

On the Construction Characteristics of Physical Space-Time

—A New Conception of Quantum Mechanics Dual 4-Dimensional Space-Time and Unified Field Theory

Guoqiu Zhao¹, Kang Li²

¹Huazhong University of Science and Technology-WISCO Joint Laboratory, Wuhan Hubei

²Hangzhou Normal University, Hangzhou Zhejiang

Email: zhao66@126.com, kangli@hznu.edu.cn

Received: Jan. 27th, 2019; accepted: Feb. 12th, 2019; published: Feb. 19th, 2019

Abstract

Newtonian space-time describes the law of motion of macroscopic low-speed objects, special relativity space-time describes the law of motion of macroscopic high-speed objects, and the space-time with gravity is curved space-time. They're both physical space-time. At present, the microscopic quantum world does not introduce new physical space-time. The microscopic quantum phenomena are described in the space-time of Newton, special relativity or general relativity respectively. However, there are many inconsistencies between quantum mechanics and special relativity, especially general relativity. People try to use string theory and circle theory to unify quantum mechanics and relativity, especially general relativity, which is not ideal at present. The mathematical form is too complicated and the physical connotation is not clear. Following the same line, we believe that if we recognize the construction characteristics of physical spacetime and eliminate the influence of subjective cognition on quantum phenomena, it is ideal to describe microscopic quantum phenomena with dual 4-dimensional spacetime, and many contradictions between quantum mechanics and relativity can be reasonably solved. The unification of the field also seems to have new ideas.

Keywords

Physical Space-Time, Construction, Characteristics, Wave Functions, Physical Meaning, Unified Field Theory

论物理时空的建构特征

——兼论量子力学双 4 维时空及统一场论新构想

赵国求¹, 李 康²

文章引用: 赵国求, 李康. 论物理时空的建构特征[J]. 现代物理, 2019, 9(2): 75-87.

DOI: 10.12677/mp.2019.92009

¹华中科技大学-WISCO联合实验室, 湖北 武汉

²杭州师范大学教授, 浙江 杭州

Email: zhao66@126.com, kangli@hznu.edu.cn

收稿日期: 2019年1月27日; 录用日期: 2019年2月12日; 发布日期: 2019年2月19日

摘要

牛顿时空描述宏观低速物体的运动规律, 狭义相对论时空描述宏观高速物体的运动规律, 有引力存在的时空是弯曲时空。它们都是物理时空。目前, 微观量子世界没有引入新的物理时空, 微观量子现象分别描述在牛顿、狭义相对论或者广义相对论时空中。但是量子力学与狭义相对论, 尤其是广义相对论之间存在许多不协调, 至今难以解决。遵循卡鲁扎-克莱因路线, 人们试图用弦论、圈论来统一量子力学与相对论, 尤其是广义相对论, 目前看来并不理想, 数学形式太复杂, 而物理内涵不清晰。遵循同样的路线, 我们认为, 如果承认物理时空具有建构特征, 要消除主观认知对量子现象的影响, 用双4维时空描述微观量子现象就比较理想, 且量子力学与相对论之间存在的许多矛盾, 也可以得到合理解决。场的统一似乎也有新思路。

关键词

物理时空, 建构, 特征, 波函数, 物理意义, 统一场论

Copyright © 2019 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

双4维时空量子力学基础包含三部分: 提出相互作用实在论(曹天予建构结构实在论的物理哲学版本), 明确物理本体的存在, 它是双4维时空量子力学的哲学基础; 建立大小自动可变的旋转场物质球物理模型, 推导出物质波波函数——物理波, 作为实验证明波函数实在性的理论基础; 创建双4维复时空(闵氏时空的复数推广), 协调相对论, 描述微观量子客体的运动规律[1]。

相互作用实在论包含广义相互作用原理和狭义相互作用原理两部分, 狭义相互作用原理专门讨论人与自然的关系。主要基本概念有: 1) 认知三要素: 主体、客体、观察信号, 强调观察信号在认知世界和物理时空建构中的作用; 2) 物理本体(自在实体): 未经观察的自然客体; 3) 物理实体(现象实体): 经观察, 系统的、稳定的、深刻反映事物本质的理性认知物[1]。4) 现象——事物外在的, 零散的, 易变的, 非本质的方面。

时间和空间是人类所有经验的背景。科学时空的哲学认知是: 不存在没有时空的物质, 也不存在没有物质的时空[2]。时空的哲学认知进入物理学描述: 选定参照物, 建立坐标系, 选定物理模型(点模型、机械球模型、旋转场物质球模型、弦模型、膜模型、圈模型等等), 讨论研究对象的运动规律。各种模型各有其优越性和不足, 但旋转场物质球模型最具挑战性。

物理时空: 牛顿、狭义相对论、广义相对论时空是物理时空, 有建构特征。量子力学时空: 闵氏时空的复数推广, 是物理时空, 也有建构特征。实时空是人类对时空认识的宏观简化。所谓物理时空的建

构特征, 是指所有物理时空的建立都有人的主观因素参与, 只是不同条件下, 形成主观认知的未知客观因素不同, 参与的程度不同, 建立物理时空时, 消除主观影响的方法不同而已[3]。

从牛顿力学到狭义相对论再到广义相对论, 虽然描述对象——质点模型不变, 但描述时空发生了变化; 时空的变化消除了现象认知中的主观因素, 实现了客观描述宏观物理世界。描述微观量子现象, 量子力学采用(更确切的说是“借用”)的是牛顿时空(宏观低速)、狭义相对论时空(宏观高速), 甚至广义相对论弯曲时空(引力介入), 以及经典力学的质点模型, 这显然是一个问题。量子力学认知领域进入了微观量子世界, 量子现象与宏观现象的形成机制发生了根本变化, 但量子力学没有通过建立自己的独立时空和物理模型, 去除认知量子现象中的主观因素, 实现主、客二分, 因此, 量子力学难以客观描述量子世界是必然的。

