

观察玻色—爱因斯坦凝聚体的晶化

对于一团密集的处于激发态的二能级原子气体, Robert Dicke 在 1954 年预言了一个非凡的现象——超辐射^[1]: 当每个原子独立地自发辐射光子时, 这团原子是一个非相干辐射源的聚集体; 但在特定的条件下, 原子可以通过它们所辐射的光子而相干地相互作用, 从而自发地和集体地辐射出相干的并且高度偏振的光。

1999 年, 麻省理工学院的 Wolfgang Ketterle 等人首先在玻色—爱因斯坦凝聚体中观察到了散射光子的超辐射脉冲^[2]。当一束激光照射一个凝聚体时, 光子可以被其中的原子散射, 而原子则获得了一个反冲动量。由于光速比原子的反冲速度大了约 10 个数量级, 被反冲的原子在它们所散射的光子已经离开凝聚体后还长期处于凝聚体中。这些运动的原子和凝聚体中静止的原子相互干涉, 形成了一个可以增强特定方向光散射的物质波的光栅, 从而实现了超辐射。这里, Dicke 原先所设想的辐射衰变被双光子散射过程所取代。

Ketterle 等人之所以在实验中采用玻色—爱因斯坦凝聚体是由于它具有很长的相干时间, 从而可以在极高的精度下监测它的由光场所诱导的集体运动。事实上, 玻色—爱因斯坦凝聚体现在已逐渐成为探索多体物理的一种全新的工具。另外, 这个实验中所观察到的超辐射是以瞬态脉冲的形式出现的。但当原子和光子之间的相互作用足够强时, 有可能实现一个稳定的超辐射相。

最近, 苏黎世联邦理工学院的 Tilman Esslinger 和他的同事, 通过把玻色—爱因斯坦凝聚体放置在光学腔中, 观察到了稳定的超辐射相^[3]。这里光学腔扮演了一个重要的角色, 它可以反复反射进入其中的光, 使它多次通过凝聚体, 从而增强了原子和光场之间的相互作用。

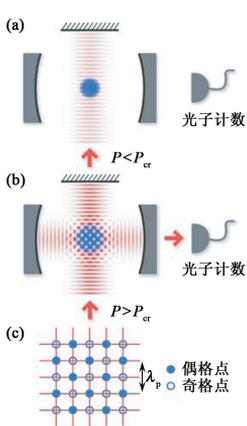


图 1 放置在光学腔中的一个玻色—爱因斯坦凝聚体, 被一束由激光形成的垂直于腔轴的驻波场抽运。(a) 当抽运功率 P 低于某个临界值 P_{cr} 时, 并且在沿腔轴方向原子具有均匀的密度分布的情况下, 腔场的相干增强效应被独立光散射事件间的相消干涉所压制; (b) 当 P 超过 P_{cr} 时, 原子相干地把抽运光散射到腔中发生超辐射。超辐射光和抽运光干涉, 进而形成类似国际象棋棋盘的正方形光学晶格。为使这种合作散射最大化, 凝聚体中的原子将只占据正方形光学晶格的偶格点或奇格点。对不同格点的选择是由破坏原子密度对称性的量子涨落所触发的; (c) 棋盘的横线和竖线表示光强度的最大值, 其中 λ_p 表示抽运光的波长

他们首先把一团包含 10 万个左右铷原子的凝聚体囚禁在具有高反射率的光学共振腔中, 然后用一束由激光形成的垂直于腔轴的驻波场抽运(如图 1 所示)。当抽运激光的功率低于某一临界值时, 原子的密度分布在腔轴方向上是均匀的。但当抽运激光的功率超过这个临界值时, 被原子散射 90° 的抽运光进入共振腔, 形成一个超辐射光的驻波, 这个驻波场的位相和原子的位置有关。抽运光和超辐射光之间的干涉又诱导出一个类似国际象棋棋盘的长方形光晶格势阱。在晶格上的激光场和腔场之间的相对光学位相被限制在相差 π 的两个值上。倾向于其中某一光学位相的微小量子涨落, 比如在腔场中或凝聚体密度上的量子涨落, 就可以瞬时地使原子只聚集在光学晶格的偶格点(国际象棋棋盘上的“黑格”)或是奇格点(“白格”)上。这个体系的相变就表现为凝聚体密度分布的突然改变: 从均匀的超流体变为长程序具有自组织特性的晶体态。由于玻色—爱因斯坦凝聚体的温度几乎为零, 其中的热涨落可以忽略不计。因此, Esslinger 指出, 这种自组织现象的出现可以被归结为一种量子相变。

在实验中, 对有序相的观察是通过监测从光学腔中泄露出来的光子数实现的: 只要功率低于某个阈值, 腔外探测不到光子; 但在这个阈值之上, 光子的数目会突然增加。因此, 光学腔的输出也揭示了时间分辨的信息。探测系统在接近相变点时的动力学行为将是一个具有挑战性的实验。

在通常的凝聚态物理实验中, 原子间的相互作用是短程的。而在光学腔中, 以超辐射光场为媒介, 每一个原子都可以感受到其他原子的存在。这使得原子间的相互作用是真正长程的。因此, 对光学腔中的玻色—爱因斯坦凝聚体的研究代表了对大多数凝聚态物理实验的一种偏离。

多体量子电动力学实验还给相变问题的研究提供一个新的视角。和传统的相变模型一样, Dicke 所考虑的体系是一个处于平衡态的封闭系统。在 Esslinger 的实验中, 尽管玻色—爱因斯坦凝聚体保持在一个稳定的基态上, 但由于外部驱动和耗散, 整个实验系统是开放的, 这和 Dicke 所考虑的系统相去甚远。Esslinger 的实验的重要意义在于他的哈密顿量定量地捕捉到 Dicke 模型的物理本质。

参考文献

- [1] Dicke R H. Phys. Rev., 1954, 93: 99
- [2] Inouye S. Science, 1999, 285: 571
- [3] Baumann K et al. Nature, 2010, 464: 1301

(中国科学院理论物理研究所 易俗 编译自 Physics Today, 2010, (7): 16)