

ICAL

# 双 $\delta$ 力与表面修正 $\delta$ 力和 ( $s-d$ ) 壳层 氧同位素核能谱

李先胤 姚士淮 张庆营

(安徽大学)

(湖南大学)

## 摘 要

本文用双  $\delta$  力和表面修正  $\delta$  力作为有效相互作用,用组态混和计算了 ( $s-d$ ) 壳层氧同位素  $^{17-22}\text{O}$  核的能谱。结果表明:双  $\delta$  力比修正表面  $\delta$  力能更好地重现氧同位素的能谱;表面  $\delta$  相互作用的两体矩阵元对能量的贡献比体  $\delta$  相互作用要大得多。

## 一、引 言

用唯象的有效相互作用计算壳模型的原子核能谱,一直进行着大量的研究工作<sup>[1-4]</sup>。这些工作,对于探讨核子之间的有效相互作用,了解原子核的性质,都是很有好处的。人们希望通过这方面的工作,寻找更好的、适用范围更广的有效相互作用。扩大组态混和所用的模型空间固然重要,更重要的工作还在于采用不同的有效相互作用进行广泛的计算。这样可以深入了解有效相互作用的性质,同时也为寻找更好的有效相互作用提供有益的启示。

本文用表面修正  $\delta$  力和体  $\delta$  力(我们称之为双  $\delta$  力)作为有效相互作用,计算了氧同位素  $A = 17-22$  的低激发能谱。所用的模型空间为 ( $s-d$ ) 壳层中只有一个单价核子的跃迁。计算值和实验数据的符合程度是满意的。而且显示出表面部分的有效相互作用比体内部分的要大得多。同时我们也用了目前广泛使用的修正表面  $\delta$  力作了计算,和实验的符合程度不及双  $\delta$  力好。我们计算结果比 McGroary 等人<sup>[5]</sup>的工作有明显的改进。

## 二、能谱的计算与结果

本文所用的双  $\delta$  力的具体形式是

$$V_{ij} = -4\pi A\delta(\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j)\delta(r_i - R) + B\boldsymbol{\tau}_i \cdot \boldsymbol{\tau}_j + C - 4\pi D\delta(\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j), \quad (1)$$

以下把这个相互作用简记作 MSDI + DI。上式前三项是修正表面  $\delta$  力,最后一项是体  $\delta$  力,  $R$  是核半径,  $A$  和  $D$  分别是表面  $\delta$  力和体  $\delta$  力的强度。我们只计算了氧同位素的能

表 1 *s-d* 壳层  $^{17-22}\text{O}$  核能谱的计算值与实验值的比较(单位: MeV)

核	$J^\pi$	$E_{\text{exp}}$	$E_{\text{cal}_1}$	$E_{\text{cal}_2}$
$^{17}\text{O}$	$\frac{5}{2}^+$	4.1443	4.0570	4.0052
	$\frac{1}{2}^+$	3.2743	3.4920	2.7882
	$\frac{3}{2}^+$	-0.9357		
$^{18}\text{O}$	0 $^+$	12.1889	12.1655	12.0635
	2 $^+$	10.2068	10.0869	9.6476
	4 $^+$	8.6341	8.9192	9.0987
	2 $^+$	6.9285	6.4977	7.0517
	3 $^+$	6.8111	6.1928	6.7309
	(1 $^+$ )	5.8376(1 $^+$ , 2 $^-$ )	6.1694	6.7310
	4 $^+$	5.0720	7.1943	7.5056
	2 $^+$	4.8389	5.3907	5.8183
	(3 $^+$ )	4.2289(3 $^+$ , 4 $^-$ )	4.4441	5.0977
$^{19}\text{O}$	$\frac{5}{2}^+$	16.1783	16.1620	16.0824
	$\frac{3}{2}^+$	16.0823	16.0783	16.3302
	$\frac{1}{2}^+$	14.7066	14.6603	14.5178
	$\frac{9}{2}^+$	13.8068	14.1813	14.3513
	$\frac{7}{2}^+$	13.3993	13.7426	13.8250
	$\frac{3}{2}^+$	13.1140	15.0776	14.7743
	$\frac{5}{2}^+$	13.0238	12.8444	13.3176
	( $\frac{11}{2}^+$ )	12.2297( $\frac{7}{2} \rightarrow \frac{13}{2}$ )	12.9152	11.2162
	( $\frac{1}{2}^+$ )	11.7763(无 $J^\pi$ )	11.2260	11.2862
	$\frac{5}{2}^+$	11.4713	11.3165	11.6441
	( $\frac{7}{2}^+$ )	11.2100( $\frac{5}{2}, \frac{7}{2}$ )	11.0901	11.4045
	( $\frac{3}{2}^+$ )	11.1713( $\frac{3}{2}, \frac{5}{2}$ )	11.2400	11.7664
	( $\frac{9}{2}^+$ )	10.7943( $\frac{9}{2} \rightarrow \frac{13}{2}$ )	10.8191	11.1819
	$\frac{3}{2}^+$	10.0483	10.1825	10.9223
	( $\frac{5}{2}^+$ )	9.0613(无 $J^\pi$ )	9.0574	9.9987
	( $\frac{9}{2}^+$ )	8.6703(无 $J^\pi$ )	8.5816	9.4127
	( $\frac{7}{2}^+$ )	8.3303(无 $J^\pi$ )	8.4400	9.1519

