·专题：量子力学的哲学探索·

编者按：

物理学哲学一直是科学哲学的正宗，维也纳学派的领袖石里克（Moritz Schlick）与柏林学派的创始人赖欣巴哈（Hans Reichenbach）都是物理学背景，物理学哲学至今也一直是分支科学哲学中最活跃的领域之一。在物理学哲学中，量子力学又是哲学讨论的永恒话题。但是相关哲学研究的要求又是最高的——必须懂得量子力学的科学细节。

本次专题的作者都有较好的物理学训练，他们的研究较能体现国内量子力学哲学的前沿。颜春玲的“圈量子引力的经验融贯”分析了圈量子引力以其协变或罗维利式的形式是否存在经验上的融贯性问题；栗钰杰和高山的“量子非定域性的逆向因果解释”探讨了逆向因果的可能性，为解决非定域性问题提供了新的路径；朱科夫的“物理理论的形式体系与诠释之辨析”对物理学中的诠释、形式体系、理论三个术语进行了更加清晰的界定和区分。希望本次量子力学的哲学探索专题，引起国内科学哲学家进一步深入探讨量子力学哲学。

（专题策划：王巍）

圈量子引力的经验融贯

The Empirical Coherence of Loop Quantum Gravity

颜春玲 /YAN Chunling

（中国科学院哲学研究所，北京，100190）
(The Institute of Philosophy in Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100190)

摘　要：人们通常认为圈量子引力和其他形式的量子引力理论面临着经验的（不）融贯性问题，因为基本的时空概念在量子引力的世界里消失了。处理这个问题的标准方案是找到一种方法来解释时空涌现。本文认为，圈量子引力，以其协变或罗维利式的形式，不存在经验上的（不）融贯性问题，因为该理论在本体论承诺上主张了过程本体论而不是实体本体论。过程本体论在经验上是融贯的。经验上的(不）融贯性问题和时空涌现的主张应该是两个不同的命题，即便它们关系密切。

关键词：时空　量子引力　本体论　时空涌现

Abstract: It is often believed that loop quantum gravity and other forms of quantum gravitational theories face a problem of empirical (in) coherence because of the disappearance of fundamental spacetime at the quantum gravitational level. The standard solution to this problem is to find a way to account for spacetime emergence. This

基金项目：中国博士后科学基金面上项目（项目编号：2022M713113）；中央高校基本科研业务费专项资金资助（项目编号：E2E40906）。
收稿日期：2022 年 6 月 15 日；**返修日期：**2024 年 3 月 14 日
作者简介：颜春玲（1991–）女，福建泉州人，中国科学院哲学研究所博士后，研究方向为物理学哲学和一般科学哲学。
Email: yanchunling@ucas.ac.cn

article argues that loop quantum gravity, in its covariant or Rovellian form, does not have a problem of empirical (in) coherence because the theory purports a process ontology rather than a substance ontology. Process ontology is an empirically coherent concept. The problem of empirical (in) coherence and the spacetime emergence claim are separated theses, even though they are closely related.

Key Words: Spacetime; Quantum gravity; Ontology; Spacetime emergence

中图分类号：O413; N031　　**文献标识码：**A　　DOI: 10.15994/j.1000–0763.2024.08.001

量子引力理论的经验（不）融贯性问题（以下简称“经验融贯问题”）的出现是因为该理论没有假定一个基本的时空概念。[1]作为最有发展前景的量子引力候选理论之一，圈量子引力（Loop quantum gravity，以下简称LQG），似乎面临着这个经验融贯问题。原因是我们的经验观察常常是关于位于时空点上的实体（substance）或“可存在量（beables）”，或者说是局域化（localization）的实体，但LQG的时空被几何地表述为自旋网络的组合连　通（combinatorial connectivity of the spin network），它并不与经验观察刻画的实体的局域化描述一一对应。换句话说，经典时空中的局域性和LQG中的局域性是不同的概念。为解决经验融贯问题，一般的主张是，LQG需要复现经典的时空特征以确保其经验上的融贯性。[2]–[5]这也就是时空涌现的主张。

