

# 极端条件下的核结构

陈永寿

(中国原子能科学研究院 北京 102413)

**摘要** 本文评述了原子核结构研究的新进展和面临的新挑战,指出当今原子核结构发展方向的基本特点是“极端条件下的核结构”,它的主要内容是高自旋态物理和远离稳定线直至滴线原子核两个方面,而这些新发展方向,有新一代超级 $\gamma$ 谱探测器系统和放射性核束加速器的发展和建造做为坚实的技术保证。

**关键词** 核结构, 高自旋态, 远离稳定线核.

## 1 引言

核物理发展面临着新的挑战,在未来的十年中,估计将有不少新的突破性进展.新挑战和新发展的基本特点是沿着三个自由度,即能量、角动量和同位旋自由度的方向进行,如图1所示.沿着能量自由度方向,科学家通过相对论重离子碰撞和高能电子探针,主要研究原子核的亚核子层次上的物质结构和性质、核力的微观基础,代表性科研计划有RHIC和CEBAF;沿着角动量自由度方向,科学家通过各种重离子核反应,研究高速旋转状态下,核物质的结构和性质,代表性科研计划有GAMMASPHERE和EUROGAM;沿着同位旋自由度方向,科学家通过放射性核束重离子反应,研究中子数同质子数比为异常值的核反应、核性质和结构,代表性科研计划有RIB、ISL和ISOLDE,我国也正在计划建造放射性核束加速器.

当前原子核结构研究发展方向的基本特点可用“极端条件下的核结构”来概括.所谓极端条件(Exotic or Extreme Conditions),是指原子核处于高速旋转的状态,即高自旋态、原子核有异常的中子数同质子数比( $N/Z$ )值的状态、原子核处于高温状态等.当今原子核结构研究有两个基本发展方向:一是原子核高自旋态的研究继续深入发展,已成为最有兴趣的核物理前沿研究领域之一;二是远离 $\beta$ 稳定线,直至滴线原子核的研究正在成为最活跃的核物理前沿研究领域之一.

近年来,在这两个方面的研究都有重大进展.

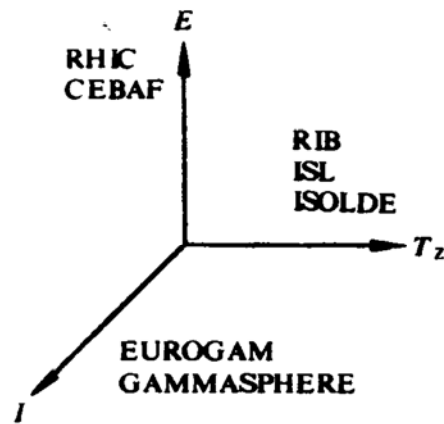


图1 核物理的新挑战及其主要发展方向的示意图

## 2 高自旋态物理的新进展和新发现

在高自旋态物理研究方面,高速转动超形变核的研究是典型的极端条件下核结构研究.它的研究对象是处于高速转动和极度拉长变形的极端条件下的原子核,近几年来发展很快,取得了许多激动人心的重要成果,可以代表高自旋态物理的新进展和新发现.

### 2.1 新兴的超形变核谱学

原子核超形变(Superdeformation,长、短轴比为2:1)的发现是核物理研究的重大进展之一.稳定的超形变核都处于高速转动状态,其角动量高达 $I=60\hbar$ 左右,核物质以 $10^{20}$  Hz的角频率旋转着.这种处于极度拉长变形的、高速转动的量子力学微观多体系,强烈地吸引着物理学家的兴趣.到目前为止,已发现了40多个高自旋态超形变核,90多条超形变转动带.大量超形变核的发现,特别是同

一核中多条超形变带的发现,使超形变核的研究进入了内禀组态的层次,从而形成了一门新兴的核谱学,即超形变核谱学.超形变核谱学的一个重要的进展,是关于超形变核的精细谱学测量,例如超形变核磁性质的测量.最近,实验测量了<sup>193</sup>Hg 超形变带(SD band)间的跃迁分支比,相应的  $g$  因子值对应着 SD 带的单中子组态结构,而最新的<sup>193</sup>Hg 的 SD 带的类似测量,给出了单质子组态结构<sup>[1]</sup>.由于超形变核态是第二位阱中的稳定态,超形变核谱学又称为第二位阱核谱学.超形变核谱学是核物理学中一个崭新的领域,尚处于初始发展阶段.

