

---

# 量子涨落定理——开启未来能源的密钥

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/28890.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！*

量子涨落定理——开启未来能源的密钥。想象一下，如果你手中的手机能在不充电的情况下，仅靠周围环境中的微小能量波动就能永远保持满电状态，这听起来是不是像科幻电影中的情节？

近日，兰州大学教授安钧鸿与吴威团队，携手在量子热力学的神秘领域里取得了重要研究进展，他们的研究成果不仅挑战了传统认知的边界，更为量子热机的未来设计开起来无限可能。相关研究成果发表于《Physical Review Letters》。

量子热力学：能源科学的新引擎

量子热力学为新的产业革命提供原始创新驱动力，是量子科技的重要组成部分。兰州大学教授安钧鸿告诉《中国科学报》。

在最近二十年，随着量子科技的蓬勃发展，物理学家将十九世纪根据实验观测与规律总结建立起来的热力学定律推广到有限自由度的微观小系统，提出了一系列问题。

传统热力学定律在量子力学与远离热平衡情况下是否还成立？

在传统热力学中，温度、熵、热与功等概念在量子力学框架下是否需要修改与拓展？

这些问题促使物理学家们重新审视并重构热力学的理论框架。量子热力学不仅关注微观系统的能量转换与热交换，还试图通过量子力学原理揭示能量、信息与熵之间的深层次关系。

在传统热力学的框架内，热机的能量转换效率受制于卡诺极限，这是由热力学第二定律所保证的，无法通过经典调控手段来突破这一极限。这一极限也制约了当今社会各类热机（如空调、冰箱、汽车等）的能量转化效率。安钧鸿说。

但在量子热力学框架内，利用一些量子资源，譬如，量子压缩或量子相干性，人们可以突破卡诺极限的限制，设计出性能优于经典热机的量子热机，从而变革性地提高能量转化与使用效率。

因此，在人类对能源需求日益增长的当下，量子热力学对能源科学重要性不言而喻。

量子跃迁：解锁无线充电的量子电池

作为长期在量子科技做基础研究的安钧鸿团队，不断追寻那些能够颠覆传统认知的量子效应一直

---

是团队成员的目标。

在前期工作中，安钧鸿团队将新奇的量子效应与量子调控手段运用到包括磁力计、光学陀螺仪和低温温度计等精密测量方案、以及作为雷达基础的高分辨率量子探照的研究中，并取得了一系列重要成果。

在量子计算、通讯与精密测量的热潮中，我们意识到，量子效应不仅能够重塑信息的存储、运算与提取，更有可能在能量的领域引发一场革命。安钧鸿说。

就在2024年年初，安钧鸿团队在量子热力学方面取得了一项重要的研究成果——提出了无线充电的抗老化量子电池方案，解决了传统量子电池普遍存在的充电低效与能量损耗问题。该研究受到国内外科技媒体的广泛关注，《Nature》杂志将其作为研究亮点进行了题为A better way to charge a quantum battery的报道。

安钧鸿表示，和依赖锂等材料储存电荷的传统化学电池不同，量子电池利用微观系统的量子能级存储能量，既不会闪爆，也不会污染环境；尤其地，得益于量子纠缠，其充电速度超越了传统电池与电池芯片数的线性规律，呈现超线性的快速特性。审慎乐观地预测，未来一旦研发出量子电池，光伏的光电转换效率将得到显著提高。

然而，这仅仅是个开始。

在量子电池无线充电的成功背后，团队发现了更加深邃的科学奥秘——量子电池与充电器之间的能量传输所表现出的丰富的非平衡特性具有普适性。

这会深刻地影响包括功与热在内的能量交换，从而改写传统量子热力学中建立在系统-环境弱耦合基础上的量子热的涨落定理。因此，在这一研究工作的启发下，我们顺势进入量子热力学的涨落定理这一研究领域，并取得了重要的进展。安钧鸿说。

**广义量子涨落定理：突破传统框架**

在量子热力学中，远离平衡态的能量、信息及熵等因热涨落、量子涨落与非平衡弛豫影响而随机变化，需通过概率分布描述。研究发现，这些非平衡态热力学量的统计规律与平衡态物理量间存在恒等式，即量子涨落定理，它桥接了非平衡态的随机性与平衡态的确定性，是量子热力学发展的重要里程碑。

