

# 相对论 Hartree-Fock 研究奇特核的性质\*

陈宝秋 马中玉

(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核物理所 北京 102413)

**摘要** 采用相对论 Hartree-Fock (RHF) 理论来描述奇特核的性质. 为了研究 Fock 项和矢量介子对奇特核性质的贡献和避免有效相互作用的不惟一性, 本文推广应用没有自由参数的密度有关的相对论 Hartree (RDH) 和 Hartree-Fock (RDHF) 理论来描述奇特核的性质. 在 RDH 和 RDHF 近似下, 计算了钙同位素链的性质, 特别研究了 Fock 交换项和矢量介子的贡献. 研究表明交换项和矢量介子对非常丰中子核的性质, 如结合能, 中子均方根半径, 中子密度分布的影响是非常不同于对稳定线附近核性质的影响. 同时, 对研究滴线奇特核性质的重要性及其理论模型做了简单的讨论.

**关键词** 奇特核 相对论 Hartree-Fock 理论 矢量介子

## 1 引言

近年来在放射性核束装置上实验的新进展开辟了核物理研究的崭新领域. 这些研究中已发现了许多新的物理现象<sup>[1]</sup>, 主要可概括为 3 个方面: 1) 某些轻核中存在的中子晕, 如<sup>11</sup>Li, <sup>11</sup>Be, <sup>14</sup>Be, <sup>17</sup>B 等; 2) 双满壳奇特核, 如<sup>10</sup>He, <sup>78</sup>Ni, <sup>100</sup>Sn; 3) 超重元素, 如  $Z = 110, 111, 112, 114, 116, 118$ . 这些发现引起国内外核物理学家的高度重视. 放射性核束装置还将为我们提供非常丰富新的物理现象. 如何理解和解释这些新的物理现象既是对核理论的挑战, 也是机遇. 因为传统的核理论模型和反应机制都是在符合稳定线附近核的性质基础上建立起来的, 当这些模型与反应机制推广到远离稳定线时, 它们的适用程度必须加以检验, 需要修正或发展现有的理论模型. 所以, 放射性核束物理是当前核物理研究的国际前沿领域, 对远离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 1996 年发布《核科学长远规划》<sup>[2]</sup> 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》<sup>[3]</sup> 都把用放射性核束装置研究在极端条件下的核结构问题放在核物理研究的重要地位, 给予极高的优先权. 世界上许多重要实验室如 RIKEN, GSI, MSU, Ganil 等及我国兰州重离子加速器已建成和计划中

2000-02-18 收稿

\* 国家自然科学基金(10075080, 19847002, 19835010), 国家重点基金研究发展规划(G200077407)和核工业基金资助

的放射性核束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,为开展极端条件下,特别是极端同位旋条件下的原子核性质的研究提供了极好的条件.

国内外在研究远离稳定线及滴线附近核的性质方面已开展了一系列理论研究工作,也解释了很多非常有兴趣的新的物理现象,但还存在许多问题有待研究. 这一领域主要的理论研究方法是采用非相对论<sup>[4]</sup>和相对论核多体方法<sup>[5]</sup>,近年来发展的相对论平均场(RMF)理论在描述球形和变形核的一系列性质上取得了很大的成功,而且推广到远离 $\beta$ 稳定线核性质的描述也取得成功<sup>[6]</sup>. 在讨论自旋-轨道相互作用及同位旋有关的有效相互作用,物理意义清楚,具有明显的优势. 滴线附近核是低密度,弱束缚的核系统具有非常特殊的性质,核的费米面接近连续态,核子的分离能很小,核表面有很大的弥散,对关联具有特殊重要的作用. 最外面的一个或几个核子具有非常大的空间分布,可能形成中(质)子晕. 滴线附近核由于束缚态与连续态之间的耦合及可能的低能散射使某些传统的核结构理论技巧,如BCS近似,变为不适用. 这可以从关系式 $S \approx \lambda + \Delta$ 看出, $S$ 是分离能, $\lambda$ 是费米能, $\Delta$ 是对隙. 在滴线附近,分离能很小,由 $\lambda$ 表示的单粒子场的能量和由 $\Delta$ 表示的对能同样重要,因而不能将对相互作用当作对单粒子平均场的微扰来处理. 目前常用的解决办法是Hartree-Fock-Bogoliubov(HFB)<sup>[7]</sup>或相对论Hartree-Bogoliubov(RHB)<sup>[8]</sup>理论来处理对关联. 但是这些方法很复杂,大部分只限于球形核. 如何来合理的和统一的处理滴线附近核的对关联和连续态问题乃是当前在这一研究领域的国际热门课题.

