

# 现代应用物理系的原子核结构实验研究简介\*

朱胜江

(清华大学现代应用物理系 北京 100084)

**摘 要** 对近年来清华大学现代应用物理系开展的原子核结构实验研究的情况作了介绍,着重对所研究过的核高自旋态(包括个别核的低自旋态)结构特性进行了简述.

**关键词** 高自旋态 核结构 丰中子核素

**分类号** O571.21

## 1 前言

70年代以来,随着重离子加速器及探测技术的发展,国际上对原子核高自旋态的研究掀起了一股热潮.通过重离子熔合-蒸发反应,用在束 $\gamma$ 谱的实验技术研究高激发态下原子核的一系列重要特性,一直是核物理研究的前沿领域.自1987年起,我们就与国外有关大学的核结构研究组以及美国的橡树岭、阿贡等实验室合作,对众多原子核进行了高自旋态的研究,取得了一系列成果.尤其是近年来进行的用裂变瞬发 $\gamma$ 谱方法对丰

中子核区的高自旋态的研究,取得了引人注目的进展.同时,目前也在国内重离子加速器上开展了高自旋态的研究工作.现将近年来的研究情况及主要结果作一简要介绍.

## 2 研究结果简介

### 2.1 $A=70$ 区原子核高自旋态的研究

此区主要涉及到质量数  $A=70$  区域的 Ge, Ga 等核的高自旋态研究.该区内的核结构比较复杂,往往体现复杂的形状共存特性.我们在美国橡树岭实验室,用 $^{40}\text{Ti}(^{20}\text{Mg}, \alpha p, \gamma n)$ 反应,研究了 $^{68}\text{Ge}$ 、 $^{66}\text{Ga}$ 和 $^{67}\text{Ga}$ 等核的高

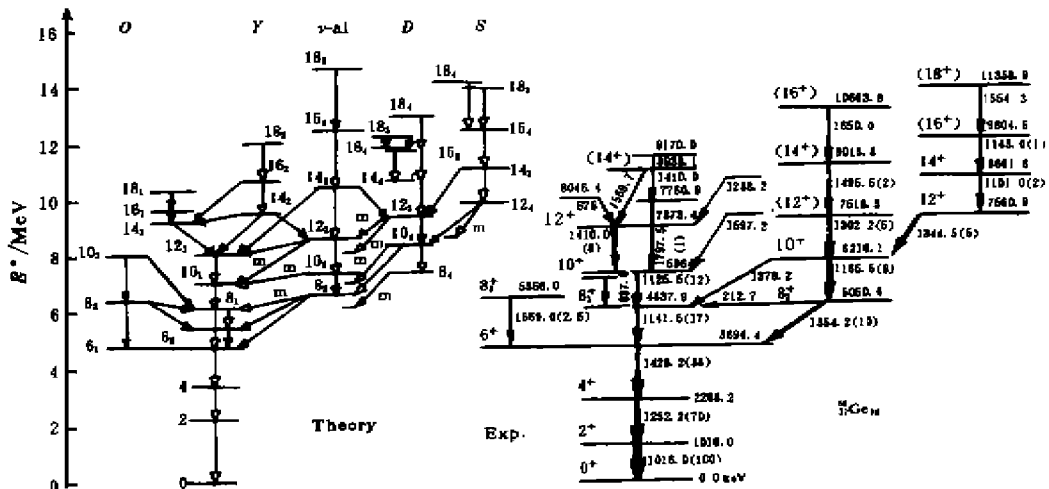


图1 对 $^{68}\text{Ge}$ 的正宇称态能级用平均场投影方法计算结果(左)与本实验结果(右)的比较<sup>[1]</sup>

\* 国家自然科学基金(项目号19375029)与核工业科学基金(项目号J94AY5072)资助.