我们认为, 解决的办法: 考虑观察信号的量子属性, 通过采用大小可变的旋转场物质球模型, 将微观客体自身空间分布特性, 转化为量子力学描述时空的属性。这就是量子力学双 4 维复时空。双 4 维复时空能够客观描述微观量子世界[4]。能量、动量的量子化及“有形结构能量子化的量子跃迁”将导致双 4 维时空的量子化, 量子化的消失将回到点粒子经典连续时空[5]。

2. 牛顿、狭义相对论、广义相对论时空的建构特征

2.1. 牛顿绝对时空的建构特征及“现象”对主观依赖性的消除

物体的运动状态及其时空特征, 必然带有观测信号的烙印[1]。最基本的观察信号是连续的光。物理学中, 参照物和研究对象都抽象成质点, 质点无大小, 观察信号对坐标系(建于参照物之上)、描述对象时空特征的影响都无法呈现, 观察者无法通过观察信号区分时空结构的变化——可建立绝对坐标系。同时, 牛顿力学预设: 物理本体(自在实体) = 物理实体(现象实体)。

可见, 牛顿力学其实也有现象对观察主体的依赖性, 只是在瞬时作用、质点抽象及绝对坐标系(建于以太之上)的建立中, 观察者所使用的观察信号对时空框架及观察现象的影响完全忽略掉了。牛顿时空是一个空空的舞台背景, 一切自然现象都描述在这样的时空背景之中。这叫背景相关。它与宏观经验相符, 认定实现了主、客二分, 能够客观描述宏观低速运动物体的运动规律。

牛顿力学: 物质告诉时空如何搭建背景时空, 时空告诉物质如何在背景中运动。两点间距离不变量: 若 $\Delta s = x_2 - x_1$ 有

$$ds^2 = dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2$$

上式代表定义域空间 $R^3 \times R^1$ 的平直性结构, 勾股定理成立, 而且空间和时间各自独立。而等价表述为:

$$ds^2 = g_{ij} dx_i dx_j, i, j = 1, 2, 3 \text{ (指标缩并求和)}$$

$$g_{ij} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

g_{ij} 称为欧几里得(Euclid)度规。它是二阶 $SO(3)$ 不变张量。牛顿力学定律具有伽利略协变性, 即在

$$x' = x + vt, y' = y, z' = z, t' = t, x' = Ax, A \in SO(3)$$

的变换中方程的形式不变。其中 v 是常数, 保证了坐标变换中的惯性系特征及时空的平直性。

2.2. 狭义相对论时空的建构特征及“现象”对主观依赖性的消除

站在牛顿时空立场, 物体高速运动, 如果时空不变, 洛伦兹则认为, 长度在物体运动方向发生收缩

[6]。现象对观察者有主观依赖性。爱因斯坦改变了牛顿的思路, 用有限速度的连续光信号“中点”对时(火车中点对时), 将高速运动中“现象对观察者的主观依赖性”转化为相对运动坐标系的时空属性[1] [7]。时空发生了变化, 物体自身不变, 并可抽象成质点, 客观描述宏观高速运动物体的运动规律, 建立了狭义相对论。

狭义相对论: 物质告诉时空在运动方向如何修正测量单位, 时空告诉物质运动方向如何长度收缩、时间减缓[6]。

两点间距离不变量: 若 $\Delta s = x_2 - x_1$ 有

$$ds^2 = dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2 + dx_4^2$$

上式代表定义域为四维闵可夫斯基空间 M^4 的平直性结构, 定义有四维向量场 A_μ 、 A^μ , 以及二阶度规张量 $g_{\mu\nu}$, 还有动量、能量三角公式, 类似勾股定理成立, 而且空间和时间彼此不独立。等价表述为:

$$ds^2 = g_{\mu\nu} dx_\mu dx_\nu, \mu, \nu = 1, 2, 3, 4 \quad (\text{指标缩并求和})$$

$$M^4 = \{x^\mu = (x^1, x^2, x^3, x^4), x^1 = ct, (x^2, x^3, x^4) \in R^3\}$$

$$A_\mu = (A_1, A_2, A_3, A_4), A^\mu = (A^1, A^2, A^3, A^4), g_{\mu\nu} = g^{\mu\nu}$$

$$g_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$x' = (x - vt) / (1 - \beta^2)^{1/2}, \beta = v/c$$

物理定律对于洛伦兹变换 $y' = y, z' = z$

$$t' = (t - vx/c^2) / (1 - \beta^2)^{1/2}$$

$$x^\mu \in M^4$$

具有不变性。相对论能量公式: $E^2 = c^2 p^2 + m_0^2 c^4$, m_0 为静止质量。亦可表述为

$$m^2 c^2 = p^2 + m_0^2 c^4, p = mv, m \text{ 为运动质量}$$

或表述为矢量形式 $mc = p + m_0 c$ 。

上式即为 4 维时空中的动量三角形, 类似勾股定理[8]。

洛伦兹变换中, 当 $v=0$ 或 $c=\infty$ 时, 洛伦兹变换过渡到伽利略变换, 闵可夫斯基时空度规演变成牛顿时空度规, 狭义相对论时空回到牛顿时空。

2.3. 广义相对论时空的建立及“现象对观察者主观依赖性”的消除

牛顿和狭义相对论时空中, 光走直线; 有引力场存在, 光走曲线, 球状客体变成椭球状[9]; 若“忽视引力场对时空的影响”, 保持牛顿时空不变, 光走曲线及椭球形态出现就会变成现象对观察者的主观依赖性。考虑引力场使时空发生弯曲及引力势的作用特征, “观察者的主观依赖性”变成了时空的属性。时空发生了变化, 现象与观察者无关, 主、客二分, 同样实现了客观描述引力世界。广义相对论: 物质告诉时空如何弯曲, 时空告诉物质如何在弯曲时空中运动。物质和时空融为一体。背景独立。

广义相对的论建立依赖于广义相对性原理, 等效原理和拉格朗日动力学原理。广义相对性原理: 所有坐标系在描述物理定律上是平等的, 即无论对惯性或非惯性系变换, 定律的微分方程都是协变的。四维不变距离微元:

$$ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu, g_{\mu\nu} = g_{\nu\mu} \quad (\text{二阶协变对称张量场})$$

