

# $N = 28$ 丰中子核的形变和形状共存研究\*

支启军<sup>†</sup>

(贵州师范大学物理与电子科学学院, 贵阳 550001)

(2010年5月9日收到; 2010年7月26日收到修改稿)

利用同位旋依赖的尼尔逊势, 在宏观-微观理论框架下, 计算了幻数  $N = 28$  同中子链上原子核的性质, 研究了  $N = 28$  同中子链上原子核的形变和形状共存现象. 研究表明,  $N = 28$  这个幻数在 Na, Mg, Al 同位素链上有着强的形状共存现象. 此外, 计算表明  $^{42}\text{Si}$  的基态为扁椭球, 同时在 Si 同位素链上的形状共存现象相对较弱.

**关键词:** 同位旋, 幻数, 形变, 形状共存

**PACS:** 21.10.Dr, 27.40.+z

## 1. 引言

远离稳定线原子核性质的理论研究一直是核物理研究的热点之一<sup>[1-4]</sup>. 由于远离稳定线原子核的性质不稳定, 因此实验上对这些原子核的研究比较上. 近年来, 随着放射性束流的进步和发展, 对远离稳定线原子核性质的研究越来越多. 实验研究发现, 远离稳定线的丰中子原子核具有许多与稳定线附近原子核不一样的结构和性质. 根据壳模型理论, 我们知道幻数核是比较稳定的. 然而实验发现, 在中子滴线附近, 这些传统幻数好像削弱或者消失了. 1975年, Thibault 等人发现在丰中子  $A = 32$  附近原子核出现的反常结合能, 预示  $N = 20$  在丰中子区有着不同于稳定区的结构, 1994年, Werner 等人通过研究核的质量、形变、半径和单粒子能级, 预言  $^{44}\text{S}$  核中子幻数  $N = 28$  的消失<sup>[5,6]</sup>. 1995年, Motobayashi 等人测量了  $^{32}\text{Mg}$  的较大的约化四极跃迁概率, 证实了  $N = 20$  在丰中子区的大形变和壳的消失<sup>[7]</sup>. 这些实验表明, 在远离稳定线的区域, 包括丰中子区和丰质子区, 原子核有着与稳定区不一样的结构. 随着对  $N = 20$  附近核素大量实验研究的开展, 已经基本认为  $N = 20$  附近的丰中子核由于入侵态的作用, 其基态主要是长椭球形状<sup>[8,9]</sup>. 对于  $N = 28$  这个幻数来说, 普遍认为它的壳结构在丰中子区也是减弱的且可能存在形状共存现象, 但是对  $N =$

28 附近丰中子核素的形状尤其是对  $^{42}\text{Si}$  则还没有明确的结论. Grévy 等人的实验预示由于  $Z = 14$  次壳层的效应,  $^{42}\text{Si}$  应该是一个球形核<sup>[10]</sup>. 然而, 随后 Fridmann 和 Bastin 等人的实验表明  $^{42}\text{Si}$  由于具有较低的第一激发能<sup>[11,12]</sup>, 因而其基态应该是扁椭球形状(约小于等于  $-0.3$ ), 最近 Riley 等人的实验也表明  $^{42}\text{Si}$  应该具有扁椭球的形状<sup>[13]</sup>. 这些实验的差异使得对  $N = 28$  附近核素的形状及性质的实验和理论研究具有重要的意义.

伴随着对这些远离稳定区附近原子核性质的实验研究, 理论物理学家一直尝试从理论上寻求这些新现象的自洽与合理的理论解释, 并取得了一些研究进展. 通过在计算中考虑入侵能级和正常能级的相互作用, 采用大范围的壳模型, Caurrier 等人研究了  $N = 28$  附近原子核的性质, 认为  $N = 28$  在丰中子区是消失的, 而入侵能级对这种壳效应的弱化起着重要的作用<sup>[14]</sup>. Otuska 等人通过引入同位旋依赖的核子核子相互作用和考虑张量力, 在壳模型下对幻数的演化进行了研究, 表明幻数在丰中子区将会变化, 张量力在幻数的消失和产生中具有重要的作用<sup>[15-16]</sup>. 采用角动量投影坐标生成方法, Rodríguez-Guzmán 等人利用平均场方法对  $N = 28$  附近原子核的性质进行了细致的理论研究<sup>[17]</sup>, 给出了  $N = 28$  附近原子核一些性质的理论解释. 最近, Nowacki<sup>[18]</sup> 等人采用新的有效相互作用势在  $0\hbar\omega$  的空间下, 利用壳模型对  $N = 28$  附近原子核的性质做

