

文章编号: 1007-4627(2013)03-0268-10

超 Fm 原子核转动谱的系统研究

张振华¹, 温凯², 贺晓涛³, 曾谨言⁴, 赵恩广^{2,5}, 周善贵^{2,5}

1. 核物理与核技术国家重点实验室, 北京大学物理学院, 北京 100871;
2. 理论物理国家重点实验室, 中国科学院理论物理研究所, 北京 100190;
3. 南京航空航天大学材料科学与技术学院, 江苏 南京 210016;
4. 北京大学物理学院, 北京 100871;
5. 兰州重离子加速器国家实验室原子核理论中心, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 简要介绍超 Fm 原子核谱学的实验和理论研究进展, 并综述本研究组近期在超 Fm 原子核谱学方面的一些理论研究工作, 包括: 利用转动谱公式系统研究了超 Fm 核区偶偶核与奇 A 核的转动谱。结果表明, 在二参数公式中, 相较于 AB 公式和 Harris 公式, ab 公式能够更好地描述偶偶核基态转动带; 通过拟合超 Fm 核区奇 A 核的单粒子能级, 提出了一组轨道角动量依赖的 Nilsson 新参数; 利用粒子数守恒方法处理对关联, 基于推转壳模型, 系统研究了超 Fm 原子核转动谱, 计算得到的转动惯量、角动量顺排等与实验符合; 通过分析费米面附近 Nilsson 能级的占据几率以及各条轨道对角动量顺排的贡献, 解释了这个质量区原子核的转动带产生回弯(上弯)的原因。进一步, 利用这组新 Nilsson 参数, 研究了超重核的单粒子能级结构以及微观壳修正能量。计算表明, 这组新 Nilsson 参数预言的超重岛中心为 $Z = 120$ 和 $N = 182$ 。

关键词: 超 Fm 原子核; 转动谱; ab 公式; 粒子数守恒方法; 推转壳模型

中图分类号: O571.21⁺1; O571.23; O571.6 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.30.03.268

1 引言

超重原子核性质及合成机制是当前原子核物理研究的一个重要前沿领域。20 世纪 60 年代, 原子核的宏观微观模型预言, 在 $Z = 114$ 和 $N = 184$ 附近可能存在一个超重稳定岛^[1-3]。目前, 实验上已经成功地合成了 $Z \leq 118$ 的超重核^[4-8], 其中 $Z = 114$ 和 116 以及 $Z \leq 112$ 的超重元素已经命名。

除宏观微观模型外, 很多其他理论模型也被用来研究超重核结构性质。当前的一个主要问题是, 不同的理论模型对超重稳定岛位置的预言不尽相同。例如, 大部分非相对论平均场理论预言, 超重岛中心在 $Z = 124$ 或 126 及 $N = 184$ 附近^[9-11]; 而相对

论平均场理论则预言, 超重岛中心为 $Z = 114$ 或 120 和 $N = 172$ 或 $N = 184$ ^[9, 12-13]。在超重核合成机制方面, 对重离子熔合反应熔合截面和蒸发剩余截面进行了许多理论研究^[14-24]。这些理论工作一方面有助于了解合成超重核的重离子熔合反应机制, 另一方面对相关实验有一定的参考意义。例如, 对合成 117 号元素的各种弹靶组合的蒸发剩余截面进行系统计算表明, $^{48}\text{Ca} + ^{249}\text{Bk}$ 这一反应的蒸发剩余截面最大, 是最佳弹靶组合^[19, 25-26]。2009 年, 利用该反应体系, 在俄罗斯 Dubna 成功合成了 117 号元素^[8]。

需要指出的是, 目前合成的超重核均为缺中子核素, 距理论预言的稳定岛中心 ($N = 184$) 还缺至少 7 个中子。超重核的存在主要源于量子壳效应。原子

收稿日期: 2012-10-16; 修改日期: 2013-01-22

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(973计划)(2013CB834400); 国家自然科学基金资助项目(10975100, 10979066, 11121403, 11175252, 11120101005, 11275098, 11275248); 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KJ CX2-EW-N01, KJ CX2-YW-N32)

作者简介: 张振华(1982-), 男, 河北石家庄人, 博士后, 从事原子核结构研究; E-mail: zhzhang@itp.ac.cn.

通信作者: 周善贵, E-mail: sgzhou@itp.ac.cn

<http://www.npr.ac.cn>

核的单粒子壳层结构对超重稳定岛的位置起决定性作用。例如, 质子自旋伙伴态 $2f_{5/2}$ 和 $2f_{7/2}$ 之间的劈裂较大时, 超重核区质子幻数为 114; 该劈裂较小时, 这个幻数则为 $Z = 120$ 。利用重离子熔合反应合成 $Z \geq 110$ 超重核的合成截面非常小, 目前尚无法通过实验获得其单粒子谱的信息。得到超重核区单粒子能级信息的一种间接方法是研究质量数相对较轻的超 Fm 原子核能谱。近些年来, 实验上观测到 $A \approx 250$ 质量区的许多转动带^[27-32]。实验数据显示这个核区的原子核都具有稳定形变。例如, ^{252}No 的四极形变 $\beta \approx 0.28 \pm 0.02$ ^[33]。由于形变效应, 决定超重核区壳层结构和幻数的若干关键的单粒子能级, 例如质子 $2f_{5/2}$ 和 $2f_{7/2}$, 降低到 $A \approx 250$ 的原子核的质子费米面附近。研究这些核的低激发转动谱可以揭示其组态结构、壳层结构以及稳定性等诸多信息, 从而一方面对现有的理论模型进行检验, 另一方面有助于深入认识超重核性质^[27-28, 32, 34-36]。

本文将简要介绍超 Fm 原子核谱学的实验和理论研究进展, 并综述我们近期在超 Fm 原子核谱学方面进行的一些理论研究工作。

2 超 Fm 原子核谱学研究进展简介

2.1 实验进展

实验上主要结合反冲衰变标记(Recoil Decay

Tagging, 简称 RDT) 技术, 利用在束或衰变谱学方法研究超 Fm 原子核的激发态性质, 代表性的实验室包括: 芬兰的 JYFL、美国的 ANL、德国的 GSI、法国的 GANIL、俄罗斯的 FLNR 以及日本的 JAEA^[27-28, 32, 37-38]。兰州重离子加速器国家实验室也计划开展这方面的实验工作^[39]。

图 1 给出了质子数 $Z = 96$ (Cm) 到 106 (Sg) 的原子核谱学实验研究结果的数据统计, 其中包括实验观测到的能级数 (N_L)、转动带的个数 (N_B) 以及原子核基态的自旋宇称 (J^π)。括号中的自旋宇称表示这些原子核的基态自旋宇称尚未确定。

