

## $\alpha$ 回弯、核子关联和形变

顾金南 杨世俊 李树河<sup>1)</sup> 刘文勤<sup>2)</sup>

(中国科学院近代物理研究所)

### 摘 要

本文讨论了 $\alpha$ 回弯、核子关联和形变之间的关系。一般说来,规范空间中的回弯现象总是联系于形状跃迁; $\alpha$ 回弯不仅联系于四极形状跃迁,还可能联系于其它的形状跃迁或形状变化。回弯现象也决定于同类核子对关联和n-p关联竞争的结果。综合壳模型基本上能描述核的形状及其随核子数增加而变化的过程。

### 一、引 言

在原子核表面,存在着同类核子成对现象,称之为中子对关联和质子对关联<sup>[1]</sup>;由于核子间的相互作用,中子质子之间也存在着关联,称之为n-p关联。类似地,在一些核的表面,四核子间存在着关联,或中子对和质子对之间存在着关联而形成 $\alpha$ 结团<sup>[2]</sup>。对和 $\alpha$ 结团是核表面的两种子结构,是两种性质各异而又互相关联着的子结构。

在普通空间中,如核有形变,则核就有确定的空间取向,就有转动,就有Yrast态的回弯现象等<sup>[1]</sup>。结构类似于普通空间中的转动的集体运动,也可以在其它空间中发生,只要在这些空间内核具有确定其取向的“形变”。在对和 $\alpha$ 结团的情形下,对场和四核子关联场就是规范空间内的形变,粒子数和核子结团的Fermi能 $\lambda$ 就相应于普通空间中的转动角动量和转动频率。于是在规范空间中,就存在着转动,以及对<sup>[3]</sup>和 $\alpha$ <sup>[4]</sup>回弯现象。而“回弯”往往联系于核的某种形状跃迁。因为回弯曲线的斜率近似地反映Fermi面附近的单粒子能级密度的变化,所以“回弯”的出现表明原子核由于核子数的增加,由单粒子能级简并度高的靠近满壳的区域变到了单粒子能级简并度逐渐消失但Fermi面增高的(变形)区域,这从能量上说是不利的,于是核就调节它的形变以降低能量。因而,“回弯区”就是核的形状跃迁处,或形状的快速变化处。

早在1950年实验上就发现了铜系核和稀土核存在大形变,后来又发现了其它的形变区。这些核的形变有丰富的内容,有四极和十六极形变等。至于核的激发态,就具有更丰富的内容。从实验值可以看到,对不同壳,随着中子数和质子数的添加,核是如何从球形

1) 中国人民解放军(重庆)后勤工程学院。

2) 兰州大学现代物理系

本文1985年7月11日收到。

到变形  
n-  
型(BM  
核形变  
子间的  
在这方  
对相互  
以成功  
本  
包括n-  
突变,并  
变化,在  
观简化  
仅适用

关

来描述  
转动频  
 $\lambda_n(2$

双质子

图  
(b)

到变形,以及形状又是怎样变化的!

n-p 关联在核的形变问题上起着关键性的作用。综合集体模型,即 Bohr-Mottelson 模型 (BMM) 认为,核子间存在着唯象的长程的残余四极四极相互作用,用以描述重核、中重核形变和集体效应相当成功<sup>[5]</sup>。另一方面,也早在 1950 年,从壳模型观点提出<sup>[6]</sup> 中子质子间的同位标 (isoscalar) 残余相互作用引起形变和核的一些集体效应。Federman 等<sup>[7]</sup> 在这方面做了一系列的工作。具体说来,就是  $T=0$  的中子质子关联超过了同类核子对相互作用能时,核的形变就产生了。70 年代提出的相互作用玻色子模型 (IBM)<sup>[8]</sup> 也可以成功地描述原子核的形变。

本文就是想探索“回弯”,主要是  $\alpha$  回弯、核子关联和形变之间的关系。这里核子关联包括 n-p 关联和同类核子对关联。首先,讨论了对回弯现象,在对回弯处,对关联能量有突变,相应于某种四极形状跃迁;而  $\alpha$  回弯不仅对应于四极形状跃迁,或四极形变的突然变化,它的第二个回弯还可能对应于其它形状跃迁,例如十六极形状跃迁。综合壳模型微观简化计算<sup>[9]</sup> 表明中子质子相互作用能超过同类核子相互作用能时,形变产生了。这不仅适用于对回弯 ( $N$  或  $Z$  不变),也适用于  $\alpha$  回弯曲线 ( $T_2$  值不变) 的情况。

