

原子核的结团性质

魏志勇 诸永泰

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

摘要 原子核结团现象是原子核运动中普遍存在的现象,本文评述了原子核结团模型研究的进展和结团思想在核结构性质、核衰变、核反应方面引人注目的发展.

关键词 结团现象, 结团模型, 结团衰变 结团反应.

1 引言

在原子核结构的众多模型中,最突出的是壳模型和集体运动模型.大量的实验分析表明:原子核的运动状态在一些时候表现为十分明显的单粒子运动,而在另外的许多情况下又充分地体现了集体运动的特点,除了这两种典型的方式以外,原子核的运动状态还有另外一种方式,那就是原子核的结团模型所描述的方式.

结团模型的概念始于30年代^[1],经过这几十年的发展,已经从最初研究一些轻核的低激发态和具有 α 结构的核结构,逐渐延伸到高激发态、重原子核的核结构,以及核衰变、核反应等一些领域且日益受到重视.如果说壳模型突出了在平均场中单个核子的运动状态,集体运动模型强调了多个核子在核内的关联而导致的集体行为,那么结团模型反映的是介于它们之间的情况.单粒子运动和集体运动各自反映了原子核运动状态的一个侧面,实际上属于两个极端情况,结团模型的中心内容是:核内部分核子之间有很强的作用而形成一些结团,结团之间的相互作用相对较弱;这样就出现了结团内部强关联和结团之间弱关联的情况.有一些工作将壳模型和结团运动模型结合起来,给出强关联的解对应于壳模型的态,而弱关联的解对应于结团模型的态^[2].壳模型和集体运动模型基本上都是针对于核结构问题的,结团模型则远

远超出了这个范围,它可以用于核反应、核衰变等许多问题中,因此也称之为统一模型^[3].

根据量子力学的观点,任何一个状态都可按任意一个正交完备集展开,选择任意一个正交完备集来描述都是等价的.实际上我们只能取展开式中的有限项来描述一个状态,因此一个好的模型将会使这种展开式中仅仅用一项或少数几项就足以描述这个状态.如Y. C. Tang介绍的 ^8Be 的基态和低激发态 0^+ 、 2^+ 、 4^+ 用结团模型描述时^[4]它们都是 $\alpha + \alpha$ 体系的本征态,但是如果用单粒子谐振子波函数来描写则其基态就需要迭加19个单粒子谐振子波函数本征态.这种能用某个纯态或少数几个纯态的迭加来描述一个体系的状态的方法,确实是手段简洁而物理图像十分清楚的好方法.这也是一个好模型所追求的目标.

2 核结构研究中的结团模型

结团模型起初的工作主要是在核结构研究这个领域,并且基本上限于具有 α 结构的原子核的低激发能级,如把 ^8Be 、 ^{12}C 、 ^{16}O 、 ^{20}Ne 等一些原子核的低激发能级看成由 α 结团组成的体系.原子核的结团模型很好地描述了这些核的部分能级^[2,4],结团模型的理论方法主要有三种.共振群方法(RGM)、生成坐标方法(GCM)和正交条件模型(OCM),其中共振群方法和生成坐标方法都是微观模型,而

正交条件模型则是半微观模型. H. Horiuchi 在 70 年代初证明: RGM 和 GCM 是等价的^[5]. 共振群方法是将 Schrödinger 方程写为投影的形式,

$$\langle \delta\varphi | (H - E) | \varphi \rangle = 0 \quad (1)$$

$$\psi = \sum_r \varphi_r(r_1, r_2, \dots, r_n, \alpha_r) F(\alpha_r) d\alpha_r + \sum_\lambda a_\lambda \rho_\lambda(r_1, r_2, \dots, r_n) \quad (2)$$

φ_r 为基函数, 将试探波函数(2)代入(1), 求解所得的方程, 得到 $F(\alpha_r)$, 这就是 RGM 的基本思想方法.

生成坐标方法实际上也是一种变分法,

选择试探波函数 $|\varphi\rangle = \int f(a) |\varphi\rangle da$

$$\delta \langle \varphi | (H - E) | \varphi \rangle = 0 \quad (3)$$

得 $\int f(a') \langle \varphi(a') | H | \varphi(a') \rangle da'$

$$= E \int f(a') \langle \varphi(a') | \varphi(a') \rangle da' \quad (4)$$

正交条件模型则引入一个条件: 结团之间的相对运动波函数与 Pauli-forbidden 态正

交, 通过这种方式引入 Pauli 原理.

