



$N = Z$ 原子核 ^{64}Ge 可能存在的三轴形变

沈水法 王华磊 孟海燕 阎玉鹏 沈洁洁 王飞鹏 蒋海滨 包莉娜

Possible triaxial deformation in $N = Z$ nucleus germanium-64

Shen Shui-Fa Wang Hua-Lei Meng Hai-Yan Yan Yu-Peng Shen Jie-Jie Wang Fei-Peng Jiang Hai-Bin Bao Li-Na

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 192101 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20210187

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210187>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于三轴X射线衍射方法的n-GaN位错密度的测试条件分析

Analyses of determination conditions of n-GaN dislocation density by triple-axis X-ray diffraction

物理学报. 2017, 66(21): 216102 <https://doi.org/10.7498/aps.66.216102>

射线总剂量辐照对单轴应变Si纳米n型金属氧化物半导体场效应晶体管栅隧穿电流的影响

Influence of γ -ray total dose radiation effect on the tunneling gate current of the uniaxial strained Si nanometer n-channel metal-oxide-semiconductor field-effect transistor

物理学报. 2017, 66(7): 076101 <https://doi.org/10.7498/aps.66.076101>

基于聚焦离子束纳米剪纸/折纸形变的三维微纳制造技术及其光学应用

Focused ion beam based nano-kirigami/origami for three-dimensional micro/nanomanufacturing and photonic applications

物理学报. 2019, 68(24): 248101 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20191494>

原子核电荷半径的研究

Study of nuclear charge radius

物理学报. 2020, 69(16): 162101 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191643>

扭转形变对石墨烯吸附O原子电学和光学性质影响的电子理论研究

Electron-theoretical study on the influences of torsional deformation on electrical and optical properties of O atom absorbed graphene

物理学报. 2017, 66(24): 246301 <https://doi.org/10.7498/aps.66.246301>

颗粒样品形变对声波传播影响的实验探究

Experimental study on the influence of granular shear deformation on sound propagation

物理学报. 2017, 66(15): 154502 <https://doi.org/10.7498/aps.66.154502>

$N = Z$ 原子核 ^{64}Ge 可能存在的三轴形变*

沈水法^{1)2)3)4)†} 王华磊⁵⁾ 孟海燕⁵⁾ 阎玉鹏⁶⁾⁷⁾ 沈洁洁⁸⁾
王飞鹏²⁾ 蒋海滨³⁾ 包莉娜⁹⁾

1) (浙江广厦建设职业技术大学智能制造学院, 金华 322100)

2) (中国科学院合肥物质科学研究院核能安全技术研究所, 合肥 230031)

3) (福建工程学院电子电气与物理学院, 福州 350118)

4) (中国科学院近代物理研究所高精度核谱学重点实验室, 兰州 730000)

5) (郑州大学物理学院, 郑州 450001)

6) (苏拉娜里理工大学物理学院, 那空叻差是玛 30000)

7) (泰国高等教育委员会物理卓越中心 (ThEP), 曼谷 10400)

8) (杭州师范大学医学部, 杭州 310012)

9) (陆军炮兵防空兵学院, 合肥 230031)

(2021 年 1 月 26 日收到; 2021 年 5 月 21 日收到修改稿)

为寻找核态可能存在的三轴形变, 用对力-形变-转动频率自洽推转壳模型对锗和硒同位素进行了总转动能面计算. 计算是在四极形变 (β_2, γ) 网格中进行的, 且十六极形变 β_4 可变. 在锗同位素中发现了由 ^{64}Ge 的三轴、 ^{66}Ge 的扁椭、再经三轴、向长椭形变的形状相变. 一般来说 Ge 和 Se 同位素具有 γ 软性形状, 导致了显著的动力学三轴效应, 计算中没有证据表明存在基态下的刚性三轴性. 在 $^{64,74}\text{Ge}$ 中发现基态和集体转动态下 $\gamma = -30^\circ$ 的三轴形变, 这是三轴形变的极限. 本文重点讨论 $N = Z$ 核 ^{64}Ge 可能存在的三轴形变, 给出了基于唯象 Woods-Saxon 势下的单粒子能级信息, 并对 $N = Z$ 核 ^{64}Ge 三轴形变的产生机理进行了讨论.