## 二、回弯现象和形变

关于普通空间和规范空间中的回弯现象可以用线性化 CHF 哈密顿

$$H' = H_0 - \varepsilon Q - \Delta_p (\beta^+ + \beta) - \omega I - \lambda \hat{N} \quad (1)$$

来描述<sup>[10]</sup>。这里,粒子数  $N$ 、Fermi 能  $\lambda$  和对场  $\Delta_p$  对应于普通空间中的转动角动量  $I$ 、转动频率  $\omega$  和四极场  $\varepsilon$ 。可见,  $\Delta_p$  就是规范空间中的形变。而双中子 Fermi 能定义为

$$\begin{aligned} \lambda_{2n}(Z, N, I, \nu) &= \partial E(Z, N, I, \nu) / \partial N \\ &\approx \frac{1}{2} [E(Z, N+1, I, \nu) - E(Z, N-1, I, \nu)], \end{aligned} \quad (2)$$

双质子 Fermi 能同样定义。对于基态,  $I=0$ , 核系统的能量  $E$  就是基态的结合能

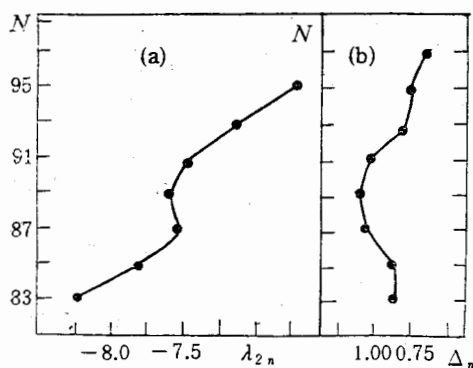


图 1: (a) 为  $Z=64$  时的  $N$  vs.  $\lambda_{2n}$  图,即规范空间的对回弯曲线,  $N \approx 89$  处为转折点。  
(b) 为  $N$  vs.  $\Delta_n$  图,  $N \approx 89$  处中子对能  $\Delta_n$  呈现极大。

空间中的  
能联系于  
-p 关联竟  
变化的过

关联<sup>[11]</sup>; 由于  
在一些核的  
团<sup>[12]</sup>。对和  $\alpha$

Yrast 态的回  
中发生,只要  
和四核子关联  
空间中的转动  
现象。而“回  
面附近的单  
单粒子能级简  
高的(变形)  
回弯区”就是

其它的形变  
就具有更丰  
如何从球形

$B(N, Z)$ .  $\nu$  为其它量子数. 图 1(a) 就是  $N$  vs.  $\lambda_{2n}$  对回弯图, 可以看到, 在中子数  $N \approx 88 \sim 90$  处有回弯现象, 相应的中子对关联  $\Delta(\text{exp})$  也增大, 有小的突变(图 1(b)), 同时, 回弯区也对应着形状跃迁, 从球形变到大变形的跃迁.

描述普通空间回弯现象和规范空间的  $\alpha$  回弯现象可以用形式上类似于 (1) 式的哈密顿, 但这里粒子数是质量数  $A^{[4]}$ , Fermi 能是

$$\lambda'_\alpha(A, T_3, I, \nu) = \frac{\partial E(A, T_3, I, \nu)}{\partial A} \approx \frac{1}{4} [E(A+2, T_3, I, \nu) - E(A-2, T_3, I, \nu)] \quad (3)$$

对于基态

$$\lambda'_\alpha(A, T_3) = \frac{1}{4} [-Q_\alpha(A+2, T_3) + B(\alpha)] \quad (4a)$$

$$= \lambda_\alpha(A, T_3) + \frac{1}{4} B(\alpha) \quad (4b)$$

$$= \frac{1}{2} [\lambda_{2n}(A+2, T_3) + \lambda_{2p}(A, T_3-1)]. \quad (4c)$$

这里  $Q_\alpha$  是  $\alpha$  衰变能;  $B(\alpha)$  是  $\alpha$  粒子结合能;  $\lambda_{2n}(A, |T_3)$  的定义与 (2) 式相似, 只是将  $N, Z$  换成  $A$  和  $T_3$ . 这里  $T_3 = \frac{1}{2}(N-Z)$  不变. 从 (4c) 式可见, 如考虑  $\alpha$  结团由 Fermi 面处成对 neutrons 和成对 protons 形成, 则  $\alpha$  结团的 Fermi 能正好是  $\lambda_{2n}$  和  $\lambda_{2p}$  的一半.

