理界，面临的一个主要困难。从另外一个角度说，这样的一个困难等价于怎样将量子力学与描述引力场的广义相对论协调统一起来……。

(1) 量子引力的产生

虽然量子引力理论的主要进展大都是在最近这十几年取得的，但是引力量子化的想法早在 1930 年就已经由 L. Rosenfeld 提出了。从某种意义上讲，在今天大多数的研究中量子理论与其说是一种具体的理论，不如说是一种理论框架，一种对具体的理论——比如描述某种相互作用的场论——进行量子化的理论框架。广义相对论作为一种描述引力相互作用的场论，在量子理论发展早期是除电磁场理论外唯一的基本相互作用场论。把它纳入量子理论的框架因此就成为继量子电动力学后一种很自然的想法。

1920 年，韦尔提出了一个将电磁场和引力场联系起来的电磁场几何化的理论，他的基本想法是：把电磁场与空间的局部度规不变性联系起来。韦尔的理论不仅没有得到学术界的认可，而且也与实验结果不符。之后，瑞尼契、惠勒、米斯纳等人也作了很多将电磁场几何化的尝试，都没有获得成功。人们也曾试图将引力场进行量子化，并从中寻求引力场与电磁场的本质联系，企图用量子论的方法实现引力场与电磁场的统一。

通常经典场论的内容主要包括经典电磁场论即经典电动力学和经典引力场论两个部分，前者指麦克斯韦的电磁场理论，后者指爱因斯坦的广义相对论。已知场是物质的基本形态，经典电动力学已发展为量子电动力学，那么很自然地爱因斯坦的广义相对论，即相对论性的经典引力场论也应发展为量子广义相对论或量子引力场论。既然量子电磁场的基态称为电磁真空态，基态的量子电磁场称为量子电磁真空；那么量子引力场的基态就应称为引力真空态，基态的量子引力场就应称为量子引力真空。

科学家们引入引力场量子理论——“引力子”理论。根据电磁场量子理论，物质间的相互作用（吸引或排斥）是通过交换电磁场量子——光子实现的。由于电磁力和万有引力都是长程力，与距离的平方成反比，人们通过类似的方法把引力场量子化，把引力场量子叫做引力子，常用符号 g 表示，引力子具有波粒二象性。引力场和其他场物质可相互转化，如电子和正电子湮灭时，除以产生光子的方式进行外，还可能以产生两个引力子的方式进行。人们还推测，引力子的静止质量为零，电荷为零，是自旋为 2 的以光速运动的玻色子。长期以来，人们力图通过探测引力波的存在证实引力场理论。但由于万有引力太弱，相应引力子的能量比光子小的多，探测非常困难。引力波是否存在，是一个极重大的理论与实验问题，科学家在确认引力波存在的问题上，采取极谨慎的态度，并继续从各方面探测引力波。此外，人们还设计出能发射引力波的装置。研究引力波，对进一步认识物质的结构和本性，促进科学技术的发展有重要的意义。

(2) 协变量子化和正则量子化

引力量子化几乎是量子化方法的练兵场，早期的尝试几乎用遍了所有已知的场量子化方法。最主要的方案有两大类：协变量子化和正则量子化。它们共同发源于 1967 年 B. DeWitt 题为 "Quantum Theory of Gravity" 的系列论文。协变量子化方法试图保持广义相对论的协变性，基本的做法是把度规张量 $g_{\mu\nu}$ 分解为背景部分 $\bar{g}_{\mu\nu}$ 和涨落部份 $h_{\mu\nu}$: $g_{\mu\nu} = \bar{g}_{\mu\nu} + h_{\mu\nu}$ ，不同的文献对背景部份的选择不尽相同，有的取 Minkowski 背景度规 $\eta_{\mu\nu}$ ，有的取量子有效作用量 (quantum effective action) 的解。这种方法和广义相对论领域中传统的弱场展开方法一脉相承，思路是把引力相互作用理解为在一个背景时空中引力子的相互作用。在低级近似下协变量子引力很自然地包含自旋为 2 的无质量粒子：引力子。

由于这种分解展开使用的主要是微扰方法，随着 20 世纪 70 年代一些涉及理论重整化性质的重要定理被相继证明，人们对这一方向开始有了较系统的了解。只可惜这些结果基本上都是负面的。1974 年，G. 't Hooft 和 M. Veltman 首先证明了在没有物质场的情况下量子引力在单圈图 (1-loop) 层次上是可重整的，但只要加上一个标量物质场理论立刻变得不可重整。12 年后 M. H. Goroff 和 A. Sagnotti 证明了量子引力在两圈图 (2-loop) 层次上是不可重整的。这一结果基本上结束了早期协变量子引力的生命。又过了十二年，Z. Bern 等人证明——除了 $N = 8$ 的极端情形尚待确定外——量子超引力也是不可重整的，从而连超对称这根最后的救命稻草也被铲除了。早期量子引力理论，即量子力学和广义相对论相结合的量子引力出现的发散困难无法消除，即不能重整化，可以说至今还没有一个十分完美的量子引力理论。但是这并未妨碍人们热情地探索引力场量子化的工作，而且还取得了相当的成功。

与协变量子化方法不同，正则量子化方法一开始就引进了时间轴，把四维时空流形分割为三维空间和一维时间 (所谓的 ADM 分解)，从而破坏了明显的广义协变性。时间轴一旦选定，就可以定义系统的 Hamilton 量，并运用有约束场论中普遍使用的 Dirac 正则量子化方法。正则量子引力的一个很重要的结果是所谓的 Wheeler-DeWitt 方程，它是对量子引力波函数的约束条件。由于量子引力波函数描述的是三维空间度规场的分布，也就是空间几何的分布，它有时被称为宇宙波函数，Wheeler-DeWitt 方程也因而被一些物理学家视

为量子宇宙学的基本方程。1967年, B.德韦特(DeWitt)应用狄拉克正则量子化方法, 对引力进行量子化。1968年, J.惠勒(Wheeler)和C.米斯纳(Misner)加以发展完善, 给出一个类似于薛定谔方程的宇宙波函数方程。这个动力学方程就是惠勒-德韦特(WDW)方程, 从此量子宇宙学兴起。后来人们把以WDW方程为核心内容的量子宇宙学称为旧量子宇宙学。

与协变量子化方法一样, 早期的正则量子化方法也遇到了大量的困难, 这些困难既有数学上的, 比如Wheeler-DeWitt方程别说求解, 连给出一个数学上比较严格的定义都困难; 也有物理上的, 比如无法找到合适的可观测量和物理态。

在建立量子引力理论的途径中, 主要出现有两种走向。一种是把量子力学只和广义相对论即引力作用结合起来, 这称为纯引力的量子理论, 或量子引力场论, 例如半量子引力、圈量子引力等属于此种。另一种是受了粒子物理标准模型的启发, 试图把广义相对论和电磁、弱及强三种作用统合起来, 形成所谓的四种作用的超统一理论, 例如超引力和超弦/M理论等属于此种。由于这两种类型的理论, 都是有关引力作用的量子理论, 所以人们把它们都称为量子引力理论。

由于WDW方程是一个泛函微分方程, 在, 就必须对宇宙波函数实施边界条件或初始条件, 而这些却是十分艰难的工作。于是人们试图运用量子引力的欧几里德路径积分变换, 这是因为此种方法在闵可夫斯基时空量子场论中是一种有效的计算技巧。量子宇宙学经过艰难的一段停滞, 1979年, S.霍金(Hawking)引进了可由欧几里德路径积分形式表示的跃迁振幅, 这种形式的量子宇宙学, 称为新量子宇宙学。在新量子宇宙学中, 主要由于宇宙边界条件的差异, 出现了哈特尔-霍金和维连金两种不同方案。1983年, J.哈特尔(Hartle)和霍金提出宇宙无边界假设, 通过引入欧几里德函数积分, 把正则量子化方法和路径积分量子化方法结合起来, 给出了合理的波函数, 从而确定了所谓宇宙的量子态。1985年, A.维连金(Vilenkin)提出宇宙隧道边界条件, 认为我们宇宙是从无(Nothing)量子隧穿效应而产生的, 波函数仅由在超空间部分的外向模所构成。无论是哈特尔-霍金的新量子宇宙学, 还是维连金的新量子宇宙学, 都给出了我们宇宙量子态的波函数, 这两种方案都有其成功和不足的。

(3) 圈量子引力真空

圈量子引力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的量子引力理论, 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哈密顿形式。根据发展正则量子引力大体上可分为朴素量子引力和圈量子引力。粗略说来, 前者发展于1986年前, 后者发生于1986年后。朴素量子引力由于存在着发散困难即不能进行重正化, 从而圈量子引力发展成为当前正则引力的代表。

基态的量子引力场是量子引力真空, 量子引力场的基态是量子引力真空态。由于作为物质存在形式的空间时间, 在一定意义上而言, 实际上就是可看作引力真空的空间时间。所以我们研究量子引力真空的时空性质, 也就是要研究在普朗克标度下真空的空间时间的物理性质。

1986年, A.阿希泰卡尔(Ashtekar)研究了A.森(Sen)提出的广义相对论引力场方程的精致形式, 这形式的方程已经表述了广义相对论的核心内容。1987年, 他给出了广义相对论的流行形式, 从而对于在普朗克标度的时空几何量, 可以进行具体计算, 并作出精确的数量性预言。这种表述是此后圈量子引力进一步发展的关键。

1990年, C.罗维利(Rovelli)和J.斯莫林(Smolin)研究得出在普朗克标度, 空间具有几何断续性, 而这些编织态, 在微观尺度上具有真空泡沫即时空泡沫的形式。1994年, 他们第一次计算了面积算子和体积算子的本征值, 得出它们的本征谱为断续而非连续的重大结论。

(4) 超引力量子真空

超引力是具有超对称性的引力理论。所谓超对称性, 是指把费米子和玻色子联系在一起的一种扩大对称性, 它同时也将内部对称性和彭加勒(Poincare)不变性联系起来。在超引力理论中, 引力是通过超对称局域化而产生的, 所以又称为定域超对称性。

1976年, D.弗里得曼(Freedman), P.纽温休泽恩(Nieuwenhuizen)和F.菲赖拉(Ferrara)等人提出超引力, 认为超对称定域化可导致超引力。1980年, P.弗里翁德(Freund)、M.鲁宾(Rubin)利用高维时空的场结构解决了高维时空如何变为四维时空和内部空间的直积这样的真空态结构。1983年, M.安瓦达(Awada)、M.达夫(Duff)和C.波普(Pope)证明了11维超引力在7维扁球上紧致化, 可给出具有 $N=1$ 超对称的真空解。1984年, I.盖姆派耳(Gampell)、P.外斯(Wess)和P.豪依(Howe)等人在10维时空中得出有三种超引力理论的结果, 其中有两类是非手征超引力, 另一类是手征超引力。但真空结构形式为 $M[4, 5] \times M[5, 5]$, 而不是 $M[4, 5] \times M[5, 6]$ 。1985年, T.鲁布(Robb)和J.泰勒(Taylor)用通常的弗里翁达鲁宾假设略为差别的方案, 首次得到了 $M[4, 5] \times M[5, 6]$ 的真空结构解。同年, 纽温休泽恩和

N.瓦奈尔 (Warner) 给出真空态结构非直积的形式。值得指出, 在超弦理论建立后, 人们知道 10 维超引力真空乃是超弦真空的特殊情况。

(5) 超弦/M 理论真空

超弦/M 理论由超弦理论和 M 理论组成, 它是当代量子引力的最佳候选者。当今量子引力除超弦/M 理论外, 还有圈量子引力、拓扑场论、欧几里得量子引力、扭量理论等。超弦/M 理论的目的, 在于提供已知四种作用即引力和强、弱、电相互作用统一的量子理论。

弦理论虽然在 20 世纪 70 年代中期, 已知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。弦理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 理论即膜理论 (90 年代后) 三个时期。

10 维超弦理论建立于 20 世纪 80 年代中期, 人们称为弦理论的第一次革命, 有五种独立微扰超弦真空。M 理论是作为 10 维超弦理论的 11 维推广, 它包含多种维数的物质实体膜 (brane), 1 维弦、二维普通膜只是它的两个特例。M 理论是 20 世纪 90 年代兴起的, 人们称为弦理论的第二次革命。M 理论的超统一真空, 把超引力的 11 维真空和五种超弦 10 维真空作为低能极限情况统一在其中。这是四种作用统一量子理论发展中十分令人鼓舞的重大突破。

对超弦/M 理论真空研究的雄心勃勃, 还在于探讨我们宇宙真正的真空结构, 即我们宇宙四种基本作用统一的、非微扰的、原初的超统一真空的具体形式。根据这个初始基态解, 人们就可以期望从第一原理来计算我们宇宙的基本参量, 从而获得我们宇宙的整体结构、创生及演化基本规律的深入认识。

在超弦/M 理论宇宙学中, 人们认为我们最初的膜世界是由永恒宇宙真空的量子涨落而来。1999 年, L.兰德 (Randell) 和 R.桑德拉姆 (Sundrum) 提出我们宇宙的一个五维膜世界模型[11], 其中空间额外维度是 7 维的, 有 6 个维度是紧致的, 剩 1 个是非紧致的。这就是说, 我们世界是 $D[3] \times R[1]$ (时间) 被嵌入在 $AdS[5]$ 中, 它的 1 个额外维度是非紧致的。2001 年, P.斯坦哈特 (Stainhart) 和 T.特鲁克 (Turok) 提出火劫/循环 (Ekpyrotic/Cyclic) 膜世界模型, 此模型认为我们宇宙是在一个高维空间中的许多 D 膜之一, 这些 D 膜彼此间有引力作用, 随机地会发生碰撞。大爆炸就是另外一个 D 膜碰撞到我们宇宙这个 D 膜的结果。

综上所述可知, 爱因斯坦在创建相对论后提出的一无所有的空间, 即原初所谓的真空概念是没有意义的论断, 空间时间是不可以脱离物质世界的真实客体而存在的东西等思想是极为深刻的, 它影响着现代物理学真空理论的发展过程。20 世纪基础物理学的真空理论, 实质上是量子的。当今量子真空理论正在蓬勃地发展, 真空是基态的量子场, 量子场的基态是真空态, 这些观念已经逐步被人们所接受。量子真空物理在实验、理论和哲学义理诸方面, 同样取得很大的进展。可以预见经过若干年的刻苦研究, 21 世纪物理学四大问题之一的真空结构困难, 是不难获得重大突破的。

空间量子化曾经是许多物理学家的猜测, 这不仅是因为量子化这一概念本身的广泛应用开启了人们的想象, 而且也是因为一个连续的背景时空看来是量子场论中紫外发散的根源。1971 年 R. Penrose 首先提出了一个具体的离散空间模型, 其代数形式与自旋所满足的代数关系相似, 被称为 spin network。1994 年 Rovelli 和 Smolin 研究了 Loop Quantum Gravity 中的面积与体积算符的本征值, 结果发现这些本征值都是离散的, 它们对应的本征态和 Penrose 的 spin network 存在密切的对应关系。以面积算符为例, 其本征值为: $A = L_p^2 \sum [J_l (J_l + 1)]^{1/2}$, 式中 L_p 为 Planck 长度, J_l 取半整数, 是 spin network 上编号为 l 的边所携带的量子数, 求和 \sum 对所有穿过该面积的边进行。这是迄今为止有关 Planck 尺度物理学最具体的理论结果, 如果被证实的话, 或许也将成为物理学上最优美而意义深远的结果之一。Loop Quantum Gravity 因此也被称为量子几何 (Quantum Geometry)。对 Loop Quantum Gravity 与物质场 (比如 Yang-Mills 场) 耦合体系的研究显示, 具有空间量子化特征的 Loop Quantum Gravity 确实极有可能消除普通场论的紫外发散。

(6) 量子引力对于黑洞热力学的研究

迄今为止对量子引力理论最具体最直接的“理论证据”来自于对黑洞热力学的研究。1972 年, Princeton 大学的研究生 J.D.Bekenstein 受黑洞动力学与经典热力学之间的相似性启发, 提出了黑洞熵的概念, 并估算出黑洞的熵正比于其视界 (Event Horizon) 面积。稍后, S.W.Hawking 研究了黑洞视界附近的量子过程, 结果发现了著名的 Hawking 辐射, 即黑洞会向外辐射粒子 (也称为黑洞蒸发), 从而表明黑洞是有温度的。由此出发 Hawking 也推导出了 Bekenstein 的黑洞熵公式, 并确定了比例系数, 这就是所谓的 Bekenstein-Hawking 公式: $S = k (A/L_p^2) / 4$, 式中 k 为 Boltzmann 常数, 它是熵的微观单位, A 为黑洞视界面积, L_p 为 Planck 长度, 它是由广义相对论和量子理论的基本常数组合成的一个自然长度单位 (大约为 10^{-35} 米)。Hawking 对黑洞辐射的研究使用的正是以广义相对论时空为背景的量子理论, 即所谓的半

经典理论，但黑洞熵的存在却预示着对这一理论框架的突破。我们知道，从统计物理学的角度讲，熵是体系微观状态数目的体现，因而黑洞熵的存在表明黑洞并不象此前人们认为的那样简单，它含有数量十分惊人的微观状态。这在广义相对论的框架内是完全无法理解的，因为广义相对论有一个著名的“黑洞无毛发定理”(No-Hair Theorem)，它表明黑洞的内部性质由其质量，电荷和角动量三个宏观参数所完全表示(即使考虑到由 Yang-Mills 场等带来的额外参数，其数量也十分有限)，根本就不存在所谓微观状态。这表明黑洞熵的微观起源必须从别的理论中去寻找，这“别的理论”必须兼有广义相对论和量子理论的特点(因为黑洞熵的推导用到了量子理论)。量子引力理论显然正是这样的理论。

在远离实验检验的情况下，黑洞熵目前已经成为量子引力理论研究中的一个很重要的理论判据。一个量子引力理论要想被物理学界所接受，必须跨越的重要“位垒”就是推导出与 Bekenstein-Hawking 熵公式相一致的微观状态数。引力量子化几乎是量子化方法的练兵场，早期的尝试几乎用遍了所有已知的场量子化方法。最主要的方案有两大类：协变量子化和正则量子化。它们共同发源于 1967 年 B. DeWitt 题为 "Quantum Theory of Gravity" 的系列论文。协变量子化方法试图保持广义相对论的协变性，基本的做法是把度规张量 $g_{\mu\nu}$ 分解为背景部分 $g_{\mu\nu}$ 和涨落部份 $h_{\mu\nu}$: $g_{\mu\nu} = g_{\mu\nu} + h_{\mu\nu}$ ，由于这种分解展开使用的主要是微扰方法，随着 70 年代一些涉及理论重整化性质的重要定理被相继证明，人们对这一方向开始有了较系统的了解。只可惜这些结果基本上都是负面的。与协变量子化方法不同，正则量子化方法一开始就引进了时间轴，把四维时空流形分割为三维空间和一维时间(所谓的 ADM 分解)，从而破坏了明显的广义协变性。时间轴一旦选定，就可以定义系统的 Hamilton 量，并运用有约束场论中普遍使用的 Dirac 正则量子化方法。正则量子引力的一个很重要的结果是所谓的 Wheeler-DeWitt 方程，它是对量子引力波函数的约束条件。由于量子引力波函数描述的是三维空间度规场的分布，也就是空间几何的分布，它有时被称为宇宙波函数，Wheeler-DeWitt 方程也因而被一些物理学家视为量子宇宙学的基本方程。

(7) 量子引力的困难

将广义相对论和量子理论相结合，形成的单一理论可以自称为自然界的完整理论。量子引力是理论物理学正在努力建立的一个理论，它包括了广义相对论和粒子物理学的标准模型。目前，这两个理论描述的是自然界中不同尺度下的性质。当物理学家们努力探索两个理论的交迭处，即同一尺度下时得出了无意义的结果，如引力(或者时空曲率)变成无穷大。

引力量子化的这些早期尝试所遭遇的困难，特别是不同的量子化方法给出的结果大相径庭这一现象是具有一定启示性的。这些问题的存在反映了一个很基本的事实，那就是许多不同的量子理论可以具有同样的经典极限，因此对一个经典理论量子化的结果是不唯一的，原则上就不存在所谓唯一“正确”的量子化方法。

其实不仅量子理论，经典理论本身也一样，比如经典 Newton 引力就有许多推广，以 Newton 引力为共同的弱场极限，广义相对论只是其中之一。在一个本质上是量子化的物理世界中，理想的做法应该是从量子理论出发，在量子效应可以忽略的情形下对理论作“经典化”，而不是相反。从这个意义上讲，量子引力所遇到的困难其中一部份正是来源于我们不得不从经典理论出发，对其进行“量子化”这样一个无奈的事实。传统的量子引力方案的共同特点是继承了经典广义相对论本身的表述方式，以度规场作为基本场量。Loop Quantum Gravity 完全避免使用度规场，从而也不再引进所谓的背景度规，因此被称为是一种背景无关(background independent)的量子引力理论。除背景无关性之外，Loop Quantum Gravity 与其它量子引力理论相比还具有一个很重要的优势，那就是它的理论框架是非微扰的。迄今为止在 Loop Quantum Gravity 领域中取得的重要物理结果有两个：一个是在 Planck 尺度上的空间量子化，另一个是对黑洞熵的计算。对于黑洞熵的计算，Loop Quantum Gravity 的基本思路是认为黑洞熵所对应的微观态由能够给出同一黑洞视界面积的各种不同的 spin network 位形组成的。量子引力的另一种极为流行的方案是超弦理论(Superstring Theory)。超弦理论的目标是统一自然界所有的相互作用，量子引力只不过是超弦理论的一个部份。超弦理论的前身是二十世纪六十年代末七十年代初的一种强相互作用唯象理论。

