

# 谈谈核的高自旋态

张 敬 业

(中国科学院近代物理研究所)

原子核的高自旋态领域主要是由 A. Bohr 和 B. Mottelson 学派开创出来的. 从五十年代到现在它已有三十多年历史, 基本理论思想是五十年代建立的. 七十年代初随着加速器和探测手段的巨大发展, 观测到了大量新的实验结果, 反过来又推进了理论的发展. 当前, 它已是核物理特别是重离子物理中十分活跃的前沿领域, 这吸引了世界各国大量的理论与实验工作者.

## 一、历史的回顾<sup>[1]</sup>

二十至三十年代, 人们认为如果原子核存在转动运动, 则所有原子核应象分子一样, 都有转动运动, 而且转动惯量就是它的刚体值; 或者象原子一样, 根本无转动运动. 所以三十年代, 实验上已观察到某些原子核具有转动谱, 但仍未能对原子核的集体转动自由度获得一致的认识. 加上四十年代壳结构思想迅速发展并获得巨大成功, 原子核内单粒子运动的特征吸引了人们的主要注意力. 因此, 一直到五十年代初期, 由于实验资料, 特别是电四极矩数据的积累, 通过 A. Bohr 和 B. Mottelson 等的系统工作, 综合了液滴模型和壳模型的思想, 原子核的转动自由度才获得了正确的理论描述. 人们认识到原子核也象其它微观客体一样, 只要平均势场不是球对称的, 则存在转动自由度, 转动谱 (为简单起见, 以偶偶核为例) 仍大致服从 (本文用  $\hbar = 1$  单位)

$$E(I) = \frac{I(I+1)}{2\mathcal{I}} \quad (1)$$

规律, 其中  $I$  是核的自旋,  $\mathcal{I}$  是转动惯量. 大量低激发谱的实验结果, 证实了上述认识. 而

理论上 S. G. Nilsson 的形变场中单粒子运动的定量描述<sup>[2]</sup>, 也给出了良好的结果. 但是实验上观察到的转动惯量  $\mathcal{I}$  却比预计的刚体值小 2—3 倍.

1958 年, Bohr, Mottelson 和 Pines<sup>[3]</sup> 发现在原子核中, 处于时间反演态的两核子之间也象超导体中的电子对一样, 存在对关联. 原子核的奇偶质量差  $\Delta$ , 正是这种对关联效应的一种量度. 从而立即从原则上解释了形变核转动惯量远小于刚体值的现象. 1960 年, Mottelson 和 Valatin<sup>[4]</sup> 注意到 Coriolis 力的反对作用, 预言了当自旋增大至某一临界值时, 对关联将会被破坏, 出现相变, 核将由存在对关联的超流相过渡到无对关联的正常相, 相应地转动惯量将趋于刚体值.

1971—1972 年, 瑞典的 A. Johnson 等<sup>[5]</sup> 从  $^{162}\text{Er}$  等核的比较高的转动能谱 ( $I = 18^+$ ) 中, 第一次作出了转动惯量  $\mathcal{I}$  和转动频率平方  $\omega^2$  关系图, 发现了著名的回弯 (backbending) 现象. 在某一临界值  $\omega_c$  附近,  $\mathcal{I}$  有一突增而

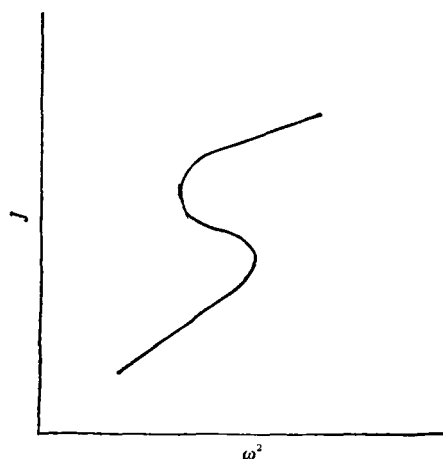


图 1 回弯现象

$\omega$  反而变小, 见图 1. 这似乎证实了上述相变的预言. 但在 1972 年, F. Stephens 和 R. Simon<sup>[6]</sup> 提出了转动排列模型, 对当时所观察到的稀土区大形变核中的回弯现象作了更合理的解释. 他们指出, 对于单粒子角动量为  $j$  的原子核, 由于总哈密顿量可以写成集体转动能和内部激发能之和, 即

$$\left. \begin{aligned} H &= T + H_{\text{in}}, \\ T &= \frac{R^2}{2\mathcal{I}_R} \\ &= \frac{I-j}{2\mathcal{I}_R}. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

