

物理所在异核费米混合气的量子少体束缚及自发晶体关联研究方面获进展

作者：writer 来源：中国科学院

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/19875.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！

严格可解的量子少体问题为探究复杂的多体物理现象提供了重要且可靠的途径。一个著名的例子是共振点处分子束缚态的生成为自旋1/2费米超流的BCS-BEC渡越奠定了基础，突显了该系统中主导的两体关联效应。那么一个自然的问题是，是否存在更奇异的量子少体态，从而可以在多体系统中诱导更新颖的少体关联效应和物理现象。

近年来超冷原子体系的快速发展为研究该问题提供了契机，特别是K-Li、Dy-K、Cr-Li等多种异核费米混合气的成功制备为该研究提供了实验条件。考虑由N个全同重费米子和一个轻原子组成的相互作用体系，轻原子的运动可以诱导重费米子之间的有效吸引，从而有助于形成(N+1)束缚态。这些束缚态具有比两体分子态更低的能量，从而在多体系统中将扮演更重要的角色，有望诱导更新奇的少体关联效应。但是理论表明，在三维空间中这些束缚态的产生一般要求较高的重-轻质量比，例如三聚体(N=2)要求这一质量比大于8.2，而四聚体和五聚体则要求更高。由于对质量比的极高要求，目前这类少体束缚还没有在冷原子实验中被观测到，其诱导的关联效应更无从谈起。

最近，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研究人员在该类问题的研究上取得了突破性进展。他们聚焦于二维的(N+1)异核费米体系，成功地得到了四体(N=3)和五体(N=4)问题的严格解，给出了对应少体束缚态出现的临界质量比(图1)。他们的计算表明，二维体系的临界质量比要远小于三维体系，从而可以被当前的多种异核费米混合气所实现。此外，他们还得到了分子-原子相对坐标系中的角动量分解，并指出不同分解可以导致不同的重费米子动量空间分布(图2)。这些分布有明显的晶体结构，是纯粹由相互作用导致的自发对称破缺，代表了这类束缚态独有的量子关联特性。这一研究成果于近期发表在Physical Review Letters上。

更进一步地，该团队研究了这类少体束缚态对费米极化子的影响(这里的极化子是指一个轻质量的杂质原子与重费米海原子相互作用所导致的准粒子激发)。之前研究表明，当杂质与费米海原子具有相同质量时，随着相互作用的增强可以导致极化子到分子的一阶相变，这也可以看作两体关联所主导的一种典型的多体效应。而对于不等质量的异核极化子体系，上面所提到的少体束缚态的产生又会诱导什么样的多体效应呢？是否会存在极化子到多聚体的量子相变？针对这一问题，该团队采用基于高阶粒子-空穴激发的变分方法，将两体、三体和四体关联统一全部包含于该变分波函数中，从而对比提炼出主导的少体关联通道。研究计算结果表明，当重费米子与轻杂质的质量比大于三聚体的临界质量比时，将不会发生一阶相变，取而代之的是由极化子到多聚体缀饰态的一系列平滑渡越；在这一过程中，背景原子的粒子-空穴激发呈现出对角或正三角的晶体

关联特性（图3），与对应的少体束缚态中的晶体关联相呼应。研究人员表示，这些现象源自于三聚体和四聚体在动量空间所特有的高对称性，从而与两体分子态所诱导的物理有本质不同（图4）。该研究成果于近期发表在Cell Reports Physical Science上。

以上两项研究表明异核费米混合体具有与自旋1/2费米体系完全不同的少体束缚态和量子关联性质，对基于Cooper pair的传统配对理论提出了巨大挑战，有希望在此基础上建立崭新的费米超流理论。该研究得到科学技术部国家重点研发计划、国家自然科学基金委和中科院战略性先导科技专项的资助。

论文链接：[1](#)、[2](#)