定义域空间为黎曼流形 $(E^4, g_{\mu\nu})$, 度规 $g_{\mu\nu}$ 与时空位置有关, $g_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 0 & G_{ij} \end{pmatrix}$,

G_{ij} 为三阶正定矩阵。于是

$$ds^2 = -c^2 t^2 + G_{ij} dx^i dx^j$$

这就是广义相对论的广义协变性, 它是洛伦兹协变性的推广。称为广义相对性原理。定律的微分方程在 $g_{\mu\nu}$ 的变换中都是协变的。

等效原理: 一个做加速运动的非惯性系中的惯性力, 等效于一个引力场。换句话说, 由广义协变性原理, 它要求黎曼空间度规张量 $g_{\mu\nu}$ 代表引力势[8]。而黎曼流形上不超过二阶导数项的几何不变量只有标量曲率 R 和常数 λ 。于是满足广义相对性原理的 $g_{\mu\nu}$ 的泛函作用量密度形式, 只能是[8]:

$$L = R + \lambda$$

加上外给能量动量应力张量 $(8\pi G/c^4) S_{\mu\nu} g^{\mu\nu}$ 得到广义相对论的泛函作用量密度

$$L = R + \lambda + (8\pi G/c^4) S_{\mu\nu} g^{\mu\nu}$$

若 $\lambda = 0$, 且 $S = S_{\mu\nu} g^{\mu\nu}$, $R = g^{\mu\nu} R_{\mu\nu}$, $R_{\mu\nu}$ 为 Ricci 曲率, $T_{\mu\nu} = \delta(S(-g)^{1/2}) / \delta g^{\mu\nu}$, $g = |g_{\mu\nu}|$ 是度规矩阵的行列式。利用拉格朗日动力学原理, 构造拉格朗日密度[7]

$$L = R + (8\pi G/c^4) S$$

得到爱因斯坦引力场方程

$$R_{\mu\nu} - (1/2) g_{\mu\nu} R = -(8\pi G/c^4) T_{\mu\nu}$$

$T_{\mu\nu}$ 为能动张量。 $g_{\mu\nu}$ 导数不超过二阶的约束, 来源于经典引力场方程引力势的导数不超过二阶。

对于局域平直时空, 洛伦兹广义协变性回到洛伦兹协变性。度规 $g_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 0 & G_{ij} \end{pmatrix}$, 演变成

$$g_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \text{ 定义域由黎曼空间 } (E^4, g_{\mu\nu}) \text{ 回到四维闵可夫斯基空间 } M^4. \text{ 描述物理规律的动力学}$$

方程从广义相对论方程演变成狭义相对论方程。

卡鲁扎-克莱因试图建构 5 维时空统一描述引力场与电磁场, 虽然它对思考场的统一有重要启示作用, 但人们对其没有统一的内在物理机制感到不快, 没有得到广泛接受。双 4 维时空量子力学尽管也是这一思维路线的产物, 但我们在统一内在物理机制的思考中有新的实质性进展。

3. 双 4 维时空的建立及量子现象对主观依赖性的消除

采用量化的光(非连续光)观察微观客体, 描述时空应该与牛顿、狭义相对论有区别。微观量子客体与宏观客体一样, 一定存在自身的空间分布。在微观认知领域, 人们实际已经进入微观客体内部观察量子现象, “点模型”隐藏的空间自由度对描述的量子现象有影响, 如若仍然忽略不计, 就会体现为量子现象对主观的依赖性。量子力学中点模型不适用, 微观量子客体空间分布应该是量子力学时空的一部分, 采用场物质球模型, 建立双 4 维复数时空, 就可以做到这一点。“场物质球”及由此产生的“物质波场”是“粒子和波”的统一。球面曲率的大小描述粒子性, 曲率的变化描述波动性, 物质波就描述在量子力

学时空中[1]。微观客体之间的相互作用通过规范场作用体现。

3.1. 微观客体的几何描述

研究表明, 现代物理学不可能把微观客体的空间坐标定位得比康普顿波长更小[10], 而这正是双 4 维时空量子力学创建场物质球模型的实验基础。微观客体是“转动的场物质球”。其状态:

1) 静态几何描述: 曲率半径由

$$R_0 = \hbar/m_0c \quad (1)$$

定义。 m_0 ——物质场静质量, R_0 呈现静态微观客体“内在”物质波场分布的广延性。而曲率 K_0 由

$$K_0 = 1/R_0 = m_0c/\hbar \quad (2)$$

定义。呈现静态微观客体“表面”的弯曲程度。 R_0 、 K_0 是一个相对任何静止参考系的不变量, 与空间位置无关。它是一个不可直接观察量, 但真实存在, 类似物理本体, K_0 称为该微观客体的量子曲率。

2) 动态几何描述: 曲率半径由

$$R_1 = \hbar/mc \quad (3)$$

定义。曲率由

$$k_1 = 1/R_1 = mc/\hbar \quad (4)$$

定义。 m ——运动质量, 质量 m 增大, 曲率半径减小, 曲率增大。运动场物质球是一个形体可变动的量子客体, 在平动与自旋中, 保证球的边缘线速不超过光速, 与相对论协调。它是物理理论中的物理实体(相互作用实在论中称为现象实体)[1]。

3) 三维空间映射: 曲率半径由

$$R_i = \hbar/mv_i \quad (5)$$

定义。曲率由

$$k_i = mv_i/\hbar \quad (6)$$

定义。 $p_i = mv_i$ 是相对论动量, 三维空间可观察量。

可见, 微观客体在三维可观察空间的‘映射’, 其曲率半径既可以非常之大, 也可以非常之小, 类似于对波长的理解[1]。它与微观客体自身空间结构 R_0 、 R_1 不等同, 类似一种“影象”。如果微观客体的动量、能量是在电磁场中获得的, 我们称其为电磁性曲率或电磁性量子曲率。

4) 转动频率: 由

$$\nu_0 = E_0/h, \nu_i = E_i/h, (\nu_i = E_i/h) \quad (7)$$

定义, $E_0 = m_0c^2, E = mc^2, (E_i = m_0v_i^2/2 \text{ 或 } E_i = mv_i^2/2)$ 与量子力学及相对论的基本假设一致。

