

原子核高角动量激发*

许甫荣¹⁾

(北京大学物理学院重离子物理教育部重点实验室 北京 100871)
(中国科学院兰州重离子加速器国家实验室原子核理论中心 兰州 730000)
(中国科学院理论物理研究所 北京 100080)

摘要 用推转壳模型计算研究了原子核的高速转动运动及其结构特性.讨论了 $A \sim 50$ 区核的转动特性; $A \sim 80$ 区 ($N = Z$) 核的形状共存问题; $A \sim 110$ 区丰中子核的扁椭球形变的稳定性. 基于壳模型理论, 我们用限制组态绝热堵塞方法计算讨论了 $A \sim 130, 180$ 和超重核区的高角动量同核异能态, 系统预言了高角动量多准粒子态的存在, 并指出这些核态可以有较长的寿命, 这对于不稳定核的研究是很有帮助的. 计算解释了不少典型的实验观测, 一些理论预言已经被最近的实验证实.

关键词 推转壳模型 高角动量 同核异能态 原子核形状 多准粒子激发

1 引言

到目前为止, 了解原子核结构性质的最有效的实验方法是测量激发原子核的电磁跃迁. 而高速转动原子核的电磁退激跃迁更是提供了大量详细的核结构知识. 由于GAMMASPHERE和EUROBALL的建成, 原子核的实验高自旋研究得到了空前的发展, 发现了一些新集体转动现象, 如超形变转动带^[1]. 最近, 实验在高自旋新运动模式方面又有新的发现, 如手征带^[2,3], 磁转动^[4,5], 摇摆转动带^[6]. 这些为原子核结构研究提供了直接的实验信息, 同时也为目前的理论模型提出了挑战和机遇. 集体转动带的旋称劈裂和旋称反转现象^[7-12]反映了原子核的精细内部结构和核子相互作用. 目前用于研究原子核集体转动运动的微观理论模型主要有推转壳模型、投影壳模型、粒子转子模型、相互作用玻色子模型^[13,14]. 这些模型在不同程度上都能有效地描写核的集体转动运动.

随着放射性核束物理的发展, 人们的眼光越来越多地转向远离 β 稳定线核(又称奇特核)的 γ 谱学研究. 目前人们对奇特核的结构性质了解得还很不够, 而这些核对于天体物理的研究又是至关重要的^[15]. 尽管实验技术上的困难, 最近的实验还是成功地观测到质子滴线核 ^{140}Dy 的集体转动带和isomeric态^[16,17], 为

这个滴线核的形状特性提供了直接的实验证据. 原子核形状是一个基本物理量, 更高阶形变已经有很好的物理依据, 如八极形变^[18,19], 三轴超形变^[20], 四面体形变^[21]. 形状共存为人们揭示了核形状的多面性, 同一个核可以同时有不同的形状, 如实验观测到缺中子核 ^{186}Pb 有球形、扁椭、长椭形状共存态^[22], 在 $A \approx 80$ 区 $Z \approx N$ 核普遍存在扁椭、长椭形状共存态^[23]. 在超重核区理论也发现有形状共存态存在^[24, 25]. 这些共存态的能量相差一般不大, 使得实验可以同时观测到这些态.

在高角动量激发态中, 非集体激发的准粒子拆对激发态是又一类重要的核态, 通常称为角动量同核异能态(K isomer)或多准粒子高 K 态(K 是角动量在对称轴上的投影). 如果组成高 K 态的高 J_z 轨道非常靠近核费米面, 这样的高 K 态可以是yrast态, 从而可以有很长的寿命, 如 ^{178}Hf 核有一个寿命为31年的 $K^\pi = 16^+$ 高 K 态^[26]. 高 K 态正在得到愈来愈多的关注, 人们已经预知它的巨大的应用前景^[27], 如新能源贮存, 伽马激光, 新型武器等. 高 K 态对于核结构和核性质研究也是非常重要的, 特别是对于不稳定核, 由于基态寿命一般很短, 长寿命高 K 态能为实验提供理想的研究载体. 我们最近的研究显示: 高 K 态在超重核区可能扮演很重要的角色, 对超重核的实验研究可

* 国家自然科学基金(10175002,10475002), 教育部博士点基金(20030001088)和国家重大基础研究发展计划(973 G2000077400)资助
1) E-mail: frxu@pku.edu.cn

能起很重要的作用^[28].