第一次超弦革命——J. H. Schwarz——和 M. B. Green 等人一起——研究了超弦理论的反常消除(anomaly cancellation)问题，由此发现自洽的超弦理论只存在于十维时空中，而且只有五种形式，即：Type I, Type IIA, Type IIB, SO(32) Heterotic 及 E8 × E8 Heterotic。第二次超弦革命——对各种对偶性及非微扰结果的研究。超弦理论对黑洞熵的计算利用了所谓的“强弱对偶性”(strong-weak duality)，即在具有一定超对称的情形下，超弦理论中的某些 D-brane 状态数在耦合常数的强弱对偶变换下保持不变。利用这种对称性，处于强耦合下原本难于计算的黑洞熵可以在弱耦合极限下进行计算。在弱耦合极限下与原先黑洞的宏观性质相一致的对应状态被证明是由许多 D-brane 构成，对这些 D-brane 状态进行统计所得到的熵和 Bekenstein-Hawking 公式完全一致——甚至连 Loop Quantum Gravity 无法得到的常数因子也完全一致。由

于上述计算要求一定的超对称性，因此只适用于所谓的极端黑洞 (extremal black hole) 或接近极端条件的黑洞。对于非极端黑洞，超弦理论虽然可以得到 Bekenstein-Hawking 公式中的正比关系，但与 Loop Quantum Gravity 一样无法给出其中的比例系数。

Loop Quantum Gravity 的成果主要局限于理论的运动学方面，在动力学方面的研究却一直举步维艰，直到目前人们还不清楚 Loop Quantum Gravity 是否以广义相对论为弱场极限，或者说 Loop Quantum Gravity 对时空的描述在大尺度上是否能过渡为我们熟悉的广义相对论时空。超弦理论的微扰展开逐级有限，虽然级数本身不收敛，比起传统的量子理论来还是强了许多，算是大体上解决了传统量子场论中的发散困难。在广义相对论方面，超弦理论可以消除部分奇点问题 (但迄今尚无法解决最著名的黑洞和宇宙学奇点问题)。Loop Quantum Gravity 与超弦理论目前还是两个独立的理论，彼此之间唯一明显的相似之处是两者都使用了一维的几何概念作为理论的基础。如果这两个理论都反映了物理世界的某些本质特征，那么这种相似性也许就不是偶然的。未来的研究是否会揭示出这种巧合背后的联系现在还是一个谜。

在量子引力情形下，认识论问题变得更加尖锐。许多学者认为，经典广义相对论的时空观念，诸如拓扑空间、连续流形、时空几何和微观因果性等都不能应用到量子引力。英国学者艾沙姆(C. J. Isham)指出：“人们应当怀疑量子理论应用到引力的可能性问题，尽管流行的量子引力研究或多或少采用了标准的量子理论研究方式，但存在着某种先验论的危险性。时空的经典想法是不假思索地运用到量子理论中去的，这会导致范畴类型上的差错。当人们试图应用量子理论到量子引力中去时，这些概念是不适合的。”

8、相对论与量子力学统一的意义及展望

物理学理论的逻辑总是决定着它的发展史的逻辑结构，尽管它受社会和物理学家心境的制约。物理学发展的内在动力是由其理论的逻辑力量推进的。当代物理学的基础，相对论和量子论，是历史上物理学的逻辑延伸，又是未来物理学的逻辑起点。玻耳兹曼认为：从微观上看，对于一个系统的状态的宏观描述是非常不完善的，系统的同一个宏观状态实际上可能对应于非常非常多的微观状态，而这些微观状态是粗略的宏观描述所不能加以区别的。

(1) 相对论与量子力学统一的意义

联合国教科文组织在《1988年世界科学报告》中指出：“相对论和量子理论是20世纪的两大学术成就，遗憾的是这两个理论迄今为止被证明是对立的。”两朵乌云换来的是百年无休止的论战，最著名要数爱因斯坦和波尔关于量子理论完备性的世纪争论【5】，遗憾的是随着两位物理学巨匠的离去，科学共同体对量子力学和相对论的质疑声也渐渐消失。相对论和量子力学作为物理学的基础，它们是现代物理学的两大柱石。相对论和量子力学的结合，不仅使物理学本身的发展日新月异，而且也使物理以外的其他自然科学改变了面貌。尽管在它们的引导下，在完善物理学理论和发展技术两方面我们都取得了惊人的成就，但是当今的物理学家们并没有上个世纪末的物理学家们的那种感觉，即物理学的大厦已经临近完工，而是心存困惑地感到现代物理学的概念基础似乎不太稳固。这突出地表现在不断被揭示出来的相对论和量子力学之间不协调的诸方面。实际上，关于相对论和量子力学概念基础的协调和统一问题，一直被物理学家们视为物理学的最基础的问题。

我国一位著名理论物理学家曾表示：“从五十年代开始广义相对论引力论工作者用不同的条件和数学方法发表了数以百计的场方程准确解的论文。但是，作者们自己也不得不承认这些解的绝大多数和物理现象没有关系。”如果说目前尚有 100 道物理难题困扰着人类；然而比起其他 99 道物理难题来，量子力学同相对论的协调问题乃是所有问题的根本。此问题实乃 20 世纪人类留给 21 世纪物理学的第一朵“乌云”。一位学者说：现在的物理学家应该是这样的一些人，星期一、三、五研究量子理论，星期二、四、六研究引力相对论，星期日就去向上帝祈祷。让别人，最好是他自己能把量子理论与相对论结合在一起。Einstein 于 1946 年就指出：“迄今为止想把量子论和相对论融合起来的一切努力都遇到了抵制”。【2】30 余年后惠勒再次指出：“我们常说，物理学中最大的问题是协调量子论和相对论。我现在更明显地说：量子论和相对论根本不能协调”。【3】霍夫曼则说：“虽然在我们寻求知识当中，这两个理论一起作出了最深刻的进展，然而它们必将彼此为敌，要等到一个更加有力的理论把这两个理论都征服了，它们的根本分歧才会得到解决。新理论会消除我们现在煞费苦心获得的关于空间、时间、物质和辐射及因果性等幻想。”【4】也有人说：量子理论同相对论之间，有着深刻的，尖锐的，灾难性的矛盾。妥善解决量子理论同相对论之间的问题，应该是蕴含了一场科学的革命。

(2) 相对论与量子力学统一的展望

(1) 该理论能够给其理论内容范围内的观察事实提供解释。理论的成熟程度与能解释的观察事实的全面性、准确性、无歧义性成正比。如果该理论不能给其理论内容范围内的观察事实提供解释，那么这个

理论就毫无意义了。如果理论的框架十分庞大、外表十分华丽，而能解释是事实并不多，理论的成熟度显然不够。

(2) 为建立该理论的公理、假设和参量是充分的和必要的。因为公理和假设是理论的基础，因此理论的成熟程度与公理和假设的严密程度成正比，与公理、假设和可调节参量的数量成反比。

(3) 该理论应该是一个逻辑系统。不可存在内部逻辑混乱、自相矛盾之处，是自洽和完备的。因为数学是表现逻辑的最好方法，所以理论应尽可能数学化。这里应注意数学化的目的是使该物理理论的逻辑系统严密化、简明化和可操作化，而不是使物理数学化，来个喧宾夺主，可是现在的物理理论却不遗余力地力图走这条路，以至于用数学的结果代替物理结论，认为只要数学上可靠的结果，必然是物理上可能的结果。

(4) 该理论应该具有预言性和可证伪性。即不但能够提出还未被观察到的可能性，还可以具有被质疑的余地。预言的证实和准确度是理论成熟与否的重要标志之一。可证伪性是包含了预言的可重复性这一必要条件在内，所以是该理论能够经得起考验的科学标志。没有预言性和可证伪性的理论都不是科学理论。

(5) 物理理论必须同时是可定量的科学。理论给出的计算值与观察量的吻合程度是理论质量的重要标志。物理理论是严密的科学理论，它只能允许理论上肯定存在（如测不准关系）的偏差和测量仪器限制的及环境条件所造成的技术性偏差。

(6) 一个成熟的理论还应具有可扩延性，即该理论与相关的理论可以在一定的边界条件下相互自然的衔接，如果能够通过推广甚至延伸为相关的理论的，则更为优良。相对论和量子力学相对于经典物理都具有这样的特点，但是它们两者之间却不能满足可扩延性。

Einstein 开创了一个物理学的新时代——Einstein 时代，这个时代的特征是：物理学远离人们的常识。相对论的问世完全改变了物理学家们的思想方法，如果说过去人们相信仅仅靠勤奋、耐心和严谨就能在物理学领域获得成功，那么，现在人们却相信要在这里获得关键性的突破，只有具有非凡的想象力才能胜任。于是这个时代的一流的物理学家们的想象力一个比一个更丰富，玻尔、海森堡等量子物理学家们所提出的“匪夷所思”的“新颖观念”，甚至连始作俑者 Einstein 都拒绝接受。作为经典理论的狭义相对论是否也应该服从量子力学的原则要求？如何满足这种要求、从而全面实现物理学两大台柱在“最深层意义上的融合”（爱因斯坦语）？

量子论在根本改变牛顿物理关于观测者与被观测者之间关系的假设时，顺从地接受了牛顿的背景时空观；在广义相对论中，时空的观念彻底变更了，但是牛顿关于观测者与被观测者之间关系的观点却保留了下来。

在 Einstein 时代，物理学一直朝越来越“匪夷所思”的方向发展，新的发展方向在这个时代的初期确实成绩斐然，日新月异的“新颖观念”让人们目不暇接，使得物理学成了高高在上、玄之又玄的“天书”，其他领域的科学家们只可仰望而不可接触；另一方面，取得物理学的最新成果的实验也越来越昂贵，只有富甲天下的国家才敢问津。物理学家长期以来认为，在众科学中独领风骚的物理学本该如此。但到了今天，这个发展方向似乎已经把物理学引向尽头，以至有人断言：“曾经风光无限的物理学现在正在走向衰微，沦为边缘学科”。近年来，越来越多有识之士已经意识到物理学需要一场新革命。所谓的科学革命就是一种新范式对旧范式的取代，比如爱因斯坦的相对论力学对牛顿力学，普朗克的能量量子化对传统的能量连续论，这种范式的替代必然改变人们对自然世界的认识，不过新范式并不意味着它们就一定是正确和先进的。作为近代科学基础的伽利略动力学和牛顿力学，它们注重的是导致物理现象的“力”因素，现代物理试图从能量的层次来解释自然现象，这无疑是一个崭新的角度。

300 多年前，伟大的物理学家、数学家牛顿把地球引力和天体引力看成是一种力，统一了地球引力和天体引力，后来麦克斯韦统一了电力和磁力，Einstein 又统一了惯性力和引力。

目前自然界已知的四种基本力，80 多年来，两大理论在对这些力量的描述中显示了威力：即广义相对论之于万有引力，量子力学之于其余，这两大理论的论述都非常准确，而且都从未被证伪。但这恰恰就是爱因斯坦难题之所在，因为它们对物理学的基本概念，如力、空间、时间以及物质等，各自有着完全不同的解释。这是爱因斯坦所不能容忍的。

通过场作用于物体上的力有四种，它们是引力、电力、核力和弱力，其中电力和引力是长程力，它们均与作用距离的平方成正比，但它们作用强度相差 10^{37} 倍。核力和弱力是短程力，其作用距离分别是在 10^{-15} 米和 10^{-17} 米以内。关于这四种力间是否有内在联系问题，物理学家对此曾提出许多理论，如大统一理论、超统一理论等等，但都因存在种种问题而不能令人接受。对四种力场进行统一的目的是要寻求四种力场本质的共性，就是探索物质世界本质的努力，为此物理学家进行了不懈的努力。300 年来，物理学的统一进程给人类带来了累累硕果，因此我们绝不能止步不前。物理学的一个终极目标（爱因斯坦曾经长期追求），便是

将包括引力在内的四种力全部统一起来。但是至今还没有人提出过可以达到这一目标的令人信服的方法。有人想按照描述其他三种力的理论来描述引力，但是都失败了。大多数物理学家认为，必须提出崭新的思想才能把引力包括在自然界的统一论之中。

我们常说，物理学中最大的问题是协调量子论和相对论。董光璧说：量子论和相对论根本不能协调，除非在这样一种观念框架中，即在其中没有这两者，没有定律，并且更重要的是没有时间。然而在最后，量子论和相对论又都会作为一种近似而出现。韦斯科夫：场是什么？场一开始是作为表达粒子间力的一种形式而提出来。威切曼：在线度 10^{-100} 厘米的区域内，场的意义是什么？量子力学的不确定原理，使真空中充满虚实粒子对，它们具有无限大的能量，按照相对论就应该有无限大的质量，进而产生无限大的引力，宇宙就会坍塌成一个点，但实际宇宙并未坍塌。我们的科学被划分成了一个相对孤立的体系，并不断地进行继续的分化，看起来科学之树越来越枝繁叶茂，但同时也越来越繁琐，越来越孤立。实验和理论的对立统一作为科学发展的内在动力是根本的，也是显而易见的。但是世纪之交的物理学革命表明，各理论体系之间的对立统一也是科学发展的一种不可忽视的内在动力，它有时也会导致新概念或新理论的提出。客观世界是统一的，作为反映客观世界运动规律的理论必然具有某种内在的联系。这是从表面上的对立入手，追求本质上统一的理论的客观基础。作为演绎前提的基本概念和基本假设变得愈来愈抽象，愈来愈远离感觉经验。仅仅通过实验，用构造性的努力去发现真实定律是相当困难的，甚至是不可能的。着眼于各理论体系之间的对立统一，往往能创出新路。由于种种条件的限制，有关实验在一定的历史时期内不可能实现或一时难以完成。如果要等实验与现有科学理论发生尖锐矛盾时再立足于实验事实进行研究，势必大大延缓科学发展的进程。在这种情况下，从旧有理论体系之间的矛盾入手，往往能取得突破。实验由于设备复杂、要求精度很高等原因，其他人往往难以重复，这样便难于及时得到科学界的公认和受到应有的重视。科学家(包括实验者本人)对新实验的认识有一个曲折的过程，特别是那些触及传统观念的实验，其深刻意义往往需要很久才能被揭示出来。

参考文献:

- 【1】 《Einstein 的文集》第 1 卷，商务印书馆 1976 年，许良英、范岱年编译，第 485 页。
- 【2】 H.Goldstein, Classical Mechanics, chap. 6, Addison-Wesley, Cambridge, Mass, 1953.
- 【3】 (美) 惠勒著 物理学和质朴性 安徽科学技术出版社 1982 年。
- 【4】 B·霍夫曼著 马元德译 量子史话 科学出版社 1979 年。
- 【5】 EINSTEIN A, PODOLSKY B, ROSEN N. Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?[J]. Physical Review, 1935, 47 (10): 777~780.

第三章 统一场论的进展

1、强相互作用、弱相互作用与电磁相互作用的统一

既然弱作用和电磁作用在非阿贝尔规范理论基础上统一起来了，而且强相互作用也是一种非阿贝尔规范作用，一个诱人的想法是它们能否在一个更大的非阿贝尔规范理论下统一起来，这就是所谓大统一理论的基本想法。最简单的大统一理论是 1974 年乔奇和格拉肖提出的大统一理论模型。20 世纪 70 年代末到 80 年代初，物理学家试图把强、弱、电三种力场进行统一，这种理论称为大统一理论，这个理论未获得成功，在此基础上物理学家们又提出了超对称的大统一理论，并获得了满意的结果。(笔者注：其实并没有统一，因为对于同种电荷电磁力相互排斥，而强相互作用互相吸引。)

就在弱电统一理论轰轰烈烈地进行的同时，量子色动力学研究也是紧锣密鼓。早在上世纪 50 年代末，日本的坂田昌一领导的小组就提出强子存在着 SU(3) 对称性。上世纪 60 年代初，对称性理论吸引了粒子物理界浓厚的兴趣。1964 年盖尔曼提出强子由夸克构成的设想。一系列实验证实了强子的夸克结构，并在此基础上建立起描写强相互作用的量子色动力学。按照这一理论，夸克带有两种量子数，分别称为味道和颜色。当然，它们与通常的味道和颜色概念毫无共同之处，夸克的味道和颜色只是被用于区分不同种类和状态的夸克。根据目前的实验，共有六种不同味道的夸克，每种味道的夸克有三种不同的颜色。各种颜色夸克之间存在强相互作用，这是一种 SU(3) 规范作用，传递规范作用的规范粒子称为胶子。规范理论严格地规定了强相互作用的耦合形式。这种非阿贝尔规范作用有十分奇特的性质：耦合强度随着能量增高而减弱，高能粒子间的作用变得很弱，可用微扰理论来计算，称为渐近自由现象，这也在实验中被观测到；相反，随着能量降低，耦合强度不断增强，以致要把带颜色的夸克分割开需要无穷大的能量，称为颜色禁闭现象。因为夸克带有颜色，作为规范粒子的胶子也带有颜色，所以目前实验无法直接观测到单独的夸克和胶子。

现代物理学认为：能量标度上升，对称性增高，各种力都走向同一，物理学趋向统一。所以大统一理论(弱、电、强力三者的统一)以及四种力(弱、电、强、引力)的统一，都必然是在极高能标下完成的；能

量标度下降, 对称破缺产生, 四种力(弱、电、强、引力)都逐渐分离, 表现不同行为。世界变得复杂, 丰富多彩。超低能低温下有五花八门的现象, 其实只是对称破缺的表面现象, 我们眼睛观察到的其实都非真相, 它们在高能标下其实只有一个本质。量子场论已经将电磁力、弱力和强力统一起来, 证明了它们不过是微观的量子薄雾所产生的不同影响的效果, 在极高温度和极小尺度下它们的表现将会完全相同。想像两条坐标轴, 横坐标是温度, 纵坐标是力的强度。随着温度的升高, 三个力会均会平滑的增大或减小, 并且最后交于一点——可是引力并不与这一点相交。此外, 物理学家还发现, 如果将计算精度提高到一定程度后, 原本相交于一点的三个力其实也是不相交的。

现代科学认为, 自然界由很少的几条规则支配, 而存在着无限多种这些支配规律容许的状态和结构。任何尚未发现的力, 必将是极微弱的, 或其效应将受到强烈的限制。这些效应, 要么被限制在极短的距离内, 要么只对极其特殊的客体起作用。

2、量子色动力学的进展与其局限性

最近, 日本物理学家首次从量子色动力学中精确计算出核子之间的强排斥相互作用, 这意味着开启了理论核物理研究的新纪元。该研究成果发表在近期的英国《自然》杂志上。所谓核子间的强排斥力, 主要是指当原子核中的核子之间距离越来越小时, 其引力变成的巨大排斥力。核子不是最基本的粒子, 而是由更小的粒子—夸克组成。半个多世纪以来, 人类对原子核的认知主要来源于实验。核物理学家通常利用著名的量子色动力学理论来描述原子核内部夸克之间的相互作用, 量子色动力学解释了许多核物理现象, 但科学家对原子核性质的研究仍然是建立在经验基础上的, 一直未能从量子色动力学中导出核子之间的强排斥力。近年来, 科学家利用格点量子色动力学来描述核子之间的强力作用发现, 在任何量子问题中, 夸克和胶子不是一个确切的粒子, 而是一种场。为了研究夸克场和胶子场的运动, 计算核子的性质, 科学家在时空中建立一种 4 维立方晶格, 利用大功率的计算机来计算核子之间的强力, 并取得了一系列重要研究成果。日本研究人员正是在上述研究方向上获得了新的突破。研究人员计算了用 6 个分布很近的夸克组成的量子色动力学方程, 在研究了 2 个核子的相对分布后, 获得了核子之间的相互作用与距离之间的关系曲线。非常重要的一点, 该计算中使用了 4 个毫微米大的、能够放置 2 个核子的格点。

新研究成果的主要成就在于: 以前用实验描述的有关核子间的相互作用都可以从这些计算中得到再现, 也与实验结果能很好吻合, 并首次从量子色动力学中导出了核子间强核排斥力的存在。这意味着开辟了理论核物理学研究的新篇章。研究人员指出, 上述成果可使物理学家重新检验以前通过实验获得的原子核的性质, 并发现新的现象, 也可能因此建立一种更新、更简单的核现象理论。

另外, 这一成果对天体物理学研究有重要意义。利用精确的核作用理论能够更准确地计算出宇宙中中子星的大小, 解释超新星的爆炸机理, 进一步研究早期宇宙的物质形态, 以及银河系的形成等宇宙演化问题。

(1) 该理论能够给其理论内容范围内的观察事实提供解释。理论的成熟程度与能解释的观察事实的全面性、准确性、无歧义性成正比。如果该理论不能给其理论内容范围内的观察事实提供解释, 那么这个理论就毫无意义了。如果理论的框架十分庞大、外表十分华丽, 而能解释是事实并不多, 理论的成熟度显然不够。当前的两个“标准模型”(宇宙学标准模型理论和粒子理论标准模型)就存在这样的问题, 仅仅是因为“市面”上还没有比它们更好的理论, 所以才获得“标准”的美名。说明它们仍然需要进一步改良和发展。

(2) 为建立该理论的公理、假设和参量是充分的和必要的。因为公理和假设是理论的基础, 因此理论的成熟程度与公理和假设的严密程度成正比, 与公理、假设和可调节参量的数量成反比。粒子理论的基本假设就不够严密, 它以同位旋不变性这个假设为重要前提, 但是事实上同位旋不是一个好的量子数, 所以 QCD 中的同位旋和 SU(3)其实是人为塞进去的, 然后硬是与 SU(2) \times U(1)结合起来构造出的理论。标准模型明显的存在假设和可调节参量过多(据他们自己承认多达 20 个, 但是事实上不止, 因为轻子和夸克质量参数已达 12 个, 4 种规范场量子有中间玻色子、光子、胶子和引力子也达 13 个加上黑格斯子共达 23 个, 加上不计精细结构常数的耦合强度系数有 3 个, 还有混合角等参数至少 4 个, 因此参量多达 30 个以上)的问题。尽管这样, QCD 和其标准模型仍然解释不了多少事实, 所以 QCD 和标准模型事实上是相当不成熟的理论, 只是因为参与建造的权威非常多, 于是就黄袍加身罢了。

(3) 该理论应该是一个逻辑系统。不可存在内部逻辑混乱、自相矛盾之处, 是自洽和完备的。因为数学是表现逻辑的最好方法, 所以理论应尽可能数学化。这里应注意数学化的目的是使该物理理论的逻辑系统严密化、简明化和可操作化, 而不是使物理数学化, 来个喧宾夺主, 可是现在的物理理论却不遗余力地力图走这条路, 以至于用数学的结果代替物理结论, 认为只要数学上可靠的结果, 必然是物理上可能的结果。

