

α 结团和集体低位态

顾金南

摘要: 核内 α 结团和集体低位负宇称态早就发现了,但理论上未能很好解释。本文介绍了最近一些典型实验所给出的新信息,老理论似乎更不能完满的解释。人们正在发展老的理论或寻找新的途径,现在 α 结团问题正在和集体低位态(特别是低位负宇称态)沟通起来, α 回弯现象也可将二者联系起来。其结果,可能导至对一些问题的重新认识或甚至解决。所以,这个课题是远离 β 稳定性核性质和高自旋态的新课题,也是核表面结构的一个大课题。

(一) 引言

α 结团问题要追溯到 α 衰变。 α 衰变的历史比核物理的历史长得多。早在本世纪20年代, Gamov以及Condon和Gurney等已各自独立地提出 α 衰变理论^[1](α 粒子在其它粒子所产生的势阱中运动);到30年代,提出了 α 粒子模型(主要用来讨论轻核结构)。后来, α 结团模型^[2]才代替了 α 粒子模型。对轻核, α 结团模型似已确立,多次结团问题国际会议讨论了这一课题。但对中重核,仍争议很大,核表面是否存在相对稳定的、动态的 α 结团呢^[3]?

只是近几年,实验信息表明,中重核表面 α 结团激发可能和轻核 α 结团问题同样重要^[4]。

理论上对于最古老的 α 衰变问题仍未解决, α 衰变和 α 转移几率的实验值与壳模型理论值,对一些核,可以差几个量级。 α 约化宽度的绝对值也是这样(相对趋势两者符合好一些)。所以这次苏州会议(苏州:国际原子核集体态讨论班,1983.9月)上A. Arima说, α 衰变问题是一个十分复杂但仍是一个十分感兴趣的课题。

Stephens等最早发现Ra区核的低位负宇称态^[5]。哥本哈根组考虑它源于八极方式^[6]。大致有几种解释。对这些解释似都有争议。

Iachello等人最近建议^[4],这些低位负宇称态(有人称之为八极态或八极带)与 α 结团激发相关联。从我们的工作中可以看到,这些具有特别低的负宇称态的核正处于 α 回弯曲线(根据核的 α 衰变能所作)的回弯区^[7]。这些核的 α 约化宽度也特别大,在低位集体态就有较丰富的自由度激发。

下面将首先介绍最近一些典型实验所提供的新的信息。

第一类实验是集体低位态,利用(主要是重离子)全融合退激到达集体低位态^[8],例如²¹⁸Ra

第二类实验是 α 转移反应^[9], ($d, {}^6\text{Li}$), (${}^6\text{Li}, d$), (${}^{16}\text{O}, {}^{12}\text{C}$), (${}^{12}\text{C}, {}^{16}\text{O}$)等

第三类是 α 衰变^[4]

然后将介绍对这些实验所作的可能的理论解释。这些理论或模型有的是才开始,例如Iachello的 α 结团分子理论,有的是由于最近实验提供的新信息而重新加以探讨,例如认为基态存在稳定的八极形变的理论^[10]。

最后将表明 α 回弯现象^[7]是规范空间转动现象的一种表现,它将把 α 衰变、 α 结团和

一些核的低位集体态激发沟通起来。

可能的结果:

〈1〉 中重核内 α 结团问题的重新认识和逐步解决。

〈2〉 核表面是光滑的, 还是粗糙的, 存在某些子结构—结团呢!

〈3〉 在基态和低激发范围内, 核内新的集体自由度, 例如八极自由度或偶极自由度的确立。

〈4〉 远离 β 稳定线核性质研究的新领域。例如稀土区 ($Z \approx 56, N \approx 88$) 核、铜系区 ($Z \approx 88, N \approx 134$) 核, 它们的集体自由度、可能还有单粒子自由度有十分丰富的内容, 人们既可以分别研究之, 又可以联系起来综合研究。

〈5〉 高自旋态的新课题

以前和现在正在研究的是转动科里奥利力与对力、四极场与对场的矛盾。而对转动科里奥利力与四核子关联、八极场(偶极场!)与 α 结团场的矛盾的研究可以说尚未展开, 这显然是高自旋态的一个新课题。

(二) 几个典型的实验

〈1〉 M. Gai^[8]等用碳离子 ($E_{C^{12}} = 59.0$

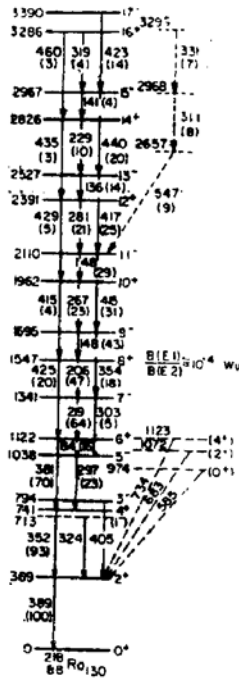


图1 ^{218}Ra 的低自旋和高自旋态

$\text{MeV} \rightarrow 67.0 \text{ MeV}$) 轰击铅, $^{208}\text{Pb}(^{13}\text{C}, 3n)^{218}\text{Ra}$ 反应得到 ^{218}Ra 低位集体谱。(见图1)

