

• 科学技术哲学 •

量子力学的原始本体方法研究

The Studies on the Primitive Ontology Approach to Quantum Mechanics

冯航 / FENG Hang 高山 / GAO Shan

(山西大学科学技术哲学研究中心, 山西太原, 030006)
(Research Center for Philosophy of Science and Technology, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi, 030006)

摘要: 量子力学的原始本体方法旨在构建一种普适性解释框架, 使得三维空间中的宏观实体及其行为可以基于三维空间中的微观实体及其行为来解释。玻姆力学和粒子的随机非连续运动理论(RDMP)是量子力学的两种原始本体理论。玻姆力学依据先验原则设定理论的原始本体并解释波函数; RDMP理论则整合了保护性测量与本体论模型框架, 在设定原始本体时强调理论的形式体系、物理本体与人们经验之间的对应关系。本文回顾了原始本体方法的历史与特征, 比较了两种理论在原始本体的性质、波函数的地位以及方法论原则上的异同。

关键词: 量子实在论 原始本体方法 玻姆力学 粒子的随机非连续运动理论 本体论模型框架

Abstract: The primitive ontology approach to quantum mechanics aims to construct a universal explanatory framework, enabling macroscopic entities and their behaviors in the 3D space to be explained based on the microscopic entities and their behaviors in the 3D space. Bohmian mechanics and the Random Discontinuous Motion of Particles (RDMP) are two primitive ontology theories of quantum mechanics. Bohmian mechanics posits its primitive ontology based on certain a priori principles and explains the wave function on this basis. In contrast, the RDMP theory, combining new empirical facts provided by protective measurements and the universally valid reality criteria in physics (the Ontological Model Framework), adopts a more general and rigorous methodological principle in exploring the ontology of quantum mechanics, emphasizing the correspondence between the formalism of physical theories, physical ontology, and human experience.

Key Words: Quantum realism; Primitive ontology approach; Bohmian mechanics; Theory of Random Discontinuous Motion of Particles; Ontological model framework

中图分类号: O413.1; B016 DOI: 10.15994/j.1000-0763.2026.07.005 CSTR: 32281.14.jdn.2026.07.005

为什么量子力学需要原始本体? 原始本体方法的支持者回答说: “解释我们经验的宏观对应物是基础物理理论的一个重要目的, 如果不设定原始本体——即关于时空中物质构成的描述, 我们便难以阐明桌椅等宏观物体的存在及

其行为。^[1] 玻姆力学是原始本体方法的思想来源之一, 而粒子的随机非连续运动(Random Discontinuous Motion of Particles, RDMP)理论是原始本体方法的当代发展。在玻姆力学中, 微观粒子遵循导引方程在时空中进行确定和连

收稿日期: 2024年9月5日; 返修日期: 2026年1月12日

作者简介: 冯航(1996-)男, 甘肃秦安人, 山西大学科学技术哲学研究中心博士研究生, 研究方向为物理学哲学、一般科学哲学。Email: fenghang_1996@163.com

高山(1971-)男, 辽宁辽阳人, 山西大学科学技术哲学研究中心教授, 研究方向为物理学哲学、一般科学哲学、心灵哲学。Email: gaoshan2017@sxu.edu.cn

续的运动,波函数被视作一种律则(nomological)对象,表示粒子的演化规律;而在RDMP理论中,波函数具有本体论地位,表征着微观粒子在时空中的随机非连续运动。两种理论在为量子力学选择原始本体时采用了不同的方法论原则,显示出关于量子实在论的不同视角。

一、原始本体方法的历史及特征

量子力学的原始本体方法(the primitive ontology approach)的思想起源于玻姆(David Bohm)和贝尔(John Bell)的基础性著作,并经历了一个历史发展。

玻姆对标准量子力学缺乏清晰的本体论内容以及对测量结果的解释深感不满。他认为,物理学理论应该具有本体论上的清晰性和经验解释上的融贯性。玻姆提出了标准量子力学的一种代替性解释方案,如今发展成了玻姆力学。这一理论将具有明确的位置和速度的粒子作为量子力学的物理本体,并通过导引方程确定这些粒子在时空中的演化。^[2]玻姆力学表明对在空间中遵循连续轨迹运动的量子系统的个体描述不仅在数学上是可能的,而且在物理上是一致的。玻姆力学能够解释测量结果,无须求助神秘的波函数坍缩。

