

滴线原子核中的晕现象

——中子晕、超子晕、巨晕和形变晕¹⁾

孟杰 吕洪凤 张双全 周善贵

(北京大学物理学院技术物理系,北京,100871)

摘要 描述了相对论连续谱 Hartree-Bogoliubov 理论框架下的多种可能的晕现象。预言了中子滴线附近的 Ca 原子核中可能存在着巨晕,并简要介绍了 O、Ni、Zr、Sn 和 Pb 等一些质子幻数核从质子滴线到中子滴线之间的原子核基态性质。随后给出超核内的晕现象研究,如 Ca 超核内的中子晕和 ^{12}C 内的单 Λ 超子晕。此外,还讨论了形变晕等奇特现象。

关键词 滴线原子核;晕;超核;相对论连续谱 Hartree-Bogoliubov 理论

中图分类号 O 571.2 A

0 引言

随着世界范围内放射性核束(Radioactive Nuclear Beam)装置和探测技术的高速发展,今天核物理学家的兴趣已从过去研究 β 稳定线附近的原子核转移到研究丰质子、丰中子乃至滴线附近原子核的性质。由于外围核子的极端弱束缚以及核子束缚态和连续谱的耦合变得更加重要等因素,滴线附近的原子核(又称“奇特原子核”)中,出现了很多奇异的新现象。例如,中子晕和中子皮的存在,传统幻数的消失和新幻数的出现等^[1,2]。在这些新的奇异现象中,晕现象发现较早,从而引起了核物理学家最为广泛的关注。晕核提供了研究低密核物质的一种新方式;借助于晕核,人们还可以研究密度波动较大的系统的结构和动力学性质。原子核内晕的通常特征是价重子(包括中子、超子等)有非常大的空间分布、特别小的分离能等。本文将结合北京大学小组近年来的研究成果,探讨晕现象的几种情况——中子晕、超子晕、巨晕和形变晕。

对于奇特原子核,由于最外围核子的分离能非常小,费米能级与连续谱非常接近,会有核子对在力作用下散射到连续谱内。因此,离心位垒、势能弥散、费米面附近的单粒子态性质和对相互作用等对滴线核性质起着非常重要的作用^[3-12]。为恰当地描述晕核较大的空间分布,自治地处理束缚态和连续谱之间的耦合,需要在坐标空间求解原子核的平均场方程^[13,14]。相对论平均场(Relativistic Mean Field,简称 RMF)理论可以非常成功地描述从 β 稳定线到滴线附近的原子核^[15,16]。为描述滴线附近的原子核中的晕等奇特现象,本文作者之一发展了相对论连续谱 Hartree-Bogoliubov(RCHB)理论^[3,4]。RCHB 理论把 RMF 理论与 Bogoliubov 变换结合起来,并在坐标空间求解,可以统一地描述平均场和对关联,同时自治地描述束缚态和连续态之

1) 国家重点基础研究发展规划(G2000077407)、国家自然科学基金(10025522,10047001,10221003)资助项目

收稿日期:2003-11-15

间的耦合。

原子核中的一个或多个核子被超子所代替,便形成了超核。借助于超核,可以研究超子-核子相互作用、超子对奇特核性质的影响等。RMF 理论已经被推广到研究多奇异系统^[17-19]、丰中子超核^[20]和形变超核^[21,22]。同样地,RCHB 理论也可以对这些领域进行研究并相应给出更为细致可靠的结果,尤其是对超核中的晕等奇特现象。

下面,本文将在 RCHB 理论框架下描述各种可能的晕现象。文中所有的计算均采用 NL-SH 参数。第二节给出中子滴线附近 Ca 原子核中可能存在巨晕的预言,并简要地介绍一些其他质子幻数核,如 O、Ni、Zr、Sn 和 Pb 等,从质子滴线到中子滴线之间的原子核基态性质。第三节给出超核内的晕现象研究,如 Ca 超核内的中子晕和¹³C 内的单 Λ 超子晕。上述研究均假定原子核为球形,关于变形的奇特核研究将在第四节中给出。最后是小结。