本文聚焦在LQG的罗维利式（Rovellian）表述或者协变（covariant）表述，也被称为“自旋泡沫”（spinfoams）模型（以下简称“S-LQG”，以此和正则LQG（canonical LQG）作区分）。与一般的处理方法，即试图通过量子引力的各种理论中的涌现论来复现经典时空以解决经验融贯问题不同，本文认为S-LQG的经验融贯问题只是表面上的，而非真正的威胁，因为这种表述将时空区域视为过程，也就是说其本体是过程本体。[2]，[3]

一、LQG的表述

LQG有两种主要的形式：正则的和协变的。LQG的正则表述诞生于惠勒–德维特方程（the Wheeler-deWitt equation）的“圈”解的发现，即用阿什特卡变量（Ashtekar variables）重述的正则广义相对论（General Relativity，以下简称GR）的形式量子化。几何学的量子化是在这一理论中得出的，并产生了量子几何学的自旋网络描述。正则的表述再进一步分支为“对几何形式的求和（sum over geometries form）”，就像费曼一样，受到霍金等在70年代发展的欧几里得泛函积分表述的启发。（[6]，pp.22–23）赖森贝格尔（M. Reisenberger）和罗维利（C. Rovelli）引入了“自旋泡沫”来描述LQG的量子自旋网络态的演化史。这一想法导致了自旋泡沫模型的诞生。自旋泡沫代表一个“时空”，就像自旋网络代表一个“空间”一样。（[7]，p.184）值得注意的是，协变形式是由正则形式产生的，但它将自旋网络视为“初态”和“末态”，并且理论的动力学由它们之间的跃迁概率幅（transition probability amplitudes）W(s)决定，也就是采取对历史求和（sum-over-histories）的方法。（[7]，p.184）

经验融贯问题和时空涌现的主张经常在正则LQG的背景下被讨论，而非在其协变形式下。[5]本文关注协变式LQG或自旋泡沫模型，并将诺顿（J. Norton）对LQG的讨论拓展至经验融贯问题，同时表明经验融贯问题是建立在对经验观察的偏颇假设之上（即在一个实体论的（substantivalist）时空结构中的局域化）。[5]，[8]一旦我们认识到LQG的本体不是可存在量或实体，而是过程，那么经验融贯问题在S-LQG中也就不成立。鉴于这种过程本体在S-LQG中是明确的，但在其他量子引力理论或表述中不那么明显，本文结论将暂时限于S-LQG，向其他量子引力理论或表述的推广有待进一步考察。

二、经验融贯问题和时空涌现

经验融贯问题和时空涌现主张是两个分离但又相互关联的问题。在量子引力的层面上，马可普卢（F. Markopoulou）认为引力理论“从量子系统的基本微观理论开始，并没有提及时空几何”。（[9]，p.129）因此，鉴于经验观察往往以经典时空中的局域化形式出现，量子引力理论无法解释经验观察。这就是经验融贯问题。因此，似乎一个成功的量子引力理论会以某种方式复现出一个经典时空，或者说经典时空是从量子引力理论中涌现出的。这就是时空涌现的主张。但是，这个经典时空是什么呢？一种解释是将经典时空作为GR时空，这通常被认为是对时空的最佳描述。（[7]，p.11）

奥里蒂（D. Oriti）认为，“如果基本自由度不是通常意义上的时空，也就是说，它们不与光滑的时空流形相关联（作为GR的基本变量，时空度规（spacetime metric）），那么就会面临一个额外的挑战：证明时空连续体本身，以及相对的几何变量至少是作为理论所基于的更基本结构的有用近似出现的”。（[10]，p.186）这里的关键点是，时空在GR中被理解为一个连续的流形，但LQG离散化了这个连续的引力场。然而，经验融贯问题不在于引力场的连续特征（或连续与离散的划分），而在于引力场中实体的局域化，无论它被视为连续还是离散。经验融贯问题本质上并不涉及GR时空作为一个度规连续体的出现，而是关于LQG下的时空是否在经验上是融贯的，以及它必须付出什么样的本体论代价。

