

# $i(\omega)$ 和等效转动排列角动量

顾金南

(中国科学院近代物理研究所)

## 摘 要

本文引入了等效转动排列角动量图象,讨论了  $i(\omega)$  和它的意义,并分析了稀土区偶偶核转晕带的情况.

原子核转晕态的回弯现象,通常认为是基带与超带交叉混杂引起的. 这就是等效转动惯量 ( $\mathcal{J}_e$ ) 和转动频率 ( $\omega^2$ ) 图上的  $S$  形曲线<sup>[1]</sup>. 而超带,可能是由不同的机制产生的. 在稀土区,人们倾向于认为超带是准粒子的转动排列带<sup>[2]</sup>.

近来,Bohr 和 Mottelson 定义了  $i(\omega)$ <sup>[3]</sup>, 并强调了它的重要的物理意义.

本文引入了等效转动排列角动量图象,在这种图象中讨论了  $i(\omega)$  的意义,并对 <sup>164</sup>Er <sup>156</sup>Dy 等稀土区偶偶核的  $i(\omega)$  等进行了分析讨论.

通常,基带和超带的转动能表示为

$$E(I) = \frac{1}{2\mathcal{J}_e} I(I+1) + E_0, \quad (1)$$

这里,  $\hbar = 1$ . 核在转动过程中所有内部性质的变化都归结为  $\mathcal{J}_e$  的变化,现在转到都归结为等效转动排列角动量  $J$  的变化,这就是等效转动排列角动量图象. 于是

$$E(I) = \frac{1}{2\mathcal{J}_0} (\widehat{I-J})^2 + E_0, \quad (\widehat{I-J})^2 = (I-J)(I-J+1), \quad (2a)$$

$$\Delta E(I) = E(I) - E(I-2) = \frac{4}{2\mathcal{J}_0} \left( I - J - \frac{1}{2} \right), \quad (2b)$$

这里  $\mathcal{J}_0$  是转动惯量,取为常量.  $(\widehat{I-J})$  看成集体转动角动量  $\hat{R}$ .  $\hat{R}^2$  的本征值为  $R(R+1)$ .  $\hat{R} = \hat{I} - \hat{J}$ ,  $I$  是核的总角动量,我们将  $J$  看作为粒子的贡献,即认为是粒子沿核的转动方向的排列角动量. 对于不同的排列带,  $J$  值一般不同. 对于基态常等非排列带,它就是等效转动排列角动量. 对于刚性转子,  $J=0$ , 转动频率  $\omega = \frac{\partial E(I)}{\partial I}$ , 这里  $\omega = \frac{1}{2} \Delta E(I)$ . 这种图象可以表示为图 1.

令  $\Delta E(2^+) = \frac{4}{2\mathcal{J}_0} \cdot \frac{3}{2} = 2(\omega_{2^+})$ , 则 (2b) 式两边减去刚性转子值, 得到

$$\frac{3}{2} \left[ \frac{\omega}{(\omega_{2^+})_r} - \left( \frac{\omega}{\omega_{2^+}} \right)_r \right] = \left( I - J - \frac{1}{2} \right) - \left( I_r - \frac{1}{2} \right) \quad (3)$$

于是

$$\left\{ \begin{aligned} \left( \frac{\omega}{\omega_{2^+}} \right)_r - \frac{\omega}{(\omega_{2^+})_r} &= \frac{2}{3} J(I), \quad I = I_r, \end{aligned} \right. \quad (4a)$$

$$\left\{ \begin{aligned} I - I_r &= J \left( \frac{\omega}{\omega_{2^+}} \right), \quad \frac{\omega}{(\omega_{2^+})_r} \doteq \left( \frac{\omega}{\omega_{2^+}} \right)_r, \end{aligned} \right. \quad (4b)$$

