

原子核转动的新机制——磁转动

李 磊 宁平治

(南开大学物理系 天津 300071)

1997年,美国《物理评论快报》第78和79期上连续发表两篇实验论文,证实原子核的转动和转动能带存在一种全新的机制。以前熟悉的转动带都是原子核大形变或超形变的结果,它们都与大的电四极矩和强的电四极跃迁相联系。1993年,理论预言,对于形变很小甚至接近球形的原子核也可以存在转动带。初期实验很快就在 $A = 190 \sim 200$ 质量区发现了这种转动带,它具有以下很不寻常的性质:

(1) 能谱很有规律,类似于大形变核的高 K 带,仍符合 $J(J+1)$ 规律。

(2) 带内能级间跃迁属于 $J = 1$ 的磁偶极跃迁,并且磁偶极约化跃迁几率 $B(M1)$ 非常大,它随能级自旋值的增加而减小。

(3) 带内能级间电四极跃迁非常小或为零(表明形变很小)。

为什么形变很小的核却拥有大形变核才有的规则转动谱?这与以前熟悉的核转动概念是抵触的。为了理解这种现象,近年来已开展了不少理论研究和实验研究工作。一般认为,这种转动带是由所谓“磁转动”机制决定的。磁转动是为区别以前熟悉的形变核(非球形的电荷分布)集体转动形成的正常转动带(可称为电转动)而引入的新概念,它是指磁偶极矩在转动,而不是通常的电四极矩转动。

原子核的电转动

原子核是一个多核子系统,既有单个核子的独立运动,又有多个核子的集体运动。按照量子力学,球形核无所谓“集体运动”(转动并未改变核状态),形变核的转动才有意义。同样,对于轴对称形变核的转动,只有绕垂直于对称轴(z 轴)的 x 轴或 y 轴的转动才有意义。对于轴对称椭圆形变,可用形变参数描述,它与椭圆长轴 a 和短轴 b 的关系为

$$a = R_0 \left(1 + \frac{2}{3} \right), \quad b = R_0 \left(1 - \frac{2}{3} \right)^{1/2}$$

此处 R_0 为同体积球半径。形变越大(越扁),均匀带电椭球的电四极矩 Q_0 也越大:

$$Q_0 = \frac{4}{5} z R_0^2 \left(1 + \frac{2}{3} \right)$$

从而形变核转动能级间的电四极(E2)跃迁几

率越大。例如,轴对称形变偶偶核从基态到第一个 $J = 2^+$ 激发态的 E2 约化跃迁几率为

$$B(E2) = \frac{5}{16} Q_0^2$$

由此可见,均匀带电形变核的转动,即其电四极矩的转动,决定了它的电四极(E2)约化跃迁几率。这就是原子核电转动的基本内容。

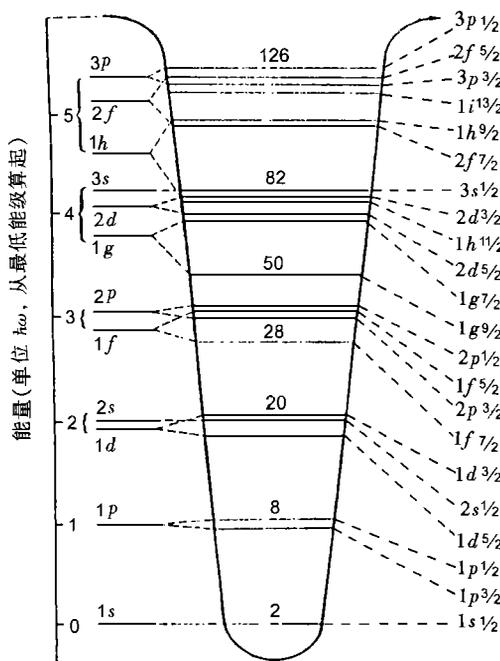
原子核转动的新机制——磁转动

核内核子的内禀磁矩与它们相对运动产生磁矩的矢量和构成核的总磁偶极矩。总角动量为 J 的原子核沿磁场方向的磁偶极矩为

$$\mu_J = g_J \mu_N J$$

其中 g_J 是 g 因子, μ_N 为核磁子。球形偶偶核基态自旋角动量 $J = 0$, 故磁矩为零。对于奇 A 核,根据壳模型,满壳内的偶数个核子耦合成 $J = 0$, 原子核磁矩仅由满壳外最后一个奇核子(或空穴)决定: $\mu_J = g_j \mu_N j$, 其中 j 为最后一个奇核子的角动量。高 j 值轨道对应较大的磁矩。

如前所述,磁转动是指磁偶极矩的转动。怎样使磁偶极矩转动呢?在什么条件下原子核才能构成



转动所需要的磁偶极矩呢?研究表明:(1) 满壳外有少数价核子和空穴的核有可能构成所需要的磁偶极矩;(2) 价核子和空穴必须处于高 j 轨道;(3) 当质子处于某一高 j 轨道时,该轨道同时存在高 j 中子-空穴态(或质子、中子互换)。例如,考虑缺中子铅同位素(^{193}Pb 至 ^{199}Pb)。参看图 1。可以设法把它们 $s_{1/2}$ 轨道(靠近 $Z=82$ 壳层能隙下方)质子激发到 $h_{9/2}$ 和 $i_{13/2}$ 轨道(能隙上方),它们耦合成高自旋质子态 $(h_{9/2} i_{13/2})_{11^-}$; 高自旋中子空穴可在 $(i_{13/2})$ 子壳层激发一个或几个空穴形成,记为 $i_{13/2}^{-n}$ ($n=1, 2, \dots$)。激发上述质子-粒子和中子-空穴态可能会使核发生少许扁椭球形变。然而,这少许形变不足以解释实验观测到的有规律的较长的转动带。特别应该注意的是,观测到的转动带带首并不是直接建立在这些态上,而是涉及更高的自旋和更高的激发能。

