

164—182 Hf 核的低能谱和电磁跃迁的 相互作用玻色子模型*

范体贵¹⁾ 吕立君 张进富

(赤峰学院物理系 赤峰 024001)

摘要 采用相互作用玻色子模型研究了^{164—182}Hf 偶偶核的低能谱和电磁跃迁, 应用一个 $U(5) \rightarrow SU(3)$ 简化哈密顿量很好的描述它们的低能谱和电磁跃迁过渡. 结果表明^{164—182}Hf 同位素核基本上属于 $U(5) \rightarrow SU(3)$ 的过渡核.

关键词 能谱 电磁跃迁 低能正宇称集体态

1 引言

Hf 核实验资料较为丰富, 核素结构较为复杂, 是核物理领域中研究的典型对象. 人们常以 Hf 核为例来验证各种模型及各种微观理论方案的正确性. 如石筑一等从壳模型组态及核子-核子有效相互作用出发, 提出了一种在截断的态空间中研究偶-偶核高自旋态的理论方案^[1, 2], 并用这一微观理论方案给出了¹⁶⁶Hf, ¹⁶⁸Hf 低能激发的计算结果, 表明该理论方案能很好的描述稀土区偶-偶核高自旋态的性质. 龚伦训等用处理推转壳模型的粒子数守恒(PNC)方法分析了稀土变形核^{172—174}Hf 的基带和低激发高 K 带的运动学转动惯量 $j^{(1)}$ 随角频率的变化及其微观机制, 特别是被拆散核子的 Pauli 堵塞效应^[3, 4]. 相互作用玻色子模型(IBM)在处理中、重偶-偶核的集体运动性质方面非常有效. 我们采用相互作用玻色子模型, 应用一个 $U(5) \rightarrow SU(3)$ 简化哈密顿量对^{164—182}Hf 偶-偶核的低能谱和电磁跃迁作了较为系统的计算, 结果表明^{164—182}Hf 基本处于振动到转动区域, 是 $U(5) \rightarrow SU(3)$ 的过渡核.

2 哈密顿量

IBM 普适哈密顿量包括 7 项, 我们的计算采用如下

多极展开形式的简化哈密顿量.

$$\hat{H} = \varepsilon_d \hat{n}_d + K \hat{Q} \cdot \hat{Q} + K_L \hat{L} \cdot \hat{L},$$

其中

$$\hat{Q}_\mu = (\hat{s}^+ \hat{d} + \hat{d}^+ \hat{s})^2 + \chi (\hat{d}^+ \hat{d})^2_\mu, \\ \hat{L}_q = \sqrt{10} (\hat{d}^+ \hat{d})_q^{(1)}, \quad \chi = -\sqrt{7}/2.$$

上述符号的意义与通常的 IBM 文献相同. 哈密顿量包括 3 项, 第一项是单粒子能量, 第二项是电四极相互作用, 第三项是单极相互作用. ε_d , K , K_L 是反应各项作用强度的参数, 上述哈密顿量中如果 $\varepsilon_d = 0$, 此哈密顿简化为 $SU(3)$ 哈密顿量; 如果 $K = 0$, 则它成为描述集体振动的 $U(5)$ 哈密顿量. $K_L(\hat{L} \cdot \hat{L})$ 项只是对 L 能级的一个修正项, 所以当给定系统的玻色子数, 上述哈密顿主要由两个参数 ε_d 和 K 决定, 因此 k/ε_d 决定了 $U(5)$ 到 $SU(3)$ 的变化趋势. $k/\varepsilon_d = 0$ 和 $k/\varepsilon_d = \infty$ 分别对应于振动和转动极限, 一般情况下, 为介于两者的过渡区. 在实际计算中, 这些参数是可调的, 使得能谱的理论值和实验值趋于一致.

3 计算结果和讨论

表 1 列出了^{164—182}Hf 同位素核哈密顿量中的有关参数. 由表 1 可知所有核的参数变化比较平滑, ε_d 随着

* 国家自然科学基金(10047001, 10265001)和内蒙古教育厅重大项目基金(ZD01038)资助

1) E-mail: fantigui@sina.com

中子数的增加而减小, 而 K 值都很小. ε_d 大的能谱更接近振动极限, 而 ε_d 小的能谱更接近转动极限, 这反映了 Hf 同位素核激发态的能量变化及核的形状共存特点. 另外 e_2 参数的变化也很小. 运用这些参数计算了每个核的能级和电四极跃迁值.