为简化起见以后  $(\omega_{2^+})_r$  以  $\omega_{2^+}$  表示. 同样, 对于基带和超带有

$$\frac{3}{2} \left[ \left( \frac{\omega}{\omega_{2^+}} \right)_g - \left( \frac{\omega}{\omega_{2^+}} \right)_s \right] = \left( I_g - J_g - \frac{1}{2} \right) - \left( I_s - J_s - \frac{1}{2} \right), \quad (5)$$

这里下标  $r$  表示刚性转子,  $s$  表示超带,  $g$  表示基带. 所以

$$\left\{ \begin{aligned} i(\omega) = I_s - I_g = J_s \left( \frac{\omega}{\omega_{2^+}} \right) - J_g \left( \frac{\omega}{\omega_{2^+}} \right), \quad \omega_g = \omega_s, \end{aligned} \right. \quad (6a)$$

$$\left\{ \begin{aligned} i(I) = \frac{3}{2} \left[ \left( \frac{\omega}{\omega_{2^+}} \right)_g - \left( \frac{\omega}{\omega_{2^+}} \right)_s \right] = J_s(I) - J_g(I), \quad I_g = I_s, \end{aligned} \right. \quad (6b)$$

(6b) 式亦可改写为

$$\omega(I) = \omega_g - \omega_s = \frac{2}{3} \omega_{2^+} i(I). \quad (6c)$$

如图1和式(6)所示,  $i(\omega)$  是超带和基带间的等效转动排列角动量差值 ( $J_s - J_g$ ).  $i(I)$  和  $i(\omega)$  本质上是相同的, 它们可能类似于转动能谱的两种展开 ( $E(I)$  或  $E(\omega)$ ).

图1中  $i_c(\omega)$  和  $i_c(I)$  为  $\omega = \omega_c$  点的  $i(\omega)$  和  $i(I)$ .

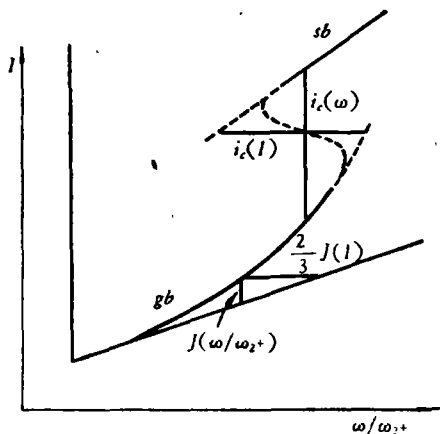


图 1

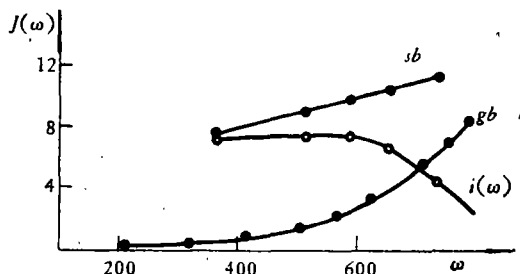


图 2  $^{156}\text{Dy}$  的  $J, i$  变化图

实验已经表明,  $^{184}\text{Hg}$   $^{186}\text{Hg}$  等核是形状共存的, 超带不是准粒子的转动排列带, 但它们的  $i(\omega)$  仍然较大. 对于转变区核和大变形核呢? 先看,  $^{156}\text{Dy}$ ,  $^{164}\text{Er}$  [4] 的情况 (图2和图3).  $i(\omega)$  约在  $\omega_c$  之后随  $\omega$  的增加而下降, 而且这种下降是快的. 这两个核的超带是公认的转动排列带,  $i(\omega)$  要是只是转动排列角动量, 该如何理解这种下降 ( $i(I)$  与之相类似) 呢.

