

# 核结构的新挑战\*

陈永寿

(中国原子能科学研究院, 北京 102413)

(中国科学院理论物理研究所, 北京 100080)

**摘要** 评述了原子核结构研究的新进展和面临的新挑战, 讨论了原子核结构的发展方向、基本特点和新实验技术的保证. 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这两个方面. 而新一代的超级  $\gamma$  谱探测器系统和放射性核束加速器的发展和建造是新发展的技术保证.

**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 10 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能量、角动量和同位旋三个自由度的方向进行. 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, 代表性的科研计划有美国的 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, 代表性的科研计划有美国的 GAMMASPHERE 和欧洲的 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所谓非对称核物质的性质和结构, 代表性的科研计划有美国的 RIB, ISL 和欧洲的 ISOLDE, 我国的放射性核束物理计划有北京的 BRNBF 和兰州的 HIRFL-CSR.

当前原子核结构研究发展方向的基本特点, 可以用“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)、原子核具有异常的中子数同质子数比( $N/Z$ )值的状态、原子核处于高激发(高温)状态等. 当前原子核结构研究有两个基本发展方向: 一是原子

核高自旋态物理; 二是异常同位旋态物理或放射性核束物理. 近年来, 在这两个方面的研究都有重大进展. 本文第二节讨论高自旋态物理的新挑战, 第三节讨论奇异同位旋核物质物理的新挑战, 第四节讨论核理论的新挑战, 第五节讨论迎接新挑战和实现新发展的实验技术保证.

## 2 高自旋态物理的新挑战

高自旋态物理研究高速旋转核物质的性质和结构, 是核物理的前沿研究领域之一. 我们利用重离子加速器, 加速重核炮弹去轰击重核靶, 通过融合反应生成角动量高达  $80\hbar$  左右、内部激发能高达几十兆电子伏(MeV)的复合核. 复合核在退激过程中发射的  $\gamma$  射线携带着核的结构和性质的信息, 而通过测量这些  $\gamma$  射线的核谱学方法使我们可以研究比较传统核结构大大拓宽的原子核态范围. 图 1 是原子核的能量  $E$  作为角动量  $I$  的函数. 对应于一个角动量给定值的能量最低的态叫做转晕态(yrast). 一个转晕态对应着图中转晕线上的一个点, 任意一个内部激发能大于零的核态对应于转晕线以上区域的一个点. 传统核结构研究基态和基态附近的核态, 如图 1 中原点附近的点线以下的狭小

\* 1995 年 6 月 12 日收到初稿, 1995 年 7 月 5 日收到修改稿.

态区所示. 而高自旋态物理学研究转晕线到 10MeV 态线(内部激发能为 10MeV)之间的核态, 考虑核子和轻粒子发射后还可以研究 10MeV 线以上的核态. 近几年来, 高自旋态物理发展很快, 有许多新进展和新发现.

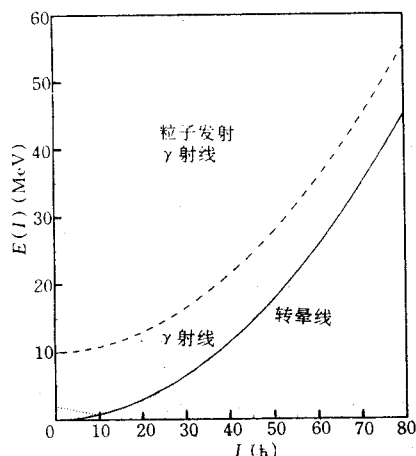


图1 原子核的能量  $E$  作为角动量  $I$  的函数  
[它图示所有核态, 转晕线(实线)以上有无数个核态, 以下则无一核态]

## 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, 即核物质以  $10^{20}$  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. 继发现第一个超形变核 $^{152}\text{Dy}$ 之后<sup>[1]</sup>, 迄今已发现了 40 多个超形变核, 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. 超形变核谱学是崭新的领域, 尚处于初始发展阶段.

## 2.2 超流态相变 - 核力场崩溃

类似超导体中的电子库珀对, 原子核中的核子在对力的作用下形成核子对, 从而核基态都是超流态. 当核转动的频率  $\omega$  达到某个临界值时, 核子对被强大的科里奥利(Coriolis)力拆