这种集体谱显示如下特征:

负宇称态 (NPS) 能量特低 (1^- 态: 713 keV)。正负宇称态 $0^+, 2^+, 1^-, 4^+, 3^-$ 后规则排列 $5^-, 6^+, 7^-, 8^+ \dots$ 。

gsb与Npb之间的 $B(E1)$ 约化跃迁几率特强, 而且分支比 $E1/E2$ 近似为常数。

从图2可见, 随中子数的变化, $B(E1)/B(E2)$ 从 $7.0 \times 10^{-5} \leq B(E1)/B(E2) \leq 9.5 \times 10^{-5}$ (Weisskopf 单位: w.u.) 到 $B(E1)/B(E2) \cong 3 \times 10^{-6} \text{ w.u.}$ 。不仅 $B(E1)$ 增强, $B(E3)$, $B(E2)$ 也都有增强。我们从转动 90° 不变性的讨论中还得到 $B(E4)$ 也可能增强。

其它信息: 基态 α 约化宽度 $Q^2 = 75\%$ 是这个区域中的核所具有的最大的 Q^2 ; 另外, 这个核处于 α 回弯^[7]曲线的回弯区。

这种(正负宇称态的)现象是很普遍的, 从轻核、例如 ^{20}Ne 的激发态, 到中重核(基态或激发态)都存在这种现象。 ^{218}Ra 是中重核中的一个典型。理论上怎么解释这些现象呢?

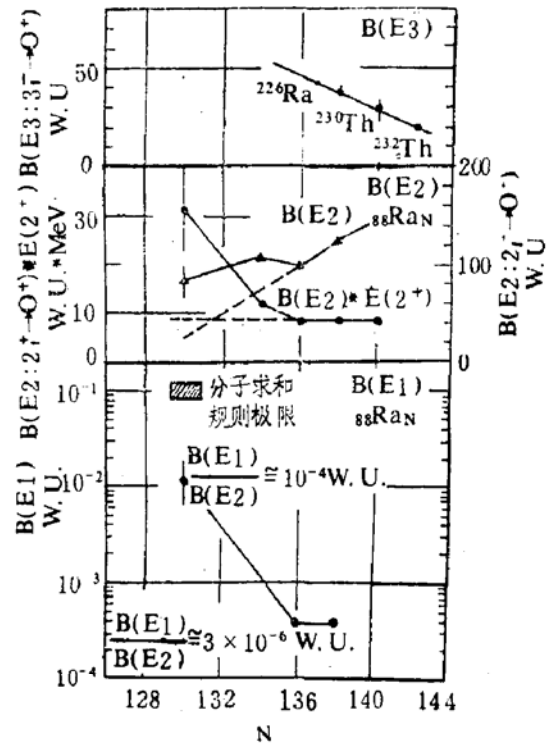


图2 核 ^{218}Ra 增强了的 $E1$ 、 $E2$ 和 $E3$ 跃迁

下面作简单介绍。

〈2〉 α 转移实验所提供的新信息^[9]。J. Jänecke等用 α 结团拾起反应 ($d, {}^6\text{Li}$) ($E_d = 55\text{MeV}$) 研究了余核 ${}^{228}\text{Ra}$ 和 ${}^{234}\text{Th}$ 的基态带, 得到了绝对 α 约化宽度, 与从 α 衰变得到的 α 约化宽度值一致。不仅如此, 还得到了几组激发的转动带, 其带头能量为: ${}^{228}\text{Ra}$ 的 $E_x = 700 \pm 40, 1070 \pm 60, 1390 \pm 60\text{keV}$; ${}^{234}\text{Th}$ 的 $E_x = 810 \pm 30, 1150 \pm 40, 1470 \pm 40\text{keV}$ 。在这些激发的转动带中, 有强的有选择的激发, 即大的 α 结团拾起截面, 或大的绝对 α 约化宽度, 这是出乎意料的, 出乎现有的理论模型的预期的。这可能意味着中子对和质子对激发的相干 (Coherent) 贡献能导致强四体关联, 和 (或) 导致新的集体激发类型, 它有利于四重 (quartet) 结构。这类实验也发现, 约在中心电荷密度 (或核物质密度) 0.3%处, 核表面 α 结团几率达到25%, 这表明在核表面存在着 α 结团浓缩 (Condensation)