在这篇文章中, 我们综述近几年我们在高自旋集体运动和多准粒子高 K 激发态等方面的理论工作.

2 高自旋集体转动运动

推转壳模型是研究原子核集体转动运动的最有效的理论模型之一. 它可以明确地确定原子核的形状, 计算集体转动能谱及其跃迁, 指定原子核的组态, 分析核子顺排现象, 以及核性质随角动量的变化特性等. 我们以形变 Woods-Saxon 势为基础^[29], 用 Total Routhian Surface (TRS) 方法^[30] 研究原子核的集体转动运动. 计算在三维形变空间 $(\beta_2, \gamma, \beta_4)$ 进行. 为了能更好地考虑粒子数涨落影响, 我们采用粒子数近似守恒的 Lipkin-Nogami 对关联处理方法^[30]. 在对关联处理中, 同时考虑单极和四极对力. 四极对力包含了对力的长程关联, 可以更好地描述对力的关联作用^[9]. 在原子核转动情况下, 核子同时受到 Coriolis 力和剩余对相互作用, 我们在平均场中自洽地求解复杂的 Hartree-Fock-Bogoliubov 方程, 从而得到 TRS 及相关的物理量.

2.1 $A \sim 60-80$ 区核的集体转动带

这个质量区的原子核具有重要的意义, 可以说是核天体 rp 过程中最重要的核区之一, 天体合成过程的重要元素 Fe 就处在这个质量区. 这个质量区核对于核结构研究也是非常重要的, 缺中子 $N \approx Z$ 核是研究中子-质子(np)相互作用的最好载体. 由于这些核的核子处于 fp 壳层, 所有可以存在丰富的 prolate 和 oblate 形状共存现象. 而在 $N(Z) = 40$ 壳层上面的 $1g_{9/2}$ 侵入轨道可以导致很规则的形变集体转动带. 最近的实验观测到 $^{55,56,59}\text{Cr}$ 有非常丰富的能谱^[31,32], 反映出不同的结构特性. 我们用推转壳模型系统计算了 Cr, Mn 同位素核的 TRS 和结构性质, 发现这些核的形状和能谱性质往往是组态相关的. 比如: ^{55}Cr 核的奇中子占据负宇称 ($\pi = -$) 轨道时, 这个核有非常软的弱形变 ($\beta_2 \approx 0.17$), 能谱表现出明显的振动影响; 而奇中子占据正宇称 ($\pi = +$) 时, 这个核的形状变得较硬较大 ($\beta_2 \approx 0.24$), 能谱具有很规则的集体转动特性, 计算结构与实验很好符合^[31].

最近人们对 $A \approx 80$ $N \approx Z$ 核比较感兴趣, 他们有比较丰富的能谱结构, 已经有不少实验结果, 如参考文献[23,33,34]. 同时, 这个区也被认为是研究 np 相互作用的较佳对象^[35]. 我们的计算显示: 这些核具有非常丰富的形状共存态, 如: $^{72}\text{Kr}_{36}$ 核有较大的 oblate 形

变 ($\beta_2 \approx 0.33$) 及建立在这个形状上的 oblate 转动带; 同时这个核有一个共存的 prolate 形状 ($\beta_2 \approx 0.4$) 及对应的集体转动带. 这些丰富的形状共存态对于实验和理论核结构研究都是非常有意义的, 我们的进一步研究正在进行中.

