



评述

原子核协变密度泛函理论及其应用专辑

原子核高自旋态中几个感兴趣的物理现象: 从电转动带到订书机带再到剪刀带, 赝自旋双带

王守宇*

山东大学空间科学研究院, 山东大学(威海) 空间科学与物理学院, 山东省光学天文与日地空间环境重点实验室, 威海 264209

* 联系人, E-mail: sywang@sdu.edu.cn

收稿日期: 2015-07-16; 接受日期: 2015-09-06; 网络出版日期: 2015-12-15

国家自然科学基金资助项目(批准号: 11175108, U1432119, 11461141001)

摘要 本文首先介绍了原子核高自旋态中几个感兴趣的物理现象: 电转动带, 剪刀带, 订书机带和赝自旋双带; 阐述了原子核电转动带, 剪刀带, 订书机带和赝自旋双带的定义和物理图像, 以及它们相互之间的关联; 然后以近年来的几个代表性研究工作为例, 综述了这几个感兴趣物理现象的最新研究进展和存在的疑难问题. 最后我们探讨了原子核物理中的协变密度泛函理论的发展对实验研究的促进作用, 以及原子核物理实验的发展和最新的实验成果对原子核的协变密度泛函理论提出的更高地要求和期待.

关键词 剪刀带, 订书机带, 赝自旋双带

PACS: 27.60.+j, 23.20.Lv, 21.10.Re, 21.60.Ev

1 引言

协变密度泛函理论自 20 世纪 60 年代创立以来已经走过了半个世纪, 在物理学, 化学和生物学等领域都发挥着巨大的作用^[1]. 在原子核物理中, 协变密度泛函理论主要指的是相对论平均场(RMF)理论或相对论 Hatree-Fock(RHF)理论, 这一理论在描述有限核性质, 形变原子核转动和形状演化, 核物质以及中子星等方面都取得了很大的成功, 推动和促进了原子核物理的发展(见文献[2]以及文中所引用的文献). 核理论的发展, 使人们获得新的核结构知识, 帮

助人们理解实验现象; 反过来实验的发展, 也可以进一步检验和约束理论研究, 并对理论研究提出新的挑战和要求. 本文将以原子核高自旋态的几个实验现象为例, 讨论原子核物理中的协变密度泛函理论与原子核高自旋态实验研究的相互促进和发展.

2 从电转动带到订书机带再到剪刀带

一个形变原子核通常会沿着与对称轴垂直的惯性主轴转动, 其角动量的获得在理想情况下将全部

引用格式: 王守宇. 原子核高自旋态中几个感兴趣的物理现象: 从电转动带到订书机带再到剪刀带, 赝自旋双带. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2016, 46: 012011
Wang S Y. Several interesting phenomena on high-spin states: electric rotation, stapler band, shear band and pseudospin partner bands (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2016, 46: 012011, doi: 10.1360/SSPMA2015-00366

来自核芯的集体转动,如图 1(a) 所示. 这种转动模式目前经常被称为“电转动”,之所以被称为“电转动”主要是为了区别和对应于另一种新颖的转动模式——磁转动. 磁转动于 1994 年被提出^[3],指的是一个近球形原子核,由于形变很小,其获得的角动量将主要来源于价中子与价质子角动量的相互靠拢,这个过程中总角动量的方向将基本保持不变. 图 1(c) 给出了磁转动的角动量耦合图像,从图中可以看出,在初始位置价质子和价中子的角动量是接近垂直的,随着转动频率的增加,价质子和价中子的角动量相互靠拢,就像一把正在闭合的剪刀的两个刀片,因此磁转动又被称为“剪刀机制”. 通过上面的讨论,我们知道电转动主要发生在具有明显形变的原子核中,而磁转动则倾向于发生在具有非常小形变的近球形原子核中. 原子核形变的大小在这里起了决定性作用. 文献[4]利用粒子转子模型详细研究了形变对磁转动机制的影响,研究结果表明磁转动只能发生于四极形变参数 $\epsilon_2 \leq 0.12$ 的原子核中;如果 ϵ_2 大于 0.12,集体转动将变的更加显著,并在角动量增量中占据主导地位,从而更接近于电转动模式而不是磁转动.

