


# 《量子空间》摘录——圈量子的优雅宇宙，脑洞大开的天马行空

 朱俊帆 评论 量子空间  
2023-07-30 00:07:35 已编辑 江苏

这篇书评可能有关键情节透露

斯莫林回想起了乔治·布拉克（Georges Braque）形容自己与毕加索一同引领立体主义潮流时说的一段话：“那些年毕加索和我之间说的话，永远也不会有人再说一次了，哪怕有人说了，也不会有人明白。当时的我们就像两个被捆在一起的登山者。”

## 摘 录

圈量子力学从广义相对论出发，借用了量子色动力学（QCD）中的一些思想，也包含致力于让结果与量子场论相容的探索。在路的终点，我们会看到空间的结构变成了量子的，而非连续的。就像量子力学中的物质和辐射一样，它是一块一块的。这一结构是一种由互相连接的引力“圈”形成的“自旋网络”系统。这些圈的形状有根本上的限制，它定义了普朗克长度尺度上的面积量子 and 体积量子（普朗克长度约为 $1.6\times 10^{-35}$ 米，即质子直径的1020分之一）。

不同的自旋网络，也就是圈的不同连接方式，定义了空间形状的不同量子态。自旋网络的演化（即一种形状和下一种形状之间的连接的变化）就产生了自旋泡沫（spinfoam）。在叠加态中加入自旋泡沫，就产生了一个新出现的时空，即一种由量子物理学定律共同产生的结构。

他如饥似渴地阅读政治学、社会学和科学相关的书，也看小说和诗歌。20岁那年，罗韦利踏上了一场寻找真理的环游世界之旅。在旅途中，他强烈地感受到了自由，也学到了如何掌控自己的生活并追寻自己的梦想。但当他远离了自己一直以来在各种方面痛恨的故乡以后，他的看法发生了一些转变。意大利的确有很多让他愤怒的地方，但在那里也有很多事物有待他学习。

我们永远都不可能知道电子的裸质量是多少：但是如今我们可以通过巧妙地处理QED方程组来解决这个问题。理论物理学家发现，将描述电子一种物理状态的方程减去描述电子另一种状态的方程，就能消掉无穷大的项。从表面上看，用一个无穷大减去另一个无穷大好像不是很有意义，但物理学家发现，这么做得出的结果不仅是有限的，而且是正确的。这种数学上的小花招被称为质量重正化（mass renormalization）。狄拉克作为一名数学上的纯粹主义者，认为这种小花招非常“丑陋”。

在传递弱力的粒子身上一定发生了某种不同寻常的事情——它们通过某种方式“获得了质量”，从而让电弱力分裂成了我们今天所见到的电磁力和弱力。对于这种分裂现象，物理学家有一种独特的描述方式，叫作“对称性破缺”，它在数学和物理学两个方面都有很深刻的含义。某种方式让电弱力的对称性发生了破缺，产生了两种新的力。

希格斯场的特征性量子涨落被称为希格斯玻色子。根据这一机制，美国物理学家史蒂文·温伯格（Steven Weinberg）和生于巴基斯坦的物理学家阿卜杜勒·萨拉姆（Abdus Salam）分别在1967年和1968年发表论文，[插图]提出了完善的关于弱力的量子场论。随着1971年荷兰物理学家马蒂纳斯·费尔特曼（Martinus Veltman）和赫拉德·特霍夫特（Gerard't Hooft）证明这一理论是可重正化的，横在电弱理论面前的最后一道障碍也被消除了。

在没有希格斯场的情况下，所有粒子都没有质量，且都以光速运动。质量将不存在，也谈不上有什么物质实体了，因此也不会有恒星和星系构成的宇宙，没有行星，没有生命，没有人类。

时至今日，没有人在粒子对撞实验中看到过自由的夸克。如果夸克真的是组成物质的最基本的粒子，又在质子和中子之中闲散地游荡，它们为什么不跑出来呢？在质子和中子内部，夸克们被拴在一起，但它们的距离又近到可以让它们“自由地游荡”，而一旦我们尝试把夸克分开，它们之间的作用力会立即表现出来，就像弹簧被拉



豆瓣豆品 | 日日陪伴 常常清欢  
豆瓣豆品

广告

> 量子空间



作者: [英]吉姆·巴戈特  
出版: 中信出版社  
定价: 59.00  
装帧: 平装  
页数: 361  
时间: 2019-10-25

> [侵权投诉通道](#)

紧的时候一样。只能假设夸克拥有第三种性质，他们称之为色（colour）。每味夸克都有三种不同的色——红、绿、蓝，每个质子或中子包含红色夸克、绿色夸克和蓝色夸克各一个。比方说，一个质子可能由一个红色上夸克、一个绿色上夸克和一个蓝色下夸克组成。这样的设定要求有8种不同的有色、无质量粒子来传递夸克间的相互作用，它们被称为胶子（gluon），充当了夸克之间的弹簧。该理论把夸克之间的强相互作用力称为色力。

精密的QCD计算表明，一个质子或者中子质量的约95%来自在夸克之间传递色力的无质量胶子的能量。爱因斯坦的质能方程 $m=E/c^2$ 表明，一个物体的质量可以衡量它所含的能量。从质能方程我们可以推出，质量并不是一个物体所拥有的东西（即它的性质），而是它在做的事情（即它的行为）。电子场同时穿过了两道狭缝，它的量子概率图案受到了场干涉的影响。电子可以被诠释为场的特征涨落，只有在场与屏或照相底片作用的时候才会产生。就在作用的一瞬间，波函数坍塌，我们所看到的电子（以及它的自旋、电荷与质量）就从空气中浮现出来了。

宇宙学的首个量子理论。“整个宇宙的波函数”这样的提法首次出现在了科学文献中。德威特发现，这个波函数只依赖于空间的几何形状，时间仍然难以捉摸。这个波函数描述了一个静态的宇宙模型，总能量为零。德威特写道：“于是我们可以得出结论：在这样一个量子的几何动力学模型中，一切都不会发生，量子理论只会产生一个静态世界的图像。”[插图]为了让事件能够在这个宇宙中发生，他需要找到一种方法重新引入时间，通过把表示不同量子空间态的多个波函数叠加起来并使其演化的方式来实现。

但如果一直把量子场放在首要位置上，协变方法就牺牲了引力与时空几何学之间的深层连接，而这正是广义相对论的核心。而那些把自己的一生都投入到广义相对论研究中的物理学家，也不喜欢量子场论研究者不得不依赖的重正化方法。尽管有些理论物理学家承认同时从事多条线路的研究有其好处，但在量子引力方面，已知的这两种方法在概念上有很深的鸿沟，彼此之间也缺乏共同的基础。正则方法强调几何，而这“在广义相对论与基本粒子理论之间制造了一种分裂”[插图]。而粒子物理学理论非凡的成功，以及大众对该领域日益增长的兴趣，让粒子物理学家深信协变方法是唯一的理性途径。

美国物理学家斯蒂芬·马丁（Stephen Martin）在2011年解释道：“希格斯粒子的质量中比较危险的大质量贡献被系统地抵消了，这只能用存在某种阴谋来解释。用我们物理学家所熟知的词语来表示，这种阴谋就是对称性。”科学家讨论的这种对称性被称为超对称（supersymmetry）。

球面联络的方法也许看起来很难懂，但实际上形成粒子物理标准模型的量子场论也可以被看作是“联络理论”。在量子场论中，量子场进行了矢量（如自旋的电子）的平行移动，而如果量子场是“弯曲”的，即它的大小和方向在各个位置不同，那么将一个矢量沿一条闭合的路径移动一圈，它在回到起点时的方向可能就和起始状态不一样了，正如指南车在回到北极点时人像指向的方向与一开始不同那样。只要我们把量子场“用钉子固定到”一个任意的平直欧几里得背景空间中，以描述矢量从“这里”到了“那里”、又回到“这里”，这样的事情就会发生。

如果广义相对论可以被重新表述成一种联络理论，也许它就能与经典场论一样被量子化了，正如麦克斯韦的经典电磁场理论被量子化而产生量子电动力学一样。然而，还有一个很大的不同点：在广义相对论的联络理论表述中，引力场是联络系统，不过我们当然没有必要把这个场再钉到一个任意的背景时空里去了。时空度规会从联络系统中自然而然地产生。

到20世纪70年代末，有科学家将类似逻辑应用于携带自旋角动量的物体的移动，提出了一种自旋联络系统，在固体物理领域有所应用。自旋联络的概念并不是新产生的——它的起源可以追溯到20世纪30年代，但阿米塔巴·森发现，它可以用来重新表述广义相对论的ADM哈密顿形式，用自旋联络来代替时空度规，这样可以导出我们更熟悉的弯曲时空。这一思路看起来很有前景：它暗示某种物体可能具有我们所期望的引力子拥有的性质。

弦论上曾经遇到过的问题之一是，在它给出的所有粒子中，有一种粒子没有质量，却有两个单位的自旋。这是在描述强核力时我们曾经认为出了错的地方，因为没有哪种已知的粒子具有这样的性质。然而，这恰好就是我们期待量子引力所拥有的性质。

因此，开放的弦不仅预言了物质粒子，也预言了它们之间的力。但弦论也要求存在闭合的弦（称为闭弦）。当一个粒子和它的反粒子互相湮灭时，两个粒子的两端就各自相连，形成一个闭弦。但如果存在闭弦，就意味着存在没有静止质量且有两个单位自旋的粒子，而这恰好就是我们所预言的引力子的性质。引力子在截至目前的所有粒子物理模型中还没有位置，而理论对引力子的预言看起来也是颇成问题的。

20世纪80年代初，威滕刚刚30岁，还是位相对年轻的理论物理学家，但已经是一位现象级人物。他的职业生涯堪称文理兼修：他先是在波士顿附近的布兰代斯大学学习历史学和语言学，然后在威斯康星大学研究经济学，又从事了一段时间的政治工作。他参与了乔治·麦戈文（George McGovern）1972年的总统竞选活动，在麦戈文被理查德·尼克松压倒性地击败后，威滕抛弃了政治，转而前往普林斯顿研究数学。没过多久，他就转向了物理学的研究。在QCD的创立者之一戴维·格罗斯的指导下，威滕于1976年获得博士学位。仅仅4年之后，他就成为普林斯顿大学的终身教授。1982年，他获得了麦克阿瑟基金会颁发的“天才奖”。

把基于点粒子的描述改成基于弦的描述确实消除了一些数学上的不一致性，引入超对称则缩减了理论所需的维度数目，并消除了麻烦的快子（虽然产生了新的代价，如引入了更多的参数，以及超对称性破缺的问题），但在超弦理论中，超弦仍然在九维的空间和一维的时间中运动，空间与时间维度仍是分开的。

转向自旋联络的形式体系带来了一条重要的线索。它表明，这样一种理论有可能不需要背景时空框架就能存在。这一理论所描述的并不是存在于空间之中的圈，而是圈定义了空间。这已经是在正确的方向上前进了一大步。

这四位理论物理学家合作撰写了一篇论文，并于1985年发表，这篇论文首次提出了“隐藏维度”的想法。如果我可以标记出面前桌子上键盘前的某个无穷小的点，并且让镜头聚焦于这个点，将其放大，以至于我们能看到1厘米的 $1/1033$ ，那么根据超弦理论，我们就能感受到另外6个维度卷成了卡拉比-丘流形。虽然理论要求这些额外维度必须隐藏起来，但这并不意味着这些额外维度不会在物理上产生影响。事实恰好相反，卡拉比-丘空间的准确形状以及它拥有的“洞”的数量，决定了可能存在的超弦振动的数量。因此，它也决定了物理学常数、物理学基本定律，以及普遍存在的粒子的能量范围（谱）。换句话说，卡拉比-丘空间的形状决定了我们处于哪一种物理宇宙中。

斯莫林、雅各布森和克兰全力发展的这一理论已经消除了格点结构，但他们得出的量子态仍然是自旋联络的函数。然而，自旋联络本身周围还带着引力场，而在广义相对论中，引力场就是时空本身。因此，哪怕这些量子态看起来已经与背景的时空格点无关了，它们也并没有真正地与时空相脱离。这就解释了为什么他们得到的解没能通过坐标系检验。罗韦利意识到，在此基础上，利用他从艾沙姆那里学到的技巧，对解进行一次重新表述，就能只以力圈的形式来表示量子态了。同样的逻辑可以用在多个问题上，这即将成为一类由交叉的圈——“引力圈”组成的理论，这类圈不仅存在于空间中，它们的集合本身即为空间。

广义相对论属于经典理论，并不像量子理论那么依赖算符。它描述的是质能与时空之间的关系，而如果我们把所有存在的物质都移走，在原则上会发生什么呢？这是第一个问题。圈量子引力原本想要的描述的是时空本身是如何演化出来的，但要以量子场论的形式重新表述，在缺乏物质的情况下，算符和可观测量就根本无法定义了。我们不能给空间安上一个算符，因此也就没有对应的可观测量。

广义相对论属于经典理论，并不像量子理论那么依赖算符。它描述的是质能与时空之间的关系，而如果我们把所有存在的物质都移走，在原则上会发生什么呢？这是第一个问题。圈量子引力原本想要的描述的是时空本身是如何演化出来的，但要以量子场论的形式重新表述，在缺乏物质的情况下，算符和可观测量就根本无法定义了。我们不能给空间安上一个算符，因此也就没有对应的可观测量。

在该结构中，唯一重要的只是物体及其自旋值之间的拓扑关系。彭罗斯证明，只要网络的总角动量足够大，就能以其自身构建出逆着其他可被测量的大型网络的相对定向的方向。想象有这么一个自旋网络，它拥有很大的总自旋角动量（例如为N），现在我们将一个单位的自旋角动量传递到另一个大的自旋网络（总自旋角动量为M）中。在这个过程中，有一定概率这一个单位的自旋角动量会加到第二个自旋网络中（得到M+1），也有一定概率第二个自旋网络会被减去一个单位的自旋角动量（得到M-1）。彭罗斯证明，这些概率之间的关系定义了两个网络之间的夹角。不仅如此，他还证明，所有这类夹角之间的关系，与三维欧几里得空间中的夹角关系完全一致。这表明，常规的空间和几何学从大的自旋网络中的一系列相互关系中演生了出来。

彭罗斯在开始构造这一理论时，完全没有预先在大脑中设定任何理论的形式结构，他只是基于空间应该是离散且相关的这一想法，想出了自旋网络的结构。实际上，彭罗斯的这种理论仅包含一个想法：自旋网络不足以构成一整个研究课题（彭罗斯本人花了更多精力在通往量子引力的另一条道路——扭量理论上面）。

