

中等质量核激发态奇异核结构的研究^{*}

石钰^{1,2} 马余刚² 陈金根² 方德清² 王鲲² 颜廷志^{1,2} 马春旺^{1,2} 刘桂华^{1,2}
田文栋² 王宏伟² 郭威² 马二俊^{1,2} 苏前敏^{1,2} 蔡翔舟^{2,1)}

1(中国科学院研究生院 北京 100039)
2(中国科学院上海应用物理研究所 上海 201800)

摘要 在球形非线性相对论平均场(RMF)的理论框架下,研究了 β 稳定线附近中等质量($Z=20-50$)奇A核在激发态下存在的晕或皮结构,提取了价核子与核芯均方根半径的比值(R_{vc}),并结合单中子或质子的分离能($S_n(p)$),讨论了具有晕或皮结构的激发态所呈现出来的带状分布,说明了壳层结构与离心势垒对激发态晕或皮结构形成的重要影响.

关键词 中等质量核 单核子激发态 晕或皮结构

1 引言和相对论平均场理论简介

自从1985年Tanihata等人发现了¹¹Li存在双中子晕结构以来^[1],人们对滴线附近轻核的晕或皮结构作了大量的研究.在Morlock等人发现了 β 稳定线附近核¹⁷F第一激发态存在质子晕后^[2], β 稳定线附近轻核的激发态奇异结构就成为新的研究方向.实验方面,刘祖华等人发现¹²B的第二,第三激发态和¹³C的第一激发态存在单中子晕结构;¹³C的第三激发态存在中子皮^[3-5].李志宏等人提出了在⁶Li的0⁺激发态存在质子-中子晕^[6].理论方面,任中州等人用RMF模型探讨了¹⁷F第一激发态的质子晕^[7,8].Arai等人用三体的Cluster模型研究了⁶Li的0⁺激发态,讨论了围绕 α 核芯的质子-中子晕^[9].陈金根等人通过对镜像核晕或皮结构的研究探讨了激发态奇异结构的形成规律^[10-12].目前对激发态晕或皮结构的研究主要集中在 β 稳定线附近的轻核,本文将在非线性相对论平均场(RMF)的框架下,系统地研究中等质量核单核子激发态的晕或皮结构及其分布特点.

非线性相对论平均场模型得到的关于核的各种数据与实验测量值符合的很好,而且对核子的密度分布也能做出较好的描述.在RMF模型中,核子之间的相

互作用是通过 σ , ω 和 ρ 介子传递的,其局域的拉格朗日量为

$$\begin{aligned} \mathcal{L} = & \bar{\Psi}(i\gamma^\mu \partial_\mu - M)\Psi - g_\sigma \bar{\Psi}\sigma\Psi - g_\omega \bar{\Psi}\gamma^\mu\omega_\mu\Psi - \\ & g_\rho \bar{\Psi}\gamma^\mu\rho_\mu^a\gamma^a\Psi + \frac{1}{2}\partial^\mu\sigma\partial_\mu\sigma - \frac{1}{2}m_\sigma^2\sigma^2 - \\ & \frac{1}{3}g_2\sigma^3 - \frac{1}{4}g_3\sigma^4 - \frac{1}{4}\Omega^{\mu\nu}\Omega_{\mu\nu} + \frac{1}{2}m_\omega^2\omega^\mu\omega_\mu - \\ & \frac{1}{4}R^{\alpha\mu\nu}R_{\mu\nu}^\alpha + \frac{1}{2}m_\rho^2\rho^{\alpha\mu}\rho_\mu^\alpha - \frac{1}{4}F^{\mu\nu}F_{\mu\nu} - \\ & e\bar{\Psi}\gamma^\mu A^\mu \frac{1}{2}(1-\tau^3)\Psi, \end{aligned}$$

其中

$$\Omega^{\mu\nu} = \partial^\mu\omega^\nu - \partial^\nu\omega^\mu, \quad (1)$$

$$R^{\alpha\mu\nu} = \partial^\mu\rho^{\alpha\nu} - \partial^\nu\rho^{\alpha\mu}, \quad (2)$$

$$F^{\mu\nu} = \partial^\mu A^\nu - \partial^\nu A^\mu, \quad (3)$$

公式中各项的意义可在文献[13—23]中找到.

