

F 旋多重态及其研究

赵玉民 顾金南

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

摘要 本文介绍和评述了在中子质子相互作用玻色子模型框架内对 F 旋多重态的研究,对 F 多重态予以详细分类,简要介绍了已有的结果,并说明了可能存在的新机制.

关键词 F 旋, IBM, 全对称态, 好量子数.

自从 T. Otsuka 等人^[1]在 IBM-2 框架内定义 F 旋以后, F 旋多重态的研究一直断断续续地进行. 不区分质子和中子的 IBM-1 的巨大成功使人们相信, F 旋对低位态是个好量子数. 而混合对称态的发现^[2,3],使 F 旋的意义立刻被提升到一个相当重要的位置^[4]. 因为混合态是 F 旋激发态,因此 F 旋及 F 旋多重态马上变得很有意思.

1 F 旋和 F 旋多重态

在 IBM-2 中, F 旋的定义有点象同位旋. 对质子玻色子, $F = 1/2, F_0 = 1/2$; 中子玻色子的 $F = 1/2, F_0 = -1/2$. 这样 F 旋群结构为 SU(2). 3 个生成元为:

$$\hat{F}_+ = d_+^\dagger \tilde{d}_+ + S_+^\dagger S_+,$$

$$\hat{F}_- = d_+^\dagger \tilde{d}_- + S_+^\dagger S_-,$$

$$\hat{F}_0 = \frac{1}{2}(d_+^\dagger \tilde{d}_+ + S_+^\dagger S_+ - d_+^\dagger \tilde{d}_- - S_+^\dagger S_-).$$

可以证明, $\hat{F}^2 = \hat{F}_+ \hat{F}_- + \hat{F}_0^2 - \hat{F}_0$. 把 \hat{F}^2 作用到基态 $|S_+^N S_-^N\rangle$ 上, 得到该状态的 $F = \frac{1}{2}(N_+ + N_-)$. 而有 n_d 个 d 玻色子的状态可以由 $(d_+^\dagger S_+ + d_+^\dagger S_-)^{n_d}$ 作用到基态上得到. 只要 $(d_+^\dagger S_+ + d_+^\dagger S_-)^{n_d}$ 与 F_\pm, F_0 对易, 该状态就是全对称态.

考察下面的 IBM-2 哈密顿量^[5]:

$$\hat{H} = \epsilon_d \hat{n}_d + K \hat{Q}_\pi \cdot \hat{Q}_\nu + \hat{V}_\pi + \hat{V}_\nu + \hat{M}_\nu, \dots (1)$$

对于全对称态有 $[\hat{H}, \hat{F}_0] = 0, [\hat{H}, \hat{F}_\pm] = 0$. 由 F 旋不变性立刻可以导出 F 旋多重态有相同的 F 值和不同的 F_0 值. 所以 F 旋多重态的核的 N_+ 个质子玻色子和 N_- 个中子玻色子的性质是确定的(粒子或空穴), 并且 $N = N_+ + N_-$ 为一个常数. 与同位旋多重态不同的是, F 旋多重态的数目一般少于 $(2F + 1)$

F 旋不变性是个很强的条件, 现在考虑一个稍弱的条件: $[\hat{H}, \hat{F}^2] = 0$, 即只要求 $\langle F^2 \rangle$ 为一好量子数. 在实际计算中, 我们可看到, $\langle F^2 \rangle$ 为一个严格的好量子数的限制仍是很难达到的. 所以一般考虑更弱的条件, 即要求 $\langle F^2 \rangle$ 为近似好量子数, 此时允许 \hat{H} 中包含矢量部分和张量部分^[4]. 典型的 IBM-2 计算结果都满足此条件. 在 \hat{H} 中有一个值很大的项 \hat{M}_ν , 它把不同 F 旋的能级拉开, $F = \frac{1}{2}(N_+ + N_-)$ 的全对称态能级最低, F 值越小, 激发能越高, 这一项称为 Majorana 项. 这时的 F 旋多重态中, 状态激发能是 F_0 的函数, 这与同位旋多重态类似.