表 1 计算能谱和电四极跃迁的参数值

nucleus	ε_d/MeV	K/MeV	K_L/MeV	e_2/eb
^{164}Hf	0.475	-0.012	0.006	0.1160
^{166}Hf	0.275	-0.013	0.013	
^{168}Hf	0.165	-0.013	0.0125	
^{170}Hf	0.145	-0.012	0.011	0.1167
^{172}Hf	0.135	-0.011	0.010	0.1013
^{174}Hf	0.132	-0.010	0.010	0.0950
^{176}Hf	0.105	-0.012	0.0095	0.0984
^{178}Hf	0.086	-0.013	0.0095	0.0980
^{180}Hf	0.068	-0.013	0.010	0.1040
^{182}Hf	0.062	-0.0135	0.0105	

3.1 能谱

图(1—5)显示了 164 — ^{182}Hf 核的理论和实验能谱^[5,6]的对比. 总体上理论值和实验值符合的很好, 特别是基带, γ 带和第一个 β 带, 各能级理论值与实验值的差别在预料之中, 其原因是没有考虑多带耦合等因素.

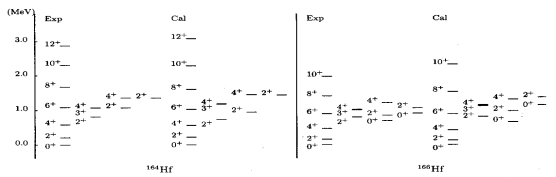


图 1 ^{164}Hf 和 ^{166}Hf 核的计算能谱与实验谱的比较

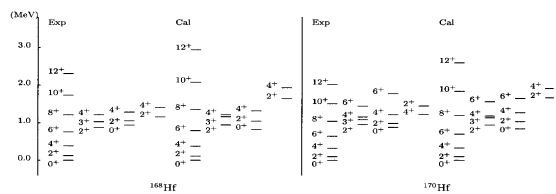


图 2 ^{168}Hf 和 ^{170}Hf 核的计算能谱与实验谱的比较

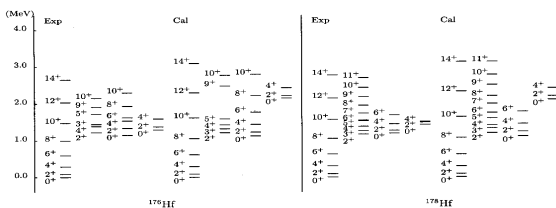


图 3 ^{172}Hf 和 ^{174}Hf 核的计算能谱与实验谱的比较

164 — ^{168}Hf 理论值与实验值符合的很好. ^{164}Hf 的三声子态的实验值几乎不存在能级分裂现象, 而理论计算的结果则存在着明显的能级分裂, 可能的原因除与参数的选取有关外, 还与没有考虑多带耦合等因素有关. ^{166}Hf 三声子态的能级分裂较小, 反映了原子核集体振动时存在一个非谐振作用项. 两声子态的能级分裂较大, 这很难用一个非谐振作用项来解释, 可能和单粒子的激发有关. ^{168}Hf 核的激发态上表现出了低能 γ 振动带 ($K=2$) 能谱中普遍存在的 staggering 现象. 虽然实验结果也存在明显的 staggering 现象, 但实验所观察到的能谱要比理论计算的结果均匀的多^[7], 为解决这一问题 IBM1 中引入核子相干对 D 间的三体相互作用, 在 IBM2 中, Sevrin A 等在原子核的哈密顿量中引入三轴转子势^[8], 龙桂鲁等在 IBM2 中引入同类玻色子四极相互作用^[9] 而使得原子核能谱的 staggering 现象得以改善. 我们也发现了第二个 β 带的理论值偏高.