众所周知,RMF理论在描述奇特核的性质方面取得举目的成就,但RMF理论中乃存在一些问题有待研究:如交换项和矢量介子 $\pi$ 在RMF理论中都不考虑. 人们可以认为交换项和 $\pi$ 的部分贡献包括在有效相互作用中,如NL-SH,NL3. 但人们也希望能够微观地和定量地研究这些效应对奇特核性质的贡献,另一方面,在滴线附近除了要正确处理对关联和连续态问题外,还可能存在别的重要效应如交换项和 $\pi$ . 为了研究这些效应,人们必须采用RHF理论来描述奇特核的性质. 过去几年,人们努力发展相对论核多体理论,基本思想是把Dirac-Brueckner-Hartree-Fock(DBHF)理论和RMF或RHF理论联系起来. 这样,既保留RMF和RHF计算相对简单,又保留DBHF的 $G$ 矩阵的特性,这就是所谓密度有关的RDH或RDHF理论<sup>[9-12]</sup>. 这个没有自由参数的密度有关的相对论RDH和RDHF理论能同时改善有限核计算的平均结合能和均方根半径与实验值的符合,因此发展了相对论核多体理论. RDH理论还成功预示了 $^{14}\text{Be}$ 的中子晕结构<sup>[13]</sup>. 目前,RHF理论仅限于稳定核的研究<sup>[14]</sup>. 本文的目的是推广RHF理论来描述奇特核的性质,研究交换项和 $\pi$ 和 $\rho$ 对奇异核性质的贡献,揭示这些效应在滴线附近的重要性.

## 2 RHF 理论简介

相对论Hartree-Fock理论的出发点是有效拉氏密度 $\mathcal{L}$ . 它可以写为自由和相互作用两部分的和:

$$\mathcal{L} = \mathcal{L}_0 + \mathcal{L}_1. \quad (1)$$

自由拉氏密度 $\mathcal{L}_0$ 可写为如下形式:

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_0 = & \bar{\psi}(i\gamma_\mu \partial^\mu - M)\psi + \frac{1}{2}(\partial_\mu \sigma \partial^\mu \sigma - m_\sigma^2 \sigma^2) + \frac{1}{2}m_\omega^2 \omega_\mu \omega^\mu - \frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} + \\ & \frac{1}{2}m_\rho^2 \rho_\mu \cdot \rho^\mu - \frac{1}{4}G_{\mu\nu} \cdot G^{\mu\nu} + \frac{1}{2}(\partial_\mu \pi \cdot \partial^\mu \pi - m_\pi^2 \pi^2) - \frac{1}{4}H_{\mu\nu}H^{\mu\nu}, \end{aligned} \quad (2)$$

其中

$$F_{\mu\nu} = \partial_\nu \omega_\mu - \partial_\mu \omega_\nu, \quad G_{\mu\nu} = \partial_\nu \rho_\mu - \partial_\mu \rho_\nu, \quad H_{\mu\nu} = \partial_\nu A_\mu - \partial_\mu A_\nu,$$

这里  $\sigma, \omega_\mu, \rho_\mu, \pi$  分别表示介子场,  $m_\sigma, m_\omega, m_\rho, m_\pi$  是其对应的质量.  $\psi$  表示核子场, 它的静止是  $M$ .  $A_\mu$  表示电磁场. 相互作用拉氏密度可写为如下形式:

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_I = & g_\sigma \bar{\psi} \sigma \psi - g_\omega \bar{\psi} \gamma_\mu \omega^\mu \psi - g_\rho \bar{\psi} \gamma_\mu \rho^\mu \cdot \tau \psi + \frac{f_\rho}{2M} \bar{\psi} \sigma_{\mu\nu} \partial^\mu \rho^\nu \cdot \tau \psi - e \bar{\psi} \gamma_\mu \frac{1}{2}(1 + \tau_3) A^\mu \psi - \\ & \frac{f_\pi}{m_\pi} \bar{\psi} \gamma_5 \gamma_\mu \partial^\mu \pi \cdot \tau \psi, \end{aligned} \quad (3)$$

其中  $\tau$  和  $\tau_3$  是同位旋 Pauli 矩阵. 介子和核子之间的耦合强度用耦合常数  $g_i$  和  $f_\rho$  ( $i = \sigma, \omega, \rho, \pi$ ) 来表示.

经过推导, 得到自洽的 Hartree-Fock 方程. 径向 Dirac 方程具有以下形式:

$$\frac{d}{dr} \begin{pmatrix} G_a(r) \\ F_a(r) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{\kappa_a}{r} - \Sigma_{T,a}^D(r) & M + E_a + \Sigma_{S,a}^D(r) - \Sigma_{0,a}^D \\ M - E_a + \Sigma_{S,a}^D(r) + \Sigma_{0,a}^D & \frac{\kappa_a}{r} + \Sigma_{T,a}^D(r) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} G_a(r) \\ F_a(r) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -X_a(r) \\ Y_a(r) \end{pmatrix}, \quad (4)$$

其中  $\Sigma_{S,a}^D, \Sigma_{0,a}^D$  和  $\Sigma_{T,a}^D$  是自能直接项的贡献, 具有以下形式:

$$\Sigma_{T,a}^D(r) = [\Sigma_\rho^T(r) + \Sigma_\rho^{VT(1)}(r)]q_a, \quad (5)$$

$$\Sigma_{S,a}^D(r) = \Sigma_\sigma(r), \quad (6)$$

$$\Sigma_{0,a}^D(r) = \Sigma_\omega(r) + [\Sigma_\rho^V(r) + \Sigma_\rho^{VT(2)}(r)]q_a + \frac{1}{2}(1 + q_a)\Sigma_c(r). \quad (7)$$

$\Sigma_\sigma(r), \Sigma_\omega(r), \Sigma_\rho^V(r), \Sigma_\rho^{VT(1)}(r), \Sigma_\rho^{VT(2)}(r), \Sigma_c(r)$  及交换项的贡献  $X_a$  和  $Y_a$  的具体表达式见文献[12].

### 3 结果和讨论

具有自相互作用的 RMF 理论在描述核物质和有限核的性质方面取得了很大的成功, 它作为核多体理论的强有力的工具被广泛的应用到许多核物理问题的研究中, 如超核<sup>[15]</sup>, 超形变<sup>[6]</sup>及相对论夸克模型<sup>[16]</sup>, 特别是广泛的应用于远离  $\beta$  稳定线核性质的研究.

尽管 RMF 理论在描述核的性质方面取得了很大成功, 但该理论是相对论核多体理论的最简单模型. 在相对论平均场理论中, 交换项, 矢量介子  $\pi$  的贡献都不考虑. 人们可以认为交换项和矢量介子  $\pi$  和  $\rho$  的部分贡献包括在有效相互作用中, 如 NL-SH, NL3. 但人们也希望能够微观地和定量地研究这些效应对奇特核性质的贡献. 为考虑它们的贡献, 人们必须采用 RHF 理论. 另一方面, 在 RMF 理论中, 采用的耦合常数是由符合实验

数据来确定的(如 NL-SH, NL3). 为避免有效相互作用的不惟一性,我们采用没有自由参数的相对论密度有关的 Hartree-Fock 理论<sup>[12]</sup>. 没有自由参数的计算是指,一旦选定现实的两体相互作用(如 Bonn-A 位),不再调节这两体相互作用位的参数来符合核的性质.