2 F 旋多重态的理论研究

1985 年, A. Frank 等人^[6]仿照 Wigner 对

超多重态的描写方法,把 $U_v(6) \otimes U_\pi(6)$ 加到 $U(12)$ 中去,即把生成元 $b_\nu^\dagger b_\nu$ 和 $b_\pi^\dagger b_\pi$ 放到一起,记作 $C_{\rho m}^{\rho' l' m'} = b_{\rho m} b_{\rho' l' m'}$,其中 $\rho(\rho') = \pi, \nu$; $l(l') = 0, 2; m(m') = \pm 2, \pm 1, 0$. 这时就不再有 N_π 和 N_ν ,只包含 $N = N_\pi + N_\nu$. 此后不久, J. Jolie 和 P. Von Isacker 等人^[7]通过构造 $U(12/20)$ 群链把奇偶核和 π, ν 自由度同时考虑:

$$\begin{aligned} U(12/20) &\supset U_v(6/20) \otimes U_\pi(6/20) \\ &\supset U_v^B(6) \otimes U_\pi^B(6) \otimes U^F(20) \\ &\supset U_\pi^B(6) \otimes U_v^F(4) \otimes U^F(5) \\ &\supset O_\pi^B(6) \otimes U_v^F(4) \otimes U^F(5) \\ &\supset \text{Spin}_{\pi\nu}^{B+F}(6) \otimes U^F(5) \\ &\supset \text{Spin}_{\pi\nu}^{B+F}(5) \otimes O^F(5) \\ &\supset \text{Spin}_{\pi\nu}^{B+F}(5) \\ &\supset \text{Spin}_{\pi\nu}^{B+F}(3) \end{aligned}$$

由此,可写出哈密顿量的 Casimir 算子表示式以及对应的本征值,用来讨论 F 旋多重态.

在以上基础上,人们用数值计算的方法对 F 旋多重态进行了大量研究. 对有些核反复进行了多次运算. 其中 $A \sim 130$ 区域的核研究得最多.

F 旋多重态,也可以由 IBM-1 和 IBM-2 之间的相互关系予以简单解释^[4]. 把 IBM-2 算符投影到 IBM-1 中,可以得到两者参数之间的关系. 在 $F \approx F_{\max}$ 的全对称近似下, IBM-2 的哈密顿量及其投影后的哈密顿量基本一致, IBM-1 的哈密顿量是通过 $N_\pi \cdot N_\nu / [N(N-1)]$ 依赖于 F_0 的. 因此,如果 $N_\pi \cdot N_\nu$ 的值很大,且变化不大, F 旋多重态中不同核的由 IBM-2 向 IBM-1 投影前后的哈密顿量就相差无几,投影后的哈密顿量基本上不依赖于 F_0 . 由此导致 F 旋多重态中能级的相似性及电磁跃迁的某些相似性.

3 F 旋多重态的分类

F 旋多重态按照玻色子类型分,有以下几种类型:

3.1 粒子—粒子型

这种 F 旋多重态的核的质子玻色子和中子玻色子对应于费米子空间中的质子对和中子对,其质量数不变,相邻核电荷数差 2,即 $(A, Z), (A, Z+2), (A, Z+4) \dots$.

3.2 粒子—空穴型

在这种情况下, F 旋多重态的核序列中每一个核的质子玻色子和中子玻色子,总是其一为粒子玻色子,另外一个为空穴玻色子,其相邻之间差一粒子,即有荷质关系 $(A, Z), (A+4, Z+2), (A+8, Z+4)$.

3.3 空穴—空穴型

这种情况与 3.1 中的粒子—粒子型有相同的荷质序列关系,不同之处在于中子玻色子和质子玻色子均是费米子空间中的空穴对投影而来.

