弱束缚原子核基态与集体激发态的研究

张一怒, 朱怡, 王楷, 裴俊琛*

北京大学物理学院, 核物理与核技术国家重点实验室, 北京 100871

* 联系人, E-mail: peij@pku.edu.cn

2016-02-24 收稿, 2016-03-17 修回, 2016-03-17 接受, 2016-04-29 网络版发表

国家优秀青年科学基金(11522538)资助

摘要 弱束缚原子核是一个开放的量子多体体系, 具有与稳定核很不一样的奇特结构和动力学. 弱束缚核的相关研究是核物理的一个前沿热点问题, 对进一步发展核理论和研究天体环境下的元素合成都很重要. 本文介绍了连续谱能量密度泛函理论的发展和弱束缚原子核的研究进展. 为了解决自洽描述问题, 主要工作是基于非球形的坐标空间求解HFB方程并对弱束缚核基态与集体激发态进行描述, 基于计算讨论了蛋形晕结构, 核芯-晕形变去耦合效应和准粒子连续谱的贡献; 发展了包含连续谱的FAM-QRPA方法描述原子核的集体激发, 研究了弱束缚核中出现的软单核共振模式. 最后对弱束缚核的研究前景和亟待开展的工作进行了展望.

关键词 晕核, 连续谱, 集体激发, 能量密度泛函

研究远离稳定线的奇特原子核是目前核物理的一个前沿热点^[1]. 这些极不稳定原子核具有很大的中子质子比, 非常弱束缚, 并且已经显现出与稳定核很不一样的奇特性质: 比如晕结构、软激发模式等, 还可能预示着新物理. 奇特核研究对于验证和发展核理论本身十分重要, 对研究天体物理环境下的元素合成和中子星结构也十分关键. 但是由于其寿命极短, 生成截面极小, 使得实验上的研究相当困难. 为此, 国际上相继投入巨资建造若干先进的大型放射性核束实验装置. 与稳定束流相比, 放射性束流可以把核物理的研究范围扩展到极不稳定核区域. 美国投资10多亿美元在密歇根兴建的Facility for Rare Isotope Beams(FRIB)将在2022年建成(<http://www.frib.msu.edu/>). 在FRIB建成之前, 日本理化所的RIBF是目前最强的放射性束流装置. 国内的放射性束流装置有兰州的HIRFL-CSR和北京的串列加速器, 都取得了丰富的成果. 我国即将开始建设的“十二五”国家大科学工程“强流重离子加速器装置——HIAF”将在放

射性核束物理领域提供很好的竞争条件和赶超机遇^[2].

弱束缚核是一个开放的量子多体系统, 其理论描述比较复杂. 由于难以提升放射性核束的流强和品质, 理论对实验的布局 and 结果分析很有用. 其中基于Hartree-Fock-Bogoliubov理论的连续谱能量密度泛函可以微观自洽地描述弱束缚核^[3]. 弱束缚核接近存在阈值, 连续谱耦合效应显著, 表面密度有很大的空间弥散分布. 传统上, HFB方程在组态空间求解, 即基于谐振子基展开法^[4], 但计算结果与展开基矢相关. 这个方法描述稳定核的计算效率很高, 但是谐振子基尾部为高斯函数, 在核表面衰减过快, 不能描述弱束缚核波函数的渐进行为和很大空间尺度分布的晕结构. 此外谐振子基求解得到的准粒子能级比较稀疏, 不能很好地描述连续谱和准粒子共振态. 更精确的描述是在坐标空间求解HFB方程^[5]. 坐标空间求解的精度与空间的大小和格点间距有关. 其优势是可以精确自洽地考虑连续谱耦合与奇特的空间结构,

引用格式: 张一怒, 朱怡, 王楷, 等. 弱束缚原子核基态与集体激发态的研究. 科学通报, 2016, 61: 2199–2206

Zhang Y N, Zhu Y, Wang K, et al. Weakly bound nuclei: Exotic ground state properties and collective excitations (in Chinese). Chin Sci Bull, 2016, 61: 2199–2206, doi: 10.1360/N972016-00257

可以很好地描述形变晕结构和裂变过程,而这些都是组态空间描述的难点.坐标空间HFB的难点是计算量巨大,特别是对于非球形核的计算.为此我们逐步发展了基于B样条的二维坐标空间HFB计算(HFB-AX)^[6]和基于多小波分析的三维坐标空间HFB计算(MADNESS-HFB)^[7].特别是三维的自适应多分辨多小波分析可以大大地提高计算效率,可以适用于描述复杂的超流费米子体系,如奇特的晕核、核裂变、冷原子体系、中子星结构等.

