

论量子疑难与物理实在 I^①

张成刚

E-Mail: zhangchengang@163.com

摘要: 玻尔理论和量子力学理论结构的巨大缺陷及面临的困难暗示量子背后应存在某种更深层次的原理, 分析两个理论的前提性思想基础成为触及这一深层次原理的新途径, 分析结果表明微观粒子应受到不同于经典力学的某种作用, 微观势函数(微观作用)是这一思考下的新发现; 玻尔理论和量子力学的缺陷和困难可以由微观作用得到理解或者消除, 玻尔理论是结合了微观作用的量子化现象和经典物理而产生的理论, 量子力学则是直接运用微观作用的“波动”表象而建立的理论, 微观作用属于粒子之间更本源的作用, 而经典作用则是微观作用在宏观领域的近似理论。

关键词: 玻尔理论 量子力学 势函数 经典作用 微观作用

中图分类号: 041 B028 B029 **标识码:** A

一、引言

玻尔理论和量子力学分别为我们描述了两个截然不同的微观世界的图像, 按照量子物理学的发展历史, 通常认为前者由于理论结构自身的局限性而被后者取代, 但事实上后者依然面临着理论基础自身难以诠释的困境, 至少目前还在争论之中。这就是玻尔理论建立在经典物理学的基础之上, 如借鉴了天体的运动模式和保留了轨道的概念等, 但同时理论引入的定态假设和量子化规则两个重要基础严重违背经典物理学规律, 将经典物理学做特殊化处理, 且没有更深层次的理论依据来解释这种不同。量子力学则认为微观粒子同时具有“粒子”和“波动”双重属性, 并根据微观粒子具有“波动”属性的思想基础建立了相应的波动方程——薛定谔方程, 量子力学理论结果的正确性已经被大量的实验事实验证, 但关于微观粒子的这种波动属性应如何做解释一直是物理学界争论的焦点问题(即关于波函数基础的理解), 其中最具代表性的是玻恩在其论文《散射过程的量子力学》^[1]中给出的“波函数统计学诠释”, 当前关于量子力学的多种解释都建立在波函数统计学诠释这一基础之下, 玻恩的这一诠释比较好的吻合了所观察到的物理现象和被应用到理论的发展之中; 但波函数统计学诠释使得量子力学首次违背经验的决定论因果性和物理实在论, 引发系列关于量子力学是否精确的描述了微观粒子状态的争论, 如爱因斯坦等人观点认为“波函数所描述的无论如何不能是单个体系的状态, 只是多体系的一种统计结果”^[2], 这只是理论发展的一个中间阶段, 玻姆认为“量子力学之所以是统计理论, 是由于存在未被发现的‘隐变量’的原因”^[3], 以玻尔和海森伯为代表的哥本哈根学派则认为“波函数精确的描述了单个粒子的状态”。

综上, 玻尔理论存在的局限性和量子力学面临理论基础自身难以诠释的困境, 根本原因主要在于理论基础自身, 而并非根据理论形式所推导出的量化结果; 一切理论的发展都建立在一定的思想基础之上, 玻尔理论和量子力学也不例外, 理论自身的缺陷和困境理应是源于思想基础的逻辑性失误和不严密性而导致, 这启发我进一步探讨玻尔理论和量子力学所依据的前提性思想基础, 并解决当前物理学存在的难题, 文章将显示这一过程的重要价值和意义。

作者简介: 张成刚(1989-), 陕西省商洛市镇安县人, 南华大学核科学技术学院核工程与核技术专业本科学士学位、汕尾市第二人民医院工程师, 主要研究方向: 理论物理, 物理哲学。

①本文的思想初形成于《量子笔迹》一书, 本文对原著的思想内容和概念作了拓展, 对势函数做了修正。

二、关于玻尔理论的前提性思想基础分析

玻尔在建立原子理论时采用了类比的科学方法，借鉴宏观物理中天体的运动规律，设想原子内部具有和天体相似的运动机制，并在前人工作的基础之上引入了大胆而创新性的假设，从玻尔理论中可以归纳出两条理论建立过程的前提性思想基础，它们分别暗含在理论的建立过程之中和在理论的建立过程中被直接提出：