实验上研究较多的是 $Z \leq 102$ 、 $N \approx 152$ 的偶偶核。最近, 在芬兰的 JYFL 进行的两次实验分别建立了 ^{246}Fm 和 ^{256}Rf 的基态转动带^[47-48]。值得指出的是, 后者是第一次在超重核(其存在完全由量子壳效应决定)中进行的这类实验, 这意味着谱学实验向超重核区迈出了重要一步。除了基态转动带, 实验上也观测到了一些偶偶核的高 K 多准粒子同核异能态。例如 ^{254}No 中的激发能为 1 297 keV、 $K^\pi = 8^-$ 的二准粒子带以及激发能为 2 928 keV、 $K^\pi = 16^+$ 的四准粒子带等^[40-45]。这些高 K 多准粒子带对研究超 Fm 原子核的单粒子能级结构, 例如 $Z = 100$ 和 $N = 152$ 处的形变子壳, 检验超 Fm 核形变的轴对称性, 以及研究对关联强度等都有很重要的作用。另外, 高 K 多准粒子

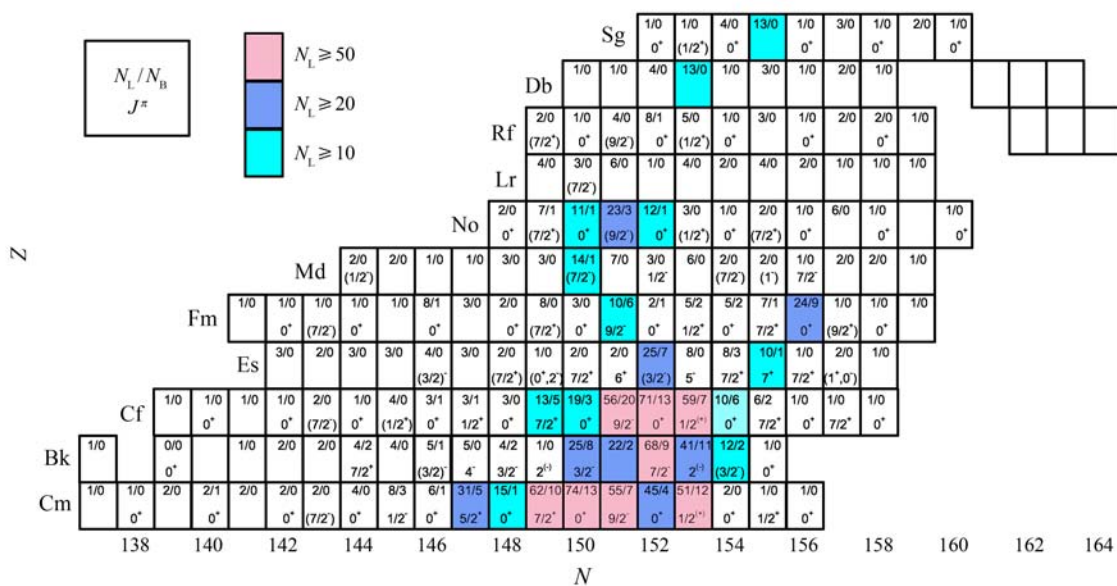


图 1 (在线彩图) 质子数 $Z = 96$ (Cm) 到 106 (Sg) 的原子核谱学实验数据统计

实验数据主要取自 ENSDF^[52](截止到 2012 年 4 月); ^{246}Fm 和 ^{256}Rf 的实验数据取自文献^[47-48]; N_L 和 N_B 分别表示实验观测到能级以及转动带的个数, J^π 表示原子核基态的自旋宇称; 本图取自文献^[53], 稍有改动。

态研究对超重核的合成也有指导意义。例如,文献[46]中指出,某些高 K 多准粒子同核异能态的寿命可能比基态的寿命还要长。

由于实验技术的发展,近些年来在奇 A 核中观测到了越来越多的转动带。例如, ^{253}No [49–50], ^{251}Md [51], ^{255}Lr [30], $^{247,249}\text{Cm}$ 以及 ^{249}Cf [31]。这些奇 A 核能够提供更丰富的单粒子能级结构以及组态相关的电磁跃迁属性等信息。尤其是,在 ^{249}Cm 中,观测到了建立在中子 Nilsson 组态 $1/2^+[620]$ 上的转动带。中子 $1/2^+[620]$ 源自 $N = 164$ 球形子壳附近的 $2g_{7/2}$ 轨道,这是目前高自旋实验所能达到的能量最高的中子组态。

从图 1 可见,奇奇核的实验数据相对较少。

2.2 理论进展

理论上研究超 Fm 原子核谱学性质,一方面可以加深对这个核区原子核性质的了解,另一方面有助于将理论模型扩展到超重核区,进而有助于了解超重核性质。用来研究超 Fm 原子核的理论模型很多,主要包括:宏观微观模型[46, 54–64]、自洽的平均场模型[61–62, 65–68]、准粒子-声子耦合模型[69]、粒子-转子模型[70]、投影壳模型[34, 71–72]、重核壳模型[73]和推转壳模型[35–36, 74–77]等。研究对象包括超 Fm 原子核的基态性质(结合能、形状、壳结构和对相关强度等)、同核异能态以及转动谱等。下面简要介绍宏观微观模型、自洽场模型、投影壳模型和推转壳模型的部分结果。

宏观微观模型已经广泛用于研究超 Fm 原子核结构性质。Sobiczewski 和 Ćwiok 等利用宏观微观模型对质子数等于 100 附近原子核的形变参数、质量盈余、 α 衰变能、偶偶核的第一个 2^+ 能级和奇 A 核的一准粒子带头能量等进行了系统研究[54–58]。结果表明,这个质量区的原子核都具有稳定的轴对称形变;为了更好地描述这些超 Fm 核的转动特性,需要引入更高阶的形变,例如 β_6 和 β_8 。Adamian 等利用双中心壳模型对超 Fm 原子核的一准粒子、高 K 多准粒子同核异能态等进行了系统计算,并通过拟合超 Fm 核区一准粒子的带头能量,提出一组同位旋相关的 Nilsson 参数[59],进而对超重核区的 α 衰变能、裂变位垒、中子(质子)分离能和蒸发剩余截面等进行了计算。结果表明,下一个质子的幻数可能大于或者等于 120[78]。

Liu 等利用 Total Routhian Surface (TRS) 方法研究了高阶形变 β_6 对超 Fm 核性质的影响,例如高 K 同核异能态以及 $^{252,254}\text{No}$ 转动属性差异的来源等[63–64]。

