
中国“天元”量子模拟器率先取得量子计算第二阶段重要进展

作者：writer 来源：中国科学院

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/28111.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！

中国“天元”量子模拟器率先取得量子计算第二阶段重要进展。

中国科学技术大学潘建伟、陈宇翱、姚星灿、邓友金等成功构建了求解费米子哈伯德模型的超冷原子量子模拟器“天元”，以超越经典计算机的模拟能力首次验证了该体系中的反铁磁相变，朝着获得费米子哈伯德模型的低温相图、理解量子磁性在高温超导机理中的作用迈出了重要的第一步。7月10日，相关研究成果在线发表在《自然》（Nature）上。

由于较高科学价值和潜在的经济效益，以高温超导为代表的强关联量子材料将推动未来科技的发展。然而，这些新型量子材料背后的物理机制尚不明确，难以实现有效可控的规模化制备和应用。费米子哈伯德模型是晶格中电子运动规律的最简化模型，被认为是可能描述高温超导材料的代表性模型之一，但研究面临着挑战：一方面，该模型在二维和三维下没有严格解析解；另一方面，计算复杂度非常高，即使是超级计算机也无法进行有效的数值模拟。

量子计算为求解若干经典计算机难以胜任的计算难题提供了全新方案。国际学术界为量子计算的发展设定了三个阶段。一是对特定问题的计算能力超越经典超级计算机，实现“量子计算优越性”。随着美国谷歌公司“悬铃木”以及中国科大“九章”系列、“祖冲之号”系列量子计算原型机的实现，这一阶段的目标已达到。二是实现专用量子模拟机以求解诸如费米子哈伯德模型这一类重要科学问题，这是当前的主要研究目标。三是在量子纠错的辅助下实现通用容错量子计算机。值得注意的是，理论研究表明，即使采用通用量子计算机也难以准确求解费米子哈伯德模型。因此，构建可以求解该模型的量子模拟机，不仅是探究高温超导机理的有效途径，而且是量子计算研究的重大突破。

对于整个设想中的费米子哈伯德模型低温相图，理论上仅能够明确无掺杂（即每个格点填充一个电子，又称半满）条件下系统的低温状态是反铁磁态。然而，由于系统的复杂性，不仅反铁磁态从未得以实验验证，而且掺杂条件下的系统状态已无法通过经典超级计算机进行准确数值模拟。因此，构建量子模拟器验证包括掺杂条件下的反铁磁相变，是实现能够求解费米子哈伯德模型的专用量子模拟机的第一步，也是获得该模型低温相图的重要基础。

光晶格中的超冷原子具有系统纯净、原子间相互作用强度、隧穿速率及掺杂浓度可精确调控等优势，是最有希望构建专用量子模拟机以求解费米子哈伯德模型的体系之一。为了验证反铁磁相变

，超冷原子量子模拟器必须满足两个关键条件：首先，需要建立空间强度分布均匀的光晶格系统，确保费米子哈伯德模型的参数在大尺度上保持一致；其次，系统温度必须显著低于奈尔温度（即反铁磁相变温度），这样反铁磁相才可能出现。然而，以往实验中光晶格强度的非均匀性和费米原子制冷存在的困难，使得上述两个关键条件无法得到满足。因此，反铁磁相变一直无法实现。