2.2 $A \sim 110$ 核的扁椭球转动

形变核一般具有长椭球形状, 扁椭球形状相对不多见, 在缺中子 Hg 和 Pb 区, 实验和理论发现了扁椭球形状, 但稳定的晕态扁椭球形状是很少见的. 从壳层结构看, 当核子 Fermi 面处于子壳上部时, 由于 high- j low- k 扁椭球轨道有较强的 Coriolis 力, 所以转动运动有可能带来原子核的扁椭球形变. 实验发现丰中子 $A \approx 110$ 核有非常低的 γ 振动能^[36], 这表明这些核有非常软的 γ 形变. 我们系统调查了 $A \sim 110$ Zr, Mo, Ru, Pd 丰中子同位素核的结构, 当增加中子数接近核天体的 r -process path 时, 这些核可以有很稳定的扁椭球转动晕带^[37]. 这些核的中子 Fermi 面在 $N \approx 70-76$ 之间, 处在 $1h_{11/2}$ 子壳上部, 这个子壳下半部的轨道有较强的扁椭球驱动力, 当这个子壳的轨道足够多地被填充时, 可以产生扁椭球形变, 转动运动进一步有利于扁椭球的稳定^[37].

2.3 双半壳核的集体转动运动

标准壳模型给出 2, 8, 20, 28, 50, 82 和中子数 126 为原子核幻数, 这对于理解核结构具有重要的意义. 随着放射性核束的发展, 人们正在注意奇特核区的幻数或者壳关闭问题. 在壳关闭问题上, 另外值得注意的特殊核是双半壳核, 这些核为数相当少, 在 sd 壳层上面, 只有 $^{28}\text{Si}_{14}$, $^{38}\text{Si}_{14}$, $^{48}\text{Cr}_{24}$ 和 $^{170}\text{Dy}_{66}$ 4 个双半壳核. 对于集体转动运动, 重核比较理想, 所以我们首先

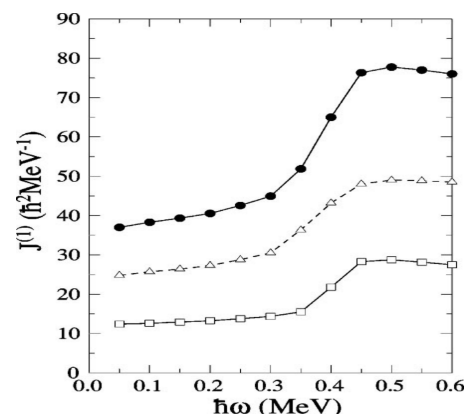


图 1 推转壳模型计算的 ^{170}Dy 核的运动学转动惯量在 $h\omega \approx 0.35$ MeV 处, 中子和质子同时发生转动顺排.

计算了 $^{170}\text{Dy}_{66}$ 双半壳核的集体转动运动. 目前, 实验上已知的 Dy 同位素到 ^{169}Dy 为止, $^{170}\text{Dy}_{66}$ 在实验上应该可以产生. 作为理论预言, 用推转壳模型计算了 $^{170}\text{Dy}_{66}$ 集体转动带. 计算给出: 这个核有非常硬的长椭球形状 ($\beta_2 \approx 0.29$)^[38]. 更有趣的是: 中子和质子在转动频率 0.35 MeV 附件同时发生角动量转动顺排现象 (见图 1), 这导致这个核有非常大的角动量转动顺排 (2 中子 + 2 质子顺排). 当然, 这种“同时”顺排现象在别的原子核中也可以看到, 但在同一个确切频率下同时发生顺排可能是非常少见的. 我们期望以后的实验能观测到 $^{170}\text{Dy}_{66}$ 巨顺排现象.

