

• 学术评论 •

超越时空实在：扭量纲领
——评曹天予“扭量，上同调，物理学的基础”

Beyond Spacetime Reality: The Twistor Programme:
Review of Cao Tianyu's "Twistor, Cohomology, Foundations of Physics"

杨刚 / YANG Gang

(中国科学院理论物理研究所, 北京, 100190)
(Institute of Theoretical Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100190)

摘要: 曹天予在其2025年发表的纲领性论文“扭量，上同调，物理学的基础”中，提出以彭罗斯的扭量理论作为解决广义相对论与量子理论冲突的基础框架。该文从历史与概念层面论证“自旋”是比量子假说更根本的物理实在，并指出扭量理论因以自旋为其内禀属性来构建，因而本质上是一个“内禀量子”的理论，无需额外量子化过程。这一思想为调和引力与量子的矛盾提供了全新的哲学路径。本文将对曹天予的核心观点进行评析，首先考察现代物理学基础面临的困境，进而对扭量理论进行基本介绍，阐明其不同于传统时空的革命性特点，最终聚焦于对曹天予“内禀量子性”这一核心论点的审视与探讨。

关键词: 扭量理论 物理学基础框架 量子引力 自旋 上同调

Abstract: In his 2025 programmatic paper, "Twistor, Cohomology, Foundations of Physics", Tianyu Cao proposes twistor theory as a new foundation for resolving the fundamental conflict between general relativity and quantum theory. Arguing that spin is more fundamental than the quantum hypothesis, Cao posits that twistor theory is intrinsically quantum due to its built-in spinorial structure, requiring no external quantization. This perspective offers a novel philosophical avenue for dissolving the contradiction between gravity and the quantum theory. This article examines Cao's core arguments by reviewing the challenges in modern physics foundations, followed by a basic introduction to twistor theory that elucidates its revolutionary departure from conventional spacetime concepts, and finally focusing on a critical examination and exploration of Cao's core claim that twistor theory is intrinsically quantum.

Key Words: Twistor theory; Fundamental framework of physics; Quantum gravity; Spin; Cohomology

中图分类号: G256.4; O56 DOI: 10.15994/j.1000-0763.2026.03.014 CSTR: 32281.14.jdn.2026.03.014

一、导言：超越时空的物理学

从牛顿到爱因斯坦，物理学一直将“时空”

视为宇宙万物演化的终极舞台。无论是宏观的星体运动还是微观的基本粒子碰撞，都发生在这个由三个空间维度和一个时间维度构成的连续流形上。然而，一个深刻的问题始终萦绕在

基金项目：国家自然科学基金项目“量子场论和量子引力”（项目编号：12425504）。

收稿日期：2025年11月15日

作者简介：杨刚（1982-）男，江苏灌云人，中国科学院理论物理研究所研究员，研究方向为量子场论和量子引力。Email: yangg@itp.ac.cn

理论物理学家们的心头：时空本身，真的是宇宙最基本的实在吗？

扭量理论（Twistor theory）对此给出了一个颠覆性的回答：并非如此。在扭量理论的图景中，我们所熟知的四维时空并非宇宙的基石，而仅仅是一种派生出的、次要的结构。那个更为基本、更为深刻的实在，是一个由复数构成的抽象数学空间——扭量空间。

推翻传统的时空图景并非单纯的遐想，而是物理学发展至今的迫切需求。二十世纪物理学的两大支柱是量子力学和广义相对论。前者奠定了理解微观世界的基础，其巅峰之作——粒子物理的标准模型——在解释自然界的电磁、强、弱三种基本相互作用以及基本粒子的构成方面取得了巨大的成功。爱因斯坦的广义相对论则提供了描述引力的时空几何框架。近年来的若干关键实验，从大型强子对撞机上发现希格斯粒子，到LIGO实验探测到黑洞并合的引力波，无不精准地验证了这些理论的预言。然而，当人们进一步探求统一量子力学和广义相对论，进而为自然界的四种基本相互作用提供一个统一的图景时，便遇到了极大的障碍。比如，传统框架下对引力进行量子化会遇到不可重整性问题。这一疑难至今仍制约着物理学家对于黑洞性质和宇宙起源等一些基本问题的理解，是21世纪理论物理学中最根本性的疑难和挑战。这一困难不仅是在技术层面，更涉及底层基本框架的问题：传统时空框架已表现出明显的局限性，物理学的突破很可能需要一场范式革命。

在寻求量子引力新范式的道路上，两个最有影响力的理论是弦理论和圈量子引力理论。弦理论将基本粒子视为微小的一维弦的不同振动模式，其目标是在更高维度的时空中统一包括引力在内的所有基本力与物质。圈量子引力则具有背景无关性，将时空本身量子化为离散的自旋网络。尽管两者都极具革命性，但它们在思想根源上仍未完全脱离我们熟悉的“时空”舞台。而扭量理论则走得更为彻底：它提供一个全新的几何图景，在其中，传统的闵氏时空仅仅作为其衍生物而出现。^[1]当然，这些理论

本身都已有数十年的研究历史，各自也都存在自己的局限和困难，所以至今对于量子引力问题依然没有公认的完美答案。

近年来，扭量理论在规范场的研究中扮演了重要的角色。特别是2003年威滕（Edward Witten）将其与弦理论结合，^[2]发展出扭量弦理论，极大简化了规范场散射振幅的计算。自此开始，扭量方法逐渐成为理论物理前沿研究的重要工具，也使得物理学界开始重新审视其作为基础理论的潜力。

正是在这一历史背景下，著名科学哲学与物理学史专家曹天予先生发表了其纲领性的长文“扭量，上同调，物理学的基础”。^[3]这篇文章远不止是对扭量理论的介绍，更包含了他对于物理学基础框架的长期思考——这与其经典著作《二十世纪场论的概念发展》一脉相承。曹天予明确主张，扭量理论不仅是一个强大的数学工具，它更提供了一个足以替代传统时空观的、全新的21世纪物理学基础框架。

