

新核素 ^{265}Bh 及其 α 衰变链上核的基态性质*

张鸿飞^{1,2;1)} 左维^{1,3} 李君清^{1,3} 任秀宰¹ 马中玉^{3,4} 陈宝秋^{3,4}

1 (中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

2 (中国科学院研究生院 北京 100049)

3 (兰州重离子加速器国家实验室原子核理论中心 兰州 730000)

4 (中国原子能科学研究院 北京 102413)

摘要 运用变形的相对论平均场理论系统地探讨了新核素 ^{265}Bh 及其 α 衰变链的基态性质. 对关联的处理采用了 BCS 方法, 不成对核子的处理运用了“阻塞”法后, 所计算的结合能和四极形变符合了有限力程小液滴模型的结果, 计算表明研究的 α 衰变链具有中等大小的长椭球形变; 且计算的 α 衰变能 Q_α 成功地与实验符合. 在此基础上进一步研究了新核素 ^{265}Bh 的单粒子能级.

关键词 相对论平均场 超重核 四极形变 α 衰变能

1 引言

随着对原子核性质认识的加深和各种核模型的逐步完善, 特别是近年来放射性束流的使用, 实验上合成超重核和理论上对其性质的研究已成为当前核物理领域最热门的课题之一^[1-6]. 对远离 β 稳定线核和超重核性质的研究, 能够检验现有的原子核模型和发现原子核新的性质. 但是, 在实验上合成超重核是非常不容易的, 经过多年的努力, 目前世界上合成的超重核也仅有二十多个. 所以, 利用比较成熟和日趋完善的理论对已合成超重核的性质进行研究显得非常必要, 而且现有的超重核合成实验基本上都仅限于 α 衰变能和寿命的测量, 这样, 对这些已合成超重核的 α 衰变和其他性质的研究是非常具有现实意义的工作.

2004 年, 新核素 ^{265}Bh 的合成结果正式发表^[7, 8], 在实验中探测到了 ^{265}Bh 及其 α 衰变链的衰变能和寿命. 我们运用近年来广泛采用而且已经符合了几乎所有已知核性质的相对论平均场理论 (RMF)^[9-15], 对 ^{265}Bh 及其 α 衰变链的结合能、四极形变、 α 衰变能、单粒子能级及自旋和宇称进行了计算和分析. 理论和实验值以及有限力程小液滴模型 (FRDM)^[16] 的

符合显示了变形的相对论平均场理论在超重区研究核结构的可靠性, 同时也发现了一些超重核特有的性质.

2 变形的相对论平均场理论简介

RMF 的出发点是一个包含核子和介子自由度的有效拉氏密度^[17]:

$$\begin{aligned} L = & \bar{\Psi}_i(i\gamma^\mu - M)\Psi_i + \frac{1}{2}\partial^\mu\sigma\partial_\mu\sigma - U(\sigma) - g_\sigma\bar{\Psi}_i\Psi_i\sigma - \\ & \frac{1}{4}\Omega^{\mu\nu}\Omega_{\mu\nu} + \frac{1}{2}m_\omega^2\omega^\mu\omega_\mu + \frac{1}{4}c_3(\omega_\mu\omega^\mu)^2 - \\ & g_\omega\bar{\Psi}_i\gamma^\mu\Psi_i\omega_\mu - \frac{1}{4}R^{\mu\nu}R_{\mu\nu} + \frac{1}{2}m_\rho^2\rho^\mu\rho_\mu - \\ & g_\rho\bar{\Psi}_i\gamma^\mu\tau\Psi_i\rho_\mu - \frac{1}{4}F^{\mu\nu}F_{\mu\nu} - \\ & e\bar{\Psi}_i\gamma^\mu\frac{(1-\tau_3)}{2}\Psi_iA_\mu, \end{aligned} \quad (1)$$