彭罗斯之所以发展出自旋网络，只是因为他感觉连续时空的观念不太对劲。把阿什特卡的广义相对论自旋联络表述量子化，就得到了引力的“圈”和“纽结”，然后得出一个由圈编织起来的空间。斯莫林和罗韦利如今已经找出了应用体积与面积算符的方法，并且证明圈量子引力理论中的空间是离散而相关的，在他们推进这一工作的过程中，彭罗斯早已建立的自旋网络理论就在背后静静地看着他们。应用体积算符，就会得到自旋网络节点处的离散“颗粒”，即量子化的空间。应用面积算符，就会得到网络中的连线上（即离散颗粒相连的地方，如图20所示）的量子化的面积。这些颗粒极为微小，一个质子装得下多达 $10^{65}$ 个这样的体积量子。从一个颗粒移动到相邻颗粒形成的闭合回路就是圈量子引力理论中“圈”的起源，而圈上每条线所带有的值的总和就反映了引力场的强度，即空间弯曲的程度。

对于当代理论物理学而言，对经验证据的要求似乎不再处于第一位了，这给了弦论研究者充足的理由来完全忽视这一要求，失去对这一要求的尊重，甚至抛弃科学方法的优良传统。而这种情况下的真正危险在于，如果这样的理论在多位聪明的理论物理学家的支持下随波逐流太久，物理学研究就可能会一直自我延续下去，哪怕它们已完全无法实现当初的承诺。

彭罗斯曾设想让他的自旋网络成为一个框架，时空从其中自然演化。但在圈量子引力理论中，自旋网络的节点处产生的是空间体积的量子，节点之间的连接则表示空间体积量子相接处的面积量子，这在很大程度上是一个

静态的图像。然而，理论物理学家必须找出一种方法为这样的时空框架引入某种动力学改变。这个问题被称为时间冻结难题（problem of frozen time）。

假设我们有一个包含3个节点（3个体积量子）和6条连接（6个面积量子）的自旋网络，在它上面叠加一个有1个节点和3条连接的网络。绘制出这些节点与连接的演化轨迹，也就描述了不同的网络，即不同空间量子态之间的转变（如图21所示）。图21 在自旋泡沫中，自旋网络的节点变成线，连接变成平面。在这个例子中，一个由3个体积量子（3个节点）和6个面积量子（6条连接）组成的自旋网络变成了一个由1个体积量子 and 3个面积量子组成的自旋网络。不过，这个演化过程并不是连续的。我们只关注节点和连接的数目，因此时钟只在这两个量发生变化的时候才走动这样做的结果就是理论物理学所说的自旋泡沫（spinfoam）。为什么称它为“泡沫”呢？因为这并不是一个平滑而连续的过程，其本质是量子的。空间随机地演化，从一个组态跳跃到另一个组态。约翰·惠勒仅凭直觉想象了时空在普朗克尺度上的样子：“讽刺的是，在我后来对引力和广义相对论产生兴趣以后，我不得不发明‘量子泡沫’这个概念，这些泡沫由不断从虚空中产生又凭空消失的粒子组成，而时空本身则被搅成了一团扭曲的肥皂泡形状。”

二维的自旋网络图终于能表示三维的空间了。通过绘制节点与连接从一个网络到另一个网络的变化轨迹，即在不同时间点上的剖面图之间建立因果关系，我们实际上引入了第四个维度。我们可以称这个维度为时间。每个自旋泡沫都能追踪局部事件的历史，包括该处在空间量子态之间的转变。它们是怎么被画出来的不重要，重要的是以节点和连接的数（和值）表示出来的网络的几何形状。

光怎么能提前“知道”沿哪条路径传播花的时间最短呢？费曼的回答是：光无须提前知道哪种路径花的时间最短，因为它走了从起点到终点的所有路径。费曼将这条相对简单的物理学原理发展成另外一套描述非相对论量子力学的表述形式。他认为，一个量子粒子在从一个位置到另一个位置的过程中走了它所能走的所有路径，即该粒子运动的所有可能“历史”的综合。而在一个特定的位置发现该粒子的概率则由所有可能到达该点的路径的振幅总和决定。对所有历史求和，就等价于对所有可能的费曼图求和。

费曼图是画在一个假定的时空背景上的。但理论物理学家发现，类似的方法可以应用在圈量子引力上。每个自旋泡沫代表了一种可能的历史——网络的节点和连接之间一系列遵循因果关系的步骤，可以被视为量子引力中的费曼图。每个自旋泡沫都对应一个概率。为了知道空间量子态是如何演化的，我们必须计算出所有可能的自旋泡沫（所有可能的历史）的发生概率，并把它们相加。把所有不同的量子泡沫加起来，就会得到一个量子叠加态。我们把最终得到的这个大尺度结果叫作时空。

圈量子引力理论预言空间会被量子化成离散的小体积，它们坐落在自旋网络的节点上。在自旋泡沫中，自旋网络从一个态跃迁（“跳”）到另一个态上，而由自旋泡沫演化出来的时空自然而然地拥有了一种格点结构，由空间的离散量子本质所决定。这与QCD中我们人为加入以简化复杂计算的虚拟格点完全不同。一方面，圈量子引力中自然演化出来的格点是动态的，而QCD中的虚拟格点是静态的。因此，我们可以将引力波看成一种沿着时空格传播的集体振动。从这个角度看，引力子就相当于与时空集体振动相关的准粒子，正如某些固体或液体中原子的集体振动产生的准粒子（声子）一样。

对于量子场论而言，边界条件对于内部情况的“编码”要比我刚刚举的简单几何例子复杂得多。厄克尔将这种方法与全息术联系在了一起，他写道：“从这种意义上说，这种数学表述类似于‘全息的’，也就是说，它内部的信息已经完全被边界上的态所编码了。”这个比喻很妙。在全息术中，重建三维图像所需要的所有信息都被编码在一幅记录在光刻胶或者光聚合物上的二维干涉图中。

边界上所编码的信息体现了内部区域的量子力学过程的所有不同的历史。比方说，如果我们关心的过程是电子从一个地方移动到另一个地方，那么这件事发生的时空区域的边界上所编码的信息就包含电子经历的所有可能的过程，包括虚粒子产生和湮灭的各种历史。如果我们选择一个足够大的区域，并设定好初始条件，边界上的物理学的表现就趋向于经典的轨迹，这是内部所有不同量子通道发生相长干涉的结果。上面的讨论都是关于一块时空区域周围的边界进行的，但这一数学结构并不依赖于时空背景。它对自旋泡沫区域的边界同样适用。

自旋泡沫的数学形式并不描述粒子的产生和湮灭，取而代之的是空间量子的产生和湮灭。只要选择一个合适的大尺度区域（包含许多个空间量子及自旋网络之间的多次跃迁），边界上编码的“全息物理学”就趋近于一个极限，亦即连续时空中的物理学结果。有了边界方法，理论物理学家就能计算粒子的行为，且无须借助背景时空假设。粒子在时空中从一个位置移动到另一个位置的结果，自然地出现在了关于边界本身的方程中。

量子引力的协变方法在重正化方面遇到了很大的困难，但在低能近似下，会让方程失效的发散项是可以被忽略的。这就意味着，我们可以基于粒子物理学家偏爱的“传统”方法，为引力子的传播函数推导出一个近似的、低能的表达。罗韦利与同事证明，把他们的边界方法用在自旋泡沫数学形式上，计算出的引力子传播函数与协变量子引力低能近似下推导出的结果完全一致。这表明，两种不同的理论方法（不管它们各自对物理学实在的描述是否正确）产生的结果至少是一致的。在大距离极限上，圈量子引力理论计算出的引力子传播函数与“这里”

弦论从本质上来说是一个粒子物理理论，它尝试通过假设粒子不是无穷小的点粒子，而是延展的二维或是多维的物体，来消除无穷大的量带来的问题，因此，得到的就是连续时空背景下的一个关于弦的理论。为此，物理学家需要将额外的维度隐藏起来，还需要引入超对称这样的假设，以让该理论不那么难以驾驭。这消除了点质量带来的问题，但并没有解决连续时空假设带来的问题。在弦论中，阿喀琉斯仍然追不上乌龟。与之相反，圈量子引力是一个关于时空几何形状本身的理论。它致力于通过将广义相对论与量子力学结合起来，表明时空是离散而非连续的，从而消除无穷大量。它对于大自然的影响并不仅仅在于时空的形状（以及无质量的引力子）方面。现实比这复杂得多。理论物理学家随后的任务，是把有质量的粒子融入这一图像中。既然所有物质都由费米子（夸克和轻子）组成，就意味着我们需要把自旋泡沫圈量子引力与费米子场耦合起来。

引力与费米子相互作用的量子理论。费米子的性质由一种叫作“CPT对称”的对称性所主宰。“C”代表电荷共轭：如果一个粒子的物理学性质在C对称性变换下不变，意味着将其电荷换成大小相等、符号相反的电荷（也就是说，用对应的反粒子来代替该粒子）以后，该粒子的性质不会发生改变。“T”代表时间反演：在描述该粒子动力学过程的方程中将t换成-t。虽然在我们的经验里，时间只会沿着一个方向流动，但物理学方程一般不管时间往哪个方向流动——不管事件是顺序发生还是倒序发生，方程都不变（我们称这种情况为物理学定律在T对称性反演下不变）。

波函数的宇称描述的就是，如果我们改变所有的空间坐标轴的正反符号（即颠倒左右、上下、前后），会不会改变这道波的传播方向。同时改变三条坐标轴的方向，相当于把这道波变成了它在一面镜子中的倒影，它的视角也变了——左变成右，上变成下，前变成后。如果波函数在这样一面“宇称之镜”中的倒影与原本的波函数振幅相同，我们就说这个波函数具有偶宇称；如果镜中的倒影与原本的波函数振幅相反，我们就说这个波函数具有奇宇称。

在弱相互作用中，大自然似乎更偏爱某一种“手性”实际上，通常来讲，只有左手性的粒子和右手性的反粒子能进行弱相互作用。

1964年普林斯顿大学的物理学家詹姆斯·克罗宁（James Cronin）和瓦尔·菲奇（Val Fitch）在布鲁克海文国家实验室做的实验表明，在中性K介子（一种由下/反奇异夸克和奇异/反下夸克混合形成的介子）发生的某种衰变过程中，CP对称性也被破坏了。我们只有再加上时间反演对称性，才能让自然再次回到正常的状态。CPT对称性的组合才是永远不被破坏的对称性。韩慕辛与罗韦利证明，在与自旋泡沫相耦合时，费米子传播函数的CPT对称性不变，这与我们要求相符。他们发现，边界行为可以通过自旋泡沫振幅中嵌入的费曼图简单地描述。毋庸置疑，费米子场相互作用的物理规律也能以同样的方式显现出来，也就是说，原本被认为只能在背景时空中运作的量子场，也能在自旋泡沫的海洋中自然存在。

森与阿什特卡已经选定了原始的自旋变量以反映手性，因此原则上将手性费米子引入自旋泡沫圈量子引力理论是可以的。然而，一旦费米子场被固定在格点上，它们的行为就变得很异常，显现出一种不自然的费米子加倍（fermion-doubling）现象：出现了奇怪的镜像态，每个原本左手性的费米子在每个空间维度方向上都产生了一个右手性的镜像。格点QCD中也有这个问题。格点QCD中有一条强大的止步定理，这条定理由丹麦物理学家霍尔格·尼尔森和日本物理学家二宫正夫提出，表明只有左手性与右手性费米子的耦合强度相等时，自由费米子在离散格点模型中才能得到连续的结果。然而，弱相互作用只青睐左手性费米子，因此耦合强度不可能相等。在格点QCD中，理论物理学家引入了多种应变方法来除掉额外的费米子，以绕过该问题，比如人为破坏手性对称，把镜像粒子推向一个更高的能量范围，使其不再发生耦合，从而影响理论计算。

2015年，斯莫林与雅各布·巴尼特（Jacob Barnett）在圆周理论物理研究所合作，详细探究了费米子加倍的现象，证明原本的正则圈量子理论无法解决这个问题，因此无法用来描述手性费米子。他相信，这是圈量子引力理论在描述自然方面的主要障碍之一。

圈量子引力理论是由互相连接的力圈形成自旋网络而构建出来的，其节点表示体积量子所在的交叉点，连接则表示相邻节点交界处形成的表面，即面积量子。如果我们回到由闭合的圈形成的空间这一想法，费米子就可以看成开放的圈，其自旋量子数为1/2。斯莫林解释道：“在该理论发展的早期，最激动人心的时刻就是我们讨论费米子如何从自旋网络中的自由端或小孔处演生出来的时候。”

开放的圈在自旋网络上以一个额外的-1/2自旋的“面”的形式存在，将物质粒子紧紧地捆绑在演生时空的结构上。这种景象不禁让人回想起惠勒和米斯纳设想过的图像。他们1957年提出，带电的粒子可能只是电场线穿过普朗克尺度的虫洞，形成假想中的隧道，将时空中不同的点串在一起。他们想象这些力线在一个虫洞中消失，在另一个虫洞中重现，力线其实形成了闭合的圈，但因为它们总是在这里消失，在那里重现，看起来就像是开放的圈。换句话说，通过这个假设，物质粒子可以完全只通过引力导出。惠勒将这一想法称为“已统一理论”。与其努力统一引力与电磁力（这是爱因斯坦多年来尝试却徒劳无功的事），为什么不干脆假设电子自身就是时空本身的基本属性呢？这样的话，理论就会变得十分简洁而优雅。斯莫林于1994年证明，从广义上来讲，将广义相对论与费米子耦合起来的理论，与不包含物质但容许某种极简主义虫洞存在的理论是完全等价

的。就背后的物理学机制而言，电子与虫洞完全是同一件事。在后来关于自旋泡沫费米子的工作中，这一结论已显而易见了。2013年，罗韦利与同事提到，在某些固定的时间，费米子圈是非局域性的——它在时空中的一部分消失，又在一点重现。

克尔-纽曼黑洞的g因子恰好等于2，与QED中应用辐射修正之前的“狄拉克电子”等价。虽然我们如今倾向于认为黑洞起源于大型天体（如恒星）的引力坍缩，但理论并没有排除微观黑洞存在的可能性。当然，我们有各种各样的理由认为电子是克尔-纽曼黑洞的这一想法不靠谱，但这种巧合恰恰是理论物理学家获得灵感所需要的。有些人认为，这一巧合反映，“量子理论与广义相对论在深处是同源的”。