1 巨晕

RCHB 理论第一次自洽地对首例晕核——¹¹Li 进行了理论解释^[3],并预言了在 $A > 122$ 的 Zr 同位素中存在巨中子晕这一新的奇特现象^[7]。最近,利用 RCHB 理论,作者系统地研究了 O、Ca、Ni、Zr、Sn 和 Pb 等元素从质子滴线到中子滴线之间的原子核的基态性质^[23-25]。

通过对上述原子核的双中子分离能、中子密度分布、单粒子能级和各能级(包括连续态)占有几率的分析表明中子滴线附近的 Ca 同位素中存在巨中子晕。在图 1 中,给出了丰中子的偶 Ca 同位素,⁵⁸⁻⁷²Ca,在 Fermi 面附近中子能级的占有几率 v^2 。由于 Fermi 面接近 0,对相互作用可以将中子对从弱束缚态散射到连续谱,从而连续态的单粒子占有几率将直接影响核的性质。连续谱的贡献可以由散射到连续谱的中子数来表示,即 N_h 。 N_h 通过对各连续态的占有几率 v^2 的叠加得到^[7,23]。从图 1 可知,⁶²⁻⁷²Ca 的 N_h 约为 1~3。

在图 2 中,给出了对 O、Ca、Ni、Zr、Sn 和 Pb 偶-偶同位素链计算得到的中子半径 r_n 。图中同时给出了经验公式 $r_n = r_0 N^{1/3}$ 的曲线,其中 $r_0 = 1.139$ fm 是通过拟合 ²⁰⁸Pb 的实验数据得到的。可以看到,该简单公式对计算结果的描述相当好。但是中子数超过 40 的 Ca 原子核和中子数超过 82 的 Zr 原子核的半径明显地大于此公式的预言值。这些原子核的中子半径的异常上升与巨中子晕的形成有关^[23-25]。由于质量数相对较小,在当前的放射性核束技术下,奇特 Ca 原子核中的巨晕要比在更重的 Zr 同位素中的巨晕更容易观测到。最近,我们进一步对更轻的丰中子滴线核区进行了考察,发现在 Na、Mg 的滴线附近同样会形成巨中子晕核,这将对未来几年巨中子晕核的实验探索和合成具有重要的指导意义^[12,25]。

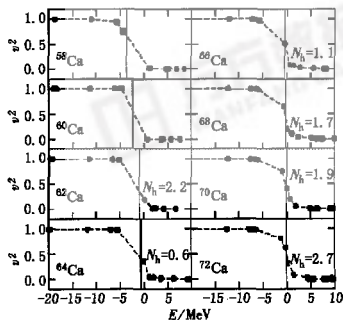


图 1 偶质量数的 Ca 原子核的 Fermi 面附近中子能级的占有几率随着单粒子能量的变化

Fig. 1 The particle occupation probabilities for even-N Ca isotopes near Fermi level versus the single-particle energies. Dashed line is used for guiding eyes

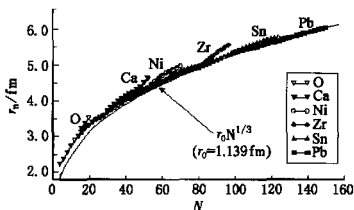


图 2 偶质量数的 O、Ca、Ni、Zr、Sn 和 Pb 原子核的中子半径随着质量数的变化

Fig.2 The two neutron separation energies S_{2n} for the proton magic isotopes, including O, Ca, Ni, Zr, Sn and Pb isotopes, as a function of the neutron number. The experimental values available are denoted by the solid symbols and the calculated ones by the open symbols

