

低密度、弱束缚核结构研究*

马中玉 陈宝秋

(中国原子能科学研究院 北京 102413)

摘要 讨论了用平均场理论研究低密度、弱束缚核性质中的主要物理问题,着重研究在同位旋极端条件下的核子的有效相互作用、平均场和同位旋相关性.

关键词 同位旋极端条件下核结构 核子有效相互作用 核平均场

放射性束核物理开辟了核物理研究的新时代,远离 β 稳定线及滴线附近核性质的研究是当前核物理研究的重要课题^[1]. 在 N/Z 极端情况下的奇特核具有外层核子弱束缚及空间的弥散分布,形成中(质)子皮或晕结构等特性. 世界上许多重要实验室如 GSI, RIKEN, GANIL, MSU 等已建成或计划建立放射性核束装置,其中包括在我国兰州重离子加速器国家实验室放射性核束装置的建造. 在这些装置上开展和将要开展的实验研究极大地扩展了原子核研究的新领域,为研究极端同位旋条件下核的性质提供了空前的机遇. 本文将着重讨论用平均场理论研究低密度、弱束缚核性质中的主要物理问题:核子有效相互作用和奇特核的平均场、自旋-轨道相互作用、同位旋相关性、壳效应、连续态附近的对相互作用、有效质量、形变、集体激发等等. 影响滴线附近核性质的因素很多,这些因素往往同时起作用,相互联系,不能截然分开的. 研究低密度、弱束缚核性质不仅与实验密切结合,有实际应用,而且理论本身也有重要的意义.

1 核子有效相互作用

核子有效相互作用的研究一直是核物理研究的重要课题,它是核结构研究的基础. 在许多实际应用中,通常采用符合实验(核物质的饱和性和一些稳定核的基态性质)的唯象的核子有效相互作用,如非相对论 Hartree-Fock 近似下的 Skyrme 力, Gogny 力和非线性相对论平均场理论的 NL3, TM1 等有效相互作用. 这种唯象的有效相互作用在研究稳定核的基态性质上取得了巨大的成功^[2-4],并在核物理的其他领域(如超形变、重离子反应、超核等)研究中被广为应用. 在同位旋极端条件下同位旋相关的有效相互作用是非常重要的,因而在相对论研究中,需要采用包含同位旋矢量介子 π, ρ 的相对论 Hartree-Fock 理论研究^[5]. 推

* 国家自然科学基金(19847002, 19835010) 和国家重点基金研究发展规划(G20000774)资助

广这种有效相互作用来研究远离稳定线核的性质,预言极端条件下核性质,并与实验观察量的比较,是得到极端条件下核的有效相互作用的性质的一种有效的方法.

原则上,核子的有效相互作用可以用自由的 NN 相互作用,考虑核介质中核子关联来得到.真空中两核子相互作用可以由核子-核子散射实验和氘核的性质很好地确定.在这方面核理论已开展了多年的研究,近来相对论核多体理论的成功和极端条件下核物理研究的新进展,使这领域的研究变得更加重要.实际上,通常的有效相互作用只依赖于核的定域密度,我们对同位旋密度的依赖了解得很少,理论上这种同位旋相关性也可以从自由的 NN 相互作用来得到.最近从相对论 Brueckner-Hartree-Fock (DBHF) 方法提取包含同位旋相关的核子有效相互作用取得了新的进展^[6],对有限核,特别是奇特核的应用将给出这种有效相互作用的直接检验.奇特核的性质的研究给出核子有效相互作用的同位旋相关性的实验检验.从第一性原理出发来研究核子的有效相互作用还存在很多的困难,需要很大的努力来发展可靠且可行的理论.

2 远离稳定线核的平均场

在平均场理论中,中心核势是自洽计算得到,核的整体性质依赖于核的定域密度.由于核物质对称能的性质,稳定核中(质)子的中心势很大程度上依赖于质(中)子的密度.然而,丰中子核中核表面主要是中子,中子的中心势在核内部依赖质子密度,而在核表面由中子密度决定.中子平均场的这种复杂结构,使中子的中心势在中心区域的平坦部分变小,更接近谐振子势.可以预言这种现象也会出现在重的丰中子核中^[2].中心势形状的变化将会极大地影响单粒子能级和核结构.

3 自旋-轨道相互作用

平均场的自旋-轨道相互作用是壳模型的基础,它可以从相对论核子 Dirac 旋量的非相对论约化得到,自旋-轨道相互作用的空间分布依赖于核的密度的微商.当 N/Z 极端情况下,自旋-轨道相互作用同位旋相关性会对远离稳定线核的壳结构有很大的影响,可能引起单粒子能级的交叉.包含同位旋矢量介子的相对论 Hartree-Fock 研究得到核子自旋-轨道劈裂的同位旋相关性主要是 π 介子的贡献^[4].目前自旋-轨道相互作用同位旋相关性的实验还很少,需要理论和实验的进一步研究.