20

21C

22C

注:

续 表

$A_z$	核	$J^\pi$	$E_{\text{exp}}$	$E_{\text{cal}_1}$	$E_{\text{cal}_2}$
1052	$^{20}\text{O}$	0+	23.4883	23.6193	23.3783
7882		2+	21.9456	22.6417	22.7562
		4+	19.9203	19.6983	20.0939
		4+	18.6383	19.2900	19.4628
		2+	18.3153	18.6123	18.7039
		0+	18.2323	18.4238	17.6192
1635		2+	18.1843	17.9164	17.6492
1476		4+	15.7343	15.7558	16.1696
1987		4+	14.9343	15.3707	17.5175
1517		2+	13.3633	14.0039	14.5788
309		(2+)	?	11.7940	12.0090
310	$^{21}\text{O}$	$\frac{5}{2}^+$	27.4990	26.9645	27.1549
1056		$\frac{7}{2}^+$	26.1490	25.8786	26.1743
183		$\frac{1}{2}^+$	24.4990	24.6079	25.5950
977		$\frac{3}{2}^+$	23.7790	23.8122	24.0704
824		$(\frac{7}{2}^+)$		24.4717	24.1669
302		$(\frac{5}{2}^+)$		24.2652	25.2340
178		$(\frac{3}{2}^+)$		23.0419	24.6102
513		$(\frac{5}{2}^+)$		22.8473	23.6561
250		$(\frac{7}{2}^+)$		22.7358	24.1587
743		$(\frac{5}{2}^+)$		22.6326	23.4493
176		$(\frac{1}{2}^+)$		21.9866	22.5112
162	$^{22}\text{O}$	0+	34.2093	34.3630	33.6883
362					

注: 1)  $E_{\text{exp}}$  是实验值(以  $^{16}\text{O}$  的结合能为零点计算).2)  $E_{\text{cal}_1}$  是用修正表面  $\delta$  力加体  $\delta$  力的计算值,  $E_{\text{cal}_2}$  是用修正表面  $\delta$  力的计算值.

表 2 由实验定出的有效相互作用参数和单粒子能量 (单位: MeV)

参 数	MSDI + DI	MSDI
$B_{3/2}$	4.0568	4.0023
$B_{1/2}$	3.4910	2.7853
$B_{3/2}$	1.7430	1.1560
A	-0.5441	-0.2443
B	-0.1778	-0.1216
D	0.0149	--

谱。容易证明,含参数  $B$ 、 $C$  的两项可以合并,只需保留一个  $B$ 。这样,对于氧同位素,双  $\delta$  力实际上只有三个可调参数。

我们这里分析氧同位素  $^{17-22}\text{O}$  的能谱。 $^{16}\text{O}$  看作是惰性的核心,不激发。组态混合所用的壳层模型空间是只考虑一个价中子从单粒子态  $d_{5/2}$  跳到  $s_{1/2}$  态或  $d_{3/2}$  态,不考虑两粒子跃迁和跨越壳层的跃迁。计算表明,这样的组态空间已可以满足重现上述氧同位素的低激发态了。

为了作比较,我们还用修正表面  $\delta$  力

$$V_{ij} = -4\pi A \delta(\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j) \delta(\mathbf{r}_i - R) + B \boldsymbol{\tau}_i \cdot \boldsymbol{\tau}_j + C \quad (2)$$

作了计算。同样,对于氧同位素这里的参数  $B$  和  $C$  只需取一个  $B$  即可。

在能谱公式中除了有效相互作用  $V_{ij}$  中的强度参数外,还出现单粒子能量  $\epsilon_{5/2}$ 、 $\epsilon_{1/2}$  和  $\epsilon_{3/2}$ 。有效相互作用中的强度参数和这三个单粒子能量,都是可调参数,用最小二乘法由实验数据确定。

组态混合波函数可以写成

$$\begin{aligned} \phi_{\alpha JM} = & C_{\alpha} \phi(d_{5/2}^n JM) + \sum_i C_{\alpha i} \phi(d_{5/2}^{n-1} J_i s_{1/2} JM) \\ & + \sum_K C_{\alpha K} \phi(d_{5/2}^{n-1} J_K d_{3/2} JM). \end{aligned} \quad (3)$$

