



清华大学物理系原子核结构实验研究进展

朱胜江*

清华大学物理系, 北京 100084

*E-mail: zhushj@mail.tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2011-01-13; 接受日期: 2011-01-21

国家自然科学基金(批准号: 10975082, 10775078)、国家重点基础研究发展规划(编号: 2007CB815005)和教育部博士点基金(编号: 20100002110077)资助项目

摘要 在清华大学百年校庆之际, 我们对近年来清华大学物理系有关原子核结构实验研究的主要进展作一介绍, 内容包括在 $A \approx 140$ 缺中子核区核的形状驱动效应研究, 如扁椭圆形变带、形状共存等; 在 $A \approx 110$ 丰中子核区核的多声子 γ 振动带结构、新手征二重带、新的准粒子带结构研究等; 在 $A \approx 150$ 丰中子核区核的八极形变研究等. 研究成果对原子核结构的理解提供许多新的重要信息.

关键词 原子核结构, 高自旋态, 形状驱动效应, 多声子 γ 振动带, 手征二重带, 八级形变

PACS: 25.85.Ca, 21.10.Re, 23.20.Lv, 27.60.+j, 25.70.Gh

极端条件下原子核结构特性的研究是国际上核物理研究的前沿领域, 而原子核高自旋态研究为其中的一个重要方面. 在高速旋转的情况下, 原子核会出现一系列奇特的特性. 本文介绍我们研究组近年来围绕 3 个原子核质量区的主要实验研究成果: 对 $A \approx 140$ 缺中子核区, 主要研究形状驱动效应, 包括扁椭圆形变、形状共存等特性; 对 $A \approx 110$ 丰中子核区, 主要研究多声子 γ 振动带、手征二重带、赝自旋伙伴带、新的准粒子带结构等特殊集体运动特性; 在 $A \approx 150$ 丰中子核区, 主要研究反射不对称的八级形变等特性.

1 实验方法

实验在国内外大科学装置上并通过与相关研究组合作进行的. 对于 $A \approx 140$ 缺中子核区原子核的高

自旋态研究是通过重离子熔合-蒸发反应与在束 γ 谱的实验技术完成的. 由中国原子能科学研究院 HI-13 串列加速器提供相关的束流, 用由 14 个反康高纯 Ge 探测器组成的在束 γ 谱探测装置及相应的电子学数据获取系统进行测量与数据获取工作. 而对于 $A \approx 110$ 与 150 丰中子核区原子核高自旋态的研究是通过与美国范德比尔特大学、橡树岭实验室、劳伦斯伯克利实验室等开展合作研究进行的. 因为用通常的重离子熔合-蒸发反应难于产生丰中子核的高自旋态, 一种很有效的方法是通过测量重核(如 ^{252}Cf 或 ^{248}Cm 等)的自发裂变产生的瞬发 γ 谱进行研究^[1,2]. 重核的裂变可产生上百种丰中子核, 测量其瞬发 γ 谱可以得到大量丰中子核的高自旋态信息. 我们的此项研究工作不是一次实验就完成的, 而是随着探测技术与数据处理技术的不断发展而反复开展实验研究, 从而使实验的精度不断提高. 早期的研究利用橡树岭实

引用格式: 朱胜江. 清华大学物理系原子核结构实验研究进展. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2011, 41: 427–431

Zhu S J. Progress in research on nuclear structure in Department of Physics, Tsinghua University (in Chinese). Sci Sin Phys Mech Astron, 2011, 41: 427–431, doi: 10.1360/132011-56

验室的具有 20 个 Ge 探测器的 Spinspectrometer 谱仪进行测量, 后来在劳伦斯伯克利实验室利用由 110 个 Ge 探测器组成的 Gammaspere 谱仪进行测量. 高自旋态的实验数据需要长时间复杂的分析. 数据分析是在校内进行的. 采用 PC-Linux 等计算机图像谱分析系统, 移植了国际上先进的通用 Radware 程序包, 可进行二维 γ - γ 及三维 γ - γ - γ 谱的符合分析.

