

中国科学院物理研究所 T01组供稿
北京凝聚态物理国家研究中心

第79期

2021年10月14日

具有Borromean三体关联的量子液滴态

探究多体体系中主导的少体关联效应是物理学研究的重要内容，而新奇的量子少体束缚态的出现为揭示多体物理体系中奇特的少体关联提供了崭新的视角。Borromean束缚就属于这样一类少体束缚态，如图1中的Borromean环链所示，它指的是只有三个物体同时存在才能相互束缚，而任意两个物体都不能形成束缚态，代表了一类特别的量子三体关联效应。在物理体系中，Borromean束缚的著名例子包括 ^{11}Li 和 ^6He 原子核中质子和中子构成的晕核态 (halo nuclei)，以及冷原子玻色体系中负散射长度区的Efimov三体束缚态，且它们的存在都已被实验证实。理论研究表明，要产生Borromean三体束缚，需要两体相互作用势的形状和强度满足较严苛的条件，或者单粒子能谱满足极高的对称性。在这一背景下，到目前为止Borromean束缚的研究还只局限于少体体系的范畴，而它是否可以推广到热力学极限的多体体系仍是一个未知而富有挑战的问题。这一问题的解答将有助于将多体体系的集体效应和量子少体关联有机联系起来，从而为解决复杂的多体问题提供一套全新的思路。

在多体物理世界中，量子液滴代表了一类典型的多体自束缚物态，自80年代开始就在液氦中有深入的研究。近年来，量子液滴重新在超冷原子领域获得了广泛的关注，并在单分量偶极气体以及两组分的碱金属玻色混合气体中得到了实现。这种物态具备负能量和零压强的液滴性质，在没有任何外势下可以稳定存在。它的物理机理是吸引的平均场相互作用以及排斥的Lee-Huang-Yang量子涨落修正之间的相对平衡，是集体效应的产物。那么这样一种多体束缚态在多组分情况下是否稳定呢，它是否可以作为Borromean束缚的载体呢？

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崔晓玲研究员多年来从事量子少体，以及少体到多体的渡越物理研究。她与合作者在早前的研究工作中提出利用自旋轨道耦合导致的能谱高对称性来诱导Borromean量子三体束缚态，相关结果发表于Phys. Rev. X 4, 031206 (2014)。最近，她指导博士后麻银峰和研究生彭程，针对三组分玻色量子液滴中可能的Borromean关联进行了细致研究。他们通过分析密度涨落对玻色混合体平均场稳定性的影响，发现三组分的平均场稳定参数区间总是小于两组分稳定区间（图2）；也就是说，三组分比两组分更容易发生平均场塌缩。这一现象的物理根源在于多组分的密度关联涨落可以诱导更吸引的相互作用力，从而加深体系的不稳定性，这为Borromean束缚的出现提供了必要条件。通过进一步对Lee-Huang-Yang量子涨落修正的计算，他们确定了Borromean液滴的存在，即只有三组分同时存在时形成的多体自束缚态，而其中任意两组分都不能形成自束缚（见图3相图）。另外一个有意思的现象是，在三组分液滴和两组分液滴共存区间，它们可自发地在实空间形成相分离，即三组分液滴被两组分液滴包围在中间形成“wedding cake”结构（图4）。这些结果表明，三组分的玻色混合体比两组分具有更丰富的物理，蕴含更新奇的关联效应。这一工作也是首次将Borromean束缚推广到热力学极限的多体体系，揭示了集体效应在诱导新奇量子束缚态中的独特优势。研究成果发表于近期出版的Phys. Rev. Lett. 127, 043002 (2021)。

此外，他们还聚焦于准二维的量子液滴相，研究了三维到二维的维度渡越中液滴相的不稳定性和相应的量子相变。研究发现，对于均匀外势中的量子液滴，当增大粒子数或者缩小外势宽度时，边界效应越来越显著，从而导致液滴相的不稳定性以及到孤子的量子相变（图5）。这一研究揭示了准低维下不同束缚态之间的共存和竞争机制，为实验上探测相关的物理现象提供了理论基础。成果以Letter形式发表于近期的Phys. Rev. Research 3, L012027 (2021)。

该工作得到科技部国家重点研发计划（2016YFA0300600，2018YFA0307600）、国家自然科学基金委（12074419）和中国科学院先导专项（XDB33000000）的资助。