扭量框架的魅力，根植于其两大革命性特征。其一，是内禀的非定域性（non-locality）。扭量空间中的一个“点”对应着贯穿整个时空的一条光线，有可能从根本上消解了传统量子场论中因点状相互作用而产生的紫外发散困难。其二，是其深刻的复数结构与全域性，它为描述物理场提供了惊人简洁的数学语言，将复杂的动力学方程编码为纯粹的复解析性质。

曹天予在回顾这些基本设定的基础上，提出了一个更为大胆的论断：扭量理论是一个内禀量子理论。他认为，物理学的“量子性”根源并非神秘的普朗克常数，而是更为基本的自旋（spin）。既然扭量理论从根基上便是由自旋（更准确地说是旋量（spinor））构建的，那么它天然就是量子的。这一论断无疑极不平凡，它试图从根本上改写我们对“量子”起源的理解。本文将在回顾扭量理论基本图像的基础上，对曹天予这一核心论点进行解读与探讨，以期揭示其对物理学基础和科学哲学的深刻启示。

二、物理学的基础框架和扭量的新时空观

物理学作为自然哲学的现代表现形式,其终极目标是洞察世界最底层的规律。这些规律并非杂乱无章,而是构建在一个深刻的逻辑基础之上。曹天予借用并发展了爱因斯坦的“基础框架”(F-frame)概念,^[4]来描绘这一基础的蓝图。我们可以将F-frame理解为一部物理理论的“宪法”。正如曹天予所言,它由“一个数学形式体系”“基本的物理实体”“动力学关系”等要素构成。可以说,这部“宪法”不仅规定了物理理论的基本语法,更界定了何为“实在”。

在二十世纪物理学的基础框架中,其核心可以概括为一条清晰的逻辑链:

时空→物理实体(场)→动力学(方程)

时空是预设的舞台,场是在舞台上表演的主角,而场方程则是规定其行为的剧本。这一框架孕育了广义相对论和标准模型,取得了辉煌的成功。

然而,这一基础框架的内在局限也日益显现。当试图用它来统一引力与量子时,我们发现其基本条款——连续的时空舞台、定域的相互作用——导致了不可调和的矛盾,例如,不可重整性和时空奇点。这表明,我们面临的并非技术性难题,而是“宪法危机”。正如曹天予所强调,对框架的修补已无济于事,物理学的发展正呼唤着一部全新的基础框架。

在寻求新“宪法”的探索中,扭量理论提供了一个激进的候选方案。它并非修改旧条款,而是彻底重写了物理学最底层的语法。传统框架的逻辑链被一组全新的概念所取代:

扭量空间→上同调→解析性

在这套新语法中,我们熟悉的时空降格为派生概念,物理实体被非定域的数学对象上同调(Cohomology)所取代,而复杂的动力学则被编码进复解析性之中。每一次基础框架的变革都伴随着对物理学理解的认知飞跃,扭量理论所启示的,正是一条通往解决量子引力疑难的全新道路。

尽管彭罗斯在20世纪60年代创立该理论的初衷是为了解决量子引力,但很长一段时间

其受到主要关注的反而是纯数学领域。这一局面的改变出现在2003年——威滕的开创性工作首次将扭量和弦理论联系起来,提出了以扭量为靶空间的扭量弦理论。困扰物理学家多年的规范场散射振幅的计算,在扭量空间中竟呈现出惊人的简洁性。传统费曼图方法中爆炸性增长的复杂性,在扭量语言下被优雅地化解。这一突破启示:我们所熟知的时空和定域相互作用,或许真的只是一个“表象”,而当我们视角切换到更基本的扭量空间时,一些物理规律和结果会变得更加和谐与简洁。这一“扭量复兴”的历史背景为曹天予提出其纲领性主张提供了全新动机和物理基础。

那么,这个颠覆我们时空观的扭量世界,其基本图像究竟是怎样的?要真正理解曹天予的核心论点,我们必须首先深入其内部,领略其独特的几何与物理。

三、扭量世界观(I):重塑时空本体论

扭量理论是由诺贝尔奖得主彭罗斯(Roger Penrose)于20世纪60年代创立的。其核心思想是:存在一个比我们熟知的时空更为基本的“扭量空间”——这是一个以光线为基本实体、并由复数描述的抽象数学空间。^[1]本章我们将重点澄清闵氏时空与扭量空间之间的关系。

1. 本体论的颠覆:从“点”到“光线”

扭量理论对传统物理学的挑战,首先是一场深刻的本体论革命。它诘问了一个我们习以为常的信念:构成世界的基本“积木”,真的是时空中的“点”吗?

理解扭量理论的第一步,就是要接受一个反直觉的观念上的颠倒,这一观念的反转彻底重构了“点”与“线”在本体论上的基本地位。

在传统的闵氏时空图景中,时空中的一个“点”是最基本的元素,而一条“光线”是由无数个点构成的轨迹。而在扭量空间的图景中,这一角色关系发生了彻底的反转:一个扭量空间中的点,对应于传统时空中的一条“光线”。进一步,传统时空中的一个“点”在扭量空间中反而成了一个轨迹,它对应着扭量空间中所