5) 场物质密度: 由

$$\eta = m/V = \eta(k) \quad (8)$$

定义。 V 为场物质球体积, $V = V(R), R = R(k)$, 物质场密度 η 是曲率 k 的函数, $K = k_0, k_1, k_i, (k_1 - k_i = K_0)$ 。可以证明: 场物质球 V 减小, k 增大, 物质场密度 η 升高; 场物质球 V 增大, k 减小, 物质场密度 η 降低, $\eta(k)$ 与 k 正相关。

但按我们的理解, R_0 、 R_1 应该不小于普朗克长度, 小于普朗克长度以下的物理理论, 目前我们还不知道该怎么建立。因此在现有理论中场物质球的场物质密度、能量密度都不可能无穷大。回避了点粒子理论的无穷大困难。

3.2. 质点模型隐藏的空间自由度

曲率矢量 k 的分量 $k_1, k_i (i=2,3,4)$ 构成的四维曲率坐标

$$k(k_1, -k_2, -k_3, -k_4)$$

是微观客体质点模型隐藏的空间自由度, 其中, $k_1 = mc/\hbar, k_i = p_i/\hbar = mv_i/\hbar$ 。

微观客体的曲率半径和曲率抽象, 体现了微观客体的几何结构和运动状态。 R_0, K_0 不可直接观察; R_i, k_i 有可观察现象对应, 映射到三维空间; R_1, k_1 是联系 R_0, K_0 和 R_i, k_i 的桥梁, 在光锥面上。若 R_0, K_0 不存在, 则 R_1, k_1, R_i, k_i 不存在。 R_0, K_0 是洛伦兹变换不变量, 是一切物理现象之源, 可承担物理学中“物理本体”角色。在相互作用实在论中, 我们称其为“自在实体”——不可直接观察量[1]。

场物质球曲率半径 R (或曲率 k) 的变化, 必然带来微观客体球内场物质密度分布的变化, 这将为我们理解波函数的物质实在性提供基础。

3.3. 场物质球的坐标复空间与曲率复空间描述[1]

1) 坐标复空间

$$\begin{aligned} Z &= x + iy = re^{i\alpha} \\ r &= r(x, y), r = (x^2 + y^2)^{1/2} \end{aligned} \quad (9)$$

描述球心在坐标原点的复空间球面坐标。

若上述复数的模 r , 由微观客体曲率半径 R 定义, 令 $r = R$, 则上述复空间的球面坐标, 描述一半径为 R 的场物质球球面坐标, 且

$$R = R(x, y), R = (x^2 + y^2)^{1/2} \quad (10)$$

静态微观客体: $R = R_0 = \hbar/m_0c$; 运动微观客体: $R = R_1 = \hbar/mc$; 三维空间的映射: $R = R_i = \hbar/mc_i$ 。
场物质球描述于坐标复空间。

2) 曲率复空间

引入曲率复空间:

$$W = 1/Z^* = u(x, y) + iv(x, y) = (1/r)e^{i\alpha} = ke^{i\alpha} \quad (11)$$

W 是 Z 的映射空间, 描述球心在坐标原点, 模为 $k(x, y) = 1/r$ 的曲率球面坐标。同样, 若 k 由微观客体场物质球的曲率 $k = 1/R$ 定义, 则曲率复空间 W 描述半径为 R 的场物质球的曲率球面坐标。静态微观客体: $k = K_0 = 1/R_0$, 运动微观客体: $k = k_1 = 1/R_1$, 三维空间的映射: $k = K_i = 1/R_i$ 。

对于 Z 空间, 物质波场在球内, 球外是空的, 宏观大尺度下可简化成质点; 而对于映射空间 W , 物质波场通过曲率映射到球外, 呈全域空间分布, 球内是空的。相对于场物质球, Z 空间与 W 空间相互映射, 描述同一物质波场, 类似对偶假设。量子力学中的所有波函数都描述在这一空间中。

量子力学中波函数的全空间分布特性, 就是在这种空间转换中不知不觉完成的。电子全空间分布在 4 维实空间不是真实的, 是内、外部空间转换, 理论描述中数学物理应用方便的需要, 也是描述量子现象的需要。

在实时空, 我们用质点的运动描述物体的轨道运动或概率分布; 而在复空间, 则用曲率半径 R 和曲率 k 的运动和变化描述微观客体的物质波。物质波是微观客体内部场物质密度或空间结构的波动运动。这就是微观客体不作轨道运动的物理意义。

曲率 k 的引入是对波矢物理意义的拓展, 是物质的几何化, 是对点模型隐藏空间自由度的揭示, 可

归于量子力学描述时空的属性。物质波场的运动状态与微观客体受到的相互作用相关, 由规范场来讨论。

3.4. 物质波的生成与双 4 维时空

1) 物质波的生成及其波函数

微观客体内部场物质的旋转运动, 在曲率复空间表示为

$$W = 1/Z^* = u + iv = ke^{i\omega t} \quad (12)$$

$k = 1/R$, ω 为微观客体内部场物质旋转的角频率。

理论上, 旋转场物质球是旋转矢量场的物理原型, 也是传统量子力学定义希尔伯特空间旋转矢量和彭罗斯扭曲子空间的物理原型。自旋是场物质球的基本性质, 它是狄拉克方程自旋解的物理基础。场物质球描述转化为旋转矢量场描述。

设静态微观客体自身的坐标系为 $K_0(x_0, t_0)$, “静态微观客体内部场物质的旋转运动——自旋”, 以自身坐标系的时间 t_0 为自由变量的场物质运动方程是

$$\psi_0 = A_0 \exp(i\omega_0 t_0) \quad (13)$$

式中, $\omega_0 = m_0 c^2 / \hbar$ 。

若微观客体(K_0 系)以速度 v 相对坐标系 $K(x, t)$ (观测系)沿 x 轴正方向匀速运动, 利用洛伦兹变换[1]: $t_0 = (t - vx/c^2) / (1 - v^2/c^2)^{1/2}$, 代入式(13)得

$$\begin{aligned} \Psi &= A \exp\left\{i\omega_0(t - vx/c^2) / (1 - v^2/c^2)^{1/2}\right\} \\ &= A \exp\left\{-i(p \cdot x - Et) / \hbar\right\} \\ &= A \exp\left\{-i(k_\mu x_\mu)\right\} \end{aligned} \quad (14)$$