自旋态, 所提取的核结构信息如下:

对<sup>68</sup>Ge, 着重研究了高自旋态正宇称带结构, 发现了6<sup>+</sup>以上的多分叉结构, 并且与别人的平均场投影理论计算作了比较, 实验与理论结果如图1所示<sup>[1,2]</sup>. <sup>68</sup>Ge的转动惯量矩随转动频率的变化见图2<sup>[1]</sup>. 可以看出, 在6<sup>+</sup>以上, <sup>68</sup>Ge的集体带结构出现明显的三分叉现象, 并且有两条带(8<sub>1</sub><sup>+</sup>与8<sub>2</sub><sup>+</sup>带)在 $\hbar\omega = 0.4$  MeV附近发生回弯. 然后, 8<sub>2</sub><sup>+</sup>带在第一回弯后又分成两叉, 其中一条发生第二次回弯, 且转动惯量特别大. 理论计算表明, 之所以发生不同特性的多带结构, 是由于在高自旋态下, 质子与中子角动量的顺排程度不同所致<sup>[2]</sup>, 从而出现了长椭与扁椭共存、不同 $\beta_2$ 形变共存的多带结构.

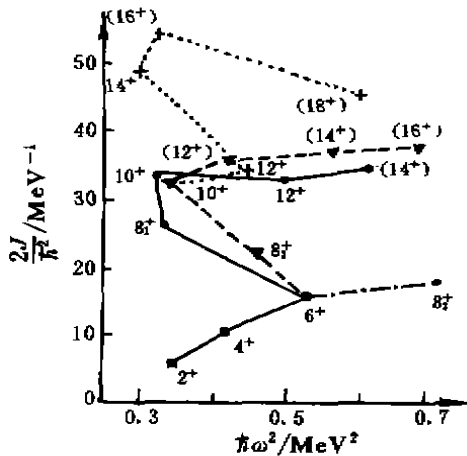


图2 <sup>68</sup>Ge的惯量矩 $2J/\hbar^2$ 对转动频率 $\hbar\omega$ 图<sup>[1]</sup>

<sup>65</sup>Ga与<sup>67</sup>Ga为过渡性核, 研究其高自旋态的主要目的是探索 $1g_{9/2}$ 轨道在此区内的重要作用. 我们建立了这两个核新的高自旋态能级图(见文献<sup>[1,3]</sup>), 发现了各自高自旋态下的几条集体带结构. 其中有一条为建立在 $(g_{9/2})^3$ 组态混合上的集体带. 在<sup>65</sup>Ga中, 另外两条集体带很可能是属于长椭与扁椭的形变带. 对这两个核的研究表明, 在低激发态下, 单粒子跃迁占主导地位, 而在高自旋态

下, 集体运动则被完全确立.

## 2.2 A=150区核的高自旋态研究

此核区内主要是研究<sup>153</sup>Dy与<sup>154</sup>Dy的高自旋态结构. 实验是在美国阿贡国家实验室完成的. 利用<sup>122</sup>Sn(<sup>36</sup>S, xn)反应, 束流能量为165 MeV. 最近在Gammasphere上作了类似的实验. 在第一次实验中, 建立了新的高自旋态能级图<sup>[4,5]</sup>. 其中, <sup>154</sup>Dy是在国外完成数据分析工作的, <sup>153</sup>Dy则是在国内完成, <sup>153</sup>Dy的能级图如图3所示. 在<sup>153</sup>Dy中, 自旋态扩展到 $81/2 \hbar$ , 发现了在同质异能态以上极其复杂的单粒子跃迁特性, 系统地比较了缺中子Dy同位素的同质异能态的变化以及其形状随中子数的变化. 并且发现, 此核随自旋的增加, 从长椭形变经三轴形变到扁椭形变, 然后转变到极其复杂的单粒子跃迁特性. 在<sup>154</sup>Dy中, 着重研究带终极前后核的特性<sup>[5]</sup>. 在对近期Gammasphere上所做的数据分析中, 又大大扩展了这两个核的高自旋态, 发现了许多新的特性, 数据分析仍在进行中, 结果有待发表.