\* 国家自然科学基金(批准号:10865004), 贵州省科学技术基金(批准号:[2008]2254号), 贵州师范大学博士基金资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: q.zhi@gsi.de

了系统的计算,也得到了类似的结论,并着重讨论了  $N=28$  在 Mg 同位素链和 Si 同位素链上的性质. 大量的计算表明,形变和入侵态对壳和幻数的演化有着重要的影响,因此,讨论形变及其对原子核结构的演化是有意义的. 在文献[19]中,利用同位旋依赖的自选轨道耦合势,我们在宏观-微观模型的理论框架下系统的对 sd 壳原子核的形变进行了研究,得到了反转岛附近原子核奇特性质的合理描述,并初步指出  $N=28$  和核素在 Si 同位素链上可能出现形状共存. 结合最近理论和实验的发展,本文将详细的研究幻数  $N=28$  在丰中子区 Na, Mg, Al 和 Si 同位素链上的性质,重点研究这些核素的形状共存现象及其对这些核素性质的影响,并从壳修正能量的角度对这些性质进行了理论探讨.

## 2. 理论框架

根据宏观-微观模型理论,对于任意的形变原子核,其总能量( $E_t$ )可定义为

$$E_t = E_H + E_\mu, \quad (1)$$

其中  $E_H$  和  $E_\mu$  分别代表原子核的宏观能量和微观能量,宏观部分反映原子核的总体性质,微观部分则反映原子核的量子性质. 在假设原子核密度和体积不变的情况下,原子核的宏观能量由形变的液滴模型来计算,它主要由体积能、库仑能和表面能构成:

$$E_{LD} = -a_v \left(1 - K_v \left(\frac{N-Z}{A}\right)^2\right) A + \frac{3}{5} \frac{e^2 Z^2}{R_c^2} \left(B_c(\bar{\epsilon}) - \frac{6\pi^2}{5} \left(\frac{d}{R_c^2}\right)\right) + a_s \left(1 - K_s \left(\frac{N-Z}{A}\right)^2 A^{2/3} B_s(\bar{\epsilon})\right), \quad (2)$$

微观能量是原子核壳层结构的宏观反映,主要由壳修正能量和对修正能量构成. 选取尼耳逊势来计算原子核的单粒子能级,然后采用 Strutinsky 方法来计算壳修正能量和 BCS 方法来计算对修正能量. 尼耳逊势的形式如下:

$$h = h_{h.o.}(\epsilon, \gamma) + 2\hbar\omega_0 \rho^2 \epsilon_4 V_4(\gamma) + V', \quad (3)$$

上式中  $h_{h.o.}$  为各向异性谐振子势,  $V_4$  为十六级形变势,  $V'$  为自旋-轨道耦合作用项和轨道-轨道耦合作用项,它的引入是为了获得与实验相一致的单粒子能级.

$$V' = -k(N)\hbar\omega_0 \{2l_i \cdot s + \mu(N)(l_i^2 - \langle l_i^2 \rangle_N)\}, \quad (4)$$

上式中的  $\kappa, \mu$  是尼耳逊势中的两个重要参数,它们影响着自旋-轨道耦合的强度和原子核的单粒子能级,考虑到在丰中子区应当考虑到同位旋的作用. 在本文的计算中我们选取文献[19]中的同位旋依赖的尼耳逊参数来计算单粒子能级,利用壳修正方法在形变空间下计算相应的微观修正能量,并结合相应的宏观能量就可以讨论原子核的位能曲面和确定原子核的基态,进而讨论原子核的性质.

