

关联光学新进展*

汪凯戈^{1,†} 曹德忠² 熊俊¹

(1 北京师范大学物理系 北京市应用光学重点实验室 北京 100875)

(2 烟台大学光电信息科学技术学院 烟台 264005)

摘要 文章综述了利用光学自发参量下转换过程产生的纠缠双光子态和热光源的空间关联性,实现“鬼”成像、“鬼”干涉、亚波长干涉和非定域双缝干涉等实验的研究进展,以及其中涉及的争论问题。

关键词 双光子纠缠,热光关联,量子成像

Progress in correlated optics

WANG Kai-Ge^{1,†} CAO De-Zhong² XIONG Jun¹

(1 Department of Physics, Applied Optics Beijing Area Major Laboratory, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

(2 Institute of Science and Technology for Opto-Electronic Information, Yantai University, Yantai 264005, China)

Abstract We discuss in brief some interesting optical experiments based on intensity correlation measurement, such as ghost imaging, ghost interference, sub-wavelength interference and nonlocal double-slit interference, performed with both entangled two-photon states generated by spontaneous parametric down-conversion, and with thermal light. Some debates in this topic are also mentioned.

Keywords two-photon entanglement, correlation of thermal light, quantum imaging

1 引言

光学成像和干涉是我们熟知的基本物理现象,它反映了波的本性。自上世纪 80 年代以来,在对非线性晶体的自发参量下转换过程产生的双光子纠缠态进行的理论和实验研究中,发现了一些新的光学现象,如“鬼”成像、“鬼”干涉和亚波长干涉等。这些奇特的物理效应更新了我们对光现象认识的传统观念,为开拓新的光信息技术提供了可能。由于光源具有量子纠缠特征,人们自然将之归于量子纠缠态的非定域性(nonlocality)。另一方面,干涉要求光源具有相干性。最近一系列的研究结果表明,“鬼”成像、“鬼”干涉和亚波长干涉也可以用非相干的热光源通过强度关联来实现。这种相似性引发了关于量子纠缠和经典关联的争论,这也是自电子顺磁共振 Einstein-Podolsky-Rosen(EPR)理论^[1]提出以来,物理学界经久不息的议题的延续。

新现象的观察是基于强度涨落的关联测量(对双光子态而言,称为符合测量),而不是强度本身。实际上强度关联的方法早在半世纪前就由 Hanbury-Brown 和 Twiss(HBT)提出^[2],用以替代迈克尔孙干涉仪测量星体的角尺寸。为此我们将基于强度关联的光学现象称为关联光学。有些学者称其为双光子成像或量子成像。

2 关联光学的基本原理

传统的光学观察是基于光场的强度分布测量。关联光学则基于光场的强度的关联测量,测量装置如图 1 所示。从光源发出的光被分束器分成两部分:一部分经过参考系统,用脉冲响应函数 $h_1(x_1, x_0)$

* 国家重点基础研究发展计划(批准号 2006CB921404)和国家自然科学基金(批准号:10574015)资助项目
2008-03-14 收到

† 通讯联系人。Email: wangkg@bnu.edu.cn

表示;另一部分经过信号系统,用脉冲响应函数 $h_2(x_2, x_0)$ 表示.光源输出平面、参考系统和信号系统探测平面的横向位置坐标分别用 x_0, x_1 和 x_2 表示.光场强度关联测量由两个系统输出平面上的探测器分别记录强度,输入关联器作乘法运算,再对乘积进行多次平均后得到强度关联分布.

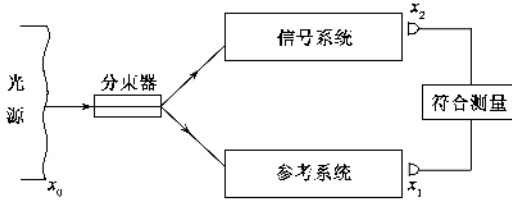


图1 利用光束强度关联获取相干信息示意图

假设两个线性光学系统的输入光场来源于同一光源,输出平面上光场的横向分布为

$$E_i(x_i) = \int h_i(x_i, x_0) E_0(x_0) dx_0 \quad (i = 1, 2), \quad (1)$$

其中 $E_0(x_0)$ 为光源平面的光场.输出平面上的光场强度分布为

$$I_i(x) = E_i^*(x) E_i(x) = \int \int h_i^*(x, x'_0) h_i(x, x''_0) E_0^*(x'_0) E_0(x''_0) dx'_0 dx''_0 \quad (i = 1, 2) \quad (2)$$

两系统输出平面任意两点光场的二阶关联函数定义为

$$G^{(2)}(x_1, x_2) = E_1^*(x_1) E_2^*(x_2) E_2(x_2) E_1(x_1) = \int \int \int h_1^*(x_1, x'_0) h_2^*(x_2, x''_0) h_2(x_2, x'''_0) h_1(x_1, x''''_0) \times E_0^*(x'_0) E_0^*(x''_0) E_0(x'''_0) E_0(x''''_0) dx'_0 dx''_0 dx'''_0 dx''''_0 \quad (3)$$

输出光场的关联性质取决于光源光场的关联.当 E_1 和 E_2 可以对易时(例如对于满足经典统计的光场或满足 $x_1 \neq x_2$ 的量子光场),该二阶关联函数等同于强度关联,即 $G^{(2)}(x_1, x_2) = I_1(x_1) I_2(x_2)$.比较(2)式和(3)式可以看出,一般情况下, $I_1(x_1) I_2(x_2) \neq I_1(x_1) I_2(x_2)$,称为光场具有强度关联,否则称两光场的强度独立.显然在强度独立的情况下,二阶关联函数不可能给出任何多于强度本身的信息,例如相干光源就属于这种情况.然而对于某些光源来说,光路中的信息在强度分布中被抹去,却可以在强度关联中再现,这是关联光学的物理基础.下面我们先介绍双光子纠缠源的关联光学.

3 双光子纠缠源的关联光学

当用一激光束照射某些非线性晶体时,在合适条件下会产生两低频光束:信号光和闲置光,这一现

象称为自发参量下转换过程.在下转换过程中产生的一对信号和闲置光子具有量子纠缠特征,这是在目前量子信息实验中最常用的量子纠缠光源.由于抽运光子与信号和闲置光子要满足能量守恒和动量守恒,当这3个光子共线近轴传播时,下转换产生的双光子纠缠态可以近似地表示为

$$|\Psi\rangle = \iint dq_1 dq_2 \delta(q_1 + q_2) a_i^\dagger(q_1) a_j^\dagger(q_2) |0\rangle \quad (4)$$

其中 q_1 和 q_2 为光子波矢量的横向分量.该纠缠态与 EPR 文章^[1]中提出的纠缠态十分接近,因此也可称为 EPR 态.在这对光子中,如果经过测量获知其中一个光子的横向动量为 q ,那么我们可以确定地预言另一个光子的横向动量为 $-q$.

