

原子核由超导态到正常态相变的迹象

杨春祥

(原子能科学研究院)

早在1960年B. R. Mottelson和J. G. Valatin就已指出^[1], 原子核的转动将使处于互为时间反演态上耦合成对的核子退耦, 当原子核转动频率达到某一临界值时, 科里奥利力将抵消核子间的对相互作用, 发生由超导态到正常态的相变。他们预言, 对A=180附近的原子核, 发生相变的临界角动量大约为12 \hbar 左右。

现在看来, 原子核发生由超导态到正常态的相变的临界角动量要比他们所预言的高得多。尽管这一预言不够准确, 但它大大激励了人们去探求这种相变发生的证据。

1971年 A. Johnson 等发现了回弯现象^[2]。它恰好发生在 Mottelson 等人预言的临界角动量附近。但人们很快便认识到这仅仅是由于处于 $i_{13/2}$ 轨道的一对中子拆对发生顺排所致^[3], 原子核实际上尚未发生由超导态到正常态的相变。自回弯现象发现以来, 原子核高自旋态研究已经成为一个相当活跃的研究领域, 加速器技术和探测技术的进展把高自旋态研究的疆界推向越来越高的自旋态, 但人们一直还未找到足够的实验证据证实Mottelson等预言的相变。

近年来出现了一些较高自旋态($I > 30\hbar$)的实验结果, 一个很有趣的现象是一些较典型的变形核在转动频率达到较高数值($\omega > 0.35 \text{ MeV}/\hbar$)时, 它们的运动学转动惯量 $J^{(1)}$ 和动力学转动惯量 $J^{(2)}$ 趋于一差不多相等的常数值(不再随转动率 ω 而变), 且接近其刚体转子值。

按定义

$$J^{(1)} = I_x / \omega \quad (1)$$

$$J^{(2)} = dI_x / d\omega \quad (2)$$

其中 I_x 是原子核的总角动量 I 在转动轴方向的分量, ω 是转动频率。它们可从下列关系式求得。

$$I_x = \sqrt{(I + \frac{1}{2})^2 + K^2} \quad (3)$$

$$\hbar\omega = [E(I+1) - E(I-1)]/2 \quad (4)$$

从上述表达式可看出, $J^{(1)}$ 和 $J^{(2)}$ 可从高自旋实验结果直接导出, 它们不依赖于任何理论模型。

图1给出以 ^{188}Hf 高自旋退激 γ 谱建立的 I_x 与 ω 的关系^[4]。在原子核转动频率 $\omega > 0.35 \text{ MeV}/\hbar$ 时, 三个转动带的 I_x 与 ω 均接近于线性关系, 斜率也差不多相等。由转晕带推算出的 $J^{(1)} = 62.9\hbar^2\text{MeV}^{-1}$, $J^{(2)} = 64.5\hbar^2\text{MeV}^{-1}$ 。这个值比 ^{188}Hf 的刚体转子转动惯量(按 $\epsilon_2 = 0.24$ 计算) $J_{rig} = 76\hbar^2\text{MeV}^{-1}$ 仅小15%—17%。

稀土区现有的一些较高自旋态的实验结果^[4-6]推算出来的 $J^{(1)}$ 和 $J^{(2)}$ 值列于表1。可以看出这些结果和上述的 ^{188}Hf 的结果类似, 在较高自旋态 $J^{(1)}$ 和 $J^{(2)}$ 均趋于一常数值, 也都略小于其刚体转子值。

特别值得指出的是巧妙的 $E_r - E_r$ 关联实验为我们提供了更高自旋态下的新信息。人们可以从 $E_r - E_r$ 关联二维谱45°对角线两侧的脊垄之间的宽度 D 直接获得转动惯量 J ($D = 8 \frac{\hbar^2}{J}$)^[7]。图2给出了由 $E_r - E_r$ 关联二维谱直接提取转动惯量的示意图。由图3我们可以看出高自旋分立谱只能提供 ω 小于 $0.55 \text{ MeV}/\hbar$ 的信息, 而 $E_r - E_r$ 关联谱为我们提供了更高自旋态, ω 接近 $0.75 \text{ MeV}/\hbar$

(图3中以。标出的实验点)的转动惯量值^[8]。值得注意的是在更高自旋态下,准连续谱区提取的转动惯量虽然统计较差,但实验点围绕其刚体转子值涨落。

表1. 稀土区某些核的 $J^{(1)}$ 、 $J^{(2)}$ 和 i

核素	组态 (π, α)	I区间	$J^{(1)}$ ($\text{MeV}^{-1}\hbar^2$)	$J^{(2)}$ ($\text{MeV}^{-1}\hbar^2$)	i
^{165}Yb	(-, 1/2)	45/2 - 61/2	65.7	61.2	2.2
^{167}Hf	(-, 1/2)	45/2 - 61/2	66.7	64.0	1.2
^{168}Hf	转晕带	22 - 32	62.9	64.5	-0.6
^{168}Yb	转晕带	22 - 34	61.8	62.0	-0.4
^{170}W	转晕带	24 - 30	64.2	65.0	-0.3