2 计算结果与讨论

本文将核考虑成具有单个价核子围绕着球形的核芯这样的系统,用球形的相对论平均场模型来计算单核子激发态的结构.计算分别使用了NLZ和NL3参数组,可以得到相似的结果.文中对质子激发态给出

^{*} 国家自然科学基金(10328259, 10135030, 10405032, 1053510, 10405033, 10475108), 上海科技发展基金启明星计划(06QA14062, 05XD14021, 03QA14066)和973基础研究项目(G200077404)资助

1) E-mail: caixiangzhou@sinap.ac.cn

了NLZ参数组^[23, 24]计算结果, 对 neutron 激发态给出了 NL3 参数组^[25]计算结果.

针对核 ⁴⁷Sc 和 ⁶¹Zn, 图 1 给出了它们基态和单质子(中子)激发态的 R_{vc} 比值与分离能 $S_n(p)$. 由于库仑势垒的作用, ⁴⁷Sc 的单质子激发态较 ⁶¹Zn 的单中子激发态少. 可以看出, ⁴⁷Sc 的 $2p_{1/2}$, $1f_{5/2}$ 态和 ⁶¹Zn 的 $3s_{1/2}$, $2d_{5/2}$ 态都是弱束缚态, 分离能都在 0.4 MeV 左右. 其中 ⁶¹Zn 的 $3s_{1/2}$ 态的 R_{vc} 值为 1.94, 并且如图 2 所示, 其中子的密度分布相对于质子有着明显的弥散, 表明存在单中子晕结构. 由于离心势对价核子的束缚作用, ⁶¹Zn 的 $2d_{5/2}$ 态的 R_{vc} 值较 $3s_{1/2}$ 态明显地下降, 但仍大于其他的核态. 与一般轻核的 $1d$ 态情况不同, 它的中子密度分布有较大的弥散, 说明了它可能有晕或皮结构. 而对于 ⁴⁷Sc 的 $2p_{1/2}$ 态, 虽然它的 R_{vc} 要比临近的核态大, 但是其质子的密度分布弥散较小, 所以认为它可能有单质子皮. 与此类似, 综合地考虑 R_{vc} 比值, 分离能 $S_n(p)$ 以及密度分布, 得到了一些具有晕或皮结构的中等质量 ($z=20-50$) 奇 A 核的单核子激发态, 并在表 1 中列出了一些计算结果.

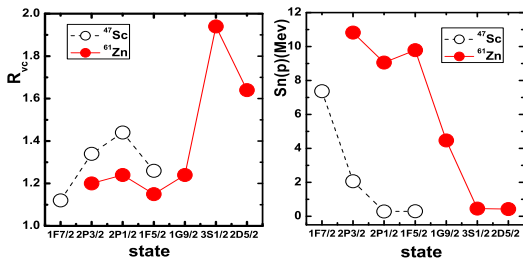


图 1 ⁴⁷Sc 和 ⁶¹Zn 基态和激发态的 R_{vc} 值和分离能 $S_n(p)$

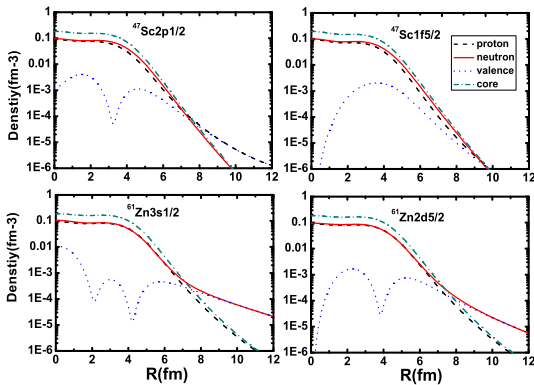


图 2 ⁴⁷Sc 和 ⁶¹Zn 的密度分布图

虚线, 实线, 点线和点划线分别代表的质子, 中子, 价核子, 核芯的密度分布.