1 弱束缚核的基态性质

原子核核素版图的边界被称为“滴线”,滴线附近为弱束缚核,滴线外为共振态或不束缚体系.丰质子核的滴线近似处在 $N=Z$ 的线上,实验和理论方面的研究比较多.而丰中子核滴线区的实验研究还局限于轻核区,很难达到中重核区的滴线,不同的理论模型预言的滴线位置也有很大的差别,这也是今后放射性核束物理的主要方向^[1].滴线区有很多新物理现象出现,也与宇宙元素起源问题紧密相关.天体物理环境中的快中子俘获过程在滴线附近进行,该过程与宇宙中较重元素的丰度相关.理论描述弱束缚原子核的基态需要自洽考虑配对关联、连续谱效应、晕结构、形变效应.

首先弱束缚核的一个新现象就是晕结构(halo),一个典型例子就是 ^6Li ^[8].在晕核中,外面的价核子分离能很小,与核心的耦合很松散,形成一个很大的空间分布.这在实验上表现为反常增加的半径和反应截面,对应于很窄的动量分布.理论分析认为,晕核的价核子应该有很小的离心位垒,因而主要成分是S波和P波.实验上发现的晕核现象比较普遍^[9],与传统平均场模型中的S波或者P波的能级位置并不相符,这就对现有的理论提出了挑战.基于我们的自洽计算和准粒子能谱分析,发现单中子晕和双中子晕的机制不同.单中子晕的形成主要与价核子的组态有关,主要成分是S波和P波.而双中子晕比较复杂,物理也更丰富.两个松散的价中子与核心形成一个三体问题^[10].晕结构形成一个稀薄的核物质环境,其中超流对关联效应和连续谱耦合很重要^[11].文献[12]中提出了对关联抑制晕结构效应(pairing anti-halo effect).而另一方面连续谱耦合可以显著的增强晕结构.低密度晕中的对关联存在BCS与BEC两种机制^[13].低密度晕结构中的双中子关联也很有意思^[14],

与集团结构(clustering)类似,实验上观察到了双中子发射现象,也可以通过转移反应来研究^[15].

变形核的晕结构也得到越来越多的注意.理论研究对于变形核能否形成晕结构有较大争议.核芯的形变可能会显著抑制外层的价中子形成晕结构.核芯与晕由于弱束缚,所以核芯形状与晕的形状可以不同,即形状去耦合,因而存在各种可能的形变晕.文献[16]中研究了一个轴对称形变的平均场的弱束缚波函数行为,显示在中子占据低 Ω (角动量磁量子数)的弱束缚轨道时,形成晕结构,且会发生晕结构和核芯部分的形状退耦情况.在文献[17]中,作者使用核芯加两个价中子的简单三体模型研究形变核中形成双中子晕的可能性.研究结果表明形变核心会显著的降低产生三体晕结构的可能性.文献[18]中,基于形变的相对论Hartree-Bogoliubov模型研究了 ^{44}Mg 的形变晕结构,自洽计算显示了核芯与晕结构退耦的现象.对变形核晕结构的理论研究,需要自洽的微观模型计算,同时考虑形变,对关联、晕结构、连续谱耦合的综合影响,进而研究变形核形成晕结构的机制.

