



原子核质量模型的检验

李涛 黎春青 周厚兵 王宁

Test of nuclear mass models

Li Tao Li Chun-Qing Zhou Hou-Bing Wang Ning

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 102101 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20201734

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201734>

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

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>

基于原子干涉仪的微观粒子弱等效原理检验

Test of weak equivalence principle of microscopic particles based on atom interferometers

物理学报. 2018, 67(16): 160402 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180621>

有效质量法调控原子玻色-爱因斯坦凝聚体的双阱动力学

Effective-mass approach to controlling double-well dynamics of atomic Bose-Einstein condensates

物理学报. 2017, 66(16): 160301 <https://doi.org/10.7498/aps.66.160301>

坐标空间中构造的Breit夸克势与介子和夸克偶素的质量劈裂

Construction of Breit quark potential in coordinate space and mass splits of meson and quarkonium

物理学报. 2018, 67(9): 091201 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172155>

基于工艺偏差的电压调控磁各向异性磁隧道结电学模型及其在读写电路中的应用

Process deviation based electrical model of voltage controlled magnetic anisotropy magnetic tunnel junction and its application in read/write circuits

物理学报. 2020, 69(19): 198502 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200228>

大质量样品厚度对 neutron 活化定量分析的影响和修正

Influence of mass sample thickness on quantitative analysis of neutron activation and its modification

物理学报. 2019, 68(8): 082801 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20182069>

原子核质量模型的检验*

李涛^{1)2)†} 黎春青¹⁾ 周厚兵¹⁾²⁾ 王宁¹⁾²⁾

1) (广西师范大学物理科学与技术学院, 桂林 541004)

2) (广西核物理与核技术重点实验室, 桂林 541004)

(2020年10月19日收到; 2020年12月30日收到修改稿)

基于 AME2016 发布的基态原子核质量数据, 分别从模型的精度及实验预言的中子新幻数两方面系统比较分析了八个普适核质量模型的可靠性及预言能力. 分区系统的计算了八个核质量模型预言的核质量均方根偏差, 分析发现对现有实验数据精确度较好的是 Bhagwat 和 WS4 两个模型. 通过分析中子壳能隙随中子数的变化趋势发现 KTUY, WS3 和 WS4 三个模型可以较好地再现中子新幻数 $N = 32$ 引起的突变行为, 预言了在 Cl 和 Ar 同位素链中 $N = 32$ 极有可能是新的幻数. 通过分析超重区域 α 衰变能随中子数的变化趋势发现 FRDM12, WS3 和 WS4 三个模型均可以较好地再现 $N = 152, 162$ 的子壳现象, 且预言了对于质子数 $Z = 108 - 114$ 同位素链在 $N = 184$ 处原子核的寿命相对较长.

关键词: 原子核质量模型, 均方根偏差, 新幻数**PACS:** 21.10.Dr, 21.60.-n, 21.90.+f**DOI:** 10.7498/aps.70.20201734

1 引言

原子核质量不仅是核物理研究领域不可或缺的数据之一, 也是核天体物理研究过程中的重要输入量. 一方面, 核质量包含了许多核结构信息, 如原子核形变^[1]、同位旋^[2]、壳效应^[3-11]等, 并且与超重核合成的研究密切相关^[12-19]; 另一方面, 核质量是恒星核合成过程中快中子俘获过程 (r 过程) 模拟计算的重要输入量之一, 在一级近似下它直接决定了 r 过程的演化路径, 这一模拟过程可以用来解释宇宙中比铁重的元素起源问题^[20-27].

随着 20 世纪初现代质谱技术的兴起, 自然界中大部分稳定的原子核质量得到了测量^[28]. 而近几十年随着放射性离子束装置的发展, 实验上已经测量了 2500 多个基态核质量^[29], 并且核质量的测量工作正在不断地向 β 稳定线两侧拓展. 虽然实验

工作在不断地取得进步, 但距离测完全部核素 (理论预言至少有 7000 个) 依然有很长的路要走, 而对于相关基础研究工作而言, 需要大量的远离稳定线区域的丰中子或缺中子核质量数据, 譬如对 r 过程的描述, 因此多种不同类型的原子核质量模型相继被提出. 其中应用比较广泛的一类核质量模型叫做普适模型, 这类模型一般基于物理学原理以及确定的模型参数, 原则上可以预言核素图上几乎所有原子核的质量. 譬如宏观-微观模型, 它是基于液滴公式再考虑原子核形变及微观壳修正能等效效应建立起来的核质量模型, 包括 Finite-Range-Droplet-Model^[30](FRDM12) 模型、Koura-Tachibana-Uno-Yamada(KTUY) 模型^[31]、Weizsäcker-Skyrme(WS) 模型^[2,32-34] 以及 Bhagwat 模型^[35] 等, 其中 Bhagwat 模型的精度较高且微观部分的计算方式与常见的宏观-微观模型相比有明显的不同; 其次是微观核质量模型, 包括 Hartree-Fock-Bogoliubov(HFB)

* 国家自然科学基金联合基金 (批准号: U1867212)、国家自然科学基金 (批准号: 11965003, 11505035, 11675266)、广西自然科学基金 (批准号: 2017GXNSFAA198160, 2017GXNSFGA198001) 和广西高校中青年教师科研基础能力提升项目 (批准号: 2019KY0061) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: litao@gxnu.edu.cn