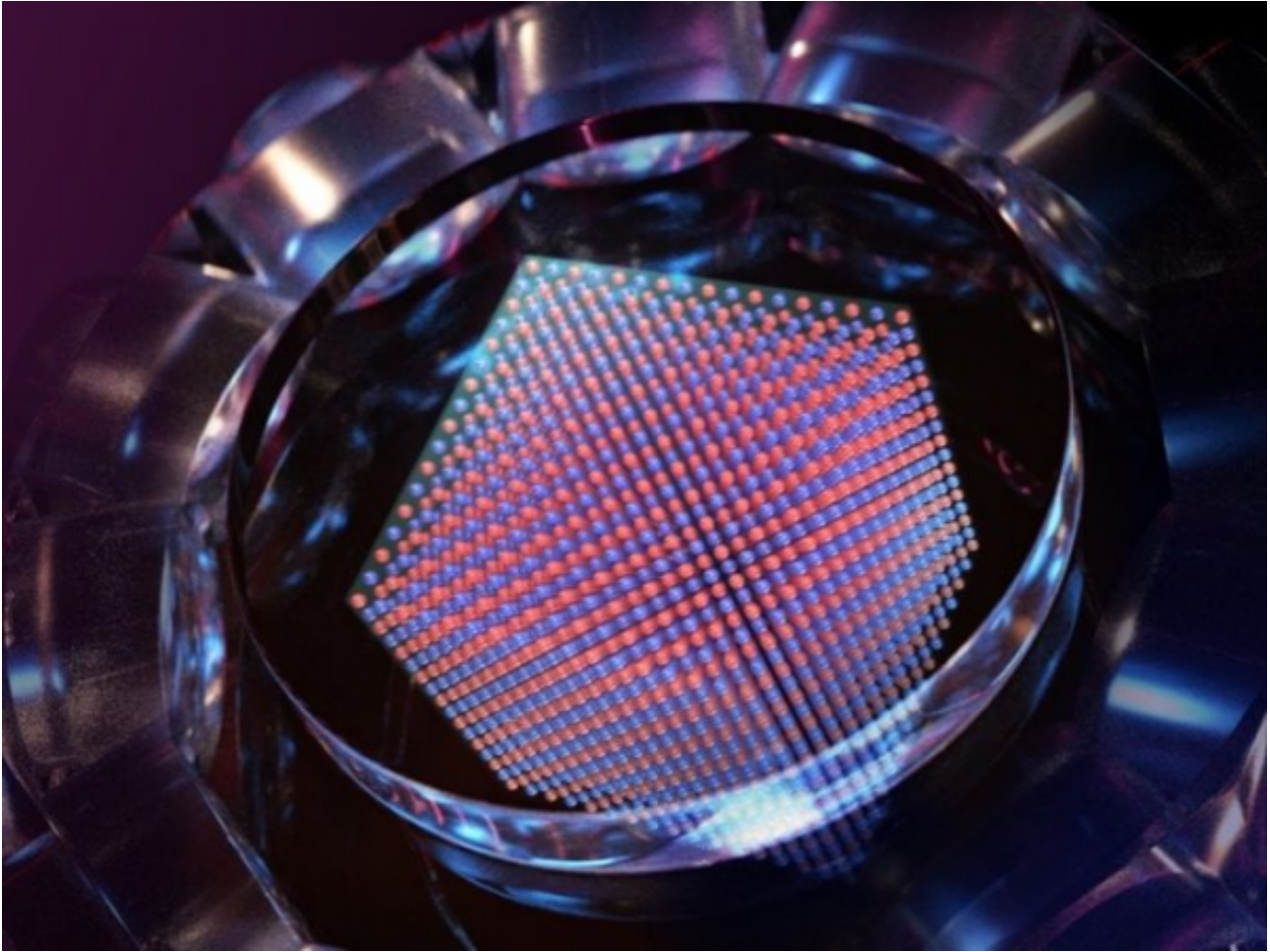
为了解决这些难题，该团队在前期实现盒型光势阱中的均匀费米超流的基础上，进一步降低了盒型光势阱的强度噪声，并结合机器学习优化技术实现了最低温度的均匀费米简并气体制备，满足了实现反铁磁相变所需要的低温。进一步，该团队创造性地将盒型光势阱和平顶光晶格技术相结合，实现了空间均匀的费米子哈伯德体系的绝热制备。该体系包含大约80万个格点，比目前主流实验的几十个格点规模提高了约4个数量级，且体系具有一致的哈密顿量参数，温度显著低于奈尔温度。在此基础上，该团队通过精确调控相互作用强度、温度和掺杂浓度，直接观察到反铁磁相变的确凿证据——自旋结构因子在相变点附近呈现幂律的临界发散现象，从而首次验证了费米子哈伯德模型包括掺杂条件下的反铁磁相变。

该工作推进了科学家对费米子哈伯德模型的理解，为进一步求解该模型、获取其低温相图奠定了基础，首次展现了量子模拟在解决经典计算机无法胜任的重要科学问题上的巨大优势。《自然》杂志审稿人对这一成果给予了高度评价，称该工作“有望成为现代科技的里程碑和重大突破”，“标志着该领域向前迈出了重要的一步”，“是实验的杰作，是期待已久的成就”。

研究工作得到国家自然科学基金委员会、科学技术部、中国科学院、上海市、安徽省等的支持。

[论文链接](#)

动画：量子模拟实验过程示意



“天元”量子模拟器示意。红色和蓝色的小球分别代表自旋相反的原子，在三维空间交错排列，形成反铁磁晶体。原子被光晶格囚禁在玻璃真空腔中。

研究团队单位：中国科学技术大学

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