

奇异核性质的研究*

马中玉 陈宝秋

(兰州重离子加速器国家实验室原子核理论中心 兰州 730000)

(中国原子能科学研究院 北京 102413)

摘 要 介绍了用放射性核束研究奇异核性质的物理问题,分析了理论研究的主要方法、模型和现状,并就对关联、连续态与束缚态的耦合、壳效应和自旋-轨道相互作用、质子晕等问题作了进一步的讨论.

关键词 奇异核 对关联 自旋-轨道相互作用 质子晕

分类号 O571.22

1 引言

放射性束核物理开辟了核物理研究的新时代,近年来的实验已经揭示出了一些非常丰富的新的物理现象,如:(1)某些轻核中存在的中子晕(^{11}Li 、 ^{11}Be 、 ^{14}Be 和 ^{17}B 等);(2)双满壳奇异核(^{10}He 、 ^{78}Ni 和 ^{100}Sn);(3)超重元素($Z=110$ 、 111 和 112).这些发现引起了国内外核物理学家的高度重视.如何理解和解释这些新的物理现象是对核理论挑战,对这些现象的研究也是当前核物理研究的国际前沿领域.关于远离 β 稳定线及滴线附近核性质的研究将是这一前沿研究领域的一个重要课题.美国在1996年发布的《核科学长远规划》^[1]以及欧洲核物理合作委员会(NuPECC)1997年12月发布的《欧洲核物理:重点和机遇》^[2]都把用放射性核束装置研究极端条件下的核结构问题放在核物理研究的重要地位,给予了极高的优先权.世界上许多重要的实验室如GSI、RIKEN、Ganil和MSU等已建成或计划建立放射性核束装置,特别是最近我国兰州重离子加速器国家实验室的放射性核束装置建成并投入运行.在这些装置上开展和将要开展的实验研究会极大地扩展原子核研究的新领域.兰州重离子加速器

国家实验室放射性核束装置上开展的实验和理论研究,将是当前以及21世纪初我国核物理研究的最重要的研究方向之一.

虽然地球上只存在有263个稳定的核素,在地球上已发现的长寿命不稳定核素以及在实验室中可合成的核素约有2 200个,然而在核素图上的一大片奇异核的区域内成千个核素还没有被人类发现和了解.用放射性核束研究这些领域内核的性质将回答核科学中的许多重要的基本问题:(1)多少个中子和质子通过强相互作用可以形成束缚核?即中(质)子滴线的位置.目前实验只能达到很轻核的滴线,在核素图上很大的区域内,特别是在中子滴线附近的情况了解很少.不同的理论模型给出的滴线位置不同,甚至相差很大.(2)奇异核中子和质子幻数是什么,即奇异核的壳结构与稳定核的有什么不同?壳结构直接与核子的自旋-轨道相互作用有关,核子的自旋-轨道相互作用的径向分布,以及它对轨道密度及核同位旋的依赖关系.(3)人们知道,在 N/Z 极端情况下的奇异核具有外层核子弱束缚及空间的弥散分布,形成中(质)子的皮或晕结构等特性.晕形成的微观机制是什么?当核的密度很小时量子效应很重要,

* 收稿日期: 1999-03-12.

国家自然科学基金(项目号19675070、19847002)资助.

需要从实验和理论上研究介质效应和核芯极化的作用。(4) 对 N/Z 极端情况下的奇异核, 对 π 介子是至关重要的, 需要正确地处理束缚态和连续态的耦合。目前, 我们关于对相互作用的了解还很少, 对关联的微观机制以及有限力程对力和密度依赖性的作用等需要进一步的研究, 特别需要通过实验来得到对相互作用的信息。(5) 在平均场近似方法中, 我们通常采用核子的有效相互作用在非相对论或相对论的自恰的 Hartree 或 Hartree-Fock (HF) 方法来给出核的性质。推广应用于奇异核性质时, 必须研究这种有效相互作用的同位旋和密度的依赖关系。此外, 还要研究奇异核的衰变、巨共振激发态以及与奇异核性质有关的低能核反应动力学等。放射性核束实验将扩展我们了解的核素范围, 从而加深对核相互作用和在介质中相互作用性质的认识。

2 理论模型

通常采用的研究核结构和核性质的理论模型只适用于稳定核性质的描述, 模型参数是由已知的实验数据来定出的。要推广到没有实验数据的不稳定核和奇异核的性质研究, 要求模型具有较好的理论基础, 并且根据奇异核的特殊性质进一步发展模型理论。微观核多体理论具有理论可靠、参数少、普适性强和适用范围大等特点。通常采用的理论方法有基于核多体理论的自恰非相对论及相对论的方法和壳模型计算。

