

呼吸模式和原子核的可压缩性

高 良 俊

(中国原子能科学研究院)

一、核物理中第一个仿生模式

原子核的呼吸模式又称巨单极共振 (GMR), 是迄今为止核物理上唯一的仿生模式。这个模式阐明了原子核的一个重要性质: 原子核是可压缩的。除了核子数 A 极少的原子核目前尚未观察到可压缩性之外, 对核素表上几乎所有的原子核, 只要给它的激发能 E_x 达到 $56 A^{-1/3} - 92 A^{-1/3} \text{MeV}$, 不同核子数 A 的原子核都会被激发起巨单极共振。这是一种保持原子核球面不发生畸变, 收缩和膨胀交替更换的集体振动。由于这样的振动很象动物的呼吸, 因而得了个仿生名字——呼吸模式。动物在呼吸时, 胸腔必然有扩大和缩小的变化。与之相似, 原子核在“呼吸”时, 其体积也有大小的变化。这就说明原子核具有可压缩性。众所周知, 原子核是构成宇宙间一切宏观物体的一个基本单位 (不是最小的)。现在大量的实验证明了原子核具有可压缩性, 看来, 可压缩性应是所有物体的普遍性质。

二、对原子核可否压缩的认识过程

关于原子核是否可压缩的问题, 在核物理学的发展过程中, 经历过一段曲折的道路。早在 1939 年, N. Bohr 和 J.A. Wheeler^[1] 在解释原子核裂变时, 曾假定原子核是不可压缩的带电液滴。几十年来大家沿用这个假设, 没有人怀疑过。1962 年, Walecka^[2] 从理论上推测出原子核应当是可压缩的。因为当时缺乏实验证据, 这个很重要的预见, 没有引起核物理界的足够重视。事隔十三年之后, Marty^[3] 等人, 在巨共振能区, 对很多靶核作了 (α, α') 和 (d, d') 的

非弹性散射实验, 发现对他们所测的那些靶核, 当激发能 $E_x = 80 A^{-1/3} \text{MeV}$ 时, 在能谱上都出现了巨单极共振峰 (见图 1)。

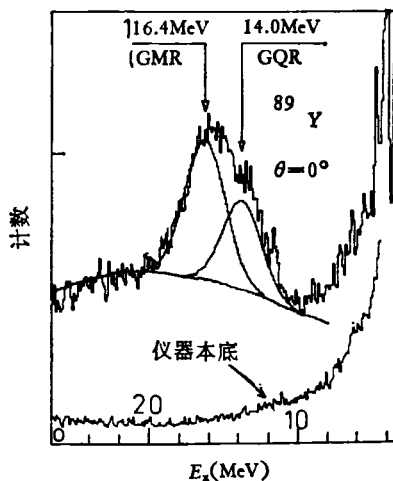
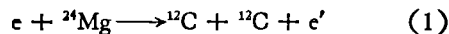


图 1 $\theta = 0^\circ$ 测得的非弹性散射的 α 粒子能谱 [图中的纵坐标是计数, 横坐标是受激原子核 ^{89}Y 的激发能 $E_x \text{MeV}$, 在 16.4MeV 处出现了巨单极共振 (GMR), 在 14.0MeV 处是巨四极共振 (GQR)]

Marty 的实验证实了 Walecka 十三年前的预言, 引起了核物理学家们的极大兴趣。因此, 很多实验室以各种不同的人射粒子, 用不同的靶核, 在更宽广的能区作了大量的非弹性散射实验。结果证明, 当激发能量在 $56 A^{-1/3} \text{MeV}$ 至 $92 A^{-1/3} \text{MeV}$ 的能区内, 普遍出现巨单极共振, 这就进一步证实了 Marty 实验的可靠性。

特别值得提出的是 1978 年 A. M. Sandorfi 等人的实验^[4], 他们用 30MeV 的电子轰击 ^{24}Mg , 结果在电子非弹性散射过程中同时出现了轻核 ^{24}Mg 的对称裂变, 其反应式为



根据量子力学的宇称守恒定律知道, 只有 ^{24}Mg

是偶宇称 ($L = 0, 2, \dots$) 的集体激发, 才有可能出现两个 ^{12}C 的对称裂变。因此, 从轻核 ^{24}Mg 对称裂变的实验, 也证明 ^{24}Mg 是有巨单极 ($L = 0$) 的共振激发态。这就从另一个侧面证实了原子核的确存在巨单极共振, 而且这是一种普遍现象。

