

# 原子核集体运动的新模式

曾月新

宁平治

(天津师范大学物理系)

(南开大学物理系)

由  $Z$  个质子和  $N$  个中子(统称核子)构成的原子核, 在一些场合下表现出独立粒子运动的特征, 在另一些场合下表现出  $A$  个核子 ( $A = Z + N$ ) 集体运动的特征, 这两种运动形态又常常相互影响, 相互耦合. 本文着重介绍原子核集体运动的若干新模式. 首先介绍集体振动的新模式.

玻尔根据核密度接近常数, 以及核力的短程性和饱和性, 最早提出了原子核集体运动的液滴模型. 这个模型虽然没有涉及原子核的内部结构, 但对于研究原子核的集体运动却很有价值, 至今仍是研究集体运动的一个出发点. 我们可以把核“液滴”比作一杯水, 碰一下水杯, 可以引起水的表面振荡, 而水的表面振荡实际上是水分子的集体运动. 如果加速一束粒子去撞击原子核, 在一定条件下也可以引起核液滴的振动, 这便是原子核作为多核子体系的集体运动. 起初, 人们认为核液滴只能发生微小的表面振荡(激发能较低), 并在实验上测量到这种振动对应的能谱. 在本世纪最后 30 年中, 随着实验技术的发展(加速器能量的提高, 探测精

度的提高), 振动的新模式不断被发现, 并从理论上进行了深入的研究. 人们逐渐认识到, 在特定的碰撞条件下, 核内核子的分布可能会发生变化, 核内核子的自旋取向可能会发生倾斜,  $A$  个核子依不同条件以各种方式协调这些变化, 从而形成原子核振动的各种新模式.

原子核本质上是个量子系统, 它以能量量子化的形式吸收或发出能量. 吸收能量, 原子核从低能态向高能态跃迁, 这就是原子核的激发; 放出能量, 原子核从高能态向低能态跃迁. 原子核的每一可能状态都有特定的能量和角动量, 并往往与特定的形状相联系. 所以激发某一特定的核振动模式需要提供某一特定的能量. 图 1 给出了原子核振动可能的 11 种基本模式. 为了区分不同模式, 在图 1 中引用了三个量子数 ( $L, \Delta T, \Delta S$ ), 其中  $L$  是表征振动角动量的量子数,  $L = 0$  的振动叫巨单极振动,  $L = 1$  的振动叫巨偶极振动,  $L = 2$  的振动叫巨四极振动. 依此类推, 巨多极振动的极由  $2^L$  决定.  $\Delta T$  是表征参加集体运动的中子和质子位相关系的量子数,  $\Delta T = 0$  表示  $N$  个中子与  $Z$  个质子运动位相是相同的, 这种振动在理论上称为同位旋标量模式;  $\Delta T = 1$  表示  $N$  个中子与  $Z$  个质子运动位相是相反的, 这种振动在理论上称为同位旋矢量模式.  $\Delta S$  是表征参加集体运动的核子的自旋与位相关系的量子数,  $\Delta S = 0$  表示自旋向上和自旋向下的核子同相位运动, 这种振动称电模式;  $\Delta S = 1$  表示自旋向上和自旋向下的核子反相位运动, 这种振动称磁模式. 迄今实验观测到的原子核振动模式已超出这 11 种模式, 下面先介绍几种研究比较充分的核振动模式.

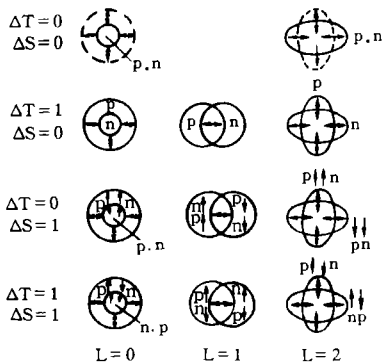


图1 原子核振动模式

### 1. 同位旋矢量巨电偶极振动 GDR(1, 1, 0)

这是一种所有原子核都可以发生的集体振动模式,利用光核反应可以激发这种核振动.在光核反应中,光子被核有效吸收的概率可用吸收截面来度量.图2是 $^{208}\text{Pb}$ 光核反应中吸收

