

偶偶核转动能谱新公式

廖继志 蒲贤安

(四川大学物理系)

摘 要

本文提出了偶偶核转动能谱的一个新公式,并用它描述高自旋态中的回弯现象.

一、引 言

偶偶核转动能谱的研究,始于 A. Bohr 和 B. R. Mottelson 的工作^[1]. 但是玻尔公式只适用于大形变核的最低几个转动能级,因而另一些唯象转动能谱公式被提出来了. 如 S. M. Harris 的转动能按角速度展开的公式^[2], M. A. J. Mariscotti 等人的可变转动惯量模型^[3]等. 但是这些模型都不能再现高自旋态中的反常现象. 本文沿着 P. C. Sood 等人的思想^[4,5],从分析柯氏力破坏对关联,因而使转动惯量随角动量增大而增大的效应着手,建立了一个能解释回弯和下弯现象的、适用于形变区和过渡区偶偶核的转动能谱公式.

二、转动能谱新公式

根据稀土核转动惯量的推转模型计算^[4],在对能隙参量 δ 值的一个相当宽的区间上,转动惯量 J 与 δ 之间有下列指数式关系

$$J = J_0 e^{-\gamma\delta} \equiv J_0 e^{-\Delta} \quad (1)$$

其中 J_0 和 γ 是与 δ 无关的常数, $\Delta \equiv \gamma\delta$ 是无量纲的等效对能隙参量. 由此可见,对关联的强弱直接影响转动惯量的大小,从而决定转动能谱的形状. 原子核转动时,柯氏力破坏核子间的对关联,使对效应随角动量的增大而减弱. L. G. Moretto^[6]用统计方法证明了对能隙参量 Δ 与角动量之间有如下关系

$$\Delta(I) = \Delta(0)(1 - I/I_c)^{1/2}, I \leq I_c \quad (2)$$

其中 $\Delta(0)$ 是 $I = 0$ 时的对能隙, I_c 是对关联消失的临界角动量.

然而,中子对关联消失的临界角动量低于质子的对应值^[7]. 同时,在所有核子的对关联消失之前,还可以发生一对中子脱耦合或拆对效应^[8]. 因此,在达到 I_c 之前 $\Delta-I$ 关系中会有一个“突变”. 这说明有必要在 (2) 式中引入一个修正项以产生上述突变. 于是我们假定

$$\Delta(I) = C_1(1 - I/I_a)^n + C_2[(1 - I/I_b)^2]^m, \quad I_b < I_a, I < I_a \quad (3)$$

其中 I_a 为(3)式成立的最大角动量即(2)中的 I_c , I_b 是 Δ 发生“突变”时的角动量; $C_1 + C_2 = \Delta(0) \equiv \Delta_0$ 是 $I = 0$ 时的等效对能隙参量; m 和 n 可以是 $1/2$ 或其它适当的值, 这是考虑到中子对关联与质子对关联强度的差异^[7]而引入的.

这样, 利用(3)式、(1)式和玻尔公式就得到下列偶偶核转动能谱公式

$$E_I = E_0 + \frac{\hbar^2}{2J_0} I(I+1) \exp \left\{ C_1 \left(1 - \frac{I}{I_a}\right)^n + C_2 \left(1 - \frac{I}{I_b}\right)^{2m} \right\} \quad (4)$$

其中 E_0 是带头能级的能量, 对基带和 yrast 带: $E_0 = 0$; J_0 是对关联消失后的转动惯量. 这个公式保留了玻尔公式的形式, 但转动惯量是指数式可变的, 它随 I 的增大(即随对关联的减弱)而增大.

三、计算结果和讨论

我们按下法选择参量, 取 J_0 等于刚体转动惯量:

$$J_0 = J_{rig} = \frac{2}{5} M A R^2 \left(1 + \frac{1}{3} \beta\right),$$

表 1 计算能谱与实验能谱的比较, 能量以 MeV 为单位. 参量 $2m = 1.10$, $n = 1.15$.