图4和图5列出了  $\text{Er}$  同位素和  $N = 90$  的同中素的  $I \sim \frac{\omega}{\omega_{2^+}}$  图 [4], 发现  $i_c(\omega)$  ( $i_c(I)$ )

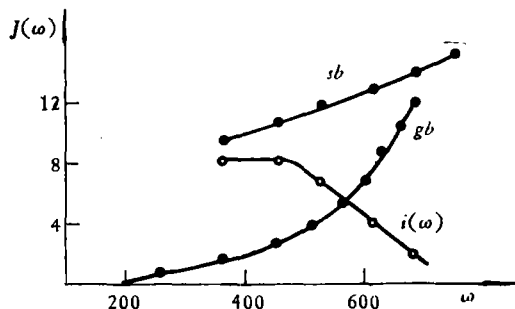


图 3  $^{164}\text{Er}$  的  $J, i$  变化图

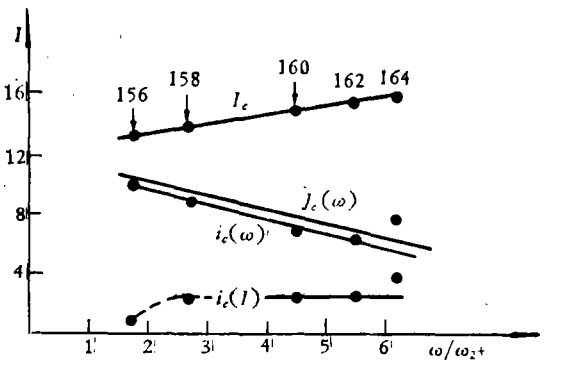
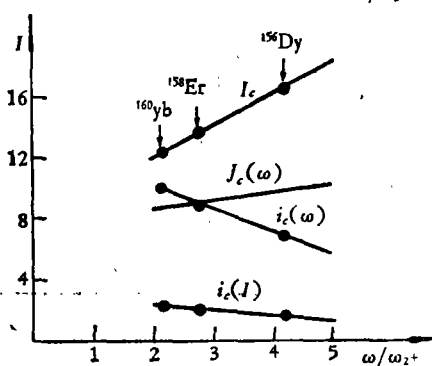
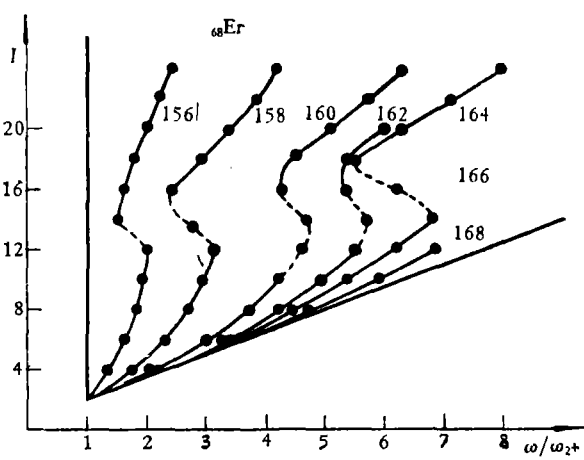
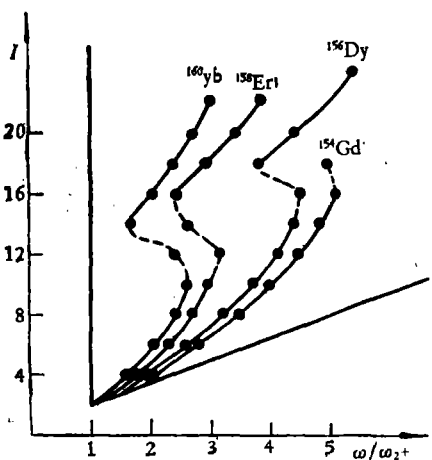


图 4  $N = 90$  同中素核

图 5  $Z = 68$  同位素核

也是随着  $\omega/\omega_2+$  的增加而下降的。作为两个例子,看看稀土区核的情况。

$I_c$ : 随着  $\omega/\omega_2+$  的增加而增加,近似为一直线。

$J_c(\frac{\omega}{\omega_2+})$ :  $J_c = I_c - I_r$ 。对于同位素,  $J_c$  随  $\omega/\omega_2+$  增加而下降。对于同中素,  $N \geq 92$  时随  $\omega/\omega_2+$  增加而下降;  $N = 90$  时上升,  $N = 88$  时锐升。