散, 对力场随之而崩溃, 原子核发生了从超流态到正常态的相变. 这是一个非常有趣的问题, 然而一直没有令人信服的实验证据. 最近, 我们建立的各向异性三维谐振子四极对力 HFB 理论(HOQHFB), 得出超形变核中对力场的“易碎性”(fragile)的结论<sup>[2]</sup>, 预示超形变核中对关联在  $\omega > 0.4\text{MeV}$  时开始崩溃. 图 2 是  $A = 190$ , 150 和 80 三个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. 由于一个没有对力体系的转动惯量等于它的刚体转动惯量  $J_r$ , 我们取  $J_r$  值为零点值, 即将不同核的  $J^{(2)} - J_r$  画在同一图中, 从而极好地展示了超形变核力场随转动频率的戏剧性变化. 对于  $A = 190$  区核, 实验超形变带的  $\omega \approx 0.1 - 0.4\text{MeV}$ , 对力仍起重要作用, 从而使  $J^{(2)}$  随  $\omega$  增加而持续上升; 对于  $A = 150$  核区, 实验超形变带的  $\omega \approx 0.5 - 0.7\text{MeV}$ , 对力场基本上崩溃, 从而使  $J^{(2)}$  随  $\omega$  增加而下降; 对于  $A = 80$  核区, 实验新发现的超形变带的  $\omega \approx 0.7 - 1.2\text{MeV}$ , 对力场完全崩溃, 核态已从超流态变成了正常态, 从而呈现  $J^{(2)}$  等于刚体常数值值的刚性转子特征. 我们认为,  $A = 80$  区超形变核的发现提供了研究正常态核物质的新机遇.

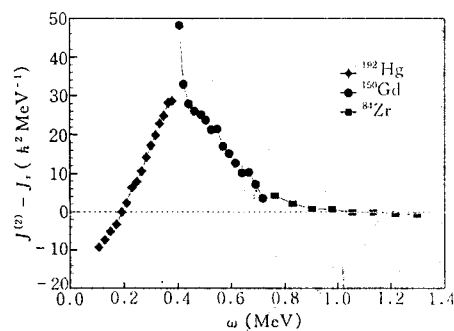


图2 不同核区典型超形变核的实验值动力学转动惯量  $J^{(2)}$  随转动频率  $\omega$  的变化  
(取刚体转动惯量  $J_r$  值为零点)

## 2.3 巨超形变核的发现

最近, 核物理学家发现了巨超形变核(hyperdeformation)的实验证据. A. Galindo 等

1) C. Baktash and H. Q. Jin, private communication.

的实验发现,在 $^{153}\text{Dy}$ 的一个转动带的 $\gamma$ 跃迁中,相继的二条 $\gamma$ 射线的能量之差,  $\Delta E_\gamma = E_{\gamma_1} - E_{\gamma_2} = 30\text{keV}$ <sup>[3]</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, 用同一个核反应肯定了  $\Delta E_\gamma = 30\text{keV}$  的结果, 但测定出是 $^{152}\text{Dy}$ 的退激 $\gamma$ 射线, 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. 然而, 巨超形变核的第一个确切的证据是 $^{147}\text{Gd}$ 核的巨超形变带的最新发现<sup>[4]</sup>.

## 2.4 keV 能量核物理学

继实验发现超形变全同带, 即不同核的两条超形变带的所有十几条跃迁 $\gamma$ 射线的能量, 在精确到 1—2keV 的范围内一一对应相等<sup>[5]</sup>. 最近, 核物理学家又发现了原子核的一个新的对称性, 即  $C_4$  对称性, 这是又一例 keV 能量核物理现象. 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(四方形). 这种空间点群  $C_4$  对称性, 是近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 $^{149}\text{Gd}$ 核的超形变转晕带的动力学转动惯量  $J^{(2)}$  随转动频率  $\omega$  的变化呈现出奇异的  $\Delta I = 2$  “摇摆”(staggering)<sup>[6]</sup> (见图 3). 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

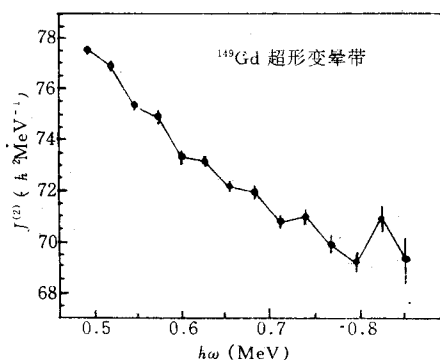


图 3  $^{149}\text{Gd}$  的 SD 晕带动力学转动惯量  $J^{(2)}$  随转动频率  $\omega$  的变化 ( $\Delta I = 2$  “摇摆”行为暗示了  $C_4$  对称性)

性的两个量子态, 其能量之差(能级劈裂)只有  $\sim 1\text{keV}$ . 全同带和  $C_4$  对称性都是重要的发现, 其物理内涵仍是个谜.