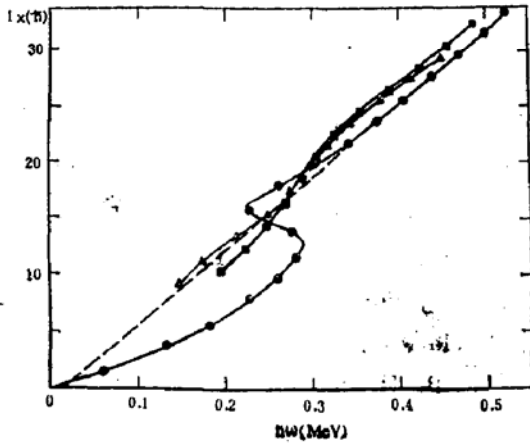


图1. ^{168}Hf 的转晕带(\circ)和两个负宇称带($\blacktriangle, \blacksquare$)的 I_x 和 ω 的关系。

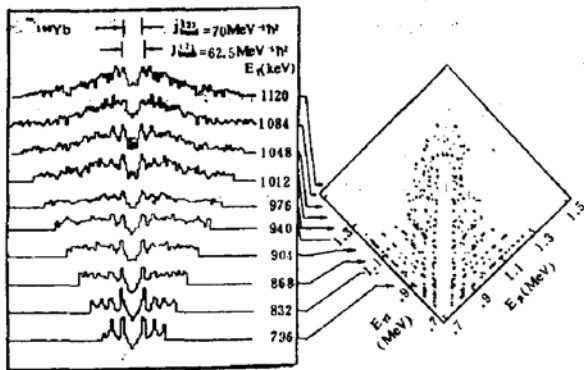


图2. 由 ^{168}Yb $E_r - E_r$ 二维关联谱(右)提取原子核转动惯量示意图。左图是沿垂直于 45° 对角线切割宽度为36KeV的切割投影谱。切割位置是 $E_{r1} = E_{r2} = 796-1120\text{KeV}$, 共10个谱。

这一现象是否意味着当原子核转动频率达到这一范围时,核子之间的对关联(或静

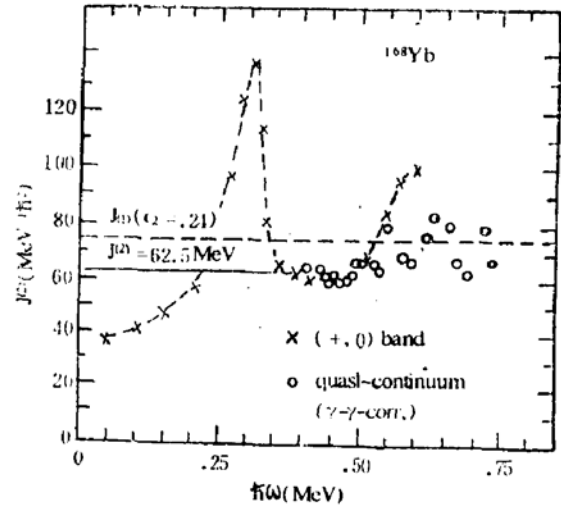


图3. ^{168}Yb 的转动惯量 $J^{(2)}$ 随转动频率 ω 的变化关系。 \circ 是由 $E_r - E_r$ 关联谱准连续区提取的, \times 是由分立谱转晕带提取的 $J^{(2)}$ 值。虚线是刚体转子值。