目前实验上已经建议了许多磁转动带,分布在质量数为 60, 80, 100, 130 和 200 等核区^[5,6]. 协变密度泛函理论于 20 世纪 90 年代开始应用于研究原子核的磁转动现象. 首先利用倾斜轴推转的 RMF 理论成功地解释了 ^{84}Rb 中的磁转动现象^[7]. 接着文献[8]发展了一个全新的二维倾斜轴推转 RMF 程序来研究磁转动. 目前这个基于协变密度泛函理论的模型已发展成利用点耦合的有效相互作用来代替介

子交换的有效相互作用^[9],从而很大程度上简化了计算,不仅成功地描述了原子核的磁转动现象^[10,11],也很好地区分了实验观察到的原子核反磁转动现象^[12-16]. 值得一提的是,无论磁转动还是反磁转动都是其他理论模型先给出了物理图像和定义,然后密度泛函理论从更微观的角度出发给出了验证和更进一步的研究. 另一方面,也有密度泛函理论首先给出物理图像和定义的典型高自旋态现象,比如本文将重点讨论的“订书机带”^[17].

随着加速器与探测器技术的不断提高和升级,原子核高自旋态研究得到了很大的发展,人们观测到了大量的转动带结构. 其中有一类转动带结构,其能谱规律和特征非常类似于磁转动带,但是它们的四极形变值 ϵ_2 却是大于 0.12,并不满足近球形核的要求,比如在 ^{115}In 中观测到的基于 $\pi(g_{9/2})^{-1} \otimes \nu(h_{11/2})^2$ 组态的转动带(见文献[17]图 1 中所标记的带 3),该如何定义和归类这一类转动带是实验工作者面对的一个难题. 这个时候原子核物理中的协变密度泛函理论起到不可替代的作用.

山东大学(威海)原子核与核天体物理课题组利用在束伽玛谱学实验扩展了 ^{115}In 中基于 $\pi(g_{9/2})^{-1} \otimes \nu(h_{11/2})^2$ 组态转动带的能级结构,并利用基于点耦合的协变密度泛函理论的倾斜轴推转 RMF 模型(TAC-CDFT),详细研究了基于 $\pi(g_{9/2})^{-1} \otimes \nu(h_{11/2})^2$ 组态所建立的转动带的能谱,自旋,电磁跃迁几率和形变随转动频率的变化关系. 理论计算较好地再现了实验特征. 图 2 给出了 TAC-CDFT 计算给出的 ^{115}In 中角动量随着转动频率的增加的变化示意图,其中 J_π, J_ν

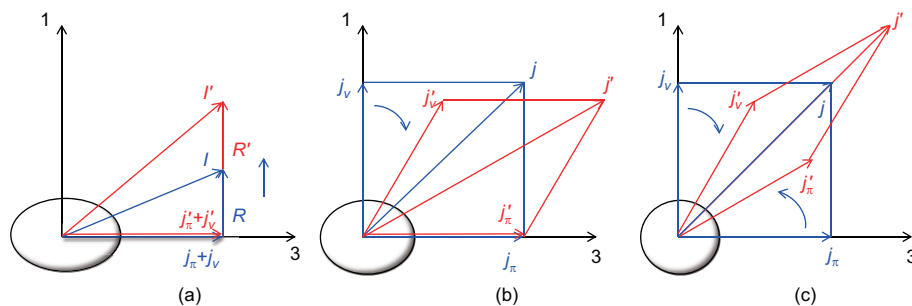


图 1 (网络版彩图) 原子核的电转动带 (a), 订书机带 (b) 和剪刀带 (c) 的角动量耦合示意图

Figure 1 (Color online) Compositions of the proton and neutron angular momentum vectors for (a) electric rotation, (b) stapler mechanism and (c) shears mechanism.

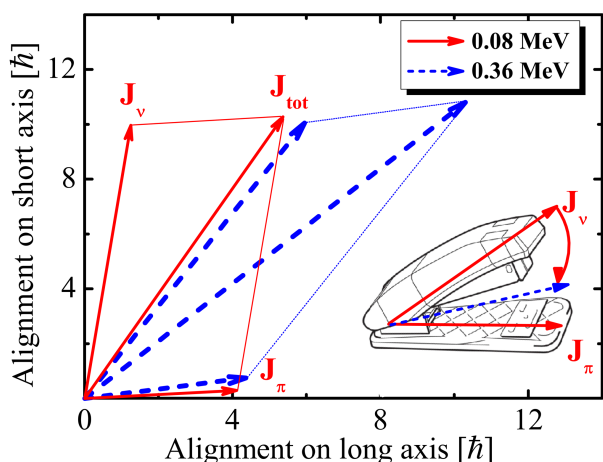


图 2 (网络版彩图)TAC-CDFT 程序计算得到的 ^{115}In 中 $\pi(g_{9/2})^{-1} \otimes \nu(h_{11/2})^2$ 组态带的角动量耦合示意图, 此图取自文献 [17]