其中矢量同位旋标量介子场 $\Omega^{\mu\nu}$ 、同位旋矢量介子场 $R^{\mu\nu}$ 和电磁场张量 $F^{\mu\nu}$ 分别为:

$$\Omega^{\mu\nu} = \partial^\mu\omega^\nu - \partial^\nu\omega^\mu, \quad (2)$$

$$R^{\mu\nu} = \partial^\mu\rho^\nu - \partial^\nu\rho^\mu, \quad (3)$$

2004 - 12 - 26 收稿

* 国家自然科学基金(10175082, 10235020, 10235030, 10275094, 10075080), 国家重点基础研究发展规划项目(G2000077407, G2000077400), 中国科学院知识创新工程重点方向项目(KJ951-A1-01-01), 中国科学院百人计划和科技部重大前期研究专项基金(2001CCB01200, 2002CCB01200)资助

1) E-mail: zhanghongfei@impcas.ac.cn

$$F^{\mu\nu} = \partial^\mu A^\nu - \partial^\nu A^\mu, \quad (4)$$

$U(\sigma)$ 为 σ 介子运动的非线性势

$$U(\sigma) = \frac{1}{2}m_\sigma\sigma^2 + \frac{1}{3}g_2\sigma^3 + \frac{1}{4}g_3\sigma^4, \quad (5)$$

Ψ_i 和 M 表示核子场和核子质量. σ , ω_μ , ρ_μ 和 m_σ , m_ω , m_ρ 分别表示 σ , ω 和 ρ 介子场及它们各自的静止质量. A^μ 是电磁场矢量, $e^2/4\pi = 1/137$. 核子和介子的有效耦合常数为 g_σ , g_ω 及 g_ρ . g_2 和 g_3 是 σ 介子的自相互作用非线性项耦合常数. τ 是同位旋泡利矩阵, τ_3 是其第3分量. 核子之间的吸引作用由标量 σ 介子来模拟, 而在核子间交换矢量同位旋标量介子 ω 则产生核子之间相互排斥的矢量势, 交换 σ 介子产生的标量势和交换 ω 介子产生矢量势各有几百个MeV, 都可以和核子的质量约1GeV相比拟, 所以要在相对论框架下来研究原子核的性质. 标量势和矢量势的平衡便构成了核子之间最主要的相互作用, 在拉氏量中加入 ρ 介子是为了更好地描述同位旋效应, 使理论在大幅度的同位旋范围内都适用. 另外, 非线性势 $U(\sigma)$ 的引进使得相对论平均场可以较好地符合核物质不可压缩系数. 同经典电动力学中相同, 光子 γ 的交换用来描述电磁相互作用.

从拉氏量出发, 利用变分原理, 可以由Euler-Lagrange方程得到一组核子运动的Dirac方程和介子运动的Klein-Gordon方程. 我们只计算核的基态性质, 可以假设介子场和光子场是静态的经典场, 核子则在经典场中作独立运动, 这就是平均场理论的基本精神之所在. 在用平均场近似和对称性理论对这组方程简化后, 可以用数值求解的办法自洽地解方程. 我们采用的是变形轴对称谐振子展开的办法(主壳 $N_f = N_b = 20$), 在柱坐标下求解方程^[17].

对于参数的选取, 采用了近年来才发展而且很好地符合现有超重核性质的两组参数TMA^[18, 19]和NL-Z2^[20]分别进行了计算.

对关联对研究开壳核的基态性质非常重要, 特别对重核的定量计算是非常关键的. 我们采用了简洁而有效的BCS(Barden-Cooper-Schrieffer)方法处理对关联, 对相互作用作为微扰项. BCS对力常数 G 采用文献[21]中提出的同位旋相关的形式:

$$G_n = \frac{21}{A} \left(1 - \frac{1}{2} \frac{N-Z}{Z} \right) \text{MeV}, \quad (6)$$

$$G_p = \frac{27}{A} \left(1 + \frac{1}{2} \frac{N-Z}{Z} \right) \text{MeV}, \quad (7)$$

对不成对的核子采用泡利阻塞的办法处理^[22].