如要了解S-LQG如何避免经验融贯问题，那么需要澄清两件事。一是经验融贯是否需要建立在经典时空中的局域化的实体上。通常来说，经验证据是关于实体在时空点的局域化，并且当时空点上的实体具有因果效力时，它们就是具体的。为此我们需要假设：实体需要一个载体来支撑它们，而这个容器通常指的是经典时空。因此，S-LQG的经验融贯问题的核心是，经验的融贯性是否需要一个实体论的时空。这也就是诺顿提出的第一种意义上的实体论（substantivalism）。[5]诺顿认为，时空是物理物体和事件的实体论的载体（substantival container），因为存在一个真实的时空点流形。实际上，这与牛顿空间的描述相似，物体在其中局域化。在S-LQG中，时空不再被理解为一个载体，而是引力场的量子。LQG时空虽然继承了经典广义相对论的哈密顿表述中的关系演化的一些特征，但引入了新颖的几何学、自旋网络和自旋泡沫。S-LQG的时空是关于场的，而不是关于实体局域化的底层或载体的。（[11]，pp.235–236）

时空特征在一个理论中消失，似乎意味着时空特征没有被该理论的数学结构或几何所表征。这并不是一个强有力的论断，因为它并不意味着时空完全不存在。[8]针对这一问题，通常需要问LQG中实体论的时空是否从根本上消失，如果答案是肯定的，那么如何复现一个像实体论意义上的具有局域化性质的时空。一般的处理方式是接受实体论时空在LQG消失，并进一步论证该时空特征如何涌现。[2]–[4]

例如，林（V. Lam）和维特里希（C. Wüthrich）提出了一种功能主义（functionalism）的方法来解释包括LQG在内的量子引力理论中的经典时空的涌现。[3]正如诺顿所指出的，本体论问题和时空涌现问题是复杂的，因为对LQG的不同解释可能导致不同的答案，比如有些解释可能把时空当作基本的，有些则不是；或者有些是实体性的，有些是关系性的。[5]

此外，罗维利对时空涌现可能产生的原因有一个明确而直接的答案。在罗维利看来，存在着不同的时空概念。我们不应该把这些不同的概念混为一谈，因为它们是对实在的不同层级（levels of reality）的不同描述。因为有多层次的实在，所以主张有一个普遍的空间、时间或时空概念是错误的。我们更熟悉的时空概念，如牛顿时空或闵可夫斯基（H. Minkowski）时空是作为近似出现的。克劳瑟（K. Crowther）将近似描述为：忽略一些物理量，并证明这种忽略是合理的；或者在近似理论的态空间中选择一个适当的态的子集，并证明这种选择是合理的；或者同时采用上述两种方法，以便得出一个理论，其物理量的值仍然足够接近被近似的理论。（[7]，p.195）从LQG中涌现的时空

是GR时空，但GR时空仅仅是一种近似的、粗略的描述。另一种方法是考虑LQG和GR之间的极限关系，但这似乎不是一个简单的方法。这种方法的困难在于，我们不知道GR是如何作为LQG在低能端的极限情况出现的。这是一个概念上的问题，因为GR的时空是连续的，但LQG明确地离散化了连续的度规。

经验融贯问题依赖于两个主要的假设，即局域化假设和可存在量假设。但这两个假设都需要被修正或澄清，以便正确描述GR和LQG。

三、局域可存在量假设

LQG的时空并不对应于一般的局域性概念，即物体处于某些时空点上。根据林和维特里希的说法，在LQG中，自旋网络联络所代表的基本邻近关系不需要也一般不对应于标准GR意义上的时空、度规毗连（contiguity）：LQG层面的两个联络结点可能对应于GR时空中彼此任意远离（在GR度规意义上）的事件。[3]从这个角度看，基本的自旋网络联络不能直接用标准的时空术语来解释；最重要的是，它在LQG层面上并没有产生任何接近标准的局域化的概念，而这些概念在经验不融贯性的威胁下和局域化的论证中居于核心地位。[3]