核素	¹³⁰ Ce		¹⁵⁶ Dy(上带)		¹⁶⁰ Yb		¹⁷² W		²³² Th(*)	
$2J_0/\hbar^2$	105.42		156.50		142.02		159.47		263.32	
I_a	29		33		33		39		43	
I_b	15		17		17		15		33	
C_1	1.3734		1.0533		1.4834		1.1775		1.3787	
C_2	0.3895		0.3110		0.3253		0.0559		-0.5473	
$I(\hbar)$	$E_{实}^{[9]}$	$E_{计}$	$E_{实}^{[10]}$	$E_{计}$	$E_{实}^{[11]}$	$E_{计}$	$E_{实}^{[12]}$	$E_{计}$	$E_{实}^{[13]}$	$E_{计}$
0	0	0	0.6754	0.6754	0	0	0	0	0	0
2	0.254	0.281	0.8287	0.8094	0.2430	0.2231	0.1229	0.1196	0.0500	0.0507
4	0.710	0.797	1.089	1.075	0.6393	0.6444	0.3768	0.3691	0.1620	0.1639
6	1.324	1.424	1.437	1.426	1.1480	1.1747	0.7278	0.7185	0.3331	0.3338
8	2.053	2.085	1.859	1.830	1.7373	1.7512	1.1422	1.1426	0.5569	0.5548
10	2.809	2.729	2.316	2.260	2.3746	2.3315	1.6177	1.6207	0.8267	0.8219
12	3.312	3.325	2.707	2.697	2.9612	2.8883	2.1302	2.1361	1.1367	1.1303
14	3.860	3.867	3.066	3.131	3.3651	3.4063	2.6799	2.6757	1.4821	1.4756
16	4.553	4.543	3.499	3.555	3.8491	3.8809	3.2569	3.2490	1.8581	1.8538
18	5.384	5.439	4.025	4.066	4.4276	4.4475	3.8546	3.8586	2.2615	2.2612
20	6.341	6.400	4.635	4.707	5.0915	5.1589	4.4996	4.4822	2.6905	2.6943
22	7.408	7.425	5.319	5.397	5.8281	5.8979			3.1427	3.1502
24	8.570	8.525	6.069	6.136	6.6240	6.6624			3.6181	3.6262
26	9.702	9.718	6.877	6.925	7.4608	7.4556			4.1147	4.1205
28			7.738	7.770	8.2919	8.2849			4.6303	4.6318
30			8.650	8.684	9.1577	9.1663			5.1608	5.1608

(*) 对 ²³²Th, $2m = 0.90$, $n = 0.95$.

这里 M 是核子质量, A 是质量数, $R = 1.2A^{1/3}\text{fm}$ 是核半径, β 是形变参量. 适当选择 m, n, I_a 和 I_b (保持 $I_a > I_b$), 用(4)式对实验能谱作最小二乘拟合以决定 C_1 和 C_2 .

采用上述方法, 我们计算了从 ^{46}Ti 到 ^{232}Th 之间的四十余种原子核的能谱, 并由此作出 $J-\omega^2$ 图, 结果与实验数据符合得相当好. 表 1 列出了五例计算能谱与实验值的比较. 图 1 给出了六例 $J-\omega^2$ 图与实验的比较. 可以看出, 除少数例外, 计算激发能与实验值的偏差在几到几十 keV 之内. 对于无明显回弯的核, 如 ^{172}W 和 ^{232}Th 等, I_a 都比较大, 计算与实验的符合比回弯核更好. 特别是 ^{232}Th , 从 $I = 2\hbar$ 到 $30\hbar$, 能量计算偏差都不超过 10keV. 对 ^{156}Dy 的次晕带, 符合情况也是满意的. 关于双回弯核 ^{160}Yb , 计算曲线在第二回弯区出现前弯, 大体上反映了第二个不连续性的存在. 在 Ti、Cr 区符合情况要差一些, 但仍能反映变化的趋势. 由此可见, 我们的公式不仅对大形变核的回弯, 而且对过渡区核的回弯都有较好的符合; 同时, 对于激发带也能得到比较满意的结果.

