

原子核集团模型现况

金星南

(中国原子能科学研究院, 北京)

摘要:本文对原子核集团模型的最近发展状况作了介绍。在轻核方面对 $1p$ 壳核与 $2s1d$ 壳核的集团模型作了讨论。对重核则对 α 十核芯这种集团模型作了论证。

一、前言

原子核集团模型是研究原子核的性质与现象所提出的一种模型。这种模型认为原子核是由核子集团组成，而核子集团是在一定的空间区域内强烈地相关着的核子所组成的亚系统。核内各集团之间是由相对运动来描述，这使集团之间发生耦合。集团可以处在亚核子系统的基态，也可以处在它的激发态上。

集团模型首先是在研究轻原子核时提出的。在轻原子核中，核子组成的平均场的概念难以成立，因此用壳模型来描述轻原子核，从理论上是难以接受的。人们首先用集团模型研究的原子核是较轻的 $1p$ 壳核。

集团模型的概念早在 1937 年由 J. A. Wheeler^[1] 提出的。尔后 K. Wildermuth 与 Th. Kanellopoulos^[2] 以及 G. C. Phillips 与 T. A. Tombrello^[3] 进一步发展 Wheeler 的观点，成为从数学上易于处理的形式。唐尧千^[4] 与日本物理学者^[5] 的大量细致工作，前后发展了共振群方法(RGM)、生成坐标方法(GCM)、正交条件模型(OCM)等，使集团模型的理论与方法日趋完善。

在 $1p$ 壳原子核方面，人们已做了较多的工作，对这些核的结构与反应方面的问题，集团模型已作了很好的结果。理论与实验的

符合程度较高。近年来在轻原子核方面，人们用集团模型来解释某些丰中子核的存在，以及超核方面的一些问题。

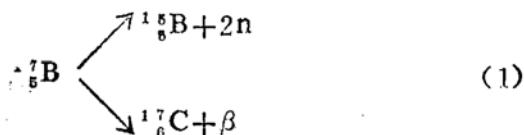
现在的趋向是：用集团模型来描述 $2sld$ 壳原子核以及 $2plf$ 壳原子核中的现象；用于研究原子核高激发态下的集团效应，在中、高能核物理方面的一些现象的研究。

本文将对上述几个方面，举具体实例予以说明。

二、 $1p$ 壳的奇异核与超核

从实验中发现远离 β 稳定线的丰中子核，其中有些是1p壳核，如 $^{16}_4\text{Be}$ 与 $^{17}_5\text{B}$ 。这些核的存在，可以认为它们具有双核(di-nuclei)型的集团结构，即 $^{16}_4\text{Be}$ 为两个 ^8_2He 核所组成 $^8_2\text{He}-^8_2\text{He}$ ， $^{17}_5\text{B}$ 为 ^8_2He 与 ^9_3Li 所组成 $^8_2\text{He}-^9_3\text{Li}$ 。而 ^8_2He 与 ^9_3Li 各具有满壳的1p_{1/2}中子。

已经发现, $^{17}_{\text{B}}$ 存在下列衰变形式^[6]:



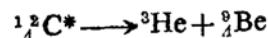
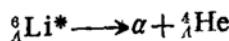
最近十多年来，人们对超核的研究有较大的进展，对 $1p$ 壳 Λ 超核积累了不少的实验数据。原子核集团模型用来研究 $1p$ 壳原子核是成功的，所以人们就很自然的想到用集团模型研究 $1p$ 壳 Λ 超核。这是在集团模型这个

*本文根据1988年7月25日—29日在日本京都市召开的国际第五届原子核与亚原子核集团现象会议(Fifth International Conference on Clustering Aspects in Nuclear and Subnuclear Systems)的内容写就。

领域中引进奇异量子数的一个新方向。施义晋与庄斐^[7]和日本H. Bandō^[8]同时互相独立地开展了这个方面的工作。

用集团模型研究超核的最典型的例子是 ${}^9\text{Be}$ 。两个结合得不坚固的 α 粒子,由于 Λ 粒子的渗入而结合成 ${}^9\text{Be}$ 。这个超核明显具有 $\alpha+\alpha+\Lambda$ 。根据 $\alpha+\alpha^*(\alpha的激发态)+\Lambda$ 的结构可以研究 ${}^9\text{Be}$ 的激发态的性质^[9]。人们从实验上测量了 ${}^7\text{Li}(K^-, \pi^-){}^7\text{Li}$ 的激发曲线, T. Yamada等^[10]用 $[(\alpha+\alpha+\Lambda)+({}^3\text{He}+\text{t}+\Lambda)]$ 那种混合模型计算了这激发曲线。在计算结果中,对极大值作了归一。两者是有一致之处的: 极大峰所在的能量是大致符合的, 相对值大致相同。但对其它能量, 两者还有一定的差别。