- (1) 对于原子，核外电子仅受原子核库仑力的主要作用，具有类似行星的运动机制；
- (2) 处于定态的电子在特定的轨道上作加速运动时既不向外辐射也不吸收电磁波。

思想基础(1)属于经典物理学中的思想和内容，被直接运用到原子领域，其直接推论便是原子将无法稳定存在，与原子稳定存在的客观事实不相符，思想基础(2)被提出其中一个重要原因是为解决(1)所导致的不合理推论，理论的发展应具有可推性和严密的逻辑性，但(2)只是将经典理论根据客观事实做特殊化处理(玻尔理论是首次将实验事实纳入到理论的建立过程之中)，并未对这种特殊化的出现给出相应的理论推导或者本源的解释，从目前来看客观上也无法从经典理论框架中给出合理推导，最终导致(2)又在违背经典物理学理论，使得(1)和(2)之间形成逻辑悖论。

(1)和(2)之间的逻辑悖论强烈表明玻尔理论的前提性思想基础存在误区，首先(1)理所当然的既定了核外电子仅受到原子核库仑力的主要作用，也正是由于这一既定内容导致理论上原子无法稳定存在，使得(2)的提出成为必然，最终形成(1)和(2)之间的逻辑悖论(类似的现象在物理学的发展历程中并不少见，如在1900年普朗克提出能量量子化假设之前^[4]，在人们的思想意识里，能量被认为是只能连续的改变，最终导致黑体辐射“紫外灾难”的出现；在1956年李政道和杨振宁提出宇称不守恒理论之前^[5]，由于宇称守恒定律的正确性在强力、电磁力和万有引力中相继被证明，于是宇称守恒定律被习惯性的认为对于一切粒子都成立，最终导致“ θ 和 γ 粒子疑难”的出现)。

为了能够消除上述逻辑悖论，假设我们改变思想方法，首先尊重原子稳定存在这一客观事实，则一个直接推论便是原子应不具有类似行星的运动模式，更深一层的推论便是核外电子受到并非已知形式的原子核库仑力的主要作用，或者并非只受到已知形式的原子核库仑力的主要作用，由于核外电子不具有类似行星的运动模式，相应(2)没有必要被无端提出，(1)和(2)之间的逻辑悖论得到理解和消除；于是在这里可以尝试给出这样的论断：对于原子，核外电子受到并非已知形式的原子核库仑力的主要作用，或者并非只受到已知形式的原子核库仑力的主要作用，是玻尔理论中受力基础的错误最终导致了逻辑悖论的必然产生。

从实验方面，仍可以证明这一论断存在的可能性，库仑定律表明库仑力在空间上按平方反比规律变化，宏观空间上也实验证实这一变化规律的确成立，但并没有实验直接证实在微观空间上这一变化规律仍然严格成立；这一思考等同于，从宏观上观察一把尺子足够的直，但一旦深入到分子或者原子尺度来观察这把尺子，则是凹凸不平)。

三、关于量子力学的前提性思想基础分析

1924年德布罗意在其论文中首次提出“物质波”概念，按照经典物理学论点，一切波都具有衍射实验现象，并于1927年戴维森和革末首次实现电子衍射实验现象；“物质波”概念的建立为物理学家开启了新的思想方法，最终薛定谔由微观粒子的波动属性这一观点建立了描述微观粒子的波动方程—薛定谔方程，量子力学体系得以建立，并能够成功的处理原子领域的物理现象。现在回顾量子力学体系的整个建立过程，其同样包含两大理论得以建立的前提性思想基础：

- (1) 微观粒子衍射实验现象证实微观粒子具有波动属性；
- (2) 微观粒子的状态由波函数描述。

微观粒子具有波动属性的观点为薛定谔方程的建立提供了前提和可能性,同时也是微观粒子具有波动属性这一观点基础最终导致量子力学关于自身基础难以诠释的困境,如本文第一节介绍其难题主要集中在对“微观粒子具有波动属性”这一观点基础的解释。

