

冲破量子极限——光压缩态

吴 令 安

近几年来,物理学最古老的分支之一——光学又有了新的突破,人们从实验上获得了光的一种量子态——压缩态光。读者可能会问,“光怎么能被压缩?”要解释什么叫压缩态光,还得从光的本性谈起。

(一) 光的量子涨落

光是一种电磁波。在经典光学里,我们可以设想在空间某点光场随时间的周期性变化如图 1(a) 所示,其中纵坐标为电场强度,在任何时刻它的振幅和相位都是完全确定的。然而,在量子理论中,根据测不准原理,光场总是有一定的涨落或噪声,也就是说,在任何时刻我们都无法同时以任意精度确定电场的振幅和相位,最多只能给出它们的范围,即图 1(b) 中由两条包络线围出的区域。这种噪声在完全没有亮光的“黑暗”中也存在,就是所谓的“真空涨落”(见图 1(c))。

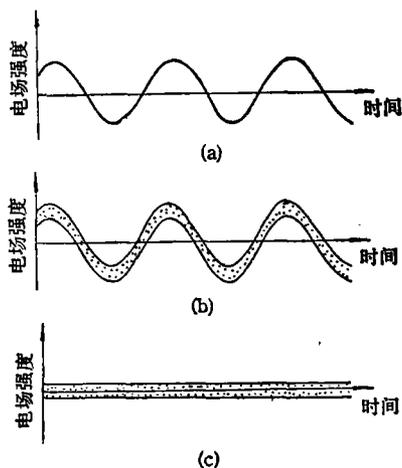


图 1 光波在空间传播时某点电场强度随时间的变化
(a) 经典电磁波 (b) 实际电磁场的量子涨落
(c) 真空场的量子涨落

振幅和相位是通常用来描述波场的一对物理量,但在讨论量子的不可同时测量性和量子涨落时,更方便的一对物理量是场的正交分量。如果将电场用直角坐标系中过原点的矢量表示,其长度和电场振幅相等,则场的正交分量就是矢量的 x 和 y 方向分量(见图 2(a)),而相位就是矢量与 x 或 y 方向的夹角。例如,某时刻电场的大小由矢量在 x 轴上的投影给出。矢量绕原点匀速转动,其与 x 轴的夹角即相位在周期性地

变动,箭头尖端便画出图 1(a) 的正弦波。在这种图象中,无涨落的理想经典场箭头尖端落在一点上。然而,量子涨落的存在使这个点模糊成一个区;如果这个模糊区是个圆斑,则表示场的两个正交分量的测量误差范围相等(图 2(b))。从激光器出来的相干态光就是这种光。测不准原理限制了圆斑的半径不能小于一个最小极限值,这个值就叫量子极限。

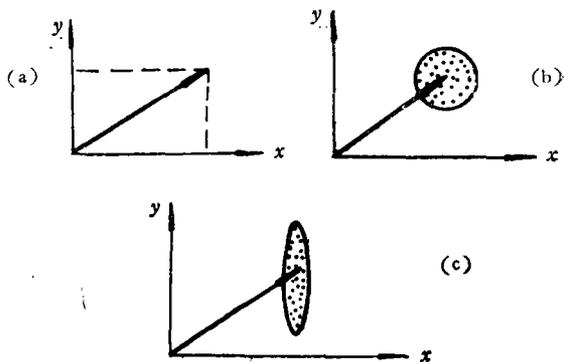


图 2 电磁场的矢量表示

(a) 经典光场的电矢量。电场矢量可由 x 、 y 正交分量表示。(b) 相干态光的电矢量。 x 、 y 正交分量的量子涨落相等。(c) 压缩态光的电矢量。 x 分量的量子涨落被压缩,而 y 分量的涨落增加了。

量子噪声的存在限制了测量精度,但是,当热噪声等其它噪声更强时,或者测量精度要求不高时,量子噪声并不重要,可以忽略不计。然而,由于科学技术的发展,许多尖端领域中对精度的要求已逼近量子极限,突破它已是迫在眉睫的任务。