Skyrme 有效相互作用的自恰非相对论 HF 方法是研究稳定核性质的常用的非常成功的方法, 它只有 10 个参数, 适用于从轻核到重核、球形与变形核的大部分核区, 近来推广到对奇异核性质的研究也取得了很大的成功。对于开壳核的研究, 对关联是很重要的。处理对关联的 Bardeen-Cooter-Schrieffer (BCS) 方法只适用于稳定核附近的核。当中 (质) 子的费米面接近连续态时, 对相互作用

不能作微扰来处理, Hartree-Fock-Bogoliubov (HFB) 方法同时自恰地处理平均场和对相互作用^[3, 4]。球形核的 HFB 方法成功地描述了一些同位素链的基态性质。由于 HFB 方法计算很复杂, 目前对变形核的应用还有待发展。推广描述巨共振激发态的无规位相近似 (RPA)^[5], 是建立在自恰的 HF 基态上的, 粒子-空穴相互作用采用与计算基态的核子有效相互作用-Skyrme 力相同, 因而不必引进新的参数, 就可描述和预言奇异核巨共振态的性质。从更基本的核多体理论出发, 直接由自由核子-核子相互作用的 Brueckner-Hartree-Fock (BHF) 方法可以给出核子有效相互作用。由于 BHF 不能给出核物质饱和性质的经验值, 在文献[6]引进了介子质量的介质修正, 采用由此得到的核子有效相互作用和变形的 HFB 方法很好地描述了轻核的同位素链的基态性质。

近年来相对论核多体方法发展很快。相对论方法从核子-介子场论出发, 将核子处理为 Dirac 粒子, 通过交换介子相互作用。包含非线性 σ (或 ω) 自相互作用的相对论平均场 (RMF) 理论, 成功地描述了稳定核以及奇异核的基态性质^[7, 8], 它的 6 个参数是由核物质的饱和性质和一些同位素链 (有限核) 的基态性质来确定。相对论平均场理论相对于非相对论 HF 方法更简单, 且有许多优越性: 相对论方法自然地得到了核子强的自旋-轨道相互作用, 因而描述了壳模型; 自旋-轨道相互作用的弱的同位旋依赖性合理地描述了 Pb 同位素链的同位旋移动; 相对论方法也成功地解释了核的赝自旋的对称性等。考虑对关联的 BCS 方法和自恰处理平均场和对相互作用的 Bogoliubov (RHB) 方法成功地描述了奇异核的基态性质, 变形的 RHB 方法目前还只能采用谐振子基展开的方法。

相对论核多体理论 Dirac BHF (DBHF) 引进了新的饱和机制, 成功地描述了核物质的饱和性质。相对论有效相互作用方法由符合 DBHF 的标量和矢量势定出的密度有关的

核子-介子有效耦合常数, 在一定意义下不引进任意常数, 就能很好地描述稳定核的基态性质. 考虑同位旋矢量介子 π 和 ρ 的贡献的相对论 HF 方法, 给出了同位旋依赖的平均场, 能合理地描述核基态性质的同位旋依赖性^[9]. 直接用 DBHF 方法研究核子有效相互作用的同位旋依赖性也是核多体微观研究的一个重要课题.

研究核的巨共振激发态可采用类似于非相对论的 RPA. 相对论 RPA (RRPA) 方法是在包含非线性 $\sigma(\omega)$ 自相互作用的相对论平均场的基态上进一步考虑了通过相同介子交换的粒子-空穴相互作用. 文献[10]成功地处理了包含非线性自相互作用的介子传播子, 研究了稳定核以及奇异核的巨共振激发态的性质.

大型壳模型计算能较精确地给出核的基态和激发态的性质, 但计算对实验数据的依赖性较强, 近来推广应用于奇异核性质的研究也有很大的发展.

3 对关联和连续态

前面已经提到, 研究奇异核的理论关键是正确处理连续态粒子. 对于弱束缚核, 中(质)子费米面接近连续态, 必须考虑衰变道、束缚态与连续态的耦合. 由于核结构和核反应理论的联系加强, 一些由核反应理论发展出来的模型可以用来描述弱束缚核系统的性质.

