



吴新忠评论赵国求——《双4维时空量子力学》与量子引力的前沿探索

吴新忠

(上海交通大学科学史与科学文化研究院 (200240))

Abstract: [摘要] 赵国求教授在量子力学曲率解释基础上,提出了用双4维复数时空的场物质球几何结构或场物质密度波来界定量子波函数的物理意义,大大推进了量子力学解释研究的深入,有助于解决量子力学在理论解释与实际应用方面出现的一系列概念困难与哲学难题,特别是量子力学与相对论的协调问题。但要解决量子力学与量子场论的大量疑难问题,并最终整合到广义相对论或类似的引力理论的时空框架中,还需要更深入的物理直觉与哲学洞察,更艰巨的数学空间突破,以及更前沿的实验验证。

[吴新忠. 吴新忠评论赵国求——《双4维时空量子力学》与量子引力的前沿探索. *Academ Arena* 2020;12(4):6-10].
ISSN 1553-992X (print); ISSN 2158-771X (online). <http://www.sciencepub.net/academia>. 2.
doi:[10.7537/marsaaj120420.02](https://doi.org/10.7537/marsaaj120420.02).

Keywords: [关键词] 双4维时空 量子曲率 量子引力

编者按: 原文发表于《自然国学评论》第1号,社会科学文献出版社,2018年1月。属于的[基金项目]2012年教育部人文社会科学研究一般项目(12YJA720013):“量子场论的本体论研究”;2014年教育部人文社会科学研究规划基金项目:“量子计算热力学中信息-存在关系的哲学探讨”(14YJA720004)。作者吴新忠(1968-),浙江东阳人,外国哲学博士,上海交通大学科学史与科学文化研究院讲师,中国物理学会相对论与天体物理学会会员,上海市科学技术史学会会员,研究方向是科学前沿哲学问题。E-mail: sju@sina.com。该文说明,以他们个人前后时间十年的观点对照看,应该说从认为量子力学有类似实数超光速物质的单曲率到改进承认有类似虚数超光速物质的双曲率(双4维)解释,赵国求和吴新忠等的进步还是很大的。

量子力学中波函数的物理本质问题,是量子力学基础研究中的国际性难题与热点问题之一。赵国求教授积50年之力,在《运动与场》(1994),《物理学的新神曲》(2002,2004),《从相互作用实在到量子力学曲率解释》(2009)等著作中提出的量子力学曲率解释基础上,由湖北科学技术出版社在2016年6月出版了《双4维时空量子力学基础》,提出了用双4维复数时空场物质球几何结构或场物质密度波来界定量子波函数的物理意义,大大推进了量子力学解释研究的深入,有助于解决量子力学在理论解释与实际应用方面出现的一系列概念困难与哲学难题,特别是量子力学与相对论的协调问题。

除了导论,全书包括四篇:一是讨论量子力学的最基本特征——波粒二象性与不确定关系,批判质点模型的局限性;二是讨论量子力学的各种传统

解释;三是相互作用实在论;四是双4维时空量子力学基础。

日本物理学家坂田昌一、汤川秀树,法国数学家托姆均认为量子力学的主要困难来源于不合理的质点模型。量子场论中的重整化问题,集中体现了把基本粒子看作是质点造成的无穷大数学困境。美国物理学家霍夫斯塔特还从实验上证明了微观量子客体不是一个点,而是有一定的分布半径,并由此获得了诺贝尔物理学奖。赵国求认为,微观粒子的质点抽象在时空动力学上是有条件的;量子现象的时空动力学机制表明微观粒子的位置不可能定义得比其康普顿波长更准确,这就自然打破了质点模型的适用范围。弦论与M理论认为,弦是在时空中振动着的1维客体,各种基本粒子可以看作是具有不同频率和模式的各种弦。但弦论具有不可观察的额外维,超弦理论预言的超对称粒子至今没有发现,M理论预言的真空几何形态太多;尽管可以整合四种基本相互作用,但引力量子化依然困难重重。另一个比较有名的圈量子引力,仍假定物质的存在形式是场或点状粒子,在通常的1+3维时空中把引力场的Ashtekar联络量子化,引进自旋网络来表示量子态和实现引力场的量子化,出现了面积量子、体积量子与离散时空等新概念,并要求澄清量子力学的基础问题。

圈量子引力应用在宇宙学中后,相当多的圈宇宙模型与标准宇宙学模型冲突。在离散时空中如何重新表达量子场论的思路还不是很清楚,很可能是把普朗克空间与普朗克时间对应的能量-动量进行截断,这样一来质点模型仍然是有问题的。因为赵国求从康普顿物质波出发,限制质点模型的无限理