## 3. 计算结果及分析

原子核的位能曲面是考察原子核能量随形变变化的主要途径,为了详细考察在不同形状下原子核的能量变化,图1和图2中画出了 Na, Mg, Al 和 Si 同位素链上的  $N=28$  核素的能量曲面图,在计算中主要考察了四极形变和十六级形变,忽略了其他多级形变. 下面将在能量曲面的基础上详细讨论  $N=28$  核素在  $Z=11-14$  区域的性质.

### 3.1. 原子核基态

图1是 $^{39}\text{Na}$ 和 $^{40}\text{Mg}$ 上的能量随四极形变变化图,图中每一个能量点是在相应的四极形变下,取能量相对十六级形变最小值获得的. 图1(a)画的是 $^{39}\text{Na}$ 的位能曲面图,(b)是 $^{40}\text{Mg}$ 的位能曲面. 从图1中清晰的看见,在每个核素的位能曲面上主要存在3个能量极小值. 为了便于讨论,我们约定,从左至右依次称之为第一能量极小、第二能量极小和第三能量极小. 由于原子核的基态比较稳定,具有最小的能量,因此3个能量极小值中最小的能量对应着这些核素的基态. 对于 $^{39}\text{Na}$ 来说,理论计算的原子核基态的四极形变为0.312,对应着图中从左至右的第三个能量极小处的能量. 因此,计算表明 $^{39}\text{Na}$ 的基态是长椭球形变,这预示着 $N=28$ 这个壳结构在Na同位素链上的减弱甚至消失. 从图1中还可以看见 $^{40}\text{Mg}$ 的基态也对应着第三能量极小,其相应的四极形变为0.327,表明它的基态为长椭球形变,这与壳模型的计算结果相符合<sup>[14,15]</sup>.  $^{39}\text{Na}$ 和 $^{40}\text{Mg}$ 作为幻数核,具有这样大的形变,预示着 $N=28$ 的壳结构在丰中子区的减弱和消失<sup>[17-21]</sup>.

图2是 $^{41}\text{Al}$ 和 $^{42}\text{Si}$ 的位能曲面图,与图1类似,对于 $^{41}\text{Al}$ 和 $^{42}\text{Si}$ 这两个核素来说,位能曲面上也对应着3个能量极小,但是在球形附近的能量极小不