为了研究交换项,矢量介子对奇特核性质的贡献,采用如下不同的近似:1) 仅交换  $\sigma$  和  $\omega$  介子的相对论密度有关的 Hartree 理论(RDH);2) 交换  $\sigma, \omega$  和  $\rho$  介子的相对论密度有关的 Hartree 理论(RDH +  $\rho$ );3) 仅交换  $\sigma$  和  $\omega$  介子的相对论密度有关的 Hartree-Fock (RDHF)理论;4) 交换  $\sigma, \omega, \pi$  和  $\rho$  介子的相对论密度有关的 Hartree-Fock 理论(RDHF +  $\pi + \rho$ ). 图 1 给出不同近似计算得到钙同位素总的结合能与实验数据的比较. 曲线 liquid drop 是实验数据<sup>[17]</sup>和 FRDM 计算的结果. 从图 1 可以看出,对稳定线附近的核,不同近似计算的结果很相近,这表示交换项和矢量介子对总结合能的贡献很小,但随着中子数的增加,它们的贡献逐渐增大. 在滴线附近,2 个近似模型(RDHF, RDHF +  $\pi + \rho$ )计算的结果与实验数据具有相同的趋势,而 RDH 计算结果大大偏离实验曲线,这表示交换项和矢量介子  $\pi$  和  $\rho$  对总结合能的贡献的重要性, RDHF, RDHF +  $\pi + \rho$  计算的结果压低总结合能,  $\rho$  介子的效应要大于  $\pi$  介子的效应,这个结果与我们以前工作<sup>[12]</sup>的结论相一致,但他们的结果与实验数据<sup>[17,18]</sup>的趋势相一致. 这里要强调的是目前的计算结果是无参数的,所以,理论的结果不可能与实验数据完全一样.

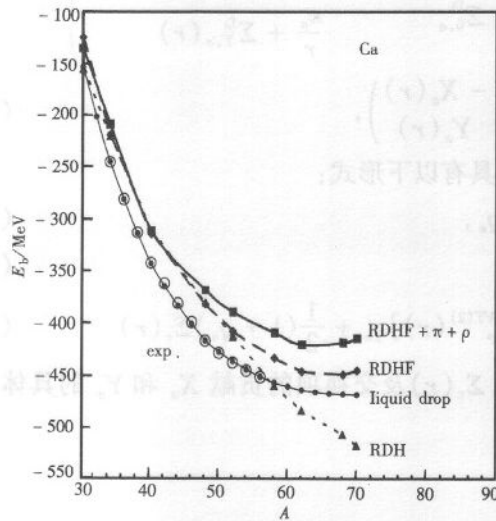


图 1 密度有关的相对论 Hartree-Fock 理论计算钙同位素总的结合能与实验数据的比较

钙同位素的中子和质子的 RMS 半径分别表示在图 2(a)和(b). 带三角形的虚线表示 RDH +  $\rho$  计算的结果;带实方块的实线表示 RDHF +  $\pi + \rho$  计算的结果;带空方块的实线表示 RDHF 计算的结果. 交换项的贡献减小中子和质子的 RMS 半径,这个结果与文献[10]的结论相一致. 但在滴线附近交换项的效应不是减小而是增加中子的 RMS 半径. 矢量介子  $\pi, \rho$  的贡献是增加中子和质子的 RMS 半径,但在滴线附近,它们对质子的 RMS 半径的效应是减小质子的 RMS 半径,而对中子的 RMS 半径的效应是增大中子的 RMS 半径,  $\rho$  介子对中子的 RMS 半径的贡献要大于  $\pi$  介子. 滴线附近核是低密度,弱束缚的核系统具有非常特殊的性质,

核的费米面接近连续态,核子的分离能很小,核表面有很大的弥散,最外面的一个或几个核子具有非常大的空间分布. 所以,用中子密度分布可以很好地表征这个特性. 交换项和矢量介子  $\pi$  和  $\rho$  的贡献从中子密度分布可以很好地显示出来,为了说明它们对中子密度分布的贡献,取非常稳定核<sup>40</sup>Ca 和非常丰中子核<sup>70</sup>Ca 的中子密度分布作比较. 图 3 (a)和(b)分别给出不同近似计算得到<sup>40</sup>Ca 和<sup>70</sup>Ca 的中子密度分布. 其中点线表示 RDH +  $\rho$  计算的结果,粗和细的实线分别表示 RDHF 和 RDHF +  $\pi + \rho$  计算的中子密度分布. 从