比尔森-汤普森将基于点粒子的哈拉里-舒普模型变成了一个拓扑学“玩具模型”，用三种“丝带”以不同方式编织形成的图作为基础。一条丝带可以带电（对应于哈拉里的T），也可以为电中性（V），而传递力的玻色子则没有经过编织。第二代和第三代粒子只是编织方式比第一代更为复杂一些。比尔森-汤普森发展的这一模型比哈拉里-舒普的原始模型更简单，而且有额外的好处：丝带既可以向左编织，也可以向右编织，可以形成两种镜像对称的图像，从而为手性提供了基础。关于这种丝带到底是什么，比尔森-汤普森没有给出解释，不过他“不太认真地提到它们可能是彼此缠绕在一起的微虫洞”。

在1986年2月圣巴巴拉晴朗的一天，斯莫林与雅各布森首次发现了广义相对论场方程的自旋联络表述的精确解。斯莫林知道比尔森-汤普森的“编织的丝带”正可以被看作这种精确解，因而提出了一个令人震惊的假设：标准模型中所有的粒子都表现为引力线不同的扭曲和编织方式。设想粒子从时空本身中诞生，是同时实现惠勒的“已统一理论”和19世纪开尔文爵士认为原子是“以太的纽结”的观点的最终方法。但这要如何实现呢？斯莫林与马科普洛邀请比尔森-汤普森来合作，他们三人进一步优化了这一模型，让三种丝带变成一张自旋网络与一套普适节点集之间的三种连接。比尔森-汤普森在其模型中引入的电荷可以用连接向一个方向扭曲（1/3正电荷）或向另一个方向扭曲（1/3负电荷）来代替。让形成上夸克的三条丝带中的两条扭曲起来，就得到了+2/3的总电荷。鉴于在三条丝带里选择两条丝带扭曲有三种情况（可能扭曲第一条和第二条、第一条和第三条，或者第二条和第三条），而这就对应于三种不同色的夸克。类似的逻辑可以用在下夸克上。至于电子，因为只有三条丝带都扭曲才能形成-1的总电荷，因此不可能形成不同的色。不带电的粒子，如电子中微子与反中微子，则不包含扭曲。丝带之间也可以“编织”起来。从左到右、先下后上的编织图案表示左手性粒子，从右到左先下后上的编织图案表示右手性粒子。这样不会形成镜像图案，斯莫林认为采用了这种方法，理论物理学家就不会遇到费米子加倍的问题了。

我们认为波函数是真实的，或者说它至少反映了系统背后的物理学性质，而这么想恰恰就错了。“因此，我们赋予一个系统（的波函数）……首先只是（该系统）此前发生的相互作用的结果的编码。”量子理论的结构——它所包含的所有波函数和规则——就像是一种工具，可以帮助我们基于过去的事件预测未来的事件。

接受了量子理论处理的仅仅是被编码的信息，以让我们通过过去预测未来这一点以后，我们又重新获得了局域性（即不存在“幽灵般的超距作用”），也无需引入波函数的坍缩了。我们无须解释系统是如何从充满了各种奇怪叠加态的微观量子尺度过渡到猫和人类观察者所在的宏观经典尺度的，因为并不存在这样的过渡。我们所做的一切，仅仅是通过一系列与系统的相互作用，追踪波函数里编码的信息，以建立我们对系统状态的认识而已——不管系统到底处于什么状态都是如此。

罗韦利清楚地表现出了实在主义者的特征——他相信存在一个独立的客观实在，在其中“测量原则上讲与其他任何一种物理相互作用都没有区别，而创造‘知识’的物理相互作用也没有什么特殊之处”。他只是认为，我们不应该把量子理论中常用的概念——尤其是波函数——从字面上诠释为真实存在的物理实体，它们只是我们在讨论时所用的方便的表达方式而已，以便把过去与未来联系在一起。这种逻辑早就有人提出了。在1781年首次出版的《纯粹理性批判》中，伟大的德国哲学家伊曼纽尔·康德区分了两个概念：本体（noumena）和现象（phenomena）。他认为本体是实在或客观事物的物理对象，我们只能通过内心来设想它们；而经验性的现象则是事物在我们的感知和经验中表现出来的样子。康德称，否定事物本身的存在是没有意义的，因为只有事物存在，它们才能在我们的感官知觉中出现（如果没有本体，就没有它所产生的现象了）。但同时，就算本体必然存在，我们原则上也不可能得到任何关于本体本身的知识。

对爱因斯坦来说，EPR实验的目的是展现出量子力学的不完备性。EPR论文的开头提出了物理实在的一个“有效定义”：如果我们在不以任何方式干扰系统的情况下，以一定的确定性（如以一个归一化的概率）预测一个物理量的值，这一物理量中就存在着某种物理实在的元素。根据罗韦利的波函数相关诠释，在对物理实体（物体本身）的预测中，无论确定性有多大，都不能改变这样一个事实：系统只有经过某种相互作用，并获得与该种相互作用相关的性质（即变成了物体的表象）之后，才能变成经验现实的一部分。实际上，根据这种逻辑，“不以任何方式干扰系统”和“物理（经验）实在的元素”就是互斥的。为了变成经验实在的一部分，系统必须受到某种相互作用。

关于波函数，我们可以接受一种反实在主义的诠释，也可以接受一种相对而言更实在论的观点，认为量子理论的概念和结构多少包含了一些字面上的物理含义。而对于实在论，我们也要付出一定代价，代价就是我们会不可避免地拖入一场“理论的游戏”。如果纯粹的经验主义是锡拉岩礁，对现实本质无穷无尽的形而上无意义思

考是卡律布狄斯旋涡，在两者之间玩一场“理论的游戏”，即找到合适的理论，就像是要安全渡过中间的墨西哥海峡。这意味着我们要不可避免地思考关于现实本质自身的问题。在这么做的过程中，我们可能会走入歧途（我认为多世界诠释与意识诠释的倡导者就已经走入歧途了），但我想人类探求真相的本性必定会驱使我们去尝试探求现实本质的。

在《皇帝新脑》（The Emperor's New Mind）中，彭罗斯提出，一个正确的量子引力理论可能可以解决这个问题，因为坍缩可能是时空弯曲产生的一种引力效应：我自己的观点是，只要引入“显著”的时空弯曲，量子力学的线性叠加规则就会瞬间失效。多个可能出现的态的复振幅的叠加被一个按权重分配概率的实际态代替，而其中的一个态最终会真正出现。在《皇帝新脑》出版26年之后，彭罗斯出版了新书《时尚、信仰与幻想》（Fashion, Faith and Fantasy）。在新书中，他的观点并没有改变，但关于量子坍缩的机制，他在逻辑上做了一些修正。他如今认为，是引力在叠加态的各个成分中作用的程度不一样，才导致叠加态坍缩成其中一个可能的结果。从这个意义上说，引力场提供了某种“摩擦阻力”，导致了退相干（decoherence）的发生。“退相干”是德国理论物理学家迪特尔·策（Dieter Zeh）于1970年首次提出的概念，指叠加态的各个成分不再同步行进而导致叠加态消失的现象。所有的质能都会产生引力场，因此任何大小达到经典尺度的测量仪器都会累积足够的相互作用，确保坍缩的发生。而且，虽然纠缠叠加态可以在实验室中产生，甚至可以越过很长的距离传输，但它们仍然是很脆弱的，很容易就会被破坏。测量的结果在相互作用链的很早一端就已经被决定了，远远先于它传播到猫（或是格温妮丝·帕特洛）的时候。彭罗斯认为，引力诱导坍缩的时间尺度或许能允许实验很快捕捉到坍缩的过程。

基础理论中的（自旋网络）图中有一种局域性的概念：如果两个节点在图中相连，我们就称它们是相邻的。但在低能极限下（这种情况下节点变为坐标位置），图中还嵌入了另外一种局域性的概念：如果两个粒子（嵌在图中的两个节点处）在时空度规上是相近的，我们也称它们是相邻的。在圈量子引力理论中，节点（体量子位置）与演生时空中的位置或格点对应（通过上段引文中提到的“嵌入”这种方式）。如果这种对应是有序的，即在自旋网络中相连的相邻节点在演生空间中所对应的位置也是相邻的，我们就得到图24（a）中的规律晶格，粒子以“跳格子”的方式从一个位置跳往下一个位置，因此在时空中粒子要想跨越遥远的距离需要花费一定的时间，这解释了为什么光速是有限的。

这类非局域性的连接有没有可能就是最终的隐变量呢？我们称一对纠缠粒子由同一个波函数所描述的时候，它们会不会是通过背后的自旋网络中的一条连接相连的呢？在粒子沿着自旋泡沫传播并在时空中相互分离的时候，这样一条连接仍然存在。也许就是这样的连接，在我们观测到粒子A为“上”的时候，像穿过某种秘密通道一样在时空中迅速传递，让粒子B具有了“下”的状态。在我们为了粒子之间如何超光速跨越时空交流而想破脑袋的时候，它们其实在时空之下保持着因果联系。我们倾向于认为，在量子引力理论中，量子的性质和行为是第一位的，而时空和广义相对论是在低能近似（即低能极限）下演生出来的二级现象。换句话说，我们假设量子引力理论首先是一个量子理论。但如果我们将非局域性作为量子物体的一项基本特征或行为，那么从上面的讨论中我们可以看到，从某种意义上说，量子理论本身也是基于量子的性质和行为演生出来的二级理论。

圈量子引力理论向我们提示了一个非常激进的想法：有可能存在这么一个理论，一切都是从一套抽象的相互作用中演生出来的——不管是量子性质，是物质与辐射的行为，还是时空（即引力场），都是如此。马科普洛与斯莫林在2003年表明，背景无关的模型在同样的低能极限下导出非相对论性的量子理论以及时空是可能的，此后斯莫林还一直在沿着这一想法继续探究。

圈量子宇宙学表明，一种来自几何空间的量子本质的新的排斥力会发生作用，它强到足以与经典的引力相抗衡，不管质量有多大。正是这种力量阻止了奇点生成。

圈量子宇宙学告诉我们，我们的宇宙并不是来自一场爆炸，而是来自一场发生在138亿年前的反弹。虽然有些无神论者更喜欢“从无到有”的宇宙观，但我们今天所知的宇宙可能是从反弹之前已经存在的宇宙中产生的。那在大爆炸之前，宇宙又是什么呢？根据圈量子宇宙学的结论，答案是很明显的：我们的宇宙在诞生之前是另外一个宇宙，那个宇宙在一场大挤压中收缩，然后反弹到如今这个不断膨胀的阶段。而这又会不可避免地产生另一个问题：我们怎么才能知道此前的宇宙都发生过什么呢（真的发生过什么的话）？2007年的时候，博约·瓦尔德的回答是“不会太多”。他的结论是，此前的宇宙在压缩和反弹的过程中，所包含的信息绝大部分都已经丢失，甚至全部丢失了。他把这一现象称为“宇宙的健忘”（cosmic forgetfulness）。反弹前后的宇宙不可能相同，不仅结构和外观不同，而且物理定律和粒子种类可能不同。我们可以尽我们所能地观察，但永远都不可能了解任何反弹之前的情况。2008年，科里基和辛格提出，反弹之后产生的宇宙中的量子涨落跟之前的宇宙间有很强的联系，就好像“宇宙（几乎）完全记得之前的样子”一样。自2008年以来，进一步的研究支持了这一结论。从实际的角度看，反弹之前存在的宇宙跟今天我们见到的宇宙在各个方面都是相似的。在宇宙收缩到由普朗克密度定义的“瓶颈”时，宇宙中的一切物体都被加热到难以置信的高温，不过现在已经有一定的根据认为之前的宇宙中的定律和粒子仍然是我们所熟悉的。虽然它们可能会随着每一次反弹而稍微扭曲一点点，但谁知道呢？博约·瓦尔德仍然坚持他的原始观点，认为物质（而非时空）分布过程中的量子涨落会让宇宙“忘记”之前的经历。如今这一问题尚未解决，但据我所知，圈量子宇宙学界更倾向于认为宇宙会回忆起之前的情况，而非忘记。

在圈量子宇宙学中，从反弹过程中产生的宇宙经历了一个迅速的膨胀过程，理论物理学家称之为超暴胀（superinflation）。阿什特卡指出：“超暴胀在广义相对论中不可能发生，但在圈量子宇宙学中是必经过程。”2002年，博约瓦尔德提出，超暴胀就是我们宇宙所需要的暴胀，它还能解释残留膨胀的过程，以及为什么我们今天观察到的宇宙学常数这么小。在近期的圈量子宇宙学模型中，超暴胀发生在反弹后的宇宙开始膨胀之时，当时的质能密度从 $\rho_c$ 降到了 $\rho_c/2$ 。但后来，理论物理学家意识到，超暴胀并不能替代标准 $\Lambda$ -CDM模型中的慢滚暴胀过程。它的持续时间不够长，不能产生所有需要的效应。单靠圈量子宇宙学无法解释我们宇宙的大尺度结构。这一事实令人很失望，物理学家别无选择，只能随大流地给圈量子宇宙学加上一个暴胀子场，其性质与如今标准的暴胀大爆炸模型中的暴胀子场相似。将暴胀与圈量子宇宙学结合起来，可能可以解决与平直性问题和视界问题相关的精细调节问题。不过，我在前文也提过，要想与暴胀结合起来，也要求圈量子宇宙学本身进行进一步的调节。暴胀后的宇宙结构极其依赖它在进入暴胀时的初始条件。就暴胀子场中量子涨落的本质而言，要想经历程度刚刚好的暴胀，最终得到我们宇宙中所观测到的恒星、星系、星系团和巨洞，其概率是极低的。

在圈量子宇宙学大反弹模型中，宇宙的起源点和初始条件的定义清晰得多，而反弹和超暴胀的物理学过程表明宇宙可以“像被漏斗导入一般进入一系列特定的初始条件，能保证它发生慢滚暴胀（并持续足够的时长）”。换句话说，宇宙被推入了“正确”的方向，沿着一条通往动态吸引子的轨迹，经历了足够长时间的慢滚暴胀，使其密度下降到比反弹瞬间的临界密度低11个数量级。不管我们在反弹的一瞬间具有的条件如何，吸引子的存在保证了宇宙最终多多少少变成了我们如今观察到的样子。尽管圈量子宇宙学不能帮助我们解释目前这个小的、正的宇宙学常数的起源，但它仍然能以跟标准大爆炸模型中同样的方式，用弗里德曼-勒梅特-罗伯逊-沃克（FLRW）度规来构造。引入宇宙学常数 $\Lambda$ 并不会影响与奇点、超暴胀和慢滚暴胀动力学相关的任何结论。