模型^[36–38]、Relativistic-Mean-Field(RMF)模型^[39]、Relativistic-Continuum-Hartree-Bogoliubov(RC-HB)模型^[40]以及Duflo-Zuker(DZ)模型^[41,42]等,其中HFB27^[37]和DZ31^[42]两个模型是微观模型中精确度较好的两个质量模型.此外,由Nayak和Satpathy^[43]提出的Infinite-Nuclear-Matter(INM12)模型也是目前精确度不错的核质量模型.这些质量模型的精确度通常用实验测量结果与模型计算结果的均方根偏差来检验.然而对已有实验数据描述的均方根偏差越小,是否意味着模型的预言能力就越强? Sobiczewski等^[44–46]通过对多个核质量模型的计算精度与模型的预言能力的系统研究发现,对于给定的核质量模型计算精度在不同区域呈现出了不同的结果,大部分模型的计算精度随着原子核质量数的增加而变好;而同一模型的计算精度与其预言能力之间没有明显的关联性,对不同模型进行对比分析,发现宏观-微观模型在更多的情况下呈现出了这种相关性.随着核质量数据的更新,核质量模型的再检验依然是一件极其重要的工作,这将对理论模型提出挑战并进一步促进核质量模型的改进.因此有必要基于目前较新的质量表AME2016^[29]重新查看核质量模型的计算精度.另外,随着丰中子核区的质量不断得到测量,一些奇特的核物理现象被发现,如中子数 $N = 32$ 在钾、钙和钡同位素链中被认为是新的幻数^[5–8],而许多研究工作^[13,14,17]也指出 $N = 152, 162$ 在超重区域也存在相对稳定的子壳区域.新幻数的出现也会对核质量模型的准确性及预言能力提出挑战.

本文基于最新的原子核质量表AME2016,对八个普适的核质量模型进行比较分析,检验其可靠性及预言能力.这八个模型包括FRDM12^[30],KTUY^[31],WS3^[33],WS4^[34]以及Bhagwat^[35]五个宏观-微观模型,HFB27^[37]和DZ31^[42]两个微观模型,以及INM12^[43]模型.本文第二部分基于AME2016核质量数据表系统地分析八个核质量模型的精确度;第三部分基于实验上给出的新幻数 $N = 32, 152$ 和 162 对八个核质量模型的预言能力做进一步检验;最后给出总结.

2 基于 AME2016 检验核质量模型的精确度

人们通常采用理论值与实验值的均方根偏差来描述理论模型的精确度,计算公式表达如下:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (M_{\text{th}}^i - M_{\text{exp}}^i)^2}, \quad (1)$$

其中 M_{th}^i 代表原子核质量的理论预言值, M_{exp}^i 代表原子核质量的实验值, n 表示计算时考虑核素的个数.表1列出了八个质量模型计算的原子核($Z, N \geq 8$)基态质量(M)、单中子分离能(S_n)、单质子分离能(S_p)、双中子分离能(S_{2n})以及双质子分离能(S_{2p})的均方根偏差.从表1可以看出对质量描述精度最好的是WS4和Bhagwat两个模型,均方根偏差降到了0.3 MeV,而其他六个模型的均方根偏差在0.34–0.72 MeV之间.各个模型的单中子分离能、单质子分离能及双中子分离能的均方根偏差都比其质量的均方根偏差要小或者相当,而WS3,WS4和Bhagwat三个模型的双质子分离能的均方根偏差要比其质量的均方根偏差稍大,对于不同模型的单质子分离能与单中子分离能的均方根偏差变化趋势基本是一致的,并且区别不大.

表1 八个核质量模型的基态质量、单中子分离能、单质子分离能、双中子分离能及双质子分离能的均方根偏差

Table 1. Root-mean-square deviations of the ground state mass, single-neutron separation energy, single-proton separation energy, two-neutron separation energy and two-proton separation energy of the 8 nuclear mass models.

模型	M/MeV	S_n/MeV	S_p/MeV	S_{2n}/MeV	S_{2p}/MeV
KTUY	0.724	0.306	0.367	0.383	0.527
FRDM12	0.599	0.351	0.368	0.455	0.469
HFB27	0.517	0.424	0.446	0.423	0.464
DZ31	0.422	0.290	0.307	0.342	0.379
INM12	0.381	0.372	0.369	0.375	0.386
WS3	0.343	0.274	0.302	0.296	0.358
WS4	0.302	0.260	0.278	0.276	0.326
Bhagwat	0.301	0.282	0.296	0.306	0.329

为了进一步检验这八个核质量模型对从轻到重体系描述的精度,我们对实验上已有的基态质量数据($Z, N \geq 8$)进行了分区.类似文献^[44–46]中的做法,主要分成轻核($8 \leq Z < 28$)、中等-I($28 \leq Z < 50$)、中等-II($50 \leq Z < 82$)、重核($82 \leq Z < 100$)和超重($Z \geq 100$)五个区域,并分别计算了每个模型在这五个区域的均方根偏差,结果如图1所示.可以看出,HFB27,WS3和WS4三个模型对从轻核区到超重核区质量描述的均方根偏

差逐渐降低, WS3 和 WS4 两个模型在超重区域给出了基本一致的结果; 而 DZ31, FRDM12, INM12 和 Bhagwat 四个模型对从轻核区到重核区域质量描述虽然也呈现类似的降低趋势, 但在超重区域的描述均方根偏差却均呈现变大的趋势; KTUY 模型相比其他几个模型对五个区域质量描述的均方根偏差较大. 综合对比不难发现 WS4 模型对现有实验数据的描述是最好的, 其次是 Bhagwat 模型.

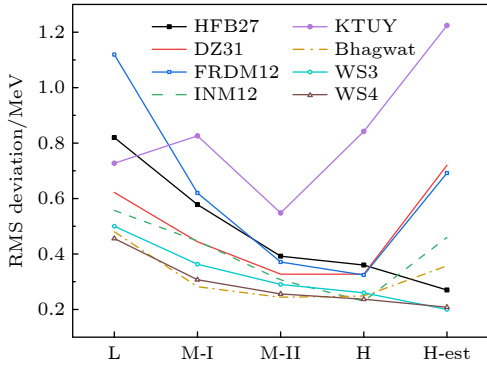


图 1 八个核质量模型对轻核 ($8 \leq Z < 28$)、中等-I ($28 \leq Z < 50$)、中等-II ($50 \leq Z < 82$)、重核 ($82 \leq Z < 100$) 以及超重 ($Z \geq 100$) 五个区域质量描述的均方根偏差
Fig. 1. Root-mean-square deviations of the mass of light ($8 \leq Z < 28$), medium-I ($28 \leq Z < 50$), medium-II ($50 \leq Z < 82$), heavy ($82 \leq Z < 100$), and super-heavy ($Z \geq 100$) are calculated by the 8 nuclear mass models.