## 3 非对称(异常同位旋)核物质物理的新挑战

新型放射性核束加速器在生产远离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. 这使核结构研究从传统的稳定线附近扩展到直至滴线的原子核(见图 4), 它不仅是核范围的极大扩展, 更重要的是其新的物理内容. 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, 例如中子晕核和最近的  $N = Z = 50$  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.

### 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, 而对于  $N = Z$  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, 20, 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, 幻数赋予原子核的特别稳定性.  $N = Z \geq 50$  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相对地更稳定的核呢? 这是一个非常有趣的问题. 1994 年, GSI 的核科学家们在  $1\text{A} \cdot \text{GeV}$  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 $^{100}\text{Sn}$ <sup>[7]</sup>.  $^{100}\text{Sn}$  的寿命尚未直接被测量到, 估计值为 s 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, 对它的某些性质, 例如关于基态和第一激发态的性质等作进一步的研究是非常有趣的.

### 3.2 滴线核

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,

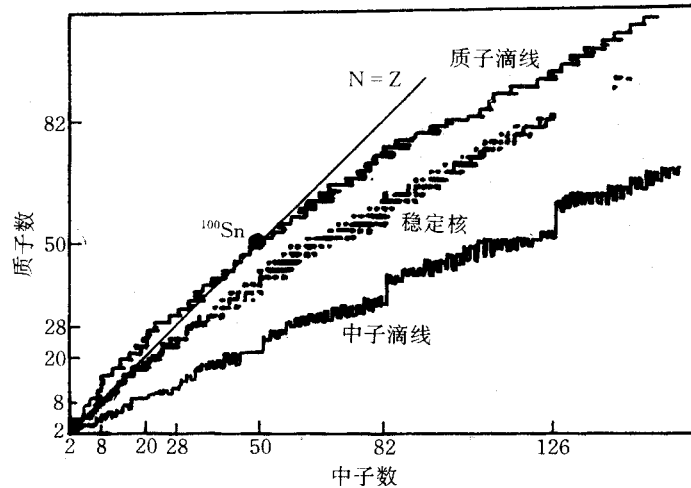


图4 核素图

(对角线附近的黑色方块示意稳定核, 左边和右边的实线分别示意质子滴线和中子滴线, 滴线以外的核不存在)

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学术进展。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  $320\text{keV}^{[8]}$ 。在中子滴线附近, 还可能存在着中子皮(neutron skin)原子核, 其核外有较厚的中子物质弥散层, 是又一种有趣的核存在形式。

质子滴线和滴线附近原子核是非常丰质子核。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。但考虑到质子库仑位垒的作用, 是否存在质子晕核呢? 这个问题是有争议的, 最终应由实验来回答。

壳结构是原子核的基本结构。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, 因此滴线附近核的新的壳结构是非常有趣的新问题。此外, 中子滴线附近核的  $\beta$  衰变以及质子滴线附近核的单质子发射和双质子发射现象等, 都是有其重要意义的问题。

### 3.3 远离稳定线核

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形变态核区、新的集体运动核区和新的有效相互作用核区, 是十分有趣的研究领域。

### 3.4 高角动量同质异能态核

特殊激发态的研究是一种非常规条件下的核结构研究。高角动量同质异能核(high spin isomer)  $^{178m2}\text{Hf}$  的研究就是一个很好的例子<sup>[9]</sup>。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  $T_{1/2} = 31$  年。由于它的寿命很长, 使科学家们能够利用俄罗斯杜布纳(Dubna)联合核子研究所的高通量回旋加速器、高纯化学和高效同位素分离实验技术, 每年生产和分离出  $10^{15}$  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。目前, 有俄、德、法等 6 个国家的 15 个研究所, 共 80 多位科学家合作进行这项研究。这种研究核现象的新方式是值得重视的。科学家们正设想在放射性核束加速器上产生高角动量同质异能态核束来进行新的实验。实际上, 我们还可以设想进行束和靶都是高角动量同质异能核的实验。

## 4 核理论的新挑战

在高自旋态和奇异同位旋核物理方面的许多新发现已使核理论面临新的挑战 and 困难. 例如, 我们还没有能够精确到可以处理 keV 能量核物理现象, 如全同带和  $C_4$  对称性等的核理论.

现有的核理论模型以及有效相互作用, 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.

我们面临的问题, 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围, 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.