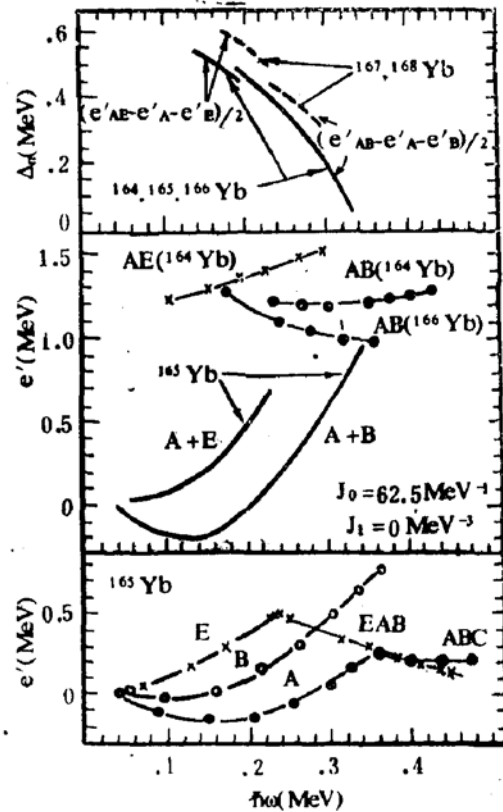


图4. 由实验结果提取中子对关联能 Δ_n 示意图。下: ^{165}Yb 在转动参考系中各种组态的能量 e' 随转动频率 ω 的变化关系。中:用相加原理由 ^{165}Yb 得到的2准粒子态的 $e'(\omega)$ 与直接由 ^{164}Yb 、 ^{166}Yb 得到的2准粒子态的 $e'(\omega)$ 的比较。上: Δ_n 随 ω 的变化关系。

态对关联) 已经基本消失了呢?

图4^[9]顶部给出了由¹⁶⁴⁻⁸Yb的高自旋分立谱提取的中子对关联能 Δ_n 随转动频率 ω 的变化关系。虽然这种推算的误差较大(如忽略了壳效应、核形变对 Δ_n 的影响及不同准粒子组态核实的差别等),但大体上可以看出中子对关联能随 ω 增大而降低,当 $\omega \sim 0.32$ MeV/h时, Δ_n 已降至0.2MeV左右。

上述实验事实是否意味着已经找到了由超导态到正常态的相变的实验证据,尽管目前对这一问题还有争议,但至少我们已经大大前进了一步。原子核在什么条件下将发生由超导态到正常态的相变无疑是一个十分重要的课题。而发生相变之后的核结构问题将是一个更吸引人的课题。

参考文献

1. B. R. Mottelson and J. G. Valatin
Phys. Rev. Lett. 5(1960) 511
2. A. Johnson, H. Ryde and I. Sztarkiev
Phys. Lett. B34 (1971) 605
3. F. S. Stephens and R. S. Simon
Nucl. Phys. A183 (1972) 257
4. R. Chapman, J. C. Lisle, J. N. Mo, E. Paul, A. Simcock, J. C. Wilmoth, J. R. Lesley, H. G. Price, R. M. Walker, J. C. Bacelar, J. D. Garrett, G. B. Hagemann, B. Herskind, A. Holm and P. J. Nolan
Phys. Rev. Lett 51 (1983) 2265
5. J. Bacelar, C. Ellegaarde, J. D. Garrett, G. B. Hagemann, B. Herskind, A. Holm, C. X. Yang, P. O. Tjom, J. C. Lisle, Contribution to the 5th Nordic Meeting on Nuclear Physics, March 1984, Jyväskylä, Finland
6. Schück, N. Bendjaballah, K. M. Diamond, Y. Ellis-Akivali, K. H. Lindenberg, J. O. Newton, S. Shih, F. S. Stephens, J. D. Garrett, and B. Herskind.
Proceedings of XX International Winter Meeting on Nuclear Physics, Bormio, Italy, Jan. 1982 No. 25, P. 197
7. O. Anderson, J. D. Garrett, G. B. Hagemann, B. Herskind, D. L. Hillis and I. L. Reidinger
Phys. Rev. Lett 43 (1979) 687
8. G. B. Hagemann
16th Masurian Summer School on Nuclear Physics "Heavy Ions in Nuclear Physics" Aug. 27-Sept. 8, 1984
Mikolajki, Poland
9. J. Bacelar, C. Ellegaarde, J. D. Garrett, G. B. Hagemann, B. Herskind, A. Holm, C. X. Yang, P. O. Tjom, J. C. Lisle Phys. Lett. 即将发表

(上接1页)

- [2] D.A. Goldberg et al., Phys. Rev. C10, 1362 (1974).
- [3] A. A. Cowley, N. S. Wall, Phys. Rev. C17, 1322 (1978).
- [4] R.M. DeVries et. al. Phys. Rev. Lett. 39, 450 (1977).
- [5] M. E. Brandan Phys. Rev. Lett. 49, 1132 (1982).
- [6] H.G. Bohlen et. al., Z. Phys. A308, 121 (1982).
- [7] M. Buenerd et. al. Phys. Rev. C26, 1299(1982).
- [8] 陈学诗, H. G. Bohlen et. al. 原子物理待发表.
- [9] K. M. McVoy, G. R. Satchler Nucl. Phys. A417, 157 (1984).
- [10] H. G. Bohlen, 陈学诗 et. al. Nucleus-Nucleus Collisions, Visby, Sweden, 1985, 6. 10-14.