

原子核集体运动的新模式(续)

曾月新

(天津师范大学物理系)

李磊 宁平治

(南开大学物理系)

在《原子核集体运动的新模式》(参见本刊1999年第2期)一文中,我们已对原子核的集体振动作了介绍,本文主要介绍原子核的集体转动.

一、原子核转动的基本概念

实验上很早就发现远离幻数原子核的低激发能谱与双原子分子的转动能谱有相似的特点,即自旋和宇称依次是 $0^+, 2^+, 4^+, 6^+, \dots$

\dots ,能级能量满足 $E_J = \frac{\hbar^2}{2J} I(I+1)$ 规律,原子

核转动自由度受到关注,并开始了原子核转动的研究.研究双原子分子转动,人们总是将双原子的连线作为双原子分子体系自然的对称轴,与此类比,研究原子核的转动通常假定转动核具有对称轴.

Z 个质子和 N 个中子构成的具有对称轴的原子核,当核电荷 Ze 均匀分布于核内,在对称轴方向所产生的电势可近似看作单电荷和四极子产生的电势之和.由于单电荷电势表示总电荷集中于核中心时产生的电势,这样四极子电势实际暗示了电荷的分布即原子核的形状.实验结果显示,除幻数核的四极子电势为零,表明幻数核是球形核外,绝大多数原子核的四极子电势或大于零呈长椭球形核,或小于零呈扁椭球形核,这种偏离球形的原子核称为形变核.球形核的核势场是球对称的,没有特定的方向;形变核的核势场是非球对称的且具有一定的方向.当原子核势场取向在空间发生了变化,我们就说原子核进行了转动.这就是说球形核无转动可言,只有形变核绕垂直于对称轴的轴转动才有意义.形变核没有转动时,核子是在一个静核势场中运动,形变核有转动时,核子便在一个变化的核势

场中运动.通常形变核作为一个整体的转动速度远小于核子在核内的运动速度.

研究原子核转动时,可选定一个体坐标系使其与原子核一起转动,而把核子在核内各自轨道上独立的运动看作是在体坐标系中的内部运动,转动坐标系是一个非惯性系,在其中运动的核子将受到科里奥利力和离心力的作用,核子所受到的科里奥利力和离心力的大小与核的转动速度有关,即核子的运动要受到转动(包括振动)的影响,反过来核子的运动特别是满壳外核子的运动对核心(满壳层)又会产生极化作用,引起核形变进而又影响原子核的转动.严格地讲,转动与核子的独立运动是不能完全分开的,但是为了使研究简化,往往首先研究平衡态某方向核场中的单粒子运动并用变形场中壳模型波函数来描述,然后再考虑原子核的转动用转动波函数来描述.这种近似地将单粒子运动和集体运动分开的作法叫“绝热近似”.但在高激发态时,“绝热近似”条件变差,需要考虑转动与核子独立运动相互干扰的因素.形变核也可同时具有转动和振动,当转动频率远小于振动频率时也可以把

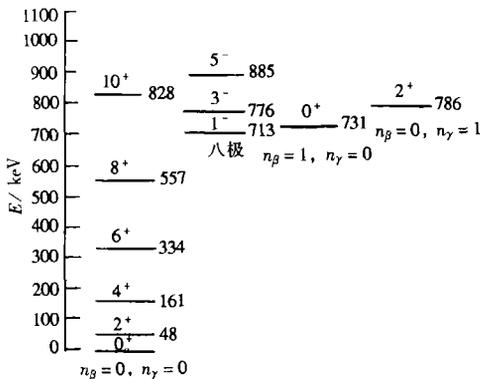


图1 $^{232}_{92}\text{U}$ 的能谱

转动和振动近似分开,在这种情况下可以观测到在振动态上的转动带. 已经观测到 $^{232}_{92}\text{U}$ 的能谱中除基带外还有 β 振动带、 γ 振动带和八极振动

