

物理所在异核费米体系的四聚体超流理论研究中获进展

作者：writer 来源：中国科学院

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/25144.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！

费米超流是凝聚态物理的一项核心研究内容。从本质上来看，费米超流与玻色凝聚是相通的，都具备非对角长程序，因此在费米体系中实现超流的一个基本思路就是将偶数个费米子结合成一个复合玻色子，然后使之凝聚。BCS理论就是一个经典的例子：两个不同自旋的费米子因吸引作用结合成库珀对再凝聚。这种超流是由费米子之间的两体关联效应所导致的物理现象。基于此，一个十分有趣且富有挑战性的问题是，能否突破BCS理论框架来实现一种具备高阶关联的费米超流相。这一方向上首当其冲的案例就是四聚体超流，即由四个费米子组成的复合玻色子的凝聚。关于四聚体超流，以往在不同物理体系中已经有一些研究，例如自旋3/2的四分量费米体系、核物理中的alpha粒子凝聚、双激子半导体，以及charge-4e超导体等。而这些体系中实现四聚体超流都需要很严苛的条件，比如多组分，多体相互作用，或者满足特殊对称性要求的配对涨落，这些条件的限制使得四聚体超流的实验实现和探测变得非常困难。

近年来，在超冷原子领域中多种异核费米混合气体的实现，如K-Li、Dy-K、Cr-Li等，为四聚体超流的研究提供了新的平台。这些不等质量的两组分费米混合体具有内禀的少体关联，这可以从相应的少体问题严格解看出：一个足够轻的原子能很容易绑定N个重费米子形成(N+1)束缚态。物理上，这是源于轻原子运动所诱导的重费米子之间的长程有效吸引力，当这种吸引力（依赖于重轻质量比）超过重费米子间的P波动能势垒时，束缚态就会形成。当N=3时，这就是一个四聚体的束缚态。这种少体束缚的一个极大优势是只需要轻-重两种费米组分，且只需要组分之间的两体短程相互作用，因此它有望成为实现四聚体超流最简单且最容易操控的物理体系。

近日，中国科学院物理研究所/北京凝聚态物理国家研究中心凝聚态理论与材料计算重点实验室研究员崔晓玲团队在四聚体超流的研究上取得了突破性进展。该团队基于之前关于异核费米体系的少体束缚态和极化子问题的理论研究，进一步考虑了轻重费米子数配比为1:3的热力学体系，确定了四聚体超流的存在。计算表明，对于二维异核两分量费米体系，当重-轻原子质量比足够大时(>3.38)，系统随重-轻吸引相互作用的增强会经历从正常态到BCS配对超流、三聚体费米液体，最后到四聚体超流的一系列相变(图1)。该团队构造了一种全新的描述四聚体超流态的变分波函数，将其给出的结果与其他可能的物态作比较，确定了四聚体超流在大质量比、强相互作用下是体系唯一的基态，并给出了在质量比和相互作用强度参数空间中的相图(图2)。此外，研究人员还表示四聚体超流所特有的高阶关联可以通过重费米子在动量空间中的密度分布与密度-密度关联函数来探测(图3)。相关研究成果发表在《物理评论快报》(Physical Review Letters)上。