关键词: 三轴形变, 总转动能面, 形状演化

PACS: 21.60.-n, 21.60.Cs, 27.50.+e

DOI: 10.7498/aps.70.20210187

1 引言

研究表明 86% 的核有长椭球形状^[1], 双幻核附近有球形形状. 在缺中子汞和铅同位素中扁椭球形变也被发现^[2]. 核能够非轴对称地变形, 非轴对称形变可由核形状的 γ 自由度描述. γ 形变导致核的特征集体运动, 例如: 摇摆运动^[3]、手征带^[4]、转动带旋称反转^[5]. 毫无疑问 γ 软性和科里奥利耦合是破坏系统的动力学轴对称最重要的机制^[6]. 有 $|\gamma| = 30^\circ$ 的最大三轴形变的稳定三轴形状吗? 最

近的一个研究工作用 Skyrme Hartree-Fock-BCS 和 Gogny-Hartree-Fock-Bogoliubov (HFB) 对核基态的计算, 预言了大部分锗同位素有软三轴形变^[7]. 本工作中, 我们使用推转 Woods-Saxon 壳模型来研究可能的三轴形状, 包括形变激发态. 对于描述三轴形状的核, 有一个长期存在的问题, 即这些核是硬的还是软的 γ 形变, 参见文献 [8–10] 中的讨论. 在一些计算^[7,11,12] 和数据^[11] 中建议 ^{64}Ge 基态为三轴的. 根据 Ennis 等^[11] 的平均场近似理论计算, $N = Z = 32$ 核 ^{64}Ge 是 $N = Z$ 丰质子不稳定核中显示 γ -软性结构的典型例子, 计算预测了基态可

* 国家自然科学基金 (批准号: 11065001) 和中国科学院高精度核谱学重点实验室开放课题资助的课题.

† 通信作者. E-mail: shuifa.shen@inest.cas.cn

能的 γ 不稳定性和激发态的三轴性, 即四极形变 $\beta_2 \sim 0.22$ 和 $\gamma \sim 27^\circ$, 而 Yamagami 等 [12] 用 Skyrme-HFB 方程作数值计算得到对 ^{64}Ge 的解为 $\beta = 0.27$, $\gamma = 25^\circ$ 和 $\beta_3 = 0$. Ennis 等 [11] 的研究还显示 ^{64}Ge 核是反射不对称和三轴自由度之间强耦合的唯一候选核. 他们的结果与 Skalski 的研究 [13] 是一致的, 后者使用了相当丰富的涉及 β_3 和 γ 的核形状参数, 并证实了对这个奇异 $N = Z$ 系统八极不稳定性及 γ -软性的预测. 通过 Skyrme Hartree-Fock 自洽计算也得到了类似的结果 [14]. Kaneko 等 [15] 基于球形壳模型研究了 $N = Z$ 核 ^{64}Ge 中的四极关联和八极关联, 他们用配对加四极加八极相互作用带有单极修正进行了壳模型计算, 结果表明 ^{64}Ge 对于无论是四极形变还是八极形变都是不稳定核, 这与先前预测 γ 软性和八极不稳定性讨论是一致的. 本工作我们试图从新的视角即用对力-形变-转动频率自洽推转壳模型着重讨论 ^{64}Ge 的三轴形变.

2 模型

在核素图大范围内偶-偶核的非轴对称由 Andrejtsche 等 [16] 使用求和规则进行了研究, 其采用一个近似. 它给出核在低位态时三轴形变的可能性 [17,18]. 为完整起见重写该方法的主要公式如下 [16]:

$$\langle \cos 3\delta_{\text{g.s.}} \rangle \approx - \left[\frac{7}{10} \right]^{\frac{1}{2}} \langle Q_{\text{g.s.}}^2 \rangle^{-\frac{3}{2}} \left[\langle 0^+ || E2 || 2_1^+ \rangle^2 \langle 2_1^+ || E2 || 2_1^+ \rangle + 2 \langle 0^+ || E2 || 2_1^+ \rangle \langle 2_1^+ || E2 || 2_2^+ \rangle \langle 2_2^+ || E2 || 0^+ \rangle \right], \quad (1)$$

$$\delta_{\text{eff}} = \frac{1}{3} \arccos(\langle \cos 3\delta_{\text{g.s.}} \rangle). \quad (2)$$

这里在推导等式 (1) 时使用了近似, δ_{eff} 值 (至较高级项) 对应于集体模型非对称角 γ [16,19]. (1) 式的有效性为核素图大范围内偶-偶核非轴对称形状参数 δ_{eff} 的提取和系统性研究提供了方便. 用这种方法, 根据 (1) 式对 $46 \leq A \leq 82$ ($22 \leq Z \leq 34$) [16] 和 $94 \leq A \leq 192$ ($42 \leq Z \leq 76$) [19] 质量区的近 70 个偶-偶核基态的 $\langle \cos 3\delta \rangle$ 期望值进行估计, 这近 70 个核其 E2 矩阵元的数据是可获得的, 然后这些核基态非轴对称形状参数 δ_{eff} (对应于 Bohr 模型参量 γ) 根据 (2) 式得到. 文献 [16] 表明对所研究的核在非轴对称性和四极形变之间存在一种整体关联, 而且