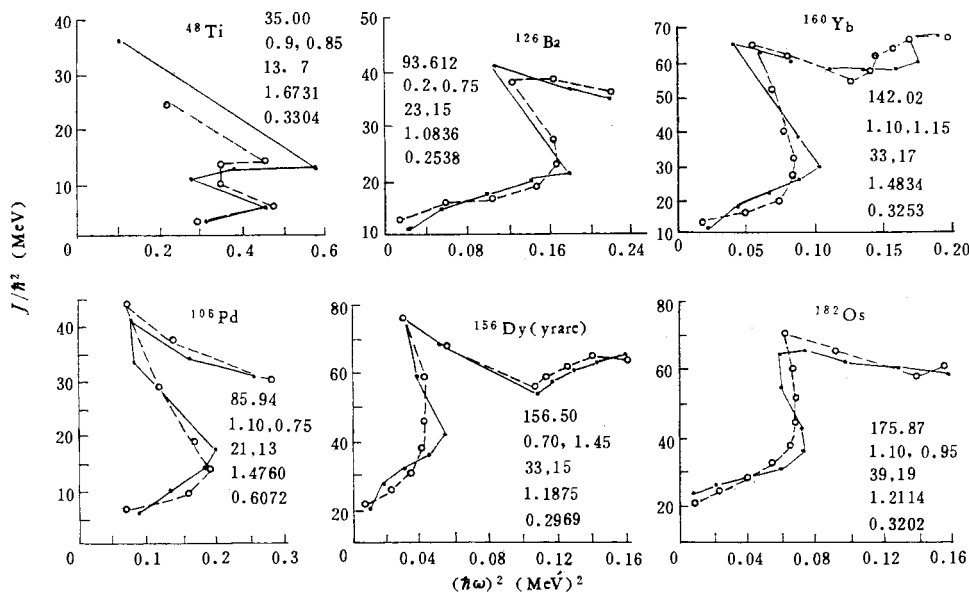


图 1 六例 $J-\omega^2$ 标绘与实验值的比较.

●——实验值, ○——计算值; 实验数据分别取自 [14] ^{48}Ti , [15] ^{106}Pd , [16] ^{126}Ba , [17] ^{182}Os , 其余见表 1. 参量: 自上而下, $2\%/\hbar^2(\text{MeV})^{-1}$, $m, n, I_a(\hbar), I_b(\hbar), C_1, C_2$.

图 2 是 ^{160}Yb 的等效对能隙参量 Δ_I 和转动惯量 J_I 对角动量 I 的标绘. 在图 3 中示出了 ^{156}Dy 转晕带的 Δ_I-I 关系, 同时示出了 U. Mosel^[18] 关于有量纲对能隙参量 δ 的计算结果. 他用的是自洽计入对关联效应的斯洽庭斯基型推转模型. 可以看出, 当 $I = I_b$ 时 δ 发生很明显的突变, 在大的 I 值下 δ 缓慢地趋于零. 两条曲线的变化趋势是一致的, 但我们得到的“突变”仅表现为一个拐点, 不如 U. Mosel 的那样明显, 尽管两者位置相同. 图 4 给出了基态原子核的转动惯量 $J_{g.s.} = J_0 e^{-\Delta_0}$ 和对能隙参量 $\Delta_0 = C_1 + C_2$ 随质量数 A 变化的系统性. 变化规律和 Harris 和 VMI 的计算基本上一致.

