

光的量子相干性研究

◆孙昌璞

人类关于物质世界的许多认识是通过光开始的。理解光的本性一直贯穿着近代物理学发展活动的主线。历史上,人们对光现象物理性质的探索,可以追溯到牛顿时代。光是粒子还是波的问题曾经引发了牛顿等人 and 惠更斯学派的激烈争论。19世纪末,由于麦克斯韦电磁场理论的建立,惠更斯(C. Huygens)提出的光的波动学说一时占了上风,但后来,量子理论的建立又使得牛顿的光的粒子学说重振雄威。量子力学关于物质世界的波粒二象性描述,原则上使得两种学说得以协调。但是,在1960年代以前,怎样从实际的实验探测出发,从根本上理解光场的波粒二重属性,仍然是当时物理学面临的重大问题。

1963年,格劳伯(R. J. Glauber)建立了光学相干的量子理论。这一开创性工作使得这个问题在理论基础和实验观测两个层面上得以彻底解决。格劳伯以量子电动力学为基础,区分了经典相干性和量子相干性,从而发现了自然光与激光的本质差别,开创了量子光学研究的新时代。不少人称格劳伯为“量子光学之父”,这是不无道理的。他获得2005年诺贝尔物理学奖实属众望所归,当之无愧。

历史背景:理解光的本性

为了全面理解格劳伯工作的深刻意义,有必要对人类认识光的本质的探索过程做一历史性的回顾。

19世纪末,通过法拉第(M. Faraday)和麦克斯韦(J. C. Maxwell)等人艰苦卓绝的努力,经典的电磁场理论得以最后确立。根据这个理论,与电磁现象本质相同的各种光学现象只不过是传播着的电磁场(即电磁波)的不同表现形式。基于对电磁场的正确认识,人们发明了今天已惠及全人类的无线电技术,开始了蒸汽工业时代以后的电气化时代。然而,从科学发展的角度讲,仅用经典电磁场理论解释光的本质,只是人类正确理解光现象的一个好的开端。

虽然经典的电磁场理论能够解释许多光辐射现象,但人们发现,黑体辐射奇异的谱分布却不能用经典理论和当时已有的其他光谱学知识加以解释。为了克服这一困难,普朗克(M. Planck)首先修正了唯象的经典公式,成功地拟合了实验数据。然后,他意识

到,为了理解这种唯象方法的正确性,本质上应当考虑光和辐射物质间的能量交换。他进而设想,光的吸收和辐射是通过一个个波包进行的,每个波包的能量必须是分立的,由此,他提出了光量子假说和光量子的概念。爱因斯坦(A. Einstein)进一步发展了普朗克光量子的思想,认为光量子可以视为具有特定能量和动量的运动粒子——光子,它与物质相互作用时必将展现明显的粒子性,如光与物质中电子作用会导致所谓的光电效应。

伴随着量子力学的建立和发展,光量子概念本身得到了进一步深化。例如,玻尔(N. Bohr)在他的原子模型中成功地应用了光量子的概念,解释了氢原子的分立谱结构。然而,光的量子化图像与经典物理看上去是有矛盾的,因为经典电磁场理论描述的辐射过程在能谱上是连续的。爱因斯坦首先意识到了这一点,他明确指出必须建立包含辐射量子化的电磁场量子化理论。今天,这个理论被称之为量子电动力学。

在海森伯(W. K. Heisenberg)和薛定谔(E. Schrödinger)等人建立了量子力学之后,狄拉克(P. A. M. Dirac)首先认识到,连续的电磁场可以对应于一组谐振子而加以量子化,从而可以得到描述原子自发辐射实验的正确理论结果。这个工作是量子电动力学的雏形。后来,经过若尔当(P. Jordan)、泡利(W. Pauli)、朗道(L. Landau)和派尔斯(R. Peierls)等人的工作,从形式上建立了完整的场量子化理论。

但不幸的是,这里包含无穷大发散的困难:与运动电子相互作用,会使得电子的有效质量变得无穷大。为了克服这些困难,朝永振一郎(S. I. Tomonaga)、费恩曼(R. Feynman)和施温格(J. Schwinger)等人发展了重整化方法。这个理论预言了氢原子谱线超精细结构实验中的兰姆(Lamb)移动。至此,电磁场量子化理论——量子电动力学已成功地协调了电磁场的粒子性和波动性的矛盾,为量子光学的最后建立打下了坚实的理论基础。