Figure 2 (Color online) Compositions of the proton and neutron angular momentum vectors J_π and J_ν as well as the total angular momentum $J_{\text{tot}} = J_\pi + J_\nu$ in the TAC-CDFT calculations with the $\pi(g_{9/2})^{-1} \otimes \nu(h_{11/2})^2$ configuration in ^{115}In [17]. The inset shows a schematic view of the stapler.

和 J_{tot} 分别代表质子、中子和总的角动量矢量。从图 2 中我们可以看到, 在初始位置, 质子角动量矢量沿着长轴方向, 中子角动量矢量沿着短轴, 两者基本垂直; 但是随着转动频率的增加, 质子的角动量矢量却是基本保持不变的, 而中子的角动量矢量向长轴方向逐渐靠拢, 从而价质子和价中子角动量耦合而成的总角动量矢量也是逐渐向长轴靠拢的。这个物理过程不同于原子核的剪刀机制, 剪刀机制是质子和中子所代表的剪刀的二个刀片同时逐渐靠拢闭合, 而总角动量方向是几乎不变的。而我们正在讨论的这种情况, 是剪刀的一个刀片不动, 仅另一个刀片闭合, 非常像一个正在工作的订书机, 因此文献 [17] 将这一类转动带称为“订书机带”。订书机带物理图像的提出完全得益于协变密度泛函理论给出的微观自洽的原子核内在角动量耦合图像。

为研究订书机带的角动量增加方式, 文献 [17] 采用了一个简单的近似处理来归类转动带的角动量增量, 这样可以定量地分析订书机带中磁转动机制和电转动机制在角动量增量中的贡献。通过这样的近似处理计算出来 ^{115}In 中 $\pi(g_{9/2})^{-1} \otimes \nu(h_{11/2})^2$ 带的 $\Delta J_{\text{shear}} : \Delta J_{\text{core}} = 4:6$, 表明两者的贡献是基本相当的

并存在着强烈的竞争。综上, 我们知道订书机带是电转动带与剪刀带的一个中间过渡形式, 在订书机带里面, 由角动量闭合和集体核芯转动带来的角动量增量是基本相当的。目前除了文献 [17] 提到的 $^{111,113,115}\text{In}$ 核存在订书机带, 在质量数为 150 的稀土核区也存在一些好的订书机带的候选带, 详见文献 [18]。

3 赝自旋双带

原子核的赝自旋对称性是核物理学的一个重大发现, 于 1969 年被两个研究组独立发现 [19,20], 并引起了极大的关注。目前已经有大量的实验和理论工作来研究原子核的赝自旋, 见参考文献 [21,22] 以及文中所引用的文献。

理论上一个形变原子核, 如果价核子占据二个互为赝自旋对称的轨道, 转动之后将会形成二个近简并的转动带, 这样的双带被称为“赝自旋双带”。实验上已经在 110, 130 和 190 核区建议了多个赝自旋双带的候选带 [11,23–27]。但是我们知道原子核的手征对称性破缺也会形成双带结构 [28], 包括原子核由于转动带来的形状或者转动惯量的变化也会造成偶然近简并双带的情况 [29,30]。如何区别这些双带结构是对理论工作的一个挑战, 急需理论上给出赝自旋双带的实验判据。另一方面, 实验上已经建议的一些赝自旋双带, 其表现出的实验特征却有很大差别, 这也给理论研究增加了不小的难度。举一个典型的例子, ^{126}Cs 核的负宇称转动带能级结构。图 3 展示了文献 [31] 给出的 ^{126}Cs 核的部分能级纲图, 其中带 A 和 B 分别基于 $\pi g_{7/2} \otimes \nu h_{11/2}$ 和 $\pi d_{5/2} \otimes \nu h_{11/2}$ 组态, 组成一对赝自旋双带; 带 C 和带 D 分别基于 $\pi h_{11/2} \otimes \nu g_{7/2}$ 和 $\pi h_{11/2} \otimes \nu d_{5/2}$ 组态, 组成另一对赝自旋双带。在一个原子核中观测到二对互为镜像组态 (一个奇奇核组态与其价质子与价中子互换轨道的组态互为镜像组态) 的赝自旋双带是非常稀有的高自旋态现象。图 4 给出了这四条转动带单粒子部分能谱随自旋的变化曲线。从图中可以看出这四条转动带在低自旋部分能量是非常接近的, 在自旋大于 15 的高自旋部分, 带 A 和 B 才与带 C 逐渐劈裂开, 并且劈裂幅度随着自旋的增加而增加。在这个过程中, 带 A 和带 B 是一直交织在一起, 并且表现出非常明显的相反的旋称