其中 $\omega = \omega_0 / (1 - v^2/c^2)^{1/2} = mc^2 / \hbar$, $\omega t = Et / \hbar$, $E = mc^2$, $p = mv_i$, $k_i = p_i / \hbar$, $k_i = mc / \hbar$ 。

$x_i = ct$, $i = 2, 3, 4$, $k_\mu = k_{1,2,3,4}$, $k_\mu x_\mu$ 称为双 4 维复时空 $W(x, k)$ 。

(14)式与传统量子力学自由粒子“点模型”波函数假设数学形式完全一样, 但物理意义明确。物质波的本质是旋转场物质的波动运动, 是物理波! 自由微观客体的状态波函数是平面物质波。振幅 A 是常数(归一化因子)。

可以证明, 物质密度与概率密度正相关。场物质球模型暗示, 可寻求物质波与概率现象之间合乎逻辑的内在联系。更为可喜的是, 波函数的物理实在性, 2017 年已经由史保森等人的“量子螺旋双缝实验”所证实[11]。

其实, “静态”转动场物质球波函数就是自旋波函数。数学上可以证明, 复相空间 $k_\mu x_\mu$ 即为物质波所在时空 $W(x, k)$ 。物质波是物理波, 相对论与量子力学从物理模型源头就得到统一。费曼路径积分的传播子就在这一时空中运行, 史保森等人的实验是可信的。

2) 双 4 维时空的物质波波函数

双 4 维时空 $W(x, k)$ 描述的物质波波函数

$$\psi(x, k) = A(x, k) \exp(-ik_\mu x_\mu) \quad (15)$$

定态情况下, $A(x, k)$ 仅与三维空间坐标和三维曲率坐标有关。

$$A(x, k) = \sum_0^\infty C_n A_n(x, k), k_\mu = k_{2,3,4}, x_\mu = x_{2,3,4}$$

物质波的振幅, 是空间坐标 x 与微观客体自身空间结构 k 的函数。利用威格纳“星号*”乘运算数

学方法, 它满足如下微分方程

$$H(x, k) \exp \left[(i/2) (\bar{\partial}_x \bar{\partial}_k - \bar{\partial}_k \bar{\partial}_x) \right] A(x, k) = H(x, k) * A(x, k) = EA(x, k) \quad (16)$$

式中, $H(x, k)$ 是体系的经典哈密顿函数。*运算是 Moyal 乘积。

物理系统总体波函数波长可以通过广义德布罗意关系式定义, 同样适用于物质波的波动运动。

上式中 Moyal 乘积中的导数是普通导数, 运算于双 3 维时空(6 维), 如果 $(\bar{\partial}_x \bar{\partial}_k - \bar{\partial}_k \bar{\partial}_x)$ 对双 4 维时空求导, $H(x, k)$ 是体系的含时相对论哈密顿函数, 微分算子采用狄拉克算子形式, 将得到含时相对论动力学微分方程。

3) 物质波 $\psi(x, k)$ 与概率函数 $\psi(x)$ 、物质密度函数 $\Phi(k)$

双 4 维时空中点 $W(x, k)$ 表示:

矢量: $K(k_1, k_2, k_3, k_4)$ 描述微观客体自身空间结构, 呈现微观客体的存在形态及物质密度分布;

矢量: $X(x_1, x_2, x_3, x_4)$ 描述微观客体在 4 维实时时空的所在位置, 有不确定性, 不确定性(或概率属性)与微观客体空间分布及物质密度分布有关。

a) $\psi(x, k)$ 与 $\psi(x)$ 及 $\Phi(k)$ 的映射关系[1]: 利用

$$A(x, k) = \int_{-\infty}^{\infty} d\xi e^{-i\xi k} \psi^* \left[x - (1/2)\xi \right] \psi \left[x + (1/2)\xi \right]$$

$$A(x, k) = \int_{-\infty}^{\infty} d\xi e^{-i\xi x} \Phi^* \left[k - (1/2)\xi \right] \Phi \left[k + (1/2)\xi \right]$$

对振幅 $A(x, k)$ 的积分运算中:

消去变量 k , $A(x, k)$ 映射到双 4 维时空的实部, 得到微观客体在坐标点 x 上的概率密度分布函数 $\rho(x)$

$$\int_{-\infty}^{\infty} A(x, k) dk = \psi(x)^* \psi(x) = |\psi(x)|^2 = \rho(x) \quad (17)$$

归一化采用:

$$\int_{\tau} c \rho(x) d\tau = \int_{\tau} c |\psi(x)|^2 d\tau = 1 \quad (18)$$

消去变量 k , 实际物理意义是将微观客体在双 4 维时空中虚部的场物质密度, 转换成双 4 维时空实部的概率属性(物质告诉时空如何具有概率属性, 且时空告诉物质如何作概率运动)。我们认为, 这就是玻恩解释把 $|\psi(x)|^2$ 理解为微观客体在实空间 x 点出现的概率(或体积内 $d\tau$ 出现的概率密度)的依据所在。

消去变量 x , $A(x, k)$ 映射到双 4 维复时空的虚部, 进入微观客体内部空间, 得到双 4 维时空由 k 量度的物质场密度分布函数 η

$$\int_{-\infty}^{\infty} A(x, k) dx = \Phi(k)^* \Phi(k) = |\Phi(k)|^2 = \eta(k) \quad (19)$$

归一化采用:

$$\int_{\nu} c \eta(k) d\nu = \int_{\nu} c |\Phi(k)|^2 d\nu = \int_{\nu} c d\nu / \nu = 1 \quad (20)$$