“时间冻结”难题当然没有消失。在原始的惠勒-德威特方程中，标度因子本身的大小被用来标记时间，但在圈量子宇宙学中，标度因子的表现是非线性的，意味着用它来标记时间不可行（我们的经验认为时间以均匀、线性的方式嘀嗒流逝，但圈量子宇宙学中的标度因子并不是这样的）。阿什特卡、帕夫洛夫斯基和辛格发现，他们需要引入一种新的无质量的场来演生出时间，以标记宇宙演化中的事件。

让线穿过卡拉比-丘空间的不同的洞这已经不仅仅是在讨论不同的卡拉比-丘空间的数目（沙粒的个数）了，而是在讨论让线穿过各个洞有多少种不同的方式，继而能产生多少种不同的理论。这种穿针引线的方式决定了可能存在的超弦振动的本质，也决定了物理学常数、物理学定律，以及占多数的基本粒子种类。换句话说，每个可能存在的理论都对应着一种不同的宇宙。

瑞典裔美国宇宙学家马克斯·泰格马克（Max Tegmark）管这样的多重宇宙叫“II级多重宇宙”。在他的分级系统中，III级多重宇宙加入了量子力学的多世界诠释（格温妮丝·帕特洛的猫在一个宇宙中活着，在另一个宇宙中死了），而IV级多重宇宙则是所有可能的数学结构描述的多重宇宙。打个比方，这些弦论研究者像是先一意孤行地向着形而上学的卡律布狄斯旋涡驶去，然后弃船逃生了。最终得到的理论当然不可能是他们所希望得到的“万物理论”，而更像是个“任有理论”。

当物质掉入黑洞时，它的表面积会增加，因此我们会推断它的熵增加了。但它的温度其实降低了——这一结论看起来似乎荒诞不经，往黑洞里增加质量（能量）反倒让它温度更低了！这像是说，往火炉里添柴火，火炉反而变凉了。不只如此，更糟糕的情况出现了。如果黑洞发射出霍金辐射，从定义上来说，它就必须失去能量（即质量），而这会令它的表面积减小，这就与霍金先前得到的结论相悖。从结果而言，黑洞的熵减小于发射出的辐射的熵，因此总的熵是增加的，这并没有违反热力学第二定律。然而，随着黑洞熵减小，黑洞的温度会上升，从而进一步提高霍金辐射的发射速率。这一过程会产生雪崩效应，让黑洞最终“蒸发”，以一场爆炸的形式完全消失。

量子力学要求在每一个量子过程中，波函数里初始编码的所有信息在结束时必须守恒。我们可以把这条规则看成某种概率的守恒。系统可能会改变，信息可能会以不同的形式呈现，但它本身必须一直存在。因此，黑洞蒸发带来的这种不可找回的信息丢失违背了量子理论的基础和结构。这一悖论被称为黑洞信息悖论。虽然施特罗明格和瓦法的推导在数学上是可靠而强有力的，但它依赖于一类人为的所谓“极值”黑洞，其带的电荷产生的效应重要性不亚于质能产生的引力效应。然而，三维的极值黑洞的表面积原则上可以缩小到零，它所携带的熵（及其携带的一切含义）也会一同消失。在施特罗明格-瓦法推导中，唯一能阻止这一结果的方法是假设有一个额外维度（弦论要求隐藏6个额外维度，这里只隐藏5个），让这个多余的维度来保存熵。该推导还需要假设弦的作用强度精确为零，此外，所有弦论都需要借助超对称的假设。

圈量子引力理论为熵与面积提供了一种非常直接的联系：熵由系统可能拥有的不同量子态的总数的对数决定，而在圈量子引力理论中，自旋网络里的连接正与量子空间态有关，由面积量子决定，面积量子又反过来与普朗克长度的平方相关。在这一问题中，自旋网络的连接（面积）比节点（体积）更重要，因为连接能够“刺穿”黑洞的事件视界（即连接的一头会消失在视界的背后），每刺穿一次，就赋予视界一块由连接所带有的量子数决定的面积（见图27）。这样一来，只要计算给视界表面赋予一个给定面积的所有不同方式数目之和的对数，就能得到黑洞熵了，克拉斯诺夫称之为“几何熵”。



在某一特定的超弦理论中， $n$ 维时空描述的物理学过程等价于对其 $(n-1)$ 维边界应用超弦量子场论得出的结果。这一结果令弦论圈里的很多人激动不已。它意味着，包含量子引力的超弦理论等价于一个不包含引力的固定背景时空中的超对称量子场论。威滕随后证明，超弦理论中总体时空里的一个黑洞，就等价于其边界表面上的一群由基本粒子（如胶子等）组成的热“汤”。

任何传递到黑洞内部的信息都可以通过对应的二元量子场论描述来重新获得，它只是随着霍金辐射跑出来消散了，但并没有消失。不过，这一方法也有不少问题。马尔达塞纳的猜想中概括的对偶性所涉及的超弦理论存在于“反德西特空间”（anti-de Sitter space）中，德西特空间以荷兰物理学家威廉·德西特的名字命名。德西特在1917年给出了爱因斯坦引力场方程的一个解，这个解代表了一个不包含物质、时空呈指数膨胀的宇宙模型。我们可以认为这样的宇宙只包含暗能量，有一个正的宇宙学常数，因此其时空曲率为正。德西特空间中三角形的内角和超过180度，就像球面上的三角形一样。在反德西特空间中，宇宙学常数为负值，时空曲率是负的，因此该空间中的三角形内角和小于180度。这是一种双曲宇宙，其形状就像一座马鞍。将物质注入双曲宇宙中，弯曲的时空会把它从边界推向中心。因此，马尔达塞纳的猜想有时也被称为“AdS/CFT对偶”，其中的AdS代表反德西特空间，CFT代表共形场论（conformal field theory），这是一类特殊的量子场论。要承认的是，即使到如今，马尔达塞纳的猜想也还只是猜想。一种特定的超弦理论（我们并没有它成立的证据）与一种超对称的量子场论（我们也没有它成立的证据）之间的对偶，其本身就是未经证明的。

有没有可能，黑洞信息悖论只是广义相对论（其中时空是以连续的方式演生出来的）被应用在本质上是量子的空间中时人为带来的结果呢？也许它跟芝诺悖论没有什么两样，只是基于一些更奇特的物体，包裹了一层更奇异的语言而已。在圈量子引力理论中，我们仅仅假设不存在比一个面积量子更小的面积，也不存在一个比体积量子更小的体积（就好像量子力学要求不存在比单个光子更小的光量一样），奇点就乖乖消失了。圈量子宇宙学中的量子引力效应，尤其是导致大反弹的量子斥力，在时空曲率接近普朗克尺度的时候占据了主导，这一现象可能发生在宇宙半径缩小到普朗克长度的很久之前。这并不一定意味着黑洞不可能完全蒸发。它可能经历一个反弹过程。2014年，罗韦利和维多托（维多托如今在荷兰的奈梅亨大学工作）提出，或许黑洞并不会坍缩成核心的一个奇点，而是坍缩成一个所谓的普朗克星。如果一个质量等于太阳质量的黑洞坍缩成一个普朗克星，它的半径大约只有10-10厘米。这已经压缩得很厉害了——整个太阳的质量被压缩到比一个原子还小的体积里，但这个尺度比普朗克长度还要大30个数量级。随着黑洞蒸发，它可能会产生一个很长的“脖子”，这样或许就可以将所有的量子信息藏在视界内，防止其丢失。现在，黑洞周围就有了两个视界。在黑洞发出霍金辐射时，外面的事件视界会收缩，让黑洞最终蒸发。但同样的机制会让普朗克星内部的视界膨胀。最终，两个视界互相接触，在这个时候，未从事件视界辐射出来的剩余的信息可以逃脱。信息并没有从宇宙中永久消失，悖论解决了。

量子引力理论中无处不在的数学结构会不可避免地让我们得出这样的结论：时间是幻觉。我们不得不认为，它是一项演生出来的、相对的性质，由一系列有因果关系的时刻序列组装而成，就像电影一样：一系列静止的图像快速地从我们眼前闪过，让我们产生了画面在动的幻觉。

一切选择都有后果。要成为一个有远见的人，你可能就需要把船驶到非常接近卡律布狄斯旋涡（形而上学谬论）的地方。在这样的情况下，你最应该做的只有通过望远镜密切观察经验主义的岩石浅滩，并期待最好的结果。

存在其他的周期性宇宙学模型，可以既消除大爆炸奇点也不必引入暴胀。该理论基于M理论的膜之间的碰撞，认为碰撞产生的一小部分能量转化为热辐射，表现为我们认为的大爆炸，它无须暴胀就能让宇宙加速膨胀。膜与膜之间碰撞并反弹，但不会相距太远，因此它们仍然能受到彼此的引力。数万亿年后，膜再次碰撞，宇宙重启，进入下一周期。既然这一模型无须引入暴胀，也就不会有原初引力波了。

在圈量子宇宙学中，宇宙的母体是大反弹之前存在的一个坍缩的宇宙。而在宇宙学自然选择模型中，宇宙的母体是前一个宇宙中的黑洞，黑洞反弹后产生了宇宙。这样看来，一个“典型”的宇宙的母体，可能会产生很多个后代宇宙（因为宇宙中有很多黑洞）。就像地球上的生命是通过随机的基因突变和自然选择演化而来的一样，随着时间推移，宇宙也进入了一种自我持续的模式，以使产生的黑洞数量最大化。

如果在每个黑洞反弹的时候，其物理学定律都会随机地发生轻微突变（比如基本粒子的质量有微小的不同，或者作用力的强度有细微的差异），那么宇宙学自然选择会让新的宇宙不断产生，创造合适的条件让产生的黑洞数量最大化。而据我们所知，让产生的黑洞数量最大化，需要的条件正是如今这个宇宙的初始条件：能产生我们熟悉的基本粒子、原子、恒星、星系和主宰所有这一切的性质与行为的基本物理定律的初始条件。“还有一个意外收获：这个模型通过假设宇宙为产生尽可能多的黑洞而生，同时解释了为什么这个宇宙中会存在生命。”那么，为什么不跳过中间过程，直接演化出原初黑洞最多的宇宙呢？因为这样的宇宙太小了。通过恒星的引力坍缩产生黑洞的宇宙会大得多，因此可以产生更多的黑洞。这个猜测简直是异想天开，离卡律布狄斯旋涡已经很近了。这是另一种多宇宙理论。与永恒暴胀和弦论景观不同的是，在这一理论中，所有不同的宇宙都有相似的血统，它们都演化出了对生命友好的结构，因此我们无须诉诸人择原理。

或许对时间的真实性带来最大威胁的想法是斯莫林和昂格尔所说的“元定律困境”（meta-law dilemma）。如果大自然的定律会演化，这岂不是意味着有一个元定律在支配着它们的演化？否则，在大自然的定律被“锁死”之前，基本粒子和它们之间的相互作用力是怎么知道要怎么做呢？而如果存在这么一条大自然的元定律，我们又得思考了：为什么是这条元定律呢？

斯莫林的先例原则也需要某种机制，让过去的相互作用产生的结果能够被未来的相互作用所“采用”。“这就需要一种新的相互作用，”斯莫林写道，“让一个物理系统可以与自己在过去的拷贝相互作用。”在探索这样的机制如何作用的过程中，斯莫林发现了一种全新的非局域隐变量量子力学诠释，他称为“真实系统诠释”（real ensemble interpretation）。之所以叫这个名字，是因为这一诠释假设量子物体的态是真实的（并不只是已编码信息的表达式），而且这些态的实体会发生集体的相互作用，就像一组音乐家组成的合奏组[插图]一样。

动态格子中的点之间可能会有非局域性的连接，代表自旋网络的演生空间。一个被测量的氢原子就通过这样的非局域性连接与系综中的其他成员相连。复制再次在空间“之下”发生了。假设这类相互作用会发生，那么先例就会一次又一次地重复发生，这样我们就得到了量子统计分布。在卢西恩·哈迪（Lucien Hardy）、路易·马萨内斯（Llúís Masanes）和马库斯·米勒（Markus Müller）此前发表的想法基础上，斯莫林设想，元定律的运行或许驱动了这些重复的结果形成一组简单的“规则”，它们能将重复结果所需要的信息量降到最低程度。随着时间推移，这些规则稳定下来，成为主宰物质、辐射和时空性质及行为的定律。如果所有这些想法都是对的，那么，通过在实验室中创造奇异的量子态，我们就创造了一个完全没有先例的系统。大自然没有任何历史上的先例可以用来决定该做什么，而对这类态的任何测量结果都应该是完全无法预测的。然而，这样的实验会很难解释，因为如果仪器没有正确地设置好，也会产生无法预测的完全随机的结果。因此，经验丰富的实验科学家会选择重复测量，消除初始设置中一切可能出现的问题（他们通常还会寻找更可预测并且可重复的结果）。到这个时候，先例原理就已完成它的使命。不仅如此，时间的真实性还要求我们重新诠释广义相对论，因为在广义相对论中时间被物理形状的对性代替了。如果时间是真实的，那么或许空间才是幻影，正如因果动态三角剖分和量子引力图论（quantum graphity）这些理论所认为的那样。这并不意味着斯莫林已经抛弃了他倾注了如此长的职业生涯的理论。这意味着，他把量子引力理论看作某种垫脚石，它并不会解决斯莫林认为与量子力学本质上的不完备性相关的深刻问题（因为它不能解决），它也不会在某种极限下产生广义相对论（因为目前看来它还不能），除了在“盒子中的物理学”的情况下以外。这就是斯莫林所说的开放未来原理（principles of the open future）。“在寻求发展这门新的科学的过程中，我们会发现，成功与否是可以通过宇宙学的未来在何种程度上变成未来的宇宙学来衡量的。”

圈量子引力最非凡的一点是，如果你从哲学角度去思考——这正是卡洛和我倾向于做的事情，思考先于几何诞生的网络（几何从中演生出来）就是一种实现相对性、背景无关性和局域性的自然的妥协方案。圈量子引力理论和弦论在某些方面有紧密的关联。实际上，罗杰·彭罗斯提出自旋网络的最初动力，就是要用量子纠缠在相关性的背景下表达马赫原理——这清清楚楚地写在他关于自旋网络的原始手写笔记上。彭罗斯一开始的自旋几何定理，就预示着空间自纠缠中诞生的想法。用圈量子引力的语言表达这些想法，有很大的空间。