### 2.2 新超形变核区的发现

由于  $A=80$  区核的质量数相对地较小,重离子反应的开道较多,生成目标超形变核的截面较小,而理论预言的超形变核晕态处于很高自旋,寻找超形变核的实验非常困难,一直没有重要进展.最近,由于实验技术的新发展,如采用 GAMMASPHERE 超级晶体球  $\gamma$  谱仪和名称为微球(MICROBALL)的  $4\pi$  带电粒子探测器的符合测量,使 ORNL 和华盛顿大学联合实验组的科学家们终于在这个核区发现了几个超形变核,<sup>82,83</sup>Sr 和<sup>84</sup>Zr,其形变参量约为  $\beta_2=0.55$ (尚未发表).

### 2.3 超形变核力场及其崩溃

超形变态的对关联及其崩溃是很有兴趣的重要问题之一,有关研究也有新的进展.实验上惊奇地发现 Hg 区超形变转动带动力学转动惯量  $J^{(2)}$  随转动频率  $\omega$  的增加而持续上升,这暗示了对关联仍然起着重要作用.然而,考虑对力的已有微观理论计算都未能再现这一实验数据,总是给出太快的上升率.最近,我们建立了各向异性三维谐振子四极对力 HFB 理论(HOQHFB),并应用该理论来研究 Hg 区超形变核的对关联和对关联的崩溃问题<sup>[2]</sup>.该自洽理论计算,给出了单极对力和四极对力场随转动频率  $\omega$  的变化,再现了  $J^{(2)}$  上升率的实验数据,揭示了四极对力,尤其是  $Y_{21}$  对力,在超形变核中的重要作用.理论计算

研究还得出超形变核中对力场的“易碎性”(fragile)的结论,即在超形变核中,一旦有一核子对被 Coriolis 力拆散,整个静力学对力场将崩溃,并得到 Hg 区超形变核力场崩溃的临界转动频率为  $\omega_c \sim 0.4$  MeV.可用这些结论统一地说明各超形变核区对力场的基本性质,以及对对力场变化极为敏感的动力学转动惯量的基本特征.图 2 是不同核区的三个典型超形变核的动力学转动惯量  $J^{(2)}$  随  $\omega$  的变化.这里,取刚体转动惯量  $J_r$  值为零点值,将它们画在同一图中是很有兴趣的,极好地展示了超形变核力场随转动频率的戏剧性变化.对  $A=190$  核区,实验超形变带的  $\omega \approx 0.1 \sim 0.4$  MeV,对力场起作重要作用,角动量转动顺排效应使  $J^{(2)}$  随  $\omega$  增加而持续上升;对  $A=150$  核区,实验超形变带的  $\omega \approx 0.5 \sim 0.7$  MeV,有一对核子被拆散,静力学对力场基本上崩溃,从而  $J^{(2)}$  随  $\omega$  增加而下降;对于  $A=80$  核区,实验超形变带的  $\omega \approx 0.7 \sim 1.2$  MeV,有一对以上的核子对被拆散,对力场全崩溃,核态已从超流态变成正常态,从而呈现  $J^{(2)}$  近似等于刚体常数值的刚性转子特征.