(4) 该理论应该具有预言性和可证伪性。即不但能够提出还未被观察到的可能性, 还可以具有被质疑的余地。预言的证实和准确度是理论成熟与否的重要标志之一。可证伪性是包含了预言的可重复性这一必要

条件在内，所以是该理论能够经得起考验的科学标志。没有预言性和可证伪性的理论都不是科学理论。超旋理论提出了存在大量（至少与已知的一样多）粒子的预言。可是一个也观察不到，因此也可以说它已经是被证伪了的理论。

(5) 物理理论必须同时是可定量的科学。理论给出的计算值与观察量的吻合程度是理论质量的重要标志。物理理论是严密的科学理论，它只能允许理论上肯定存在（如测不准关系）的偏差和测量仪器限制的及环境条件所造成的技术性偏差。然而粒子理论的标准模型却视电磁质量差这个这个明显的事实于不顾，想当然的设定它为电磁作用的后果，以同位旋不变为基础，洋洋洒洒地建立起一套理论来，在数学方法上看似十分严密，但是岂能因为数学的严密就必然能构成严密的物理理论，因为事实上粒子理论离开给出完整的质量谱还远远着呢。

(6) 一个成熟的理论还应具有可扩展性，即该理论与相关的理论可以在一定的边界条件下相互自然的衔接，如果能够通过推广甚至延伸为相关的理论的，则更为优良。相对论和量子力学相对于经典物理都具有这样的特点，但是它们两者之间却不能满足可扩展性。

量子色动力学解释了强相互作用的一些实验现象，但也还存在着许多困难。例如在低能情况下耦合强度较强时，如何按照这理论作外微扰计算问题，又如颜色禁闭性如何从理论上作严格的论证等问题。

3、大统一理论的困难

著名的物理学家沈志远提出时空是不连续的吗？20世纪物理学流行的名词是“量子化”，能量、动量、角动量等物理量都是量子化的。量子场论一次量子化还不够，再来个二次量子化。几十年来，物理学家提出各种版本的“万物之理”（统一场论）：弦论、圈论、旋子论、扭子论、时空非互易论等，绝大多数基于时空量子化。认为时间和空间都具有最小单元——普朗克时间（ 10^{-43} 秒）和普朗克长度（ 10^{-35} 米）。问题出在他们认为比普朗克时间和普朗克长度更小的时间和空间根本不存在，从而否认时空单元具有内涵。著名圈论研究者斯莫林在专论《时间与空间是什么》的书中强调时间和空间的离散性而否认其连续性，认为连续空间只是“幻觉”（illusion）。在他看来这是通向统一场论的必由之路。这种观点在统一场论界具有代表性。否认连续性偏离量子论主旨。量子化引入离散的量子，但并不否认连续性。以电磁场为例，其能量以光子为单元是离散的，但空间中的电磁场和电磁波却都是连续的。而且正是对连续的电磁场作傅里叶分析，才在封闭空间中得出离散能量谱，在开放空间中则得出连续能量谱。

大统一理论把夸克和轻子看成一种粒子的不同状态，用数学的话来说，大统一理论把夸克和轻子填在同一线性表示里，通过SU(5)规范作用把它们联系起来。强相互作用、弱相互作用和电磁相互作用在非常高的能量（百万亿倍质子的静止能量级，质子静止能量约为10亿电子伏特）下统一成一种SU(5)规范相互作用。随着能量下降，通过黑格斯场的第一次破缺，描写强相互作用的SU(3)对称性和描写弱电相互作用的SU(2)×U(1)对称性分开了。能量继续下降，在100倍质子静止能量量级，黑格斯场发生第二次破缺，电磁作用和弱作用又分开了，形成目前实验观测到的三种相互作用。在大统一理论中，夸克和轻子可以通过SU(5)规范场相互转化，原则上质子不再是稳定的，它可能衰变成介子和轻子。尽管理论预言质子衰变的寿命非常长，平均寿命约为 10^{31} 年，但是质子不稳定造成原子核不稳定，由原子分子构造起来的物质都将是不稳定的。80年代初以来，人们密切注视着实验的发展，但是实验没有观测到大统一理论所预言的质子衰变现象。当然这类实验比较难做，有很强的背景干扰（如宇宙射线干扰），目前还有人在不断地改进设备和方法，努力寻找质子衰变的事例，现在人们公认的实验结果是质子的平均寿命大于 10^{32} 年，所以目前的实验不支持SU(5)大统一模型。

强、弱、电三种相互作用并未得到真正的统一，标准模型也只是一个唯象的理论，其中含有十几个可调参数、任意性太大。物理学家希望，真正的统一方案应该用一个单群来描述三种相互作用的对称性、并且在理论中只出现一个耦合常数来描述相互作用强度，更具体一些说，三种相互作用具有不同的强度，这只是在低能量情况下的行为、是对称性发生破缺的结果。而在更高的能量标度上，三种相互作用统一成为一种力，只有一个作用强度。就像是麦克斯韦方程把电力和磁力统一成为一种电磁相互作用。

标准模型(Standard Model)是几代物理学家辛勤努力的结果。标准模型用来解释宇宙中最基本的组成粒子以及其间的交互作用力，现在物理学家们认为物质粒子共有六种夸克和三种轻子；物质粒子间的作用力有四种：电磁力、万有引力、强相互作用力和弱相互作用力。标准模型中不包括引力。目前看来，标准模型似乎是很完善了，但是标准模型不能解释如下的基本事实：无论是核裂变还是核聚变，都会产生大量的中子、中微子和伽马光子（现在的许多中微子的研究就在核反应堆附近进行）。这就是说，物质中有中子、中微子和伽马光子，我们知道，中微子是一种神秘的宇宙粒子，具有不可思议的极强的穿透能力，能够自由地穿过墙壁、山脉、甚至地球与其他行星。物理学家估计，中微子能够自由穿透厚度比地球到太阳的距离还高出几十

亿倍的铁板。如果有数光年厚的一个铅做成的壁垒的话，中微子也能从容穿过。这就是说，中微子几乎不同物质发生相互作用。中微子既在物质中存在，但一旦离开了物质，又几乎不再同物质发生相互作用。这是为什么？既然中微子在物质中存在，那么我们要问：中微子为什么能够在物质中存在？换句话说，中微子是被何种粒子的何种作用力囚禁在物质之中的？标准模型不能解释，因为标准模型中不包含囚禁中微子的力。至于伽马光子，同样的问题仍然存在。伽马光子既存在于物质中，又几乎不同任何物质产生相互作用。伽马光子只能感受巨大的引力，但是标准模型中不包括引力。即使标准模型中包括引力，对伽马光子来说也没有什么用处，因为目前已知的物质粒子的静止质量根本不能提供足以囚禁伽马光子的极其巨大的引力。既然伽马光子在物质中存在，那么我们要问：伽马光子为什么能够在物质中存在？换句话说，伽马光子是被何种粒子的何种作用力囚禁在物质之中的？标准模型不能解释，因为标准模型中不包含囚禁伽马光子的力。

下面是肖军先生的推导：我们知道，电场强度 \vec{E} 等于电势 φ 的负梯度

$$\vec{E} = -\nabla\varphi \quad (1)$$

并满足场方程

$$\nabla \cdot \vec{E} = \rho / \varepsilon \quad (2)$$

把式 (1) 代入式 (2) 知，电势 φ 满足方程

$$\nabla^2\varphi = -\rho / \varepsilon \quad (3)$$

由此可求出点电荷源 q 在无界空间中所激发的电势 φ 为

$$\varphi = q / 4\pi r \quad (4)$$

式中 r 是场点 P 到源电荷 q 的距离。

电势 φ 的绝对值是没有物理意义的，有物理意义的是场点 P 处电势相对参考点 P_0 的电势差，也就是把单位电荷从参考点 P_0 处移至到场点 P 处，电场 \vec{E} 对单位电荷所做的功，即

$$V = \int_P^{P_0} \vec{E} \cdot d\vec{\ell} = \left(1 - \frac{r}{r_0}\right)\varphi \quad (5)$$

式中 r_0 是参考点 P_0 到源电荷 q 的距离。以往人们选取 $r_0 \rightarrow \infty$ ，从而得到 $V = \varphi$ ，可以肯定这是错误的，因为 V 是有物理意义的，它在 $r = 0$ 时存在有无穷大奇点，这在物理上是不可能的。

究竟应当怎样选取 r_0 呢？不妨我们假设 r_0 已经选定，并令

$$e^{-\lambda(r)} = 1 - \frac{r}{r_0} \quad (6)$$

其中 $\lambda(r)$ 为肖军函数。式 (5) 则可写成形式为

$$Ve^{\lambda(r)} = \varphi \quad (7)$$

于是，由式 (3) 知

$$\nabla^2 [Ve^{\lambda(r)}] = -\rho / \varepsilon \quad (8)$$

若令 $x = 1/r$ ，则因

$$\nabla^2 = \frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left(r^2 \frac{d}{dr} \right) = x^4 \frac{d^2}{dx^2}$$

由 (8) 式则可得到一个变系数非齐次线性方程

$$V''(x) + 2\lambda'(x)V'(x) + [\lambda''(x) + \lambda^2(x)]V(x) = -(\rho/\varepsilon)x^{-4}e^{-\lambda(x)} \quad (9)$$

这就是四种场的统一方程，它的通解为

$$V(x) = C_1 u_1(x) + C_2 u_2(x) + Cu(x) \quad (10)$$

式中 C_1 、 C_2 和 C 是由实验确定的常量： $u(x)$ 是非齐次线性方程 (9) 的一个特解； $u_1(x)$ 和 $u_2(x)$ 是齐次线性方程

$$V''(x) + 2\lambda'(x)V'(x) + [\lambda''(x) + \lambda^2(x)]V(x) = 0 \quad (11)$$

的两个线性无关的解。下面就分别来确定 $u_1(x)$ 、 $u_2(x)$ 和 $u(x)$ 的数学式：

1. 1 $u_1(x)$ 的确定

设

$$u_1(x) = e^{\int y dx} \quad (12)$$

式 (11) 则可写成形式为

$$y' = -[y^2 + 2\lambda'(x)y + \lambda''(x) + \lambda^2(x)]$$

$$= -[y + \lambda'(x)]^2 - \lambda''(x) \quad (13)$$

若设

$$t = y + \lambda'(x) \quad (14)$$

式 (13) 又可写成形式为

$$y' = -t^2 - \lambda''(x) \quad (15)$$

对式 (14) 求导，然后代入式 (15) 中，则知

$$t' = -t^2 \quad (16)$$

由此可解出

$$t = \frac{1}{x} \quad (17)$$

也就是有 $t = r$ ，把式 (17) 代入式 (14) 知

$$y = \frac{1}{x} - \lambda'(x) \quad (18)$$

于是，由式 (12) 可得到

$$u_1(x) = e^{\int \left[\frac{1}{x} - \lambda'(x) \right] dx} = x \exp[-\lambda(x)] \quad (19)$$

1. 2 $u_2(x)$ 的确定

由于 $u_1(x)$ 是方程 (11) 的一个非零解，所以，在 $x \geq \xi$ 时，还应有解

$$u_2(x) = u_1(x) \int_{\xi}^x e^{-\int_{\xi}^x 2\lambda'(t) dt} \cdot \frac{dx}{[u_1(x)]^2} \quad (20)$$

$$u_2(x) = \left(\frac{x}{\xi} - 1 \right) \exp[-\lambda(x) + 2\lambda(\xi)] \quad (21)$$

把 (19) 式代入 (20) 式中，即可得到

$$W(x) = \begin{vmatrix} u_1(x) & u_2(x) \\ u_1'(x) & u_2'(x) \end{vmatrix} = e^{-2[\lambda(x) - \lambda(\xi)]} \neq 0 \quad (22)$$

易验证，伏朗斯基行列式

这表明上面导出的 $u_1(x)$ 和 $u_2(x)$ 确实是方程 (11) 在 $x \geq \xi$ 情形时的两个线性无关的解。在 $x < \xi$ 情

形时, 其 $u_2(x)$ 应恒等于零。

1.3 $u(x)$ 的确定。方程 (11) 是方程(9)在 $\rho = 0$ 情形时的结果, 对于 $\rho \neq 0$ 情形, 方程 (9) 还存在有一个特解 $u(x)$, 若取

$$\rho = -k^2 \varepsilon V e^{\lambda(x)} \quad (23)$$

由式(9)知, $u(x)$ 是非齐次常微分方程

$$V''(x) + 2\lambda'(x)V'(x) + [\lambda''(x) + \lambda^2(x)]V(x) = k^2V/x^4 \quad (24)$$

的一个特解。利用待定系数可得到

$$u(x) = x \exp[-k/x - \lambda(x)] \quad (25)$$

把式 (19)、(21)、(25) 代入式 (10) 中, 即可得到电场对单位电荷所做的功在 $x \geq \xi$ 情形时, 有

$$\begin{aligned} V &= \left\{ C_1 x + C_2 \left(\frac{x}{\xi} - 1 \right) \exp[2\lambda(\xi)] + Cx \exp(-k/x) \right\} \exp[-\lambda(x)] \\ &= V_e + V_r + V_s \end{aligned} \quad (26)$$

在 $x < \xi$ 情形时, 因 $u_2(x) = 0$, 有

$$V = \{C_1 x + Cx \exp(-k/x)\} \exp[-\lambda(x)] \quad (27)$$

很明显, 电场 \vec{E} 对单位电荷所做功相对 x 是非线性的, 它可分解为: (a) 库仑电场所做的功:

$$V_e = C_1 x \exp[-\lambda(x)] = C_1 \frac{1}{r} \exp[-\lambda(r)] \quad (28)$$

$$(c) \text{核力场所做的功: } V_s = Cx \exp[-k/x - \lambda(x)] = C \frac{1}{r} \exp[-kr - \lambda(r)] \quad (29)$$

至此我们把电力、核力统一到方程 (9) 中, 其力的表达式分别是:

$$F_e = \frac{\partial V_e}{\partial r} = -C_1 \left(\frac{1}{r^2} + \frac{\lambda'(r)}{r} \right) \exp[-\lambda(r)] \quad (28-1)$$

$$F_s = \frac{\partial V_s}{\partial r} = -C \left(\frac{1}{r^2} + \frac{k}{r} + \frac{\lambda'(r)}{r} \right) \exp[-kr - \lambda(r)] \quad (29-1)$$

从马克思主义哲学看, 承认有一个绝对统一方程, 就是承认一切质的差异都可归化为量的差异, 而这必然推出物质都由“同一的最小粒子构成”的荒谬结论。这种错误见解在恩格斯眼中, 实质上就是一种“片面的数学观点”, 即认为物质只在量上可以规定而在质上则自古以来都相同的观点, 无非是十八世纪法国唯物主义的翻版, 甚至倒退到毕达哥拉斯那里去了。在马克思主义看来, 绝对的统一性思想, 忽略了不同事物之间质的差异性, 而过分强调其间某些量的统一性, 因而是一种机械唯物主义观点。在理论上是错误, 在实践上也是行不通的。当然, 这绝不是说, 统一性思想与当前许多人仍在从事的大统一理论研究都是毫无意义的。只要从马克思主义哲学的辩证统一性原理出发, 我们可以肯定地说, 一定条件下和一定范围内的大统一理论是存在的, 但包罗万象、能导出一切物理定律的统一场论是没有的。

4、现代物理学对于统一场论研究的基本思路

1968 年, 一个重大的历史时刻提前一个世纪到来了, 意大利物理学家维尼基亚诺随手翻阅了一本数学书, 找到了数学家欧拉于 1771 年研究过的一条函数, 他把它应用到“雷吉轨迹”的问题做了计算, 结果发现它能很好地描述核子中许多强相对作用力的效应。不久, 南部阳一郎、萨思金和尼尔森三人分别证明了维尼基亚诺模型在描述粒子的时候, 它等效于描述一根一维的“弦”。这是量子研究的一个重大突破。量子向来只被看成是粒或点, 现在却被描述成为一根“弦”了。这个偶然的发现把量子的研究步伐推进了一个世纪。因按正常的科研步伐, 这个问题要到 21 世纪中叶才可能发现。到了 1984 年, 施瓦茨和格林取得了一个伟大

的突破，也是第一次超弦革命。他们对量子弦的描述图像是：任何粒子其实都不是传统意义上的点，而是开放或闭合（头尾相接而成环）的弦，它有十维，其中六维蜷缩在大一点的另一头，人类只能感知四维，这四维就是我们的生活时空。1995 年爱德华·威顿完善了超弦的理论。这时，爱因斯坦的统一场论又出现新的转机。如果人们能找出控制超弦的那种最终的力，统一场论就能成立。

最近 20 年来统一场论的研究主要有四条道路：

第一条道路即所谓的“弦论”。大约在公元前 387 年，希腊哲学家柏拉图认为，几何学研究是通向认识宇宙本质的道路。卡拉比猜想是在 1954 年召开的国际数学家大会上，意大利几何学家卡拉比提出：在封闭的空间中，有无可能存在没有物质分布的引力场。这就是著名的卡拉比猜想。卡拉比认为自己的猜想是正确的，但是，包括他自己在内，没有人能证实。然而，几乎所有的数学家都认为，卡拉比是错误的，包括年轻的丘成桐在内。在 1973 年初，丘成桐花了相当多的时间，证明卡拉比猜想是错误的；几个月后丘成桐认为自己最终得出了卡拉比猜想是错误的证明时，一个有顶级几何学家参加的大型会议 1973 年 8 月在斯坦福大学召开，丘成桐就将自己的想法告诉了卡拉比。当天晚上 7 点卡拉比带来了几个来自宾夕法尼亚州的同事。丘成桐讲了大约一个小时，大家也认为可以停止一相情愿地认为卡拉比是正确的想法。

但在当年 10 月，卡拉比和丘成桐都发现其证明思想有一些问题。于是，丘成桐开始寻找别的例子来证明卡拉比是错误的。两个星期后，仍发现证明总会在最后崩溃……这时，丘成桐才对卡拉比猜想有更深刻的理解，认为它应该是正确的；也开始发明新工具，来理解卡拉比猜想。1975 年丘成桐最终解决了整个问题，然后到宾夕法尼亚大学去见卡拉比。他们又一起再到纽约大学找数学家路易斯·尼伦伯格讨论这个问题。之后几个月里，丘成桐写了证明卡拉比猜想的论文。这一年，丘成桐 27 岁。卡拉比猜想的证明，让丘成桐一举成名，他的证明所称为“丘定理”，他们所发现的新空间，被称为“卡拉比-丘流形”。卡拉比猜想的证明，解决了代数几何中的十多个重要问题，但卡拉比猜想被证明的重要性，远远不止于此。因为它已成为现代物理学家们解释宇宙本质的弦理论的基石。例如，丘成桐说，数学家们认为可以通过五维时空（四维空间和一维时间），来统一爱因斯坦的相对论和电磁场等量子论，但物理学家们又发现了很多新粒子，这些粒子需要额外的维度，来解释其强作用力和弱作用力。当物理学家们解决了这些问题后，他们发现需要一种名为弦理论的东西，才能解释宇宙。所谓的弦理论，就是将“弦”看做是物质组成的最基本单元，所有的粒子，如电子、光子、中微子和夸克，都是弦的不同振动激发态，以代替经典物理学模式中的基本粒子。

弦理论的雏形，是在 1968 年由意大利物理学家加布里埃莱·威尼采亚诺提出的。他当时在麻省理工学院工作，希望找到能描述原子核内强作用力的数学函数，在一本数学书中，他发现 200 年历史之久的欧拉函数，能描述他所求解的强作用力。不久后，美国斯坦福大学的理论物理学家李奥纳特·苏士侃指出，这个函数，可理解为一小段类似橡皮筋一样扭曲抖动的“线段”，即“弦”。物理学家们发现，为了与量子论一致，弦需要在十维度中震动：三维是空间、一维是时间，另外六维则是“致密空间”，隐藏在“致密空间”中的维度，如此之小，以至于人们不能通过任何可感知的实验来探测。实际上，它们是纯粹的结构。而包含六维空间的“卡拉比-丘流形”，所拥有的特殊拓扑学性质，正好是弦理论所需要的。

丘成桐的引导是：如果这些空间真正模拟了弦理论所需要的六维空间，那么它们将有助于我们推导出隐藏在宇宙中的几何学和物理定律。丘成桐认为，弦理论是现在最有希望将自然界的基本粒子和引力等四种相互作用力统一起来的理论，它第一次将 20 世纪的两大基础理论——广义相对论和量子力学结合到一个数学上自洽的框架里，有可能解决一些长期困扰物理学家的世纪难题，如黑洞的本质、宇宙的起源等。

1968 年弦论的开创者威尼采亚诺（Gabriele Veneziano），萌生用描述核子中质子和中子及其作用力，如夸克被禁锢在质子或中子内，彼此就好似用橡皮弦把它们拴在一起作的模型。这个模型的核心概念是基本粒子并非点状物，而是无限细的一维实体，也就是弦。在基本粒子庞大的家族中，每种粒子都有自己的特性，这反映在一根弦有多种可能的振动模式上。这样一个看似与小提琴弦没两样，只不过其上的振动以光速传播的“量子弦魔术”，一旦把量子力学套用到振动的弦上面，崭新的性质便出现了。首先，量子弦的尺度有限。如果不考虑量子效应，一根小提琴弦可以一分为二，再一分为二，这样一直分割下去，直至最后变成一些无质量的点状粒子。但是分割到一定程度，海森堡的测不准原理就会介入，防止最轻的弦被分割到 10^{-34} 厘米以下。这个不能再分割的长度量子，用 l_s 表示，是弦论引入的一个全新的自然常数，与光速 C 和普朗克常数 h 并列。它在弦论的几乎所有方面都起着决定性的作用，为各种物理量设定了上下限，防止它们变成零或无穷大。

其次，就算没有质量的量子弦，也可以有角动量（笔者注：此时是电磁质量的角动量）。在经典物理学中，角动量是绕轴旋转的物体所具有的一种性质。计算角动量的公式是速度、质量以及物体到转轴距离三者之乘积，因此无质量的物体不可能具有角动量。但在微观世界中，由于存在量子涨落，一根微小的弦即使没有任