论外推，在概念上牢固坚持相对论与量子力学协调的微观因果原理与洛伦兹协变性，有可能给出量子力学与量子场论的一种全新的几何学解释，并对量子引力的探索提供新的启示。

量子力学从建立以来，就一直流行各种解释。波动力学创始人薛定谔认为波函数的模方是电荷 e 的权值分配函数，但这个假设无法解决多维空间与波包扩散困难，而被多数物理学家放弃。德布罗意认为，微观粒子对应一个相位波，相位波指引粒子运动，后来认为微观粒子直接对应一个非线性奇异波包，而量子力学只能给出其线性近似。但双重解释理论因为数学难度大而得不到公认。流行的哥本哈根解释认为：微观客体是遵循测不准关系的位置和动量不能同时确定的粒子，单粒子具有波动性，波函数的模方是单位体积内粒子的分布概率，物质波就是概率波。随着哥本哈根解释被广泛接受，量子力学的进一步发展引发了决定论与非决定论，定域性与非定域性，实在论与反实在论的大量争论。玻姆的量子势理论，试图说明量子概率背后的决定论因素，认为连续运动的微观粒子，不仅受到经典势 U 的作用，而且还受到量子势 Q 的作用。但量子势具有明显的超距作用，这迫使我们量子力学做整体论解释，并引入非定域的瞬时影响，尽管我们不能用来超光速地传递信息。玻姆与合作者后来把量子势理论整合到量子场论中，但量子势明显是与相对论精神不太一致的，这就导致它的解释能力与发展潜力大打折扣。

将宏观世界和微观世界统一在量子力学的解释范围之内是多世界解释的一大亮点。根据多世界解释，人们可以放心地认为宏观物体实际上也有波函数的表示形式，而观察不到叠加态则是世界分裂的结果。多世界解释尽管消除了波包坍塌的困难，似乎也消除了量子测量对观察者的依赖性，并且有可能在弯曲时空中处理量子演化问题；但它在本体论上把理论设想的各种可能世界与我们生活在其中的现实世界等量齐观，而且很难根据测量过程确定宇宙波函数分裂的时刻。多世界解释的优选基问题，是该理论面临的最严峻考验。按照埃弗雷特最初的理论，世界应当按照被观测系统的本征态展开式来分裂，但问题是这种本征态的展开并不是唯一的。多心解释把世界分裂的过程改造成了意识分裂的过程，虽然在哲学上换了个说法，但多世界解释的内在矛盾依然存在。假如我们用时间反演的方式来理解量子现象，按照多世界解释，就意味着现实世界可能是从大量类似的可能世界中演化而来的：我们宇宙不仅有不同的未来，而且很可能有不同的历史。这是相当悖谬的，除非我们突破多世界解释中量子规则同时适用于微观现象与宏观现象时造成的可能世界总体的时间可逆的假象。当然，多世界解释加

深了我们对量子概率与量子实在的认识，无论是对物理学，哲学，还是科幻小说与影视，都有深刻的启发价值。

相互作用实在论是赵国求结合爱因斯坦与薛定谔等在量子力学解释中提出的一些实在论思想，综合包括哥本哈根解释在内的各种量子力学解释的不同哲学倾向，按照马克思主义的自然辩证法，创造性地改进康德哲学的一种尝试，并与国内外流行的各种关系实在论，结构实在论进行对比分析。现象实体概念的提出，将认知过程从本质与现象的二元对立，修正为现象-现象实体-自在实体三元过渡。在赵国求看来，现象实体是我们能够直接用感觉器官，或者间接用测量仪器所把握的客体；而自在实体是只能通过理性思维来把握的尚未感知或者不能感知的事物，它也许不过是尚未呈现为现象的更深层次的本质，与康德原来所说的“自在之物”或者“物自体”的意义并不一致。康德的“自在之物”是作为刺激感官的未知对象而在理论上设定的认识界限，是不能用先验感性形式与先验知性-理性范畴来把握的；但赵国求所说的“自在实体”虽然没有进入感性形式，却具有知性与理性形式的某种规定，是通过测量结果与借助相互作用的因果律合理外推出来的对象，比较接近一些科学实在论者所说的“理论实体”或“物理本体”，并与相对论静能 m_0c^2 对应物对应，是一个在任何静止坐标系中的不变量。相互作用实在论在量子力学曲率解释的探索中，特别是量子测量问题的澄清，以及微观与宏观的划界，连续作用与离散作用的区分等方面有重要启发意义，但这并不意味着它是量子力学曲率解释的唯一哲学理解。基于物理的，认识论与本体论的理由，以后的探索者给出量子力学曲率解释的其他哲学理解也是可行的，不同的哲学理解可能会导致量子力学曲率解释出现不同的理论模型，但尽量维持量子力学与相对论的协调性，应该是我们推进量子力学曲率解释的根本目标。