这种超出量子极限的想法是否违背量子理论呢?前面提出的测不准原理对圆斑半径的限制实际上是有可能打破的。因为测不准原理只要求斑点的面积不能小于一个极限值,设想误差斑不是圆的,那么理论上就允许场的两个正交分量之一的误差范围小于量子极限。形象地说,我们可将误差圆斑压扁,这就是压缩态这一名称的由来。这里所说的压缩,物理上相当于使一个正交分量的噪声减小,当然,由于测不准原理,此时另一正交分量的噪声必定增大。图 2(c) 显示了 x 分量噪声被压缩的光场。如果某个光学系统采用压缩态光,探测器只测量被压缩的那个分量,我们就可得到超过上述“标准量子极限”的测量精度。

(二) 怎样压缩光

在解释如何能压缩光之前,先来看一个生活中的例子——荡秋千。

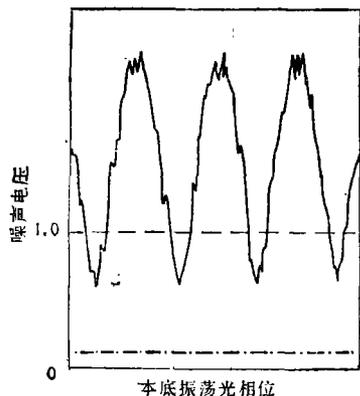


图3 参量振荡器产生压缩态光正交分量的噪声电压与本底振荡光相位的关系。虚线为真空场的量子噪声,点划线为放大器本底噪声。曲线最低、最高值分别为被压缩和被放大正交分量的噪声。

彼此相位匹配。相反,如果小孩在最高点站起,而在最低点蹲下,秋千摆幅将逐渐减小,最终完全静止。物理上就是说泵浦源和摆的相位完全不匹配,因泵浦只起阻尼的作用。

再让我们假设,在一个操场上有许多孩子,每人自由自在地荡着秋千,彼此没有任何联系,同一时刻各个秋千摆起的角度是无规的,即各自的位相是随机的。前面所说的电磁场噪声就好比这一群无规的摆,摆幅的总和不是随时间而周期性地改变,而是为一个平均值,因此表现出如图1(c)所示的噪声宽度。

现在假定有人任意地选定了操场上某一个秋千,当该秋千到最低点时,此人用喇叭喊口令“一”,指挥所有荡秋千的孩子站立起来,而不管他们的秋千当时处在什么位置。当选定的那个秋千到最高点时,再喊口令“二”,指挥所有孩子下蹲。如此重复多遍后再看操场上的秋千,就会发现,最初和选定秋千相位相近的那些秋千变得彼此同步,并越荡越高,而其余的秋千却逐渐趋于停止。经过相当时间后,一半秋千将以同样的振幅和相位一致地摆动,另一半秋千则将停止不动。这就相当于电磁场的一个分量的噪声被放大,而另一分量的噪声被压缩了。

产生压缩态光根据一个类似的泵浦机理。具体方案很多,但都离不开使用非线性光学介质。这种介质的光学性质与通过的光强有关,它们可以是气体、液体或固体,通过的光强增大一倍时,转换出来的光强并不是增大一倍。激光经过这种介质后可产生另一种频率的光波,在频率和相位关系合适时,通过它输出的波就被压缩了。

