

物理所发现几何阻挫导致的量子电偶极液态

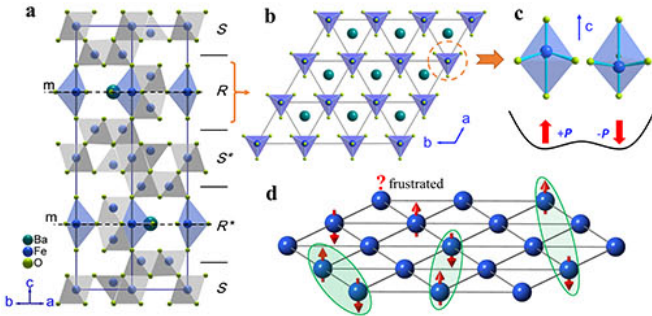


图1 BaFe₁₂O₁₉的晶体结构和电偶极的几何阻挫。

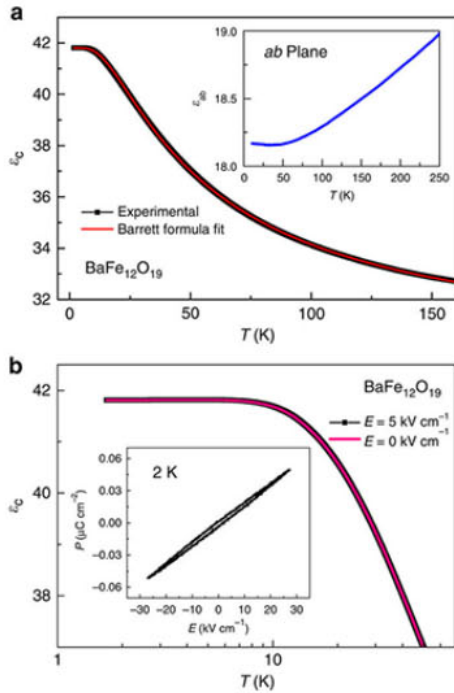


图2 BaFe₁₂O₁₉的低温介电行为。

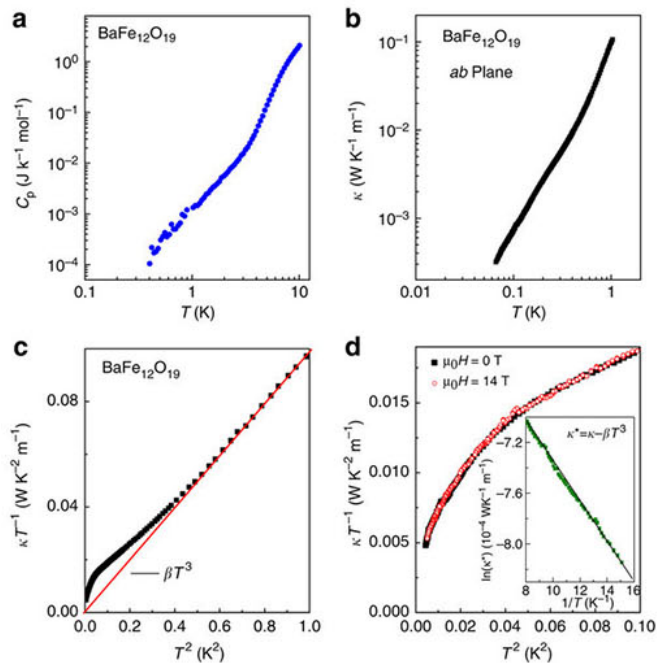


图3 BaFe₁₂O₁₉的低温比热和热导率。

阻挫 (frustration)，或称挫折，在自然界和人类社会中普遍存在，并在一定程度上使世界变得丰富多彩。物理学中的几何阻挫是指，在某些特定几何结构上的物理系统，无法同时满足所有的竞争相互作用，使得系统具有大量简并的能态。在温度趋近于绝对零度时，经典的热力学涨落已被完全抑制，而量子涨落开始占据主导地位。此时，量子力学原理和几何阻挫的结合可以在固体中产生一些奇异的量子液态。