3 ²⁶⁵Bh及其 α 衰变链上核的基态性质

3.1 结合能与四极形变

结合能本身是标志原子核性质非常重要的物理量^[23], 而且对 α 衰变能、质子分离能、中子分离能等物理量的计算都是基于正确的结合能值. 我们先计算了²⁶⁵Bh及其 α 衰变链的结合能和相应的四极形变. FRDM系统地符合了所有已知核的实验数据, 对远离 β 稳定线和超重核的性质也给出了比较好的预测^[16]. 通常把FRDM的结果看作经验值, 所以我们将RMF计算的结果和FRDM的结果进行了比较, 结果显示在表1中. 可以看到, 运用参数NL-Z2和TMA计算所得到的结合能和FRDM的结果非常接近. 再仔细分析会发现FRDM的结合能数值基本上都处于RMF的两组参数TMA和NL-Z2的计算结果之间, 而且参数NL-Z2的结果总处于经验值的下限, TMA的结果总处于经验值的上限. 这是一个很有意义的结论, 说明可以结合TMA和NL-Z2两组参数对超重核的结合能给出合理的预言. 总体来看, RMF和FRDM都有一致的结果: ²⁶⁵Bh及其衰变链都具有中等大小的长椭球形变, 其四极形变值都位于0.230—0.265之间, 可见这些超重核都是变形核, 通常形变是促使超重核稳定的因素之一. 从²⁶⁵Bh到²⁵³Md, 尽管四极形变值偶尔有较小的振荡, 但总体趋势是缓慢增大的. 相对论平均场曾预言的超重核区 $N = 172$ 为可能的中子满壳^[24], 而 $Z = 108$ 是一个质子变形满壳, 从²⁶⁵Bh到²⁵³Md逐渐远离中子幻数 $N = 172$ 和质子幻数 $Z = 108$, 所以四极形变值逐渐增大也是合理的.

表1 用RMF计算的²⁶⁵Bh衰变链中核的结合能、四极形变及与FRDM结果的比较

Nucleus	RMF(NL-Z2)		RMF(TMA)		FRDM	
	E_b/MeV	β_2	E_b/MeV	β_2	E_b/MeV	β_2
²⁶⁵ Bh	-1939.68	0.255	-1942.04	0.231	-1939.77	0.230
²⁶¹ Db	-1920.92	0.265	-1922.92	0.243	-1920.63	0.228
²⁵⁷ Lr	-1900.86	0.265	-1903.58	0.229	-1901.56	0.238
²⁵³ Md	-1879.89	0.266	-1883.63	0.237	-1882.13	0.246

3.2 α 衰变能

α 衰变是重核最主要的衰变方式, 衰变能是标志 α 衰变最重要的物理量, 其大小可以反映有关原子核结构和稳定性的信息, α 衰变能越大超重核越容易发生 α 衰变, 也就越不稳定; 反之, α 衰变能越小超重核越稳定. α 衰变有不同的衰变道, 例如从基态到基态的衰变, 从激发态到激发态的衰变以及激发态与基态之间的衰变. 我们在这里只考虑从基态到基态的衰变

并采用以下的公式计算 α 衰变能:

$$Q_{\alpha}(Z, N) = M(Z, N) - M(Z - 2, N - 2) - M(2, 2) = E_b(Z - 2, N - 2) + E_b(2, 2) - E_b(Z, N), \quad (8)$$

其中, $E_b(2, 2) = 28.3 \text{ MeV}$ 为 α 粒子的结合能, $E_b(Z, N)$ 和 $E_b(Z - 2, N - 2)$ 分别为母核和子核的结合能.