综上所述, 在玻尔公式中引入随对关联的减弱而指数式增大的转动惯量所得到的转

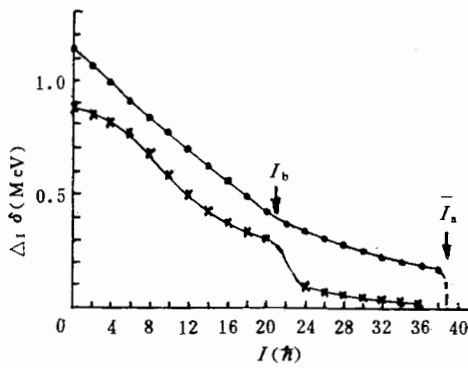


图 2 ^{160}Yb 的 Δ_I 和 J_I 与角动量的关系

● 本工作 × U. Mosel

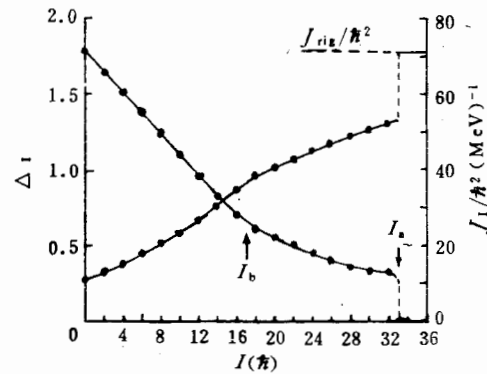


图 3 ^{156}Dy 转晕带的对能隙参量

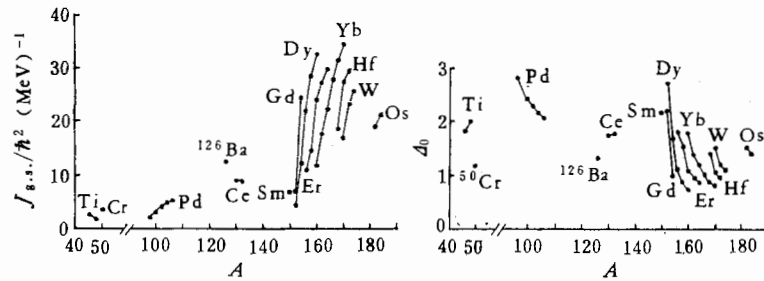


图 4 基态转动惯量 $J_{g.s.}$ 和对能隙参量 Δ_0 的系统性

动能谱公式,能相当满意地再现偶偶核基态带和低激发带能谱和高自旋态中的反常现象,并能提供有关转动惯量和对能隙与角动量的关系方面的一些知识.新公式也能反映过渡区偶偶核能谱的主要特征,但结果不如在大形变区的好.能隙参量与角动量的关系可能还不够精确,在这方面进一步开展工作也许是有益的.

参 考 文 献

- [1] A. Bohr and B. R. Mottelson, Kgl. Danske Videnskab. Selskab, Mat.-Fys. Medd. 26, 1952.
- [2] S. M. Harris, *Phys. Rev.*, **138** (1965), B509.
- [3] M. A. J. Mariscotti et al., *Phys. Rev.*, **178** (1969), 1864.
- [4] Chin W. Ma, *Phys. Rev.*, **C9** (1974), 1083.
- [5] P. C. Sood and A. K. Jain, *Phys. Rev.*, **C18** (1978), 1906.
- [6] L. G. Moretto, *Nucl. Phys.*, **A185** (1972), 145.
- [7] R. A. Sorensen, *Rev. Modern Phys.*, **45** (1973), 353.
- [8] F. S. Stephens, R. Simon, *Nucl. Phys.*, **A183** (1972), 257.
- [9] P. J. Nolan et al., *Phys. Lett.*, **108B** (1982), 269.
- [10] D. Ward et al., *Nucl. Phys.*, **A332** (1979), 433.
- [11] F. A. Beck et al., *Phys. Rev. Lett.*, **42** (1979), 493.
- [12] G. D. Dracoulis et al., *J. Phys. G: Nucl. Phys.*, **4** (1978), 713.
- [13] R. S. Simon et al., *Phys. Lett.*, **108B** (1982), 87.
- [14] G. Fortuna et al., *Nuovo Cim.*, **34A** (1976), 321.

- [15] A. Klein, *Nucl. Phys.*, **A347** (1980), 3.
[16] C. Flaum et al., *Nucl. Phys.*, **A264** (1976), 291.
[17] R. M. Lieder et al., *Nucl. Phys.*, **A375** (1982), 291.
[18] U. Mosel, *Nucl. Phys.*, **A347** (1980), 317.

A NEW EXPRESSION FOR THE ROTATIONAL BANDS OF AN EVEN-EVEN NUCLEUS

LIAO JI-ZHI PU XIAN-AN

(*Sichuan University*)

ABSTRACT

The exponential model of the nuclear moment of inertia proposed by P. C. Sood and A. K. Jain is improved, and a new expression for the rotational bands of an even-even nucleus is proposed. The backbending and the downbending behaviours in J vs ω^2 plot can be reproduced by the calculations based on this new formula.