所以, 核在转动中必定存在 Coriolis 力和离心力, 其对应的能量表示为

$$T_c = -\frac{I \cdot j}{\mathcal{I}_R}, \quad (3)$$

其中  $R$  为转子的角动量,  $\mathcal{I}_R$  为其转动惯量. 显然, 具有不同  $j$  的单粒子所感受到的 Coriolis 力是不同的, 高  $i$  低  $Q$  的, 受力最大, 最易被拆对, 而且  $j$  将逐渐排列到  $I$  的方向上去 (在 Pauli 原理允许的意义下), 见图 2. 这样当

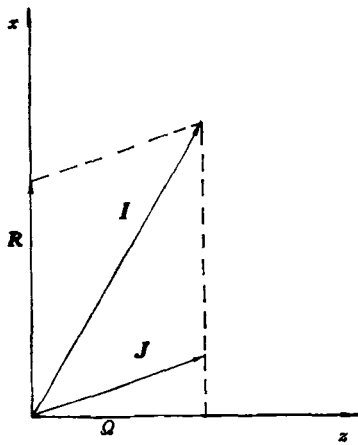


图 2 核的自旋  $I$  是集体转动角动量  $R$  和单粒子角动量  $J$  的总和,  $z$  为对称轴,  $x$  为转动轴,  $Q$  为  $J$  在  $z$  轴上的投影

$I$  比较小时, 对于偶偶核, 核子均配对存在, (2) 式中的  $j$  为零, 但是当  $I \geq I_c$  时, 有一对高  $i$  低  $Q$  核子被拆对并排列到转动轴方向, 亦即有一排列角动量  $i$  ( $i = \sum j_x$ ) 产生, 于是由于有效转动惯量

$$\mathcal{I} = I \left( \frac{dE}{dI} \right)^{-1} = \frac{I}{I-i} \mathcal{I}_R, \quad (4)$$

而转动频率

$$\omega = \frac{dE}{dI} = \frac{I-i}{\mathcal{I}_R}. \quad (5)$$

$\mathcal{I}$  将有一突然增大, 对应地  $\omega$  有一减小, 于是出现回弯现象.

转动排列模型不仅可以解释回弯现象, 原则上还可以具体指出究竟是那一对质子或者中子首先拆对, 贡献了这一排列角动量. 进一步的理论和实验研究表明, 稀土区的大形变核其第一回弯是来自于  $i_{13/2}$  中子对的转动排列.

由此可见, 原子核的总自旋来自两个方面: 集体转动和单粒子排列. 前者是核绕垂直于对称轴的方向的集体转动, 特征是规则的转动谱和大的  $E2$  跃迁几率; 后者则是单粒子运动, 特征是转动谱的不规则性及小的  $E2$  跃迁几率. 通常其约化电四极跃迁几率  $B(E2)$  比集体转动的小一到两个数量级 (见图 3), 两者的相互交织, 影响了整个核的转动运动.