何质量，也可以获得不超过 $2h$ 的角动量。量子弦在通常的 3 维之外，还存在额外的空间维度。经典的小提琴弦，不管时空的性质如何，都可以振动。但要使描述量子弦振动的方程能够自洽，时空必须是高度弯曲的，否则它就应该含有 6 个额外的空间维。在物理方程中，物理常数现在不再具有任意给定的固定值，它们在弦论中以场的形式出现，就如电磁场一样，可以动态地调整它们的数值。在不同的宇宙时期或者在相隔遥远的空间区域，这些场可能取不同的值。这其中的所谓“膨胀子场”是整个弦论的关键，它决定了所有作用力的总强度。现代物理实验清楚的表明：宇宙中的基本粒子都显得具有一内禀角动量，等于 $h / 4\pi$ 的某一整数倍（ h 为普朗克常数），特别是我们最熟悉的质子、中子、电子、光子和中微子都具有一内禀角动量。在有这些粒子参与的一切相互作用和重新组合中，角动量总是守恒的。在基本粒子中，电子具有非常确定的质量和电荷，实验显示电子在 10^{-15}cm 量级仍表现得像个质点，不呈现内部结构，但电子却有着某种类似于内部结构的自旋角动量，一个没有大小的质点却具有旋转变角动量和空间方向性。

它是物理学家们的宠儿，沿着这一道路前进的理学家为数最多，远多于其他道路。弦论诞生于意大利物理学家伽布利耶·威尼采亚诺（Gabriele Veneziano）在 1968 年写下的一个公式。该理论认为量子理论不该被应用于点状对象，而应被应用于极微小的线条，即“弦”，这些弦的振动可以导出以相对论的种种公式并可以描绘日前所探测到的所有粒子。迄今未知，因尚有待实验验证，弦理论仍然是一个理论物理概念，但丘成桐认为，有朝一日，弦理论实验证明将从根本上改变人们对结构、空间和时间的认识；数学中每一个基础性发现，最终在物质世界都有一个真实的意义……如果空间模拟了弦理论所要求的六维空间，那么它们将帮助我们推导出宇宙的几何性质和物理定律。

2010 年 12 月 21 日美国《连线》杂志报道，弦理论试图揭开一个物理学谜团，即物理学的两大理论量子力学和相对论为何基本上不相容。弦理论假设四维空间之外还存在额外维度，从而将这两种理论结合起来。弦论的一个基本观点就是，自然界的基本单元不是电子、光子、中微子和夸克之类的粒子。这些看起来像粒子的东西实际上都是很小的弦的闭合圈（称为闭弦），闭弦的不同振动和运动就产生出各种不同的基本粒子。

第二条道路——“圈量子引力论”——则于 1988 年出现在意大利人卡尔洛·罗韦利（Carlo Rovelli）及美国人李·斯莫林（Lee Smolin）的笔下。其目标是重新诠释广义相对论将时空与万有引力联系在一起的方式，以便在不改变任何公式的前提下，使量子理论的公式能够得到直接的应用。这可谓是对这一难题发起的正面进攻，它并没有引入任何新的概念。在一些物理学家的心目中，它将成为弦论的有力竞争者。1904 年，庞加莱提出庞加莱猜想，奠定了当代前沿科学弦膜圈说的数学基础的形式体系。即正猜想的收缩或扩散，涉及点、线、平面和球面；逆猜想的收缩或扩散，涉及圈线、管子和环面；外猜想的空心圆球内外表面及翻转，涉及正、反膜面、和点内、外时空。这是传统科学的结束，革命科学的开始，因为以“乌托子球”为最高理想的原子论（量子论）模型解读遍历科学的波尔兹曼，在同一“战壕”里长期争论的苦闷中的自杀，给革命和科学的分化与合作都留下了悬念。原因是，波尔兹曼的乌托子球量子论，被同一“战壕”里的一批知名的唯物论革命战友，误认为是没有实验基础的科学假说。而就在波尔兹曼自杀后的第二年，爱因斯坦就帮助波尔兹曼找到了科学实验证据。然而最冤的还有波尔兹曼的朋友庞加莱，因为在另一批知名的唯物论革命战友支持波尔兹曼的声讨中，庞加莱也被不加区别地当作了 20 世纪的“坏人”。原因是庞加莱从拓扑几何学的同伦论、同调论、同胚论、同构论出发，认为唯物论革命的基础科学假说除同伦论、同调论、同胚论、同构论的“乌托子球”外，还应有不同伦论、不同调论、不同胚论、不同构论的“乌托子环”。但科学和革命说到底已经都成为一种强大的社会集团，庞加莱好心帮助朋友波尔兹曼，却被这类强大的社会集团当作了反波尔兹曼。庞加莱两头受气，使年轻的爱因斯坦增长了见识，也埋下了心计的阴影。

第三条道路——“非交换几何学”——出自法国数学家阿兰·孔内（Alain Connes）自上世纪 80 年代开始的研究工作。其构想，就是重新从长久以来被人们忽略的对量子力学所进行的一种代数学诠释出发，将其演绎为一种新的时空几何。这一极其抽象的结构能够自发地导出广义相对论和所知的粒子。这种数学的视角，正在引起越来越多的物理学家们的重视。

最后，第四条道路——“标度相对论”——于 1979 年出自法国人洛朗·诺塔尔（Lauret Nottale）的灵感。它认为时空的结构取决于我们对其进行测量的标度，试图证明广义相对论和量子力学都只是对某一根本理论的逼近，仅在某些标度下有效。“标度相对论”已经部分达到了自己的目标，这使它颇具黑马的气质……。

除了上述四条道路以外，物理学家们还对其他众多道路进行了探索。1918 年的赫尔曼·外尔（Hermann Weyl）以及之后的西奥多·卡鲁扎（Theodor Kaluza）及亚瑟·爱丁顿（Arthur Eddington）都为此作出过努力。当然，爱因斯坦本人在其生命的最后 40 年中也提出过不少解决构想。再到后来，还有一批杰出的理论家，比如罗杰·彭罗斯（Roger Penrose）、安德烈·萨哈罗夫（Andrei Sakharov）及斯蒂芬·霍金（Stephen Hawking）

等也曾为此绞尽脑汁。雷纳特·洛尔 (Renate Loll)、扬·安卜强 (Jan Ambjorn)和儒莱·儒齐耶维茨 (Jurek Jurkiewicz)还提出了一项新理论。

5、弦理论在现代物理学中的重要性

2006年7月世界著名数学家、哈佛大学教授丘成桐院士,在南开大学陈省身数学研究所演讲前后曾说:弦理论研究已经到了“重大革命性突破的前夜”。2008年获得诺贝尔物理学奖的南部阳一郎,就是一位著名的弦理论先驱者之一。2009年10月英国剑桥大学著名科学家霍金告别卢卡斯数学教授职位后,也是著名的弦理论先驱者之一的格林,获得了剑桥大学声望最高的卢卡斯数学教授席位。卢卡斯数学教授职位于1664年设立,科学史上一些最伟大的人物都曾获得这一头衔,其中包括牛顿和狄拉克。说明当代科学前沿的弦膜圈说已出现发展的势头。

现任我国《前沿科学》编委的美籍华人物理学家、美国杜邦中央研究院退休院士的沈致远先生说:“在美国超弦理论和圈量子引力论已成显学,占据一流大学物理学要津,几乎囊括了这方面的研究经费,年轻的粒子物理学家如不做弦论,求职非常困难,资深的也难成为终身教授”。湖南科技出版社2008年4月出版了李泳先生翻译的斯莫林的《物理学的困惑》一书,在该书开头11页至15页有,即使斯莫林是站在反对弦论者的代表人物的立场上,他也不得不承认:“在美国,追求弦理论以外的基础物理学方法的理论家,几乎没有出路。最近15年,美国的研究型大学为做量子引力而非弦理论年轻人一共给了三个助理教授的职位,而且给了同一个研究小组”。“因为弦理论的兴起,从事基础物理学研究的人们分裂为两个阵营。许多科学家继续做弦论,每年大约有50个新博士从这个领域走出来”。“在崇高的普林斯顿高等研究院享有永久职位的每个粒子物理学家几乎都是弦理论家,唯一的例外是几十年前来这儿的一位。在卡维里理论研究所也是如此。自1981年麦克阿瑟学者计划开始以来,9个学者有8个成了弦理论家。在顶尖的大学物理系(伯克利、加州理工、哈佛、麻省理工、普林斯顿和斯坦福)。1981年后获博士学位的22个粒子物理学终身教授中,有20个享有弦理论或相关方法的声誉。弦理论如今在学术机构里独领风骚,年轻的理论物理学家如果不走进这个领域,几乎就等于自断前程。”中科院理论物理所著名超弦理论家朱传界研究员,在《写在“2006年国际弦理论会议”前夜》的文章所说:弦理论在中国,在超弦的第一、第二次革命,以及随后的快速发展中,中国都未能在国际上起到应有的作用。我们在研究的整体水平上,与国际、与周边国家如印度、日本、韩国,甚至和我国台湾地区相比都有一定的差距。

中科院理论物理所著名超弦理论家朱传界研究员在《写在“2006年国际弦理论会议”前夜》的文章中说:弦理论在中国,在超弦的第一、第二次革命,以及随后的快速发展中,中国都未能在国际上起到应有的作用。我们在研究的整体水平上,与国际、与周边国家如印度、日本、韩国,甚至和我国台湾地区相比都有一定的差距。内地学术界对弦理论的认识存在较大的分歧,一些有影响的物理学家,基于某种判断,公开地发表“弦理论不是物理”的观点。受他们的身份和地位的影响,这种观点在中国更容易被大多数人接受,因而在某种程度上制约了弦理论在中国的研究和发展。从教育和人才培养上看,我国的世界一流大学如北大、清华,在相当长的一个时期内都严重缺乏主要从事弦理论研究的人才,这种局面间接地制约了青年研究生的专业选择,直接地造成了国内研究队伍的青黄不接。值得庆幸的是,在丘成桐教授的直接推动下,伴随着浙江大学数学科学中心的成立,以及随后该中心和中国科学院晨兴数学中心每年举办的多次高水平专业会议,并邀请像斯特罗明格这样一流水平的学者到中心工作,大大地推动了国内弦理论方面的研究。2002年底,在中国科技大学成立的交叉学科理论研究中心。通过多次举办工作周和暑期学校,在超弦理论的人才培养和研究方面做了许多基础性工作。这种种现象都表明,中国的超弦理论研究,在平静的外表下,正积蓄着旺盛的爆发潜力。摆在超弦理论研究面前的,是一幅广阔的前景和一条艰难的道路,这是一条热闹又孤独的旅程,它所涉及的问题对年轻的学生和学者,有着强大的魅力,同时它对研究人员的专业素养有着很高的要求。我们正在为弦理论的第三次革命作准备,也期待着她的早日到来。

6、超弦理论简介

把四种力场进行统一的理论目前最有影响是超弦理论。这个理论认为存在一种极微小、运动于十维时空的抽象的弦,它具有波粒二像性,弦不同的振动模式构成了不同的基本粒子,超弦理论现在又发展成为膜理论。这是一种在数学上非常复杂而艰深的理论。这个理论目前仍在探索之中。高维时空的观点并不是超弦理论所特有的,早在1919年,T. Kaluza就把广义相对论推广到了五维时空,试图由此建立一个描述引力与电磁相互作用的统一框架;1926年,O. Klein发展了Kaluza的理论,引进了紧致化(Compactification)的概念,由此建立了所谓的Kaluza-Klein理论。Kaluza-Klein理论与膜宇宙论的主要差别在于:Kaluza-Klein理论中的物质分布在所有的维度上,而膜宇宙论中只有引力场、引力微子(Gravitino)场(引力微子为引力子的超对称伙伴)、Dilaton场等少数与时空本身有密切关系的场分布在所有的维度上,由标

准模型描述的普通物质只分布在膜上。克罗斯提到的第三大困惑是：“是否存在额外维度？”他解释说，弦理论证明的成果之一是额外维度的思想，基于的也是额外维度的思想。弦理论最早有 26 维，然后缩减到 10 维，但我们是生活在 4 维宇宙中；解释那些看不见的额外维度的讨论很多，可以不用超出 5 维，也能解释弦理论遇到的那些难题。即若 11 维超引力中的 7 维空间是紧致的，且其尺度为 10 的-33 次方厘米，就会导出粒子物理标准模型所需的 $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ 对称群。但是，在时空从 11 维紧致化到 4 维时，却无法导出手征性来。到了 1984 年，超引力丧失领头理论地位，超弦理论取而代之。

物理学上真正伟大的理论终究是少数，一个理论只要能给人以启迪，也就不枉了它被学术界所认识。当代物理学正出现天体物理和粒子物理的新的合流；加速器物理和非加速器物理的合流，需要新的物理的实验，更需要新的物理观念。二十世纪六十年代出现的超对称观念，初试锋芒之后已经渗透到了现代物理的许多领域中，这种渗透的延伸是一个试图统一自然界所有相互作用的超弦理论，它对时空维数的要求，变成了十维而不再是四维。在这样的一幅时空图景中，我们直接观测所及的看似广袤无边的宇宙，不过是十维时空中的一个四维超曲面，就象薄薄的一层膜，我们人类就世代生活在这层膜上，我们的宇宙论也就变成了膜宇宙论。那么进入黑洞的物体的物质结构信息是不是永久地消失了呢？霍金认为，如果用超膜理论来理解黑洞，会发现各种信息储存在 p-膜上，p-膜是一张通过三维空间以及我们未注意到的额外 7 维的运动的薄片，黑洞可被认为在时空的额外维中与 p-膜相交。在某些情形下，人们可以证明在 p-膜上的波的数目和人们所预料的黑洞所包含的信息量相同。如果粒子打在 p-膜上，便会在膜上激起额外的波。类似地，如果在 p-膜上不同方向的波在某点相遇，它们会产生一个如此大的尖峰，使得 p-膜的一小片破裂开去，而作为粒子离开。这样，p-膜正如黑洞一样，能吸收和发射粒子。p-膜模型和虚粒子对模型对发射率的预言完全一样。

从 1984 年起，人们认定 10 维时空是最佳选择，10 维时空的弦论替代了 11 维时空的超引力理论。曾流行过五种弦论，其不同在于未破缺的超对称性荷的数目，以及所带有的规范群。在 10 维时空中，最小的旋量具有 16 个实分量，有三种弦论的守恒超荷恰巧对应于这种情况，它们是类型 I、杂优弦 HE 和 HO。其余两种弦论含有 2 个旋量超荷，称为类型 II 弦。其中，类型 II A 的旋量具有相对的手征性，类型 II B 的旋量具有相同的手征性。HE 和 HO 二种杂优弦，分别带有 $E_8 \times E_8$ 规范群和 $SO(32)$ 规范群。类型 I 弦也具有 $SO(32)$ 规范群，它是开弦，而其余的 4 种弦是闭弦。重要的是，它们都是反常自由的，即弦论提供了一种与量子力学相容的引力理论。在这些理论中，HE 弦至少在原则上能解释所有已知粒子和力的性质，当然也包括手征性在内。然而若将粒子看作弦，那为什么不将它们看作膜，抑或看作 p 维客体——胚(brane)呢？K--K 理论与膜宇宙论的主要差别在于：K--K 理论中的物质分布在所有的维度上，而膜宇宙论中只有引力场、引力微子场、Dilaton 场等少数与时空本身有密切关系的场分布在所有的维度上，由标准模型描述的普通物质只分布在膜上。但是象这样的一种只凭一些唯象的考虑，是不足以成为现代宇宙论的基础的，它本身必须有明确的理论依据。这种理论依据随着超弦理论的发展渐渐地成为了可能。1995 到 1996 年“第二次超弦革命”，从 IIA 及 $E_8 \times E_8$ heterotic 型超弦理论在强耦合极限下均具有 11 维超引力理论的特征，E. Witten 提出了一种 11 维时空中的新理论，它以 11 维超引力理论为低能有效理论，能够在特定的参数条件下再现所有五种不同类型的超弦理论，被称为 M 理论。在研究这种 11 维超引力理论及 M 理论时，由于超弦理论中的规范场只存在于十维时空中，因此很自然地出现了规范场只存在于 11 维时空中的超曲面上的观点，这便是膜宇宙论思想在超弦理论中的出现。

局部超对称性，还提供将引力也纳入物理统一理论的新途径。Einstein 的广义相对论，是根据广义时空坐标变换下的某些要求导出来的。在超对称时空坐标变换下，局部超对称性则预言存在“超引力”。在超引力理论中，引力相互作用由一种自旋为 2 的玻色子（引力子）来传递；而引力子的超伙伴，是自旋为 3/2 的费米子（引力微子），它传递一种短程的相互作用。广义相对论没有对时空维数规定上限，在任何维黎曼流形上都能建立引力理论。超引力理论却对时空维数规定了一个上限——11 维。更吸引人的是，已经证明，11 维不仅是超引力容许的最大维数，也是纳入等距群 $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ 的最小维数。描述强力的标准模型，即量子色动力学，是基于定域对称群 $SU(3)$ 的规范理论，它的量子叫做胶子，作用于一个叫“色”的内禀量子数上。描述弱力和电磁力的温伯格—萨拉姆模型，是基于 $SU(2) \times U(1)$ 的规范理论。这个规范群作用在“味道”上，而不是在“颜色”上，它不是精确的，而是自发破缺的。由于这些理由，许多物理学家开始探讨 11 维的超引力理论，期望这就是他们寻求的统一理论。

然而，在手征性面前，引力理论的一根支柱突然倒塌了。手征性 2 是自然界的一个重要特征，许多自然对象都有类似于人的左手与右手那样的对称性。像中微子的自旋，就始终是左手的。20 世纪 20 年代，波兰人卡卢扎 (T. Kaluza) 和瑞典人克莱因 (O. Klein)，发现从高维空间约化到可观测的 4 维时空的机制。若 11 维超引力中的 7 维空间是紧致的，且其尺度为 10—33 厘米（缘此其不被觉察），就会导出粒子物理标

准模型所需的 $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ 对称群。但是，在时空从 11 维紧致化到 4 维时，却无法导出手征性来。到了 1984 年，超引力丧失领头理论地位，超弦理论取而代之。当时，“让 11 维见鬼去吧！”——“夸克之父”盖尔曼 (M. Gell-Mann) 的这句名言，表达了不少物理学家对 11 维的失望情绪。从 1984 年起，人们认定 10 维时空是最佳选择，10 维时空的弦论替代了 11 维时空的超引力理论。曾流行过五种弦论，其不同在于未破缺的超对称性荷的数目，以及所带有的规范群。在 10 维时空中，最小的旋量具有 16 个实分量，有三种弦论的守恒超荷恰巧对应于这种情况，它们是类型 I、杂优弦 HE 和 HO。其余两种弦论含有 2 个旋量超荷，称为类型 II 弦。其中，类型 II A 的旋量具有相对的手征性，类型 II B 的旋量具有相同的手征性。HE 和 HO 二种杂优弦，分别带有 $E8 \times E8$ 规范群和 $SO(32)$ 规范群。类型 I 弦也具有 $SO(32)$ 规范群，它是开弦，而其余的 4 种弦是闭弦。重要的是，它们都是反常自由的，即弦论提供了一种与量子力学相容的引力理论。在这些理论中，HE 弦至少在原则上能解释所有已知粒子和力的性质，当然也包括手征性在内。然而，弦论绝非美仑美奂，至少可从四方面对它诘难。首先，人们本将弦论当作物理统一理论来追寻，它的五种不同理论却又给出了五种不同的宇宙，若人类生活在其中的一种宇宙之中，那么其余四种理论描述的宇宙，又是何等样的生物居住其中呢？其次，若将粒子看作弦，那为什么不将它们看作膜，抑或看作 p 维客体——胚 (brane) 呢？1994 年开始了弦论的第二次革命。此后，五种不同的弦论在本质上被证明是等价的，它们可以从 11 维时空的 M 理论导出。M 理论的 11 维真空，能用一个称作 11 维时空普朗克质量 m_P 的单一标度表征。若将 11 维时空中的一个空间维度，取成半径为 R 的圆周，就可以将它与类型 II A 的弦论联系起来。类型 II A 弦论有一个无量纲的弦耦合常数 g_s ，它由膨胀子场 Φ (一种属于类型 II A 超引力多重态的无质量标量场) 的值决定。类型 II A 的质量标度 m_s 的平方，给出基本 II A 弦的张力，11 维与 10 维的 II A 的参数之间的关系为 (略去数值因子 2π) $m_s^2 = R m_P^3$, $g_s = R m_s$ 。II A 理论中经常使用的微扰分析，是将 m_s 固定而对 g_s 展开。从第二个关系式可见，这是关于 $R=0$ 的展开，这也就是为什么在弦微扰论中没有发现 11 维解释的原因。半径 R 是一个模 (modulus)，它由带有平坦势的无质量标量场的值确定。若这个模取值为零，对应于 II A 理论；若取值无穷大，则对应于 11 维理论。杂优弦 HE 与 11 维理论也有相似的联系，差别在于紧致的空间不再是圆周，而是一条线段。这个紧致化会产生两个平行的 10 维切面，而每一面又对应于一个 $E8$ 规范群。引力场存在于块中。从 11 维时空更能说明，为什么采用 $E8 \times E8$ 规范群才会是量子力学“反常自由”的。

