

## 核集体运动的负宇称态

石宗仁

(中国原子能科学研究院)

**摘要:** 本文综述了近10年内有关核集体运动负宇称态的理论和实验研究状况,也提出了今后应该继续研究的内容。寻找 Simplex 对称性,研究八极形变随转动频率的动力学过程及八极形变、分子偶极方式和电偶极巨共振共同激发能与质量数的关系,以及寻找统一描述同位旋标量和同位旋矢量形变的理论框架仍是重要的课题。

### 一、引言

研究核集体运动产生的负宇称态是核结构研究中的重要课题。长期以来,理论普遍认为八极形变核不存在。1980年后,理论上计算形变势能的宏观—微观方法有了显著改进:宏观势能项考虑了核表面弥散和有限力程效应;微观壳修正项采用现实的,核内区平缓径向关系势,例如 Woods-Saxon 势 (WS) 和 Folded-Yukawa 势 (FY)。从而,理论上可以预言八极形变核的存在,例如缺中子 Ra-Th 区及 Ba 和丰中子 Ba 区等。利用 WS 势和对力场的推转壳模型的宏观—微观方法预言和解释了八极形变同转动频率  $\omega$  的关系,以及超形变下的八极振动。模型理论也得到了发展,在集体模型中引入八极形变,分子偶极集团模型被应用于铜系与稀土核,在相互作用玻色子模型 IBM 中,分别或同时引入 P 和 f 玻色子。实验上,在束  $\gamma$  谱学及重离子核反应等技术的发展,为八极效应的研究提供了手段。实验上发现了  $^{223}\text{Th}$  具有 Simplex 对称性及随转动频率提高 Simplex 对称性,电偶极跃迁及核集体性加强等实验事实。

实验和理论上继续寻找 Simplex 对称性,研究反演不对称性随转动频率的增强与消失。超形变下的八极振动,检验和鉴别八

极形变、分子偶极方式及电偶极巨共振的适用范围,寻找统一描述同位旋标量和矢量形变的理论框架都将是重要的研究课题。

### 二、理论概况

下面分别就几个问题做简要叙述。

#### 1. Simplex 对称性

对于稳定的奇多极形变核,体坐标反演变换  $\hat{P}$  及绕主轴转动  $\pi$  角的变换  $\hat{R}$  是不对称的,如果二者的积是对称的,则称为 Simplex 对称性<sup>(1)</sup>,用算符表示为:

$$\hat{S}_i = \hat{P} \cdot \hat{R}_i \quad i = X, Y, Z \quad (1)$$

它的几何意义是相对含二个主轴平面的镜象反演对称性。对于轴对称的核,含对称轴平面的镜象反演是对称的。对于偶和奇核 Simplex 算符本征值分别为  $S = \pm 1$  和  $S = \pm i$ , 由于 Simplex 对称性的约束,角动量 I 和宇称  $\pi$  有下述关系:

$$\begin{aligned} \text{偶 } A \text{ 核 } S = \pm 1 \quad I^\pi &= 0^\pm, 1^\mp, 2^\pm \\ \text{奇 } A \text{ 核 } S = \pm i \quad I^\pi &= \frac{1}{2}^\pm, \frac{3}{2}^\mp, \frac{5}{2}^\pm \end{aligned} \quad (2)$$

由此可得到交替宇称,能级顺序  $\Delta I = 1$  的转动带。在绝热近似下,满足坐标转动,坐标和时间反演不变的总本征波函数<sup>(2)</sup>

$$\begin{aligned} \Psi_{IM\pi KS} = \sqrt{(2I+1)/(16\pi^2)} e^{i\phi} \\ \cdot (\Phi_K \mathcal{D}_{MK}^I + \pi(-1)^{(I+K)} \Phi_1 \mathcal{D}_{MK}^I) \end{aligned} \quad (3)$$

$e^{\pi}$  为相因子。本征波函数包括了符号相关项，它不仅与  $(-1)^{l+k}$  有关，还同宇称  $\pi$  有关。对于  $K=0$  的偶核， $S \equiv +1, 1^-, 2^+, \dots$ 。

在带内，有  $\Delta I=1$  的电偶极跃迁和  $\Delta I=2$  的电四极跃迁  $E_2$  两种方式。带内  $E_2$  跃迁比满足 Alaga 规律，电偶极矩可以从  $E_1$  和  $E_2$  跃迁中导出。

