科学通报 2021 年 第 66 卷 第 27 期: 3561 ~ 3569
高精度核物理实验及相关物理问题研究专题 进 展
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS

基于形变相对论连续谱Hartree-Bogoliubov理论构建高精度原子核质量表

张开元, 潘琮, 张双全, 孟杰*

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: mengj@pku.edu.cn

2020-12-15 收稿, 2021-01-14 修回, 2021-01-18 接受, 2021-01-19 网络版发表

国家重点研发计划(2018YFA0404400, 2017YFE0116700)、国家自然科学基金(11935003, 11875075, 11975031, 12070131001)和北京大学核物理与核技术国家重点实验室项目(NPT2020ZZ01)资助

摘要 质量是原子核最基本的物理量之一, 是理解核子间相互作用、揭示壳结构演化和确定滴线位置的关键, 是研究核反应和核衰变的基本信息, 同时也是探索元素起源等问题必需的核物理输入量, 对粒子物理与核物理、天体物理和宇宙学等学科至关重要. 尽管短寿命原子核质量的测量工作已经取得很大进展, 但是在可预见的将来, 大部分远离稳定谷的奇特原子核质量仍依赖理论模型预言和计算. 本文介绍了原子核质量模型的重要发展历程、相对论密度泛函理论描述原子核现象的成功、基于相对论连续谱Hartree-Bogoliubov理论构建的目前唯一考虑连续谱效应的原子核质量表, 以及拟基于形变相对论连续谱Hartree-Bogoliubov理论建立高精度原子核质量表的最新进展和展望.

关键词 原子核质量, 形变, 连续谱, 相对论密度泛函理论

原子核是原子的致密核心, 尽管其空间尺度不及原子的万分之一, 它的质量却占整个原子质量的99.9%以上, 是可见世界的主要质量来源. 原子核与组成它的组元之间的质量差, 即质量亏损, 为包括太阳在内的恒星燃烧提供能量, 为地球提供能源[1]. 核物理中, 质量作为原子核最基本的物理量之一, 是理解核子间相互作用[2]、揭示原子核壳结构演化[3]、确定原子核滴线位置与核素版图极限[4]的关键, 并且为研究核反应和核衰变提供最基本的信息. 此外, 原子核质量是天体物理和宇宙学中模拟天体核合成过程[5]、探索元素起源[6]等问题必需的核物理输入量. 由于核素图中远离稳定谷的大部分丰中子原子核的质量和衰变性质尚不能确定, 导致重元素的起源仍然是一个待解之谜, 并被列为物理学中11个最大的未解问题之一[7].

原子核质量的精确测量一直是核物理研究的重要前沿[8]. 目前, 实验上已合成了约3000种原子核[9], 测量了约2500种原子核的质量[10,11]. 为了研究不稳定原子核, 探索原子核存在的极限, 中国、美国、欧洲、日本和韩国等国家和地区都投入巨资, 建造和升级新一代的稀有同位素大科学装置, 包括兰州重离子加速器冷却储存环工程[12]、北京串列加速器升级工程[13]、惠州强流重离子加速器装置[14]、日本理化学研究所(RIkagaku KENkyusho/Institute of Physical and Chemical Research, RIKEN)的放射性离子束工厂[15]、美国的稀有同位素束流装置[16]、德国重离子物理研究所的反质子与离子研究装置[17]和韩国稀有同位素科学工程[18]等. 这些大科学装置的建造和升级必将促进核物理与核天体物理的发展, 为研究元素起源和宇宙演化提供

引用格式: 张开元, 潘琮, 张双全, 等. 基于形变相对论连续谱Hartree-Bogoliubov理论构建高精度原子核质量表. 科学通报, 2021, 66: 3561–3569
Zhang K Y, Pan C, Zhang S Q, et al. Towards a high-precision nuclear mass table with deformed relativistic Hartree-Bogoliubov theory in continuum (in Chinese). Chin Sci Bull, 2021, 66: 3561–3569, doi: 10.1360/TB-2020-1601

© 2021《中国科学》杂志社

原子核质量、衰变寿命、核反应截面等关键数据.

目前, 在核素图的缺中子一侧, 93号Np元素及以下的质子滴线已被基本确定[19,20]. 在丰中子一侧, 中子滴线位置仅被确定至10号Ne元素[21]. 在可预见的未来, 大部分丰中子原子核仍然无法在实验室产生. 因此, 必须利用原子核理论模型对原子核质量等物理量进行预言.

1 原子核质量表发展简介

1935年, von Weizsäcker[22]提出了描述原子核质量的液滴模型, 该模型考虑了体积能、表面能、库仑能、对称能和对能, 相应的各项参数通过拟合已知的原子核质量实验数据来确定. 该模型能够给出原子核质量的整体趋势, 但是没有考虑壳效应. 1967年, Strutinsky[23]提出壳修正方法, 该方法从独立粒子壳模型的单粒子能级中提取壳修正能量, 结合宏观液滴模型, 给出了发展原子核宏观-微观模型的思想. 1995年, Möller等人[24]基于液滴模型和Strutinsky壳修正方法, 发展了有限力程液滴模型(finite-range droplet model, FRDM). 通过对当时1654个已知原子核的质量和28个裂变位垒高度的实验值拟合模型中的38个参数, FRDM给出的质量描述精度为699 keV.

Wang等人[25,26]在宏观-微观模型的基础上, 利用Skyrme能量密度泛函考虑同位旋效应、镜像核约束和表面弥散效应等修正, 发展了系列宏观-微观Weizsäcker-Skyrme模型. 考虑了不稳定原子核的表面弥散修正的Weizsäcker-Skyrme 4(WS4)模型[26], 包含18个参数, 与2353个原子核的质量测量值[27]的均方根偏差为298 keV, 是目前精度最高的原子核质量模型.

由于宏观-微观质量模型参数较多, 很难保证宏观部分与微观部分的自洽, 对未知原子核质量的预言能力有待进一步考察.