这就是所谓的钢系迷惘 (puzzle), 还有稀土迷惘^[6]。这些实验结果似乎都不是现有理论模型所预期的。各种实验, ($d, {}^6\text{Li}$) 和 (${}^{16}\text{O}, {}^{12}\text{C}$) 等表明: 激发了的 α 结团态的存在是所有中重形变核的共同特征。

这里附带说一下, 例如从转移反应 ${}^{208}\text{Pb} ({}^{16}\text{O}, {}^{12}\text{C}) {}^{212}\text{Po}$ 截面提取的 α 约化宽度比 $Q_{\alpha}^2(\text{Cal})/Q_{\alpha}^2(\text{Exp})$ 为 $10^{-2} \rightarrow 10^{-6}$ 与 ${}^{212}\text{Po}$ 的 α 衰变得到的 $Q_{\alpha}^2(\text{Cal})/Q_{\alpha}^2(\text{Exp})$ 是相一致的^[3]。当然, ${}^{212}\text{Po}$ 的 α 衰变是上述转移拾起的逆过程。

〈3〉 α 衰变实验, 例如 ${}^{226}\text{Th} \rightarrow {}^{222}\text{Ra}$, 表明这些核有异常低的禁戒因子^[4]。见图3。

F (hindrance factor) = $\lambda_{\text{th}}/\lambda_{\text{rot}}$, λ 是衰变常数, 如果说偶偶核基态 $F \approx 1$, 则激发态的 F 往往是几个量级, 但在 $Z \approx 88, N \approx 134$ 区域, 核有异常低的值, 这从图3可见。

α 衰变实验也对理论模型作检验, 例如认为负宇称态是八极声子态的模型预期, 单声子态能量 $\approx 250\text{keV}$, 则双声子态约在 $400 \sim 500\text{keV}$, 但仔细的 α 衰变实验并未发现

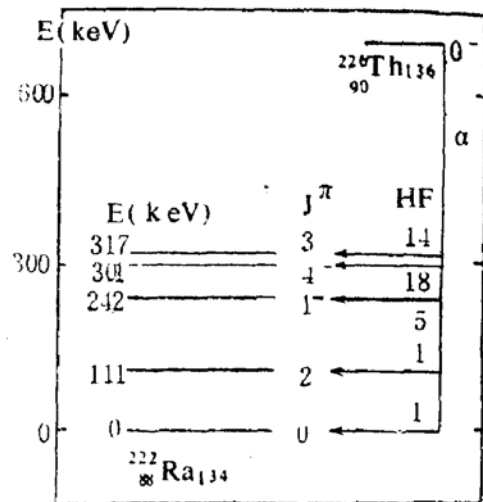


图3 ${}^{226}\text{Ra}_{138}$ 的实验低位谱, α 衰变禁戒因子 (F) 也列在图中。

这种双声子态。

综上所述, 这类现象都发生在如下区域, 钢系区 $Z \approx 88, N \approx 134$ 和 $Z \approx 92, N \approx 146$ 以及稀土区 $Z \approx 56, N \approx 88$, 所以, 这不是个别现象。特别是钢系区 $Z \approx 88, N \approx 134$ 附近的核, 其NPS的能量特低 ($200 \sim 300\text{keV}$), α 约化宽度值特大, 又都处在 α 回弯曲线回弯区。这些实验数据分析的结果告诉我们, 研究它们的性质是很有意义的。例如 ${}^{218}\text{Ra}$, 它的基态可能就 (或近似地) 是 α 结团态 ${}^{218}\text{Ra} \approx {}^{214}\text{Rn} + \alpha^{[8]}$, 可能就具有稳定的八极形变。

(三) 理论

关于 α 衰变的理论 (包括 α 约化宽度) 在引言中已作简单介绍。至于低位负宇称态的解释都迁到一些困难。基态有无稳定的八极形变仍有争议, 特别是Ra、Th区大的 $B(E1)$ 值理论上能否符合, 由于计算的困难, 这种理论都未去计算或讨论 $B(E1)$ 问题^[10]。认为低位负宇称态是八极声子激发的理论的困难是, 实验上没有找到这种双声子态。对这两种理论, 特别是前者, 仍有很多人去努力探求。

前述理论都有几十年的历史了, 有大量

文献可供参考。这里想稍为详细介绍最近二、三年提出的一种模型理论^[4]，有的称之为 α 结团分子模型。即考虑 $A \Rightarrow B + \alpha$ ， α 与 B 核可以正体转动，也可以相对振动，类似于双原子分子。这种图象用四个自由度描述之， S ($L=0$) P_μ ($L=1, \mu=0, \pm 1$) 四种玻色子组成 $U(4)$ 群，它有两个子群链

$$U(4) \supset O(4) \supset O(3) \cdots \text{I}$$

$$\supset U(3) \supset O(3) \cdots \text{II}$$

前者 (I) 呈现转动谱特征；后者 (II) 呈现振动谱特征，描述这种分子态的相对振动，所以它是相互作用玻色子模型 (IBM) 的一种推广。

当然，这种图象是过分简化了。在实际问题的讨论中，必须考虑偶极自由度与其它自由度的偶合，例如占四极自由度 (d 玻色子) 或 (f 玻色子) 八极自由度的偶合。即使这样，这种图象仍有它的简明处，计算也较容易。