斯莫林回想起了乔治·布拉克（Georges Braque）形容自己与毕加索一同引领立体主义潮流时说的一段话：“那些年毕加索和我之间说的话，永远也不会有人再说一次了，哪怕有人说了，也不会有人明白。当时的我们就像两个被捆在一起的登山者。”

它从广义相对论出发，借用了量子色动力学（QCD）中的一些思想，也包含致力于让结果与量子场论相容的探索。在路的终点，我们会看到空间的结构变成了量子的，而非连续的。就像量子力学中的物质和辐射一样，它是一块一块的。这一结构是一种由互相连接的引力“圈”形成的“自旋网络”系统。这些圈的形状有根本上的限制，它定义了普朗克长度尺度上的面积量子和体积量子（普朗克长度约为 $1.6 \times 10^{-35}$ 米，即质子直径的1020分之一）。

不同的自旋网络，也就是圈的不同连接方式，定义了空间形状的不同量子态。自旋网络的演化（即一种形状和下一种形状之间的连接的变化）就产生了自旋泡沫（spinfoam）。在叠加态中加入自旋泡沫，就产生了一个新出现的时空，即一种由量子物理学定律共同产生的结构。

他如饥似渴地阅读政治学、社会学和科学相关的书，也看小说和诗歌。20岁那年，罗韦利踏上了一场寻找真理的环游世界之旅。在旅途中，他强烈地感受到了自由，也学到了如何掌控自己的生活并追寻自己的梦想。但当他远离了自己一直以来在各种方面痛恨的故乡以后，他的看法发生了一些转变。意大利的确有很多让他愤怒的地方，但在那里也有很多事物有待他学习。

我们永远都不可能知道电子的裸质量是多少：但是如今我们可以通过巧妙地处理QED方程组来解决这个问题。理论物理学家发现，将描述电子一种物理状态的方程减去描述电子另一种状态的方程，就能消掉无穷大的项。从表面上看，用一个无穷大减去另一个无穷大好像不是很有意义，但物理学家发现，这么做得出的结果不仅是有限的，而且是正确的。这种数学上的小花招被称为质量重正化（mass renormalization）。狄拉克作为一名数学上的纯粹主义者，认为这种小花招非常“丑陋”。

在传递弱力的粒子身上一定发生了某种不同寻常的事情——它们通过某种方式“获得了质量”，从而让电弱力分裂成了我们今天所见到的电磁力和弱力。对于这种分裂现象，物理学家有一种独特的描述方式，叫作“对称性破缺”，它在数学和物理学两个方面都有很深刻的含义。某种方式让电弱力的对称性发生了破缺，产生了两种新的力。

希格斯场的特征性量子涨落被称为希格斯玻色子。根据这一机制，美国物理学家史蒂文·温伯格（Steven Weinberg）和生于巴基斯坦的物理学家阿卜杜勒·萨拉姆（Abdus Salam）分别在1967年和1968年发表论文，[插图]提出了完善的关于弱力的量子场论。随着1971年荷兰物理学家马蒂纳斯·费尔特曼（Martinus Veltman）和赫拉德·特霍夫特（Gerard't Hooft）证明这一理论是可重正化的，横在电弱理论面前的最后一道障碍也被消除了。

在没有希格斯场的情况下，所有粒子都没有质量，且都以光速运动。质量将不存在，也谈不上有什么物质实体了，因此也不会有恒星和星系构成的宇宙，没有行星，没有生命，没有人类。

时至今日，没有人在粒子对撞实验中看到过自由的夸克。如果夸克真的是组成物质的最基本的粒子，又在质子和中子之中闲散地游荡，它们为什么不跑出来呢？在质子和中子内部，夸克们被拴在一起，但它们的距离又近到可以让它们“自由地游荡”，而一旦我们尝试把夸克分开，它们之间的作用力会立即表现出来，就像弹簧被拉紧的时候一样。只能假设夸克拥有第三种性质，他们称之为色（colour）。每味夸克都有三种不同的色——红、绿、蓝，每个质子或中子包含红色夸克、绿色夸克和蓝色夸克各一个。比方说，一个质子可能由一个红色上夸克、一个绿色上夸克和一个蓝色下夸克组成。这样的设定要求有8种不同的有色、无质量粒子来传递夸克间的相互作用，它们被称为胶子（gluon），充当了夸克之间的弹簧。该理论把夸克之间的强相互作用力称为色力。

精密的QCD计算表明，一个质子或者中子质量的约95%来自在夸克之间传递色力的无质量胶子的能量。爱因斯坦的质能方程 $m=E/c^2$ 表明，一个物体的质量可以衡量它所含的能量。从质能方程我们可以推出，质量并不是一个物体所拥有的东西（即它的性质），而是它在做的事情（即它的行为）。电子场同时穿过了两道狭缝，它的量子概率图案受到了场干涉的影响。电子可以被诠释为场的特征涨落，只有在场与屏或照相底片作用的时候才会产生。就在作用的一瞬间，波函数坍塌，我们所看到的电子（以及它的自旋、电荷与质量）就从空气中浮现出来了。

宇宙学的首个量子理论。“整个宇宙的波函数”这样的提法首次出现在了科学文献中。德威特发现，这个波函数只依赖于空间的几何形状，时间仍然难以捉摸。这个波函数描述了一个静态的宇宙模型，总能量为零。德威特写道：“于是我们可以得出结论：在这样一个量子的几何动力学模型中，一切都不会发生，量子理论只会产生一个静态世界的图像。”[插图]为了让事件能够在这个宇宙中发生，他需要找到一种方法重新引入时间，通过把表示不同量子空间态的多个波函数叠加起来并使其演化的方式来实现。

但如果一直把量子场放在首要位置上，协变方法就牺牲了引力与时空几何学之间的深层连接，而这正是广义相对论的核心。而那些把自己的一生都投入到广义相对论研究中的物理学家，也不喜欢量子场论研究者不得不依赖的重正化方法。尽管有些理论物理学家承认同时从事多条线路的研究有其好处，但在量子引力方面，已知的这两种方法在概念上有很深的鸿沟，彼此之间也缺乏共同的基础。正则方法强调几何，而这“在广义相对论与基本粒子理论之间制造了一种分裂”[插图]。而粒子物理学理论非凡的成功，以及大众对该领域日益增长的兴趣，让粒子物理学家深信协变方法是唯一的理性途径。

美国物理学家斯蒂芬·马丁（Stephen Martin）在2011年解释道：“希格斯粒子的质量中比较危险的大质量贡献被系统地抵消了，这只能用存在某种阴谋来解释。用我们物理学家所熟知的词语来表示，这种阴谋就是对称性。”科学家讨论的这种对称性被称为超对称（supersymmetry）。

球面联络的方法也许看起来很难懂，但实际上形成粒子物理标准模型的量子场论也可以被看作是“联络理论”。[插图]在量子场论中，量子场进行了矢量（如自旋的电子）的平行移动，而如果量子场是“弯曲”的，即它的大小和方向在各个位置不同，那么将一个矢量沿一条闭合的路径移动一圈，它在回到起点时的方向可能就和起始状态不一样了，正如指南车在回到北极点时人像指向的方向与一开始不同那样。只要我们把量子场“用钉子固定到”一个任意的平直欧几里得背景空间中，以描述矢量从“这里”到了“那里”、又回到“这里”，这样的事情就会发生。

如果广义相对论可以被重新表述成一种联络理论，也许它就能与经典场论一样被量子化了，正如麦克斯韦的经典电磁场理论被量子化而产生量子电动力学一样。然而，还有一个很大的不同点：在广义相对论的联络理论表述中，引力场是联络系统，不过我们当然没有必要把这个场再钉到一个任意的背景时空里去了。时空度规会从联络系统中自然而然地产生。

到20世纪70年代末，有科学家将类似逻辑应用于携带自旋角动量的物体的移动，提出了一种自旋联络系统，在固体物理领域有所应用。自旋联络的概念并不是新产生的——它的起源可以追溯到20世纪30年代，但阿米塔巴·森发现，它可以用来重新表述广义相对论的ADM哈密顿形式，用自旋联络来代替时空度规，这样可以导

出我们更熟悉的弯曲时空。这一思路看起来很有前景：它暗示某种物体可能具有我们所期望的引力子拥有的性质。

弦论上曾经遇到过的问题之一是，在它给出的所有粒子中，有一种粒子没有质量，却有两个单位的自旋。这是描述强核力时我们曾经认为出了错的地方，因为没有哪种已知的粒子具有这样的性质。然而，这恰好就是我们期待量子引力所拥有的性质。

因此，开放的弦不仅预言了物质粒子，也预言了它们之间的力。但弦论也要求存在闭合的弦（称为闭弦）。当一个粒子和它的反粒子互相湮灭时，两个粒子的两端就各自相连，形成一个闭弦。但如果存在闭弦，就意味着存在没有静止质量且有两个单位自旋的粒子，而这恰好就是我们所预言的引力子的性质。引力子在截至目前的所有粒子物理模型中还没有位置，而理论对引力子的预言看起来也是颇成问题的。

20世纪80年代初，威滕刚刚30岁，还是位相对年轻的理论物理学家，但已经是一位现象级人物。他的职业生涯堪称文理兼修：他先是在波士顿附近的布兰德斯大学学习历史学和语言学，然后在威斯康星大学研究经济学，又从事了一段时间的政治工作。他参与了乔治·麦戈文（George McGovern）1972年的总统竞选活动，在麦戈文被理查德·尼克松压倒性地击败后，威滕抛弃了政治，转而前往普林斯顿研究数学。没过多久，他就转向了物理学的研究。在QCD的创立者之一戴维·格罗斯的指导下，威滕于1976年获得博士学位。仅仅4年之后，他就成为普林斯顿大学的终身教授。1982年，他获得了麦克阿瑟基金会颁发的“天才奖”。

把基于点粒子的描述改成基于弦的描述确实消除了一些数学上的不一致性，引入超对称则缩减了理论所需的维度数目，并消除了麻烦的快子（虽然产生了新的代价，如引入了更多的参数，以及超对称性破缺的问题），但在超弦理论中，超弦仍然在九维的空间和一维的时间中运动，空间与时间维度仍是分开的。

转向自旋联络的形式体系带来了一条重要的线索。它表明，这样一种理论有可能不需要背景时空框架就能存在。这一理论所描述的并不是存在于空间之中的圈，而是圈定义了空间。这已经是在正确的方向上前进了一大步。

这四位理论物理学家合作撰写了一篇论文，并于1985年发表，这篇论文首次提出了“隐藏维度”的想法。如果我可以标记出面前桌子上键盘前的某个无穷小的点，并且让镜头聚焦于这个点，将其放大，以至于我们能看到1厘米的 $1/1033$ ，那么根据超弦理论，我们就能感受到另外6个维度卷成了卡拉比-丘流形。虽然理论要求这些额外维度必须隐藏起来，但这并不意味着这些额外维度不会在物理上产生影响。事实恰好相反，卡拉比-丘空间的准确形状以及它拥有的“洞”的数量，决定了可能存在的超弦振动的数量。因此，它也决定了物理学常数、物理学基本定律，以及普遍存在的粒子的能量范围（谱）。换句话说，卡拉比-丘空间的形状决定了我们处于哪一种物理宇宙中。

斯莫林、雅各布森和克兰全力发展的这一理论已经消除了格点结构，但他们得出的量子态仍然是自旋联络的函数。然而，自旋联络本身周围还带着引力场，而在广义相对论中，引力场就是时空本身。因此，哪怕这些量子态看起来已经与背景的时空格点无关了，它们也并没有真正地背景时空相脱离。这就解释了为什么他们得到的解没能通过坐标系检验。罗韦利意识到，在此基础上，利用他从艾沙姆那里学到的技巧，对解进行一次重新表述，就能只以力圈的形式来表示量子态了。同样的逻辑可以用在多个问题上，这即将成为一类由交叉的圈——“引力圈”组成的理论，这类圈不仅存在于空间中，它们的集合本身即为空间。

广义相对论属于经典理论，并不像量子理论那么依赖算符。它描述的是质能与时空之间的关系，而如果我们把所有存在的物质都移走，在原则上会发生什么呢？这是第一个问题。圈量子引力原本想要的描述的是时空本身是如何演生出来的，但要以量子场论的形式重新表述，在缺乏物质的情况下，算符和可观测量就根本无法定义了。我们不能给空间安上一个算符，因此也就没有对应的可观测量。

广义相对论属于经典理论，并不像量子理论那么依赖算符。它描述的是质能与时空之间的关系，而如果我们把所有存在的物质都移走，在原则上会发生什么呢？这是第一个问题。圈量子引力原本想要的描述的是时空本身是如何演生出来的，但要以量子场论的形式重新表述，在缺乏物质的情况下，算符和可观测量就根本无法定义了。我们不能给空间安上一个算符，因此也就没有对应的可观测量。

在该结构中，唯一重要的只是物体及其自旋值之间的拓扑关系。彭罗斯证明，只要网络的总角动量足够大，就能以其自身构建出逆着其他可被测量的大型网络的相对定向的方向。想象有这么一个自旋网络，它拥有很大的总自旋角动量（例如为N），现在我们将一个单位的自旋角动量传递到另一个大的自旋网络（总自旋角动量为M）中。在这个过程中，有一定概率这一个单位的自旋角动量会加到第二个自旋网络中（得到M+1），也有一定概率第二个自旋网络会被减去一个单位的自旋角动量（得到M-1）。彭罗斯证明，这些概率之间的关系定义了两个网络之间的夹角。不仅如此，他还证明，所有这类夹角之间的关系，与三维欧几里得空间中的夹角关系完全一致。这表明，常规的空间和几何学从大的自旋网络中的一系列相互关系中演生了出来。

彭罗斯在开始构造这一理论时，完全没有预先在大脑中设定任何理论的形式结构，他只是基于空间应该是离散且相关的这一想法，想出了自旋网络的结构。实际上，彭罗斯的这种理论仅包含一个想法：自旋网络不足以构

彭罗斯之所以发展出自旋网络，只是因为他感觉连续时空的观念不太对劲。把阿什特卡的广义相对论自旋联络表述量子化，就得到了引力的“圈”和“纽结”，然后得出一个由圈编织起来的空间。斯莫林和罗韦利如今已经找出了应用体积与面积算符的方法，并且证明圈量子引力理论中的空间是离散而相关的，在他们推进这一工作的过程中，彭罗斯早已建立的自旋网络理论就在背后静静地看着他们。应用体积算符，就会得到自旋网络节点处的离散“颗粒”，即量子化的空间。应用面积算符，就会得到网络中的连线上（即离散颗粒相连的地方，如图20所示）的量子化的面积。这些颗粒极为微小，一个质子装得下多达 $10^{65}$ 个这样的体积量子。从一个颗粒移动到相邻颗粒形成的闭合回路就是圈量子引力理论中“圈”的起源，而圈上每条线所带有的值的总和就反映了引力场的强度，即空间弯曲的程度。

