神奇的量子成像

杨　哲[1]　戚　琪[2]　李俊林[1]

（1　清华大学物理系　100084；2　武汉市第十五中学　430071）

DOI:10.13405/j.cnki.xdwz.2015.01.014

1. 引言

光学成像系统在日常生活中应用广泛。我们使用照相机记录图像，使用投影仪展示幻灯片，用眼睛看到世界，这些都离不开成像系统。

无论是照相机、投影仪还是人的眼睛的成像过程，都属于经典成像的范畴。如图 1 所示，经典成像系统包括三个部分：光源、物体和光学系统。在光学理论分析时，物体所在的平面称为物平面，光源发出的光照射在物体上，经过成像系统后，成像在像平面。一般而言，物平面、成像系统（比如成像透镜）以及像平面在同一条轴上。经典成像系统的特点是，直接通过光学探测器，记录光场的强度信息。

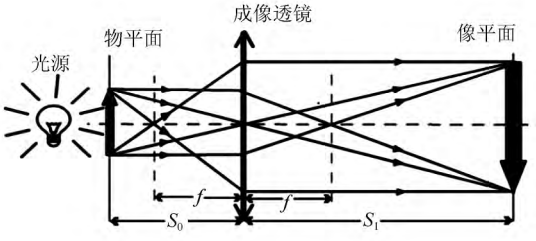


图 1　经典成像系统示意图

除了经典的成像系统，近年来，一种被称为“鬼成像”的新型量子成像系统开始兴起，这篇文章将向读者介绍这种新型的成像方式。

量子成像系统的基本构成如图 2 所示，光源发出的光被分成两束，一束称为信号光，经过取样系统到达一个“桶探测器”（可以收集一定面积的光，探测其总强度，比如大面积的光电二极管）；另外一束称为参考光，经过参考系统，到达另外一个点探测器。将点探测器在参考光路合适位置的横向平面进行逐点扫描（这个过程等效于一个具有空间分辨率的面阵探测器直接探测参考光信号，面阵探测器上的每一个光敏单元相当于点探测器，比如常见的 CCD），扫描的结果与桶探测器的结果进行符合测量，测量结果可以再现物体的像。所谓符合测量，指的是两个探测器同

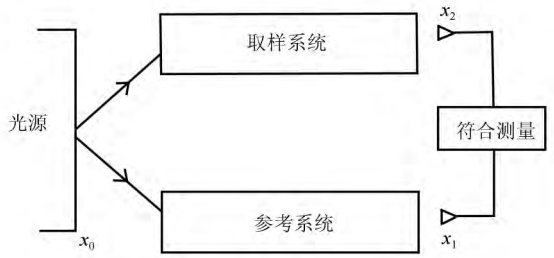


图 2　量子成像系统示意图

时有响应时，才进行计数。如果只有一个探测器有响应，或者两个探测器都没有响应，就不计数。

值得注意的是，物体只处于取样系统这一路，但是这一路只有一个单像素的桶探测器。众所周知，一个像素的探测器在光学中是不能进行成像的。对于参考光路，虽然通过平面扫描具有了空间分辨能力，但是这一路并没有物体，所以单独的这一路也是不能成像的。对于这两路光的强度进行符合计数之后，却可以再现物体的像。显然这是一种离轴成像，也就是说，物平面、成像系统、像平面不在同一条光轴上。

量子成像与全息成像有着本质区别。全息成像是利用光场的一阶干涉效应来记录 / 获得物体信息，测量方法上是利用一个探测器直接记录光场的振幅和相位信息。而量子成像则是利用光场的二阶关联或高阶关联来获得物体信息，测量方法上则需要两个或多个探测器对光场分布进行符合测量。