这种图象或理论是半唯象的，它的生命力在于能否很好解释实验以及它的微观基础。

讨论这个区域原子核性质之所以复杂，在于它有很多自由度被激发。大形变核四极形变是主要的，但这些核，例如 ^{218}Ra ，各种形变 $\beta_2, \beta_3, \beta_4$ (亦许还有 β_1) 的大小可能都是同一量级的。因而，区分不同自由度的效应就是十分重要的了。例如，利用绕垂直于对称轴的轴转动 $\frac{\pi}{2}$ 不变性可清楚地讨论十六极自由度的效应。要是做不到这点，任何模型理论都会碰到困难。

(四) 结束语

如前所述，实验提出了不少问题，原有的理论似都难给以满意的解释，而 α 结团分子模型还没有对实验结果作出系统分析。我们认为：这些区域核性质之所以复杂，一是与 α 结团态的混杂有关，这从 α 回弯曲线^[7]可

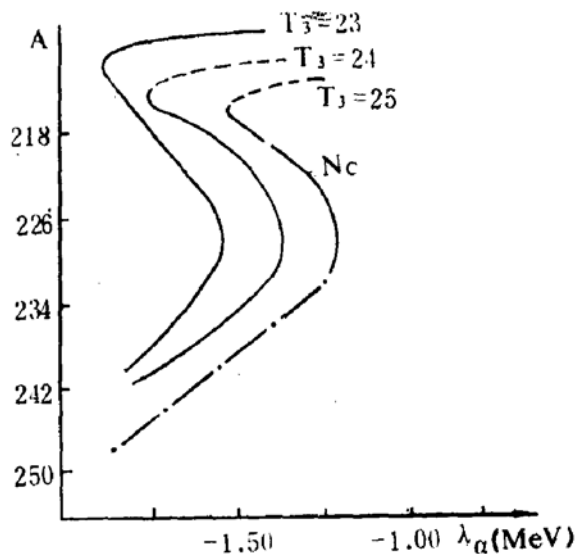


图4 一些核的 α 回弯曲线 λ_α , T_3 , A 的解释见文献[7]

见，这些核正处于回弯区 (N_c 附近) 相对于 α 结团态是不稳定的，或者说易于产生 α 结团激发。而 α 结团问题至今并没有很好解决，特别是在中重核内， α 结团约化宽度 Q^2_α 的理论值与实验值 (绝对值) 可差几个量级。二是与多自由度的共存和激发有关，例如偶极 (极化) 四极形变、八极形变、十六极形变等都有，这显然给分析和讨论问题带来困难。

困难、复杂并不可怕，解决之后就会使人们的认识前进一步。自五十年代初Bohr-Mottelson集体模型提出后人们主要研究了四极自由度 (IBM也是这样) 和对力，和在转动之下这两者是如何变化或如何关联地变化的。当然，集体自由度不仅是四极自由度，还有偶极八极等自由度。短程残余相互作用不仅是对力，还有四核子关联场，或四体 (!) 力。人们已开始认识到要把它们联系起来研究，可能，现在正处在解决这些问题的前夜。而在转动之下这一对矛盾 (偶极!) 八极场与四核子关联场是如何变化的规律的认识，必将使我们对转动自由度、形状对称性等远离 β 稳定性核的性质的认识大大前进一步!

参 考 文 献

1. G. Gamov *Z. Phys.* 51 (1928) 204;
52 (1929) 496
R. Gurney, E. Condon *Nature*, 122
(1928)439; *Phys. Rev.* 33. (1929)127
2. W. T. H. Van Oers et al. *Clustering Aspects of Nuclear Structure and Nuclear Reaction* (1978)
3. A. Arima *ibid* P1—34
4. F. Iachello, *Nucl. Phys.* A396 (1983)
253.
F. Iachello, A. D. Jackson,
Phys. Lett. 108B (1982) 151
5. F. Stephens et al. *Phys. Rev.* 96
(1954) 1568; 100 (1955)1543
6. K. Alder et al. *Rev. Mod. Phys.*
28 (1956) 432
7. 顾金南 *Proc. of workshop on Nucl. Coll. States Suzhou* (1983) 44
8. M. Gai et al. *Phys. Rev. Lett.* 51
№8 (1983) 646
9. J. Jänecke et al. *Phys. Rev.* c26
(1982) 405; *Phys. Rev.* c23 (1981)
101
10. G. A. Leander, R. K. Sheline,
Nucl. Phys. A388 (1982) 452