

重离子碰撞中的共振结构研究*

李庆利

(中国原子能科学研究院, 北京)

摘要: 本文综述了重离子碰撞中共振结构研究的发展概况, 后角增强的共振现象, 以及介绍了中国原子能科学研究院在该领域的工作。

一、引言

重离子碰撞中共振结构研究是重离子核反应机制研究中非常活跃的一个领域。从开始就显示出了对核物理及其他学科的深远影响。当D. A. Bromley等在Chalk River 1959年首次观测到低能 $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 碰撞系统的共振结构时, 不仅使人们对核的运动及相互作用规律有了新的认识, 提出了许多新的概念。诸如核反应的中间过程, 核分子态等, 而且由于共振的存在, $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 截面比原来估计的大了数倍, 这对天体物理学中恒星的演变, 曙暮光的相位 (twilight phases) 等研究都产生了重大影响^[1]。

核分子的概念最初是由原子分子的概念发展借用来的。大多数原子分子是稳定的。

但核分子的情况有所不同。由于核力的短程性质, 核分子是由几乎碰在一起的原子核构成的。核分子态存在在一个很短的时间内, 我们仅可以作为核反应过程中存在的一个中间态探测。

目前很多文献把核分子称为Orbiting Dinuclear Complex (DNC)^[2], 它与复合核在几个方面有所不同。首先在形状上, DNC形状是哑铃状, 而复合核是球形或近于球形的变形核; 在衰变方式上, DNC仍以入射道相同的道或少数核子交换的直接碎裂衰变为主, 而复合核的衰变是以蒸发轻粒子为主, 通常认为复合核失去对入射道的记忆, 而DNC的Orbiting过程是对入射道有强的记忆; 复合核的寿命是 10^{-19} 秒, 直接反应的寿命是 10^{-23} 秒, DNC的寿命是在直接反应与复合核过程之间即 10^{-20} — 10^{-21} 秒。

*该工作为国家自然科学基金资助项目。

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

对于核分子态的观测通常的方法是核反应激发函数的测量。如果两个核仅仅相互通过一下，仅交换少量能量和一、二个核子，激发函数上截面随能量光滑地变动，这是反应进行很急剧的一个特征，也就是直接反应。如果在反应中二个核结合成一个复合核，那么截面随能量将有一个很急剧的变化，激发函数上呈现几个 keV 的峰，这相应于复合核的能级。这可以由测不准关系式 $\Gamma \cdot \tau \approx \hbar$ 估算， Γ 为峰的半宽度， τ 为反应时间， \hbar 为普朗克常数， $\hbar = h/2\pi$ 。对于核反应的中间过程即核分子态，在激发函数上应当有几十——几百 keV 的共振结构。因此重离子碰撞中的共振结构研究是与核反应的中间过程及核分子态密切相关的。当然激发函数上中间宽度的共振结构也可能由其他原因产生^[8]。

二、共振结构研究的发展概况

重离子碰撞中共振结构研究至今已有近 30 年的历史。目前世界上许多国家的实验室在实验和理论上对重离子反应中激发函数上的共振结构仍然进行着大量研究^[4]。

1977 年在南斯拉夫举行的关于重离子反应中共振现象研究的国际会议有来自 17 个国家的 70 名代表参加。D. A. Bromley 在报告中提出了著名的六大 Open questions，其中一些问题至今并没有解决。诸如，核分子现象的出现与碰撞体系的质量数 A ，电荷数 Z 和激发能 E^* 究竟有什么关系？什么条件决定了核分子现象是可观测的？在一些更重的碰撞体系中是否能观测到该现象？^[5]

1981 年在西德 Bad Honnef 举行的关于重离子反应中共振研究的学术讨论会有十几个国家的代表参加。会议制定了公约对分子共振的定义；共振的自旋给定；约化宽度计算及角分布的测量等都作了明确的规定和要求。^[6]例如规定至少在二个出射道角度积分

截面上有共振，且共振要有唯一的自旋和宇称才能认为是核分子共振。这表明该领域的研究工作由于国际交流与合作的需要已发展到规范化和统一化的阶段。

1986 年在英国 Harrogate 召开的国际核物理会议上，仅这方面的文章就有十几篇，该课题已成为重离子反应中众所瞩目的几大课题之一。^[7]