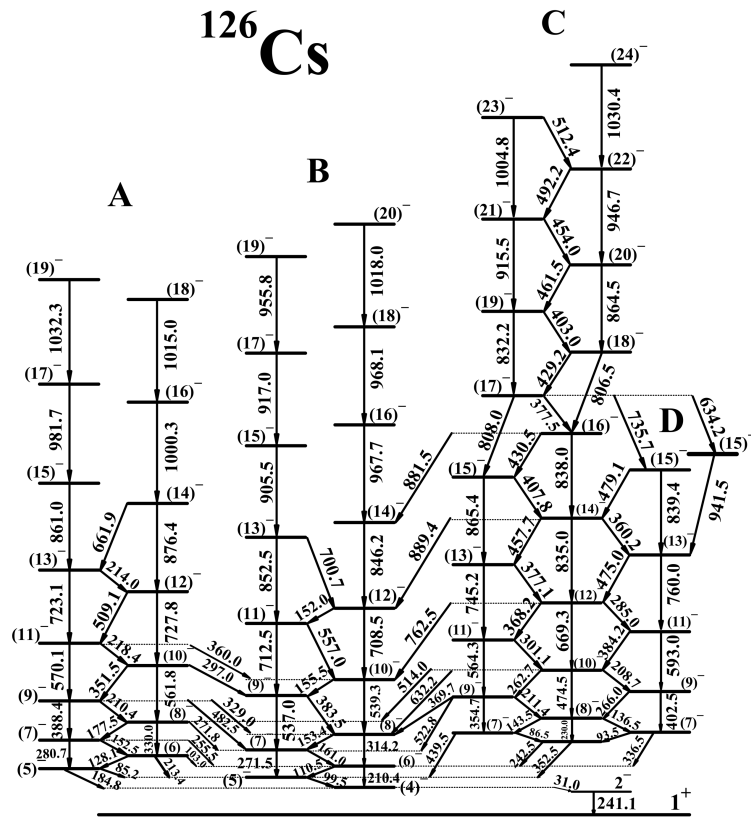


图3 (网络版彩图) 取自文献 [31] 的 ^{126}Cs 核的部分能级纲图

Figure 3 (Color online) The partial level scheme of ^{126}Cs from ref. [31].

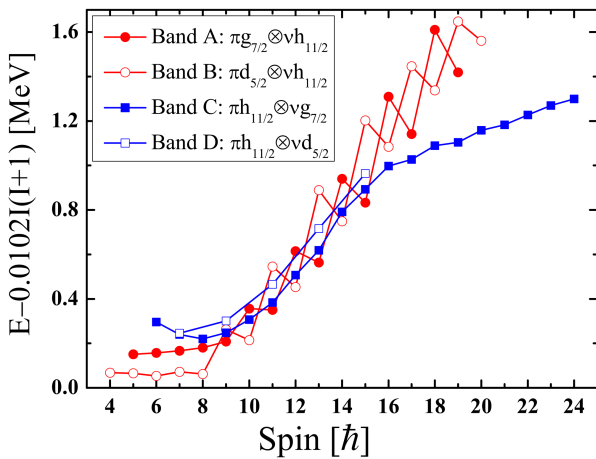


图4 (网络版彩图) 实验观测到的激发能减掉一个刚性转子之后的能谱随着自旋的变化关系曲线

Figure 4 (Color online) Experimental excitation energies versus spin relative to a rigid rotor.

劈裂相位. 带 C 和带 D 能谱几乎平行, 保持着一个近

似恒定的能量差, 没有任何旋称劈裂. 为何组态如此接近的二对赝自旋双带会表现出如此不一样的能谱规律? 如何在赝自旋对称性破缺的框架下统一描述它们的实验性质? 是当前理论研究亟待解决的问题.