根据赵国求的论述，双 4 维时空量子力学基础的基本思路是[1,p10]：

(1)静态的微观客体不是点粒子，而是转动的场物质球，不能抽象为质点，半径由 $R_0 = \hbar/m_0c$ 定义，量子波动根源于球内场物质的波动。

(2)运动的场物质球不断发生形变，其曲率随着动量的变化发生变化，球内 ($R = \hbar/mc$) 场物质的转动，和球面曲率 ($k_1 = mc/\hbar$) 及其在 3 维空间的映射 ($k_i = mv_i/\hbar$)， $i=2,3,4$ ，共同决定了场物质球的结构及运动状态。这里的量子曲率是采用物质波的康普顿波长构成的圆周的曲率来定义的。一个有待深入研究的问题是：运动的场物质球在发生形变时，曲面上各点的曲率如何随着运动而变化，如何用张量、联络等概念表示？这需要双 4 维复数时空的微分

几何性质深入研究，结合量子波函数的几何形态变化规律才能给出严密的数学表示。

(3)时空本质上是复数的。复数空间是物理本体（自在实体）所在空间。因为量子现象是波动现象，与波动现象有关的量子时空具有复数结构是相当自然的。

(4)复数时空中“转动场物质球”发生运动，由洛伦兹时间变换，可推演生成物质波及具有洛伦兹协变的双4维复时空 $W(x,k)$ 。量子力学与狭义相对论中模型引入之初就得到统一。

(5) $W(x,k)$ 虚部坐标 k_1, k_2, k_3, k_4 描述场物质球的结构，各向同性，有洛伦兹协变性；实部坐标 x_1, x_2, x_3, x_4 描述场物质球在实数时空的位置与时刻，与闵可夫斯基空间 $M^4(x)$ 同构。 $W(x,k)$ 是闵氏实数时空的复空间推广。

(6)物质波描述在双4维复时空 $W(x,k)$ 中，传播微观客体空间结构和场物质密度分布的波动信息，是物理波，量子信息技术的进一步发展，也许能够让物质波像电磁波一样具有应用价值。这对中国物理学家潘建伟院士推动的量子通信技术的深入发展，是一个新的理论资源。我们发现，在 $W(x,k)$ 空间中，波函数的演化是决定论的、可逆的、相干的，而在本征态的线性叠加中，场物质密度分布与量子概率分布可以相互映射，类似表象变换，使得我们更容易直观理解量子信息的物质基础。

(7)微观因果律认为，由类空间隔分开的两点不能用光信号相联系，在这两点上进行的任何测量是互不相干的[2,p263]。根据相对论的微观因果性原理和定域场论模型，对量场只能采取对易关系的正则量子化，对 Dirac 旋量场只能采取反对易关系的量子化，这就区分了玻色子与费米子[2,p265]。当场量子化之后，经典场演变成了量子场，其作用由连续变得不连续。即使是能量连续分布的本征函数系，数学上也可以通过正交归一处理，将本征态之间的连续性联系截断，使其同时并存。本征态是在场的量子化中，去除显在相互作用，切断量子态之间的因果联系，保留作用结果，并置于线性空间的产物。场的定态相当于删除了连续作用场，而保留其间断作用的自由运动状态。

(8)微观客体的位置测不准隐含在自身结构之中，波函数的双4维球模型，通过测量得到本征位置的点模型描述，正好表达了这一物理事实。本质上，任何微观客体都不可能定位得比康普顿波长的范围更精确，因为破坏微观因果性条件的空间范围是粒子约化康普顿波长的尺度[2,p266]。

在非相对论的情形，测量一个粒子的空间位置的精度在原则上没有限制，粒子在空间是完全定域的，可以采用点粒子模型 [2,p267]。但在相对论的情形中，质点模型是忽视粒子内在的静止康普顿动