^{265}Bh 及其衰变链的 α 衰变能在表2中给出, 可以看到RMF和FRDM的结果都和实验符合得比较好, 只有用RMF参数NL-Z2计算时 ^{257}Lr 的 α 衰变能和实

验值相差在1MeV以上, 总体来看用参数TMA计算的结果和FRDM的结果和实验值符合得非常好. 不论是计算的数值还是实验的结果, 从 ^{265}Bh 到 ^{253}Md , α 衰变能都在逐渐变小, 这样会导致 α 衰变寿命逐渐变长. 理论上分析, 从 α 衰变的起点 ^{265}Bh 沿着 α 衰变链, 其过程是从丰质子区域逐渐靠近稳定线, α 衰变应该越来越困难, 即 α 衰变能 Q_{α} 应越来越小, 实验给出的结果和FRDM的预言都证实了这一点, 现在DRMF计算的结果也再次符合了这一规律.

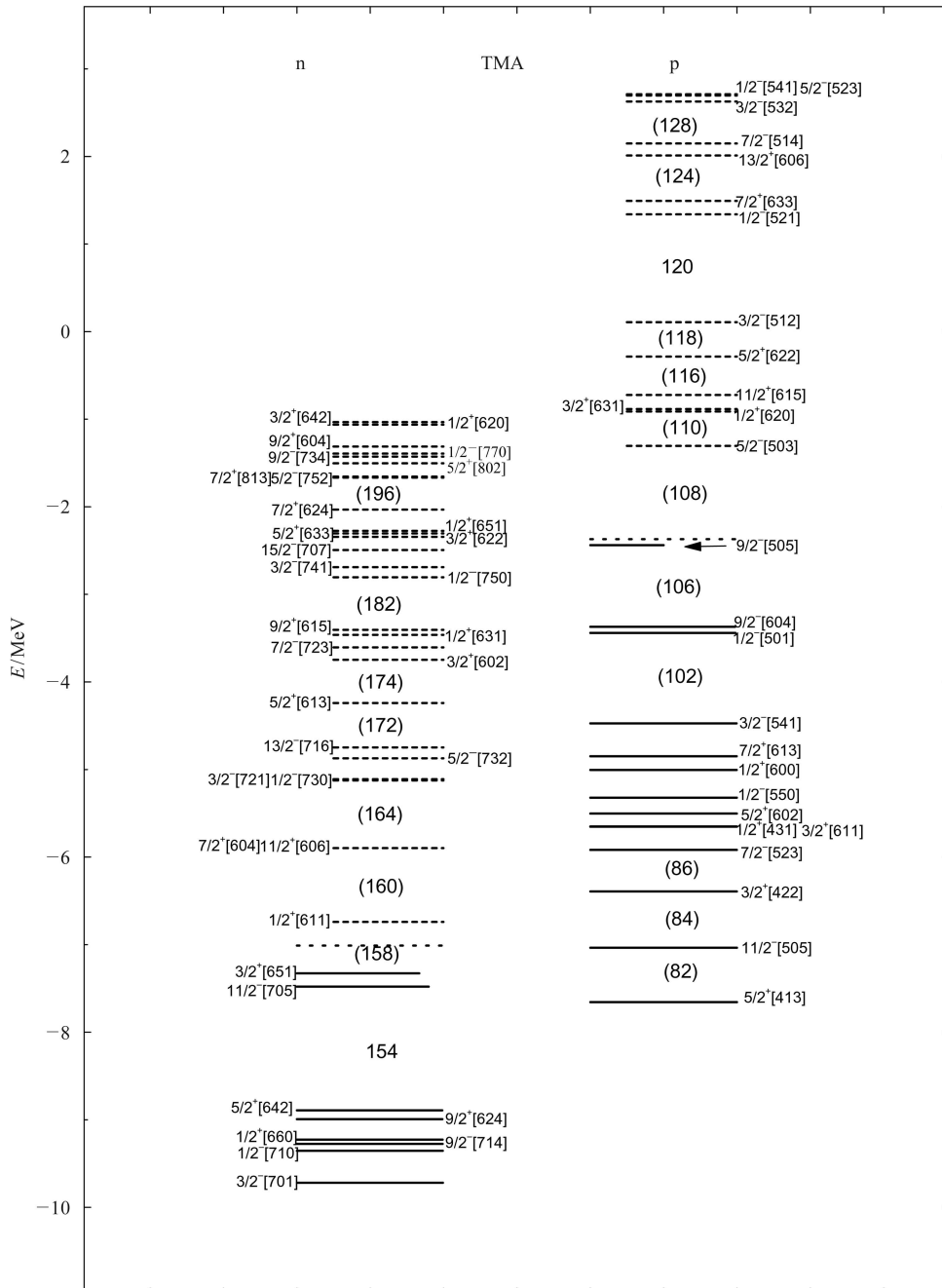


图1 用参数TMA计算的 ^{265}Bh 的单粒子能级
横坐标每格长度代表占有一个核子.

表2 用RMF计算的 ^{265}Bh 衰变链中核的 α 衰变能及与FRDM和实验结果的比较

Nucleus	RMF(NL-Z2)	RMF(TMA)	FRDM	Exp.
	Q_α/MeV	Q_α/MeV	Q_α/MeV	Q_α/MeV
^{265}Bh	9.54	9.18	9.15	9.38
^{261}Db	8.24	8.96	9.23	9.07
^{257}Lr	7.33	8.35	8.87	8.94
^{253}Md	7.78	7.49	7.45	

3.3 新核素 ^{265}Bh 的单粒子能级结构

从前面的分析讨论可以知道,变形的RMF理论结合对关联BCS近似比较恰当地描述了 ^{265}Bh 及其 α 衰变链核的基态性质.从微观角度考虑,单粒子能级结构是原子核最根本的性质,对 ^{265}Bh 结构的研究,有助于进一步了解关于超重核的一些信息.