然而，罗维利认为局域化可以是关系性的，比如位置被定义为实体或变量的相关性，而不是相对于时空中的固定点。这在经典GR中也是如此，当以哈密顿方式表述时，空间是一个动力学实体（dynamical entity），而“动力学实体（理论中的所有实体都是动力学的）是相对于彼此来实现局域化的”。（[12]，p.125）罗维利认为，我们通常的局域性概念是因为牛顿思想的根深蒂固，然而，在牛顿之前，我们关于局域性的认知是由亚里士多德或笛卡尔的毗连性充分论证的。从关系的角度来理解局域性实际上并不奇怪。在罗维利看来，LQG中的局域性就是毗邻性。这种局域性仅仅需要变量之间的相互作用或关系。

关系性的局域化概念实际上保证了LQG中的经验融贯性：在林和维特里希的功能主义中，“只要QG中的基本实体（在合适的情况下）发挥正确的功能作用，比如局域性的作用，经验确证（empirical confirmation）就会在QG的背景下以常规方式进行，经验融贯性不会受到威胁，因为时空不是理论基础本体的一部分。事实上，正是在时空的动力学性质中，这种功能主义的说法才得以实现。”（[3]，p.43）和罗维利一样，他们也认为GR的局域化是动力学的，也就是动力学实体之间的关系（relation）或关联（correlation），而不是相对于某种固定的、非动力学的时空背景的。

时空的动力学表明，在经典（GR）层面上已经对某些关键的时空特征采取了功能主义的理解——特别是时空局域性——从而具有功能涌现框架。这似乎意味着，对经验融贯性问题起着核心作用的局域性，实际上可以被理解为关系性的和动力学的，而不是实体位于固定的时空点上。例如，在对局域化的功能理解中，物理场F并不是真正相对于某个固定的时空背景而定位，而是“相对于其他动力学场而定位”，或“在动力学实体之间某些功能关系的意义上，编码了一个动力学和功能的局域概念”。（[3]，p.47）功能主义的说法是：引力场的某些标量函数承担了局域化的功能。LQG也实例化了实体之间的这种毗连关系。

在LQG中，“功能主义框架自然地解释了这样一个事实，即具有各种构型的（轻度的）无序的局域性的不同编织态（weave states）可以发挥相同的局域性作用：新的（且从根本上来说是局域的！）经验预测实际上可能来自这种（轻度的）无序的局域性”。（[3]，p.49）虽然功能主义的说法能在一定程度上挽救LQG的经验融贯问题，但是显然对于理解量子引力这样的基础理论不能令人满意。原因在于LQG作为（可能的）基础而非有效的理论，显然需要一种更加强有力的方法来满足经验融贯性的要求。本文的第四、五节正是提供了这样的一种方法。

可存在量假设与局域性假设有关，因为我们常常认为可存在量或实体是在时空中实现局域化的。莫德林（T. Maudlin）认为，可存在

量必须存在于某个地方。这一说法直接关系到是否存在一个具有基础时空特征的背景时空结构。[1]哈格特（N. Huggett）和维特里希从时空区域的可存在量的局域化角度提出了经验融贯问题。他们认为，我们所理解的经验科学是以贝尔所说的“局域可存在量”的存在为前提，其中“可存在量”是他们认为是实在的东西。（[2]，p.276）可存在量假设相当于一种实体本体论。如果描述可存在量的自由度与时空的一个开区域相关联，那么把它看作是局域化的就足够了。（[2]，pp.276–277）对时空的实体论解读，是将局域可存在量视作存在于时空的某处的前提。

但是S-LQG不仅没有提供一个实体论的时空，同时也没有关于可存在量存在的说法。在S-LQG的层面上，系统之间的量子相互作用的网络与邻近时空区域的网络是同一回事。[12]实在不是局域化可存在量，而是相互作用的事件。但是，奥尔多弗雷迪（A. Oldofredi）认为，局域可存在量与可观测量是相联系的，因为可存在量不仅包括我们在微观层面探测的实体，还包括我们在实验中熟悉的一般实体。[13]这其中的一个含义是，我们观察或测量的是位于某个时空点或区域的可观测物，因为经验内容似乎是由这种关于局域可存在量的经验构建的。

