云南大学学报 (自然科学版), 2008, 30 (5): 494~ 497 CN 53- 1045/N ISSN 0258- 7971
Journal of Yunnan University

超重原子核区的壳效应研究

支启军[1], 令狐荣峰[1], 吉世印[2]
(1. 贵州师范大学 理学院, 贵州 贵阳 550001; 2. 黔南民族师范学院 物理系, 贵州 都匀 558000)

摘要: 采用 Nilsson 势的宏观- 微观模型, 对 Z= 114 同位素链上原子核基态的结合能、衰变能和四极形变进行了系统的计算, 并将理论计算结果与实验数据和其他理论模型的结果进行了详细的比较. 研究发现, 理论计算结果和实验数据符合, 也与其他模型的计算结果符合, 表明宏观- 微观模型对超重核性质的研究是可靠和有效的. 对形变和壳效应的分析表明在宏观- 微观模型里 Z= 114 和 N= 184 是一个闭壳.

关键词: 超重核; 衰变链; 壳效应; 形变
中图分类号: O 562.1 文献标识码: A 文章编号: 0258- 7971(2008)05- 0494- 04

对超重核的研究是当前核物理研究领域中的热点课题之一. 超重核研究不仅对探索原子核的质量极限和检验原子核结构理论具有重要的科学意义, 而且超重新元素的合成对核物理、天体物理、化学乃至能源等研究领域都将产生深远的影响. 早在 20 世纪 60 年代, 基于 Strutinsky 壳修正方法, 原子核壳模型理论预言了在 ^{208}Pb 以后存在一个超重岛[1]. 在此理论预言的激励下, 物理学家一直试图登上这一岛屿. 近年来, 随着实验技术和理论研究工作的不断进展, 合成超重元素的研究工作取得了突破性进展[1~ 4]. 许多新的超重元素已经在实验中合成. 至今, 人们已经在实验中合成了 118 号以前(Z= 117 除外)的元素.

超重核性质和结构的理论研究不仅对于检验核模型在超重区的有效性、发展核理论有着重要的作用, 而且对超重核的实验也具有重要的理论指导意义. 理论物理学家们利用平均场模型(Relativistic mean filed (RMF))、Hartree Fock model (HF) 宏观- 微观模型(macroscopic- microscopic) 对超重核的性质作了一些理论计算并取得了一些有意义的结果, 如认为大部分超重核是形变的, 形变对超重核的性质起着重要的作用等[5~ 9]. 在文献[8, 9]中, 我们采用 Nilsson 势宏观- 微观模型对 Z= 94 ~ 112 偶- 偶核和 95~ 113 奇- 偶超重核的性质作了研究, 发现宏观- 微观模型对超重核基态性质的理论描述是可靠和有效的, 宏观- 微观模型对超重核性质的描述比 RMF 和 HF 模型稍好. 由于 Z = 114 被认为是下一个质子壳(稳定岛中心), 有必要对其进行比较详细的计算和讨论. 本文将用宏观- 微观模型系统地计算 Z= 114 同位素链上的原子核的性质, 并将计算结果与实验数据及其他模型的计算结果进行细致地比较和讨论. 重点考察形变对超重核基态性质的作用以及 Z= 114 的壳效应.

1 理论框架

宏观- 微观模型认为原子核的总能量由宏观部分和微观部分组成, 其中宏观部分反映原子核的总体性质, 而微观部分则反映原子核的微观性质, 主要是原子核量子性质的体现[7]

$$E_{总} = E_{宏观} + E_{微观}. \quad (1)$$

一般来说, 原子核的微观能量主要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

收稿日期: 2007- 12- 10
基金项目: 贵州省教育厅自然科学研究重点资助项目(黔教科 2005105).
作者简介: 支启军(1979-), 男, 贵州人, 博士, 副教授, 主要从事理论物理方面的研究.
© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

成[7~9]:

$$E_{\text{微观}} = E_{\text{壳修正}} + E_{\text{对修正}}, \quad (2)$$

在本文的计算中选取形变的液滴模型来计算宏观能量. 至于微观能量, 我们选取 Nilsson 势来计算原子核的单粒子能级, 然后采用 Strutinsky 方法[8] 来计算壳修正能量和 BCS 对修正方法来计算对修正能量. 尼耳逊势的形式如下

$$h = h_{\text{h.o.}}(\ ,\ ) + 2h\ _0{}^2\ _4V_4(\ ) + V\ , \quad (3)$$

上式中 $h_{\text{h.o.}}$ 为各向异性谐振子势

$$h_{\text{h.o.}}(\ ,\ ) = \frac{p^2}{2m} + \frac{1}{2}m\{\ _x^2x^2 + \ _y y^2 + \ _z z^2\}, \quad (4)$$