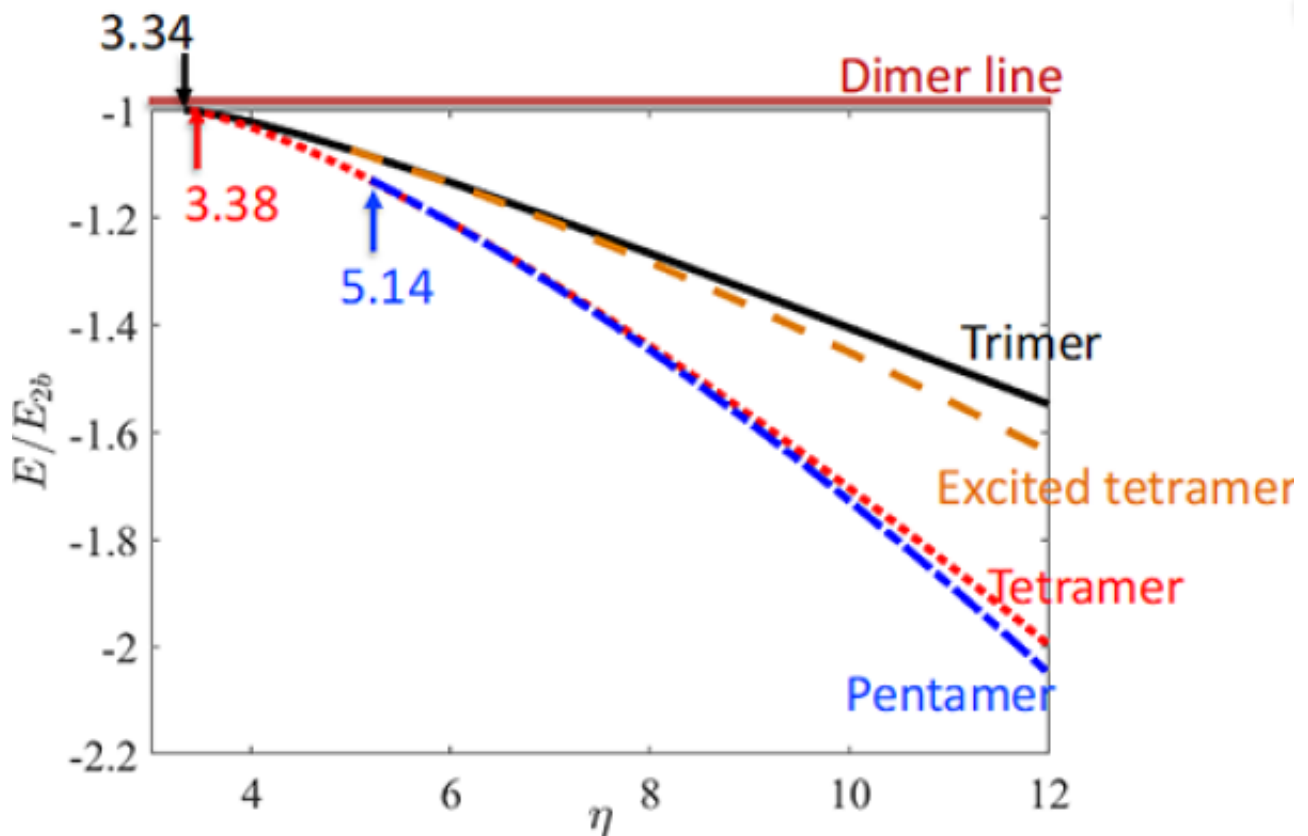


图1 能量随质量比的变化关系图。三聚体（trimer）、四聚体（tetramer）、五聚体（pentamer）出现的临界质量比分别是3.34、3.38、5.14。其中四聚体和五聚体是该研究新得到的结果。