运用RMF的参数TMA计算 ^{265}Bh 的单粒子能级(费米面附近)显示在图1中,对应的四极形变值 $\beta_2 = 0.231$.线段沿横轴的长度表示在该能级的核子占有数.众所周知,若不考虑剩余相互作用,即可忽略对关联而只考虑形变平均场.在费米面以下每条单粒子能级应容纳两个核子,在费米面以上没有核子.而在采用BCS方法处理对关联后,占居在每条能级上的粒子数在0到2之间连续变化,费米面用点线标识.从图1中可以看到,在费米面以下,核子占有数为2或非常接近2(对奇A核 ^{265}Bh ,最后一个质子 $9/2^-$ 的占有数为1),而在费米面以上,核子占有数非常接近0(为下面讨论方便用虚线标识能级的位置,其长度并不代表占有数),说明在 ^{265}Bh 中,由库仑势垒和离心势垒所造成的共振态的影响并不大.费米面能量分别为质子 $E_p = -2.33\text{MeV}$,中子 $E_n = -7.01\text{MeV}$,都较低,表明连续态的贡献不十分重要,在这里BCS对关联可近似有效的使用^[10].中子单粒子能级最大的能隙 $N = 154(1.41\text{MeV})$,而在 $N = 158, 160, 164, 172, 174, 182$ 和 196 处也各有一能隙存在,在 $N = 158$ 处中子能隙的存在一定程度促使超重核 ^{265}Bh (中子数 $N = 158$)的稳定.但由于这一能隙只有 0.59MeV ,而在非超重核区,大的能隙可达 4MeV 左右,所以在 ^{265}Bh 中 $N = 158$ 中子能隙的作用并不像在非超重区核那样大,这样自然超重核的稳定性就会相对钢系以前的核要差很多.单粒子能级密度变大,能隙减小,费米面,特别是质子费米面比较接近连续态是超

重核结构最主要的特性之一,也是导致其不稳定的主要原因.质子能隙最大处为 $Z = 120(1.23\text{MeV})$ 和 $108(1.31\text{MeV})$,而在 $Z = 82, 84, 86, 102, 106, 116, 124$ 和 128 处也各有一能隙存在.