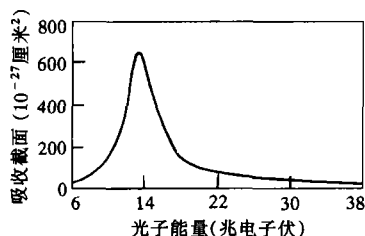


图2  $^{208}\text{Pb}$ 光核反应吸收截面

截面 $\sigma(E)$ 随光子能量 $E$ 变化的曲线,在 $E \approx 14\text{MeV}$ 处出现一个共振峰,其峰值为 $14\text{MeV}$ 相邻能量对应截面值的50—100倍,称为巨共振.对应于一束光子的 $\gamma$ 射线,其波长虽比可见光短,但相对于核的直径却是很大的,所以光子的振荡电场在整个核范围内是近似均匀的,它使核内所有带电的质子随之振荡,为了保持核的质心不动,不带电的中子必须反向移动,核位能增加产生恢复力,于是核中所有质子和中子便反向振荡起来,形成核的巨电偶极振动(图3).由于原子核的密度很高,所以这种核振动具有较高的能量.对于中、重核,振动能量在13—18MeV,对轻核则在20MeV左右.实验证实,此振动模式的激发能随原子核质量数 $A$ 的变化规律满足 $E \approx (75 \pm 5)A^{-1/3}\text{MeV}$ 关系.

### 2. 同位旋标量巨电四极振动 GQR(2, 0, 0)

在电子或质子与原子核的非弹性散射实验中,首次发现这种核振动.后来大量实验研究表明, $\alpha$ 粒子( $^4\text{He}$ 的原子核)的非弹性散射对激

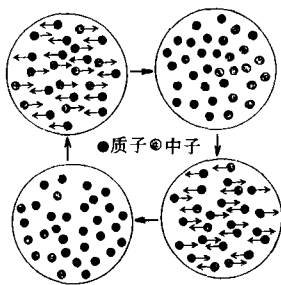


图3 巨电偶极振动GDR(1, 1, 0)示意图

发这种核振动最有效。 $\alpha$ 粒子与靶核的相互作用主要是核力相互作用,具有电荷对称性,比较容易激发靶核中的质子和中子同时向不同方向运动,并使核的电荷中心和质量中心保持不动.其特征的运动趋势是,参加集体运动的核子沿一个轴的方向把核表面往里拉,而沿另一个垂直于该轴的方向把核表面向外推(参看图4左上和右下).原子核的电荷分布和质量分布周期性地发生变化,使原子核在球形 $\rightarrow$ 长椭球形 $\rightarrow$ 球形 $\rightarrow$ 扁椭球形之间振荡(图4).

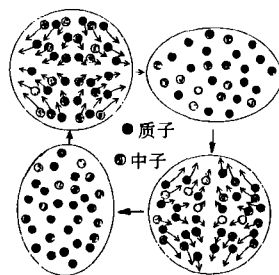


图4 巨电四极振动GQR(2, 0, 0)示意图

怎样才能观测到原子核的巨电四极振动?由于微观粒子的波粒二象性, $\alpha$ 粒子的德布罗意波被 $\alpha$ 粒子与核表面的相互作用所扰动,在 $\alpha$ 粒子的德布罗意波对靶核衍射所产生的衍射图样中,最强的衍射是指向以 $\alpha$ 束流轴线为中心的圆环内,这表明入射粒子散射到那里的几率最大.如果用散射截面来度量入射粒子散射到空间某一位置的几率大小,那么当原子核内巨电四极振动一旦被激发,表现在与 $\alpha$ 束流轴线成一定角度的特定方向上发生非弹性散射的粒子数目会急剧增加,即散射截面达到峰值.散射截面达到最大值的角度取决于核的大小以及 $\alpha$ 粒子的能量.图5是 $96\text{MeV}$ 的 $\alpha$ 粒子与同位素 $^{144}\text{Sa}$ 非弹性散射的角分布.GQR(2, 0, 0)振动模式被激发时,在偏离 $\alpha$ 束流轴线 $5^\circ$ 处散射截面达到极大值.典型的GQR(2, 0, 0)振动能量在 $20\text{MeV}$ 左右.实验表明,激发此振动的激发能随原子核质量数 $A$ 的变化规律满足 $E \approx (64 \pm 4)A^{-1/3}\text{MeV}$ 关系.