(三) 压缩态光的实验观察

关于压缩态光的理论始于六十年代;七十年代人们就提出了若干种产生压缩态光的实验方案,然而,当时不知道如何探测电磁场的两个正交分量 X 和 Y ,因为通常的探测器如光二极管、光电倍增管,都是只对电场振幅敏感。直到八十年代初,才有人提出了所谓的平衡零拍探测系统的方法。在这样的探测系统中有一个半反射镜,可让待测的压缩态光一半透过、一半反射。从镜子的另一面输进一束强度较大的同波长光,它和压缩态光来自同一激光器,称为本底振荡光束。本底振荡光束的反射部分与透射的压缩态光共线,同时到达一个探测器。同样,透射的本底振荡光与反射的压缩态光,也一起到达另一相间的探测器。两个探测器的电信号经过适当电学处理,将本底振荡光的成份消去后,只剩下某一正交分量的信号。通过调节本底振荡光和压缩态光间的相位关系,可挑出噪声被压缩的那个正交分量。当然,也可观察到涨落被放大的另一正交分量。

探测手段解决后,美国的几家实力雄厚的大实验室(如AT&T的贝尔实验室、IBM公司和国家标准局),首先展开激烈竞争,争当实验获得压缩态光的第一家。他们看到压缩态光在信息传输及超高精度测量等方面有潜在的应用前景,也很重视它的基础研究价值,很早就从实验上着手研究压缩态光。但由于技术要求高、实验难度大,直到1985年,贝尔实验室才在三年的努力下终于获得首先观察到光压缩态的殊荣。

贝尔实验室采用的是谐振腔钠原子束四波混频法,即以钠原子为非线性介质,用强激光束泵浦钠原子,使腔内共振的另一光束被压缩。这样,第一次使得量子噪声比真空涨落噪声极限低百分之七,后来达到百分之二十五。

几个月之后,IBM公司用一百多米长的光导纤维,在4.2°K的低温下,通过四波混频,使噪声相对于量子极限值下降了百分之十二,随后提高到百分之二十。

接着又有几个小组用四波混频或钠原子束实现了压缩态光。但最重大的突破还推算1986年美国德克萨斯大学奥斯汀分校小组的光学参量振荡器实验。他们以硫酸锂晶体为非线性介质,将它放在谐振腔中,用绿色激光泵浦,产生频率减半的红外压缩态光。他们观察到的噪声涨落比真空噪声极限低百分之六十三。测出压缩态光两个正交分量的噪声与本底振荡光的关系如图3所示。参量振荡器实验产生的压缩率估计高达百分之九十,只是由于传输和探测系统的损耗使实测值降低。

德克萨斯小组实验的成功表明实验上可获得有实用价值的压缩态光,并指明了产生这种压缩态光的一

你听说了吗？

——来自 24 届国际高能物理会议的消息

之一：

自七十年代以来，高能物理与宇宙学的研究联系越来越密切，因而近几届国际高能物理会议上都安排一个有关宇宙学方面的报告。在 1988 年举行的第 24 届会议上报道了一种新的宇宙模型。

宇宙有可能不是创生出来的

我们的宇宙在膨胀，这一事实早为天文学家所确定。在此基础上，四十年前，物理学家盖莫夫及其合作者阿尔弗创立了大爆炸宇宙学。按照这个理论，我们的宇宙在遥远过去的某一时刻是物质密度为无穷大的奇点状态，突然一声“巨响”，原来被挤压在体积趋于零的空间内的所有物质因剧烈的宇宙大爆炸四散抛出。而后，宇宙在膨胀中不断降温，直至生成了原子、分子及各种现存于宇宙的物质。

四十年来，大爆炸宇宙学有很大发展，取得了相当的成功，例如，预言了宇宙氦丰度不低于 25%，这与观测到的事实十分相符。特别是，1965 年在 7.35 厘米波长处发现的背景辐射，对大爆炸宇宙学理论提供了极大支持。

然而，任何人都可能提出这样的问题——那一声巨响之前宇宙是什么呢？事实上大爆炸宇宙学几乎肯定了宇宙在时间上有一个始点。那么这难道意味着宇宙是被创生出来的？另一方面，假如天体物理学家不想陷入求助于神学的窘境，是否非抛开已有不少实验支持的大爆炸宇宙论不可？