按照传统和一贯解决这一理论难题的思路和方法,是对微观粒子的这种波动属性继续找到更加合理的解释,但过去物理学家们的尝试表明这一解决问题的思路和方法很难获得根本性的成功,这启发我重新思考“微观粒子具有波动属性”这一观点基础的正确性。

首先,关于波和衍射现象的辩证存在于经典物理学理论中,观点认为:“一切波都具有衍射实验现象,且司空见惯的认为具有衍射现象的物质也是波”,但从逻辑的角度,“一切波都具有衍射实验现象”和“具有衍射现象的物质也是波”属于两个不同的命题,前者 and 后者在逻辑上并不能等同,且并没有更深层次的理论或者足够的实验证明“具有衍射现象的物质也是波”这一命题普遍成立。而思想基础(1)正是依据了“具有衍射现象的物质也是波”这一命题,逻辑上存在明显的缺陷,即不能由微观粒子具有衍射实验现象证实微观粒子具有波动属性;其次,按照量子力学现有的观点,微观粒子具有波动和粒子双重属性,则很容易给出推论,微观粒子的衍射实验现象必定可以由粒子的“粒子性”给出解释,这在逻辑上是能够成立的。

按照上述讨论结果,不能由微观粒子具有衍射实验现象证实微观粒子具有波动属性,逻辑上微观粒子的衍射实验现象应可以由“粒子性”给出解释,现在假设微观粒子的衍射实验现象的确可以从粒子的“粒子性”给出解释,则微观粒子具有波动属性的观点没有必要继续坚持,相应量子力学的基础难题从根本上得到消除(这里并没有否定薛定谔方程形式上的正确性,而是怀疑微观粒子具有波动属性这一观点客观上是否具有真实性和必要性)。

现在考虑从“粒子性”解释微观粒子衍射实验现象的可能性,则微观粒子能够产生衍射实验现象的本质在于其运动轨迹发生了规律性的改变,而促使这一改变的唯一可能只能是粒子受到某种未知力的作用,这一思考无疑为我们解决问题提供了新思路。

四、 一个具有量子化特征的作用函数

第二节和第三节分别分析了玻尔理论和量子力学所依据的前提性思想基础,以及玻尔理论前提性思想基础之间形成的逻辑悖论,和量子力学关于基础诠释的难题,并且最终都将理解或者消除问题的关键指向微观粒子究竟受到何种力场的作用(在后文的讨论中将更多采用力场所对应的势函数来表达这一作用),这一全新的思考方式重新回归到了问题的本源,我相信其必定包含对经典理论的某种完善和深入,将其深刻揭示连续和量子之间的某种内在原理,接下来的讨论中将做这一尝试。

事实上,通过对经典物理学中的势函数乘以一个额外的作用因子

$$g = \cos^{2m} \sqrt{r/A}$$

即可实现对微观领域的全面量子化,通常求解薛定谔方程的复杂数学过程可以被这一特征函数取代;这里记经典物理学中的势函数为 $U_{\text{经典}}$,乘以作用因子后的势函数记为 $U_{\text{微观}}$,则:

$$U_{\text{微观}} = U_{\text{经典}} \cdot g = U_{\text{经典}} \cdot \cos^{2m} \sqrt{r/A}$$

其中 A 和考察系统的物理参量有关(如物体的质量、电荷量等), m 为待定整系数, $r^2 = x^2 + y^2 + z^2$ 。现在将此操作应用到原子领域,考虑最简单的类氢原子情况(原子的核电荷数为 Z),核外电子应具有势能

$$U_{\text{微观}} = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Ze^2}{r} \cdot \cos^{2m} \sqrt{r/A}$$

