

极端条件下原子核性质的研究

胡济民 郑春开 钟云霄 许甫荣 安宇* 白新华

(北京大学技术物理系, 北京大学重离子物理研究所 北京 100871)

摘要 近几年来,北京大学重离子物理研究所低能核物理理论课题组,对极端条件下原子核性质研究取得了一些成果,其中包括原子核的高自旋态、超形变带及远离 β 稳定线核的性质.

关键词 高自旋态 超形变态 远离 β 稳定线核

1 引言

当前核物理发展面临新的机遇和挑战,尤其是在极端条件下(高自旋态、超形变态和远离 β 稳定线核)原子核的结构及其性质的研究,已成为当今核结构研究的最重要前沿课题之一.随着国际上近期在建的几台放射性核束加速器的建成并投入运行,已建成或即将建成的巨型超级 γ 谱仪的启用,都将为极端条件下核结构研究提供重要的实验手段和开拓新的发展前景.因此,极端条件下的核结构研究已成为各国核物理学界追逐的热点,也是我们当前重要的研究方向.

近年来,该小组在这一热门课题上开展了许多研究工作,并取得了一些重要成果.

2 高自旋态及超形变带研究

2.1 推转玻尔-莫特逊哈密顿量^[1]

正常变形核转动谱是核结构研究中最具吸引力和最富有成效的研究领域之一.为此,已从实验和理论两方面作了大量研究,并取得了成功,但已有的理论方法和模型还不完善.因此,建立一种新的描写原子核集体运动的模型是需要的,希望这种模型能具有较好的动力学基础,并能得到较简单的适用于较高自旋的转动谱公式.为此,从推转壳模型出发,在转动参考系中,应用绝热近似和微扰的方法,可以得到轴对称四极形变时推转玻尔-莫特逊哈密顿量

$$H = -\frac{\hbar^2}{2B_0} \frac{\partial^2}{\partial a_0^2} - \frac{\hbar^2}{4B_2} \frac{\partial^2}{\partial a_2^2} - \frac{1}{2} B_1 (3a_0^2 + 2a_2^2) \omega^2 + E(a_0, a_2) \quad (1)$$

式中, a_0, a_2 为四极形变参数, $E(a_0, a_2)$ 为静态核能, B_0, B_1, B_2 为核的质量参数.

在实验室系中,体系的能量 E 和平均角动量 $\langle J \rangle$, 可由转动系中的 H 和本征能量 E' 计算得到.

$$E = E' - \omega \frac{\partial E'}{\partial \omega} \quad (2)$$

$$\langle J \rangle = \sqrt{I(I+1) - K^2} = \frac{1}{\hbar} \frac{\partial E'}{\partial \omega} \quad (3)$$

2.2 原子核的正常转动带^[1,2]

对于轴对称的变形核,可以假定

$$E(a_0, a_2) = E_0 + \frac{1}{2} C_0 (a_0 - \bar{a}_0)^2 + \frac{1}{2} C_2 a_2^2 \quad (4)$$

利用(1)式的哈密顿量 H' , 求解它的本征方程,可以得到转动系中的能量 E' , 再由(2)和(3)式,很容易得到实验室系中的集体运动能量 E 和平均角动量 $\langle J \rangle$, 最后结果为

$$E = (n_\beta + \frac{1}{2}) \hbar \omega_\beta (1 - \frac{3B_1 \omega^2}{B_0 \omega_\beta^2})^{-1/2} + (n_\gamma + \frac{1}{2}) \hbar \omega_\gamma (1 - \frac{B_1 \omega^2}{B_2 \omega_\gamma^2})^{-1/2} \quad (5)$$

$$\langle J \rangle = \sqrt{I(I+1) - K^2} = (n_\beta + \frac{1}{2}) \cdot \frac{3B_1 \omega}{B_0 \omega_\beta} (1 - \frac{3B_1 \omega^2}{B_0 \omega_\beta^2})^{-1/2} + (n_\gamma + \frac{1}{2})$$