原始本体方法的另一个思想来源是贝尔。贝尔主张,一个定义明确的物理学理论必须假设一组清晰的物理本体——用他的术语来说:一组定域可存在物(local beables)。“beable”是“maybe-able”的简称,贝尔引入这个术语作为量子世界中一个假定的实在元素的名称。^[3]他认为在为我们的经验提供一个清晰的说明时,标准量子力学的公理结构中所包含的一些概念(如观察、可观测量)是模糊不清的,这些概念应该从更基本的概念(即beables)中导出。^[4]更一般地,对于一个物理理论T,存在一组定域可存在物,它们是T的理论实体,并且指向归属于时空有界区域的真实对象——理论所假设的独立于任何观察而存在的实在的元素。结合理论的动力学定律,这些可存在物解释了在所考虑的理论应用范围内的物理现象,将它的形式

结构与我们可及的宏观世界联系起来。^[5]

原始本体的概念最初由迪尔(Detlef Dürr)等人在1992年提出,阿洛里(Valia Allori)等人在2008年对其进行了更详细的阐释。原始本体方法的现代表述要求定义明确的物理理论必须假定一组清晰的原始本体——即指定一组理论实体来表示在物理空间中运动的真实物体——以及一致的动力学,通过微观实体的行为来解释宏观现象。根据原始本体方法,所有基础物理学理论,从经典力学到量子理论,都具有以下共同特征:^[6]

首先,它们都秉持本体论上的还原主义,主张三维空间中的宏观物体可以还原为三维空间中的微观实体。根据原始本体理论,我们周围的世界是由具有明确属性的三维宏观物体组成的,而宏观物体在基础层次上是由理论指定的微观实体组成的。三维空间中的微观实体构成了其他一切事物的基本组成部分。

其次,通过区分原始变量和非原始变量,这些理论提供了原始本体在时空中的演化的动力学方程。一个基础的物理理论不仅要描述存在哪些物理对象,还要描述它们如何随时间演化。因此,理论的形式体系包含两类变量:描述原始本体的变量,这些变量具有物理意义,代表了三维空间中精确地定域化的实体;以及不代表物理实体的非原始变量(或称律则变量),这些变量负责原始本体的动力学演化。一旦原始本体和它的演化规律确定下来,其他一切与原始本体相关的经验预测都可以推导出来,原始本体在时间中的发展构成了世界的历史图景。

借助原始本体方法,量子力学可以遵循与经典力学相似的解释方案,对人们的宏观经验作出说明。在为量子力学提出的本体论方案中,存在着因为设定抽象本体或二元本体引发的解释问题,前者以阿尔伯特(David Albert)的位形空间实在论为代表,这种本体论将波函数所处的数学空间看作一个更基本的物理空间,波函数作为一种高维物理实体在其中发展和演化;^[7]而后者主要来自对玻姆力学本体论的传统解读,根据这种解读,玻姆力学的物理本体由高维空间中的引导场和三维空间中粒子构成。在

这两种本体论中,高维位形空间中的对象如何产生我们的三维经验或如何支配三维空间中的对象的运动?这一问题很难得到回答。原始本体方法通过为量子力学设定原始本体及演化方程,使其可以沿着与经典力学相同的路线发展它的解释方案:我们日常生活中宏观物体的属性原则上可以根据量子力学的原始本体的行为来解释。

对于如何为每个理论选择其原始本体这一问题,以玻姆主义者为代表的一些原始本体方法的支持者给出的答案带有明显的先验倾向。他们认为,确定一个理论的原始本体没有特定的规则,而是往往基于某些先验标准:如理论的简单性、解释力和统一性^①。具体而言,理论的创立者会从一个形而上学假设出发,并围绕这个假设建立理论。当一位物理学家提出一个理论时,他心中已经预设了这个理论的基本对象,即原始本体,它将告诉我们理论所表示的世界是由什么构成的。然后,物理学家会给予原始本体适当的数学表示,并提供确定原始本体演化所需的数学工具(演化方程)。这里的要点在于,理论的原始本体和数学形式体系是物理学家在建构理论时先验设定的。一旦理论被提出,每个数学对象就已有了解释,即理论支持者想要给予它的解释。科学家对世界中存在什么的选择,会自动决定代表它的数学对象的意义。^②而另一种新的原始本体理论——粒子的随机非连续运动理论则强调,任何物理学理论的本体论内容都不应该先验地给出,而应该通过一种普遍和有效的方法推导出来,该理论借助本体论模型框架揭示了量子力学的数学形式体系、人们的经验以及量子力学的原始本体三者之间的对应关系。