最近，苏联人林德等提出的称为娃娃 (Baby) 宇宙模型的理论也许是一种解决办法。林德等认为宇宙是无始无终的，膨胀着的宇宙可看作是在一个“泡泡”上凸起而“长大”的“泡泡”，每个“泡泡”各自在膨胀，又不断凸起“泡泡”，我们现在的宇宙只是无穷长流

中的一个“泡泡”而已。这一模型可把原来的宇宙大爆炸模型的好结果全部继承下来，而又避免了必须回答“大爆炸之前是什么”这类难题。

之二：

作为轰击粒子的武器，高能加速器自然是粒子物理的重要实验工具。在美国和欧洲等的大实验室竞相建造耗资巨大的超级加速器的同时，近两年来也发展了一些不用加速器的实验，并取得了十分有意义的结果。

中微子失踪案或许即将了结

六十年代，人们用氦探测来自太阳的中微子流，探测结果是到达地面的中微子通量比理论预期的少一半以上。多年来，粒子物理学家和天体物理学家都对此疑惑不解，是太阳上并非进行着人们想象的氢核聚变，还是在从太阳到地球的历程中丢失了中微子？第 24 届国际高能物理会议上报道的一个消息或许表明这段持续了二十年之久的公案可望了结。

在 Davis 用氦测量太阳中微子的实验发现，1987 年的太阳中微子通量比以前年份高出一倍。根据太阳标准模型的估计，新的实验数据与之相符。如果 1987 年的测量是正确的，可能意味着所谓太阳中微子失踪的问题不复存在。

但是否还可能有另一种情况？即如果 1987 年是太阳活动的特别时间，则当年的中微子流原先就高于平均值，那末即使途中丢失一半以上，到达地面的中微子通量仍会接近平均值。

到目前为止，还无法断定究竟是什么原因造成 Davis 的观测值。因此，我们还须等待进一步的实验结果。（作者：张肇西）

个可行途径。此后，各地实验室纷纷着手研制光学参量振荡器作为压缩态光的产生源获得连续压缩态光及脉冲压缩态光，并实验探讨压缩光的应用。

前面介绍的都是如何压缩电场的正交分量。另有一种压缩态是把电场振幅的涨落减小到量子极限之下，也就是压缩光子数的涨落。这时另一个量即相位的涨落必定增大，但对于一般的光探测器来说，这一点无关紧要，因为它们只对电场的振幅敏感。在光子

数压缩态方面做得最成功的当数日本电报电话公司 (NTT) 的实验，他们用加反馈的半导体激光器获得了压缩率为百分之三十二的粒子数压缩态。

在我国，人们对光压缩态的研究也越来越重视，但虽然理论工作已开展数年，实验研究则刚刚起步，目前尚未观察到压缩光。

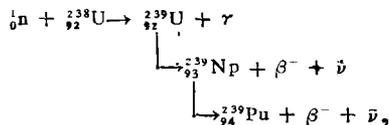
(下转第 30 页)

应堆被密封在一个坚固的水泥容器中，以确保压力容器或管道破裂时放射性物质不会扩散。来自堆芯的高压热水通过蒸汽发生器循环，使汽轮机回路中的水在蒸汽发生器中形成高压蒸汽以驱动汽轮机运转。这座核反应堆裂变热功率为 3,000 MW，可以产生 1000 MW 的发电功率。

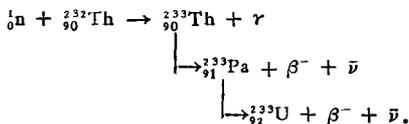
核动力反应堆的另一种堆型是沸水堆。沸水堆没有蒸汽发生器，与核燃料棒接触的水直接在压力容器内沸腾而形成驱动汽轮机的蒸汽。

