

衍生引力 / 量子引力： 宏观 / 微观时空理论

胡悲乐

(美国马里兰大学)

衍生引力的观点认为，时空不是自始至终都存在，而是在大于普朗克（Planck）尺度（ 10^{-33}cm ），低于普朗克能阶（ 10^{19}GeV ）或普朗克温度（ $T_{\text{Pl}}=10^{32}\text{K}$ ）的领域才呈现的；在此限定的条件下广义相对论才适用。在小于普朗克尺度，用更高的能量、更高分辨率去进行观察，时空微观结构才开始显现。探寻时空微观结构的理论是量子引力研究的任务。衍生引力的观点认为，广义相对论是只有在大尺度和低能阶范围内才适用的一个有效理论。在过去的 60 年间，许多引力研究工作者想通过将度规或联络量子化来实现这个目的，从衍生引力的哲学思维看来，这是不可能的，因为这些几何量是只适用在低于普朗克能量的宏观时空的集体变量。将它们量子化只能给出时空的声子，给不出时空的原子。当前描述时空微观结构的候选理论有 4、5 种（人们比较熟悉的是超弦（superstring）理论），它们还未能令人满意地推演出完全符合当今可观察到的宇宙宏观现象。衍生引力对主张任一此类微观结构理论的人提出的挑战是，能否完满地解释时空在什么条件下以什么机制呈现。要知道，这个（自上而下的）任务并非像通常猜想的或如同万物理论（Theory of Everything）所宣示的那么简单容易，因为有很多衍生现象并不能由某个微观理论给定的基本组分相互作用直接了当地推论演算出来。关键在于甄别衍生发展的条件、过程和机制。逆向（自下而上）则是量子引力的任务，即凭借我们所熟知的描述宏观时空的广义相对论和描述物质成分的量子场论去探寻时空微观结构的理论。这个任务看似极其困难甚至几乎是不可能实现，因为不但我们不知道且从低能阶我们也不容易看见时空的微观结构，而且还需要重拾丢失的信息，才能建构一个更为完整的理论^①。本文结尾提出：如果能找对问题和寻找到所需的工具，这并非完全没有希望。我们建议一条自下而上的途径，即在从给定的经典引力和量子场论的宏观条件到靠近微观与宏观交汇界面的这样一个区域中（衍生发生的区域）寻找时空微观结构的显著特征的线索和迹象。

一、引言：百年回顾浅略

1. 时空与物质关系

爱因斯坦方程左边是时空张量，右边是物质张量；它是场方程——能给出受物质支配的时空如何演化，同时它也是动力学方程——能描述在背景时空里物质的运动状态。爱因斯坦 1915 年发表的广义相对论提出时空与物质的互动交织，迄今这 100 年的演化也贯穿着两条主线：一是对量子化物质的探索，二是对时空或引力的理解。

2. 物质理论的探索

1925 年量子力学建立，结合狭义相对论，在 20 世纪 30~40 年代发展到量子场论。1949 年量子电力

学，1967 年电弱统一都是精彩的成功例子。另一主线是 1954 年由杨振宁和米尔斯（R.L.Mills）提出的规范场，可是还要等到 1974 年重整化证明后才被接受。从 1925 年起历时半世纪才奠定了量子场论与规范场在解释物质世界的牢固地位。

3. 引力理论的发展

虽然广义相对论诞生的比较早，但是到了 1950 年后才有比较集中对相对论的理论专题研究。我想一来是爱因斯坦的超颖，比理论物理其他领域的发展早了 40 年，二来是物理的主流发展侧重核子（因为二战）、粒子物理与原子、固体物理。接着 20 世纪 60 年代宇宙学探测（3K 微波背景辐射）和天文学观测（类星体、

脉冲星)带动了相对论宇宙学与相对论天体物理学诞生。过去 15 年在宇宙学观测更有多样丰硕的成果,包括前所未知的暗物质和暗能量。需要强调的是:至今依然没有观察结果明显地违背经典的广义相对论的推断。100 年前爱因斯坦提出的理论对大尺度时空的结构和运动依然适用。

单纯从如何理解描述时空理论角度着眼,切入本文主题,可以说有两个阶段的发展,也是相隔 40 年。以作者亲历的时段和接触的人说来,20 世纪 50 年代在美国接下爱因斯坦接力棒的主要有两位大师:雪城大学(Syracuse University)的伯格曼(Peter Bergmann)和普林斯顿大学的惠勒(John A. Wheeler)。