三、原子核可压缩模数的计算方法

既然实验证明了原子核存在巨单极共振, 因而说明原子核具有可压缩性。表示原子核可压缩性的物理量, 称为原子核的可压缩模数, 用 K_A 来表示, 其下标 A 代表原子核的核子数。一般说来, 原子核的可压缩模数 K_A 与原子核中核子的平均内能 E/A 、密度 ρ 、半密度半径 R , 以及巨单极共振频率 ω 有密切的关系。在这里我们简要地介绍一下用液滴模型来求原子核可压缩模数 K_A 和巨单极共振频率 ω 的方法。

具有可压缩性的球形原子核, 核子的分布或核物质密度用费米函数来描述:

$$\rho(r, q) = \frac{\rho_0(q)}{1 + e^{(r-R)/\alpha_c(q)}}, \quad (2)$$

这里 q 是与原子核可压缩性密切相关的量:

$$q = \frac{\rho_c(q)}{\rho_0}, \quad (3)$$

$\rho_c(q)$ 是可压缩原子核中心部位的核物质密度, ρ_0 是原子核平衡态的核物质密度。在(2)式中, R 是原子核的半密度半径, 即当 $r = R$ 时, 核密度恰为中心核物质密度的一半:

$$\rho(r = R, q) = \frac{1}{2} \rho_c(q). \quad (4)$$

(2)式中 $\alpha_c(q)$ 是表面扩散系数, 这个系数代表原子核物质在核表面扩展程度。

$$\alpha_c(q) = \alpha_0 q^\beta, \quad (5)$$

α_0 是平衡态情况下核物质表面扩散系数。 β 是一个无量纲的参数, 用它可以调节原子核表面压缩和体压缩对压缩模数贡献的相对大小。如果原子核受到激发而出现巨单极共振, 核物质密度 ρ 和半密度半径 R 就会出现如下图所示的

变化(见图 2)。

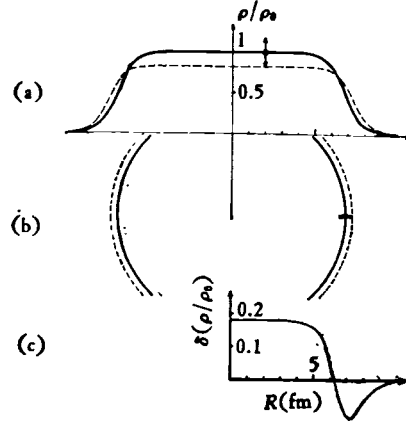


图 2 巨单极共振态核物质密度与半密度半径的变化状况

(a) 浓黑线代表原子核平衡态核物质密度 ρ_0 , 断线表示 ρ/ρ_0 的变化限度; (b) 浓黑的圆弧线表示用平衡态的半密度半径所划出的原子核大小, 断线表示原子核在“呼吸”时其半径缩短和伸长的范围; (c) 表示核物质密度变量 $\delta\left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)$ 和半径 $R(\text{fm})$ 的关系

根据流体力学求频率公式, 可以写出原子核呼吸频率 ω 和压缩模数 $K_A(\beta)$ 之间的关系:

$$\omega^2 = \frac{K_A(\beta)}{B(\beta)}. \quad (6)$$

当 β 固定时, 压缩模数 K_A 定义为

$$K_A = 9 \frac{d^2}{dq^2} \left(\frac{E}{A} \right) \Big|_{q=1}. \quad (7)$$

从(3)式不难看出, 当 $q = 1$ 时, 则 $\rho_c = \rho_0$ 。只要求出核子的平均内能 E/A , 即可用(7)式计算出可压缩模数 K_A 。计算核子平均内能的方法很多, 最常见的是用半经验公式:

$$\frac{E}{A} = a_v + a_s A^{-1/3} + a_y \frac{(N-Z)^2}{A^2} + a_c A^{-1}. \quad (8)$$