在描述弱束缚核的性质中, 对相互作用起了重要的作用. BCS 方法引进了核子对从束缚态到正能态的虚激发, 引起核周围存在“费米气”的非物理情况. 用基展开的 HF 方法虽然得到的正能态的波函数在核外不衰变, 核的密度仍局限在一定的范围内, 但可能给出不合理的径向分布和均方根半径. HFB 方法正确处理了束缚态和连续态的耦合, 可以解决这一问题. 文献[4]得到用 HF + BCS 和 HFB 分别计算 Ni 同位素链的两中

子分离能 S_{2n} 和中子均方根半径, 发现用这两种方法计算的 S_{2n} 很接近, 但中子的实际均方根半径却有很大的差别. 因而对滴线附近核, HFB 方法是必要的.

对中重核或重核的性质, 核的变形起了很重要的作用. 由于变形核的 HFB 方法计算很困难, 通常还采用 BCS 近似来处理对相互作用. 文献[11]用变形的自恰相对论平均场计算 Pr 同位素链的性质, 发现用 BCS 近似处理对关联时, 得到的正能态占有的粒子数, 除了在中(质)子滴线附近核外, 对大部分 Pr 同位素核计算得到处在正能态的粒子数远小于1. 显然在滴线附近 BCS 方法处理对关联会给出非物理的结果, 但在很大的同位素链的范围内用 BCS 处理对关联的方法仍是一个好的近似方法.

4 壳效应和自旋-轨道相互作用

自旋-轨道相互作用在核结构中起了重要的作用, 引进了自旋-轨道相互作用才能解释实验上得到的核的幻数. 在非相对论模型中, 自旋-轨道相互作用是唯一地引入. 在相对论框架下, 自旋-轨道相互作用是从有效拉氏量的 Dirac-Lorentz 结构中自然地得到, 不需引进自旋-轨道相互作用强度的参数, 就可得到实验的自旋-轨道劈裂. 用相对论模型来研究 Ni 同位素链的基态性质, 分析从自恰基态解的标量和矢量势得到的自旋-轨道相互作用, 可以发现自旋-轨道作用势 V_{so} 随中子数的增加而减少^[8]. 比较 ^{56}Ni 和 ^{78}Ni , 在表面区域强度减少了约35%, 峰的位置也向外移动. 这说明了标量和矢量密度的空间分布的外延和表面弥散. 这种效应对轻核更加明显. 中子滴线附近核的自旋-轨道相互作用的减弱是形成晕结构的微观机制之一.

包含交换项的同位旋矢量介子 π 和 ρ 的贡献的相对论 HF 方法给出了与同位旋有关的自旋-轨道相互作用, 解释了由实验得到的 ^{40}Ca 和 ^{48}Ca 质子 1d 壳自旋-轨道劈裂的很大差

别^[9].

5 质子晕

由于质子的库仑势垒, 质子晕只能在轻核上产生. 最可能存在质子晕的核是⁸B, 质子分离能只有 $E_p = 0.137 \text{ MeV}$. Minamisono 等^[12]于1992年首先用测量四极矩的方法得到⁸B的晕结构, 但以后的一些实验得到了不同的结论. 最近 Minamisono 等指出, 高能实验数据对核的表面分布可能不敏感, 需要将高能实验和低能实验数据一起分析, 他们再次得到了⁸B存在质子晕结构的结论. 由于 Glauber 理论分析不适用于低能散射, 尽管作了修正, 仍然是一个非常粗糙的方法. 要给出⁸B的质子晕结构的确切结论, 还需要核物理实验学家和理论学家的共同努力.

近来对 $2s1d$ 壳丰质子核可能存在晕结构的问题也开展了研究, 任中洲、陈宝秋等首先用 RMF 方法预言了²⁶P、²⁷S 可能存在质子

晕^[13], 随后 Brown 和 Hansen 用壳模型也预言了不仅²⁶P 而且²⁷P 也可能存在质子晕^[14]. 接着我们又对 $2s1d$ 壳核进行了系统的研究, 预言了^{26, 27, 28}P 和^{27, 28, 29}S 存在质子晕及质子晕发展过程^[15]. 最近, 美国 Michigan 州立大学实验室发现了质子晕^{26, 27, 28}P 的存在^[16].

6 结束语

奇异核性质的研究是当前核物理的国际前沿研究课题之一. 随着国际上的放射性核束装置, 特别是兰州重离子加速器国家实验室放射性核束装置的建成和投入运行, 将得到更多更新的实验数据, 我们对奇异核的性质和基本物理问题的认识将会大大地前进一步. 目前对远离稳定线核性质的理论研究还存在很多问题, 模型预言的精度还落后于先进的实验研究装置可提供的精度, 滴线附近核的复杂性质计算中存在着许多严重的技术困难, 理论模型和方法还有待于进一步的研究和发展.