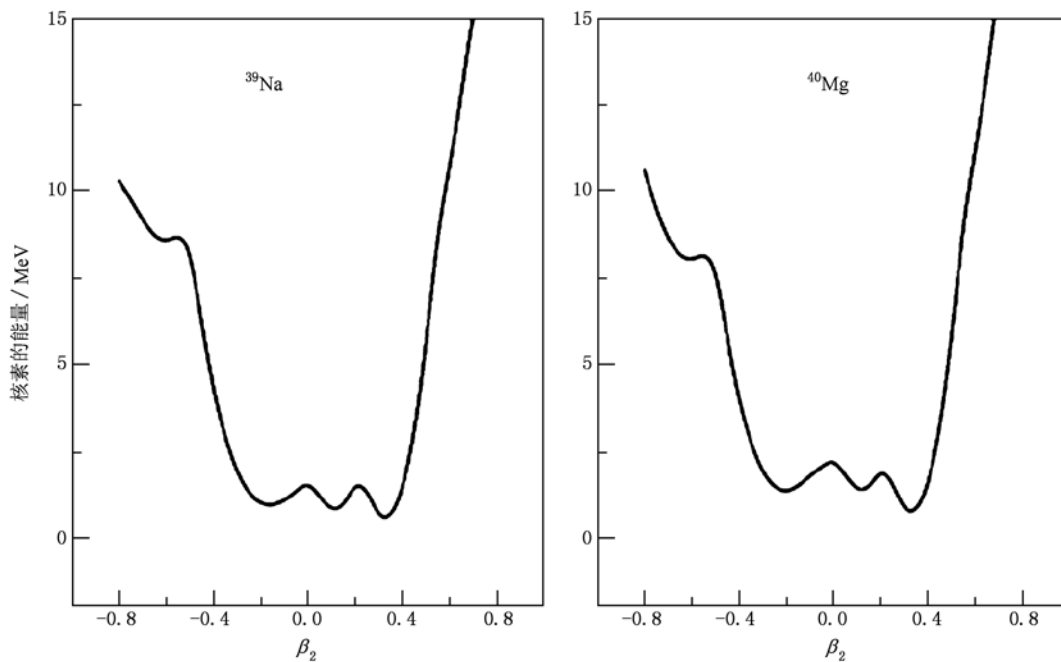


图1  $^{39}\text{Na}$  和  $^{40}\text{Mg}$  核素的能量随四极形变的变化图

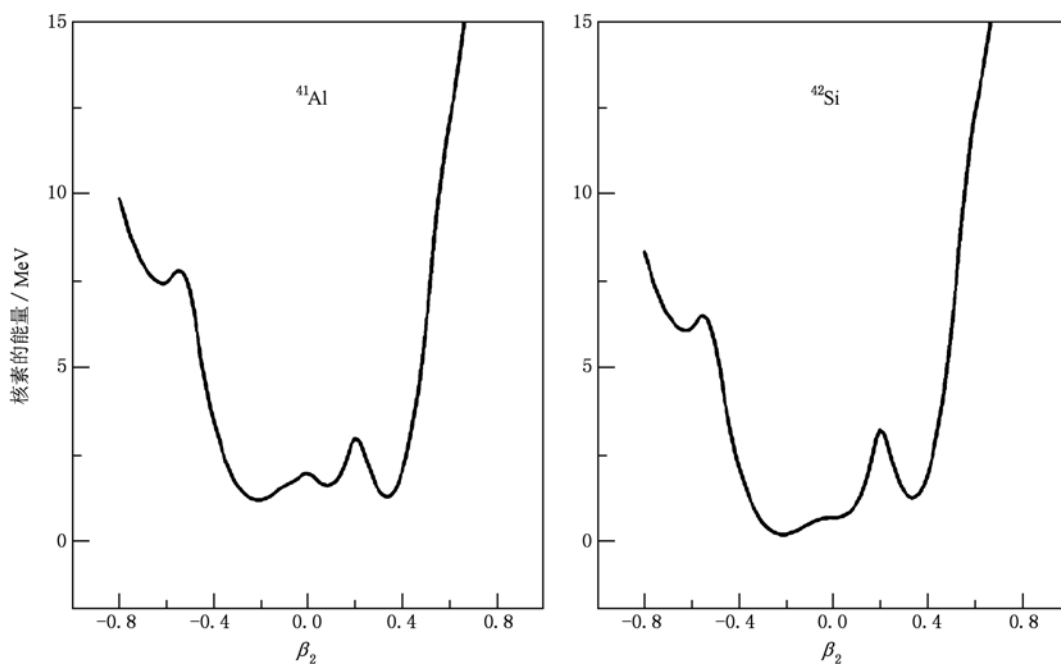


图2  $^{41}\text{Al}$  和  $^{42}\text{Si}$  核素的能量随四极形变的变化图

太明显,尤其是对于 $^{42}\text{Si}$ 这个核素来说. 与图1中 $^{39}\text{Na}$ 所不同的是,此时能量最小值不是处在长椭球状态而是处在扁椭球状态,表明这两个核素的基态是扁椭球的. 对于 $^{41}\text{Al}$ 来说,理论计算的四极形变为 $-0.211$ ,预示着 $N=28$ 在Al同位素链上的消失. 对于 $^{42}\text{Si}$ 来说,理论计算的基态形变为 $-0.212$ ,是

一个扁椭球,它也预示着 $N=28$ 在Si同位素链上的消失,这与实验和理论计算是一致的<sup>[16,18]</sup>. 对 $^{42}\text{Si}$ 来说,实验上有一些不一致的地方,Grévy等人的实验表明,由于 $Z=14$ 次壳层效应, $^{42}\text{Si}$ 应该是一个球形核<sup>[10]</sup>. 但是随后Fridmann和Bastin等人<sup>[11,12]</sup>的实验表明 $^{42}\text{Si}$ 由于具有较低的第一激发能,因而其

基态应该是扁椭球形状,这与我们的理论计算结果是一致的.最近,采用新的相互作用势的壳模型计算也支持 $^{42}\text{Si}$ 是一个形变而非球形的原子核<sup>[18]</sup>,计算得到的扁椭球基态也被最近 Riley 等人的实验结果所支持<sup>[13]</sup>.综合各种理论计算结果和实验结果,可以认为 $^{42}\text{Si}$ 的基态是处于形变而非球形,且是一个扁椭球.