四、过程本体论

S-LQG提供了一种不同的本体论，即过程本体论。这实际上为理解经验融贯问题提供了一个不同的视角。经验证据可以用过程来刻画，而不是用经典时空的局域可存在量来描述。一旦我们认识到S-LQG的本体论是由过程来体现的，那么经验融贯问题就只是表面现象，其本身并不支持时空涌现的主张。在罗维利的框架中，“实体”被理解为相互之间的变量，作为过程和事件的发生。尽管罗维利对不同层级的实在描述的本体持有更温和的观点，因为他接受了关于空间和时间的多层次（multi-layer）观点，但如果S-LQG是正确的，它所包含的本体是一个过程本体，我们就会得到一个更统一的图景，即在经验世界和基础物理学所描述的世界之间没鸿沟。

LQG的经验融贯问题和一些量子力学的诠释面临的感知问题（the problem of perception）类似。感知问题最初是针对阿尔伯特（D. Albert）的波函数实在论的问题。波函数是在高维构型空间中定义的，这是理论中的基本空间，但经验证据是通过观察通常3维空间中的实体获得的。[14]因此，存在着从理论中复现观测证据的问题。原始本体论提供了一个解决办法。原始本体论主张基本空间就是3维空间，所有的本体论承诺都应在3维空间中声明。这是一种直观的方法，所以不难理解为什么有人试图复现经典的3维时空，以保证经验的融贯性。

然而，与量子力学不同的是，LQG为我们提供了在不复现经典时空的情况下保证经验融贯的方法。LQG为我们提供了一个新的本体论——过程本体论。过程本体是否能在量子力学中找到类似物是另一个问题，但它是S-LQG的一个明确结果。

更关键的是，这两个问题的区别在于：“量子力学把不确定性引入了在时空中运动的实体的时空性质，但时空本身却牢牢地留在原地，作为这些实体存在、运动和相互作用的舞台。借助于探测器，电子、光子和原子在时空中被观察和测量，从而记录下它们在空间和时间中的性质。”（[15]，p.3122）相反，LQG关注的是时空结构本身，并且这个结构本身不再是一个基本实体。在量子力学中，我们需要一个背景时空来进行测量，但在LQG中，时空本身就是测量的一部分。

要解决S-LQG中的经验融贯问题有两个步骤。（1）说明S-LQG中的时空是过程本体，而不是可存在量；（2）表明过程本体论在经验上是融贯的。关于（1）需要进一步回答两个问题：（i）S-LQG中的时空是什么？（ii）为什么S-LQG中的时空不能用来局域化可存在量？

S-LQG的几何诠释表明，空间的结构是由有限的圈织成的极细的编织态或网络组成的。这些圈网络被称为自旋网络。自旋网络代表了

引力场的量子态：空间的量子态；面积和体积都是离散的颗粒状空间（也就是说，面积和体积有离散的本征值）。（[6]，pp.14–16）这意味着空间不能被分割成任意小的部分。空间实际上不是由一个特定的自旋网络形成的，而是由所有可能的自旋网络的求和形成的。一个自旋网络的演化，或自旋泡沫，特征尺度约为普朗克长度，即大约10^{-35}米，与之相比更小的尺度是没有意义的。一个自旋泡沫表征了一个自旋网络的演化历史。因此，不仅是物质，而且空间本身，都具有原子化的结构。因此，S-LQG和协变场中的时空不能用可存在量的术语来理解，因为这些量子化的场不是存在于一个时空内，它们实际上构成了时空。

在数学上，S-LQG的方程以对给定边界的自旋泡沫的求和（sum over spinfoams）来表达一个过程的概率。通过这种方式，原则上可以计算出任何物理事件的概率。（[11]，p.227）罗维利认为，“LQG的量子态自然地坐落于4维区域的3维边界上”。（[12]，p.128）量子振幅与区域内发生的事情相关。直观地讲，它们可以被理解为在给定的边界数据下，所有可能的内部几何的路径积分。对于每一组边界数据，理论给出了一个振幅，它决定了这个过程相对于其他过程发生的概率。为了计算一个过程的概率，我们必须对边界里所有可能的、与该过程具有相同边界的自旋泡沫进行求和。