3.1 “鬼”成像

上世纪80年代,前苏联学者 Klyshko 根据自发参量下转换光子对的纠缠行为,提出了“鬼”成像方案^[3].若干年后,美国马里兰大学史砚华小组首次在实验上实现了双光子纠缠源的“鬼”成像^[4].实验装置如图2所示,一激光束抽运 BBO 晶体产生的信号光和闲置光被一偏振分束器分开,其中信号光经过透镜照射一透光物体(见图3(a))后被探测器 D_1 收集(D_1 固定不动,集束透镜收集通过物体各部位的光子被 D_1 记录,这种方法称为桶测量).闲置光经过一定距离的自由传播,在探测平面由探测器 D_2 进行逐点空间扫描测量.两路探测器连接到符合线路进行符合测量(coincidence measurement),得到了物体的空间分布信息(见图3(b)).实验中有两个令人困惑的特征:一是对任何单路光强度的测量(即单光子测量)均不能得到有关物体的信息;二是符合测量中的空间分辨部分是在没有物体的参考光路中进行的,而对有物体的信号光路只执行桶测量.这些性质难以由传统的光学成像理论来理解,因此称为“鬼”成像.

“鬼”成像可以用双光子纠缠性质来解释.在关联测量中,两路光并不独立,可将信号光路相对晶体作镜面对折,使相互关联的信号光和闲置光处在同一直线上.物体到透镜的距离 z_3 看作物距,而把 BBO 晶体到透镜和探测器的几何距离(z_2 和 z_1)之和看作像距,则“鬼”成像的物像关系同样满足几何光学中的高斯成像公式:

$$\frac{1}{z_3} + \frac{1}{z_2 + z_1} = \frac{1}{f}, \quad (5)$$

其中 f 为透镜的焦距.

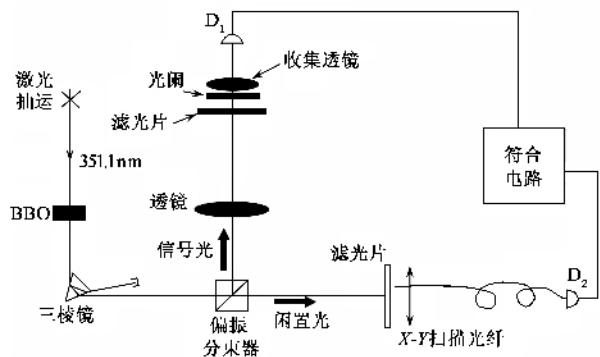


图2 纠缠双光子源的鬼成像实验^[4]

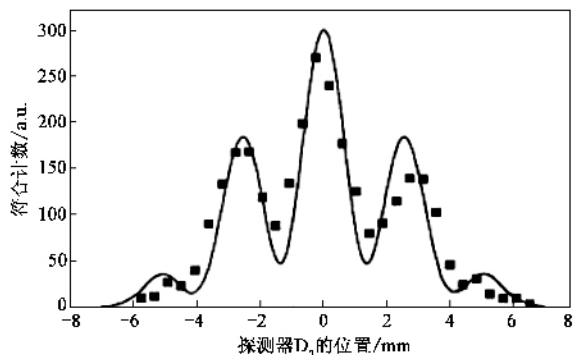


图4 纠缠双光子的鬼干涉条纹^[5]

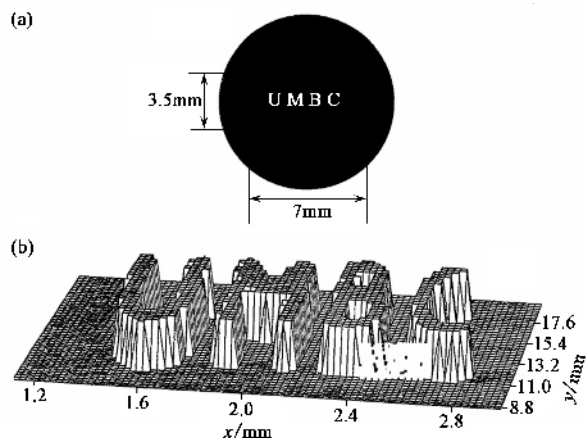


图3 鬼成像实验中的物体(a)和像(b)^[4]

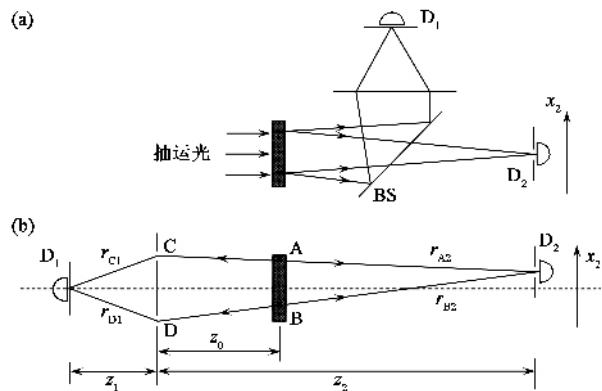


图5 纠缠双光子的鬼干涉实验示意图^[5]

3.2 “鬼”干涉

“鬼”干涉和“鬼”成像的原理相仿^[5]。将自发参量下转换过程产生的信号光和闲置光分开,在信号光路中放置一双缝,闲置光路自由传播。由于信号光和闲置光均为自发辐射产生,它们的传播方向并不确定(参见(4)式),因此探测器扫描任何单路光束的强度分布(单光子测量)观察不到干涉条纹。在实验中固定信号光路(含有双缝)探测器的位置不动,而对闲置光路(不包含双缝)的探测器进行空间分辨扫描,在两个探测器符合测量中获得如图4所示的干涉条纹。

“鬼”干涉的实验解释如图5所示。由于下转换产生的纠缠光子对相互不独立,将信号光路经晶体对折后与参考光路构成联合系统,因此可以通过双光子符合测量获取双缝的干涉信息。

3.3 亚波长干涉

光学成像系统的分辨率不能一味地提高,它的极限是瑞利衍射分辨条件。提高瑞利衍射分辨极限的经典方法一般有两种:一是改善成像系统的光学

性能;另一是采用较短波长的光源。2000年,Boto等人^[6]从理论上分析了 N 个纠缠光子系统的性质,提出利用 N 个光子纠缠系统来做 N 个光子符合探测的量子刻录(quantum lithography)方案。该方案可以在不改变光波波长的情况下,把光学系统的瑞利衍射分辨极限提高 N 倍。

实际上,1999年巴西Fonseca等人^[7]首次报道了利用自发参量下转换产生的双光子态作光源,观察到了双缝的亚波长干涉效应。两年后,史砚华小组^[8]也报道了类似的实验结果,他们的实验装置如图6所示。由激光抽运BBO晶体产生的双光子对通