174 — ^{180}Hf 的 g 带和 γ 带理论值与实验值符合的很好, 但第一个 β 带的 0_2^+ , 2_3^+ 的理论值普遍偏低, 而第二个 β 带的理论值普遍偏高. 激发态上仍表现出了 staggering 现象.

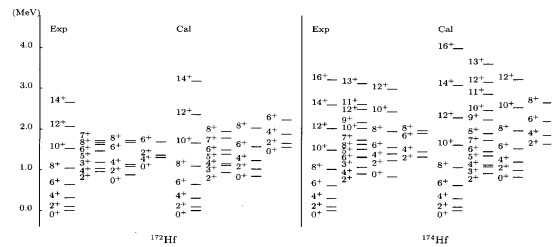


图 4 ^{176}Hf 和 ^{178}Hf 核的计算能谱与实验谱的比较

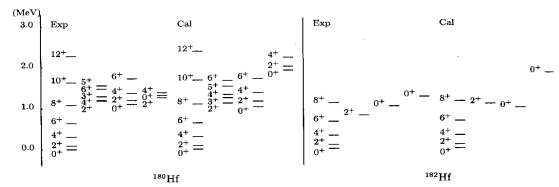


图 5 ^{180}Hf 和 ^{182}Hf 核的计算能谱与实验谱的比较

3.2 电磁跃迁

通过计算能谱及得到的相应波函数, 也可以计算电磁跃迁几率. 例如 E2 跃迁算符:

$$\hat{T}(E2)_\mu^2 = e_2 \left[(\hat{s}^+ \hat{d} + \hat{d}^+ \hat{s})_\mu^2 + \chi (\hat{d}^+ \hat{d})_\mu^2 \right]$$

上述符号的意义与通常的 IBM 文献相同. 运用表 1 列出的 e_2 参数计算了每个核的电四极跃迁值, 所

有数据列于表2, 并对 $B(E2)$ 值的理论和实验数据作了对比.

从表2可以看出, 计算值和现有的实验值符合的很好. 如果用 Δn 表示跃迁各态间的声子数差, 我们发现一部分 $\Delta n=1$ 各态间跃迁的 $B(E2)$ 值很大, 说明这几个核具有较强的振动性($U(5)$ 对称性), 另外也有一部分 $\Delta n=1$ 各态间跃迁(主要指 γ 带向 g 带跃迁)的 $B(E2)$ 值很小, 如 ^{178}Hf 同位素核的 $2_2^+ \rightarrow 2_1^+$ $B(E2)$ 的实验值为 $261(\text{e}^2\text{fm}^4)$ 而理论值为 $3(\text{e}^2\text{fm}^4)$, 这也说明这些核又具有转动性($SU(3)$ 对称性)或者说主要是由于 $SU(3)$ 极限跃迁的选择定则 $\Delta\lambda=0$ 和 $\Delta\mu=0$ 决定的, 由于 β 带和 γ 带属于相同的 $SU(3)$ 表示 ($\lambda=2N-4, \mu=0$), 而 g 带属于 $SU(3)$ 的另一表示 ($\lambda=2N, \mu=0$), 也就是 γ 带向 g 带跃迁主要是由 $SU(3)$ 对称性的一些小破缺项引起的, 所以这样的跃迁是很弱的. 此外对核 $^{174-176}\text{Hf}$ 的 $B(E2, 2_2^+ \rightarrow 0_1^+)$ 其跃迁几率不为0的事实可能暗示存在着一定程度的对称破缺. 另外我们还发现声子数差 $\Delta n=0$ 各态间跃迁的 $B(E2)$ 的值都很小.

4 结论

应用相互作用玻色子模型研究了 $^{164-182}\text{Hf}$ 同位素核的能谱和电四极跃迁. 结果表明 $^{164-182}\text{Hf}$ 同位素核可以用一个 $U(5)$ 到 $SU(3)$ 的哈密顿量来描述, 或者说 $^{164-182}\text{Hf}$ 同位素核是 $U(5)$ 到 $SU(3)$ 的过渡核. 同时我们也发现理论和实验结果还存在一定偏差, 说明在哈密顿量中必须考虑其它的作用项, 如对作用等, 但总体上二者符合的很好.

