

量子: 过去与现在

孙昌璞

量子概念代表了人类认识微观世界的核心观念, 不仅说明了微观实物粒子存在的基本形式, 而且描述了波与场所具有的粒子性特征。以量子力学为核心的现代量子理论, 完整地描述了微观世界的量子行为。时至今日, 虽然在量子力学基础方面, 量子力学的含义还没有定论, 但量子力学已成为现代科学的重要基石, 导致了激光、半导体和核能技术的产生, 并深刻影响了当代人类社会的生产力。

近 20 年来, 量子物理与信息科学、计算机科学交叉形成了新的科学领域))) 量子信息。量子信息主要包括量子计算、量子通讯和量子密码学。其目标是利用量子观念及其衍生的量子特性进行信息存储、处理、计算和传送, 完成经典信息系统难以胜任的高速计算、大容量信息传输通讯和完全安全、保密的信息处理任务。量子信息的研究, 有可能为突破传统计算机芯片的尺度极限提供新的启示和革命性的解决方案, 从而导致未来计算机构架体系根本性的变革。

为了使读者能够清楚地理解量子观念、正确地了解量子物理的现代发展, 我们将从最基本的概念谈起。

一、光量子 and 玻尔原子

量子的观念主要起源于光量子假说。光量子是指光波客观上具有的基本能量(动量) 单元。它代表的量子观念来自 20 世纪初黑体辐射的研究。普朗克发现, 为了解释实验中发现的黑体辐射能量的频率分布, 必须假设电磁场辐射只能以/ 量子0 方式进行, 即发射和吸收的能量只能是每个/ 量子0 能量的整数倍。这是与经典力学中能量连续性不一样的革命性观念。由此, 爱因斯坦进一步明确提出光量子(或光子) 的概念, 认为辐射场是由光量子组成的。光子与电子碰撞, 其行为很像一个有特定能量和动量的实物粒子。由此可以很好地解释光电效应: 光照射到金属表面, 只有当光的频率足够大时, 电子才

能克服表面的逸出功, 脱离金属表面。爱因斯坦进一步应用能量的不连续性, 成功地解释了固体比热在 $T = 0$ 度时的行为。

光波能量不连续的量子观念, 进一步启发了玻尔对于卢瑟福原子有核模型的深入研究。1909 年, 卢瑟福的学生盖革和马斯顿用粒子轰击原子时发现, 有 $1/8000$ 的粒子被完全反射回来, 产生所谓的/ 大角散射0。基于大角反弹这个当时不可思议的实验事实, 卢瑟福通过严密的经典散射理论分析后, 于 1911 年提出了/ 原子有核结构模型0: 正电荷集中在仅占原子大小万分之一的中心范围, 而电子则像行星围绕太阳运动一样, 被束缚在这个中心周围。然而在观念上,/ 原子有核结构模型0 与当时业已/ 大厦建成0 的经典物理有着极为深刻的矛盾: 根据经典力学和电磁学, 绕原子核运动, 电子在速度改变时要发生辐射, 引起能量损失, 最后将会塌缩到原子核上。因而, 理论上卢瑟福原子是不稳定的。

针对这个问题, 玻尔提出了一种基于卢瑟福/ 有核模型0 的原子理论, 其基本内容是: 一、定态条件: 氢原子中的电子绕原子做运动, 形成经典轨道, 但有一个/ 强性规定0, 即它只能在分立轨道上运动, 且不产生辐射。二、频率条件或量子跃迁: 仅当电子从一条轨道/ 跃迁0 到另一条轨道时辐射才会产生, 辐射频率是两个轨道频率之差。第三, 角动量量子化: 要求微观范畴的量子理论外推到宏观领域必须得到与经典理论一样的结果。依据这个所谓的对应原理, 可以推导出电子运动的角动量量子化))) 角动量只能是某个小量的整数倍。这个观点克服了经典理论对原子有核模型预言与现实原子基本稳定的矛盾, 成功解释了实验中总结出来的氢原子光谱里德伯-里兹(Rydberg-Ritz) 组合公式。形式上看, 基于以上三个观念的玻尔理论, 只是通过定态条件假定回避了卢瑟福模型的困难, 但这里形成的根本性观念却是现代物理学、乃至当代科学的发端。

二、物质波和宏观量子现象

量子理论的另一个重要方面是德布罗意物质波概念的引入。德布罗意把光的波粒二象性观点加以推广,认为一切微观粒子都具有波动性。一个动量为 p 、能量为 E 的自由粒子,相当于一个波长为 $\lambda = h/p$ 、频率为 $\nu = E/h$ 、沿粒子运动方向传播的平面波。许多实物粒子物质波的波长很短,例如能量为 100 电子伏的电子,其物质波波长仅为 0.12 纳米。室温下氢原子的物质波波长更短,仅为 0.021 纳米。1927 年,美国物理学家戴维逊和革末,在进行电子散射实验时,一次意外事故使他们观测到和 X 射线衍射类似的图像。同年,英国物理学家汤姆逊完成了电子束穿过多晶薄膜的衍射实验。这些都证明电子具有波动性。以后,物理学家还陆续证实中子、质子乃至原子、分子等微观粒子都具有波动性。