二、玻姆力学

玻姆力学是原始本体方法的范例,它将量

子力学视为关于粒子行为的理论——粒子由它们的位置来描述,遵循薛定谔方程的波函数并没有提供量子系统的完整表示,而是决定了基本变量——即粒子位置——如何演化。^⑧

玻姆的研究程序始于对测量问题的求解。他先验地假设双缝干涉实验中屏幕上的闪光是由通过其中一个狭缝从光源传播到屏幕上的粒子引起的,而不是由有时表现为粒子的波引起的。玻姆理论通过在任意时刻占据一个空间点的点粒子来表述,它们随时间的运动在空间中形成连续轨迹。为了与量子力学的预言一致,玻姆需要将特定空间区域内波函数振幅的平方的积分解释为在该区域内发现粒子的概率。为此,他假设粒子最初在空间中的概率分布等于波函数振幅的平方(这一假设被称为“量子平衡假设”);^⑨并且在粒子运动过程中其概率分布始终与波函数振幅的平方保持一致,即使波函数本身随时间变化。在玻姆力学(即玻姆理论的现代表述)中,运动定律由两个方程表示:一个是决定三维空间中粒子位形演化的导引方程;另一个是决定波函数演化的薛定谔方程。薛定谔方程中波函数出现在导引方程之中。运动定律可以表示如下:^⑩

$$\frac{dQ(t)}{dt} = v^{\Psi_t}(Q(t)) \quad (\text{导引方程})$$

$$i\hbar \frac{\partial \Psi_t}{\partial t} = H\Psi_t \quad (\text{薛定谔方程})$$

其中 $Q(t)$ 表示粒子的空间位形, Ψ_t 是 t 时刻粒子位形的波函数, v 相当于标准量子力学中概率密度的速度。这两个定律以如下方式联系在一起:给定所有粒子在 t 时刻的位置,根据薛定谔方程演化的宇宙波函数将确定每个粒子在该时刻的速度^②。

玻姆力学具有以下几个特点:首先,它是完全决定性的理论——初始波函数和初始粒子的位形决定了任何其他时候的波函数和粒子的位形;其次,它恢复了玻恩规则——当人们在实验

①此处的“先验”指理论的构建者事先持有的关于世界中何物存在的本体论假设,以及在选择不同的原始本体时采用的形而上学标准。

②玻姆力学中存在宇宙波函数和有效波函数的区分,只有宇宙波函数被视作运动定律的一部分,具有真正的律则地位,有效波函数相当于标准量子力学中的波函数。

结束时测量粒子的位置，它们的概率分布由波函数振幅的平方给出，因为粒子位形的初始分布和玻姆运动定律确保了情况始终如此；最后，在玻姆力学中，测量问题得到了解决——产生测量结果的是粒子的位置而不是波函数，叠加态的各个项之间的对称性被粒子轨迹的存在打破——以薛定谔的猫为例，如果组成猫的粒子的轨迹落在死亡的猫的波函数的支集范围内，那么猫就是死的，如果它们落在活着的猫的波函数的支集范围内，猫就是活的。波函数总是服从薛定谔方程，并且永远不会坍缩。

根据原始本体方法，遵循连续轨迹的粒子是玻姆力学的原始本体，它们可以被分配到时空的某个有界区域，总是具有明确的位置；而出现在运动方程中的波函数（宇宙波函数）则被看作是运动定律的一部分，因此是律则的。这主要有两个原因：第一，玻姆力学中，每个粒子的速度是定义于整体位形上的宇宙波函数的函数。第二，描述子系统的有效波函数通过宇宙波函数和所有粒子的位形的完整集合得到了唯一的定义。^[10]对于玻姆力学中波函数的律则地位，在哲学上有三种不同立场的解读，对应三种关于自然定律的观点：休谟主义、原始主义以及倾向主义。根据休谟主义，宇宙波函数随附在遍及整个时空的原始本体——玻姆粒子——的分布上，并出现在休谟最佳系统中，在该系统中，宇宙波函数在描述原始本体在时空中的分布时，在简单性和信息量之间达到了最佳平衡；根据原始主义，宇宙波函数在超越玻姆粒子之外的律则事实中被实例化，并且支配着时空中玻姆粒子的演化；而根据倾向主义，时空中玻姆粒子的位形具有一种整体属性，这种整体属性奠基了宇宙波函数以及动力学定律。这三种选择体现了玻姆粒子和宇宙波函数之间的三种不同的关系。在第一种情况下，宇宙波函数随附于玻姆粒子的位置分布；在第二种情况下，宇宙波函数独立于玻姆粒子及其属性；在第三种情况下，宇宙波函数奠基在玻姆粒子

的属性中。^[11]