### 3.2. 形状共存现象

在图 1 和图 2 中我们看见,除了最小的能量极小之外,位能曲面上还有两个能量极小.当位能曲面上有几个能量极小时,如果这几个能量极小之间的能量相差不大,则原子核的基态就可能在这个能量极小之间出现,形成所谓的形状共存现象<sup>[22]</sup>.当形状共存现象存在时,原子核的基态则可能在这几个不同的形状之间竞争出现,并可能在实验上显示出不同的可观测量.因此讨论原子核的形状共存现象对于了解原子核的性质有着重要的意义.为了详细讨论 $^{39}\text{Na}$ ,  $^{40}\text{Mg}$ ,  $^{41}\text{Al}$ 和 $^{42}\text{Si}$ 核素上的形状共存现象,我们把这 3 个能量极小值的计算结果画在图 3 和图 4 中.

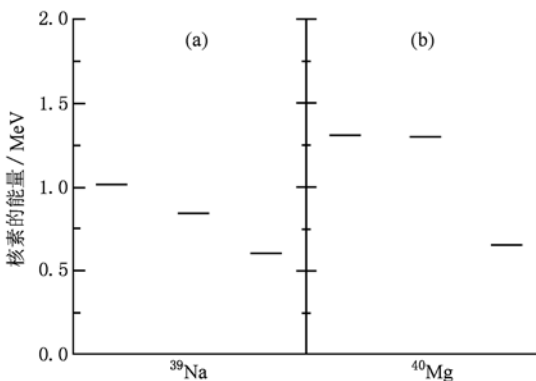


图 3  $^{39}\text{Na}$  和  $^{40}\text{Mg}$  核素的三个能量极小

图 3 是 $^{39}\text{Na}$ 和 $^{40}\text{Mg}$ 位能曲面上的三个能量极小值对应核素的能量,三个能量极小值对应的四极形变从左至右形变逐渐增加,依次对应图 1 中的扁椭球、小长椭球、大长椭球形变.在图 3 中我们可以看见对于 $^{39}\text{Na}$ 来说,处于处于不同形状的 3 个能量极小值之间的能量差异很小,在 0.6 MeV 之内,这么小的能量使得其基态将会在扁椭球和长椭球之间竞争出现,因此,宏观微观模型预言, $^{39}\text{Na}$ 将会出现明显的形状共存现象.对于 $^{40}\text{Mg}$ 来说,可以看见与 $^{39}\text{Na}$ 相似的现象,尤其是第一能量极小和第二能

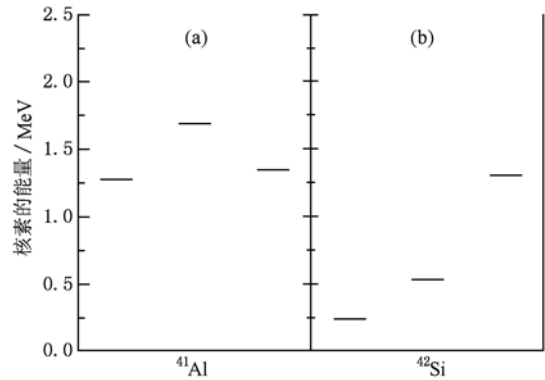


图 4  $^{41}\text{Al}$  和  $^{42}\text{Si}$  核素的三个能量极小

量极小之间的能量差异很小,这两个能量极小与基态之间的能量差异比 $^{39}\text{Na}$ 的稍大,但仍然在 1 MeV 之内,因此,理论计算认为 $^{40}\text{Mg}$ 的基态也会出现强烈的形状共存现象.