早在 20 世纪初，德国女学者诺特 (A. Noether) 证明了一条著名定律：对称性对应于某一种物理守恒定律。电荷、色荷，以及别的守恒荷，都能看成是诺特荷。某些粒子的特性在场变形下保持不变，这样的守恒律称为拓扑的，其守恒荷为拓扑荷。按照传统观点，轻子与夸克被认作是基本粒子，而单极子等携带拓扑荷的孤子是派生的。是否能颠倒过来猜想呢？即猜想单极子带诺特荷，而电子带拓扑荷呢？这一猜想被称作蒙托南—奥利夫 (Montonen—Olive) 猜想，它给物理计算带来了意料不到的惊喜。带有 e 荷的基本粒子等价于 $1/e$ 的拓扑孤子，而粒子的荷对应于它的相互作用耦合强度。夸克的耦合强度较强，因而不能用微扰论计算，但可用耦合强度较弱的对偶理论计算。这方面的一个突破性进展，是由印度物理学家森 (Ashoke Sen) 取得的。他证明，在超对称理论中，必然存在既带电荷又带磁荷的孤子。当这一猜测推广到弦论后，它被称作 S 对偶性。S 对偶性是强耦合与弱耦合之间的对偶性，由于耦合强度对应于膨胀子场 Φ 的值。杂优弦 HO 与类型 I 弦可通过各自的膨胀子场联系起来，即 $\Phi(I) + \Phi(HO) = 0$ 。弱 HO 耦合对应 $\Phi(HO) = -\infty$ ，而强 HO 耦合对应 $\Phi(HO) = +\infty$ 。可见，杂优弦是 I 型弦的非微扰激发态。这样，S 对偶性便解释了一个长期令人疑惑的问题：HO 弦与 I 型弦，有着相同的超对称荷和规范群 $SO(32)$ ，却有着非常不同的性质。

在弦论中，还存在着一种在大小紧致体积之间的对偶性，称作 T 对偶性。举例来说，II A 理论在某一半径为 R_A 的圆周上紧致化和 II B 理论在另一半径为 R_B 的圆周上紧致化，两者是等价的，且有关系 $R_B = (m_s^2 R_A) - 1$ 。于是，当模 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 和 II B 之间的联系。两种杂优弦间的联系，虽有技术细节的不同，本质却是一样的。弦论还有一个定向反转的对称性，如将定向弦进行投影，将会得到两种不同的结果：扭曲的非定向开弦和不扭曲的非定向闭弦。这就是 II B 型弦和 I 型弦之间的联系。在 M 理论的语言中，这一结果被说成：开弦是狄利克雷胚的衍生物。有质量的矢量粒子有 3 个极化态，而无质量的光子只有 2 个极化态。无质量态可以看作是有质量态的临界状态。在 4 维时空的庞加莱对称性中，用小群表示描述光子态。小群表示又称短表示，这一代数结构可以推广到 11 维超对称理论。临界质量也会在 M 理论中重现。由诺特定理，能量和动量守恒是时空平移对称性的推论。超对称荷的反对易子是能量和动量的线性组合，这是超引力的代数基础。然而，两个不同超对称荷的反对易子，却可生成新的荷。这个荷称作中心荷 Q 。对于带有中心荷的超代数也有一个短表示，它将与 M 理论的非微扰结构密切相关。

对于带有中心荷的粒子态，代数结构蕴涵着物理关系 $m \geq |Q|$ ，即质量将大于中心荷的绝对值。若粒子态

是短表示的话, 该关系取临界情形 $m=|Q|$, 通常称为 BPS 态。这一性质的最初形式是前苏联学者博戈莫尔内 (E.B.Bogomol'nyi)、美国学者普拉萨德 (M. K. Prasad) 和萨默菲尔德 (C. M. Sommerfield) 在研究规范场中单极子时发现的。如果将 BPS 态概念应用到 p 胚, 这时中心荷用一个 p 秩张量来描述, BPS 条件化作 p 胚的单位体积质量等于荷密度。处于 BPS 态的 p 胚将是一个保留某种超对称性的低能有效理论的解。II 型弦与 11 维超引力都含有两类 BPS 态 p 胚, 一类称为电的, 另一类称为磁的, 它们都保留了一半的超对称性。在 10 维弦论中, 据弦张力 T_p 与弦耦合常数 g_s 的依赖关系, p 胚可分成三类。当 T_p 独立于 g_s , 且与弦质量参数的关系为 $T_p \propto (m_s)^{p+1}$, 则称胚为基本 p 胚; 这种情形仅发生在 $p=1$ 时, 故又称它为基本弦; 这又是在弱耦合下仅有的解, 故它又是仅可使用微扰的弦。当弦张力 $T_p \propto (m_s)^{p+1/g_s^2}$, 则称胚为孤子 p 胚; 事实上这仅发生在 $p=5$ 时, 它是基本弦的磁对偶, 记作 NS5 胚。当 $T_p \propto (m_s)^{p+1/g_s}$, 则称胚为狄利克雷 p 胚, 记作 D_p 胚, 其性质介于基本弦和孤子之间。通过磁对偶性, D_p 胚将与 $D_{p'}$ 胚联系起来, 其中 $p+p'=6$ 。在 11 维时空中, 存在两类 p 胚: 一类是曾被命名为超膜的 M2 胚, 另一类称为 M5 胚的 5 胚, 它们互为电磁对偶。11 维理论仅有一个特征参数 m_P , 它与弦张力 T_p 的关系为 $T_p \propto (m_P)^{p+1}$ 。将 11 维理论通过其中 1 维空间作圆周紧致化, 能导出 II A 型理论。那么, p 胚在这个紧致化过程中将做出什么变化呢? p 胚的空间维数可以占据或不占据紧致维。倘若占据, M2 胚将卷曲成基本弦, M5 胚卷曲成 D4 胚; 倘若不占据, M2 胚化作 D4 胚, M5 化作 NS5 胚。威滕和荷拉伐 (Peter Horava) 发现, 从 11 维的 M 理论可以找到手征性的起源。他们将 M 理论中的一个空间维数收缩成一条线段, 得到两个用该线段联系起来的 10 维时空。粒子和弦仅存在于线段两端的两个平行的时空中, 它们通过引力彼此联系。物理学家猜测, 宇宙中所有的可见物质位于其中的一个, 而困扰着物理学家的暗物质则在另一个平行的时空中, 物质与暗物质之间仅通过引力相联系。这样, 便可巧妙地解释宇宙中为什么存在看不到的质量。这一图象具有极其重要的物理意义, 可用来检验 M 理论。

70 年代, 物理学家已认识到, 所有相互作用的耦合强度随能量变化, 即耦合常数不再是常数, 而是能量的函数, 并给它取了个形象的名称——跑步耦合常数。90 年代, 物理学家又发现, 在超对称大统一理论中, 电磁力、弱力与强力的耦合强度, 会聚在能量标度 E 约为 10^{16} 吉电子伏的那一点上。然而, 这里只统一了宇宙四大基本相互作用中的三个, 还有一个引力。对这个人类最先认识的引力, 又将如何处置呢? 给人启迪的是, 上述三力统一的耦合强度与无量纲量 GE^2 (G 为牛顿引力常数) 相近, 而不相等。在威滕—荷拉伐方案中, 可选择线段的尺寸, 使已知的四种力一起会聚在同一能量标度 E 上。这就是说, 引力的量子效应, 将在比普朗克能量标度低得多的标度 ($E \approx 10^{16}$ 吉电子伏) 上起作用, 这无疑将对宇宙学产生全面的影响。在廿多岁就解决规范场量子化问题的荷兰理论物理学家胡夫特 (G. 't Hooft), 曾向弦学者提出关于弦论为何没能解决黑洞问题的质询。当时人们并不明白, 这究竟是诘难, 还是鼓励? 然而, 在弦论演化成 M 理论之际, 所有的疑问很快消散了。10 维弦论紧致化到 4 维的方式有成千上万种, 不同方式产生出 4 维世界中不同的运行机制。于是, 不信弦的人认为, 这根本就作预测。然而, 在 M 理论中, 黑胚有望解决这一难题。现已证明, 当黑胚包绕着一个洞收缩时, 黑胚的质量将会消失。这一性质将对时空本身产生绝妙的影响, 它将改变经典拓扑学的法则, 使得时空拓扑发生变化。一个带有若干洞的时空, 可以想象成一块沪上的早点——蜂糕。在黑胚作用下, 它变成了另一块蜂糕, 即变成了另一带有不同数目洞的时空。利用这一方法, 可以把所有不同的时空联系起来。这样, 对弦紧致问题的诘难, 就容易解决了。M 理论最终将依照某种极值原理, 选择一个稳定的时空, 弦就在这个时空中生存下来。接下来便是, 振动着的弦将产生人类已知的粒子和力, 也就是产生出人类所处的现实世界。美国学者苏什金 (Leonard Susskind) 等人, 进行了一次新尝试, 他们称 M 理论为矩阵理论 (英语中矩阵一词, 也是以 M 开头的)。试图给 M 理论下一个严格的定义。矩阵理论的基础是无穷多个 0 胚 (也就是粒子), 这些粒子的坐标 (即时空位置) 不再是通常的数, 而是相互之间不能对易的矩阵。在矩阵理论中, 时空本身成了一个模糊的概念, 这一方法使物理学家大为振奋。施瓦茨呼吁大家关心这些研究, 同时指出矩阵理论含有一个重要的未决问题: “当多个空间紧致维数出现时, 矩阵理论中用环面 T^n 紧致化将会遇到困难, 或许会找到更好的紧致化方法, 否则新的研究是必要的。”

当代西方的弦论、膜论、圈论都类似联系有一个共同的源头, 即卡鲁扎-克莱因理论的额外维论和微小圈论。当代弦膜圈说在于统一相对论和量子论。而卡鲁扎在 1919 年是在用四维时空的基础上, 增加一个维度, 来统一广义相对论的引力方程和麦克斯韦的电磁场方程。但早于卡鲁扎五年, 已有诺德斯特朗提出, 引力和电磁学可以在更高维度上来统一。在卡鲁扎和克莱因的五维理论被大量引用时, 但诺德斯特朗的文章已被完全遗忘。而卡鲁扎的文章受到爱因斯坦的重视, 是卡鲁扎用“柱面条件”创新了他的“第五维”。1926 年克莱因提出的五维理论, 又创新了卡鲁扎的“柱面条件”, 他联系德布罗意把电子描绘成驻波解释玻尔电子能级位置, 设想这些驻波排列一个圆环, 用来解释第五维, 并且想到电荷的最小单位决定了第五个维度中

圆的半径，发现了这个第五维微小圈的尺寸。可见有完善的创新也是非常重要的。

a) 拓扑量子的纠错研究。中国科技大学微尺度物质科学国家实验室潘建伟及陈宇翱、刘乃乐等教授，成功制造出并观测到了具有拓扑性质的八光子簇态，并将此簇态作为量子计算的核心资源，实现了拓扑量子纠错。这也许能解决长期困扰量子计算机物理实现的最大问题即量子计算机不可避免地与环境耦合而产生的各种噪声使计算过程产生各种错误的“消相干效应”。

b) 拓扑量子的薄膜研究。上海交大低维物理和界面工程实验室贾金锋、钱冬、刘灿华、高春雷等教授，已经制备出最适合探测和操纵 Majorana 费米子的人工薄膜系统。“Majorana 费米子”是意大利科学家马约拉纳 (Majorana) 的预测，而被冠名的一类特殊的费米子。上海交大是在拓扑绝缘体与超导体之间，插入一种超薄的过渡层，而形成的一种由拓扑绝缘体材料和超导材料复合而成的特殊人工薄膜，超导的特性能够传递到拓扑绝缘体上，拓扑绝缘体也具有了超导体的“本领”，首次成功实现了超导体和拓扑绝缘体的“珠联璧合”。厚度只有发丝的万分之一的这种薄膜，通过精确控制，将所需材料的原子一层一层垒起来可达到产生 Majorana 费米子的要求。

c) 量子自旋霍尔拓扑绝缘体的研究。美国莱斯大学科学家杜瑞瑞、克尼兹等教授研制出的“量子自旋霍尔拓扑绝缘体”的微型设备，也是与超导体结合研制而成。因为在“拓扑量子计算”机的研制竞赛中，各国研究人员采用了许多种制造量子比特的方法，但不管什么方法，一个普遍的问题就是如何确保将信息编码为量子比特而又不会因为量子波动而随时间变化，这就是一个容错问题。量子自旋霍尔拓扑绝缘体被用作“电子高速公路”，是量子计算机中产生量子粒子用来存储和处理数据的关键构件之一。拓扑量子计算在美国得到极大的重视，微软公司在其加州的研究所中网罗了大量理论人才，从事拓扑量子计算方面的开创性研究，并每年投入数百万美元直接支持加州理工学院、芝加哥、哥伦比亚、哈佛等大学相关的分数量子霍尔效应的实验研究。

d) 我国拓扑量子计算研讨会活跃。如 2011 年 5 月 21 至 22 日，由上海微系统所蒋寻涯研究员、上海交大刘熒教授和浙大万歆教授联合牵头的“普陀论拓扑”专题研讨会，在浙江舟山举行，全国近 50 名研究人员参加。2011 年 11 月 25 日至 27 日，由理论物理国家重点实验室资助的“理论物理前沿研讨会—凝聚态物理中的拓扑物态和量子计算研究专题研讨”，在北京郁金香温泉花园度假村召开，来自于北大、北师大、中国人民大学、北京科技大学、中科院研究生院、北京计算科学研究中心、中科院物理研究所、北京应用物理与计算数学研究所和中科院理论物理研究所等国内知名单位 20 余位专家参与。而早在 2006 年的拓扑量子计算研讨会，就汇集了中科院理论物理所、北大、清华大学、北师大、人民大学、南开大学、南京大学和浙大的学者。其目的就是要推进我国在拓扑量子物态与拓扑量子计算、拓扑绝缘体与相关系统、拓扑超导体方面的研究，交流思考从传统物相理论到今天泛拓扑图像的物理背景、实验、和分类方式，对拓扑量子计算的背景、理论和实验的基础、现状以及前景等作专题讨论。

e) 拓扑量子在交叉科学中的应用。如《有机化学中的拓扑量子方法》一书，是湖南科技大学副校长曹晨忠教授 2010 年在科学出版社出版的专著。内容主要包括基团极化效应参数和拓扑立体效应指数的计算；有机分子拓扑量子键连接矩阵的构造以及分子结构特征参数的提取，矩阵特征根、拓扑量子轨道能级、原子电荷、化学键的键级等参数的计算；应用上述分子结构参数，对烷烃、单取代烷烃、链状烯烃、含 C=O 键和 N=O 键有机化合物、芳香烃和极性芳香化合物等各类有机物的热力学性能、化学反应性能、光学性能、色谱性能、价电子能量、酸性和生物活性等进行定量的相关研究。又如《非相对论物理学中的拓扑量子数》，是 2000 年由世界图书出版公司出版论述拓扑量子数在非相对论物理系统中作用的专著。与普通由对称性定义的量子数相比，拓扑量子数的特点是对系统中的缺陷不敏感。近年来，拓扑量子数在物理量的精确测量中变得非常重要，并提供了最好的电压和电阻的标准。

7、超对称问题简介

根据对称的相对性与绝对性原理，科学没有永恒的理论，一个理论预言的论据常常被实验所推翻。任何一个理论都有它的逐渐发展和成功的时期，经过这个时期之后，它就很快地衰弱。科学不是而且永远不会是一本写完了的书，每一个重大的进展都带来了新问题，每一次发展总要揭露出新的更深的困难。

事实上，二十世纪七十年代出现于弦论 Raymond 模型中的世界面超对称(worldsheet supersymmetry)是超对称概念历史发源的一部分。自然界并不具有严格的超对称，但它可能具有内在的、自发破缺的超对称，就象粒子物理标准模型中的 $SU(2) \times U(1)$ 规范对称性那样。事实上，有迹象表明超对称在当前或拟议中的加速器实验所及的能区中就可能被检测到。迹象之一是“等级问题”(hierarchy problem)，它是 Dirac “大数问题”的现代版。Dirac 的问题是：为什么两个质子间的电力比引力强 10^{-38} 倍？在物理定律中出现如此微小的无量纲常数似乎是需要解释的。这一问题的现代版则是：为什么 W 与 Z 粒子 (这些规范粒子的质量与其

它粒子的质量标度密切相关)的质量比 Planck 质量小 10^{-17} 倍? 超对称为一问题提供了一种可能的答案, 因为它消除了影响 Higgs 质量的平方发散。超对称的一个更加定量的迹象来自于强、弱及电磁相互作用耦合常数的测量值。它们与基本相互作用的大统一理论及超对称所导出的关系式在 1% 的精度内相符。如果超对称 - 比如通过费米实验室或正在欧洲核子中心建造的新加速器 LHC - 被发现, 人们将从中得到许多有关超对称粒子质量及相互作用的信息。现在描述超对称世界细节的理论模型比比皆是, 其中即使有一个的方向是正确的, 我们也无从知晓。发现超对称无疑会给弦论带来极大的促进, 它将表明由弦论以大致相同的方式导出的三种基本结构 - 引力、规范理论及超对称 - 都是对自然描述的组成部分。现在还很难说弦论从发现和探索超对称中可能得到的促进会有多大, 因为我们不知道超对称质量谱会是什么样的, 以及从中能得到有关更高能物理学的什么样的线索。超对称的发现还可能通过多种方式对宇宙学产生影响: 某些超对称粒子将是暗物质的可能候选者, 计算表明它们有可能恰好具有与观测相符的质量和丰度。(不过, 超对称粒子并不是暗物质的唯一候选者, 而且有些超对称模型不具有这种候选者。)如果超对称存在, 那它必须被纳入计算宇宙早期元素合成的理论中去。事实上, 超对称理论所包含的带重子数的标量粒子很可能会起重要作用。超对称标量粒子也许与暴涨有关(这在 L. Randall 的报告中已经讨论过了), 尽管超对称及弦论尚未对此给出清晰的图景。1984 年, 随着 Green-Schwarz 反常消除及 Gross、Harvey、Martinec 和 Rohm 的杂交弦 (heterotic string) 理论使得构筑优美及半现实的粒子物理与量子引力模型成为可能, 弦论变得越来越让人感兴趣。这里“半现实”指的是可以干净利落地得到正确的粒子与规范相互作用, 但却无法对粒子质量给出合理描述, 因为后者依赖于超对称破缺, 而我们对此还没有合适的模型。一个好的超对称破缺模型应该会为解决宇宙学常数极小(或为零?)的问题带来曙光, 因为在我们的半现实模型中, 超对称未破缺时宇宙学常数为零。因此宇宙学常数极小不仅本身是一个很大的谜 - 不为零的观测值使之更为尖锐 - 而且缺乏对它的理解还会妨碍我们改进粒子物理模型。我们现在所知的超对称破缺模型会导致 quintessence 类型的行为(它们具有变化的标量场, 没有稳定的真空态), 但其参数和耦合却高度非现实。总体上讲, 带标量场的 quintessence 看来是有问题的, 因为它们的相干耦合按说应该已经在对等效原理的检验中被检测到了。有鉴于此, 带赝标量场 [即具有 $V(a) = \Lambda^4(1 - \cos(a/F))$ 型相互作用势的轴子型 (axion-like) 场, 其中 Λ 和 F 为常数] 的 quintessence 也许更具吸引力, 因为这类模型没有相干耦合 (或者 - 考虑到宇称并不严格守恒 - 相干耦合被高度抑制)。目前还只有少数文章讨论以赝标量场为基础的 quintessence 型模型。

运用超对称解决宇宙学常数问题的主要推理步骤: 超对称在 TeV 量级上破缺 \rightarrow 宇宙学常数比观测值大 60 个数量级 \rightarrow 宇宙半径在毫米量级。上述推理中, 对超对称破缺能标的估计来自于现有高能物理实验与理论的综合分析, 显著调低该能标将与未能观测到超对称粒子这一基本实验事实相矛盾, 而调高该能标只会使宇宙学常数的计算值更大, 从而更偏离观测值; 从超对称破缺能标到宇宙学常数的计算依据的是量子场论; 而从宇宙学常数到宇宙半径的计算依据的是广义相对论。这些理论在上述计算所涉及的条件下都是适用的, 因此整个推理看上去并没有什么明显的漏洞。

20 世纪 70 年代发现了现代数学模型的一个特征——超对称, 它可以不同的方式来描述。一种方式是讲 space-time 有额外的维——格拉斯曼维, 格拉斯曼变量是反交换的, $A \times B = -B \times A$ 。【1】根据对称的相对性与绝对性原理, 把物质几何化将引起新的不对称性, 因此超对称的工作是没有止境的。这是由对称的相对性所决定的。另外规范场的 F_{uv} 和引力场的 R_{uv} 都是几何学中的曲率, R_{uv} 是 g_{uv} 的二阶导数, 因此 Einstein 的引力场方程是 g_{uv} 的二阶微分方程, 而规范场的运动方程 $\alpha^{\mu\nu} F_{\mu\nu} = \dots$ 是曲率的一阶微分方程, 电磁学中是如此, 因此引力场方程就应当是 g_{uv} 的三阶微分方程。这也是 Einstein 的引力理论需要修改的一种迹象。韦耳中微子的存在破坏了左右对称性。有人认为: R_{uv} 与 g_{uv} 成立的条件是系统的状态函数与时间无关, 也就是系统处于理想的对称状态, 此时对于系统空间的任意一点满足规范化条件。当然 R_{uv} 和 g_{uv} 的形成机制是不一样的。前者的状态函数在空间的任意一点任意方向都“静止”(标量场), 但是在某些特殊方向有破缺, 但是从整体上看, 他满足整体对称。其状态函数守恒。后者的状态函数在空间的一些特殊方向“运动”(矢量场。), 但是在某些特殊方向有破缺, 但是从整体上看, 他满足整体对称。其状态函数守恒。我们所说的电磁场, 是这个理想的系统对称和破缺的综合体系。反变换对应矢量场, 正变换对应标量场。在自然界反变换对应两种可能性, 分别对应左旋和右旋。也分别对应于正负电荷。标量场只有一种可能性, 对应于引力质量。用 R_{uv} 和 g_{uv} 来表征场并非是最好的方法。最好的方法是引入新的变量。利用变分原理描述之。我们将物体看成是一个体系, 其中球的对称性最高, 再设想这个球是由一些等势面构成。在这个等势面, 则在这个等势面的任意一点, 只考虑切平面方向, 则满足局部的对称, 其意义就是在切平面上任意方向势能相等。但是在其他的方向并不满足局部的对称, 其中变化最大的方向就是法向方向。而且正是这类不对称, 导致了万有引力场。这个不对称可以表述为势能随空间的导数。考虑整个系统的空间, 由于其满足整体对称。则这