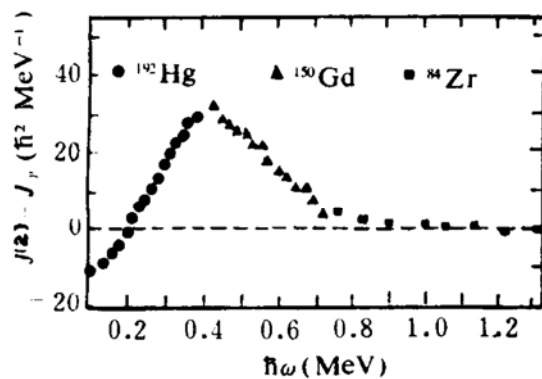


图 2 不同区典型超形变核动力学转动惯量  $J^{(2)}$  随转动频率  $\omega$  的变化,并取刚体转动惯量  $J_r$  值为零点

### 2.4 超形变带的退激

超形变态向正常形变态的越迁,涉及原子核形变的大振幅运动和内禀状态的极大重组,是非常有兴趣的问题,但也是公认的难题.最近,阿贡实验室在此研究中取得了重要的进展,测出了超形变带退激的准连续  $\gamma$  谱.

发现,  $^{192}\text{Hg}$  的超形变(SD)带退激到正常形变(ND)带的越迁, 发射的  $\gamma$  射线的平均数目为  $3.2 \pm 0.6$ ; 退激 SD 态相对于 ND 晕态的激发能为  $4.3 \pm 0.9 \text{ MeV}$ , 自旋为  $10.1 \pm 0.7\hbar$ . 所测的退激谱为类统计  $\gamma$  谱, 这表明 SD 态的退激可能是通过与周围的高密度 ND 态“海洋”的耦合来实现的<sup>[3]</sup>. 实验还测量了复合核退激时通过 SD 带的  $\gamma$  级联发射过程的不同阶段的  $\gamma$  谱, 从而发现高激发原子核的退激, 可能是经历了 Chaos  $\rightarrow$  Order  $\rightarrow$  Chaos  $\rightarrow$  Order 的奇异衰变过程最后达到基态的. 这种多次相变过程有重要的物理意义.

### 2.5 巨超形变核的发现

最近, 核物理学家发现了巨超形变核(Hyperdeformation, 长、短轴比为 3:1)的实验证据. A. Galindo 等人在  $^{153}\text{Dy}$  的  $E_{\gamma 1}$  和  $E_{\gamma 2}$  二维  $\gamma$  能量关联谱中, 发现了  $\Delta E = E_{\gamma 1} - E_{\gamma 2} = 30\text{keV}$  的半谷宽<sup>[5]</sup>, 相应的  $J^{(2)} = 4\hbar^2/\Delta E_{\gamma} = 130\hbar^2\text{MeV}^{-1}$ , 由此得到形变参量  $\beta_2 = 0.9$ , 对应长、短轴比为 3:1. M. Lunardon 等人的实验<sup>[6]</sup>, 在同一个反应道中, 肯定了  $\Delta E_{\gamma} = 30\text{keV}$  的半谷宽(见图 3), 但测定出该谷是由  $^{152}\text{Dy}$  的  $\gamma$  跃迁的贡献而形成的, 因此认为所发现的巨超形变核是  $^{152}\text{Dy}$  而不是  $^{153}\text{Dy}$ . 进一步的有关实验仍在进行中.

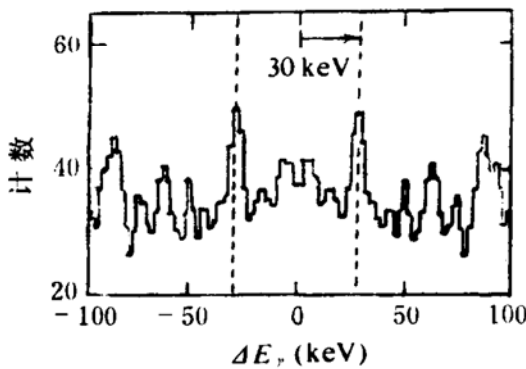


图 3  $^{152}\text{Dy}$  的二维关联  $\gamma$  射线能量差 ( $\Delta E_{\gamma} = E_{\gamma 1} - E_{\gamma 2}$ ) 谱. 中心谷半宽度为 30keV, 这暗示该核的巨超形变(HD)转动带的存在