格劳伯的光的量子相干理论

量子电动力学建立以后,它的主要应用是在高能物理领域。格劳伯把它应用到光学领域,并从根本上解决了当时光学实验中出现的光子群体行为问题——聚束和反聚束等量子关联现

象。需要指出,格劳伯早在普林斯顿期间主要工作在核物理和高能物理领域,因此他对量子电动力学相当精通。格劳伯的成功堪称不同学科有机交叉的典范。

普朗克和爱因斯坦等人建立的光量子概念很好地描述了单光子的粒子性效应,并在光电效应实验中得以验证。但是,光子是一种全同粒子,其统计行为存在一种奇异的集体效应。以前经典电磁场理论或量子力学单光子图像都不能正确描述这种集体效应。1950年代中期的实验发现和1960年代激光理论与技术的发展,更要求人们必须发展描述光子群体行为——聚束效应的理论。

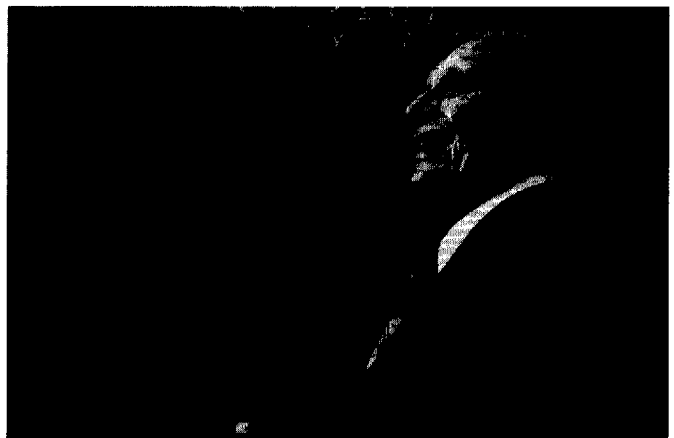
1954—1956年,物理学家汉伯里-布朗(R. Hanbury Brown)和特威斯(R. Q. Twiss)^[1]利用光干涉的方法,用两台相隔20英尺(1英尺=0.3048米)的探测器,测量来自天狼星的光子数。他们发现,当两台仪器对天狼星的光束路径相等时,光电流表的光子数密度关联有一个突出的峰值。这意味着,来自天狼星的光子并不是像雨点那样完全随意地到达地球的,到达两台仪器的光子之间存在某种关联。如果用 $I(x)$ 代表在 x 点接收到的光子密度,则关联函数为: $C(x,y)=\langle I(x)I(y) \rangle$,它描述了在 x 和 y 点同时观测到光子的概率。实验进行所谓的符合计数测量,即如果在 x 点观测到一个光子,在 y 点也同时观测到一个光子,则符合计数器记录一次。实验发现,在同一点符合计数是强度平方的两倍,即 $C(x,y)=2\langle I(x) \rangle^2$ 。这个今天被称为HBT(Hanbury-Brown-Twiss)实验的著名实验预言了光子关联的存在。

虽然这两位实验物理学家没能从理论上解释这个实验现象,但他们直观地意识到,这可能是一种量子效应。后来有人企图用经典理论去解释这个实验,但最后还是意识到了量子理论的必要性。1960年代激光的快速发展要求人们从本质上去区分经典光(如热光)和量子光,这进一步凸现了研究光子群体行为(如聚束和反聚束效应)的量子相干理论的重要性。针对HBT实验,格劳伯在1962—1963年间发表了一系列文章^[2],他应用量子电动力学,以优美简洁的方式,建立了描述光的本性的一般量子相干理论,同时成功地描述了正在迅速发展的激光的物理特性。

通常杨氏干涉实验可用来展现光的波动性,但它只表征光的一阶相干性,并不能从本质上反映光的量子特征,因为经典光场或光波的干涉也会有相同的结果,仅由一阶相干性不足以区分经典光场和量子光场。为此,格劳伯引入了光场的二阶量子相干性描述,指出光子的关联或所谓的双光子干涉现象,是一种必须用量子电动力学描述的量子现象。从探测的角度看,每一个探测光辐射的装置都是基于对光子能量的吸收。如果只是把光子看成一个普通粒子,不同的光子吸收将是没有关联的。然而,由于光具有波动性的一面,它将导致光子吸收之间的关联。因此,格劳伯引入二阶关联函数,正确地表征了光场的波粒二象性,从根本上揭示了光场量子化和其量子相干性的特点。