1973年，P. W. Anderson (1977年诺贝尔物理学奖获得者) 首先在理论上指出，在三角晶格上反铁磁相互作用的阻挫自旋系统可以存在量子自旋液态 (quantum spin liquid)。在此后的几十年中，量子自旋液态吸引了广泛的理论研究，由此发展出了各种理论模型和计算方法，预言了许多新奇的物理性质和物理效应。与此同时，实验物理学家也在努力寻找和探测量子自旋液态。然而，迄今为止，人们仅发现了少数几种可能存在量子自旋液态的候选材料。近期，中国科学院物理研究所/北京凝聚态物理国家实验室(筹)研究员孙阳和杨义峰拓展了固体中量子液态的范畴，提出在同时具有几何阻挫和强烈量子涨落的电介质中，可以存在一种新的量子液态——量子电偶极液态 (quantum electric-dipole liquid)。同时，孙阳与合作者通过一系列实验，在一种真实材料 ($\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$) 中发现了可能存在量子电偶极液态的证据。

电介质中的量子涨落效应最初由K. A. Müller (1987年诺贝尔物理学奖获得者) 等在1970年代研究 SrTiO_3 低温下的反常介电行为时发现。他们认为，量子涨落使该体系的电偶极在趋近绝对零度时也无法形成长程有序，并由此提出了量子顺电体 (quantum paraelectric) 的概念。此后，人们陆续在一些钙钛矿氧化物中发现了类似的量子顺电体。2014年，研究员孙阳、副研究员柴一晟和博士生申世鹏等发现了一个全新的量子顺电体家族：六角铁氧体($\text{Ba,Sr Fe}_{12}\text{O}_{19}$)。

这类六角铁氧体具有层状的晶体结构，其中的电偶极来源于 FeO_5 双金字塔单元中 Fe^{3+} 离子偏离中心对称的一个微小位移。由于量子涨落效应，这些微弱的电偶极在极低温下依然无法形成长程有序，表现出量子顺电行为。在传统氧化物铁电体中，电偶极的起源通常满足所谓的d0法则，即只有d轨道为空的非磁性离子才能产生位移型电极化。 FeO_5 双金字塔中的电偶极机制打破了d0法则的限制，表明由磁性离子的位移可以直接产生电极化。相关研究结果发表于Phys. Rev. B 90, 180404(R) (2014)。

在此工作基础上，孙阳等发现 $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ 中的 FeO_5 双金字塔单元恰好形成一个二维的三角晶格，由此产生了一个三角格子的电偶极系统。同时，理论计算与实验测量表明相邻电偶极之间具有反铁电相互作用。正如三角格子上的反铁磁体存在自旋阻挫，三角格子上的反铁电体也同样面临着阻挫。因此， $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ 是一个非常特殊的电介质，同时具有几何阻挫和强烈的量子涨落，两者的共同作用可能会导致电偶极的量子液态。为了检验量子电偶极液态的存在，孙阳研究组与中国科学技术大学孙学峰研究组开展合作，精确测量了极低温下(最低到66 mK) $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ 单晶的热导率和比热行为。实验发现，除了常规的声子热导外，在650mK以下还存在额外的低能元激发对热导率的贡献。在低温极限下，这种额外元激发的热导率与以往报道的量子自旋液态的热导行为类似，具有一个很小的能隙。由于 $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$

O_{19} 中这种流动性的低能元激发很可能就对应于一种量子电偶极液态。

需要指出的是，虽然量子电偶极液态与量子自旋液态一样，由大量具有远程量子纠缠的量子二聚体 (quantum dimer) 组成，但是两者可能具有显著不同的特征和相图。这是因为自旋之间的相互作用和电偶极之间的相互作用具有非常不同的物理属性，因此，现有的关于量子自旋液态的众多理论模型与理论预言并不能直接应用到量子电偶极液态，需要发展新的理论模型和研究方法。量子电偶极液态不仅可能蕴含着丰富的基础物理，也有望未来在量子信息与量子计算领域得到应用。可以预期，对量子电偶极液态的理论研究与实验探索将开辟一个新的研究领域。

以上研究成果发表于Nature Communications 7, 10569

(2016)。该工作获得了国家自然科学基金、科技部和中国科学院项目的支持。

原文地址：<http://www.china-nengyuan.com/tech/89768.html>