

研究简报

核分子的振转模型

杨伯君
(北京大学)

摘 要

为解释 $^{12}\text{C} + ^{16}\text{O}$ 反应系统的中间结构,本文提出一种核分子的振转模型。

重离子反应中中间结构的研究已引起广泛的兴趣^[1], 因为它预示着核分子运动形态存在的可能性。从实验中观察到中间结构比较明显的系统是 $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$ 与 $^{12}\text{C} + ^{16}\text{O}$, 在这两个系统的中间结构的研究中, 问题比较大的是 $^{12}\text{C} + ^{16}\text{O}$ 系统。对于 $^{12}\text{C} + ^{16}\text{O}$ 反应系统, 不仅在库仑位垒以下已观察到若干中间结构, 而且在库仑位垒以上, 在不同的反应道也观察到许多中间结构。特别是 Malmin 等人^[2] 发现在 20 MeV 附近与 22—23 MeV 之间存在两组双态共振。为了解释这一现象, Matsuse 等人^[3] 提出了带交叉模型。他们在选取适当的位势参数的条件下, 正确地给出了 Malmin 等人发现的双态共振峰的位置, 并预言每组共振峰的两个态有同样的自旋和宇称。但后来 Jachciński 等人^[4] 利用角关联技术测得同一组共振峰两个态的自旋是不相同的, 结果是: 19.7 MeV (14^+), 20.5 MeV (12^+), 22.0 MeV (15^-) 和 22.6 MeV (13^-)。使 Matsuse 等人的理论遇到困难。Jachciński 等人的实验结果正好显示出 $^{12}\text{C} + ^{16}\text{O}$ 反应系统存在两个以上的转动带。Resmini 等人^[5] 曾建议两转动带图象。但根据现有的实验事实, 我们认为至少应存在三条转动带, 实验表现出来双态共振是核分子不同振动态的转动带的两个邻近状态, 中间结构的存在是核分子位形集体激发的结果。和普通双原子分子相似, 集体激发既可以表现在转动自由度上, 也可以发生在振动自由度上, 也可以是振动和转动自由度同时激发。这模型有以下两方面的实验根据: (1) 同一中间结构常反映在许多道上, 例如 12.8 MeV 态, 就在弹性、非弹性、 n 、 p 、 d 、 α 、和 ^8Be 等反应道同时表现出来, 这不同的反应道可以看成分子集体激发的不同退激方式。(2) 在散射角分布中后角散射截面值比较大, 如果扣除库仑散射有近似的 90° 对称分布, 表明两个核形成一个暂时的复合系统, 这系统就是核分子。

我们知道, 普通双原子分子的振动和转动都表现在两个原子的相对运动自由度上; 而非球形核的振动和转动, 在低激发态是表面核子的运动。用这两种模型我们发现都不能正确地给出在 $^{12}\text{C} + ^{16}\text{O}$ 反应中表现出来的中间结构谱。因此, 我们推测核分子的振转运动, 既不同于普通的双原子分子, 也不同于一般的非球形核, 而有它自己的特点。即核分

子的转动和振动表现在关系不大的两种集体自由度上. 一方面根据已测量的几个中间结构角动量接近于擦边角动量的事实, 可以认为转动运动表现在两个核相对运动的自由度上. 另一方面从核分子瓦解后两核可以处在各自振动激发态的事实, 可以认为核分子的振动表现在表面自由度上. 正因为核分子的振动和转动表现在几乎完全独立的自由度上, 因此两部分关联很小, 可以分别进行处理. 两部分之间的微小关联仅表现在表面振动引起核形变, 使核分子转动惯量发生变化, 影响核分子的转动能谱.

在以上核分子转动和振动的模型基础上, 假定核分子具有轴对称位形, 在微小振动情况下, 核分子的哈密顿量可以写成:

$$\hat{H} = \frac{\hat{M}^2}{2\mathcal{I}} + \frac{1}{2B}(\hat{p}_a^2 + 2\hat{p}_b^2) + \frac{1}{2}c_0a^2 + c_1b^2 \quad (1)$$

式中 \hat{M} 为角动量算符, \mathcal{I} 是核分子相对垂直于对称轴的轴的转动惯量, $\mathcal{I} = \mu R^2$, μ 是核分子的折合质量, R 是两核质心的相对距离. a 与 b 分别为轴向与垂直轴向的振动变数, B 是振动的惯性参数. 如果将转动与振动两部分哈密顿量分开对角化, 立即可以得到核分子的振转谱为:

$$E_{In_0n_1} = B_0 + \frac{\hbar^2}{2\mathcal{I}} I(I+1) + \hbar\omega_0\left(n_0 + \frac{1}{2}\right) + \hbar\omega_1(2n_1 + 1) \quad (2)$$

式中 B_0 是带头能, I 为转动量子数, n_0 与 n_1 为两个方向的振动量子数. \mathcal{I} 是两核质心相对距离 R 的函数, R 与振动有关. 下面我们用简单的经典模型给出 R 与振动量子数的关系. n_0 相应振动即普通核的 β 振动, 它引起核的形变在轴向, 使 R 加大; 而 n_1 振动相应普通核的 η 振动, 它引起核垂直对称轴的形变, 使 R 减少.