在图2中显示的是用参数NL-Z2计算的 ^{265}Bh 费米面附近的单粒子能级,对应的四极形变值 $\beta_2 = 0.255$,关于图中各物理量的说明同图1.在图2中能明显看到在 $N = 162$ 处有一大的能隙(1.59MeV),这已被预言是一个中子亚壳^[25], $N = 158$ 处仍有一比较明显的能隙,和图1相比,在 $N = 154$ 处不再有大大的能隙,而在 $N = 150, 152, 184, 186$ 和 202 时也各有能隙存在.在质子单粒子能级中,质子能隙最大处为 $Z = 120(1.37\text{MeV})$,和参数TMA的计算有一致的结论.同时看到在 $Z = 82, 104, 106, 108, 110, 114$ 和 126 处有明显的能隙存在.和图1最大的不同是采用参数TMA时最后一个质子($9/2^-$)占居在费米面以下,而采用参数NL-Z2时最后一个质子($5/2^-$)处于费米面以上,奇A核基态和低激发态结构接近单准粒子态,其基态有一个不成对的核子处在费米能级 λ 的上方最靠近 λ 处的 k 态($\epsilon_k - \lambda \ll \Delta, \Delta$ 为对能隙)^[26].采用参数NL-Z2时很好的再现了这一物理内容.用TMA参数和NL-Z2计算的最后一个质子的自旋也不相同,而对奇A核,最后一个核子的自旋和宇称就是该原子核的自旋和宇称,这样会导致用TMA和NL-Z2计算 ^{265}Bh 的自旋也不相同,这也是一重要的差异.所以为什么相对论平均场的各组参数会给出某些同一物理量不同的计算结果是值得进一步深入探讨的课题.

4 结论

运用变形的RMF理论对新核素 ^{265}Bh 及其 α 衰变链的性质进行了较为详细的研究,结果和FRDM的结果以及实验都符合得比较好,说明变形的RMF理论结合对关联的BCS方法处理,对超重核性质的研究是可靠的.我们用相对平均场理论对新核素 ^{265}Bh 及其 α 衰变链结合能、四极形变、 α 衰变能、单粒子能级及自旋和宇称进行了计算和分析,特别注意超重核有别于非超重区原子核的性质的探讨.发现超重区许多稳定核是形变的,同时也看到相对论平均场的各组参数会给出某些同一物理量不同的计算结果,这需要做进一步的研究.