正如在引言中介绍的, 丰中子核的质量是天体物理研究中 r 过程的重要输入量 [47]. 因此, 核质量模型对质量的描述从稳定线向滴线拓展时其精度的研究是极其重要的. 类似文献 [47–49] 的做法, 定义了一个远离 β 稳定线程度的物理量 $\varepsilon = Z_0 - Z$, 其中 $Z_0 = \frac{A}{1.98 + 0.0155A^{2/3}}$ 并就近取整数, 而 Z 和 A 分别表示核的电荷数与质量数. $\varepsilon = 0$ 代表是 β 稳定线上的核素; $\varepsilon < 0$ 表示缺中子核素, ε 越小代表这个核素越靠近质子滴线; 而 $\varepsilon > 0$ 表示丰中子核素, ε 越大代表这个核素越靠近中子滴线. 如图 2 所示, 呈现了八个核质量模型的理论值与实验值的均方根偏差随 ε 的变化趋势. 可以看出, DZ31, INM12, WS3, WS4 以及 Bhagwat 五个模型计算 β 稳定线上核素质量的结果与实验值的均方根偏差基本在 0.26–0.33 MeV 之间, 而 HFB27, FRDM12 和 KTUY 三个模型的均方根偏差达到了 0.5 MeV 或以上. 对于 β 稳定线左侧 (缺中子) 区域的描述, HFB27, DZ31, INM12, Bhagwat 及 WS3 五个模型的均方根偏差基本可以达到

0.5 MeV 以下, 而 WS4 模型甚至可以达到 0.3 MeV 以下. 对于 β 稳定线右侧 (丰中子) 区域的描述, 模型的均方根偏差几乎都随远离 β 稳定线而增大, 其中较好的是 Bhagwat 和 WS4 两个模型, 其均方根偏差可以控制在 0.4 MeV 以下. 综合分析图 2, 不难发现 Bhagwat 和 WS4 两个模型向质子滴线和中子滴线外推结果相对更可靠.

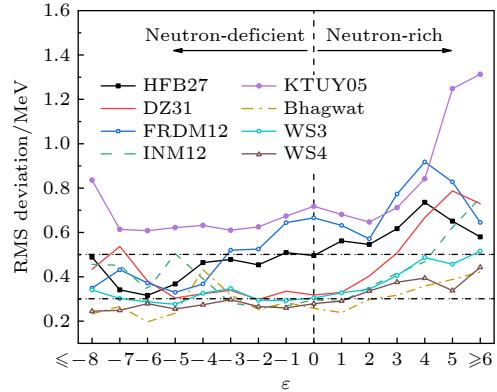


图 2 八个核质量模型的理论值与实验值的均方根偏差随 ε 的变化趋势
Fig. 2. Root-mean-square deviation between the predictions of the 8 nuclear mass models and the experimental values varies with the ε .

3 基于中子新幻数检验核质量模型

3.1 基于新幻数 $N = 32$ 检验核质量模型

随着放射性束流实验技术的开展, 许多丰中子核素的质量得到测量, 并且发现了更多的奇特核物理现象, 这给传统的核理论带来了挑战与发展机遇. 在丰中子区域, 中子新幻数的出现是与核质量测量工作密切相关的奇特现象之一. 为了确定中子幻数的位置, 通常需要计算中子壳能隙, 其表达式如下:

$$\Delta_n = S_{2n}(N, Z) - S_{2n}(N + 2, Z), \quad (2)$$

其中 $S_{2n}(N, Z) = E_B(N, Z) - E_B(N - 2, Z)$ 表示双中子分离能, 而 $E_B(N, Z)$ 表示原子核的结合能, 可以由模型计算或者实验测量得到. 图 3 呈现了 K, Ca, Sc, Ti 和 V 同位素链的中子壳能隙随中子数的变化趋势, 其结合能由实验上测出的核质量计算得到. 首先可以在图 3 中看到, K, Ca 和 Sc 三条同位素链的中子壳能隙在传统幻数 $N = 20$ 的地方出现了明显的突起, 其数值可以达到 7–9 MeV. 对于幻数 $N = 28$ 而言, 五条同位素链的中子壳能隙

均出现了明显的突起,但是峰值的高度明显低于 $N = 20$ 处的高度. 此外可以明显地看到 Ca 和 Sc 两条同位素链在 $N = 32$ 处也形成了显著的突起,而在 Ti 和 V 同位素链中逐渐消失,文献 [5, 6] 基于实验数据计算得到的双中子分离能随中子数的变化趋势确认了 $N = 32$ 在 K 同位素链中也属于新幻数,因此可以确认在 K, Ca 和 Sc 三条同位素链中 $N = 32$ 属于新的幻数,而从 Ti 同位素链开始逐渐消失.

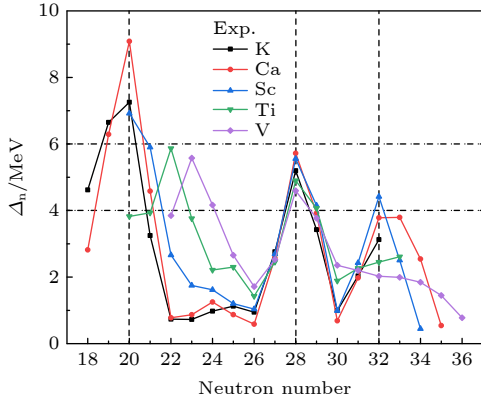


图 3 K, Ca, Sc, Ti 和 V 同位素链的中子壳能隙随中子数的变化趋势

Fig. 3. Variation trend of neutron shell gaps in K, Ca, Sc, Ti and V isotope chains with neutron number.