相对于宏观微观模型,自洽场模型的计算量大很多,因此系统的计算结果不多。Duguet 等利用基于 Skyrme 能量密度泛函的 Hartree-Fock-Bogolyubov (HFB) 理论对 ^{254}No 附近原子核的转动特性、对相互作用和裂变位垒等进行了研究[67, 79]。计算表明,基于实验给出的原子核结合能奇偶质量差得到的对力强度并不能很好地描述实验,为了再现转动惯量等物理量的实验值,对力强度必须适当减小。这个问题目前为止还没有得到令人满意的回答,需要进一步的研究。Egido 等利用基于 Gogny 能量密度泛函的 HFB 理论研究了 ^{254}No 的裂变位垒随着自旋的变化。计算表明, $I = 30 \sim 40\hbar$ 时,裂变位垒呈现双峰结构,当自旋更高时 ($I > 40\hbar$) 变成单峰。这表明,即使角动量很大时 ($I \sim 40\hbar$), ^{254}No 这个原子核仍然能稳定存在[80]。Delaroche 等对锕系区 55 个偶偶核在正常形变态以及超形变同核异能态下的各种性质进行了系统研究,例如计算了单粒子能级、对能、势能曲面、二准粒子能量、转动惯量和裂变位垒等[68]。这是为数不多的利用密度泛函理论系统研究超 Fm 原子核的工作之一。利用多维形变约束的相对论平均场模型[81], Zhao 等研究了 $N = 150$ 的几个同中子素的基态性质,发现在 ^{248}Cf 等原子核中,有较强的非轴对称八极 (Y_{32}) 关联[82],从而支持了 Chen 等[72]的结论。Afanasjev 等利用 Cranked relativistic Hartree-Bogoliubov (CRHB) 理论对 ^{254}No 附近的几个原子核的四极形变、对相关、一准粒子谱、壳结构和双核子分离能等进行了系统研究[66]。

投影壳模型[83] (Projected shell model, 简称 PSM) 也被用来系统研究超 Fm 原子核转动。Al-Khudair 和 Sun 等利用 PSM 计算了 Cm, Cf, Fm 和 No 等偶偶核转动带的能谱、转动惯量、约化跃迁几率 $B(E2)$ 以及 g 因子[34],预言了这些原子核中存在 γ 振动带[71]。为了重现实验上观测到超 Fm 核区较低的 2^- 能级, Chen 等提出此质量区的某些原子核中存在非轴对称八极 (Y_{32}) 关联[72]。

Egido 等利用推转壳模型 (Cranked shell model, 简称 CSM) 系统研究了锕系区原子核[74–75],计算了这些原子核的能级、 g 因子、 $E2$ 约化跃迁几率,并系

统地分析了这些原子核基态转动带的回弯机制。Zhang等利用粒子数守恒(Particle-number conserving, 简称PNC)方法处理对关联, 基于推转壳模型, 系统研究了超Fm原子核转动谱^[35-36, 77]。第4节, 将简要介绍基于粒子数守恒方法的推转壳模型(PNC-CSM)部分研究结果。

3 转动谱公式对超Fm原子核的描述

理论上, 既可以用上节提到的理论模型深入细致地研究原子核的转动性质, 也可以用经验公式描述原子核的转动谱。描述原子核转动谱的经验公式主要有: Bohr-Mottelson提出的按 $I(I+1)$ 展开的 AB (ABC 和 $ABCD$)公式^[84]、按 ω^2 展开的Harris公式^[85]、吴崇试与曾谨言提出的 ab 公式^[86]和其他几个二参数公式^[87-88]、推转Bohr-Mottelson模型^[89]以及对能隙参量随转动频率增加而减小的指数型公式^[90]等。考虑到超Fm原子核多具有稳定的形变, 可以近似看成好的转子, 温凯等利用上述部分公式研究了 $A \approx 250$ 区的原子核转动能谱^[91], 这些公式包括 AB (ABC 和 $ABCD$)公式、Harris公式以及 ab 公式。下面简略地给出利用这些公式描述 $A \approx 250$ 区偶偶核基态带转动谱的部分结果。

在绝热近似假设下, Bohr和Mottelson提出, 轴对称原子核的转动能量可以按 $I(I+1)$ 展开^[84]:

$$E_I = A\xi^2 + B\xi^4 + C\xi^6 + D\xi^8 + \dots \quad (1)$$

上式中 $\xi^2 = I(I+1) - K^2$, K 为自旋 I 在对称轴方向的投影。对于偶偶核的基态, $K = 0$ 。上式中的第一项为转动项, 其余各项是对转动项的修正。这个公式在回弯前可以很好地描述转动谱。由角动量为 I 的能级到角动量为 $I-2$ 的能级的跃迁能量 $E_\gamma(I)$ 为

$$E_\gamma(I) = E_I - E_{I-2} \quad (2)$$

按 ω^2 展开的Harris公式^[85]形式如下:

$$E = \alpha\omega^2 + \beta\omega^4 + \gamma\omega^6 + \dots \quad (3)$$

其中的 ω 为转动频率。1984年, 吴崇试与曾谨言给出了描述转动带的 ab 公式^[86]:

$$E_I = a \left[\sqrt{1 + bI(I+1)} - 1 \right] \quad (4)$$

文献[91]将实验观测到的跃迁能量 E_γ^{Exp} 用上述转动谱公式进行拟合, 使均方根偏差

$$\sigma = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| E_\gamma^{\text{Exp.}}(I_i) - E_\gamma^{\text{Cal.}}(I_i) \right|^2 \right]^{1/2} \quad (5)$$

取极小, 得到了相应参数的最佳取值。研究发现, 对于大部分转动谱, ab 公式能够给出更好的描述, 均方根偏差大多小于1 keV。

一般认为, 与 AB 公式相比, Harris公式能更好地描述转动谱^[92]。这是由于, 对于很多轻核的转动带, Harris公式能给出与4参数的 $ABCD$ 公式比较接近的描述。这个结论能从考察 $ABCD$ 公式的4个参数之间的关系得到。如果假设二参数Harris公式与4参数的 $ABCD$ 公式都能很好地描述实验数据, 可以得到 A , B , C 和 D 4个参数间的关系。基于Harris公式:

$$E = \alpha\omega^2 + \beta\omega^4, \quad (6)$$

这4个参数之间满足如下关系式:

$$R_1 = \frac{AC}{4B^2} = 1, \quad R_2 = \frac{A^2D}{24B^3} = 1. \quad (7)$$

通过对较轻核的实验数据进行分析, 这个关系能够很好地满足, 说明Harris公式与4个参数的 $ABCD$ 公式一样, 能很好地描述这些转动谱。需指出的是, 通过对稀土区与铜系区的实验数据分析表明, 这个关系并不能很好地满足^[93]。文献[91]通过对 $A \approx 250$ 质量区原子核的分析也表明这个关系不能很好地满足。这说明, 二参数的Harris公式对于描述稀土区、铜系区和 $A \approx 250$ 质量区原子核的转动谱有一定的局限性。