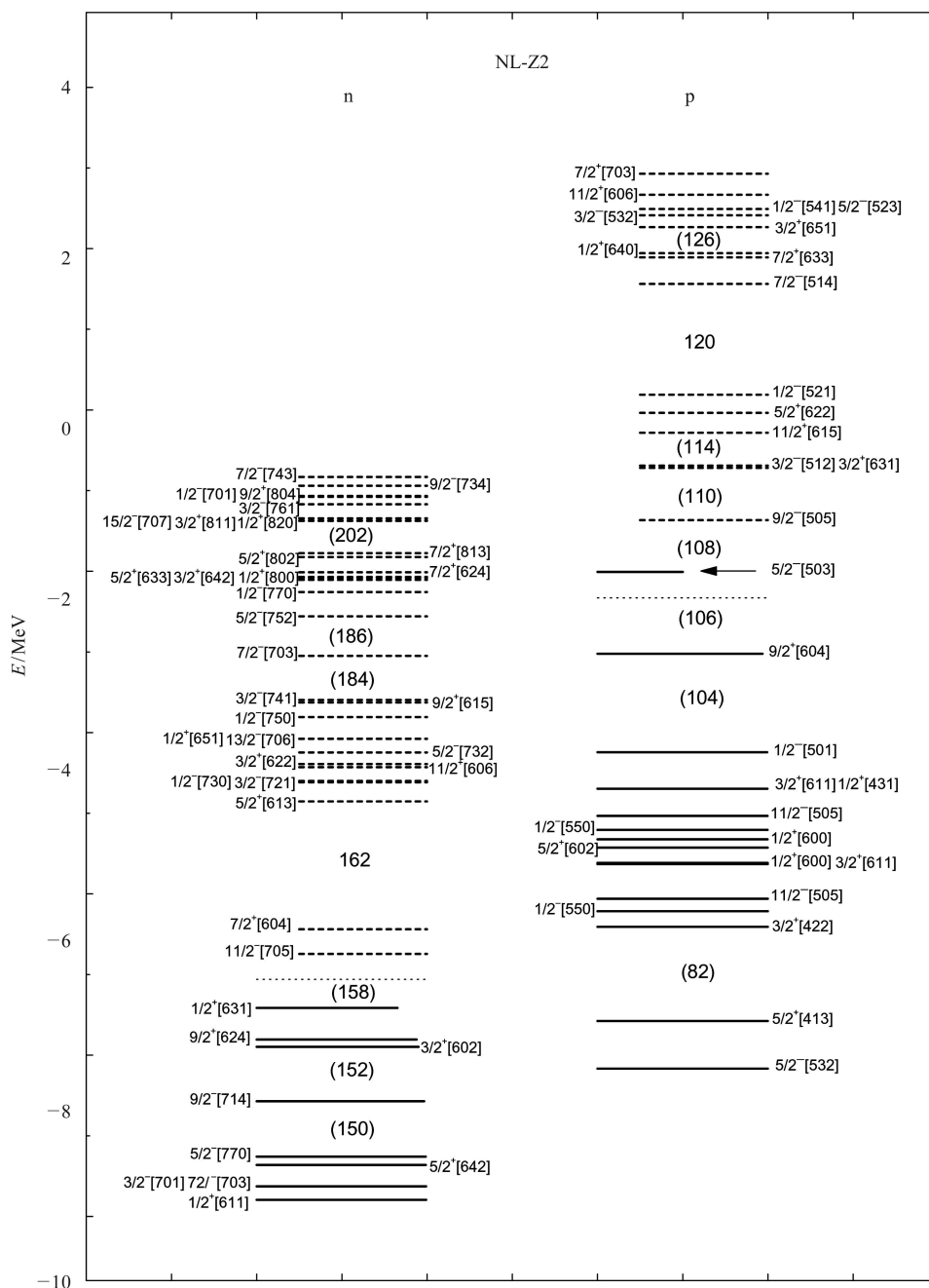


图2 用参数NL-Z2计算的 ^{265}Bh 的单粒子能级
横坐标每格长度代表占有一个核子。

参考文献(References)

- Hofmann S et al. Rep. Prog., 1998, **61**: 636
- Oganessian Y T et al. Nature, 1999, **400**: 242
- Oganessian Y T et al. Phys. Rev., 2000, **C62**: 041604(R)
- Hofmann S, Muenzenberg G. Rev. Mod. Phys., 2000, **72**: 733
- Oganessian Y T et al. Phys. Rev., 2000, **C63**: 011301(R)
- Oganessian Y T et al. Phys. Rev., 2004, **C69**: 021601
- GAN Zai-Guo, FAN Hong-Mei, QIN Zhi et al. High Energy Physics and Nuclear Physics, 2004, **28**(4): 332 (in Chinese)
(甘再国, 范红梅, 秦芝等. 高能物理与核物理, 2004, **28**(4): 332)
- GAN Z G, GUO J S, WU X L et al. Eur. Phys. J., 2004, **A20**: 385
- Gambhir Y K, Ring P, Thimet A. Ann. Phys., 1990, **198**: 132