(1) 几何动力学

惠勒是 1955 年结束核物理研究,转向相对论研究的。他将爱因斯坦的观点终结为几何动力学(Geometrodynamics),因为哪怕没有物质,时空的非线性相互作用也能让它独立存在(例如 Geons)。1957 年间他领导的普林斯顿学派提出的《已经统一理论》,把时空的拓扑特性用以解释电磁效应;1971 年他还在普林斯顿大学举办克利福德(Clifford)发表物质为几何激发态论文 100 周年纪念,这可说是纯时空观点的极致,与当时粒子物理以物质为主导的观点成为鲜明的对比。值得一提的是,这跟 20 世纪 20 年代的卡鲁查-克莱茵(Kaluza-Klein)理论和 80 年代后期开始的超弦(superstring)理论有共通的理念。

(2) 几何流体动力学

跳跃 40 年,1995~1996 年是衍生(emergence)引力思维的起点。我的同事雅各布森(Ted Jacobson)在 1995 年从热力学出发推演出(1972 年贝肯斯坦(Bekenstein)推导黑洞熵的反演)爱因斯坦方程,把它视为态(state)方程。我从流体力学集体变量作为经历退相干后可持续性的变量,提出广义相对论的性质属于经典流体力学理论,描述的范围仅限于低能阶大尺度结构。相应于惠勒的几何动力学,我把这种观点叫做几何流体动力学(Geometrohydrodynamics 或 GHD),重点在于强调,可以用几何描述的时空是某种微观结构的长波段,低能量极限,亦即流体力学的极限。

加上流体这两个字,隐含着几层重要的寓意:

1) 流体力学基于分子动力学,是描述集体变量衍生的理论,不是描述基本组成结构(分子或原子)的理论。同样的,这种观点认为引力可能不是基本力,不同于其他三种基本粒子力,而是有效(effective)作用力。

2) 广义相对论只适用于经典大尺度时空。在小于普朗克尺度(10^{-33} cm)下,用几何语言(如流型)描述的时空观念不再适用,应该蜕变为很不一样的图像,如时空泡沫(spacetime foam)。

3) 对时空量子化的合理性会受到严厉的冲击。要了解这点的意义,得先说说究竟什么是量子引力。

4. 量子引力

由于量子化在描述微观世界——电子、原子、核子——的成功,让人不假思索地设定,要获取时空的微观结构,就将度规、联络视为算符,将广义相对论量子化。这在数学上是难度很高的课题。伯格曼在 20 世纪 50 代初期就开始了这个旅程,在他之前狄拉克(P. Dirac)也做过类似的和系统的尝试。60 年代的 Arnowitt, Deser, Misner 3+1 正则法, Wheeler-DeWitt 方程, 70 年代 Isham 和 Kuchar 的正则量子化, 80 年代 Ashtekar 变量;同时段,受规范场带动的泛函量子化,体现在如德威特(B. DeWitt)等人工作上,也有长足的发展,一直到今天的圈(loop)量子引力理论,这条路持续走了 60 年。

顺带一提的是:20 世纪 60~70 年代发展成形的弯曲时空量子场论是 1974 年霍金效应和 1981 年古斯(Guth)暴涨宇宙模型的理论基础。但是,有别于量子引力,时空依然保持经典,量子场在经典时空上运作,没有企图将时空量子化。从下面的解释,这样做反而是可容许的,甚至是唯一正确对待低于普朗克能阶的物理过程的做法。对应来看,认为将时空量子化就可以得到时空的微观结构,现在倒是一件值得反思,令人质疑的假设。这条在引力理论发展史上 60 年的主线,在基本概念层面上受到新的理念——衍生引力——的严重挑战。

5. 衍生引力

1967 年萨哈罗夫(A.D.Sakharov)提出引力是由

物质相互作用诱发生成的 (induced gravity), 可说是衍生引力观念的前身。上面提到我 1996 年的论文就是在他第二次国际纪念会上做的报告。1995~1996 年之前, 还有两篇引子: (a) 《宇宙学与“凝聚态”物理》(1988): 宇宙的相变、结构的形成、甚至“宇宙的诞生”等过程, 不仅由广义相对论与量子场论主导, 也遵循着一些在凝聚态物理中发现的法则。这些法则考量的对象大多属于衍生现象。(b) 《半经典(平均场)和随机(涨落)引力与介观物理学》(1994): 噪声与涨落在宇宙学和黑洞物理学的许多重要过程中都扮演了关键性的角色。时空的介观就是处于广义相对论描述的宏观理论及量子引力的微观理论之间。这些都属于衍生现象。