2 主要研究成果

2.1 $A \approx 140$ 缺中子核区核的形状驱动效应研究

$A \approx 140$ 缺中子核区核的高自旋态结构具有重要的特性, 尤其是对于中子数接近 $N=82$ 满壳层的核, 相应的 β 形变比较小, γ 形变比较软, 属于所谓“ γ 软形变”核. 形变壳模型的计算指出, 核内质子的费米面位于 $h_{11/2}$ 亚壳层的底部, 而中子的费米面位于 $h_{11/2}$ 亚壳层的顶部, 在高自旋态下, 位于 $h_{11/2}$ 亚壳层下部的粒子的顺排将驱动核的形状向长椭圆形变($\gamma \approx 0^\circ$)变化, 而位于 $h_{11/2}$ 亚壳层上部的粒子的顺排将驱动核的形状向扁椭圆形变($\gamma \approx -60^\circ$)变化. 这样, 对于在高自旋态下由多准粒子组态形成的转动带或能态, 由于不同粒子的形状驱动效应, 可使核形成不同的形状, 即所谓形状共存. 我们在这个区域所发现的核结构主要特性为: (i) 扁椭圆形变带的研究. 在众多的核如 $^{137,138}\text{Ce}$ [3,4], $^{136,137}\text{La}$ [5,6], ^{138}Pr [7], ^{139}Nd [8], ^{140}Pm [9], ^{141}Pm (结果待发表) 等中扩展并新识别了多条重要的高自旋态下的扁椭圆形变($\gamma \approx -60^\circ$)带. (ii) 在 $^{140,141}\text{Pm}$ 中识别了新的三轴扁椭圆形变($\gamma \approx -90^\circ$)带以及退耦带结构. (iii) 在 ^{134}Ce 核中 [10], 发现了 3 种不同 γ 形变的形状共存结构: 在基带以上的带交叉处的 10^+ 态起源于两个 $h_{11/2}$ 准中子的组态, 为 $\gamma \approx -60^\circ$ 的扁椭圆形变; 晕带 10^+ 同质异能态及其结构也起源于两个 $h_{11/2}$ 准中子的组态, 为 $\gamma \approx -120^\circ$ 的长椭圆形变; 而基于 7^- 态的强耦合带则起源于两个准质子 $h_{11/2}$ 与 $g_{7/2}$ 组态, 为 $\gamma \approx 0^\circ$ 的长椭圆形变. (iv) 其他系统的核结构特性研究. 在双奇核 ^{136}La [5], ^{138}Pr [7], ^{140}Pm [9] 中观测到系统的旋称反转; 在 Ba, Ce, Nd [6,8,11] 同位素链中表现出低自旋态下的核的形状由长椭圆边的 $\gamma < 30^\circ$ 向扁椭圆边的 $\gamma > 30^\circ$ 的形状转变; 在 ^{122}Ba [12] 中的八级关联现象等等. 这些研究为此区核形状驱动效应的研究提供了重要的实验信息.

2.2 $A \approx 110$ 丰中子核区核的高自旋态研究

这部分核包括从 $Z=38 \sim 48$ 的 Sr-Cd 等核链的众多的丰中子核. Sr 和 Zr 核链位于此丰中子核区的 $Z=40$, $N=56$ 的亚球壳区与 $Z=38$, $N=60$ 的大形变区, 而其他核则处于从 $Z=38$, 40 的大形变、经由三轴形变向 $Z=50$ 的球形壳层的过渡区, 其核结构特性丰富而复杂. 我们与国外合作者一起, 取得的重要研究成果为:

(i) 多声子 γ 振动带的研究. 形变核中的多声子振动带的研究是非常重要的原子核结构课题. 在偶偶核中它体现了原子核的集体振动、集体转动及其耦合特性. 然而, 实验上要识别两声子带是非常困难的. 我们在此核区内的偶偶核中, 扩展了 ^{104}Mo 和 ^{106}Mo 的两声子 γ 振动带 [13,14], 新识别了 ^{108}Mo [15], $^{108,110,112}\text{Ru}$ [16-18] 中的新的两声子 γ 振动带. 而对于奇 A 核的两声子带研究则非常少, 在我们的工作之前, 尚没有有奇 A 核中有关两声子 γ 振动带的实验报道. 我们经过对此区核的仔细研究, 利用测得的高精度的实验数据, 在奇中子核 ^{105}Mo [19]、奇质子核 ^{103}Nb [20], ^{107}Tc [21], ^{109}Tc [22] 中发现重要的两声子 γ 振动带结构, 对其特性进行了系统深入的研究. 这是在核结构实验研究中, 首次在奇中子与奇质子核中发现的重要的结构, 而 ^{107}Tc 和 ^{109}Tc 中的多声子 γ 振动带是建立在准粒子激发态基础上的, 这也是在 γ 振动带中的首次发现. 我们的发现引起理论家们的密切注意, 在 ^{103}Nb 的结果发表后, 相关理论组第一次用投影壳模型对此区奇 A 核的多声子 γ 振动进行了计算, 得到非常满意的结果 [23].

(ii) 手征二重带的研究. 原子核手征对称性破裂引起的手征二重带结构的研究是当前核物理研究的热点问题之一. 通过国际合作, 我们在此区内的偶偶核 ^{106}Mo 中观测到一对重要的软手征振动二重带结构 [24], 而这种软手征振动带结构也是第一次发现. 其后, 又在 $^{110,112}\text{Ru}$ 中发现这样的带结构 [25,26]. 这样, 在此核区我们发现了三例这样重要的结构. 此外, 我们还在此区的缺中子核 ^{98}Tc 中也发现了手征二重带结构 [27].

(iii) 其他重要的结构特性. 如对一些核的晕带结构大为扩展, 观测到几个偶-偶核中重要的集体回弯现象, 如在 $^{108,110,112}\text{Ru}$ [16,18,28], ^{109}Tc [22] 等核中, 并通过推转壳模型的计算, 对其三轴形变特性、集体回弯的机制等作出解释; 在 $^{104,106}\text{Mo}$ [13,14],

$^{108,109,110}\text{Ru}$ ^[16-18,26], ^{104}Zr ^[29]等偶偶核中系统的观测到多个由一对核子破对激发形成的新的准粒子带, 这种带的转动惯量几乎为常数; 在 ^{98}Sr 中^[30], 观测到一对两准粒子带, 其带头的组态相同而耦合方式分别由 $|\Omega_1 + \Omega_2|$ 与 $|\Omega_1 - \Omega_2|$ 所组成; 大大扩充了双奇核 $^{106,108}\text{Tc}$ ^[31,32] 的集体带结构, 第一次在此区的双奇核 ^{108}Tc 中观测到一对赝自旋伙伴带结构^[32], 在双奇核 ^{104}Nb 中识别了半退耦带结构等^[33]; 在对奇 A 核的研究中, 在多个核中识别了新的单准粒子带, 如在 ^{105}Mo ^[19], ^{107}Ru ^[34], ^{109}Ru ^[35], ^{113}Ru ^[36], ^{107}Tc ^[31]等核中.

2.3 $A \approx 150$ 丰中子核区核的八极形变等特性研究

原子核的八极形变反映在内禀坐标系中空间反演的不对称性. 对于其特性的研究, 一直为核物理界非常关注的课题. 我们对围绕 $Z=56$, $N=88$ 的 $A \approx 150$ 区域的丰中子核的高自旋态进行了广泛的研究, 主