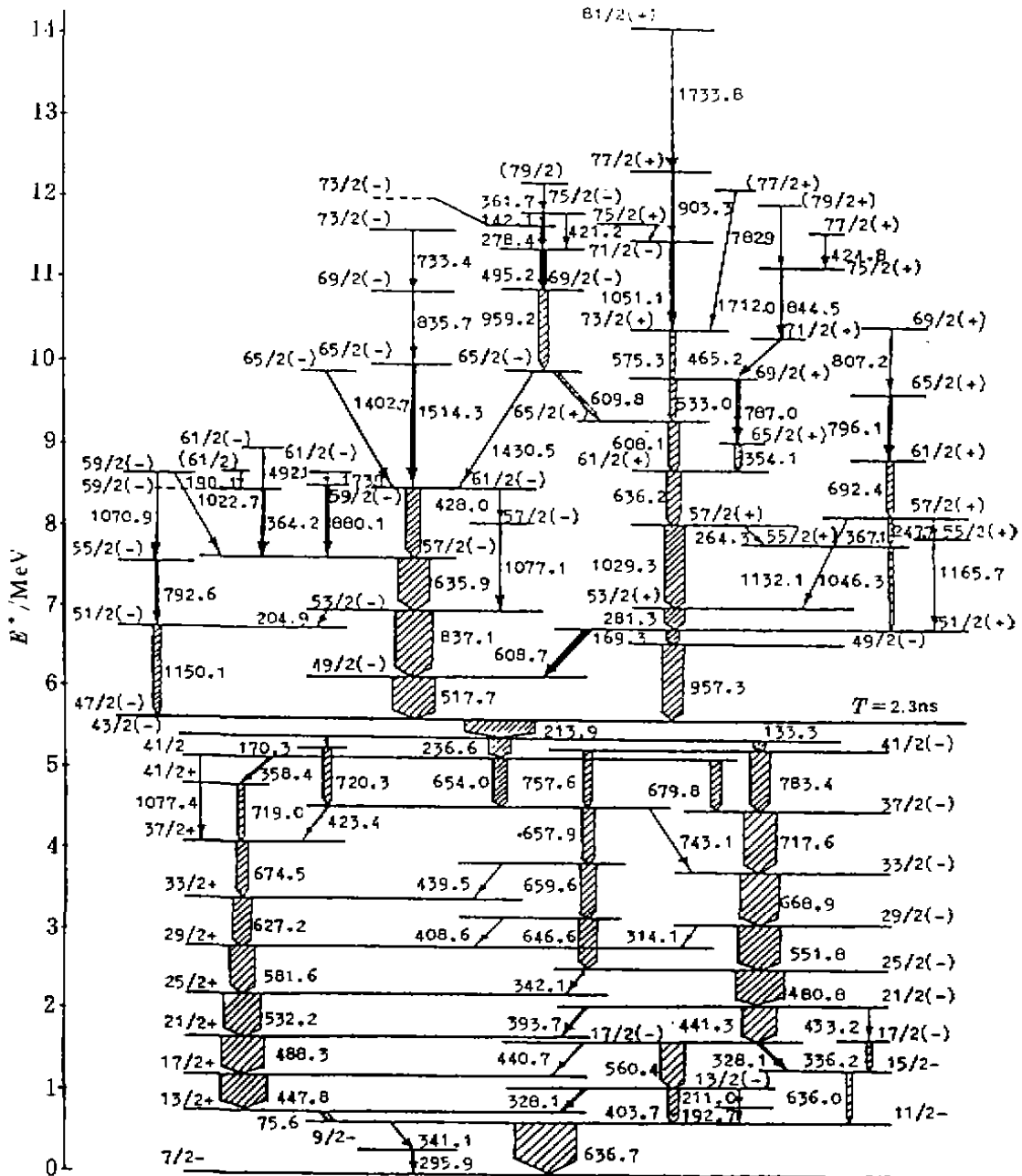
## 2.3 <sup>187</sup>Au形状共存的研究

<sup>187</sup>Au处于缺中子偶偶核Pt与Hg的形状共存区域, 通过研究其能级结构可以深入探讨单质子的耦合对形状共存的影响. 利用<sup>177</sup>Hf(<sup>18</sup>F, 9n)反应, 在橡树岭国家实验室同位素分离器上分离出了<sup>187</sup>Tl, 然后测量<sup>187</sup>Tl的衰变 $\gamma$ 谱, 从而得到<sup>187</sup>Au的低自旋态能级纲图<sup>[6]</sup>. 我们共识别了84条能级和111条 $\gamma$ 跃迁, 其中, 新发现41条能级和65条 $\gamma$ 跃迁, 并测得了38个内转换系数.

从所测结果抽出<sup>187</sup>Au主要的集体带特性, 如图4所示<sup>[6]</sup>. 从图中可看出, <sup>187</sup>Au在低激发态下就可以表现为两组性质完全不同的形状共存带: 第一组的两个带为建立在 $9/2^-$ 上的长椭与扁椭的形状共存带, 它起源于

$\pi h_{9/2}$  单质子轨道与  $^{168}\text{Pt}$  的长椭与扁椭的形状共存芯的耦合；第二组的两个带为建立在  $11/2^-$  上的近球形与长椭的形状共存带，而它则起源于  $\pi h_{11/2}$  单质子空穴态与  $^{188}\text{Hg}$  的近球形与长椭形状共存芯的耦合。这种奇特的