参 考 文 献

- 1 Nuclear Science: A Long Range Plan. The DOE/NDF Nuclear Science Advisory Committee, Feb, 1996, 1~ 16
- 2 Nuclear Physics in Europe: Highlights and Opportunities. NuPECC Report, Dec, 1997, 31~ 54
- 3 Dobaczewski J, Hamamoto I, Nazarewicz W *et al.* Nuclear Shell Structure at Particle Drip Lines. *Phys Rev Lett*, 1994, 72: 981~ 984
- 4 Dobaczewski J, Nazarewicz W. Theoretical Aspects of Science with Radioactive Nuclear Beams. Theme Issue on Science with Beams of Radioactive Nuclei, Philosophical Transactions, ed by W Gelletly. Nucl-th/9707049
- 5 Hamamoto I, Sagawa H, Zhang X Z. Quadrupole Strength Function and Core Polarization in Drip Line Nuclei. *Nucl Phys*, 1997, A626: 669~ 685
- 6 Gruemmer F, Chen B Q, Ma Z Y *et al.* Bulk Properties of Light Deformed Nuclei Derived from a Medium-modified Meson-exchange Interaction. *Phys Lett*, 1996, B387: 673~ 679
- 7 Ring P. Relativistic Mean Field Theory in Finite Nuclei. *Prog Part Nucl Phys*, 1996, 37: 193~ 264
- 8 Vretenar D, Ring P, Lalazissis G A. Relativistic Mean-field Description of Nuclei at the Drip-lines. Nucl-th/9810011
- 9 Ma Zhongyu, Shi Hualin, Chen Baoqiu. Isovector Meson Contribution in Relativistic Hartree-Fock Approach for Finite Nuclei. *Phys Rev*, 1994, C50: 3 170-3 173; Shi Hualin, Chen Baoqiu, Ma Zhongyu. Relativistic Density Dependent Hartree-Fock Approach in Finite Nuclei. *Phys Rev*, 1995, C52: 144~ 159
- 10 Ma Zhongyu, Hiroshi Toki, Chen Baoqiu *et al.* The Giant Dipole Resonance of Ar-isotopes in the Relativistic RPA. *Prog Theo Phys*, 1997, 98: 917~ 926
- 11 Zhou Yong, Li Jingqing, Ma Zhongyu *et al.* Ground State Properties of $Z = 59$ Nuclei in the Relativistic Mean-field theory, in Preparation; 周 勇. 硕士论文, 1999
- 12 Minamisono T, Ohtsubo T, Minami I *et al.* Proton Halo of ⁸B Disclosed by Its Giant Quadrupole Moment. *Phys Rev Lett*, 1992, 69: 2 058~ 2 061

(下转第186页)

(上接第180页)

- 13 Ren Zhongzhou, Chen Baoqiu, Ma Zhongyu *et al.* One-proton Halo in ^{26}P and Two-proton Halo in ^{27}S . *Phys Rev*, 1996, C53, R572~575
- 14 Brown B A, Hansen P G. Proton Halos in the $1s0d$ Shell. *Phys Lett*, 1996, B381, 391~396
- 15 Chen B Q, Ma Z Y, Gruemmer F *et al.* Relativistic Mean Field Theory Study of Proton Halos in the $2s1d$ Shell. *J Phys, G, Nucl and Part Phys*, 1998, 24, 97~105
- 16 Navin A, Bazin D, Brown B A *et al.* Spectroscopy of Radioactive Beams from Single-nucleon Knockout Reactions; Application to the sd Shell Nuclei ^{25}Al and $^{26,27,28}\text{P}$. *Phys Rev Lett*, 1998, 81, 5 089~5 092

Study of Exotic Nuclei

Ma Zhongyu Chen Baoqiu

(Center of Nuclear Theoretical Physics, National Laboratory of Heavy Ion Accelerator, Lanzhou 730000)

(China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413)

Abstract We briefly present the physical aspects in the study of exotic nuclei with radioactive nuclear beams and introduce the main theoretical methods, models and present status. A few theoretical problems, such as pairing, coupling to the continuum, shell effects, spin-orbit interactions and proton halos, are discussed.

Key words exotic nuclei pairing correlation spin-orbit interaction proton halo

Classifying number O571.22