发现 $^{72-76}\text{Ge}$ 和 $^{74-78}\text{Se}$ 的基态有非常显著的 (有效的) 三轴形变. 最大三轴形变在基态是非常罕见的, 常见的是发生在高自旋态. 过去主要是对高自旋态对于轴对称的可能偏离开展过广泛的讨论 (参见文献 [20] 及其参考文献). (1) 式给出非轴对称参量的平均值 δ_{eff} , 但它没有提供 γ 自由度方向上核形变软度的信息. 应该强调的是基于 (1) 式中矩阵元的三阶项的分析, 无法确定三轴形变是软性的 (动态的) 还是刚性的 (静态的) [16]. δ 的软度由实验 E2 矩阵元的六阶项决定, 它目前只在非常少的核中获得 [17]. 有几个工作提示非轴对称一般是动态的, 即牢固地建立起刚性三轴形变的核几乎不存在 (参见文献 [21, 22] 及其参考文献).

在本文中我们集中研究三轴形变包括三轴参量 γ 的软度. 用对力-形变-转动频率自洽推转壳模型来作总转动能面 (total Routhian surface, TRS) 计算 [23,24]. 在 TRS 计算中, 单粒子能量由非轴对称形变的 Woods-Saxon (WS) 势获得 [25,26], 计算过程中使用的 WS 势参数 [27,28] 为: a) 半径参数: $r_0(\text{p}) = r_0(\text{n}) = r_{0-\text{so}}(\text{p}) = r_{0-\text{so}}(\text{n}) = 1.190 \text{ fm}$; b) 中心势阱参数: $V_0 = 53.754 \text{ MeV}$, $\kappa = 0.791$; c) 自旋轨道耦合强度参数: $\lambda(\text{p}) = \lambda(\text{n}) = 29.494$; d) 表面弥散参数: $a_0(\text{p}) = a_0(\text{n}) = a_{0-\text{so}}(\text{p}) = a_{0-\text{so}}(\text{n}) = 0.637 \text{ fm}$. 其对关联由 Lipkin-Nogami (LN) 方法处理得到 [29,30]. 单极对力强度参量 G 由平均能隙方法决定 [31], 在本工作中质子和中子的单极对力强度 G_{p} 和 G_{n} 分别为 0.292 MeV 和 0.303 MeV . 总能量包括从标准液滴模型得到的宏观部分 [32] 和从 Strutinsky 壳修正得到的微观部分 [33,34]. 计算在四极形变 (β_2, γ) 的网格中进行, 且十六极形变 (β_4) 可变. 对一个给定的转动频率 ω , 对关联在任何给定形变格点上由解推转 LN 方程自洽处理 (即前面提到的对力-形变-转动频率自洽处理), 然后形变由得到的 TRS 取最小值来确定 (其细节参见文献 [23, 24]). 已包括在双拉伸坐标空间中的四极对力 [35,36], 其对能量的影响可忽略, 但是对集体角动量却有重要影响 [24].

3 计算和讨论

对偶质量核 $^{64-80}\text{Ge}$ 基态从总转动能面 (total Routhian surface, TRS) 计算得出的形变显示在图 1 中. 在该计算中, 在四极形变 (β_2, γ) 的各个网

格点, 总罗斯量对十六极形变 β_4 取最小. 轴对称长椭球 (扁椭球) 形状对应于 $\gamma = 0^\circ$ 和 $\gamma = -120^\circ$ ($\pm 60^\circ$), 而其中的 $\gamma = 60^\circ$ 和 $\gamma = -120^\circ$ 为非集体转动 (可以是粒子-空穴激发). 根据文献 [37] 的定义, 形变软度从 TRS 计算得到, 由图 1 中的误差棒所示. 对锗同位素基态, 我们看到从 ^{64}Ge 的三轴形变到 ^{66}Ge 的大形变的扁椭球, 通过 ^{74}Ge 的 $\gamma = -30^\circ$ 三轴形状到 $^{78}, ^{80}\text{Ge}$ 的微弱形变的长椭球的形状变化 (基态 TRS 对 $\gamma = 0^\circ$ 和 -60° 是反射对称的), 这和由 Lecomte 等 [38] 确定的 $N = 40$ 附近可能存在的形状转变相符. 应该指出, 核基态具有扁椭球形状是罕见的 [39,40], 在稳定核基态中出现 $\gamma = 30^\circ$ 的三轴形状几乎是唯一的.