为了描述变形的弱束缚核,发展了坐标空间形变Hartree-Fock-Bogoliubov模型.图1是基于二维的坐标空间HFB-AX计算的形变晕结构^[19].对比可以看出基于谐振子基HO的计算不能描述晕结构,基于改进的谐振子基THO计算可以显著地改善对晕的描述,但是与我们的坐标空间计算仍有较大差距.此外对于晕的描述,大尺度坐标空间计算很关键,大尺度计算可以很精确地离散化连续谱.但是大尺度坐标空间计算量非常大,为此基于天河一号超级计算机发展了MPI+OpenMP的混合并行计算^[20].通过系统计算预言了 ^{38}Ne 中存在的“蛋形晕结构”.在这种图2展示的奇特蛋形晕结构中,核芯部分是球形,核芯中的质子和中子都是球形分布,而晕结构是长椭形变,由核芯之外的两个中子构成,形变主要由外层的中子造成.这是首次通过自洽的微观计算得到这种由于核芯-晕形变去耦合效应导致的奇异结构.得到这样的奇异结构得益于坐标空间对于形变效应、连续谱耦合效应、对关联、表面弥散的精确处理.对关联密度分布也表现出核芯-晕退耦效应,形成中子对的“蛋形晕”结构,对密度晕结构的形变和空间分布都比中子晕要大.为了研究形变晕结构的产生机制,分析了准粒子谱的占据数情况^[20].在图3中,分析了

图1 (网络版彩色)HFB-HO, HFB-THO和HFB-AX计算得到的 ^{42}Mg 的中子密度在轴坐标分布, 其中实线为长轴 z 方向, 虚线为短轴 r 方向
Figure 1 (Color online) Neutron density profiles of ^{42}Mg calculated by HFB-HO, HFB-THO and HFB-AX. Density distributions are displayed along the cylindrical coordinates: z -axis (solid line) and r -axis (dashed line), respectively

^{38}Ne , ^{40}Mg 和 ^{44}Mg 的 $\Omega=1/2$ 中子准粒子能谱. 为了明确区分准粒子共振谱和连续谱的贡献, 分别使用了27和30 fm两种不同的坐标空间. 根据实稳定法, 连续谱随着空间大小变化而变化的是非共振连续谱, 随坐标空间大小不变的为准粒子共振态. ^{38}Ne 和 ^{44}Mg 有显著的非共振连续谱的贡献, ^{38}Ne 和 ^{44}Mg 的形变晕结构和表面形变在很大程度上也是由低能非共振连续谱贡献的. ^{40}Mg 与 ^{38}Ne 有相同的中子幻数 $N=28$, ^{40}Mg 中准粒子谱有一个很宽的共振态 $1/2[321]$, 但该共振对晕结构没有明显贡献, ^{38}Ne 中有显著的非共振连续谱贡献. ^{44}Mg 有与 ^{40}Mg 相似的 $\Omega=1/2$ 中子准粒子谱, 但是低能连续谱的贡献更多. 可以推论出 ^{38}Ne 中的蛋形晕结构是由于 P 波散射进入连续谱态. 我们发现共振态离阈值的距离或者说非共振相空间越大越

有利于晕形成^[20]. 而重核区这种相空间分离由于能级密度大而变小, 所以预言重核区的形变晕结构不显著. 在球形计算时中重核区还可能存在巨晕结构^[21]. 目前实验室发现的形变晕核都是奇中子核, 如 ^{11}Be ^[22], ^{31}Ne ^[23], ^{37}Mg ^[24]等. 对于奇中子晕的描述, 理论上需要考虑准粒子堵塞效率. 我们计算表面不考虑堵塞效应就不能得到 ^{37}Mg 的形变晕结构^[25]. 这种堵塞计算自洽考虑了价核子的自旋极化效应, 对密度分布出现了有意思的小幅度振荡, 这与冷原子体系中的Larkin-Ovchinnikov超流相类似^[26].

2 弱束缚核的集体激发性质

巨共振是原子核的主要集体激发模式, 可以描述为对外场的一种小幅度动力学响应. 不同类型的巨共振涉及不同的多极电磁跃迁算符, 同位旋算符和自旋算符. 弱束缚核由于晕结构的出现, 可能会出现稳定核所没有的新集体激发模式. 其中晕/皮结构与核芯之间的相对运动形成的低能区小幅度矮共振(pygmy resonances)是一个令人感兴趣的问题. 其中单极激发模式, 又称为呼吸模式, 与核物质的不可压缩系数紧密相关^[27]. 由于晕结构密度稀薄, 相对核心很容易被压缩, 所以会出现额外的软单极激发模式. 实验上更容易研究晕与核心的相对运动形成低能偶极激发模式. 这些低能矮共振或软共振模式对我们研究极端条件下的核物质性质、状态方程、对称能、中子皮厚度、中子星结构等很有作用, 这些软共振还可以增加天体环境下的中子俘获率^[28,29]. 实验上观测到丰中子Sn同位素有很明显的Pygmy共振^[30], 但是这在多大程度上是中子皮与核心之间的集体运