对于当代理论物理学而言，对经验证据的要求似乎不再处于第一位了，这给了弦论研究者充足的理由来完全忽视这一要求，失去对这一要求的尊重，甚至抛弃科学方法的优良传统。而这种情况下的真正危险在于，如果这样的理论在多位聪明的理论物理学家的支持下随波逐流太久，物理学研究就可能一直自我延续下去，哪怕它们已完全无法实现当初的承诺。

彭罗斯曾设想让他的自旋网络成为一个框架，时空从其中自然演化。但在圈量子引力理论中，自旋网络的节点处产生的是空间体积的量子，节点之间的连接则表示空间体积量子相接处的面积量子，这在很大程度上是一个静态的图像。然而，理论物理学家必须找出一种方法为这样的时空框架引入某种动力学改变。这个问题被称为时间冻结难题（problem of frozen time）。

假设我们有一个包含3个节点（3个体积量子）和6条连接（6个面积量子）的自旋网络，在它上面叠加一个有1个节点和3条连接的自旋网络。绘制出这些节点与连接的演化轨迹，也就描述了不同的网络，即不同空间量子态之间的转变（如图21所示）。图21 在自旋泡沫中，自旋网络的节点变成线，连接变成平面。在这个例子中，一个由3个体积量子（3个节点）和6个面积量子（6条连接）组成的自旋网络变成了一个由1个体积量子（1个节点）和3个面积量子组成的自旋网络。不过，这个演化过程并不是连续的。我们只关注节点和连接的数目，因此时钟只在这两个量发生变化的时候才走动。这样做的结果就是理论物理学所说的自旋泡沫（spinfoam）。为什么称它为“泡沫”呢？因为这并不是一个平滑而连续的过程，其本质是量子的。空间随机地演化，从一个组态跳跃到另一个组态。约翰·惠勒仅凭直觉想象了时空在普朗克尺度上的样子：“讽刺的是，在我后来对引力和广义相对论产生兴趣以后，我不得不发明‘量子泡沫’这个概念，这些泡沫由不断从虚空中产生又凭空消失的粒子组成，而时空本身则被搅成了一团扭曲的肥皂泡形状。”

二维的自旋网络图终于能表示三维的空间了。通过绘制节点与连接从一个网络到另一个网络的变化轨迹，即在不同时间点上的剖面图之间建立因果关系，我们实际上引入了第四个维度。我们可以称这个维度为时间。每个自旋泡沫都能追踪局部事件的历史，包括该处在空间量子态之间的转变。它们是怎么被画出来的不重要，重要的是以节点和连接的数（和值）表示出来的网络的几何形状。

光怎么能提前“知道”沿哪条路径传播花的时间最短呢？费曼的回答是：光无须提前知道哪种路径花的时间最短，因为它走了从起点到终点的所有路径。费曼将这条相对简单的物理学原理发展成另外一套描述非相对论量子力学的表述形式。他认为，一个量子粒子在从一个位置到另一个位置的过程中走了它所能走的所有路径，即该粒子运动的所有可能“历史”的综合。而在一个特定的位置发现该粒子的概率则由所有可能到达该点的路径的振幅总和决定。对所有历史求和，就等价于对所有可能的费曼图求和。

费曼图是画在一个假定的时空背景上的。但理论物理学家发现，类似的方法可以应用在圈量子引力上。每个自旋泡沫代表了一种可能的历史——网络的节点和连接之间一系列遵循因果关系的步骤，可以被视为量子引力中的费曼图。每个自旋泡沫都对应一个概率。为了知道空间量子态是如何演化的，我们必须计算出所有可能的自旋泡沫（所有可能的历史）的发生概率，并把它们相加。把所有不同的量子泡沫加起来，就会得到一个量子叠加态。我们把最终得到的这个大尺度结果叫作时空。

-----

圈量子引力理论预言空间会被量子化成离散的小体积，它们坐落在自旋网络的节点上。在自旋泡沫中，自旋网络从一个态跃迁（“跳”）到另一个态上，而由自旋泡沫演化出来的时空自然而然地拥有了一种格点结构，由空间的离散量子本质所决定。这与QCD中我们人为加入以简化复杂计算的虚拟格点完全不同。一方面，圈量子引力中自然演化出来的格点是动态的，而QCD中的虚拟格点是静态的。因此，我们可以将引力波看成一种沿着时空格传播的集体振动。从这个角度看，引力子就相当于与时空集体振动相关的准粒子，正如某些固体或液体中原子的集体振动产生的准粒子（声子）一样。

对于量子场论而言，边界条件对于内部情况的“编码”要比我刚刚举的简单几何例子复杂得多。厄克尔将这种方法与全息术联系在了一起，他写道：“从这种意义上说，这种数学表述类似于‘全息的’，也就是说，它内部的信息已经完全被边界上的态所编码了。”这个比喻很妙。在全息术中，重建三维图像所需要的所有信息都被编码在一幅记录在光刻胶或者光聚合物上的二维干涉图中。

边界上所编码的信息体现了内部区域的量子力学过程的所有不同的历史。比方说，如果我们关心的过程是电子从一个地方移动到另一个地方，那么这件事发生的时空区域的边界上所编码的信息就包含电子经历的所有可能的过程，包括虚粒子产生和湮灭的各种历史。如果我们选择一个足够大的区域，并设定好初始条件，边界上的物理学的表现就趋向于经典的轨迹，这是内部所有不同量子通道发生相长干涉的结果。上面的讨论都是关于一块时空区域周围的边界进行的，但这一数学结构并不依赖于时空背景。它对自旋泡沫区域的边界同样适用。

自旋泡沫的数学形式并不描述粒子的产生和湮灭，取而代之的是空间量子的产生和湮灭。只要选择一个合适的大尺度区域（包含许多个空间量子及自旋网络之间的多次跃迁），边界上编码的“全息物理学”就趋近于一个极限，亦即连续时空中的物理学结果。有了边界方法，理论物理学家就能计算粒子的行为，且无须借助背景时空假设。粒子在时空中从一个位置移动到另一个位置的结果，自然地出现在了关于边界本身的方程中。

量子引力的协变方法在重正化方面遇到了很大的困难，但在低能近似下，会让方程失效的发散项是可以被忽略的。这就意味着，我们可以基于粒子物理学家偏爱的“传统”方法，为引力子的传播函数推导出一个近似的、低能的表达。罗韦利与同事证明，把他们的边界方法用在自旋泡沫数学形式上，计算出的引力子传播函数与协变量子引力低能近似下推导出的结果完全一致。这表明，两种不同的理论方法（不管它们各自对物理学实在的描述是否正确）产生的结果至少是一致的。在大距离极限上，圈量子引力理论计算出的引力子传播函数与“这里”和“那里”的距离成平方反比，也依赖于如牛顿引力常量G这样的物理学常数，这与经典极限下的结果完全一致。

弦论从本质上来说是一个粒子物理理论，它尝试通过假设粒子不是无穷小的点粒子，而是延展的二维或是多维的物体，来消除无穷大的量带来的问题，因此，得到的就是连续时空背景下的一个关于弦的理论。为此，物理学家需要将额外的维度隐藏起来，还需要引入超对称这样的假设，以让该理论不那么难以驾驭。这消除了点质量带来的问题，但并没有解决连续时空假设带来的问题。在弦论中，阿喀琉斯仍然追不上乌龟。与之相反，圈量子引力是一个关于时空几何形状本身的理论。它致力于通过将广义相对论与量子力学结合起来，表明时空是离散而非连续的，从而消除无穷大量。它对于大自然的影响并不仅仅在于时空的形状（以及无质量的引力子）方面。现实比这复杂得多。理论物理学家随后的任务，是把有质量的粒子融入这一图像中。既然所有物质都由费米子（夸克和轻子）组成，就意味着我们需要把自旋泡沫圈量子引力与费米子场耦合起来。

引力与费米子相互作用的量子理论。费米子的性质由一种叫作“CPT对称”的对称性所主宰。“C”代表电荷共轭：如果一个粒子的物理学性质在C对称性变换下不变，意味着将其电荷换成大小相等、符号相反的电荷（也就是说，用对应的反粒子来代替该粒子）以后，该粒子的性质不会发生改变。“T”代表时间反演：在描述该粒子动力学过程的方程中将t换成-t。虽然在我们的经验里，时间只会沿着一个方向流动，但物理学方程一般不管时间往哪个方向流动——不管事件是顺序发生还是倒序发生，方程都不变（我们称这种情况为物理学定律在T对称性反演下不变）。

波函数的宇称描述的就是，如果我们改变所有的空间坐标轴的正反符号（即颠倒左右、上下、前后），会不会改变这道波的传播方向。同时改变三条坐标轴的方向，相当于把这波变成了它在一面镜子中的倒影，它的视角也变了——左变成右，上变成下，前变成后。如果波函数在这样一面“宇称之镜”中的倒影与原本的波函数振幅相同，我们就说这个波函数具有偶宇称；如果镜中的倒影与原本的波函数振幅相反，我们就说这个波函数具有奇宇称。

在弱相互作用中，大自然似乎更偏爱某一种“手性”实际上，通常来讲，只有左手性的粒子和右手性的反粒子能进行弱相互作用。

1964年普林斯顿大学的物理学家詹姆斯·克罗宁（James Cronin）和瓦尔·菲奇（Val Fitch）在布鲁克海文国家实验室做的实验表明，在中性K介子（一种由下/反奇异夸克和奇异/反下夸克混合形成的介子）发生的某种衰变过程中，CP对称性也被破坏了。我们只有再加上时间反演对称性，才能让自然再次回到正常的状态。CPT对称性的组合才是永远不被破坏的对称性。韩慕辛与罗韦利证明，在与自旋泡沫相耦合时，费米子传播函数的CPT对称性不变，这与我们的要求相符。他们发现，边界行为可以通过自旋泡沫振幅中嵌入的费曼图简单地描述。毋庸置疑，费米子场相互作用的物理规律也能以同样的方式显现出来，也就是说，原本被认为只能在背景时空中运作的量子场，也能在自旋泡沫的海洋中自然存在。

森与阿什特卡已经选定了原始的自旋变量以反映手性，因此原则上将手性费米子引入自旋泡沫圈量子引力理论是可以的。然而，一旦费米子场被固定在格点上，它们的行为就变得很异常，显现出一种不自然的费米子加倍（fermion-doubling）现象：出现了奇怪的镜像态，每个原本左手性的费米子在每个空间维度方向上都产生了一个右手性的镜像。格点QCD中也有这个问题。格点QCD中有一条强大的止步定理，这条定理由丹麦物理学家霍尔格·尼尔森和日本物理学家二宫正夫提出，表明只有左手性与右手性费米子的耦合强度相等时，自由费米子在离散格点模型中才能得到连续的结果。然而，弱相互作用只青睐左手性费米子，因此耦合强度不可能相等。在格点QCD中，理论物理学家引入了多种应变方法来除掉额外的费米子，以绕过该问题，比如人为破坏手性对称，把镜像粒子推向一个更高的能量范围，使其不再发生耦合，从而影响理论计算。

2015年，斯莫林与雅各布·巴尼特（Jacob Barnett）在圆周理论物理研究所合作，详细探究了费米子加倍的现象，证明原本的正则圈量子理论无法解决这个问题，因此无法用来描述手性费米子。他相信，这是圈量子引力理论在描述自然方面的主要障碍之一。

圈量子引力理论是由互相连接的力圈形成自旋网络而构建出来的，其节点表示体积量子所在的交叉点，连接则表示相邻节点交界处形成的表面，即面积量子。如果我们回到由闭合的圈形成的空间这一想法，费米子就可以看成开放的圈，其自旋量子数为 $1/2$ 。斯莫林解释道：“在该理论发展的早期，最激动人心的时刻就是我们讨论费米子如何从自旋网络中的自由端或小孔处演生出来的时候。”

开放的圈在自旋网络上以一个额外的 $-1/2$ 自旋的“面”的形式存在，将物质粒子紧紧地捆绑在演生时空的结构上。这种景象不禁让人回想起惠勒和米斯纳设想过的图像。他们1957年提出，带电的粒子可能只是电场线穿过普朗克尺度的虫洞，形成假想中的隧道，将时空中不同的点串在一起。他们想象这些力线在一个虫洞中消失，在另一个虫洞中重现，力线其实形成了闭合的圈，但因为它们总是在这里消失，在那里重现，看起来就像是开放的圈。换句话说，通过这个假设，物质粒子可以完全只通过引力导出。惠勒将这一想法称为“已统一理论”。与其努力统一引力与电磁力（这是爱因斯坦多年来尝试却徒劳无功的事），为什么不干脆假设电子自身就是时空本身的基本属性呢？这样的话，理论就会变得十分简洁而优雅。斯莫林于1994年证明，从广义上来讲，将广义相对论与费米子耦合起来的理论，与不包含物质但容许某种极简主义虫洞存在的理论是完全等价的。就背后的物理学机制而言，电子与虫洞完全是同一件事。在后来关于自旋泡沫费米子的工作中，这一结论已显而易见了。2013年，罗韦利与同事提到，在某些固定的时间，费米子圈是非局域性的——它在时空中的一部分消失，又在一点重现。

克尔-纽曼黑洞的 $g$ 因子恰好等于2，与QED中应用辐射修正之前的“狄拉克电子”等价。虽然我们如今倾向于认为黑洞起源于大型天体（如恒星）的引力坍缩，但理论并没有排除微观黑洞存在的可能性。当然，我们有各种各样的理由认为电子是克尔-纽曼黑洞的这一想法不靠谱，但这种巧合恰恰是理论物理学家获得灵感所需要的。有些人认为，这一巧合反映，“量子理论与广义相对论在深处是同源的”。