如前所述, 对回弯联系于四极形状跃迁, 因为对场相应于普通空间中的四极场, 这种关系可以由哈密顿 (1) 式描述. 在中重核和重核中可以认为  $\alpha$  结团由成对 neutrons 和成对 protons 组成, 所以  $\alpha$  回弯也联系于四极形状跃迁. 而从实验数据的定性分析看,  $\alpha$  回弯还可能联系于十六极形状跃迁. 图 2(a) 为  $T_3 = 24$  的  $\lambda_\alpha$  vs.  $A$  的  $\alpha$  回弯图,  $E(4^+)/E(2^+)/$

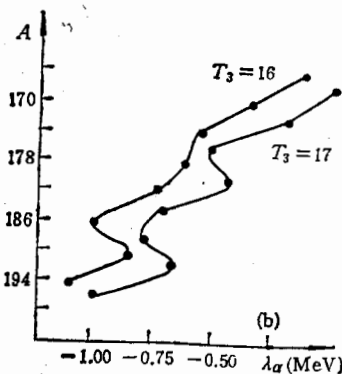
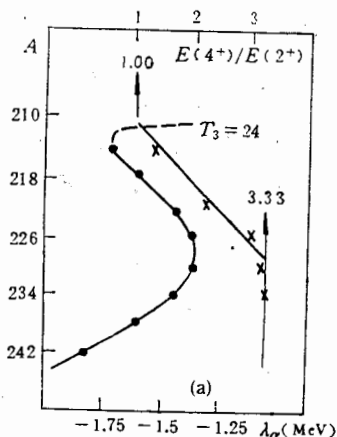


图 2(a)  $T_3 = 24$  时  $A$  vs.  $\lambda_\alpha$  曲线与  $A$  vs.  $E(4^+)/E(2^+)$  曲线的比较.  $x$  示  $E(4^+)/E(2^+)$  的实验值.  $E(4^+)/E(2^+)$  值为 1.00 时核是球形, 为 3.33 时核是大变形核.

图 2(b)  $T_3 = 16, 17$  时  $A$  vs.  $\lambda_\alpha$  图, 即  $\alpha$  回弯曲线. 这里  $T_3 = 17$  的  $\alpha$  回弯曲线明显地呈现双回弯现象.

$E(2^+) \approx$  回弯对应形状跃迁从负的  $\beta$  对普通空核的带  $\alpha$  的  $\beta_4$  到  $\beta_1$  级差分  $\Delta$  称态能量能具有'

为了  $\Delta = 0$ ,  $\hbar\omega_0$ , 合 | 引言中所定于同  $\Delta$  也好, 都主要决定

综合 相互作用 作用来计 相互作用 假定满

看到, 在中子数突变(图 1(b)), 于(1)式的哈密顿量中,  $E(2^+) \approx 1$  为球形,  $E(4^+)/E(2^+) \approx 3.33$  为刚性转子值, 此时核为大形变核。显然,  $\alpha$  回弯对应着四极形状跃迁。图(2b)是  $T_3 = 17, 16$  的  $\alpha$  回弯图。第一个回弯对应着四极形状跃迁, 从扁圆形到拉长形四极形状跃迁, 而第二个回弯可能对应着十六极形状跃迁, 从负的  $\beta_4$  到正的  $\beta_4$  的形状跃迁。这种形状跃迁发生在半壳处, 即中子数  $N \approx 104$  处。它对普通空间中的转动也有影响, 这就是带交叉频率的突然下降。例如,  ${}_{76}\text{Os}^{176-186}$  同位素核的带交叉频率在  $N \approx 105$  处为极小<sup>[10]</sup>。对铜系区核, 实验上也发现了类似现象, 从正的  $\beta_4$  到负  $\beta_4$  的跃迁<sup>[11]</sup>, 大致在  $N \approx 146$  附近。但在  $\alpha$  回弯曲线中反映不出来, 必须在一级差分  $\Delta\lambda_0$  中才能反映出来。这种跃迁大致也对应于铜系区最低的  $K^\pi = 0^-$  带的负宇称态能量曲线的次极小<sup>[12]</sup>。关于八极形变, 某些  $\alpha$  回弯曲线回弯区的转折点附近的核可能具有八极平衡形变<sup>[12]</sup>。但这些核的八极形变问题尚有待于进一步讨论和实验证实。