### 2.6 原子核新对称性的发现

核物理学家发现了原子核的一个新的对称性, 即  $C_4$  对称性. 具有  $C_4$  对称性的原子

核, 在轴对称破缺后, 形成了具有空间转动  $90^\circ$  对称的形状. 这种空间点群  $C_4$  对称性, 是近些年来在原子分子物理中发现的, 现在在核物理中找到了实验证据, 即  $^{149}\text{Gd}$  核的超形变晕带的动力学转动惯量  $J^{(2)}$  随转动频率  $\omega$  的变化, 在相当大的  $\omega$  值范围内 ( $0.5 \sim 0.75 \text{ MeV}$ ), 呈现出奇异的  $\Delta I = 2$  “摇摆”(Staggering)<sup>[6]</sup>(见图 4). 上摆点和下摆点分别组成了两个  $\Delta I = 4$  序列, 它们对应着一个量子体系的空间转动  $90^\circ$  对称性的两个量子态. 在  $^{149}\text{Hg}$  和  $^{153}\text{Dy}$  中, 似乎也找到了  $C_4$  对称性的实验证据.  $C_4$  对称性的一个自然解释是原子核发生了  $Y_{44}$  变形<sup>[7]</sup>. 原子核的  $C_4$  对称性也许是近年来最大的新发现, 它已成为目前高自旋态物理研究的热点.

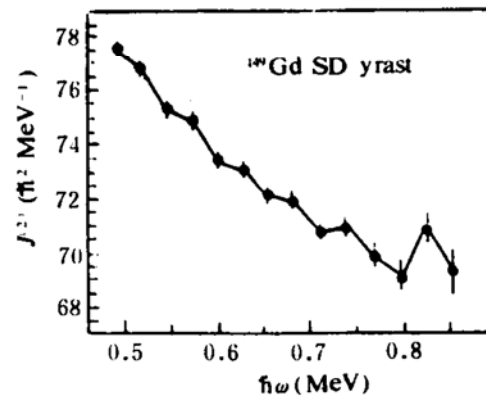


图 4  $^{149}\text{Gd}$  的 SD 晕带动力学转动惯量  $J^{(2)}$  随转动频率  $\omega$  的变化, 其  $\Delta I = 2$  摇摆行为暗示了  $C_4$  对称性

## 3 异常同位旋原子核的兴趣

新型放射性核束加速器在生产远离  $\beta$  稳定线原子核方面的前所未有的能力, 打开了异常同位旋核科学新领域的大门. 这方面的研究工作虽然刚刚起步, 但已经取得了一些重大成果, 例如中子晕核, 以及最近的  $N = Z = 50$  双幻数核  $^{100}\text{Sn}$ , 都是轰动国际核物理学界的发现. 核物理学家对这一新领域抱有极浓厚的兴趣, 而这些兴趣之所在, 也是今后核物理研究发展的重要方向.