3.4 组态混合型

有些核的激发态中,既有振动谱,又有转动谱,前者是该核低位态的固有能谱,后者可解释为玻色子跨壳激发. 在 IBM-2 框架内对此描写的方法是在原有的 \hat{H} 中加入 \hat{H}_{mix} ^[8]. 有趣的是,对跨壳激发后的形状共存带来说,一些本来 $\langle F^2 \rangle$ 不是好量子数的核序列有可能是 F 旋多重态^[9]. 理由也很简单,例如 ^{180}Hg 的 $N_\pi = 1$ (空穴), $N_\nu = 9$, 质子玻色子跨壳激发后 $N_\pi = 1+2=3$, 则 $N_\pi \cdot N_\nu$ 由 9 变为 27, 与 ^{176}Pt 比较可知, (它的基态带的 $N_\pi \cdot N_\nu = 16$, 一质子玻色子跨壳激发后 $N_\pi \cdot N_\nu$ 变为 32) 两者形状共存带满足 $N = N_\pi + N_\nu = 12$, 且 $N_\pi \cdot N_\nu$ 相差较小的要求. 需指出的是,这种由玻色子跨壳激发导致的 F 旋多重态与以上三种均不一样. 被跨壳激发的那种玻色子既有粒子玻色子,也有空穴玻色子.

3.5 饱和型

最近研究发现,除了子壳附近的核应当引入有效玻色子数外,在 $SU(3)$ 极限下玻色子数增加到某一值之后不再增加,出现饱和性. 在稀土区和铜系区这个现象很明显. 有效玻色子数的存在也导致 F 旋多重态. 不过这种情况比较复杂,没有确切的核序列的质量

数和电荷关系.

4 F 旋多重态的研究及应用

F 旋多重态最直接的研究方法是比较能谱. 在 A 比较接近的区域寻找一组核, 比较其能谱及电磁跃迁性质, 在 IBM-2 框架内给出其 $N_x \cdot N_z$ 值, 若 $N_x + N_z$ 相等, $N_x \cdot N_z$ 相差较小, 能谱和 $B(E2)$ 等值均很相近, 则可能是 F 旋多重态. 通常情况可以对这一组核数值计算说明之. 也有人继续用群论作工具研究 F 旋多重态的对称性质.

F 旋多重态研究的实际应用之一是可以用它鉴别出不属于玻色子空间的入侵带. 比如通过分析 F 旋多重态, 给出 ^{186}Pt 在 0.9MeV 和 0.65MeV 附近的 2^+ 态, 就是这种入侵态^[4]. 其另一重要应用是可以用它对尚

未发现的核素的性质, 如基态形变、内禀电四极矩、激发态能量、电四极矩跃迁几率等, 予以较准确的估计.

总而言之, F 旋多重态的研究, 为原子核结构知识的系统化提供了一个新的研究角度, 其机制的研究及其应用有着广阔的前景, 已成为目前核结构研究的热点之一.

参 考 文 献

- 1 Otsuka T, et al. Phys. Lett., 1978, 76B: 139
- 2 Bohle D, et al. Phys. Lett., 1984, 137B: 27
- 3 Meyer R A, et al. Phys. Rev., 1990, C41: 2386
- 4 Harter H, et al. Phys. Rev., 1985, C32: 631
- 5 Kortelahti M O. Phys. Rev., 1990, C42: 1267
- 6 Frank A, et al. Phys. Rev., 1985, C32: 1770
- 7 Jolie J, et al. Phys. Rev. Lett., 1985, 55: 1457
- 8 Duval D, et al. Nucl. Phys., 1982, A376: 213
- 9 Barrett B R, et al. Phys. Rev., 1991, C43, R926

F — spin Multiplets and Its Study

Zhao Yumin Gu Jinnan

(Institute of Modern Physics, Academia Sinica, Lanzhou 730000)

Abstract The study of F -spin multiplets within the neutron — proton interacting boson model is reviewed, the mechanism of F -spin multiplets is classified in detail. Furthermore, the results we have gotten are presented, and the new probable mechanism is reported here.

Key Words F -spin, IBM, full-symmetry state, good quantum number.

(上接第 34 页)

In this paper a review on applications of PAC to surfaces problems including very recent results in Ni single crystal surface and ultrathin Ni films is discussed.

Key Words perturbed angular correlation, surface physics, microscopic diffusion, Ni single crystal, ultrathin Ni film, magnetic hyperfine field.