

中国科学院物理研究所 HX02组供稿
北京凝聚态物理国家研究中心

第97期

2021年12月28日

K₂Cr₃As₃中发现自旋三重态超导

在常规BCS超导体中，电子配对成库伯对的媒介是电声子相互作用，超导态具有对称的轨道波函数（s波）和反对称的自旋波函数（自旋单态， $S=0$ ）。在铜氧化物高温超导体中，库伯对也处于自旋单态，但轨道波函数具有d波对称性。除了自旋单态，电子对还可以以自旋三重态的方式配对（ $S=1$ ），这种情况下就要求轨道波函数具有反对称的形式，如p波，f波等。第一个自旋三重态配对的例子是超流³He，其库珀对处于自旋三重态（ $S=1$ ），轨道波函数是p波。³He中的自旋三重态超流是由铁磁涨落引起的。最近的研究发现³He超流相是拓扑非平凡的。对于自旋三重态超导体，如果破坏时间反演对称性，就可以形成拓扑超导，有可能为拓扑量子计算提供基础，在未来的信息处理上有实用价值。长期以来，人们一直试图在关联电子系统中寻找本征的自旋三重态超导体，然而，到目前为止仅有几种候选材料，并且它们在实验和理论上仍然存在一些问题。

A₂Cr₃As₃（A为碱金属元素）是近年来新发现的一种强关联电子材料，诸多实验和理论表明这是一个非常规超导体。中国科学院物理研究所/北京凝聚态物理国家研究中心HX02组杨杰副研究员等人在过去的研究中，利用核磁共振实验（NMR）发现A₂Cr₃As₃和³He中的超流态A相有很多相似之处，如超导能隙具有点状的节点，并且正常态存在强烈的铁磁性自旋涨落。因此，这是一个有望实现自旋三重态p波超导的体系（*Physical Review Letters* 115, 147002 (2015)）。之后，与组内博士生罗军等人一起又发现通过改变碱金属原子A，可对A₂Cr₃As₃的铁磁涨落和超导进行调控，系统的超导态处于铁磁量子临界点附近（*Physical Review Letters* 123, 047001 (2019)）。

最近，杨杰副研究员、罗军博士后、郑国庆教授等通过与物理所石友国研究组以及周毅研究员合作，在高质量K₂Cr₃As₃单晶样品上开展了核磁共振实验，首次在实验上确定K₂Cr₃As₃的超导是自旋三重态。实验中克服了单晶细小（质量约0.1mg），且ab面内无法定向的困难，通过施加不同晶体方向的外磁场，测量了奈特位移K和自旋晶格弛豫率 $1/T_1T$ 。当外加磁场沿着ab面的方向时，通过原位旋转单根样品同时测量NMR谱随面内角度的变化，确定了磁场与晶体方向的关系。在正常态，ab方向和c方向的K和 $1/T_1T$ 都随着降温而增大，表明样品中存在铁磁自旋涨落。进入超导态后，ab面内奈特位移所探测到的自旋磁化率不随温度变化，而当磁场沿着c方向时，自旋磁化率随着降温趋近于0。自旋磁化率出现了自发的各向异性变化。对于自旋单态超导体，各个晶体方向的自旋磁化率都应在零温时趋近0；而对于自旋三重态超导体，库伯对则会贡献自旋磁化率，同时库伯对的净磁矩也有方向性，这会引起来奈特位移在超导态的各向异性变化。因此，实验结果明确的表明K₂Cr₃As₃是自旋三重态超导。

自旋三重态中库伯对的方向习惯上用d矢量来描述，d矢量与库伯对自旋的方向相互垂直。在固体晶格中，d矢量通常固定在某一晶体方向。上述实验结果说明K₂Cr₃As₃的d矢量是沿着c方向的。而c方向进一步的变磁场NMR实验发现了一个有趣的现象，K₂Cr₃As₃中库伯对自旋（d矢量）的朝向是可以被“撬动”的。实验中c方向的奈特位移并不是在T_c处开始下降，而是在比T_c稍低的温度T*，并且在不同的磁场下，T*与T_c的差距随着磁场增大而逐渐增加。当施加16T的磁场时，c方向的奈特位移也表现出不随温度变化的行为。这些现象表明K₂Cr₃As₃中d矢量最初是沿着c方向，当磁场增加后，d矢量旋转90度朝向了ab面。在实验数据的基础上，与物理所周毅研究员合作进行了理论计算工作，得到了K₂Cr₃As₃所有满足点状节点能隙和自旋三重态的轨道波函数，其中 $px+ipy$ 和 $px-ipy$ 是符合实验结果的。因此，K₂Cr₃As₃的自旋三重态超导与³He超流A相很相似，可能是具有拓扑性质的。这项研究成果证实了K₂Cr₃As₃是一个具有关联电子效应的自旋三重态超导体，其超导态更详细的性质及拓扑超导的可能性值得进行更深入的研究。