### 3.1 $N = Z$ 原子核的壳结构

$N = Z$  原子核的性质和结构一直是核物

理学家感兴趣的课题,而对  $N=Z$  双幻核的兴趣尤盛. 核的壳结构是核物理的最重大发现之一,相应的幻数(2、8、28、50、82、126)在决定具体原子核的基本性质和结构方面,起着极重要的作用,这些幻数赋予原子核的特别稳定性,其中双幻核最为稳定.  $N=Z \leq 28$  的双幻核处于  $\beta$  稳定线附近,都是早已发现的稳定核.  $N=Z \geq 50$  的双幻核,处于质子滴线上或以外,本应该是极不稳定的或不可能存在的原子核. 然而,是否由于幻数的原因而变成比较稳定或存在的核呢? 这是一个非常有兴趣的问题,但实验研究的难度很大. 1994 年 4 月, GSI 的核科学家们,在 1 GeV/u 高能  $^{124}\text{Xe}$  束弹裂反应碎块核中,首次鉴别出  $N=Z=50$  双幻数核  $^{100}\text{Sn}$ . 11 天的弹裂轰击实验,一共仅发现了 7 个  $^{100}\text{Sn}$  事件,由此推测其截面大约为 5 pb.  $^{100}\text{Sn}$  的寿命尚未直接测量到,估计值为秒级,比它附近的核素的寿命大几个量级,这暗示了幻数仍然起着极重要的作用. 核物理学家对这个核的性质和结构的知识还很缺乏,实验只迈出了第一步,进一步的研究,例如关于基态和第一激发态的性质等,是非常有兴趣的.

### 3.2 $N=Z$ 原子核的 n-p 对关联

原子核的对关联,在决定核的基态和低激发态的性质方面起着十分重要的作用,因此一直是核结构研究的重要课题之一. 人们对中子之间和质子之间的对关联已有较多的知识,但对中子与质子之间的(n-p)对关联的知识,特别是实验数据,还很缺乏. 迄今获得的对关联知识,是建立在稳定线附近核的实验数据基础上的. 这些核中的中子数远大于质子数,即中子同质子的费米面相差较远,因此 n-p 对关联的效应不够强或不够突出,以致于难以进行实验测量研究. 在  $N=Z$  原子核中,中子同质子的费米面相互非常靠近, n-p 对关联效应因此而相当显著,是研究 n-p 对关联的最佳实验室.

### 3.3 中子滴线原子核

中子滴线和滴线附近的原子核,是非常

丰中子核,由于过剩的那些中子的结合能很小,从而形成一种低密度的松散结合的中子物质体系,有其重要的研究价值.  $^{11}\text{Li}$ 、 $^{14}\text{Be}$  和  $^{17}\text{B}$  等中子晕(neutron halo)核的发现,是核物理研究的重大新进展,它开拓了一个新研究领域. 实验惊奇地发现,  $^{11}\text{Li}$  的核半径比最邻近稳定核  $^9\text{Li}$  的大了 30%, 由质量数据得出的最后一对中子的结合能只有 320 keV<sup>[8]</sup>. 图 5 显示了已发现的和可能即将发现的碳以下的轻元素核的单中子和双中子晕原子核. 在中子滴线附近,还可能存在着中子皮(neutron-skin)原子核,其核实外有较厚的中子物质弥散层,是又一种有趣的核存在形式.

壳结构是原子核的基本结构形式. 然而,已有的有关壳结构的知识完全是建立在稳定线附近原子核实验数据基础之上的,而中子滴线附近核的新的壳结构也是非常有趣的新问题. 此外,中子滴线附近核的  $\beta$  衰变也显然是十分有兴趣的.

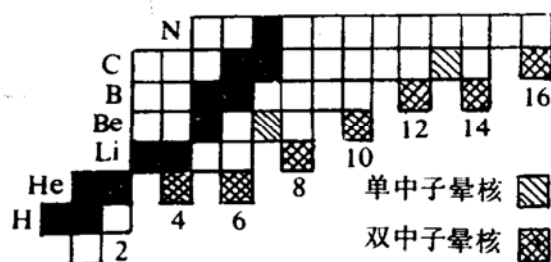


图 5 已发现的和可能即将发现的碳以下的轻元素核的单中子和双中子晕原子核

### 3.4 质子滴线原子核

质子滴线和滴线附近原子核,是异常丰质子核,由于过剩的那些质子的结合能很小,从而形成一种低密度的松散结合的质子物质体系,也有其重要的研究价值. 类似于中子晕和中子皮存在的理由,也可能存在着质子晕(proton halo)和质子皮(proton skin)原子核. 但考虑到由于质子之间的库仑相互作用而形成的库仑位垒的作用,最后的一、两个质子的波函数“尾巴”是否可能在核实外拖出足够长,从而形成质子晕核呢? 这个问题是有争议



的, 最终应由实验来回答. 同样, 质子滴线附近核的新的壳结构、质子滴线附近核的单质子发射和双质子发射现象及其物理机制, 也是非常有趣的新问题.