数学上, $r \approx n^2 \pi^2 A \approx n^2 A_0$ 处为微观势函数的极小值点 (n 取正整数), 极值点与玻尔理论轨道半径在形式上相一致; 同时微观势函数在 $r \approx n^2 A_0$ 周围形成深势阱, 当极小值点为玻尔半径的 2 倍 (这里和玻尔理论对照是为验证理论结果的一致性), 即

$$A_0 = \frac{2\epsilon_0 h^2}{\pi m Z e^2}$$

此时极值势能与玻尔类氢原子理论和量子力学的理论结果在形式上和数值上完全相同。

以上内容更多是从数学和形式上实现了对微观领域的量子化, 但理论包含了更深层次的物理学原理, 现在假设原子内部的确处在上述作用之中, 则原子内部的真实情况应不同于玻尔理论和量子力学的描述, 原子内部应是核外电子的运动只能被束缚在原子核周围一些特定的势阱之中, 势阱中处于基能的电子则在原子核周围特定的空间做自由运动, 当电子由一个束缚态进入另一个束缚态时能量以跃迁辐射的形式发出; 显而易见, 原子不具有类似行星的运动机制, 定态假设和量子化规则不需要被毫无理论依据的提出, 玻尔理论之所以形成基础悖论在于所依据的受力基础并非原子内部的客观真实; 原子处在微观作用之下, 如节三所述, 对于量子力学, 不再需要坚持“微观粒子具有波动属性”这一观点 (这里并没有否定量子力学数学形式的正确性, 和理论结果的正确性, 而是指出量子力学的数学形式需要通过微观势函数做物理含义的重新解读), 粒子的不均匀性分布被解释为由于微观作用的结果, 相比玻尔理论和量子力学本文的尝试或许更深刻的揭示了量子化的内在本质, 接下来的内容充分的论证了这一观点。

五、 微观势函数与量子力学之间的关系

(1) 波函数实质为微观粒子的位移函数: 设想三维空间中某一不带电微观粒子受到 $U_{\text{微观}}(r)$ 的作用, 微观粒子的运动必定被束缚在其势阱之中 (为明确和简化语言, 后文将 r 方向称之为径向, 和 r 垂直的方向称之为正交向), 势阱中微观粒子沿径向的运动可以近似处理为在做简谐振动, 根据简谐振动理论计算得径向微观粒子相对平衡位置的位移函数为 $\psi(t) = A \sin(\omega t + \phi)$; 现在假设微观粒子在径向做简谐振动的同时, 在正交向具有运动速率 u , 综合微观粒子在径向和正交向的双重运动, 微观粒子将在正交向按正弦线轨迹运动, 此时微观粒子径向位移函数可以被改写为: $\psi(r, t) = A \sin[\omega(t - \alpha \cdot r/u) + \phi]$ (此处 α 为微观粒子在正交向所滑过弧长对应的弧度角), 再利用关系式 $\omega = 2\pi\nu$ (此处 ν 为微观粒子的径向振动频率) 和 $\lambda = u/2\nu$ (此处 λ 为正交向运动周期距的一半, 或半正交周期距), 于是

$$\psi(r, t) = A \sin[2\pi(\nu \cdot t - \alpha \cdot r/\lambda) + \phi]$$

注意到, 径向位移函数 $\psi(r, t)$ 和量子力学中所认为的自由粒子波函数在形式上完全一致。这也进一步说明量子力学中描述微观粒子状态的“波函数”, 并不是真正意义上的波函数,

而是描写微观粒子运动状态的径向位移函数,位移函数间接反映了微观粒子受到不同于经典力学的作用,微观粒子并不具有真正意义上的波动属性,“波动属性”只是一种表象,量子力学的基础难题被自然消除。

(2) 微观势函数关于薛定谔方程的推导:薛定谔方程通常通过类比法得以建立,而并非严格从物理和数学上推导得到,含有“猜测”和“拼凑”的成分,并被认为如同经典力学中的牛顿方程一样,不能由其它基本原理推导得到,这在一定程度上是由于量子力学对 $\psi(r,t)$ 的物理意义并不十分清晰,通过(1)的分析已经明确 $\psi(r,t)$ 表达的是微观粒子的径向位移函数,则原则上可以通过径向位移函数 $\psi(r,t)$ 推导薛定谔方程;现在数学上对径向位移函数 $\psi(r,t)$ 关于坐标 $r(x,y,z)$ 求二阶偏导数,再利用关系式 $\lambda = u/2v$,正交向的动能 $E_k = mu^2/2$ (此处 m 为微观粒子的质量),及 $E_k = h\nu$ (这里 h 为普朗克常量),则得到微观粒子的正交动能