1996 年以后我有两篇延伸的论文: (c) 《由随机引力到量子引力》(1999): 探索如何利用包含量子场(高阶)关联所引起的度规涨落重构量子相干信息。(d) 《量子引力的分子动力学途径》(2002): 通过联系物质内部相关性与引力部分的相关性, 构建新的爱因斯坦-玻尔兹曼层级方程, 而爱因斯坦方程可以看作是这个层级中的最底层^②。

自 2005 年以来, 衍生这一观念因弦-引力-规范对偶性, 逐渐的被越来越多的弦理论 (Seiberg, Horowitz & Polchinsky) 粒子与核物理 (Shuryak) 领域中的研究人员所接受。在引力领域也被越来越多的年轻工作者所追随。专题讨论衍生引力的国际会议自 2007 年来也开了好几次。在凝聚态物理领域这一观念的早期支持者中, 最著名的当属沃洛维克 (G. Volovik) 和文小刚, 可以看看他们的专著。

二、素本与衍生

让我们暂时放下引力, 先来认识一下这里的中心思想, 也就是衍生现象的哲学意义, 如何区别于认为可以从某一基础理论推演得到解释一切自然现象的观点。我把前者叫做衍生 (emergent-effective) 观, 后者称为素本 (elemental-fundamental) 观。

1. 基础理论与有效理论

我用“素本”这两个字: “素”表达了不可再分、约的意思, “本”表达了原本、基础的意思。认为可以从某一基础理论推演建构得到解释一切自然现

象与规律, 这种哲学观是西方科学哲学的主导思想。推演建构, 从而得名为建构主义 (Constructivism)。相信有基本理论、基本粒子, 这种看法也叫作基本观 (Fundamentalism)。相信万物百态都可以归约到最原始的结构和运作, 这种想法也叫作归约观或还原论 (Reductionism)。理论物理追求的统一理论, 万物理论都是这种指导思想的驱动和体现。要注意: 知道了物质由原子组成, 离开能够解释万物百态还远。所以, 建构与规约不是单轨双向直通车。关键在于尺度放大后 (scaling), 粒子参与数加多后, 繁复度 (complexity) 增加, 就会在不同尺度下呈现新的结构和新的现象, 这是衍生现象的一种体现。物理学科的两大部分, 粒子物理与凝聚态物理所持的观点, 笼统讲来, 前者着力于追索基本素质, 后者要求了解衍生何来。(上面提到的主导思想在文献③中还有更多的介绍。)

基本观, 归一论也不是铁板一块。长期以来, 在量子场论群体里, 把重整化看成是划分能被接受的“物理的”和不能被接受的“非物理的”理论的标准。20 世纪 70 年代初, 温伯格 (S. Weinberg) 等提出有效场论的观点。指出从更高能阶、更具基础的理论推演得出的低能阶理论, 尽管不能完全重整化, 只要掌控到它足够小的误差度, 依然有它描述低能物理世界的价值。这样一来, 有效理论可以不需要还原到基础理论而有它独自存在的空间和意义。核子力对应于色动力学就是一个活例子。推广而言, 我们知道化学奠基基于原子或分子的相互作用, 所以也可以把化学看成是原子物理的有效理论。也容易理解到为何研究化学的人可以完全不学粒子物理还可以作出在化学里独特的贡献。

这里带出一个有意思的问题是: 衍生理论与有效理论差别何在? 下面我会解释衍生的内涵, 这里就浅显地说个大概。衍生理论是一种有效理论, 衍生的结构也是一种有效结构。可是, 有效理论可以不用涉及衍生, 有效结构不见得是衍生出来的。或许说, 有效理论的评断基于在什么能阶, 哪个尺度内有效, 没有要求采纳这个有效理论的人说出它是如何呈现, 由什么规律和法则衍生出来, 而保持相对的稳定性和特色。

生物界大多现象是衍生的，对比粒子物理的规则和概念，就可以看见问题本质上，甚至连提法上都可以很不一样。简单地说，有效理论说出静态表征，衍生理理论侧重的是动态演变。从 20 世纪 70 年代的有效理论到今天受普遍注目的衍生理理论也有了 40 年的光景。