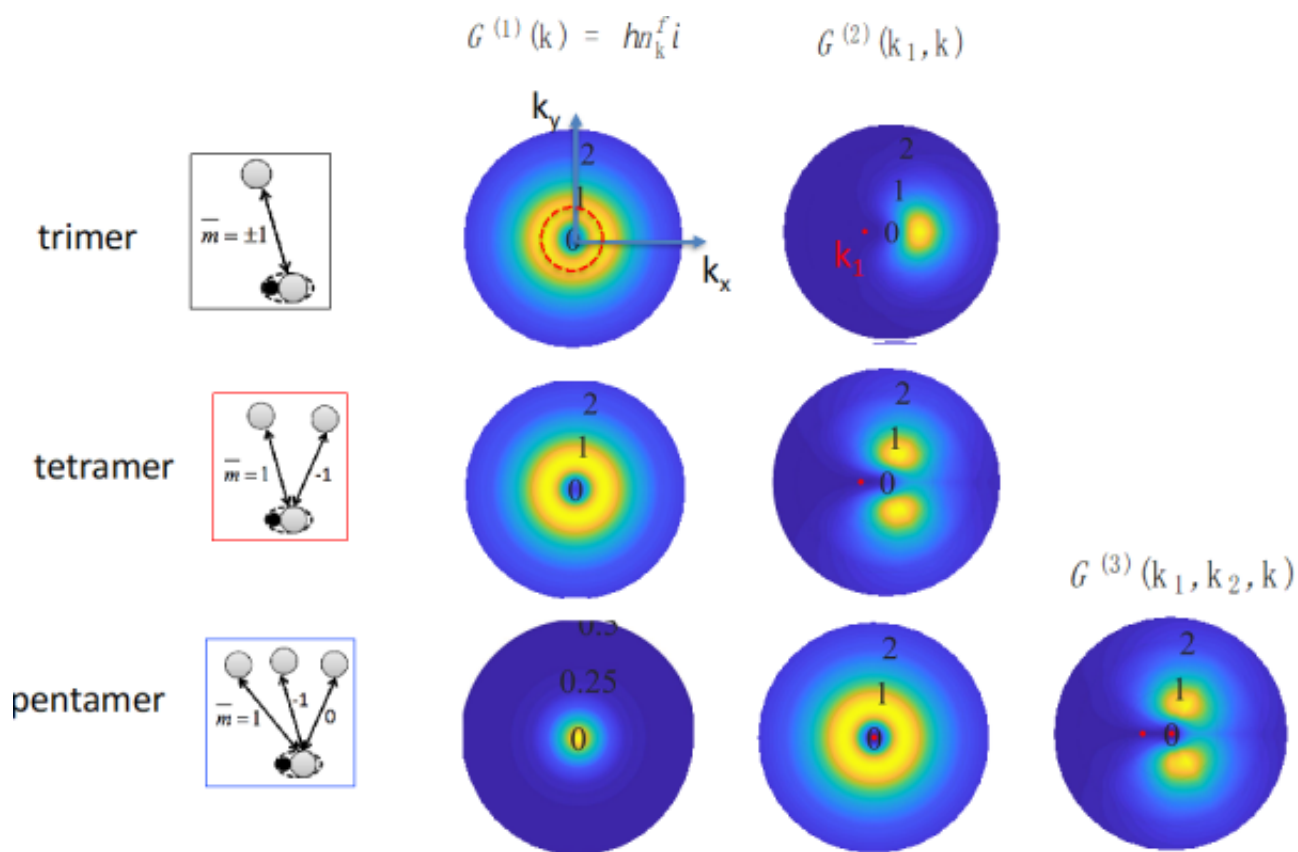


图2 三聚体 (trimer)、四聚体 (tetramer)、五聚体 (pentamer) 在分子-原子相对坐标系中的角动量分解，及其对应的费米子动量空间关联分布。可以看到三聚体和四聚体的二阶关联分布以及五聚体的三阶关联分布自发地呈现出对角、正三角等晶体结构。