## 2. 宏观—微观方法

核形变引起的势能宏观项来自表面及库仑力的变化。早期，核表面被视为是尖锐的。现在，考虑表面弥散及核力有限程效应后，表面项可用汤川加指数函数 (Yukawa-plus-exponential) 的双重积分计算。库仑项需要附加弥散修正项。

Nazarewicz<sup>[3]</sup> 指出考虑弥散效应后，八极形变明显加强，采用底部平缓径向关系的单粒子势，如 WS 和 FY 势，壳修正计算结果有利于八极形变。

从势能面可以得到三个有用的参数：八极形变参数  $\beta_3$ ，奇多极形变势能  $E_{om}$  和表示八极形变“软硬”程度的参数  $C_3$ 。Sobiczewski<sup>[4]</sup> 将  $\beta_2-\beta_7$  的所有形变参数都作为自由参数，计算得到丰中子 Ba 及锕系区的势能面，给出了  $\beta_3$  和  $E_{om}$ 。<sup>142,144</sup>Xe、<sup>142-146</sup>Ba、<sup>144,146</sup>Ce、<sup>220,222</sup>Ra、<sup>220-224</sup>Th、<sup>222,224</sup>U、<sup>224,226</sup>Pu、<sup>226</sup>Cm 和 <sup>228</sup>Cf 具有较明显的八极形变。Skalski<sup>[5]</sup> 计算了缺中子 Ba 区的势能面，<sup>108-112</sup>Xe 和 <sup>112,114</sup>Ba 表示出明显的八极形变。一般  $\beta_3 \leq 0.10$ ， $E_{om} \leq 1.0\text{MeV}$ ，即八极形变是小的，势井是浅而软的。在 Sobiczewski 计算中，<sup>218</sup>Ra 和 <sup>220</sup>Th 核的  $\beta_3$  大于所有其它形变参数，可能是一种新型的过渡核。Skalski 也研究了非轴对称奇多极形变对形变势能的影响。

Nazarewicz<sup>[6]</sup> 采用 WS 和对力场的推转壳模型计算微观壳修正项，得到了八极形变与转动频率的动力学过程。对于近球形核 <sup>218</sup>Ra 和 <sup>220</sup>Th 随  $\omega$  的提高出现四极和八极形变，并保持到较高的角动量；对于基态具有

四极和八极形变的核，例如 <sup>222,224</sup>Ra、<sup>222-226</sup>Th，形变维持到中等角动量  $I = 14 - 24\hbar$ ，在更高角动量时，由于  $(v_{j_{15/2}})^2$  和  $(\pi_{j_{13/2}})^2$  两个准粒子顺排，八极形变消失，成为坐标反演对称的核。图 1 给出 Ra-Th 核最低正负宇称带转动频率比同角动量  $I$  的关系。在  $I = 15\hbar$ ，<sup>220</sup>Ra 和 <sup>222</sup>Th 达到了稳定的八极形变，虚线分别为稳定八极形变和八极振动顺排两种极限状态。实验上研究八极形变消失是有意义的。

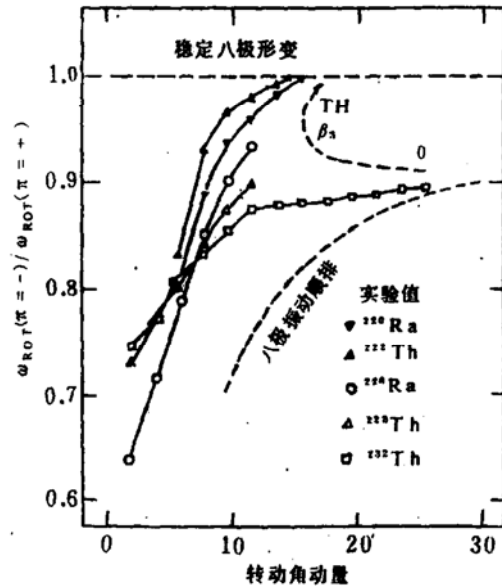


图 1  $k=0$  的正负宇称态转动频率比同角动量的关系，虚线分别为稳定八极形变和八极振动顺排两种极限状态

Dudek<sup>[7]</sup> 计算了  $A \sim 150$  和  $190 \sim 200$  轴对称超形变的势能面。在超形变  $\beta_3 \approx 0.5$  时，<sup>154</sup>Er、<sup>156</sup>Yb 和 <sup>190-194</sup>Hg 的八极振动很明显，并且振子数  $n_3=0$  和  $n_3=1$  的两个转动带具有符号相反的去耦参数， $a(n_3=0) = -a(n_3=1)$ 。