个空间 所有的不对称所导致的作用量的和必然为零。这是系统保持稳定存在的条件。所以对称和稳定是一对孪生兄弟。所以，你如果试图用量子或者玄论去构筑这样一个稳定的系统是不可能的，因为他们本身就存在一个由什么构成以及稳定的问题。如果深入下去，我们可以为电场找到一个合适的数学模型，万有引力场不同，但也满足保森方程。

参考文献：

【1】Einstein 和英费尔德 著 周肇威译。《物理学的进化》上海科学技术出版社 1962 年。

附录：新华社东京 2006 年 8 月 4 日电（记者钱铮）日本高能加速器研究机构日前宣布，该机构参与的一个日美欧联合研究小组在世界上首次观测到 B 介子衰变为中微子和 τ 子的现象，这一极难观测到的特殊现象将可能成为验证“超对称性假说”的线索。根据高能加速器研究机构发布的新闻公报，研究小组利用该机构的大型加速器，使电子和正电子相互撞击，生成大量 B 介子。通过严密筛除衰变时产生的其他介子，研究小组发现存在伴随中微子出现而产生的能量，从而确认衰变产生了用设备无法直接检测出的中微子。对约 4.5 亿次 B 介子衰变数据进行分析的结果显示，其中有 17 次 B 介子衰变为中微子和 τ 子，而 τ 子又很快转变为电子，同时释放出中微子。“超对称性假说”预言宇宙中还存在未知的粒子，本次研究测算出了 B 介子衰变发生的概率，为研究宇宙中未知粒子是否存在的实验提供了线索。

8、弦理论的局限性

《科学》杂志 2004 年第 10 期的劳伦斯·M·克罗斯专访中提到：目前最让物理学家困惑的问题有三个：A、暗能量的本质是什么？B、怎样调和黑洞蒸发与量子力学？C、是否存在额外维度？克罗斯认为，这三大困惑还互相关联，而且都需要对量子力学有新的认识，但他对物理学界看好的超弦理论和圈量子引力理论作了拼击。他说，弦理论的时代会过去，因为面对物理学家的三大困惑，弦理论和圈量子引力理论所做的是，通过不小于某一特定距离的尺度来绕过困难。这是因为如果超过该尺度，事物将以不同的方式作用。从解决物理学问题的意义上，弦理论没有做出太大的成绩，虽然它产生了许多有趣的数学发现。弦论的时间观与相对论的时间观基本等同，并且进一步地认为时间可以卷曲或舒展，甚至认为不能给时间一个准确的定义。显然，这就与时间是空间及运动的天文学本质也不相关。沈志远教授认为：“基本方程是统一场论核心；弦论至今尚缺基本方程，圈论虽有宏观方程，并不适用于微观基本粒子，称不上基本”。

1. 自然界是超对称的吗？如果是，超对称性是如何破灭的？

许多物理学家认为，把包括引力在内的所有作用力统一成为单一的理论要求证明两种差异极大的粒子实际上存在密切的关系，这种关系就是所谓的超对称现象。第一种粒子是费密子，可以把它们粗略地说成是物质的基本组件，就像质子、电子和中子一样。它们聚集在一起组成物质。另一种粒子是玻色子，它们是传递作用力的粒子，类似于传递光的光子。在超对称的条件下，每一个费密子都有一个与之对应的玻色子，反之亦然。物理学家有杜撰古怪名字的冲动，他们把所谓的超级对称粒子称为“*s p a r t i c l e*”。但由于在自然界中还没有观察到 *s p a r t i c l e*，物理学家还需要解释这种对称性“破灭”的原因：随着宇宙冷却并凝结成现在的这种不对称状态，在其诞生之际所存在的数学上的完美被打破了。

2、为什么宇宙表现为一个时间维数和三个空间维数？

这只是因为还没有想到一个可以接受的答案，只是因为除了上下、左右、前后，人们无法想像在更多的方向上运动。这并不意味着宇宙原本就是这样的。实际上，根据超弦理论，肯定还存在着另外六个维数，每一维都呈卷曲状，十分微小，因而无法察觉。如果这一理论是正确的，那么为什么只有这三个维数是伸展开来的，留给我们这个相对幽闭恐怖的空间呢？

3. M 理论的基本自由度（M 理论的低能极限是 11 维的超引力，它包含 5 种相容的超弦理论）是多少？这一理论是否真实地描述了自然？

多年来，超弦理论最大的弱点是它有 5 个不同的版本。到底哪一个--如果有的话--描述了宇宙？反对这一理论的人最近已经接受了被称为 M 理论的最主要的 11 维理论框架。但情况却因此变得更加复杂。

在 M 理论前，所有的亚原子粒子都被说成是由微小的超弦组成的。M 理论给组成亚原子的物质谱加了一种叫做“膜”（*b r a n e*）的更为神秘的物质，它就像生理学上的膜一样，但最多有 9 个维数度。现在的问题是，什么是更基本的物质组成单位，是膜组成了弦还是刚好相反？或者另外存在着一些更基本的物质单位，只是人们没有想到罢了？最后，这两种东西中是否有一种确实存在，或者 M 理论仅仅是一种迷人的大脑游戏？

4. 何种物理学能够解释基本粒子的重力与其典型质量之间的巨大差距？

换言之，为什么重力比其他的作用力（如电磁力）要弱得多？一块磁铁能够吸起一个回形针，即使整个地球的引力在把它往下拉。根据最近的一种说法，重力实际上要大得多。它仅仅是看上去比较弱而已，因为大部分重力陷入了某一个额外的维数度之中。如果我们可以用高能粒子加速器俘获全部的重力，也许就有可能制造出微型黑洞。虽然这看上去会引起固体垃圾处理业的兴趣，但这些黑洞很可能刚一形成就消失了。

5、超弦理论是一个有望成功地统一自然相互作用的理论，但它到底是什么？

6、存在低能超对称吗？超对称伴子的质量谱是什么？

7、弦理论会被证明是正确的吗？

剑桥大学的物理学家戴维·堂（David Tong）则着迷于弦理论的数学之美。弦理论认为我们观测到的基本粒子并不是“点”状的而是微小的“弦”。但当他意识到兴许在他的有生之年也无法知道这一理论是否真的能描述宇宙万物的时候，他也感到了茫然。即使是大型强子对撞机和“普朗克”卫星这些旨在揭示出新物理学的实验也无法对弦理论下任何决定性的结论。另一方面，有些弦理论预言自然界还存在一种极其微弱的力，对于不同组成的物质它会使得引力发生微小的变化，这就会使得不同的物体在引力场中以不同的速度下落。但这一差别远远小于目前可测量的范畴。不过当他知道弦理论中的方法还可以用于其他更实际的问题——例如，夸克的行为和特殊金属——时，他也感到了一丝欣慰。“这是一个有用的理论，”堂说，“因此我正试图专注于它的应用。”

大量实验证实，非定域性是量子力学的一个基本属性。当前，量子引力理论中的超弦理论的时空背景相关性，与圈量子引力理论中的时空背景无关性同时存在，是物理学中潜在的对于时空本质不同态度的一次大碰撞，这种困难预示着物理学需要一次概念的变革，首当其冲的就是时空。时空观念是物理学中最基本的也是最重要的概念，不同的时空观念将导致不同的理论研究方向，任何对于时空概念的更新和深化，势必对整个物理学产生巨大的革命性的影响。

(1) 该理论能够给其理论内容范围之内的观察事实提供解释。理论的成熟程度与能解释的观察事实的全面性、准确性、无歧义性成正比。如果该理论不能给其理论内容范围之内的观察事实提供解释，那么这个理论就毫无意义了。如果理论的框架十分庞大、外表十分华丽，而能解释是事实并不多，理论的成熟度显然不够。当前的两个“标准模型”（宇宙学标准模型理论和粒子理论标准模型）就存在这样的问题，仅仅是因为“市面”上还没有比它们更好的理论，所以才获得“标准”的美名。说明它们仍然需要进一步改良和发展。

(2) 为建立该理论的公理、假设和参量是充分的和必要的。因为公理和假设是理论的基础，因此理论的成熟程度与公理和假设的严密程度成正比，与公理、假设和可调节参量的数量成反比。粒子理论的基本假设就不够严密，它以同位旋不变性这个假设为重要前提，但是事实上同位旋不是一个好的量子数，所以 QCD 中的同位旋和 SU(3)其实是人为塞进去的，然后硬是与 SU(2) \times U(1)结合起来构造出的理论。标准模型明显的存在假设和可调节参量过多（据他们自己承认多达 20 个，但是事实上不止，因为轻子和夸克质量参数已达 12 个，4 种规范场量子有中间玻色子、光子、胶子和引力子也达 13 个加上黑格斯子共达 23 个，加上不计精细结构常数的耦合强度系数有 3 个，还有混合角等参数至少 4 个，因此参量多达 30 个以上）的问题。尽管这样，QCD 和其标准模型仍然解释不了多少事实，所以 QCD 和标准模型事实上是相当不成熟的理论，只是因为参与建造的权威非常多，于是就黄袍加身罢了。

(3) 该理论应该是一个逻辑系统。不可存在内部逻辑混乱、自相矛盾之处，是自洽和完备的。因为数学是表现逻辑的最好方法，所以理论应尽可能数学化。这里应注意数学化的目的是使该物理理论的逻辑系统严密化、简明化和可操作化，而不是使物理数学化，来个喧宾夺主，可是现在的物理理论却不遗余力地力图走这条路，以至于用数学的结果代替物理结论，认为只要数学上可靠的结果，必然是物理上可能的结果。

(4) 该理论应该具有预言性和可证伪性。即不但能够提出还未被观察到的可能性，还可以具有被质疑的余地。预言的证实和准确度是理论成熟与否的重要标志之一。可证伪性是包含了预言的可重复性这一必要条件在内，所以是该理论能够经得起考验的科学标志。没有预言性和可证伪性的理论都不是科学理论。超弦理论提出了存在大量（至少与已知的一样多）粒子的预言。可是一个也观察不到，因此也可以说它已经是被证伪了的理论。

(5) 物理理论必须同时是可定量的科学。理论给出的计算值与观察量的吻合程度是理论质量的重要标志。物理理论是严密的科学理论，它只能允许理论上肯定存在（如测不准关系）的偏差和测量仪器限制的及环境条件所造成的技术性偏差。然而粒子理论的标准模型却视电磁质量差这个这个明显的事实于不顾，想当然的设定它为电磁作用的后果，以同位旋不变为基础，洋洋洒洒地建立起一套理论来，在数学方法上看似十分严密，但是岂能因为数学的严密就必然能构成严密的物理理论，因为事实上粒子理论离开给出完整的质量谱还遥远着呢。

(6) 一个成熟的理论还应具有可扩延性, 即该理论与相关的理论可以在一定的边界条件下相互自然的衔接, 如果能够通过推广甚至延伸为相关的理论的, 则更为优良。相对论和量子力学相对于经典物理都具有这样的特点, 但是它们两者之间却不能满足可扩延性。

9、弦膜圈说发展的历史回顾

威滕说: “M 在这里可以代表魔术 (magic)、神秘 (mystery) 或膜 (membrane), 依你所好而定。”施瓦茨则提醒大家注意, M 还代表矩阵 (matrix)。

1、1904年, 庞加莱提出庞加莱猜想, 奠定了当代前沿科学弦膜圈说的数学基础的形式体系。即正猜想的收缩或扩散, 涉及点、线、平面和球面; 逆猜想的收缩或扩散, 涉及圈线、管子和环面; 外猜想的空心圆球内外表面及翻转, 涉及正、反膜面、和点内、外时空。传统科学的结束, 革命科学的开始, 以“乌托子球”为最高理想的原子论 (量子论) 模型解读遍历科学的波尔兹曼, 在同一“战壕”里长期争论的苦闷中的自杀, 给革命和科学的分化与合作都留下了悬念。

2、1905年, 爱因斯坦提出狭义相对论, 揭示了弦膜圈说与四维时空的联系。

3、1910年, 卢瑟福提出原子行星轨道模型, 留下原子弦膜圈说的悬念。

4、1911年, 昂尼斯发现超导电流环现象, 留下电子弦膜圈说的悬念。

5、1913年, 玻尔发展卢瑟福模型为电子能级模型, 留下量子弦膜圈说的悬念。

6、1917年, 爱因斯坦发表广义相对论方程, 完善了从狭义到广义的弦膜圈说与四维时空的联系。德·西特找到爱因斯坦广义相对论方程的一个特殊解, 即宇宙高度对称, 空空如也, 并且不停地快速膨胀的德·西特时空。

7、1919年, 卡鲁扎以柱面条件和增添第五维, 统一广义相对论和电磁场方程, 开启当代西方弦膜圈说的先河。

8、1926年, 薛定谔发现量子力学的中心方程。克莱因以驻波加玻尔能级圆圈, 推算出第五维微小圈半径可到普朗克尺度, 强化了卡鲁扎方程; 卡鲁扎-克莱因奇迹成为当代西方弦膜圈说伟大的超越。

9、1936年, 狄拉克将二维旋量推广到高自旋方程。图灵提出可计算性概念, 图灵机演绎纸带及其方格揭示了弦膜圈说与计算机的联系; 图灵/康托尔论证、哥德尔定理和拓扑斯逻辑的缠结, 奠定了当代弦膜圈说不同于普通逻辑的基础。

10、1938年, 卡皮查等发现超流上向线旋现象, 留下宏观量子弦膜圈说的悬念。

11、1947年, 盖伯发明全息技术, 留下弦膜圈说全息会聚技术的悬念。

12、1948年, 申农提出通信极限和信息编码概念, 奠定了弦膜圈说与信息论结合的基础。

13、1949年, 费曼提出处理虚实粒子结合的费曼折线图, 奠定了弦膜圈说图像时空和量子的基础。

14、1953年, 沃森和克里克提出 DNA 双螺旋结构模型, 揭示了弦膜圈说与生命科学之间的联系。

15、1954年, 杨振宁和米尔斯提出改进了的三维坐标相位因子变换的量子规范场模型, 奠定了标准模型和弦膜圈说自旋编码描述的基础。

16、1957年, 卡拉比猜想封闭的空间, 有无可能存在没有物质分布的引力场; 这是涉及求解非线性偏微分方程的陈省身发现复流形上, 有反映复结构特征的不变量的陈省身示性类流形的一个著名难题。

17、1962年, 狄拉克提出电子膜理论。四川盐亭中学赵正旭老师, 启发学生钻研与庞加莱猜想相关的空心圆球内外表面翻转的难题, 有学生从竹子后期的竹桠枝端上的发育, 与早期竹笋子端上发育的相似与区别观察, 类比联系, 提出宇宙收缩可能有视界的自然全息类比原理。

18、1963年, 盖尔曼和茨威格提出夸克模型, 第一次把能量、物质和数学不可分地融合在一起, 为弦膜圈说进入夸克打下基础。

19、1965年, 彭罗斯将拓扑学运用于时空奇点研究, 提出黑洞奇点定理。彭齐亚斯和威尔逊在无意中发​​现宇宙微波背景, 证实弗里德曼的宇宙膨胀假设和伽莫夫的宇宙大爆炸假说的一些预见。武汉钢铁学院有学生向中国《科学通报》投稿“论宇宙”, 用盐中学生发现的竹桠枝与竹笋发育类比联系的自然全息原理, 论证宇宙有界以表示支持。《红旗》杂志在1964“北京科学讨论会”有关自然辩证法等讨论认识统一的基础上, 发表坂田的新基本粒子观对话的论文和加的注释, 强调宇宙无限性和物质粒子的无限可分性。当代纯基础科学进入全球合作应对与分化对立, 难于选择, 弦膜圈说莫能例外。

20、1966年, 高锟发表《光频率介质纤维表面波导》的论文, 提出光导纤维在通信上应用的基本原理, 留下了弦膜圈说在点线内空间运用的悬念。中国一部分学者7月23日至31日在北京举办的世界科协北京中心“1966年暑期物理讨论会”上, 报告了粒子物理的最新研究成果——层子模型。层子模型认为: 物质结构有无限的层次, 在粒子层次上的构成组分是层子, 但层子并不是物质最终的组成部分。该模型的层子波函数

挑战了扭量层上调理论的“层”概念和函数类型，加速了武汉钢铁学院有学生用三旋弦膜圈说对基本粒子的探索；以及利用文革停课开会等机会，试验层次互动的“脑力思维二电机假说”。这是从武钢轧钢厂观察到的在大型轧钢机等重要地方，为要及时排除故障，配有两台电机的类比猜想；实验是使两只手同时向下作按的相同动作，并注意静默的大脑里感觉和意识位置的交换和交替。

21、1967年，温伯格和萨拉姆与格拉肖，提出了统一电磁作用与弱作用的规范场理论，他们用规范对称性的几何思想引发了量子色动力学的创立，留下弦膜圈说与超对称性联系的悬念。彭罗斯正式创立扭量理论，其三维球面上，球极平面投影的克利福德平行线，如“抓拍”的鲁滨逊线汇的空间图像，就清楚地再现了东方类圈体三旋的线旋图像。在武汉钢铁学院实习工厂车间劳动中，有学生从观察葫芦吊及其链条运动的工作，联系图解牛顿和爱因斯坦引力方程的韦尔张量与里奇张量，把葫芦吊类比星球，葫芦吊链条类比星球引力如外面飞散的蓬松的毛发或弦链，留下宏观量子引力类似“毛球”或者“弦星”的弦膜圈说悬念。

22、1968年，韦内齐亚诺提出用小小的一维的振动的弦来模拟基本粒子，标志当代西方弦理论的正式诞生。惠勒和德韦特等提出类似薛定谔方程的宇宙波函数方程，奠定了量子宇宙学弦膜圈说的基础。王文祥开始提出组成物质世界的基本单元，是一种如弯弓形状“ ”的曲线的假说，并想方设法寻找在地学领域的运用，如地质勘探测量仪器的研制。

23、1969年，普里高津提出耗散结构理论，从贝纳德花纹热对流，联系耗散结构远离平衡态下动态的稳定有序图像，也再现了弦膜圈说三旋类圈体线旋的开放图像。

24、1970年，南部一郎对韦内齐亚诺方程用另一种观点解释，认为这里单个的强子是一根弦而不是粒子；弦的历史是一2维曲面，与标准的费曼图实际上是拓扑等价的，留下弦膜圈说与费曼图联系的悬念。格林和施瓦兹再加入超对称性概念，合成“超弦理论”。

25、1971年，安德列·纳瓦尔与施瓦兹提出自旋弦论，可将费米子纳入其中，而原始的弦论模型描述的只是玻色子。彭罗斯提出自旋网络方法的离散模型，为后来斯莫林的圈量子引力研究打下基础。

26、1974年，丁肇中发现第一个夸克---粲夸克。施瓦兹和谢尔克提出弦理论不单是强力的理论，也一个包含了引力的量子理论。十八冶三公司机修科写出的《基本粒子的结构不是类点体，而是类圈体》的论文，把类圈体的三旋编码运用于对夸克的描述。特霍夫特等提出的类似“流管”的电磁对偶性理论，涉及夸克禁闭解释。霍金提出的黑洞辐射理论，也留下弦膜圈说视界有内外区分的悬念。

27、1976年，威尔逊提出格点构想，通过在格点上画场线和规则的色-电场线，表达夸克和弦，称威尔逊圈；其空间被想像成由边相连的结点所构成的格点，夸克只能存在于格点的结点上。

28、1977年，丘成桐证明了卡拉比猜想，并取得了代数几何学、复解析几何学、微分几何学甚至广义相对论等领域的一系列重要定理。

29、1978年，史密斯发表《形式本体论》，引导了弦膜圈说的形式本体论及形式体系思考。

30、1981年，古斯提出暴涨宇宙模型。格林和施瓦兹认为弦具有超对称性。张颖清在《自然杂志》发表生物全息律，在中国开创了把观察与联想具像化的全息思维模式。

31、1982年，《潜科学杂志》发表自然全息律，提出圈态线旋模式的宇宙网络思想。印度物理学家森，把广义相对论方程表述成简单而精致的联系威尔逊圈解形式的方程，为圈量子引力研究打下基础。1983年，鲁巴柯夫等提出大额外维度思想。

33、1984年，第一次超弦革命开始，格林和施瓦兹的一篇里程碑论文，证明弦理论能容纳四种基本力，并把开弦发展到包括闭弦的几何图像。吉川圭二和山崎讨论弦理论，提出绕在圆环上的缠绕模式和能量模式交换的T对偶性，留下弦膜圈说与拓扑的对偶性联系的悬念。《自然信息》杂志发表《生物全息律的普遍意义》，《石家庄科技报》发表《大陆起源与线旋》，表明东方弦膜圈说早超出研究微观领域的范围。

34、1985年，格罗斯、威藤和施瓦兹等提出多维多种的杂化弦圈图模型，并与卡拉比-丘流形相联系。《自然信息》杂志发表《隐秩序和全息论》，第一次以东方弦膜圈说解释了玻姆的量子现象的隐参量理论，和爱因斯坦、波多尔斯基、罗森等发现的量子幽灵EPR现象。

35、1986年，美籍华裔物理学家阿什塔卡，提出处理广义相对论的标准哈密顿量中具有复杂的非多项式结构的重要简化方法，即输入带手征的阿什塔卡变量。休斯特提出将超对称与膜理论嫁接的超膜理论。威藤提出的非对易几何方案，对建构超弦协变场论，成为促进微扰超弦理论的最为突出的深层次探讨；研究超弦唯像学对于紧致空间，已不限于卡拉比-丘流形，还包括了轨形、陪集空间等。华东工学院学报发表《前夸克类圈体模型能改变前夸克粒子模型的手征性和对称破缺》，《交叉科学》杂志发表《从夸克到生物学》，揭开东方弦膜圈说从夸克到生物学应用的新篇章。

36、1987年，霍金处理黑洞问题提出婴儿宇宙和虫洞概念。丘成桐和田刚发现弦理论从一个已知卡-丘空间生成新空间的途径，即简化变换操作破裂、缝合的丘-田过程。《潜科学》杂志发表《高温物理超导和生物超导机制的思维》，把弦膜圈说引向超导研究。

37、1988年，霍金出版《时间简史》一书，在物理学的统一世界推广普及弦膜圈说。斯莫林和罗维利等在广义相对论基础上发展基于圈变量的量子引力，标志西方圈量子引力理论的诞生。《四川大学报》发表《诞生在中国的三旋坐标学说》的介绍文章。