量 m_0c 对应的空间尺度——康普顿波长的一个近似。在量子场论中，可以证明在空间两点上的粒子数密度不能同时测定，除非它们之间的距离大于粒子的约化康普顿波长 \hbar/mc 。特别是，我们不能测定空间线度小于粒子约化康普顿波长范围内的粒子数 [2,p268]。因为比康普顿波长更小的空间位置测量，需要波长比粒子的康普顿波长更小的外场，这足以产生新的粒子而与原来的粒子不可区分。因此，相对论与量子力学的结合，对测量粒子位置给出了在海森伯测不准关系之外的进一步的内在限制。

(9) 纯态存在的物理空间是双4维复时空，混合态存在的物理空间是4维实空间，Hilbert 空间是它们共同的数学应用空间。双4维时空量子力学修改了正统测量假设，认为量子测量是从微观非连续作用过渡到宏观连续作用，本征态之间消除突变区，消除固定相差，破坏正交、破坏线性，恢复宏观时序、恢复因果联系的实验操作过程。波函数的“坍缩”，既是双4维复数时空向4维闵氏时空的坍缩，“纯态”向“混合态”的运动转换，也是物理模型从“球”到“点”的“坍缩”。测量又使量子场回到经典场，量子世界回到经典世界。

(10) 通过量子测量，微观客体从双4维复数时空 $W(x,k)$ 回到4维实时空 $M^4(x)$ ，与可观察值对应。波函数的“坍缩”在 $W(x,k)$ 到 $M^4(x)$ 空间转换中实现，是全空间的，不可逆的、退相干的。“测量导致量子态瞬间坍缩”的传统理解，也将由“测量导致描述微观客体的物理空间和物理模型的转换”所取代。“纯态”向“混合态”“坍缩”，本征值的对应是状态转换物理内在的对应，不是测量过程中创生的。

(11) $W(x,k)$ 中的物质波 $\psi(x,k)$ 和 $M^4(x)$ 中点粒子的概率函数 $\psi(x,p)$ 动量、能量不变，数学形式相同，但物理意义不同。测量让描述“电子”的时空和存在形态及相互作用机制、物理模型发生了变化，“物质波”演变成了“概率波”（概率函数）。

(12) 量子力学与狭义相对论、广义相对论的内在联系可能有新思路。首先，赵国求把量子力学中态的叠加原理解释为定态波函数进行傅里叶展开时，在每个本征态上可以建立惯性系，而各个并存的本征态对应一个平行并存的惯性系群的同时存在。对波函数进行洛伦兹变换，相当于对一个平行的惯性系群中的本征态的同时变换[1,p160-161]。因此，量子力学实质上把本征态之间的连续作用和连续运动的物理过程，进行量子化分割（在量子电动力学中，这相当于把一个宏观的连续相互作用，分解为一系列电子在原子结构内部的轨道跃迁、电子碰撞，以及散射光子的康普顿效应来理解），截断宏观因果联系，变成间断匀速运动；本征态之间的变更，相当于本征态惯性系之间的变更。原子内部电子轨道的量子态跃迁，类似两个不同匀速运动惯性系间

的坐标变换[1,p161]。从量子力学微观客体不同本征态的叠加到对应微观客体某一宏观连续力学状态的恢复,涉及重新恢复连续相互作用,消除正交归一量子化分割,破坏线性叠加,恢复宏观因果联系,以及微观双4维复时空向宏观4维实时空,场物质球向点粒子,物质波向概率波,微观非连续作用向宏观连续性作用的转换[1,p162]。

其次,从能量、动量量子化出发,恢复宏观连续作用,就会破坏波函数线性叠加的物理条件:“一方面,由于本征态的同时并存被破坏,叠加态不存在,因而物理上失去了自身的独立自相干波源,自相干性随之消失。这是宏观物体不能自相干的物理原因。另一方面,能量、动量量子化的消失和连续作用力的重新恢复,前述与自由微观客体联系的各个本征态惯性系变成非惯性系,微观客体也将由本征态的叠加,还原成整体(质点)的加速运动状态。惯性力(或等效引力)的出现,惯性系变成非惯性系,空间变得不均匀,洛伦兹协变性失效。”[1,p161-162]这意味着,惯性力的量子起源伴随着本征态惯性系向宏观加速系的过渡。