图2 (网络版彩色)(a) HFB-AX计算的 ^{38}Ne 中子密度分布; (b) 中子对关联密度分布, 核芯与晕的形状用虚线表示

Figure 2 (Color online) (a) The HFB-AX calculated neutron density distribution; (b) the neutron pairing density distribution of ^{38}Ne . The shapes of the core and halo are guided by dashed lines

图3 (网络版彩色) ^{38}Ne , ^{40}Mg , ^{44}Mg 的 $\Omega=1/2$ 中子准粒子态占据数分布. 实线和虚线分别为坐标空间大小为 27 和 30 fm 的计算结果. 连续谱从 $-\lambda_n$ 能量开始出现, 其中 λ_n 为中子费米能

Figure 3 (Color online) The occupation numbers of $\Omega=1/2$ neutron quasiparticle states of ^{38}Ne , ^{40}Mg , ^{44}Mg . The solid lines and dashed lines show the results with box sizes of 27 and 30 fm, respectively. The continuum thresholds $-\lambda_n$ are given, where λ_n is the neutron Fermi surface energy

动还存在争论. Nakatsukasa 研究组^[31]系统研究了 $8 \leq Z \leq 40$ 的原子核的 Pygmy 共振, 其结果表明 Pygmy 共振强度主要取决于外层价核子的轨道, 但没有讨论连续谱效应影响. Reinhard 和 Nazarewicz^[32]的文章指出中子皮厚度对偶极化率更敏感而对 Pygmy 共振强度并不敏感. 除了偶极跃迁, 多极跃迁模式也十分有意思. 特别是对于形变的弱束缚核, 中子形变往往比质子形变小, 预示着反常的同位旋矢量四极激发模式^[16], 这也是一个很值得研究的问题. 同时对相互作用在奇异核的低能偶极激发中也扮演了重要角色^[33].

描述原子核小幅度集体运动的理论模型是准粒子无归相位近似 QRPA^[34]. 在连续谱能量密度泛函理论的框架下, 假设有一个很弱的外场, 近似考虑原子核对外场的线性响应, 通过所有准粒子激发的相干叠加来描述原子核的集体激发. 关键的问题是自治描述形变、晕结构、连续谱、对关联、集体激发^[35]. 但是由于 QRPA 需要处理巨量的矩阵元, 大多数的自治 QRPA 计算都被限制在球形核^[36,37]. 直到基于超级计算, 形变的 Hartree-Fock-Bogoliubov+QRPA 计算才得以实现^[38]. 最近 FAM (finite amplitude method)-QRPA 方法^[39]通过迭代求解 QRPA 方程而大大降低计算量. FAM-QRPA 可以使得系统性的连续谱形变 QRPA 计算成为可能, 这对分析物理和实验都非常有用. FAM-QRPA 还可以用于计算 β 衰变和 $\beta\beta$ 衰变, 其中寻找无中微子的双 β 衰变已经是一个十分受关注的跨学科问题^[40]. 首先基于形变谐振子基空间的 FAM-QRPA 模型计算于 2011 年实现^[41], 但谐振子基展开法并不能很好地描述弱束缚核. 基于形变坐标空间 HFB 计算, 首次发展了坐标空间的 FAM-QRPA 描述弱束缚形变核的集体激发性质^[35].