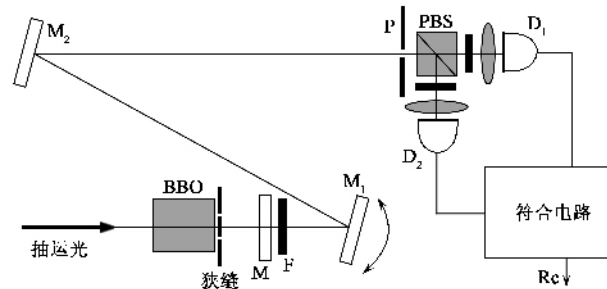


图6 纠缠双光子对的亚波长干涉实验示意图^[8]

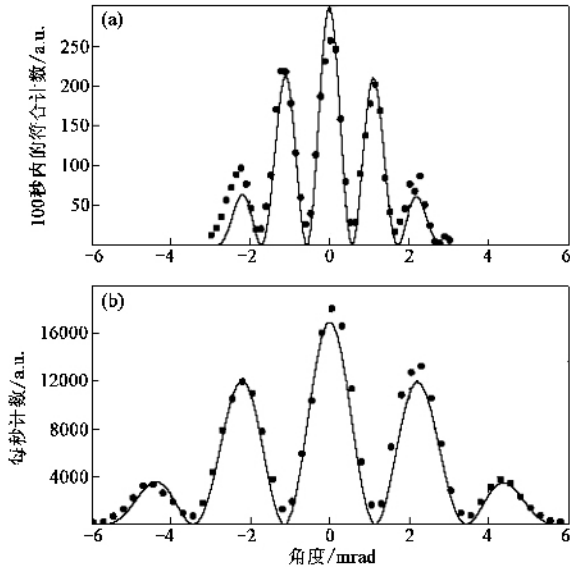


图7 亚波长干涉实验结果 (a)亚波长干涉条纹 (b) 相干光干涉条纹^[8]

过双缝,在观察平面上实行双光子强度测量.双光子强度测量是通过偏振分束器将双光子分离后,由符合计数完成的.实验结果如图7(a)所示,所测得的干涉条纹的分布范围和条纹间距均为同波长普通相干光双缝干涉条纹(图7(b))的一半,即相当于波长减少一半的干涉条纹.因此这一效应称为亚波长干涉(subwavelength interference).

3.4 非定域双缝干涉

量子非定域性是量子纠缠的本性.这里我们再介绍一个有趣的实验,可能更直观地展现非定域性,它也是由 Fonseca 等人^[9]完成的.该实验采用会聚的抽运光束入射到非线性晶体上,使得参量下转换产生的信号光和闲置光具有特殊的空间关联性质.在信号光路和闲置光路分别置入两个不同的光阑 A_1 和 A_2 ,如图8所示.假如将这两个光阑合在一起,正好形成一双缝.由于在单路中并不存在双缝,自然在每一路的观察平面上作强度扫描时不可能出现干涉条纹.然而对两路光作符合测量,观察到如图9所示的干涉条纹.在符合测量中,可以固定任意一路中的探测器的位置,而扫描另一路中的探测器.

上面介绍的这些实验事实似乎有悖于经典光学的理论和朴素的物理直观.很明显,这些实验中都使用了量子纠缠光源.因此人们有理由相信这些实验是纠缠光源的量子非定域性的反映.为此,Abourady 等人^[10]在2001年研究了双光子成像中量子纠缠的作用,认为成像系统中纠缠光子所表现出的效应

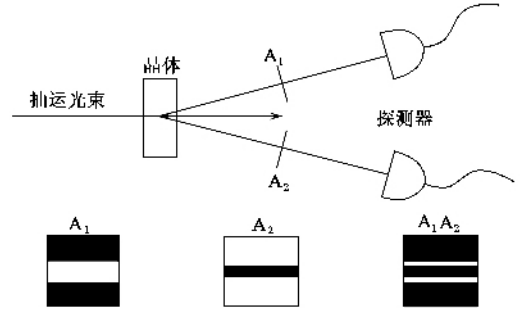


图8 非定域双缝干涉原理示意图 (A_1, A_2 为两个光阑,它们放在一起形成一个双缝)^[9]

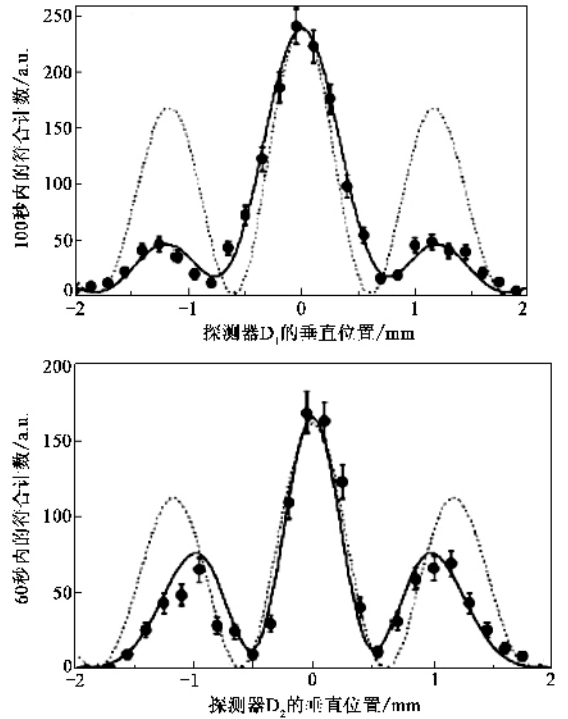


图9 非定域双缝实验结果(上图为固定探测器 D_2 扫描探测器 D_1 的结果;下图则反之)^[9]

是其他双光子源所不能模仿的,纠缠是获得量子成像的先决条件.不过,一年后一个新实验的报道,进一步挑战人们的物理直观,并引起了对关联光学机制更深入的思考.

4 经典关联光源的关联光学

美国 Rochester 大学从事非线性光学的著名学者 Boyd 小组,在2002年设计了一个模拟经典关联光源的“鬼”成像实验^[11](他们还在2004年用同样方案完成“鬼”干涉实验^[12]).实验装置如图10所示,He-Ne 激光通过一个斩波器,被一个随机旋转的反射镜

反射,再经光学分束器分成两路.反射光束经过一透镜和物体后被一探测器收集(桶测量),透射光束经过一透镜后被 CCD 记录.在关联器中,以物光探测信号作为 CCD 的记录开关来实现两路光的强度关联测量.实验中的物体由两个字母 UR 组成,关联测量得到的该物体的像如图 10 中的插图所示.