V_4 为十六级形变势, V 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

$$V = -k(N)h\ _0\{2l_t\ \ s + \ (N)(l_t^2 - \ l_t^2\ _N)\}, \quad (5)$$

上式中的 k, 是尼耳逊势中的2个重要参数, 对于不同的壳层, 应选取不同的值. 在本文的计算中我们选取与文献[8] 相同的尼耳逊参数, 在形变空间下计算相应的微观修正能量, 加上宏观能量, 便得到原子核的总能量. 然后在形变空间通过求极小确定原子核的基态, 进而研究原子核的基态性质.

2　计算结果和讨论

利用宏观- 微观模型, 我们系统计算了 $Z=114$ 同位素链上原子核的基态性质, 下面来依次对这些计算结果进行讨论.

在图 1 中, 我们画出了理论计算的结合能和实验数据以及其他理论模型计算的结果. 为了能清楚的看出理论结果和试验的差异, 图 1 中我们用的是原子核的平均结合能. 从图中可以发现, 我们的理论计算结果和 Moller 等的计算结果符合较好, 也与实验数据比较接近(我们的理论计算结果比 Moller 等的计算结果与实验数据的估计值符合稍好) . 当然我们也可以看见对超重核来说, 实验数据是非常少的. 理论模型的计算结果有待于更多试验数据的累积. 但是, 就总的结合能来说, 我们的理论结果与 Moller 等的结果相差不大, 与试验估计值相差不超过 2.5 MeV. 相对误差不超过 2%. 因此, 可以说理论计算结果是可靠的.

图 2 是理论计算　衰变能的比较图. 图 2 中衰变能的试验值取自最近的试验结果[10]. 从图 2 中我们可以看到, 宏观- 微观模型理论结算的衰变能与最近的试验结果符合较好, 也与 Moller 的理论计算结果比较接近. 由此可以说明, 宏观- 微观模型对 $Z=114$ 同位素链上原子核结合能核衰变能的理论描述是可靠和有效的.

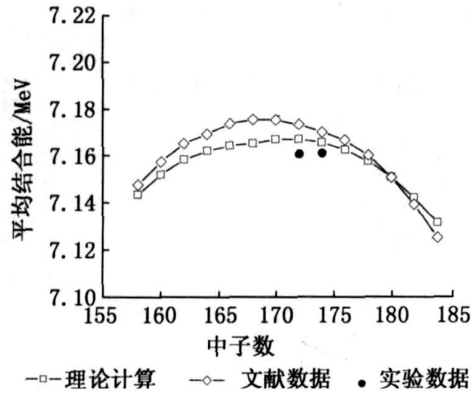

图 **1**　理论计算结合能与试验数据的比较

Fig. 1 Comparisons of theoretical binding energies and experimental data

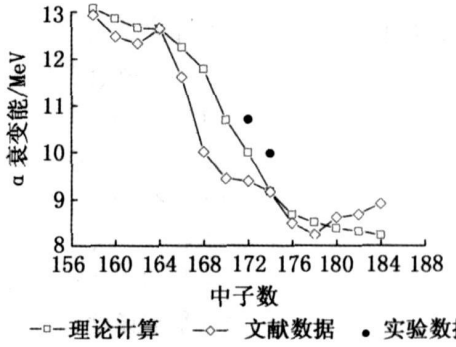

图 **2**　理论计算衰变能和实验数据及其他理论模型结果的比较

Fig. 2 Comparison of theoretical alpha- decay energies and experimental data

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

形变对原子核的性质起着非常重要的作用,下面分析超重核区的形变. 宏观– 微观模型的理论计算结果显示 $Z=114$ 附近的原子核基本上呈球形,预示 $Z=114$ 是继 $Z=82$ 后的质子壳,这与文献[1]的结论是一致的. 图 3 画出的是 $Z=114$ 同位素链上比较典型的微观能量面图. 我们知道,原子核基态是能量面的最小点,从图 3 中可以看见,对每一个原子核来说,能量的极小点基本上是在四极形变接近于 0 的位置. 这表示这些原子核的基态基本上是没有形变的,也就是说这些原子核是球形原子核. 我们知道球形核意味着这些核是在壳的附近,这表明在我们的宏观– 微观模型计算中,$Z=114$ 可能是一个质子壳. 在图 3 中,我们还发现,在每一个能量面上,除了第 1 个能量极小点外,还存在另 1 个能量极小点(大约在四极形变等于 0.5 附近),这个能量极小点就是所谓的同质异能态[8]. 同质异能态的出现表明这些原子核可能不像常规想象的原子核那样容易裂变,进而这些原子核有相对来说比较长的寿命,从而形成所谓的超重岛.