38、1989年，彭罗斯出版《皇帝新脑》，奠定了从图灵机人工智能到量子引力和精神物理的弦膜圈说应用探讨的基础。坡尔钦斯基等发现弦论方程的新型膜延展解。1990年，斯特罗明格发现不同弦理论间的强耦合和弱耦合间的S对偶性。上饶师专学报发表《论大脑密码学的三旋数学模型》，把弦膜圈说引向大脑信息处理的深层次探讨。

39、1992年，莫斯林和罗维利等，在弦膜圈说中引入编织概念。渝州大学学报发表《三旋与自旋磁陀螺的反向倾斜与公转》，《自然信息》杂志发表《关于冷聚变的思考》，介绍弦膜圈说在普通物理和核化学中的一些应用。

40、1993年，四川大学出版社出版《分形理论的哲学发轫》一书，发表《分形与复杂性探索》，介绍弦膜圈说结合分形在非线性等复杂性物质系统中的一些应用。

41、1994年，孔涅出版《非对易几何》，推动非对易几何在超弦/M理论中的应用；他以频谱计算为依据，证明了可以把所有的自然力都纳入到同一个非交换的空间中来，并能使用重正化的方法。莫斯林和罗维利推证在普朗克标度空间，存在面积和体积的量子离散性。河北师范大学学报发表《语言学和生物全息律》，介绍弦膜圈说在语言学和生物学中的一些应用。

42、1995年，威藤根据超弦间的对偶性，提出统一五种超弦理论的M理论。莫斯林和罗维利阐明自旋网络形式体系。坡尔钦斯基 (Polchinski)引入D膜，简化了对偶性讨论；坡尔钦斯基等发现D膜可以描述弦论。西南交通大学出版社出版的《中国科协青年学术年会四川卫星会议论文集》一书，发表《当代地学理论的探索》，展示了东方弦膜圈说在地学应用的探讨。

43、1996年，斯特劳明格与瓦法计算出五维黑洞熵，成为第二次超弦革命的高峰之作。罗维利从圈量子引力推出贝肯斯坦-霍金黑洞熵公式。《大自然探索》杂志发表《物质族基本粒子质量谱计算公式》，延边大学学报发表《共轭多烯电环合反应的三旋联系》和《模拟DNA双螺旋结构的机械孤立波》等论文，展示了东方弦膜圈说对物质质量起源到有机化学反应的深层次应用的探讨。

44、1997年，马德西纳提出反德·西特时空/共形场论的对偶性猜想，即作用于某一空间的引力理论与作用于时空边界的无引力量子场论之间，可能存在着某种精确的对应关系。这正是全息原理的例子。全息原理类似能从二维曲面角度感知到三维图像。马德西纳等人还证明至少在一定条件下，弦理论体现着全息原理。有些弦理论家还认为，彻底认识全息原理和它在弦理论中的运用，将导致第三次超弦革命。

45、1998年，斯莫林探讨圈量子引力和弦理论的一致性。延边大学学报发表《胶子球候选者中最佳组合态预测》，提出了一种在强子对撞机上检验弦膜圈说的实验方法。

46、1999年，布索提出全息原理可能是统一圈量子引力和超弦/M理论的一个共同假设的表述。延边大学学报发表《量子计算机与双螺旋结构的三旋联系》的论文，揭示弦膜圈说在量子计算机和DNA之间的联系。

47、2000年，兰达尔和桑德勒姆提出宇宙的5维世界膜模型，即RS模型。

48、2001年，斯坦哈特和特鲁克提出两个D膜之间碰撞的宇宙火劫/循环模型。

49、霍金第一次到北京传播西方的弦膜圈说前沿科学。2003年，对霍金的《时间简史》以弦膜圈说贯穿的《解读时间简史》一书出版。凉山大学学报以《从卡-丘空间到轨形拓扑》开始发表的一组论文，对弦理论遇到三大数学物理难题等给予了解答。2004年，论文《从电脑信息论到量子计算机信息论》的发表，把“克隆与不可克隆”的弦膜圈说引进了计算机和信息等学科。2005年，被定为世界物理年，也是爱因斯坦奇迹年100周年，中科院理论物理所成立了以诺贝尔物理学奖获得者，美国Kavli理论物理所所长David Gross为主席的第一个国际顾问委员会；在研究超弦宇宙学、超弦理论非对易几何、超对称规范理论、全息暗能量模型和不稳定膜的引力衰变等方面，都取得进展，理论物理所超弦研究团队，已成为亚洲最强的团队之一。

50、2006年，霍金第二次和威藤等科学家到北京传播西方的弦膜圈说前沿科学。佩雷尔曼证明百年数学难题庞加莱猜想，获菲尔茨奖；庞加莱猜想借丘成桐和媒体宣传朱熹平等对佩雷尔曼证明的推广解读，在我国得到广为传播。论文《宇宙开端之前无时间新解》的发表，借助庞加莱猜想外定理的空心圆球内外表面

翻转熵流，把时间之箭和热力学、量子论、相对论、超弦论等联系起来。2007年，弦论走到了庞加莱猜想，《求衡论---庞加莱猜想应用》一书出版，点燃第三次超弦革命视野。

第四章 统一场论的展望

1、引力场与电磁场统一途径展望

Einstein 在临终前八个月曾表示：“……我认为非常有可能，物理学不是建立在场的概念上，即不是建立在连续体上的。如果是这样，那末，我的空中楼阁——包括引力论在内——甚至连其他现代物理学也一样，都将荡然无存。”由于 Einstein 的引力场与 Maxwell 的电磁场都是从宏观物质存在总结出来的，且均为宏观物质实体，所以统一场论思想也应从宏观存在入手。另外，应力作用影响实在空间的几何形状，而与引力相类似的电磁力作用同样也应该影响实在空间的几何形状。因为空间和时间的客观意义在于：四维连续区是双曲面型的，因此，从每一点出发，都有“时间的”（即 $ds^2 < 0$ ）和“空间的”（即 $ds^2 > 0$ ）线元。【1】从这一点，统一场论理所当然地也应从宏观存在的空间的几何变形入手。基于以上两点，从微观世界寻找统一场的考虑就不存在了，这也符合 Einstein 的统一思想。

如果接受 Einstein 的有引力场的对称度规张量 $g_{\mu\nu}$ 和电磁场的反对称电磁张量 $F_{\mu\nu}$ 考虑的一个对称部分 s_{ik} 和一个实数的或纯虚数的反对称部分 a_{ik} 之和而形成的表示度规的非对称张量 g_{ik} 的思想的话，那么，我们将走入误区。因为引力场的度规张量 $g_{\mu\nu}$ 为对称张量，且每个元素是非矢量的协变分量和逆变分量的集合——纯几何量构成的；而电磁场的电磁张量 $F_{\mu\nu}$ 只能表示电磁张量，其中的每个元素是由只具有几何特征的纯电磁场量构成的，并非表示电磁场的空间度规成份——电磁场引起的空间的几何变形。因此，电磁场的空间度规，不一定非为反对称张量 a_{ik} 不可——由电磁张量不能确定电磁度规的结构，也许与引力场相似它也是对称张量。

如果接受束星北的电磁与引力间的复数形式的结合的话，虽然满足了相同符号的两个质点彼此相吸，而相同符号的两个电荷彼此相斥的结论，但这也许可得到电磁与引力之间毫无相干这样的结果，尽管这对从总场分解出电磁与引力的各分场有利，但和电磁与引力也许是一个统一的相互影响的整体的可能性相矛盾。

也许 Kaluza 的五维空间法是一个很不错的方法，但要注意的是电磁张量 $F_{\mu\nu}$ 并不代表空间的几何变形，要重新寻找电磁的度规表示。这样，也许才能在更高维的空间中构成一个单一的“统一场”。综上所述，二场的统一，一方面要在宏观世界上进行，另一方面，还要相互和谐，不能是简单的合并，要符合物理的实在同一性，也要符合物理意义。

Einstein 曾指出：“我设法去找在形式上有点类似于真空引力方程而又同总场有关的东西，把它作为总场方程。”【2】在宇宙物质的场方程中，曲率张量的出线应该说是由于受到某种或者是引力或者是电磁力的作用而引起的，即由于物质储备了能量动量而引起了周围时空的曲率张量。这样，我们如果分析 Einstein 的引力场方程就会知道，方程的左边是空间的几何变分量，我们不妨叫它“几何能量动量张量”（因为在平直空间的基础上，几何变形应该说是“蓄能”的过程）；而右边是物体的能量动量张量形式。因为从作用力的角度来考虑，两个质点的引力与两个异种电荷的引力在本质上的作用机理是相似的——都是吸引力，所以电磁作用同样会引起与引力作用相似的空间几何变化，也许变形的程度有所不同罢了。若对两个同种电荷质点的相斥来说，由于引力引起空间变形的事实，斥力也应该会引起空间几何形状的变化。从能量辐射的角度来说，引力辐射会引起空间形状的改变，那么电磁辐射也应该影响空间形状，只是影响的形状或程度不同罢了，Einstein 本人在 1923 年发表的《仿射场论》一文中也得到了类似的结果。【3】此外，Einstein 的广义相对论的结论也与电磁场情况相对应——具有与电荷在其周围引起静电势一样的引力势，即“电”分量；也有做圆周运动的电荷具有磁矩及磁矩与磁矩之间的作用相类似的旋转的物体会产生引力“磁”矩，而且两个旋转物体之间会有引力“磁”矩的相互作用。【4】这样，我们应该考虑到有把 Einstein 引力场方程修改为统一场方程的可能。从形式上看，Einstein 的引力场方程应该说是能量动量守恒的一部分，因为在广阔的宇宙之中，除了引力的能量动量之外，还有电磁的能量动量部分。由于在 Einstein 引力场方程中左边已经是“几何的能量动量”形式了，所以可以认为两种场的合作用所引起的合几何变形归因于这个“几何的能量动量”形式，而右边的物体的能量动量形式应该变为电磁与引力共同作用下的物体的能量动量形式，其中由于 Lorentz 力是电磁作用的另一种形式，它同样会引起力效应和电磁辐射，所以为了包含所有客观的二场作用，也考虑根据物体的能量动量守恒情况，在方程的右边也应考虑到 Lorentz 力作功的情况，基于这些思想，在不修正 Riemann 几何的情况下，左边的几何形变应该是两种能量动量张量和 Lorentz 力作功的合作结晶。这样，统一场方程可以写为 $G_{\mu\nu} = 8\pi G_{\mu 0 2 \epsilon 0 2} (T_{\mu\nu} + \int F_{\mu\nu} J_{\nu dx})$ ，其中 $G_{\mu\nu}$ 为 Einstein 张量， G 为 Newton 引力常数， J_{ν} 为电流密度， $T_{\mu\nu}$ 为引力与电磁能量动量张量之和。在这个方程中可以看到，电磁与引力是不可分的统一整体，只是存在的环境不同，哪种成份表现的更强与更弱的问题——在大尺度宇宙空间中，引力更强一些，相对地电磁力可以忽

略，而在我们生活的空间（比如实验室）和微观世界里，电磁作用更强一些，引力可以忽略。当然，这个方程与 Einstein 的引力方程相似，同样包含有物质的运动方程。而且从这个方程中很自然地可以分解出 Maxwell 电磁场方程组和 Einstein 引力场方程，这也许对引力场的量子化有好处，能提供一个引力场的量子化方法，因为电磁场可以量子化，那么用同样的方法对统一场量子化，即可得到引力场的量子化。

Einstein 关于统一场论的贡献不止在于他提出了统一场论的思想，而且还在于他让人们认识到电磁场是不能直接几何化的，由于电磁质量的数值在实数集上量子分布，引力质量的数值在实数集上连续分布，所以 electric field 的数值在实数集上量子分布，引力场的数值在实数集上连续分布，二者有着差异的一面，尽管 Einstein 的引力理论依赖于二次微分形式，然而电磁理论却依赖于线性微分形式 $\Sigma A_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu$ ，这可能是现代物理学难以将其统一在一起的重要原因——现代物理学未让量子力学进入的唯一领域是引力和宇宙的大尺度结构，将引力场量子化遇到无穷大的困难。重整化可以消除无限大的问题，但是由于重整化意味着引力质量的作用力的强度的实际值不能从理论上得到预言，必须被选择以去适合观测，因此重整化有一严重缺陷。目前要取得进展，能够建议采用的最有力的方法，就是在企图完成和推广组成理论物理现有基础的数学形式时，利用纯数学的所有源泉，并在这个方面取得每次成功之后，试着用物理的实体来解释新的数学特色。若将其统一在一起或许需要创立新的数学工具，把拓扑空间与度量空间统一在一起，认为离散与连续是相对性与绝对性的统一，把标准分析与非标准分析统一在一起。空间——时间结构在 Planck 尺度下会有基本改变，量子引力必须为一个时间不对称的理论，可以消除量子场论的无限大。Einstein 讲：“有两种彼此独立的空间结构，即度规——引力的结构和电磁结构。、、、、这就使我们相信：这两种场必定对应于一个统一的空间结构。”当代著名的数学家和理论物理学家 Stephen W. Hawking 在《时间简史》中写到：“然而，如果我们确实发现了一套完整的理论，它应该在一般的原理上及时让所有人（而不仅仅是少数科学家）所理解。那时，我们所有人，包括哲学家、科学家以及普通的人，都能参加为何我们和宇宙存在的问题的讨论。”

无论是连续的观点或是分立的观点，他们都默认自然是统一的观点，分立的观点以古希腊的‘四元素说’，原子论以及现代物理的量子理论为代表，连续的观点以迪卡尔的旋涡论以及奥斯瓦尔多唯能论为代表；争论的结果大家都知道，以分立的观点胜利而告终。类似的争论在中国古代的思想史上也有过，比如说五行学说就是分立的观点，而诸如道家和佛家则持连续的观点。所谓分立学说和连续学说，一言以蔽之：构成自然本质的存在，究竟是分立的基本粒子，还是某种连续分布的存在。分立学说认为：自然统一于物质，物质是由基本粒子构成，空间是物质运动和变化的场所，他没有任何物理意义。连续学说认为：自然统一于某种连续变化的存在，物质和空间是这种存在的运动和变化的表现形式。

时空是物质存在的根本形式。当我们感觉到物质存在的同时也就感觉到物体间的相互邻接关系，以及在同一地点事件发生的先后次序，即有了时空的拓扑概念。我们可以利用一系列邻接关系不变的质点系来建立时空的拓扑几何学。我们认为实践证明空间是三维的，由三条开曲线的拓扑乘积所构成，即与 R^3 同胚，而时间则是一维的开曲线流型，即为 R^1 。

根据离散与连续的相对性与绝对性原理，电磁质量的跃迁是物体运动的一种形式，是拓扑空间里的连续运动；引力质量的运动是度量空间里的连续运动，在拓扑空间里也是跃迁。将引力场量子化进而建立起量子化的引力场论（即量子引力）是当前一个重大任务。与广义相对论相比，标量——张量引力论具有很强的竞争力。广义相对论在宇宙学及天体物理学中的应用已取得巨大成功，但是许多疑难问题有待解决。例如奇异性困难、暗物质的构成及其存在形式、物理性质、在宇宙中占有比例及其对宇宙演化的作用，物质反物质的不对称性，宇宙常数，原初核合成，宇宙早期相变过程的拓扑欠缺问题等等。国际上若干大型空间和地面天文观测装置（包括大型望远镜、引力波天文台、等效原理的检验装置等等。将在今后若干年内投入使用，这将对现有的宇宙学理论、引力波的预言以及等效原理的正确性提供更精确的检验，随之而来的将是宇宙学和引力论的迅速发展，为理论工作提供更多获取重要成果的机遇。

根据相对绝对论物质世界的整体性与可分性既是绝对的，又是相对的，所以电磁质量的数值在实数集上量子分布与引力质量的数值在实数集上连续分布既是绝对的，又是相对的。根据 D. 玻姆的隐秩序学说，完整运动包罗一切、产生一切，引力场与 electric field 可以统一在一起，这是由对称的绝对性所决定的。最近法国一个研究小组证明，在重力的作用下运动的物体不会毫无阻碍地落下，而是摇曳的、跳跃式地落下。这种运动方式与围绕原子核运行的电子相似。从理论上说，这个规律用于所有的物质。不过，在重力条件下，这种现象极难观测。在极低的温度下，中子不带电子，移动非常缓慢，通常会与质子一块形成原子核。研究人员设法使中子与重力外的其它基本力场隔绝进行观察。在上百次的下落运动观察中，人们发现中子下落的过程并非一个连续的过程，而是从一个高度跃迁至另一个高度，正如量子理论所观测的一样。它进一步说明引力场与 electric field 可以统一在一起。引力质量与电磁质量可能是宇宙统一原的两种不同的表现形式。1967

年—1968年，格莱肖、Steven Weinberg 和 Abdus Salam 在现代高能物理实验的基础上把规范场观念和对称性自发破缺希格斯机制结合起来，中间玻色子获得引力质量，而光子则仍为静质量等于 0 的玻色子，构造了一个统一弱作用和电磁作用的模型，把自发破缺的观念引入规范理论问题，它既解决了规范粒子的引力质量问题，又没有破坏对称精神，令人注意的是它的结果与实验符合得很好，虽然从理论观点看来，它只是许多可能的模型中的一个。【5】用波函数表示原子的态就意味着，在原子的态中，空间的线性关系和时间的因果关系之间是由一种密切的关系的，说明它们具有等价性的一面。“统一场论看来就像一座灯塔，能够引导极度痛苦的宇宙探索者，引导为真理而战的追随者。”

哈佛大学邱成桐教授主持下在北京人大大会堂开过三次大会的“超弦论”，似乎用连续论数学能统一四场、却未必能否定断续论数学在微观物理世界的作用而统一真实的物理宇宙，更无法否定人类已揭示的生命科学在[基因碱基对→氨基酸→蛋白质]三个层次上以整量出现的密码语言与键连结使其连续为对称双螺旋表达，宇宙在[生命|无生命]对称的高低两端演化进程的交叉也许是微观物理[波|粒]二象统一性映射在[相对论|量子力学]上对于[连续|断续]宇宙二象对称双螺旋表达更深刻的揭示，的确：就连大名鼎鼎的英国科学家霍金也认为：“不太可能建立一个单一的能协调和完善地描述宇宙的理论。”，因此宇宙的信息单位总是以一个“对称元”[Bit]来表达的。

自然界中存在四种基本相互作用，即引力相互作用、电磁相互作用、强相互作用和弱相互作用。目前已经建立了统一描述电磁、强和弱相互作用的大统一理论，而引力仍徘徊在统一理论之外。为建立一个统一描述自然的基本理论，人们必须对引力本质有深刻的理解。始于上世纪七十年代黑洞物理的研究，人们发现引力不同于其它三种相互作用的基本原因是引力具有一种所谓的全息性质：一个引力体系的自由度由该体系的表面面积决定。这一概念由诺贝尔物理奖获得者't Hooft 在 1993 年提出。多年来引力的基本性质一直是国际上理论物理的研究热点之一。蔡荣根，王斌，张元仲及其合作者自上世纪九十年代初就开始在引力的基本性质及其在黑洞物理和宇宙学等领域中的应用开展合作研究，取得了一系列研究成果，共发表论文 300 余篇，其中发表在影响因子 4 以上的国际一流学术杂志如 Phys. Rev. Lett., Nucl. Phys. B, Phys. Lett. B, Phys. Rev. D, JHEP 和 JCAP 等有 200 余篇，相关工作被国际同行他引 5000 余次，SCI 他引 3344 次，其中 8 篇代表性论文被 SCI 他引 495 次，并多次被邀请在相关国际学术会议上作大会邀请报告。

本项目主要成果如下：(1) 在反德西特和德西特时空中的黑洞物理研究方面，发现了爱因斯坦场方程的 Gauss-Bonnet 拓扑黑洞解，该论文成为国际上关于 Gauss-Bonnet 黑洞的三篇重要的经典文章之一，并成为许多后续研究的出发点；提出了拓扑德西特时空解，证实了一个关于德西特时空质量上限的重要猜测，为理解德西特时空的经典和量子性质奠定了基础，对此解的命名也被国际同行广泛采纳；建立了(反)德西特时空中视界热力学熵和共形场论的 Cardy-Verlinde 公式的联系；研究了带荷反德西特黑洞的准正则模，证明了小反德西特黑洞准正则模振荡频率并不随温度变化，澄清了文献中的争论；首次在反德西特时空中引入可调曲率耦合常数，揭示了在不同拓扑背景中具有曲率耦合标量场的波动行为。这些研究深刻揭示了引力的全息性质。(2) 建立了热力学第一定律和爱因斯坦场方程的联系。从热力学第一定律出发首次完整地推导出了描述宇宙时空动力学的 Friedmann 方程，建立了表观视界熵与其几何的关系，给出了膜世界视界熵和表观视界几何的联系。这一研究为理解引力的基本性质提供了新思路。(3) 将引力全息性质应用于动力学时空，发现全息性质能对宇宙学暴胀模型和暗能量模型给出许多富有物理意义的结果。在真实的非均匀宇宙模型中，最先研究利用全息性质和熵限可以挑选符合物理的宇宙模型。这些表明宇宙学研究对理解引力的本质起到重要的作用。上述成果对引力基本性质的研究做出了实质性贡献，引发了国际同行的许多后续研究，推动了该领域的发展。康德评论道：“根据理性的立法规则，决不能允许我们的各种知识的模式仅仅是一种大杂烩，而必须要形成体系。只有这样它们才能追求理性的根本目的。据我理解，一种体系就是在一种理念指导下的多种知识模式的统一。”

参考文献：

- 【1】许良英、赵中立、张宣三编译 Einstein 文集（第三卷）第 1 版 北京 商务印书馆出版 1979 年 P. 421。
- 【2】许良英、赵中立、张宣三编译 Einstein 文集（第三卷）第 1 版 北京 商务印书馆出版 1979 年 P. 470。
- 【3】范岱年、赵中立、许良英编译 Einstein 文集（第二卷）第 1 版 北京 商务印书馆出版 1977 年 P.397。
- 【4】方励之 天体物理学前沿鸟瞰 第 1 版 上海 科学技术文献出版社出版 1989 年 P.30。
- 【5】宁平治、唐贤民、张庆华 主编。《杨振宁演讲集》南开大学出版社 1996 年 8 月。