根据量子理论的波粒二象性学说,任何微观实物粒子都会像光波、水波一样,具有干涉、衍射等波动特征,形成物质波(或称德布罗意波)。日常所见的宏观物体虽然由服从这种量子力学规律的微观粒子组成,但由于其空间尺度远远大于这些微观粒子的德布罗意波长,微观粒子量子特性由于统计平均的结果而被掩盖了。对于宏观物质运动而言,也由于其物质波波长极短(远远小于宏观物体的尺度),其波动效应通常很难观察到。例如当一颗质量为 10 克的子弹以 300 米/秒的速度射出时,其波长仅为 2.12×10^{-34} 米。由于原子核的线度约为 10^{-15} 米(飞米)的数量级,相比之下子弹的波长小到实验难以测量的程度。这时可以不考虑子弹的物质波效应,用轨道这样的经典概念,就可以相当准确地描述子弹的宏观运动。由于当代材料制备和测量技术的进步,物理学家已经用实验证实了原子乃至大分子的波动性。维也纳大学研究小组利用热的 C60 分子进行了量子干涉实验,观察到了由 C60 质心运动物质波波长确定的干涉条纹。它表明,在特定条件下,具有丰富内部自由度的较大粒子(甚至宏观物体),也具有实验上可观测的物质波特性和波动性。

虽然在通常条件下宏观物体整体运动不显现量子效应,但在超低温等极端条件下,由大量粒子组成的宏观系统则会呈现出整体量子现象,当温度降低或粒子密度变大时,宏观物体的个体组分会相干地结合起来,通过长程关联或重组进入能量较低的量子态,形成一个有机的整体,使整个系统表现出奇特

的量子性质。原子气体的玻色-爱因斯坦凝聚、超流动性、超导电性和约瑟夫森效应等都是宏观量子效应的具体表现。宏观量子效应有着广泛应用,如利用物质波的干涉现象,可以制作各种干涉仪。干涉仪是测量精度和灵敏度都非常高的精密仪器,干涉仪测量时使用的波长越短,测量精度和灵敏度就越高。一旦用物质波替代光波做成干涉仪(例如用在宇宙飞船导航的陀螺仪上),其灵敏度将比现在的激光陀螺仪还高出几亿倍。在 20 世纪 90 年代就已利用玻色-爱因斯坦凝聚的相干输出,研制出了原子物质波干涉仪原理器件。

三、矩阵力学和波动力学

量子力学是描述微观世界运动的基本理论,包括互为等价的矩阵力学和波动力学。为了发展玻尔思想以适用于更复杂的原子,1924 年,海森堡首先提出革命性的观点:在原子世界,每个可观测的实验结果(如氢原子谱线)总与两个玻尔轨道有关,一个绝对的、由速度和坐标同时确定的轨道在描述原子的微观理论中没有意义,应当处处以两个轨道来描述可观察的物理量。例如,原子的电磁辐射可以由电子坐标随时间的变化来描述,可能辐射的频率是其傅立叶展开式中出现的频率))里德伯-里兹组合中有两个指标的实数。于是,应当把坐标和动量等可观察物理量都看成具有两个指标元素的矩阵(或算符),这时坐标 Q 和动量 P 是不对易的,即 $QP \neq PQ$ 。在玻恩和约当的协作下,海森堡这个重要发现导致了矩阵力学的建立,它的诞生成功克服了玻尔理论处理复杂原子时遇到的困难。

量子力学的另一表述))波动力学是薛定谔在 1924 年建立的,其核心是用满足薛定谔方程的时空点上的波函数描述粒子的运动。在波动力学中,原子的定态是薛定谔方程的本征态,相应的本征值就是原子的能级。原子的电磁辐射可描述为从一个能级到另外一个能级的跃迁。狄拉克通过建立表象理论,把矩阵力学和波动力学的描述完美地结合起来,而且把它推广到狭义相对论描述的高速运动情况,成功预言了正电子。正电子等反物质粒子的发现,把量子力学理论推上科学的顶峰。

量子力学的另一个重要基础是玻恩波函数概率解释。德国物理学家玻恩思考波函数的本质问题,提出物质波是概率波的见解:波函数绝对值的平方(模平方)就是微观粒子在某一时刻出现在某处的概