加,在 $N = 20, 28$ 和 40 处均出现大的跳变,这些变化对应着壳模型中的满壳和亚满壳。但另一个幻数 $N = 50$ 处,并没有表现出类似的变化特征,这与中子晕的形成有关。非常小的中子分离能被认为是原子核中产生中子晕的条件之一。图 3 的另一显著特征是,中子数大于 40 的奇特 Ca 同位素的双中子分离能 S_{2n} 非常接近于零。这些奇特 Ca 同位素可以看成是中子数 40 以上的所谓价中子填充在弱束缚态和连续谱中而形成的。由于小的中子分离能,这些价中子的空间分布可能很大,因此这里 S_{2n} 的行为表明在奇特 Ca 同位素中可能有巨晕现象的存在。

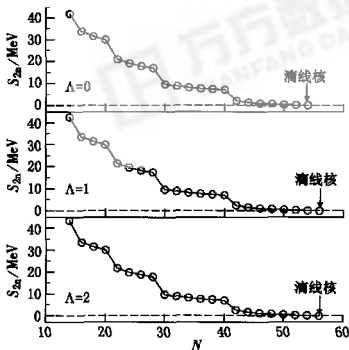
从图 3 还可以看出,在不打破中子壳层结构的情况下,加入 1 个或 2 个 Δ 超子降低了中子的 Fermi 面,使得超核的中子滴线核 ($N = 54$) 比通常的中子滴线核 ($N = 52$) 多两个中子。由于对关联和连续谱贡献导致的巨晕现象在 Ca 同位素的 Δ 超核内同样存在。这对在超核的基础上探测巨晕是非常有趣的结果。

通常,核内的 Δ -N 相互作用要比 N-N 相互作用弱,超子态应该比相应的中子态有更

2 超核内的晕

根据实验上提供的 Δ 超子-核子相互作用的信息以及理论上对 Ca 同位素中巨中子晕的预言^[23-25],研究在这些奇特核加入超子后将出现的奇异现象是非常有意义的。作者对偶中子数的 Ca 同位素从质子滴线到 neutron drip line 范围内的单 Δ 超核和双 Δ 超核基态性质进行了系统研究,并预言了在超核中也可能存在巨中子晕现象^[26,27]。

中子分离能是揭示核壳层结构、预言中子滴线、检验微观理论模型的重要物理量。图 3 给出了偶质量数的 Ca 同位素的双中子分离能 S_{2n} 随中子数 N 的变化, $\Delta = 0, \Delta = 1$ 和 $\Delta = 2$ 用来标记通常核、单 Δ 超核和双 Δ 超核。在图 3 中, S_{2n} 曲线的共同特征是:随着中子数的增



上、中、下三图分别对应通常核、单 Δ 超核和双 Δ 超核空心圆圈为计算值,箭头所指为中子滴线核

图 3 偶质量数的 Ca 原子核的双中子分离能 S_{2n} 随中子数 N 的变化

Fig.3 The two-neutron separation energies S_{2n} in even-N Ca isotopes versus the neutron number N . The upper panel is for ordinary nuclei, the middle one for single- Δ hypernuclei, and the lower one for double- Δ hypernuclei

大的空间弥散,以薄雾状环绕在核芯的四周而形成晕,即超子晕。由于超子的奇数不为零,超子晕核将提供中子晕核所没有的奇异性。超子的加入将只是轻微地影响核子密度,所以可以在不分散核芯的情况下生成超子晕。值得提出的是,Rufa 等曾基于 RMF 理论预言了 Λ 超子晕现象,并指出多 Λ 超核可在重离子碰撞的次级无电荷交换反应中伴随着相互作用半径的增大而得到^[16]。但他们采用 BCS 模型来处理对力,而 BCS 模型无法正确地处理连续态以及束缚态和连续态之间的耦合,因而他们的结果未必可靠,还需要进一步细致研究。为此,作者以 C 超核同位素为例,在 RCHB 理论框架下探讨了多 Λ 超核内的超子晕现象^[27]。