近年来的许多工作^[6]表明多组态结团模型, 不仅可以描述那些具有明显结团结构的原子核的核结构、核反应问题, 而且可以普遍地描写一般的核性质. 例如, ${}^4\text{He}$ 这样的体系就可以用 $d+d$ 、 $d+d^*$ 、 $d+d^{**}$ 、 d^*+d^* 、 d^*+d^{**} 、 $d^{**}+d^{**}$ 等多组态结团来描写, ${}^4\text{He}$ 的基态 0^+ 的结合能和第一激发态 0^+ 能量的实验结果分别为: -28.3MeV 和 20.1MeV . 表 1 为利用多组态结团模型计算的 ${}^4\text{He}$ 的基态 0^+ 的结合能和第一激发态 0^+ 的能量. 多组态结团方法计算的结果和这个实验结果符合很好, 而不考虑结团性质时迭加 15 个高斯函数给出的基态结合能为 -25.55MeV , 不如结团方法的结果好. 因此多组态结团模型是很有效的方法, 使结团模型可以用于很多问题, 大大扩大了原来的应用范围. 重核和高激发态的情况, 当然也很需要多组态结团模型方法的.

表 1

组态	基态能量 (MeV)	第一激发态 (MeV)
$d+d$	-19.21	15.99
$d+d, d+d^*, d^*+d^*$	21.90	18.22
$d+d, d+d^*, d^*+d^*$	-23.08	19.17
$d+d^{**}, d^*+d^{**}, d^{**}+d^{**}$	-25.17	20.07
$p+t, n+h$	-26.03	20.05
$p+t, n+h, d+d$	-26.28	20.18
$p+t, n+h, d+d, d+d^*, d^*+d^*$	-26.50	20.07
$p+t, n+h, d+d, d+d^*, d^*+d^*$ $d+d^{**}, d^*+d^{**}, d^{**}+d^{**}$		

3 结团放射性

对原子核的衰变方式, 了解较多的是 α 、 β 、 γ 放射性, 此外还有质子放射性以及缓发质子, 缓发中子等放射性过程. 近年来又发现了重离子放射性这种新的衰变方式. 重离子放射性也叫结团放射性, 主要是一些很重的原子核自发地放出 ${}^{14}\text{C}$ 、 ${}^{20}\text{O}$ 、 ${}^{24}\text{Ne}$ 、 ${}^{26}\text{Ne}$ 、 ${}^{28}\text{Mg}$ 、 ${}^{32}\text{Si}$

等一些较重的结团^[7,8]. 尽管这种重离子衰变过程的衰变强度比 α 衰变强度要小许多个数量级, 但是对这种过程的研究将会对研究原子核提供更为深刻的认识.

结团放射性的理论模型主要有两种, 一种是把它看作一种极不对称的裂变过程, 将 α 衰变、重离子放射性和自发裂变进行统一地描述. 母核通过自发形变穿过由液滴模型加

壳修正所确定的形状位垒而发射出结团重离子. 由于过去对于复合核衰变, 以及裂变过程的研究积累了许多经验, 因而这种方法的定量计算发展很快. 另外一种重要的理论模型是结团发射模型^[9]. 母核内形成了多个重离子结团, 它们通过位垒穿透发射出来, 发射的几率取决于两个因素, 一个是结团形成的几率, 这和 α 衰变中的 α 粒子的形成因子类似, 另一个则是隧道贯穿的几率.

究竟结团粒子是事先就存在于核内, 还是发射过程中才生成还不能直接判定, 但是结团发射模型有一个很重要的结论: 认为母核内形成了多个重离子结团, 这样 ²²³Ra 在衰变过程中将发射出 ¹⁴C 而不是想像中结合更紧的 ¹²C. 实验结果对此论断给了有力支持.

4 核反应中的结团现象

50 年代中期, M. G. Meshergakov 用 600 ~ 700MeV 的质子研究了 (p, pd) 反应, P. Cuer 等人用 180 ~ 340MeV 的质子研究了 p + ¹²C 敲出过程中 α 的动量分布, 从此以后这方面的研究日益广泛深入. 主要有以下几个方面的进展: (1) 敲出反应, (2) 结团转移反应, (3) 分子态和共振结构, (4) breakup, (5) fragmentation.

核反应中关于结团现象的研究是相当广泛的. 在分析直接反应问题时, 许多情况都是将炮弹或靶子分为由一个核芯与一个较简单的复合粒子组成的体系, 在直接反应中该复合粒子发生转移过程, 或者被敲出, 因此对轻体系, 尽管没有明显说明, 但实际上在处理中大家都假定: 靶子和炮弹都是由一些结团组成的, 由此结团反应的思想自然地采用了.