有“穿过该点的光线”的点的集合。这些点在扭量空间中构成一个复射影直线 \mathbb{CP}^1 ，在几何上等价于一个“黎曼球面”。

这个对偶关系可以总结为：

时空中的一个点 \leftrightarrow 扭量空间中的一个球面
 时空中的一条光线 \leftrightarrow 扭量空间中的一个点

如图1所示，这一对应也称为克莱因对应（Klein correspondence）。

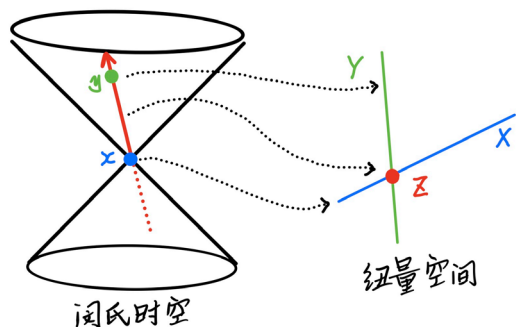


图1 克莱因对应。闵氏时空的光线对应于扭量空间的点，闵氏时空的点对应到扭量空间的复射影直线（ \mathbb{CP}^1 ，等价于黎曼球面）。

这个关系的核心特征是具有“非定域性”。扭量空间中的一个点，包含了贯穿整个时空的一整条光线的全部信息，而不是时空某个局部点的信息。这与传统物理学中“点对点”的定域性描述形成了鲜明对比。

2. 入射关系：连接两个世界的桥梁

这两个截然不同的几何世界是如何定量地联系起来的呢？答案是一个被称为“入射关系”（Incidence relation）的数学方程。

一个扭量 Z 具有四个复分量：

$$(Z^0, Z^1, Z^2, Z^3) \sim c(Z^0, Z^1, Z^2, Z^3), \quad (1)$$

其中整体系数 c 是一个任意非零复数。这表明扭量 Z 在数学上是复射影空间 \mathbb{CP}^3 的一个元素。另一方面，时空坐标 $x^\mu = (t, x, y, z)$ 表示闵氏空间的一个点。扭量空间与闵可夫斯基时空通过如下的“入射关系”关联：

$$\begin{pmatrix} Z^0 \\ Z^1 \end{pmatrix} = \frac{i}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} t+z & x+iy \\ x-iy & t-z \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Z^2 \\ Z^3 \end{pmatrix}. \quad (2)$$

扭量通常也可以表示为两个（二分量）旋量

$$Z^\alpha = (\omega^A, \pi_{A'}), \quad A, A' = 1, 2. \quad (3)$$

入射关系可以简化为：

$$\omega^A = ix^{AA'} \pi_{A'}. \quad (4)$$

其中 $x^{AA'}$ 是时空坐标 x^μ 对应的 2×2 厄米矩阵，即方程(2)中的矩阵。这个方程的几何意义是：它约束了时空点 x^μ 必须“位于”由扭量 Z 所代表的光线上。

表征扭量性质的一个重要几何量是它的“范数”（Norm）：

$$Z \cdot \bar{Z} = Z^\alpha \bar{Z}_\alpha, \quad (5)$$

其中共轭扭量 \bar{Z} 定义为

$$(\bar{Z}_0, \bar{Z}_1, \bar{Z}_2, \bar{Z}_3) = (\overline{Z^2}, \overline{Z^3}, \overline{Z^0}, \overline{Z^1}). \quad (6)$$

只有当扭量 Z 范数为零时：

$$Z \cdot \bar{Z} = 0, \quad (7)$$

入射关系才对应物理（实坐标）的 x^μ 。满足该条件的扭量被称为“零扭量”。它们构成的空间被记为 \mathbb{PN} ，这是一个5维的实空间。一般具有非零范数的扭量空间记为 \mathbb{PT} （实6维空间）。

这样我们就给出了一个精确的对应：闵氏时空中的光线，恰好对应于扭量空间中所有零扭量的集合。从维数上可以分析验证，四维闵氏时空的光线集合构成一个五维空间，而零扭量空间也具有五个自由度（作为三维复流形，射影空间 \mathbb{CP}^3 有六个自由度，而零扭量条件作为一个实约束，消去了一个自由度，所以剩余五个自由度）。

忽略如上的技术细节，这里的核心图景是，传统时空和扭量空间相比，二者有极大的差别。特别是二者的对应关系完全是非定域的。

值得补充的是，扭量空间虽然也可以推广到一般的时空维数，但只有在时空是四维情形才是最特殊的；这一点和弦论等额外维理论有明显的差异。因为只有四维时空点所对应的天球（celestial sphere）——即穿过该点的所有光线所构成的扭量集合——才是黎曼球，具有优美的复结构，进而可以给出后面提到的彭罗斯变换等优美的性质。

四、扭量世界观（II）： 以复数几何重写物理定律

我们之前的描述仅限于纯粹的几何图像。这一章中,我们进一步介绍扭量空间中如何描述物理场及其动力学。我们将看到复流形结构在构造物理场所展现的威力。

1. 从几何到物理:引入螺旋度

现实世界中的无质量粒子,不仅携带动量,还具有螺旋度(Helicity),后者可以理解为自旋在运动方向上的投影。如光子自旋为1,螺旋度可以有+1和-1,分别对应左旋和右旋光子。

扭量理论将粒子的螺旋度直接编码进了扭量空间的几何结构之中。扭量的“范数”是一个基本的几何不变量,其物理意义正是粒子的螺旋度 s :

$$s = \frac{1}{2} Z \cdot \bar{Z}. \quad (8)$$

一个携带非零螺旋度的物理粒子,对应一个范数非零的扭量,即 $Z \cdot \bar{Z} \neq 0$ 。整个扭量空间 \mathbb{PT} 也因此被赋予了物理意义,其被 \mathbb{PN} 分为两半: \mathbb{PT}^+ (对应正螺旋度粒子)和 \mathbb{PT}^- (对应负螺旋度粒子)。

在这个图像下,扭量的两个二分量旋量分别可以被赋予明确的物理意义:旋量 π 承载了粒子的动量信息,而 ω 则编码了极化矢量信息。极化矢量携带的量子数就是螺旋度。比如,自旋(Spin)为1的光子具有两种螺旋度:+1和-1。

将螺旋度写入几何,不仅赋予了扭量物理意义,也为自旋提供了一幅全新的、令人惊叹的几何图像。当一个扭量携带螺旋度(即范数非零)时,它在实数时空中的对应物不再是一条简单的线。通过复杂的几何投影,我们得到一个被称为“罗宾逊线汇”(Robinson congruence)^[5]的非定域几何结构。它相当于一个遍布整个空间、以特定方式扭曲的光线族,如图2所示。物理上,它对应到一个具有自旋 s 的无质量粒子态。这个具有“扭转”(twist)形态的几何图像,也正是彭罗斯创造“扭量”(Twistor)一词的灵感来源。