从形而上学角度来说，罗维利认为，“一个过程不在一个时空区域里：一个过程就是一个时空区域。一个态不是在空间的某个地方：它是对两个过程相互作用的方式的描述，或两个时空区域相互传递信息。反过来说，一个时空区域就是一个过程：因为它实际上是其边界之间可能发生的一切的费曼和”。（[6]，p.54）世界是关于对应于量子事件的物理变量之间的关系和相互作用，可以被概括为过程。物理变量或系统之间的相互作用和关系是S-LQG的核心。

事实上，对罗维利来说，量子理论并不描述量子态（波函数）的时间演化，而是描述与量子事件相对应的物理变量之间的关系或相关性。LQG表明，这种扩展和重述的后果是，物理世界的本体是由完全相互作用的量子动力学实体（即量子场）组成的，包括时空。其结果是，LQG迫使我们把物理世界看作是一个不断变化的物理相互作用、过程、事件的网络，其中不存在自存的（self-subsistent）个体“事物（thing）”或“物体（object）”发生性质变化并持续存在，因为一切都是作为事件发生或演化的动力学过程而存在”。（[16]，p.70）这些过程是动力学的。因此，过程即时空区域的想法并不神秘，也不是比喻或类比。

S-LQG呈现的是一种过程本体论，但在整个西方哲学史上（从前苏格拉底时期的希腊哲学家巴门尼德开始），实体本体论或可存在量本体论比过程本体论受到更多关注。在S-LQG中，“生成（becoming）”“事件发生（events happening）”和“持续的相互作用（ongoing interaction）”而非“存在（being）”才是实在的内容。（[12]，pp.123–124）而一个过程是指从一个相互作用到另一个相互作用的过程。（[11]，pp.144–145）尽管罗维利对过程与时空区域的认定似乎很新颖，但变量相互作用及其关系是基本物理学的基本结构这一主张却很成熟。事实上，卡拉马里（M. Calamari）主张在LQG中明确声明过程本体论。在他看来，从根本上说，物理世界是由一个永恒的“生成”定义的，这被理解为一个非时间性的、无止境的事件发生。（[16]，p.68）

但是，S-LQG中的过程在某些重要方面与一般的过程不同。S-LQG中的过程是非时间性的（atemporal），因为没有被赋予优先权的时间变量（也就是在基础物理世界没有时间方向），而只有物理变量的相互作用和相对演化。一般的过程似乎需要一个时间方向，例如人会长大衰老，而不会变年轻。时间方向经常被认为是热力学第二定律和熵的增加带来的结果。[17]此外，S-LQG所描述的过程是非因果的（acausal），因为因果关系需要时间方向，使得原因先于结果。在罗维利的观点中，即使没有时间，也有变化、生成和过程。变化不是指从t_1到t_2的性质变化，也不需要一个经历变

化的主体，而只是变量之间的相对演化。实体本体的动力学被描述为一个时空区域的变化，而过程本体本身是动力学的，它不需要对变化在时空中如何发生做出说明，因为过程即时空区域。此外，S-LQG过程是非机制的（non-mechanistic）。如果一个过程强调构成该过程中实体的活动和它们相互作用的时间，并且实体有合理的组织，那么该过程就是有机制的。[18]在S-LQG的过程中，重要的不是变量或系统如何以某种方式正确地组织，而是它们的关系和相互作用。

显然，现代物理学需要我们修改空间和时间概念，那么，它迫使我们接受新的本体论也就不足为奇。事实上，过程本体论并不新颖，但受到的支持却相对较少。从原子论者、亚里士多德到最近的量子力学中的原始本体论的倡导者，实体本体论受到传统本体论方法的青睐。但是，作为目前最具前瞻性的量子引力理论之一的LQG，是比GR、量子力学以及量子场论更基本的理论，它似乎需要我们改变对实体的态度。因此，如果要确保其经验上的融贯性，似乎需要用过程本体论来重新描述经验证据。