通过利用质量模型预言与实验值的偏差进行训练, 机器学习方法如径向基函数方法[28]和贝叶斯神经网络方法[29]等, 可以改善原子核质量模型的精度至大约200 keV. Niu等人[30]将傅里叶谱分析与径向基函数方法结合, 探讨了将原子核质量模型的精度提高至100 keV的可能途径. 但是, 机器学习方法缺乏对远离已知质量区原子核质量的预言能力[31], 如Wu等人[32]发现, 径向基函数和核脊回归等机器学习方法的可靠外推距离不超过4个核素.

为了对远离已知区域的原子核质量给出可靠预言, 有必要基于微观的相对论和非相对论原子核密度泛函理论发展原子核质量模型.

在非相对论框架下, 已经建立了一系列的原子核质量表. 比如, 基于Skyrme力的HFB-27*质量表, 为了得到较高的精度, 在集体修正能量项和唯象Wigner项中引入了较多的自由参数, 通过拟合2353个原子核质量实验值, 确定Skyrme能量密度泛函、对相互作用、集体修正、唯象Wigner项等中的共24个参数, 描述精度为512 keV[33]; 基于Gogny力的能量密度泛函D1M, 通过拟合2149个原子核质量实验值确定14个参数, 利用集体哈密顿量方法考虑动力学关联能, 描述精度为798 keV[34].

在相对论框架下, 对原子核质量的描述在过去的20年间也取得了诸多进展[35~41]. 1999年, 基于非线性介子交换的NL3密度泛函, 利用Bardeen-Cooper-Schrieffer (BCS)方法考虑对关联, 计算了质子数10~98的1315个偶偶核的基态性质, 其中质量与已有实验值的均方根偏差为2.6 MeV[35]. 2005年, 基于A-依赖的介子交换TMA密度泛函, 利用态依赖的BCS方法考虑对关联, 系统计算了质子数8~100的6969个原子核的基态性质, 其中质量与已有实验值的均方根偏差为2.1 MeV[36]. 2013年, 基于点耦合PC-PK1密度泛函, 利用BCS方法考虑对关联, 计算了质子数大于8的原子核质量, 与实验值的均方根偏差为1.42 MeV[37]. 在此基础上, 利用推转近似考虑转动和四极振动修正能, 对质子数8~108的575个偶偶核, PC-PK1密度泛函对质量描述精度达到1.24 MeV[38], 进一步利用集体哈密顿量方法改善动力学关联能, 精度可提升至1.14 MeV[39]. 此外, 文献[40]通过对所有已知质量实验值拟合密度依赖形式的介子交换泛函、对相互作用和转动修正能中的共14或17个参数, 给出了两个质量模型DD-MEB1和DD-MEB2, 对原子核质量描述的精度分别为1.17和1.15 MeV.

相比于非相对论密度泛函, 相对论密度泛函由于考虑了洛伦兹协变性, 可以在参数相对较少的情况下对原子核质量给出可靠的描述, 并且还有更大的改善空间.

2 相对论密度泛函理论

密度泛函理论的基础是Hohenberg-Kohn定理[42]. 它指出, 一个外场中的多粒子体系的基态能量能够被写成体系密度的一个普适的泛函形式. 密度泛函理论的实用性取决于所构建的密度泛函是否准确. Kohn和Sham[43]提供了构建能量密度泛函的一个实用方法. 该

方法将相互作用多体系统映射到虚构的无相互作用系统，并假设该无相互作用系统的密度等于真实的基态密度. 对该无相互作用系统应用Hohenberg-Kohn定理，可以导出一个可以自洽求解的单粒子运动方程. 形式上，Kohn-Sham密度泛函理论的求解与Hartree-Fock方法类似. 但是，它仅包括定域项，避免了处理复杂的非定域项. Hartree-Fock理论中复杂的积分微分方程被简化为简单的微分方程，即Kohn-Sham方程. 密度泛函理论广泛地应用于化学、材料科学、凝聚态物理等领域. 在原子核物理领域，密度泛函理论适用于描述核素图中几乎所有原子核的基态性质，是研究稳定原子核和远离稳定谷的奇特原子核的重要工具[5,44~48].

原子核的相对论密度泛函理论可以追溯到1974年Walecka[49]基于有效拉氏量发展的相对论平均场理论. 相对论密度泛函理论具有如下优点: (1) 在相对论密度泛函理论中，核子由狄拉克旋量描述，自动包括自旋自由度，给出的自旋轨道相互作用势随同位旋的变化与实验结果相吻合[50]，自然解释了原子核单粒子谱中隐藏的赝自旋对称性和反核子谱中的自旋对称性[51~53]; (2) 由于洛伦兹对称性，矢量势的类空分量与类时分量具有相同的耦合常数，相对论密度泛函理论可以自洽处理奇时间场，这对描述与原子核转动相关的谱学性质尤为重要[37,47]; (3) 标量密度和矢量密度相互竞争给出核物质新的饱和机制; (4) 基于裸相互作用的相对论Brueckner-Hartree-Fock方法，与非相对论方法相比，能够给出核物质与有限核更好的描述[54]. 由于以上优点，相对论密度泛函理论在描述核物理现象等方面取得了成功，已经成为核结构理论研究中最重要的微观方法之一，相关的综述文献可以参考文献[37,45,47,48,52]. 关于相对论密度泛函理论的系统介绍，可以参见文献[5].