式(19)中, 若 $k =$ 常数, 表明微观客体形体结构全空间不变, 物质密度不变, 刚好与全空间概率密度分布不变等价, 归一化的物理意义与(18)相同。 $K =$ 常数, 微观客体不受力, 作匀速运动, 是平面波, 采用 δ 函数归一化。若 $k \neq$ 常数, 则 $P \neq$ 常数, 动量发生了变化, 与时间有关, 微观客体在全空间受到了力的作用, 形体结构发生了变化, 物质密度发生变化, 概率密度也将发生变化, 这已经不是定态波函数了。

b) $\psi(x)$ 与 $\Phi(k)$ 用傅里叶变换联系

$$\psi(x) = (2\pi\hbar)^{(-1/2)} \int_{-\infty}^{\infty} \Phi(k) \exp\{i(kx)\} d(k) \quad (21-1)$$

$$\Phi(k) = (2\pi\hbar)^{(-1/2)} \int_{-\infty}^{\infty} \psi(x) \exp\{i(kx)\} dx \quad (21-2)$$

场物质密度分布与概率密度分布发生了联系, 类似一种表象变换。量子力学中 $\psi(x)$ 与 $\Phi(p)$ 之间的傅里叶变换有了新的物理意义。双 4 维时空实部微观客体概率密度分布可以映射为双 4 维时空虚部微观客体场物质密度分布; 而双 4 维时空虚部微观客体场物质密度分布也可以映射为双 4 维时空实部微观客体概率密度分布。傅里叶变换也演变成量子测量中物质波—概率波的变换公式。

量子力学时空 $W(x, k)$, x 描述微观客体所在位置, 有不确定性, k 描述微观客体物质密度分布(由结构体现的曲率分布)。微观客体的几何特性演变成描述空间的属性, 实现了量子现象的客观描述。而这在传统量子力学中常常被引入主观认知, 变成量子现象对主观的依赖性。双 4 维时空量子力学: 曲率的大小描述粒子性, 曲率的变化描述波动性; 物质告诉时空如何具有概率属性, 时空告诉物质如何作概率运动[3]。

其实, 如果认为时空具有建构特征, 而牛顿时空、狭义相对论时空、广义相对论时空, 都有将现象对人的主观依赖性归于时空属性的操作成分, 那么, 双 4 维时空作为描述量子现象的微观时空, 水到渠成。因为, 在前述三种经典时空中无法理解的微观客体波粒二重属性及波函数的概率属性(现象对主观的依赖性), 都将归于双 4 维时空的属性了。人们没有必要再为波粒集微观客体于一身及量子概率的来源而苦恼, 因为, 在双 4 维时空中, 波粒的统一, 奇异的量子概率, 已经通过时空曲率坐标 k 的变化, 纳入描述时空——双 4 维时空, 而代表微观客体自身的波函数则是双 4 维时空中的物理波, 当然有实在性。这是解决现有量子力学认知困难的最有趣、简便而又客观的认知模式和时空建构方法。基于此, 曹天予的建构结构实在论更加有了结坚实的物理基础。

4) 双 4 维复时空数学: 双 4 元数复空间、双 4 维复相空间、双 4 维复时空

a) 双 4 元数复空间

定义: $Z_\mu = x_\mu + iy_\mu, Z_\mu^* = x_\mu - iy_\mu, \mu = 1, 2, 3, 4$ 。

$$W(x, y) = 1/Z^* = u(x, y) + iv(x, y) = Ae^{i\alpha}$$

波函数:

$$\begin{aligned} \psi(x, y) &= u(x, y) + iv(x, y) \\ &= A(x, y) \exp(-iy_\mu x_\mu) \end{aligned} \quad (22)$$

这里 y_μ, x_μ 为双 4 元数复空间虚、实空间坐标, 具有无量纲特性, 出现在波函数的相位中。波函数是数学波。

b) 双 4 维复相空间

由双 4 元数复空间 $Z_\mu = x_\mu + iy_\mu, Z_\mu^* = x_\mu - iy_\mu$ 形式, 可以定义双 4 维复相空间。当 x_μ 看成是矢量 x 的 4 维分量, y_μ 看成是矢量 y 的 4 维分量时,

$$x_\mu = (x_1, -x_2, -x_3, -x_4), y_\mu = (y_1, -y_2, -y_3, -y_4)$$

则 $Z_\mu = x_\mu + iy_\mu$ 就可以看成是由矢量 x, y 生成的双 4 维复相空间。

波函数:

$$\begin{aligned} \psi(x, y) &= u(x, y) + iv(x, y) \\ &= A(x, y) \exp(-iy_\mu x_\mu) \end{aligned} \quad (23)$$

式(23)是双 4 维复相空间中的波函数, 它与波函数(22)形式完全相同, 但相空间坐标 x_μ, y_μ 是矢量 x, y 。

y 的分量, 具有矢量 x 、 y 的属性, 有实在论意义, 但必须保证相位角 y_μ , x_μ 具有无量纲特性。

c) 双 4 维复时空中的物质波

对双 4 维复相空间 $Z_\mu = x_\mu + iy_\mu$ 作 $y = k$ 的变换, $y_\mu = k_\mu = (k_1, -k_2, -k_3, -k_4)$, y 矢量变换成与微观客体曲率 k 相关的洛伦兹矢量。由是生成了新的具有物理意义的双 4 维复相空间: $W_\mu = x_\mu + ik_\mu$, 因为 x_μ 中, $x_1 = ct$, 所以我们称其为双 4 维复数时空, 或简称双 4 维时空。

$$X(x_1, -x_2, -x_3, -x_4), K(k_1, -k_2, -k_3, -k_4)$$

波函数:

$$\begin{aligned}\psi(x, k) &= u(x, k) + iv(x, k) \\ &= A(x, k) \exp(-ik_\mu x_\mu)\end{aligned}\quad (24)$$

这就是(14)式。由位置矢量 x 与曲率矢量 k 的分量构成了一个双 4 维复时空 $W = x_\mu + ik_\mu$, 物质波就在其中, 相位角 $(k_\mu x_\mu)$ 满足无量纲要求。波函数是物理波。

