

研究确定只具有空穴型费米面铁基超导体的超导能隙对称性

自2008年发现以来，作为第二大类高温超导材料的铁基超导体的超导配对机理一直是凝聚态物理领域的重大前沿问题。确定超导能隙对称性和导致电子配对的媒介是解决超导机理的两个先决条件。铁基超导体是一个典型的多带体系，其配对对称性和费米面的拓扑结构密切相关。大多数铁基超导体具有布里渊区中心（ Γ 点）的空穴型费米面和布里渊区角落（M点）的电子型费米面，其配对对称性普遍被认为是 $s_{\pm}(-M)$ ，即在 Γ 点空穴型费米面和M点电子型费米面上超导能隙符号相反的s波。在电子掺杂的只具有电子型费米面的铁基超导体中，例如单层FeSe/SrTiO₃超导薄膜的配对对称性尚有争议，可能是 s_{\pm} 波或d波。而在空穴掺杂的铁基超导体中，极度过掺区域会得到只具有空穴型费米面的情形，其配对对称性引起了广泛讨论，提出的可能性包括 $s_{\pm}(\Gamma)$ ，即在 Γ 点两个费米面上配对符号相反的s波或者d波等。厘清超导配对对称性和不同费米面结构之间的关系，对理解铁基超导体的超导机理至关重要。

KFe₂As₂是典型的只有空穴型费米面的铁基超导体，处于(Ba_{1-x}K_xFe₂As₂)体系的掺杂末端($x=1$)，具有约3.5K的超导转变温度。有实验表明在(Ba_{1-x}K_x)Fe₂As₂掺杂 $x=0.8$ 附近有反演对称性破缺，暗示其左右两边发生了配对对称性的改变；其低温的线性比热系数（索末菲尔德系数）很大，引起了对其重费米子行为起源的讨论。作为具有对电子动量分辨本领的实验方法，角分辨光电子能谱（ARPES）是研究这些问题最直接的实验手段。然而，KFe₂As₂的超导转变温度极低，超导能隙极小，常规ARPES对其超导态的电子结构和能隙结构很难进行测量。

中国科学院物理研究所/北京凝聚态物理国家研究中心超导国家重点实验室周兴江团队，与中国科学院理化技术研究所许祖彦团队、理论物理研究所吴贤新等合作，利用自主研发的大动量极低温深紫外激光角分辨光电子能谱仪，克服了KFe₂As₂超导态电子结构测量需求的极低温和超高分辨率的难题。通过对KFe₂As₂的电子结构和超导能隙进行研究，该工作确定了KFe₂As₂的费米面结构和超导能隙对称性，为铁基超导的配对机理提供了重要信息。

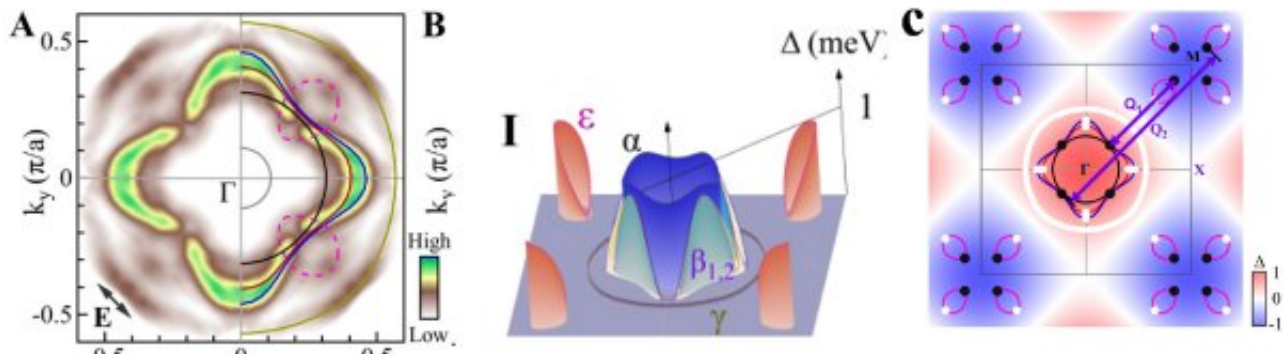
基于自行生长的具有3.7K转变温度的高质量KFe₂As₂单晶，深紫外激光ARPES测量了其精细的费米面结构和超导能隙结构。费米面结构显示为 Γ 点附近、 Γ 和M三个空穴型费米面，以及围绕M点的四个小空穴型费米面。细节特征显示， Γ 费米面发生了劈裂，进一步研究表明其中一支来源于表面态。围绕 Γ 点，研究人员还观察到四个小空穴型费米面，这是由于样品解理面存在 2×2 表面重构，导致 Γ 点和M点的电子结构相互折叠，这四个小空穴型费米面实际上来源于M点附近的费米面折叠到了 Γ 点附近。这个特性使得深紫外激光ARPES不仅能测量到 Γ 点附近，还能测量M点附近的电子结构，提供了全面研究KFe₂As₂费米面和超导能隙结构的机会。

该研究揭示了超导能隙在不同温度下的打开与关闭，以及低温下超导能隙的费米面依赖行为；详细分析了KFe₂As₂中的 Γ 能带，发现其正常态是一个很平的能带，与KFe₂As₂的重费米子行为有关。进一步计算表明，KFe₂As₂比热的索末菲尔德系数有接近一半来源于 Γ 能带，说明其对重费米子行为起重要作用。

基于低温下完整费米面的获取，该研究提取了所有费米面的能隙大小随着动量的分布，并对其能隙对称性进行深入分析。结果表明，KFe₂As₂的超导能隙对称性为 $s_{\pm}(\Gamma)$ ，即 Γ 和M点的空穴型费米面之间能隙符号变号，原因在于：能隙大小分布定性符合 $s_{\pm}(-M)$ 的简单形式；结合非弹性中子散射的结果， Γ 点附近和M点附近的嵌套矢量和自旋共振的波矢相符，表明 Γ 点附近和M点附近的能隙符号反转；嵌套矢量连接的能隙大小和自旋共振能量的关系满足普适规律；费米面上出现很多能隙节点，这些节点的位置都出现在 $s_{\pm}(-M)$ 的简单形式给出的节线附近。这些证据表明KFe₂As₂的超导能隙对称性为 $s_{\pm}(\Gamma)$ 。

KFe₂As₂的能隙对称性存在争议许久，其独特的费米面结构也使其研究十分重要。之前研究普遍认为其超导能隙对称性对应 $s_{\pm}(-M)$ 。这项工作明确了KFe₂As₂的超导能隙对称性为 $s_{\pm}(\Gamma)$ ，表明只具有空穴费米面的KFe₂As₂的能隙对称性和同时具有空穴型和电子型费米面的体系具有相同的能隙对称性，统一了这两类不同费米面的超导体，为铁基超导体的配对机理研究提供了重要信息。

近日，相关研究成果发表在《自然-物理学》(Nature Physics)上。研究工作得到国家自然科学基金、国家重点研发计划和中国科学院战略性先导科技专项(B类)等的支持。



A. KFe₂As₂的实验得到的费米面结构；B. 超导能隙的动量依赖关系；C. 能隙对称性的解释示意图

原文地址：<http://www.china-nengyuan.com/tech/208373.html>