### 3. 同位旋标量巨电单极振动 GMR(0, 0, 0)

GMR(0, 0, 0)的激发以及探测方法与

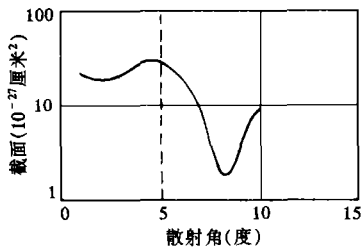


图5  $\alpha$ 粒子对同位素 $^{144}\text{Sa}$ 的非弹性散射 GQR(2, 0, 0)被激发时的角分布

GQR(2, 0, 0)大致相同,所不同的是要求入射的 $\alpha$ 粒子擦过原子核表面.在这种情况下 $\alpha$ 粒子与靶核的相互作用,使核处于激发态,核内的所有核子会沿着径向同时向外或同时向内周期性运动,图6是GMR(0, 0, 0)的示意图.可以看出,GMR(0, 0, 0)表现为原子核体积的周期性膨胀和收缩,这一“胀”和“缩”好像原子核在“呼吸”,故又称这种集体振动模式为“呼吸模式”.

在实验上,GMR(0, 0, 0)产生的标志是在与 $\alpha$ 粒子束流轴线近乎零度方向上,散射截面达到峰值.图7是 $\alpha$ 粒子对 $^{208}\text{Pb}$ 非弹性散射,GMR(0, 0, 0)被激发时的角分布.单纯选择性地激发GMR(0, 0, 0)是比较困难的,因为在 $\alpha$ 粒子的非弹性散射实验中,往往同时激发GMR(0, 0, 0)和GQR(2, 0, 0)两种模式.这两种模式对应的散射角分布在大于 $5^\circ$ 角区内几乎有完全相同的特点,很难区分;在小于 $5^\circ$ 的角区内,二者的散射角分布才有很大差别,其极大与极小是相反的.而且要将偏离 $\alpha$ 粒子束流轴线近乎零度方向上散射粒子与通过靶核而不偏转的粒子区分开难度很大.这正是GMR(0, 0, 0)比GQR(2, 0, 0)推迟七年才被发现的原因.巨电单极振动能量范围一般在15—20MeV左右,激发此振动的激发能随原子核质量数 $A$ 的变化规律满足 $E \approx (78 \pm 3)A^{-1/3}$ 关系.

以上介绍的三种振动模式均属于原子核的形状振动,形状振动的特点是与核子的自旋取向无关,但核子的分布要发生变化,原子核的这类振动与宏观系统的振动是类似的.在原子核中还存在另一类振动,这类振动与核子自旋取

向有关,但核子的分布不会发生变化,就好像核子的空间分布处于一种“冻结”状态.

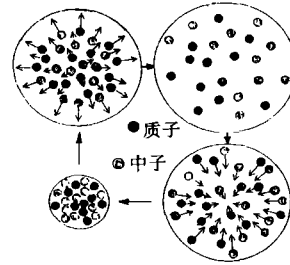


图6 巨电单极振动GMR(0, 0, 0)示意图

大家知道,地球运动的特点是既有公转又有自转,所以地球既具有绕太阳公转的角动量,又具有绕地球极轴自转的角动量.原子核中的质子和中子与地球类似,除了具有轨道角动量,还具有自旋角动量.在核物理中,把原子核中质子和中子的轨道角动量和自旋角动量的矢量和(总角动量)称为原子核的自旋.

原子核未被激发时,核内核子的自旋取向是固定的.当用某种方法使原子核激发,原子核中有些核子的自旋取向会发生稍微的倾斜,自旋角动量发生变化产生一个改变量,使核子的自旋轴将沿圆锥面绕其原始自旋取向转动,这就是核子自旋轴的进动.由于原子核的中子和质子都具有磁矩,考虑自旋后的中子和质子的行为如同一个“小磁铁”,所以与自旋取向有关的振动,必然是磁性的集体振荡模式.在核子自旋轴的进动中,核子自旋的协调方式有两种,一是中子自旋朝着和质子自旋相同方向倾斜;二是中子自旋朝着和质子自旋相反方向倾

