

经典干涉与量子干涉

邹明

若将1609年伽利略使用望远镜观察月球作为以观察和实验为基础的现代物理学的起点,近400年来,科学技术获得了巨大的发展,经典物理学对宏观世界给出了几乎完美的描述,同时,由于科学技术的发展和人类认识水平的不断提高,经典物理的知识体系已远远不能满足人们认识世界的需要,随人们认识世界、改造世界的经验积累,20世纪物理学取得了两个划时代的发展——创立了相对论和量子力学,并使之分别成为认识高速、微观领域的利器。

量子论创立100年来,量子力学在固体特性和光辐射方面的应用已导致半导体和激光的产生。现在量子论和信息论的结合形成了量子信息论,提出了令人耳目一新的概念、原理和方法。近几年,对量子信息和量子计算,在理论和实验上都取得了重要进展,提出了基于量子干涉的高速计算机模型和量子算法,使信息科学似乎看到了光明的前景,而量子理论独具的量子态相干叠加性和纠缠特性是实现量子信息优越性和量子计算的前提,作为量子信息载体的量子态,在信息的传输和处理过程中不可避免地与周围环境相互作用,相干性将被破坏,引起量子信息的丢失和量子计算的错误,那么要保证量子信息传输和计算的实现上有举足轻重的地位,为了对量子干涉有一个较好的理解,本文将它与经典干涉作一个比较。

经典干涉

干涉的概念最初始于经典力学中的机械波的相干叠加,即当两列波的波源满足振动方向相同、频率

一种直接的用途就是对超冷原子云,玻色-爱因斯坦凝聚体成像。这是一种新的量子状态,在这一状态中,许多原子合起来显示一个实体的行为。在这样一种原子云中,每一个原子都是极冷的——也就是运动非常之慢——以致单单一个光子就可以把原子撞出原子云外。以前不存在一种可以获得凝聚态图像而同时又不破坏原子云的方法。“无相互作用的测量”可能是使这样的原子集合成像的一种途径。

除了使量子物体成像之外,“无相互作用测量”还可用来扩大“薛定谔的猫”。可以使一组光子(比如

相等且在空间各点位相差恒定的条件时,这两列波在空间某些点的振动始终加强,另一些点振动始终减弱甚至完全抵消,这种现象称为干涉现象。

设有两个相干波源,波函数分别为 y_1, y_2 ,有

$$y_1 = A_1 \cos(\omega t + \phi_1 - \frac{2\pi r_1}{\lambda}) \quad (1)$$

$$y_2 = A_2 \cos(\omega t + \phi_1 - \frac{2\pi r_2}{\lambda}) \quad (2)$$

若P为两列波叠加区域中某一点, r_1, r_2 为两波源分别到点P的距离, λ 为两相干波的波长。按波的叠加原理,P点的合振动波函数为

$$y = y_1 + y_2 = A \cos(\omega t + \phi) \quad (3)$$

则,点P的振幅A、位相 ϕ 分别为

$$A^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1 A_2 \cos[(\phi_2 - \phi_1) - \frac{2\pi}{\lambda}(r_2 - r_1)] \quad (4)$$

$$\phi = \arctan \frac{A_1 \sin(\phi_1 - \frac{2\pi r_1}{\lambda}) + A_2 \sin(\phi_2 - \frac{2\pi r_2}{\lambda})}{A_1 \cos(\phi_1 - \frac{2\pi r_1}{\lambda}) + A_2 \cos(\phi_2 - \frac{2\pi r_2}{\lambda})} \quad (5)$$

令 $\Delta\phi = (\phi_2 - \phi_1) - \frac{2\pi}{\lambda}(r_2 - r_1)$,对点P, $\Delta\phi$ 为常数,一般有 $A \neq A_1 + A_2$,但A为定值,所以合成波的场内有一个稳定的不随时间变化的振幅分布,即是干涉现象,其中 $2A_1 A_2 \cos[(\phi_2 - \phi_1) - \frac{2\pi}{\lambda}(r_2 - r_1)]$ 被称为干涉项。

特别,当 $\Delta\phi = 2k\pi (k=1, 2, \dots)$ 时, $A = A_1 + A_2$,为干涉加强; $\Delta\phi = (2k \pm 1)\pi (k=1, 2, \dots)$ 时, $A = |A_1 - A_2|$,为干涉相消。

量子干涉

我们知道,微观粒子(电子、原子等)都具有波粒二象性,他们不能用经典物理知识来完整描述,在量子力学中,我们用波函数 $\varphi(r, t)$ (或表示为 $|\varphi(r, t)\rangle$)来描述微观客体,定态时记为 $\varphi(r)$ (或 $|\varphi(r)\rangle$),在对它描述

说20个光子)处于相同的迭加中。这个特性可用来制造量子逻辑门,而量子逻辑门是制造量子计算机的关键器件。

近年来,基于量子力学效应(如量子相干、量子隧穿、库仑阻塞效应等)的量子器件研究取得很大进展,当然光学也不例外。美国劳伦斯伯克利国家实验室,洛斯阿拉莫斯国家实验室等机构的研究人员证实,只用线性光学中的简单元件就能做到量子计算,至少在理论上是可行的。

(南京中国科学院国家天文台南京天文光学技术研究所 210042)

的系统进行测量时,内积 $\langle\varphi(r),\varphi(r)\rangle$ (或 $\langle\varphi(r)|\varphi(r)\rangle$)能给出粒子出现在空间点 (r) 的相对几率,这反映了微观粒子的一种统计规律性,因此,通常称粒子波为几率波。那么量子系统的态可用波函数来描述,说量子态的波函数为 $|\varphi(r,t)\rangle$ 就是说量子系统处于 $|\varphi(r,t)\rangle$ 态。