### 三 理论讨论

为了更好的理解图(1a), Åberg 等<sup>[3]</sup>曾作简单的计算, 如图(3)所示。从图上可见,  $\Delta = 0, \epsilon = 0$  即是球单粒子能级情况, 图中为台阶式的曲线。引入  $\Delta$ , 这里  $\Delta = 0.12 \hbar\omega_0$ , 台阶曲线就光滑化, 但并不产生回弯。引入形变 ( $\epsilon = 0.25$ ) 立即产生回弯。正如引言中所说和下面将要进行的讨论所表明的, 核的形状决定于核子间的残余相互作用, 决定于同类核子对关联和 n-p 关联互相竞争的结果。所以从本质上说, 对回弯也好,  $\alpha$  回弯也好, 都是决定于同类核子对关联和 n-p 关联互相竞争的结果。而这种关联的大小强弱, 主要决定于核子所占据的“轨道”和核子间的残余相互作用。

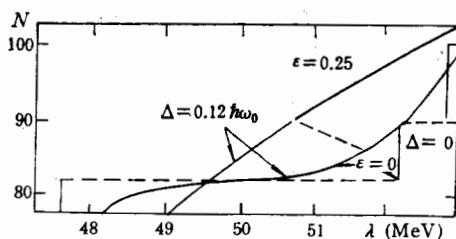


图 3: 计算的  $N$  vs.  $\lambda_{2n}$  图<sup>[3]</sup>, 这里分两种情形, 球形  $\epsilon = 0$  (对能或“对形变”  $\Delta_n = 0$  和  $\Delta_n = 0.12\hbar\omega_0$ ) 和形变  $\epsilon = 0.25$  ( $\Delta_n = 0.12\hbar\omega_0$ ) 两种情形。  $\lambda_{2n}$  是用标准的 Nilsson 单粒子轨道和 BCS 方程计算得到的。从图上可见,  $N = 86$  为球形,  $N = 88$  为转折点  $N = 90$  为大变形核。

综合壳模型认为: 同位标残余 n-p 相互作用能量  $W_{np}$  超过  $T = 1$  的同类核子残余相互作用能量  $W_{nn} + W_{pp}$  时, 形变就产生了。这里选用球谐振子波函数和短程  $\delta$  相互作用来计算  $W$ , 这样可以大大降低可调参数的数目, 而保持基本的物理内容。核子间的相互作用为  $\delta$  力

$$V_{12} = 4\pi g\delta(\vec{r}_1 - \vec{r}_2) \quad (5)$$

假定满壳外有若干个  $j$  壳, 其角动量值为  $j_i$ , 则核子间相互作用能量<sup>[9]</sup>

$$W_{nn} = \sum_i W(j_{n_i}) + \sum_{i < j} W(j_{n_i} j_{n_j}), \quad (6a)$$

$$W_{pp} = \sum_i W(j_{p_i}) + \sum_{i < j} W(j_{p_i} j_{p_j}), \quad (6b)$$

$$W_{np} = \sum W(j_{n_i} j_{p_j}). \quad (6c)$$

这里  $W(j_i)$  是  $j_i$  态内两个相同核子之间的相互作用能,  $W(j_i j_j)$  是不同  $j$  壳两个核子之间的相互作用能.