* 清华大学现代物理系

$$\begin{aligned} & \cdot \frac{B_1 \omega}{B_2 \omega_\gamma} \left(1 - \frac{B_1 \omega^2}{B_2 \omega_\gamma^2}\right)^{-1/2} + \frac{1}{\hbar} 3B_1 \bar{a}_0^2 \omega \\ & \cdot \left(1 - \frac{3B_1 \omega^2}{B_0 \omega_\beta^2}\right)^{-2} \end{aligned} \quad (6)$$

式中, $\omega_\beta = \sqrt{C_0/B_0}$, $\omega_\gamma = \sqrt{C_2/2B_2}$, \bar{a}_0 是核的基态形变参数. 这就是由推转玻尔-莫特逊哈密顿量导得的振动与转动模型的能谱和角动量公式. 在(5)式中各项的物理意义是很明确的, 第一、二项分别为 β 和 γ 振动能量, 其中包含了转动(ω)对振动的影响; 第三项为转动能, 其中也包含了振动(ω_β)对转动的耦合. 公式中所含的参量都是与核结构的微观信息相联系的. 有理由假定 $B_2 = B_0$, 而且 $\hbar\omega_\beta$ 、 $\hbar\omega_\gamma$ 取实验值, 这样(5)、(6)式中只含 $A = 3B_1 \bar{a}_0^2$ 和 $B = 3B_1/B_0 \omega_\beta^2$ 两个可调参数. 应用这些公式分析偶偶变形核正常转动带时, 只需要对基带的最低的三条能级作最小二乘法拟合, 就可确定 A 、 B 两个参数, 然后整个基带能量以及 β 、 γ 振动带都可以由所确定的参量及有关公式计算得到.

应用这一模型, 分析了所有稀土区和铜系区的正常变形偶偶核的基带和 β 、 γ 激发带, 所得结果是令人满意的, 直到很高的自旋(发生回弯以前)都能很好地重现转动能谱, 而且计算的自旋也与实验的相一致.

这一模型还可以应用于分析奇 A 核的正常转动带^[2]. 由于它要满足绝热近似条件, 所以它只适用于规则的或部分规则的转动谱. 总共分析了满足这个条件的 280 个奇 A 核的转动谱, 结果也是十分满意的, 能谱计算的偏差都小于 1%.

2.3 全同带^[2]

全同带的存在是个相当普遍的现象, 而且也是核结构研究中十分感兴趣的问题. 两个带之间的全同性是建立在相应的 γ 跃迁能量的比较上, 要在上百个转动带中比较和挑选哪些带具有全同性, 是一件很麻烦的工作. 但是在此模型中, 有一种简便的挑选办法, 只需要比较两个带之间的参数 A 和 B 就可以确定. 因为, 对于全同带这两个参数值的差

别应该很小(尤其是 A 的值). 因此, 通过比较两个带之间的参数 A 和 B 的值, 就可方便地建立全同带的关系. 根据这一方法, 在正常转动带中判明了 153 个全同带. 不仅两个带之间建立了全同带, 而且存在两个带以上、最多的有 9 个带连结成的全同带群. 由此可见, 正常转动带全同带是一种普遍的现象.

2.4 超形变带研究^[3,4]

已经知道, 超形变(SD)态是个好转子, 因此上面的模型完全可以适用于超形变带的研究. 有关的公式只需作适当的修改, 就可以用来计算 SD 带能谱和自旋. 我们应用这一模型分析了 $A \sim 190$ 和 150 区的 SD 带, 得到了如下满意的结果: (1) 模型能很好地拟合能谱, 其偏差远小于 1%; (2) 绝大多数情况, 模型计算得到的能级自旋与整数(偶偶核)或半整数(奇 A 核)的偏离小于 0.2; (3) 自旋值的确定与拟合时所用的跃迁能量数目无关; (4) 用宏观-微观模型计算静态势 $U(a_0)$, 所得的 Routhian 势 $V(a_0, \omega) = U(a_0) - 3/2 B_1 a_0^2 \omega^2$ 在某一确定值处有一明显的谷, 而且此值与实验观测的四极形变是相符的.

