# 第 11 章 现代光学的兴起

## 11.8 量子光学

量子光学与量子信息是 20 世纪末期兴起的最具生命力的两门新兴学科，它们对某些有争议的量子力学基本原理所作的实验验证，有不可替代的作用。同时，它们的基本理论以及操纵单量子的实验方法应用到信息处理，开辟了量子信息的新领域。现在，这两门学科正以巨大的魅力吸引大量理论与实验物理学家从事研究和开发，成果不断涌现。可以判断，这两门学科正处于取得重大突破的前夜，一旦突破，对科学技术以至社会和经济，将会产生无法估量的作用。

### 11.8.1 量子光学的兴起和 HBT 实验

人类认识到光的量子性已经一百年，但是应用量子理论研究光辐射与光场的相干性及统计性还只是近年来的事情。20 世纪前半叶，尽管量子力学已经得到普遍应用，但是在光学领域中，经典电磁理论却仍然占据主导地位，原因可能是光的量子性只在几个特定光现象中才能观察到。人们所接触到的光都是发自大量彼此独立的原子或分子，在相位上毫无关联。这就是所谓的混沌光场，判断相干光也只是以这种光场能否发生干涉为依据。因此，这一相干性概念具有极大局限性。1956 年（激光问世之前！），汉堡-布朗（R.Hanbury-Brown）和特维斯（R.Q.Twiss）完成了光学关联实验[[1]](#footnote-1)（这一实验常被称为 HBT 实验），对传统的相关性提出了挑战。通过这一实验，他们首次证实了光场存在有高阶相关效应。HBT 实验测出的光场起伏表明，传统的相干性描述并不完备，必须补充二阶或更高阶的相关函数。在普通光源情况下，不可能获得真正的完全相干光。只有激光器问世后，才有可能获得完全相干光。

随着认识的深入，人们已经发现有三类光：一是混沌光，它是自发辐射过程产生的光子构成的，给出的是最大噪声的光场；二是相干光即激光，具有很低的总噪声（真空噪声）；三是由非线性过程产生的非经典光，如压缩光、光子数态光等。

### 11.8.2 光场压缩态

根据量子场论，处于真空中的量子场，所有振动模式仍在不停地振动，这种振动称为真空零点振荡。真空中各量子场间仍有相互作用，虚粒子会不断地产生、转化和消失，这就是所谓的真空量子涨落。也就是说，真空并不空虚，而是某种特殊媒质。根据不确定原理，完全相干光条件下的量子相干态，在振幅平面上不再对应于一个点，而是一个大小等于电场真空起伏涨落的圆斑，这就是零点振动。在真空中，电磁场仍存在微小的起伏，这就叫真空起伏。普通光波是经典光波和真空起伏的叠加，它们相干的结果构成噪音场，由于噪音场的存在，测量的精度从根本上受到限制。人们十分关注的是，如何使这种无规则的起伏压缩至最小，能不能实现光场的压缩。

最初设想使用一种周期性抽运的方法。令谐振腔一端的反射镜往返运动，当腔长变化的频率达到光频的两倍时，到达反射镜上的光波能量会周期性地被放大和缩小。但是事实上，不可能使反射镜以光频数量级振动。1985 年，美国贝尔实验室的斯鲁施尔（R.E.Slusher）研究小组提出了一种代替反射镜振动的实验方案。他们选用运转于钠原子共振线附近的非简并四波混频作为非线性过程，“证明了从被激发原子发出的自发辐射在用于压缩的空腔中导致了广谱频率的光谱”[[2]](#footnote-2)。由于在钠原子束中光速比真空中低，光经过钠蒸气室的光程加大。当用激光激发钠原子时，钠原子蒸气室的光程迅速变化，其变化频率正好与光频相当，这就相当于反射镜的往返振动。他们在实验中测定噪声功率相对真空涨落降低了 7%。这一结果虽然不够理想，却是首次利用驻波场激光获得了压缩光。1986 年，得克萨斯大学的金布尔（J.Kimble）研究组利用运转于阈值以下光学参量下转换过程，使输出场噪声功率相对于真空涨落降低 63%。接着，美国 IBM 公司 Almaden 研究中心的谢尔比（Robert M.Shelby）、MIT 的夏皮洛（I.Shapiro）等人利用不同的方法也得到了光场的压缩态。

压缩光是非经典光，它的量子特性对于揭示场的物理本质有着重要的价值。压缩态光场又是通过非线性过程由相干光场产生的，对它的研究可使量子光学与非线性光学实现交叉。

由于压缩光具有比一般标准量子噪音低的起伏，使得大幅提高信噪比成为可能，有望在引力波之类的微弱信号检测、光通信及原子、分子物理学等方面得到广泛应用。光场压缩态的研究已成为现代光学中的一个重要前沿课题。

### 11.8.3 腔量子电动力学

在 1946 年以前，人们普遍认为，原子的自发辐射是原子的一种固有特性，是不能改变的。1946 年，帕塞尔（E.M，Purcell）[[3]](#footnote-3)首次发现，如果把原子置于腔内，在一定条件下原子的自发辐射率较之处于自由空间中的自发辐射会发生变化，证明自发辐射不是孤立原子的行为，而是原子与真空相互作用的结果。1963 年，加尼斯（E.T.Jaynes）和孔明斯（F.W.Cummings）建立了 J – C 模型，很好地说明了原子在腔内的量子行为。这以后，一系列与腔有关的现象相继被发现。其中有慕尼黑大学伦姆佩（G.Rempe）和他的合作者 1987 年在单原子微波激射器中观察到量子坍塌和复苏现象；1987 年杰赫（W.Jhe）等将研究拓展到了光频范围，观察到了腔诱变频率漂移；1990 年伦姆佩等人又在微型微波激射器中观察到了亚泊松光子统计；1991 年加州理工学院的汤普森（R.J.Thompson）等人观察到了单原子的真空拉比分裂；1995 年法国高等师范学校的布朗尼（M.Brune）小组在用实验检验腔中场的量子化时，发现了非线性量子特性。一门被称为腔量子电动力学（C-QED）的研究学科逐步建立并发展起来。它主要是研究原子与光子在小型谐振腔中的相互作用。起初目标集中在里德伯原子与毫米波的相互作用。随着技术的进步，特别是 20 世纪 90 年代冷原子技术和光电测试技术的发展，高品质微腔和原子冷却与俘获的结合使单原子和单光子作用的 J – C 模型可以得到很好的实验检验。单原子和单光子之间的耦合在 1992 年以后进入所谓强相互作用，由原子、光场和腔组成的系统成了具有重要潜在应用的量子装置，不仅可以用于探索量子物理世界某些非经典行为的重要工具，例如薛定谔猫态、量子测量，而且在量子计算、量子态的制备以及量子通信等领域都具有重要价值。

1. Hanbury-Brown R，Twiss R Q.Nature（London），1956（178）：1046 [↑](#footnote-ref-1)
2. Slusher R E，et al.Phys.Rev.A1985（31）：3512 ~ 3515 [↑](#footnote-ref-2)
3. Purcell E M.Phys.Rev，1946，69：681 [↑](#footnote-ref-3)