### 3.5 远离稳定线原子核

处在中子滴线和稳定线之间的丰中子核和处在质子滴线和稳定线之间的丰质子核, 尚有大量的新核素有待实验发现. 这些核形成了新的奇变形变核区、新的集体运动核区和新的有效相互作用核区, 是很有兴趣的研究领域. 今天的高水平实验技术使我们不仅能研究这些核的基态, 而且可研究具有异常同位旋的原子核的高自旋态和特殊激发态.

特殊激发态的研究, 是一种非常规条件下的核结构研究, 我认为它的基本精神也是与极端条件下核结构的基本精神相一致的, 即它的“unique”性. 高自旋同质异能核 (high spin isomer)  $^{178m2}\text{Hf}$  的研究就是一个很好的例子. 同质异能态核  $^{178m2}\text{Hf}$  的角动量为  $I^{\pi} = 16^{+}$ , 能量为  $E = 2.45\text{MeV}$ , 寿命为  $T_{1/2} = 31\text{a}^{[9]}$ . 由于其寿命长, 使 Dubna 和 Orsay 的科学家们利用高通量加速器、高纯化学和高效同位素分离实验技术, 每年可以生产和分离出  $10^{15}$  个  $^{178m2}\text{Hf}$  原子核的产物, 将它制成靶 (激发态靶核) 进行激光核谱学、各种核反应和作为角动量和能量的贮存源等内容的研究. 这种研究核现象的新方式和“unique probe”是值得重视的. 目前, 有俄、德、法等 6 个国家的 15 个科研所, 共 80 多位科学家通力合作进行这项研究.

### 3.6 超重元素稳定岛

超重元素稳定岛核, 不属于通常概念下的远离  $\beta$  稳定线原子核, 但它是稳定线核向超重质量数方向的延伸, 有非常重大的物理意义. 二十几年前, 合成和寻找超重元素的研究在全世界形成热潮, 一批重离子加速器相继建成. 然而, 科学家们在合成超重元素方面遇到了极大的困难, 不知道从何途径才能踏上那座理论预言的“超重岛”, 研究工作似乎比设想的要困难得多, 合成和寻找超重元素

的研究热潮渐渐地冷了下来. 更多的科学家们, 则利用兴建和改建的重离子加速器, 进行重离子核反应和核结构研究, 特别是高自旋态物理的研究, 取得了举世瞩目的成就. 然而, 值得我们注意的一个事实是, 合成和寻找超重元素核的研究工作并没有完全停止, 近些年来已取得了某些新进展. 当今实验设备和技术已经有了长足的进步, 我们有理由相信, 在今后十年左右的时间内, 科学家有可能发现并测量超重元素核.

### 3.7 核理论的新挑战

现有的核理论模型, 和有效相互作用, 都是建立在关于稳定线及其附近原子核的知识基础之上的, 将这些理论用于远离稳定线和直至滴线原子核的描述时, 需要进行大幅度的外推, 其可靠性是令人怀疑的. 核理论面临着新的挑战, 核理论必须发展. 目前所面临的问题, 不仅是理论的大幅度外推的困难, 而且更基本的问题可能是要处理一种全新的量子微观多体系, 这里我们姑且将它称为“无限接近于分离态的束缚态量子体系”. 它的意义, 显然已经超出核物理本身的范畴, 而滴线附近原子核为这种体系的研究提供了天然的实验室.

