

1f_{7/2} 壳层不同种核子组态核能谱 与两体自旋轨道耦合作用

王元 庄勤

(东北师范大学)

摘 要

本文采用中心力加两体自旋轨道耦合力作剩余相互作用,用纯组态壳模型计算了 1f_{7/2} 壳层不同种核子组态原子核⁴³Sc, ⁴⁴Ti, ⁵²Fe, ⁵³Fe, ⁵³Co 等能谱。计算结果与实验值符合程度令人满意。从而表明两体自旋轨道耦合作用对于 1f_{7/2} 壳层不同种核子组态原子核能谱的影响也是重要的。

一、引 言

近些年来,对 1f_{7/2} 壳层核作了大量实验和理论研究工作。在壳模型计算中,除了广泛应用有效相互作用方法^[1-5]之外, Балашов^[6] 和李友松等^[7] 用两体自旋轨道耦合力分别计算过⁷Li 和 1p 壳层核能谱,得到了比较好的结果。陈小暑和张庆营^[8] 用中心力加两体自旋轨道耦合力计算了部分 1f_{7/2} 壳层纯中子和纯质子组态核的能谱,得到了满意的结果。

不同种核子组态比同种核子组态要复杂得多,能谱更丰富,计算量也更大。对于同种核子组态, JM 确定之后波函数就唯一地确定了,而不同种核子组态则必须考虑不同前缀波函数的重新组合,自旋轨道耦合力还要通过波函数分布的改变而起作用。有效相互作用理论一般只能解稀交叉共厄对中的一个核的能谱,共厄对中的另一个核理论给出的能级次序与实验不符^[2,5]。而用自旋轨道耦合力所作的同种核子组态工作在这一点上也无法同有效相互作用理论作比较。因此,考察 1f_{7/2} 壳层不同种核子组态两体自旋轨道耦合力在引起能级劈裂和改善理论与实验符合程度所起的作用,便是本文的目的。

二、能谱计算

我们所采用的剩余相互作用为

$$V_{ij} = (W + HP_H + MP_M + BP_B) \frac{e^{-\mu r}}{\mu r} (-V_0) + \frac{V_0 d}{\mu^2 r d(\mu^2 r)} \cdot \frac{e^{-\mu^2 r}}{\mu^2 r} \mathbf{L} \cdot \mathbf{S} \quad (1)$$

式中第一部分是中心交换势^[8], 交换参数可调且满足^[9] $W + M + B - H = 1$. 后一项是自旋轨道作用项, 其中

$$S = \frac{1}{2} (\sigma_1 + \sigma_2), \quad L = (r_1 - r_2) \times \frac{1}{2} (P_1 - P_2). \quad (2)$$

这里我们没有计入库伦项. 我们作过实际计算, 库伦项对能谱影响是很小的. 自洽场采用谐振子势:

$$V(r) = \frac{1}{2} m\omega^2 r^2. \quad (3)$$

这样径向波函数即是谐振子波函数. j^n 组态反对称波函数采用

$$\begin{aligned} |j^n[\lambda]JT\rangle^A &= \sqrt{\frac{1}{f[\lambda]}} \sum_r (-1)^{P_r} |(r)[\lambda]JM\rangle |(\bar{r})[\bar{\lambda}]TM_r\rangle \\ &= \sum_{[\lambda^1]\alpha^1 J^1 T^1} \langle [\lambda^1]\alpha^1 J^1 T^1 | \{[\lambda]\alpha JT\} | j^{n-1}[\lambda^1]\alpha^1 J^1 T^1 j_n, JT \rangle^A. \end{aligned} \quad (4)$$

其中 $\langle [\lambda^1]\alpha^1 J^1 T^1 | \{[\lambda]\alpha JT\}$ 是 FP 系数, 这样多个核子相互作用矩阵元可用二体矩阵元的组合表出. 计算二体矩阵元所用二体波函数是

$$\begin{aligned} |j^2 J M T M_\tau\rangle^A &= |j^2 J M\rangle \left| \left(\frac{1}{2}\right)^2 T = 0 \quad M_\tau = 0 \right\rangle, \quad J = \text{奇数} \\ |j^2 J M T M_\tau\rangle^A &= |j^2 J M\rangle \left| \left(\frac{1}{2}\right)^2 T = 1 \quad M_\tau \right\rangle. \quad J = \text{偶数} \end{aligned} \quad (5)$$