其中  $C_{\alpha}$ 、 $C_{\alpha i}$  和  $C_{\alpha K}$  是波函数的组合系数,这些系数的个数就是  $\phi_{J\alpha M}$  的重数。根据组态波函数 (3),可以算出几个粒子的有效相互作用矩阵元。用标准的 Racah 代数的方法<sup>[6]</sup>,化为用两粒子的有效相互作用矩阵元来表示。

对氧同位素  $T = |T_z| = \frac{n}{2}$ ,  $n$  是  $^{16}\text{O}$  核心外的价中子数。在这里就是  $n = A - 16$ 。容易算出

$$\left\langle B \sum_{i < j} \boldsymbol{\tau}_i \cdot \boldsymbol{\tau}_j \right\rangle = \frac{n(n-1)}{2} B \quad (4)$$

两体矩阵元算出后,能量矩阵都由参数  $\epsilon_{5/2}$ 、 $\epsilon_{1/2}$ 、 $\epsilon_{3/2}$ 、 $A$ 、 $B$  和  $D$  等表示。定参数和求矩阵特征值是同时进行的,要用矩阵叠代法去求<sup>[6]</sup>。

我们用上述方法算出的能谱及其和实验值的比较列于表 1。实验数据取自<sup>[7-9]</sup>。表 2 给出的有效相互作用  $\text{MSDI} + \text{DI}$  和  $\text{MSDI}$  的数值。

由表 1 看到,一共计算了 52 条能级,其中有 34 条能级在实验上已确测出  $J^{\pi}$ 。有 10 条能级测出了能量值,但未给确切的或根本未给出  $J^{\pi}$ 。我们是根据有  $J^{\pi}$  值的 34 条实验能级来做最小二乘拟合,再用定出的参数计算其它能级。用上述两种有效相互作用所计算的 41 条能级的方均根偏差列于表 3。

表 3 计算结果的方均根偏差

$\sigma_1 = 0.331\text{MeV}$	对于 $\text{MSDI} + \text{DI}(\text{DDI})$
$\sigma_2 = 0.712\text{MeV}$	对于 $\text{MSDI}$

### 三、结果的讨论

由表 1—表 3 看到,我们仅用了少量的参数,就拟合了大量的能级,结果是令人满意

的。  
显减  
能量  
用在  
计算

第一

(对于  
实验

级的

合变

交互

我们的计

我们

数需

对于氧同位素, 双  
发. 组态混合所  
 $i_{3/2}$  态, 不考虑两  
现上述氧同位素

(2)

能级  $\epsilon_{5/2}$ 、 $\epsilon_{3/2}$  和  
用最小二乘法由

(3)

的重数. 根据组  
Racah 代数的方

是  $n = A - 16$ .

(4)

表示. 定参数和

居取自 [7-9]. 表 2

角测出  $J^*$ . 有 10  
值的 34 条实验  
效相互作用所计

的. 用 DDI 计算的方均根偏差为 0.331MeV, 比 MSDI 的方均根偏差 0.712MeV 明显减小. 可见修正表面  $\delta$  力再加上一项体  $\delta$  力, 确能改善和实验符合的程度. 在 DDI 的能量计算中, 含  $A$  项矩阵元比含  $D$  项的矩阵元要大得多. 这说明核子之间的剩余相互作用在核表面很强, 而在体内就弱得多. 但是只要加上很弱的体  $\delta$  力, 就明显改善了理论的计算结果.

由表 1 和表 2 可以看出, 单粒子能级  $\epsilon_{5/2}$  和  $\epsilon_{3/2}$  的计算结果, 很接近于  $^{17}\text{O}$  的基态和第一个  $\frac{1}{2}^+$  态的能量. 用这里的  $\epsilon_{3/2}$  算出的  $^{17}\text{O}$  的单粒子激发能量分别为 2.3138MeV (对于 DDI) 和 2.8503MeV (对于 MSDI), 和实验值 5.080MeV 相差很多. 如果我们用实验的  $\epsilon_{3/2}$  值 ( $= -0.9357\text{MeV}$ ) 进行计算, 那么, 总的方均误差变坏. 所以, 由其他能级的拟合定出. 可以认为, 实验的  $\frac{3}{2}^+$  能级不是单纯的单粒子能级, 激发能级越高组态混合变得更加显著.

文献 [5] 也用模型空间  $d_{5/2}$ 、 $s_{3/2}$  和  $d_{3/2}$  计算了 ( $s-d$ ) 壳层原子核的能谱, 用的有效相互作用和我们不同. 我们这里对氧同位素  $^{18}\text{O}-^{21}\text{O}$  拟合的能级多, 而且总的误差比 [5] 小. 我们看到在 [5] 中, 理论计算的  $^{19}\text{O}$  的基态和第一激发态和实验不符, 位置颠倒了, 而我们的计算结果和实验能级次序是一致的, 如下图所示.