对于HBT实验,二阶关联函数意味着计算 x 和 y 两点上的密度关联

$$\langle I(x)I(y) \rangle \propto \langle a^\dagger(x)a^\dagger(x)a(x)a(y) \rangle = \langle a^\dagger(y)a(y) \rangle \langle a^\dagger(x)a(x) \rangle + \langle a^\dagger(y)a(x) \rangle \langle a^\dagger(x)a(y) \rangle$$



格劳伯(R. J. Glauber, 1925—),哈佛大学马林克罗特(Mallinckrodt)物理教授

其中, $a^\dagger(x)$ 代表在 x 点产生一个光子, $a(x)$ 代表在 x 点消灭一个光子。设 $I(x)=a^\dagger(x)a(x)$,它在特定态上的平均值 $\langle I(x) \rangle$ 代表 x 点光子的数密度。当 $x=y$ 时, $\langle I^2(x) \rangle = 2\langle I(x) \rangle^2$ 。因此,通过计算各种光场分布的二阶关联函数,格劳伯理论成功地解释了HBT实验。

其实,在多光子实验中,一旦一个光子被吸收,电磁场的光子态就会发生改变,使得下一次吸收变得比较困难。因而,电磁场的一个 n 光子态只能存在 n 阶关联。既然一个连续的光吸收过程涉及到的场的状态必须包含不同的光子数态,它必然涉及到各个可能级别的关联。为此,格劳伯在光学中引入相位确定的相干态,描述光场的量子相干性。格劳伯证明,当光场处在相干态上,即一个最接近经典状态的准经典态上,物质对光的吸收最强。这一点可以用微扰论解释:构成物质的原子能级跃迁矩阵元正比于光场二阶关联函数,而光场的二阶关联函数对于相干态取极大值。需要指出的是,为了描述谐振子运动的准经典行为,最早是薛定谔引入了由不扩散波包表示的相干态。

格劳伯创造性地在光学中应用了相干态的思想,不久就导致了量子光学的迅速发展。格劳伯等人^[4]证明,由于这类光场态的量子描述直接与经典相空间相联系,光场态在特定情况下,只需应用相干态的对角表示,并可以对那些正定的对角准概率分布给出很好的经典解释。因此,格劳伯的光学相干理论从另一个角度描述了量子-经典对应的基本物理问题。格劳伯的工作还表明,量子光学要求人们必须考虑光信号的量子特性。例如,相干态表示提供了一个在经典范畴讨论量子光学问题的工具,其中,场的相位和振幅是基本的物理变量,它们可以被用于光子通讯和各种超精度测量。人们可通过恰当地选择实验参数,忽略潜在的量子涨落,从而将信号当作明确的经典场振幅。

在格劳伯的理论中,像白炽灯和烛光这样的热光源对应着高斯分布的光场状态,而激光则由相干态描述。就HBT实验而言,后者不会出现光子的关联效应。从认识光现象的物理本性的角度讲,格劳伯的理论指出了烛光与激光的本质差别,即它们具有不同的量子关联性,其中激光的二阶关联函数明显具有时域恒定特征。格劳伯的工作还证明,物质对激光的吸收必须借助上

述二阶量子相干性理论。从光子探测的角度讲,激光场吸收光子的统计分布不能理解为经典统计的随机现象,正确的描述必须借助光电器件的量子性质,必须基于仪器量子态与量子化光场相互作用的知识。

任何经典随机理论和半经典理论,不管是泊松型,还是高斯型,不管它们多么精致,都不足以解释这种量子现象。格劳伯的研究导致了一系列后续的研究工作,为激光的全量子理论、参数放大问题和光子关联实验,乃至当前量子信息^[9]的发展打下了重要基础。