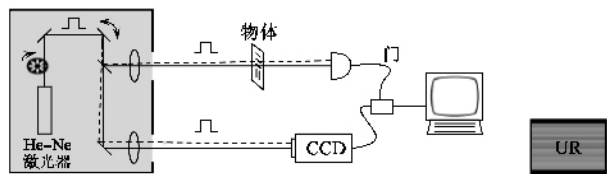


图 10 经典关联光源的符合成像实验装置图^[11]

由于实验中的光源是 He - Ne 激光,它不存在任何量子纠缠.因此实验结果挑战上述命题:“鬼”成像效应中量子纠缠光源是否是必需的?显然,实验结果给出了否定的答案.那么进一步的问题是,实验中人工制造的经典关联光源能够在多大程度上模拟量子纠缠光源,它们的物理本质有何异同?

文章^[11]发表后不久,某些学者认为^[13],经典关联光源并不能真正模拟量子纠缠光源实现“鬼”成像,前者的光场关联仅仅是一种点对点的投影,而后者实现的是真正的相干光学成像,满足高斯透镜成像公式.他们还进一步指出由于经典关联不能模仿双光子波包的相干叠加,因而不能实现“鬼”干涉、亚波长干涉或其他光的衍射效应.另外一些学者提出了新的见解,并在随后的实验中被验证.

5 热光源的关联光学

2004 年,有一批理论研究成果报道了具有空间非相干性质的热光源能够模拟量子纠缠光源实现关联光学中的量子成像和干涉效应.意大利 Lugiato 研究小组^[14]提出采用热光源可以实现“鬼”成像.中国科学院上海光学精密机械研究所程静和韩申生提出用非相干光源实现无透镜傅里叶变换成像^[15].香港浸会大学朱诗尧研究小组利用黑体辐射理论研究了非相干光的“鬼”干涉^[16].我们研究小组详细分析比较了热光和双光子纠缠两种光源的关联性质,提出使用热光源也可以模拟双光子纠缠源实现类似的亚波长干涉^[17-19].在热光“鬼”成像的研究中,我们首次得到热光“鬼”成像的透镜公式,它与量子纠缠源的公式略有不同.更重要的是,我们指出热光源的分束类似于一个相位共轭镜,可以实现真正的无透镜

成像^[20].不久,采用赝热光源和真热光源的“鬼”成像、“鬼”干涉和亚波长干涉实验相继完成^[21-24].这些理论和实验成果充分证明了,热光源可以类似于量子纠缠光源完成关联光学中的成像和干涉效应.下面以我们小组的研究成果为主线,围绕该领域研究中的争论问题,介绍热光源关联光学的基本原理、主要现象以及与量子纠缠光源的异同.

5.1 热光场强度关联的波性

干涉和衍射现象是波的本性,历史上证明光的波动性的著名实验是杨氏双缝干涉和泊松亮斑,干涉衍射斑图的实现要求光源具有空间相干性.空间非相干的热光能否通过强度关联再现这两个实验,可以鉴别热光关联是否具有波动本性,而限于光线间的投影关联.

热光亚波长干涉实验的装置(见图 11)^[23]与量子纠缠源的亚波长干涉实验装置(图 6)极为相似. He - Ne 激光经透镜会聚到旋转毛玻璃上形成赝热光源,然后照射双缝.我们采用一个光学分束器和两个探测器来完成观察平面上两个位置的同步强度测量 $I_1(x_1)$ 和 $I_2(x_2)$,再由数字示波器记录并进行强度关联运算,得到 $I_1(x_1)I_2(x_2)$.实验结果如图 12 所示,其中(a)为干涉平面上的强度分布,它不存在干涉条纹,这是我们熟知的非相干性的结果.作为比较(b)为相干光通过双缝产生的干涉条纹.(c)和(d)均为两个探测器的强度关联分布,其中(c)表示两个探测器在同一横向位置上($x_1 = x_2$)同步扫描,不存在干涉条纹(d)表示它们在对称位置上($x_1 = -x_2$)同步扫描,得到了明晰的干涉条纹,条纹间隔是同波长相干光条纹(图(b))的一半.它相当于波长减小一半的光的条纹,因此称为亚波长干涉.如果我们像观察纠缠双光子源的双缝干涉的方法一样,即在同一位置进行强度关联,则不能观察到干涉效应,如图 12(c)所示.

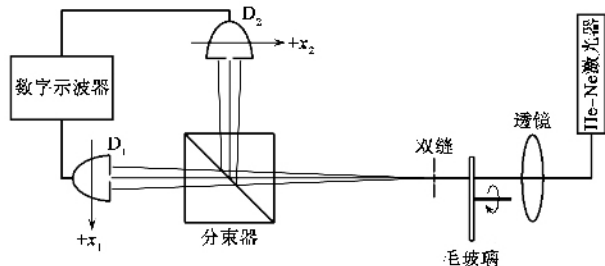


图 11 赝热光源的亚波长干涉实验装置图^[23]

热光和纠缠光的亚波长干涉的主要区别是:

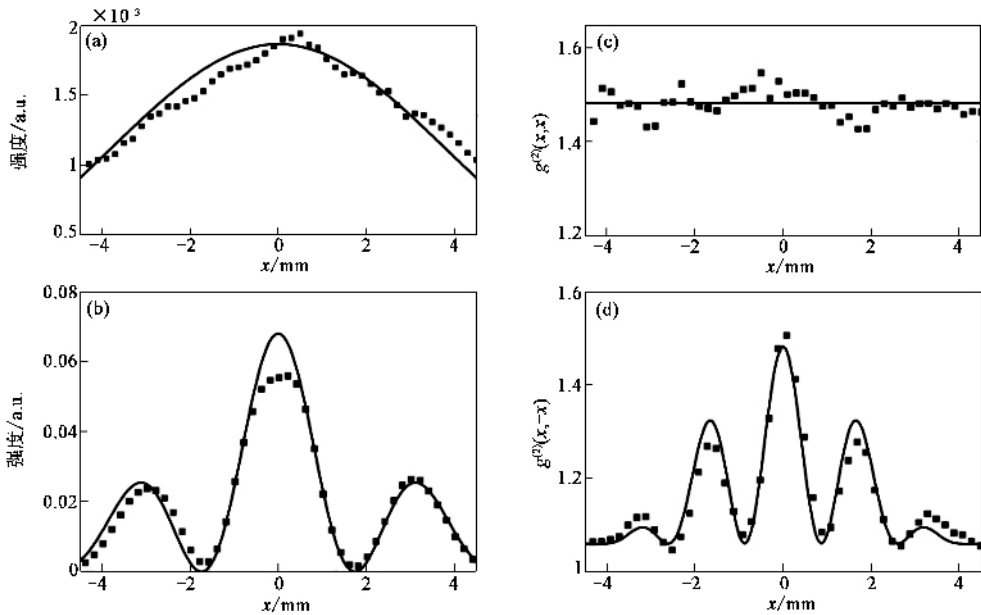


图 12 (a) 热光通过双缝的强度分布 (b) 激光通过双缝的强度分布 (c) 热光通过双缝后在同一位置 ($x_1 = x_2$) 的强度关联分布 (d) 热光通过双缝后在对称位置 ($x_1 = x_2$) 的强度关联分布. 图中点线为实验数据, 实线为理论模拟结果^[23]

(1) 观察中关联方式不同 (2) 热光亚波长干涉条纹的最大可见度为 33%, 而纠缠光可以达到 100%.