2、量子几何与现代物理学

爱因斯坦承认道：相对论“这理论直到现在还未提出一个关于物质的原子论性结构的解释。这种失败，

也许同它对理解量子现象至今尚无贡献的这一事实有关。”(爱因斯坦。爱因斯坦文集(第一卷)[M]。许良英、范岱年, 编译。北京: 商务印书馆, 1976:391)。爱因斯坦还说:“为了真正证明量子关系, 显然需要新的数学语言。无论如何, 用微分方程组和积分条件来记录自然规律, 正如我们今天所做的那样, 是同合理的想法矛盾的。理论物理学的基础重新受到震撼, 实验要求我们能够在新的更高的水平上找到描述自然规律的方法。新思想要到什么时候才会出现呢? 谁要是能够活到那个时候并且能够看到这一点, 那该是多么幸福啊。一个明智的科学家。应该在探索科学真理的过程中, 清醒地看到外部标准和内部标准的应有地位, 充分发挥二者的有效作用, 使之珠联璧合、相得益彰, 把科学认识推向前进。从特殊的感性知识到逻辑自洽的理论体系的发展, 必须依靠数学。没有新的逻辑自洽的数学形式的出现, 新的物理学的普遍理论体系是不可能产生的。物理科学所描绘的是实在的一个分析性的方面; 经验告诉我们, 物理学所绘制的图表使我们能够预测, 有时还能控制自然界的作用。知识的大综合是时常进行的。字谜画中的各个方块突然配合起来了; 不同的孤立的概念由某一个伟大的科学家融合起来了, 这时就会出现壮观的盛况——牛顿创立天体演化学, 麦克斯韦把光和电统一起来, 爱因斯坦把万有引力归结为空间和时间的一个共同特性, 都是这样的情况。一切迹象都说明, 还会有这样一次综合。在这样一个综合中, 相对论, 量子论和波动力学可能会归入到某一个包罗万象的、统一的、单一的基本概念里去。

20 世纪理论物理学家说得最多的话题是广义相对论和量子理论, 而量子几何正是为现代物理学这两大支柱整合服务的。因为空间量子化不仅是许多物理学家曾经的猜测, 而且因量子化概念本身的广泛应用已开启了人们的想象, 传统的量子引力方案是继承广义相对论经典的表述方式, 即以度规场作为基本场量, 一个连续的背景时空会是量子场论中紫外发散的根源。1971 年 R. Penrose 首先提出了一个具体的离散空间模型, 其代数形式与自旋所满足的代数关系相似, 被称为 spin network。1986 年后, A. Ashtekar 等物理学家借鉴了 A. Sen 的研究工作, 在正则量子化方案中引进了一种全新的表述方式, 即以自对偶自旋联络作为基本场量, 这组场量通常被称为 Ashtekar 变量, 由此为正则量子引力的研究开创了一番新的天地。同时 T. Jacobson 和 L. Smolin 发现 Ashtekar 变量的 Wilson loop 满足 Wheeler-DeWitt 方程。在此基础上 C. Rovelli 和 Smolin 提出把这种 Wilson loop 作为量子引力的基本态, 从而形成了现代量子引力理论的一个重要方案: Loop Quantum Gravity。1994 年 Rovelli 和 Smolin 研究了 Loop Quantum Gravity 中的面积与体积算符的本征值, 结果发现这些本征值都是离散的, 它们对应的本征态和 Penrose 的 spin network 存在密切的对应关系。Loop Quantum Gravity 因此也被称为量子几何 (Quantum Geometry)。这里它完全避免使用度规场, 从而也不再引进所谓的背景度规, 因此被称为是一种背景无关的量子引力理论。一些物理学家认为 Loop Quantum Gravity 的这种背景无关性是符合量子引力的物理本质的, 因为广义相对论的一个最基本的结论就是时空度规本身由动力学规律所决定, 因而量子引力理论是关于时空度规本身的量子理论。在这样的理论中经典的背景度规不应该有独立的存在, 而只能作为量子场的期待值出现。

量子场论纲领认为, 场(量子场)才是第一性的实在, 粒子不是永固不变的而只是派生的, 通过激发和退激, 粒子(=场量子)在场中产生和湮灭, 相互作用是通过量子场来实现的。量子场以局域耦合和场量子的为基础。总之, 这种系统阐述方式, 是植根于通过局域耦合概念而建立的算符场的定域激发概念。从数学角度看, 抽象的希尔伯特空间中的对称变换群, 构成一般量子力学的数学基础, 可观察量是用其中的线性厄米算符表示的。量子场论所处理的是所谓的定域场(局域场)。也就是说, 场变量只在一个点空间才有定义, 定域场相当于一个算符, 定域的场算符。量子场论确立之后, 能够用场理论的产生和湮灭算符方便而精确地描述所有相关过程(包括玻色子、费米子的场, 还包括其间的基本相互作用)。换句话说, 费米子和玻色子都被看作是一个场的量子。在场论的这种表述中, 引入产生和湮灭算符(即 a , a^* 或 b , b^*)以增加或减少在某种量子态中的粒子数。一个振子振幅的算符能够产生或者毁灭振子的一个量子。这样, 物理上场量子的产生和湮灭过程以及哲学上的生成论思想, 其关键性特征可以通过精致的数学形式加以刻画。可见, 宇宙奥秘深藏于数学规律的毕达哥拉斯主义理念, 对由量子场所代表的流变的微观物理世界并没有例外。

尽管在引力场几何化纲领和量子场论纲领之间, 从相互作用机制上说存在着深刻的区别(前者涉及宏观、外部空间, 后者涉及微观、抽象空间)。然而, 引力场与量子场在场本体论上却仍然有一致性。曹天予在《规范理论和基础物理学的几何化》(1987)中提出了将规范场与引力场进行细致类比的思想。如果从规范场论的眼光来看引力场, 那么局域规范对称性就可消除时空的平坦性, 而仿射联络能够在弯曲时空中起到联络不同时空点方向的作用。与引力场的弯曲时空相似, 物理系统的内部空间的方向在不同时空点也是不同的。因此局域规范对称性也要求引入规范势, 这相应于规范作用, 以便联络在不同时空点的内方向。这样, 规范势在规范理论的纤维从空间中所起的作用, 恰好等同于仿射联络在广义相对论的弯曲时空所起的作用。因此, 规范相互作用应当看作一种新的几何化。

Loop Quantum Gravity 所采用的新的基本场量绝非只是一种巧妙的变量代换手段。因为从几何上讲，Yang-Mills 场的规范势本身就是纤维丛上的联络场，因此以联络作为引力理论的基本变量体现了将引力场视为规范场的物理思想。不仅如此，自旋联络对于研究引力与物质场（尤其是旋量场）的耦合几乎是必不可少的框架，因此以联络作为引力理论的基本变量也为进一步研究这种耦合提供了舞台。Rovelli 和 Smolin 等人发现在 Loop Quantum Gravity 中由广义协变性，即称为微分同胚不变性所导致的约束条件与数学上的“节理论”有着密切的关联，从而使得约束条件的求解得到强有力的数学工具的支持。Loop Quantum Gravity 与节理论之间的这种联系看似神秘，其实在概念上并不难理解，微分同胚不变性的存在使得 Wilson loop 中具有实质意义的信息具有拓扑不变性，而节理论正是研究 loop 拓扑不变性的数学理论。对 Loop Quantum Gravity 与物质场（比如 Yang-Mills 场）耦合体系的研究显示，具有空间量子化特征的 Loop Quantum Gravity 确实极有可能消除普通场论的紫外发散。

我们知道一个量子系统的波函数由包含了对系统有影响的各种外场的作用。这种方程对于波函数 Ψ 是线性的，也就是说如果 Ψ_1 和 Ψ_2 是方程的解，那么它们的任何线性组合也同样是方程的解。这被称为态迭加原理，在量子理论的现代表述中作为公理出现，是量子理论最基本的原理之一。但是一旦引进引力相互作用，情况就不同了。因为由波函数所描述的系统本身就是引力相互作用的源，而引力相互作用又会反过来影响波函数，这就在系统的演化中引进了非线性耦合，从而破坏了量子理论的态迭加原理。不仅如此，进一步的分析还表明量子理论和广义相对论耦合体系的解是不稳定的。其次，广义相对论和量子理论在各自“适用”的领域中也都面临一些尖锐的问题。例如量子理论同样被无穷大所困扰，虽然由于所谓重整化方法的使用而暂得偏安一隅。但从理论结构的角度看，这些无穷大的出现预示着今天的量子理论很可能只是某种更基础的理论在低能区的“有效理论”。因此广义相对论和量子理论不可能是物理理论的终结，寻求一个包含广义相对论和量子理论基本特点的更普遍的理论是一种合乎逻辑和经验的努力。引力量子化早期的尝试，几乎用遍了所有已知的场量子化方法。最主要的方案有两大类：协变量子化和正则量子化。协变量子化方法试图保持广义相对论的协变性，基本的做法是把度规张量分解为背景部分和涨落部份。但不同的文献对背景部份的选择又不尽相同，这种方法和广义相对论领域中传统的弱场展开方法一脉相承，思路是把引力相互作用理解为在一个背景时空中引力子的相互作用。在低级近似下协变量子引力很自然地包含自旋为 2 的无质量粒子，即引力子。由于这种分解展开使用的主要是微扰方法，随着一些涉及理论重整化性质的重要定理被相继证明，基本上结束了早期协变量子引力的生命。

与协变量子化方法不同，正则量子化方法一开始就引进了时间轴，把四维时空流形分割为三维空间和一维时间，从而破坏了明显的广义协变性。时间轴一旦选定，就可以定义系统的 Hamilton 量(哈密顿量)，并运用有约束场论中普遍使用的 Dirac 正则量子化方法。与协变量子化方法一样，早期的正则量子化方法也遇到了大量的困难，这些困难既有数学上的，也有物理上的，比如无法找到合适的可观测量和物理态。当然量子引力还有另一种极为流行的方案是超弦理论。与传统的量子几何相比，量子引力只不过是超弦理论的一个部份。从量子引力的角度来看，传统的量子几何是正则量子化方案的发展，而超弦理论则通常被视为是协变量子化方案的发展。这是由于当年受困于不可重整性，人们曾经对协变量子化方法做过许多推广，比如引进超对称性，引进高阶微商项等，这些推广后来都殊途同归地出现在超弦理论微扰表述中。因此虽然超弦理论本身的起源与量子引力无关，但它的形式体系在量子引力领域中通常被视为是协变量子化方案的发展。经过十几年的发展，目前 Loop Quantum Gravity 已经具有了一个数学上相当严格的框架。除背景无关性之外，Loop Quantum Gravity 与其它量子引力理论相比还具有一个很重要的优势，那就是它的理论框架是非微扰的。一个国际合作的研究小组在 1 月 17 日出版的英国《自然》杂志上，报告了他们对于地球重力场量子化的观测结果。他们让冷却到非常接近绝对零度的中子在重力场中运动，同时用一个探测器观测中子的下落。结果他们发现，中子的下落过程不是连续的，而是从一个位置“跳”到了另外一个位置，这一过程与理论的预测相符合，从而实际观测到了引力场的量子效应。不带电微粒子（如中子）在低真空度的管室内，在地球引力场的自由下落，不是沿下垂线连续落下的，而是阶梯式下落的。这表明引力场实际上也是象原子内的电磁场那样，也有能级的，是离散的。行星、卫星稳定轨道的不连续分布早就表明了这点，只是人们没从这一观点上去认识而已！

Einstein 的广义相对论场方程直接支配运动方程，而无须引入任何新的常量。事实上，Einstein 的广义相对论的运动方程可以直接从表述能量—动量张量的散度等于 0 的方程 $\Delta r = T_{ur}$ 中得出，因此 electric field 的方程应当直接得出量子跃迁的条件。在任何自恰的场理论基础中，不应该在场的概念上附加任何粒子概念。整个理论的基础应仅仅建立在偏微分方程及其非奇性解上。【1】

拓扑学是研究几何图形连续性质即在连续变形下保持不变的一门学科，1873 年麦克斯韦把拓扑学的连

通性理论应用于电磁学的研究。如果考虑到拓扑空间结构没有时间轴,那么 electric field 的理论基础可能不是仅仅建立在偏微分方程及其非奇性解上。中微子不带 quantity of electricity 而具有引力质量说明其只具有度量结构,不具有拓扑结构。电磁质量与引力质量的差异性是对称的相对性的表现形式,例如数值在实数集上量子分布与连续分布、度量空间结构与拓扑空间结构、惯性差异等。

目前,物理学在最基本的问题上还远未形成比较一致的认识,物质的最基本单元是球粒子、是弦、是圈还是孤立波,各种理论有不同的说法。四种自然力的微观作用机制也没有建立起相应的物理力学模型,现有的模型也基本属于数学、几何模型。往往人们在设想物理模型的过程中陷入绝境时,会倒退回数学领域,即:建立与观测事实相拟合的数学、几何模型。

哥白尼创立日心说的初衷不是因为地心说的计算与观测不符,而是系统的复杂性让人难以容忍。哥白尼创立日心说后的一百多年间,地心说仍然处于主导地位。除宗教的原因外,其中也因为日心说的理论计算与观测数据符合的精度并未超越地心说。海王星的发现,才最终证明了日心说的正确性,也证明了牛顿力学体系的正确性。

虽然主流物理学家认为:物理力学模型只是建设物理学大厦的脚手架,大厦建好后是可以拆除的,但在物理学大厦还在继续增高的过程中,长期没有脚手架是危险的。“假如没有高风险,量子引力理论什么都不是(包括弦、圈等量子引力理论)。”——圈量子引力理论的创始人,李·斯莫林说。一个缺乏基本物理模型的物理学,单靠数学这一根拐杖到底能够走多远,谁也说不准。可以预想,现代物理学需要一场哥白尼式的革命。

参考文献:

【1】Einstein 著 方在庆、韩文博、何维国 译。《Einstein 晚年文集》海南出版社 2000 年 3 月第 1 版。

附录: 科学家观测到中子在引力场中的效应 2008-09-21 11:11:32

一个国际科学家小组最近成功地在实验中观测到了中子在引力场中的量子效应,这一发现有可能促进基础物理学的发展。在英国《自然》杂志上,这个由法国、德国和俄罗斯等国科学家组成的小组以《地球引力场中中子的量子态》为题发表了一篇论文,报告了他们的实验结果。他们让冷却到非常接近绝对零度的中子在重力场中运动,同时用一个探测器观测中子的下落过程。结果发现,中子的下落过程不是连续的,而是从一个位置“跳”到了另外一个位置。所谓“量子化”是指状态的不连续性,例如绕原子核运动的电子只能处于一系列不连续的能量状态上,而不能处在两个相邻状态之间的状态上。科学家介绍说,探测微观粒子在引力场中的量子态非常困难,这一实验的成功为探索微观世界提供了新思路。

前不久,曾有报道把这一成果误报为“科学家观察到引力场的量子效应”。对此,一些科学家认为,尽管这一实验成果是研究微观世界的一项重要进展,但与观察到引力场的量子效应并不是一回事。后者是基础物理研究领域的重大课题,目前尚没有取得突破。中科院理论物理所的李淼研究员认为,这个实验是对在连续的、非量子化的经典引力场中的粒子的量子行为的检验。虽然它也很有意义,但与引力本身的量子化没有任何关系。

量子力学预言,所有物质形态都满足量子法则,这个原理已经在小到 10 的负 15 次方或 10 的负 16 次方厘米的尺度上得到实验检验,但科学家目前尚没有发现引力量子化的实验证据。在目前情况下引力只能被当作经典场来处理。李淼认为,发表在《自然》杂志上的这一实验,毫无疑问是对经典引力场中粒子的量子行为的一个检验,这样的实验远没有涉及引力本身的量子性质。他说,引力场的量子化是目前理论物理的一大难题。引力场本身的量子效应非常微弱,这一实验在原理上根本达不到这样的精度,只能期望一种全新的实验来测量引力的量子效应。

3、经络理论的实质

科学有三个基本特征:逻辑推理、数学描述、实验验证。科学发展的过程本身就是、也只能是一个不断突破旧知、创造新知,拓展人类认识的无止境过程。

人体是一个开放的复杂巨系统,现代医学的发展,是一个自组织演化的前进上升运动,正进行这 4 个转变,1. 化学观点的医学观上升到生命层次的医学观; 2. 生物医学向人类医学的转变; 3. 由疾病医学向健康医学转化; 4. 对抗医学向生态医学的转变。

中医和西医的差别,其根本在于基于不同的物质观:西医注重结构与成分;中医则注重功能和作用。西医长于分析思维,所以以人体解剖学为理论基础;中医长于整体思维,所以以阴阳五行学说为理论基础。西医对于疾病的认识侧重于具体部位和局部症状,所以运用机械的分析方法,使用形式逻辑;中医对疾病的认

识注重整体功能状态，所以要进行辨证论治。辨证论治就是一种旨在掌握人体整体功能状态的思想方法，而阴阳五行逻辑则是进行辨证论证的思维逻辑。它属于高层次的辩证逻辑。因为西方人长于分析思维，所以西方科学具有分科性；因为中国人长于整体思维，所以中国传统科学具有整体性。中医学就是将生理、病理、物理、化学、天文、地理、气象等许多学科的思想融为一体的整体科学。

中医的基本概念与现代生命科学有很多相似之处：中医强调“阴阳平衡”，这与现代生物学有异曲同工之妙；中医强调“天人合一”，这与现代西方科学讲的环境十分相似；中医强调“辨证施治”，类似于西方医学中的药物遗传学，为每一个病人找到最适合的药；中医的复方理论，实际上就是现在的西方治疗学越来越强调的各种疗法的综合使用。一年有 365 天-----而人体有 365 个穴位；一年有 12 个月 -----而人体有 12 条经络；一年有 24 个节气 ----- 而人体有 24 块脊椎。等等，这难道是巧合，还是有未被发现的内在联系呢？英国查尔斯王子曾说“如果我们对八千年的印度和中国医术视而不见，那么，我们的确漏掉了一些东西。我的这种感觉非常强烈，因为他们医学理论基础是看人在宇宙中，在和谐整体中的位置”这句话讲得既现实得体，又富有哲学水平。巴西医生尤西夫说：“人们厌倦了西药的副作用。西医就像一个‘身体工程师’，将各部分分开治疗，只是表面的治疗，并非真正的治愈”。这句话实在是点到了西医学的死穴。

经络理论是关于经络穴位的组成与结构（分布）、性质与功能、现象与应用、运动规律等的学问，经络技术（中医学）是经络理论和经络功能的实际具体应用。生命的本质在于经络，经络是生命的动力系统，因此经络理论是生命的动力学理论。根据经络理论和构成经络的精气神理论，即可阐述所有的生命现象和规律。经络论是比较成熟的理论，在中医和气功著作里都有了很系统、科学、全面、具体的论述。从古人经络穴位的论述里，在医疗和气功实践中，我们感觉到经络是一种实在的物质系统，知道了经络物质对生命的重要性和决定性，了解到经络穴位的分类、分布、起止流向、性质功能、作用现象、运行规律、应用技能等知识。经络的分布状态与神经、血管类同，与树木干支分布相似，有主干、支干、细支三类，在经络为经脉、络脉、孙脉三脉。经络上密布着穴位，经络功能主要是通过穴位得以实现的，穴位是经络的功能点、敏感点。外力作用于穴位上的效果比非穴位经络好得多。经络病象也会反映在相应经络的有关穴位上。阿是穴通常在孙脉上形成，因为孙脉细小，容易堵塞产生气节，出现痛感，这就是“不通则痛，通则不痛”的道理。

经络论也是神秘文化现象之一，并普遍引起了人们的重视。人们利用现代科技手段研究经络，终于在十几年前拍摄到了经络图，上有穴位点，与经络理论完全吻合，从而证实了经络穴位的实在性。那么经络穴位的本质到底是什么呢？近 20 年来，为了探明经络穴位的本质，人们进行了广泛的研究，做了很多的猜想，开展了全面的实验工作，取得了很多宝贵的第一手资料。仅摘几则如下：解剖学研究成果显示：穴区组织中都有丰富而多样的神经末梢、神经束、神经丛。可见经络穴位与神经紧密相关。但是研究又显示，经络和神经各有不同的走向、现象与功能，是不同的物质系统。针刺实验结果：神经干以麻为主，血管以痛为主，肌肉、肌腱、骨膜以酸胀为主，经络则兼而有之。气感现象表明，气是一种具有力学性质的实在物质，而不是凭空想象的理论名词，气是在经络中存在的。同时也说明了，气不是气体，而是某种未知的物质，因为气和气体的功能与产生的现象明显不符。穴位电位实验：器官活动增强时，相应的经络穴位电位升高。器官摘除或经络组织损坏时，相应的经络穴位电位降低，甚至为零。穴位辐射效应实验：在相应的脏腑有暖流感觉，相应经络有感传效应。

“经络有运行气血、濡养组织、沟通全身的功能……使人体成为一个有机的整体。经络在病理上的作用，主要关系疾病的发生与转变。经络功能失常，就容易感受到外邪(致病的外气)而发病。经络……病变相互影响的重要渠道。调整经络气血，从而达到治疗疾病的目的……经络是人体运行气血的通道。腧穴就是脏腑经络之气通达于体表的特殊部位。按摩针刺体表的腧穴，可以通过经络达到调整气血治疗有关脏腑和各部的病症”(《家庭按摩疗法》，科学普及出版社广州分社，1987 年版，27、28)。“经络现象在全国不同地区、不同民族的人身上都能测到”(《自然》杂志，1979—5，循经传感现象的调查及其特征的研究)。“彻底否定经络理论也遇到了困难，原因是与此有关的一个重要现象已经得到证实，这就是‘循经感传’。经络没有找到，可循经感传现象却存在。循经感传的路线与神经干的路线并不一致，而且其速度也大异于神经传导的速度(因此经络不是神经)”(《百科知识》杂志，1994—7，56)。笔者认为经络可能就是电磁质量的表现形式。

5/4/2017