2. 衍生现象

衍生 (Emergence) 并非一个怪僻的观点，它起源于生物学以及社会学，同时也普遍出现在凝聚态物理学中。事实上，相较于以还原论线性逻辑的观点所得到的构造而言，衍生现象在自然界中是更为常见的。还原论观点的一个极端的例子即所谓万物理论。按照这一理论，如果我们知道了最基本的构成（如弦、圈、集）及其相互作用，我们就能够推导出物理世界一切事物的结构和动力学。

在现实世界中，对于每个不同层面的构成元素及其相互作用模式，存在着控制其组织和演化的不同的衍生规律和法则。这是一种与还原论相反的论点。安德森 (P. Anderson) 在 1971 年的警句：“多即不同” (More is Different) 是针对当时物理思维几乎被粒子物理的哲学观全面覆盖时发出的呼喊。要知道，凝聚态物理学中的概念促进粒子物理学的发展已经是广为人知的事实，其中最为认可的例子是对称破缺的概念。

事实上，在我们理解物理世界的过程中，这两种观念总是同时存在的：例如一些在低能或者低分辨率情况下被看作“基本的”事物可能在随后的高能或者高分辨率的情况下被发现仅仅是合成物。尽管这两种观念在关注点和方法上有很大不同，但是它们在人类对大自然的理解和概念发展的过程中都起到了重要的作用。由已知的微观结构推论获得相应的宏观结构和动力学往往是容易的，例如由分子动力学得到流体力学。然而，相反的过程——例如由流体力学回到分子动力学——则难度较大。对于时空结构而言，前者对应于衍生引力的尝试和要求，而后者则对应于量子引力的努力目标。然而，请注意，即使我们已经掌握了精准的基础理论知识，获得低能情况下的衍生行为依然不是想象中的那么直截了当。

3. 可推知的和不易推知的衍生

为了理解衍生理论的特性和法则，我们首先需要从能否从逻辑上或者方法上由微观理论推导出的理论加以区分，或者至少区分不得不需要宏观系统的属性作为输入的理论。例如，由分子动力学得到流体力学以及由量子色动力学得到核物理学当属于前者。而由于人们仅能在观测到相关现象之后才能总结出有效的理论属于后者。分数量子霍尔效应的提出，是这类型理论很好的例子。在弦论和圈量子引力论重构低能世界物理的挑战中，也可以看到这一过程并非容易。有关衍生现象比较带哲学意味的讨论，可参看文献③。

三、 衍生引力与量子引力的双向关系

在各种不同理论框架下，关于量子引力的定义至少存在一个共识，它是寻求时空微结构的理论。其中流行达 60 年的一种观点认为时空微结构可借由广义相对论的量子化而获得。另一个极具挑战性观点则认为，广义相对论是一个低能阶的有效理论，作为某些未知的微观理论的集体或流体动力学变量的度规和联络在较短波长以及较高能量的情况下将会失去意义。按照这个观点，广义相对论不是量子引力的经典极限，而是量子引力的衍生；微结构理论与量子化广义相对论所得到的结构压根就不同。

从这个角度看，过去半个世纪人们致力于寻找量子化经典理论的方法在很大程度上是走错了方向，这么做并不能得到时空的微观理论。例如对原子晶体的振荡模态做量子化将会得到声子而非原子。探寻物质的原子结构并不能简单地通过对它的集体自由度做量子化获得，而必须采用完全不同的思路。我们将会讨论如下两种途径：（1）自上而下（上下在这里指的是能量尺度的大小）选定某些量子引力理论，通过研究其动力学行为与衍生过程，获得已知的宏观理论的特性，从而印证微观时空结构的准确性。（2）自下而上，借由广义相对论所描述的宏观时空和量子场论描述的物质成分去找寻微观结构，也就是量子引力的理论。

这两种途径的目标、方法、强调的重点和处理的方式都迥然不同。自下而上所面临的挑战在于从已知的宏观现象推断出微观结构，这不是件容易的事，因

为它需要重建丢失的信息。为了达到这个目的，非平衡统计力学的概念和方法，以及强关联多体系统的例子可能起到重要作用。但这并不是新的方法，它被物理学家所关注已经有几个世纪之久，然而迄今为止并未在量子引力领域引起足够的重视。

自上而下看似容易，从已知的微观理论推导出宏观理论是“万有理论”所采用的观点，其中包含了我们所熟悉的处理过程，如取经典物理极限、使用对应原理、或者诉诸有效场论等。但面对各种类型的衍生，上述处理过程也许不如想象中的直接可行。不过，我们可以从许多描述自然界衍生理论的特征来探寻衍生所需的潜在要素，进而理解与构建衍生的基本法则，并利用这些法则来描述衍生时空的条件、过程和动力学行为。这些就是衍生引力追随这条“自上而下”途径的新任务。