率。人们可以从光子的概念出发,理解概率波的观点。如果想象光束是由大量光子组成的,光的强度就是光子到达屏幕上各处的概率。按照玻恩的想法,电子在衍射时落在空间的哪一点是有一定概率的。在衍射时,成千上万的电子落点的分布是一种概率分布,电子衍射图像正是这种概率分布的体现。人们也可以在动量空间中理解这种概率分布。

从原理上讲,物质波的干涉现象源自描述波函数的薛定谔方程是线性的。若物理体系有两个可能状态,其叠加也代表物理体系的一个可能状态。依据波函数的玻恩解释,其空间表示的模平方代表了在某空间点发现粒子的几率密度。对一个量子相干叠加态而言,其模平方中除了有两个分量的模平方,还包含不同分量的交叉项,它们代表了量子干涉,意味着态的量子相干性。仅就数学结构而言,这与经典光束的干涉是一样的。然而,量子干涉或量子相干性有不同于经典干涉的十分奇妙的基本量子特性。

四、不确定关系与互补(并协)原理

在经典物理中,描述质点特征的几个物理量通常可以在任意精度内同时进行测量。当微观粒子表现为物质波时,它的空间位置和动量是不能同时确定的,只会有不确定值 Δp 和 Δx 。德国物理学家海森堡指出,动量和位置不能同时确定的程度,由普朗克常量 h 加以限定,具体结果表示为/不确定性关系 $\Delta x \Delta p \geq \hbar/2$,其中 $\hbar = h/2\pi$,它是量子理论所描述的微观粒子的最基本特征之一。对此物理上有一种直观的解释,即海森堡提出的/测量扰动 Δ 的观念。例如用光去照射电子以之进行观测,要求观测得越精确(即 Δx 越小),就得用波长越短的光去照射电子;光子波长越短意味着光子动量越大,电子受到碰撞后其动量偏差 Δp 也就越大。

物质波的干涉现象和不确定性关系有着互补关系。一个典型例子是物质波的双缝干涉实验:实验中,如果测得粒子通过了某一条缝,干涉条纹便不再存在了。这种由于测量或其他影响导致相干性消失的现象称之为量子退相干。仅就量子测量而言,人们称之为波包塌缩。玻尔认为,量子退相干根源在于互补性(并协)原理:物质存在着波粒二象性,但在同一个实验中波动性和粒子性是互相排斥的。知道粒子走哪一条缝,等于强调粒子性(只有/粒子 Δ 才具有确定位置,而波则弥散于整个空间)。根据互补性原理,波动性被排斥了,干涉条纹便消失了。可以用

海森堡/测量扰动 Δ 解释量子退相干,但测量扰动并不是退相干唯一的根本原因。

1998年,德国兰佩(Rempe)研究小组通过冷原子干涉实验证明,坐标-动量的测不准关系不是导致干涉条纹消失的唯一原因。在不干扰冷原子空间运动的动量的前提下,他们利用冷原子内部状态有效记录了空间路径的信息。内部状态(/仪器 Δ)与原子束空间态相互作用,形成了原子束空间状态和内部状态的纠缠态,干涉条纹消失。这类新型物质波的干涉实验,直接检验了与互补性原理相关的量子力学基本问题,大大加深了人们对物质波奇妙特性的理解。

五、从量子物理到量子信息

如上所述,量子理论是标志20世纪科学进步的一个伟大的里程碑。它的创立和发展不仅导致了重大的技术发明、创造了人类的物质文明,而且使得人们对微观世界运动规律有了基本正确的、革命性的理解。然而,自量子力学诞生以来,以量子测量问题为核心,关于量子力学的思想基础和基本问题的争论就从来没有停止过。近年来,伴随着技术的进步,过去仅限哲学思辩式探讨的量子论基本问题,已经能够在实验室里精确地检验。这方面的研究导致了量子信息的发展。

根据计算机发展的摩尔定律,中心处理器的运行速度每18个月就会提高1倍,相应地,芯片上晶体管集成的数目也随时间呈指数增长。这预示着计算机芯片元件不久将会达到它的极限尺度,突破芯片元件尺度的极限是当前信息科学所面临的一个重大问题。从物理学角度看,信息的载体必定是一些特定的物理系统,信息的传递和处理必定是某种物理过程。随着物理的存储单元变得越来越小(甚至变成单个原子),量子效应将会凸显出来,基本量子特性)))量子相干性会在信息的存储、传递和处理过程中起核心作用。

量子信息的研究是以量子力学原理为基础、充分利用量子相干的独特性质(如量子并行、量子纠缠和量子不可克隆),探索以全新方式进行计算、编码和信息传输的可能性,为突破芯片极限提供了新概念、新思路和新途径。从本质上讲,量子信息的关键是直接利用量子相干性的物理观念以及由此引起的量子效应,而不只是利用量子力学的物化产品(如传统半导体器件)。量子计算的优势源于量子相干性