形状共存特性体现了  $^{187}\text{Au}$  核中费米面附近的单粒子轨道对于形状共存的影响。从所得的内转换系数可以看出，具有形状共存的两个带间 E0 跃迁的内转换系数特别大，这点可以作为识别形状共存带的“指纹”。



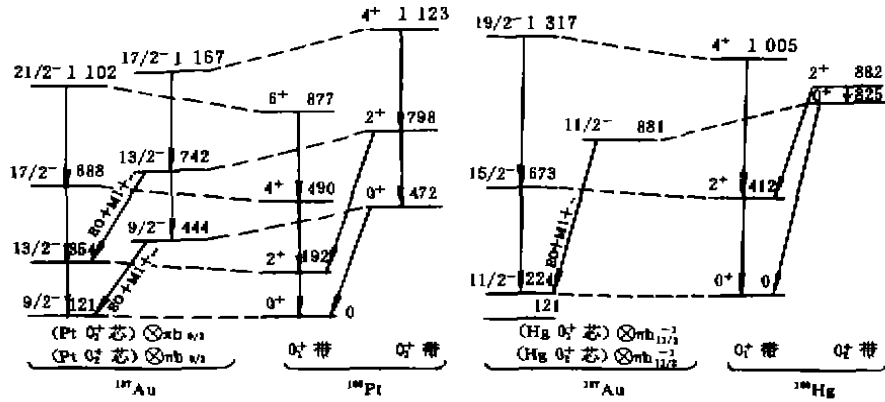


图4 实验测得的<sup>197</sup>Au 的单质子粒子态  $\pi h_{9/2}$  和<sup>198</sup>Pt 芯以及单质子空穴态  $\pi h_{11/2}^{-1}$  与<sup>199</sup>Au 芯耦合示意图<sup>[5]</sup>

### 2.4 丰中子核区的高自旋态研究

利用在束  $\gamma$  谱的实验探测装置, 测量由<sup>252</sup>Cf 等重核自发裂变产生的瞬发  $\gamma$  谱, 在目前情况下这是研究丰中子核高自旋态的一种有效方法<sup>[7]</sup>. 多年来, 我们与美国的 Vanderbilt 大学、橡树岭实验室和伯克利实验室等单位合作, 对  $A = 100 \sim 120$  以及  $140 \sim 150$  丰

中子核区进行了广泛的研究, 发现了一系列重要结果<sup>[8]</sup>. 实验的方法见本期“围绕  $Z = 56, N = 88$  丰中子核区八极形变的研究”一文. 现将主要结果概述如下.