第三种型式的核动力反应堆是用浓缩铀核燃料、石墨慢化剂，以氦气作为热交换介质冷却堆芯并把热量从堆芯带出以供应用。

有一种叫做快增殖堆的核反应堆，功率密度可达 100 MWm^{-3} ，也可以作为核动力反应堆。它的活性区由高浓度的铀-235 或铀-239 和氧化天然铀的混合物与冷却剂组成。核素铀-238 的快中子诱发裂变也是反应堆的能量来源。冷却剂为液态金属钠，通过热交换器循环，把汽轮机回路中的水变成高压蒸汽，与压水堆的情况相似。应用液态金属钠作为热交换液体，堆芯不必在高压下运行就可以维持高的温度和高的热力学效率。另一方面，液态金属钠是电的良导体，可以用电磁泵驱动它循环而大大减少机械防漏循环泵所带来的麻烦。这种反应堆所以被称为增殖堆是因为它能够把核燃料中的铀-238 以及包在活性区外围的铀-238 (或钍-232) 转变为核燃料钚-239 (或铀-233)。具体反应为：



即，铀-238 核俘获一个中子，生成铀-239 核，放出 γ 光子；铀-239 核 β^- 衰变 (放出一个电子和一个反中微子，寿命约 23 分钟)，生成镎-239 核；镎-239 核再 β^- 衰变 (寿命约 2、3 天)，生成寿命约 24000 年的钚-239 核。钚-239 具有比较大的热中子诱发裂变截面，可以作为核燃料。钍-232 的转化反应式为



如果适当设计，快增殖堆每裂变 1 公斤铀-235 (或铀-239) 可以利用铀-238 或钍-232 生产 1 公斤以上的钚-239 或铀-233。就是说，快增殖堆可以将地球上藏量比较多的铀-238 和钍-232 转变成藏量很少或无蕴藏的核燃料。因此，快增殖堆是一种很受欢迎的堆型。

核动力反应堆能把核能转变为动力。对于能源紧张的当今世界来说，建造核动力反应堆是很必要和很

有利的。当然，核动力反应堆的运行过程中会产生大量的放射性废物，而恰当地处理放射性废物是一种比较麻烦的事情。不过，火力发电站和燃油发动机产生的化学废物同样给人类带来不可忽视的危害。相对而言，建造核动力反应堆所带来的问题并不是那么令人担忧的。对于煤、石油和水力资源比较缺乏的国家来说，建造核动力反应堆尤其是利大于弊。因此，世界上的核动力反应堆的数量越来越多，并且将以更快的速度发展下去。

(上接第24页)

(四) 压缩态光的应用前景

光学测量中最强有力的手段之一是干涉测量法，其精度为光波长 (10^{-7} 米) 量级，在德克萨斯小组和贝尔实验室所做原理性实验中，噪声被降到量子极限之下，下降量最高达百分之五十。

用压缩真空涨落提高干涉仪灵敏度，在引力波检测方面有最直接的应用。天文学家预言在超新星爆发时会发射大量的引力波，但这种波很弱，目前设计的最灵敏测试手段在精度上远达不到。美国加州理工学院和德国马克斯-普朗克研究所正在设计激光干涉仪，如果用压缩光代替入射到分束镜上的真空涨落，理论上可期望将精度提高一百万倍。当然，由于光学元件的各种损耗，估计实际提高精度约十倍，而这就能使探测引力波得以实现。

另一种用到干涉测量的仪器是激光陀螺仪，它测量的不是距离的变化，而是角度的变化。激光陀螺仪本身的灵敏度已相当高，如果精度再能提高十倍，就有可能测量广义相对论所预言的地球自转引起空间畸变的现象。

在原子分子光谱方面，压缩态光不仅会减弱噪声提高精度，还将开辟一个新的研究领域。目前，压缩态光场同原子和分子的相互作用仍不清楚，理论探讨刚刚开始。

除此以外，压缩态光在实际应用方面也有广阔的前景。在微波波段，某些约瑟夫逊超导器件已接近量子噪声极限，光通讯和光计算等尖端技术也很快将发展到量子噪声极限，到那时只有借助压缩态光才能继续取得进展。压缩态光将是人们揭示量子噪声极限禁锢下未知世界奥秘的有力手段。