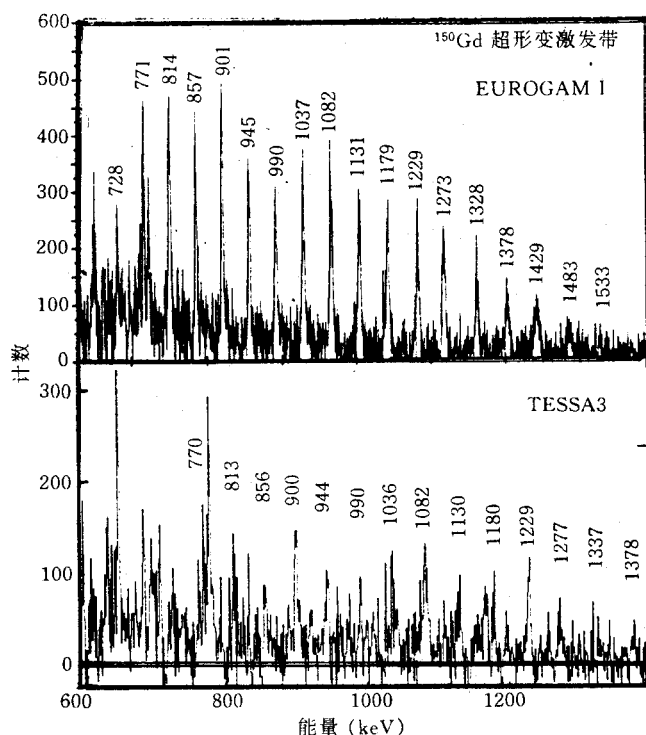


图5  $\gamma$  探测谱仪 TASSA3 和 EUROGAM I 观测核谱水平的比较  
(观测谱为 $^{150}\text{Gd}$ 的第一激发超形变转动带  $\gamma$  谱)

## 5 迎接新挑战和实现新发展的技术保证

估计在未来的 10 年中, 以高自旋态和远离稳定线直至滴线核为主要内容的极端条件下核结构研究将有许多新成果和重大突破. 除开它本身的丰富物理内容和在核物理发展中, 以及与其他物理学, 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重要地位外, 我们做出这一估计的另一方面的根据是新实验技术和新设备的发展和建造, 以及超级并行计算机的应用.

新一代的超级  $\gamma$  谱探测器系统(超级晶体球)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. 例如美国正在建造的名称为 GAMMASPHERE 的超级晶体球  $\gamma$  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>.欧洲正在建造的名称为EUROGAM的超级晶体球 $\gamma$ 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>.实践证明,建造与加速器配套的高水平的探测器系统的工作十分重要.从图5可见,探测器的分辨本领提高一个量级(从TASSA3到EUROGAM I)给核谱测量水平带来的革命.从只能测量几条最强的 $\gamma$ 射线,确定自旋高达10h的核态的碘化钠探测器,到可以测量几十条最弱的 $\gamma$ 射线,将观测自旋推进到60h,发现了超形变核的晶体球 $\gamma$ 谱仪,其分辨本领提高了4—5个量级.

同时,放射性核束加速器的发展和建造,使科学家们可以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,都在提出有关放射性核束加速器及物理的发展计划.美国橡树岭实验室的名称为RIB的放射性核束加速器,计划1995年出束.

总之,新一代的超级晶体球 $\gamma$ 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的技术保证和开拓新的发展前景.

### 参 考 文 献

- [ 1 ] P. J. Twin, B. M. Nyako, A. H. Nelson et al., *Phys. Rev. Lett.*, **57**(1986), 811.
- [ 2 ] Y. S. Chen, in Proceedings of IV International Conference on selected topics in nuclear structure, Dubna, Russia, July 5—9, 1994.
- [ 3 ] A. Galindo - Uribarri, H. R. Andrews, G. C. Ball et al., *Phys. Rev. Lett.*, **71**(1993), 231.
- [ 4 ] D. R. Lafosse et al., *Phys. Rev. Lett.*, **74**(1995), 5186.
- [ 5 ] T. Byrsk, F. A. Beck, D. Curien et al., *Phys. Rev. Lett.*, **64**(1990), 1650
- [ 6 ] S. Flibotte, H. R. Andrews, G. C. Ball et al., *Phys. Rev. Lett.*, **71**(1993), 4299.
- [ 7 ] R. Schneider, J. Friese, J. Reinhold et al., in Proceedings of Conference on Physics From Large Gamma - Ray Detector Arrays, LBL, Berkeley, August 2—6, 1994, Vol. 1, 189.
- [ 8 ] I. Tanihata, H. Hamagaki, O. Hashimoto et al., *Phys. Rev. Lett.*, **55**(1985), 2676.
- [ 9 ] Yu. Ts. Oganessian, S. A. Karamian, Y. P. Gangrski et al., *J. of Phys. G*, **18**(1992), 393.
- [ 10 ] I. Y. Lee, *Nucl. Phys.*, **A520**(1990), 641c.
- [ 11 ] P. J. Nolan, *Nucl. Phys.*, **A520**(1990), 657c.