相关研究结果以“Spin-triplet superconductivity in $K_2Cr_3As_3$ ”为题发表在近期的 *Science Advances* **7**, eabl4432 (2021)。该工作获得了科技部、国家自然科学基金委、中科院青促会、王宽诚教育基金会等项目的支持。

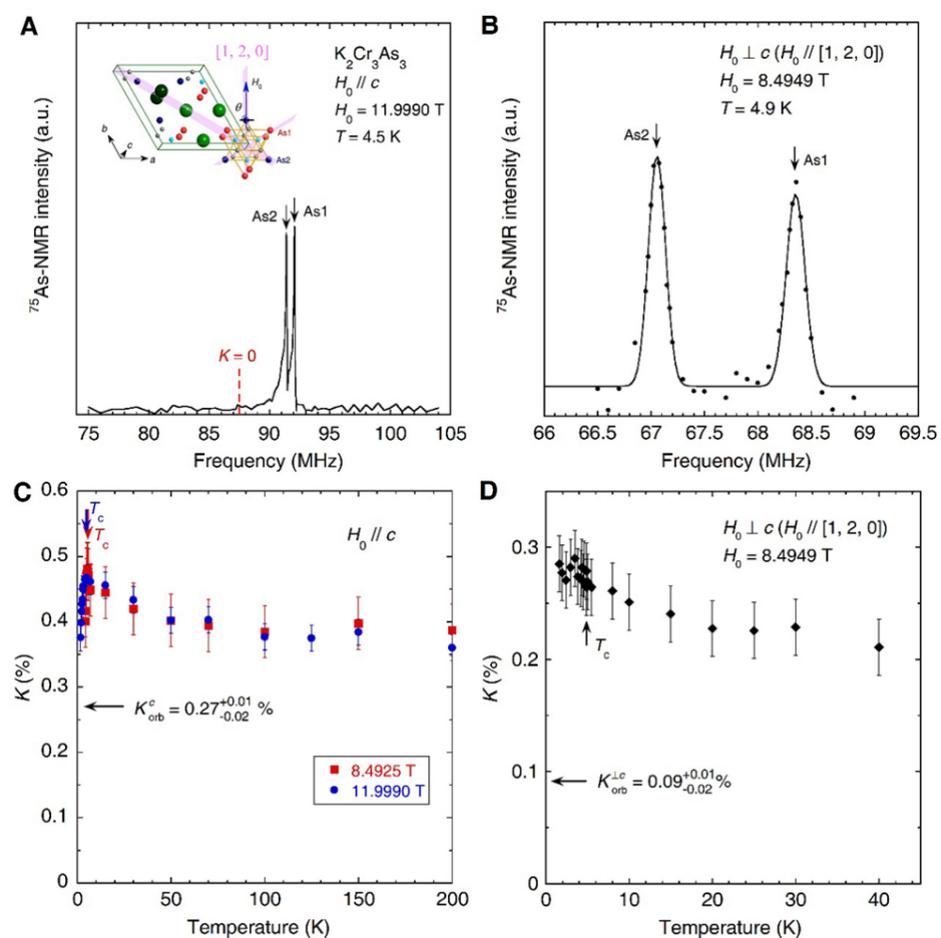


图1. $K_2Cr_3As_3$ 不同晶体方向的 ^{75}As 核磁共振谱中心峰，以及得到的奈特位移温度变化和轨道磁化率贡献。

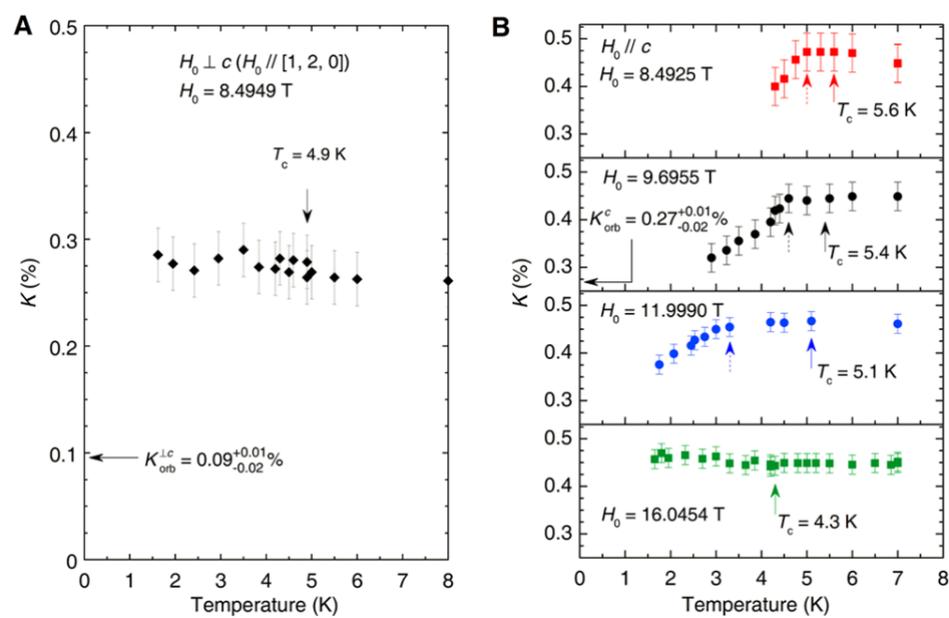