$i_c(\omega)$  (包括  $i_c(I)$ ): 随着  $\omega/\omega_2+$  的增加而下降。

这里着重指出三点。

一是对不同的同位素,  $Z = 66, 68, 70^{[4]}$ , 其  $i_c(\omega)$  ( $i_c(\omega) = J_s(\frac{\omega_c}{\omega_{2+}}) - J_g(\frac{\omega_c}{\omega_{2+}})$ ) 的延长线, 到  $\frac{\omega}{\omega_{2+}} = 0$  处, 约为 12. 正好是理论上预期的  $i_{13/2}$  中子对的最大的转动排列角动量. 但  $i_c(\omega)$  到振子线附近可能就锐降. 同时, 这三种同位素核的  $i_c(\omega)$  线的数值和下降斜度大致相同. 说明这些核的超带可能都是  $i_{13/2}$  中子对的转动排列带.

二是同中素核,  $N = 96$  的  $^{170}\text{W}$ ,  $^{168}\text{Hf}$ ,  $^{166}\text{Yb}$ ,  $^{164}\text{Er}$  的  $i_c(\omega)$  近似不随  $\omega/\omega_{2+}$  而变. 这主要是  $^{164}\text{Er}$ , 次之  $^{166}\text{Yb}$  的  $i_c(\omega)$  值高于同位素中其它核的平均趋势造成的. 这可能是在  $^{164}\text{Er}$  的情况下, 单粒子能级间距小 ( $N = 96$  与  $98$  之间); 而  $N = 98$  核, 其单粒子能级<sup>[5]</sup> ( $N = 98$  与  $N = 100$  之间) 的间距大 (或在 Fermi 表面的能级密度低于  $N = 96$  核), 所以都不显示后弯, 预期它们的  $i_c(\omega)$  值会偏小. 或者说, 这是由于带间相互作用是中子数的振荡函数<sup>[6]</sup> 所造成.

$N = 96$  和  $N = 90$  (图 4) 的  $i_c(\omega)$  等行为都不相同, 表明这些核的后弯不可能是由质子对的转动排列造成的.

三是  $i_c(\omega)$  和  $i(\omega)$  都随  $\omega/\omega_{2+}$  的增加而下降, 对于单个核 (普通空间的转动) 是这样 (图 2 和图 3); 对于不同核 (规范空间的转动) 也是这样 (图 4 和图 5), 这时  $\omega/\omega_{2+}$  的改变就相应于  $Z = 66, 68, 70$  同位素核的中子对数的增加.

要注意的是:  $J_g, J_s$  ( $i(\omega) = J_s - J_g$ ) 与  $J_g(\omega_c), J_s(\omega_c)$  ( $i_c(\omega) = J_s(\omega_c) - J_g(\omega_c)$ ) 随  $\omega/\omega_{2+}$  的变化趋势大致相反, 但  $i(\omega)$  和  $i_c(\omega)$  的趋势却相同.

$i_c(\omega)$  和  $i(\omega)$  随  $\omega/\omega_{2+}$  的变化趋势相同, 说明对于这些核的规范空间的转动和普通空间的转动存在某种共性, 可以联系起来分析. 希望不久以后能有更多的实验数据以供分析之用.

对于  $i_c(\omega)$  随  $\omega/\omega_{2+}$  的变化, 比较易于理解. 主要是形变的增加, 使转动惯量  $\mathcal{I}$  增大, 例如 Er 同位素, 从  $^{156}\text{Er}$  到  $^{166}\text{Er}$ , 约增大 2—3 倍. 这就使  $i_c(\omega) = (\mathcal{I}_s(\omega_c) - \mathcal{I}_g(\omega_c))\omega_c$  中  $\mathcal{I}_g(\omega_c)$  随  $\omega/\omega_{2+}$  变化较大, 而  $\mathcal{I}_s(\omega_c)$  变化不大, 所以  $i_c(\omega)$  下降. 这些等价于  $i_c(\omega) = J_s(\omega_c) - J_g(\omega_c)$  中  $J_g(\omega_c)$  变化较大. 对于这些核, 如用 (2b) 式去符合实验的  $\Delta E_s = E_\gamma$  值, 即可近似的抽取出超带的  $\mathcal{I}_s$  和  $J_s$  值.