基于在 K, Ca 和 Sc 三条同位素链中出现的新幻数 $N = 32$ 可以进一步检验核质量模型的可靠性. 图 4 给出了基于八个核质量模型计算的 K, Ca, Sc, Ti 和 V 同位素链的中子壳能隙随中子数的变化趋势. 从图 4 可以看出, 八个模型对于传统幻数 $N = 28$ 几乎都可以较好的再现, 而对于传统幻数 $N = 50$ 而言 Bhagwat, DZ31, FRDM12, WS3 及 WS4 五个模型的预言都出现了较明显的突起, 其他三个模型突起的行为较为混乱或消失. 对于 K, Ca 和 Sc 同位素链中出现的新幻数 $N = 32$ 而言, 只有 KTUY, WS3 和 WS4 三个模型能够较好地再现, 但是 WS3 和 WS4 两个模型对于新幻数 $N = 32$ 在 Ti 同位素链中的变弱行为并没有很好地再现.

基于基态核质量的实验数据不难判断新幻数 $N = 32$ 从 Ti 同位素链开始变弱, 在 V 同位素链中基本消失, 那么新幻数 $N = 32$ 是否从 K 同位素链开始? 为此在图 5 中给出了 Cl 和 Ar 同位素链中子壳能隙随中子数的变化趋势. 可以看出, Cl 和 Ar 同位素链的中子壳能隙的实验测量值虽然没有触及到中子数 $N = 32$, 但基于 AME2016 质量表发布的评估值及 KTUY, WS3 和 WS4 三个模型预言的核质量结果计算得到的 Cl 和 Ar 同位素链的中子壳能隙在中子数 $N = 32$ 处存在明显的突起

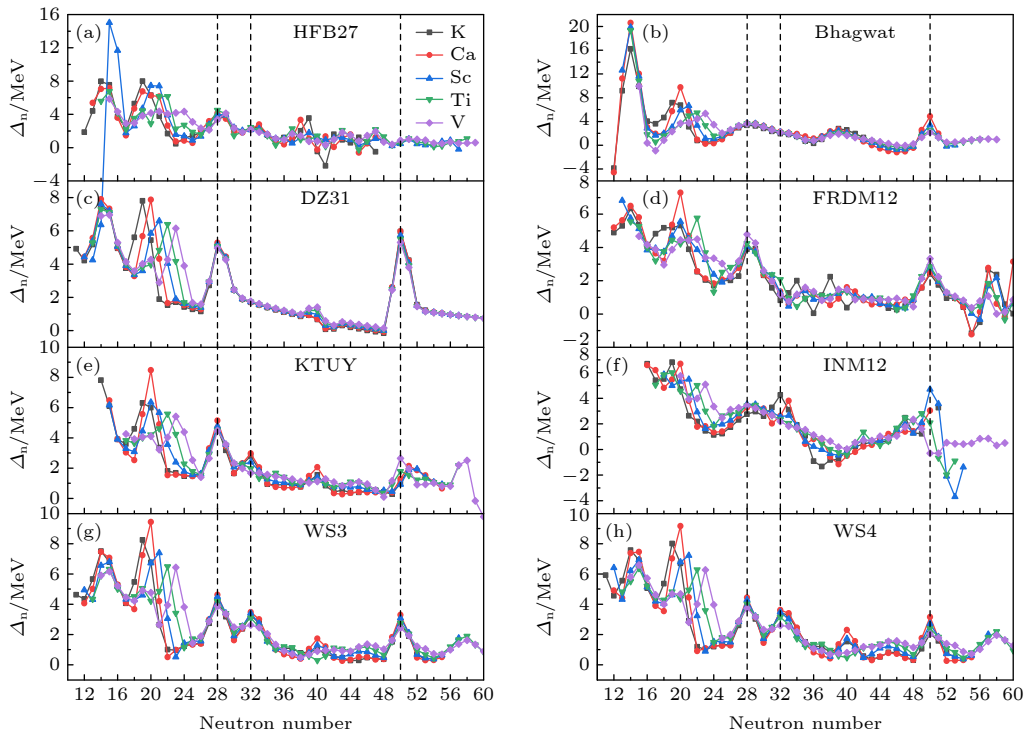


图 4 八个核质量模型计算的 K, Ca, Sc, Ti 和 V 同位素链的中子壳能隙随中子数的变化趋势

Fig. 4. Neutron shell gaps of K, Ca, Sc, Ti and V isotopic chains calculated by 8 nuclear mass models vary with the neutron number.

行为, 这预示着在 Cl 和 Ar 同位素链中 $N = 32$ 也极有可能是新的幻数. 因此, 实验测量 Cl 和 Ar 同位素链中这一区域的原子核质量对于鉴别 $N = 32$ 中子壳尤为重要. 同样对于传统幻数 $N = 20$ 在图 5 的两条同位素链中没有看到明显的突起行为, 基本可以认为 $N = 20$ 这一传统幻数在 Cl 和 Ar 同位素链中消失; 对于在中子数 $N = 14$ 处, KTUY, WS 和 WS4 三个理论模型同时预言出现了较高的突起行为, 这说明 $N = 14$ 在 Cl 和 Ar 同位素链中可能为新的幻数, 这些现象可能预示着中子闭壳效应受同位旋不对称度的影响. 在 Ar 同位素链中, $N = 18$ 处可以看到更高的突起行为, 这可能是由于质子数与中子数相等导致 ^{36}Ar 存在更稳定的结构.