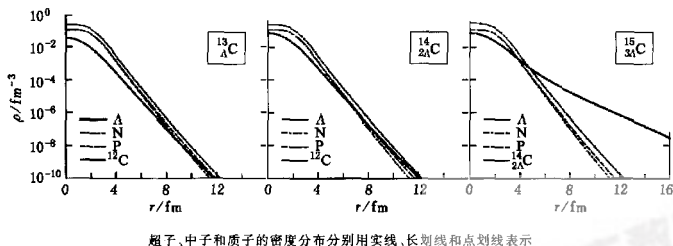


图 4 对数坐标下 C 的 Λ 超核内超子密度分布

Fig. 4 Density distributions of lambda (solid line), neutron (dot-dashed line), proton (long-dashed line) and corresponding nucleus core (dotted line) for some C hypernuclei in logarithmic scales

在图 4 中,给出了超核同位素 $^{13}_{\Lambda}\text{C}$, $^{14}_{\Lambda}\text{C}$ 和 $^{15}_{\Lambda}\text{C}$ 在对数坐标下的密度分布,其中超子、中子和质子的密度分布分别用实线、长划线和点划线表示。从该图的上部可以看到,1、2 个超子加入到 ^{12}C 这样的轻核里,核子的密度分布几乎不变,这和前面讨论单、双 Λ 超核时给出的结论是一致的,即 1 个或 2 个超子的加入并不改变超核内核子的大块性质。另外,1 个或 2 个超子密度分布的尾巴与 6 个中子的相当。也就是说,超子物质分布要比同样多的核子的物质分布的弥散更大。有趣的是,当加入 3 个超子时, $^{15}_{\Lambda}\text{C}$ 的超子密度分布在尾部有明显的翘起,超出核子分布很多。显然,在 $r=6\text{ fm}$ 处超子密度分布的翘起主要是最后填充的 1 个 Λ 超子引起的。这是超子晕形成的信号。为了比较,其核芯 $^{14}_{\Lambda}\text{C}$ 的密度分布同时用点线给出,可以看出超子的密度分布也大大超出了它的核芯物质密度分布。

3 形变晕

上述关于巨中子晕和超子晕的所有讨论,都是在假设原子核为球形的前提下进行的。实际上,多数原子核都有或大或小的形变。为了更全面地描述原子核性质,应该考虑形变效应。包括形变效应的 RCHB 理论正在发展中。对于轴对称形变核,将矢量势、标量势和介子场按 Legendre 多项式展开,将核子的波函数按 Dirac 球旋量展开,可以得到用来描述形变核的相对论 Hartree-Bogoliubov 方程。该方程的数值求解非常复杂,目前作者尚未完成对关联和形变效应的自洽计算。为了简单,可假定对力为常数,得到如下结果。

在表 1 中给出了 ^{24}Mg 的基态性质,包括均方根半径、四极矩和结合能。为了与实验比较,同时给出了一些已有的实验值。对于 ^{24}Mg ,理论计算的结合能与实验值符合很好,绝对

表 1 形变 RHB 计算(对力为常数)得到的 $^{24-32}\text{Mg}$ 的基态性质
 Table 1 Ground state properties of $^{24-32}\text{Mg}$ are calculated using the deformed RHB theory with a constant pairing interaction (data in bracket is the corresponding data)

| 核素 | r/fm | | | Q/fm^2 | | E/MeV | |
|------------------|---------------|-------|-------------|-----------------|--------------|----------------|------------------|
| | r_n | r_p | r_o | Q_n | Q_p | E | E_{exp} |
| ^{24}Mg | 2.897 | 2.927 | 3.034(3.08) | 54.238 | 55.019(62.0) | -197.924 | -198.256 |
| ^{26}Mg | 3.051 | 2.964 | 3.070 | 75.019 | 63.927 | -215.438 | -216.680 |
| ^{28}Mg | 3.199 | 2.943 | 3.050 | 63.478 | 51.543 | -231.053 | -231.627 |
| ^{30}Mg | 3.328 | 3.053 | 3.156 | 138.949 | 82.875 | -243.198 | -244.040 |
| ^{32}Mg | 3.437 | 3.088 | 3.190 | 159.492 | 88.025 | -252.801 | -249.690 |