这一工作在貌似简单的两分量费米体系中揭示了一种全新的具有高阶关联的费米超流相，可以在

多种异核的超冷费米混合气中实现，并且可以广泛推广到其他具有不对称质量的费米体系中，为研究超越两体配对的费米超流和超导开辟了新的思路和方向。

相关研究工作得到国家自然科学基金委员会和中国科学院战略性先导科技专项的资助。

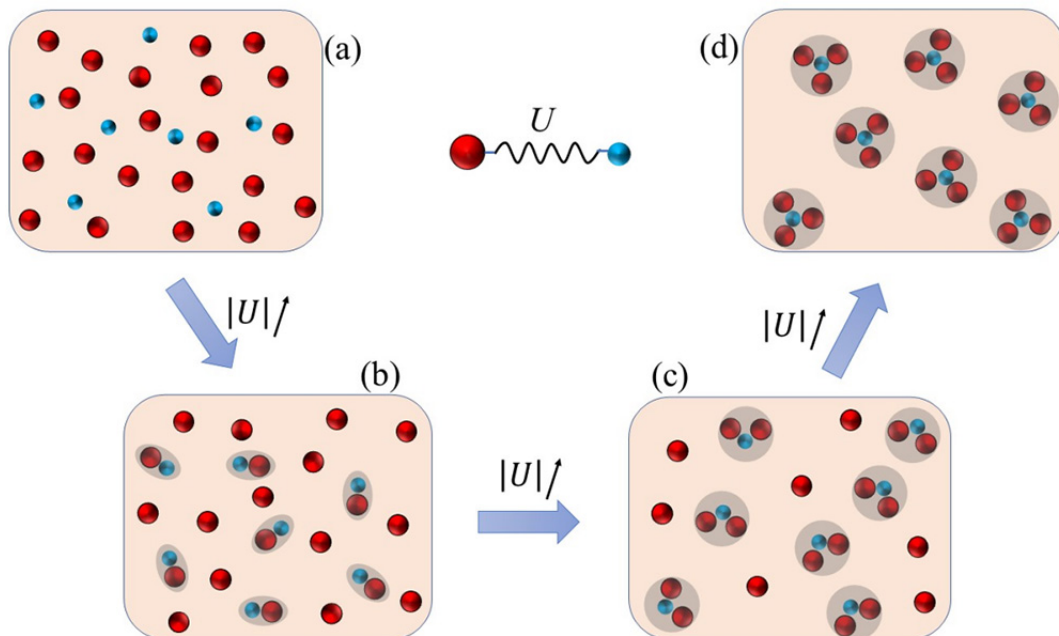


图1. 异核费米混合体系的相变示意图。图中红色和蓝色圆球分别代表重和轻费米子，二者粒子数之比为3:1，它们之间具有接触相互作用 $U(<0)$ 。随吸引相互作用的增强,体系会发生从正常态(a)-BCS配对超流(b)-三聚体费米液体(c)-四聚体超流(d)的转变。

图2. 二维异核费米混合气体在相互作用强度与质量比参数空间中的相图。黄色区域对应四聚体超流区，灰色区域对应三聚体液体与自由重费米子的混合区，绿色区域是各种两体配对超流区（如BCS超流、FFLO超流等），白色区域则是正常态。

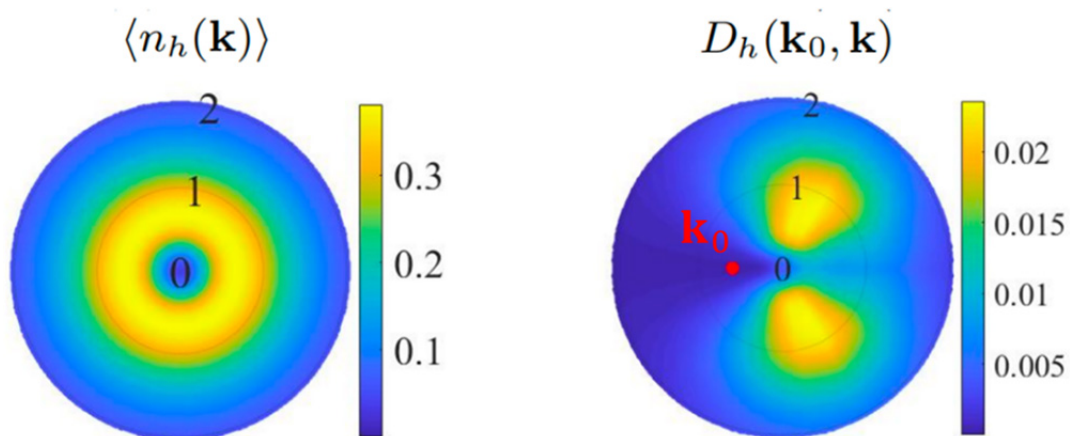


图3. 四聚体超流相中重费米子在动量空间的密度分布（左图）与密度-密度关联函数（右图）。分布中自发的晶体对称破缺体现了该超流相中的高阶关联。

研究团队单位：物理研究所

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](https://www.iikx.com)转发