要研究成果有: (i) 识别了多个核的八级形变带, 包括 ^{139}Xe ^[37], $^{140,141,143,145}\text{Ba}$ ^[37-39], $^{143,145,147}\text{La}$ ^[40,41] 以及 $^{144,148}\text{Ce}$ 等^[37,42], 其中 ^{143}Ba 是我们最早在此核区内发现的奇 A 核的八级形变带结构, 而 ^{145}Ba 则为理论上预言最有可能存在八极形变带、而实验上一直在加以寻找的核, 其八极形变带也首先被我们发现^[39]. (ii) 我们在这个区域发现了 4 个双八级形变带(同时在一个核核中观测到双 simplex 分支的八级形变带结构), 即在奇中子核 ^{143}Ba 与 ^{145}Ba 中^[39]、奇质子核 ^{145}La 中^[41] ($s=\pm i$) 以及偶偶核 ^{148}Ce ($s=\pm 1$) 中^[42]. 这是迄今为止在此区内发现的仅有的 4 个双八级形变带结构. (iii) 对于偶-偶核 $^{144,146}\text{Ba}$, ^{146}Ce 等的八级形变带结构作了扩展, 对其跃迁特性、八级形变的稳定性等问题等作了仔细研究^[38]. (iv) 第一次识别了一些极端丰中子核如 ^{152}Ce ^[43], ^{160}Sm ^[44] 中的集体带结构; 在 $^{145,147}\text{Ce}$ ^[45], ^{152}Nd ^[46] 等核中发现新的集体转动带等.

致谢 感谢 Vanderbilt 大学、Lawrence Berkeley 实验室、Oak Ridge 实验室, 中国原子能研究院、北京大学、上海交通大学等相关实验室与研究组多年来的合作与支持. 感谢参加此项研究的本组所有成员, 包括博士后、研究生、访问学者等.

参考文献

- 1 Hamilton J H, Ramayya A V, Zhu S J, et al. New insights from studies of spontaneous fission with large detectors arrays. *Prog Part Nucl Phys*, 1995, 35: 635-740
- 2 Zhu S J. Experimental study of prompt γ emission neutron rich nuclides produced in fission (in Chinese). *Trends Nucl Phys*, 1992, 9(2): 8-12 [朱胜江. 裂变产物丰中子核素的瞬发 γ 谱的实验研究. *核物理动态*, 1992, 9(2): 8-12]
- 3 Zhu S J, Zhu L Y, Li M, et al. High spin states and a collective oblate band in ^{137}Ce . *Phys Rev C*, 2000, 62: 044310
- 4 Zhu S J, Li M, Zhu L Y, et al. Identification of collective oblate bands in ^{138}Ce . *Chin Phys Lett*, 1999, 16: 635-637
- 5 Zhu S J, Xiao S D, Che X L, et al. High-spin states and band structures in the doubly odd ^{136}La nucleus. *Eur Phys J A*, 2005, 24: 199-204
- 6 Li M L, Zhu S J, Xiao S D, et al. Identification of band structures in the ^{137}La nucleus. *Eur Phys J A*, 2006, 28: 1-4
- 7 Li M L, Zhu S J, Che X L, et al. High-spin states and collective oblate bands in the odd-odd ^{138}Pr nucleus. *Phys Rev C*, 2007, 75: 034304
- 8 Xu Q, Zhu S J, Che X L, et al. High-spin states and collective oblate bands in ^{139}Nd . *Phys Rev C*, 2008, 78: 034310
- 9 Wang J G, Zhu S J, Gu L, et al. High-spin states and collective band structures in the odd-odd ^{140}Pm nucleus. *J Phys G-Nucl Part Phys*, 2010, 37: 125107
- 10 Zhu S J, Gan C Y, Zhu L Y, et al. High spin states and shape coexistence in ^{134}Ce . *High Energy Phys Nucl Phys*, 2005, 29: 130-138
- 11 Che X L, Zhu S J, Li M L, et al. High-spin levels based on the $11/2^-$ isomer in ^{135}Ba . *Eur Phys J A*, 2006, 30: 347-350
- 12 Zhu S J, Sakhaee M, Yang L M, et al. The $\pi h_{1/2}$ band-crossing and possible octupole correlations in ^{122}Ba . *Chin Phys Lett*, 2001, 18: 1027-1029
- 13 Yang L M, Zhu S J, Li K, et al. Collective bands in neutron-rich ^{104}Mo nucleus. *Chin Phys Lett*, 2001, 18: 24-26
- 14 Xu R Q, Zhu S J, Hamilton J H, et al. Observation of rotational bands in neutron-rich ^{106}Mo nucleus. *Chin Phys Lett*, 2002, 19: 180-183
- 15 Ding H B, Zhu S J, Hamilton J H, et al. Collective band structures in neutron-rich ^{108}Mo nucleus. *Chin Phys Lett*, 2007, 24: 1517-1520
- 16 Che X L, Zhu S J, Hamilton J H, et al. High-spin structure in neutron-rich ^{108}Ru nucleus. *Chin Phys Lett*, 2004, 21: 1904-1907
- 17 Zhu S J, Luo Y X, Hamilton J H, et al. Even-parity bands of ^{108}Ru , ^{110}Ru , ^{112}Ru . *Int J Mod Phys*, 2009, E18: 1717-1739