比尔森-汤普森将基于点粒子的哈拉里-舒普模型变成了一个拓扑学“玩具模型”，用三种“丝带”以不同方式编织形成的图作为基础。一条丝带可以带电（对应于哈拉里的 $T$ ），也可以为电中性（ $V$ ），而传递力的玻色子则没有经过编织。第二代和第三代粒子只是编织方式比第一代更为复杂一些。比尔森-汤普森发展的这一模型比哈拉里-舒普的原始模型更简单，而且有额外的好处：丝带既可以向左编织，也可以向右编织，可以形成两种镜像对称的图像，从而为手性提供了基础。关于这种丝带到底是什么，比尔森-汤普森没有给出解释，不过他“不太认真地提到它们可能是彼此缠绕在一起的微虫洞”。

在1986年2月圣巴巴拉晴朗的一天，斯莫林与雅各布森首次发现了广义相对论场方程的自旋联络表述的精确解。斯莫林知道比尔森-汤普森的“编织的丝带”正可以被看作这种精确解，因而提出了一个令人震惊的假设：标准模型中所有的粒子都表现为引力线不同的扭曲和编织方式。设想粒子从时空本身中诞生，是同时实现惠勒的“已统一理论”和19世纪开尔文爵士认为原子是“以太的纽结”的观点的最终方法。但这要如何实现呢？斯莫林与马科普洛邀请比尔森-汤普森来合作，他们三人进一步优化了这一模型，让三种丝带变成一张自旋网络与一套普适节点集之间的三种连接。比尔森-汤普森在其模型中引入的电荷可以用连接向一个方向扭曲（ $1/3$ 正电荷）或向另一个方向扭曲（ $1/3$ 负电荷）来代替。让形成上夸克的三条丝带中的两条扭曲起来，就得到了 $+2/3$ 的总电荷。鉴于在三条丝带里选择两条丝带扭曲有三种情况（可能扭曲第一条和第二条、第一条和第三条，或者第二条和第三条），而这就对应于三种不同色的夸克。类似的逻辑可以用在下夸克上。至于电子，因为只有三条丝带都扭曲才能形成 $-1$ 的总电荷，因此不可能形成不同的色。不带电的粒子，如电子中微子与反中微子，则不包含扭曲。丝带之间也可以“编织”起来。从左到右、先下后上的编织图案表示左手性粒子，从右到左先下后上的编织图案表示右手性粒子。这样不会形成镜像图案，斯莫林认为采用了这种方法，理论物理学家就不会遇到费米子加倍的问题了。

我们认为波函数是真实的，或者说它至少反映了系统背后的物理学性质，而这么想恰恰就错了。“因此，我们赋予一个系统（的波函数）……首先只是（该系统）此前发生的相互作用的结果的编码。”量子理论的结构——它所包含的所有波函数和规则——就像是一种工具，可以帮助我们基于过去的事件预测未来的事件。

接受了量子理论处理的仅仅是被编码的信息，以让我们通过过去预测未来这一点以后，我们又重新获得了局域性（即不存在“幽灵般的超距作用”），也无须引入波函数的坍缩了。我们无须解释系统是如何从充满了各种奇怪叠加态的微观量子尺度过渡到猫和人类观察者所在的宏观经典尺度的，因为并不存在这样的过渡。我们所做的一切，仅仅是通过一系列与系统的相互作用，追踪波函数里编码的信息，以建立我们对系统状态的认识而已——不管系统到底处于什么状态都是如此。

罗韦利清楚地表现出了实在主义者的特征——他相信存在一个独立的客观实在，在其中“测量原则上来讲与其他任何一种物理相互作用都没有区别，而创造‘知识’的物理相互作用也没有什么特殊之处”。他只是认为，我们不应该把量子理论中常用的概念——尤其是波函数——从字面上诠释为真实存在的物理实体，它们只是我们在讨论时所用的方便的表达方式而已，以便把过去与未来联系在一起。这种逻辑早就有人提出了。在1781年首

次出版的《纯粹理性批判》中，伟大的德国哲学家伊曼纽尔·康德区分了两个概念：本体（noumena）和现象（phenomena）。他认为本体是实在或客观事物的物理对象，我们只能通过内心来设想它们；而经验性的现象则是事物在我们的感知和经验中表现出来的样子。康德称，否定事物本身的存在是没有意义的，因为只有事物存在，它们才能在我们的感官知觉中出现（如果没有本体，就没有它所产生的现象了）。但同时，就算本体必然存在，我们原则上也不可能得到任何关于本体本身的知识。

对爱因斯坦来说，EPR实验的目的是展现出量子力学的不完备性。EPR论文的开头提出了物理实在的一个“有效定义”：如果我们在不以任何方式干扰系统的情况下，以一定的确定性（如以一个归一化的概率）预测一个物理量的值，这一物理量中就存在着某种物理实在的元素。根据罗韦利的波函数相关诠释，在对物理实体（物体本身）的预测中，无论确定性有多大，都不能改变这样一个事实：系统只有经过某种相互作用，并获得与该种相互作用相关的性质（即变成了物体的表象）之后，才能变成经验现实的一部分。实际上，根据这种逻辑，“不以任何方式干扰系统”和“物理（经验）实在的元素”就是互斥的。为了变成经验实在的一部分，系统必须受到某种相互作用。

关于波函数，我们可以接受一种反实在主义的诠释，也可以接受一种相对而言更实在论的观点，认为量子理论的概念和结构多少包含了一些字面上的物理含义。而对于实在论，我们也要付出一定代价，代价就是我们会不可避免地拖入一场“理论的游戏”。如果纯粹的经验主义是锡拉岩礁，对现实本质无穷无尽的形而上无意思考是卡律布狄斯旋涡，在两者之间玩一场“理论的游戏”，即找到合适的理论，就像是要安全渡过中间的墨西哥海峡。这意味着我们要不可避免地思考关于现实本质自身的问题。在这么做的过程中，我们可能会走入歧途（我认为多世界诠释与意识诠释的倡导者就已经走入歧途了），但我想人类探求真相的本性必定会驱使我们去尝试探求现实本质的。

在《皇帝新脑》（The Emperor's New Mind）中，彭罗斯提出，一个正确的量子引力理论可能可以解决这个问题，因为坍缩可能是时空弯曲产生的一种引力效应：我自己的观点是，只要引入“显著”的时空弯曲，量子力学的线性叠加规则就会瞬间失效。多个可能出现的态的复振幅的叠加被一个按权重分配概率的实际态代替，而其中的一个态最终会真正出现。在《皇帝新脑》出版26年之后，彭罗斯出版了新书《时尚、信仰与幻想》（Fashion, Faith and Fantasy）。在新书中，他的观点并没有改变，但关于量子坍缩的机制，他在逻辑上做了一些修正。他如今认为，是引力在叠加态的各个成分中作用的程度不一样，才导致叠加态坍缩成其中一个可能的结果。从这个意义上说，引力场提供了某种“摩擦阻力”，导致了退相干（decoherence）的发生。“退相干”是德国理论物理学家迪特尔·策（Dieter Zeh）于1970年首次提出的概念，指叠加态的各个成分不再同步行进而导致叠加态消失的现象。所有的质能都会产生引力场，因此任何大小达到经典尺度的测量仪器都会累积足够的相互作用，确保坍缩的发生。而且，虽然纠缠叠加态可以在实验室中产生，甚至可以越过很长的距离传输，但它们仍然是很脆弱的，很容易就会被破坏。测量的结果在相互作用链的很早一端就已经被决定了，远远先于它传播到猫（或是格温妮丝·帕特洛）的时候。彭罗斯认为，引力诱导坍缩的时间尺度或许能允许实验很快捕捉到坍缩的过程。

基础理论中的（自旋网络）图中有一种局域性的概念：如果两个节点在图中相连，我们就称它们是相邻的。但在低能极限下（这种情况下节点变为坐标位置），图中还嵌入了另外一种局域性的概念：如果两个粒子（嵌在图中的两个节点处）在时空度规上是相近的，我们也称它们是相邻的。在圈量子引力理论中，节点（体积量子的位置）与演生时空中的位置或格点对应（通过上段引文中提到的“嵌入”这种方式）。如果这种对应是有序的，即在自旋网络中相连的相邻节点在演生空间中所对应的位置也是相邻的，我们就得到图24（a）中的规律晶格，粒子以“跳格子”的方式从一个位置跳往下一个位置，因此在时空中粒子要想跨越遥远的距离需要花费一定的时间，这解释了为什么光速是有限的。

这类非局域性的连接有没有可能就是最终的隐变量呢？我们称一对纠缠粒子由同一个波函数所描述的时候，它们会不会是通过背后的自旋网络中的一条连接相连的呢？在粒子沿着自旋泡沫传播并在时空中相互分离的时候，这样一条连接仍然存在。也许就是这样的连接，在我们观测到粒子A为“上”的时候，像穿过某种秘密通道一样在时空中迅速传递，让粒子B具有了“下”的状态。在我们为了粒子之间如何超光速跨越时空交流而想破脑袋的时候，它们其实在时空之下保持着因果联系。我们倾向于认为，在量子引力理论中，量子的性质和行为是第一位的，而时空和广义相对论是在低能近似（即低能极限）下演生出来的二级现象。换句话说，我们假设量子引力理论首先是一个量子理论。但如果我们将非局域性作为量子物体的一项基本特征或行为，那么从上面的讨论中我们可以看到，从某种意义上说，量子理论本身也是基于量子的性质和行为演生出来的二级理论。

圈量子引力理论向我们提示了一个非常激进的想法：有可能存在这么一个理论，一切都是从一套抽象的相互作用中演生出来的——不管是量子性质，是物质与辐射的行为，还是时空（即引力场），都是如此。马科普洛与斯莫林在2003年表明，背景无关的模型在同样的低能极限下导出非相对论性的量子理论以及时空是可能的，此后斯莫林还一直在沿着这一想法继续探究。

圈量子宇宙学表明，一种来自几何空间的量子本质的新的排斥力会发生作用，它强到足以与经典的引力相抗衡，不管质量有多大。正是这种力量阻止了奇点生成。



圈量子宇宙学告诉我们，我们的宇宙并不是来自一场爆炸，而是来自一场发生在138亿年前的反弹。虽然有些无神论者更喜欢“从无到有”的宇宙观，但我们今天所知的宇宙可能是从反弹之前已经存在的宇宙中产生的。那在大爆炸之前，宇宙又是什么呢？根据圈量子宇宙学的结论，答案是很明显的：我们的宇宙在诞生之前是另外一个宇宙，那个宇宙在一场大挤压中收缩，然后反弹到如今这个不断膨胀的阶段。而这又会不可避免地产生另一个问题：我们怎么才能知道此前的宇宙都发生过什么呢（真的发生过什么的话）？2007年的时候，博约·瓦尔德的回答是“不会太多”。他的结论是，此前的宇宙在压缩和反弹的过程中，所包含的信息绝大部分都已经丢失，甚至全部丢失了。他把这一现象称为“宇宙的健忘”（cosmic forgetfulness）。反弹前后的宇宙不可能相同，不仅结构和外观不同，而且物理定律和粒子种类可能不同。我们可以尽我们所能地观察，但永远都不可能了解任何反弹之前的情况。2008年，科里基和辛格提出，反弹之后产生的宇宙中的量子涨落跟之前的宇宙间有很强的联系，就好像“宇宙（几乎）完全记得之前的样子”一样。自2008年以来，进一步的研究支持了这一结论。从实际的角度看，反弹之前存在的宇宙跟今天我们见到的宇宙在各个方面都是相似的。在宇宙收缩到由普朗克密度定义的“瓶颈”时，宇宙中的一切物体都被加热到难以置信的高温，不过现在已经有一定的根据认为之前的宇宙中的定律和粒子仍然是我们所熟悉的。虽然它们可能会随着每一次反弹而稍微扭曲一点点，但谁知道呢？博约·瓦尔德仍然坚持他的原始观点，认为物质（而非时空）分布过程中的量子涨落会让宇宙“忘记”之前的经历。如今这一问题尚未解决，但据我所知，圈量子宇宙学界更倾向于认为宇宙会回忆起之前的情况，而非忘记。

在圈量子宇宙学中，从反弹过程中产生的宇宙经历了一个迅速的膨胀过程，理论物理学家称之为超暴胀（superinflation）。阿什特卡指出：“超暴胀在广义相对论中不可能发生，但在圈量子宇宙学中是必经过程。”2002年，博约·瓦尔德提出，超暴胀就是我们宇宙所需要的暴胀，它还能解释残留膨胀的过程，以及为什么我们今天观察到的宇宙学常数这么小。在近期的圈量子宇宙学模型中，超暴胀发生在反弹后的宇宙开始膨胀之时，当时的质能密度从 $\rho_c$ 降到了 $\rho_c/2$ 。但后来，理论物理学家意识到，超暴胀并不能替代标准 $\Lambda$ -CDM模型中的慢滚暴胀过程。它的持续时间不够长，不能产生所有需要的效应。单靠圈量子宇宙学无法解释我们宇宙的大尺度结构。这一事实令人很失望，物理学家别无选择，只能随大流地给圈量子宇宙学加上一个暴胀子场，其性质与如今标准的暴胀大爆炸模型中的暴胀子场相似。将暴胀与圈量子宇宙学结合起来，可能可以解决与平直性问题和视界问题相关的精细调节问题。不过，我在前文也提过，要想与暴胀结合起来，也要求圈量子宇宙学本身进行进一步的调节。暴胀后的宇宙结构极其依赖它在进入暴胀时的初始条件。就暴胀子场中量子涨落的本质而言，要想经历程度刚刚好的暴胀，最终得到我们宇宙中所观测到的恒星、星系、星系团和巨洞，其概率是极低的。

在圈量子宇宙学大反弹模型中，宇宙的起源点和初始条件的定义清晰得多，而反弹和超暴胀的物理学过程表明宇宙可以“像被漏斗导入一般进入一系列特定的初始条件，能保证它发生慢滚暴胀（并持续足够的时长）”。换句话说，宇宙被推入了“正确”的方向，沿着一条通往动态吸引子的轨迹，经历了足够长时间的慢滚暴胀，使其密度下降到比反弹瞬间的临界密度低11个数量级。不管我们在反弹的一瞬间具有的条件如何，吸引子的存在保证了宇宙最终多多少少变成了我们如今观察到的样子。尽管圈量子宇宙学不能帮助我们解释目前这个小的、正的宇宙学常数的起源，但它仍然能以跟标准大爆炸模型中同样的方式，用弗里德曼-勒梅特-罗伯逊-沃克（FLRW）度规来构造。引入宇宙学常数 $\Lambda$ 并不会影响与奇点、超暴胀和慢滚暴胀动力学相关的任何结论。