30 年来该领域总的发展趋势是所涉及的核由轻到重逐步扩大，能量由低到高逐步扩展，研究方法及涉及的反应道也由弹性散射道，非弹性散射道发展到其他反应道越来越复杂。

①核的范围：最初是以研究 P 壳核为主，主要是 $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ ， $^{12}\text{C}+^{16}\text{O}$ 以及 $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ 等。特别是对 $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 实验上测量的比较系统，理论上 H. Feshbach 也作了不少工作，在 1977 年 “Europhysics Conference on Medium Mass Nuclei” 会议上有个系统综合性的报告^[4]。70 年代末到 80 年代初，主要工作发展到 ^{12}C ， ^{16}O 与 sd 壳核，特别是偶核的碰撞如与 ^{20}Ne ， ^{24}Mg ， ^{28}Si ， ^{32}S 以及 ^{40}Ca ，另外也开展了 sd 壳偶核之间的碰撞如 $^{24}\text{Mg}+^{24}\text{Mg}$ ， $^{28}\text{Si}+^{28}\text{Si}$ ， $^{40}\text{Ca}+^{40}\text{Ca}$ 等。80 年代少数实验室的研究已向 fp 壳的核发展。Oak Ridge 小组用 New Holifield Tandem 作了 $^{60}\text{Ni}+^{60}\text{Ni}$ 在 $E_{\text{Lab}}=228\text{MeV}$ 时的弹性与非弹散射角分布。该能量相当于在库仑位垒附近。目前还没有测出激发函数。这是到目前为止实验研究所涉及的较重的碰撞体系。

②能量范围：最早的 $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 碰撞系统中的共振是在库仑位垒以下发现的，后来发展到库仑位垒附近以至几倍库仑位垒的能量范围。

③反应道：最初是测弹性散射道为主，发展到非弹道及转移反应道，其中主要是转移 α 的反应道或出射 α 的反应道如 (^{16}O ， ^{12}C)，(^{12}C ， α) 等以及 γ 道。后来有些实验室发展到深部非弹，连续谱范围。也有人专门研究角动量匹配道与角动量失配道共振结构的

比较问题^[8]。还有人提出了研究多粒子末态中可能的准分子态问题^[9]。

④其他研究手段和方法：除测量激发函数之外，有人提出了研究观测分子态之间的直接电磁辐射。如对 $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 碰撞系统，观测 ^{24}Mg 的能级间的 γ 跃迁^[10]。也有人提出用 $^{12}\text{C}(^{16}\text{O}, \alpha)^{24}\text{Mg}$ 转移反应的能谱法来代替 $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 碰撞体系中 C^{12} 出射的激发函数测量^[11]。

三、共振现象的“普遍性”

重离子碰撞中的共振结构研究领域之所以非常活跃，是由于不断有新的实验现象被观测到。除了对已发现的共振作了更加细致的测量之外，人们不断地打破一些原有的观念和框框，在原来没有预计到或认为可能性不大的一些碰撞体系里观测到了新的共振。人们原来的框框部分来自于对于能级密度与中间共振的关系认识不全面。原来普遍认为奇核系统或较重的碰撞体系以及激发能高了以后，复合体系的能级密度太高，相互重叠，因而难于观测到共振。然而实验表明，恰恰在这些碰撞体系和能区观测到了共振结构。因而人们开始感到这种共振现象可能有一定的“普遍性”。

例如，原来人们认为之所以在 $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ ， $^{12}\text{C}+^{16}\text{O}$ 及 $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ 这些系统中发现共振结构，说明 α 次结构有重要作用，于是人们有意选用入射粒子和靶核都是 α 粒子缀合核来研究。但后来在 $^{12}\text{C}+^{14}\text{C}$ 以及 $^{14}\text{C}+^{14}\text{C}$ 系统中也先后发现了共振结构。D.Konnerth等人(1980)^[12]测量了 $^{14}\text{C}+^{14}\text{C}$ 弹性与非弹性散射在 $E_{cm}=6-35\text{MeV}$ 能区，观测到明显的共振结构与 $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ 散射发现的类似。R.M.Freeman等人(1981)^[13]用测量 γ 跃迁观测到在 $E_{cm}=12.5-32.5\text{MeV}$ 能区， $^{14}\text{C}+^{14}\text{C}$ 在非弹，转移以及熔合蒸发道有关联的振荡结构。虽然 ^{40}Ca 是 α 缀合核，H.Dobre等人(1975)曾作过 $^{40}\text{Ca}+^{40}\text{Ca}$

碰撞体系弹性散射实验却没有发现共振结构^[14]。这些实验说明 α 次结构并不是构成分子态共振的主要条件。

D.L.Hanson、D.A.Bromley(1974)^[15]从能级密度考虑预言 $^9\text{Be}+^{12}\text{C}$ 体系在库仑位垒附近是继 $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ ， $^{12}\text{C}+^{16}\text{O}$ 和 $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ 之后出现准分子共振的可能性最大的体系。但M.Hugi等人(1982)^[16]测量了该反应 $^{12}\text{C}(^9\text{Be}, X)$ ， $X=p, d, t, \alpha$ ， $E_{cm}=5.9-15.4\text{MeV}$ 的266条激发函数，表明没有明显的关联共振。后来在 $^{12}\text{C}+^{19}\text{F}$ ^[17]， $^{12}\text{C}+^{27}\text{Al}$ ^[18]奇核碰撞体系都观测到了明显的共振结构，这更是原来的理论所无法解释的。