- 18 Che X L, Zhu S J, Hamilton J H, et al. High spin band structure in ^{112}Ru . *Chin Phys Lett*, 2006, 23: 328–331
- 19 Ding H B, Zhu S J, Hamilton J H, et al. Identification of band structures and proposed one- and two-phonon γ -vibrational bands in ^{105}Mo . *Phys Rev C*, 2006, 74: 054301
- 20 Wang J G, Zhu S J, Hamilton J H, et al. Identification of one-phonon and two-phonon γ -vibrational bands in odd- Z ^{103}Nb nucleus. *Phys Lett B*, 2009, 675: 420–425
- 21 Gu L, Zhu S J, Hamilton J H, et al. Reinvestigation of collective bands in ^{107}Tc . *Chin Phys Lett*, 2009, 26: 092502
- 22 Gu L, Zhu S J, Hamilton J H, et al. Collective band structures and identification of one-phonon and two-phonon γ -vibrational bands in ^{109}Tc . *Chin Phys Lett*, 2010, 27: 062501
- 23 Sheikh J A, Bhat G H, Sun Y, et al. Multi-phonon γ -vibrational bands in odd-mass nuclei studied by triaxial projected shell model approach. *Phys Lett B*, 2010, 688: 305–308
- 24 Zhu S J, Hamilton J H, Ramayya A V, et al. Soft chiral vibrations in ^{106}Mo . *Eur Phys J A*, 2005, 25(s01): 459–462
- 25 Zhu S J, Luo Y X, Hamilton J H, et al. Triaxiality, chiral and gamma vibrations in $A = 99\text{--}114$ nuclei. *Prog Part Nucl Phys*, 2007, 59: 329–336
- 26 Luo Y X, Zhu S J, Hamilton J H, et al. Evolution of chirality from γ soft ^{108}Ru to triaxial $^{110,112}\text{Ru}$. *Phys Lett B*, 2009, 670: 307–312
- 27 Ding H B, Zhu S J, Wang J G, et al. Proposed chiral doublet bands in ^{98}Tc . *Chin Phys Lett*, 2010, 27: 072501
- 28 Jiang Z, Zhu S J, Hamilton J H, et al. Collective bands in neutron-rich ^{110}Ru nucleus. *Chin Phys Lett*, 2003, 20: 350–353
- 29 Yeoh E. Y, Zhu S J, Hamilton J H, et al. Identification of a quasiparticle band in very neutron-rich ^{104}Zr . *Phys Rev C*, 2010, 82: 027302
- 30 Li M L, Zhu S J, Hamilton J H, et al. Two-quasiparticle bands and isomers in ^{98}Sr . *Chin Phys Lett*, 2004, 21: 2147–2150
- 31 Gu L, Z, Zhu S J, Hamilton J H, et al. Collective band structures in neutron-rich $^{106,107}\text{Tc}$. *Phys Rev C*, 2009, 79: 054317
- 32 Xu Q, Zhu S J, Hamilton J H, et al. Identification of pseudospin partner bands in ^{108}Tc . *Phys Rev C*, 2008, 78: 064301
- 33 Wang J G, Zhu S J, Hamilton J H, et al. First identification of a collective band in the odd-odd ^{104}Nb nucleus. *Phys Rev C*, 2008, 78: 014313
- 34 Zhu S J, Hamilton J H, Ramayya A V, et al. Observation of rotational bands in the neutron-rich ^{107}Ru nucleus. *Phys Rev C*, 2001, 65: 014307
- 35 Ding H B, Zhu S J, Hamilton, et al. Identification of the $\nu 7/2^+[404]$ band in neutron-rich ^{109}Ru . *Phys Rev C*, 2008, 77: 057320
- 36 Zhang J, Zhu S J, Hamilton, et al. Identification of collective bands in neutron-rich ^{113}Ru . *Phys Rev C*, 2003, 67: 064307