3 高角动量多准粒子同核异能态

在基态情况下, 由于核子间的对力相互作用, 偶偶核中的核子是成对占据壳层轨道的, 基态的自旋和宇称为 0^+ . 但成对的核子可以被拆对激发, 其中一个核子占据更高的能级, 从而可以形成准粒子激发态, 有多对粒子被拆对激发时, 可以产生多准粒子激发态. 如果准粒子占据高角动量 (实际应为对称轴上的投影角动量) 轨道, 则产生多准粒子激发态可以有很高的角动量, 通常称为高角动量多准粒子激发态或简称高 K 态 (high K). 根据电磁跃迁选择定则, 轴对称核从高 K 态到低 K 态的 $E2(M1)$ 跃迁是禁闭的, 所以高 K 态可以有很长的寿命, 有些情况下可以比对应的基态还长, 称为高 K 同核异能态 (high- k isomer), 比如: ^{178}Hf 核有一个激发能为 2.4 MeV $K^\pi = 16^+$ 同核异能态 (2 准中子 + 2 准质子激发), 它的寿命长达 31 年, 再如: ^{180}Ta 有一个寿命为 10^{15} 年的同核异能态 (比地球诞生年龄还长). 这些 isomers 在能源, 天体演变和核物理本身都具有极其重要的意义, 人们已经预言它在未来能源方面的巨大前景^[39]. 在核结构方面, 这种原子核激发形成又一类高自旋态, 在核结构研究中起到重要的作用, 特别是对于不稳定核, 由于寿命一般较短, 很难进行深入的实验研究, 而长寿命高 K 态可以提供深入的实验研究载体.

在高 K 态计算中, 一个重要的问题是要实现组态限制的绝热位能面计算, 我们在 Woods-Saxon 势下, 首次实现了这样的计算^[40]. 绝热计算可以包含准粒子激发对核形状的极化影响, 给出高 K 态的形状及对称性行为, 从而可以定量计算激发能和分析衰变特性. 我们主要系统计算了 $A \sim 130, 180$ 和超重核区的高 K 激发态, 分析了这些高 K 态的结构和衰变特性, 给出了有意义的理论预言.

3.1 $A \sim 130$ 和 180 区 $K^\pi = 8^-$ 同核异能态

$A \sim 130$ 和 180 是形成高 K 态较为理想的核区, 因为这些核的中子和质子费米面附件存在较多的高 J_z 轨道, 有利于形成高 K 态. 实验已经系统观测到 $N = 74, 106$ 或 $Z = 72$ 偶偶核的二准粒子 $K^\pi = 8^-$ 态, 寿命从纳秒到小时不等. 对于 $N = 74$ 或 $Z = 72$, 这个 8^- 态的组态是 $7/2^+[404] \otimes 9/2^-[514]$; 对于 $N = 106$, 组态为 $9/2^+[624] \otimes 7/2^-[514]$. 我们系统地计算了 $A \sim 130$ 和 180 核区的 8^- 态^[41], 得到的结果很好地与现有实验符合, 并发现对于靠近满壳附件的软形变核, 二准粒子的形状极化是非常明显的, 如 $^{126}\text{Te}_{52}$ 核的基态基本上是弱形变扁椭球形变, 但二准粒子极化这个原子核成为长椭球形变. 理论预言了质子滴线核 ^{140}Dy 存在 8^- 同核异能态, 激发能为 2150 keV^[41], 这被后来的二个实验证实, 实验能量为 2165 keV, 寿命为 $7 \mu\text{s}$ ^[16,17]. 在 $A \sim 180$ 区, 预言了 ^{188}Pb 有一个激发能为 2400 keV 的 8^- 态, 也已经被实验证实, 实验激发能和寿命分别为 2575 keV 和 $1.2 \mu\text{s}$ ^[42]. 我们的计算还显示在 ^{188}Pb 附近还存在扁椭球高 K 态^[43]. 原则上, 高 K 态可以在整个核素图区存在, 他们对能源, 核天体和核物理的影响正在越来越得到重视.