粒子(电子、光子等)双缝干涉实验是量子力学的实验基础之一,我们就以电子的双缝干涉为例来说明量子干涉性。设 $|\varphi_1\rangle,|\varphi_2\rangle$ 分别为电子穿过狭缝1、2到达观察屏的量子态,根据量子态叠加原理,电子穿过两狭缝到达屏的量子态就为

$$|\varphi\rangle=c_1|\varphi_1\rangle+c_2|\varphi_2\rangle \quad (6)$$

其中 c_1, c_2 为复数,且 $|c_1|^2+|c_2|^2=1$,那么电子到达屏上一点P的几率为

$$\langle\varphi|\varphi\rangle=|c_1|^2\langle\varphi_1|\varphi_1\rangle+|c_2|^2\langle\varphi_2|\varphi_2\rangle+c_1c_2^*\langle\varphi_2|\varphi_1\rangle+c_1^*c_2\langle\varphi_1|\varphi_2\rangle \quad (7)$$

或写作

$$|\varphi|^2=|c_1|^2|\varphi_1|^2+|c_2|^2|\varphi_2|^2+c_1c_2^*\varphi_2^*\varphi_1+c_1^*c_2\varphi_1^*\varphi_2 \quad (8)$$

可以看出(8)式和(2)式形式上是相似的, $|\varphi|^2$ 并不是电子穿过两狭缝的几率的简单求和($|c_1|^2|\varphi_1|^2+|c_2|^2|\varphi_2|^2$),其中 $c_1c_2^*\varphi_2^*\varphi_1+c_1^*c_2\varphi_1^*\varphi_2$ 代表了两束粒子间的干涉效应,被称为量子干涉项,也正是量子相干叠加态的干涉性(量子相干)的表现。

量子干涉在量子信息和量子计算中的重要应用

量子存储及量子通信中的应用 量子信息理论中的量子位是一个微观粒子构成的两态系统,例如两态为 $|0\rangle$ 和 $|1\rangle$,量子位可以分别处于 $|0\rangle$ 态和 $|1\rangle$ 态外,还可以处于他们的叠加态 $c_1|1\rangle+c_2|0\rangle$,因此可说量子位同时处于 $|0\rangle$ 态和 $|1\rangle$ 态,即一个量子位可同时存储两个状态信息,而经典计算机一个位只能代表一个状态信息。

量子计算的并行性 设一个量子系统 $|\varphi\rangle,|n\rangle$ 是某力学量的本征态,则相干叠加态 $|\varphi\rangle=\sum_n c_n|n\rangle$ 也是系统的一个可能态,量子系统以一定的几率分布在各叠加态上,兼有各态的特性。对系统 $|\varphi\rangle$ 进行么正变换,就是对其所有的叠加态进行了么正操作,也就是说量子计算机的一个处理器可对大量量子态进行计算。

量子退相干

信息存储于量子态上,所以量子信息就是量子位的量子态,量子态的演化遵循薛定谔方程,量子信息的传输就是量子态在量子信道中的传输,信息处理就是量子态的么正变换,信息提取就是对量子系

统的测量,在这一系列过程中,量子位由于与环境相互作用而产生纠缠等原因导致量子相干性衰减,使得量子位能量或相对位相变化,量子信息消失在环境中,这就是量子退相干,它是量子计算机和量子信息处理的主要障碍。

经典干涉和量子干涉的比较

经典干涉是宏观波动叠加而产生的现象,描述的是振动能量在叠加区域的分布情况:量子干涉是完全不同于经典干涉的一种量子现象,描述的是同一量子系统若干个不同态叠加为一个纯态的情况。经典干涉和量子干涉是物理学中的两种干涉现象,他们有着形式上的相似和本质上的区别:

(1)量子力学和经典力学中都存在着叠加原理,形式上是相似的,但二者在意义上有着本质的差别。经典力学中的波的叠加原理是基于媒质质点振动和波的传播的相对独立性,两列波叠加形成一个新的波;而量子力学中态的叠加原理是基于微观客体遵循的薛定谔方程所具有的线性,两个量子态叠加的结果是使得系统将部分地处于各个叠加态。

(2)两种干涉在数学上的表示都是波函数的相加。经典波是实在的、可直接观察的,发生干涉时表现为叠加区域中的某些点的振动始终加强或减弱,即稳定的强度分布;而发生量子干涉的波是描述微观粒子的几率波,它反映出微观客体的不确定性的统计规律,量子干涉使得量子态处于某些叠加态上的几率总是增大或减弱,即稳定的几率分布。

(3)经典波以实物为媒质,反映振动形式在媒质中的传播,发生干涉时可以直接地观察到干涉图样;量子干涉的波函数不以实物为媒质,发生干涉时不能直接地观察到干涉图样,但可以通过大量的微观粒子的集体表现,间接地得到与经典干涉相似的量子干涉图样。

(4)干涉项都可以带有信息。经典力学中的相干波的干涉直接反映了两波源到观察点的波程差(或位相差);量子干涉中的干涉项反映了量子位的相干强度、位相等,体现出量子信息的保持程度。

总之,量子干涉与经典干涉是本质上不同的两类干涉现象,但经典干涉给了我们直观的干涉图样,更是我们理解量子干涉的比较对象,量子相干的独特性质为量子信息处理和量子计算带来了充满希望的前景,让我们看到了信息技术发展的潜力空间。

(恩施市湖北民族学院物理系 445000)