在现有的相对论密度泛函中，PC-PK1[55]密度泛函提供了对原子核质量最好的描述[39]. 对于575个有实验数据的偶偶核，图1给出了PC-PK1计算的原子核质量和实验数据[27]的比较，精度达1.14 MeV. 其中，理论计算结果包括采用集体哈密顿量方法[56,57]计算的动力学关联能. PC-PK1密度泛函基于球对称近似，正确考虑了原子核性质的同位旋依赖性，很好地描述了球形原子核的质量. 对于形变原子核，进一步考虑动力学关联能，改善了对原子核质量的描述. 因此，PC-PK1密度泛函对原子核质量的描述非常成功. 与之相比，很多密度泛函给出的原子核质量与实验值的偏差具有很强的同位旋依赖行为，因此，考虑动力学关联也不能在整体上改善对原子核质量的描述[55,58]. 除了基态性质，PC-PK1密度泛函还被成功地应用于描述原子核的激发态，例如磁转动[59]、反磁转动[60]和手征转动[61]等. 文献[62]基于PC-PK1在三维格点空间发展了不包含任何对称性限制的含时相对论密度泛函理论，为研究原子核的动力学性质提供了新的途径.

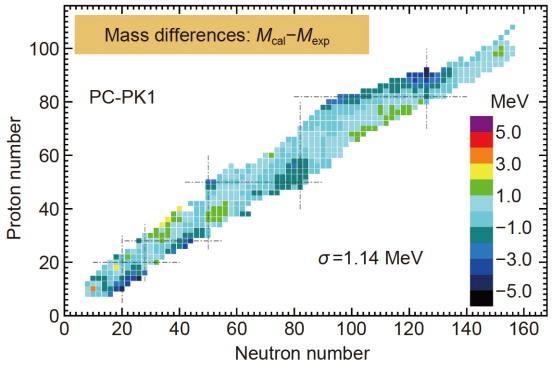


图 1 (网络版彩色)相对论密度泛函 PC-PK1 计算的质量与 575 个偶偶核实验数据的比较. 其中，理论计算利用集体哈密顿量方法考虑了动力学关联能. σ值表示理论预测值和实验值之间的均方根偏差. 图片取自文献[39]

Figure 1 (Color online) Comparison between the relativistic density functional PC-PK1 calculated masses and the data for 575 even-even nuclei. The dynamical correlation energies are taken into account by the collective Hamiltonian method in the theoretical calculations. The σ value represents the root-mean-square deviation between the theoretical predictions and data. Taken from Ref. [39]

3 原子核的相对论连续谱质量表

正确预言远离稳定谷的奇特原子核性质，对确定原子核滴线位置[41]和模拟天体核过程[63,64]等至关重要. 在奇特原子核中，费米面接近连续谱阈值，原子核的对关联效应能够将弱束缚的价核子散射到连续谱，形成密度分布弥散的量子体系. 因此，为了正确描述奇特原子核，需要恰当地处理连续谱以及核子间的对关联效应[48]. 传统的BCS方法虽然可以很好地处理稳定原子核中的对关联，但是由于非定域的连续谱的存在，对弱束缚的奇特原子核并不适用[65]. Bogoliubov方法通过准粒子变换，将包括对相互作用的体系转化为彼此独立的准粒子体系，恰当处理对关联，正确描述奇特原子核[5,65~67].

基于相对论密度泛函理论，Meng和Ring[68]利用Bogoliubov准粒子变换考虑原子核的对关联效应，在坐标空间求解球形相对论Hartree-Bogoliubov方程，发展了相对论连续谱Hartree-Bogoliubov(relativistic continuum Har-

tree-Bogoliubov, RCHB)理论. 该理论正确处理对关联和连续谱, 揭示了连续谱对晕核的贡献, 给出了晕核的微观自洽描述[68], 预言了巨晕现象[69~71], 再现了Na同位素中的相互作用截面[72]和C, N, O, F同位素中的电荷变化截面[73], 解释了奇特原子核中的赝自旋对称性[74,75], 并且预言了原子核势垒表面弥散的同位旋依赖性[76]、超重核中的新幻数[77]和超核中的中子晕[78]等.

文献[41]基于RCHB理论, 采用密度泛函PC-PK1, 对8≤Z≤120的原子核进行了大规模数值计算, 系统研究了原子核的质量, 构建了迄今唯一考虑连续谱效应的质量表, 预言了9035个束缚的原子核, 并研究了连续谱对原子核滴线位置的影响. RCHB理论预言的质子滴线与其他质量表的结果十分接近, 然而中子滴线与其他质量表的结果存在显著差异. 对于中子滴线附近的原子核, 由于中子费米面非常接近连续谱阈值, 对关联可以将中子从束缚态散射到连续谱, 从而产生束缚态和连续谱之间显著的耦合, 对体系的密度分布、结合能和滴线位置产生影响. RCHB理论正确地考虑了这种连续谱效应, 预言了更拓展的中子滴线, 揭示了连续谱效应对描述奇特原子核和预言滴线位置的重要性. 基于RCHB质量表, 文献[79,80]分别系统地研究了α衰变能量和质子放射性. 图2展示了RCHB 理论预言的质量与实验值的相对偏差. 在大多数情况下, 相对偏差介于–0.75%和0.75%之间. 由于球对称性的假设, RCHB理论对偏离幻数原子核质量的描述精度不高.

4 基于形变相对论连续谱理论构建高精度原子核质量表

除了双幻原子核, 核素图中绝大多数原子核的形状都偏离球形. 因此, 考虑形变自由度对研究原子核质量和确定滴线位置非常重要. 但是, 在相对论框架下同时考虑连续谱、对关联和形变效应是非常复杂的.