非相干的热光还可以通过强度关联实现泊松亮斑实验^[25]. 用相干光照射不透明圆盘, 在圆盘后面可以观察到衍射斑图, 在中心是一亮斑, 如图 13(a) 所示. 当用非相干光(例如图 11 中的热光)照射不透明圆盘时, 在圆盘后面的强度分布是盘的阴影, 没有中心亮斑, 如图 13(b) 所示. 现在我们仍采用非相干光源, 但在观察平面上采用强度关联的方法, 即将一个探测器固定在中心位置(也可以是其他位置), 另一个探测器扫描整个平面, 然后对两个探测器记录的强度进行关联, 我们观察到泊松亮斑, 如图 13(c) 所示.

热光的“鬼”成像方案如图 14 所示. 我们在文献^[20]中, 证明了热光的“鬼”成像同样有类似于纠缠光“鬼”成像的透镜成像公式:

$$\frac{1}{z_2 - z_1} + \frac{1}{z_3} = \frac{1}{f}, \quad (6)$$

其中 f 为透镜的焦距, z_3 是物距, z_1 和 z_2 分别是光源到成像平面和透镜的距离, 它们之差为像距. 而对于纠缠光源的公式(5), 像距应取它们之和.

5.2 热光的无透镜成像

在文献 [20] 中, 我们发现热光和量子纠缠光成

像公式中的正负号的差别, 带来了十分有趣的物理现象. 在上面的公式(6)中, 令 $f \rightarrow \infty$, 得到 $z_1 = z_2 + z_3$. 这表明在不使用透镜时, 我们仍能得到一个实像 ($z_1 > 0$), 实像到光源的距离等于物体到光源的距离. 因此, 热光源类似于一个相位共轭镜可以实现无透镜成像. 相反, 量子纠缠光源如同一个普通的平面镜 ($z_1 = -(z_2 + z_3)$), 在不使用透镜时无法得到一个实像.

在实验中, 热光束用分束器分为信号光和参考光. 信号光照射物体后其强度由一探测器实行桶测量, 参考光路的探测器置于物体关于光源镜面对称的位置, 实行空间扫描测量. 在两束光的强度关联中再现物体的像. 图 15 是我们在实验中使用的物体(北京 2008 奥运会会标)和观察到的像. 有关的实验和理论工作, 见文献 [26—28].

5.3 热光的非定域双缝干涉

上面我们看到热光可以模拟纠缠光完成“鬼”成像、“鬼”干涉和亚波长干涉, 说明热光场中的关联和量子纠缠在一些方面具有相似性. 一个挑战性的问题油然而生, 在关联光学中能否找到属于量子纠缠特有的效应, 它不能被热光关联效应所模拟. 我们知道, 量子非定域性是量子纠缠区别于经典关联的基本属性. 那么上面提到的纠缠光源的非定域双

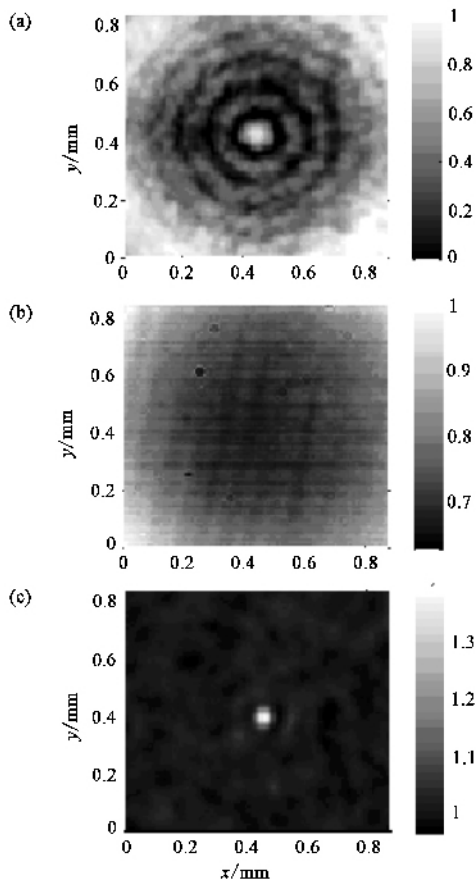


图 13 (a)激光照射圆盘后的衍射斑图 (b)热光照射圆盘后的强度分布 (c)热光照射圆盘后的强度关联分布^[25]

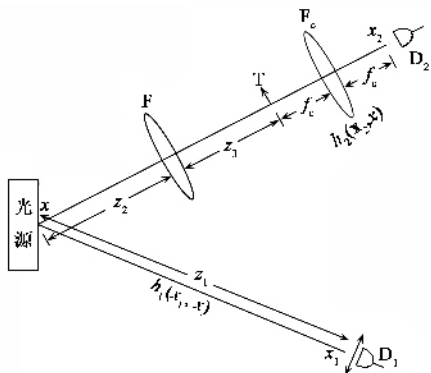


图 14 热光“鬼”成像方案示意图^[20]

缝干涉是否属于这样的实验？为此我们设计了与图 8 类似的实验^[29]，如图 16 所示。两个光阑(物体) A_1 和 A_2 分别放置入信号系统和参考系统中，它们的位置恰好关于分束器对称。 A_1 是一个长方形孔， A_2 为一黑条，如将它们合在一起正好构成一个双缝。由于 A_1 和 A_2 空间上完全分离，两光束没有照射一个物理意义上的双缝。实验结果如图 17 所示。由于我们的光源是非相干光，在单路的强度平均测量中均无

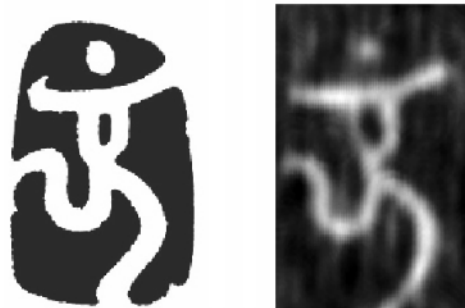


图 15 热光无透镜成像实验中的物体(左)和像(右)

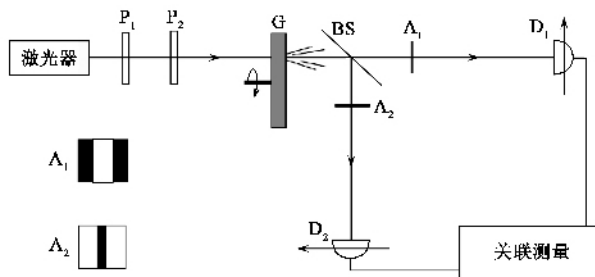


图 16 热光非定域双缝干涉实验图^[29]