说明:括号内是相应的电荷半径和四极矩实验值。

偏差不超过 1.0 MeV(相对偏差小于 5%)。对于非常丰中子的 ^{32}Mg ,结合能的计算值与实验值偏离最大,约为 3.2 MeV,可能是由于对关联的处理不合适。另外,理论计算得到的 ^{24}Mg 电荷均方根半径 r_o 和质子的四极矩 Q_p 与实验值符合得比较好。

自治地考虑原子核形变、束缚态和连续谱之间耦合的 RCHB 理论在研究奇特核方面将有更广泛的应用前景,可以用来探索形变核芯下的晕现象、形变晕以及滴线原子核中幻数的改变等。

4 小 结

本文简要地介绍了在相对论连续谱 Hartree-Bogoliubov(RCHB)理论框架下对各种晕现象,如巨晕、超子晕和形变晕等的研究。目前,自治的形变 RCHB(DRCHB)理论正在发展之中,它将成为研究形变晕核等奇特核现象的合适工具。

参 考 文 献

- 1 Tanihata Isao. Nuclear Structure Studies from Reaction Induced by Radioactive Nuclear Beams. Prog Part Nucl Phys, 1995, 35: 505 ~ 573
- 2 Tanihata Isao. Studies with Radioactive Beams, Past and Future. Prog Theor Phys Suppl, 2002, 146: 1 ~ 5
- 3 Meng Jie, Ring Peter. Relativistic Hartree Bogoliubov Description of Neutron Halo in ^{11}Li . Phys Rev Lett, 1996, 77(19): 3 963 ~ 3 966
- 4 Meng Jie. Relativistic Continuum Hartree Bogoliubov Theory with both Zero Range and Finite Range Gogny Force and their Application. Nucl Phys A, 1998, 635(1): 3 ~ 42
- 5 Meng Jie, Tanihata Isao, Yamaji Shuhei. The Proton and Neutron Distribution in Na Isotopes: the Development of Halo and Shell Structure. Phys Lett B, 1998, 419(1): 1 ~ 6
- 6 Meng Jie. Pairing Interaction in Exotic Nuclei: Finite range or Zero range? Phys Rev C, 1998, 57(3): 1 229 ~ 1 232
- 7 Meng Jie, Ring Peter. A Giant Halo at the Neutron Drip Line. Phys Rev Lett, 1998, 80(3): 460 ~ 463
- 8 Meng Jie, Tanihata Isao. The Surface Diffuseness and the Spin-Orbital Splitting in Relativistic Continuum Hartree-Bogoliubov Theory. Nucl Phys A, 1999, 650(2): 176 ~ 196
- 9 Im Soojae, Meng Jie. Particles in Classically Forbidden Area, Neutron Skin and Halo, and Pure Neutron Matter in Ca Isotopes. Phys Rev C, 2000, 61(4): 047302
- 10 Meng Jie, Zhou Shan-Gui, Tanihata Isao. The Relativistic Continuum Hartree-Bogoliubov Description of Charge-changing Cross Section for C, N, O and F Isotopes. Phys Lett B, 2002, 532(2): 209 ~ 214
- 11 Yang Si-Chun, Meng Jie, Zhou Shan-Gui. Exploration of Unbound States by Analytic Continuation in the Coupling Constant Method within Relativistic Mean Field Theory. Chin Phys Lett, 2001, 18(2): 196 ~ 198