第一种选择面临许多哲学上的反对意见，其中一个来自于休谟主义在解释力方面的欠缺——根据休谟主义，自然定律只具有描述功能，而没有任何解释功能。休谟主义者只能在宇宙终结时（即最佳系统中）描述宇宙中发生了什么^①，但是他们无法解释在给定的初始条件下，实际发生的事情为什么会发生。第二种选择似乎违背我们的常识，通常我们认为，事物的属性不能从它所执行的律则功能中分离出来。例如，电子带负电荷的属性P不能从它吸引带正电荷的物体的律则作用R中分离出来，使得即使存在不同的律则作用R，P也保持不变。此外，在原始主义中，关于独立存在的律则事实如何能“支配”时空中物体的运动，这一点也是不清楚的。^[12]第三种选择在原始本体方法的语境中是有吸引力的：根据倾向主义，时空中的原始本体实例化了一个或多个属性，该属性决定了这些原始本体的行为。在定律表达了对对象凭借这些属性可以做什么的意义上，定律奠基基于倾向之中。在玻姆力学的框架内，宇宙波函数通过玻姆运动方程决定了原始本体的时间发展，即玻姆粒子的速度。在这个视角下，将宇宙波函数视为描述了决定其运动的玻姆粒子的基本属性是完全合理的。然而宇宙波函数定义在给定时间宇宙中所有玻姆粒子的整个位形上，因此每个粒子的时间发展依赖于所有其他粒子在该时间的位置。所以宇宙波函数实际上描述的是粒子整个位形在给定时间的一种整体属性。^[10]

三、粒子的随机非连续运动理论

玻姆力学先验地设定了三维空间中以连续轨迹运动的粒子的实在性，并在此基础上给出了波函数的律则解释。而在高山提出的粒子的随机非连续运动理论（RDMP）中，原始本体的性质和波函数的地位是借助一种更为普

① “在宇宙终结时”并非指宇宙会发生物理意义上的终结，而是强调只有获取涵盖宇宙初态至终态所有粒子位置事实的完整时空历史，才能提炼出在简单性与信息量间达到最佳平衡的定律，即宇宙波函数。

遍和严格的方法论推导得出的。^[13] 具体而言, RDMP理论首先基于保护性测量这种量子力学中新的测量类型所提供的经验事实,并结合物理学中普遍有效的实在性判据(本体论模型框架),论证了波函数的实在性;继而, RDMP理论通过揭示被测系统存在有效的电荷分布,并将这种电荷分布的可能形式与量子实验现象的特征联系起来,提供了量子力学的本体论图像:根据RDMP理论,量子力学和牛顿力学一样,也处理3维空间中粒子的运动。量子力学的原始本体是具有质量和电荷等属性的定域粒子,但是它们以随机和非连续的方式运动;波函数描述了粒子随机非连续的运动状态,在更深层次上,它体现了微观粒子具有的随机非连续运动的倾向。接下来,我们将介绍RDMP理论探寻量子力学原始本体的过程,并展示其遵从的方法论原则中理论、经验、原始本体三者间的对应关系。

量子力学中为人所熟知的测量类型是投影测量。这类测量会干扰被测系统的波函数并导致测量结果与测量装置发生不可避免的纠缠,这使得人们很难区分被测系统和测量装置各自的态以及它们之间的相互作用,并导致将传统物理属性赋予量子系统时存在模糊性。阿哈罗诺夫(Yakir Aharonov)和魏德曼(Lev Vaidman)等人1993年提出的“保护性测量”(protective measurements)提供了一种不同于投影测量的测量语境。在保护性测量中,利用量子芝诺效应等适当保护机制,被测系统的波函数在测量过程中不会发生改变,并且不会与测量装置的态相互纠缠。在投影测量中,波函数与测量结果之间的连接由玻恩规则给出,这种连接是概率性的;而在保护性测量中,二者之间的连接则是确定的。保护性测量使人们能够测量单个量子系统上可观测量的期望值,通过实施一系列的保护性测量,人们可以重建单个量子系统的波函数。^[14] 因此,保护性测量的支持者认为,波函数并非单纯的统计工具,它能够被测量到,具有直接可观察的意义。一些作者进一步主张波函数直接指称了系统的本体态,具有本体论地位。为了论证波函数的实在性,建立一条关于波函数实在性的普遍和严格的判据是必要的。

2010年,哈里根(Nicholas Harrigan)和斯佩克斯(Robert Spekkens)提出的本体论模型框架(the ontological models framework)旨在为波函数认识论观点(ψ -epistemic view)和本体论观点(ψ -ontic view)之间的裁决提供一条严格的判定标准。在承认微观客体具有基本的本体态的前提下,波函数认识论观点主张波函数仅是关于微观客体本体态的不完备的认知态,其本身并不具备本体论地位;而波函数本体论观点主张波函数本身直接表征了微观客体的本体态,具有本体论地位。^[15] 本体论模型框架包含两个基本假设:^[16] 其一,如果制备一个量子系统并使其处于纯态,那么制备之后该系统就拥有一组定义明确的物理性质,或者说拥有一个基本的本体态;其二,在进行测量时,测量装置的行为只由系统的本体态和测量装置的物理性质决定,对于通常的投影测量而言,这意味着量子系统的本体态决定了系统投影测量得到不同结果的概率。第一条假设为分析波函数的实在性提供了基础,如果不存在基本的本体态,那么询问波函数是否描述了这一本体态便没有意义;第二条假设提供了系统的本体态与我们的测量结果之间的联系。由于波函数认识论观点的核心假设是:波函数表征的是关于系统本体态的不完备的知识,因此,至少存在某些本体态将与一个以上的波函数相容。所以,波函数本体论观点的支持者的策略是论证这一假设的结果与量子力学的预言不一致。基于本体论模型框架,普西(Matthew Pusey),巴雷特(Jonathan Barrett)和鲁道夫(Terry Rudolph)给出了一条关于波函数认识论观点的不可行定理,即PBR定理。PBR定理表明,在本体论模型框架下,假定独立制备的系统具有独立的本体态时(称为制备非语境假设),量子系统的本体态唯一地决定了它的波函数,或者说波函数直接表征了量子系统的本体态。^[17]