## 3. 八极效应的微观起因

两个相反宇称的单粒子轨道出现在 Fermi 面附近，轨道角动量差  $\Delta l = \Delta j = 3$  时，八极关联效应加强，两个轨道越接近，作用越强。图 2 给出谐振子势及先后引进  $\hat{l}^2$  和  $\hat{l} \cdot \hat{s}$  项的单粒子能级。引入后两项，两个相反宇称， $\Delta l = 3$  的轨道相互接近，如  $j_{15/2}$  和  $g_{9/2}$ 。它

说明了现实的平底径向关系单势在八极关联中的作用。据此, Nazarewicz<sup>(3)</sup> 得出八极关联最强的中子和质子数是 34、56、88 和 134, 称它们为“八极驱动数”。当中子和质子均为驱动数时, 八极形变比较稳定, 例如  $^{222}_{88}\text{Ra}$  和  $^{144}_{56}\text{Ba}$ 。中子和质子八极驱动数的不同组合为寻找八极形变提供了线索。

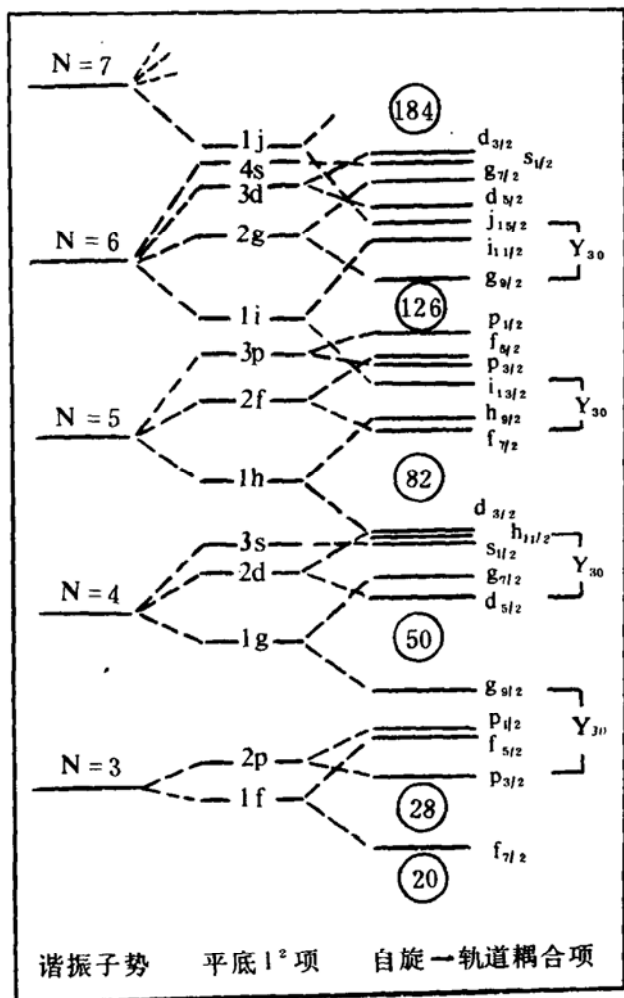


图2 八极效应的微观起因。含  $l^2$  和  $l \cdot s$  项引起相反宇称  $\Delta l = 3$  的两个轨道接近, 产生强的八极关联

最近, Cottle<sup>(8)</sup> 系统分析了  $3_1^-$  态激发能同 N 和 Z 的关系, 得出经验的八极驱动数为 40、64、88 和 134。由此可预言  $^{80}\text{Zr}$ 、 $^{104}\text{Zr}$  和  $^{128}\text{Gd}$  附近可能有八极形变。