- 12 Meng Jie, Lü Hong-Feng, Zhang Shuang Quan, et al. Giant, Hyperon, and Deformed Halos near the Particle Drip Line. *Nucl Phys A*, 2003, 722c: 366 ~ 371
- 13 Zhou Shan-Gui, Meng Jie, Ring Peter. Spherical relativistic Hartree theory in a Woods-Saxon Basis. *Phys Rev C*, 2003, 68(3): 034323
- 14 Zhou Shan-Gui, Meng Jie, Yamaji Shuhei, et al. Deformed Relativistic Hartree Theory in Coordinate Space and in Harmonic Oscillator Basis. *Chin Phys Lett*, 2000, 17(10): 717 ~ 719
- 15 Serot Brain, Walecka John Dirk. *Adv Nucl Phys*(16). Plenum Press: 1986
- 16 Ring Peter. Relativistic Mean Field Theory in Finite Nuclei. *Prog Part Nucl Phys*, 1996, 37: 193 ~ 263
- 17 Mareš J, Žofka J. Λ -Hyperon(s) in the Nuclear Medium. *Z Phys A*, 1989, 333: 209 ~ 212
- 18 Rufa M, Schaffner J, Maruhn J, et al. Multi-Lambda Hypernuclei and the Equation of State of Hypermatter. *Phys Rev C*, 1990, 42(6): 2 469 ~ 2 478
- 19 Schaffner Jürgen, Carsten Greiner, Stöcker Horst. Metastable Exotic Multihypernuclear Objects. *Phys Rev C*, 1992, 46(1): 322 ~ 329
- 20 Vretenar D, Pöschl W, Lalazissis G A, et al. Relativistic Mean-Field Description of Light Lambda Hypernuclei with Large Neutron Excess. *Phys Rev C*, 1998, 57(3): R1 060-R1 063
- 21 Rufa M, Stöcker H, Maruhn J, et al. Single-Particle Spectra of Λ Hypernuclei and the Enhanced Interaction Radii of Multi-Strange Objects. *J Phys G*, 1987, 13: 143 ~ 148
- 22 Koepf Werner and Ring Peter. Has the Nucleus ^{24}Mg a Triaxial Shape? A Relativistic Investigate. *Phys Lett B*, 1988, 212(4): 397 ~ 401
- 23 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(4): R041302
- 24 Zhang Shuang-Quan, Meng Jie, Zhou Shan-Gui, et al. Giant Neutron Halo in Exotic Calcium Nuclei. *Chin Phys Lett*, 2002, 19(3): 312 ~ 314
- 25 张双全, 孟杰, 周善贵. 相对论连续谱 Hartree-Bogoliubov 理论中的质子幻数核及巨晕. *中国科学*, 2003, G33(4): 289 ~ 316
- 26 Lü Hong-Feng, Meng Jie, Zhang Shuang Quan, et al. Neutron Halos in Hypernuclei. *Eur J Phys A*, 2003, 17(1): 19 ~ 24
- 27 Lü Hong-Feng, Meng Jie. Hyperon Halos in Λ Hypernuclei in the Relativistic Continuum Hartree-Bogoliubov Theory. *Chin Phys Lett*, 2002, 19(12): 1 775 ~ 1 778

Giant Neutron- and Hyperon-Halos in Drip-Line Nuclei

MENG Jie LÜ Hongfeng ZHANG Shuangquan ZHOU Shangui

(Department of Technical Physics, School of Physics, Peking University, Beijing, 100871)

Abstract Kinds of halos in the relativistic continuum Hartree-Bogoliubov (RCHB) theory are described. While giant halo in the even-N Ca isotopes near neutron drip line is predicted, properties of some proton magic nuclei, such as O, Ni, Zr, Sn, and Pb, ranging from the proton drip line to neutron drip line, are briefly studied. Halos in hypernuclei, for example, the neutron halo in Ca hypernuclei and the single-hyperon halo in $^{15}_{\Lambda}\text{C}$, are also investigated. In addition, deformed halo is also mentioned as well as the developing self-consistent deformed RCHB theory.

Key words Dripline nuclei; halo; hypernuclei; the relativistic continuum Hartree-Bogoliubov theory