最初的本体论模型框架仅考虑了投影测量这种测量类型,但该框架提供的实在性判据具有普遍性,可以自然地对其进行推广,使之适用于保护性测量。按照本体论模型框架,在论证波函数的实在性时,人们不仅需要波函数与

测量结果之间的连接，还需要测量结果与被测系统的本体态之间的附加连接。投影测量中这一附加连接指的是系统的本体态以及测量装置的物理性质决定了投影测量不同结果的概率；而对于保护性测量，可以合理地假定：被测系统的本体态及测量装置的物理性质决定了保护性测量的确定结果。（[13]，pp.29-31）采用与PBR定理相同的论证思路，可以证明：如果两个受保护的波函数仅仅是关于被测系统本体态不完备的认知态，从而这两个波函数与被测系统的同一本体态相容，那么在这两个波函数上对同一被测可观测量进行保护性测量将会得到相同的结果，但是，这将违背量子力学的预言。因此，两个受保护的波函数对应于被测系统不同的本体态。此外，由于保护程序和测量装置的本体态并不包含被测波函数的信息，所以，保护性测量的结果仅由被测系统的本体态和测量装置的物理性质决定，这意味着两个未受保护的波函数（即波函数本身）对应于不同的本体态。^[18]

基于本体论模型框架对保护性测量的分析表明单个量子系统的波函数具有本体论地位，那么接下来的问题便是：波函数表征了系统怎样的本体态？RDMP理论通过如下两个步骤对量子系统本体态的存在形式作出了说明：

（1）确定单体量子系统中存在有效的电荷分布：在对单体量子系统的保护性测量中，对于给定时刻波函数为 $\Psi(t)$ 的量子系统，人们可以测量空间中每个位置 x 处的密度——该值等于波函数的模平方。因为密度作为量子系统可能本体态的一部分具有将测量仪器指针偏移并产生保护性测量结果的作用，而测量总是通过被测系统与测量仪器间的特定相互作用实现的，所以这种密度可以看作是一种相互作用荷密度。对于由静电相互作用（对于引力相互作用也一样）实现的测量，作用荷密度乘以系统的电荷，即为电荷密度。由于在对单体系统的保护性测量中，探测电子的轨迹只受被测系统电荷期望值的影响，因此，测量结果表明了被测系统具有确定电荷量的性质，即单体量子系统具有有效的电荷分布。^[19]

（2）分析这种电荷分布的起源与量子实验

现象特征之间的关联：对于单体量子系统中电荷的分布形式，存在两种可能性：一是电荷以离散粒子的形式分布；二是电荷以场的形式分布。粒子与场之间的主要不同在于，粒子在一个时刻只处于空间中的一个位置，并且一个粒子在某一时刻与另一时刻的自己没有相互作用；而场在每个时刻都遍布于整个空间，空间中一个场的任意两部分之间可以相互作用。如果带电量子系统的电荷分布以场的形式存在，那么这个场在空间中的任意两部分之间就会存在静电相互作用，这不符合实验观察并且违背了量子力学的叠加原理。^[20]然而，在对一个单体带电量子系统（如处于两个分立波包叠加态的一个电子）进行保护性测量时，人们确实发现电子的单个波包与另一个探测电子之间具有电磁相互作用，这表明电子的单个波包也带有电荷。关于这种物理现象的发生机制，RDMP理论给出了如下解释：单个电子的两个分立波包并不同时存在，相反，它们的电荷是由具有电子总电量的单个局域化粒子的遍历运动所形成的。由于每个时刻只有一个局域化的粒子，因此，由该粒子运动所形成的有效电荷分布之间便不存在静电相互作用。为了与量子力学的预言一致，RDMP理论中粒子的遍历运动只能是随机和非连续的；当粒子出现在每个位置处的概率密度等于此处波函数模的平方时，就会产生正确的电荷分布。此外，这种粒子的随机非连续运动可以推广到多体系统，并能说明多体系统中的纠缠信息。（[13]，pp.77-80）