这一对应为我们理解“自旋”这个概念提供了一幅全新的图像。要知道在传统定域时空框架中,自旋是很难理解的一个概念。如果粒

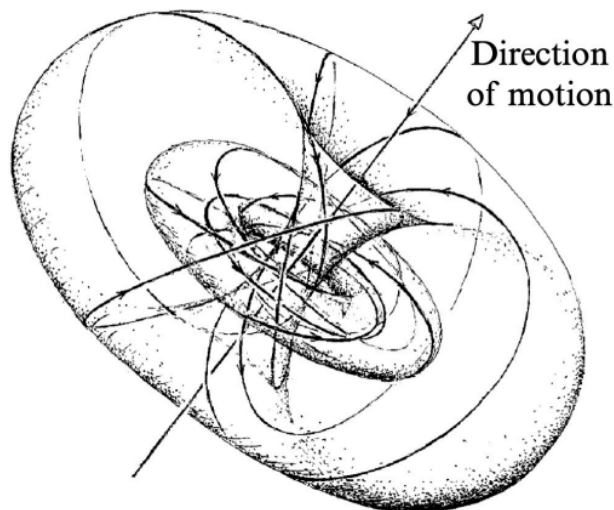


图2 “罗宾逊线汇”(Robinson Congruence)。

子是一个完美的点粒子,则不存在旋转,而如果是有限体积球体,则其旋转则会导致超光速,和狭义相对论直接冲突。这一矛盾在扭量空间中得到了消解:一个带自旋的粒子,不再是一个旋转的“点”或“球”,而是一个宏大的、非定域的几何结构。这幅图像暗示,自旋的“悖论”,或许只是一个“语境错置”——我们将一个天然属于非定域扭量空间的几何概念,强行塞入定域时空的框架中所产生的矛盾。自旋的本质或许并非时空内的运动学,而是扭量空间内在几何结构的体现。

2. 物理场的全纯性和齐次性

在扭量世界中,物理定律的表述也发生了根本性的转变,描述演化的微分方程,直接转变为代数约束,复杂的时空动力学,被纯粹的复结构所取代。

我们首先来看一下扭量空间的量子化。在标准量子力学中,正则量子化将经典物理中的泊松括号提升为算符的对易子。扭量理论采用类似的哲学,将扭量 Z^α 及其厄米共轭 \bar{Z}_α 视为一对正则共轭变量。其基本的量子对易关系为:

$$[Z^\alpha, \bar{Z}_\beta] = \hbar \delta_\beta^\alpha, \quad (9)$$

其中 $[A, B] = AB - BA$, δ_β^α 是克罗内克符号。同时,我们要求 $[Z^\alpha, Z^\beta] = 0$ 和 $[\bar{Z}_\alpha, \bar{Z}_\beta] = 0$ 。

和传统场论的坐标和共轭动量(二者满足傅里叶变换关系,共同构成相空间)不同,这里是扭量和共轭扭量二者构成相空间。我们可

以将 Z^α 视为算符，而将其共轭扭量 \bar{Z}_α 视为微分算符：

$$Z^\alpha \rightarrow Z^\alpha, \quad \bar{Z}_\alpha \rightarrow -\hbar \frac{\partial}{\partial Z^\alpha}. \quad (10)$$

一个物理态由一个扭量波函数 $f(Z^\alpha)$ 描述。在“扭量表象”中，我们要求波函数不依赖于共轭动量 \bar{Z}_α 。这在数学上意味着波函数必须满足一组柯西-黎曼方程的类似形式：

$$\frac{\partial f}{\partial \bar{Z}_\alpha} = 0. \quad (11)$$

满足这组方程的函数称为“全纯函数” (holomorphic function)。扭量理论的一个核心论断是：物理上允许的量子态，是由扭量空间上的全纯函数来描述。

在量子扭量理论中，粒子的螺旋度 s 被提升为一个算符。其经典表达式 $s = \frac{1}{2} Z^\alpha \bar{Z}_\alpha$ 在量子化后，考虑到算符的排序（采用外尔排序），变为：

$$\hat{s} = \frac{1}{4} (Z^\alpha \bar{Z}_\alpha + \bar{Z}_\alpha Z^\alpha) = -\frac{\hbar}{2} \left(Z^\alpha \frac{\partial}{\partial Z^\alpha} + 2 \right). \quad (12)$$

量子自旋是整数或半整数。一个具有确定螺旋度 s 的粒子的波函数 $f(Z)$ ，必须是螺旋度算符的本征函数，从而一定是“齐次函数”，其本征值（齐次度 k ）满足（这里取自然单位制 $\hbar=1$ ）：

$$s = -\frac{1}{2}(k+2) \implies k = -2s - 2. \quad (13)$$

作为例子，我们考虑一个描述螺旋度 $s=+1$ 的光子扭量函数，其对应齐次度为 $k=-4$ 的全纯函数。一个典型的例子是：

$$f(Z) = \frac{1}{(Z^\alpha A_\alpha)^2 (Z^\beta B_\beta)^2}, \quad (14)$$

其中 A_α 和 B_β 是两个固定的常数扭量。

3. 彭罗斯变换：从扭量空间到时空的积分映射

动力学方程本身如何描述？答案是：它们被“彭罗斯变换”优雅地转译为几何约束。这个变换扮演着“解码器”的角色，只要输入一个满足上述代数约束（全纯、齐次）的扭量函数，它输出的时空场就自动满足相应的无质量场方程（如麦克斯韦方程或爱因斯坦方程）。从某