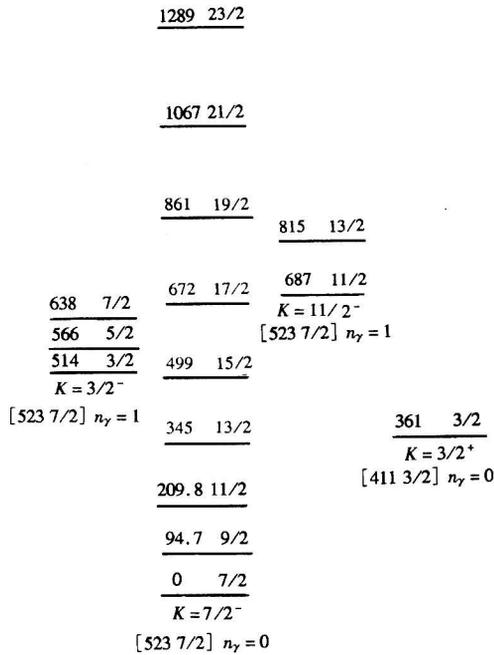


图2 $^{165}_{67}\text{Ho}$ 的能谱

带,其中负宇称能级是能量为713keV的八极振动态上的转动能级(图1). 而 $^{165}_{67}\text{Ho}$ 的能谱中出现两个 γ 振动带(图2),建立在这两个振动态上的是 $K = \frac{7}{2} \pm 2$ 的转动带(K 是总角动量在核对称轴上投影的量子数).

二、超形变态下原子核转动带的特点

原子核转动形态是在形变核中显现出来的,超形变核的发现带给了我们对于原子核转动的新认识.

1986年,实验上发现第一个高自旋超形变核 ^{152}Dy . 10多年来,已在 $A=80, 130, 150, 190$ 的核区观测到50多个超形变核的120多条超形变转动带. 图3给出的是已观测到和预期观测到的原子核的各种超形变. 超形变原子核长短轴之比可达2:1或3:1(正常形变核典型长短轴比为1.3:1). 超形变核一般是通过重离子融合反应生成的复合核,入射重离子带来很高的角动量,使得超形变原子核都处于高速转动状

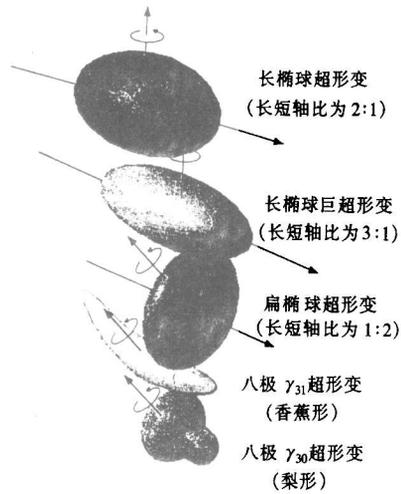


图3 已观测到和预期观测到的各种超形变态

态,角动量高达 $60\hbar$ 左右,即以 10^{20}Hz 的角频率转动着. 下面看一看超形变态下原子核转动带有些什么特点?

一个形变核的能谱可能存在多组转动带, γ 跃迁可在同一转动带之间进行,也可在不同转动带之间进行. 同一转动带各能级有相同的宇称,且 K 是常数. 例如,奇 A 核 ^{169}Yb 的能级有

$K = \frac{7}{2}^+$, $K = \frac{1}{2}^-$, $K = \frac{5}{2}^-$ 三个转动带,最低能级的自旋分别是 $\frac{7}{2}$, $\frac{1}{2}$, $\frac{5}{2}$, 各较高能级的自旋

依次为 $K+1$, $K+2, \dots$, 同一转动带间的 γ 跃迁以 $K=0$ 带的基态 0^+ 到第一激发态 2^+ 的跃迁为例,其约化跃迁几率 $B(E2, 0^+ \rightarrow 2^+) =$

$$\frac{5}{16\pi} e^2 Q_0^2 = \left(\frac{3ZeR_0^2}{4\pi} \right)^2 \beta^2 (Q_0 \text{ 为体坐标系中的电四极矩, } \beta \text{ 为形变参量})$$

由单粒子模型计算出 $0^+ \rightarrow 2^+$ 的 $E2$ 跃迁的约化几率是 $B_{sp}(E2, 0^+ \rightarrow 2^+) = \frac{9}{20} R^4 e^2$,对稀土族原子核的实验结果显示出

B 比 B_{sp} 大出100—200倍,这一方面表明原子核的转动是核子的集体运动,另一方面也表明 $E2$ 的约化跃迁几率在研究转动中是非常重要的,由它可方便地推出 Q_0 ,进而分析核形变的大小. 不同转动带的 γ 跃迁情况比较复杂,不仅要考虑角动量和宇称守恒选择定则,而且要考虑并不是严格成立的 K 选择定则. 一个超形变核

也可以存在多条超形变转动带, 例如, ^{194}Tl , ^{192}Tl , 和 ^{193}Hg 各有 6 条超形变转动带, ^{149}Gd 有 8 条超形变转动带. 但目前由于超形变带布居的强度很小与正常形变核相比测量超形变核的 Q_0 还有较大的难度, 从目前观测到的超形变态的 γ 跃迁谱, 比如 ^{152}Dy 其 $Q_0 = 17.5\text{eb}$ 这相当于 $\beta \approx 0.6$, 已达到长短轴之比为 2:1 的超形变核. 研究超形变转动带基态和高激发态的结构和性质导致发现超形变态下原子核转动带新的特点.