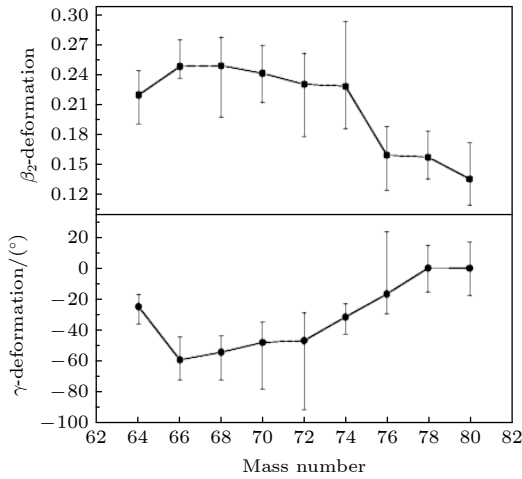


图 1 总转动能面计算得出的偶质量核 $^{64-80}\text{Ge}$ 的基态形变. 误差棒显示对应于能量高出最小值 100 keV 以内的形变值, 此表示各个核对应于相应形变参数 (β_2 和 γ) 的软度
Fig. 1. Deformation obtained from total Routhian surfaces for ground states in even-mass $^{64-80}\text{Ge}$. The error bars display the deformation values within an energy range of less than 100 keV above the minimum, giving an indication of the softness of the nucleus with respect to the corresponding shape parameter (β_2 and γ).

在目前工作中, 为了研究 ^{64}Ge 三轴形变的稳定性, 对该核的正宇称转晕态作 TRS 计算. 图 2 中给出在特定转动频率 $\hbar\omega = 0.0, 0.4, 0.7, 0.9$ MeV 下的总转动能面, 对应于自旋范围 $I \sim (0 - 16)\hbar$. 根据对正宇称转晕态总转动能面 (TRS) 的计算, 在 $\hbar\omega = 0.0$ MeV 时 (即原子核不发生转动, 对应于原子核处于基态, 此时 $I = 0$), 极小点处于 $\beta_2 = 0.224$ 、 $\gamma = -94.9^\circ$, 因基态 (此时原子核还没有转动) TRS 对 $\gamma = 0^\circ$ 和 -60° 是反射对称的, 所以 $\gamma =$

-94.9° 等价于 $\gamma = -25.1^\circ$ 、也等价于 $\gamma = 25.1^\circ$, 是为三轴形变的核, 但此时核 ^{64}Ge 被预言沿 γ 方向有点软. 随着转动频率增加到 $\hbar\omega = 0.4$ MeV, 极小值变到 $\beta_2 = 0.250$ 、 $\gamma = -39.4^\circ$ (因为比较软, 所以可以认为变化不大) 并且势阱变得深一些 (因而变得较硬一些). 这第一个极小值在转动频率 $\hbar\omega = 1.0$ MeV 处消失. 另一方面, 在转动频率为 $\hbar\omega = 0.7$ MeV 时 (对应于图 2 的左下部分), 第二个极小值出现, 并且在转动频率 $\hbar\omega = 0.8$ MeV 时成为最小值, 其为较大形变 $\beta_2 = 0.360$ 和 $\gamma = 4.0^\circ$, 即长椭球形状. 随着转动频率的进一步增加, 这个最小值的 γ 形变变到 60° , 即为非集体转动的扁椭球.