$$W(j_{n_i} j_{n_j}) = \frac{1}{2} n_i n_j F_{ij}^{(0)}, \quad (7a)$$

$$W(j_{n_i} j_{p_j}) = n_i \cdot p_j F_{ij}^{(0)} \quad (7b)$$

$n_i$  和  $p_i$  分别是该  $i$  壳上占据的中子数和质子数,  $F_{ij}^{(0)}$  为核子间相互作用矩阵元中径向波函数积分部分. 于是, 当

$$\frac{W_{np}}{W_{nn} + W_{pp}} \geq 1 \quad (8)$$

形变便产生了, 对于  ${}_{66}\text{Dy}$ 、 ${}_{68}\text{Er}$  和  ${}_{70}\text{Yb}$  同位素核, 对应于  $N \approx 90$  处. 图 4(a) 是计算结果, 图 4(b) 是实验值,  $\delta\langle r^2 \rangle$  是均方电荷半径的积分变化值, 假定  $N = 82$  时  $\delta\langle r^2 \rangle = 0$ ; 斜线是由小滴模型 (droplet model) 给出, 旁边注明了所表示的四极形变值. 显然, 图 4(a) 和 4(b) 是相似的. 这样一种简化计算竟能比较准确地显示形变产生处和不同同位素核的行为, 令人惊奇. 要知道, 这种简化计算没有可调参数. 这表明, 综合壳模型是能反映原子核的形变特性的, 也能反映  $N(\lambda_{2n})$  图回弯行为的. 正是在  $N \approx 90$  处, 对  $Z = 64, 66, 68$  等同位素, 将发生“对”回弯(或上弯), 这从图 1(a) 可见.

沿  $\alpha$  衰变链, 或沿  $\alpha$  回弯曲线来计算  $W$ , 情况就不同了, 因为中子和质子同时增加(或减少);  $W_{nn}$  和  $W_{pp}$  同时改变. 图 5(a) 是铜系区核  $W_{np}/(W_{nn} + W_{pp})$  vs.  $A$  图, 对不同

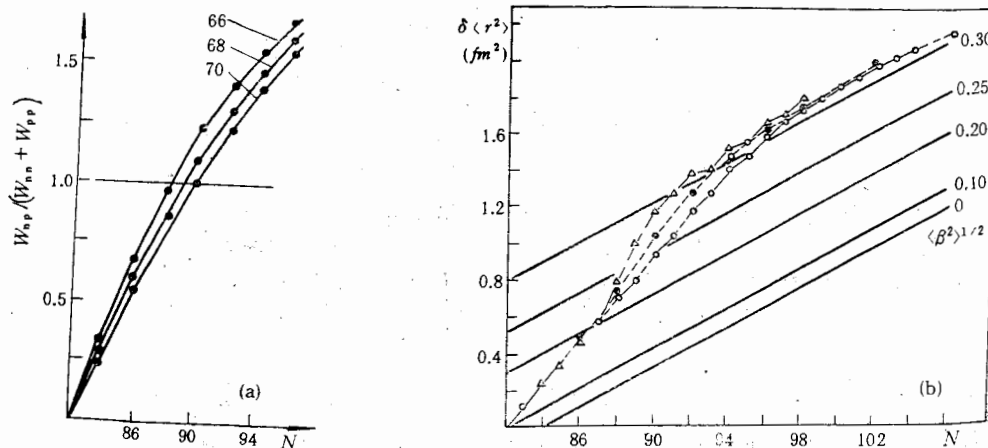


图 4(a) 计算的  $Z = 66, 68, 70$  的同位素核的  $N$  vs.  $W_{np}/(W_{nn} + W_{pp})$  图,  $N \approx 89$  处, 比值为 1 大致对应于图 4(b) 中  $\langle \beta^2 \rangle^{1/2} = 2.5$

图 4(b)  $N$  vs.  $\delta\langle r^2 \rangle$  图.  $\delta\langle r^2 \rangle$  为相对于  $N = 82$  的均方电荷半径积分变化值.  $N = 82$  处  $\delta\langle r^2 \rangle = 0$ .  $\beta$  为形变参数, 等形变线  $\langle \beta^2 \rangle^{1/2}$  值由小滴 (droplet) 模型给出.  $\triangle$   ${}_{66}\text{Dy}$   $\bullet$   ${}_{68}\text{Er}$   $\circ$   ${}_{70}\text{Yb}$

的  $T_3$  值  
以对  
种四极  
迅即  
原子核  
在  
正) 计  
因为核  
二重简  
致形变

关系已  
次比较  
定于满  
通  
力和匹  
程四极  
定中子  
度, 例  
则不同  
( $T_3 =$   
并没有  
的情况  
用的性

(6a)

(6b)

(6c)