随核转动频率的提高,  $\Delta l = 3$  及宇称相

反的两个轨道可能更接近, 八极关联效应加强, 稳定八极形变产生, 集体性提高。

#### 4. 八极形变伴生的电偶极矩

用液滴模型计算的电偶极矩的宏观项为

$$D^{LD} = C_{LD} A Z e (\beta_3 \beta_2 + \frac{88}{27 \sqrt{5}} \beta_3 \beta_4) \quad (4)$$

$C_{LD}$  为常数, 理论值为 0.00069fm, 经验值为 0.00060fm。由此可得出八极形变伴生一个电偶极矩。

壳修正项是由于所有质子填充的轨道平均偏离质心造成的。Leander 计算了稀土和锕系核壳修正项的偏心因子  $\langle Z \rangle - \langle \bar{Z} \rangle$ 。宏观项与壳修正项的符号可能相同, 也可能相反。对于  $^{222}\text{Th}$ , 两项符号相同, 电偶极矩增强, 对于  $^{226}\text{Ra}$  两项符号相反, 电偶极矩相消。

#### 5. 集体模型

Rohorinski 全面地分析了四极和八极形变及其耦合的集体模型。满足坐标转动, 坐标及时间反演不变的实数哈密顿量在体坐标选在四极形变主轴时, 哈密顿量可分为总的转动、八极部分转动 Coriolis 项、振动和转动-振动耦合等, 文中也给出了波函数的一般求解方法, 强调了内禀波函数应满足  $\phi_{TK}^N = \pi(-1)^{l+K} \phi_{TK}^N$  的对称关系。

对于轴对称的八极形变, 只有一个形变参数  $\beta_3$ , 体坐标系的哈密顿量<sup>(9)</sup>

$$H = -\frac{\hbar^2}{2B} \frac{d^2}{d\beta_3^2} + V(\beta_3) \quad (5)$$

势函数满足  $V(\beta_3) = V(-\beta_3)$ 。图 3 表示出三种势函数及其所对应的能级图。左图相应于稳定八极形变, 右图相应于八极振动, 中图介于两者之间。迄今所知道的都介于两者之间。

#### 6. 八极振动顺排

如果八极振动与转动耦合是弱的, Coriolis 力将顺排八极振子角动量沿转动轴的方向, 产生一个最低的奇自旋负宇称带, 能量间隔与基态带相同, 角动量为  $3\hbar$ 。振子角动量在转动轴上的投影也可以为  $2\hbar$ , 在较高的激发能产生偶自旋负宇称的耦合带。

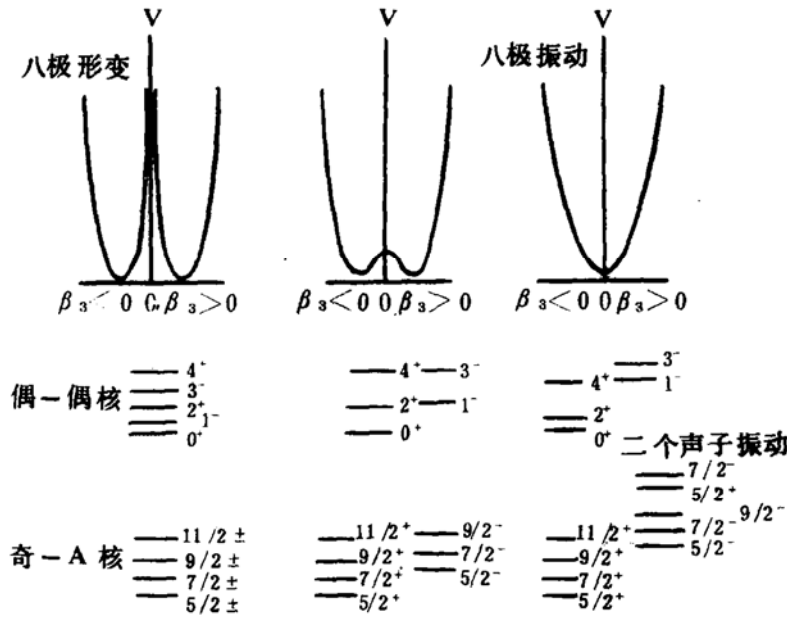


图3 三种不同势函数  $V(\beta_3)$  所对应的能级图

### 7. 八极形变下奇 A 核的结构

轴对称稳定八极形变势场下的单粒子 Nilsson 轨道已经利用  $WS$  和  $FY$  势计算了。由于轴对称性, 粒子角动量在对称轴的投影  $\Omega$  是好量子数; 由于坐标反演不对称, 粒子的宇称不是好量子数。单粒子波函数主要由两个彼此接近、对称轴上角动量投影相同和宇称相反的两个单粒子轨道组成, 如  $5/2[642]$  和  $5/2[523]$ 。单粒子算符  $\hat{S}_z$ ,  $\hat{J}_+$  和  $\hat{\pi}$  的对角矩阵元可从实验上测定, 它们分别是磁矩、去耦参数和宇称量。