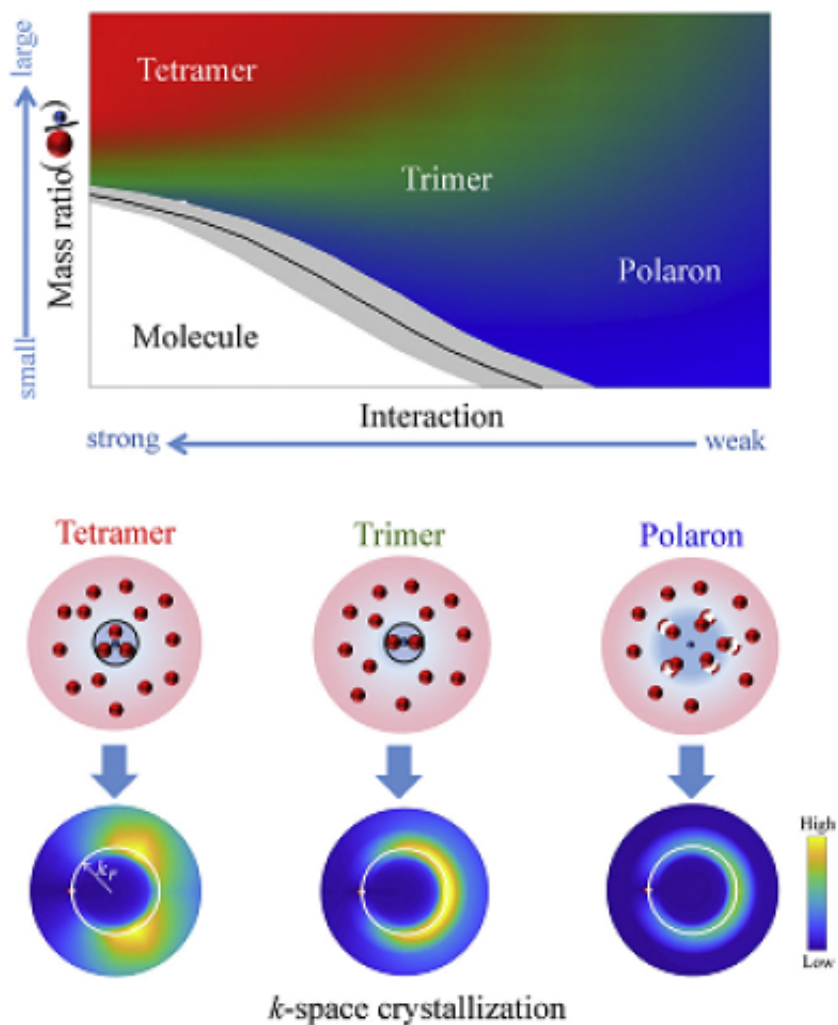


图3 二维异核费米极化子体系在相互作用强度和质量比参数空间的相图。当质量比大于真空中三聚体的临界质量比时，将不会发生极化子到分子的一阶相变，而是由极化子到多聚体缀饰态的一系列平滑渡越；在此过程中，费米海原子的粒子-空穴激发呈现出对角或正三角的晶体关联特性，代表体系进入缀饰三聚体和四聚体区间。

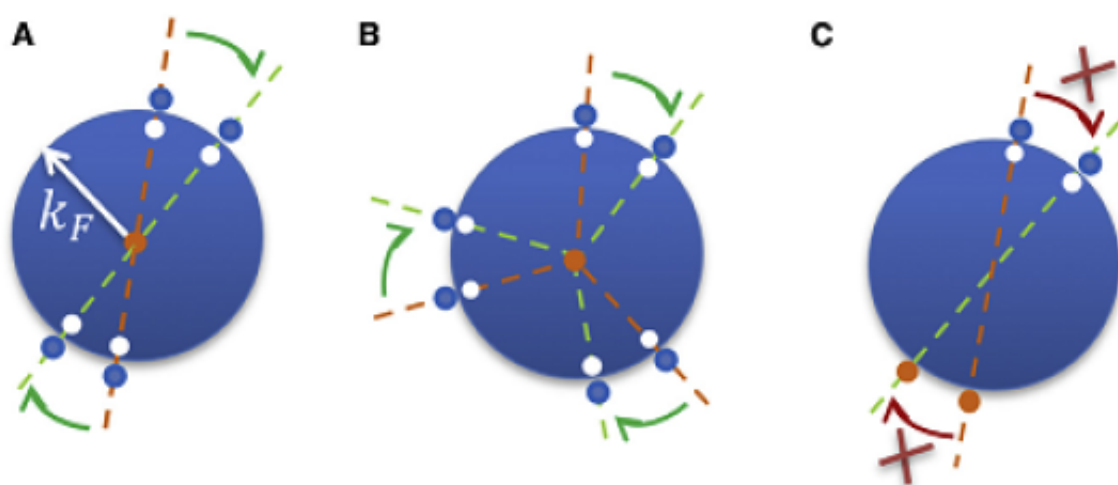


图4 缀饰三聚体 (A)、四聚体 (B) 以及分子态 (C) 区间内的粒子-空穴激发及晶体关联。在 (A, B) 中, 高对称的对角或正三角激发之间可以自由散射, 降低能量的同时不改变系统总动量; 而在 (C) 中, 不同动量的粒子-空穴激发之间不能散射, 其总动量也与 (A, B) 不同。这些不同导致极化子到分子态的转变是不同总动量态之间的一阶相变, 而极化子到三聚体和四聚体的转变属于平滑渡越。

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