超核的衰变^[11]:



是可以用集团模型来解释的。 ${}^6\text{Li}^*$ 为 α 与 ${}^4\text{He}$ 两个集团组成, ${}^{12}\text{C}^*$ 为 ${}^9\text{Be}$ 与 ${}^3\text{He}$ 两个集团组成。

当 K^- 轰击轻原子核 ${}^7\text{Li}$, ${}^9\text{Be}$, ${}^{12}\text{C}$, ${}^{16}\text{O}$, 能形成 ${}^4\text{He}$, 形成几率列于下表 I。这种形成几率是相当大的^[12]。如用集团模型来解释这个现象, 务必在轻核 ${}^7\text{Li}$, ${}^9\text{Be}$, ${}^{12}\text{C}$, ${}^{16}\text{O}$ 中存在集团 ${}^4\text{H}$, 而 ${}^4\text{H}$ 集团在核内是难以形成的。故轻核中 ${}^4\text{H}$ 的形成不能用集团模型来解释。现有用超核的复合核模型来解释此现象^[13]。

表 I 轻核中 ${}^4\text{H}$ 的形成几率

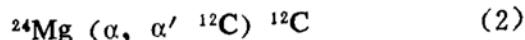
靶核	形成几率(吸收每一 K^-)%
${}^7\text{Li}$	3.3±0.4
${}^9\text{Be}$	1.57±0.18
${}^{12}\text{C}$	1.00±0.14
${}^{16}\text{O}$	0.47±0.08

三、较重的1p壳核与2sld壳核的集团模型

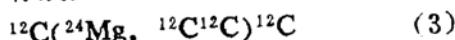
较重的1p壳核与2sld壳核基态附近的态为壳模型态, 但较高的激发态则为集团态。人们从实验与理论的验证已知道 ${}^{12}\text{C}$ 的7.66 MeV O^+ 态, 12.3MeV 2^+ 态为 $\alpha+{}^8\text{Be}$ 集团态(也即 $\alpha+\alpha+\alpha$ 集团态), ${}^{16}\text{O}$ 的6.05MeV的 O^+ 上的 $K^*=O^+$ 带与9.63MeV 1^- 上的 $K^*=O^-$ 带为 $\alpha+{}^{12}\text{C}$ 集团态, ${}^{20}\text{Ne}$ 的5.78MeV 1^- 上的 $K^*=O^-$ 带为 $\alpha+{}^{16}\text{O}$ 集团态。

$\alpha+\text{核芯}$ 那种形式的集团态在中重核与重核是经常出现的, 在下节中将作进一步的讨论。

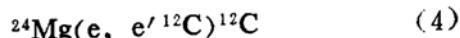
在高激发下, ${}^{24}\text{Mg}$ 除了 $\alpha+{}^{20}\text{Ne}$ 集团态外还存在其它形式的集团态。 α 对 ${}^{24}\text{Mg}$ 的非弹性散射, 产生 ${}^{24}\text{Mg}$ 的对称裂变:



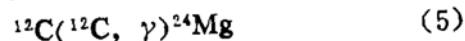
最近用180MeV的 ${}^{24}\text{Mg}$ 对 ${}^{12}\text{C}$ 反应中, 产生 ${}^{24}\text{Mg}$ 的对称裂变^[14]:



同样 ${}^{24}\text{Mg}$ 还发出电致裂变

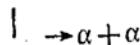


以及 ${}^{12}\text{C}$ 对 ${}^{12}\text{C}$ 的辐射俘获



这些事实说明了 ${}^{24}\text{Mg}$ 在高激发下存在 ${}^{12}\text{C}+{}^{12}\text{C}$ 的集团结构。

B. R. Fulton等^[14]在180 MeV的 ${}^{24}\text{Mg}$ 与 ${}^{12}\text{C}$ 反应时, 发现激发着的 ${}^{24}\text{Mg}^*$ 的衰变



这指出 ${}^{24}\text{Mg}$ 存在 ${}^{16}\text{O}+2\alpha$ 的集团结构。

${}^{24}\text{Mg}$ 的 ${}^{12}\text{C}+{}^{12}\text{C}$ 集团结构以及 ${}^{16}\text{O}+2\alpha$ 集团结构是在14MeV附近出现的。具体地说: ${}^{24}\text{Mg}$ 分成 ${}^{12}\text{C}+{}^{12}\text{C}$ 需13.93MeV, 分成 ${}^{16}\text{O}+2\alpha$ 需14.05MeV。

${}^{24}\text{Mg}$ 的同位旋标量共振是 E. Kahlmann 等^[15]从反应 ${}^{24}\text{Mg}(\gamma, \alpha) {}^{20}\text{Ne}_{\text{基态}}$ 测得的。利