在图 2 中我们可以看见对 $^{41}\text{Al}$ 和 $^{42}\text{Si}$ 来说,第二个能量极小两边的势垒相对于 $^{39}\text{Na}$ 和 $^{40}\text{Mg}$ 的势垒来说要浅,预示着该能量极小不稳定,这可以从图 4 中清楚地看出来.图 4 是 $^{41}\text{Al}$ 和 $^{42}\text{Si}$ 位能曲面上的三个能量极小值.从图中可以看见对于 $^{41}\text{Al}$ 来说,处在不同形状之间的 3 个能量极小之间能量差异在 0.5 MeV 之内,其中能量最小的状态是扁椭球形变,考虑到处在第二能量极小值(四极形变 0.1 附近)时位能曲面上两边的位垒很低,我们认为其不成为核素的一个稳定状态.因此,对于 $^{41}\text{Al}$ 来说,核素处在扁椭球形变和大长椭球形变之间核素的能量非常接近,预示着在 $^{41}\text{Al}$ 核素中将会出现较强的扁椭球和长椭球的形状共存现象.对于核素 $^{42}\text{Si}$ 来说,在图 4 中可以看见,核素处在扁椭球形变和小长椭球形变附近的能量非常接近,但是从图 2 中我们可以看见,第二能量极小两边的势垒非常平滑,它不应该够成核素的一个状态.因此,可以认为对 $^{42}\text{Si}$ 来说,未能曲面上只有两个能量极小,一个为扁椭球(0.2 附近),一个是长椭球(0.3 附近).从图 4 中可以看见,处于这两个极小时,核素的能量相差大于 1 MeV,这表明,对于核素 $^{42}\text{Si}$ 来说,出现形状共存的机会相对来说比 $^{39}\text{Na}$ ,  $^{40}\text{Mg}$ 和 $^{41}\text{Al}$ 小.因此,我们认为 $^{42}\text{Si}$ 的基态是扁椭球,形状共存现象不明显.

为了进一步考察 $^{42}\text{Si}$ 基态扁椭球形成的原因,我们在图 5 中画出了 $^{42}\text{Si}$ 在四极形变分别为 -0.2 (图 5(a)), 0.0 (图 5(b)) 和 0.3 (图 5(c)) 时的壳修

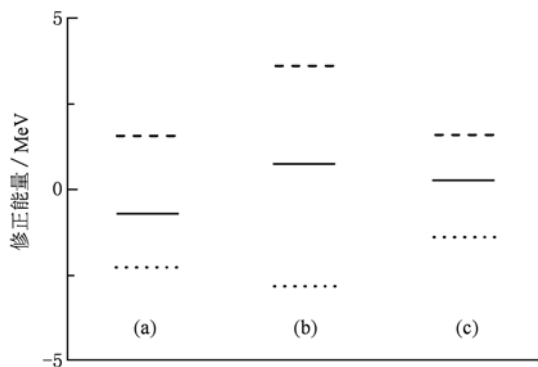


图5  $^{42}\text{Si}$  处于扁椭球、球形核长椭球时的壳修正能量

正能量图. 图中在每一个形变下, 实线、短线和点线分别代表壳修正能量、质子壳修正能量和中子壳修正能量. 从图中可以看见虽然在球形处中子壳修正能量最小, 但是由于此时的质子壳修正很大, 使得总的壳修正能量大于处于扁椭球状态下的壳修正能量, 从而使得扁椭球成为 $^{42}\text{Si}$  的基态.  $^{42}\text{Si}$  在扁椭

球区域很小的质子壳修正能量是形变  $Z = 14$  壳的反应, 形变的  $Z = 14$  壳对于 $^{42}\text{Si}$  基态的扁椭球有着重要的贡献, 有关这方面的详细讨论正在进行中.