图2. $K_2Cr_3As_3$ 超导态不同晶体方向奈特位移的温度变化。

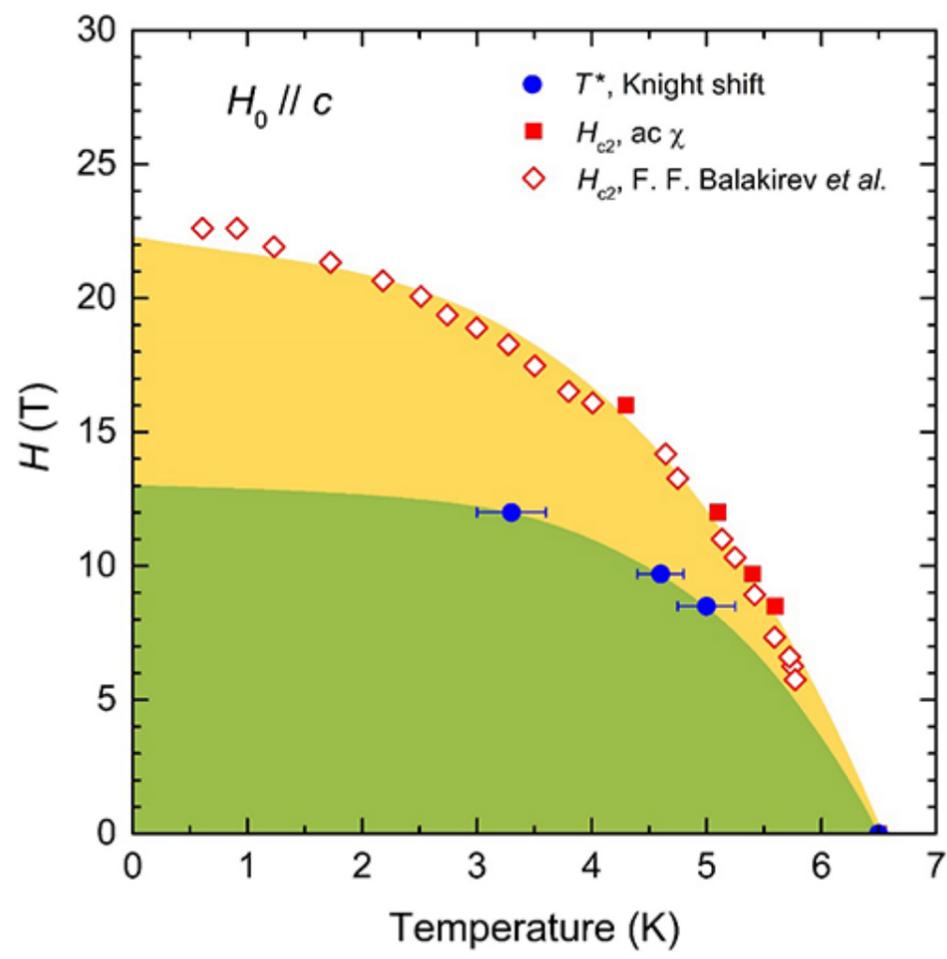


图3. 沿 c 方向加磁场时 $K_2Cr_3As_3$ 的磁场-温度相图

[Science Advances 7, eabl4432 \(2021\).pdf](#)

[电子所刊](#)
[公开课](#)
[微信](#)
[联系我们](#)
[友情链接](#)
[所长信箱](#)
[违纪违法举报](#)



中国科学院
CHINESE ACADEMY OF SCIENCES