五、过程本体论的经验融贯性

经验融贯问题让我们误认为，LQG在经验上不融贯是因为基础时空特征在量子引力理论的层面上消失了。此外，实体本体论让我们误认为，使理论在经验上融贯的方法是通过复现熟悉的时空结构，即实体或可存在量的局域化。本文希望通过过程本体论来说明S-LQG的经验融贯性，原因是一个理论的经验融贯性不应该取决于一个涌现的理论、涌现的时空结构、近似的时空特征，或者该理论在极限情况下的表现。一个理论是否具有经验上的融贯性，取决于该理论自身的属性。虽然，本文并不否认存在其他使得GR时空可以被复现的原因（比如它在低能尺度是有效的），但经验融贯问题本身并不能确保经典时空结构的涌现。

经验融贯性可以用过程本体论的语言来刻画，也就是用变量之间的关系来描述经验证据。值得注意的是，LQG或其他量子引力理论缺乏直接的经验证据，所以经验融贯问题不是关于理论本身的经验证据。相反，该问题是关于该理论的本体是否是经验性的或者有经验蕴涵。换言之，与变量之间的关系和相互作用有关的过程本体是否是经验的。实际上，这个问题在量子纠缠中已经有答案了。

对纠缠的量子系统的测量所表现出的统计相关性不能以实体（例如电子）本身的属性来解释，因为该系统的组成部分的属性不独立于测量而存在。因此，被测量的相关性是一种相互作用的属性，而不是任何实体的属性。[19]这意味着，在量子纠缠案例中，两个类空分离的量子粒子，如两个电子，其自旋之间的统计相关性是产生谜题的原因。重要的是它们的关联性。经验内容涉及相关变量之间的相互作用和关系，比如两个电子的自旋，而不是实体在某个时空点的属性。虽然实体本体论者可能会试图论证将整个系统看成是一个整体的实体，并且将统计相关性看作是它表现出一种涌现的属性，但此举需要付出更大的本体论代价，因为这意味着我们需要将整个宇宙看成一个整体的实体。

从历史的角度看，量子力学的发展并不依赖时空描述来实现其经验上的融贯性。海森堡（W. Heisenberg）在1925年提出的矩阵力学是第一个完全抵制时空可视化的（spatiotemporal visualization）量子理论：它没有提供原子结构的时空描述，而只是说明了可观测量（例如光谱线的频率和强度）之间的关系。（[15]，p.3128）一方面，重要的是变量之间的关系。另一方面，这表明，尽管时空描述可能足以实现物理观测和经验融贯性，但它不是必要的。

然而，结构实在论者可能会认为，量子结构需要在时空中实现，以便成为具体的物理结构，而不是抽象的数学结构。[20]这种说法不完全正确。如果我们在实在的层面上有一个背景时空例如闵可夫斯基时空，物理关系需要在这个背景时空中被实例化（instantiated），那么它就是正确的。这种描述实在的方式在人们看来是熟悉的和直观的。但如果我们关注基础物

理的世界，也就是量子引力描绘的世界，那这种方式就错了。在这个层面上，时空结构的实例化变得毫无意义，因为时空也是关系性的结构。需要被实例化的结构和时空之间没有任何区别。

实体本体论与过程本体论的争论可归结于什么是更基础的本体。雷舍尔（N. Rescher）指出，现代物理学描述的是非常小的过程（量子现象）结合起来产生普通的宏观物体。也就是说，那些所谓持存的实体是统计波动中的稳定性的复合，即可变过程的稳定模式。[21] 这意味着，如果处于时空点的实体是经验融贯的，那么构成这些实体的过程也是经验融贯的。

结　　语

现代物理学已经颠覆了自亚里士多德以来贯穿西方哲学的实体本体论。过程本体论更适合用来刻画S-LQG，并且过程本体是一个经验上融贯的概念。本文并不主张经典时空在合适情况下不能被复现，而意在说明S-LQG不存在经验上的不融贯。经验融贯问题和时空涌现的主张并不像看上去那样紧密相连，应该对它们分别讨论。即使GR对普朗克尺度不适用，它可能仍然是涌现的和有效的。GR最重要的启示是引力场的微分同胚不变性（diffeomorphism invariance），因此寻求在量子引力的低能端保留微分同胚不变性也是被LQG主张者所认同的。（[7]，p.179）所以，GR时空仍然是LQG的重要主题。本文的目的是从本体论的角度去解决S-LQG的经验融贯问题，这是比从功能主义角度出发更强的观点，因为前者涉及对理论的本体的辩护。

[参 考 文 献]

[1] Maudlin, T. 'Completeness, Supervenience, and Ontology'[J]. *Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical*, 2007, 40: 3151–3171.