Zhou等人[81]利用正确考虑连续谱渐近行为的Dirac Woods-Saxon基[82], 通过对密度和势场的多极展开, 微观自洽地考虑了轴对称形变自由度、对关联和连续谱效应, 发展了轴对称形变的相对论Hartree-Bogoliubov连续谱(deformed relativistic Hartree-Bogoliubov theory in continuum, DRHBc)理论. DRHBc理论揭示了形变原子核^{42}Mg和^{44}Mg中的中子晕, 预言了核芯和中子晕之间的形状退耦现象[81,83], 被列为滴线附近原子核有趣的新现象之一[84]. 文献[85]考虑奇核子的堵塞效应, 研究了形变奇偶核^{15}C的中子正则单粒子能级、形变和密度分布等. 文献[86]再现了^{22}C物质均方根半径的实验值, 解决了^{22}C中关于半径和价中子组态的疑难, 预言了^{22}C中的形变晕现象. 文献[87]进一步系统研究了C同位素链的基态性质, 讨论了壳结构的演化, 探讨了^{15,19,22}C中子晕结构的成因. 文献[88]研究了Mg同位素, 揭示了形变效应对经典禁区中子数的影响, 发现晕

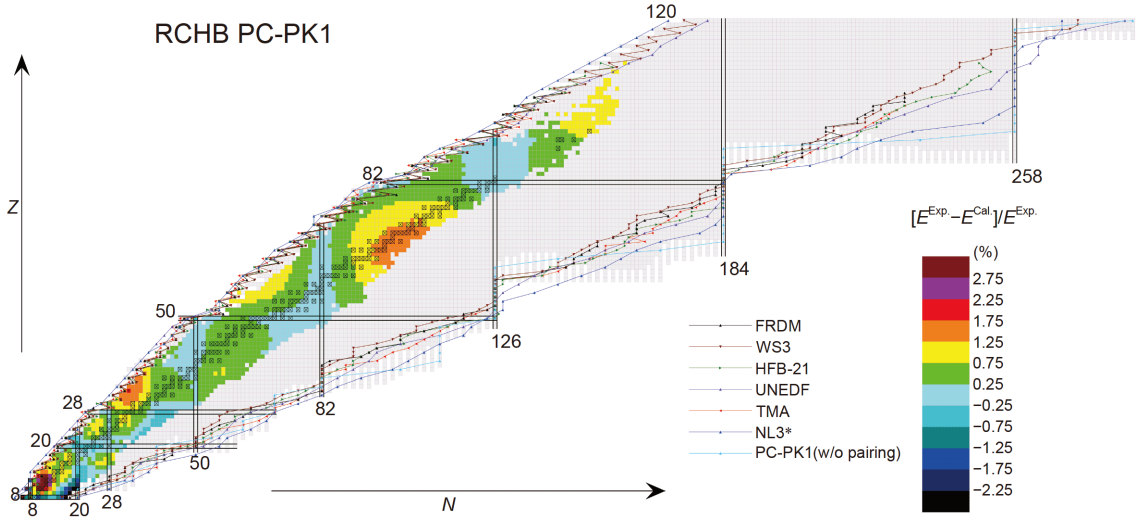


图 2 (网络版彩色)RCHB 理论结合 PC-PK1 预言的从Z=8 到Z=120 的 9035 个束缚原子核. 对于 2284 个有质量实验值的原子核, 给出了 RCHB 计算结果和实验数据的相对偏差. 此外, 为了比较, 展示了其他质量表预言的滴线和不包含对关联的 PC-PK1 计算结果. 图片取自文献[41]

Figure 2 (Color online) 9035 bound nuclei from Z=8 to Z=120 predicted by RCHB theory with PC-PK1. For the 2284 nuclei with mass measured, the relative binding energy differences between the data and RCHB calculations are shown. Furthermore, the nucleon drip lines predicted by other mass tables, and also PC-PK1 without pairing correlations are plotted for comparison. Taken from Ref. [41]

核^{42}Mg和^{44}Mg中的经典禁区中子数显著增加.

DRHBc理论不仅可以正确考虑连续谱贡献和对关联效应, 而且包含了形变自由度, 通过结合目前对原子核质量描述最成功的相对论密度泛函PC-PK1, 有望提高原子核质量的预言精度. 因此, 有必要利用DRHBc理论在相对论框架下构建包含连续谱和形变效应的高精度原子核质量表.

构建同时考虑连续谱效应和形变效应的原子核质量表是一个十分艰巨的课题. 首先, 随着质量数或形变逐渐增大, 密度的高阶分量变得更加重要, 收敛所需的多极展开阶数也越大[89], 因此计算资源需求量大. 其次, 为保证找到正确的原子核基态, 需进行形变约束计算. 最后, 对奇偶核与奇奇核, 必须考虑堵塞效应, 找到给出正确基态的堵塞能级. 特别是对于重核, 单粒子能级密度大, 约束计算和堵塞能级的确定都更加复杂.

为了构建DRHBc质量表, 北京大学发起和组织了DRHBc质量表合作组, 合作单位包括安徽大学、北京航空航天大学、湖州师范学院、韩国基础科学研究所(Institute for Basic Science, IBS)、中国科学院近代物理研究所、中国科学院理论物理研究所、韩国科学技术信息研究所(Korea Institute of Science and Technology Information, KISTI)、南京航空航天大学、韩国国立釜山大学(Pusan National University)、四川师范大学、韩国崇实大学(Soongsil University)、西南大学、韩国成均馆大学(Sungkyunkwan University)、香港大学和郑州大学等. 迄今, 合作组已经分别在大田、首尔、北京、釜山举办了多届DRHBc质量表合作组会议, 并定期组织工作会议.

DRHBc质量表合作组基于点耦合密度泛函PC-PK1, 从轻核到重核进行了系统的数值收敛性检验, 建议了计算偶偶核的数值细节[90]: (1) Dirac Woods-Saxon基所采用的盒子大小为20 fm, 格点步长为0.1 fm; (2) 基空间的能量截断为300 MeV, 角动量截断为23$\hbar$/2; (3) 密度和势场的Legendre展开阶数为6($Z\leqslant 80$)和8($Z>80$); (4) 从实验奇偶质量差确定的对力强度为–325 MeV fm^3; (5) 原子核的基态需通过形变约束计算进行确认. 利用确定的数值条件, 以Nd同位素链中的偶偶核为例, 系统地研究了质量、双中子分离能、费米面、半径、四极形变、正则单粒子能级和密度等物理量[90].