种意义上说，在扭量理论中，动力学被几何化了。

具体而言，彭罗斯变换是一个积分变换，它将一个扭量空间上的全纯函数 $f(Z^\alpha)$ 映射为闵可夫斯基时空上的一个无质量场函数 $\psi(x)$ 。变换公式的大致形式为：

$$\psi_{A'...L'}(x) = \frac{1}{2\pi i} \oint_{\omega=ix\cdot\pi} \pi_{A'}... \pi_{L'} f(Z) \pi_E d\pi^E, \quad (15)$$

其中 $Z=(\omega^A, \pi^B)=(ix^{AA'} \pi_{A'}, \pi_B)$ 。这里的逻辑是：对于一个时空点 x ，我们首先借助入射关系 $\omega^A=ix^{AA'} \pi_{A'}$ ，将被积函数中的 ω 用时空坐标 x 和旋量 π 来表示。然后，通过积分运算可以积掉旋量 π 。最终等式右边给出的便是仅依赖时空坐标 x 的函数。

该变换的神奇之处是，只要输入的 $f(Z)$ 是一个齐次度为 $-n-2$ 的全纯函数，输出的时空场 $\psi(x)$ 或 $\phi(x)$ 就“自动满足”相应的螺旋度为 $s=n/2$ 的无质量场方程：

$$\nabla^{AA'} \psi_{A'B'...L'} = 0. \quad (16)$$

我们小结一下。在扭量理论中，首先，量子态本身被赋予了一个纯粹的解析条件——全纯函数。这要求物理波函数在复数的一半变量上保持不变，这是一个极其严格的约束。其次，粒子的螺旋度，不再由复杂的动力学决定，而是直接被转译为这个函数的齐次性——一个简单的代数属性。比如，一个右手光子就对应一个齐次度为 -4 的齐次函数。进一步，彭罗斯变换则保证了这样的物理描述满足传统的时空场方程。可以说，复杂的时空动力学方程被完全编码在了扭量函数的“全纯性”和“齐次性”这两个简单而优美的数学属性之中。

4. 上调调：扭量函数的真实身份

至此，我们似乎已经找到了物理定律在扭量空间中的新形式。然而，物理态的真实身份，比一个简单的全纯函数要远为深刻和微妙。其最终的揭示，将再次彰显扭量理论的整体性和非定域性。

这一发现的线索，源于彭罗斯变换的一个奇特属性：我们发现，可以对扭量函数 $f(Z)$ 进行较大的改动（例如给它加上某些特定的函

数),而不改变彭罗斯变换后所输出的时空物理场 $\psi(x)$ 。这带来了一个问题:若不同函数对应同一物理态,则函数本身不能作为物理实在的终极表征。真实的物理态,必然对应于一个由所有这些“等价”函数构成的集合或等价类。数学上,要准确描述这一性质,就需要使用上同调的语言。这正是曹天予文章标题中“上同调”(cohomology)一词的来源。

要理解这个抽象的概念,一个绝佳的直观类比正是彭罗斯所提出的“不可能三角”,如图3所示。这个怪异的几何图形,从每个局部(每一根独立的边或每一个角)看起来,都是一个完全合理的三维物体。但如果将这三个局部“拼接”成一个整体,就会发现这是不可能的。这个“整体的不可能性”,就是一种无法消除的“全局障碍”。

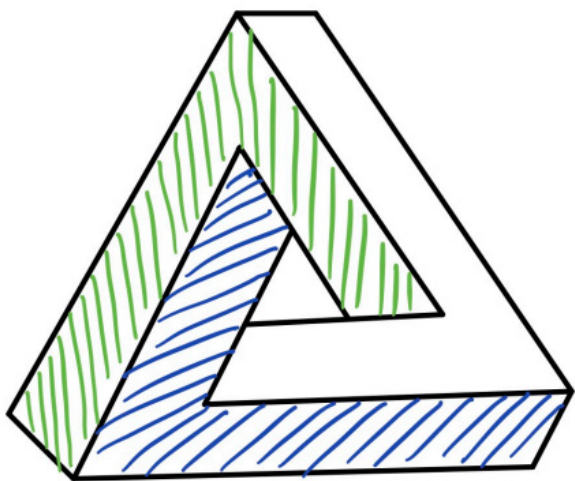


图3 彭罗斯三角：一个“不可能的物体”。从局域看，它的每一子部分都没问题，但整体结构却无法在三维空间中实现。

上同调本质上就是描述这种“全局拼接障碍”的数学语言。

在扭量空间中,上同调的一个元素并非单个函数,而是由一组定义在不同局部区域上的函数及其在交叠区域的“粘合规则”共同定义。如果这组函数所代表的几何结构存在一个内在的、全局性的“扭结”,无法被分解为更简单的全局函数之差(即所谓的“非平庸”元素),那么它就代表了一个上同调元素。反之,如果一组函数 $\{g_{ij}\}$ 可以被表示为 $g_{ij}=h_i-h_j$ 的形式,其中每个 h_i 是在整个开集 U_i 上都有定义的

全纯函数(开集集合 $\{U_i\}$ 覆盖整个空间),那么这组 $\{g_{ij}\}$ 就被认为是“平庸的”或“零元素”。上同调真正关心的是那些非平庸的、具有内在全局“障碍”的函数族。

这里更严格的数学定义就不去展开了。我们可以借助之前光子扭量函数的例子(14)来初步体会扭量函数和上同调的特点。我们可以对扭量函数进行修改:

$$f'(Z) = f(Z) + c_i h_i, \quad (17)$$

其中 c_i 是任意常数,

$$h_1(Z) = \frac{1}{(Z^\alpha A_\alpha)^4}, \quad h_2(Z) = \frac{1}{(Z^\beta B_\beta)^4}. \quad (18)$$