#### 4. 结 论

本文采用同位旋依赖的尼尔逊势, 用宏观-微观模型, 详细的对 $^{39}\text{Na}$ ,  $^{40}\text{Mg}$ ,  $^{41}\text{Al}$  和 $^{42}\text{Si}$  核素的形变进行了细致的理论研究, 重点讨论了这些核素上的形状共存现象. 研究表明  $N = 28$  这个壳结构在  $\text{Na}$ ,  $\text{Mg}$ ,  $\text{Al}$  和  $\text{Si}$  同位素链上减弱和消失,  $^{39}\text{Na}$ ,  $^{40}\text{Mg}$  的基态为长椭球,  $^{41}\text{Al}$  的基态为扁椭球. 在核素 $^{39}\text{Na}$ ,  $^{40}\text{Mg}$  和 $^{41}\text{Al}$  中将会出现较强的形状共存现象. 对位能曲面的研究表明, 与 $^{39}\text{Na}$ ,  $^{40}\text{Mg}$ ,  $^{41}\text{Al}$  不同,  $^{42}\text{Si}$  不出现较强的形状共存现象. 明确指出 $^{42}\text{Si}$  的基态形状是扁椭球, 计算表明 $^{42}\text{Si}$  的扁椭球形状与形变的  $Z = 14$  壳有着重要的联系.

- [1] Ren Z, Zhu Z Y, Cai Y H, Xu G 1996 *Phys. Lett. B* **380** 241
- [2] Li Y, Shen S F, Shi S H, Gu J H, Liu, J Y, Xu H 2005 *Chin. Phys.* **14** 95
- [3] Zhang Y M, Xu F R 2008 *Acta. Phys. Sin.* **57** 4826 (in Chinese) [张玉美、许甫荣 2008 物理学报 **57** 4826]
- [4] Sheng W Q, Zhan W L, Ye Y L, Liu W P, Jin G M, Zhou X H, Xu S W, Zhu L H, Zhu S J, Liu Z H, Meng J 2001 *Nuclear Physics Review* **18** 206 (in Chinese) [沈文庆、詹文龙、叶沿林、柳卫平、靳根明、周小红、徐树威、竺礼华、朱胜江、刘祖华、孟杰 2001 原子核物理评论 **18** 206]
- [5] Thibault C, Klapisch R, Rigaud C, Poskanzer A M, Prieels R, Lessard L, Reisdorf W 1975 *Phys. Rev. C* **12** 644
- [6] Werner T R, Sheikh J A, Nazarewicz W, Strayer M R, Umar A S, Misu M 1994 *Phys. Lett. B* **333** 303
- [7] Motobayashi T, Ikeda Y, Ieki K, Inoue M, Iwasa N, Kikuchi T, Kurokawa M, Moriya S, Ogawa S, Murakami H, Shimoura S, Yanagisawa Y, Nakamura T, Watanabe Y, Ishihara M, Teranishi T, Okuno H, Casten R F 1995 *Phys. Lett. B* **346** 9
- [8] Neyens G, Kowalska M, Yordanov D, Blaum K, Himpe P, Lievens P, Mallon S, Neugart R, Vermeulen N, Utsuno Y, Otsuka T 2005 *Phys. Rev. Lett.* **94** 022501
- [9] Schwerdtfeger W, Thiroff P G, Wimmer K, Habs D, Mach H, Rodriguez T R, Bildstein V, Egido J L, Fraile L M, Gernhäuser R, Hertenberger R, Heyde K, Hoff P, Hübel H, Küster U, Kröll T, Krücken R, Lutter R, Morgan T, Ring P 2009 *Phys. Rev. Lett.* **103** 012501
- [10] Grévy S, Angélique J C, Baumann P, Borcea C, Buta A, Canchel G, Catford W N, Courtin S, Daugas J M, Oliveira F, Dessagne P, Dlouhy Z, Knipper A, Kratz K L, Lecolley F R, Lecouey J L, Lehrseneau G, Lewitowicz M, Lienard E, Lukyanov S, Marechal F, Mische C, Mrazek J, Negoita F, Orr N A, Pantelica D, Penionzhkevich Y, Peter J, Pfeifer B, Pietri S, Poirier E, Sorlin O, Stanoie M, Stefan I, Stodel C, Timis C 2004 *Phys. Lett. B* **594** 252
- [11] Fridmann J, Wiedenhöver I, Gade A, Baby L T, Bazin D, Brown B A, Campbell C M, Cook J M, Cottle P D, Dierenderfer E, Dinca D C, Glasmacher T, Hansen P G, Kemper K W, Lecouey J L, Mueller W F, Olliver H, Rodriguez-Vietez E, Tery J R, Tostevin J A, Yoneda K 2005 *Nature* **435** 922
- [12] Bastin B, Grévy S, Sohler D, Sorlin O, Dombrádi Zs, Achouri N L, Angélique J C, Azaiez F, Baiborodin D, Borcea R, Bourgeois C, Buta A, Bürger A, Chapman R, Dalouzy J C, Dlouhy Z, Drouard A, Elekes Z, Franchoo S, Iacob S, Laurent B, Lazar M, Liang X, Liénard E, Mrazek J, Nalpas L, Negoita F, Orr N A, Penionzhkevich Y, Podolyák Zs, Pougheon F, Roussel-Chomaz P, Saint-Laurent M G, Stanoie M, Stefan I 2007 *Phys. Rev. Lett.* **99** 022503.
- [13] Riley L A, Adrich P, Baugher T R, Bazi D, Brown B A, Cook J M, Cottle P D, Dige C A, Gade A, Garland D A, Glasmacher T, Hosier K E, Kemper K W, Otsuka T, Rae W D M, Ratkiewicz A, Siwek K P, Tostevin J A, Utsuno Y, Weisshaar D 2008 *Phys. Rev. C* **78** 011303
- [14] Caurier E, Nowacki F, Poves A, Retamosa J 1998 *Phys. Rev. C*