图3展示了DRHBc理论计算的Nd偶偶核结合能和已有实验值[11]的偏差, 以及与RCHB质量表结果[41]的比较. DRHBc计算结果与实验值的均方根偏差为2.668 MeV. 进一步考虑转动修正能, 均方根偏差减小至0.958 MeV, 远小于RCHB质量表给出的8.301 MeV. 因此, 考虑形变自由度对Nd偶偶核的质量描述有显著的改善. DRHBc计算同时很好地再现了Nd偶偶核的双中子分离能、四极形变、电荷半径等实验值[90].

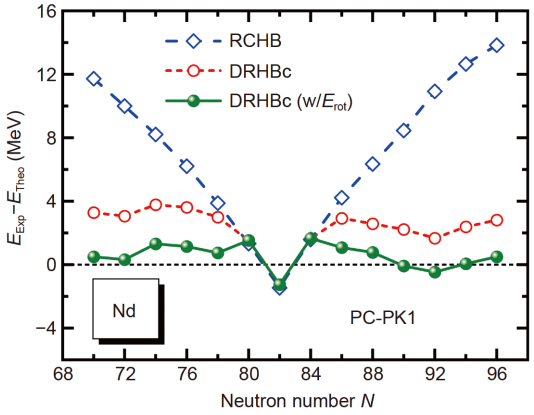


图 3 (网络版彩色)DRHBc计算Nd偶偶同位素的结合能与实验数据的偏差. 为了比较, 图中也展示了RCHB质量表的结果. 图片取自文献[90]

Figure 3 (Color online) The difference between the experimental binding energy and the DRHBc calculations for even-even Nd isotopes. The results of the RCHB mass table are also shown for comparison. Taken from Ref. [90]

DRHBc质量表合作组进一步探讨了Nd同位素链中子滴线附近的奇特现象和质子滴线外可能的质子放射性[90]. 通过研究极端丰中子核^{214}Nd费米面附近的中子单粒子能级、连续谱中的中子数、密度分布以及不同单粒子态对总密度的贡献, 确定了^{214}Nd的中子皮结构. 对于质子滴线外原子核, 以^{114}Nd为例, 通过考察质子分离能、质子单粒子能级、费米面以及不同方向上库仑位垒的高度, 讨论了可能的质子放射性.

基于Nd偶偶核的研究基础, 合作组正在开展$8\leqslant Z\leqslant 120$质量区偶偶核的计算, 考虑堵塞效应的奇偶核与奇奇核质量表计算的准备工作正在进行中.

通过DRHBc质量表, 可以开展很多有趣的研究, 如形变效应对滴线位置的影响[91]、形状演化与相变、形状共存、形变效应对同位素漂移的影响、原子核的结团结构、奇特核与超重核区的新幻数、质子滴线外原子核的质子发射、近中子滴线原子核的奇特结构、中子滴线外的原子核稳定性等.

5 总结

质量是原子核最基本的物理量之一, 对核物理、

粒子物理、天体物理和宇宙学等学科至关重要. 尽管短寿命原子核质量的测量工作已经取得很大进展, 但是在可预见的将来, 大部分远离稳定谷的奇特原子核质量仍依赖理论模型预言和计算.

本文回顾了原子核质量模型的重要发展历程, 包括宏观微观模型、相对论和非相对论密度泛函理论对原子核质量的研究、机器学习在改善质量描述中的应用, 介绍了相对论密度泛函理论的优点和点耦合密度泛函PC-PK1对原子核质量描述的成功, 介绍了基于RCHB理论构建的原子核质量表, 这是目前唯一考虑连续谱效应的质量表, 强调了对关联和连续谱对描述奇特核的重要性.

除了双幻原子核, 核素图中的绝大多数原子核的形状都偏离球形. 因此, 考虑形变自由度对研究原子核质量和确定滴线位置非常重要. 本文介绍了微观自洽考虑轴对称形变、对关联和连续谱效应的DRHBc理论, 以及DRHBc质量表合作组拟建立的高精度原子核质量表的最新进展. 以偶偶Nd原子核为例, 讨论了形变效应对原子核质量描述的重要性. 对基于DRHBc质量表, 可以开展的研究进行了展望.