量子成像也被称为“鬼成像”或者“关联成像”，近年来取得了很大的进展，受到人们的广泛关注，具有重要的理论和实践意义。在理论方面，量子成像领域的研究进展使人们对于光子的特性、光的高阶干涉效应有了更深刻的理解；在实践方面，量子成像技术的成像灵敏度可以超越测试系统的量子噪声极限，扫描成像速率可以突破经典的采样极限。量子成像技术不断提高，使其具有很好的应用前景，并且朝着实用化的方向不断发展。

量子成像的发展史与“纠缠”的概念有着很深的

21994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

联系。量子力学建立之初受到了很多的质疑，1935 年由爱因斯坦、波多尔斯基、罗森发表的论文第一次提出了“纠缠”这个概念，用以证明量子力学是不完备的。20 世纪 50 年代，汉伯里 • 布朗（R. Hanbury Brown）和特威斯（R. Q. Twiss）二人做了非常有名的 HB-T 实验，他们本来是用这种方法解决迈克尔孙干涉仪受到大气扰动的问题。但是这个工作最重要的意义，在于把光子符合探测引入到光学实验中，使得人们可以探测光场强度的关联（即相关性），认识到光的二阶干涉效应的存在，为后来进一步研究光的高阶干涉打下了基础。20 世纪 80 年代以后，由于一种被叫做“自发参量下转换”的非线性光学技术的发展，人们可以方便地获得纠缠光子对（具体见第 3 节），被形象地称为“双光子”。利用双光子进行成像，也就是利用光场的二阶关联特性的量子成像，表现出与经典成像不同的特点。

自从理论上提出了离轴的量子成像方案之后，1995 年，美国的马里兰大学史砚华（Yanhua Shih）小组以纠缠双光子作为光源，首次在实验上实现了量子成像，被称为“鬼成像”。因为史砚华小组使用的是纠缠光源，人们很容易受到暗示，认为纠缠特性是实现这种成像机制的核心。波士顿大学一个研究小组同年在《物理评论快报》上发表文章，他们认为纠缠是得到双光子成像的必要条件。但是在仅仅一年后，美国罗切斯特大学的博伊德（Robert Boyd）小组报道了经典的光源（激光经斩波后被随机散射）实现类似于双光子“鬼成像”的实验现象。这就是说纠缠其实不是量子成像实现的必要条件。随后，其他研究小组使用赝热光源（具体见第 4 节）实现了“鬼成像”。这些实验引发人们对于热光能不能产生双光子干涉和成像的一系列讨论。其实直到现在，人们对量子成像的机制仍有争论。

在我国，量子成像这一研究领域的发展非常迅速，北京师范大学的汪凯戈研究组，中科院物理所的吴令安小组，还有中科院上海光机所的韩申生小组等研究组，都为量子成像的发展做出了重要的贡献。

2. 量子成像与相干函数

在量子成像的实现过程中，相干函数是最重要的物理量。所谓的相干函数，是描述不同时空点光场的关联性质的函数。

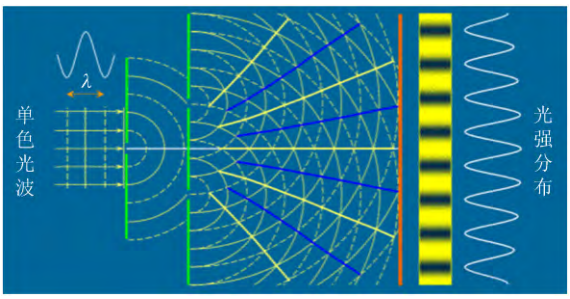


图 3　经典杨氏双缝实验示意图

如图 3 所示，光学课本上面引入光场的相干性，一般是从杨氏双缝实验开始的。在这个实验中，如果按照双缝发出的两个光强直接相加，不能解释衍射屏上面出现明暗相间条纹的现象；而使用双缝后两条路径光场的振幅相加之后，再计算总光强分布，则会出现一个余弦干涉项，可以解释条纹的明暗变化。此干涉项是光场具有一阶相干性质的体现，也就是说，不同的时空点的光场的振幅有可能具有关联性质。