用(7)和(8)式, 可得到压缩模数 K_A 。

$$K_A = K_v + K_s A^{-1/3} + K_y \frac{(N-Z)^2}{A^2} + K_c A^{-1}, \quad (9)$$

这里 K_v, K_s, K_y 和 K_c 分别是原子核的体积、

表面、对称项和库仑项对压缩模数的贡献,它们和(8)式中的四个系数 a_v, a_s, a_τ 和 a_c 相对应。

(6) 式中的 $B(\beta)$ 是与核物质流动有关的参数,当 β 固定时,它可以从核物质流体连续方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial q} + \nabla \cdot (\rho v) = 0 \quad (10)$$

中,求出核物质在巨单极共振中的流动速度 $v(r, q)$, 然后用 Brack^[5] 公式计算出 $B(\beta) = B$,

$$B = \frac{9}{A} m \int \rho(r, q) v^2(r, q) d^3r, \quad (11)$$

这里的流动速度 $v(r, q)$ 是从(10)式求出的,在(10)式中, $v = v(r, q), \rho = \rho(r, q)$ 。(11)式中, m 是单个核子的质量, A 是原子核的核子数, $\rho(r, q)$ 由(2)式给出。

由(6)式可以看到,原子核的“呼吸”频率 ω 和原子核可压缩模数 K_A 的平方根成正比,即

$$\omega = \sqrt{\frac{K_A}{B}}. \quad (12)$$

由此可见,压缩模数越大,其“呼吸”频率就越大;相反地,压缩模数越小,其“呼吸”频率也就越小。从声学观点可以想象,核子数不同的各个原子核,在它们作巨单极共振时,会发出高、低不同的音响。

目前人们用各种模型和方法来计算可压缩模数,如集体模型、受压的费米气体模型、生成坐标法、随机相近似方法等等^[6]。各种模型和方法计算得到的模数各不相同。一般用核子数趋于无限大的模数 K_∞ , 作为比较各种理论计算结果的参数。目前各种方法的计算结果大致在 200—300 MeV。

四、研究原子核可压缩性的现实意义

在激发能低于巨共振能区的范围内研究原子核的性质,把原子核看成是不可压缩的,这当然是可以的。但是在能量较高的巨共振能区来研究原子核的某些性质,例如计算巨共振能区的核反应截面,就应当考虑到巨共振的影响,要以原子核可压缩的新观点,来衡量以往的结论和修正在不可压缩假设下的计算结果。同时要以原子核可压缩的观点去研究微观世界,从中可能揭示出更深刻的物理规律。

微观世界与宏观世界有着惊人的相似之处。现在已有学者把核物质可压缩性和原子核的巨单极共振用于研究宇宙中高密度的中子星以及其他天体问题上去。据文献报道,和人们天天见面的太阳就存在着巨单极共振,或者说太阳也在“呼吸”。太阳这个发光的星体,它本身的周期振动会引起光和热辐射产生涨落,因此也就会影响地球的气候变化。也许正是这些原因,原子核的可压缩性已引起了人们的极大关注。

参 考 文 献

- [1] N. Bohr and J. A. Wheeler, *Phys. Rev.*, **56** (1939), 426.
- [2] J. D. Walecka, *Phys. Rev.*, **126**(1962), 653.
- [3] C. H. Dasso, *Nuclear Physics*, North-Holl and Publishing Compony Amsterdam, New York, Oxford, (1982), 361.
- [4] A. M. Sandorfi et al., *Phys. Rev. Lett.*, **40**(1978), 1252.
- [5] M. Brack and W. Stocker *Nucl. Phys.*, **A**, **406** (1983), 413.
- [6] J. P. Blaizot, *Physics Reports*, **64-4**(1980), 171.

1985 年第4期《物理》内容预告

宏观量子现象——超流动性(管惟炎); 耗散系统中的混沌现象(汪小京); 直拉硅单晶中的氧沉淀(钱家俊等); 内转换电子 Mössbauer 谱学(王广厚); 电子偶素物理学(王少阶); 中子导管(何敏); 集成电路对硅材料的要求(万群); 瓦级染料激光治癌系统(宋向宁等); 扫描隧道显微镜(戴道宣); 光学多道分析仪及其应用(林美荣); 长寿命电晕预电离 XeCl 准分子激光器(刘达伟); 一种低电感场畸变型短路开关(吴为民等); 在定向仪上用衍射线对法精密测定晶胞参数(刘来保); 硅中微缺陷及其形成过程(崔树范等)。