图4中展示了计算靠近滴线的 Mg 同位素的同位旋标量单极共振强度分布. 可以看到无论是 SLy4 相互作用还是 SKM* 相互作用计算, 在向滴线靠近时 4 MeV 附近出现的低能共振峰都会逐渐增强. 这样的低能模式在文献[42]的计算中已有一些迹象. 计算结果与逐渐增加的表面对密度分布一致, 说明计算结果与对作用形式有关. 同时在 15 和 23 MeV 处的巨单极共振由于形变影响而劈裂, 这种形变效应在其他多级激发模式中也很普遍. 计算表明 23 MeV 附近的峰非常弱, 并在向滴线靠近的过程中逐渐消失. 对于 Mg 同位素的系统性计算可以看出低能的集体单极共振模式有两种不同的机制. 在 4 MeV 附近的软单极共振有较少的集体激发机制, 主要由表面的对密度晕结构产生, 主要成分是 $\Omega=1/2^-$ 的低能非共振连续谱的贡献, 集体性不如巨共振. 这种激发模式的强度和集体性在靠近中子滴线时逐步增强. 而第二个出现在 9 MeV 附近的共振具有更多集体激发机制. 我们的坐标空间 FAM-QRPA 对形变弱束缚核的新激发模式的研究提供了可靠的工具. 除单极激发外, 对任意多极激发的计算更复杂. 此外基于三维坐标空间的 FAM-QRPA 计算还没有实现, 将基于 MADNESS-HFB 发展为三维坐标空间的 FAM-QRPA^[7], 这样可以打破对称性的限制实现组态混合, 可以更好地研究寻找弱束缚核的奇特激发模式.

3 结论与展望

远离稳定线的弱束缚原子核的研究无疑是目前核物理一个重要前沿领域. 大尺度坐标空间计算采用“离散化”的方法求解 Hartree-Fock-Bogoliubov 方程, 对晕结构、形变、对关联、连续谱进行统一自治精确

图4 (网络版彩色)基于HFB-AX的FAM-QRPA计算的Mg同位素链巨单极同位旋共振强度分布: (a) SLy4 相互作用; (b) SkM*相互作用

Figure 4 (Color online) Isoscalar monopole strengths in Mg isotopes calculated with FAM-QRPA method based on HFB-AX, using SLy4 (a) and SkM* (b) effective interactions

的描述,对形变弱束缚核的研究有独特优势.具体来说我们系统研究了形变晕核的基态结构、形成机制、对关联密度、连续谱效应,以及其低能集体激发模式.

在模型计算方面,特别是形变弱束缚核的研究一直是一个难点.由于连续谱的处理计算量巨大,我们还研究了超流体系的二阶Thomas-Fermi近似^[43],得到了理想的计算结果.我们正在发展三维坐标空间MADNESS-HFB和FAM-QRPA模型来描述三维形变弱束缚核的基态、激发态和跃迁特性.三维坐标空间计算量巨大,为此我们采用多分辨小波分析^[44],计算格点非均匀并且可以自适应调整,这与图像压缩比较类似,这也是该方法首次应用于核物理研究^[7].MADNESS采用了复杂的并行计算技术,波函数基于数图分配在全局内存,优化了节点通信和排队处理.目前该方法也已经被用于冷原子体系和中子星结构的研究^[45].基于多小波方法的优势,计划进一步发展MADNESS进行激发态和时间相关的动

力学研究.

当然弱束缚核的研究还需要进一步的理论创新,还可能有很多未知的新现象等待实验去探索.首先弱束缚核的研究对有效核子相互作用和对关联作用的研究提供了很大的机遇.比如三体力、张量力的作用在滴线核区的有显著影响^[46].对关联对晕的形成和激发也有很大影响,但是弱束缚核中对关联的作用形式还不确定^[47].目前的理论研究还存在对相互作用和参数的依赖.其次是弱束缚效应是多体系统中的少体物理问题,传统的平均场壳模型和单粒子轨道的图像已经不适用.最近的格点有效场论方法有望解决对集团结构和晕结构的描述问题^[48].FRIB在2022年建成出束后将为弱束缚核的研究提供极大机遇.理论上超级计算机的发展也为我们探索弱束缚核的新形态、多体关联和高阶效应提供更好的条件.弱束缚核作为一个开放的量子体系,连续谱对激发的影响,阈值效应等有广泛的交叉学科兴趣.

致谢 成文过程中北京大学许甫荣教授给予了有益的讨论,谨此致谢.