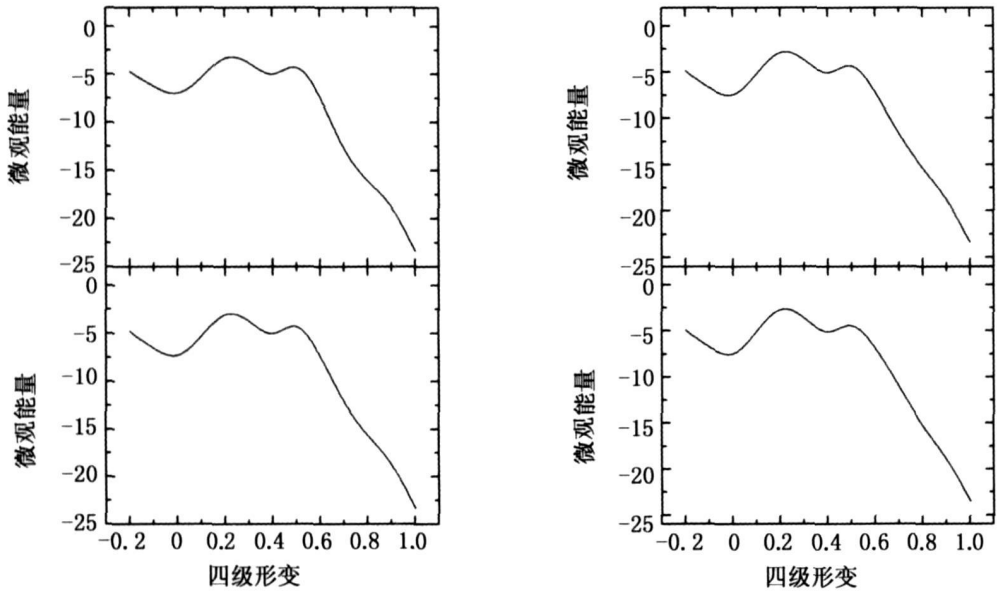

图 3 $Z=114$ 同位素链上原子核的微观能量曲面图

Fig. 3 The microscopic potential energy surfaces of $Z=114$ isotopic chain

图 4 是 $Z=114$ 同位素链上原子核的微观能量在形变等于 0 时随中子数的变化曲线图,从图中可以发现,在 $N=184$ 附近,原子核的微观能量取最小值,这预示着 $N=184$ 时一个中子壳. 这与文献[1]中的结论是一致的. 根据计算,$Z=114$ 和 $N=184$ 是继 $Z=82$ 和 $N=126$ 后的下一个质子壳和中子壳,这与其他宏观– 微观模型的理论计算结果是基本相同的. 我们前面的相对论平均场的理论计算结果表明 $N=184$ 是一个中子壳,而质子壳并不与 $Z=114$ 相一致. 我们知道,在平均场模型里面,不同的计算给出的质子壳是 $Z=114, 120$,$Z=126$[11]. 文献[1]指出这是由于不同模型采用不同的近似和选取不同的微观势,不同模型对质子壳得出不同的理论预言这是可以理解的. 各个模型预言的结果仍有待于将来的实验数据来检验.

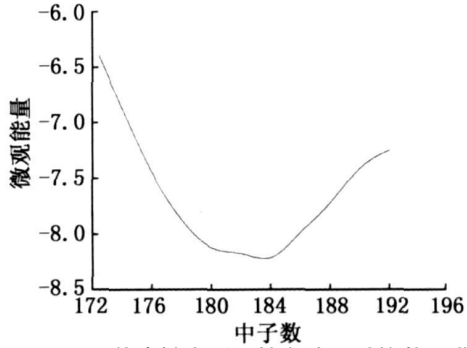

图 4 Z= 114 同位素链上原子核在球形时的能量曲面图

Fig. 4 The potential energy surfaces of Z= 114 isotopic chain at spherical shape

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net