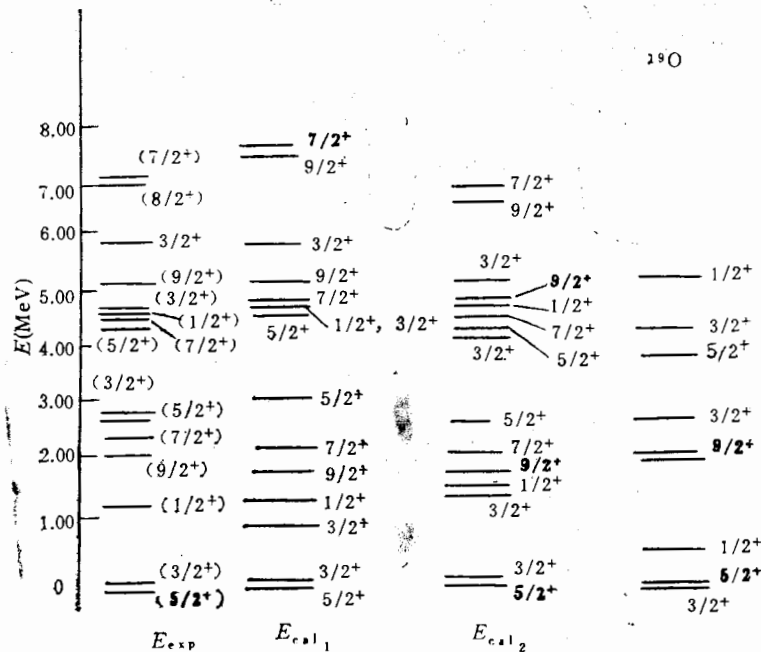


图 1 DDI、MSDI 和文献 [5] 的计算结果同实验值 [7, 9] 的比较.

我们的理论计算比文献 [5] 总的说来是有明显的改进

本文用可调参数不多的双  $\delta$  力势进行了计算, 符合了较多的能级,  $\epsilon_{3/2}$  单粒子能级参数需要与实验值有较大的偏离. 由此可见单粒子对于激发谱起着重要作用. 我们知道唯

结果是令人满

象调参数分析以及精确壳模型计算可以给微观理论提供有益的借鉴<sup>[10]</sup>。因而,本工作也许对了解原子核微观结构有所帮助。

本工作在早期的计算中,徐辅新同志参加了部分计算工作,特致谢意。

### 参 考 文 献

- [ 1 ] J. B. McGrory and B. H. Wildenthal, *Ann. Rev. Nucl. Part. Sci.*, **30**(1980), 383.
- [ 2 ] D. S. Chuu et al., *Phys. Rev.*, **C27**(1983), 380.
- [ 3 ] Zhang Qing-ying (张庆营), proceedings of The International Summer School on Nucleon-Nucleon Interaction and Nuclear Many-Body Problems, World Scientific Publishing co Pte Ltd. 1984, 697.
- [ 4 ] Zhang Qing-ying (张庆营), *J. Phys. G; Nucl. Phys.*, **11**(1985), L35.
- [ 5 ] J. B. McGrory and B. H. Wildenthal, *Phys. Rev.*, **C7**(1973), 974.
- [ 6 ] P. J. Brussaard and P. W. M. Glaudemans, *Shell-Model Applications In Nuclear Spectroscopy*, North-Holland Publishing co., Amsterdam, 1977.
- [ 7 ] A. H. Wapstra and K. Bos, *Atomic Data and Nuclear Data Tables*, **19**(1977), 175.
- [ 8 ] F. Ajzenberg-selove, *Nucl. Phys.*, **A392**(1983), 1; **A300**(1978), 175.
- [ 9 ] C. Detraz, M. Roy-stephan et al., *J. Phys. Lett.*, **43**(1982), L29.
- [10] 杨立铭, 原子核物理(第五次核物理会议论文集), 原子能出版社, 1984. J. Shurpin, Thesis of Ph. D., State Univ. of New York at stony Brook, 1980.

## THE DOUBLEDELTA AND THE SURFACE DELTA INTERACTIONS AND SPECTRA OF OXYGEN ISOTOPES IN THE (*s-d*) SHELL

LI XIAN-YIN    YAO SHI-HUAI

(*Anhui University*)

ZHANG QING-YING

(*Hunan University*)

### ABSTRACT

By using the Double Delta Interaction (DDI) and the Modified Surface Delta Interaction (MSDI) as the effective interaction respectively and by the mixed-configuration, the low-lying spectra of oxygen isotopes <sup>17-22</sup>O in the (*s-d*) shell space are calculated. The results are favorable for DDI.

Cline  
Cline  
杂粒

尽管  
等人  
个射理  
核子

用(2  
式,包  
的态  
是经