人们很自然将希望寄托在协变密度泛函理论上, 因为协变密度泛函理论可以自然地给出自旋-轨道相互作用和赝自旋对称性, 而不用人为的加入相互作用并根据实验数据来调整相互作用强度. 因此非常适合用于研究赝自旋对称, 并已经取得了很大的成功 [22, 32–34]. 但是, 目前为止协变密度泛函理论还不能自然地描述实验上观测到的赝自旋双带结构, 需要理论家进一步深入发展此项理论.

4 总结与展望

本文阐述了原子核高自旋态中几个有趣的物理现象: 电转动带, 订书机带, 剪刀带和赝自旋双带, 并

从这几个物理现象入手讨论了原子核的协变密度泛函理论的发展对实验研究的促进作用, 和实验研究对协变密度泛函理论提出地更高的要求 and 期待. 未

来原子核的协变密度泛函理论将有望在研究原子核的赝自旋对称破缺形成的双带和手征对称性破缺形成的手征双带方面取得进一步的突破.

致谢 感谢刘晨和李志泉的部分制图和仔细地阅读此手稿.

参考文献

- 1 Zangwill A. A half century of density functional theory. *Phys Today*, 2015, 68: 34–39
- 2 Meng J, Guo J Y, Li J, et al. Covariant density functional theory in nuclear physics. *Prog Phys*, 2011, 31: 199–336
- 3 Frauendorf S, Meng J, Reif J. Tilted Cranking. In: *Proceedings of the Conference on Physics From Large γ -Ray Detector Arrays*. Deleplanque M A, ed. Berkeley: University of California, Berkeley, 1994. IILBL35687: 52–67
- 4 Macchiavelli A O, Clark R M, Deleplanque M A, et al. The competition between the shears mechanism and core rotation in a classical particles-plus-rotor model. *Phys Lett B*, 1999, 450: 1–6
- 5 Amita, Jain A K, Singh B. Table of magnetic dipole rotational bands. *At Data Nucl Data Tables*, 2000, 74: 283–331
- 6 Meng J, Peng J, Zhang S Q, et al. Progress on tilted axis cranking covariant density functional theory for nuclear magnetic and antimagnetic rotation. *Front Phys*, 2013, 8: 55–79
- 7 Madokoro H, Meng J, Matsuzaki M, et al. Relativistic mean field description for the shears band mechanism in ^{84}Rb . *Phys Rev C*, 2000, 62: 061301(R)
- 8 Peng J, Meng J, Ring P, et al. Covariant density functional theory for magnetic rotation. *Phys Rev C*, 2008, 78: 024313
- 9 Zhao P W, Zhang S Q, Peng J, et al. Novel structure for magnetic rotation bands in ^{60}Ni . *Phys Lett B*, 2011, 699: 181–186
- 10 Yu L F, Zhao P W, Zhang S Q, et al. Magnetic rotations in ^{198}Pb and ^{199}Pb within covariant density functional theory. *Phys Rev C*, 2012, 85: 024318
- 11 Wang S Y, Sun D P, Chen Z Q, et al. Collective and noncollective states in ^{116}Sb . *Phys Rev C*, 2012, 86: 064302
- 12 Zhao P W, Peng J, Liang H Z, et al. Antimagnetic rotation band in nuclei: A microscopic description. *Phys Rev Lett*, 2011, 107: 122501
- 13 Zhao P W, Peng J, Liang H Z, et al. Covariant density functional theory for antimagnetic rotation. *Phys Rev C*, 2012, 85: 054310
- 14 Li X W, Li J, Lu J B, et al. Candidate antimagnetic rotational band in ^{112}In . *Phys Rev C*, 2012, 86: 057305
- 15 Meng J, Peng J, Zhang S Q, et al. Progress on tilted axis cranking covariant density functional theory for nuclear magnetic and antimagnetic rotation. *Front Phys*, 2013, 8: 55–79
- 16 Zhang P, Qi B, Wang S Y. Competition between antimagnetic and core rotation in ^{109}Cd within covariant density functional theory. *Phys Rev C*, 2014, 89: 047302
- 17 Chen Z Q, Wang S Y, Liu L, et al. High-spin states and possible “stapler” band in ^{115}In . *Phys Rev C*, 2015, 91: 044303
- 18 Chen Y Y, Zhang S Q, Li X Q, et al. High-spin spectroscopy of ^{144}Tb : Systematic investigation of dipole bands in $N=79$ isotones. *Phys Rev C*, 2014, 89: 054309
- 19 Arima A, MHarvey M, Shimizu K. Pseudo LS coupling and pseudo SU3 coupling schemes. *Phys Lett B*, 1969, 30: 517–522
- 20 Hecht K T, Adler A. Generalized seniority for favored $J \neq 0$ pairs in mixed configurations. *Nucl Phys A*, 1969, 137: 129–143
- 21 Ginocchio J N. Relativistic symmetries in nuclei and hadrons. *Phys Rep*, 2005, 414: 165–261
- 22 Liang H Z, Meng J, Zhou S G. Hidden pseudospin and spin symmetries and their origins in atomic nuclei. *Phys Rep*, 2015, 570: 1–84
- 23 Liu C, Wang S Y, Qi B, et al. Signature splitting, shape evolution, and nearly degenerate bands in ^{108}Ag . *Phys Rev C*, 2013, 88: 037301
- 24 Liu C, Wang S Y, Qi B, et al. Configuration assignment of the positive-parity structures of ^{108}Ag . *Int J Mod Phys E*, 2011, 20: 2351–2359
- 25 Wang S Y, Qi B, Sun D P, et al. Shape coexistence and strongly coupled bands in ^{118}Sb . *Phys Rev C*, 2010, 82: 057303
- 26 Xu Q, Zhu S J, Hamilton J H, et al. Identification of pseudospin partner bands in ^{108}Tc . *Phys Rev C*, 2008, 78: 064301
- 27 Hua W, Zhou X H, Zhang Y H, et al. Properties of the rotational bands in the transitional nucleus ^{189}Pt . *Phys Rev C*, 2009, 80: 034303
- 28 Frauendorf S, Meng J. Tilted rotation of triaxial nuclei. *Nucl Phys A*, 1997, 617: 131–147
- 29 Petrache C M, Hagemann G B, Hamamoto I, et al. Risk of misinterpretation of nearly degenerate pair bands as chiral partners in nuclei. *Phys Rev Lett*, 2006, 96: 112502
- 30 Wang S Y, Zhang S Q, Qi B, et al. Examining the chiral geometry in ^{104}Rh and ^{106}Rh . *Chin Phys Lett*, 2007, 24: 664–667
- 31 Wang S Y, Liu Y Z, Ma Y J, et al. Observation of negative parity high spin states of ^{126}Cs . *Phys Rev C*, 2007, 75: 037302