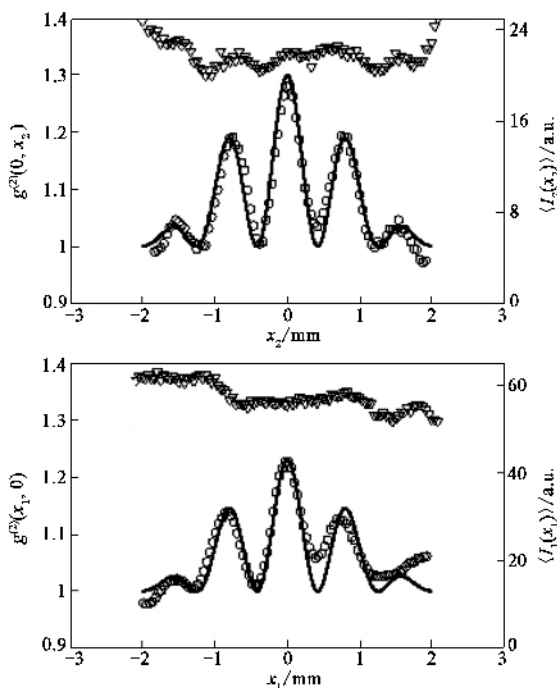


图 17 热光非定域双缝干涉实验结果 (a)固定探测器 D_1 ，扫描 D_2 (b)固定探测器 D_2 ，扫描 D_1 。图中三角为单路强度，空心圆点为强度关联实验数据，实线为理论拟合曲线^[29]

法获得物体的信息。而在关联测量中，我们固定其中一个探测器而扫描另一个，则都能观察到双缝的干涉条纹。因此实验的结论是，实现非定域双缝干涉量子纠缠不是必需的。

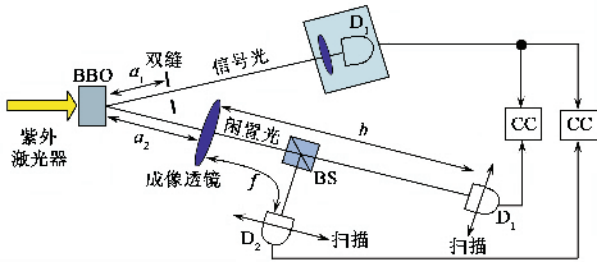


图 18 纠缠双光子源的同时成像和干涉实验装置图^[30]

5.4 同时观察“鬼”成像和“鬼”干涉

在关联光学中，“鬼”成像缘于两光路中位置的关联，而“鬼”干涉缘于两光路中动量的关联。另一方面，EPR 纠缠双光子态的特征是通过对其一个粒子的位置和动量的测量，可以确定地预言另一个粒子的位置和动量。因此一些学者提出，双光子纠缠态可以同时实现“鬼”成像和“鬼”干涉，而热光中的关联不具有 EPR 态的特征，从而不可能做到。为此，他们提出一个新的实验方案^[30]，希望通过该实验来区分量子纠缠系统和经典关联系统。

该实验方案如图 18 所示。由非线性 BBO 晶体自发参量下转换产生的信号光和闲置光被分离，将双缝放入信号光路中，信号光路的光子由探测器 D_1 收集。成像透镜置入闲置光路，在透镜后放入一个光学分束器，将闲置光束再分为两束，分别由放在焦平面的探测器 D_2 和放在成像平面的探测器 D_3 测量。探测器 D_1 和 D_2 的双光子符合测量给出双缝的干涉条纹，而探测器 D_1 和 D_3 的符合测量给出双缝的像。图 19 的实验结果证明了该方案可以同时实现“鬼”成像和“鬼”干涉。

文献[30]发表一年后，Lugiato 小组的实验表明，热光源同样能够同时执行高分辨成像和干涉效应^[21]。作为学生的论文工作，我们小组也研究了这一效应^[31]。与文献[21]不同的是，我们在实验中没有使用任何透镜（见图 20），从而能更直观地表示近场中的位置关联和远场中的动量关联。两个光学分束器把热光源发出的光束分为三束，其中一路中放置双缝，另外两路光束自由传播。三路光强度分别由 3 个 CCD 探测器进行同步记录，其中 CCD1 仅测量任意固定位置的光强，CCD2 放在与双缝对称的位置，作近场测量，CCD3 远离分束器完成远场测量。CCD2 和 CCD3 进行空间分辨的测量。实验结果表明，CCD1 和 CCD2 之间的强度关联分布再现双缝的像（无透镜成像），CCD1 和 CCD3 之间的强度关联分布展现干涉条纹，如图 21 所示。

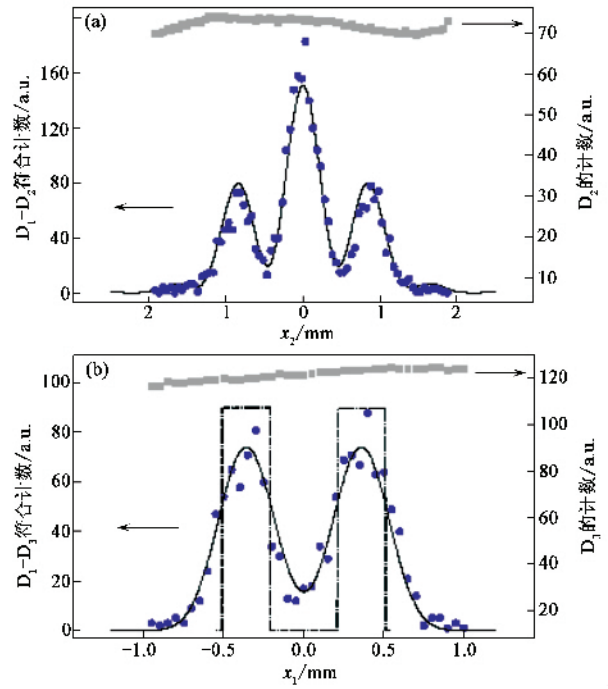


图 19 (a)由 D_1 和 D_2 符合测量得到双缝干涉条纹 (b) 由 D_1 和 D_3 符合测量得到双缝像^[30]

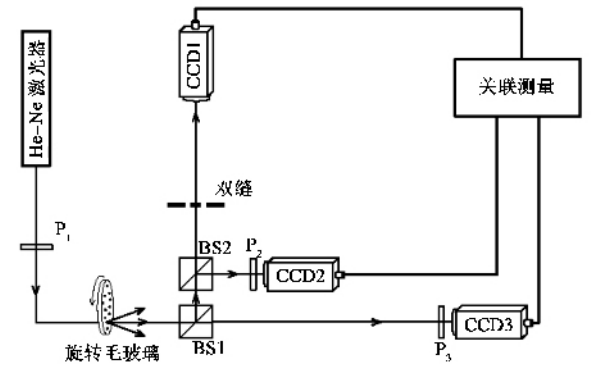


图 20 热光源的同时成像和干涉实验装置图^[31]