$$E_k = -\frac{\hbar^2}{2m\alpha^2} \cdot \frac{\nabla^2 \psi}{\psi}$$

其中 $\hbar = h/2\pi$,上式实质上我们已经将微观粒子正交动能通过径向位移函数进行表达;现在按照经典力学规律,则微观粒子正交向的运动速率 u 必须由经典力的作用来得以维持(事实上,当微观粒子处于 $U_{\text{微观}}(r)$ 的作用之中,正交向的运动速率 u 并不需要由向心力的作用来得以维持,这形成了微观与经典之间关于运动表达的不同),相应微观粒子具有经典势能 $U_{\text{经典}}$,再利用微观粒子具有的总能量 $E = E_k + U_{\text{经典}}$,于是得到方程

$$-\frac{\hbar^2}{2m\alpha^2} \cdot \nabla^2 \psi + (U_{\text{经典}} - E)\psi = 0$$

现在考虑 $\alpha^2 = 1$ 的特殊情况,上式即为定态薛定谔方程的形式;这说明薛定谔方程是在求解当 $\alpha^2 = 1$ 时微观粒子的位移函数,揭示的是微观粒子在微观作用下的运动规律而非波动规律。

(3) 德布罗意关系的真实物理含义:传统在建立薛定谔方程都必须利用到德布罗意关系式,(2)推导薛定谔方程的过程中利用到关系式 $\lambda = u/2v$ 和 $E_k = h\nu$,由此可再次得到

$$\lambda = h/p$$

但与德布罗意提出关系式时的理解不同,德布罗意通过类比光的波粒二象性而提出关系式时,思想上已经猜测微观粒子是一种新的波(物质波),这成为量子力学体系得以建立的指导思想和前提基础,将微观粒子的运动引入“波动”领域,如节一所述,这一思想所引发的难题是持久的;在微观作用这一发现之下,如(1)关于微观粒子位移函数的给出和(2)关于定态薛定谔方程的推导, ν 和 λ 表达的并非是微观粒子的“某种”波动频率和波长,而是当微观粒子处在微观作用中的径向频率和半正交周期距,揭示的是微观粒子的运动规律而非波动

动规律。于是这里重新发现了德布罗意关系所揭示的物理规律，粒子的正交动能和径向频率的比值，以及粒子的半正交周期距和正交动量的乘积都为普朗克常量

$$E_k / \nu = h; \quad \lambda \cdot p = h$$

德布罗意关系揭示的是自然界中粒子运动存在的一个基本定律，普朗克常量为限定自然界粒子运动规律的基本常量。

六、 微观势函数与经典力学之间的关系

微观势函数自然的实现微观领域的量子化，对玻尔理论现象的理解，和对量子力学形式的重新解读和推导，都在说明经典物理学的力学定律并不精确，这也是将经典物理学直接运用到微观领域不再适用的原因，但微观作用与经典作用之间并非决然分开的两种作用，而属于同种作用的不同表现形式。考虑经典势函数为库仑势的情况，则有

$$U_{\text{微观}} = -\frac{Q_1 Q_2 \cos^{2m}(\sqrt{r/A})}{4\pi\epsilon_0 r} \quad \left(\text{其中: } A = \frac{2\epsilon_0 h^2}{\pi m |Q_1 Q_2|} \right)$$

当 m 很大时， $U_{\text{微观}}$ 必定在 $r_n \approx n^2 \pi^2 A$ 处具有极值势能，现在假设某带电粒子由第 n 能级进入第 $n-1$ 能级（且有 $n \gg 1$ ），极值势能的改变量 $\Delta U_{\text{微观}(n \rightarrow n-1)}$ 与空间改变量 $\Delta r_{\text{微观}(n \rightarrow n-1)}$ 的比值计算如下

$$\frac{\Delta U_{\text{微观}(n \rightarrow n-1)}}{\Delta r_{\text{微观}(n \rightarrow n-1)}} \approx \frac{Q_1 Q_2}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{n^4 \pi^4 A^2} = \frac{Q_1 Q_2}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{r_n^2}$$