引言中讲到 1956 年的 HB-T 实验，首次发现光强也具有关联性质。因为光强是振幅取模方的结果，所以光场的高阶干涉效应开始引起人们的关注和研究。

大多数的量子成像使用的是两个探测器，也就是测两个光强的关联（可以认为是四个光场振幅的关联），称为光场的二阶关联。计算二阶关联函数的值，可以重构出物体的像。

本文后面会提到利用光场的高阶关联性质进行的成像，但是，从一阶关联到二阶关联是质的变化，所以，我们将重点介绍基于光强的二阶关联的量子成像。

3. 纠缠光源实现量子成像

从这一小节开始介绍量子成像发展史上的几个重要实验，帮助读者进一步理解量子成像。

马里兰大学的史砚华小组于 1995 年率先利用纠缠光源，在实验室实现了量子成像，开启了这一领域实验和理论发展的大门。

实验装置如图 4 所示，使用 351.1 nm 的激光照射偏硼酸钡晶体（BBO），由于这种晶体的非线性光学效应，会发生参量下转换过程，在满足相位匹配条件

21994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

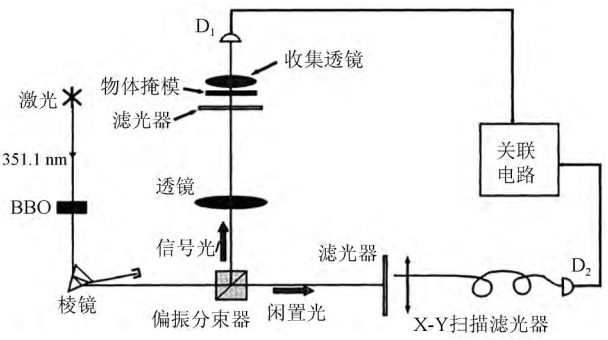


图 4　纠缠光源量子成像实验装置图（引自 *Phys. Rev.* A52, R3429（1995））

时，产生正交偏振的两束光。这两束光经过偏振分束器之后，分成两束，一束作为信号光，另一束作为闲置光，信号光的光子和闲置光的光子组成纠缠光子对。信号光照射物体掩模后，通过透镜收集到探测器 D_1 中，另一束光直接收集到探测器 D_2 中。单独的任意一个探测器都是不能成像的，但是经过关联电路进行符合测量后，可以再现物体的像。

在参量下转换过程中，泵浦光（Pump）照射在非线性晶体上，产生信号光 s 和闲置光 i，两束光需要满足能量守恒，$\omega_{pump}=\omega_s+\omega_i$。又要满足相位匹配条件，即动量守恒，$\boldsymbol{k}_{pump}=\boldsymbol{k}_s+\boldsymbol{k}_i$。

史砚华小组实验中的物体掩模以及成像效果如图 5 所示。所谓的物体掩模是一种“二值透过率物体”，透光的地方认为其透过率函数值为 1，不透光的地方透过率函数值为 0。可以看出，量子成像很好的再现了物体掩模上的字母。

