
芝诺阶段内的自发辐射集体效应

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/25054.html>

本文仅供学习交流之用，版权归原作者所有，请勿用于商业用途！

芝诺阶段内的自发辐射集体效应。自发辐射是最为常见的量子现象。你我所见之光，大多都可溯于某原子、分子或其他处于激发态的量子系统的自发辐射。这一现象也是最初等的量子场论现象，无法在经典的电磁场理论中获得解释。1916年，Einstein最早预言了这一现象，并唯象地计算了自发辐射的速率，即广泛见于原子物理课本中的A系数；1926年，Dirac从微观理论上得出了Einstein的结果，其理论也是后来量子电动力学的雏形。这些关于速率的计算也将指数衰减的图像深植人心。

从上世纪五十年代起，自发辐射的研究对象便从单个原子拓宽至多原子系统。1953年，Dicke研究发现，如果N个原子以极短的间距分布，那么系统总体的辐射速率不是简单的放大N倍，而是依量子态而定，最高可正比于 N^2 ，即超辐射(superradiance)现象，最低则甚至可为零。这种集体效应可以从简单的干涉原理理解：诸原子同处于一个电磁场中，其辐射场必定相互干涉，而干涉会产生增强或相消的结果。

这种集体效应，正如海洋中沙丁鱼群整齐划一的规避动作，亦或鸟群整体形态的自由变换，总是令人在惊叹之余，也好奇背后的机理。但是自Dicke起，对光与物质相互作用中的集体效应的研究大多承袭上述类比干涉的物理图像，在Markov近似下忽略电磁波在原子间传播的时间延迟，虽然能直接计算出上述干涉的结果，却无法回答原子系统如何彼此协调并达成集体行为的细节。而如果将延迟效应纳入理论，则会得到这样的物理图像：每个原子先是独立的指数衰减，并在收到其他原子发出的虚光子时改变自己的行为，并逐步达成一致。

然而，在对一维原子链和一维光波导的相互作用(waveguide QED)的研究中，中国科学院物理研究所/北京凝聚态物理国家研究中心量子计算研究中心的张玉祥特聘研究员在最近的研究中发现，这样以延迟效应为核心的物理图像也并非全貌。

其实，对任何准稳态的衰变而言，指数衰减都不是严格成立。在上世纪五十年代，人们便已经认识到，指数衰减并不兼容于诸如uncertainty principle等量子力学基本原理。特别的，在自发辐射的早期，这一点可经简单的分析得出：由原子和量子化的电磁场组成的总系统必然遵从Schrödinger方程，按一个含时幺正矩阵所确定的方式演化。那么，在距初始时刻极短的范围内对时间变量做Taylor展开，即可发现衰减率是动态变化的。它将从零开始，最初以 t^2 的形式增长，并在一个有限的时间内形成Einstein、Dirac等人计算的自发辐射速率。不妨将这一阶段称之为芝诺阶段，其得名于著名的量子芝诺效应：趁此衰减较慢之时，若对原子频繁施以测量，则可将之维持在激发态上。若用开放系统的习惯，将电磁场视为环境，那么在芝诺阶段内，

环境的记忆效应非常显著，原子的演化不能由 Markov 过程所描述。

张玉祥特聘研究员在研究中发现，在波导量子电动力学的两种常见理论模型中，芝诺阶段的时长都将超过共振光本身的周期。这也意味着，如果原子间的间距小于共振波长，那么在单个原子还没有进入指数衰减阶段的时候，近邻原子就已经完成了虚光子的交换，从而形成部分的集体行为。换言之，在这一系统中，单个原子芝诺阶段内显著的非马尔科夫效应不仅会塑造单个原子的指数衰减，也会影响到集体行为的形成。尽管芝诺阶段的非指数行为和原子系综的集体行为已经有近七十年的研究历史，这一机制此前并没有得到充分揭示。另外，计算表明，和单个原子向波导的自发辐射相比，集体辐射可以为芝诺阶段的非马尔科夫动力学提供对比度更高的观测信号。这一研究结果近期发表于 *Physical Review Letters* 131, 193603 (2023)。

这项研究得到了中国科学院稳定支持基础研究领域青年团队计划 (YSBR-100)、国家自然科学基金委 (12375024)、科技创新 2030—量子通信与量子计算机重大项目 (No. 2-6)，和中国科学院物理研究所启动资金的支持。（来源：中国科学院物理研究所）

图 1(a) 原子和光波导耦合时，芝诺阶段内的非马尔科夫过程（红色线）与原子之间交换虚光子、形成集体效应的过程（蓝色虚线）同时发生，相互影响。(b,c) 单个原子和波导相互作用的芝诺阶段中，自发辐射速率随时间变化的曲线（实线、虚线分属不同的耦合模型）。

相关论文信息：<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.131.193603>

作者：张玉祥 来源：《物理评论快报》

更多 科学进展 请访问 <https://www.iikx.com/news/progress/>

本文版权归原作者所有，请勿用于商业用途，[爱科学iikx.com](https://www.iikx.com)转发