图 3 可以看出,对非常稳定核<sup>40</sup>Ca,交换项,矢量介子  $\pi$  和  $\rho$  对中子密度分布的贡献非常小,可以不必考虑. 但对非常丰中子核<sup>70</sup>Ca, RDHF 和 RDHF +  $\pi + \rho$  计算的中子密度分布与 RDH +  $\rho$  计算的结果非常的不同. RDHF 和 RDHF +  $\pi + \rho$  计算的中子密度分布有很长的尾巴,这表明丰中子核<sup>70</sup>Ca 具有晕核结构. 交换项、 $\pi$  和  $\rho$  介子对中子密度分布的贡献非常大,它们的效应很重要而不能忽略.

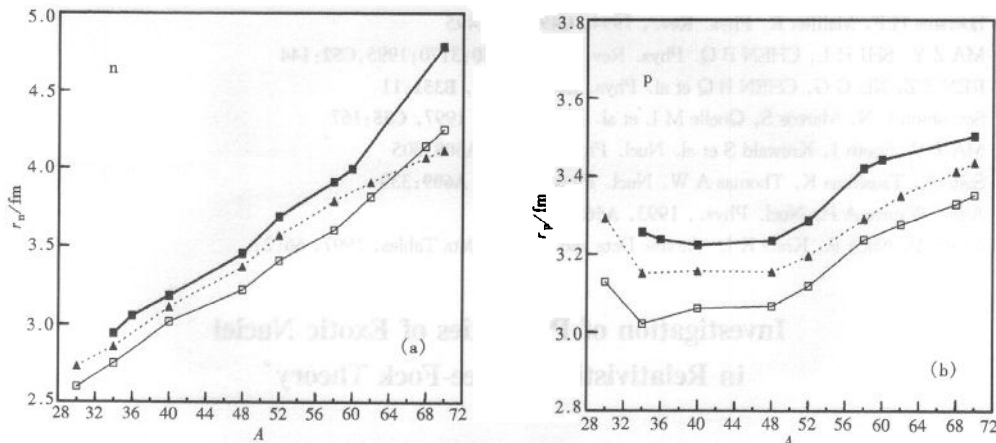


图 2 密度有关的相对论 Hartree-Fock 理论(RDHF, RDHF +  $\pi + \rho$ ) 计算

钙同位素均方根半径与 RDH +  $\rho$  结果的比较

(a) 钙同位素中子的均方根半径; (b) 钙同位素质子均方根半径.

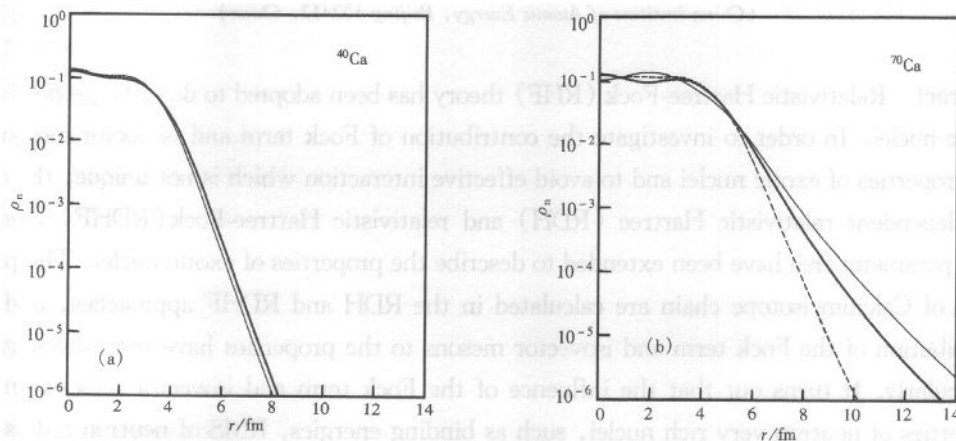


图 3 密度有关的相对论 Hartree-Fock 理论(RDHF, RDHF +  $\pi + \rho$ ) 计算

钙中子密度分布与 RDH +  $\rho$  的结果的比较

(a) <sup>40</sup>Ca 中子密度分布; (b) <sup>70</sup>Ca 中子的密度分布.