由此看来，在关联光学中的同时成像和干涉可能并不涉及 EPR 效应。事实上，在两个参考光路中，参与成像和干涉的不属于同一个光子。在下面的实验中，我们将看到热光场中的光子关联的量子特征。

5.5 利用热光关联验证量子互补原理

量子互补原理告诉我们，不可能同时观察一个微观系统的波的行为和粒子行为。例如在双缝干涉实验中，粒子通过哪一个缝的路径信息与干涉条纹的可见度是相互排斥的。在互补实验的设计中，由于对粒子的直接测量只能进行一次（测量后粒子被湮灭），因此在对两个不对易的共轭量的测量中，必有一要采用间接测量方法，热光场中光子的关联提供了间接测量系统。

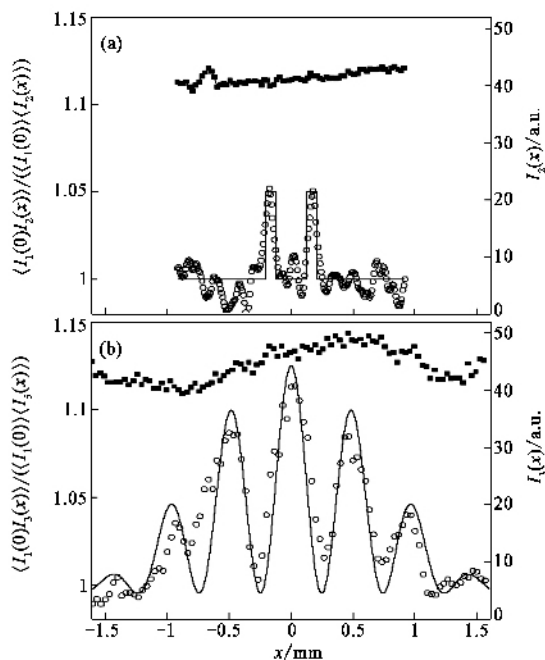


图 21 基于热光关联的同时成像 (a) 和干涉 (b) 实验. 强度关联的实验数据用圆圈表示, 黑点为单臂强度分布, 实线为理论拟合^[31]

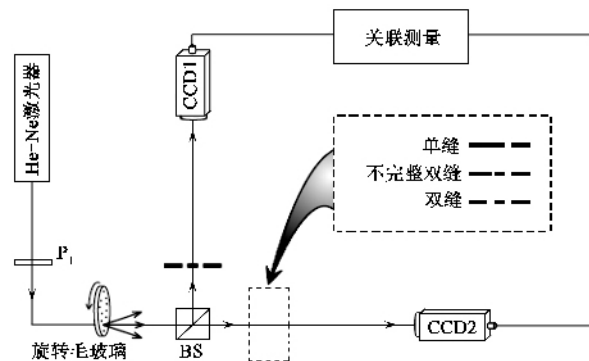


图 22 验证量子互补原理实验示意图^[32]

我们的实验装置如图 22 所示^[32]. 热光经分束器分为两路, 在其中的一路放置一双缝, 在另一路的对应位置通过放置不同的光阑作为间接测量系统, 然后对两光束作强度关联测量. 当该光阑为一单缝, 并且其位置与双缝的一条缝的位置对应时, 由于关联成像中位置与位置间的对应, 我们可以获取关联光子的路径信息. 当探测光阑换成完全相同的双缝时, 路径信息完全消失. 图 23 中的 (a) 和 (c) 分别对应于这两种情况的测量结果. 条纹完全消失和条纹对比度最大. 为了作对比, 图 23 (b) 对应于探测光阑为一不完整双缝 (其中一条缝较窄), 可以部分地获取路径信息, 干涉条纹的可见度减小. 实验结果证实, 对于关联干涉, 同样要满足量子力学互补性. 与历史上已报道的互补实验不同的是, 本实验涉及的是多光子的宏观系统和宏观测量.

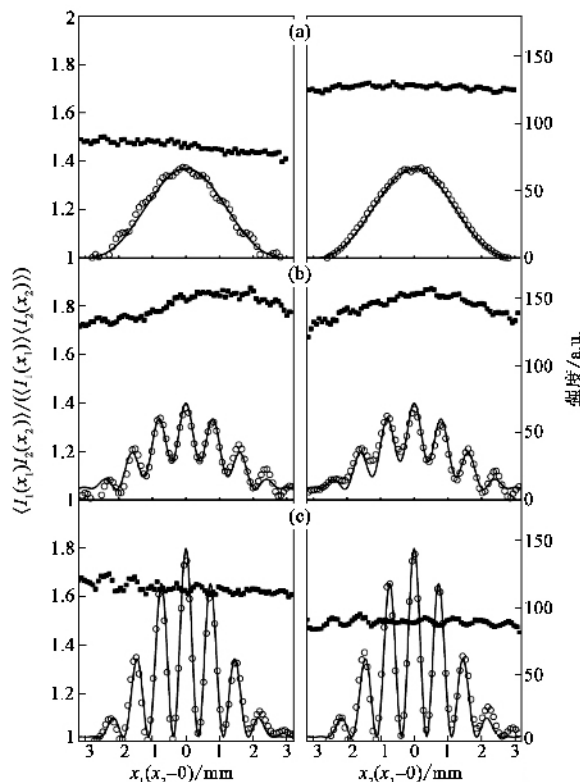


图 23 探测光阑为 (a) 单缝 (b) 不完整双缝 (c) 双缝时的强度关联分布. 图中方点为单臂强度实验数据, 空心圆是强度关联的实验数据, 实线是理论拟合曲线. 左右两列分别对应于关联测量中固定一个探测器而扫描另一个探测器的结果^[32]

6 关联光学的理论基础^[33, 34]

如果在理论上分析比较双光子纠缠源和热光源的空间关联函数, 就不难理解它们在关联光学中的相似作用. 对于 (4) 式表示的双光子纠缠态, 容易计算一阶和二阶场关联函数为

$$a_i^\dagger(q) a_i(q') = \delta(q - q') \quad (i = 1, 2), \quad (7a)$$

$$a_1^\dagger(q_1) a_2^\dagger(q_2) a_2(q'_2) a_1(q'_1) = \delta(q_1 + q_2) \delta(q'_1 + q'_2) \quad (7b)$$