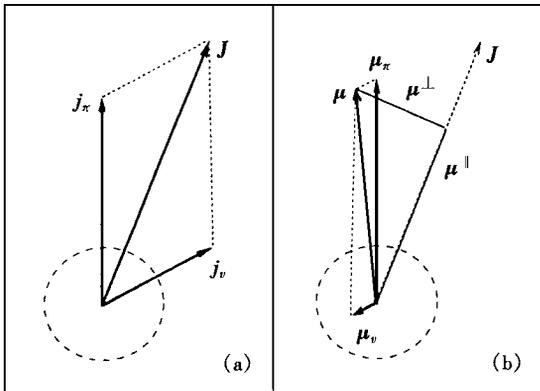


图2 (a) 质子-粒子与中子-空穴角动量耦合示意图
(b) 相应的磁耦合示意图

研究表明:(1) 带首所处的态是这些态耦合构成的态。例如: $(h_{9/2} i_{13/2})_{11^-} \otimes i_{13/2}^{-1}$; (2) 粒子-空穴耦合的最低能量(带首)发生在粒子角动量 j 和空穴角动量 j 取向互相垂直的情况,如图 2(a) 所示,其中 J 是 j 和 j 耦合成的总角动量。与此相联系的磁矩耦合情况如图 2(b) 所示,其中质子磁矩 μ_p 和中子磁矩 μ_n 耦合成总磁矩 μ , μ_{\perp} 和 μ_{\parallel} 分别为总磁矩 μ 对核总角动量 J 的垂直分量和平行分量。 μ_{\perp} 的存在决定了磁矩 μ 将绕总角动量 J 转动,这就是所谓磁转动。

磁转动带的实验观测

在磁转动过程中,作用到质子-粒子和中子-空穴上的科里奥利力将引起 j 和 j 向总角动量 J 靠拢顺排,并耗费能量。如前所述,能量最低的态是质

子角动量 j 和中子空穴角动量 j 几乎垂直耦合的那个态。随着转动加快,能量增加,核总角动量 J 增加,直到 j 和 j 达到全顺排并发生带终止。这个过程类似剪刀合拢,所以磁转动带也称为“剪刀带”。

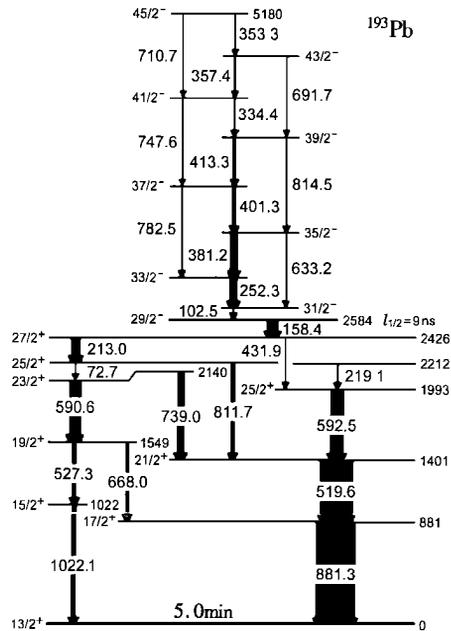


图3 实验测量的 ^{193}Pb 核能级图的一部分。 $E=0$ 能级寿命为 5.0min, $E=2584\text{keV}$ (磁转动带带首)能级寿命为 9ns, 相应的自旋宇称为 $(29/2)^-$ 。箭头宽度表示 跃迁强度

图 3 给出实验观测到的 ^{193}Pb 核磁转动带的例子。能量为 $E=2584\text{keV}$ 的 $(29/2)^-$ 态对应上述质子角动量和中子空穴角动量几乎垂直取向的组态。磁转动带正是建立在这个态(带首)之上。

回顾形变核转动,那是大量配对核子参与的集体转动,科里奥利力的作用是拆散核子对并使核子角动量取向朝着转动角动量方向靠拢、顺排。现在的磁转动情况下,参与的只是少数几个未配对的高角动量的粒子和空穴。它们不是一步就达到全顺排,而是以逐步增加的能量和角动量形成一个有规律的 $J=1$ 的能级量子化序列——磁转动带,直到“剪刀闭合”为止。剪刀从张开到闭合的过程中,质子角动量 j 和中子空穴角动量 j 间的夹角在减小,磁矩垂直分量 μ_{\perp} 在减小。相应地,磁转动带从能量最低的带首移动到最高的能级。

原子核这种十分特殊的转动机制加深了人们对核结构的认识。我们看到原子核内单粒子运动和集体运动的相互关联、相互竞争和相互转化,它们有丰富多彩的表现形式。有关磁转动的实验和理论研究在继续发展着。