在RDMP理论给出的本体论图景中，在每个时刻，所有粒子都有一个确定的位置，而在每个时刻周围的时间间隔内，它们的运动以随机和非连续的方式遍及波函数非零的整个空间；它们出现在空间中每个可能的位置组中的概率密度由那里波函数的模平方给出；每个粒子的随机非连续运动会在空间形成一朵质量和电荷云，许多处于纠缠态的粒子的随机非连续运动会在空间形成许多纠缠的质量和电荷云。根据RDMP理论，测量后叠加的不同结果分支（作为空间上的不同的云）在同一时间间隔内并不同时存在，它们存在于不同的时刻集或不同的

时间子流中，^[21]不同结果分支代表了空间和时间中的不同世界^①。采用倾向主义解释，量子力学中的波函数不只是描述了微观粒子的随机非连续运动状态，更代表着粒子所具有的随机非连续运动的倾向。^[22]

四、两种原始本体理论的异同

在如下意义上，玻姆力学和RDMP理论同属于量子力学的原始本体理论——它们都在量子力学中秉持实在论立场，将三维空间中以特定方式运动的粒子作为理论的原始本体，这些粒子的运动产生了宏观世界并且能够解释我们的日常经验。然而，由于这两种理论采用了不同的方法论原则，它们在原始本体的性质和波函数地位上表现出显著差异：

原始本体性质：首先，就微观对象的运动形式而言，在玻姆力学中，玻姆粒子在时空中遵循确定和连续的轨迹；而在RDMP理论中，粒子在时空中进行随机非连续的运动。其次，就微观对象是否具有与运动态无关的属性（如质量和电荷）而言，RDMP理论的答案是肯定的——借助保护性测量，人们可以测得单体量子系统以及多体量子系统的有效电荷（或质量）分布；而这一点在玻姆力学中则存在争议：根据对玻姆力学本体论的传统解读（即本体论中包含高维空间中的引导场和三维空间中的玻姆粒子），有两种不同的选择，分别对应于所谓的慷慨原则（the principle of generosity）以及节俭原则（the principle of parsimony）。前者将质量和电荷等属性同时归属于引导场和粒子；^[23]而后者主张质量和电荷等与运动态无关的参数仅仅是引导场的属性，而非粒子的属性，粒子只对应空间中的一条轨迹。^[24]从原始本体方法来看，玻姆力学中的波函数代表运动定律，其本体论中的物理对象只有粒子，所以质量和电荷等属性要么

归属于玻姆粒子，要么不归属于玻姆粒子。如果是后者，玻姆主义者需要为这些属性的起源提供一个解释。然而，无论采取哪种观点，恰当地在玻姆力学的本体论中包含质量和电荷等属性仍然是一个很大的挑战。^[25]

波函数的地位：在原始本体方法中，玻姆力学中的波函数被视作是一种律则对象，它决定了原始本体在时空中的演化。根据自然定律的倾向主义立场，玻姆力学中所有粒子的位形具有一种全局倾向，这种倾向使得每个粒子的运动都依赖于其他所有粒子的位置，波函数奠基在作为一个整体的粒子位形的全局倾向中。而RDMP理论则支持波函数本体论观点，借助保护性测量和本体论模型框架，RDMP理论论证了微观粒子具有本体态且波函数本身直接表征了这种本体态——粒子在三维空间中的随机非连续运动。按照倾向主义，RDMP理论中所有粒子都具有一种特殊的运动倾向，这种倾向使得每个粒子在时空中以玻恩概率进行随机非连续的跳跃，波函数奠基在每个粒子所具有的运动倾向中。

方法论差异：玻姆反对量子力学正统诠释所秉持的实证主义原则，他认为经验数据不能为形而上学的限制（这些限制涉及对原始本体的选择）提供任何理由。^[26]“我们的认识论在很大程度上由现有的理论决定。因此，根据从现有理论推导出的纯粹认识论的限制来指定未来理论的可能形式是不明智的。”^[2]玻姆力学表明标准量子力学的实证稳健性及其偶然的数学结构不足以排除其他先验的、本体论上更清晰的表述。作为量子力学的代替性解释方案，玻姆的研究始于对测量问题的求解，然后再去解释波函数的意义。这种进路独立于保护性测量和PBR定理所提供的支持波函数本体论观点的证据^②，波函数的意义不会影响玻姆力学对测量问题的答案。此外，为了保证玻姆力学与标准量子力学在经验上的等价性，玻姆假设初始位

①玻姆力学首先解决测量问题，然后才解释波函数的意义；而RDMP理论则先论证波函数的实在性，并构建了粒子随机非连续运动的本体论图像，随后研究这一图像在解决测量问题时的完备性。鉴于本文的焦点在于对设定量子力学原始本体时方法论原则的评估，有关测量问题的内容此处不再详细展开。