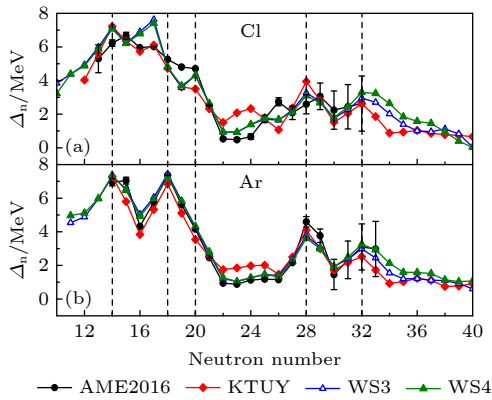


图 5 Cl 和 Ar 同位素链中子壳能隙随中子数的变化趋势, 竖线表示误差
Fig. 5. Variation trend of neutron shell gaps of Cl and Ar isotope chains with neutron number, the vertical bar represents the error.

3.2 基于子壳 $N = 152$ 和 162 检验核质量模型

超重稳定岛的探索一直是核物理领域研究的热点问题之一, 而 α 衰变目前是鉴别超重新核素产生的主要手段, 通常 α 衰变能的计算表达式为

$$Q_\alpha = E_B(2, 2) + E_B(N - 2, Z - 2) - E_B(N, Z), \quad (3)$$

其中 α 粒子的结合能 $E_B(2, 2) = -28.296$ MeV, 取自文献 [29]. 图 6 给出了质子数 $Z = 100 - 110$ 为偶数同位素链的 α 衰变能随中子数的变化趋势, 数据来自核质量表 AME2016. 从图 6 可以看出, 在中子数 $N = 152$ 和 162 两个子壳位置 α 衰变能出现了明显的低洼现象, 因此可以通过 α 衰变能进一步检验核质量模型, 看其能否再现超重区域的壳

演化趋势. 图 7 给出了八个核质量模型计算的质子数 $Z = 100 - 110$ 为偶数同位素链的 α 衰变能随中子数的变化趋势, 可以看出, 只有 FRDM12, WS3 和 WS4 三个模型可以再现子壳 $N = 152$ 和 162 的低洼趋势, 而 FRDM12 和 KTUY 两个模型预言在中子数 $N = 184$ 处出现了明显低洼现象, 且 α 衰变能都小于 8 MeV. 从图 7(g) 和图 7(h) 可以看到 WS3 和 WS4 两个模型给出的 α 衰变能随中子数的变化趋势基本一致, 而预言中子数 $N = 184$ 的低洼现象是从质子数 $Z = 108$ 处才开始呈现, 这与 FRDM12 和 KTUY 两个模型的结果有明显的不同.

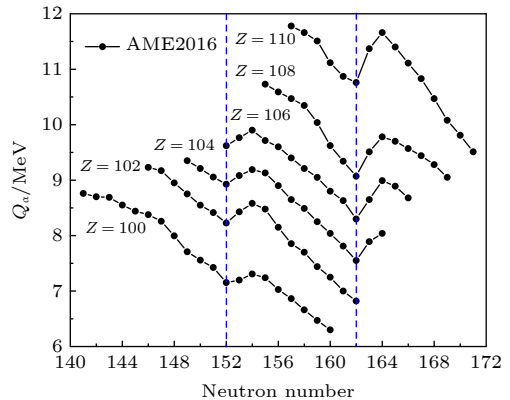


图 6 质子数 $Z = 100 - 110$ 为偶数同位素链的 α 衰变能随中子数的变化趋势
Fig. 6. Alpha decay energy of even isotope chains for the proton number $Z = 100 - 110$ vary with the neutron number.

此外, 图 8 也给出了 FRDM12 和 WS4 两个模型预言的质子数 $Z = 112 - 124$ 为偶数同位素链的 α 衰变能随中子数的变化趋势, 图中较大的黑色实心圆点表示 $Z = 112, 114, 116$ 和 118 同位素链的 α 衰变能, 数值取自核质量表 AME2016. 从图 8 可以看出, WS4 模型的结果比 FRDM12 模型更接近 AME2016 给出的值, 并且发现 $N = 152$ 和 162 的子壳现象到了 $Z = 114$ 附近慢慢消失. 对于理论预言的中子幻数 $N = 184$ 处两个模型呈现出了相似的结果, 就是到了 $Z = 114$ 之后的同位素链的 α 衰变能在 $N = 184$ 处都大于 8 MeV, 而对于 $Z = 108 - 114$ 同位素链的 α 衰变能在 $N = 184$ 附近都在 8 MeV 左右, 这可能预示虽然 $N = 184$ 对于 $Z > 114$ 的同位素链仍属于幻数, 但是这部分核素的寿命应该比 $Z = 108 - 114$ 同位素链在 $N = 184$ 附近的核素寿命短.