再次,如果狭义相对论的建立包含将运动物体自身的时空特征转化为建在其上的坐标系的时空属性,同时忽略物体自身空间形态结构并抽象为质点的过程;那么在微观领域,通过坐标系的相对论时空属性,将质点还原为微观客体进行量子波动的双4维复时空的逆过程,就能得到转动场物质球,并推导出德布罗意-薛定谔的物质波方程。波函数的振幅和相位包含着微观客体的速度信息、几何结构信息,物质密度信息,表明微观客体不是“质点”,隐藏的空间自由度在双4维时空中展开[1,p176]。

当作为场物质球的微观客体自由运动时,从整体规范变换过渡到局部规范场,一开始就引进了相互作用场,自由场拉格朗日量的不变性遭到了破坏,局域时空是不对称的。通过协变导数引进规范场,实现规范不变性,是一种抵消作用[1,p176]。这个附加的规范场,则通过对场量进行规范变换,使得局域时空的均匀与对称性再次得到恢复[3,p7-8]。整体规范对称性反映或决定场的内禀特性,例如电荷、奇异数、重子数等。在整体规范对称性作用下,描述场量的拉格朗日函数是不变的,内禀对称性对应的守恒流具有守恒荷,能够体现电荷、奇异数、重子数等的守恒。也就是说,内禀空间的转动不会扭曲粒子或场所在的坐标系的时空变量——位置变量与时钟变量,时空底流形上的纤维丛不发生形变;或者说代表电荷、奇异数、重子数等的内禀空间的转动不产生力的效应。就像轮胎整体绕着垂直于环面中心轴转动的时候,轮胎环面不产生力的效应[3,p7]。定域规范变换能够改变场量的拉格朗日量,这意味着与定域规范变换有关的内禀空间的转动扭

曲了粒子或场所在的坐标系的时空变量——位置变量与时钟变量,形成了一个弯曲的纤维丛镶嵌在平直或弯曲的时空坐标的底流形上;或者说内禀空间的转动产生了力的效应,就像轮胎各点之间独立运动导致轮胎表面伸缩出现弹性力;这种新产生的内禀空间扭转力是用规范场产生的规范势来表示的,类似于引力场或者非惯性运动扭曲时空坐标产生惯性-引力场效应。因此,规范场也具有引力场的曲率特征[3,p8]。而场所在坐标系的时空变量,在时轴正交的平直时空坐标的底流形上是能够用双4维复时空中的场物质球的形变来表示的。

这里存在一个问题,既然规范场论使用内禀空间的形变来描述杨-米尔斯场,与广义相对论利用弯曲时空描述惯性-引力场有类似之处,就出现了两个问题:一是广义相对论是否属于杨-米尔斯理论的问题,二是广义相对论是什么样的规范场的问题。在广义相对论中,度规的具体设置以及4维-微分流形上的其余场都是任意的,微分同胚可以把不同的设置联系起来。温斯坦认为,规范理论的物理预言,都是就固定的背景时空具体化的时空点上的场值而言的,它们在物理上有意义是因为假定了一些外在于这些模型的结构,而在广义相对论这样的微分同胚不变理论中,不存在这样的背景结构,有意义的物理陈述只是一种纯粹关系特征。在形式上,微分同胚群不是主纤维丛上自同构群,在物理内容上,微分同胚群并不具有粒子物理意义下的规范群含义[4, p146-155]。海利认为,规范理论与广义相对论的约束哈密顿形式体系是不同的:在杨-米尔斯理论中,定义在对应于规范轨道内“运动”的矢量场构成一个李代数,封闭性是杨-米尔斯理论的明确特征[5,p255];而在广义相对论中,定义在对应规范轨道内“运动”的积分曲线的向量场并不构成李代数,因此广义相对论不是杨-米尔斯理论[5,p256]。但温斯坦认为,大量作者试图从规范-类原理导出广义相对论,把广义相对论理解为另类的规范场论是可能的。早在1988年,曹天予在《规范理论和基础物理学的几何化》一文中,认为尽管杨-米尔斯规范理论之类的非引力理论在几何化问题上拥有广阔的发展空间,但是所有基本相互作用的几何化问题,说明广义相对论跟统一描述其他基本相互作用的规范理论有诸多联系,可以确定这样的几何化对应着物理内容[6,p117-133]。

而赵国求采用等效原理分析规范场论中协变导数的意义,重新解释真空形变机制,发现了规范场论的几何化存在着类似广义相对论的思想。

尽管量子力学双4维时空理论在沟通量子力学与相对论方面取得重大突破,但我们也应该正视量子力学与广义相对论融洽结合时,仍然面临一些艰巨难题。通过康普顿物质波,沟通量子力学与量子

