

^{178}Hf 同质异能态的 γ 自由度*

图雅^{1;1)} 陈永寿^{1;2;2)} 高早春^{1;3)}

1(中国原子能科学研究院 北京 102413)

2(中国科学院理论物理研究所 北京 100080)

摘要 采用三轴投影壳模型 (TPSM) 对 ^{178}Hf 已发现的 6 条转动带进行了计算. 在 $\gamma = 22^\circ$ 时, 很好再现了 γ 带. 在相同 γ 形变下预言了 $^{178m2}\text{Hf}(16^+)$ 态的 γ 态 ($I^\pi = 14^+$) 的存在, 其带头位置在 $^{178m2}\text{Hf}(16^+)$ 态之上大约 900keV 处. 该 14^+ 态与 16^+ 同质异能态具有相同的内禀组态, 因此, 应较容易从 16^+ 态激发上去. 我们希望, 该 14^+ 态有可能比 $^{178m2}\text{Hf}(16^+)$ 态有更多的机会跃迁到基带, 从而实现 $^{178m2}\text{Hf}(16^+)$ 的退激.

关键词 同质异能态 γ 自由度 三轴投影壳模型

1 引言

同质异能态是原子核的一种长寿命激发态. 由于其较高的激发能, 同质异能态退激可以释放出很大的能量, 尤其对于某些很长寿命的同质异能态可以作为理想的储能介质, 被认为有巨大的潜在应用前景, 例如: 研发新的能量储存技术、高能 γ 激光等. 因此, 掌握原子核同质异能态的形成, 激发和退激机制成为当今科学研究的新挑战.

同质异能态的研究一直是核结构的前沿领域^[1-5], 也是各国争相研究的热点课题. 其中, 对 $^{178m2}\text{Hf}(16^+)$ 态的研究最为引人注目. 它不仅有很长的寿命 (31 年) 而且也有很高的激发能 (2.4MeV), 是非常理想的储能介质. 然而迄今为止, $^{178m2}\text{Hf}$ 的生产 and 退激机制还没有最终解决. 本工作探索 $^{178m2}\text{Hf}$ 的可能退激途径. 即首先将 $^{178m2}\text{Hf}$ 激发到某些中间态, 再经过一系列电磁跃迁到达基态, 从而达到释放能量的目的. 我们研究发现, 引入 γ 自由度, 可以很好再现 ^{178}Hf 的 γ 带, 同时, 我们的计算给出了基于 $^{178m2}\text{Hf}$ 组态的 γ 振动带的预言, 可以考虑将其作为 $^{178m2}\text{Hf}$ 退激的候选中间态.

2 三轴投影壳模型

在投影壳模型中引入 γ 自由度就发展为三轴投影壳模型 (TPSM), Sheikh 等建立了只含准粒子真空态的模型^[6]. 最近, 我们建立了含有多准粒子组态的三轴投影壳模型^[7], 使得对原子核的多准粒子组态, 如本文要研究的两准粒子组态的多准粒子组态的描述得以实现. 在纯组态近似下, TPSM 波函数为

$$|\Psi\rangle = \sum_{IK} F_K^I \hat{P}_{MK}^I |\Phi\rangle,$$

其中 $|\Phi\rangle$ 为有三轴形变的内禀组态, 这里它表示准粒子真空态, 两准粒态以及四准粒子态等, 其相应能量及其波函数由 TPSM 本征方程决定

$$\sum_K (H_{K'K}^I - E^I N_{K'K}^I) F_K^I = 0,$$

其中 $H_{K'K}^I = \langle \Phi | H P_{K'K}^I | \Phi \rangle$, $N_{K'K}^I = \langle \Phi | P_{K'K}^I | \Phi \rangle$. F_K^I 满足归一化条件

$$\sum_{K'K} F_{K'}^I N_{K'K}^I F_K^I = 1$$

* 国家自然科学基金 (10475115, 10305019, 10435010) 和国家重点基础研究发展规划项目 (G2D000774) 资助

1) E-mail: tuyu@iris.ciae.ac.cn

2) E-mail: yschen@iris.ciae.ac.cn

3) E-mail: zcgao@iris.ciae.ac.cn

这里TPSM哈密顿量的形式为: (详见文献[6])

$$H = H_0 - \frac{1}{2} \sum_{\lambda=2}^4 \chi_{\lambda} \sum_{\mu=-\lambda}^{\lambda} Q_{\lambda\mu}^{\dagger} Q_{\lambda\mu} - G_0 P_{00}^{\dagger} P_{00} - G_2 \sum_{\mu=-2}^2 P_{2\mu}^{\dagger} P_{2\mu}.$$