4 单粒子能级

单粒子能级主要是由平均场的中心势确定,而影响能级排列的因素很多,中心势在核内部的平坦程度,自旋-轨道势的强度等都会改变单粒子能级的排列.丰中子核的中心势形状和自旋-轨道势的强度的改变使单粒子能级重新组合,例如,谐振子势中不同 l 的单粒子能级的简并在 Woods-Saxon 势中劈裂,在丰中子核这种情况正好反过来.初步研究表明自旋-

轨道势的强度在丰中子核中减弱. 单粒子能级排列的改变会在测量的各种核性质, 特别是集体性质中表现出来.

5 连续态附近的对相互作用

在弱束缚核中对相互作用起了非常重要的作用, 最后一个不成对的核子与相邻偶-偶核相比少了对吸引, 这种对相互作用提供的吸引与平均场的弱吸引相当. 因而, 对滴线附近核的处理不能将对相互作用看作微扰, 必须将对效应与平均场同时考虑. 理论上, Hartree-Fock-Bogoliubov 方法^[2,3]或相对论平均场加 Bogoliubov 方法^[4]合理地处理连续态附近核子对相互作用. 但是, 对关联中连续态相空间的认识目前还存在不同的看法, 我们对对关联性质的了解还远远不够, 例如, 对相互作用是短程还是长程? 是整体还是表面? 是否同位旋相关? 等等. 对关联的进一步的认识还需要大量的研究工作, 理论和实验的共同努力. 对相互作用的这些问题也只能通过对弱束缚系统的实验和理论研究的结合来得到回答.

6 弱束缚系统的形变

弱束缚系统核子与正能连续相空间的耦合, 使费米面附近单粒子态的密度增大, 同时也增加对关联强度. 极端丰中子轻核的晕结构的长尾巴形成球对称的空间分布. 这些效应往往使形变减小, 或改变形变模式. 形变模式的改变同时也反映了单粒子壳结构的相应变化. 因此研究弱束缚系统的形变是核结构物理的重要课题.

7 弱束缚系统的集体激发模式

核的集体激发模式的微观机制是由剩余相互作用引起的关联的粒子-空穴激发. 在同位旋极端条件下核的中子和质子的费米面相差很大, 毫无疑问, 它将引起核的集体激发模式的极大的变化, 特别是同位旋矢量激发模式的改变. 在稳定核中同位旋矢量激发的能量一般比较高, 而丰中子核中中子皮相对于质子核芯的偶极振动和中子皮相对于形变质子核芯的四极振动使丰中子核同位旋矢量激发的能量变低, 形成新的激发模式.

目前研究同位旋极端条件下的核性质引起了世界各国核物理学家的极大兴趣, 世界各国都已经投入了大量的人力和财力, 建造了放射性核束装置. 预期不久将会得到许多激动人心的新的结果和发现新的物理现象. 当前开展对低密度弱束缚核系统性质、结构和反应的研究具有重要的理论和现实意义.

参考文献 (References)

- 1 Nuclear Science: A Long Range Plan, The DOE/NDF Nuclear science Advisory Committee, 1996, Feb. 1, Nuclear Physics in Europe: Highlights and Opportunities, NuPECC Report, 1997, Dec, 31
- 2 Dobaczewski J, Nazarewicz W, Werner T R et al. Phys. Rev. , 1996, C53:2809; Dobaczewski J, Hamamoto I, Nazarewicz W et al. Phys. Rev. Lett. , 1994 72: 981 - 984
- 3 Gruemmer F, CHEN Bao-Qiu, MA Zhong-Yu, Krewald K. Phys. Lett. , 1996, B387:673-679.
- 4 Ring P. Prog. Part. Nucl. Phys. , 1996. 37:193
- 5 SHI Hua-Lin, CHEN Bao-Qiu, MA Zhong-Yu. Phys. Rev. , 1995, C52:144; MA Zhong-Yu, SHI Hua-Lin, CHEN Bao-Qiu. Phys. Rev. , 1994, C50: 3170
- 6 Schiller E, Muether H. Nucl-th/0006072

Nuclear Structures of Low Density and Weakly Bound System*

MA Zhong-Yu CHEN Bao-Qiu

(China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

Abstract The physics aspects of the low density and weakly bound system in the theoretical mean field theory study are presented. The nuclear effective interactions and mean field for nuclei at extreme values of the isospin are focused.

Key words structure of nuclei at extreme values of the isospin, nuclear effective interaction, nuclear mean field

* Supported by NSFC(19847002, 19835010) and Major State Basic Research Development Program(G200077407)