参考文献

- 1 Erler J, Birge N, Kortelainen M, et al. The limits of the nuclear landscape. *Nature*, 2012, 486: 509–512
- 2 Yang J C, Xia J W, Xiao G Q, et al. High Intensity Heavy Ion Accelerator Facility (HIAF) in China. *Nucl Instr Meth B*, 2013, 317: 263–265
- 3 Pei J C, Kruppa A T, Nazarewicz W. Quasiparticle continuum and resonances in the Hartree-Fock-Bogoliubov theory. *Phys Rev C*, 2011, 84: 024311
- 4 Stoitsov M V, Dobaczewski J, Nazarewicz W, et al. Axially deformed solution of the Skyrme-Hartree-Fock-Bogolyubov equations using the transformed harmonic oscillator basis. The program HFBTHO. *Comput Phys Commun*, 2005, 167: 43–63

- 5 Dobaczewski J, Flocard H, Treiner J. Hartree-Fock-Bogolyubov description of nuclei near the neutron-drip line. *Nucl Phys A*, 1984, 422: 103–109
- 6 Pei J C, Stoitsov M V, Fann G I, et al. Deformed coordinate-space Hartree-Fock-Bogoliubov approach to weakly bound nuclei and large deformations. *Phys Rev C*, 2008, 78: 064306
- 7 Pei J C, Fann G I, Harrison R J, et al. Adaptive multi-resolution 3D Hartree-Fock-Bogoliubov solver for nuclear structure. *Phys Rev C*, 2014, 90: 024317
- 8 Tanihata I, Hamagaki H, Hashimoto O, et al. Measurements of interaction cross sections and nuclear radii in the light p-shell region. *Phys Rev Lett*, 1985, 55: 2676
- 9 Tanihata I. Neutron halo nuclei. *J Phys G*, 1996, 22: 157–198
- 10 Ren Z Z, Carsoiu F. Further studies on Halo nuclei ^{11}Li , ^{14}Be , and ^{37}B (in Chinese). *High Energy Phys Nucl Phys*, 1995, 19: 562–566 [任中洲, Carsoiu F. 晕核 ^{11}Li , ^{14}Be 和 ^{37}B 的进一步研究. *高能物理与核物理*, 1995, 19: 562–566]
- 11 Dobaczewski J, Nazarewicz W, Werner T R, et al. Mean-field description of ground-state properties of drip-line nuclei: Pairing and continuum effects. *Phys Rev C*, 1996, 53: 2809
- 12 Bannaceur K, Dobaczewski J, Ploszajczak M. Pairing anti-halo effect. *Phys Lett B*, 2000, 496: 154–160
- 13 Hagino K, Sagawa H, Carbonell J, et al. Coexistence of BCS-and BEC-like pair structures in halo nuclei. *Phys Rev Lett*, 2007, 99: 022506
- 14 Bertsch G F, Esbensen H. Pair correlations near the neutron drip line. *Ann Phys*, 1991, 209: 327–363
- 15 Spyrou A, Kohley Z, Baumann T, et al. First observation of ground state dineutron decay: ^{16}Be . *Phys Rev Lett*, 2012, 108: 102501
- 16 Misu T, Nazarewicz W, Aberg S. Deformed nuclear halos. *Nucl Phys A*, 1997, 614: 44–70
- 17 Nunes F M. Valence pairing, core deformation and the development of two-neutron halos. *Nucl Phys A*, 2005, 757: 349–359
- 18 Zhou S G, Meng J, Ring P, et al. Neutron halo in deformed nuclei. *Phys Rev C*, 2010, 82: 011301(R)
- 19 Zhang Y N, Pei J C, Xu F R. Hartree-Fock-Bogoliubov descriptions of deformed weakly bound nuclei in large coordinate spaces. *Phys Rev C*, 2013, 88: 054305
- 20 Pei J C, Zhang Y N, Xu F R. Evolution of surface deformations of weakly bound nuclei in continuum. *Phys Rev C*, 2013, 87: 051302
- 21 Meng J, Zhou S G. Halos in medium-heavy and heavy nuclei with covariant density functional theory in continuum. *J Phys G*, 2015, 42: 093101
- 22 Fukuda M, Ichihara T, Inabe N, et al. Neutron halo in ^{11}Be studied via reaction cross sections. *Phys Lett B*, 1991, 268: 339–344
- 23 Nakamura T, Kobayashi N, Kondo Y, et al. Halo structure of the island of inversion nucleus ^{31}Ne . *Phys Rev Lett*, 2009, 103: 262501
- 24 Kobayashi N, Nakamura T, Kondo Y, et al. Observation of a p-wave one-neutron halo configuration in ^{37}Mg . *Phys Rev Lett*, 2007, 99: 162503
- 25 Xiong X Y, Pei J C, Zhang Y N, et al. Study of weakly-bound odd—A nuclei with quasiparticle blocking. *Chin Phys C*, 2016, 40: 24101
- 26 Pei J C, Dukelsky J, Nazarewicz W. Competition between normal superfluidity and larkin-ovchinnikov phases of polarized Fermi gases in elongated traps. *Phys Rev A*, 2010, 82: 021603
- 27 Li T, Grag U, Liu Y, et al. Isotopic dependence of the giant monopole resonance in the even—A $^{112-124}\text{Sn}$ isotopes and the asymmetry term in nuclear incompressibility. *Phys Rev Lett*, 2007, 99: 162503
- 28 Piekarewicz J. Pygmy dipole resonance as a constraint on the neutron skin of heavy nuclei. *Phys Rev C*, 2006, 73: 044325
- 29 Klimkiewicz A, Paar N, Adrich P, et al. Nuclear symmetry energy and neutron skins derived from pygmy dipole resonances. *Phys Rev C*, 2007, 76: 051603
- 30 Adrich P, Klimkiewicz A, Fallot M, et al. Evidence for pygmy and giant dipole resonances in ^{130}Sn and ^{132}Sn . *Phys Rev Lett*, 2005, 95: 132501
- 31 Inakura T, Nakatsukasa T, Yabana K. Emergence of pygmy dipole resonances: Magic numbers and neutron skins. *Phys Rev C*, 2011, 84: 021302(R)
- 32 Reinhard P G, Nazarewicz W. The information content of a new observable: The case of the nuclear neutron skin. *Phys Rev C*, 2010, 81: 051303
- 33 Matsuo M, Mizuyama K, Serizawa Y. Di-neutron correlation and soft dipole excitation in medium mass neutron-rich nuclei near drip line. *Phys Rev C*, 2005, 71: 064326
- 34 Ring P, Schuck P. *The Nuclear Many-Body Problem*. Berlin: Springer-Verlag, 2014
- 35 Pei J C, Kortelainen M, Zhang Y N, et al. Emergent soft monopole modes in weakly bound deformed nuclei. *Phys Rev C*, 2014, 90: 051304(R)
- 36 Cao L G, Ma Z Y. Low-lying dipole modes in $^{26,28}\text{Ne}$ in the quasiparticle relativistic random phase approximation. *Phys Rev C*, 2005, 71: 034305