具体计算二体矩阵元时, 首先将波函数的自旋空间部分由 jj 耦合表象化成 ls 耦合表象, 而同位旋子空间不变:

$$\begin{aligned} |(j_1, j_2) J M T M_\tau\rangle^A &= \sum_{SL} \sqrt{(2j_1 + 1)(2j_2 + 1)(2S + 1)(2L + 1)} \begin{Bmatrix} \frac{1}{2} & l_1 & j_1 \\ \frac{1}{2} & l_2 & j_2 \\ S & L & J \end{Bmatrix} \\ &\cdot |l_1 l_2 S L J\rangle \left| \left(\frac{1}{2}\right)^2 T M_\tau \right\rangle. \end{aligned} \quad (6)$$

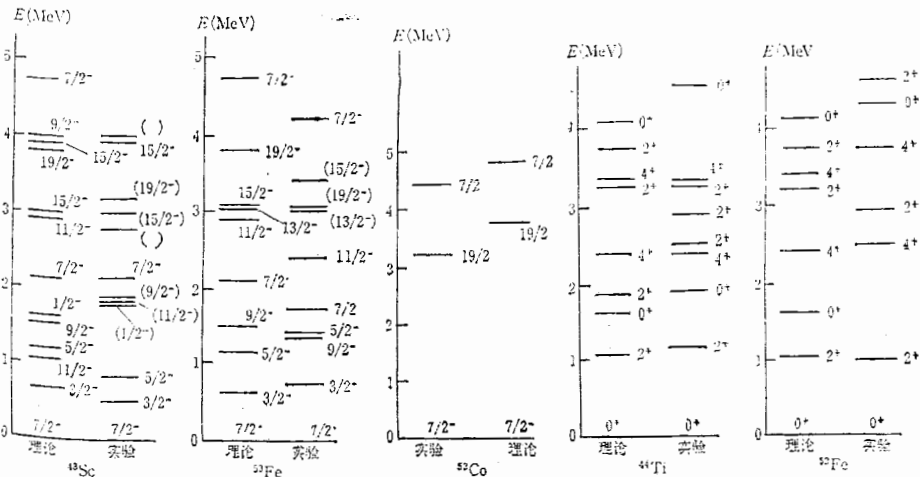


图 1 能谱图

泛
· 别
本
自
是。
同
种
核
子
互
相
的
上
也
首
耦
的。

(1)

然后再利用广义 Talmi 系数^[10]化成质心和相对坐标表象波函数

$$|(n_1 l_1)(n_2 l_2); {}^{2T+1, 2S+1} L_{JM}\rangle = \sum_{n\Lambda, N\lambda, J_0} \langle \lambda \mu, J_0 M_0; JM \rangle \cdot U(\lambda \Lambda JS; L J_0) \begin{matrix} n_1 l_1 \\ n_2 l_2 \end{matrix} \left| \begin{matrix} N\lambda \\ n\Lambda \end{matrix} \right. \begin{matrix} TSL \\ n\Lambda \end{matrix} \right| n\Lambda T S J_0 M_0(\mathbf{r}) \rangle \Psi_{\lambda \mu}^N(\mathbf{R}). \quad (7)$$

这样就可以用(1)式给出的剩余作用计算矩阵元和能谱。所得结果列于表1和图1,并与实验值作了比较。实验数据取自文献[11,12]。

表1 能级理论值与实验值比较

参数 $W = -0.231, H = -1.61, B = 0.500$

核	J^π	理论值	实验值	误差 (理-实)	核	J^π	理论值	实验值	误差 (理-实)	
⁴³ Sc	7/2	0	0	0	⁵² Fe	0	0	0	0	
	3/2	0.672	0.472	0.200		2	1.005	0.850	0.155	
	5/2	1.119	0.845	0.274		0	1.596	—	—	
	(1/2)	1.552	1.811	-0.259		2	1.860	—	—	
	(11/2)	1.083	1.830	-0.747		4	2.372	2.386	-0.014	
	(9/2)	1.483	1.884	-0.401		2	3.243	2.760	0.483	
	(7/2)	2.159	2.143	0.016		4	3.356	3.586	-0.230	
	11/2	2.912	2.890	0.022		2	3.747	—	—	
	(15/2)	3.056	2.987	0.069		0	4.062	4.146	-0.084	
	(19/2)	3.857	3.123	0.734		⁵³ Co	7/2	0	0	0
	(5/2)	3.884	3.934	0.050			(19/2)	3.857	3.190	0.667
9/2	3.942	—	—	(7/2)	4.390		4.755	0.365		
7/2	4.755	—	—	7/2	0		0	0		
17/2	2.007	—	—	3/2	0.672		0.741	0.069		
				11/2	1.083		—	—		
				9/2	1.483		1.328	0.115		
⁴⁴ Ti	0	0	0	0	5/2	1.119	1.423	-0.304		
	2	1.005	1.083	0.078	1/2	1.552	—	—		
	0	1.596	1.904	-0.308	⁵³ Fe	7/2	2.159	1.696	0.463	
	4	2.372	2.454	-0.082		11/2	2.912	2.340	0.572	
	2	1.860	2.531	-0.671		(15/2)	3.056	3.463	-0.413	
	2	3.243	2.886	0.357		13/2	3.061	3.176	-0.115	
	2	3.747	3.176	0.571		19/2	3.857	3.041	0.816	
	4	3.356	3.365	-0.009		7/2	4.755	—	—	
0	4.061	4.610	-0.549	17/2	2.007	—	—			