计算将发现,彭罗斯变换后 $f(Z)$ 和 $f'(Z)$ 给出的是相同的结果;这是因为 h_i 的彭罗斯变换等于零。扭量函数 $f(Z)$ 之所以构成一个非平庸的上同调元素,是因为它包含了两个不同的极点(A_α 和 B_β),这在整个扭量空间中制造了一个无法被抚平的全局拓扑障碍。而我们添加的那些不改变物理结果的函数 h_i ,则因为只包含单个奇点,可以被视为局部的、可被消除的“平庸”元素。这揭示了一个深刻的图像:在扭量理论中,定义一个基本粒子的,不是一个函数在某处的数值,而是其奇点在整个扭量空间中的全局拓扑关系。

总结一下,闵可夫斯基时空中的点粒子图像在扭量理论中发生根本转变:扭量直接表征着粒子的动量和螺旋度性质,传统时空的场方程的解对应于扭量空间的齐次、全纯函数,而物理实体的最终身份,既非粒子,亦非场,而是一个个上同调类——它们是非定域的、依赖全域拓扑的数学结构。

五、曹天予“内禀量子性”的新观点

对于扭量理论这一新框架,学界可从两个视角理解:其一是“保守派”,将扭量单纯看做一种“翻译”旧有理论的崭新数学工具或描述手段;另一个则是“激进派”,主张扭量是比传统时空更加本质的存在。曹天予无疑属于后者,他主张扭量理论应被视为21世纪物理学的基础框架。不仅如此,曹天予提出了一个更具革命

性的论断：扭量理论本身是一个内禀量子理论、无需“被量子化”的过程。这一章我们来具体讨论这一观点。

1. 扭量的新启示

为深入理解曹天予观点，我们首先回顾传统量子场论的量子化机制。在这一框架下，量子化条件是一个外在于经典理论的基本假设。人们可以采用不同（但等价）的方案对经典场论进行量子化，比如正则量子化或路径积分量子化等。如果将普朗克常数 \hbar 取为零，理论可以退化到其经典极限。

量子场论框架的另一个特点是定域相互作用，即拉氏量中不同粒子的场是在同一点相互作用的。定域性和量子化的结合导致在实际计算（费曼图圈图计算）中会遇到紫外发散，而解决紫外发散的技术手段是重整化。粒子物理标准模型在量子场论框架下是可重整的，也就是说，紫外发散都可以自治地通过有限个重整化参数消除，相应的理论预言也得到了实验的验证。但是将爱因斯坦引力理论纳入这一框架则会导致不可重整性，需要在引力的作用量中引入无穷多的抵消项，每个抵消项都对应于一个“未知”参数，这强烈表明这个理论框架是不完备的。此外，爱因斯坦的引力理论中也存在宇宙学和黑洞的奇点等问题，解决这些问题需要考虑其中的量子效应。在传统时空框架下，将引力和量子统一是必要的，但遇到了难以调和的困难。

扭量理论因为其全新的图像，特别是内禀的非定域性这一特点，为调和引力和量子的冲突提供了希望。曹文的3.2.3节指出，扭量理论中的新基本物理实体（即对应物理态的上同调）带来两大启示：

（1）这些基本实体为统一所有时空场（包括引力场和规范场）提供了本体论基础，并因此也为实现基本物理实体及其相互作用（力）的统一奠定了基础。（2）这些基本实体的非定域性否定了定域的、点状的时空实体（场和粒子）的首要地位，从而消除了由传统物理学中基于时空实体的定域性所引起的发散和奇点问题。^[3]

2. 自旋的优先性

曹天予进而提出了一个更具颠覆性的论断，也是整篇论文的核心论点：扭量理论不仅是一个更好的框架，它本质上是一个无需外加量子化程序的内禀量子理论。这一论断将我们引向一个根本性的问题：在物理学的基础中，究竟是“自旋”更基本，还是“量子假说”更基本？

量子理论的核心常数是普朗克常数 \hbar 。历史上普朗克和哈斯（Arthur E. Haas）都试图给 \hbar 提供一个物理解释，比如将其和电子电荷或者氢原子的大小相关联，然而这些尝试都没有成功。现代物理学家普遍将普朗克常数 \hbar 及其所代表的量子假说视为微观世界的终极假设，我们应该接受它，而不需要尝试去推导或解释它。然而，曹天予主张自旋优先于量子假说，并从三方面论证此观点。

首先，是对物理学史的重审。曹天予借用两个实验——1915年的爱因斯坦-德哈斯实验，和1922年施特恩-盖拉赫实验——来说明，自旋的概念提出并不依赖于预设的量子假说。这挑战了传统观点——即自旋是量子力学的派生物。

其次，是对“量子性”核心概念的辨析。量子力学的核心特点就是波粒二象性，即周期性与分立性的统一。曹天予指出，以普朗克常数为基础的周期性需要通过能量关系（ $E=h\nu$ ）这类外部关系引入，而自旋在其单一概念内部就天然地、不可分割地同时蕴含了周期性（旋转）与分立性（取值量子化）。因此，他提出自旋是比普朗克常数更自治、更根本的“量子性”载体。

其三，自旋和定域性的冲突反过来也使得非定域的扭量理论成为一个安置自旋的理想框架。如之前所提到的，自旋概念在传统定域时空框架中的窘境——点粒子无法旋转和有限体积球体的旋转超光速，这些困难可能并非是自旋本身的问题，而是源于将自旋置于定域的时空框架内。扭量理论作为一个天然非定域的、以旋量为基础的数学结构，恰好为自旋提供了一个自治的框架。

3. “内禀量子性”的论证

进一步严格论证扭量理论具有“内禀量子性”的性质,则是一个困难得多的问题。这个问题的讨论主要集中曹文的4.2.3节。笔者认为这一节的论述是曹天予文章中最有争议、也可能最不易理解的地方。首先我们必须明确什么叫做一个理论是“内禀量子”的?传统的量子理论都是从一个经典理论出发,然后通过一个外部操作施加量子化条件,而一个内禀量子理论则应该天生就满足量子化的内在要求。对于扭量理论,这就要求:^[3]量子约束不是施加于经典的扭量形式的要求,而是先验地在扭量形式中满足的。