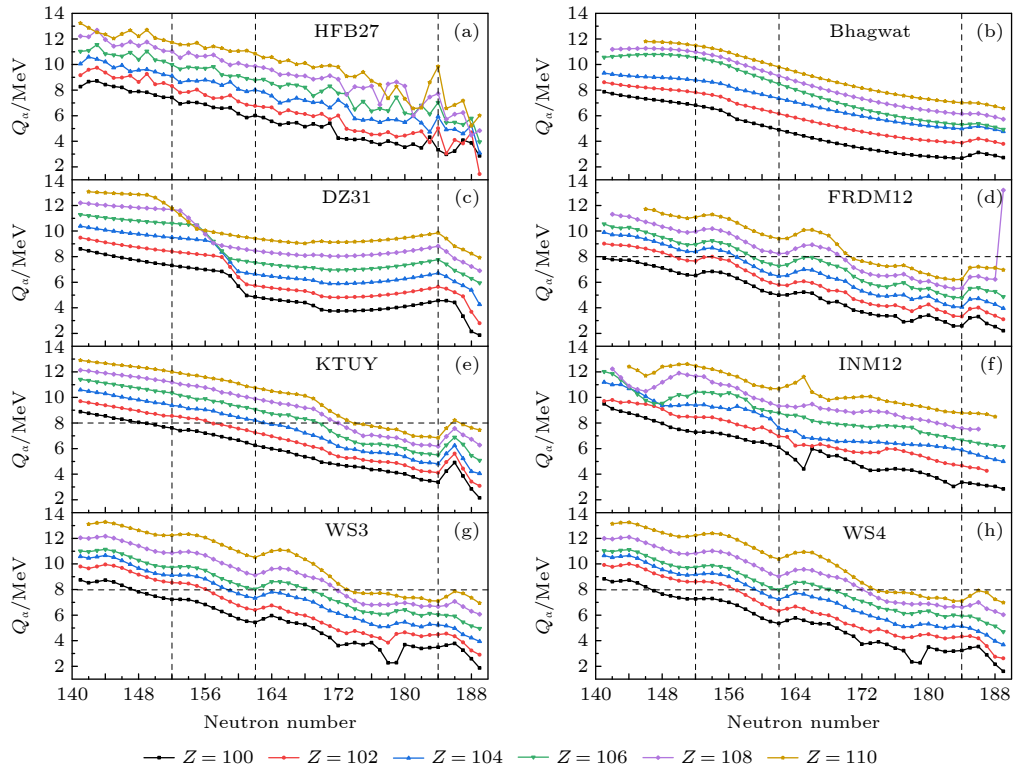


图 7 八个核质量模型计算的质子数 $Z = 100 - 110$ 为偶数同位素链的 α 衰变能随中子数的变化趋势

Fig. 7. Alpha decay energy of even isotope chains for the proton number $Z = 100-110$ calculated by 8 nuclear mass models vary with the neutron number.

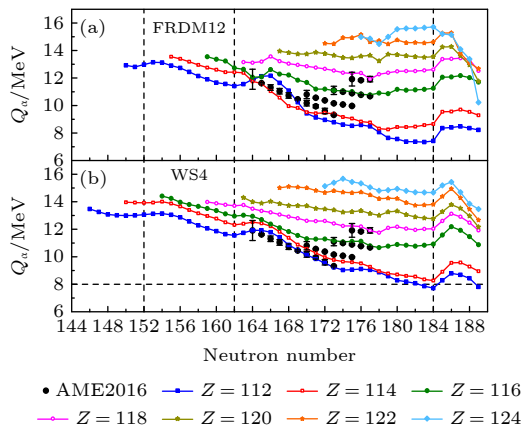


图 8 FRDM12 和 WS4 模型计算的质子数 $Z = 112-124$ 为偶数同位素链的 α 衰变能随中子数的变化趋势, 竖线表示误差

Fig. 8. Alpha decay energy of even isotope chains for the proton number $Z = 112-124$ calculated by the FRDM12 and WS4 models vary with the neutron number, the vertical bar represents the error.

4 结论

本文首先基于 AME2016 质量表中发布的核质量系统地计算了八个普适核质量模型的基态质量、单中子分离能、单质子分离能、双中子分离能

以及双质子分离能的均方根偏差; 并且采取从轻核到超重核以及逐渐远离 β 稳定线的两种分区办法, 分别计算了八个普适模型再现每个分区核素质量的均方根偏差; 结果表明, WS4 和 Bhagwat 是目前精度较好的两个模型.

其次, 基于实验上测量核质量发现的中子新幻数检验了八个普适核质量模型描述原子核的壳演化能力. 通过分析中子壳能隙随中子数的变化趋势发现 KTUY, WS3 和 WS4 三个核质量模型均可以再现 K, Ca 和 Sc 同位素链中出现的新幻数 $N = 32$, 基于 KTUY, WS3 和 WS4 三个理论模型的计算结果与 AME2016 中发布的质量评估数据计算的 Cl 和 Ar 同位素链的中子壳能隙, 分析发现在 Cl 和 Ar 同位素链中 $N = 32$ 也极有可能是新的中子幻数, 这有待实验上进一步的确认; 通过系统地分析超重区域 α 衰变能随中子数的变化趋势, 发现 FRDM12, WS3 和 WS4 三个模型可以较好地再现子壳 $N = 152$ 和 162 的低洼趋势, 对 FRDM12 和 WS4 两个模型预言的 α 衰变能分析发现, 对于中子数 $N = 184$ 的超重核可能在 $Z = 108 - 114$ 附近寿命相对较长.

综合分析发现, 精确度较好的质量模型不一定能够再现壳演化行为, 例如 Bhagwat 模型精确度与 WS4 模型相当, 但是却不能再现新幻数 $N = 32, 152$ 和 162 的突变行为. KTUY 和 FRDM12 两个模型虽然均方根偏差稍大, 却可以分别再现 $N = 32$ 和 $N = 152, 162$ 的幻数行为. WS4 模型的均方根偏差较小且同时能够较好地描述原子核质量中的壳演化行为.

感谢广西师范大学物理科学与技术学院刘敏教授的讨论和对本论文的修改.