图 3 给出了在 R_{vc} - S_n 关联下单中子激发态的分布. 星号、实心点和空心点分别代表具有中子晕, 中

子皮, 和正常结构的核态. 可以看出, 在 4 MeV 下, 具有中子晕或皮结构的激发态呈现出带状分布, 沿着每条带子, 随着分离能的减少和比值 R_{vc} 的增加, 核态将依次由正常核变为皮核和晕核. 其中 ¹³C 和 ¹⁵O 的 $2s_{1/2}$ 激发态的中子晕和中子皮结构的数据取自文献^[3-5]和^[11]. 从上到下, 每条带子上的核态分别是 $2s$, $3s$ 或 $2p$, $2d$ 或 $3p$, 其主量子数与轨道量子数之和分别是 2, 3, 4, 说明了核的壳层结构与离心势共同影响着激发态奇异结构形成. 通常认为由于离心势对价核子的束缚作用, 轻核的 $1d$ 态一般不会有奇异结构. 而中等质量核, 其 $2d$ 激发态却可能形成奇异结构, 例如 ⁵⁹Zn $2d_{5/2}$, 和 ⁶¹Zn $2d_{5/2}$, 表明了主量子数的增加可能有利于晕或皮结构的形成. 因为单质子的激发态比较少, 没有能形成系统的带状分布, 所以这里没有给出它的分布图.

表 1 激发态晕或皮结构的物理性质

| nuclear | state | R_c | R_v | R_{vc} | B | $S_n(p)$ |
|------------------|---------------|-------|-------|----------|--------|----------|
| ⁶³ Ni | $3s_{1/2}(n)$ | 3.78 | 7.59 | 2.01 | 535.9 | 0.24 |
| ⁵⁹ Zn | $2d_{5/2}(n)$ | 3.69 | 6.28 | 1.7 | 481.26 | 0.13 |
| ⁶⁵ Ge | $3s_{1/2}(n)$ | 3.83 | 6.54 | 1.71 | 531.5 | 1.44 |
| ⁶⁹ Se | $2d_{3/2}(n)$ | 3.93 | 6.31 | 1.61 | 557.47 | 0.43 |
| ⁴⁷ Sc | $2p_{1/2}(p)$ | 3.53 | 5.07 | 1.44 | 397.04 | 0.29 |
| ⁴⁷ V | $2p_{3/2}(p)$ | 3.52 | 4.93 | 1.4 | 390.08 | 0.37 |
| ⁵³ Mn | $2p_{1/2}(p)$ | 3.59 | 4.95 | 1.38 | 451.46 | 0.6 |
| ⁵³ Co | $2p_{3/2}(p)$ | 3.59 | 4.91 | 1.37 | 437.96 | 0.35 |

R_c , R_v 分别代表核芯和价核子的均方根半径, 单位为 fm, B 为总结合能, 单位为 MeV.

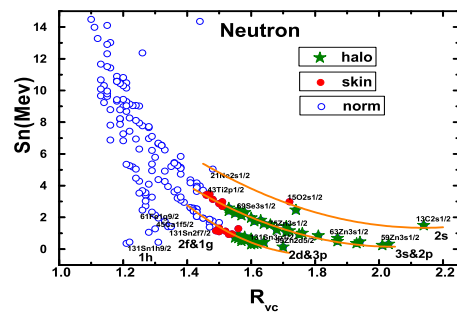


图 3 中子激发态的 R_{vc} - S_n 关联图
' $2s$ ' 等代表相应核态的主量子数和轨道量子数.

3 结论

通过 RMF 计算, 综合地考虑 R_{vc} 值, 分离能和密度分布这些物理量, 得到了一些可能具有奇异结构的中等质量核的激发态. 单中子激发态在 R_{vc} - S_n 关联图下呈现出带状分布, 每条带子上核态的主量子数与轨道

量子数之和为 2, 3, 4, 说明了壳层结构与离心势共同影响着激发态奇异结构的形成. 与轻核的 $1d$ 态不同,

中等质量核的 $2d$ 激发态也可能形成奇异结构, 说明主量子数的增加可能有利于激发态奇异结构的形成.