#### 2.4.1 $A = 140 \sim 150$ 丰中子核区的高自旋态研究

此区为裂变产物的重核区, 我们系统地研究了 Xe、Ba、Ce、La、Nd 和 Sm 等核链的

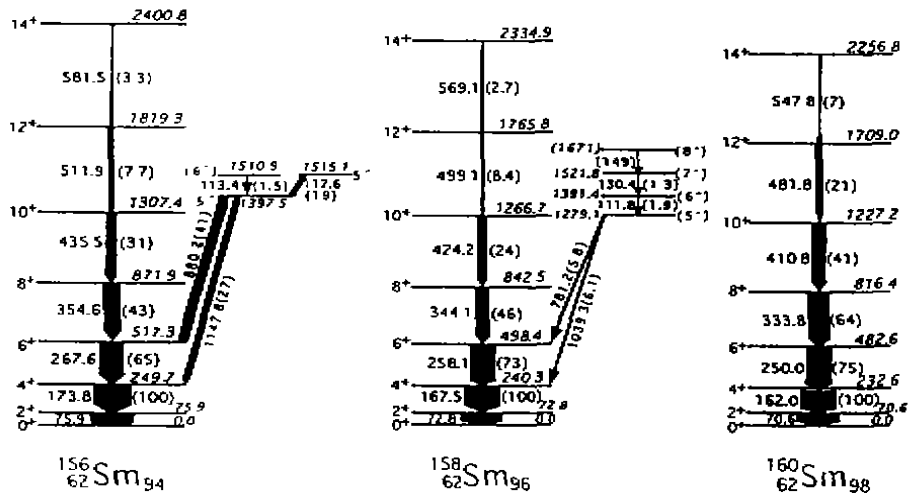


图5 <sup>156,158,160</sup>Sm 的能级图<sup>[10]</sup>

丰中子核的高自旋态结构, 首次建立了此区内一批极端丰中子核的能级图, 包括<sup>162</sup>Ce<sup>[9]</sup>、<sup>160</sup>Sm<sup>[10]</sup>、<sup>149</sup>Ce<sup>[11]</sup>和<sup>141</sup>Xe<sup>[12]</sup>等, 并发现或扩展了一批丰中子核的重要的集体带结构. 图5

所示例子为利用早期的 Gammasphere 实验装置所测数据得到的<sup>156, 158, 160</sup>Sm 的能级图<sup>[10]</sup>. 新建的<sup>160</sup>Sm 的能级图最高自旋态为 14+, 并且系统地比较了转晕带结构, 发现这

3个核的晕带的转动惯量  $J_1$  和  $J_2$  随转动频率的变化互相之间为等间距的曲线, 即为移动了的“全同带”, 如图6所示. 并在  $^{156, 168}\text{Sm}$  中, 发现了建立在新的组态混合上的带成员. 在此区内还发现并扩展了一批重要的八极形变核(见本期23页)以及多个核的回弯现象. 此

区内的核结构我们仍在研究之中.

### 2.4.2 $A=100\sim 120$ 丰中子核区的高自旋态研究

这部分核包括 Kr、Sr、Zr、Mo、Ru 和 Pd 等核链. 利用 Gammasphere 所得的实验数据, 大大扩展了原有核的高自旋态.