类似于Harris公式, 由 ab 公式与 $ABCD$ 公式同样可以得到 A , B , C 和 D 4个参数间的关系^[94]:

$$R_1 = \frac{AC}{4B^2} = \frac{1}{2}, \quad R_2 = \frac{A^2D}{24B^3} = \frac{5}{24}. \quad (8)$$

由Harris公式得到的关系式与由 ab 公式得到的关系式有很大的不同。文献[91]通过对 $A \approx 250$ 质量区转动谱实验数据的分析检验了上述4个关系式。

图2展示了通过拟合偶偶核基态转动带得到的 A , B , C 和 D 4个参数对关系式(7)和式(8)的满足情况。对于 ^{244}Cm , 4个参数的关系对式(7)和式(8)都有较大偏离。但总体上, 对于 $A \approx 250$ 质量区的偶偶核基态转动带, 相较于由Harris公式得到的关系式(7), A , B , C 和 D 这4个参数更符合由 ab 公式得到的关

系式(8)。由于 $ABCD$ 公式能非常好地描述实验,这说明,比较Harris公式, ab 公式能与实验更好地符合。

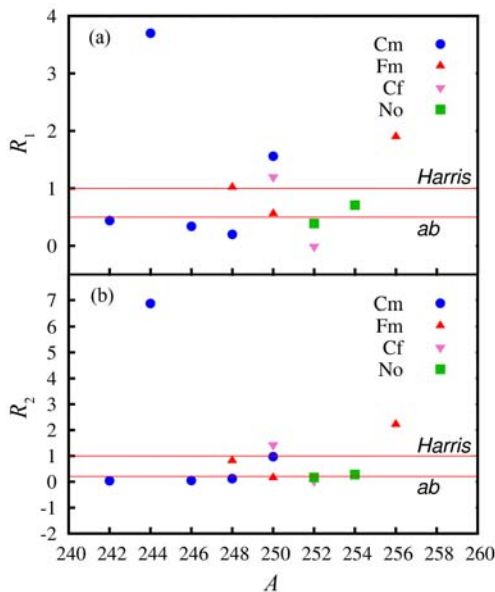


图 2 (在线彩图)利用 $ABCD$ 公式对 $A \approx 250$ 质量区偶偶核基态带转动谱拟合得到的 $R_1 = \frac{AC}{4B^2}$ (a)和 $R_2 = \frac{A^2D}{24B^3}$ (b)(本图取自文献[91])

文献[91]还利用上述公式论述了 $A \approx 250$ 质量区的奇 A 核原子核转动谱,并讨论了它们的参数之间的关系。对于奇 A 核, AB 公式和 ab 公式给出的描述则稍差,同时关系式(7)和式(8)都不能很好地满足,而 $ABCD$ 公式则能给出较好的结果。

4 利用PNC-CSM研究超Fm原子核

PNC-CSM在研究较轻的正常变形核以及超变形核的高自旋态方面已经取得了巨大成功。Zhang等利用PNC-CSM,一方面详细讨论了个别超Fm原子核的性质^[35,77],另一方面系统研究了超Fm原子核的转动谱^[36]。下面给出部分系统研究的结果。

在PNC-CSM中,单粒子能级由Nilsson模型给出。传统的Nilsson参数 (κ, μ) ^[95-96]是通过拟合稀土区和锕系区 β 稳定线附近原子核的单粒子能级得到的,对超Fm原子核不适用。通过拟合超Fm核区奇 A 核的一准粒子带的带头能量,Zhang等针对这个质量区提出了一组轨道角动量依赖的新Nilsson参数 (κ, μ) ^[35-36]。超Fm原子核形变的实验值非常少。各种理论模型对这个核区的原子核形变参数的预言也有一些差别。文献[35-36]根据不同模型预言的形变参数系统学规律,

结合对偶偶核基态转动惯量的描述,给出了 $Z \approx 100$ 区原子核的四极形变参数。

文献[36]利用上述参数计算了超Fm核区奇 A 核的一准中子(质子)带的带头能量,与实验值的均方根偏差为270 keV(200 keV)。与传统的Nilsson参数相比,这一结果有了很大的改进,与采用Woods-Saxon势计算出来的结果非常接近。

PNC-CSM对奇 A 核和偶偶核转动惯量的计算结果与实验符合得非常好。图3是PNC-CSM计算(实线)的Cm, Cf, Fm和No偶偶核同位素链基态带的第一类转动惯量 $J^{(1)}$ 与实验值(实心圆)^[28-29]的比较。PNC-CSM的计算结果可很好地重现实验值。从图中可以看出,任何一个同中子素链中随着质子数的增大,转动惯量的上弯越来越不明显。文献[36]详细描述了导致这种行为的物理原因:在Cm和Cf同位素中,主要是质子 $i_{13/2}$ 轨道对回弯(上弯)有贡献;随着质子数增加,在Fm和No同位素中,回弯(上弯)由质子 $i_{13/2}$ 轨道和中子 $j_{15/2}$ 轨道之间的竞争产生。文献[36]还解释了为什么在这个质量区的一些原子核中没有观测到中子 $j_{15/2}$ 轨道引起的回弯(上弯)。最近,实验上观测到了 ^{246}Fm 基态带的转动谱^[47]。在超Fm原子核中,内转换效应非常强,因此实验上没有观测到最低的几条 γ 跃迁。文献[47]利用 ab 公式来拟合转动谱,推得实验上观测到的能量最低的167 keV的跃迁对应的初态和末态自旋宇称分别为 6^+ 和 4^+ ,并且利用 ab 公式(4)进行外推,得到了更低的两个 γ 跃迁能量分别为108和47 keV。图4是PNC-CSM计算得到的 ^{246}Fm 的转动惯量与指定不同带头自旋提取的实验值的对比^[53]。上三角代表指定能量为167 keV的 γ 跃迁对应的初态和末态自旋宇称分别为 8^+ 和 6^+ ,即观测到的带头自旋为 6^+ 。实心圆代表指定能量为167 keV的跃迁对应的初态和末态自旋宇称分别为 6^+ 和 4^+ ,即观测到的带头自旋为 4^+ 。这也是文献[47]中采用的结果。上三角代表指定能量为167 keV的跃迁对应的初态和末态自旋宇称分别为 4^+ 和 2^+ ,即观测到的带头自旋为 2^+ 。由此可以看出,把能量为167 keV的 γ 射线指定为从 6^+ 态到 4^+ 态的跃迁所发出,即实验上观测到的最低能级的自旋宇称为 4^+ ,与理论计算符合得非常好。这一方面肯定了文献[47]的自旋指定,另一方面也是对PNC-CSM的支持。