- 37 Bai C L, Zhang H Q, Sagawa H, et al. Effect of the tensor force on the charge exchange spin-dipole excitations of ^{208}Pb . *Phys Rev Lett*, 2010, 105: 072501
- 38 Terasaki J, Engel J. Self-consistent Skyrme quasiparticle random-phase approximation for use in axially symmetric nuclei of arbitrary mass. *Phys Rev C*, 2010, 82: 034326
- 39 Avogadro P, Nakatsukasa T. Finite amplitude method for the quasiparticle random-phase approximation. *Phys Rev C*, 2011, 84: 014314
- 40 Engel J, Šimkovic F, Vogel P. Chiral two-body currents and neutrinoless double- β decay in the quasiparticle random-phase approximation. *Phys Rev C*, 2014, 89: 064308
- 41 Stoitsov M, Kortelainen M, Nakatsukasa T, et al. Monopole strength function of deformed superfluid nuclei. *Phys Rev C*, 2011, 84: 041305
- 42 Yoshida K, Giai N V. Deformed quasiparticle-random-phase approximation for neutron-rich nuclei using the Skyrme energy density functional. *Phys Rev C*, 2008, 78: 064316
- 43 Pei J C, Na F, Zhang Y N, et al. Generalized second-order Thomas-Fermi method for superfluid Fermi systems. *Phys Rev C*, 2015, 92: 064316
- 44 Harrison R, Belykin G, Bischoff F A, et al. Madness: A multiresolution, adaptive numerical environment for scientific simulation. 2015, arXiv: 1507.01888
- 45 Schuetrumpf B, Nazarewicz W. Twist-averaged boundary conditions for nuclear pasta Hartree-Fock calculations. *Phys Rev C*, 2015, 92: 045806
- 46 Otsuka T, Suzuki T. Three-body force and neutron-rich exotic nuclei. *Few-Body Syst*, 2013, 54: 891–896
- 47 Chen W J, Bertulani C A, Xu F R, et al. Odd-even mass staggering with Skyrme-Hartree-Fock-Bogoliubov theory. *Phys Rev C*, 2015, 91: 047303
- 48 Epelbaum E, Krebs H, Lee D, et al. Lattice effective field theory calculations for $A=3, 4, 6, 12$ nuclei. *Phys Rev Lett*, 2010, 104: 142501