此外, 有些实验对于认识结团反应的性质有重要的作用, 如重离子散射中的后角散射异常, 这种向后散射异常是指散射截面在后角不但不减小反而增大, 并且有明显的振荡, 这有多种机制存在, 其中有弹性转移过程的贡献: $C_1 + (C_2 + x) \rightarrow (C_1 + x) + C_2$, 当 C_1 和 C_2 相同时就是弹性转移. 振荡结构也有多

种原因, 核分子态便是其中之一, 核分子态就是一种结团现象.

敲出反应可探测结团波函数的低动量部分, 往往对应于结团之间结合弱的情况. 对于中重体系的核反应过程, ²⁰Ne、¹²C 等炮弹引起的周边碰撞, 许多动力学计算都将它们作为多个 α 组成的体系来处理.

对于重体系的核反应过程, 其周边碰撞引起的 breakup 也是一种结团反应过程, 甚至有些科学家将目前中能重离子核反应中热门的课题 fragmentation 都看成是一种结团现象^[2]. 这种看法实际上也是有道理的, 重离子核衰变是一种冷的结团发射过程, 而 fragmentation 则是有一定激发能的热的结团衰变过程, 从此意义上讲它们都是同一类过程.

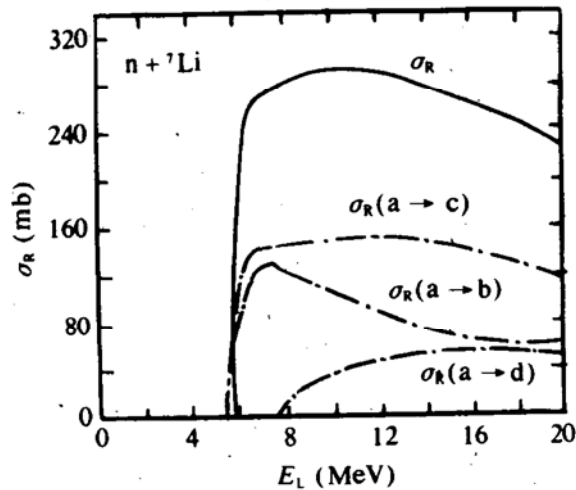


图 1

轻体系中的核反应利用结团方法处理已经有一些结果. 如 n + ⁷Li 的反应截面计算^[10], 考虑 t + ⁵He (图中的 a -> b)、⁴He + ⁴He (a -> b)、n + ⁷Li* (a -> c) 三种结团反应过程, 就基本上反映了其主要的内容, 对于重体系和高激发能的情况当然也可以这样处理, 但要比这复杂得多.

5 结束语

几年前美国科学家 D. Allan Bromley 强

调指出:结团现象的研究是一个很有活力、有巨大潜力、有前途的发展方向.有关结团现象的研究工作已取得了一系列进展,并且日益受到重视,但它又是一个十分难对付的课题,其中一个难处理的问题是:在 Pauli 限制下,多体问题的描述方法和结团之间的相互作用.对于目前的一些实验事实的分析尚不统一,结团现象的研究正处在发展之中.

有关结团现象的一些研究方法不仅是核物理研究所追求的,而且是原子物理,分子物理等诸多学科目前正在探索的,除基础研究外,许多和应用直接相关的研究领域也对此有极大的兴趣^[11].

参 考 文 献

1 Wheeler J A. Phys. Rev. , 1937, 52 : 1083, 1107

- 2 Wildermuth K, Tang Y C. A Unified Theory of The Nucleus, Academic Press, New Youk, 1977
- 3 Price P B, et al. Phys. Rev. Lett. , 1985, 54 : 297
- 4 Clustering Aspects of Nuclear Structure, edited by Lilley J S and Nagarajan M A. Reidel D Publishing Company, 1985
- 5 Tang Y C. Microscopic Description of the Nuclear Cluster Theory in Lecture notes in Physics, Springer-verlag Berlin, 1981, 145
- 6 Horiuchi H. Prog. Theory Theory Phys. 1970, 43 : 375
- 7 Tang Y C. Nucl. Phys. , 1987, A463 : 377c
- 8 Blendowske R, et al. Nucl. Phys. , 1987, A464 : 75
- 9 Ronen Y. Phys. Rev. , 1991, C44 : R594
- 10 Fujiwara Y, Tang Y C. Phys. Rev. , 1990, C41 : 28
- 11 Clustering Phenmoena in Atoms and Nuclei, International Conf. on Nuclear and Atomic Clusters 1991, Finland (springerverlag Berlin Heidelberg 1992) ed. by Brenner M, Lonroth T, Malik F B.

Clustering Property of Nucleus

Wei Zhiyong Zhu Yongtai

(Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000)

Abstract Clustering phenomena exist in all the field of the nucleus. In this paper the development of the cluster model and its use in nuclear structure, nuclear radioactivity, and nuclear reactions are described.

Key Words clustering phenomena, cluster model, cluster radioactivity, cluster reaction.