导致的量子并行,量子通讯则依赖于多粒子相干叠加代表的量子纠缠,而量子密码则直接源于量子测量导致的波包塌缩。

众所周知,经典信息处理的最基本单元是比特(用两个经典状态 0 和 1 表示),但如果用微观系统作为信息处理单元,0 和 1 必定是两个量子态。因此,由量子力学线性叠加原理表示的量子相干性在信息处理过程就会突现出来,甚至会发挥意想不到的作用。一个典型例子就是大数因子化的量子算法。经典计算中存在着一大类难解问题(NP 问题)。由于其计算复杂度随大数位数的增长而指数上升,经典计算机在原理上对此不能进行有效计算。但是,肖(Shor)量子算法可以把问题的复杂度变为随位数增长呈多项式上升,从而原则上可以有效地进行大数因子化。由于目前许多安全的经典保密体系是基于大数因子化的难解性,量子算法无疑是对目前密码系统的巨大挑战,对基于经典保密系统领域(如军事、金融和国家安全等)的信息安全构成了根本性的威胁。为了保证这些领域的信息安全,发展量子信息的理论与技术势在必行。在研制量子计算机的同时,又要开发由量子观念保证其保密性的量子密码体系。为此,世界各国已投入大量人力、财力,积极开展相关的基础研究。

虽然量子信息的研究已经取得日新月异、令人叹为观止的进步,但是最终要实现有实际价值的量子计算、量子通讯和量子密码,不仅在实用化上存在相当大的技术困难,而且甚至存在原理性的困难。一般地说,这些困难的根源是量子退相干问题。事

实上,量子力学所展示的微观世界图景,完全不同于经典物理/精确描述0的物质世界。通过测量从微观世界提取经典观察者可以感知的信息,通常要改变微观系统的量子态。环境的随机性也会导致微观系统量子相干性损失。例如固体系统易于操纵和集成化,是用量子计算的量子比特的最佳候选者。但是,由于固体量子比特存在根源尚不完全清楚的低频噪音(1/f 噪音),基于固体系统量子计算的研究具有广阔发展前景的同时,又面临巨大的挑战。

总之,量子力学与信息科学的结合,充分显示了学科交叉的重要性。新兴的量子信息科学与技术处在经典与量子的交汇处(一个传统量子理论没有充分关注的领域),反过来对量子物理提出新的问题和挑战。因此,量子信息的研究不只是两个不同学科的简单交叉,还涉及到怎样从物理学的角度,在物质科学层面上深入理解什么是信息、什么是物质、能量和信息关系等基础性问题。

(中国科学院理论物理研究所 100080)

作者简介

孙昌璞,1962 年生于辽南农村,1981~1987 年在东北师范大学物理系攻读本科及硕士研究生,1992 年在南开大学获得博士学位,现任中国科学院理论物理研究所研究员,兼任英国 J. Phys.



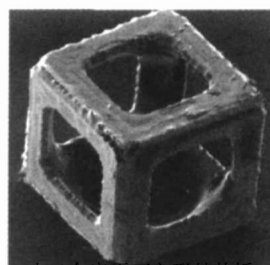
A、5 中国科学 6 和 5 现代物理知识 6 等刊物的编委。主要从事量子力学基本问题、光与物质作用、量子信息理论和数学物理前沿问题的研究。

科苑快讯

能够自动折叠成型的纳米容器

设计新的药物运送工具或者试图控制人体中药物之间的反应,都是令化学家头疼的问题。不过,美国马里兰州的研究者可能已经找到了解决办法。马里兰州巴尔的摩市约翰#霍普金斯大学的研究者,在 5 美国化学会杂志 6(Journal of the American Chemical Society)在线发表的一篇文章中报告,他们制造出了一种微小的二维镂空平面结构,这种结构能够自动折叠成镂空立方体或其他 3D 容器。这种容器可用于将化合物运送到化学家希望其进行反应的地方。而金属版纳米容器的去向,可以通过磁场进行控制。

研究者说,这种新型纳米容器能够作为神奇的药物运送工具和芯片实验室(lab2on2a2chip,亦译为掌中生化实验室)的反应器。美国休斯顿市德克萨斯大学健康科学中心(Health Science Center)



由 6 个扁平正方形结构折叠拼接而成的 3D 立方体

的纳米医学专家马洛#法拉利(Mauro Ferrari)说:/这是一流的研究工作,它为药物的可控式释放研究领域带来了创新元素。0 不过他警告道,这一技术在用于治疗患者之前,/将经过一个漫长的过程。0

(高凌云编译)
现代物理知识