3 ^{178}Hf 的计算结果及分析

计算中所需要的Nilsson参数, 对质子4, 5, 6 3个大壳, $\kappa = 0.0636$, $\mu = 0.393$, 对质子3, 4, 5 3个大壳 $\kappa = 0.062$, $\mu = 0.614$ ^[8]. 形变参数取 $\epsilon_2 = 0.28$, $\epsilon_4 = 0.06$, 单极对力强度取为 $G_0 = \left(20.46 \mp 10.86 \frac{N-Z}{A}\right)/A$ (其中, 负号对应中子, 正号对应质子), 由此所得的能隙可以很好再现两准粒子带的位置. 通过计算, 我们发现当 $\gamma = 22^\circ$ 时, 不仅可以再现实验观测的多准粒子带 (如图1), 还可以很好地

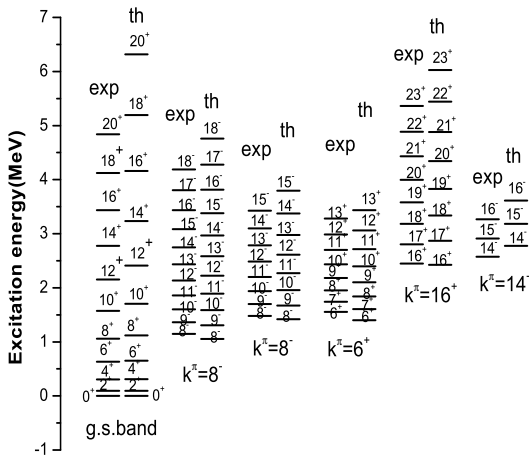


图1 $\gamma = 22^\circ$ 时 ^{178}Hf 能谱计算结果与实验比较

再现实验的 γ 带^[9-11] (如图2(a)). 如果我们假定 $^{178m2}\text{Hf}$ 的内禀组态也具有如基态一样的 γ 自由度, 并进一步假定 $\gamma = 22^\circ$, 则基于 $^{178m2}\text{Hf}$ 内禀组态之上会有若干条转动带的存在 (如图2(b)). 其中, 我们注意到带头为 14^+ 的转动带处于 $^{178m2}\text{Hf}$ 之上, 约 900keV 处, 由于它们均属于相同的内禀组态, 从 16^+ 态向 14^+ 激发比较容易实现. 实验验证 14^+ 态的存在有两方面的意义, 其一, 14^+ 态的存在意味着 $^{178m2}\text{Hf}$ γ 自由度的存在, 则该体系不具有好量子数 K , 可以增加两态

之间的电磁跃迁几率. 然而, K 是好量子数时, K 值相差很大的两态之间的跃迁是禁止的. 其二, 14^+ 的存在本身又可能成为 $^{178m2}\text{Hf}$ 实现退激途中的一座可能的桥梁. 因此, 能否验证 14^+ 态的存在是一项有挑战性的课题.

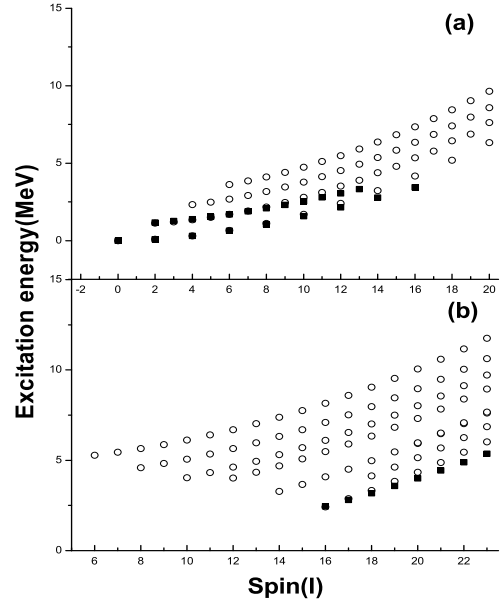


图2 ^{178}Hf γ 带的计算 (图中, 实心圈为实验值, 而空心圈为理论计算值)
(a) 基带及基于其上的 γ 带的能谱计算结果与实验比较; (b) $^{178m2}\text{Hf}(16^+)$ 态及基于其上的 γ 带的能谱计算结果与实验比较.

