

藏在暗原子云中的光

(北京大学 王树峰 编译自 Ana Asenjo-Garcia. *Physics*, May 10, 2021)

集体效应减缓了致密原子云中受激原子的衰减，研究者可以制备并操纵这一亚辐射态。

坠落与升起相伴而行。当原子处于激发态，“坠落”意味着通过自发辐射光子而衰减。这种由真空涨落触发的辐射构成了不可避免的能量耗散，但可以通过集体效应将其减缓：如果原子间距小于光波波长时，辐射可能会变“暗”，即相互阻止衰减到基态。

人们曾在稀疏的原子系综中观察到过这种被称为亚辐射的现象。它由光子介导的原子间偶极—偶极相互作用导致。罗伯特·迪克(Robert Dicke)在1954年提出了著名的超辐射现象：原子在超辐射状态下发射的光子干涉相长，增强了整体辐射。与之相对的亚辐射则是干涉相消，导致原子系综的辐射被抑制。到目前为止，大多数研究都集中在晶格常数小的有序体系上，尽管取得了诸如亚辐射二维原子镜之类的令人瞩目的进展，但实现具

有小的粒子间距的有序阵列仍然充满了挑战。

法国帕莱索光学研究所的Giovanni Ferioli等通过光镊陷阱约束高密度的、无序的铷原子云，获得了较小的粒子间距。铷原子云辐射光激发主要耦合到快速衰减的超辐射态，亚辐射态的激发则非常微弱，但由于亚辐射态的寿命长，因此在衰减后期主导了辐射。研究人员证明这种亚辐射的演变完全取决于云中原子的数量：随着原子数量的增加，辐射的寿命也会增加。这种在稀疏系统中没有的特性是对高密度区理论预测的重要证明。

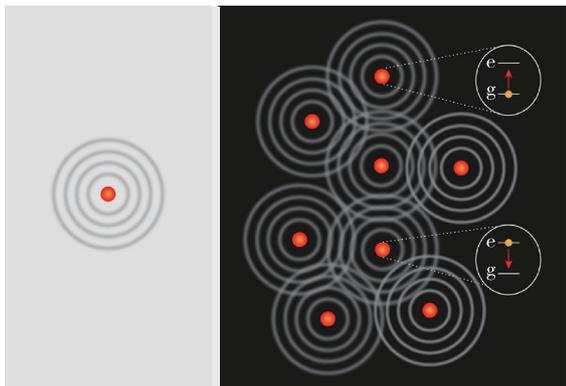
该团队还探索了“多体”亚辐射态，即原子之间共享多个激发。他们通过增加入射光的强度产生多个超辐射激发，这些激发通过光子发射随机“级联”到基态。但如果遇到长寿命暗态，它可能会被“阻塞”，形成多体暗态。研究首次证实了它们是由单激发态的叠加“构建”而来的理论预测。尽管预测是针对有序阵列，但这个结果表明它对无序云也有效。

如果可以随意控制亚辐射激发，暗态就会非常有用。研究人员通过光镊陷阱引起的交流斯塔克位移获得位置相关的失

谐。这种失谐会破坏原子共振并使原子脱离黑暗状态，从而导致辐射突然爆发。这种实时控制原子集体光学响应的能力无论是对提高量子信息协议的保真度，还是对研究开放量子系统中的失衡多体物理学，都具有重要的意义。

接下来还有很多的探险等待着实验和理论学家。例如100%效率的单个亚辐射态激发，以及选择性制备具有特定寿命和空间分布的态都将是里程碑。Ferioli及其他小组是通过“等待”系统衰减到亚辐射态，这种方法意味着效率损失，因为大部分能量(和信息)在系统达到目标状态时已经丢失。在无序系综中人们可能无法克服这一损失，但是在有序阵列中可能容易实现，因此有序阵列作为高效的光与物质相互作用体系吸引了很多关注。

还有许多问题需要从理论上解释。超越Dicke的开创性工作并理解多体系统中的超辐射、亚辐射和相关衰减几十年来一直是悬而未决的问题。大多数理论研究都集中在较容易解决的少数原子被激发的系统上。推动这一前沿将需要一个新的框架应对指数增长的复杂性。潜在的回报是值得的：了解这种非平衡动态可能导致的具有长寿命的高度纠缠态的确定性制备，可用于计量或计算。此外，集体衰减会在发射光子中留下相关性，这可能会导致光的非经典状态，有助于表征和控制这个多体系统。



左图：处于激发态的原子最终不可避免地衰减到基态，并释放出一个光子；右图：一群间距小于跃迁波长的激发态原子发射的光子干涉相消，从而阻止从激发态到基态的集体跃迁