参考文献

1 Bethe H A. Energy production in stars. Phys Rev, 1939, 55: 434–456
2 Wienholtz F, Beck D, Blaum K, et al. Masses of exotic calcium isotopes pin down nuclear forces. Nature, 2013, 498: 346–349
3 Ramirez E M, Ackermann D, Blaum K, et al. Direct mapping of nuclear shell effects in the heaviest elements. Science, 2012, 337: 1207–1210
4 Erler J, Birge N, Kortelainen M, et al. The limits of the nuclear landscape. Nature, 2012, 486: 509–512
5 Meng J. Relativistic Density Functional for Nuclear Structure. Singapore: World Scientific, 2016
6 Schatz H, Blaum K. Nuclear masses and the origin of the elements. Europhys News, 2006, 37: 16–21
7 Haseltine E. The 11 greatest unanswered questions of physics. Discovery, 2002, 23: 37
8 Sun B H, Meng J. Progress in precision mass measurements of atomic nuclei (in Chinese). Physics, 2010, 39: 666–673 [孙保华, 孟杰. 原子核质量精密测量的研究进展. 物理, 2010, 39: 666–673]
9 Thoennessen M. 2018 update of the discoveries of nuclides. Int J Mod Phys E, 2019, 28: 1930002
10 Huang W J, Audi G, Wang M, et al. The AME2016 atomic mass evaluation (I). Evaluation of input data; and adjustment procedures. Chin Phys C, 2017, 41: 030002
11 Wang M, Audi G, Kondev F G, et al. The AME2016 atomic mass evaluation (II). Tables, graphs and references. Chin Phys C, 2017, 41: 030003
12 Zhan W L, Xu H S, Xiao G Q, et al. Progress in HIRFL-CSR. Nucl Phys A, 2010, 834: 694c–700c
13 Liu W P, Li Z H, Bai X X, et al. BRIF and CARIF progress. Sci China-Phys Mech Astron, 2011, 54: 14–17
14 Yang J C, Xia J W, Xiao G Q, et al. High Intensity Heavy Ion Accelerator Facility (HIAF) in China. Nucl Instrum Methods Phys Res Sect B-Beam Interact Mater Atoms, 2013, 317: 263–265
15 Motobayashi T. RIKEN RI beam factory—Recent results and perspectives. Nucl Phys A, 2010, 834: 707c–712c
16 Thoennessen M. Plans for the facility for rare isotope beams. Nucl Phys A, 2010, 834: 688c–693c
17 Sturm C, Sharkov B, Stöcker H. 1, 2, 3 … FAIR! Nucl Phys A, 2010, 834: 682c–687c
18 Tshoo K, Kim Y K, Kwon Y K, et al. Experimental systems overview of the rare isotope science project in Korea. Nucl Instrum Methods Phys Res Sect B-Beam Interact Mater Atoms, 2013, 317: 242–247
19 Zhang Z Y, Gan Z G, Yang H B, et al. New isotope ^{220}Np: Probing the robustness of the N=126 shell closure in neptunium. Phys Rev Lett, 2019, 122: 192503
20 Thoennessen M. Reaching the limits of nuclear stability. Rep Prog Phys, 2004, 67: 1187–1232
21 Ahn D S, Fukuda N, Geissel H, et al. Location of the neutron dripline at fluorine and neon. Phys Rev Lett, 2019, 123: 212501
22 Weizsacker C F. Zur theorie der kernmassen. Z Physik, 1935, 96: 431–458
23 Strutinsky V M. Shell effects in nuclear masses and deformation energies. Nucl Phys A, 1967, 95: 420–442
24 Möller P, Nix J R, Myers W D, et al. Nuclear ground-state masses and deformations. Atom Data Nucl Data Tables, 1995, 59: 185–381
25 Wang N, Liu M, Wu X. Modification of nuclear mass formula by considering isospin effects. Phys Rev C, 2010, 81: 044322
26 Wang N, Liu M, Wu X, et al. Surface diffuseness correction in global mass formula. Phys Lett B, 2014, 734: 215–219
27 Audi G, Wang M, Wapstra A H, et al. The Ame2012 atomic mass evaluation. Chin Phys C, 2012, 36: 1287–1602
28 Niu Z M, Sun B H, Liang H Z, et al. Improved radial basis function approach with odd-even corrections. Phys Rev C, 2016, 94: 054315
29 Niu Z M, Liang H Z. Nuclear mass predictions based on Bayesian neural network approach with pairing and shell effects. Phys Lett B, 2018, 778: 48–53

30 Niu Z, Liang H, Sun B, et al. High precision nuclear mass predictions towards a hundred kilo-electron-volt accuracy. Sci Bull, 2018, 63: 759–764
31 Niu Z M, Fang J Y, Niu Y F. Comparative study of radial basis function and Bayesian neural network approaches in nuclear mass predictions. Phys Rev C, 2019, 100: 054311
32 Wu X H, Zhao P W. Predicting nuclear masses with the kernel ridge regression. Phys Rev C, 2020, 101: 051301
33 Goriely S, Chamel N, Pearson J M. Hartree-Fock-Bogoliubov nuclear mass model with 0.50 MeV accuracy based on standard forms of Skyrme and pairing functionals. Phys Rev C, 2013, 88: 061302
34 Goriely S, Hilaire S, Girod M, et al. First Gogny-Hartree-Fock-Bogoliubov nuclear mass model. Phys Rev Lett, 2009, 102: 242501
35 Lalazissis G A, Raman S, Ring P. Ground-state properties of even-even nuclei in the relativistic mean-field theory. Atomic Data Nucl Data Tables, 1999, 71: 1–40
36 Geng L, Toki H, Meng J. Masses, deformations and charge radii: Nuclear ground-state properties in the relativistic mean field model. Prog Theor Phys, 2005, 113: 785–800
37 Meng J, Peng J, Zhang S Q, et al. Progress on tilted axis cranking covariant density functional theory for nuclear magnetic and antimagnetic rotation. Front Phys, 2013, 8: 55–79
38 Zhang Q S, Niu Z M, Li Z P, et al. Global dynamical correlation energies in covariant density functional theory: Cranking approximation. Front Phys, 2014, 9: 529–536
39 Lu K Q, Li Z X, Li Z P, et al. Global study of beyond-mean-field correlation energies in covariant energy density functional theory using a collective Hamiltonian method. Phys Rev C, 2015, 91: 027304
40 Peña-Arteaga D, Goriely S, Chamel N. Relativistic mean-field mass models. Eur Phys J A, 2016, 52: 320
41 Xia X W, Lim Y, Zhao P W, et al. The limits of the nuclear landscape explored by the relativistic continuum Hartree-Bogoliubov theory. Atom Data Nucl Data Tables, 2018, 121-122: 1–215
42 Hohenberg P, Kohn W. Inhomogeneous electron gas. Phys Rev, 1964, 136: B864–B871
43 Kohn W, Sham L J. Self-consistent equations including exchange and correlation effects. Phys Rev, 1965, 140: A1133–A1138
44 Jones R O, Gunnarsson O. The density functional formalism, its applications and prospects. Rev Mod Phys, 1989, 61: 689–746
45 Ring P. Relativistic mean field theory in finite nuclei. Prog Part Nucl Phys, 1996, 37: 193–263
46 Bender M, Heenen P H, Reinhard P G. Self-consistent mean-field models for nuclear structure. Rev Mod Phys, 2003, 75: 121–180
47 Vretenar D, Afanasjev A V, Lalazissis G A, et al. Relativistic Hartree-Bogoliubov theory: Static and dynamic aspects of exotic nuclear structure. Phys Rep, 2005, 409: 101–259
48 Meng J, Toki H, Zhou S G, et al. Relativistic continuum Hartree-Bogoliubov theory for ground-state properties of exotic nuclei. Prog Part Nucl Phys, 2006, 57: 470–563
49 Walecka J D. A theory of highly condensed matter. Ann Phys, 1974, 83: 491–529
50 Sharma M M, Lalazissis G, König J, et al. Isospin dependence of the spin-orbit force and effective nuclear potentials. Phys Rev Lett, 1995, 74: 3744–3747
51 Zhou S G, Meng J, Ring P. Spin symmetry in the antinucleon spectrum. Phys Rev Lett, 2003, 91: 262501
52 Liang H, Meng J, Zhou S G. Hidden pseudospin and spin symmetries and their origins in atomic nuclei. Phys Rep, 2015, 570: 1–84
53 Meng J. Selected milestones and hot topics in nuclear structure researches (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2016, 46: 012002 [孟杰. 原子核结构研究的一些重要历史回顾与几个热点问题. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2016, 46: 012002]
54 Shen S, Liang H, Long W H, et al. Towards an ab initio covariant density functional theory for nuclear structure. Prog Part Nucl Phys, 2019, 109: 103713
55 Zhao P W, Li Z P, Yao J M, et al. New parametrization for the nuclear covariant energy density functional with a point-coupling interaction. Phys Rev C, 2010, 82: 054319
56 Nikšić T, Li Z P, Vretenar D, et al. Beyond the relativistic mean-field approximation. III. Collective Hamiltonian in five dimensions. Phys Rev C, 2009, 79: 034303
57 Li Z P, Nikšić T, Vretenar D, et al. Microscopic analysis of nuclear quantum phase transitions in the $N\approx90$ region. Phys Rev C, 2009, 79: 054301
58 Meng J, Zhao P. Relativistic density functional theory in nuclear physics. AAPPS Bull, 2021, 31: 2, https://doi.org/10.1007/s43673-021-00001-8
59 Zhao P W, Zhang S Q, Peng J, et al. Novel structure for magnetic rotation bands in ^{60}Ni. Phys Lett B, 2011, 699: 181–186
60 Zhao P W, Peng J, Liang H Z, et al. Antimagnetic rotation band in nuclei: A microscopic description. Phys Rev Lett, 2011, 107: 122501
61 Zhao P W. Multiple chirality in nuclear rotation: A microscopic view. Phys Lett B, 2017, 773: 1–5
62 Ren Z X, Zhao P W, Meng J. Time-dependent covariant density functional theory in three-dimensional lattice space: Benchmark calculation for the ^{16}O+^{16}O reaction. Phys Rev C, 2020, 102: 044603
63 Li Z, Niu Z M, Sun B H, et al. WLW mass model in nuclear r-process calculations (in Chinese). Acta Phys Sin, 2012, 61: 072601 [李竹, 牛中明, 孙保华, 等. WLW原子核质量模型在r过程研究中的应用. 物理学报, 2012, 61: 072601]