曹天予的论证基于相空间的辛形式 ω 。我们需要对比三种相关的辛形式:

- p - q 体系: $\omega = dp \wedge dq$
- Z - \bar{Z} 体系: $\omega = dZ \wedge d\bar{Z}$
- S - θ 体系: $\omega = dS \wedge d\theta$

其中 p - q 体系对应于传统理论的正则动量和坐标,量子化后要求二者都提升为算符,并满足对易关系。而扭量空间的 Z - \bar{Z} 体系的量子化也可以理解为将扭量提升为算符,并满足之前给出的对易关系(9)。这也是扭量理论研究者通常采用的观点:量子扭量理论可以看做是经典扭量理论的正则量子化。(S - θ 对应于自旋和相位,我们后面再用到。)

曹天予质疑这一通常对于扭量量子化的理解,他指出一个重要的不同点:动量和坐标是物理可观测量,但扭量的 Z 和 \bar{Z} 则不对应于可观测量,而更类似于量子场论真空态的产生与湮灭算符 a 和 a^+ 。通常产生湮灭算符的量子化关系是由更基本的 p - q 量子化所“诱导”出的,然而在扭量空间中,却不存在先于 Z 的“ p - q ”体系。

基于这一观察,曹天予提出扭量空间的量子化应作为一种内禀性质。为了论证这一性质,曹天予提出需要证明两点:

- (1) 扭量形式体系内禀地(自动地)满足量子约束;
- (2) 它应该在逻辑上,而不仅仅是类比地,推导出量子形式体系的核心,即算符(代表可观测量)代数(“海森堡代数”),

该代数承载着扭量态空间(作为希尔伯特空间)的么正变换。^[3]

对于第一点——自动满足量子约束,曹天予的基本理由是,由于自旋本身具有量子属性,同时扭量本身就是由一对2分量旋量构成,从而扭量框架本身也继承了内禀的量子属性。更具体的论证如下:“量子约束”体现为一个深刻的“整性条件”(integrality condition),即要求理论的辛2-形式 ω 在任意闭合二维面上的积分(作用量相位)必须是 $2\pi\hbar$ 的整数倍。曹天予在此执行了一个关键操作:将扭量空间的坐标系从抽象的复坐标(Z, \bar{Z})正则变换到更具物理意义的自旋-相位坐标(S, θ)。在这个新坐标系下,辛形式变为 $\omega = dS \wedge d\theta$ 。此时,一个关于旋量(扭量的基础)的根本性质——其 4π 的旋转周期性——起到关键作用。为了让一个旋量态回到自身,其相位 θ 必须旋转 4π 。因此,对一个最小的量子“面积元”进行积分,我们得到

$$\int \omega = \int_0^{S_{\min}} \int_0^{4\pi} dS d\theta = 4\pi S_{\min}. \quad (19)$$

根据整性条件,这个结果必须等于 $2\pi\hbar$ (取最小整数 $n=1$)。由此可直接解出: $S_{\min} = \hbar/2$ 。这个推导的关键之处在于:普朗克常数 \hbar (量子化)的出现,是旋量空间内在几何(4π 周期性)的一个逻辑推论,而非一个外部强加的假设。这也是曹天予“自动满足”论断的核心论据。

对于第二点——逻辑上得出算符代数,曹天予首先指出,在物理意义清晰的 S - θ 体系中,自旋 S 是一个可观测量,而相位 θ 不是。因此,论证的出发点就是为代表可观测量 S 的算符 \hat{S} 寻找一个自洽的表示及其本征态。随后,他论证道:既然第一步已经证明了该体系是“内禀量子”的,我们便“在逻辑上被授权”使用量子化的数学工具(如将共轭变量表示为微分算符)。将 S - θ 体系下的自旋算符本征方程 $\hat{S}f(s) = sf(s)$,经由正则变换“翻译”回 Z - \bar{Z} 体系,可以导出自旋算符的具体形式,即欧拉齐次算符(12): $\hat{s} \propto (Z^\alpha \frac{\partial}{\partial \bar{Z}^\alpha} + \text{const.})$ 。其本征态(物理态)也自然地成为齐次全纯函数,其齐次度 k 与螺旋度 s 通过 $k = -2s - 2$ 联系起来。

4. 上述观点的审视和挑战

我们上面回顾了曹天予关于扭量内禀量子性的基本论证思路：既然自旋在历史和概念上都先于并优于量子假说，而扭量理论又是安放自旋最自然的框架，那么，一个以扭量为基础的物理学，其量子性便不再是需要从外部强加的“公设”，而是一种从框架地基中自然生长出来的“内禀属性”。它自动满足了曹天予提出的两点判据：内禀地满足量子约束，并内在地包含算符代数。

这一系列论证和观点，无疑是深刻且富有启发性的。它为我们重新思考“量子”的起源提供了一个全新的视角。当然，这一论证从物理角度的严格性和唯一性，仍值得进一步的商榷与审视。

其一，在传统狄拉克理论中，自旋是相对论性量子框架的必然推论：自旋是洛伦兹群在量子层面表示的必然结果。而曹天予的方案，是将自旋的属性直接赋予给扭量框架作为其基本出发点。这两种理论策略——一种是“自上而下的推导解释”，另一种是“自下而上的公设构建”——何者更为本质，可能是一个哲学观点的分歧。

其二，是关于内禀量子与经典极限的关系，这一点可能也是最富有争议的。一个量子的理论，可能并不像传统理论存在一个自然的经典极限。然而，扭量理论也并非和传统的正则量子化观点相排斥，正如传统扭量学者所一直采用的观点。此外，对于经典的自旋，扭量理论也提供了一个优美的经典几何图像，即前面提到的“罗宾逊线汇”。这似乎暗示，扭量理论更像是一个深刻的、统一了经典与量子特征的框架，而非一个纯粹的、无经典对应的量子理论。因此，“内禀量子”是否是对扭量理论“唯一”正确的理解，可能是一种诠释上的选择。