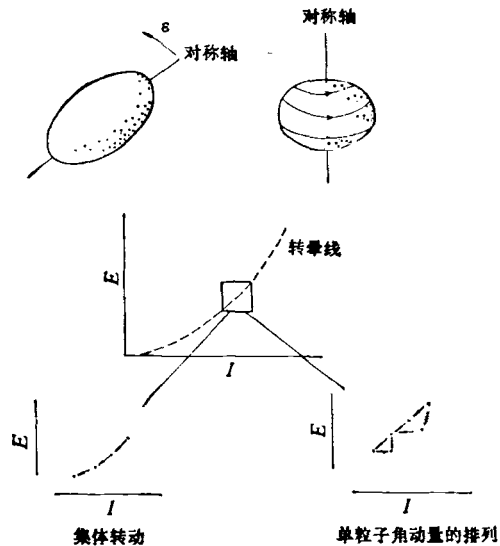


图 3 两类转动的示意图

(左侧为集体转动, 右侧为单粒子角动量的排列——绕对称轴的“转动”; 转晕线为给定自旋下的最低能量态所组成)

造成转动惯量突增, 除了可能来自自由超流相至正常相的相变, 或者来自于某些单粒子轨道的转动排列, 还可能来自形状相变——由较

小形变至较大形变。这自然也对应于转动惯量的突增。

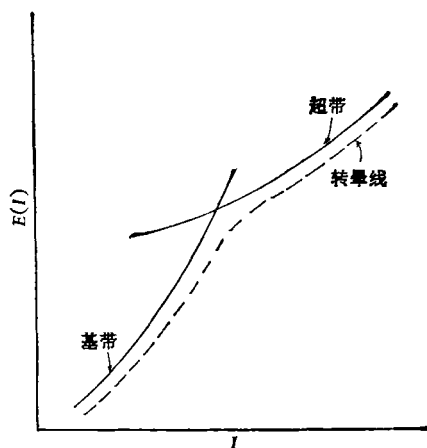


图4 带交叉图象

如果用带交叉图象(见图4)来解释,则实验上首先观察到的转晕(yrast)线是由基带和超带混杂而成的。而超带既可能是正常相带或转动排列带,也可能是形状相变带。实际上,常常是它们的某种交织。

## 二、近十年(1973—1983年)来的一些发展

### 1. 实验技术水平方面

随着重离子加速器和探测手段的发展,人们已可以加速各类离子一直到铀(U),可以测量到几十微微秒量级的短寿命,因而可以测到越来越高的自旋态。重离子碰撞所产生的瞬时存在的复合系统,其总角动量可达 $300-400\hbar$ 。现在研究得比较清楚的是蒸发余核的高自旋态,其自旋目前也可达 $60-70\hbar$ 。这样的高角动量激发态很快通过辐射粒子和 $\gamma$ 射线而退激,最初是统计 $\gamma$ ,由于有大量的跃迁道同时开放,目前的探测水平还测不到分立谱线,属于连续谱线区。当核退激到接近转晕线附近时,跃迁道大量减小,于是比较容易测到分立谱线。1977年,分立谱线已可测到 $32^+(^{138}\text{Er}_{90})$ ,于是发现了第二个回弯,即第二个带交叉。1982年底至1983年初已测到 $40^+(^{152}\text{Dy}_{86}, ^{140}\text{Yb}_{90})$ 及 $85/2$

( $^{147}\text{Gd}$ ),大量旁带也被测到了,如 $^{180}\text{Os}$ 测到了六条转动带。在 $N\sim 84$ 至 $90$ 附近,许多稀土核存在同质异能态或叫转晕陷阱(yrast traps)态。

以上新实验结果的取得,和近年来实验技术上的两大发展很有关系,一是晶体球探测器(或叫自旋谱仪),一是反康(Anti-Compton)技术。

### 2. 物理结果方面

#### (1) 推转壳模型

因为处于转晕态时,核的内部激发很小,核仍是冷的,能级密度很小。例如,激发能 $E^*\sim 5\text{MeV}$ 的转晕态附近的能级密度只有低自旋下同样激发能区域的能级密度的万分之一左右。因此,我们有理由认为对于转晕线附近,描述核的基态性质十分成功的壳模型仍可以运用,只要再加上转动效应即可。按照这样思想所建立起来的推转壳模型,这几年来获得了巨大的成功。其哈密顿量可写为

$$\begin{aligned} H' &= H - \omega j_x \\ &= \sum_a (\epsilon_a - \lambda) a_a^\dagger a_a \\ &\quad + \frac{1}{2} \Delta \sum_{\alpha\beta} \delta(\alpha, \beta) (a_\alpha^\dagger a_\beta^\dagger + a_\beta a_\alpha) \\ &\quad - \omega \sum_{\alpha\beta} \langle \alpha | j_x | \beta \rangle a_\alpha^\dagger a_\beta. \end{aligned} \quad (6)$$