用 ^{24}Mg 的集团结构 $^{16}\text{O}+2\alpha$, 用OCM方法可以计算 ^{24}Mg 的激发能级, 这与实验上找到的12MeV以上的能级, 在能量位置及强度上是有一定程度的符合的^[16]。

利用 ^{24}Mg 的 $^{16}\text{O}+2\alpha$ 的OCM波函数, 可以计算同位旋E2强度 Γ_{r_i} 与 α 约化宽度 $\gamma_{\alpha_i}^2$ 以上各量右下角的标记*i*是指第*i*个激发态的量)。反应 $^{24}\text{Mg}(\gamma, \alpha)^{20}\text{Ne}_{\text{基态}}$ 的截面可用下式计算:

$$\sigma_i(E) = 4\pi\lambda^2(2J+1) \sum_i \frac{\Gamma_{r_i} \gamma_{\alpha_i}^2}{\Delta E} \int_{E_i - \frac{\Delta E}{2}}^{E_i + \frac{\Delta E}{2}} \frac{P_i(E')}{(E' - E_i)^2 + \Gamma_i^2/4} dE'$$
(7)

其中 $P_i(E)$ 为 α 粒子的穿透率, Γ_i 为第*i*共振态的总宽度。这些量均从 $^{16}\text{O}+2\alpha$ 的OCM计算得到的。这里 ΔE 取为0.15MeV^[16]

计算结果与实验作了比较, 在定量上尚有一定的差别。

四、中重核与重核的集团模型

2sld壳核中的 ^{20}Ne , 用 $\alpha+^{16}\text{O}$ 的集团模型的研究是十分成功的^[17]。 $\alpha+$ (双满壳)核芯的结构推广到2plf壳, 我们便对原子核 ^{44}Ti 进行研究, 把 ^{44}Ti 作为 $\alpha+^{40}\text{Ca}$ 的集团结构。

利用HNY势, 由RGM可以计算 ^{44}Ti 的低激发谱^[18], 把计算结果与实验进行了比较, 对基带 O^+ 带是符合得较好, 而其它带则因实验数据不够, 还不能作比较。

从RGM可以算得 α 与 ^{40}Ca 间的相互作用势, 其中包括直接部分与交换部分, 一般是非定域势。 ^{44}Ti 能谱的计算是用这个相互作用进行的。我们如果把这个相互作用势用作为 α 与 ^{40}Ca 发生散射时的光学势实部, 再加上虚部势:

$$-iW_o(E_a)\{1+\exp[(r-R_w)/a_w]\}^{-2} \quad (8)$$

其中

$$R_w=6\text{fm}, \quad a_w=1\text{fm}$$

$$W_o(E_a)=(2.99+0.288E_a)\text{MeV}$$

来计算不同能量下的 $^{40}\text{Ca}(\alpha, \alpha)^{40}\text{Ca}$ 的散射截面, 便得到与实验符合相当好的结果, 散射截面中的后角反常现象可以很好地表示出来。

Michel等^[19]曾用下列光学势

$$V(r)=V_c(r)-U_o f(r, R, a)-iW_o f(r, R_w, a_w) \quad (9)$$

其中

V_c 为 α 与 ^{40}Ca 间的库仑位,

$$f(r, R, a)=\{1+\exp[(r-R)/a]\}^{-2}$$

$$R_c=1.3A^{1/3}\text{fm} \quad (\text{在库仑位中用})$$

$$R=4.685\text{fm}, \quad a=1.290\text{fm},$$

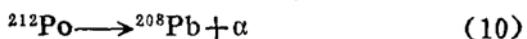
$$R_w=6.000\text{fm}, \quad a_w=1.000\text{fm},$$

$$U_o=180(1-0.00168E_a)\text{ MeV},$$

$$W_o=(2.99+0.288E_a)\text{MeV}.$$

能计算得到与实验符合的 $^{40}\text{Ca}(\alpha, \alpha)^{40}\text{Ca}$ 散射截面^[19]。这里公式(9)中虚部是前面公式(8)。因此所用的虚部是一样的, 而差别只是在实部。这样人们就认为: 用RGM计算得到的两集团相互作用势与光学势实部是等效的。这是近几年来集团模型中的重要成果之一。

重原子核的 α 衰变是一个目前尚未很好理解的问题。人们用壳模型可以很好地计算得到 ^{208}Pb 基态附近的性质, 但是用壳模型来描述 ^{212}Po 的 α 衰变:



则计算所得的 ^{212}Po 的 α 衰变宽度与实验值比较要小几个量级, 如果用本文所提到的 $\alpha+^{208}\text{Pb}$ 集团模型, 则计算所得到的 α 衰变宽度将比实验值大。