简单地假定两个核在形成核分子以前是球形, 当相碰形成核分子时, 两核相互挤压而产生形变, 两核接触部分的圆半径为 d , 为了在振动情况下维持分子位形, d 值至少要等于振动振幅的方均根值. 由

$$\begin{aligned} d^2 &= \langle In_0n_1 | b^2 | In_0n_1 \rangle \\ &= \frac{\hbar}{2B\omega_1} \langle In_0n_1 | (\hat{\beta}^+ + \hat{\beta})(\hat{\beta}^+ + \hat{\beta}) | In_0n_1 \rangle \\ &= \frac{\hbar}{2B\omega_1} (2n_1 + 1) \end{aligned}$$

$$\text{则} \quad d = \sqrt{\frac{\hbar}{2B\omega_1} (2n_1 + 1)} \quad (3)$$

其中 B 为振动的惯性参数, 若认为核分子除两核内满壳层八个核子外, 其余 20 个核子都参加振动, 取 B 为 20 个核子的质量, 为拟合实验数据取 $\hbar\omega_1 = 2\text{MeV}$, 这样可以利用 (3) 式算出 $n_1 = 0$ 和 1 时, d 值分别为

$$d_0 = 0.611\text{fm} \quad d_1 = 1.058\text{fm}$$

若取核半径 $r = 1.24 \times A^{1/3}\text{fm}$, 并认为核分子结合后除挤压部分外两核其余部分仍为球形, 而且形成核分子后核物质密度不变, 则可以算出两核质心相对距离在 $n = 0$ 和 1 时, 分别为:

$$R_0 = 5.84\text{fm} \quad R_1 = 5.57\text{fm}$$

至于与量子数 n_0 相应的振动, 振动沿对称轴, 将引起两核质心距离的加长, 加长的大小也认为是振动振幅的方均根值的变化, 即

$$\Delta R = \sqrt{\frac{\hbar}{2B\omega_0} (2n_0 + 1)} - \sqrt{\frac{\hbar}{2B\omega_0}}$$

当 $n_0 = 1$ 时, 取 $\hbar\omega_0 = 6.4 \text{ MeV}$, 算出 $\Delta R_1 = 0.25 \text{ fm}$, 则

$$R'_1 = R_0 + \Delta R_1 = 6.09 \text{ fm}$$

将求得的 R_0 , R_1 和 R'_1 代入 (2) 式, 可求出三个转动带的能谱. 其中 B_0 可用一个已测的中间结构能量来决定, 我们利用 $I = 14$, $E = 19.7 \text{ MeV}$ 的中间结构, 认为此态的 $n_0 = n_1 = 0$, 定出 $B_0 = -4.27 \text{ MeV}$. 表中列出三个转动带的部分计算结果, 为了比较还给出了有关的实验值, 包括已测出的部分状态的自旋和宇称. 从表中看出, 模型不仅给出了 Malmin 和 Jachcinski 的实验结果, 而且得到其他一些中间结构, 并给出它们应有的自旋和宇称 (宇称为 $(-1)^l$). 其中 14.7 MeV , 16.7 MeV , 24.6 MeV , 27.0 MeV 和 29.6 MeV 均是近期的实验结果^[6], 它们对应一个新的转动带. 实验中测到的 25.5 MeV 中间结构, 我们估计是 14^+ 与 16^+ 的混合, 而不是简单的 15^- . 随着实验工作的深入, 将会观察到一些精细的中间结构, 这可能是振动与转动角动量的耦合的结果, 这一点我们将作进一步的研究.

表 核分子 $^{12}\text{C} + ^{16}\text{O}$ 部分振转能级

I	$n_0 = n_1 = 0$		$n_0 = 0$	$n_1 = 1$	$n_0 = 1$	$n_1 = 0$
	计算值 (MeV)	实验值 (MeV)	计算值 (MeV)	实验值 (MeV)	计算值 (MeV)	实验值 (MeV)
9	8.97		13.77	13.7(9 ⁻)	14.72	14.7(9 ⁻)
10	10.76	10.9(10 ⁺)	15.74	15.8	16.37	16.7(10 ⁺)
11	12.73	12.8	17.90	18.0(11 ⁻)	18.18	18(11 ⁻)
12	14.87	14.8	20.26	20.5(12 ⁺)	20.15	
13	17.20	17.3	22.81	22.8(13 ⁻)	22.29	
14	19.70	19.7(14 ⁺)	25.56	25.5(15 ⁻)	24.59	24.6(14 ⁺)
15	22.38	22.0(15 ⁻)	28.51	28.4(15 ⁻)	27.05	27.0(15 ⁻)
16	25.24		31.66	32.2(16 ⁺)	29.68	29.6(16 ⁺)
17	28.28		35.00		32.48	

我们的模型是很初步的, 但它已能较好地给出目前实验得到的 $^{12}\text{C} + ^{16}\text{O}$ 反应的中间结构谱, 表明我们的考虑是合理的. 至于模型的微观机制还有待进一步的研究.

参 考 文 献

- [1] N. Cindro (ed), Nuclear Molecular Phenomena, North Holland, Amsterdam (1978).
- [2] R. E. Malmin et al., Phys. Rev., C18(1978), 163.
- [3] J. Matsuse et al., Progr. Theo. Phys., 59(1978), 1907.
- [4] C. M. Jachcinski et al., Phys. Letters, 87B(1979), 354.
- [5] F. G. Resmini et al., Phys. Rev., C15(1977), 2241.
- [6] K. Katori et al., Phys. Rev., C21(1980), 1387.
C. M. Jachcinski et al., Phys. Rev., C22(1980), 101.
J. R. Hurd et al., Phys. Rev., C22(1980), 528.

THE ROTATION-VIBRATION MODEL FOR NUCLEAR MOLECULE

YANG BO-JUN
(*Peking University*)

ABSTRACT

A rotation-vibration model for nuclear molecule is proposed in order to explain the intermediate structures in $^{12}\text{C}+^{16}\text{O}$ reaction system.