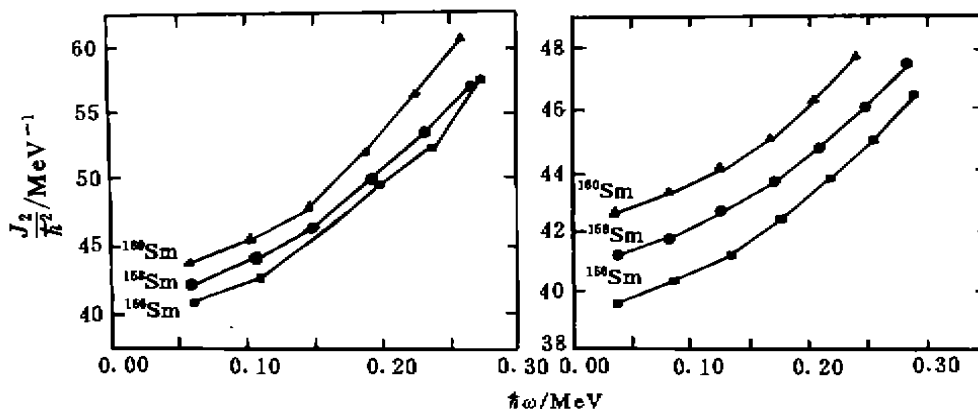


图6  $^{156, 158, 160}\text{Sm}$  的转动惯量  $J_1$  与  $J_2$  随转动频率  $\hbar\omega$  变化图<sup>[10]</sup>

Sr 和 Zr 核链位于丰中子核的  $Z=40$ 、 $N=56$  的亚球壳区与  $Z=38$ 、 $N=60$  的大形变区, 所以对这两个核链中丰中子核的研究对于理解此区内单粒子轨道的影响具有重要意义. 研究表明<sup>[8]</sup>, 这两个核的形状随中子数的变化非常激烈, 在  $N=56$ 、 $58$  时为球形核, 而在  $N=60$  时则发生  $\beta\sim 0.4$  的基态大形变, 且在  $N=58\sim 60$  时体现为球形与轴对称形状的“形状共存”特性. 而对于  $^{100, 102}\text{Zr}$  核, 还发现了建立在新的组态混合上的强形变带<sup>[8]</sup>.

了理论计算. 结果表明, 在  $\beta$ - $\gamma$  势能面中, 丰中子 Mo 核应为轴对称形变, 而不是通常所认为的三轴形变, 能级与跃迁几率也与实验结果符合得很好.

对于 Mo 核链, 系统地研究了其偶偶核的振动-转动带. 图7为我们新建的  $^{106}\text{Mo}$  的能级图, 此结果扩展了 Eurogam 的报导<sup>[13]</sup>. 在此核中, 除发现了  $1\gamma$  振动-转动带外, 还发现了不多见的  $2\gamma$  带以及一个可能是建立在新的组态混合上的强形变带. 与此同时, 我们利用广义集体模型对丰中子偶偶核的结构进行

丰中子偶偶核  $^{108, 110, 112}\text{Ru}$  的结果见文献<sup>[14]</sup>. 除大大扩展了这3个核的转晕带结构外, 还系统地观测到  $\gamma$  振动-转动带结构. 用三轴振动-转动模型计算, 很好地再现了能级与  $\gamma$  分支比, 并且发现  $^{108, 110}\text{Ru}$  的晕带的全同带特征.

对 Pd 核链, 早期报导了  $^{112, 114, 116}\text{Pd}$  的转晕带结构与回弯机制<sup>[16]</sup>, 后来我们发现了系统的振动-转动带<sup>[16, 17]</sup>, 并且发现  $^{114, 116}\text{Pd}$  中的一个边带, 它可能是基于新的组态混合上的一个形变带.

这个区域的研究工作仍在进行之中, 包括一些复杂的偶  $Z$  奇  $A$  核与奇  $Z$  核结构的

研究. 同时, 还开展了对 Sr、Cd 等核的 IBM 理论计算, 得到许多重要结果, 详细内容见本期龙桂鲁等人的文章.