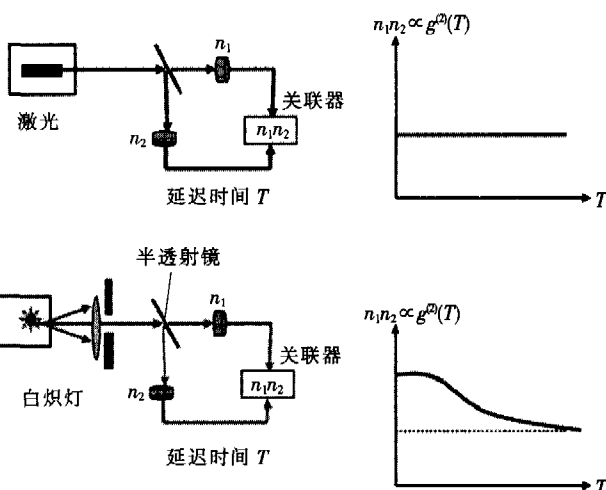
格劳伯与量子光学的发展

在格劳伯工作以后,量子光学得以蓬勃发展,今天已经成为一个充满挑战性的研究领域。工作于量子光学的一代理论家曾利用并发展了格劳伯的量子相干理论,其中包括沃尔斯(D. F. Walls)^[6]和斯卡利(M. O. Scully)^[7]等人。他们的工作为进一步的量子光学实验提供了一个坚实的理论基础。利用这些理论上的发展,曼德尔(L. Mandel)^[8]曾设计出许多精巧而富有独创性的实验,阐释了光信号的量子特性;金布尔(H. J. Kimble)继续推动着这个领域向新的研究方向发展,如在实验上产生了理想的压缩光场态,这种态的量子涨落在相位上具有各向异性。在此状态下,相位的某一正交分量的量子不确定性比在相干态下更小。从原则上来说,利用这样的态,人们可以在超高精度测量中减小量子噪声的影响。人们还可以观测到HBT效应的逆效应,即反聚束效应,在这种情况下,光子的聚束程度比在泊松分布下的随机方式更小。对于光子统计而言,这是一种纯量子现象。

在实验方面,人们努力发展现代测量方法,使得单光子和少数原子的测量成为可能,因此,相关的量子光学理论由于其特殊的量子性,有极其重要的研究意义。从现代实验技术的角度讲,在低密度光子极限下,只有极少数的光子参与的单光子过程是十分重要的。单光子技术可以应用在量子保密通讯、量子计算^[10]以及在高精度实验中记录超微弱信号。在所有这些情况下,人们都需要对基础理论有一个十分清楚的理解,这是因为量子效应对于可以达到的目标会有一个原则性的限制;技术性的噪声可以尽量降低,而系统固有的量子噪声是无法减小的。

量子光学方法的另一个重要应用是检测量子理论基本问题。量子力学展现出许多反直观的效应的非定域性问题,可以通过是否违背贝尔不等式的实验结果加以证实。量子力学中不能表示成直接相乘的形式的态称为纠缠态,它代表的两个或多个量子系统之间存在不能用经典理论解释的非定域、非经典的关联现象。笔者小组^[11]的研究表明,量子纠缠特性也可以用格劳伯的高阶量子关联函数来描述。在这方面,马里兰大学的史观华^[11]和曼德尔等人利用偏硼酸钡晶体(BBO)在非线形效应-参量下转换,产生了光子的量子纠缠态,并用它检验了贝尔不等式,成功地演示了由这种纠缠所导致的“鬼象”和“鬼干涉”实验。光子纠缠态产生的方法和观念是后来量子通讯研究的理论和技术关键。

总之,尽管量子理论在应用中取得了巨大成功,但量子理论



关于格劳伯理论要点的实验检验 通过符合计数测量光子数的关联:在水平光路探测到的单位时间内的光子记数为 n_1 ,在垂直光路探测到的单位时间内的光子记数为 n_2 ,而经过延迟时间 T 在垂直和水平光路探测到光子的符合计数为 $n_1 n_2 \propto g^{(2)}(T)$,其中 $g^{(2)}(T)$ 代表光子数的关联,它正好是二阶关联函数。对于激光,这个关联函数保持一个常数;而对于普通光,这个关联函数随延迟时间是衰减的。

的诠释并未在学术界达成一致,因此,仍需要将实验进一步向量子领域纵深推进,从而有望获得对量子理论体系更多新的理解。格劳伯以后的量子光学的发展不仅为进一步理解这些量子理论基本问题提供了精巧的实验方法,而且奠定了概念基础。

(本文作者为中国科学院理论物理研究所研究员)