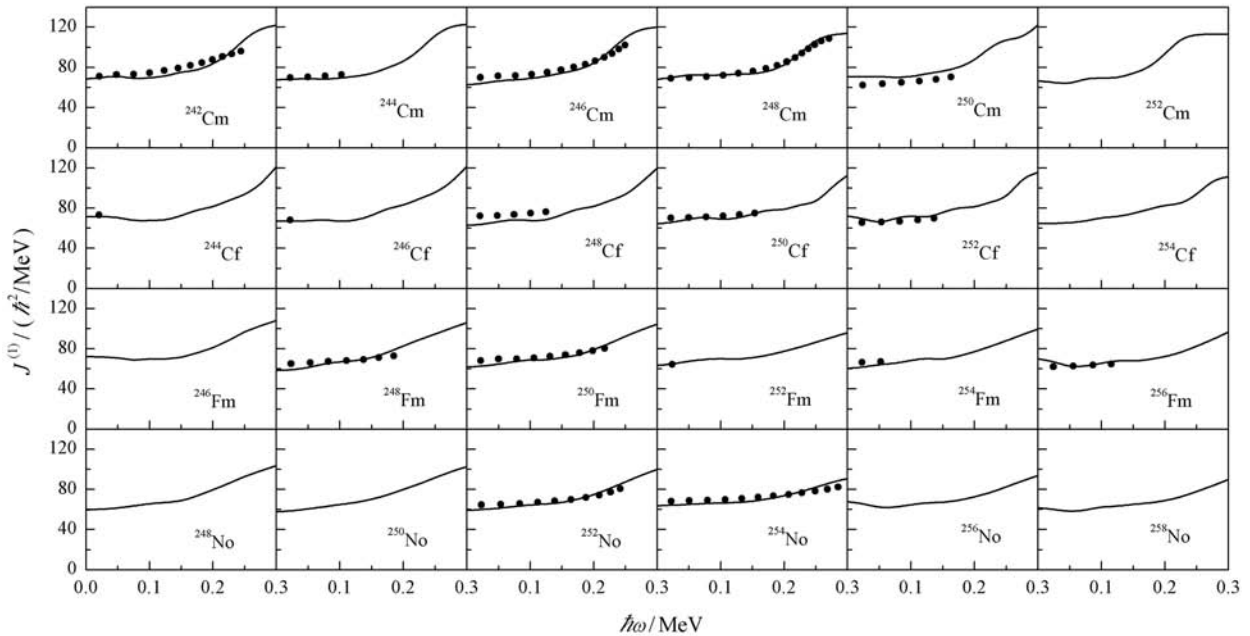


图 3 PNC-CSM 计算(实线)得到的 Cm, Cf, Fm 和 No 偶偶核同位素链基态带的第一类转动惯量 $J^{(1)}$ 与实验值(实心圆)^[28-29]的比较(本图取自文献 [36])

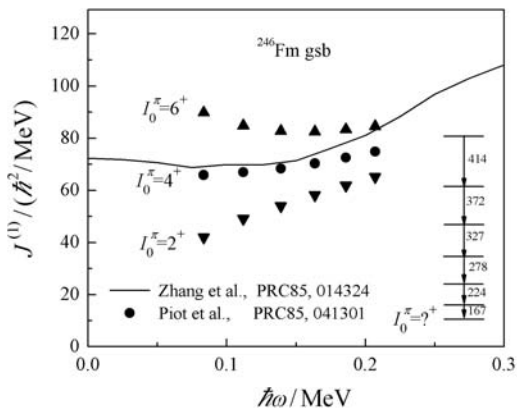


图 4 PNC-CSM 计算得到的 ^{246}Fm 基态带转动惯量与指定不同带头自旋提取的实验值的对比

计算结果取自文献 [36], 实验数据取自文献 [47]; 上三角、实心圆和下三角分别代表指定实验上观测到的最低的 167 keV 的跃迁为 $E(8^+) \rightarrow E(6^+)$ (即观测到的带头自旋为 6^+)、 $E(6^+) \rightarrow E(4^+)$ (即观测到的带头自旋为 4^+ , 这也是文献 [47] 中采用的结果) 以及 $E(4^+) \rightarrow E(2^+)$ (即观测到的带头自旋为 2^+); 本图取自文献 [53]。

5 超重核区的壳结构

研究超 Fm 核谱学性质, 一方面可以加深人们对这个核区原子核性质的理解, 另一方面有助于将理论模型扩展到超重核区, 进而有助于了解超重核的单粒子能级结构以及超重岛的位置等信息。通过第 4 节的

讨论, 可以看到, 使用新 Nilsson 参数进行 PNC-CSM 计算能够很好地重复出超 Fm 核的谱学性质。在本节, 将利用这组参数来研究超重核区的壳结构。

图 5 展示了用新 Nilsson 参数计算得到的形变 Nilsson 能级图。从图中可见, 中子的壳结构没有明显的变化, 仍然是在 $N = 184$ 处有明显的能隙。然而对于质子, $Z = 114$ 处的能隙消失, 取而代之的是 $Z = 120$ 处产生一个明显的能隙, 即质子的幻数为 $Z = 120$ 。这和大部分相对论平均场理论预言的幻数相同。文献 [78] 中利用双中心壳模型通过拟合超 Fm 核的谱学, 计算得到的质子幻数也是 $Z = 120$ 。微观修正能对壳结构的存在与否起着决定性的作用^[97], 当原子核处于满壳时, 其壳修正能最大。为了更深入地研究超重稳定岛的位置, 图 6 展示了使用新 Nilsson 参数计算得到的 $Z = 106 \sim 128$ 偶偶核的微观修正能 E_{mic} 。从图中可以非常清楚地看出, 在 $Z = 120$ 和 $N = 182$ 附近 E_{mic} 达到极小。这说明了计算得到的超重稳定岛的中心为 $Z = 120$ 和 $N = 182$ 。壳修正的方法可能是导致微观修正能极小值的位置(图 6)与单粒子能级(图 5)中能隙对应的中子数不同的原因, 在文献 [98] 使用 FRDM 的计算同样出现此问题。FRDM 计算得到的单粒子能级在 $Z = 114$ 和 $N = 184$ 处有比较大的能隙, 然而微观修正能的极小位于 $Z = 115$ 和 $N = 179$ 。