涉及量子成像的严格解释，需要量子光学的理论来计算量子二阶相干函数。

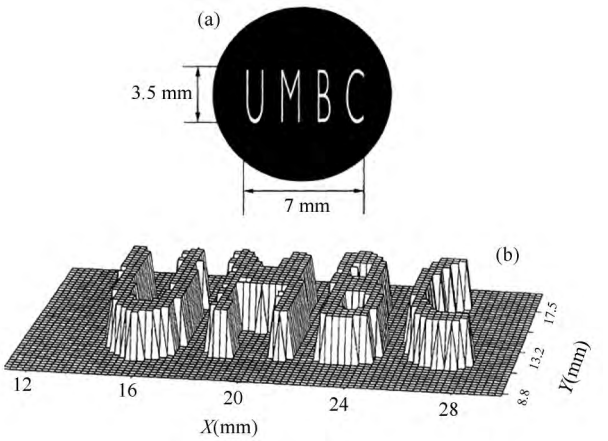


图 5　（a）实验物体掩模；（b）经过符合测量后得到物体掩模的像

这个工作引起了科学家们的广泛兴趣，围绕着量子成像的工作不断出现。现在已经实现了多种形式的量子成像，比如使用经典的光源代替纠缠光源的实验。

4. 赝热光源与真热光源实现的量子成像

经典光源实现量子成像

上面提到，由于量子成像的首次实现使用的是纠缠光源，于是科学家们很自然地讨论“纠缠”与“鬼成像”这种新颖的成像方式之间的联系。是不是只有纠缠光才能够实现量子成像？“纠缠”是否才是量子成像的本质？使用其他光源能否实现量子成像？

2001 年，波士顿大学的研究者发表文章，他们宣称纠缠是量子成像的必要条件。但是仅仅一年之后，罗切斯特大学的科学家就使用随机指向的光源实现了量子成像。这个实验开启了基于经典光源量子成像的研究。

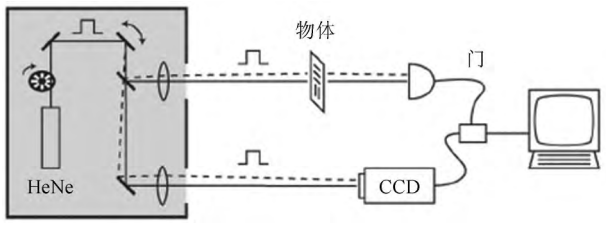


图 6　经典光源量子成像实验装置图（引自 *Phys. Rev. Lett.* 89, 113601（2002））

如图 6 所示，实验中使用斩波器将连续的激光变成脉冲激光，然后经过一个随机振动的反射镜，使光朝着不同的方向射出。光经过半反半透镜，一部分光反射进入信号光路，另一部分透过，到达平行放置的第二面镜子后，反射进入参考光路。这样可以保证信号光路与参考光路是角度关联的，即两个镜子反射光的角度相同。在信号光路中，光经过物体，照射在一个单光子探测器上，作为控制信号。参考光照射在 CCD（光电耦合探测器）上面，CCD 是具有空间分辨率的探测器。一旦信号光路的探测器接受到信号光子，相当于开门信号，则 CCD 上面就记录信号；如果信号光计数器没有接收到信号光，那么参考光路的 CCD 不记录参考光强。图 7 展示的是经过符合计数之后，物体掩模的像得到了很好的再现。

这个实验是容易理解的，因为上面的光随机照射在物体上面，由于不规则的指向，有的地方可以透光，

21994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

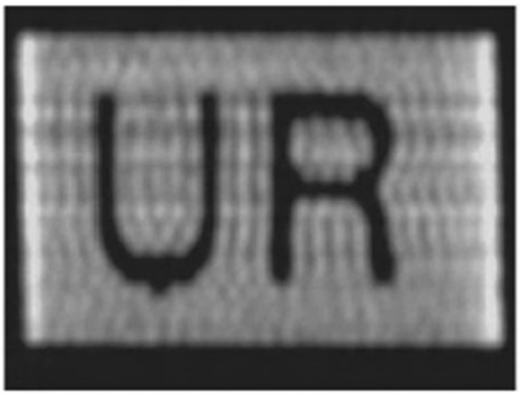


图 7　经典光源量子成像实验成像效果

有的不能，于是可以透光的地方，信号光计数器得到光子，发出开门信号，下面的 CCD 记录信号，符合之后的区域比较亮，不能透过的地方，信号光计数器没有接受到光，产生关门信号，下面的 CCD 不记录信号，符合之后的区域比较暗。最后通过亮暗对比就可以复现掩模字母的图像。