表 1 Er 同位素的  $i_c(\omega)$  和  $J_s(\omega_c)$

核	$^{164}\text{Er}$	$^{162}\text{Er}$	$^{160}\text{Er}$	$^{158}\text{Er}$	$^{156}\text{Er}$
$i_c(\omega)$	8.0	6.6	6.5	8.5	10.0
$J_s(\omega_c)$	4.0	?	4.2	5.6	1.9

也许更能说明问题的是  $N = 90$  核 (图 4), 从超带抽取的  $\mathcal{I}_s$  相近<sup>[7]</sup>,  $J_s$  也相近, 通常认为这几个核的最后一对质子占据相同的  $i_{13/2}$  的单粒子轨道, 超带就是这一对质子转动排列所产生, 它们的  $\mathcal{I}_s, J_s$  相近就是自然的了. 所以图 4 中  $i_c(\omega)$  的下降是由于基态带不同, 即  $J_g(\omega)$  不同所致.

对于  $^{156}\text{Dy}$ , 我们已看到  $I_s - I_g \approx 0$ , 而同时又  $\omega_s - \omega_g = 0$  的情况. 这时  $i(\omega) \approx 0$ , 按我们分析,  $i(\omega) = J_s - J_g \approx 0$ ,  $J_s \approx J_g \approx 5$ . 但这类数据尚少.

在等效排列角动量图象中, 我们分析了  $i(\omega)$  和  $i_z(\omega)$  随  $\omega/\omega_2^+$  的变化趋势. 表明  $i(\omega)$  是一个等效量, 它不仅包含超带的排列角动量, 而且受基态带、即  $J_g$  的影响, 再就是混杂的贡献(因为对于(有回弯的)排列带, 它与基态带的混杂小, 在抽取  $i(\omega)$  时已予考虑).

在高自旋 ( $I < 30$ ) 区域, 不管从实验上还是理论上, 要抽取和区别集体转动部分和准粒子排列部分对  $I$  的贡献, 本身就是一个复杂的问题, 需要从各个方面去探讨.

### 参 考 文 献

- [1] A. Johnson et al., *Nucl. Phys.*, **A179**(1972), 153.
- [2] F. S. Stephens and R. S. Simon, *Nucl. Phys.*, **183**(1972), 157.
- [3] A. Bohr and B. R. Motelson, Proc. Int. Conf. on Nuclear Structure, (Tokyo, 1977); *Phys. Today*, **32**(1979), 6; 25; 张敬业, 高能物理与核物理, **4**(1980), 382.
- [4] R. O. Sayer et al., *Atom. Data and Nucl. Data Table*, **15**(1975), 85; H. R. Andrew et al., C.R.N. 79—01 p. 27; N. R. Johnson, *Phys. Rev. Lett.*, **40**(1978), 151.
- [5] R. M. Lieder, H. Ryde, *Advances in Nucl. Phys.*, **V10**(1978), 1.
- [6] R. Bengtsson and S. Frauendorf, *Nucl. Phys.*, **A314**(1979), 27.
- [7] 顾金南、王正大, 高能物理与核物理, **4**(1980), 652; 王正大、顾金南、余超凡、罗诗裕, 高能物理与核物理, **3**(1979), 348.
- [8] D. Ward et al., *Nucl. Phys.*, **A332**(1979), 433.

## $i(\omega)$ AND EFFECTIVE ROTATION-ALIGNMENT ANGULAR MOMENTUM $J$

GU JIN-NAN

(*Institute of Modern Physics, Academia Sinica*)

### ABSTRACT

An effective rotation-alignment angular momentum  $J$  is introduced. The sense for  $i(\omega)$  and  $J$  is discussed, and the yrast band for even-even rare earth nuclei is analysed in a systematic way.