参考文献 (References)

- 1 Tanihata I. J. of Phys. , 1996, **G22**:157; Hansen P G et al. Ann. Rev. Nucl. Part. Sci. , 1995, **45**:591
- 2 Nuclear Science: A Long Range Plan, The DOE/NDF Nuclear Science Advisory Committee, Feb. 1996
- 3 Nuclear Physics in Europe: Highlights and Opportunities, NuPECC Report, Dec. 1997
- 4 Dobaczewski J et al. Phys. Rev. Lett. , 1994, **72**:981
- 5 Serot B, Walecka J D. Adv. Nucl. Phys. , 1986, **16**:1
- 6 Ring P. Prog. Part. Nucl. Phys. , 1996, **37**:193; CHEN B Q, MA Z Y, Gruemmer F et al. J. of Phys. , 1998,

- G24:97
- 7 Dobaczewski J, Flocard H, Treiner J. Nucl. Phys., 1984 **A422**:103; Grucmmer F, CHEN B Q, MA Z Y et al. Phys. Lett., 1996, **B387**:673
  - 8 Poschl W, Vretenar D, Lalazissis G A et al. Phys. Rev. Lett., 1997, **79**:3841; MENG J, Ring P. Phys. Rev. Lett., 1996, **77**:3963
  - 9 Brockmann R, Toki H. Phys. Rev. Lett., 1992, **68**:3408
  - 10 Fritz R, Muther H, Machleidt R. Phys. Rev. Lett., 1993, **71**:46; Phys. Rev., 1994, **C49**:633
  - 11 Boersma H F, Malfliet R. Phys. Rev., 1994, **C49**:233;1495
  - 12 MA Z Y, SHI H L, CHEN B Q. Phys. Rev., 1994, **C50**:3170;1995, **C52**:144
  - 13 REN Z Z, XU G G, CHEN B Q et al. Phys. Lett., 1995, **B351**:11
  - 14 Savushkin L N, Marcos S, Quelle M L et al. Phys. Rev., 1997, **C55**:167
  - 15 MA Z Y, Speth J, Krewald S et al. Nucl. Phys., 1996, **A608**:305
  - 16 Saito K, Tsushima K, Thomas A W. Nucl. Phys., 1996, **A609**:339
  - 17 Audi, Waptra A H. Nucl. Phys., 1993, **A565**:1
  - 18 Moller P, Nix J R, Kratz K L. Atomic Data and Nuclear Data Tables, 1997, **66**(2)

## Investigation of Properties of Exotic Nuclei in Relativistic Hartree-Fock Theory\*

CHEN Bao-Qiu MA Zhong-Yu

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

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

**Abstract** Relativistic Hartree-Fock (RHF) theory has been adopted to describe properties of exotic nuclei. In order to investigate the contribution of Fock term and isovector mesons to the properties of exotic nuclei and to avoid effective interaction which is not unique, the density dependent relativistic Hartree (RDH) and relativistic Hartree-Fock (RDHF) theories with parameter free have been extended to describe the properties of exotic nuclei. The properties of Calcium isotope chain are calculated in the RDH and RDHF approaches, and the contribution of the Fock term and isovector mesons to the properties have been investigated particularly. It turns out that the influence of the Fock term and isovector mesons on the properties of neutron very rich nuclei, such as binding energies, RMS of neutron radius and distribution of neutron density, is very different from those of stable nuclei. We also briefly discuss importance of study on the properties of nuclei near drip line and the theoretical model used in this paper.

**Key words** exotic nuclei relativistic Hartree-Fock theory, isovector mesons

Received 18 February 2000

\* Supported by NSFC(10075080, 19847002, 19835010), State Major Basic Research Development Program under Contract Number (G200077407) and The Science Foundation for Nuclear Industry