[2] Huggett, N., Wüthrich, C. 'Emergent Spacetime and Empirical (In)Coherence'[J]. *Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 2013, 44(3): 276–285.

[3] Lam, V., Wüthrich, C. 'Spacetime is as Spacetime Does'[J]. *Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 2018, 64: 39–51.

[4] Le Bihan, B. 'Spacetime Emergence in Quantum Gravity: Functionalism and the Hard Problem'[J]. *Synthese*, 2019, 199(Suppl 2): 371–393.

[5] Norton, J. 'Loop Quantum Ontology: Spacetime and Spin-networks'[J]. *Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 2020, 71: 14–25.

[6] Rovelli, C., Vidotto, F. *Covariant Loop Quantum Gravity: An Elementary Introduction to Quantum Gravity and Spinfoam Theory*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2015, 14–23.

[7] Crowther, K. *Effective Spacetime*[M]. Cham: Springer, 2018, 11–202.

[8] Norton, J. 'Incubating a Future Metaphysics: Quantum Gravity'[J]. *Synthese*, 2020, 197(5): 1961–1982.

[9] Markopoulou, F. 'New Directions in Background Independent Quantum Gravity'[A], Oriti, D. (Ed.) *Approaches to Quantum Gravity*[C], Cambridge: Cambridge: Cambridge University Press, 2009, 129–166.

[10] Oriti, D. 'Disappearance and Emergence of Space and Time in Quantum Gravity'[J]. *Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 2014, 46: 186–199.

[11] Rovelli, C. *Reality is Not What It Seems: The Journey to Quantum Gravity*[M]. London: Penguin, 2018, 1–145.

[12] Rovelli, C. 'Space and Time in Loop Quantum Gravity'[A], Huggett, N., Matsubara, K., Wüthrich, C. (Eds.) *Beyond Spacetime: The Foundations of Quantum Gravity*[C], Cambridge: Cambridge University Press, 2020, 117–132.

[13] Oldofredi, A. 'Beables, Primitive Ontology and Beyond: How Theories Meet the World'[A], Allori, V. (Ed.) *Quantum Mechanics and Fundamentality: Naturalizing Quantum Theory Between Scientific Realism and Ontological Indeterminacy*[C], Berlin: Springer, 2022, 97–111.

[14] Suárez, M. 'Bohmian Dispositions'[J]. *Synthese*, 2015, 192(10): 3203–3228.

[15] De Haro, S., De Regt, H. W. 'A Precipice Below Which Lies Absurdity? Theories Without a Spacetime and

Scientific Understanding'[J]. *Synthese*, 2020, 197(7): 3121–3149.

[16]Calamari, M. 'The Metaphysical Challenge of Loop Quantum Gravity'[J]. *Studies in History and Philosophy of Science Part A*, 2021, 86: 68–83.

[17]Rovelli, C. 'Agency in Physics'[EB/OL]. http://arxiv.org/abs/2007.05300. 2020–07–13.

[18]Glennan, S. *The New Mechanical Philosophy*[M]. Oxford: Oxford University Press, 2017.

[19]Rovelli, C. 'Agency in Physics'[EB/OL]. http://arxiv.org/abs/2007.05300. 2020–07–13.

[20]Lam, V., Esfeld, M. 'A Dilemma for the Emergence of Spacetime in Canonical Quantum Gravity'[J]. *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 2013, 44: 286–293.

[21]Rescher, N. *Process Philosophy: A Survey of Basic Issues*[M]. Pittsburgh: University of Pittsburgh Press, 2000.

[责任编辑　王巍　谭笑]

JDN