4 总结

本工作中, 我们采用三轴投影壳模型理论, 对 ^{178}Hf 实验上已发现的6条转动带进行了计算, 当 γ 取 22° 时得到的结果不仅很好地符合了实验, 还可以很好地再现了 γ 带, 并预言了另外两条更高的 γ 带和基于 $^{178m2}\text{Hf}(16^+)$ 态上的几条边带. 其中, γ 带 (14^+) 带头位置在 $^{178m2}\text{Hf}(16^+)$ 态之上大约 900keV 处. 由于该 14^+ 态与 16^+ 同质异能态具有相同的内禀组态, 应该比较容易从 16^+ 态激发上去. 同时我们希望, 通过 γ 自由度引起的 K 混合, 该 14^+ 态将比 $^{178m2}\text{Hf}(16^+)$ 态有更多的机会跃迁到基态带, 从而实现 $^{178m2}\text{Hf}(16^+)$ 的退激. 实验如果证实该 14^+ γ 带的存在, 实现 $^{178m2}\text{Hf}$ 的退激有可能增加一条途径.

参考文献(References)

- 1 Apranamian A, Sun Y. *Nature Phys.*, 2005, **1**: 80—81
- 2 Walker P M, Carroll J J. *Phys. Today*, 2005, **58**: 39—44
- 3 Walker P M, Dracoulis G D. *Nature*, 1999, **399**: 35—40
- 4 Sherman M S. *Science Technol. Rev.*, 2005, July/August: 24—25
- 5 Ahmad I, Banar J C, Becker J A et al. *Phys. Rev.*, 2005, **C71**: 024311
- 6 Sheikh J A, Hara K. *Phys. Rev. Lett.*, 1999, **82**: 3968
- 7 GAO Z C, SUN Y, CHEN Y S. *Phys. Lett.*, 2006, **B634**:195
- 8 Jain, Sheline, Sood. *Rev. Mod. Phys.*, 1990, **62**: 400
- 9 Hayes A B, Cline D, WU C Y et al. *Phys. Rev. Lett.*, 2002, **89**: 242501
- 10 Mullins S M, Dracoulis G D, Byrne A P et al. *Phys. Lett.*, 1997, **B400**: 401
- 11 Mullins S M, Dracoulis G D, Byrne A P et al. *Phys. Lett.*, 1997, **B393**: 279—284

 γ Degree of Freedom for the ^{178}Hf Isomeric State^{*}Tuya^{1;1)} CHEN Yong-Shou^{1;2;2)} GAO Zao-Chun^{1;3)}

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

2 (Institute of Theoretical Nuclear Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract We have performed calculations for the six rotational bands in ^{178}Hf which have been found experimentally by using triaxial projected shell model (TPSM). The γ band can be well reproduced with $\gamma = 22^\circ$. By using the same γ value, the present calculations predict a γ -band built on $^{178m2}\text{Hf}(16^+)$ state, and its band head ($I = 14^+$) lies about 900keV above the $^{178m2}\text{Hf}(16^+)$ state. This 14^+ state should be rather easily excited from the 16^+ isomeric state because of the same intrinsic configuration of these two states. It is hope that the 14^+ state could have more probable chance to decay into the ground state band than that from the $^{178m2}\text{Hf}(16^+)$ state, and then to realize the de-excitation of the isomeric state.

Key words isomeric state, γ degree of freedom, triaxial projected shell model

* Supported by National Natural Science Foundation of China (10475115, 10305019, 10435010) and Major State Basic Research Development Program (G2D000774)

1) E-mail: tuyu@iris.ciae.ac.cn

2) E-mail: yschen@iris.ciae.ac.cn

3) E-mail: zcgao@iris.ciae.ac.cn