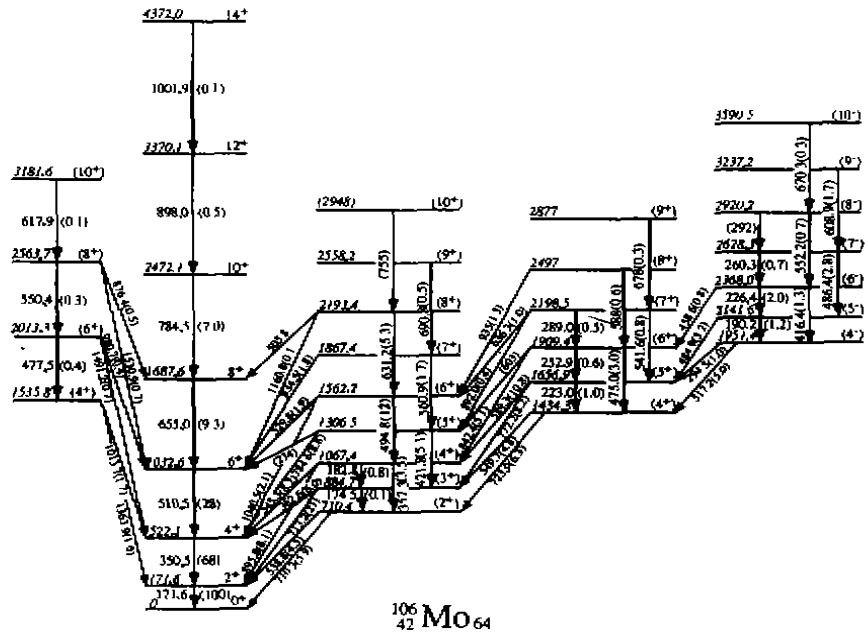


图7  $^{106}\text{Mo}$  的能级图

2.5 在国内重离子加速器上的实验工作

我们准备在国内原子能科学研究院及中科院近物所的重离子加速器上开展研究工作. 1997年春天已在原子能科学研究院 H-13 串列加速器上进行了对  $A = 140$  区的  $^{137,138}\text{Ce}$  高自旋态实验测量工作, 打算研究这些核的高自旋态新的组态混合及单粒子轨道对形状的驱动效应. 利用  $^{124}\text{Sn}(^{18}\text{O}, xn)$  反应, 测得  $2 \times 10^8$  个  $\gamma\text{-}\gamma$  符合事件. 目前数据分析仍在进行之中, 可望得到许多新的结果.

3 结束语

这些年来, 我们开展了内容广泛的高自旋态研究工作, 与国外先进实验组和实验室合作, 测量了大量的原始数据, 在校内进行艰苦而复杂的数据分析工作, 取得了许多重要结果. 尤其在丰中子核的高自旋态研究方面, 受到国内外同行的关注与高度评价. 我们将利用国内现有的实验条件, 争取做出一流的研究工作.

参 考 文 献

- 1 Zhu Shengjiang, Hamilton J H, Ramayya A V *et al.* Research on High Spin States of  $^{68}\text{Ge}$ ,  $^{65}\text{Ga}$  and  $^{67}\text{Ga}$ . High Energy Phys and Nucl Phys, 1992, 16, 211~217
- 2 Chaturvedi L, Zhao X, Ramayya A V *et al.* Tests of Microscopic Calculations of Multiple Band Structures and Large Deformations in  $^{68}\text{Ge}$  and  $^{72}\text{Se}$ . Phys Rev, 1991, C43, 2 541~2 545
- 3 Zhu Shengjiang, Chaturvedi L, Hamilton J H *et al.* High Spin States in  $^{65}\text{Ga}$ ,  $^{67}\text{Ga}$  and Their Collective Behavior at High Angular Momenta. Chin Jour Nucl Phys, 1991, 13, 331~338
- 4 Zhu Shengjiang, Ma Wenchao, Ahmad I *et al.* High Spin Level Structure in  $^{159}\text{Dy}$  and Shape Changes in Neutron-Deficient Dy Nuclei. High Energy Phys and Nucl