四、 衍生引力：从假定微观理论推演宏观现象

如果时空是一个衍生的客体，那么它的大尺度结构应当能够由其底层的微观构成及其相互作用推知，一如晶体或者凝聚态系统由原子构成。由微观结构所产生的宏观的集体行为和特性，例如弹性（将引力场对应于度规弹性），可以由优美的几何图像描述。然而在尺度接近或者小于原子的情况下，这一图像将会失效。在这类情况下，衍生引力的目标则类似于由分子动力学推导出流体运动方程和热力学定律。注意：我们这里解说的跟韦尔兰德（E. Verlinde）的所谓“熵引力”无任何关系。在④中我对此观点有点评。

1. 自上而下：从微观到宏观

时空是由高能阶底层结构的组元（组成元分）相互作用所显现的一种大尺度结构。即便相信弦、圈、自旋泡沫、单形等这些微观组元的可能性，我们仍需阐明宏观极限的存在性和如何由这些微观组分相互作用形成大尺度结构。这是任何量子引力候选理论都必须满足的准则。推导衍生行为的路线可能十分复杂曲折，但原则上是可行的。

由凝聚态物理中的很多例子知道，从微观动力学推导宏观行为常常不是件容易的事情：人们通常会遇到强关联系统中的非线性甚至非局域相互作用，需要想出一些独特的技巧确定相继的结构层级的总体变量

来简化分析。拿从分子到流体动力学的例子来说，就是在相继的不同复杂性层面上使用最大熵原理找到与中间尺度相应的动力学变量和动力学。

除了非线性，非局域性亦可以出现在每一层级的结构及动力学中，使得微观体系向宏观极限的过渡变得更为复杂，这就要求除了在单独一个层级上的线性过程推演之外，还需要多个层级上的新想法的注入。

上述的讨论都是基于演绎预测型的理论。值得注意的是，宏观表现也可以来自于微观结构的非演绎衍生行为。在这种情形下，从微观到宏观，由次结构到超结构都是不容易实现的，某些情况下甚至是不可能的。

2. 从既有的量子引力理论中衍生出何物

我们可以从 3 种时下流行的量子引力理论（时空的微观结构）候选者来审查上述关键问题。（a）安比约恩（J. Ambjorn）和罗（R. Loll）等人所寻求的因果动力学三角剖分方案（casual dynamical triangulation program）是比较符合直觉和容易操作的策略。Regge 的原始构想（Regge calculus 和 Regge-Ponsano calculus）是把时空的本质要素归化到其基本构件——单形（simplex）上，将时空的曲率置于单形的顶点。拼接这些单形会产生不同的时空结构，其中很多具有分形维数，而且大多数结构演化的时间很短就中断，只有少数能扩演到了我们生活的大宇宙。近来的一个可喜结果是出现了我们熟悉的四维时空。这个方案对观察宏观结构如何衍生是有用的，然而，对此方案我们可以提出的点评是，单形虽是很好的构筑元件，但从开始在单形身上已经注入了宏观时空的关键信息（曲率），真正的微观结构可能很不一样，还得继续往里探。（b）自旋泡沫理论是圈论的顶层结构，有丰富的数学内容，但我至今还未听到类似联络形式之类的宏观变量如何在量子化后即被认为是微观变量的合理解释（声波量子化后为声子，怎么可能变成原子？）。（c）对弦理论来说，AdS / CFT 对应及规范 - 引力对偶关系常被拿来作为衍生引力的范例。但这不算是一个真正的答案，人们需要看到的是规范理论和引力都从同一个更为基本的理论中衍生，大家假定这是 M 理论，但这始

终还是个愿望而已。要宣称实现了衍生，时空微观结构的候选理论至少要确认生成宏观时空的主要机制，同时又有可供区分的确定性质。

五、量子引力：探寻推论时空微观结构的理论

衍生引力的使命是从一个假拟的微观理论寻求它的宏观极限，它成功与否决定于能否与我们观察到的宇宙特性吻合。反向的历程，亦即从宏观结构推究、揣测微观结构，则因信息丢失而更加困难。通常我们掌握的只是从微观结构中粗略化以后得到的宏观特征。人们希望从残余焔化的信息中试图窥瞥到微观结构。任务是艰巨的。