## 4 实现新发展的技术保证

综上所述, 已讨论了近几年来在核结构研究方面的一些新的、奇异的、常常是料想不到的发现. 这些发现是核物理研究的重要成就, 但同时又给科学家提出了许多有待回答的新问题. 虽然我们只能简要地讨论了关于极端条件下核结构的一部分内容, 但这已使我们注意到这样一个事实: 在实验和理论的研究方面都面临着新的挑战和新发展. 估计在未来的十年中, 以高自旋态和远离稳定线直至滴线核为主要内容的核结构研究将有许多新成果和重大突破. 除了极端条件下核结构本身的丰富物理内容和在核物理发展中, 以及与其它物理学, 如原子分子物理学、固体

物理学和天体物理学等的联系方面所占有的重要地位外,我们做出这一估计的另一方面的根据,就是新实验技术和新设备的发展和建造。

新一代的超级  $\gamma$  谱探测器系统(晶体球)的发展和建立,极大地推动了核结构,特别是高自旋态物理的发展.例如美国伯克利、橡树岭和阿贡三个国立实验室合作建造的 GAMMASPHERE 超级晶体球  $\gamma$  谱仪,现已完成了一期工程并投入使用,它已使  $\gamma$  射线的探测效率和分辨本领比上一代谱仪提高了大约一个量级,全期工程(包含 110 个 Ge detector)完成后,将提高两个量级<sup>[10]</sup>.这台  $\gamma$  谱仪的造价为 1700 万美元.欧洲(法、英合作)正建造的 EUROGAM 超级晶体球  $\gamma$  谱仪,全期工程(包含 126 个 Ge detector)完成后,具有更高的探测效率和分辨本领<sup>[11]</sup>.同时,放射性核束加速器的发展和建造,可使科学家们研究远离稳定线直至滴线附近原子核的结构和性质.许多国家,其中包括我国的科学家,都在提出有关计划.美国橡树岭实验室的 RIB 放射性核束加速器,1995 年出束.1993 年 8 月作者在该实验室访问时,有幸被邀参观了整个工程,并了解了工程进展情况.该工程进展顺利,如果有关离子源的某些难

点能得到解决,RIB 加速器将按期建成和出束打靶.

总之,新一代超级晶体球  $\gamma$  谱仪和放射性核束加速器的发展和建造,以及并行超级计算机的应用,必将为极端条件下核结构研究提供可靠技术保证和开拓新的发展前景.

## 参 考 文 献

- 1 Duprat J, et al. Proceedings of Conference, Berkeley, 1994, 1: 42
- 2 Chen Y S. Proceedings of IV International Conference on Selected Topics in Nuclear Structure, Dubna, Russia, July 5~9, 1994
- 3 Lauritsen T, et al. Proceedings of Conference, Berkeley, 1994, 1: 36
- 4 Galindo-Uribarri A, et al. Phys. Rev. Lett., 1993, 71: 231
- 5 Lunardon M, et al. Proceedings of Conference, Berkeley 1994, 1: 24
- 6 Flibotte S, et al. Phys. Rev. Lett., 1993, 71: 4299
- 7 Hamamoto I, Mottelson B. Phys. Lett., 1994, B333: 294
- 8 Tanihata I, et al. Phys. Rev. Lett., 1985, 55: 2676
- 9 Oganessian Yu Ts, et al. J. of Phys., G: Nucl. Part. Phys., 1992, 18: 393
- 10 Lee I Y. Nucl. Phys., 1990, A520: 641c
- 11 Nolan P J. Nucl. Phys., 1990, A520: 657c

## Nuclear Structure in Exotic Conditions

Chen Yongshou

(China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413)

**Abstract** This paper reviews the new developments and new challenges for the nuclear structure studies. It points out that the developments of the nuclear structure today is characterized by the term "Nuclear Structure in Exotic Conditions", the main contents of which are the high spin physics and physics for the nuclei far from the stability line and up to drip lines. All these new developments are solidly ensured by the developments and the constructions of super  $\gamma$ -ray spectrometer arrays of a new generation and the radioactive beam accelerators.

**Key Words** nuclear structure, high spin states, nuclei far from stability.