理论上, 采用粒子-转子模型处理单粒子与核心的耦合。有强耦合和中间耦合两种方式, 它们分别适用于稳定八极形变和弱八极形变。两种方式的主要差别是强耦合用八极形变场的准粒子波函数做基矢, 中间耦合用四极形变场的准粒子波函数做基矢。它们在  $Ra - Ac - Th - Pa$  区得到了较好的应用。

### 8. 分子偶极集团模型

由两个质量不等的原子核构成的双核结构称为分子偶极集团模型, 例如  $\alpha + {}^{18}O$ ,  $\alpha + {}^{40}Ca$  构成的双核结构。铜系核的  $\alpha$  衰变及  $\alpha$

拾取反应增强, 也表明铜系核具有  $\alpha$  集团结构。电偶极矩和电偶跃迁的能量权重律分别为

$$D_e = e(Z_1 + Z_2) \left[ \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} - \frac{A_2}{A_1 + A_2} \right] \cdot (R_1 + R_2) \quad (6)$$

$$S(E_1; A_1 + A_2) = \frac{9}{4\pi} \frac{(Z_1 A_2 - Z_2 A_1)^2}{A A_1 A_2} \cdot \frac{\hbar^2 e^2}{2m} \quad (7)$$

下标 1 和 2 分别表示两个集团。实际上, 纯分子偶极集团核结构是不存在的, 一般为基态四极形变与激发的分子偶极方式共存与混合。

### 9. 相互作用玻色子模型 IBM

为描述负宇称态, 除  $s$  和  $d$  玻色子外, 引进了  $P$  和  $f$  玻色子。目前有四种玻色子组合方式:  $(s, p)$ ,  $(s, d) * (s^*, p)$ ,  $(s, d, f)$  和  $(s, p, d, f)$ 。 $(s, d) * (s^*, p)$  方式又可分为耦合与共存两种。

$(s, p)$  方式也称为 Vibron 模型<sup>[10]</sup>,  $s$  和  $p$  玻色子构成  $U(4)$  群, 有两种极限状态  $U(3)$  和  $O(4)$ , 分别对应分子偶极方式的振动和转动。

(s, d) \* (s\*, p) 方式中有四种玻色子, 哈密顿量为  $\hat{H} = \hat{H}_{s,d} + \hat{H}_{s^*,p} + \hat{H}'$ 。对于耦合方式和共存混合方式  $\hat{H}'$  取不同的形式。共存与混合方式更接近实际情况, Daley<sup>[11]</sup> 建立了 ALPHA 程序并系统地研究铜系核的核谱性质, 得到满意的结果。

(s, d, f) 方式中, 往往只取一个 f 玻色子。Barfield 系统地分析了稀土核的结构, 除  $^{162}\text{Dy}$  外, 理论与实验符合。它的缺点是哈密顿量参数随质量 A 有明显的涨落及  $E_1$  跃迁不易处理。

(s, p, d, f) 方式中, Catara 从微观上证明了 p 和 f 玻色子对负宇称态是必不可少的。Otsuka 和 Kusnezov 分别利用 (s, p, d, f) 方式分析了铜系与 Ba 区核, 均得到满意的结果, 而且哈密顿量参数随 A 光滑变化,  $E_1$  跃迁容易得到。