[1] Hanbury Brown R, Twiss R Q. *Nature*, 1956, 177: 27.
 [2] Jglauer R. *Phys Rev Lett*, 1963, 10: 84; *Phys Rev*, 1963, 130: 2529; *ibid*, 1963, 131: 2766.
 [3] Glauber R J, DeWitt C, ed. *Quantum Optics and Electronics* [C]. Holland: Les Houches, 1964.
 [4] Sudarshan E C G. *Phys Rev Letters*, 1963, 10: 277.
 [5] Klauder J R, Sudarshan E C G. *Fundamentals of Quantum Optics* [M]. New York: W A Benjamin Inc, 1968.
 [6] Walls D F, Milburn G J. *Quantum Optics* [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1994.
 [7] Scully M O, Zubairy M S. *Quantum Optics* [M]. Cambridge: Cambridge Univ Press, 1997.
 [8] Mandel L, Wolf E. *Optical Coherence and Quantum Optics* [M]. Cambridge: Cambridge Univ Press, 1995.
 [9] Bouwmeester D, Zeilinger A, Ekert A, ed. *The Physics of Quantum Information* [M]. Berlin: Springer-Verlag, January 2001.
 [10] Zhou D L, Zhang P, Sun C P. *Phys Rev*, 2002, A66: 012112.
 [11] Shih Y H, et al. *Phys Rev Lett*, 1988, 61: 2921.

关键词: 量子相干 量子光学 相干态



知网查重限时 7折 最高可优惠 120元

本科定稿，硕博定稿，查重结果与学校一致

立即检测

免费论文查重: <http://www.paperyy.com>

3亿免费文献下载: <http://www.ixueshu.com>

超值论文自动降重: http://www.paperyy.com/reduce_repetition

PPT免费模版下载: <http://ppt.ixueshu.com>

阅读此文的还阅读了:

1. [量子纠缠和消相干的熵变探讨](#)
2. [我国自旋量子相干调控研究获进展](#)
3. [电磁辐射场中量子位的消相干特性研究](#)
4. [量子环中量子比特的消相干时间](#)
5. [原子相干的离散行为与量子噪声压缩](#)
6. [原子相干与量子纠缠](#)
7. [利用多量子相干实现无消相干子空间](#)
8. [利用量子相干实现窄带谱线及其应用](#)
9. [有噪量子信道中的量子相干性](#)
10. [超短激光脉冲传输特性的量子相干操控与应用](#)
11. [原子相干效应中的量子噪声特性研究](#)
12. [量子退相干与熵变](#)
13. [柱形量子点中量子比特的消相干时间](#)
14. [光合原初过程存在量子相干态传能途径吗?](#)
15. [海藻光合天线常温量子相干态传能研究简评](#)
16. [从哲学视角看量子干涉、纠缠与消相干](#)
17. [量子相干性与相干的激发态能量传输](#)
18. [混沌微扰导致的量子退相干](#)
19. [Peremolv SU\(1,1\)相干叠加态的二阶量子关联特性研究](#)
20. [Bloch表示中单量子比特的量子相干性](#)
21. [量子相干与量子消相干](#)
22. [量子相干网络](#)
23. [多光子反J-C模型下纠缠相干光场量子特性研究](#)
24. [非平衡环境造成的稳态量子相干\(英文\)](#)
25. [量子光学相干层析扫描显微镜](#)

26. 高斯态的量子相干度量
27. 量子相干性演化方程
28. 量子相干控制与量子信息处理
29. 多重量子相干器件制备、表征及外场调控
30. Swap量子门的消相干特性
31. 超导体中库珀对的SU(2)与Glauber相干态——库珀对与约瑟夫森超流性的量子特性研究
32. 基于量子反馈保护量子比特的相干性
33. 腔QED中量子关联与量子相干有关问题的研究
34. 囚禁离子和电子系统中的量子相干调控
35. 探析量子纠缠的可分性判据和量子退相干的研究
36. 浅海声场相干特性研究
37. 基于碰撞感应激发产生的量子相干效应研究
38. 一类普适的量子密码相干光源
39. 光的量子相干性研究
40. 量子态的极大可操控相干性
41. 量子态相干性的度量
42. 量子相干光学合成孔径方法
43. 量子操控诱发的相干性萃取
44. 脉冲光场作用下纠缠双光子量子相干特性研究
45. 固态量子计算中退相干研究取得新进展
46. 相干光场实现量子态操控及量子逻辑门的操控
47. 界面量子相干现象
48. 基于量子相干效应的静态光
49. 球型量子点量子比特的声子退相干效应
50. 量子相干控制与量子信息处理