参考文献

- [1] Roubin A, Atanasov D, Blaum K, George S, Herfurth F, Kisler D, Kowalska M, Kreim S, Lunney D, Manea V, Minaya Ramirez E, Mougeot M, Neidherr D, Rosenbusch M, Schweikhard L, Welker A, Wienholtz F, Wolf R N, Zuber K 2017 *Phys. Rev. C* **96** 014310
- [2] Wang N, Liu M, Wu X Z 2010 *Phys. Rev. C* **81** 044322
- [3] Wang Y Z, Gao Y H, Cui J P, Gu J Z 2020 *Commun. Theor. Phys.* **72** 025303
- [4] Mo Q H, Liu M, Wang N 2014 *Phys. Rev. C* **90** 024320
- [5] Xu X, Wang M, Zhang Y H, Xu H S, Shuai P, Tu X L, Yuri A L, Zhou X H, Sun B H, Yuan Y J, Xia J W, Yang J C, Klaus B, Chen R J, Chen X C, Fu C Y, Ge Z, Hu Z G, Huang W J, Liu D W, Lan Y H, Ma X W, Mao R S, Uesaka T, Xiao G Q, Xing Y M, Yamaguchi T, Yamaguchi Y, Zeng Q, Yan X L, Zhao H W, Zhao T C, Zhang W, Zhan W L 2015 *Chin. Phys. C* **39** 104001
- [6] Rosenbusch M, Ascher P, Atanasov D, Barbieri C, Beck D, Blaum K, Borgmann C, Breitenfeldt M, Cakirli R B, Cipollone A, George S, Herfurth F, Kowalska M, Kreim S, Lunney D, Manea V, Navrátil P, Neidherr D, Schweikhard L, Somà V, Stanja J, Wienholtz, F, Wolf R N, Zuber K 2015 *Phys. Rev. Lett.* **114** 202501
- [7] Reiter M P, Ayet San Andrés S, Dunling E, Kootte B, Leistenschneider E, Andreoiu C, Babcock C, Barquest B R, Bollig J, Brunner T, Dillmann I, Finlay A, Gwinner G, Graham L, Holt J D, Hornung C, Jesch C, Klawitter R, Lan Y, Lascar D, McKay J E, Paul S F, Steinbrügge R, Thompson R, Tracy J L, Jr, Wieser M E, Will C, Dickel T, Plaß W R, Scheidenberger C, Kwiatkowski A A, Dilling J 2018 *Phys. Rev. C* **98** 024310
- [8] Leistenschneider E, Reiter M P, Ayet San Andrés S, Kootte B, Holt J D, Navrátil P, Babcock C, Barbieri C, Barquest B R, Bergmann J, Bollig J, Brunner T, Dunling E, Finlay A, Geissel H, Graham L, Greiner F, Hergert H, Hornung C, Jesch C, Klawitter R, Lan Y, Lascar D, Leach K G, Lippert W, McKay J E, Paul S F, Schwenk A, Short D, Simonis J, Somà V, Steinbrügge R, Stroberg S R, Thompson R, Wieser M E, Will C, Yavor M, Andreoiu C, Dickel T, Dillmann I, Gwinner G, Plaß W R, Scheidenberger C, Kwiatkowski A A, Dilling J 2018 *Phys. Rev. Lett.* **120** 062503
- [9] Michimasa S, Kobayashi K, Kiyokawa Y, Ota S, Ahn D S, Baba H, Berg G P A, Dozono M, Fukuda N, Furuno T, Ideguchi E, Inabe N, Kawabata T, Kawase S, Kisamori K, Kobayashi K, Kubo T, Kubota Y, Lee C S, Matsushita M, Miya H, Mizukami A, Nagakura H, Nishimura D, Oikawa H, Sakai H, Shimizu Y, Stolz A, Suzuki H, Takaki M, Takeda H, Takeuchi S, Tokieda H, Uesaka T, Yako K, Yamaguchi Y, Yanagisawa Y, Yokoyama R, Yoshida K, Shimoura S 2018 *Phys. Rev. Lett.* **121** 022506
- [10] Mougeot M, Atanasov D, Blaum K, Chrysalidis K, Goodacre T D, Fedorov D, Fedosseev V, George S, Herfurth F, Holt J D, Lunney D, Manea V, Marsh B, Neidherr D, Rosenbusch M, Rothe S, Schweikhard L, Schwenk A, Seiffert C, Simonis J, Stroberg S R, Welker A, Wienholtz F, Wolf R N, Zuber K 2018 *Phys. Rev. Lett.* **120** 232501
- [11] Manea V, Kartheim J, Atanasov D, Bender M, Blaum K, Cocolios T E, Eliseev S, Herlert A, Holt J D, Huang W J, Litvinov Y A, Lunney D, Menéndez J, Mougeot M, Neidherr D, Schweikhard L, Schwenk A, Simonis J, Welker A, Wienholtz F, Zuber K 2020 *Phys. Rev. Lett.* **124** 092502
- [12] Erler J, Birge N, Kortelainen M, Nazarewicz W, Olsen E, Perhac A M, Stoitsov M 2012 *Nature* **486** 509
- [13] Ramirez E M, Ackermann D, Blaum K, Block M, Droese C, Düllmann C E, Dworschak M, Eibach M, Eliseev S, Haettner E, Herfurth F, Heßberger F P, Hofmann S, Ketelaer J, Marx G, Mazzocco M, Nesterenko D, Novikov Y N, Plaß W R, Rodríguez C, Scheidenberger C, Schweikhard L, Thirolf P G, Weber C 2012 *Science* **337** 1207
- [14] Hamilton J H, Hofmann S, Oganessian Y T 2013 *Annu. Rev. Nucl. Part. Sci.* **63** 383
- [15] Zhou S G 2014 *Physics* **43** 817 (in Chinese) [周善贵 2014 物理 **43** 817]
- [16] Zhou S G 2017 *Nucl. Phys. Rev.* **34** 318 (in Chinese) [周善贵 2017 原子核物理评论 **34** 318]
- [17] Li P C, Zhang H F, Wang Y J 2017 *Chin. Phys. C* **41** 114103
- [18] Düllmann C E, Block M 2018 *Sci. Am.* **318** 46
- [19] Nazarewicz W 2018 *Nat. Phys.* **14** 537
- [20] Li Z, Niu Z M, Sun B H, Wang N, Meng J 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 072601 (in Chinese) [李竹, 牛中明, 孙保华, 王宁, 孟杰 2012 物理学报 **61** 072601]
- [21] He J J, Zhou X H, Zhang Y H 2013 *Physics* **42** 484 (in Chinese) [何建军, 周小红, 张玉虎 2013 物理 **42** 484]
- [22] Li Z, Sun B H, Meng J 2013 *Physics* **42** 505 (in Chinese) [李竹, 孙保华, 孟杰 2013 物理 **42** 505]
- [23] Niu Z M, Niu Y F, Liang H Z, Long W H, Nikšić T, Vretenar D, Meng J 2013 *Phys. Lett. B* **723** 172
- [24] Ma C, Li Z, Niu Z M, Liang H Z 2019 *Phys. Rev. C* **100** 024330
- [25] Li Z, Miu Z M, Sun B H 2019 *Sci. China, Ser. G* **62** 982011
- [26] Tang X D, Li K A 2019 *Physics* **48** 633 (in Chinese) [唐晓东, 李阔昂 2019 物理 **48** 633]
- [27] Möler P, Mumpower M R, Kawano T, Myers W D 2019 *At. Data Nucl. Data Tables* **125** 1
- [28] Wang M, Zhang Y H, Zhou X H 2020 *Sci. Sin. Phys. Mech. Astron.* **50** 052006 (in Chinese) [王猛, 张玉虎, 周小红 2020 中国科学: 物理学力学天文学 **50** 052006]
- [29] Wang M, Audi G, Kondev F G, Huang W J, Naimi S, Xu X 2017 *Chin. Phys. C* **41** 030003
- [30] Möler P, Sierk A J, Ichikawa T, Sagawa H 2016 *At. Data Nucl. Data Tables* **109-110** 1
- [31] Koura H, Tachibana T, Uno M, Yamada M 2005 *Prog. Theor. Phys.* **113** 305
- [32] Wang N, Liang Z Y, Liu M, Wu X Z 2010 *Phys. Rev. C* **82** 044304
- [33] Liu M, Wang N, Deng Y G, Wu X Z 2011 *Phys. Rev. C* **84** 014333