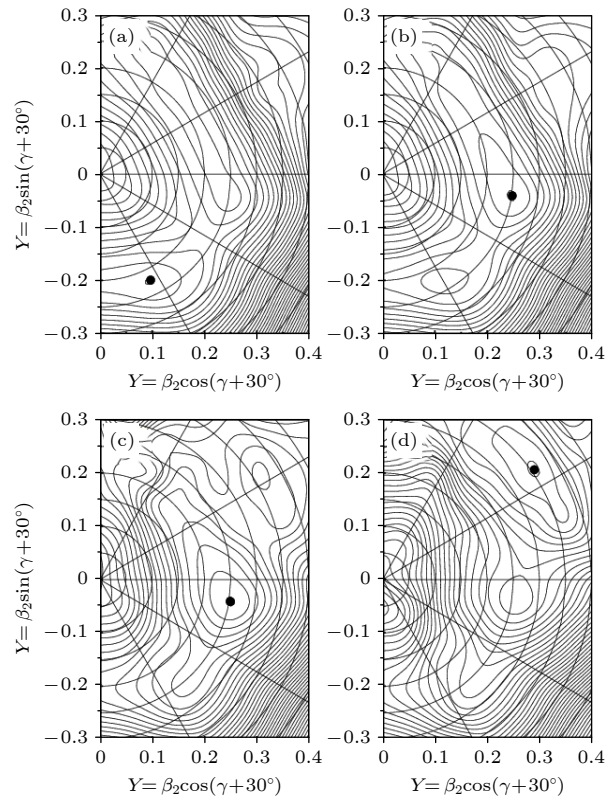


图 2 对 ^{64}Ge 的正宇称转晕态在给定转动频率 (a) $\hbar\omega = 0.0$ MeV, (b) $\hbar\omega = 0.4$ MeV, (c) $\hbar\omega = 0.7$ MeV 和 (d) $\hbar\omega = 0.9$ MeV 下计算得到的总转动能面, 其对应于自旋 $I \sim (0 - 16)\hbar$. 图中黑点表示最小值, 相邻等位线的间隔是 200 keV
Fig. 2. Calculated TRS's for ^{64}Ge positive-parity yrast states at (a) $\hbar\omega = 0.0$ MeV, (b) 0.4 MeV, (c) 0.7 MeV, and (d) 0.9 MeV corresponding to $I \sim (0 - 16)\hbar$. The black dot indicates the lowest minimum, and the energy difference between neighboring contours is 200 keV.

为了了解三轴形变的起源, 我们计算了对应于三轴形变参数 γ 的 Woods-Saxon 势单粒子能级图, 见图 3.

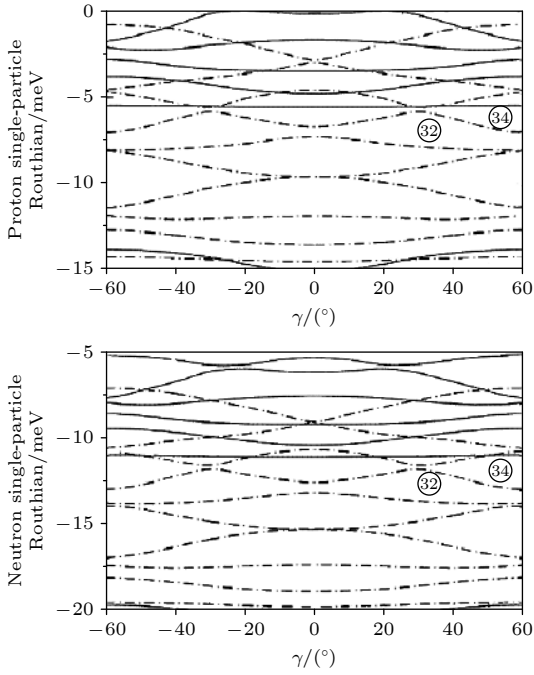


图3 对应于三轴形变参数 γ 的 Woods-Saxon 势单粒子能级图
 Fig. 3. The calculated Woods-Saxon single-particle levels versus the triaxial deformation γ .

图3是取 $(Z, N) = (32, 38)$ 在形变 $(\beta_2, \beta_4) = (0.24, 0)$ 下作的计算. 这些参量代表了这里所研究的大形变核的一般性质. 我们看到, 在 $Z = 32$ 和 $N = 32$ 处有一形变的 $\gamma = 30^\circ$ 壳能隙. TRS 计算显示, 核 ^{64}Ge 有一不太软的三轴形状 $\gamma \approx -25^\circ$ (参见图1). 但是, 在 $N = 34$ 处出现一个扁椭球壳能隙, 其结果导致在 ^{66}Ge 中的扁椭球形状. 随着中子数的增加, 扁椭球中子能隙的效应减小, 因此更重的锗同位素的形变向三轴(或长椭球)形状变化. 上面已经提到 Andrejtsche 等[16]发现 $^{72-76}\text{Ge}$ 和 $^{74-78}\text{Se}$ 的基态有非常显著的(有效的)三轴形变, 为了确定这些核的三轴形变是软性的(动态的)还是刚性的(静态的), 我们在对力-形变-转动频率自洽推转壳模型框架下对其中的 ^{74}Ge 和 ^{74}Se 核进行了讨论, 图4(a)和图4(b)分别是总转动能面计算得到的 ^{74}Ge 和 ^{74}Se 的运动学转动惯量(也称第一类转动惯量) $J^{(1)}$ 及对应的从实验测到的能级能量提取出的运动学转动惯量, 从中可以看出理论计算值与实验值存在差异, 总转动能面计算基于推转壳模型, 其只考虑转动, 没有考虑振动, 理论计算值与实验值的明显差异说明 ^{74}Ge 和 ^{74}Se 有振动行为, 对 ^{64}Ge 比较理论与实验值, 发现也是如此. 这与上面提到的“非轴对称一般是动态的, 即牢固地建立刚