借助于 Bogoliubov 变换及  $e^{-i\pi j_x}$  和  $H'$  的可对易性,可以通过对角化求得转动场中的准粒子谱和波函数。1976—1977年间,在 Bohr 和 Mottelson 的直接关心下, R. Bengtsson 和 S. Frauendorf 完成了推转壳模型的计算程序<sup>[7]</sup>。在假定能隙 $\Delta$ 和形变为常数的条件下,可以给出全部准粒子谱(见图5),排列角动量 $i(\omega)$ ,带交叉的临界转动频率 $\omega_c$ 及带间相互作用强度等是可实验比较的物理量。1977年东京会议上, Bohr 和 Mottelson 比较详细地介绍了他们的理论结果,1981年5月在丹麦哥本哈根召开的“高自旋下的核结构”的专题会议上, Mottelson 又专门就推转壳模型所得到的准粒子谱的命名法作了报告。到目前为止,对于稀土区大形变核实验上观察到的一个和两个准粒子带的排列

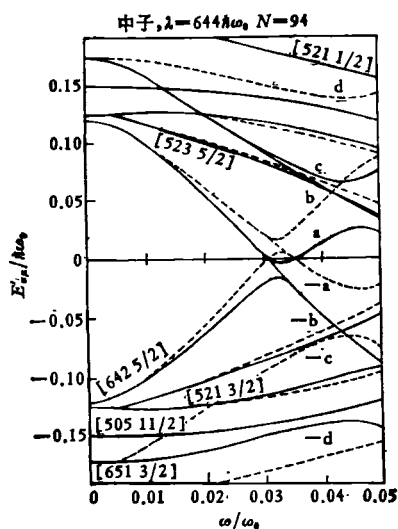


图5 准中子能谱  
中子数  $N = 96$ ,  $\lambda = 6.44\hbar\omega_0$  对应于  $^{164}\text{Yb}_{94}$  核, 虚线和实线对应于  $r = \pm 1$  ( $r$  叫符号因子, 是  $e^{-ix_1/x}$  的本征值)

角动量、临界转动频率及相互作用强度等,基本上和理论值符合。但是,在带交叉区域,理论上还存在一些困难。对于多准粒子带及过渡核,理论和实验会出现矛盾。主要原因是在计算中为了简化,假定对关联和形状是不变的。这两年内,我们作了些系统的自治计算,探讨不同组态的对关联的区别,以及随着自旋增大对关联的变化情况<sup>[8]</sup>,对于过渡核,形状的变化也不能忽略。我们计算了  $^{160}\text{Yb}_{90}$ , 指出随着自旋的增加,在基带,  $\varepsilon_2$  增大而  $\gamma$  (描述三轴不对称性的形变参量)略为变负;在超带,  $\varepsilon_2$  基本不变,但  $\gamma$  随自旋增大而增大,当  $I = 16^+$ ,  $\gamma$  可达  $8^\circ$  左右,这可以定性解释美国橡树岭实验室的结果。阿贡实验室关于  $^{154}\text{Dy}_{88}$  的测量也显示了基带集体性随自旋增大而增大,而在超带,集体性随自旋下降而下降的特征。这方面,理论和实验上显然还有许多工作可作。

### (2) 核内对关联性质的探讨

这也是一个十分活跃的前沿领域,当前,人们的兴趣似乎主要集中在下面几个方面:

(i) 关于对崩溃的进一步研究: 1960年 B. Mottelson 和 J. Valatin<sup>[4]</sup> 指出,由于 Coriolis 力的反对作用,核的自旋超过一定临界值  $I_c$