这个实验使用的光源是一种经典的光源，并不是纠缠光子对，说明了经典光源也可以实现量子成像，推翻了以前人们关于“纠缠是实现分布式量子成像的先决条件”的论断。

值得注意的是实验的探测部分也区别于以前的实验，使用了具有空间分辨率的 CCD，不同的像素点代表空间中不同的位置，这样 CCD 的各个像素点信号直接给出了空间分辨的结果，不需要移动光子计数器进行机械扫描。另一方面，由于 CCD 的积分时间比单光子探测器长，于是需要时间相干性好的光源，而我们知道热光的时间相干性是很差的，因此赝热光源被大量使用。

热光源和赝热光源

实验室使用的光源一般有两种，一种是基于自发辐射原理的热光源，另一种是基于受激辐射原理的激光光源。在激光器发明以前，热光源是唯一一类实验室使用的光源，日常生活中的大部分光源都是这种光源。因为其原理是自发辐射，热光源发出的光，无论

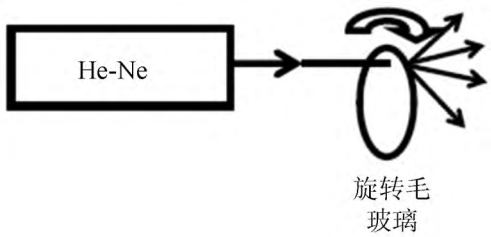


图 8　赝热光源组合示意图

是时间还是空间上都是随机的，其时间相干性、空间相干性都很差。一般而言，由于热光源的时间相干性不佳，受限于探测器的响应时间，很难使用热光源实现量子成像。

为了解决上面提到的热光源相干时间短这个问题，人们普遍使用的是图 8 所示的装置作为赝热光源。

激光照射在旋转的毛玻璃片上，毛玻璃上面布满了散斑，不同散斑之间的光是非相干的，所以其空间相干性被打散。相干时间可以认为是毛玻璃转过一个散斑面积需要的时间。于是，通过调节毛玻璃的转速，可以调节光源的相干时间。毛玻璃转速越快，其相干时间就越短，毛玻璃转速越慢，相干时间越长。

由于这种光源既能很好的模拟热光源，又可以照顾到探测器的响应时间，在量子成像的研究中得到了广泛的应用。

赝热光源的量子成像

图 9 是史砚华小组完成的赝热光源量子成像的实验原理图，激光照射在旋转的毛玻璃上获得激光散斑。光源发出的光经过分束器分成两束，一束经过物体（本实验使用的是双缝）照射在探测器 D_1 上面，另外一路经过自由空间照射在探测器 D_2 上面。经过符合计数，并且探测器 D_2 进行空间扫描后，可以获得双缝的图样。

这个实验说明使用赝热光源也可以很好地再现物

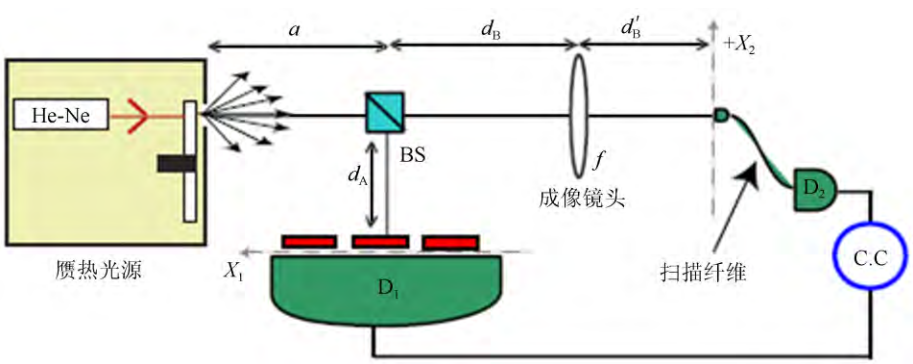


图 9　赝热光源量子成像实验装置图（引自 *Phys. Rev. Lett.* 94. 063601（2005））

21994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

体的像。

中国的汪凯戈、曹德忠等在赝热光源成像的几何解释方面做出了贡献。

热光源的量子成像

2005 年，中国科学院物理所的吴令安小组首次使用真热光源实现了量子成像。

所谓的真热光源就是使用空心阴极灯，前面说过，热光源实现量子成像的难点在于，热光的时间相干性很差。但是图 10 所示的这种空心阴极灯与其他的热光源相比有较好的时间相干性，比探测器的响应时间略长，所以可以实现量子成像。