两个核子之

(7a)

(7b)

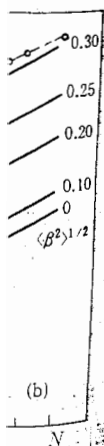
中径向波

(8)

) 是计算结  
 $s(r^2) = 0$ ;

显然, 图  
和不同同位  
气模型是能  
处, 对  $Z =$

时增加(或  
图, 对不同



≈ 89

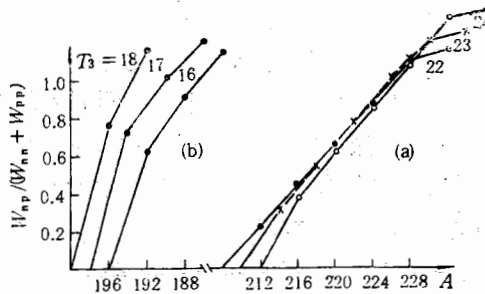


图 5: a 为铜系核  $T_3 = 22, 23, 24$  时的  $W_{np}/(W_{nn} + W_{pp})$  vs.  $A$  图.  $A = 226$ ,  $N \approx 136$  处比值为 1. b 为  $T_3 = 16, 17, 18$  时的  $A$  vs.  $W_{np}/(W_{nn} + W_{pp})$  图.  $A \approx 186$  ( $T_3 = 16$ ),  $A = 190$  ( $T_3 = 17$ ) 和  $A \approx 194$  ( $T_3 = 18$ ) 处比值为 1.

的  $T_3$  值, 大致在  $N \approx 136$  处形变产生, 或发生形状跃迁, 从球形到大形变; 这与图 2(a) 可以对应起来, 在图 2(a) 中回弯的转折点  $N_c$  就在 136 处,  $N_c \approx 136$ . 图 5(b) 则反映另一种四极形状跃迁, 从扁圆形到拉长形四极形状跃迁. 从图 5(b) 可见,  $W_{np}/(W_{nn} + W_{pp})$  迅即上升到 1, 这与图 2(b) 是一致的. 所以, 更确切的说,  $W_{np}/(W_{nn} + W_{pp}) \approx 1$  处, 原子核的形状发生突变, 或发生跃迁.

在“规范空间中的  $\alpha$  回弯现象”一文<sup>[4]</sup>中, 我们用不同的质量公式(包括壳修正和对修正)计算了  $\alpha$  回弯曲线, 都能再现实验的  $\alpha$  回弯现象, 表明,  $\alpha$  回弯是与壳效应相联系的. 因为核由球形到大变形时, 单粒子能级由高度简并到无简并(对 Nilsson 势, 则是到  $\pm Q$  二重简并), 壳效应消失了, 形变产生了. n-p 关联的作用, 正是使球壳模型组态混杂, 导致形变的产生.

#### 四、结 束 语

对场和四极场之间的相似性可以用(1)式的哈密顿来描述, 对回弯与四极形状跃迁的关系已有一些文章讨论.  $\alpha$  回弯与形状跃迁的关系, 虽然以前我们已指出, 但本文是第一次比较详细的讨论了这个问题. 必须指出, 对回弯和  $\alpha$  回弯, 象原子核的形状那样, 都决定于满壳外核子间的残余相互作用, 决定于同类核子对关联和 n-p 关联互相竞争的结果.

通常用以描述形变的综合集体模型, 即 BMM, 考虑核子间的残余相互作用包括对力和四极四极力. 同类核子之间的对关联使核维持球形, 而核子间, 主要是 n-p 之间的长程四极四极相互作用使核变形. 所以, 核的形状是这二者竞争的结果. 在 IBMII 中, 也假定中子玻色子和质子玻色子间存在着四极四极相互作用, 虽然 IBM 描述形变是从另外角度, 例如取相应群链的经典极限来进行的, 但和 BMM 本质上是相似的<sup>[13]</sup>. 综合壳模型则不同, 它是从壳模型观点出发描述形变的, 并且认为 n-p 相互作用是残余的同位标 ( $T_3 = 0$ ) 相互作用. 本文的简化计算结果表明, 这种对形变的描述是近似正确的. 本文并没有以综合壳模型去讨论十六极形状跃迁, 因为这种简化计算对满壳外如此多的粒子的情况已经不一定适用. 由上可见, BMM 和综合壳模型虽然出发点不同, n-p 相互作用的性质不同, 但在描述形变中, n-p 关联的重要作用是相似的, 或者甚至可以说是相同