64 Zhao B, Zhang S Q. The r-process with the newly developed high-precision mass model WS4. Astrophys J, 2019, 874: 5

65 Dobaczewski J, Flocard H, Treiner J. Hartree-Fock-Bogolyubov description of nuclei near the neutron-drip line. Nucl Phys A, 1984, 422: 103–139

66 Meng J. Relativistic continuum Hartree-Bogoliubov theory with both zero range and finite range Gogny force and their application. Nucl Phys A, 1998, 635: 3–42

67 Meng J, Guo J Y, Li J, et al. Covariant density functional theory in nuclear physics (in Chinese). Prog Phys, 2011, 31: 199–336 [孟杰, 郭建友, 李剑, 等. 原子核物理中的协变密度泛函理论. 物理学进展, 2011, 31: 199–336]

68 Meng J, Ring P. Relativistic Hartree-Bogoliubov description of the neutron halo in ^{11}Li. Phys Rev Lett, 1996, 77: 3963–3966

69 Meng J, Ring P. Giant halo at the neutron drip line. Phys Rev Lett, 1998, 80: 460–463

70 Meng J, Toki H, Zeng J Y, et al. Giant halo at the neutron drip line in Ca isotopes in relativistic continuum Hartree-Bogoliubov theory. Phys Rev C, 2002, 65: 041302

71 Zhang S, Meng J, Zhou S. Proton magic even-even isotopes and giant halos of Ca isotopes with relativistic continuum Hartree-Bogoliubov theory. Sci China-Phys Mech Astron, 2003, 46: 632

72 Meng J, Tanihata I, Yamaji S. The proton and neutron distributions in Na isotopes: The development of halo and shell structure. Phys Lett B, 1998, 419: 1–6

73 Meng J, Zhou S G, Tanihata I. The relativistic continuum Hartree-Bogoliubov description of charge-changing cross section for C, N, O and F isotopes. Phys Lett B, 2002, 532: 209–214

74 Meng J, Sugawara-Tanabe K, Yamaji S, et al. Pseudospin symmetry in relativistic mean field theory. Phys Rev C, 1998, 58: R628–R631

75 Meng J, Sugawara-Tanabe K, Yamaji S, et al. Pseudospin symmetry in Zr and Sn isotopes from the proton drip line to the neutron drip line. Phys Rev C, 1999, 59: 154–163

76 Meng J, Tanihata I. The surface diffuseness and the spin-orbital splitting in relativistic continuum Hartree-Bogoliubov theory. Nucl Phys A, 1999, 650: 176–196

77 Zhang W, Meng J, Zhang S Q, et al. Magic numbers for superheavy nuclei in relativistic continuum Hartree-Bogoliubov theory. Nucl Phys A, 2005, 753: 106–135

78 Lü H F, Meng J, Zhang S Q, et al. Neutron halos in hypernuclei. Eur Phys J A, 2003, 17: 19–24

79 Zhang L F, Xia X W. Global α-decay study based on the mass table of the relativistic continuum Hartree-Bogoliubov theory. Chin Phys C, 2016, 40: 054102