1. 自下而上：从宏观到微观

在这个方向，我们将着眼于下面两个关键因素：

拓扑结构 因为他们对演化和环境变化有更强的保真和持久性。例如上面提到沃洛维克 (He^3 类似物，费米面) 和文小刚的工作 (弦网，光和费米子的衍生性)。

噪声涨落 涨落能够揭示一些子结构的内容和行为，例如从流体动力学的涨落中推演分子相互作用，或从系统相变的临界指数中发现系统的普遍类。这也是我 25 年来同时从事量子开放系统研究的一个原因。

2. 不同成分构建的集体态的共同特征

在物质结构和特性的描述中，有两个几乎垂直的视角：一个是看它的成分和相互作用的方式，另一个是根据其集体行为。如果我们把 QED-QCD-GUT-QG 链视作描绘基本成分的层次结构的垂直进程，那么有一个集体态的随机-统计-动力学-热力学/流体力学描述的水平进程。在由不同成分构成的但具有同一集体态的物质间存在相似性 (例如流体力学)。电子等离子体与夸克-胶子等离子体在很多宏观行为上类似。QCD 中的磁色流体力学本质上与麦克斯韦理论中的磁流体力学相同。在这个长波、碰撞主导的框架内，他们的行为都可以通过流体动力学定律来描述。尽管微观理论不同，但这些成分的流体动力学行为却是类似的。宏观流体动力学方程及其守恒律都基于微观物理的动力学和守恒定律 (如牛顿力学)，但就新的一组集体 (流体动力) 变量而言，这种描述宏观行为的新理论衍生而出，简洁而独特。

六、寓意、推论

1. 时空凝聚体

上面探讨的主线是在微观与宏观之际如何放置量子化这个问题。我的观点跟以前 60 年来奉行的法则认为将广义相对论量子化即可以得到时空的微结构在根本上不一样之处是，先找到微观物理量，再考虑这些变量的量子化。把“寻找微观动量”与“将宏观动量量子化”次序颠倒给出的是迥然两样的实质。如前所述，前者指的是原子，后者得到的是声子。声子在接近原子尺度时完全丧失意义。

这种想法并不是说考量时空宏观结构的量子特性是没意义的。下面我们将提出一种原创性比较强的理念。

我们现在来探索一下时空宏观结构的量子特性。上面说过，将时空微扰量子化得到的相当于声子的理论没多大意思。我们该着想的是，原子在大尺度下的量子效应：玻色-爱因斯坦凝聚体 (BEC) 才是我们想要的。凝聚体是符合我们上面提出的几何流体动力学 (GHD) 的新概念框架。2005 年我提出了一条探寻时空本质或找寻“时空的组成原子” (spacetime atom, 或 spatom) 的新途径。

首要问题是，时空是否可以被视作在低温条件下才可能形成的量子凝聚体？今天 3K 宇宙够冷，这么看还可以。但在接近普朗克温度，在高得不可想象的 $T_{\text{Pl}}=10^{32}\text{K}$ 时的时空是否依然是个凝聚体？我们认为。因为时空是在稍微低于普朗克能阶才呈现，衍生出来的就是凝聚体。这是一个完全非传统的想法，将它推向极致，将意味着宏观量子现象可以在今天的宇宙中被观测到。所面临的挑战是这种想法能否解决一些悬而未决的问题，例如，能否使得暗能量问题更容易被理解。同时也该注意到，不同于原子物理学中的 BEC，我们希望能够甚至在不了解什么是时空原子的情况下，也能够描述时空整体的显著特征。

非常规观点 1：所有亚普朗克物理是低温物理

我们相信已知的物理定律，即使回溯到大统一理论 (GUT) 和普朗克时代，甚至在普朗克温度 $T_{\text{Pl}}=10^{32}\text{K}$ 下都是适用的。由于时空结构在所有后普朗克时期仍然保留，如果我们把今天宇宙时空视为凝聚体，

它应该从普朗克时代起就一直如此。事实上，人们应该将这个概念推广到它的极限，只要所有物理过程发生所需的舞台——时空——保持光滑流型结构，所有我们已知的物理都是低温物理。根据我们目前对物理定律的理解，时空凝聚在低于普朗克温度 T_{Pl} 时开始发生。在这种意义下，时空物理本质上是低温流体动力学，今天我们经验到的物理现象都属于类似于超流体和 BEC 的超低温物理。