I.Tonozuka^[20]将壳模型基与集团模型基混合, 将模型波函数写为:

$$\psi=a|s\rangle+b|c\rangle \quad (11)$$

其中 $|s\rangle$ 为壳模型波函数, $|c\rangle$ 为集团模型波函数。在集团模型波函数采用OCM波函

数：

$$\zeta_l(r) \hat{Y}_l(\vec{r}) = \int (1-K) \frac{\mu_l(r')}{r'} \hat{Y}_l(\vec{r}') dr'$$

其中K为波函数的重叠积分核。

我们取 $l=0$ 的情况，系统 $\alpha+^{208}\text{Pb}$ 的集团波函数 $r\zeta_0(r)$ 可用图形的形式给出。从图形可见系统的波函数内部基本上为零，这说明 α 粒子在 ^{208}Pb 内部不存在。波函数（通过某种归一后）在核表面为1，这说明 ^{212}Po 在衰变时， α 粒子是在原子核的表面处形成的。

用壳模型基和壳模型与集团模型混合基，计算了 α 宽度，列于表Ⅱ，可见在混合基下的 α 宽度与实验值仅差一个量级。

表Ⅱ ^{212}Po 的 α 宽度

壳模型组态	$r_\alpha^*(\text{MeV})$	$\Gamma_\alpha^*(\text{MeV})$	实验值
$0h_{9/2}^1 1g_{9/2}^2$	1.0×10^{-20}	1.5×10^{-16}	1.5×10^{-1}

五、中、高能核物理中原子核的集团效应

在中、高能核物理中原子核的集团所产生的影响，我们举一例以资说明。

高能重离子在碰撞时产生高能 γ 射线。这个现象可用W.Bauer等^[21]所提出的n-p碰撞下产生的轫致辐射的非相干叠加（incoherent superposition）的理论来说明。在这理论中需要首先知道核-核开始时核子的动量分布与 γ 射线的产生截面。

用这理论来计算 $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 碰撞时产生的 γ 射线截面，则将比实验上得到的结果为低。

如果考虑了核-核碰撞时，核-核存在着强的相互作用，这相互作用可由RGM计算得到，约为 $40-50\text{MeV}/\mu$ 。核-核碰撞在能量耗散之前，产生加速效应，增加了碰撞核内的核子动量分布中的高能成份。这高能成份会使高能 γ 射线的产额增加。

K.Yabana等^[22]用这种方法所计算得到

的结果与实验是比较符合的。

六、结论

原子核集团模型能对原子核的性质与所产生的现象予以解释，集团是原子核集体运动的一种运动形式。目前原子核的集团模型是在向中重核与重核中应用。

超核与核子夸克集团是集团模型应用的另一方向。超核的研究是将奇异量子数引入集团模型。核子的夸克集团研究是推动对物质结构高一层次的研究的一种探索，所获得的结果是对人们进一步了解原子核内夸克所起的作用是有益的。

参考文献

- [1] J. A. Wheeler, Phys. Rev. 52(1937), 1083, 1107
- [2] K. Wildermuth et al., Nucl. Phys. 7 (1958), 150
- [3] G. C. Phillips et al., Nucl. Phys. 19 (1960), 555
- [4] Y. C. Tang, Lecture Notes in Physics. Vol. 145, Springer, Berlin, (1981)
- [5] Prog. Theor. Phys. (Suppl.) 62 (1977)
- [6] F. Ajzenberg-Selove, Nucl. Phys. A460 (1986), 1
- [7] 施义晋、庄斐、高能物理与核物理 6(1982), 750; 7(1983), 605
- [8] H. Bandō, Prog. Theor. Phys. 66 (1981), 1344
- [9] T. Yamada et al., to be appeared in Phys. Rev. C
- [10] T. Yamada et al., Contributed Papers to the 5th International Conference on Clustering Aspects in Nuclear and Subnuclear Systems, Kyoto, Japan(1988) (以后简称为Contributed Papers to Cluster'88), 364
- [11] L. Majling et al., Contributed Papers to Cluster'88, 366
- [12] H. Tamura et al., Contributed Papers to

- Cluster'88, 368 by Heavy Ions, Tokyo, (1975), 90
- [13] H.Tamura et al., Contributed Papers to Cluster'88, 372
- [14] B. R. Fulton et al., Contributed Papers to Cluster'88, 82
- [15] E. Kuhlmann et al., Phys. Rev. C11 (1975), 1525
- [16] K. Kato et al., Contributed Papers to Cluster'88, 308
- [17] T.Tomoda et al., Proceedings of INS-IPCR Symposium on Cluster Structure of Nuclei and Transfer Reactions Induced
- [18] T. Wada et al., Contributed Papers to Cluster'88, 344
- [19] F. Michel et al., Phys. Rev. C34(1986), 1248
- [20] I. Tonozuka et al., Contributed Papers to Cluster'88, 54.
- [21] W. Bauer et al., Phys. Rev. C34(1986), 2127
- [22] K.Yabana et al., Contributed Papers to Cluster'88, 280