②有关保护性测量和PBR定理与玻姆力学的相容性问题已经得到了广泛关注，并引发关于玻姆力学中波函数性质的进一步的讨论。

形按照玻恩概率分布，并制定了导引方程以保持这种分布不随时间改变。玻姆力学中的这些先验设定和人为构造带来了一些困难：首先，尽管玻姆所主张的先验原则体现出他对科学探索过程中未来可能出现的新现象和新理论的开放态度，但过度强调这一原则会削弱科学方法论的客观性和普适性；其次，玻姆先解决测量问题再解释波函数的意义的研究进路存在一定问题，因为如果人们假设了操作主义的波函数工具论观点，那么测量问题就被消解了，这表明测量问题的解决依赖于波函数的意义；（[13]，p.167）再者，由于设定原始本体时依据先验标准，玻姆力学中粒子是否拥有质量和电荷等物理性质存在争议；此外，许多物理学家批评玻姆力学在薛定谔方程之外设立导引方程，认为这种做法显得刻意，缺乏自然性；最后，在玻姆力学中，从量子平衡假设到导引方程之间的转变引发了关于属性和运动定律的二元论——根据倾向主义，量子平衡假设中的波函数表示初始时刻粒子位形在空间中随机分布的倾向，而导引方程中的波函数则表示后续时刻粒子在空间中遵循连续运动轨迹的倾向，这种属性和运动形式的二元论不仅增加了理论的复杂性，也威胁着玻姆力学的内在一致性。^[27]

相比之下，RDMP理论强调探寻任何物理学理论的本体论内容都需要一种普遍的方法——量子力学的本体论内容不应该先验地给出，应该像其他物理学理论一样，通过一种普遍和有效的方法推导出来。由于量子力学已经指定了其数学形式体系与人们经验间的连接，为了得到它的本体论内容，人们还需要其本体态与我们经验间的连接，而本体论模型框架的第二假设正好可以提供这样一种连接。以这种方式得出的本体论内容并不必然是真的和完备的，但如果它们能够应用于经典力学和宏观客体推出预期的经典本体论的话，它们应该也能够应用于量子力学和微观客体以推出量子本体论。由于保护性测量的存在，量子力学和经典力学在实在性方面并没有什么不同。如果人们采用了经典力学的实在论观点，那么出于一致性，人们也应该采用量子力学的实在论观点。

特别是，就像经典力学中的轨迹函数一样，量子力学中的波函数也是实在的，它表征了单个量子系统的物理态。（[13]，pp.164-165）在玻姆力学中，三维空间中遵循连续轨迹运动的粒子的实在性是先验设定的，而在RDMP理论中，三维空间中进行随机非连续运动的粒子的实在性及其所具有的电荷和质量等属性是分析之后得到的结果；RDMP理论所采用的方法论原则并不排除未来可能发现的新现象，但同时坚持应该有经验证据和普遍有效实在性标准来支持现有的理论断言。

结 论

玻姆力学和RDMP理论给出了量子力学的不同本体论图像：在玻姆力学中，玻姆粒子按照导引方程在时空中遵循确定和连续的轨迹，波函数代表着粒子的演化规律，经典世界的决定论图像得到了恢复；而在RDMP理论中，粒子在时空中进行随机和非连续的跳跃，波函数表征着粒子随机非连续的运动状态。在确定量子力学的原始本体时，玻姆反对实证主义，认为物理本体的选择不受经验数据的限制；而RDMP理论主张任何物理理论的本体论内容都不应先验地给出，而应该以一种普遍的方法推导出来。相较于玻姆力学，RDMP理论在探寻量子力学的本体论时采取了一种更为普遍和严格的进路，强调物理学理论的形式体系、物理本体以及人们经验三者之间的联系。两种理论提供了关于量子力学实在论的不同视角，对二者的进一步研究有助于推动量子力学理论框架的发展和完善，深化人们对量子世界的认知。

[参考文献]

- [1] Allori, V., Goldstein, S., Zanghi, N. 'On the Common Structure of Bohmian Mechanics and the Ghirardi-Rimini-Weber Theory'[J]. *The British Journal for the Philosophy of Science*, 2008, 59(3): 353-389.
- [2] Bohm, D. 'A Suggested Interpretation of Quantum Theory in Terms of "Hidden" Variables, I and II'[J]. *Physical Review*, 1952, 85(2): 166-193.
- [3] Bell, J. S. *Speakable and Unsayable in Quantum Mechanics*[M]. Cambridge: Cambridge University Press,