后,核内对关联会消失(以后 Stephens 把这叫做对崩溃),核将由超流相过渡为正常相,转动惯量将达到刚体值。长期以来,实验上一直在寻找这一现象。最近获悉<sup>[9]</sup>,英国和丹麦的一批实验学家,利用 Daresbury 实验室和 Bohr 研究所的 216MeV 的  $^{48}\text{Ti}(11^+)$  束和 85MeV  $^{16}\text{O}(8^+)$  束通过反应  $^{124}\text{Sn}(^{48}\text{Ti}, 4n)$  和  $^{156}\text{Gd}(^{16}\text{O}, 4n)$  产生  $^{168}\text{Hf}$ , 借助于  $\gamma$ - $\gamma$  符合测量,可把 yrast 谱推高至  $34^+$ , 两条负宇称的边带推高至  $30^-$  与  $33^-$ , 他们发现在  $0.38 \leq \hbar\omega \leq 0.50\text{MeV}$  的范围内, yrast 线的行为象个极好的刚性转子,即其能谱

$$E = AI(I+1) + BI^2(I+1)^2. \quad (7)$$

表达式中的  $B/A \approx 7 \times 10^{-6}$ , 这个数值比迄今所知的最好的刚性转子的  $B/A$  几乎还小一个量级。而这三个带的排列角动量很小,仅有  $1.0-1.5\hbar$ , 和假定对关联消失的推转壳模型计算值相符,据此他们声称已找到了对崩溃的实验验证。目前还未看到其它理论和实验研究组对他们结论的看法。

(ii) 对关联的性质: 目前理论计算中,通常只考虑到单极对关联<sup>[6]</sup>,但从去年以来,通过对某些具有扁椭球轨道被阻塞的奇  $A$  核转动带的研究发现,应该还存在四极对力。

四极对力的存在是否和 IBM 模型中的 d 玻色子直接对应,也是个有趣的问题。

此外, p-n 之间的对关联的理论描述与实验探讨,也越来越引起人们的注意。

### (3) 规范空间的回弯现象和核相图<sup>[10]</sup>

如所周知,核的哈密顿量可以写为

$$H' = H_0 - \varepsilon \hat{Q} - \Delta(\hat{P} + \hat{P}^+) - \omega \hat{I}_x - \lambda \hat{N}, \quad (8)$$

第二项是四极场,第三项是对场,后两项是两个拉格朗日 (Lagrange) 不定乘子项,实际上可以看成是普通空间的推转项和规范空间的推转项。正如 Bohr 和 Mottelson 所指出的,对场和四极场是可以加以类比的,而对场可以在规范空间中加以描述。在此空间中,粒子数  $N$  是角动量,而费米能  $\lambda$  是转动频率。这些量均可由实验能量

$$E(Z, N, I, \nu) = -E_B(Z, N) + E_{ex}(Z, N, I, \nu) \quad (9)$$

求得. 其中  $E_B$  是结合能,  $E_{ex}$  是相对于基态的激发能,  $\nu$  是其它量子数. 易知

$$\left. \begin{aligned} \lambda_p(Z, N, I, \nu) &= \partial E(Z, N, I, \nu) / \partial E, \\ \lambda_n(Z, N, I, \nu) &= \partial E(Z, N, I, \nu) / \partial N, \\ \omega(Z, N, I, \nu) &= \partial E(Z, N, I, \nu) / \partial I_x, \end{aligned} \right\} (10)$$

其中

$$I_x \approx \sqrt{(I + 1/2)^2 - K^2}. \quad (11)$$

对应于普通空间中的  $I_x-\omega$  图, 现在我们可以相应地作出规范空间中  $N-\lambda_n$  图 (或  $Z-\lambda_p$  图, 下同). 图 6 是 Dy 的  $N-\lambda_n$  图.