目前, 不区分中子和质子玻色子的 IBM 不能体现出电偶极跃迁的同位旋矢量性质, 区分中子和质子玻色子则维数太大。p 玻色子的引入带来了质心运动的虚假态。

### 三、实验研究状况

八极形变多出现在缺中子和丰中子区, 实验上如何获得并测量它们的谱学参数, 以及对于裂变元素如何克服裂变带来的本底是主要的困难。对于丰中子核, 通常用自发裂变元素, 如  $^{252}\text{Cf}$  和  $^{248}\text{Cm}$  做源, 产生  $A \approx 150$  和 100 的丰中子核。利用  $\gamma$  谱测量技术获得谱学参数。实验上已经研究了  $^{142-146}\text{Ba}$  和  $^{146-150}\text{Ce}$ 。工作集中在美国 ANL, 使用 Argonne-Notre-Dame BGO  $\gamma$  谱仪, 它由 10 个 Ge 反康、两个低能  $\gamma$  探测器 LEPS 及 50 个 6 边形 BGO 单元构成的内晶体球组成。

在 Heidelberg 18MV 串列, 重离子核反应产生缺中子核, 采用  $\gamma\gamma\text{R}$ ,  $e^-e^+\text{R}$ ,  $\gamma e^-\text{R}$  三重符合及  $\gamma$  多重性测量。余核 R 通过静电分离器与入射束分离及测量它的能量和飞行时间来

选择。转换电子是利用磁螺线管谱仪, 采用反冲阴影方式抑制  $\delta$  电子。图 4 表示出余核和转换电子测量装置。

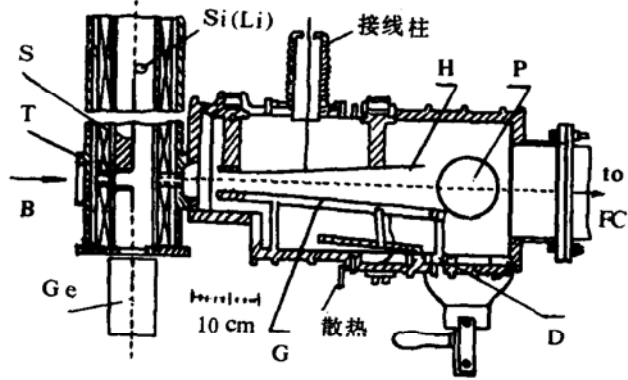


图 4 Heidelberg 用于  $e-\gamma\text{R}$  符合测量的实验装置

用由 151 个 NaI 晶体单元和 6 个 Ge 反康构成的 Darmstadt-Heidelberg 晶体球测量平均级联跃迁数。Dahlinger 利用这套装置发现了具有 Simplex 对称性  $^{223}\text{Th}$  的能级图, 这是近年核结构研究的重要成果。

在 Daresbury 实验室, 使用称为 POLY-TESSOR 的 24 个 Ge 反康谱仪及置于它内部的大立体角和位置灵敏的雪崩探测器分别测量  $\gamma$  射线及背散射余核, 并进行符合测量。利用  $^{226}\text{Ra}$  ( $^{58}\text{Ni}$ ,  $^{60}\text{Ni}$ ) 反应产生  $^{224}\text{Ra}$ 。特别是利用  $^{58}\text{Ni}$  ( $^{60}\text{Ni}$ ,  $2\text{P}2\text{n}$ ) 反应研究了  $^{114}\text{Xe}$  的核谱。

实验上测量了  $^{218}\text{Ra}$  的电偶极跃迁<sup>[12]</sup> 及自旋达  $31\hbar$  的负宇称态<sup>[13]</sup>。研究了  $^{150}\text{Sm}$ <sup>[14]</sup> 和  $^{146,148}\text{Nd}$ <sup>[15]</sup> 的八极形变效应。测量了  $^{224-228}\text{Th}$ <sup>[16]</sup> 和  $^{230-238}\text{U}$ <sup>[17]</sup> 的高自旋负宇称态的参数。

利用核共振荧光技术系统地研究 1-态激发能与  $B(E_1)$  的关系及双核子或  $\alpha$  转移反应对鉴别八极形变的分子偶极子方式是有用的。在德国 Stuttgart 的 4.3MeV Dynamitron 静电加速器上建立了核共振荧光装置, 可测  $\gamma$  角分布及线偏振。