度规和联络形式是几何 – 流体动力学变量，大部分宏观引力现象可以被解释为深层的微观理论的集体模式和它们的激发：从弱场区域的引力波作为扰动到强场区域的黑洞作为非微扰解的孤子。在几何 – 流体动力学中甚至可能存在类似湍流的效应，随着数值技术和观测手段改善提高，这些效应可能会被预测和探测到。

非常规观点 2：时空是量子实体

将时空视为凝聚体的一个更为严酷的困难在于认识和辨别今天，而不是普朗克时代的时空的量子特征。传统观念认为时空在普朗克能标以下为经典，之上为量子。这正是寻求广义相对论的量子化方案的原则依据。以度规函数和联络形式的量子化为开始，我们尝试提出一个相反的观点，认为宇宙时空状态本质上是一个量子现象，在量子涨落和强关联效应不显著之前，在平均场意义上，用来描述其大尺度行为（有序参数场）的多体波函数（微观成分或时空“原子”）服从类经典方程，这与 BEC 中 Gross-Pitaevskii 方程相似，在描述 BEC 大尺度集体动力学上此方程已获得大量实验证明。

我们从这个视角提问，是否爱因斯坦方程描述时空量子流体的集体行为同 Gross-Pitaevskii 方程之于 BEC 有同样立足点？仅仅是在平均场水平上，多体波函数才服从经典描述？受 BEC 的启发，我们知道从涨落现象可以看见量子特征。

2. 宇宙是最宏观的量子现象

这种想法所面临的挑战是，如果宇宙的内禀是带有量子相干性的，那么从何处可以观察到时空的量子相干现象？我们再次从与 BEC 动力学的类比中寻找灵感，其中有用的例子并不少，例如，BEC 瓦解时粒

子的产生透露了它的量子本质。如果时空是量子体，真空能量密度将会无衰减地存在于今天的宇宙。这十年宇宙观测到的暗能量占据了整个预算的 0.7，对于传统观念中的经典时空来说，它的起源是很费解的。可是，在多数凝聚态系统中，集体激发具有同基态一样的能量量级，不会出现像粒子物理推论的 10^{-120} 这么大的差异。这是给时空作为凝聚体一个正面的支持。我们可以利用已被充分研究的超导和超流模型和丰富的实验结果探索时空作为凝聚体的线索。

无疑，这些非常规的观点需要思考去完善，需要时间去印证。（文献 ⑤ 有些背景介绍，如在不同环境下凝聚态的意义，这个想法能走多远，它的优缺点，以及对物理学基本原理和量子引力现有方案的启示。从这种观点去理解宇宙的起源，请参考⑥。）

七、结语：旧念新识、老题再问

本文的主体是时空结构和引力的本质（是基础？还是衍生？），但是贯穿主体的两条经脉是“经典/量子”和“宏观/微观”。这两条经脉存在于一切我们试图理解的物理现象的理念中。

总论

1. 量子引力更严谨的新定义：研究量子引力的途径至少有 4~5 条，有很多根本不同的看法。但是，各个学派能够同意归一的是：量子引力的任务是探寻时空微观结构的理论。

2. 引力理论研究者都会同意：广义相对论研究的是大尺度时空，度规和联络是宏观量。我们认为，度规和联络在微结构的普朗克尺度下会失去意义。相异于 60 年来奉行的法则，认为将广义相对论量子化即可以得到时空的微结构，我们持不同观点，认为时空的微结构不是将宏观量量子化即可得，时空的微结构理论不是将广义相对论量子化即达成。

3. 我们的看法：时空的微结构与大尺度时空的结构和运动的关系，类似于分子与流体的关系。后者是前者的低能阶，长波段极限。相对于时空微结构来说，广义相对论本质上属于流体力学，只有在比普朗克尺度大，比普朗克能阶低的领域，时空才可以用几何概念如流形结构来表述，也就是我们说的几何流体力学，只有在这种条件下度规和联络才有意义，他们同

属于流体力学变量。把他们量子化^{*}后，得到的类比于声子，根本不是以原子所代表的微结构。

4. 流体力学理论不是基本理论，是有效理论；如同核物理是色动力学的有效理论。我们讨论了有效理论与基础理论的关连，更重要的是基础理论与描述衍生现象的理论之不同：基础理论找寻的是素（粒子），探求的是本（质）。衍生现象探讨的是衍生的过程，呈现的机制。假如说找寻基础理论是为了返璞归真，百态追一，那么衍生现象要求的是如何见微知著，洞识事物的千姿百态。