“时间冻结”难题当然没有消失。在原始的惠勒-德威特方程中，标度因子本身的大小被用来标记时间，但在圈量子宇宙学中，标度因子的表现是非线性的，意味着用它来标记时间不可行（我们的经验认为时间以均匀、线性的方式嘀嗒流逝，但圈量子宇宙学中的标度因子并不是这样的）。阿什特卡、帕夫洛夫斯基和辛格发现，他们需要引入一种新的无质量的场来演出时间，以标记宇宙演化中的事件。

让线穿过卡拉比-丘空间的不同的洞这已经不仅仅是在讨论不同的卡拉比-丘空间的数目（沙粒的个数）了，而是在讨论让线穿过各个洞有多少种不同的方式，继而能产生多少种不同的理论。这种穿针引线的方式决定了可能存在的超弦振动的本质，也决定了物理学常数、物理学定律，以及占多数的基本粒子种类。换句话说，每个可能存在的理论都对应着一种不同的宇宙。

瑞典裔美国宇宙学家马克斯·泰格马克（Max Tegmark）管这样的多重宇宙叫“II级多重宇宙”。在他的分级系统中，III级多重宇宙加入了量子力学的多世界诠释（格温妮丝·帕特洛的猫在一个宇宙中活着，在另一个宇宙中死了），而IV级多重宇宙则是所有可能的数学结构描述的多重宇宙。打个比方，这些弦论研究者像是先一意孤行地向着形而上学的卡律布狄斯旋涡驶去，然后弃船逃生了。最终得到的理论当然不可能是他们所希望得到的“万物理论”，而更像是个“任有理论”。

当物质掉入黑洞时，它的表面积会增加，因此我们会推断它的熵增加了。但它的温度其实降低了——这一结论看起来似乎荒诞不经，往黑洞里增加质量（能量）反倒让它温度更低了！这像是说，往火炉里添柴火，火炉反而变凉了。不只如此，更糟糕的情况出现了。如果黑洞发射出霍金辐射，从定义上来说，它就必须失去能量（即质量），而这会令它的表面积减小，这就与霍金先前得到的结论相悖。从结果而言，黑洞的熵减小于发射出的辐射的熵，因此总的熵是增加的，这并没有违反热力学第二定律。然而，随着黑洞熵减小，黑洞的温度会上升，从而进一步提高霍金辐射的发射速率。这一过程会产生雪崩效应，让黑洞最终“蒸发”，以一场爆炸的形式完全消失。

量子力学要求在每一个量子过程中，波函数里初始编码的所有信息在结束时必须守恒。我们可以把这条规则看成某种概率的守恒。系统可能会改变，信息可能会以不同的形式呈现，但它本身必须一直存在。因此，黑洞蒸发带来的这种不可找回的信息丢失违背了量子理论的基础和结构。这一悖论被称为黑洞信息悖论。虽然施特罗明格和瓦法的推导在数学上是可靠而强有力的，但它依赖于一类人为的所谓“极值”黑洞，其带的电荷产生的效应重要性不亚于质能产生的引力效应。然而，三维的极值黑洞的表面积原则上可以缩小到零，它所携带的熵（及其携带的一切含义）也会一同消失。在施特罗明格-瓦法推导中，唯一能阻止这一结果的方法是假设有一个额外维度（弦论要求隐藏6个额外维度，这里只隐藏5个），让这个多余的维度来保存熵。该推导还需要假设弦的作用强度精确为零，此外，所有弦论都需要借助超对称的假设。

圈量子引力理论为熵与面积提供了一种非常直接的联系：熵由系统可能拥有的不同量子态的总数的对数决定，而在圈量子引力理论中，自旋网络里的连接正与量子空间态有关，由面积量子决定，面积量子又反过来与普朗克长度的平方相关。在这一问题中，自旋网络的连接（面积）比节点（体积）更重要，因为连接能够“刺穿”黑洞的事件视界（即连接的一头会消失在视界的背后），每刺穿一次，就赋予视界一块由连接所带有的量子数决定的面积（见图27）。这样一来，只要计算给视界表面赋予一个给定面积的所有不同方式数目之和的对数，就能得到黑洞熵了，克拉斯诺夫称之为“几何熵”。

在某一特定的超弦理论中， $n$ 维时空描述的物理学过程等价于对其 $(n-1)$ 维边界应用超弦量子场论得出的结果。这一结果令弦论圈里的很多人激动不已。它意味着，包含量子引力的超弦理论等价于一个不包含引力的固定背景时空中的超对称量子场论。威滕随后证明，超弦理论中总体时空里的一个黑洞，就等价于其边界表面上的一群由基本粒子（如胶子等）组成的热“汤”。

任何传递到黑洞内部的信息都可以通过对应的二元量子场论描述来重新获得，它只是随着霍金辐射跑出来消散了，但并没有消失。不过，这一方法也有不少问题。马尔达塞纳的猜想中概括的对偶性所涉及的超弦理论存在于“反德西特空间”（*anti-de Sitter space*）中，德西特空间以荷兰物理学家威廉·德西特的名字命名。德西特在1917年给出了爱因斯坦引力场方程的一个解，这个解代表了一个不包含物质、时空呈指数膨胀的宇宙模型。我们可以认为这样的宇宙只包含暗能量，有一个正的宇宙学常数，因此其时空曲率为正。德西特空间中三角形的内角和超过180度，就像球面上的三角形一样。在反德西特空间中，宇宙学常数为负值，时空曲率是负的，因此该空间中的三角形内角和小于180度。这是一种双曲宇宙，其形状就像一座马鞍。将物质注入双曲宇宙中，弯曲的时空会把它从边界推向中心。因此，马尔达塞纳的猜想有时也被称为“AdS/CFT对偶”，其中的AdS代表反德西特空间，CFT代表共形场论（*conformal field theory*），这是一类特殊的量子场论。要承认的是，即使到如今，马尔达塞纳的猜想也还只是猜想。一种特定的超弦理论（我们并没有它成立的证据）与一种超对称的量子场论（我们也没有它成立的证据）之间的对偶，其本身就是未经证明的。

有没有可能，黑洞信息悖论只是广义相对论（其中时空是以连续的方式演生出来的）被应用在本质上是量子的空间中时人为带来的结果呢？也许它跟芝诺悖论没有什么两样，只是基于一些更奇特的物体，包裹了一层更奇异的语言而已。在圈量子引力理论中，我们仅仅假设不存在比一个面积量子更小的面积，也不存在一个比体积量子更小的体积（就好像量子力学要求不存在比单个光子更小的光量一样），奇点就乖乖消失了。圈量子宇宙学中的量子引力效应，尤其是导致大反弹的量子斥力，在时空曲率接近普朗克尺度的时候占据了主导，这一现象可能发生在宇宙半径缩小到普朗克长度的很久之前。这并不一定意味着黑洞不可能完全蒸发。它可能经历一个反弹过程。2014年，罗韦利和维多托（维多托如今在荷兰的奈梅亨大学工作）提出，或许黑洞并不会坍缩成核心的一个奇点，而是坍缩成一个所谓的普朗克星。如果一个质量等于太阳质量的黑洞坍缩成一个普朗克星，它的半径大约只有10-10厘米。这已经压缩得很厉害了——整个太阳的质量被压缩到比一个原子还小的体积里，但这个尺度比普朗克长度还要大30个数量级。随着黑洞蒸发，它可能会产生一个很长的“脖子”，这样或许就可以将所有的量子信息藏在视界内，防止其丢失。现在，黑洞周围就有了两个视界。在黑洞发出霍金辐射时，外面的事件视界会收缩，让黑洞最终蒸发。但同样的机制会让普朗克星内部的视界膨胀。最终，两个视界互相接触，在这个时候，未从事件视界辐射出来的剩余的信息可以逃脱。信息并没有从宇宙中永久消失，悖论解决了。

量子引力理论中无处不在的数学结构会不可避免地让我们得出这样的结论：时间是幻觉。我们不得不认为，它是一项演生出来的、相对的性质，由一系列有因果关系的时刻序列组装而成，就像电影一样：一系列静止的图像快速地从我们眼前闪过，让我们产生了画面在动的幻觉。

一切选择都有后果。要成为一个有远见的人，你可能就需要把船驶到非常接近卡律布狄斯旋涡（形而上学谬论）的地方。在这样的情况下，你最应该做的只有通过望远镜密切观察经验主义的岩石浅滩，并期待最好的结果。

存在其他的周期性宇宙学模型，可以既消除大爆炸奇点也不必引入暴胀。该理论基于M理论的膜之间的碰撞，认为碰撞产生的一小部分能量转化为热辐射，表现为我们认为的大爆炸，它无须暴胀就能让宇宙加速膨胀。膜与膜之间碰撞并反弹，但不会相距太远，因此它们仍然能受到彼此的引力。数万亿年后，膜再次碰撞，宇宙重启，进入下一周期。既然这一模型无须引入暴胀，也就不会有原初引力波了。

在圈量子宇宙学中，宇宙的母体是大反弹之前存在的一个坍缩的宇宙。而在宇宙学自然选择模型中，宇宙的母体是前一个宇宙中的黑洞，黑洞反弹后产生了宇宙。这样看来，一个“典型”的宇宙的母体，可能会产生很多个后代宇宙（因为宇宙中有很多黑洞）。就像地球上的生命是通过随机的基因突变和自然选择演化而来的一样，随着时间推移，宇宙也进入了一种自我持续的模式，以使产生的黑洞数量最大化。

如果在每个黑洞反弹的时候，其物理学定律都会随机地发生轻微突变（比如基本粒子的质量有微小的不同，或者作用力的强度有细微的差异），那么宇宙学自然选择会让新的宇宙不断产生，创造合适的条件让产生的黑洞数量最大化。而据我们所知，让产生的黑洞数量最大化，需要的条件正是如今这个宇宙的初始条件：能产生我们熟悉的基本粒子、原子、恒星、星系和主宰所有这一切的性质与行为的基本物理定律的初始条件。“还有一个意外收获：这个模型通过假设宇宙为产生尽可能多的黑洞而生，同时解释了为什么这个宇宙中会存在生命。”那么，为什么不跳过中间过程，直接演化出原初黑洞最多的宇宙呢？因为这样的宇宙太小了。通过恒星的引力坍缩产生黑洞的宇宙会大得多，因此可以产生更多的黑洞。这个猜测简直是异想天开，离卡律布狄斯旋涡已经很近了。这是另一种多宇宙理论。与永恒暴胀和弦论景观不同的是，在这一理论中，所有不同的宇宙都有相似的血统，它们都演化出了对生命友好的结构，因此我们无须诉诸人择原理。

或许对时间的真实性带来最大威胁的想法是斯莫林和昂格尔所说的“元定律困境”（meta-law dilemma）。如果大自然的定律会演化，这岂不是意味着有一个元定律在支配着它们的演化？否则，在大自然的定律被“锁死”之前，基本粒子和它们之间的相互作用力是怎么知道要怎么做呢？而如果存在这么一条大自然的元定律，我们又得思考了：为什么是这条元定律呢？

斯莫林的先例原则也需要某种机制，让过去的相互作用产生的结果能够被未来的相互作用所“采用”。“这就需要一种新的相互作用，”斯莫林写道，“让一个物理系统可以与自己在过去的拷贝相互作用。”在探索这样的机制如何作用的过程中，斯莫林发现了一种全新的非局域隐变量量子力学诠释，他称为“真实系统诠释”（real ensemble interpretation）。之所以叫这个名字，是因为这一诠释假设量子物体的态是真实的（并不只是已编码信息的表达式），而且这些态的实体会发生集体的相互作用，就像一组音乐家组成的合奏组[插图]一样。

动态格子中的点之间可能会有非局域性的连接，代表自旋网络的演生空间。一个被测量的氢原子就通过这样的非局域性连接与系统中的其他成员相连。复制再次在空间“之下”发生了。假设这类相互作用会发生，那么先例就会一次又一次地重复发生，这样我们就得到了量子统计分布。在卢西恩·哈迪（Lucien Hardy）、路易·马萨内斯（Llúís Masanes）和马库斯·米勒（Markus Müller）此前发表的想法基础上，斯莫林设想，元定律的运行或许驱动了这些重复的结果形成一组简单的“规则”，它们能将重复结果所需要的信息量降到最低程度。随着时间推移，这些规则稳定下来，成为主宰物质、辐射和时空性质及行为的定律。如果所有这些想法都是对的，那么，通过在实验室中创造奇异的量子态，我们就创造了一个完全没有先例的系统。大自然没有任何历史上的先例可以用来决定该做什么，而对这类态的任何测量结果都应该是完全无法预测的。然而，这样的实验会很难解释，因为如果仪器没有正确地设置好，也会产生无法预测的完全随机的结果。因此，经验丰富的实验科学家会选择重复测量，消除初始设置中一切可能出现的问题（他们通常还会寻找更可预测并且可重复的结果）。到这个时候，先例原理就已完成它的使命。不仅如此，时间的真实性还要求我们重新诠释广义相对论，因为在广义相对论中时间被物理形状的相对性代替了。如果时间是真实的，那么或许空间才是幻影，正如因果动态三角剖分和量子引力图论（quantum graphity）这些理论所认为的那样。这并不意味着斯莫林已经抛弃了他倾注了如此长的职业生涯的理论。这意味着，他把量子引力理论看作某种垫脚石，它并不会解决斯莫林认为与量子力学本质上的不完备性相关的深刻问题（因为它不能解决），它也不会某种极限下产生广义相对论（因为目前看来它还不能），除了在“盒子中的物理学”的情况下以外。这就是斯莫林所说的开放未来原理（principles of the open future）。“在寻求发展这门新的科学的过程中，我们会发现，成功与否是可以通过宇宙学的未来在何种程度上变成未来的宇宙学来衡量的。”

圈量子引力最非凡的一点是，如果你从哲学角度去思考——这正是卡洛和我倾向于做的事情，思考先于几何诞生的网络（几何从中演生出来）就是一种实现相对性、背景无关性和局域性的自然的妥协方案。圈量子引力理论和弦论在某些方面有紧密的关联。实际上，罗杰·彭罗斯提出自旋网络的最初动力，就是要用量子纠缠在相关性的背景下表达马赫原理——这清清楚楚地写在他关于自旋网络的原始手写笔记上。彭罗斯一开始的自旋几何定理，就预示着空间自纠缠中诞生的想法。用圈量子引力的语言表达这些想法，有很大的空间。

投诉

© 本文版权归作者 朱俊帆 所有，任何形式转载请联系作者。

2人阅读 编辑 | 设置 | 删除

有用 0

没用 0

赞赏

收藏

转发

回应   转发   收藏   赞赏



添加回应

☐ 转发到广播

加上去