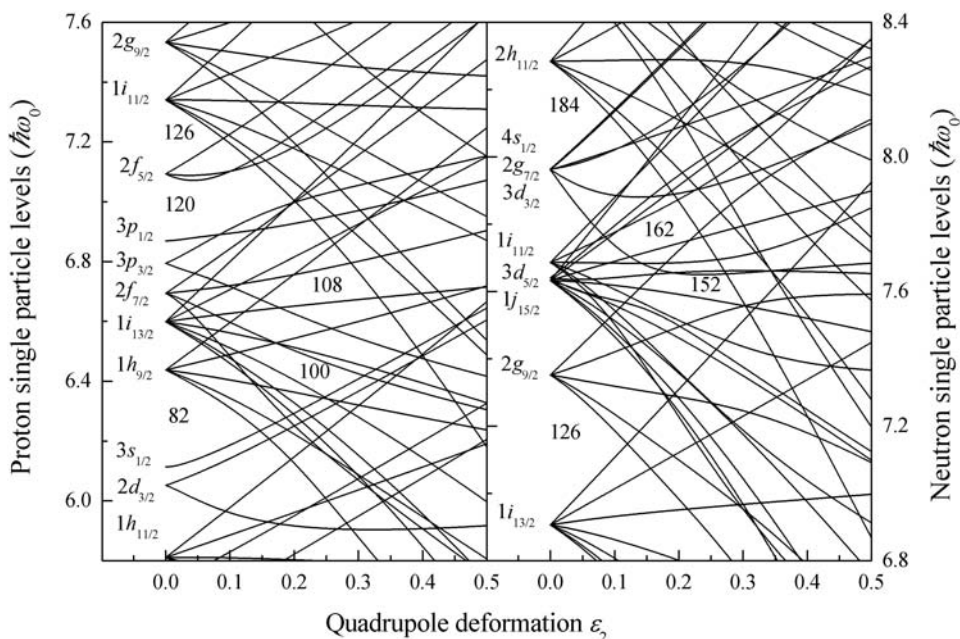


图 5 使用新 Nilsson 参数计算得到的形变 Nilsson 能级图(本图取自文献 [53])。

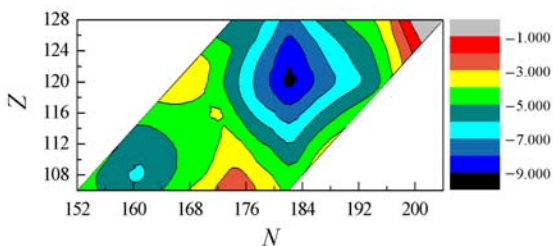


图 6 (在线彩图) 基于新 Nilsson 参数给出的单粒子能级计算得到的 $Z = 106 \sim 128$ 偶偶核的微观修正能 E_{mic} (单位为 MeV) 微观修正的方法参见文献 [99]; 本图取自文献 [53]。

6 总结与展望

本文简要介绍了超 Fm 原子核谱学的实验和理论研究进展, 综述了我们近期在超 Fm 原子核谱学方面进行的部分理论工作, 并且展示了对超重核结构的初步研究。利用几个转动谱公式系统研究了超 Fm 核区偶偶核与奇 A 核的转动谱, 这些公式包括 Bohr-Mottelson 提出的按 $I(I+1)$ 展开的 AB (ABC 和 ABCD) 公式、按 ω^2 展开的 Harris 公式以及吴崇试与曾谨言提出的 ab 公式。结果显示, 在二参数公式中, 相较于 AB 公式和 Harris 公式, ab 公式能够更好地描述 $A \approx 250$ 质量区的偶偶核基态转动带。通过拟合超 Fm 核区奇 A 核的单粒子能级, 提出了一组轨道角动量依赖的 Nilsson 新参数。利用基于粒子数守恒方法

的推转壳模型, 系统研究了超 Fm 原子核转动谱, 计算得到的转动惯量、角动量顺排等与实验符合。通过分析费米面附近 Nilsson 能级的占据几率以及各条轨道对角动量顺排的贡献, 解释了这个质量区原子核的转动带产生回弯(上弯)的原因。利用这组新 Nilsson 参数, 研究了超重核的单粒子能级结构, 发现在 $Z = 120$ 和 $N = 184$ 处有比较大的能隙, 这与传统的 Nilsson 参数预言的结果不同。进一步地, 基于新 Nilsson 参数组给出的单粒子能级, 计算了 $Z = 108 \sim 126$ 的偶偶超重核的微观修正能量, 发现在 $Z = 120$ 以及 $N = 182$ 处, 微观修正能量最大。研究表明, 这组新 Nilsson 参数预言的超重岛中心为 $Z = 120$ 和 $N = 182$ 。另外, 计算得到的单粒子能级能隙的位置与微观修正能极值位置不相同, 需要对此进行进一步研究。

PNC 方法能很好地处理对关联, 基于推转 Nilsson 势的 PNC-CSM 在研究超 Fm 核以及超重核转动性质方面已经取得了很大成功。然而, 在目前理论框架下, 原子核形变参数是输入量, 不能由理论本身自洽给出。在进一步的工作中, 需要发展一种微观自洽的理论, 而协变密度泛函理论为这样的微观研究提供了很好的理论基础。因此, 把 PNC 方法和协变密度泛函理论结合起来是非常必要的。发展基于推转相对论平均场模型的 PNC 方法的工作正在进行当中。另一方面, 在推转模型框架下, 原子核的总角动量不是好量

子数, 把角动量投影方法与PNC方法结合起来, 也是将来的一个重要发展方向。

本文的部分计算结果是在中国科学院计算机网络信息中心超级计算中心的中科院超级计算网格环境上得到的。

参考文献(References):