- 1987, 174-176.
- [4] Lewis, P. J. 'In Search of Local Beables'[J]. *International Journal of Quantum Foundations*, 2015, 1: 215-229.
- [5] Oldofredi, A. 'Beables, Primitive Ontology and Beyond: How Theories Meet the World'[A], Allori, V. (Ed.) *Quantum Mechanics and Fundamentality*[C], Switzerland: Springer, 2022, 97-111.
- [6] Allori, V. 'Primitive Ontology and the Structure of Fundamental Physical Theories'[A], Ney, A., Albert, D. Z. (Eds.) *The Wave Function: Essays on the Metaphysics of Quantum Mechanics*[C], Oxford: Oxford University Press, 2013, 58-75.
- [7] Albert, D. Z. 'Wave Function Realism'[A], Ney, A., Albert, D. Z. (Eds.) *The Wave Function: Essays on the Metaphysics of Quantum Mechanics*[C], Oxford: Oxford University Press, 2013, 52-57.
- [8] Goldstein, S. 'Bohmian Mechanics'[DB/OL]. <https://plato.stanford.edu/archives/fall2021/entries/qm-bohm/>. 2023-12-10.
- [9] Dürr, D., Goldstein, S., Zanghì, N. 'Quantum Equilibrium and the Origin of Absolute Uncertainty'[J]. *Journal of Statistical Physics*, 1992, 67(5-6): 843-907.
- [10] Esfeld, M., Lazarovici, D., Hubert, M., et al. 'The Ontology of Bohmian Mechanics'[J]. *The British Journal for the Philosophy of Science*, 2014, 65(4): 773-796.
- [11] Dorato, M., Esfeld, M. 'The Metaphysics of Laws: Dispositionalism versus Primitivism'[A], Bigaj, T., Wüthrich, C. (Eds.) *Metaphysics in Contemporary Physics*[C], Amsterdam/New York: Rodopi Brill, 2015, 403-424.
- [12] Dorato, M., Laudisa, F. 'Realism and Instrumentalism About the Wave Function: How Should We Choose?'[A], Gao, S. (Ed.) *Protective Measurements and Quantum Reality: Toward a New Understanding of Quantum Mechanics*[C], Cambridge: Cambridge University Press, 2014, 119-134.
- [13] Gao, S. *The Meaning of the Wave Function: In Search of the Ontology of Quantum Mechanics*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2017.
- [14] Aharonov, Y., Vaidman, L. 'Measurement of the Schrödinger Wave of a Single Particle'[J]. *Physics Letters A*, 1993, 178(1-2): 38-42.
- [15] Oldofredi, A., López, C. 'On the Classification Between Ψ -ontic and Ψ -epistemic Ontological Models'[J]. *Foundations of Physics*, 2020, 50(11): 1315-1345.
- [16] Harrigan, N., Spekkens, R. W. 'Einstein, Incompleteness, and the Epistemic View of Quantum States'[J]. *Foundations of Physics*, 2010, 40: 125-157.
- [17] Pusey, M. F., Barrett, J., Rudolph, T. 'On the Reality of the Quantum State'[J]. *Nature Physics*, 2012, 8(6): 475-478.
- [18] Gao, S. 'An Argument for Ψ -ontology in Terms of Protective Measurements'[J]. *Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 2015, 52: 198-202.
- [19] Gao, S. 'Protective Measurements and the Reality of the Wave Function'[J]. *The British Journal for the Philosophy of Science*, 2022, 73(3): 777-794.
- [20] Gao, S. 'A Puzzle for the Field Ontologists'[J]. *Foundations of Physics*, 2020, 50(11): 1541-1553.
- [21] Gao, S. 'On Bell's Everett (?) Theory'[J]. *Foundations of Physics*, 2022, 52(4): 89.
- [22] Gao, S. 'Time Division Multiverse: A New Picture of Quantum Reality'[DB/OL]. <http://philsci-archive.pitt.edu/20055/>. 2023-12-15.
- [23] Holland, P. R. *The Quantum Theory of Motion: An Account of the de Broglie-Bohm Causal Interpretation of Quantum Mechanics*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1993, 78-79.
- [24] Brown, H. R., Elby, A., Weingard, R. 'Cause and Effect in the Pilot-Wave Interpretation of Quantum Mechanics'[A], Cushing, J. T., Fine, A., Goldstein, S. (Eds.) *Bohmian Mechanics and Quantum Theory: An Appraisal*[C], Dordrecht: Kluwer, 1996, 309-319.
- [25] Gao, S. 'Why the Ontology of Bohmian Mechanics Cannot Include Only Particles or Particles and the Wave Function'[DB/OL]. <http://philsci-archive.pitt.edu/22276/>. 2023-12-15.
- [26] Bohm, D. *Causality and Chance in Modern Physics*[M]. London: Routledge, 1984, 64-68.
- [27] Gao, S. 'Why the Quantum Equilibrium Hypothesis? From Bohmian Mechanics to a Many-Worlds Theory'[DB/OL]. <https://philsci-archive.pitt.edu/20160/>. 2023-12-15.