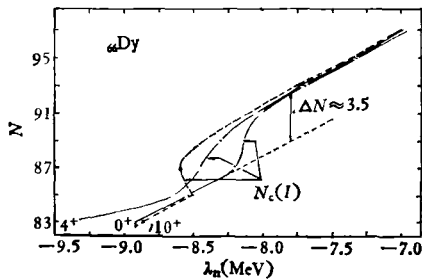


图 6 Dy 同位素的中子数  $N$  与费米能  $\lambda_n$  关系图, 亦即规范空间中的回弯图 (图中的数目为自旋  $I$ ;  $N_c$  为临界中子数;  $\Delta N$  为曲线上下分支的中子数差, 大致对应于过渡区的大小)

由这类图中可以看到, 在回弯之前, 只有少数几个中子超过满壳, 核呈近球形, 回弯之后则对应于形变核. 可以看出随着自旋的升高, 形变区在扩大, 过渡区的范围也在变化. 进一步的分析表明, 规范空间中的回弯图还可以用来探讨形状共存现象、有效能隙的变化规律等等. 如果综合由  $I_x-\omega$  图及  $N-\lambda_n$  图中所获得的知识, 我们可求得核的相图 (图 7). 由此可以对核的相变, 核随着自旋和核子数的变化而可能产生的形状, 对关联等的变化, 获得一个总的概貌, 对于实验工作和进一步的理论研究, 似乎均有一定启发意义. 我们所作的 Dy 同位素的核相图与美国橡树岭和 GSI 实验室关于四极矩测量结果相符合<sup>[11]</sup>. 最近关于  $N = 82-88$  过渡区核激发谱的系统分析, 进一步支持了核相图的基本思想<sup>[11]</sup>.

物理

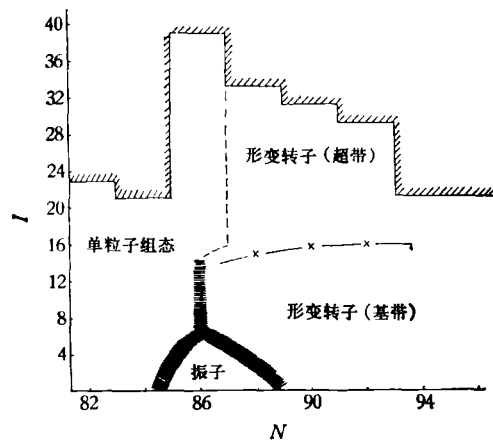


图 7 Dy 核相图

#### (4) 核形状的系统计算

这方面近年来做了不少工作. 比较系统且获得比较广泛承认的是瑞典 Lund 小组的结果. 他们利用 Yukawa-plus-exponential 宏观模型及折叠 Yukawa 微观模型<sup>[12]</sup> 计算了四千多个原子核的基态质量和形状 (包括  $\epsilon_2$  和  $\epsilon_4$ ), 还利用 Nilsson-Strutinsky 模型<sup>[12]</sup>, 计算了四百多个偶偶核的基态位能面 (考虑了对关联, 形变参数包括  $\epsilon_2$  和  $\gamma$ ) 及高自旋态下的位能面 (这种情况下忽略了对关联).

这些理论作出了一些预言, 从实验上去检验这些预言, 探讨这类核在高自旋下形状的变化规律, 无疑是十分有意义的. 理论上还预言了超回弯——更高自旋 ( $>40\hbar$ ) 下的形状相变的  $I_c$  值. 所谓超回弯是指核的形状的大的变化 (由  $\epsilon_2 \sim 0.2$  变到  $\epsilon_2 \gtrsim 0.45$ ) 所导致的转动惯量的突增, 目前有些实验表明在某些稀土形变核中, 当  $I_c \sim 50\hbar$  时出现了超回弯现象, 但还不十分肯定.

以上着重是沿着 Bohr-Mottelson 学派的路子, 列举了高自旋态领域当前感兴趣的一些课题. 除此之外, 当前还存在着另一学派, 以 A. Arima 和 F. Ichello 为代表的相互作用玻色子模型 (IBM), 它可以相当成功地解释相当大范围内的原子核的低激发谱, 引起了广泛的注意. 但其微观基础及与 Bohr 和 Mottelson 模型的关系尚在探讨与争论之中, 在此就不作介绍了.