- [1] MYERS W D, SWIATECKI W J. Nucl Phys, 1966, **81**: 1.
- [2] SOBICZEWSKI A, GAREEV F, KALINKIN B. Phys Lett, 1966, **22**: 500.
- [3] MELDNER H. Arkiv Fysik, 1967, **36**: 593.
- [4] HOFMANN S, MÜNZENBERG G. Rev Mod Phys, 2000, **72**: 733.
- [5] MORITA K, MORIMOTO K, KAJI D, *et al.* J Phys Soc Jpn, 2004, **73**: 2593.
- [6] OGANESSIAN Y. J Phys G: Nucl Phys, 2007, **34**: R165.
- [7] OGANESSIAN Y T, UTYONKOV V K, LOBANOV Y V, *et al.* Phys Rev C, 2006, **74**: 044602.
- [8] OGANESSIAN Y T, ABDULLIN F S, BAILEY P D, *et al.* Phys Rev Lett, 2010, **104**: 142502.
- [9] BENDER M, RUTZ K, REINHARD P G, *et al.* Phys Rev C, 1999, **60**: 034304.
- [10] CWIOK S, DOBACZEWSKI J, HEENEN P H, *et al.* Nucl Phys A, 1996, **611**: 211.
- [11] RUTZ K, BENDER M, BURVENICH T, *et al.* Phys Rev C, 1997, **56**: 238.
- [12] BENDER M, NAZAREWICZ W, REINHARD P G. Phys Lett B, 2001, **515**: 42.
- [13] ZHANG W, MENG J, ZHANG S, *et al.* Nucl Phys A, 2005, **753**: 106.
- [14] ADAMIAN G G, ANTONENKO N V, SCHEID W, *et al.* Nucl Phys A, 1998, **633**: 409.
- [15] ZAGREBAEV V I. Phys Rev C, 2001, **64**: 034606.
- [16] SHEN C, KOSENKO G, ABE Y. Phys Rev C, 2002, **66**: 061602R.
- [17] BAO J D, ZHUO Y Z. Phys Rev C, 2003, **67**: 064606.
- [18] FENG Z Q, JIN G M, LI J Q, *et al.* Phys Rev C, 2007, **76**: 044606.
- [19] ZAGREBAEV V, GREINER W. Phys Rev C, 2008, **78**: 0346101.
- [20] ZHAO E G, WANG N, FENG Z Q, *et al.* Int J Mod Phys E, 2008, **17**: 1937.
- [21] BIAN B A, ZHANG F S, ZHOU H Y. Phys Lett B, 2008, **665**: 314.
- [22] LI J Q, FENG Z Q, GAN Z G, *et al.* Nucl Phys A, 2010, **834**: 353c.
- [23] FENG Z Q, JIN G M, LI J Q. Nucl Phys Rev, 2011, **28**: 1.
- [24] WANG N, ZHAO E G, SCHEID W, *et al.* Phys Rev C, 2012, **85**: 041601-5.
- [25] SHEN C, ABE Y, BOILLEY D, *et al.* Int J Mod Phys E, 2008, **17**: 66.
- [26] LIU Z H, BAO J D. Phys Rev C, 2009, **80**: 034601.
- [27] LEINO M, HESSBERGER F P. Annu Rev Nucl Part Sci, 2004, **54**: 175.
- [28] HERZBERG R D, GREENLEES P. Prog Part Nucl Phys, 2008, **61**: 674.
- [29] TAKAHASHI R, ISHII T, ASAI M, *et al.* Phys Rev C, 2010, **81**: 057303.
- [30] KETELHUT S, GREENLEES P T, ACKERMANN D, *et al.* Phys Rev Lett, 2009, **102**: 212501.
- [31] TANDEL S K, CHOWDHURY P, LAKSHMI S, *et al.* Phys Rev C, 2010, **82**: 041301R.
- [32] GREENLEES P T. Acta Phys Pol B, 2011, **42**: 587.
- [33] HERZBERG R D, AMZAL N, BECKER F, *et al.* Phys Rev C, 2001, **65**: 014303.
- [34] AL-KHUDAIR F, LONG G L, SUN Y. Phys Rev C, 2009, **79**: 034320.
- [35] ZHANG Z H, ZENG J Y, ZHAO E G, *et al.* Phys Rev C, 2011, **83**: 011304(R).
- [36] ZHANG Z H, HE X T, ZENG J Y, *et al.* Phys Rev C, 2012, **85**: 014324.
- [37] ACKERMANN D. Acta Phys Pol B, 2011, **42**: 577.
- [38] HERZBERG R D. J Phys G: Nucl Phys, 2004, **30**: R123.
- [39] YANG Huabin, YU Lin, HUANG Tianheng, *et al.* Nuclear Physics Review, 2013, **30**(3): 369.(in Chinese)
(杨华彬, 郁琳, 黄天衡, 等. 原子核物理评论, 2013, **30**(3): 369.)
- [40] BUTLER P A, HUMPHREYS R D, GREENLEES P T, *et al.* Phys Rev Lett, 2002, **89**: 202501.
- [41] TANDEL S K, KHOO T L, SEWERYNIAK D, *et al.* Phys Rev Lett, 2006, **97**: 082502.
- [42] CLARK R, GREGORICH K, BERRYMAN J, *et al.* Phys Lett B, 2010, **690**: 19.
- [43] HERZBERG R D, GREENLEES P T, BUTLER P A, *et al.* Nature, 2006, **442**: 896.
- [44] SULIGNANO B, HEINZ S, HESSBERGER F, *et al.* Eur Phys J A, 2007, **33**: 327.
- [45] GREENLEES P T, HERZBERG R D, KETELHUT S, *et al.* Phys Rev C, 2008, **78**: 021303.
- [46] XU F R, ZHAO E G, WYSS R, *et al.* Phys Rev Lett, 2004, **92**: 252501.
- [47] PIOT J, GALL B J P, DORVAUX O, *et al.* Phys Rev C, 2012, **85**: 041301(R).
- [48] GREENLEES P T, RUBERT J, PIOT J, *et al.* Phys Rev Lett, 2012, **109**: 012501.
- [49] REITER P, KHOO T L, AHMAD I, *et al.* Phys Rev Lett, 2005, **95**: 032501.
- [50] HERZBERG R, MOON S, EECKHAUDT S, *et al.* Eur Phys J A, 2009, **42**: 333.
- [51] CHATILLON A, THEISEN C, BOUCHEZ E, *et al.* Phys Rev Lett,