- 37 Zhu S J, Hamilton J H, Ramayya A V, et al. High spin octupole correlations in the $N=85$, ^{139}Xe and ^{141}Ba isotones. *J Phys G-Nucl Part Phys*, 1997, 23: L77–L83
- 38 Zhu S J, Lu Q H, Hamilton J H, et al. Octupole deformation in $^{142,143}\text{Ba}$ and ^{144}Ce : New band structures in neutron-rich Ba-isotopes. *Phys Lett B*, 1995, 357: 273–280
- 39 Zhu S J, Hamilton J H, Ramayya A V, et al. Octupole correlations in neutron-rich $^{143,145}\text{Ba}$ and a type of superdeformed band in ^{145}Ba . *Phys Rev C*, 1999, 60: 051304
- 40 Wang J G, Zhu S J, Hamilton J H, et al. First identification of collective bands and octupole correlations in the neutron-rich ^{143}La nucleus. *Phys Rev C*, 2007, 75: 064301
- 41 Zhu S J, Hamilton J H, Ramayya A V, et al. Octupole correlations in neutron-rich $^{145,147}\text{La}$ nuclei: Some Coriolis-limit-coupling bands with aligned $h_{11/2}$ proton. *Phys Rev C*, 1999, 59: 1316–1323
- 42 Chen Y J, Zhu S J, Hamilton J H, et al. Search for octupole correlations in neutron-rich ^{148}Ce nucleus. *Phys Rev C*, 2007, 73: 054316
- 43 Zhu S J, Hamilton J H, Ramayya A V, et al. Identification of ^{152}Ce and unexpected variations in moments of inertia with neutron number and spin in $^{142-148}\text{Ba}$, $^{144-152}\text{Ce}$ and $^{152-156}\text{Nd}$. *J Phys G-Nucl Part Phys*, 1995, 21: L75–L81
- 44 Zhu S J, Hamilton J H, Ramayya A V, et al. Identification of levels in ^{160}Sm and new high spin states in $^{156,158}\text{Sm}$. *J Phys G-Nucl Part Phys*, 1995, 21: L57–L62
- 45 Sakhaee M, Zhu S J, Hamilton J H, et al. Identification of levels in neutron-rich odd mass ^{145}Ce and ^{147}Ce nuclei. *Phys Rev C*, 1999, 60: 067303
- 46 Yeoh E Y, Zhu S J, Hamilton J H, et al. High-spin states and a new band based on the isomeric state in ^{152}Nd . *Eur Phys J A*, 2010, 45: 147–151

Progress in research on nuclear structure in Department of Physics, Tsinghua University

ZHU ShengJiang^{*}

Department of Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China

For the centenary celebration of Tsinghua University we give a brief review of the experimental research on nuclear structure by our research group in this article. The main research progress are: the shape driving effect in $A \approx 140$ neutron-deficient region, such as the oblate deformed bands, the shape coexistence etc.; the multi-phonon gamma vibrational bands, the new chiral doublet bands, the new quasi-particle bands etc. in $A \approx 110$ neutron-rich region; the octupole deformation etc. in $A \approx 150$ neutron-rich region. The research results provide new valuable information to understand the nuclear structure.

nuclear structure, high spin state, shape driving effect, multi-phonon γ -vibrational bands, chiral doublet bands, octupole deformation

PACS: 25.85.Ca, 21.10.Re, 23.20.Lv, 27.60.+j, 25.70.Gh

doi: 10.1360/132011-56