根据统计光学, 具有空间非相干的热光场的一阶和二阶场关联函数为

$$E^*(q) E(q') = \mathcal{X}(q) \mathcal{X}(q - q'), \quad (8a)$$

$$\begin{aligned} E^*(q_1) E^*(q_2) E(q'_2) E(q'_1) \\ = \mathcal{X}(q_1) \mathcal{X}(q_2) [\mathcal{X}(q_1 - q'_1) \mathcal{X}(q_2 - q'_2) \\ + \mathcal{X}(q_1 - q'_2) \mathcal{X}(q_2 - q'_1)] \end{aligned} \quad (8b)$$

比较两种光场的关联函数可以看出, 它们具有类似的空间关联. 不同之处在于二阶关联函数, 纠缠双光子之间的关联满足横向动量守恒, 热光场的关联只

存在于相同动量之间. 当运用(8b)式计算两个空间位置的强度关联时,在等式右边对称的两项中,当一项给出强度背景时,另一项贡献出场的相干信息. 热光中的空间关联反映了 HBT 效应的内涵:由两个独立的发光源各辐射一个光子到达两个分离的空间接收点时,在关联测量中,两粒子的交换对称性产生干涉项.

7 结束语

从传统的光学理论和观念出发,关联光学中研究的这些新型光学效应令人惊讶,甚至可能难以理解. 如同半世纪前的 HBT 实验,它引起了种种争论. 一些争论在实验证据中得以澄清,有些争论或许涉及命名学和各自理解难以给予统一的评判^[35,36]. 然而在关联光学中涉及到量子世界中的基本规律——非定域性,依然在锤炼我们的物理理解.

参 考 文 献

[1] Einstein A , Podolsky B , Rosen N. *Phys. Rev.* , 1935 , 47 : 777

[2] Hanbury-Brown R , Twiss R. *Nature* , 1956 , 177 : 27 ; 1956 , 178 : 1447

[3] Klyshko D N. *Sov. Phys. JETP* , 1988 , 67 : 1131 ; *Photon and Nonlinear Optics* , New York : Gordon and Breach Science , 1988

[4] Pittman T B , Shih Y H , Strekalov D V *et al.* *Phys. Rev. A* , 1995 , 52 : R3429

[5] Strekalov D V , Sergienko A V , Klyshko D N *et al.* *Phys. Rev. Lett.* , 1995 , 74 : 3600

[6] Boto A N , Kok P , Abrams D S *et al.* *Phys. Rev. Lett.* , 2000 , 85 : 2733

[7] Fonseca E J S , Monken C H , Pádua S. *Phys. Rev. Lett.* , 1999 , 82 : 2868

[8] D'Angelo M , Chekhova M V , Shih Y. *Phys. Rev. Lett.* , 2001 , 87 : 013602

[9] Fonseca E J S , Souto Ribeiro P H , Pádua S *et al.* *Phys. Rev. A* , 1999 , 99 : 1530

[10] Abouraddy A F , Saleh B E A , Sergienko A V *et al.* *Phys. Rev. Lett.* , 2001 , 87 : 123602 ; Abouraddy A F , Saleh B E A , Sergienko A V. *J. Opt. Soc. Am. B* , 2002 , 19 : 1174

[11] Bennink R S , Bentley S J , Boyd R W. *Phys. Rev. Lett.* , 2002 , 89 : 113601

[12] Bennink R S , Bentley S J , Boyd R W *et al.* *Phys. Rev. Lett.* , 2004 , 92 : 033601

[13] D'Angelo M , Shih Y. *quant-ph/0302146*

[14] Gatti A , Brambilla E , Bache M *et al.* *Phys. Rev. Lett.* , 2004 , 93 : 093602 ; Gatti A , Brambilla E , Bache M *et al.* *Phys. Rev. A* , 2004 , 70 : 013802

[15] Cheng J , Han S S. *Phys. Rev. Lett.* , 2004 , 92 : 093903

[16] Cai Y , Zhu S Y. *Opt. Lett.* , 2004 , 29 : 2716

[17] Wang K , Cao D Z. *Phys. Rev. A* , 2004 , 70 : 041801R

[18] Cao D Z , Wang K. *Phys. Lett. A* , 2004 , 333 : 23

[19] Cao D Z , Li Z , Zhai Y H *et al.* *Eur. Phys. J. D* , 2005 , 33 : 137

[20] Cao D Z , Xiong J , Wang K. *Phys. Rev. A* , 2005 , 71 : 013801

[21] Ferri F , Magatti D , Gatti A *et al.* *Phys. Rev. Lett.* , 2005 , 94 : 183602

[22] Scarcelli G , Valencia A , Shih Y H. *Europhys. Lett.* , 2004 , 68 : 618 ; Valencia A , Scarcelli G , D'Angelo M *et al.* *Phys. Rev. Lett.* , 2005 , 94 : 063601

[23] Xiong J , Cao D Z , Huang F *et al.* *Phys. Rev. Lett.* , 2005 , 94 : 173601

[24] Zhang D , Zhai Y H , Wu L A *et al.* *Opt. Lett.* , 2005 , 30 : 2354 ; Zhai Y H , Chen X H , Zhang D *et al.* *Phys. Rev. A* , 2005 , 72 : 043805 ; Zhai Y H , Chen X H , Wu L A. *Phys. Rev. A* , 2006 , 74 : 053807

[25] Gao L , Xiong J , Zhang S H *et al.* *Chin. Phys. Lett.* , 2008 , 25 : 1277

[26] Scarcelli G , Berardi V , Shih Y. *Appl. Phys. Lett.* , 2006 , 88 : 061106

[27] Basano L , Ottonello P. *Appl. Phys. Lett.* , 2006 , 89 : 091109

[28] Cai Y , Wang F. *Opt. Lett.* , 2007 , 32 : 205 ; 2007 , 32 : 1359

[29] Gao L , Xiong J , Lin L F *et al.* *Opt. Commun.* , 2008 , 281 : 2838

[30] D'Angelo M , Kim Y H , Kulik S P *et al.* *Phys. Rev. Lett.* , 2004 , 92 : 233601

[31] 唐华. 热光的关联干涉和关联成像效应. 北京师范大学硕士学位论文, 2007 [Tang H. *Correlated interference and correlated imaging effects with thermal light*. Master thesis of Department of Physics at Beijing Normal University , 2007 (in Chinese)]

[32] Cao D Z , Xiong J , Tang H *et al.* *Phys. Rev. A* , 2007 , 76 : 032109

[33] Wang K , Xiong J , Gao L. *Frontiers of Physics in China* , 2006 , 1(1) : 54

[34] Shih Y. *Frontiers of Physics in China* , 2007 , 2(20) : 125

[35] Scarcelli G , Berardi V , Shih Y. *Phys. Rev. Lett.* , 2006 , 96 : 063602

[36] Gatti A , Bondani M , Lugiato L A *et al.* *Phys. Rev. Lett.* , 2007 , 98 : 039302