由于 A 由粒子的电荷量和质量确定，所考察体系带电荷量和质量越大时 A 值越小， r_n 近似连续变化，作用因子的效应不再明显，量子现象逐渐消失，上式即为经典力学中的库仑定律，而高电荷量和大质量则属于宏观物理，这说明经典力学中的库仑定律只是微观作用在宏观上的一种近似结果；而当所考察对象为小电荷量和小质量物体时 A 值很大，作用因子不能被忽略，经典物理中库仑定律不再适用于微观领域。

七、 结束语

与传统不同，传统在对待玻尔理论时只是简单的认为其由于自身的缺陷已经被量子力学取代，传统在寻求解决量子力学的基础难题时也只是在其理论体系之内进行，本文则重新考察了玻尔理论和量子力学得以建立的前提性思想基础，分析结果表明它们并不严格成立，如玻尔理论首先既定了核外电子受到已知形式的原子核库仑力的作用，量子力学则司空见惯的将微观粒子的衍射实验现象作为微观粒子具有波动属性的论据，并且最终都将理解和消除问题的关键指向微观粒子究竟受到何种作用？微观势函数更是这一思考下的新发现，微观和宏观之间存在作用关系

$$U_{\text{微观}} = U_{\text{经典}} \cdot \mathcal{G} = U_{\text{经典}} \cdot \cos^{2m} \sqrt{r/A}$$

微观作用自然的实现对微观领域的量子化，同时微观势函数对玻尔理论、量子力学和经典理论作出新的认识，两者都未深入到微观作用这一本质：（1）玻尔理论是结合经典力学和微观作用的量子化现象而建立的理论，玻尔理论的基础悖论和理论的巨大缺陷，正是由于玻尔理论受力基础的错误而导致，事实上原子内部并非如玻尔理论的描述；（2）量子力学则是直接

运用微观作用的“波动”表象而建立的理论，波函数实质为描述微观粒子运动的径向位移函数，微观粒子不具有真实的波动属性，微观粒子的运动由普朗克常量限定，有

$$E/\nu = h; \lambda \cdot p = h$$

(3) 微观作用属于更物质之间本源的作用，经典物理的力学定律属于微观作用在宏观上的近似结果，由宏观领域深入到微观领域时缺少对作用定律的再发现过程，这也是形成玻尔理论现象和量子力学现象的原因所在，和将经典理论直接运用到微观领域不再适用的原因。

参考文献

- [1] M. Born, Zeit.Physik, 38(1926),803.
- [2] A. Einstein, B. Podolsky, N. Rosen. Phys Rev.47,777(1935).
- [3] D.Bohm.Phys.Rev.85,166,180(1952).
- [4] M. Planck, Verh.Phys.Ges.,2(1900),202.
- [5] T.D. Lee, C.N. Yang. Physical Review. 104(1956),254

Question of Quantum and Physical Reality

Zhang ChengGang

E-Mail: zhangchenggang@163.com

Abstract: shortcomings and difficulties which in Bohr's theory and quantum mechanics imply a deeper theory after the quantum, a new way to touch the deeper theory is by analysis their premise thought foundation, analysis indicated that the force of microcosmic particle should different from classical mechanics, and microcosmic potential function(microscopic interaction) is a new discovery; the shortcomings and difficulties of Bohr's theory and quantum mechanics can be understood or eliminated by microcosmic potential function, Bohr's theory is the result of combining quantum phenomena of microscopic interaction and classical physics, quantum mechanics is established by directly using microscopic interaction's "wave" apparent phenomenon, the microscopic interaction is more essential theory between the two particles, classical mechanics is only approximation results of microscopic interaction in macroscopic.

Key words: Bohr theory; quantum mechanics; potential function; classical action; microcosmic action.