- [34] Wang N, Liu M, Wu X Z, Meng J 2014 *Phys. Lett. B* **734** 215
 [35] Bhagwat A 2014 *Phys. Rev. C* **90** 064306
 [36] Goriely S, Chamel N, Pearson J M 2013 *Phys. Rev. C* **88** 024308
 [37] Goriely S, Chamel N, Pearson J M 2013 *Phys. Rev. C* **88** 061302(R)
 [38] Goriely S, Chamel N, Pearson J M 2016 *Phys. Rev. C* **93** 034337
 [39] Geng L S, Toki H, Meng J 2005 *Prog. Theor. Phys.* **113** 785
 [40] Xia X W, Lim Y, Zhao P W, Liang H Z, Qu X Y, Chen Y, Liu H, Zhang L F, Zhang S Q, Kim Y, Meng J 2018 *At. Data Nucl. Data Tables* **121-122** 1
 [41] Duflo J, Zuker A P 1995 *Phys. Rev. C* **52** R23(R)
 [42] Zuker A P 2008 *Rev. Mex. Fis.* **54** 129
 [43] Nayak R C, Satpathy L 2012 *At. Data Nucl. Data Tables* **98** 616
 [44] Sobczewski A, Litvinov Y A 2014 *Phys. Rev. C* **89** 024311
 [45] Sobczewski A, Litvinov Y A 2014 *Phys. Rev. C* **90** 017302
 [46] Sobczewski A, Litvinov Y A, Palczewski M 2018 *At. Data Nucl. Data Tables* **119** 1
 [47] Zheng J S, Wang N Y, Wang Z Y, Niu Z M, Niu Y F, Sun B H 2014 *Phys. Rev. C* **90** 014303
 [48] Hua X M, Heng T H, Niu Z M, Sun B H, Guo J Y 2012 *Sci. China, Ser. G* **55** 2414
 [49] Niu Z M, Fang J Y, Niu Y F 2019 *Phys. Rev. C* **100** 054311

Test of nuclear mass models*

Li Tao^{1)2)†} Li Chun-Qing¹⁾ Zhou Hou-Bing¹⁾²⁾ Wang Ning¹⁾²⁾

1) (College of Physical Science and Technology, Guangxi Normal University, Guilin 541004, China)

2) (Guangxi Key Laboratory of Nuclear Physics and Technology, Guilin 541004, China)

(Received 19 October 2020; revised manuscript received 30 December 2020)

Abstract

The reliability and prediction ability of 8 global nuclear mass models is systematically analyzed in terms of the accuracy of the model and the new neutron magic number predicted by experiments based on the ground-state nuclear mass data from AME2016. The root-mean-square (RMS) deviations of nuclear mass predicted by 8 nuclear mass models are calculated by subregion, and find that the Bhagwat and WS4 models possess better accuracy to describe the existing experimental data. By analyzing the trend of the neutron shell energy gap varying with neutron number, it is found that the KTUY, WS3 and WS4 models can well represent the mutation behavior caused by the new magic number $N = 32$, and it is predicted that $N = 32$ is likely to be a new magic number in the Cl isotope chain and Ar isotope chain. By analyzing the variation trend of α decay energy in the superheavy region, it is found that the FRDM12, WS3 and WS4 models can reproduce the phenomena of subshell with $N = 152$ and $N = 162$ well, and predict the relatively long life of nuclei at the neutron number $N = 184$ for the isotope chain with proton number $Z = 108-114$. The comprehensive analysis shows that the mass model with good accuracy cannot reproduce shell evolution behavior. For example, the Bhagwat model has the same accuracy as the WS4 model, but it cannot reproduce the mutation behavior of the new magic number $N = 32, 152$ and 162 . But the KTUY model and FRDM12 model can reproduce the new magic number behavior of $N = 32, 152$ and 162 , respectively, although the RMS deviation is slightly larger. The RMS deviation of WS4 model is small and can describe the shell evolution behavior in the nuclear mass well.

Keywords: nuclear mass model, root-mean-square deviation, new magic number

PACS: 21.10.Dr, 21.60.-n, 21.90.+f

DOI: 10.7498/aps.70.20201734

* Project supported by the Joint Funds of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. U1867212), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11965003, 11505035, 11675266), the Natural Science Foundation of Guangxi (Grant Nos. 2017GXNSFAA198160, 2017GXNSFGA198001), and the Basic Scientific Research Ability of Young and Middle-aged Teachers in Guangxi Colleges and Universities, China (Grant No. 2019KY0061).

† Corresponding author. E-mail: litao@gxnu.edu.cn