如前所述,加上自旋这一维度后,人们对于核结构的研究领域大大扩展了,认识也大大深化了.随着原子核自旋角动量的变化,核的内部结构、形状、对关联等属性究竟发生什么变化?变化的规律是什么?作为有限大小的微观客体之一的原子核,其相变规律有什么新的特征等等,均是十分吸引人的挑战性课题.目前世界上除 Bohr 研究所仍是这一课题最活跃的研究中心外,瑞典的 Lund 大学,美国的贝克莱、橡树岭、阿贡等国立实验室,西德的 GSI, Max-planck 研究所, Jülich 的 KFA, 法国的 Grenoble, 英国的 Daresbury, 日本的京都大学等均有十分活跃的理论或实验班子在工作.每年均有数次国际专题会议讨论高自旋问题.而在综合性的国际会议上,高自旋也常是十分重要的课题之一.

我国核物理学界有许多人对高自旋态问题也感兴趣.从七十年代中期起,在国内刊物上已可见到一些学术论文,八十年代以来在国际刊物和国际学术会议上也常可见到我国高自旋工作者的文章,有些学术观点还引起了国际同行的兴趣和重视.

感谢贾豫京同志为本文描绘了插图.

### 参 考 文 献

- [ 1 ] A. Bohr, *Rev. Mod. Phys.*, **48**(1976), 365.
- [ 2 ] S. G. Nilsson, *Mat. Fys. Medd. Dan. Vid. Selsk.*, **29-16**(1955).
- [ 3 ] A. Bohr, B. Mottelsson and D. Pines, *Phys. Rev.*, **110**(1958), 936.
- [ 4 ] B. Mottelsson and J. Valatin, *Phys. Rev. Lett.*, **5**(1960), 511.
- [ 5 ] A. Johnson et al., *Phys. Lett.*, **B34**(1971), 605. *Nucl. Phys.*, **A179**(1972), 753.
- [ 6 ] F. S. Stephens and R. S. Simon, *Nucl. Phys.*, **A183**(1972), 257.
- [ 7 ] R. Bengtsson and S. Frauendorf, *Nucl. Phys.*, **A327**(1979), 139.
- [ 8 ] R. Bengtsson and Jing-ye Zhang (张敬业), Proc. Workshop on Nucl. Phys. I. T. P. Trieste, Italy, 5-30 Oct. (1981).
- [ 9 ] B. Chapman et al., 预印本, (1983).
- [ 10 ] 徐躬耦、张敬业, *高能物理与核物理*, **3**(1979), 232. R. Bengtsson, Jing-ye Zhang(张敬业) and S. Aberg, *Phys. Lett.*, **105B**(1981), 5.
- [ 11 ] H. Emling, Proc. XIV Masurion Summer school on Nucl. Phys., Poland, (1981); C. Baktash, Invited talk on Intern. Conf. High Angular Momentum properties of Nuclei, Oak Ridge, Nov. (1982).
- [ 12 ] P. Möller and J. Nix, *Atomic Data and Nucl. Data Tab.* 26-2 (1981); S. Aberg *Phys. Scripta* **25**(1982), 23.
- [ 13 ] 未宝文, Abstract China-Japan Joint Symposium on Accelerators for Nucl. science and Their Application, 兰州, 1983年10月, p.5.
- [ 14 ] 黄大海, 同上, p. 17.

(上接第 146 页)

- [ 17 ] 王竹溪, *统计物理学导论*, 人民教育出版社, (1955).
- [ 18 ] J. W. Goodman, in *Laser Speckle and Related phenomena*, J. C. Dainty, Ed., Springer-Verlag, Heidelberg, (1975), 9.
- [ 19 ] J. M. Grodman, *Introductim to Fourier Optics*, McGraw-Hill, New York, (1968).
- [ 20 ] A. Yariv, *Quantum Electronics*, John Wiley Sons, Inc., New York, (1975), 110.
- [ 21 ] G. H. Kaufmann, A. E. Ennos, B. Gale and D. J. Push, *J. Phys. E*, **13**(1980), 579.
- [ 22 ] T. H. Chao, S. L. Zhuang and F. T. S. Yu, *Opt. Lett.*, **5**(1980), 230.