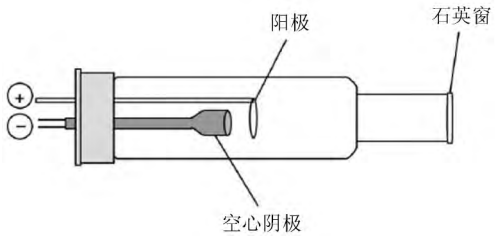


图 10　空心阴极灯示意图

除了光源部分之外，真热光源量子成像实验的光路与赝热光源相比并没有太大的差异，而且实验的理论解释也是相似的。

5. 量子成像的其他进展

无透镜量子成像

韩申生研究小组对于热光的无透镜鬼成像做出了贡献。在以前的实验中，光路中必须有透镜，并且满足成像公式。韩申生指出，即使没有透镜，也可以通过两路 CCD 的关联函数进行成像，在信号光路以及参考光路这两路相等的时候可以进行成像。后来人们又发现不等臂的无透镜鬼成像也是可以实现的。

这种无透镜成像，可以获得 X 射线、γ 射线的衍射图样，因为这些光源没有传统意义上的相干光源，所以传统的成像方式难以获得。由费米子构成的射线，如中子源，本身也不存在相干光源，但是无透镜量子成像机制为这些高能电磁波或者某些射线源的成像提供了可能性。

光子的高阶干涉成像

量子成像是两路光进行强度关联，需要计算二阶量子相干函数或者经典相干函数，通过计算的结果来复现物体的像。后来的实验发现三路光以及多路光进行的量子成像也是可以实现的，但需要计算高阶相干函数。与二阶量子成像相比，高阶成像具有更好的成像可见度。

差分鬼成像与归一化鬼成像

2010 年，意大利的加蒂（A. Gatti）小组给出了一种旨在提高传统鬼成像信噪比的成像方式，即所谓差分鬼成像。

差分鬼成像在实验装置上并没有做很大的改变，仅仅是在传统鬼成像的计算方式的基础上，加上了对于权重因子的修正。通过理论和实验验证，对于高透过率的物体，差分鬼成像可以明显提高信噪比。

2012 年，人们又提出了一种归一化鬼成像。作为差分鬼成像的变形，在成像效果上，归一化鬼成像与差分鬼成像完全相同，所以这里不再详细展开描述。

计算鬼成像

前面所有的量子成像的实验装置，都需要使用两路探测器去探测具有一定的关联性的两个光场，再现物体的像。2008 年，美国麻省理工大学的夏皮罗（Shapiro），给出了一种新的成像方案，只使用一个点（单像素）探测器，就可以完成成像。

实验使用激光照射在空间光调制器上产生随机分布的光斑，代替了激光照射旋转毛玻璃产生散斑的方式。所谓的空间光调制器，就是可以对于入射光的强度、相位等信息进行调制的仪器，并且可以人为控制。这种方式调制的光强信息可以保存在计算机中，而且是已知的，称为主动式光源。它区别于以前的被动式光源，即以前方案中的光源的强度是未知的，只能通过探测得到。

介绍了光源处的改进，这种方式的原理也是容易理解的。在装置中保留的一路是探测光路，即有物体以及桶探测器的一路，而原来的参考光路被取消。我们可以通过已知的对于激光的空间调制，利用衍射理论计算得到在适当位置的光强的分布，而传统的量子成像是通过在相同位置的点阵探测器得到的。