在理论方面, 研究高度形变、高速转动的量子力学多核子系统已取得长足进展. 例如, 用平均场理论研究核子对关联和对关联的崩溃对超形变核的影响. 又如, 用无规位相近似方法把转动惯量作为转动频率的函数, 对 ^{190}Hg , ^{192}Hg 和 ^{194}Hg 超形变带转动惯量的研究, 给出了 $K = 0, 1, 2, 3$ 的转动与八极形变共存的超形变态(图 4).

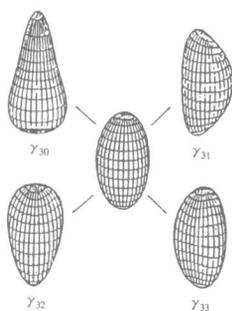


图4 $K=0, 1, 2, 3$ 的转动与八极形变共存的超形变态

在实验方面, 通过实验发现超形变核转动带有两个奇特的现象, 一是突然退激现象, 即超形变态向正常形变态跃迁的 γ 谱表现出突然退激的特点. 例如, 超形变核 ^{152}Dy 的 γ 跃迁强度大约在 $I = 50\hbar$ 处达到饱和(为基态跃迁强度的 1% 左右), 然后保持不变的跃迁强度, 直到自旋下降到 $I \approx 26\hbar$ 时, γ 跃迁强度突然消失. 实验分析显示 $A = 150$ 核区的超形变带 γ 跃迁强度在 $I \approx 24\hbar$ 时突然消失, $A = 190$ 核区的超形变带跃迁强度在 $I \approx 10\hbar$ 突然消失. 目前科学家正在探索超形变态与正常形变态之间这种奇特

的跃迁机制.

二是“全同带”现象. 90 年代以来, 实验上发现某些相邻原子核的超形变转动带惊人相似, 称为全同带现象. 并且发现某些相邻核正常形变带之间也存在全同带现象. 超形变核转动带表现出的全同带特性比正常形变核转动带表现出的全同带特性蕴含了更加丰富的内涵, 全同带主要指两条转动带的动力学转动惯量相同或者全同带内 γ 跃迁能量相同. 正常形变核的全同带以转动惯量相同为特点, 而超形变核的全同带是能量相同的全同带. 如果比较 ^{151}Tb 和 ^{152}Dy 转动带中 10 条能量在 1000keV 左右的 γ 射线, 会发现在 1—2keV 误差范围内, γ 射线的能量竟一一对应相等, 这实在令人吃惊. 超形变核中全同带发生频率非常高, 由 $J^{(2)} = 4/\Delta E$, ($J^{(2)}$ 是动力学转动惯量, ΔE 为相继两个 γ 跃迁能量之差) 可以看出, 动力学转动惯量相同只要求能量之差相同, 并不要求能量相同, 超形变核全同带内 γ 跃迁能量相同并不意味着动力学, 转动惯量相同而且还应该提供有关原子核转动的其它信息. 目前科学家正在积极探索全同带的实质以获取更多原子核性质的信息.

三、原子核高自旋态的新现象

原子核的高自旋态角动量可高达 $65-70\hbar$. 实验上陆续发现了一些新现象, 首先是回弯现象. 回弯现象是指在原子核的转动惯量 J 随转动频率平方 ω^2 变化的关系曲线上, ω 的某一临界值附近, J 极剧上升, ω 反而变小, 使曲线呈 S

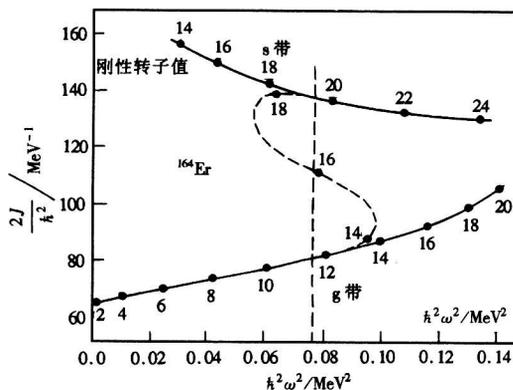


图5 原子核 ^{164}Er 转动惯量 J 与转动频率 ω 关系曲线的回弯现象

形. 图 5 是 ^{164}Er 的 $\left(\frac{2J}{\hbar^2}\right)_i - (\hbar\omega)_i^2$ 关系曲线, 曲线上各点对应的值是角动量 I 的值, 可以看到在 $I \leq 10$ 时, 转动惯量随 ω^2 线性增加, 当 $I > 12$ 时, J 极剧上升并出现回弯(虚线). 回弯现象的原因是高自旋态下原子核转动过程中的形状相变和集体运动到单粒子运动的相变的结果.