- Phys., 1991, 15: 165~172
- 5 Ma W C, Quader M A, Emiling H *et al.* Structural Changes along and above the Yrast Line of  $^{154}\text{Dy}$ . *Phys Rev Lett*, 1988, 61: 46~49
- 6 朱胜江, 陈智超, Zganjar E F 等.  $^{197}\text{Au}$  的能级结构及单质子与偶-偶核芯的耦合特性. *高能物理与核物理*, 1994, 18: 193~201
- 7 朱胜江. 裂变产物丰中子核素的瞬发  $\gamma$  谱的实验研究. *核物理动态*, 1992, 9(2): 8~12
- 8 Hamilton J H, Ramayya A V, Zhu S J *et al.* New Insights from Studies of Spontaneous Fission With Large Detectors Arrays. *Prog In Part and Nucl Phys*, 1995, 35: 635~740
- 9 Zhu S J, Hamilton J H, Ramayya A V *et al.* Identification of  $^{152}\text{Ce}$  and Unexpected Variations in Moments of Inertia with Neutron Number and Spin in  $^{142}\text{--}^{148}\text{Ba}$ ,  $^{144}\text{--}^{152}\text{Ce}$  and  $^{152}\text{--}^{156}\text{Nd}$ . *J Phys*, 1995, G21: L75~81
- 10 Zhu S J, Hamilton J H, Ramayya A V *et al.* Identification of Levels in  $^{160}\text{Sm}$  and New High Spin States in  $^{156}\text{--}^{158}\text{Sm}$ . *J Phys*, 1995, G21: L57~62
- 11 Babu B R S, Zhu S J, Ramayya A V *et al.* Identification of  $\gamma$ -transitions in  $^{147}\text{Ba}$ ,  $^{148}\text{Ge}$  and  $^{151}\text{--}^{153}\text{Nd}$ . *Phys Rev*, 1996, C54: 568~571
- 12 朱胜江, 王牧歌, 邓景康等. 丰中子核  $^{141}\text{Xe}$ ,  $^{152}\text{Ce}$ ,  $^{153}\text{Nd}$  及  $^{160}\text{Sm}$  能级图的建立. *高能物理与核物理*, 1997, 21: 104~109
- 13 Guessous A, Schulz N, Phillips W R *et al.* *Phys Rev Lett*, 1995, 75: 2 280~2 283
- 14 Lu Q H, Butler-Moore K, Zhu S J *et al.* Structure of  $^{108}\text{--}^{110}\text{--}^{112}\text{Ru}$ . Identical Bands in  $^{108}\text{--}^{110}\text{Ru}$ . *Phys Rev*, 1995, C52: 1 348~1 354
- 15 Aryaenejad, Cole J D, Greenwood R C *et al.* Band Crossing Observed in Neutron-rich Pd Isotopes via Spontaneous Fission of  $^{252}\text{Cf}$ . *Phys Rev*, 1993, C48: 566~572
- 16 朱胜江, Hamilton J H, Ramayya A V *et al.* 丰中子  $^{112}\text{--}^{114}\text{--}^{116}\text{Pd}$  核的集体带结构. *青岛大学学报(第十次全国核物理大会论文集)*, 1997, 10(2): 1~4
- 17 Hamilton J H, Lu Q H, Zhu S J *et al.* Extended Identical Bands in  $^{98}\text{--}^{100}\text{Sr}$  and  $^{108}\text{--}^{110}\text{Ru}$  and New High Spin States in  $^{94}\text{--}^{96}\text{Sr}$ ,  $^{96}\text{--}^{102}\text{Zr}$  and  $^{112}\text{--}^{114}\text{Pd}$ . *Proc Int Conf on Exotic Nucl and Atomic Masses, ENAM95*, eds: M. de Saint Simon and Sorlin, *Frontiers (France)*, 1995: 487~492

## Overview of Experimental Research on Nuclear Structure in Department of Modern Applied Physics

Zhu Shengjiang

(Department of Modern Applied Physics, Tsinghua University, Beijing 100084)

**Abstract** The experimental research on nuclear structure in Department of Modern Applied Physics, Tsinghua University has been summarized. The main research results in high spin states of nuclear structure, as well as some low spin states, have been reported.

**Key words** nuclear structure high spin states neutron-rich nuclide

**Classifying number** O571.21