3.2 超重核区的高 K 态及其影响

超重核合成中一个重要问题是如何增加超重核合成产额和超重核的稳定性. 通过融合反应生成的复合核放射 1—4 个中子后, 仍有较高的激发能, 具有较高的角动量. 如果高角动量以集体转动形式出现, 则很容易发生自发裂变, 达不到超重核的基态, 只有极少数也许通过 γ 跃迁退激到达基态. 我们通过系统计算, 发现高 K 态在超重核区系统存在^[28], 而且由于高 K 态是准粒子非集体激发, K 的量子化条件可以大大增加裂

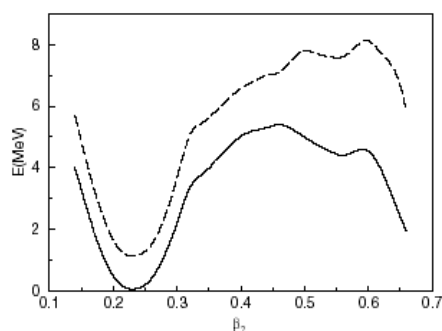


图 2 计算的 ^{256}Fm 能量随形变参数 β_2 的变化. 实线和虚线分别代表基态和 $\pi 7/2[633] \otimes 7/2[514]$ $K^\pi = 7^-$ 同核异能态的位能曲线.

变位垒的高度和宽度(如图 2), 从而使得合成后的超重核不容易发生自发裂变. 由于费米面处的核子对被拆对激发, 母核内 α 粒子的形成几率大大减少, 从而减弱了超重核的 α 衰变. 所以, 高 K 态的形成有利于超重核的合成和稳定性的增加.

4 总结

我们在 Woods-Saxon 势下, 用推转壳模型研究了原子核高速集体转动运动. 在 $A \sim 60-80$ 区, 计算显示了多样的集体转动谱和形状共存现象, 包括长椭圆形状、扁椭圆形状及其它们的集体转动带.

在 $A \approx 110$ 区, 计算表明: 非常丰中子核可以有扁椭圆形变, 并且随着转动频率增加扁椭圆形变变得更稳定, 可以成为晕带. 双半壳核具有特殊的壳层位置, 计算发现双半壳核 ($^{166}\text{Dy}_{66}$) 的集体转动带具有中子和质子同时发生转动顺排现象. 系统研究了 $A \sim 130$ 和 180 区的多准粒子高 K 同核异能态, 预言了一些不稳定核的高 K 同核异能态, 对于不稳定核, 这些高 K 同核异能态具有特别的意义, 一般比它们对应的基态更稳定, 寿命更长. 计算分析了超重核的高 K 同核异能态及其对超重核合成和性质的影响, 结果表明高 K 激发可以增加超重核的合成几率和增加超重核的生存寿命, 对于超重核的实验研究是很有意义的.

参考文献(References)