通过大量计算与分析，安钧鸿与吴威团队认识到，传统量子热的涨落定理失效的根源在于系统-环境强耦合破坏了系统非平衡过程的细致平衡条件。细致平衡条件是指在趋向平衡的过程中，系统从一个微观状态演化到另一个微观状态的概率与其逆向演化的比值由环境的温度唯一决定的物理性质。

接下来，团队证明传统量子热的涨落定理在量子强耦合下不再适用，并明确了理论边界。

然而，真正的挑战在于第二点：如何修补之前的漏洞，构建一个在所有参数空间内都能稳固站立的广义涨落定理。

这要求我们不仅要理解量子系统与外部环境间复杂而微妙的相互作用，还要具备创新思维，以超

越传统框架的方式重构热力学的基本原理。

经过无数次的讨论与尝试，团队最终提出了一种创新性的解决方案——通过引入有效温度的概念，巧妙地恢复了量子系统在非平衡态下的细致平衡条件。安钧鸿介绍到，这一概念的引入，如同为量子热力学的复杂迷宫点亮了一盏明灯，使我们能够清晰地看到通往广义涨落定理的道路。

这一研究方法提供了一个探索强耦合量子系统中能量交换规律的标准研究范式，可以推广到其他系统，也可以用于探索其他热力学量的量子涨落定理。提出的广义涨落定理提供了一项量子热的全面研究，深化了量子热力学的研究范畴，重塑了人们对强耦合系统中量子热涨落特性的理解。

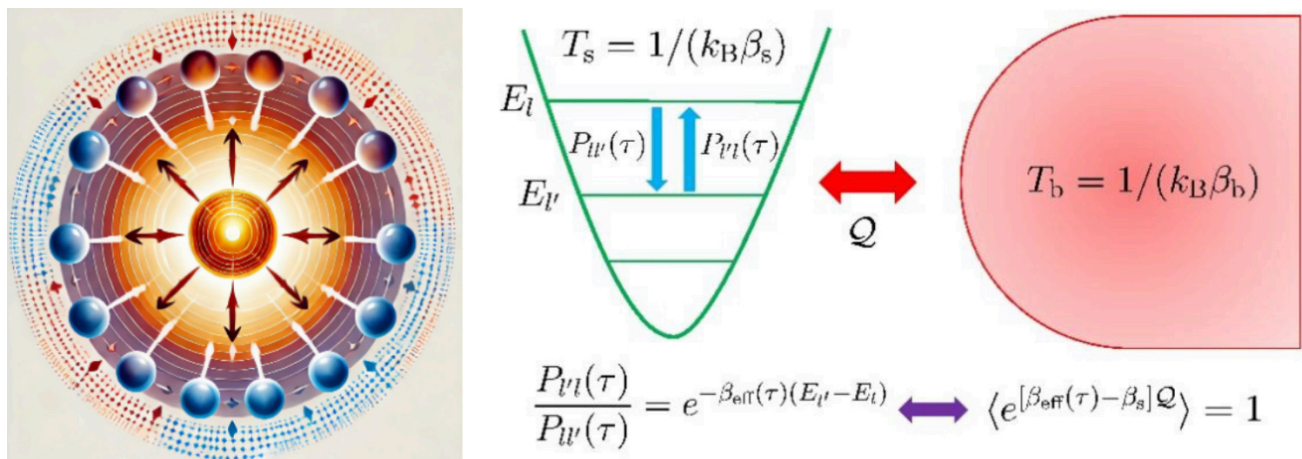
这也为团队下一步探索非平衡量子热机提供了一个非常有效的调控机制：通过优化耦合强度，提升热交换效率。

在热机循环中，传统热力学限制了能量传输的调控，而广义量子涨落定理揭示了其独特的非平衡能量交换特性，能够精准控制能量传输，有望超越传统热机效率。这一发现也为非平衡热力学定律的建立提供了新思路。

在传统热力学框架内，吸、放热过程的能量传输取决于两个热库的温差，是不可调控的。

安钧鸿解释，在量子热力学框架下，我们通过广义量子涨落定理，能精细调控这些非平衡特性，实现对能量传输的精准控制，突破传统热机的性能限制。此定理不仅为构建高效非平衡量子热机提供了有效的调控策略，有望引领量子能源技术的潜在革新。（来源：中国科学报 叶满山）

相关论文链接：<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.133.050401>



左图：量子系统与环境耦合示意图；右图：量子系统与环境能量交换的广义量子涨落定理。兰州大学供图。

作者：安钧鸿等 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](http://www.iikx.com)转发