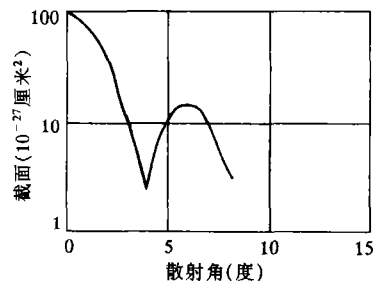


图7  $\alpha$ 粒子对 $^{208}\text{Pb}$ 的非弹性散射 GMR(0, 0, 0)被激发时的角分布

斜,无论哪种方式,最终都会使核获得按进动频率振荡的净自旋和净磁矩,导致自旋振动的发生。下面是两种基本自旋振动模式。

#### 4. 同位旋矢量巨磁单极振动 GMR(0, 1, 1)

在 高能质子的非弹性散射中,质子的  $\pi$  介子场与靶核中的核子相互作用,可以交换带电的  $\pi$  介子,使人射的一个质子转变为一个中子飞离核外,而靶核中则有一个中子转变为质子(称同位旋反向)。这时中子自旋轴朝着和质子自旋相同方向倾斜,于是产生巨磁单极振动,亦称伽莫夫-忒勒共振,图 8 是 GMR(0, 1, 1) 示意图。

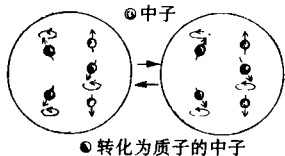


图8 巨磁单极振动GMR(0, 1, 1)  
(伽莫夫-忒勒共振)示意图

当 GMR(0, 1, 1) 被激发时,由于靶核发生 (p, n) 电荷交换,故散射的粒子是中子,而不再是质子,且中子的出射速度几乎与质子的入射速度一样,这表明质子与核子之间没有任何动量交换,核内唯一变化的是一个中子变成了一个质子。我们可以在与质子束流轴线夹角接近零度处,发现中子散射截面的峰值。GMR(0, 1, 1) 的能量范围是 10—15MeV。

#### 5. 同位旋矢量巨磁偶极振动 GDR(1, 1, 1)

这种核的自旋振动与 GMR(0, 1, 1) 的区别是在高能质子的非弹性散射中,靶核内不发生电荷交换,即靶核中质子和中子数目不变,发生变化的是中子自旋朝着和质子自旋相反方向倾

斜,即质子和中子的自旋轴的进动位相彼此相差 180 度(图 9),由于质子和中子的磁矩符号相反故总磁矩会因这种位形成为极大,这种振动的磁场具有偶极图样。这种振动的能量对重核约 8MeV,对轻核约 15MeV。

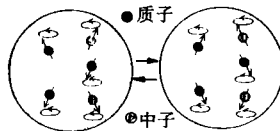


图9 巨磁偶极振动GDR(1, 1, 1)示意图

实验表明,在重核的这两种自旋振动中,仅有三分之一的核子参与了磁性的集体振荡,并不象巨电偶极振动、巨电四极振动和巨电单极振动那样表现出百分之百的核子的一致行动,这是一个有趣尚难解释的现象。有人估计这种现象可能与原子核内的夸克效应有关,目前一些科学家把自旋振动作为反映核内夸克效应的可能信号,正在积极探讨。

对已发现的核振动各种模式,从宏观和微观两方面进行深入的理论研究,以及继续寻找新的核振动模式,是原子核集体振动研究领域的两大热点课题,已经建立起来的核振动宏观描述和微观描述的各种模型和计算方法,各有其成功之处,也各有其解释不了的问题,尚须进一步改进和发展。同位旋标量巨电八极振动模式、剪刀式振动模式在国外有关文献中已有报道。至于各种核振动模式所提供的有关原子核的性质、内部结构和运动状态的信息,我们将放到《原子核集体运动的新模式(续)》中,在介绍原子核集体转动后,一并给予考虑。

### 致作者 关于投稿的几点要求

1. 感谢广大作者对本刊的厚爱和支持,热忱欢迎广大新老作者踊跃投稿。

2. 来稿内容应符合本刊的报道范围和深度要求。表达上宜采用深入浅出、通俗易懂的语言,要符合科普文章的写作要求。

3. 来稿要求一式两份,用 20 × 20 稿纸眷

写或打印。字迹工整清楚,公式、符号书写规范。

4. 文中有插图处画方框示意,插图绘制清楚,统一附在稿后。

5. 随稿请附英文题目和作者准确的通信地址、邮编及联系电话,多作者情况请指明联系人。

《现代物理知识》编辑部