- 32 Chen T S, Lü H F, Meng J, et al. Pseudospin symmetry in relativistic framework with harmonic oscillator potential and Woods-Saxon potential. *Chin Phys Lett*, 2003, 20: 358
- 33 Lu B N, Zhao E G, Zhou S G. Pseudospin symmetry in single particle resonant states. *Phys Rev Lett*, 2012, 109: 072501
- 34 Guo J Y, Chen S W, Niu Z M, et al. Probing the symmetries of the Dirac Hamiltonian with axially deformed scalar and vector potentials by similarity renormalization group. *Phys Rev Lett*, 2014, 112: 062502

Several interesting phenomena on high-spin states: electric rotation, stapler band, shear band and pseudospin partner bands

WANG ShouYu*

*Shandong Provincial Key Laboratory of Optical Astronomy and Solar-Terrestrial Environment, School of Space Science and Physics, and
Institute of Space Sciences, Shandong University, Weihai 264209, China*

This article describes several interesting nuclear phenomena on high-spin states: electric rotation, stapler band, shear band and pseudospin partner bands. We first introduce the physical pictures of electric rotation, stapler band, shear band and pseudospin partner bands, and then discuss recent progress of these nuclear phenomena with a few selected examples and open problems. Start from these nuclear phenomena, we discuss that the covariance density functional theory in nuclear physics promotes the development of experimental studies. Vice versa, the development of the experiment also presents the higher requirements and expectations for nuclear covariance density functional theory. Further developments of nuclear covariance density functional theory are anticipated in the near future.

shear band, stapler band, pseudospin partner bands

PACS: 27.60.+j, 23.20.Lv, 21.10.Re, 21.60.Ev

doi: 10.1360/SSPMA2015-00366