最后也是最关键的一点，对于物理学家而言，一个新框架的最终价值在于其能否带来全新的、可检验的物理结果。关于内禀量子性，除了在哲学层面的争论外，是否会导致全新的物理结果，或者真正解决传统已有框架中所难以解决的问题呢？如果扭量理论仅仅是传统理

论的一种等价表述（即这章开头提到的“保守派”观点），那么传统理论的困难也依旧会继承到扭量理论中，只不过表现形式不同。“激进派”观点能否真正引领物理学突破，例如在量子引力的具体计算上展现其威力，仍有待证明。

综上所述，曹天予的论断无疑为量子引力研究开辟了具有讨论价值的哲学方向。然而，要使其成为物理学界广泛接受的共识，则不能仅仅停留在哲学层面的思辨，更需要构建一个自洽的、实际可计算的量子引力理论。

六、结语和展望

本文中，我们回顾了扭量理论的基本图像。从时空中的点到扭量空间中的球面，从全纯函数到上同调，扭量理论为我们描绘了一幅全新的宇宙图景。在这个图景中，“时空”不再是本体论上的基石，而是在更深层次的、由非定域性和复数法则支配的“扭量”之上所浮现的“衍生物”。

曹天予则将这场革命更加彻底化。他主张，这个新世界的基石——自旋——本身就是“量子性”的源头，而扭量理论是一个内禀量子的理论。这一论断试图从根本上改写物理学的基础叙事，将“量子化”从一个外部强加的操作，还原为理论内在的自然属性。这无疑是一个极富雄心的纲领，但正如所有深刻的物理学变革一样，这一观点是否正确，仍有待于未来更为严谨的数学物理研究的检验。

通往任何新范式的道路都布满荆棘。扭量理论作为一个仍在发展中的框架，其自身面临诸多理论挑战。这些挑战不仅是技术性的，也涉及理论构建的根基。我们从以下几个方面加以说明。

1. 质量的起源

扭量理论的数学优雅性高度依赖于共形不变性（即对尺度变换的不变性），这使其天然成为一个描述无质量世界的理论。然而，我们的现实世界充满了有质量的粒子。如何在一个无质量的理想框架中，通过某种对称性破缺机

制(如希格斯机制或动力学破缺)来自自然地生成质量,是扭量理论必须回答的核心问题。

2. 手征性难题

扭量理论的基本构造具有内禀的手征性,它在描述具有单一螺旋度的粒子时,如自对偶场(self-dual field),非常简洁。然而,引力理论显然是非手征的,它必须同等地处理 ± 2 引力子,对于这样的理论该如何在一个统一的框架内“对称地”描述,便成了一个深刻的难题。这就是所谓的“googly问题”(googly是板球术语,指投出看似右手旋转却产生左手旋转效果的球,比喻其困难和反直觉),至今仍是该领域的“阿喀琉斯之踵”。这一理论结构上的不对称,直接挑战了扭量理论作为一个本应完备且对称的底层理论的基础。

3. 计算框架的发展

传统的扭量理论,如扭量图(twistor diagram)理论,虽然提供了一个框架,但其计算规则非常复杂。近年来基于扭量弦和散射振幅的研究虽然取得了巨大进展,但它们更多是针对散射振幅等特定物理量的微扰计算。一个完备的物理理论必须具备处理高圈修正、束缚态乃至非微扰效应的能力。在这些领域,扭量理论的计算框架仍有待发展。

4. 弯曲时空与奇点

扭量理论诞生于对平直闵可夫斯基时空的研究,其推广到弯曲时空还远未成熟。这也限制了它直接应用于现代物理学的两大前沿——宇宙学(一个动态演化的弯曲时空)和黑洞物理学(强引力弯曲时空)。扭量理论是否能解决传统框架所面临的黑洞和宇宙大爆炸奇点等难题,将是物理上检验这一理论的黄金判据。

5. 对量子理论根基的启示

扭量对于量子理论本身也有深刻的启示。

量子力学本身就是定义在复数空间——基本的薛定谔方程就包含虚数 i 。而EPR佯谬和贝尔不等式所揭示的非定域性则是量子力学最难以理解之处,且与狭义相对论的因果结构存在直接“冲突”。有趣的是,按照“ER=EPR”的假说(即虫洞与量子纠缠等价),理解量子力学的非定域性可能恰好需要通过引力。^[6]面对这些基本问题,天生具有非定域性和复结构的扭量理论,是否就是我们寻觅已久的、能够诠释量子与引力理论内在联系的一个完美框架呢?

在量子引力研究的众多途径中,扭量理论是否是最终答案,还无人知晓。但其颠覆性的图像、天然的非定域性以及复几何的深刻联系,无疑为我们探索物理学的终极奥秘,提供了一个充满独特魅力的新视角。它的存在本身,就是对人类创造力和敢于挑战最根深蒂固观念的最好证明。

[参考文献]

- [1] Penrose, R. 'Twistor Algebra'[J]. *Journal of Mathematical Physics*, 1967, 8(2): 345-366.
- [2] Witten, E. 'Perturbative Gauge Theory as a String Theory in Twistor Space'[J]. *Communications in Mathematical Physics*, 2004, 252(1): 189-258.
- [3] Cao, T. Y. 'Twistor, Cohomology, Foundations of Physics'[J]. *International Journal of Modern Physics A*, 2025, 2530002.
- [4] 曹天予. 爱因斯坦的遗产[J]. *自然辩证法通讯*, 2022, 44(9): 117-126.
- [5] Penrose, R. *The Road to Reality: A Complete Guide to the Laws of the Universe*[M]. New York: Vintage Books, 2025.
- [6] Maldacena, J., Susskind, L. 'Cool Horizons for Entangled Black Holes'[J]. *Fortschritte der Physik*, 2013, 61(9): 781-811.

[责任编辑 李斌]