- 2007, **98**: 132503.
- [52] [2012-08-25] [Http://www.nndc.bnl.gov/ensdf/](http://www.nndc.bnl.gov/ensdf/).
- [53] ZHANG Z H. Theoretical Investigation of the Spectroscopy of the Transfermium and the Superheavy Nuclei [D]. Beijing: Institute of Theoretical Physics, Chinese Academy of Sciences, 2012.(in Chinese)
(张振华. 超Fm核以及超重核谱学的理论研究[D]. 北京: 中国科学院理论物理研究所, 2012.)
- [54] CWIOK S, HOFMANN S, NAZAREWICZ W. Nucl Phys A, 1994, **573**: 356.
- [55] MUNTIAN I, PATYK Z, SOBICZEWSKI A. Phys Rev C, 1999, **60**: 041302(R).
- [56] SOBICZEWSKI A, MUNTIAN I, PATYK Z. Phys Rev C, 2001, **63**: 034306.
- [57] PARKHOMENKO A, SOBICZEWSKI A. Acta Phys Pol B, 2004, **35**: 2447.
- [58] PARKHOMENKO A, SOBICZEWSKI A. Acta Phys Pol B, 2005, **36**: 3115.
- [59] ADAMIAN G G, ANTONENKO N V, SCHEID W. Phys Rev C, 2010, **81**: 024320.
- [60] ADAMIAN G G, ANTONENKO N V, KUKLIN S N, *et al.* Phys Rev C, 2010, **82**: 054304.
- [61] ADAMIAN G G, ANTONENKO N V, MALOV L A, *et al.* Phys Part Nucl, 2010, **41**: 1101.
- [62] ADAMIAN G G, ANTONENKO N V, KUKLIN S N, *et al.* Phys Rev C, 2011, **84**: 024324.
- [63] LIU H L, XU F R, WALKER P M, *et al.* Phys Rev C, 2011, **83**: 011303.
- [64] LIU H L, XU F R, WALKER P M. Phys Rev C, 2012, **86**: 011301(R).
- [65] BENDER M, RUTZ K, REINHARD P G, *et al.* Phys Rev C, 1998, **58**: 2126.
- [66] AFANASJEV A V, KHOO T L, FRAUENDORF S, *et al.* Phys Rev C, 2003, **67**: 024309.
- [67] BENDER M, BONCHE P, DUGUET T, *et al.* Nucl Phys A, 2003, **723**: 354.
- [68] DELAROCHE J P, GIROD M, GOUTTE H, *et al.* Nucl Phys A, 2006, **771**: 103.
- [69] JOLOS R V, MALOV L A, SHIRIKOVA N Y, *et al.* J Phys G: Nucl Part Phys, 2011, **38**: 115103.
- [70] ZHUANG K, LI Z B, LIU Y X. Commun Theor Phys, 2012, **57**: 271.
- [71] SUN Y, LONG G L, AL-KHUDAIR F, *et al.* Phys Rev C, 2008, **77**: 044307.
- [72] CHEN Y S, SUN Y, GAO Z C. Phys Rev C, 2008, **77**: 061305(R).
- [73] CUI J W, ZHOU X R, CHEN F Q, *et al.* in preparation.
- [74] EGIDO J L, RING P. J Phys G: Nucl Phys, 1982, **8**: L43.
- [75] EGIDO J, RING P. Nucl Phys A, 1984, **423**: 93.
- [76] HE X T, REN Z Z, LIU S X, *et al.* Nucl Phys A, 2009, **817**: 45.
- [77] ZHANG Z H, MENG J, ZHAO E G, *et al.* Phys Rev C, 2013, **87**: 054308.
- [78] KUZMINA A N, ADAMIAN G G, ANTONENKO N V, *et al.* Phys Rev C, 2012, **85**: 014319.
- [79] DUGUET T, BONCHE P, HEENEN P H. Nucl Phys A, 2001, **679**: 427.
- [80] EGIDO J L, ROBLEDO L M. Phys Rev Lett, 2000, **85**: 1198.
- [81] LU B N, ZHAO E G, ZHOU S G. Phys Rev C, 2012, **85**: 011301(R).
- [82] ZHAO J, LU B N, ZHAO E G, *et al.* Phys Rev C, 2012, **86**: 057304.
- [83] HARA K, SUN Y. Int J Mod Phys E, 1995, **04**: 637.
- [84] BOHR A, MOTTELSON B R. Nuclear Structure volume II[M]. New York: Benjamin INC, 1975.
- [85] HARRIS S M. Phys Rev Lett, 1964, **13**: 663.
- [86] WU C S, ZENG J Y. High Ener Phys and Nucl Phys, 1984, **8**: 219.(in Chinese).
(吴崇试, 曾谨言. 高能物理与核物理, 1984, **8**: 219.)
- [87] ZENG G M, LIU W, ZHAO E G. Phys Rev C, 1995, **52**: 1864.
- [88] WU L A, DING H M, YAN Z T, *et al.* Phys Rev Lett, 1996, **76**: 4132.
- [89] HU J, XU F. Phys Rev C, 1993, **48**: 2270.
- [90] ZHOU S G, ZHENG C. Phys Rev C, 1997, **55**: 2324.
- [91] WEN K, ZHANG Z H, ZHAO E G, *et al.* Sci Sin: Phys Mech Astron, 2012, **42**: 22.(in Chinese).
(温凯, 张振华, 赵恩广等. 中国科学: 物理学, 力学, 天文学, 2012, **42**: 22.)
- [92] SAETHRE O, HJORTH S, JOHNSON A, *et al.* Nucl Phys A, 1973, **207**: 486.
- [93] WU X, LEI Y A. Chin Phys C, 2008, **32**: 112.
- [94] XU F X, WU C S, ZENG J Y. Phys Rev C, 1989, **40**: 2337.
- [95] NILSSON S G, TSANG C F, SOBICZEWSKI A, *et al.* Nucl Phys A, 1969, **131**: 1.
- [96] BENGTTSSON T, RAGNARSSON I. Nucl Phys A, 1985, **436**: 14.
- [97] RAGNARSSON I, NILSSON S G, SHELINE R K. Phys Rep, 1978, **45**: 1.
- [98] MÖLLER P, NIX J. At Data and Nucl Data Tables, 1995, **59**: 185.
- [99] HU Jimin, ZHENG Chunkai, XU Furong. High Energy Physics and Nuclear Physics, 1990, **14**(10): 945.(in Chinese)
(胡济民, 郑春开, 许甫荣. 高能物理与核物理, 1990, **14**(10): 945.)

Systematic Investigation on Spectroscopy of Transfermium Nuclei

ZHANG Zhenhua¹, WEN Kai², HE Xiaotao³, ZENG Jinyan⁴, ZHAO Enguang^{2, 5}, ZHOU Shangui^{2, 5}

(1. State Key Laboratory of Nuclear Physics and Technology, School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China;

2. State Key Laboratory of Theoretical Physics, Institute of Theoretical Physics,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

3. College of Material Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

4. School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China;

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

Abstract: Experimental and theoretical studies on the spectroscopy of the transfermium nuclei are briefly reviewed. Recent theoretical progresses made by us is introduced. Moreover, the structure of the superheavy nuclei is investigated. The rotational spectra in even-even and odd- A nuclei in this mass region are systematically studied by using several empirical formulas. Our result shows that compared with the AB formula and the Harris formula, the ab formula can give a better description for rotational spectra of ground-state bands in even-even nuclei in this mass region. By fitting the experimental single-particle spectra of the odd- A nuclei in this mass region, a new set of Nilsson parameters is proposed. The rotational bands of the transfermium nuclei are investigated systematically by using a cranked shell model with the pairing correlations treated by a particle number conserving method. The experimental kinematic moments of inertia and angular momentum alignments are reproduced quite well. By analyzing the occupation probability of each cranked Nilsson orbital near the Fermi surface and the contributions of valence orbitals in each major shell to the angular momentum alignment, the upbending mechanism in this mass region could be understood clearly. This new Nilsson parameter set is also used to investigate the shell effects and the microscopic shell correction energies of the superheavy nuclei. The calculated results predict that center of the superheavy island is $Z = 120$, $N = 182$.

Key words: transfermium nuclei; rotational band; ab formula; particle number conserving method; cranked shell model

Received date: 16 Oct. 2012; **Revised date:** 22 Jan. 2013

Foundation item: National Basic Research Program of China(973 Program)(2013CB834400); National Natural Science Foundation of China (10975100, 10979066, 11121403, 11175252, 11120101005, 11275098, 11275248); Knowledge Innovation Project of Chinese Academy of Sciences (KJCX2-EW-N01, KJCX2-YW-N32).

Corresponding author: ZHOU Shangui, E-mail: sgzhou@itp.ac.cn

<http://www.npr.ac.cn>