- 10 LI Jun-Qing, MA Zhong-Yu, CHEN Bao-Qiu et al. Phys. Rev., 2002, **C65**: 064305
- 11 MENG J, Takiga N. Phys. Rev., 2000, **C61**: 064319
- 12 REN Zhong-Zhou. Phys. Rev., 2002, **C66**: 064306
- 13 REN Zhong-Zhou. High Energy Physics and Nuclear Physics, 2002, **26**(10): 1046 (in Chinese)
(任中洲. 高能物理与核物理, 2002, **26**(10): 1046)
- 14 CHEN Bao-Qiu, MA Zhong-Yu. High Energy Physics and Nuclear Physics, 2001, **25**: 309 (in Chinese)
(陈宝秋, 马中玉. 高能物理与核物理, 2001, **25**: 309)
- 15 ZHOU Yong, MA Zhong-Yu, CHEN Bao-Qiu et al. Chinese Phys. Lett., 2000, **17**: 185
- 16 Moeller P, Nix J R, Kratz K L. At. Data Nucl. Data Tables, 1997, **66**: 131
- 17 Ring P. Prog. Part. Nucl. Phys., 1996, **37**: 193
- 18 REN Zhong-Zhou, Toki H. Nucl. Phys., 2001, **A689**: 691
- 19 Sugahara Y. PhD Thesis. Tokyo Metropolitan University, 1994
- 20 Bend M, Rutz K, Reinhard P G et al. Phys. Rev., 1999, **C60**: 034304
- 21 ZHOU Yong, LI Jun-Qing, MA Zhong-Yu et al. High Energy Physics and Nuclear Physics, 2000, **24**: 65 (in Chinese)
(周勇, 李君清, 马中玉等. 高能物理与核物理, 2000, **24**: 65)
- 22 Ring P, Schuck P. The Nuclear Many-Body Problem. Springer, 1980. 229
- 23 ZHANG Hong-Fei, ZUO Wei, Soojae IM et al. The Commun. Theor.Phys., 2004, **42**: 871
- 24 CHEN Bao-Qiu, MA Zhong-Yu, RONG Jian et al. Nuclear Physics Review, 2003, **20**: 102 (in Chinese)
(陈宝秋, 马中玉, 荣健等. 原子核物理评论, 2003, **20**: 102)
- 25 ZHANG Hong-Fei, ZUO Wei, Soojae IM et al. Nuclear Physics Review, 2004, **21**: 203 (in Chinese)
(张鸿飞, 左维, 任秀宰等. 原子核物理评论, 2004, **21**: 203)
- 26 NING Ping-Zhi, LI Lei, MIN De-Fang. Nuclear Physics Foundation Nucleon and Nucleus. Beijing: Higher Education Press, 2003. 397 (in Chinese)
(宁平治, 李磊, 闵德芳. 原子核物理基础. 北京: 高等教育出版社, 2003. 397)

Ground State Properties of the Newly Discovered Nucleus ^{265}Bh and It's Alpha Decay Chain^{*}

ZHANG Hong-Fei^{1,2;1)} ZUO Wei^{1,3} LI Jun-Qing^{1,3} Soojae IM¹ MA Zhong-Yu^{3,4} CHEN Bao-Qiu^{3,4}

1 (Institute of Modern Physics, the Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

2 (Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

3 (Center of Nuclear Theoretical Physics, National Laboratory of Heavy Ion Accelerator of Lanzhou, Lanzhou 730000, China)

4 (China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

Abstract The properties of the nuclei belonging to the newly discovered alpha-decay chain starting from ^{265}Bh have been studied. The axially deformed relativistic mean field (RMF) calculation with the force TMA and NL-Z2 has been performed in the blocked BCS approximation. Some ground state properties such as the binding energies, deformations, spins and parities, as well as Q -values of the alpha decay for this decay chain have been calculated and compared with known experimental data. Good agreement is observed. The single-particle spectrum of the nucleus ^{265}Bh has been studied.

Key words relativistic mean field theory, superheavy nuclei, quadrupole deformation, alpha-decay energy

Received 26 December 2004

^{*}Supported by National Natural Science Foundation of China (10175082, 10235020, 10235030, 10275094, 10075080), Major Basic Research Development Program(G2000077407, G2000077400), Knowledge Innovation Project of the Chinese Academy of Sciences (KJXC2-SW-N02), 100 Talents Programme of CSA, and National Key Program for Basic Research of the Ministry of Science and Technology (2001CCB01200, 2002CCB01200)

1) E-mail: zhanghongfei@impcas.ac.cn