- 58 2033
- [15] Utsuno Y, Otsuka T, Mizusaki T, Honma M 1999 *Phys. Rev. C* **60** 054315
- [16] Otsuka T, Suzuki T, Honma M, Utsuno Y, Tsunoda N, Tsukiyama K, Hjorth-Jensen M 2010 *Phys. Rev. Lett.* **104** 012501
- [17] Rodriguez-Guzman R, Egido J L, Robledo L M 2000 *Phys. Lett. B* **474** 15
- [18] Nowacki F, Poves A 2009 *Phys. Rev. C* **79** 014310
- [19] Zhi Q J, Ren Z Z 2007 *Nucl. Phys. A* **794** 10
- [20] Ding B G, Lu D H, Zhang D L 2007 *Acta. Phys. Sin.* **56** 6905 (in Chinese) [丁斌刚、鲁定辉、张大立 2007 物理学报 **56** 6905]
- [21] Ding B G, Zhang D L, Lu D H 2009 *Acta. Phys. Sin.* **58** 865 (in Chinese) [丁斌刚、张大立、鲁定辉 2009 物理学报 **58** 865]
- [22] Reinhard P G, Dean D J, Nazarewicz W, Dobaczewski J, Maruhn J A, Strayer M 1999 *Phys. Rev. C* **60** 014316

## The study of shape and shape-coexistence of neutron rich nuclei around $N = 28$ \*

Zhi Qi-Jun<sup>†</sup>

(School of Physics and Electronic Science, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China)

(Received 9 May 2010; revised manuscript received 26 July 2010)

### Abstract

With the isospin-dependent Nilsson potential, we calculate the properties of the  $N = 28$  nuclei in the framework of macroscopic-microscopic model. The shape and shape coexistence of these nuclei are calculated and discusses. It is shown that strong shape coexistences occur in the ground state of nuclei with  $N = 28$  in Na, Mg and Al isotopes. It is pointed out that, the ground state of  $^{42}\text{Si}$  is oblate shape and there is no obvious shape coexistence for  $^{42}\text{Si}$ .

**Keywords:** isospin, magic number, deformation, shape coexistence

**PACS:** 21.10.Dr, 27.40.+z

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10865004), the Natural Science and Technology Foundation of Guizhou Province (Grant No. [2008]2254) and the Doctor Funding of Guizhou Normal University.

<sup>†</sup> E-mail: q.zhi@gsi.de