- 1 Twin P J. Nature, 1995, **376**: 550
- 2 Frauendorf S, MENG J. Nucl. Phys., 1997, **A617**: 131
- 3 Starosta K et al. Phys. Rev. Lett., 2001, **86**: 971
- 4 Frauendorf S, MENG J. Z. Phys., 1996, **A357**: 263
- 5 Lakshmi S et al. Phys. Rev., 2004, **C69**: 014319
- 6 Odegard S et al. Phys. Rev. Lett., 2001, **86**: 5866
- 7 Bengtsson R et al. Nucl. Phys., 1984, **A415**: 189
- 8 LIU Y Z et al. Phys. Rev., 1995, **C52**: 2514
- 9 XU F R, Satula W, Wyss R. Nucl. Phys., 2000, **A669**: 119
- 10 ZHANG Y H et al. Euro. Phys. J., 2002, **A13**: 429
- 11 ZHOU X H et al. Euro. Phys. J., 2002, **A15**: 285
- 12 ZHENG R R et al. Phys. Rev., 2001, **C64**: 014313
- 13 LONG G L. Phys. Rev., 1997, **C55**: 3163
- 14 LIU Y X et al. Phys. Rev., 1997, **C56**: 1370
- 15 XU S W et al. Phys. Rev., 1999, **C60**: 061302
- 16 Cullen D M et al. Phys. Lett., 2002, **B529**: 42
- 17 Krolas W et al. Phys. Rev., 2002, **C65**: 031303(R)
- 18 CHEN Y S, GAO Z C. Phys. Rev., 2001, **C63**: 014314
- 19 ZHU S J et al. Phys. Lett., 1995, **B357**: 273
- 20 YANG C X et al. Euro. Phys. J., 1998, **A1**: 125
- 21 Schunk N et al. Phys. Rev., 2004, **C69**: 061305(R)
- 22 Andreyev A N et al. Nature, 2000, **405**: 430
- 23 Fischer S M et al. Phys. Rev. Lett., 2001, **87**: 132501
- 24 REN Zhong-Zhou. Phys. Rev., 2002, **C65**: 051304(R)
- 25 REN Zhong-Zhou, Toki H. Nucl. Phys., 2001, **A689**: 691
- 26 Mullins S M et al. Phys. Lett., 1997, **B393**: 279
- 27 Walker P M, Dracoulis G D. Nature (London), 1999, **399**: 35
- 28 XU F R et al. Phys. Rev. Lett., 2004, **92**: 252501
- 29 Nazarewicz W et al. Nucl. Phys., 1985, **A435**: 397
- 30 Satula W, Wyss R, Magierski P. Nucl. Phys., 1994, **A578**: 45
- 31 Appelbe D E et al. Phys. Rev., 2003, **C67**: 034309
- 32 Freeman S J et al. Phys. Rev., 2004, **C69**: 064301
- 33 Fischer S M et al. Phys. Rev. Lett., 2000, **84**: 4064
- 34 Chandler C et al. Phys. Rev., 2000, **C61**: 044309
- 35 Satula W, Wyss R. Phys. Rev. Lett., 2001, **86**: 4488; **87**: 052504
- 36 Shannon J A et al. Phys. Lett., 1994, **B336**: 136
- 37 XU F R, Walker P M, Wyss R. Phys. Rev., 2002, **C65**: 021303(R)
- 38 Regan P H et al. Phys. Rev., 2002, **C65**: 037302
- 39 Walker P, Dracoulis G. Nature, 1999, **399**: 35
- 40 XU F R, Walker P M, Sheikh J A et al. Phys. Lett., 1998, **B435**: 257
- 41 XU F R, Walker P M, Wyss R. Phys. Rev., 1999, **C59**: 731
- 42 Dracoulis G D et al. Phys. Rev., 1999, **C60**: 014303
- 43 XU F R. Chin. Phys. Lett., 2001, **18**: 750

High-Spin Excitations of Atomic Nuclei*

XU Fu-Rong¹⁾

(MOE Key Laboratory, School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

(Center of Theoretical Nuclear Physics, National Laboratory of Heavy Ion Physics, Lanzhou 730000, China)

(Institute of Theoretical Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract We used the cranking shell model to investigate the high-spin motions and structures of atomic nuclei. We focus the collective rotations of the $A \sim 50$, 80 and 110 nuclei. The $A \sim 50$ calculations show complicated g spectroscopy, which can have significant vibration effects. The $A \approx 80$ $N \approx Z$ nuclei show rich shape coexistences with prolate and oblate rotational bands. The $A \approx 110$ nuclei near the r -process path can have well-deformed oblate shapes that become yrast and more stable with increasing rotational frequency. As another important investigation, we used the configuration-constrained adiabatic method to calculate the multi-quasiparticle high- K states in the $A \sim 130$, 180 and superheavy regions. The calculations show significant shape polarizations due to quasi-particle excitations for soft nuclei, which should be considered in the investigations of high- K states. We predicted some important high- K isomers, e.g., the 8^- isomers in the unstable nuclei of ^{140}Dy and ^{188}Pb , which have been confirmed in experiments. In superheavy nuclei, our calculations show systematic existence of high- K states. The high- K excitations can increase the productions of synthesis and the survival probabilities of superheavy nuclei.

Key words cranking shell model, high spin, high- K isomer, shape coexistence, multi-quasiparticle excitation

* Supported by National Natural Science Foundations of China (10175002,10475002), Doctoral Foundation of Chinese Ministry of Education (20030001088) and Chinese Major State Basic Research Development Program (G2000077400)

1) E-mail: frxu@pku.edu.cn