的。

$\alpha$  结团与形变的情况不同,对关联和 n-p 关联的增加都将有利于  $\alpha$  结团的形成。

在普通空间,  $I_x V s \omega$  的 Yrast 回弯图上,实验所观测到的超带一般是准粒子转动排列带,因而在回弯区“对形变”或对能的变化很大,而形变  $\beta$  的变化很小。但在规范空间,回弯区 ( $A$  Vs.  $\lambda_\alpha$  图 2a) 形状变化非常快,从球形到大变形;而“对形变”(图 1)或对能变化不大,比较平缓。这正好与普通空间回弯区所反映的情况相反。

$\alpha$  回弯、核子关联和形变的关系是很复杂的一个问题,本文只是初步的(但比较详细的)讨论。可以说,  $\alpha$  回弯和形变都决定于核子关联,决定于对关联和 n-p 关联的竞争;而  $\alpha$  回弯和形变正是因为核子关联而联系起来。

### 参 考 文 献

- [ 1 ] A. Bohr, B. R. Mottelson, *Nuclear structure*, 1(1969); 2(Benjamin, New York 1975).
- [ 2 ] 顾金南, 杨世俊, 李树河, “n-p 关联和  $\alpha$  结团”, 原子核物理, 待发表.
- [ 3 ] S. Aberg, R. Bengtsson, I. Ragnarsson, Jing-ye Zhang, Proc. Workshop on Nucl. Phys. Treiste, Italy, 5-30 Oct. (1981), p. 273.
- [ 4 ] 顾金南, “科学通报”, 22(1984), 1364.  
顾金南, 规范空间中的  $\alpha$  回弯现象”, 原子核物理, 待发表.
- [ 5 ] B. R. Mottelson, Proc. of international school of Physics “Enrico Fermi” Course XV (1960), edited by Racah (1962), 44.
- [ 6 ] A. Deshalit, M. Goldhaber, *Phys. Rev.*, 92(1953), 1211.
- [ 7 ] P. Federman, S. Pittel, *Phys. Rev.*, C20(1979), 820.
- [ 8 ] A. Arima, F. Iachello, *Phys. Rev. Lett.*, 35(1975), 1069.
- [ 9 ] N. Zeldes, *Nucl. Phys.*, 2(1956—1957), 1.
- [ 10 ] J. D. Garrett et al., *Phys. Lett.*, 108B(1982), 77.
- [ 11 ] J. D. Zumbro et al., *Phys. Rev. Lett.*, 53(1984), 1888.
- [ 12 ] G. A. Leander et al., *Nucl. Phys.*, A388(1982), 452.
- [ 13 ] 徐躬耦, 杨亚天, 顾金南, 高能物理与核物理, 3(1984), 352.

## $\alpha$ -BACKBENDING, NUCLEON-NUCLEON CORRELATION AND DEFORMATION IN NUCLEI

GU JIN-NAN YANG SHI-JUN LI SHU-HE LIU WEN-QIN

(Institute of Modern Physics, Academia Sinica, Lanzhou)

### ABSTRACT

The relation between  $\alpha$ -backbending, nucleon-nucleon correlation and deformation in nuclei has been discussed. In general the backbending phenomena in gauge space are related to shape transition, however  $\alpha$ -backbending is not only related to the quadrupole shape transition, but also related to other kinds of shape transition. The  $\alpha$ -backbending phenomena also depend on the competition between n-p correlation and pair correlation, i.e., n-n and p-p correlation. The change of nuclear deformation with increasing nucleon number can be fundamentally described by unified shell model.

Data  
c  
The S  
Stocha  
e<sup>+</sup>e<sup>-</sup>  
Integr  
ti  
Muon-  
E  
Therm  
n  
Monte  
L  
The F  
..  
The E  
ri  
The F  
ti  
Relativ  
Densit  
te  
The A  
2)  
Multip  
N  
The R  
R  
A Sm  
Investi  
..  
Z  
A Res  
..  
Z  
12C +  
A Sim  
..  
The L  
..  
 $\alpha$ -Back  
..