5. 在“宏观/微观”与“经典/量子”这种视围框架下，我们可以明白衍生引力与量子引力，其实是探究时空宏观/微观结构的双向路径。指出衍生引力理论的任务是从微观结构推导、印证出宏观结构（从上到下），这种任务不如前人认为的简单。我们重新命定量子引力理论的任务，不是前人认为的将广义相对论量子化即可，是从宏观结构推敲、领悟出微观结构（从下到上）。这项任务可说是难于登天，因为无路可寻，无规可就。可是我想勉励年轻科研工作者不要气馁，要探的深，要走的远，不能急躁，更不能冒进。几百年理论物理走的路，面临的就是这样的挑战，可是我们还是克服了重重困难，层层障碍。这是理论物理吸引人的极致。

结语：量子与引力，物质与时空

本节题目“旧念新识”指的是引力、“老题再问”指的是量子。这是孕育 20 世纪物理的两条大河，可是 100 年来还是找不到它们的唐古拉山，共同的源头。本来应该是你中有我，我中有你的两个泥娃娃还是捏不到一起。

爱因斯坦在 1905~1915 年间在量子物理和引力理论都作出了划时代的贡献。有意思的是，哪怕他拿到的光电效应诺贝尔奖是量子理论的重要证据之一，爱因斯坦始终对量子的基础理论抱着怀疑态度，或者说，对当时的波函数解释，量子测量理论不愿轻易苟同。他这样的慎重态度是有原因的。从本文提出的若干命题，假如我们就量子的本质这条思路去想想，会让我们把问题看的更深。就拿其中之一为例：

提问

（3）量子化究竟是什么意思？与宏观到微观过

渡有何关系？

连带本文主题我再加上三点相关的问题，供我们一起继续反复思考：

（2）引力是基础力、还是有效力？

描述物质的力，一般认为是基础力，果真如此吗？

（1）时空能否脱离物质而独立存在？

不能，那我们可以从物质结构去探索时空状态。能，那就只能靠时空呈现前的几何（pre-geometry）形成的特性，加上拓扑性，甚至是点集或更朴素的概念去探究。

（0）描述时空及物质的物理定律是否亦属衍生？

某类定律只有在某特定条件下呈现，在某特定能阶及尺度才适用？

• 献给吴锦鋐教授 — 智者、贤人、良师、益友。他是我遇到的最有原则、最严以责己、而宽厚待人的人。他是传统中国与现代西方最好的品德和智慧的结合。他不占一丝、不多一言，只给尘世添加了一分无以名状的清静与光明。

• 本文部分内容取自 B. L. Hu,

① “Emergent /Quantum Gravity: Macro/Micro Structures Spacetime” in DICE 2008 September 22–26, 2008, Castiglione (Tuscany), Italy. *J. Phys. Conf. Ser.* 174 (2009) 012015. [arXiv:0903.0878]

呈蒙刘润球教授及他的同事们协助翻译并在短时间内完成，在此表示衷心感谢。

② “A Kinetic Theory Approach to Quantum Gravity” Invited talk given at the 6th Peyresq Physics Meeting, France, June 2001. *Int. J. Theor. Phys.* 41 (2002) 2111-2138 [arXiv:gr-qc/0204069v1]

③ “Emergence: Key Physical Issues for Deeper Philosophical Inquires” Invited talk, International Conference on Self-Organization and Emergence. November 10-13, 2011, Vienna, Austria. *J. Phys. Conf. Ser.* 361 (2012) 012003 [arXiv:1204.1077]

④ “Gravity and Nonequilibrium Thermodynamics of Classical Matter” *Int. J. Mod. Phys. D* 20:697-716 (2011) [arXiv:1010.5837v1]

⑤ “Can Spacetime be a Condensate?” *Int. J. Theor. Phys.* 44 (2005) 1785 [arXiv:gr-qc/0503067v2]

• 以上文章的文献表中有列出各门学派的论文，请参考原著。

⑥ “量子引力与宇宙起源”收录在《我们为何在此？》一书第八章（香港商务 2006）

* 经典流体量子化后是何物？50 年代以来，量子流体里所指的量子，是玻色子或费米子的特性，如 He^3 , He^4 ，主要是超流的特性，不一定考量到多粒子量子调协性（quantum coherence）。到 1995 年 BEC 在实验室造成后，配合量子信息研究，量子调协性作为量子的首要特征才被视为前台的主角。