由此可见, 振动-转动模型对 SD 带的分析是成功的. 今后将进一步对模型的参量进行微观分析.

3 远离 β 稳定线核性质研究

目前远离 β 稳定线核性质研究引起人们广泛的兴趣. 因为它大大开拓了核结构研究的领域, 而且在实验上已发现了一些轻的丰中子核的一些奇异性质. 已往的核结构理论都是建立在人们对 β 稳定线附近的核素的经验基础上的. 因此要把已有的理论外推到很远, 直到滴线附近的核, 将面临严重考验.

3.1 原子核的宏观模型^[5-7]

为了能广泛地研究远离 β 稳定线核的性质, 提出具有更好微观基础的宏观模型. 这个模型是把原子核看成质子密度和中子密度分布的连续介质, 并假定原子核的能量是质子

密度和中子密度的泛函,通过变分取极小,可以得到原子核基态的质子密度和中子密度分布、核能量及与密度分布有关的平均性质.

应用这个模型计算的结合能、电荷半径等与扩展的 Thomas-Fermi 相互作用计算的结果相比较,能很好地符合,表明这个模型有较好的微观基础^[7].

根据核基态各有关性质的实验数据确定的一组参数,可以满意地重现核基态性质.因此这个模型对核基态性质的研究是成功的.

把这一模型推广应用于研究远离 β 稳定线核的性质,也取得了初步成果.它给出了滴线、Sn 同位素、Zr 同位素结合能、电荷半径、中子皮厚度等,并与其它方法计算结果相比,也相一致,而且在结合能方面更为精确.当然,这一模型是否成功,还应随实验的不断发展,经受检验并加以改进.

3.2 轻的丰中子核 PNC 和 HF 计算

在远离 β 稳定线的区域,首先最有兴趣研究的是轻核,因为这个区域的平均场比较弱,核的剩余作用的效应是最突出的,核的对相互作用是相当重要的.由于核子数少,中子又丰富,因此中子对相互作用有明显贡献,通常处理对相互作用的 BCS 方法由于粒子数不守恒,会引起较大的误差,因此,采用了

Skyrme 势进行 HF 计算,同时用粒子数守恒方法(PNC)考虑对相互作用,初步结果表明:(1)对于大多数轻的丰中子核, HF+PNC 的计算结果好于用 S \square 势的 HF 计算结果,而且能较好地再现质量奇偶差.这说明在这些核中中子对相互作用明显存在,而且 PNC 方法能较好地描写它;(2)中子间的对相互作用对滴线附近的核的稳定性有明显影响.计算结果 ^{11}Be 有单中子晕, ^{11}Li 和 ^{14}Be 有双中子晕,这是与实验相符的.

总之,极端条件下原子核性质研究是十分吸引人的.理论和实验研究还处于初期阶段,许多问题还需要进行长期、深入的研究.

参 考 文 献

- 1 Hu Jimin, Xu Furong. Phys. Rev., 1993, C48:227
- 2 Hu Jimin, Xu Furong. Phys. Rev., 1995, C51:2504
- 3 Xu Furong, Hu Jimin. Phys. Rev., 1994, C49:1449
- 4 Xu Furong, Hu Jimin. Phys. Rev., 1995, C52:431
- 5 Hu Jimin, Zheng Chunkai. Chinese Physics, 1986, 6:105
- 6 胡济民,郑春开. 原子核物理, 1985, 7:1
- 7 Hu Jimin, An Yu. High Energy Physics and Nuclear Physics, 1992, 16:339.

Studies of Nuclear Properties in Exotic Conditions

Hu Jimin Zheng Chunkai Zhong Yunxiao Xu Furong An Yu Bai Xinhua

(Institute of Heavy Ion Physics, Department of Technical Physics, Peking University, Beijing 100871)

Abstract The recent results on the studies of nuclear properties in exotic conditions are briefly presented. These studies include high spin states and nuclei far from the β -stability line.

Key Words high spin state superdeformed state far from β -stability line