性三轴形变的核几乎不存在(参见文献[21, 22]及其参考文献)”相符. 所以需要提及的是目前 TRS 计算不能合理地再现观测到的激发态实验数据, 实验数据[41,42]显示强烈的振动效应, 该效应未能包括在 TRS 模型中. 另一方面, 现在的模型作一维主轴推转, 对三轴形状, 原则上应该作三轴推转. 但是, 一维推转模型应该能给出关于形变的一个正确描述. 作为在各种质量区分析原子核基态和激发态形状的方法, TRS 在研究三轴形变方面扮演着重要的角色, 尤其是研究具有软性的三轴形变.

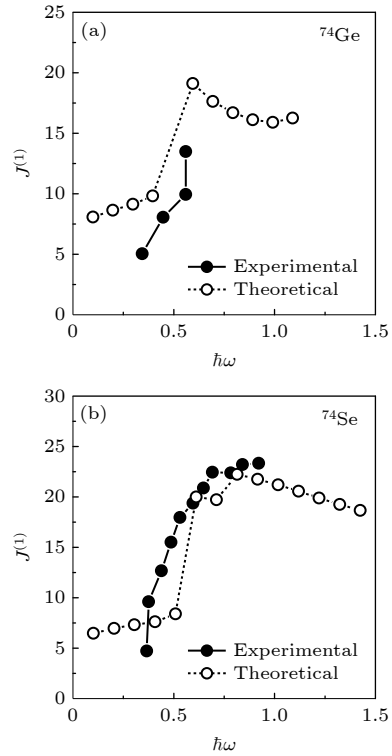


图4 对(a) ^{74}Ge 和(b) ^{74}Se 核由 TRS 计算得到的运动学转动惯量 $J^{(1)}$ 与由实验结果提取出的比较
 Fig. 4. The kinematic moment of inertia $J^{(1)}$ calculated by TRS is compared with those extracted from the experimental results for (a) ^{74}Ge and (b) ^{74}Se .

4 结 论

在现在的工作中, 作为例子, 使用推转 Woods-Saxon 壳模型对 $^{64-80}\text{Ge}$ 同位素的正宇称态作自洽形状计算, 即对力是形变和转动频率依赖的, 用来讨论形状相变, 特别是从基态开始的强的非轴对称. 在我们的 TRS 计算中, Ge 同位素形状显示出有 γ 软性的三轴形变, 而 $^{64}, ^{74}\text{Ge}$ 显示最显著的三轴形变. 基于唯象 Woods-Saxon 势下的单粒子能级, 对 $N = Z$ 核 ^{64}Ge 三轴形变的产生机理进行了

探讨. 本文工作给出对这些核的一个进一步理论理解, 证明了为了得到一个关于形状硬度清楚的图像, 正像本文所显示的在 β_2 - γ 坐标平面上计算它们的总转动能面 (TRS) 总是有用的. 可以看出取近似后的总和规则方法为量度关于振动或 γ 软核的有效的三轴形变提供了一个有效的方法 [16], 对刚性转子, γ_{eff} 是与几何 γ 值相等的 [43]. 而我们用对力-形变-转动频率自洽推转壳模型来作总转动能面计算, 可确定核形状和它的软度, 不仅对基态还是对激发态, 本文的工作是特别适当的.