表 2 $^{164-180}\text{Hf}$ 同位素核电磁跃迁的 $B(E2)$ 理论和相应的实验值^[5]

nucleus	J_i	J_f	Expt/ e^2fm^4	Cal/ e^2fm^4
^{164}Hf	2_1^+	0_1^+	3039	3036
	4_1^+	2_1^+	5492	5358
	6_1^+	4_1^+	9064	6444
	8_1^+	6_1^+	5865	6892
^{170}Hf	2_1^+	0_1^+	10069	10067
	4_1^+	2_1^+	14544	14196
	6_1^+	4_1^+	14432	15267
	8_1^+	6_1^+	16782	15424
^{174}Hf	2_1^+	0_1^+	8771	8775
	2_2^+	0_1^+	121	6
	2_3^+	0_1^+	276	5
	2_4^+	4_1^+	0	0
	6_3^+	4_1^+	0	2
	2_1^+	0_1^+	10721	10723
^{176}Hf	2_2^+	0_1^+	58	2
	6_2^+	6_1^+	0	7
	6_2^+	4_1^+	0	1
^{178}Hf	2_1^+	0_1^+	9457	9459
	2_3^+	0_1^+	3	1
	2_4^+	0_1^+	18	0
	2_2^+	4_1^+	15	6
	2_2^+	2_1^+	261	3
	2_4^+	4_1^+	5	0
	6_1^+	4_1^+	13025	14462
	8_1^+	6_1^+	14095	14728
^{180}Hf	10_1^+	8_1^+	15285	14575
	12_1^+	10_1^+	15226	14138
	14_1^+	12_1^+	17248	13475
	2_1^+	0_1^+	9357	9360
	4_1^+	2_1^+	13885	13218
	6_1^+	4_1^+	13221	14253
	8_1^+	6_1^+	15092	14460
	10_1^+	8_1^+	14489	14233
	12_1^+	10_1^+	14006	13708

参考文献(References)

- SHI Z Y, DAN H J, ZHANG Z J et al. Journal of Central China Normal University(Nat.Sci.), 1998, **32**(1): 34 (in Chinese)
(石祝一, 但汉久, 张战军等. 华中师范大学学报(自然科学版), 1998, **32**(1): 34)
- SANG J P, DAN H J, LIU Y. J. Wuhan. Univ. (Natural Science Edition), 1996, **42**(3): 321(in Chinese)
(桑建平, 但汉久, 刘庸. 武汉大学学报(自然科学版), 1996, **42**(3): 321)
- GONG L X, LIU S X, ZHU H B et al. HEP & NP, 2002, **26**(2): 164(in Chinese)
- GONG L X, LIU S X, ZHU H B et al. HEP & NP, 2002, **26**(4): 371(in Chinese)
(龚伦训, 刘树新, 朱红波等. 高能物理与核物理, 2002, **26**(4): 371)
- CHU S Y, Hordberg H, Firestone R B et al. Isotopes Explorer 2.00, April 5, 1997
- Grigoriev, Gladkova. Physics of Atomic Nuclei., 2000, **63**: 700
- Casten R F, Brensno P Von. Phys lett., 1995, **152B**: 22
- LONG G L. Phys. Rev., 1997, **C55**: 3163
- LONG G L, LIU Y X, SUN H Z. J. Phys., 1990, **G16**: 813

Low-Lying Spectra and Electromagnetic Transition Rates in $^{164-182}\text{Hf}$ in the Interacting Boson Model*

FAN Ti-Gui¹⁾ LÜ Li-Jun ZHANG Jin-Fu

(Department of Physics, Chifeng University, Chifeng 024001, China)

Abstract Spectra and E2 transition for the even-even $^{164-182}\text{Hf}$ isotopes are studied in the framework of the interacting boson model. A schematic Hamiltonian can be used to describe their spectra and E2 transition. The results show that $^{164-182}\text{Hf}$ are in the transition from the vibrational limit to rotational limit.

Key words spectra, electromagnetic transition, positive parity collective state

* Supported by National Natural Science Foundation of China(10047001, 10265001) and Key Scientific Research Fund of Inner Mongolian Educational Bureau (ZD01038)

1) E-mail: fantigui@sina.com