## 参 考 文 献

- [1] W. Nazarewicz and P. Olander, Nucl. Phys. A441 (1985) 420  
[2] A. Bohr and B. R. Mottelson, Nuclear Structure (benjamin New York, 1975) Vol. 2  
[3] W. Nazarewicz et al., Nucl. Phys. A429 (1984) 269  
[4] A. Sobieczewski et al., Nucl. Phys. A485 (1988) 16  
[5] J. Skalski, Phys. Lett. B238 (1990) 6  
[6] W. Nazarewicz et al., Nucl. Phys. A467 (1987) 437  
[7] J. Dudek et al., Phys. Lett. B248 (1990) 235  
[8] P. D. Cottle, Phys. Rev. C42 (1990) 1264

- [9] G. A. Leander et al., Nucl. Phys. A388 (1982) 452  
[10] F. Iachello, Nucl. Phys. A396 (1983) 233C, J. Chem. Phys. 77 (1982) 3046  
[11] H. Daley and B. R. Barrett, Nucl. Phys. A449 (1986) 256  
[12] M. Gai et al., Phys. Lett. B215 (1988) 242  
[13] N. Schulz, Phys. Rev. Lett. 63 (1989) 2645  
[14] W. Urban et al., Phys. Lett. B185 (1987) 331  
[15] W. Urban et al., Phys. Lett. B200 (1988) 424  
[16] P. Schuler et al., Phys. Lett. B174 (1986) 241  
[17] P. Zeyen et al., Z. Phys. A328 (1987) 399

(上接第 13 页)

对于用化学分离法处理的靶,我们将发展跑兔装置与液相快化学终端配合。叠层薄靶加 He 喷咀装置与气相热色谱化学终端配合。这些设备的设计正在进行中。

### 3. 高温难溶——快化学方法中使用化合物靶及发展高温、高效靶离子源系统

选定的目标核中,有相当一部分是高温难熔贵金属和锕系元素。为此,在化学方法中拟通过使用化合物靶缩短溶靶时间,使可分离、鉴别的核素寿命达几十秒量级。而在线同位素分离器上,则准备发展高温高效的靶离子源系统。目前,FEBIAD 源的工作温度已达 1600℃,高温的热扩散靶系统正在设计中。

## 五、结束语

我国在新核素合成方面至今尚未突破零的纪录。我们立足于我国已有的一台中能重离子加速器及其附设的二台终端设备,根据国内外对中能重离子反应靶核研究的最新进展,提出开辟在靶核中合成、鉴定新核素研究方向的设想,并已开始付诸实践。这条路线在物理机制方面是成立的,技术上也是可行的。我们的目标不仅是合成少量新核素,而且要在重核区开辟出一片核区以形成自己的特色,并在  $N = 126$  中子满壳和  $A \sim 225$  基态八极形变区作出有价值的谱学研究结果。这是一个充满困难而又极富吸引力的工作,我

们希望国内同行能帮我们出谋划策,并热忱欢迎有志于此事业者参加进来一同工作。

## 参 考 文 献

- [1] R. Anne et al., A Complication on Nuclear Physics, GANIL (1983—1988) 19—21 and its references  
[2] G. Audie et al., 同 1, p. 23—24  
[3] E. K. Warbarton et al., Phys. Rev., C14, 1147 (1991)  
[4] J. P. Dufour et al., Phys. Lett., B206, 11 (1988)  
[5] V. Borrel et al., Nucl. Phys., A473, 331 (1987)  
[6] M. DE Saint Simon et al., 同 1, p. 40  
[7] W. D. Loveland, Nuclear Chemistry Progress Report Prepared for the U. S. Department of Energy Under Grant No. DE-FG-6-88ER 40402  
[8] P. L. McGaughey et al., Phys. Rev., C31, 896 (1985)  
[9] W. Loveland et al., Phys. Rev., C41, 973 (1990)  
[10] J. P. Dufour et al., Nucl. Phys., A387, 157 (1982)  
[11] D. Molzahn et al., J. Radioanal. Chem., 80, 109 (1983)  
[12] PH. Dessagne et al., Nucl. Phys., A426, 399 (1984)  
[13] D. Drake et al., Phys. Rev. Lett., Vol. 45, 1765 (1980)  
[14] K. Moody et al., GSI Scientific Report, 93 (1984)  
[15] A. Turler et al., 同上, p. 95  
[16] R. Schmoll et al., GSI Scientific Report, 34 (1985)  
[17] H. Bohlen et al., Nucl. Phys., A488, 89 (1988)  
[18] H. L. Ravn, Rep., Vol. 54, No. 3 (1979)