(有圆括号表示实验数据不确定)

三、对结果的讨论

从所得结果可以看出,可调参数只有三个,而实验数据多达几十个;第一激发态均方根误差小于0.15MeV,第二激发态小于0.10MeV,总体均方根误差小于0.3MeV.理论与实验值符合程度感到满意.能级的分布和次序基本再现了实验结果.只在少数几处能级次

序发生颠倒, ^{43}Sc 的 $5/2^-$ 和 $11/2^-$ 颠倒. 还有几处是实验上很靠近的能级次序颠倒, 这就 ^{44}Ti 的 2^+ 、 4^+ 和 ^{53}Fe 的 $5/2^-$ 、 $9/2^-$. 由于这些能级间隔很小, 如 ^{53}Fe 的 $5/2^-$ 和 $9/2^-$ 间隔仅有 0.09MeV , 那么我们没有计入的其它效应所产生的微小影响都可能改变这些能级次序. Fortuna 等人^[2]就曾经指出这个壳层中有些态的解释需要较大的组态空间或考虑集体运动.

特别引起我们兴趣的是 ^{43}Sc 和 ^{53}Fe 这个交叉共厄对. Kazuo Muto 等人^[5]用最小二乘方法算得的能谱基本再现了 ^{53}Fe 的实验能谱, 但误差比我们大, 较高的激发态次序有颠倒. 而对 ^{53}Fe 的共厄伴 ^{43}Sc , 能级次序与实验不符, 第一激发态就发生颠倒. 这个理论给出的其它交叉共厄对中的 ^{45}Ti , ^{47}Ti , ^{47}V 和 ^{52}Mn 等^[3]能谱的基态与第一、二激发态也发生颠倒. 我们给出的 ^{43}Sc 和 ^{53}Fe 的基态和第一激发态都未发生颠倒, 其它激发态与实验的符合程度也有改进.

由此可以推断, 两体自旋轨道耦合作用对 $1f_{7/2}$ 壳层不同核子组态引起能级劈裂和改善理论能谱与实验的符合程度起着重要作用. 纯组态壳模型在 $1f_{7/2}$ 壳层是一种较好的近似.

参 考 文 献

- [1] I. Talmi, *Rev. Mod. Phys.*, **34**(1962), 704.
- [2] G. Fortuna, S. Lunardi, M. Morando and C. Signorini, *Nucl. Phys.*, **A299** (1978), 479.
- [3] 廖继志, 高能物理与核物理, **3**(1979), 734.
- [4] A. E. L. Dieperink et al., *Nucl. Phys.*, **A106** (1968), 177.
- [5] K. Muto, T. Oda and H. Horie, *Prog. Theor. Phys.*, **60**(1978), 1350.
- [6] B. B. Балашов, *ЖЭТФ.*, **36** (1959), 1123.
- [7] 李友松, 陈创天, 张广志, 孙洪洲, 北京大学学报, **8**(1962), 149.
- [8] 陈小署, 张庆营, 高能物理与核物理, **4**(1979), 454.
- [9] H. Feshbach, *Theoretical Nuclear Physics*, Vol. 1, 375. (J. Wiley, Editor), New York, (1974).
- [10] V. V. Balashov and V. A. Eltkov, *Nucl. Phys.*, **16**(1960), 423.
- [11] J. R. Beene, *Nucl. Dat. Sheets.*, **23**(1978), 1; **25**(1978), 235; **21**(1977), 366.
- [12] P. M. Endt, *Nucl. Phys.*, **A214**(1973), 552.

THE ENERGY SPECTRA OF $1f_{7/2}$ SHELL NUCLEI WITH NONIDENTICAL NUCLEONS CONFIGURATION AND THE TWO BODY SPIN-ORBIT COUPLING FORCES

WANG YUAN ZHUANG QIN

(Northeast Normal University)

ABSTRACT

The central and two body spin-orbit coupling forces as the residual interaction and the pure configuration are used to calculate the energy spectra of $1f_{7/2}$ shell nuclei (^{43}Sc , ^{44}Ti , ^{52}Fe , ^{53}Fe , ^{53}Co) with nonidentical configuration. The consistency between the calculated energy spectra of the nuclei and the experimental data are rather satisfactory.