场论的波函数几何解释，我们发现广义相对论中时轴正交系中的局部闵氏坐标系如果远大于康普顿波长的尺度，在其中引入康普顿物质波 1+3 分解是可行的。但在推广到弯曲时空一般坐标系时，由于时间坐标与空间坐标不一定相互正交，康普顿物质波的 1+3 分解是否可行，或者以何种方式进行能够变换分解，是双 4 维时空量子力学解释的时空几何结构与广义相对论的弯曲时空结构进行巧妙整合的最有挑战性的大问题。回避量子曲率解释与广义相对论直接结合面临的巨大困难的另外一些思路是，我们可以考虑与广义相对论略有差别的双度规引力场论中，在整体或局部的闵可夫斯基时空度规中引入双 4 维复数时空量子力学模型的可能性，而把其中的弯曲时空度规只当作宏观时空结构的一种唯象描述，微观的时空结构是通过弯曲时空对应的平直时空度规中的双 4 维复数时空而得以包容量子现象的。那么，赵国求关于量子波函数的态叠加原理的惯性系与非惯性系分析，为什么很难推广到量子引力理论的研究中呢？首先是因为目前还没有类似薛定谔方程，狄拉克方程的量子引力方程，能够给出一般情形下的量子引力定态；其次是因为广义相对论的非线性，有可能使得量子引力定态波函数的傅里叶展开，出现了未知的数学物理困难。

目前，按照赵国求给出的引力场与规范变换的深入讨论，我们还看不出通过协变导数引入引力规范场，能够给出一个完全量子化的引力规范理论，而只能得到引力规范场中的描述电子的狄拉克-爱因斯坦方程与描述光子的克莱因-戈登-爱因斯坦方程。引力规范理论中出现了违背广义相对论等效原理的挠率，挠率可以看作是在量子力学中，弱等效原理（在惯性引力场中，初始位置与速度一致的质点，不管质量如何，它们的运动轨迹一致）破缺以后被迫引入的理论扩展，用来描述双 4 维时空中的粒子自旋。但对高密度强引力场进行量子化分割时，所得到的引力子双 4 维时空的量子波动球不可能是质点，因而不能使等效原理在引力的双 4 维时空的场物质球中严格成立，并给出作为万有引力本质特征的潮汐引力的测地偏离效应，而只能把粒子自由运动方向的惯性力场通过局域规范变换引进的反向

引力场来抵消。

如果说量子力学在原子结构中有一个随着轨道能级提高，能量跃迁不断缩小的自动退相干过程，那么量子引力在物质结构的什么层次过渡到连续的弯曲时空而呈现万有引力的机制并不是清楚的，因为目前所谓的量子引力能级跃迁只是理论假设，在普朗克时空尺度附近还没有一个类似原子结构的轨道能级模型。

总之，赵国求的理论观点新颖，立意清楚，其研究成果有助于量子力学基础问题的深入讨论。量子引力研究中的各种概念问题，都涉及时空问题在哲学概念与数学处理方面的新突破。但国外的研究往往被数学形式主义误导，而赵国求除了物理直觉外，还自觉地以爱因斯坦，德布罗意，薛定谔为代表的波动力学实在论哲学为指导，批判地改造与整合量子力学解释各种流派的解释的合理成分，初步完成了量子力学与量子场论的双 4 维复数时空模型，但要解决量子力学与量子场论的大量疑难问题，并最终整合到广义相对论或类似的引力理论的时空框架中，还需要有更深入的物理直觉与哲学洞察，更艰巨的数学空间突破以及更前沿的实验验证。对于双 4 维时空量子力学的发展前景，正如 2015 年曹天子教授所说：“双 4 维复数时空框架在量子物理概念基础的探讨中，是一个有希望的研究方向，坚持下去有可能取得重大概念上的突破。目前国际上量子物理概念基础的研究是一个热点。去年（2014）在日内瓦就此专题开了一个国际大会，几十位国际一流物理学家，包括 Nobel 奖获得者，提交了他们的探讨设想，其中有些研究的思路与赵国求的思路比较接近。” [1,p236]

参考文献

1. 赵国求：《双 4 维时空量子力学基础——量子概率的时空起源》[M]，湖北科学技术出版社，武汉，2016 年 6 月第 1 版。
2. 王正行：《量子力学基础》[M]，北京大学出版社，北京，2003 年 5 月第 1 版。
3. 桂起权 高策：《规范场论的哲学研究》[M]，科学出版社，北京，2008 年 5 月第 1 版。

4/21/2020