21994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

很快，计算鬼成像的方案在实验上得到了实现。有的科学家认为计算鬼成像方案根本不涉及两路光子，仅仅有一路光，所以不是量子效应，鬼成像不依赖所谓的量子关联。但是，又有物理学家指出，这个方案仍然是量子关联的，只不过是一个真实光子，与一个计算的虚拟光子的关联。

可以看到，科学家们对于成像的解释仍然有争议。

6. 量子成像的应用

传统的几何光学成像是基于物像间点对点的共轭对应成像，而量子成像则迥然不同：其信号端（物端）只有一个没有成像功能的桶探测器，参考端虽然有一个用于成像的面阵探测器，但其上没有任何物的信息。神奇之处在于两路信号都无法单独得到图像信息，只有两者做关联时才可以实现成像。从某种意义上可以说，量子成像是关联技术和量子光学相结合的结果，是一种全新的成像技术，具有很多独特的优点：（1）能够实现成像过程的空间分离，（2）可完成单像素成像，（3）可进行无透镜成像，（4）成像过程抗光学相位干扰。

传统的飞机成像，卫星成像，都会受到大气湍流扰动的影响，这是可以理解的，因为大气的扰动相当于介质不均衡，使光场相位受到很大的影响，成像质量下降。而量子成像的特性使得其对于光场相位变化不敏感，有文章在实验上证明量子成像的成像质量是不受大气湍流影响的，可以称为消湍流成像。

通过在晴朗、多雾、夜间、阴雨等多个天气条件下的实验，表明量子成像雷达都能够有很好的成像效果。相比于传统的雷达，量子成像雷达抗天气干扰的能力更强，使其在未来的雷达方面会有很好的应用前景。

当然，随着量子成像技术被人们越来越熟练的掌握，在很多其他的领域都得到了应用。

X 射线断层成像（CT）主要通过单一轴面的 X 射线旋转照射人体，由于不同的组织对 X 射线的吸收不同，可以用电脑的三维技术重建出断层面影像。经过处理，可以得到相应组织的断层影像。将断层影像层层堆栈，即可形成立体影像。量子光学系统使用的频率比较宽，在 X 射线这一频域内也有效，可以把量子成像技术应用到 X 光断层摄影领域 。

2013 年，有人提出了基于计算鬼成像的光学密钥分发方案，此方案可以在长距离、多方之间进行量子密钥的产生、放大和分发。相比于传统的密钥分发，基于计算鬼成像的方案具有更加快速的密钥分发率。这一优势在网络会议、商业通信等需要快速安全通信的领域具有很好的应用前景。

7. 总结与展望

本文回顾了量子成像这种新型成像方式的实验发展以及理论解释，介绍了其在基础研究与实际应用等方面的进展。

在基础研究方面，量子成像已经在纠缠光源、热光源、赝热光源等多种光源条件下得到了实现，并且获得了较好的理论解释。这有助于我们深入理解光的干涉现象，进一步了解光的特性。但是，使用经典的光源与量子光源到底有什么不同，量子成像的物体图像究竟是什么，现在并没有完全达成共识，仍然有不同的理论解释，并且没有停止争论。

在实际应用方面，由于量子成像技术可以适用于激光、荧光，甚至是太阳光等光源，所以具有广泛的应用前景。这种机制可以避开云、雾、烟等常规成像技术无能为力的气象条件的干扰，从而获得更加清晰的图像。这样的优势使得量子成像在消湍流成像、量子雷达、量子断层扫描、量子秘密通信等方面有很好的应用前景。

而且，量子成像正在朝着实用化的方向迅速发展，在快速、高清、三维、彩色等目标上取得了很大的进展。当然，量子成像距离实际应用还有一段路要走。因为主动式光源的成像会受到空间光调制器频率的限制，并且主动式光源的强度不能太大。被动式的光源，比如太阳光是最普遍的光源，却会受到探测器的响应时间的限制。这些限制并没有得到完全的突破。需要人们的进一步的探索。

可以预期，量子成像这一领域，无论在基础理论研究以及实际应用的层面，还会有长足的发展。

21994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net