原子核处于低自旋态时, 所有的核子处于配对状态, 当原子核自旋很高即转动角速度很大时, 核子受到很强的科里奥利力的作用, 并足以克服对力, 导致高 j 低 Q (Q 是核子角动量 j 在对称轴上的投影) 能级上的一对核子拆对, 角动量沿集体转动方向顺排, 图 5 中的 g 带是 ^{164}Er 的基带, s 带是一对 $i_{13/2}$ 中子拆对顺排之后的两个准中子带, 也称为超带. g 带与 s 带在“回弯”处明显交叉. 其次是二次回弯与带终结现象. 实验上不仅观测到了一对 $i_{13/2}$ 能级中子拆对, 两中子角动量沿集体转动方向顺排的第一“回弯”, 也观测到了一对 $h_{11/2}$ 能级质子拆对顺排的第二“回弯”, 同时还观测到原子核在高速转动中的形状相变、集体运动到单粒子运动的相变. 例如, ^{158}Er 转晕跃迁 γ 谱显示出, 随着集体转动速度的加快, 在 $12^+ - 16^+$ 能态范围一对 $i_{13/2}$ 中子拆对顺排, 在 $26^+ - 30^+$ 能态范围一对 $h_{11/2}$ 质子拆对顺排形成四准粒子转动带. 由于拆对顺排的核子对核心的极化作用, 在 $38^+ - 46^+$ 能态范围核从长椭球形转变为扁椭球形, 其表现是 γ 能谱的不规则振荡, 本来绕垂直于对称轴的轴的转动转变为绕对称轴的转动. 这时 ^{158}Er 可看成是以 ^{146}Gd 为核实的 4 个价质子和 8 个价中子组成的. 最后一个能态 46^+ 的 $46\hbar$ 的角动量全部由转动顺排的 12 个价核子提供的, 所以尽管 ^{158}Er 还有很高的角动量, 但已经没有集体运动了, 也就是说到 46^+ 态转动带结束了, 这个现象称为带终结. 它标志 ^{158}Er 完成了从长椭到扁椭的形状相变, 也完成了从集体运动到单粒子运动的相变.

高自旋态的集体转动会使处于高 j 轨道的核子拆对顺排, 这是核内核子对集体运动“响应”的具体表现, 实际上质子和中子对集体

运动“响应”是有区别的, 这种区别表现为转动核 g 因子的上升和下降. 理论计算预言 g 因子随转动频率 ω 的变化有三种情况, 一是 g 因子随 ω 增加而逐渐增加, 二是 g 因子随 ω 增加而突然下降, 三是 g 因子随 ω 增加具有峰值结构. 前两种情况已在实验中观测到, 观测第三种情况是高自旋态研究领域中的又一重要课题, 因为 g 因子的变化与转动核的磁矩变化密切相关, 这种研究可从集体运动与单粒子运动的相互影响中提取有关原子核性质的未知信息.

四、小 结

不断发现的原子核集体运动的新模式, 正在不断丰富我们对原子核内部结构和运动状态的认识, 今天我们已经可以从多“侧面”来认识原子核这个尺度为 10^{-13} 厘米的量子体系了. 比如, 由原子核振动呼吸模式推出的呼吸模式能量与原子核压缩系数关系式, 使得过去无法测量的压缩系数得到解决, 这是原子核集体运动为研究原子核性质开辟新途径的一个例子. 高自旋和极端形变条件下集体运动的研究使我们进一步认识了集体运动中原子核形状的演化, 了解了形变对集体运动的影响、了解了核子与核子的相互作用以及集体运动和单粒子运动的相互关联、相互转化, 并从中获取了有关核结构和核力新知识.

迄今在实验和理论两方面原子核集体运动新模式的研究已取得重大进展, 研究原子核集体运动的宏观模型和微观理论虽然不断改进, 但仍有许多问题尚未得到解决, 而且随着研究的深入新的问题又不断出现, 比如自旋振动中的强度问题、核振动阻尼问题、超形变态退激到正常形变态的机制、超形变带全同带的实质等等都有待解决; 与此同时原子核晕结构的软巨偶极共振模式、高自旋态上的热核巨共振模式、转晕陷阱态以及寻找巨超形变核的研究工作都在积极进行中. 这些问题的解决将使我们对原子核集体运动有更深入的了解.