一般称量子力学波函数相空间为数学空间。其实, 双 4 维复相空间是微观客体所在的复空间通过人对运动微观客体的观察, 在相互作用中自动显现的描述物质波的真实物理空间。所以我们称其为双 4 维复时空。即(场物质球 + 复空间) + 观察系 = 物质波 + 双 4 维复时空。费曼路径积分就在这一空间中进行。

双 4 维复时空是量子力学的特有空间。微观客体自身的空间结构 k_μ , 既作为时空坐标进入描述时空, 也作为描述自身运动状态的状态参量, 呈现在波函数的相位中。量子力学时空是背景相关和背景独立的复合。它是背景相关到背景独立过渡的中间状态。量子场论中的波矢空间, 其实就是双 4 维复时空的虚部空间, 是物质和时空的统一, 作为特例, 量子场论也是背景独立的, 且线性而且平直。研究量子力学与引力场的统一, 将会从两种背景独立中得到启示。

双 4 维复时空 $W(x, k)$ 的度规张量

$$\begin{aligned}g^{\mu\nu} &= \text{diag}(1, -1, -1, -1), \\ x^2 &= x_\mu g^{\mu\nu} x_\nu = x_1^2 - x_2^2 - x_3^2 - x_4^2, \\ K^2 &= K_\mu g^{\mu\nu} K_\nu = k_1^2 - k_2^2 - k_3^2 - k_4^2, \\ \text{以及 } |Z|^2 &= ZZ^* = x^2 + y^2, |Z|^2 = ZZ^* = x^2 + k^2\end{aligned}$$

都是 Lorentz 不变量。所以, 我们认为 $W(x, k)$ 是 $M^4(x)$ 的复数拓展。狄拉克方程在 Lorentz 变换中具有不变性。 $dK_0^2 = dk_1^2 - dk_2^2 - dk_3^2 - dk_4^2$ 中的 dK_0 是坐标变换中的不变量, 它就是人们期待的那个物理本体。

显然, 双 4 维时空中, 伽利略变换仍然是洛伦兹变换的特例。经典力学与量子力学的统一, 通过物理模型的变化及时空度规的演变得得到引领, 狄拉克方程不变性也将过渡到薛定谔方程的不变性。

4. 从双 4 维时空 $(W, g_{\mu\nu})$ 度规 $g_{\mu\nu}$ 到黎曼空间 $(E^4, g_{\mu\nu})$ 度规 $g_{\mu\nu}$ 的演变及场的统一新思路探讨

双 4 维时空 $(W, g_{\mu\nu})$ 度规 $g_{\mu\nu}$ 具有闵可夫斯基时空 $(M^4, g_{\mu\nu})$ 度规 $g_{\mu\nu}$ 的属性, 讨论量子力学与广义相对论的统一, 与狭义相对论一样, 当然也就要考虑黎曼空间 $(E^4, g_{\mu\nu})$ 度规 $g_{\mu\nu}$ 到双 4 维时空 $(W, g_{\mu\nu})$ 度规 $g_{\mu\nu}$ 的过渡。

引力子被定义为一个自旋为 2、静止质量为零的玻色子。双 4 维时空中光子是一个转动的场物质球, 自由运动, 速度为 c , 静止质量为零, 描述时空线性平直, 但是有运动质量(惯性质量)。进入引力场, 惯性质量将等于引力质量, 时空破缺(真空破缺?), 描述时空弯曲、非线性。自由运动的球状物体有运动质

量(惯性质量), 亦有引力质量, 其形状将变成椭球[9]。于是一个在双 4 维时空 $(W, g_{\mu\nu})$ 中自旋为 1 的球状光子, 进入引力场将变成椭球引力子, 自旋为 2。消除引力场, 返回双 4 维时空 $(W, g_{\mu\nu})$, 椭球引力子退化为球状光子, 由双 4 维时空量子场论来描述(数学形式与点粒子狄拉克量子场论相同)。通过玻色子构形的变化可以看到场的变化。

于是, 在爱因斯坦自由下落的局部平直时空(电梯)中, 由于引力场被消除, 人们看到的是球状光子的自由运动; 而惯性空间自由电梯的加速运动, 由于引进了引力场(惯性力 = 引力), 人们看到的则是一个椭球引力子的运动。引力场使惯性空间中的球状变成了弯曲空间中的椭球状。广义相对论中, 引力势就是弯曲空间的度规 $g_{\mu\nu}$ 。引力势变化, 度规 $g_{\mu\nu}$ 变化(或仿射联络变化), 椭球的形状也变化。假设椭球表面任意一点的曲率 $r_{\mu\nu}$ 与对应点时空曲率 $R_{\mu\nu}$ (或仿射联络 $L_{\mu\nu}$) 相等, 那么, 我们可以用椭球引力子的运动和变化描述引力场。物质与时空有机融合, 背景独立就此形成。椭球引力子在引力场中的自由运动方程, 由含有自旋(挠率)特征的测地线方程描述。

爱因斯坦广义相对论宇宙模型是一个静态模型, 用黎曼空间来描述。黎曼空间标量曲率 R 为不变量。一个球状宇宙, 在弯曲空间的某一点, 时空曲率为 $R_{\mu\nu}$, 若 $\lambda g_{\mu\nu} R$ 看作是度规 $g_{\mu\nu}$ (引力势)对标量曲率 R 的影响, 即引力场对时空曲率 $R_{\mu\nu}$ 的贡献, λ 则为某一比例系数。 $(8\pi G/c^4) S_{\mu\nu} g^{\mu\nu}$ 为外给能量动量应力张量对 $R_{\mu\nu}$ 的贡献, 那么, 我们将得到

$$R_{\mu\nu} = \lambda g_{\mu\nu} R + (8\pi G/c^4) S_{\mu\nu} g^{\mu\nu}$$

令 $\lambda = 1/2$, 则 $R_{\mu\nu} - (1/2) g_{\mu\nu} R = (8\pi G/c^4) S_{\mu\nu} g^{\mu\nu}$ 。