参考文献(References)

- 1 Tanihata I, Hamagaki H, Hashimoto O et al. Phys. Rev. Lett., 1985, **55**: 2676
- 2 Morlock R, Kunz R, Mayer A et al. Phys. Rev. Lett., 1997, **79**: 3837
- 3 LIU Z H, LIN C J, ZHANG H Q et al. Phys. Rev., 2001, **C64**: 034312
- 4 LI C J, LIU Z H, ZHANG H Q et al. Chin. Phys. Lett., 2001, **18**: 1183
- 5 LIU Z H, LIN C J, ZHANG H Q et al. Chin. Phys. Lett., 2001, **18**: 1024
- 6 LI Z H, LIU W P, BAI X X et al. Phys. Lett., 2002, **B527**: 50
- 7 REN Z Z, Faessler A, Bobyk A et al. Phys. Rev., 1998, **C57**: 2752
- 8 REN Z Z, JIANG W Z, CAI X Z et al. Commun. Theor. Phys., 2002, **38**: 470
- 9 Arai K, Suzuki Y, Varga K et al. Phys. Rev., 1995, **C51**: 2488
- 10 ZHANG Hu-Yong, SHEN Wen-Qing, REN Zhong-Zhou. Chin. Phys. Lett., 2003, 20(9): 1462
- 11 CHEN J G, CAI X Z, SHEN W Q et al. Eur. Phys. J., 2005, **A23**: 11
- 12 CHEN J G, CAI X Z, SHEN W Q et al. Nucl. Phys. Rev., 2005, **22**: 11
- 13 Horowitz C J, Serot B D. Nucl. Phys., 1981, **A368**: 503
- 14 MA Zhong-Yu, SHI Hua-Lin, CHEN Bao-Qiu et al. Phys. Rev., 1994, **C50**: 3170
- 15 Reinhard P G, Rufa M, Maruhn J et al. Phys., 1986, **A323**: 13
- 16 Patra S K. Nucl. Phys., 1993, **A559**: 173
- 17 REN Zhong-Zhou, Mitting W, CHEN Bao-Qiu et al. Phys. Rev., 1995, **C52**: R20
- 18 Furnstahl R J, Price C E. Phys. Rev., 1989, **C40**: 1398
- 19 Marcos S, Giai N Van, Savushkin L N et al. Nucl. Phys., 1992, **A549**: 143
- 20 Warriar Latha S, Gambhir Y K. Phys. Rev., 1991, **C49**: 871
- 21 Tanihata I, Hirata D, Toki H et al. Nucl. Phys., 1995, **A583**: 769
- 22 Sharma M M, Nagarajan M A, Ring P. Phys. Lett., 1993, **B312**: 377; Sharma M M, Lalazissis G A, Ring P. 1993, **317**: 9
- 23 Reinhard P G. Rep. Prog. Phys., 1989, **52**: 439
- 24 Lalazissis G A et al. Phys. Rev., 1997, **C55**: 540
- 25 Riisager K, Jensen A S et al. Nucl. Phys., 1992, **A548**: 393

Exotic Structure of the Single Nucleon Excited States in the Medium Nuclei near the Stability Line^{*}

Shi Yu^{1,2} MA Yu-Gang² CHEN Jin-Geng² FANG De-Qing² WANG Kun² YAN Ting-Zhi^{1,2}
 MA Chun-Wang^{1,2} LIU Gui-Hua^{1,2} TIAN Wen-Dong² WANG Hong-Wei² GUO Wei²
 MA Er-Jun^{1,2} SU Qian-Min^{1,2} CAI Xiang-Zhou^{2;1)}

1(Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039)

2(Shanghai Institute of Applied Physics, CAS, 201800, China)

Abstract The halo or skin structure of excited states in odd nuclei near the stability line is studied in terms of the spherical nonlinear relativity mean field theory calculation, considering nucleus as a spherical core plus a valence nucleon outside it. The tail of density distributions of excited states with exotic structure are presented for medium-heavy nuclei. The ratio (R_{vc}) of valence nucleon rms radii to that of nuclear core are deduced. Together with the separation energy ($S_n(p)$), the ratio (R_{vc}) constitutes a correlation, in which the exotic nuclei excited states distribution presents a strap structure. It implied the effects of centrifugal barrier and the shell structure.

Key words medium mass nuclei, single particle excited states, halo or skin structure

^{*} Supported by National Natural Science Foundation of China (10405032, 1053510, 10405033, 10475108, 10328259, 10135030), Shanghai Development Foundation for Science and Technology (06QA14062, 05XD14021, 03QA14066) and Major State Basic Research Development Program in China (G200077404)

1) E-mail: caixiangzhou@sinap.ac.cn