参考文献

- [1] Tajima N, Suzuki N 2001 *Phys. Rev. C* **64** 037301
- [2] Nazarewicz W 1993 *Phys. Lett. B* **305** 195
- [3] Bohr A, Mottelson B R 1975 *Nuclear Structure* (Vol. II) (New York: Benjamin)
- [4] Frauendorf S, Meng J 1997 *Nucl. Phys. A* **617** 131
- [5] Bengtsson R, Frisk H, May F R, Pinston J A 1984 *Nucl. Phys. A* **415** 189
- [6] Narimatsu K, Shimizu Y R, Shizuma T 1996 *Nucl. Phys. A* **601** 69
- [7] Guo L, Maruhn J A, Reinhard P-G 2007 *Phys. Rev. C* **76** 034317
- [8] Odegård S W, Hagemann G B, Jensen D R, Bergström M, Herskind B, Sletten G, Törmänen S, Wilson J N, Tjøm P O, Hamamoto I, Spohr K, Hübel H, Görge A, Schönwasser G, Bracco A, Leoni S, Maj A, Petrache C M, Bednarczyk P, Curien D 2001 *Phys. Rev. Lett.* **86** 5866
- [9] Schönwaßer G, Hübel H, Hagemann G B, Bednarczyk P, Benzoni G, Bracco A, Bringel P, Chapman R, Curien D, Domscheit J, Herskind B, Jensen D R, Leoni S, Bianco G Lo, Ma W C, Maj A, Neußer A, Odegård S W, Petrache C M, Roßbach D, Ryde H, Spohr K H, Singh A K 2003 *Phys. Lett. B* **552** 9
- [10] Hartley D J, Janssens R V F, Riedinger L L, Riley M A, Aguilar A, Carpenter M P, Chiara C J, Chowdhury P, Darby I G, Garg U, Ijaz Q A, Kondev F G, Lakshmi S, Lauritsen T, Ludington A, Ma W C, McCutchan E A, Mukhopadhyay S, Pifer R, Seyfried E P, Stefanescu I, Tandel S K, Tandel U, Vanhoy J R, Wang X, Zhu S, Hamamoto I, Frauendorf S 2009 *Phys. Rev. C* **80** 041304
- [11] Ennis P J, Lister C J, Gelletly W, Price H G, Varley B J, Butler P A, Hoare T, Ćwiok S, Nazarewicz W 1991 *Nucl. Phys. A* **535** 392
- [12] Yamagami M, Matsuyanagi K, Matsuo M 2001 *Nucl. Phys. A* **693** 579
- [13] Skalski J 1991 *Phys. Rev. C* **43** 140
- [14] Bonche P, Flocard H, Heenen P H 1991 private communication
- [15] Kaneko K, Hasegawa M, Mizusaki T 2002 *Phys. Rev. C* **66** 051306
- [16] Andrejtscheff W, Petkov P 1994 *Phys. Lett. B* **329** 1
- [17] Cline D 1986 *Annu. Rev. Nucl. Part. Sci.* **36** 683
- [18] Kumar K 1972 *Phys. Rev. Lett.* **28** 249
- [19] Andrejtscheff W, Petkov P 1993 *Phys. Rev. C* **48** 2531
- [20] Hamamoto I 1990 *Nucl. Phys. A* **520** 297c
- [21] Åberg I, Flocard H, Nazarewicz W 1990 *Annu. Rev. Nucl. Part. Sci.* **40** 439
- [22] Zamfir N V, Casten R F 1991 *Phys. Lett. B* **260** 265
- [23] Satuła W, Wyss R, Magierski P 1994 *Nucl. Phys. A* **578** 45
- [24] Satuła W, Wyss R 1995 *Phys. Scr. T* **56** 159
- [25] Nazarewicz W, Dudek J, Bengtsson R, Bengtsson T, Ragnarsson I 1985 *Nucl. Phys. A* **435** 397
- [26] Ćwiok S, Dudek J, Nazarewicz W, Skalski S, Werner T 1987 *Comput. Phys. Commun.* **46** 379
- [27] Bhagwat A, Vinas X, Centelles M, Schuck P, Wyss R 2010 *Phys. Rev. C* **81** 044321
- [28] Meng H Y, Hao Y W, Wang H L, Liu M L 2018 *Prog. Theor. Exp. Phys.* **2018** 103D02
- [29] Pradhan H C, Nogami Y, Law J 1973 *Nucl. Phys. A* **201** 357
- [30] Nazarewicz W, Riley M A, Garrett J D 1990 *Nucl. Phys. A* **512** 61
- [31] Möller P, Nix J R 1992 *Nucl. Phys. A* **536** 20
- [32] Myers W D, Swiatecki W J 1966 *Nucl. Phys.* **81** 1
- [33] Strutinsky V M 1966 *Yad. Fiz.* **3** 614
- [34] Strutinsky V M 1967 *Nucl. Phys. A* **95** 420
- [35] Sakamoto H, Kishimoto T 1990 *Phys. Lett. B* **245** 321
- [36] Satuła W, Wyss R 1994 *Phys. Rev. C* **50** 2888
- [37] Granderath A, Mantica P F, Bengtsson R, Wyss R, Brentano P von, Gelberg A, Seiffert F 1996 *Nucl. Phys. A* **597** 427
- [38] Lecomte R, Irshad M, Landsberger S, Kajrys G, Paradis P, Monaro S 1980 *Phys. Rev. C* **22** 2420
- [39] Ward D, Fallon P 2001 *Adv. Nucl. Phys.* **26** 167
- [40] Xu F R, Walker P M, Wyss R 2002 *Phys. Rev. C* **65** 021303
- [41] Farhan A R 1995 *Nucl. Data Sheets* **74** 529
- [42] Toh Y, Czosnyka T, Oshima M, Hayakawa T, Kusakari H, Sugawara M, Hatsukawa Y, Katakura J, Shinohara N, Matsuda M 2000 *Eur. Phys. J. A* **9** 353
- [43] Werner V, Scholl C, Brentano P von 2005 *Eur. Phys. J. A* **25** s01 453