图3: 粒子数 - 相互作用平面相图。蓝色区为Borromean液滴 (“BD”), 以下为气态, 以上为两组分与三组分液态共存区。

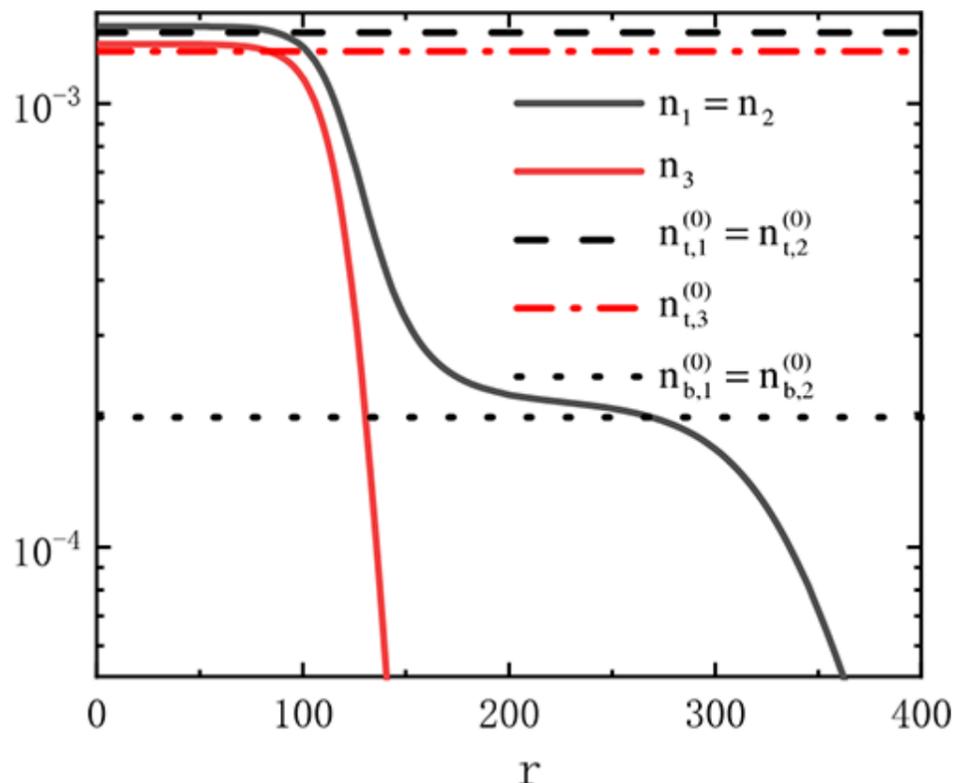


图4: 液滴相分离: 三组分液滴被两组分液滴包围, 形成“wedding cake”结构。

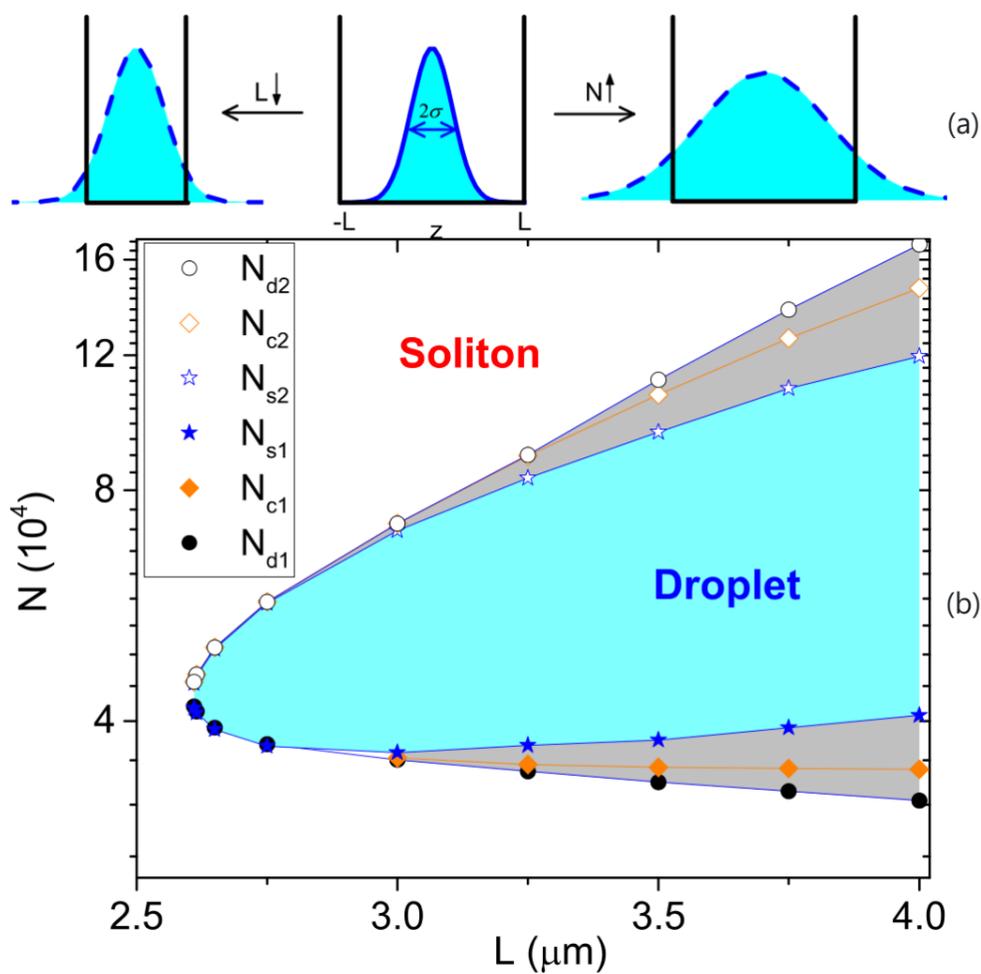


图5: (a) 均匀外势下液滴的边界效应: 当逐步增大粒子数或缩小外势尺寸时, 液滴表面触碰到外势边界, 导致不稳定性。(b) 粒子数 - 外势宽度平面相图。蓝色和白色区间的基态分别为液滴态和孤子态, 灰色是两态共存区间。

[Phys. Rev. Research 3, L012027 \(2021\).pdf](#)

[PRL 127, 043002 \(2021\).pdf](#)