80 Lim Y, Xia X, Kim Y. Proton radioactivity in relativistic continuum Hartree-Bogoliubov theory. Phys Rev C, 2016, 93: 014314

81 Zhou S G, Meng J, Ring P, et al. Neutron halo in deformed nuclei. Phys Rev C, 2010, 82: 011301

82 Zhou S G, Meng J, Ring P. Spherical relativistic Hartree theory in a Woods-Saxon basis. Phys Rev C, 2003, 68: 034323

83 Li L, Meng J, Ring P, et al. Deformed relativistic Hartree-Bogoliubov theory in continuum. Phys Rev C, 2012, 85: 024312

84 Cottle P D, Kemper K W. A walk along the dripline. Physics, 2012, 5: 49

85 Li L L, Meng J, Ring P, et al. Odd systems in deformed relativistic Hartree Bogoliubov theory in continuum. Chin Phys Lett, 2012, 29: 042101

86 Sun X X, Zhao J, Zhou S G. Shrunk halo and quenched shell gap at $N=16$ in ^{22}C: Inversion of sd states and deformation effects. Phys Lett B, 2018, 785: 530–535

87 Sun X X, Zhao J, Zhou S G. Study of ground state properties of carbon isotopes with deformed relativistic Hartree-Bogoliubov theory in continuum. Nucl Phys A, 2020, 1003: 122011

88 Zhang K Y, Wang D Y, Zhang S Q. Effects of pairing, continuum, and deformation on particles in the classically forbidden regions for Mg isotopes. Phys Rev C, 2019, 100: 034312

89 Pan C, Zhang K, Zhang S. Multipole expansion of densities in the deformed relativistic Hartree-Bogoliubov theory in continuum. Int J Mod Phys E, 2019, 28: 1950082

90 Zhang K, Cheoun M K, Choi Y B, et al. Deformed relativistic Hartree-Bogoliubov theory in continuum with a point-coupling functional: Examples of even-even Nd isotopes. Phys Rev C, 2020, 102: 024314

91 In E J, Kim Y, Papakonstantinou P, et al. Neutron drip line in the deformed relativistic Hartree-Bogoliubov theory in continuum: Oxygen to calcium. Int J Mod Phys E, 2021, 30: 2150009

Summary for “基于形变相对论连续谱Hartree-Bogoliubov理论构建高精度原子核质量表”

Towards a high-precision nuclear mass table with deformed relativistic Hartree-Bogoliubov theory in continuum

Kaiyuan Zhang, Cong Pan, Shuangquan Zhang & Jie Meng*

State Key Laboratory of Nuclear Physics and Technology, School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China
* Corresponding author, E-mail: mengj@pku.edu.cn

As one of the most fundamental quantities for the atomic nucleus, nuclear mass is very important for various fields such as nuclear physics, particle physics, astrophysics, and cosmology. It is the key to understand the interaction between nucleons, the evolution of shell structures, and the location of drip lines. It also provides the basic information for nuclear reactions and the necessary inputs to study the origin of elements. Although dramatic progress for the mass measurement of short-lived nuclei has been made, the masses of most exotic nuclei far away from the stability valley still rely on the predictions by nuclear models in the foreseeable future.

The popular nuclear mass models are briefly reviewed, including the finite-range droplet model (FRDM), Weizsäcker-Skyrme 4 (WS4) model, and HFB-27* model, etc. The efforts in applying the machine learning to improve the nuclear mass predictions are introduced.

The relativistic density functional theory has been proved to be a powerful theory in nuclear physics by its successful description of many nuclear phenomena. The relativistic density functional theory has many attractive advantages, such as the automatic inclusion of nucleonic spin degree of freedom, explaining naturally the pseudospin symmetry in the nucleon spectrum and the spin symmetry in antinucleon spectrum, and the natural inclusion of nuclear magnetism, which plays an important role in nuclear magnetic moments and nuclear rotations. The relativistic density functional PC-PK1 has turned out to be very successful in providing good descriptions of the isospin dependence of the binding energy along either the isotopic or the isotonic chain.

The relativistic continuum Hartree-Bogoliubov (RCHB) theory, which takes into account self-consistently the pairing correlations and continuum effects, is very suitable to describe the exotic nuclei. The first nuclear mass table including the continuum effects based on the RCHB theory with PC-PK1 has been constructed, predicting 9035 bound nuclei with $8 \leqslant Z \leqslant 120$, which remarkably extends the existing nuclear landscape.

The deformed relativistic Hartree-Bogoliubov theory in continuum (DRHBc) was developed for exotic nuclei including deformation and continuum effects, with the deformed relativistic Hartree-Bogoliubov equations solved in a Dirac Woods-Saxon basis. The success of the DRHBc theory has been demonstrated in predicting an interesting shape decoupling between the core and the halo in ^{44}Mg and ^{42}Mg, resolving the puzzles concerning the radius and configuration of valence neutrons in ^{22}C, and studying particles in the classically forbidden regions for magnesium isotopes.

A DRHBc Mass Table Collaboration, presently consisting of sixteen institutions from China and South Korea, which aims to construct the first relativistic nuclear mass table including simultaneously the deformation and continuum effects based on the DRHBc theory and density functional PC-PK1, has been founded. The recent progress in the construction of the DRHBc mass table for even-even nuclei is introduced. By taking even-even Nd isotopes as examples, the improvement for the description of the nuclear masses by deformation effects is shown in comparison with the RCHB calculations. The investigation of the possible exotic structure on the neutron-rich side and the possible proton radioactivity beyond the proton drip line for Nd isotopes is discussed. Possible topics to be investigated based on the DRHBc mass table are proposed.

nuclear mass, deformation, continuum, relativistic density functional theory

doi: 10.1360/TB-2020-1601