Possible triaxial deformation in $N = Z$ nucleus germanium-64*

Shen Shui-Fa^{1)2)3)4)†} Wang Hua-Lei⁵⁾ Meng Hai-Yan⁵⁾ Yan Yu-Peng⁶⁾⁷⁾

Shen Jie-Jie⁸⁾ Wang Fei-Peng²⁾ Jiang Hai-Bin³⁾ Bao Li-Na⁹⁾

1) (*School of Intelligent Manufacturing, Zhejiang Guangsha Vocational and Technical University of Construction, Zhejiang, Jinhua 322100, China*)

2) (*Institute of Nuclear Energy Safety Technology, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Anhui, Hefei 230031, China*)

3) (*School of Electronic, Electrical Engineering and Physics, Fujian University of Technology, Fujian, Fuzhou 350118, China*)

4) (*Key Laboratory of High Precision Nuclear Spectroscopy, Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China*)

5) (*School of Physics, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China*)

6) (*School of Physics, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand*)

7) (*Thailand Center of Excellence in Physics (ThEP), Commission on Higher Education, Bangkok 10400, Thailand*)

8) (*Division of Health Sciences, Hangzhou Normal University, Zhejiang, Hangzhou 310012, China*)

9) (*Department of Basic Sciences, Army Academy of Artillery and Air Defense, Anhui, Hefei 230031, China*)

(Received 26 January 2021; revised manuscript received 21 May 2021)

Abstract

Evidence for nonaxial γ deformations has been widely found in collective rotational states. The γ deformation has led to very interesting characteristics of nuclear motions, such as wobbling, chiral band, and signature inversion in rotational states. There is an interesting question; why the nonaxial γ deformation is not favored in the ground states of even-even (e-e) nuclei. The quest for stable triaxial shapes in the ground states of e-e nuclei, with a maximum triaxial deformation of $|\gamma| \approx 30^\circ$, is still a major theme in nuclear structure. In the present work, we use the cranked Woods-Saxon (WS) shell model to investigate possible triaxial shapes in ground and collective rotational states. Total-Routhian-surface calculations by means of the pairing-deformation-frequency self-consistent cranked shell model are carried out for even-even germanium and selenium isotopes, in order to search for possible triaxial deformations of nuclear states. Calculations are performed in the lattice of quadrupole (β_2, γ) deformations with the hexadecapole β_4 variation. In fact, at each grid point of the quadrupole deformation (β_2, γ) lattice, the calculated energy is minimized with respect to the hexadecapole deformation β_4 . The shape phase transition from triaxial shape in ^{64}Ge , oblate shape in ^{66}Ge , again through triaxiality, to prolate deformations is found in germanium isotopes. In general, the Ge and Se isotopes have γ -soft shapes, resulting in significant dynamical triaxial effect. There is no evidence in the calculations pointing toward rigid triaxiality in ground states. The triaxiality of $\gamma = -30^\circ$ for the ground and collective rotational states, that is the limit of triaxial shape, is found in $^{64}, ^{74}\text{Ge}$. One should also note that the depth of the triaxial minimum increases with rotational frequency increasing in these two nuclei. The present work focuses on the possible triaxial deformation of $N = Z$ nucleus ^{64}Ge . Single-particle level diagrams can give a further understanding of the origin of the triaxiality. Based on the information about single-particle levels obtained with the phenomenological Woods-Saxon (WS) potential, the mechanism of triaxial deformation in $N = Z$ nucleus ^{64}Ge is discussed, and caused surely by a deformed $\gamma \approx 30^\circ$ shell gap at $Z(N) = 32$. At $N = 34$, however, an oblate shell gap appears, which results in an oblate shape in ^{66}Ge ($N = 34$). With neutron number increasing, the effect from the $N = 34$ oblate gap decreases, and hence the deformations of heavier Ge isotopes change toward the triaxiality (or prolate).

Keywords: triaxial deformation, total Routhian surface, shape evaluation

PACS: 21.60.-n, 21.60.Cs, 27.50.+e

DOI: 10.7498/aps.70.20210187

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11065001) and the Key Laboratory of High Precision Nuclear Spectroscopy, Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences.

† Corresponding author. E-mail: shuifa.shen@inest.cas.cn