它就是爱因斯坦引力场方程。爱因斯坦引力场方程有了可理解的物理基础。

外给能量动量应力张量可以由电磁场、强场、弱场形成, 构造统一的拉格朗日密度时可一并考虑。爱因斯坦引力场方程可由拉格朗日动力学原理推导出来。引力场的存在让时空变得弯曲, 弯曲时空的度规就是引力势。用弯曲时空度规及时空曲率的变化描述引力场, 是爱因斯坦引力场方程的功能。

椭球在引力场中运动, 其大小发生变化。若椭球引力子的自旋对应一个端点在椭球中心的旋转矢量。椭球的运动状态由波函数 $\psi(r_{\mu\nu}(x)) = Ae^{-i\omega t}$ 描述。矢量旋转一周, 模长 A 在变化, 为保证椭圆线速不超过光速, 其转速 ω 必须是由快(达到短半轴最快)到慢(达到长半轴最慢), 再由慢(长半轴)到快(短半轴); 然后, 再由快(短半轴)到慢(长半轴), 再由慢(长半轴)到快(短半轴)发生周期性变化。矢量旋转一周, 角速度 ω 完成快→慢两个周期变化。因此, 引力子自旋为 2 很好理解。

弯曲时空曲率 $R_{\mu\nu}$ (或联络 $L_{\mu\nu}$) 与椭球引力子曲率 $r_{\mu\nu}(x)$ 对应, 用椭球引力子波函数 $\psi(r_{\mu\nu}(x))$ 描述引力场, 得到引力场测地线方程[12]。引力子运动搅动的时空涟漪就是引力波。

弯曲时空向平直时空的过渡, 将体现为, 弯曲时空 $(E^4, g_{\mu\nu})$ 度规 $g_{\mu\nu}$ 向平直双 4 维时空 $(W, g_{\mu\nu})$, 球模型)、狭义相对论闵氏时空 $(E^4, g_{\mu\nu})$, 点模型)度规 $g_{\mu\nu}$ 的过渡; 椭球引力子波函数 $\psi(r_{\mu\nu}(x))$ 向双 4 维时空球光子 $\psi(k)$ 描述的过渡; 弯曲时空非线性方程, 向平直时空线性方程的过渡。这里度规或联络将起到重要作用[13]。而各个空间对可观察现象的描述都是客观的, 有效的。

质量缘于真空对称性破缺, 有质量就有引力。宇宙是从真空破缺中从无引力到有引力逐渐形成的。引力波、椭球引力子是引力存在的必然产物和见证。引力子椭球模型中宇宙的形成, 需要真空对称性破缺机制。

5. 结论与讨论

1) 物理时空具有建构特征。“现象对观察者的主观依赖性”, 普遍存在于人与自然的关系之中, 当把它合理归于时空的属性后, 就可实现客观描述物质世界。

2) 量子力学时空是双 4 维时空, 同样具有建构特征。双 4 维时空中, 物质告诉时空如何具有概率属性, 时空告诉物质如何作概率运动。双 4 维时空量子力学中, 相对论与量子力学是协调的。

3) 量子力学——线性平直时空, 广义相对论——非线性弯曲时空。传统量子化方法不适合引力场。统一场论必须寻找新途径, 或许可以从不同时空度规和玻色子形态的相互转化演变入手。双 4 维时空量子力学可能有启发, 帮助解决一些存在的传统困难。

4) 世界著名物理学史学家、物理学哲学家曹天予教授最近明确指出, 量子力学双 4 维时空: a) 沿着 Kaluza-Klein 的传统, 也是 Pauli 导出规范场论的传统, 试图从更复杂的时空结构(双 4 维时空)中导出量子物理的概率特征, 从而为量子物理提供一种实在论的解读。b) 更复杂的时空结构(双 4 维时空)是在量子现象的概率特征的约束下建构出来的, 其实在性有待证实, 就像 Minkowski 建构的 4 维时空的实在性有待后续物理学的发展证实一样。c) 所以, 量子物理的出现, 使我们对时空结构的丰富、复杂有了更为清晰的认识, 而双 4 维时空的建构也使量子物理有了客观的本体论基础。

5) 物理时空的建构中, 必须有客观事实依据, 尽量避免主观成分的扩大化, 防止给认知世界带来不必要的混乱。

参考文献

- [1] 赵国求. 双 4 维时空量子力学基础[M]. 武汉: 湖北科学技术出版社, 2016: 178-197.
- [2] M·雅默. 量子力学的哲学[M]. 秦克诚, 译. 北京: 商务印书馆, 1989: 70-78, 328, 598, 601, 603.
- [3] 赵国求. 论如何消解物理学中现象对观察者的主观依赖性[J]. 江汉论坛, 2017(6): 54-59.
- [4] Zhao, G.Q. (2014) Describe Quantum Mechanics in Dual 4 D Complex Space-Time and the Ontological Basis of Wave Function. *Journal of Modern Physics*, 5, 1684-1697.
- [5] 赵国求. 找寻本征态叠加的物理机制[J]. 武汉理工大学学报(文科版), 2018, 31(3): 7-13.
- [6] 倪光炯, 李洪芳. 近代物理[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1979: 146-148.
- [7] 爱因斯坦, 等. 物理学的进化[M]. 周肇威, 译. 上海: 上海科学技术出版社, 1964: 35.
- [8] 马天. 从数学观点看物理世界——基本粒子与统一场理论[M]. 北京: 科学出版社, 2016: 25-28.
- [9] 罗杰·彭罗斯. 通向实在之路[M]. 王文浩, 译. 长沙: 湖南科学技术出版社, 2008: 367-368.
- [10] 费·因曼. 今天的物理学[M]. 叶悦, 等, 译. 北京: 科学出版社, 1981: 168-173.
- [11] 史保森, 等. 量子螺旋双缝实验: 证实波函数的物理实在性[J]. 科学通讯, 2017, 62(17): 1185-1192.
<https://doi.org/10.1016/j.scib.2017.08.024>
- [12] Zhao, G.Q. (2016) Quantum Mechanics Foundation in Dual 4-Dimensional Space-Time: Space-Time Origins of Quantum Probability. Scientific Research Publishing, Inc., Wuhan.
- [13] 王仁川. 广义相对论引论[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1996: 242-245, 264, 271.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2161-0916, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: mp@hanspub.org