Weakly bound nuclei: Exotic ground state properties and collective excitations

ZHANG YiNu, ZHU Yi, WANG Kai & PEI JunChen

School of Physics and State Key Laboratory of Nuclear Physics and Technology, Peking University, Beijing 100871, China

Weakly bound nuclei are open quantum many-body systems and can have exotic structures and dynamics in contrast to our knowledges of stable nuclei. Currently the related studies are among the central topics in nuclear physics and are important for further improvements of nuclear theory and understandings of element enrichment processes in astrophysical environments. Since the improvements of intensity and quality of radioactive nuclear beams are very difficult, theoretical studies will be very helpful for planning experiments and the interpretation of results. Here we review recent developments of continuum density functional theory and studies of weakly bound nuclei. The theoretical challenge is to self-consistently describe the weak-binding effects, exotic shapes, continuum effects and dynamics together. To this end, our main work is to solve the Hartree-Fock-Bogoliubov equation in non-spherical coordinate-spaces and then to describe the ground state properties as well as collective excitations of weakly bound nuclei. In the 2D lattice, we solved the HFB equation with the B-spline techniques. More recently, we solved the HFB equation in the 3D coordinate-space with the adaptive multi-resolution multi-wavelet techniques, which is novel and much more efficient. Based on our calculations, we discussed the exotic egg-like deformed halo structures, the core-halo deformation decoupling, and the role of continuum contributions. We also see pairing density distributions have remarkable deformed halo structures. The deformed cores are not so favorable for the formation of $2n$ -halos, in particular heavy $2n$ -halos. The non-resonant continuum rather than the resonant continuum is mainly responsible for halo features. With the quasiparticle blocking calculations, we also studied the deformed $1n$ -halo nuclei, in which the pairing density is unusual due to the spin polarization. In addition, we developed the deformed continuum FAM-QRPA calculations in coordinate spaces and studied the emergent soft monopole collective excitations. The soft collective modes are unique in weakly bound nuclei and are useful for studies of nuclear properties in extreme conditions. Compared to the conventional QRPA diagonalization method, the FAM-QRPA solves the QRPA equation iteratively and is more efficient. Otherwise the deformed QRPA calculations with continuum would be very challenging. We see the pairing density halos and non-resonant continuum play an important role in these soft collective excitations. Our studies involved large coordinate-space calculations in Tianhe supercomputers to take into account shape deformations, large spatial extensions and continuum spectra. Otherwise, calculations within small coordinate spaces would produce a coarse continuum discretization and even false resonance peaks. Finally we give some perspectives on studies of weakly bound nuclei and our plans. Since weakly bound nuclei exhibit few-body physics in many-body systems, the conventional shell-structure picture breaks down in this respect. Therefore new many-body techniques, time-dependent 3D dynamics and improved effective interactions are very desirable. The studies of weakly bound nuclei as open quantum systems that involve threshold effects and continuum contributions can have broad interdisciplinary interests.

halo nuclei, continuum, collective excitation, energy density functional theory

doi: 10.1360/N972016-00257