1982年在美国Michigan State University核碰撞国际会议上，该研究领域的先驱D.A.Bromley作了开场报告“Gateway To the Unknown”^[19]引用R.R.Betts^[20]的一个新的实验事实即 $^{28}\text{Si}+^{28}\text{Si}$ $E_{cm}=53-61\text{MeV}$ 弹性散射激发函数上有明显的共振(见图3)。这是相应于复合体系 ^{56}Ni 在激发能70MeV左右有几个窄的量子态被激发。从目前所有的核模型计算告诉我们，这时的能级密度达到每MeV每个自旋有1万—10万条能级(这时复合体系的能级自旋为36, 38, 40 h)。因而D.A.Bromley惊呼：实验上竟然在这样高的能级密度下观测到几个窄的共振，这在几年前人们是难以想像的。

这些事实说明尚有某种“选择性”还没有被人们认识，人们原来认为当复合体系的能级密度太高，相互重叠因而难于观测到共振的论点看来并不是绝对的。直到目前为止，共振出现的规律性尚未被清楚地总结出来，因而对尚未探讨过的碰撞体系进行较系统地研究是十分必要的。

四、后角增强的共振现象

1977年P.Braun-Munzinger^[21]，J.Barrette^[22]及M.R.Clover^[23]等在 $^{16}\text{O}+^{28}\text{Si}$ 体系弹性和非弹散射角分布上观测到在 $\theta_{cm}=\theta_{cm}$

180°的反常大截面,进而观测到 $^{12}\text{C}+^{28}\text{Si}$ 和 $^{16}\text{O}+^{28}\text{Si}$ 在 $\theta_{\text{cm}}=180^\circ$ 激发函数上强的有规律的粗结构。其角分布的特点是:在中间角区和大角区,角分布的振荡行为是骑在前角度指数下降的衍射振荡的自然伸展之中;振荡的角度间距大约为 $\Delta\theta=\pi/lgr$,很多角分布在大角度可以被简单地用 $P_l^m(\cos\theta)$ 图型描述。 l 取接近于擦边角动量 lgr 的值。随后 ^{12}C , ^{16}O 在与sd壳的其他一些偶核如 ^{20}Ne , ^{24}Mg , ^{40}Ca 的碰撞中也观察到类似的现象^[24]。有时共振也出现在(^{16}O , ^{12}C)转移反应道中。尤其值得注意的是 ^{12}C 与sd壳的某些奇核构成的碰撞体系也观测到了后角共振如C.F. Maquiere等人^[17]在 $^{12}\text{C}+^{19}\text{F}$ 及A. Roy等人^[18]在 $^{12}\text{C}+^{27}\text{Al}$ 奇核碰撞体系都观测到了明显的共振结构。

目前对后角增强的共振结构的机制仍在讨论中,但已有几种理论有迹象表明有可能较好地解释某些实验数据。

1. 用分子轨道理论计算弹性转移

如在 $^{20}\text{Ne}+^{24}\text{Mg}$ 体系,所测量的弹性散射产额是由两种不同的反应机制贡献的。第一种 ^{24}Mg (^{20}Ne , ^{20}Ne) ^{24}Mg ,这是真正的弹性散射;第二种 ^{24}Mg (^{20}Ne , ^{24}Mg) ^{20}Ne ,这就是弹性转移。在实验上测量 ^{20}Ne 是无法区分这二种机制的。这也相当于二个 ^{20}Ne 共价一个 α 粒子,要解耦合道方程计算截面。在考虑了弹性转移之后可以解释某些大角反常角分布。

分子轨道理论最早是由W. Von Oertzen提出的,1987年末他与B. Imanishi对该理论作了一个总结^[24]。南开大学何国柱教授等在该理论的计算方面也作了不少工作^[26]。由二个相同核共价一个 α 集团发展到不同核共价一个 α 集团以及发展到计算奇核系统。我们将合作对 $^{19}\text{F}+^{12}\text{C}$, $^{27}\text{Al}+^{12}\text{C}$, $^{31}\text{P}+^{12}\text{C}$ 体系分别处理为 ^{16}O 与 ^{12}C 共价一个t集团, ^{24}Mg 与 ^{12}C 共价一个t集团, ^{28}Si 与 ^{12}C 共价一个t集团来计算截面并与实验进行比较。

2. Orbiting Model

在碰撞体系中的两个核首先被核势吸引,完成几圈转动。在相互回绕转动中它们每个核本身的组成保持不变,但相对动能可以转化为内部激发能和角动量。该系统最后要分开为二个激发的组态。Oak Ridge实验室D. Shapira等人^[27]在这方面作了大量工作,进一步区分了两个核在碰撞时Sticking和Rolling等几种运动方式,并计算了在不同运动方式时体系所具有的能量,很好地解释了部分后角反常的共振实验。

3. Landau-Zener Effects (双中心壳模型)

双中心壳模型可以很好地描写碰撞体系从两核分离到两核完全融合的过程。为了使模型有真正物理的渐近行为,可以调正核势中 L^2 项和 $L\cdot S$ 耦合项的系数,使在两核分离时产生实验上测得的两核原来的能级,当两核融合时模型产生复合核的能级。从二核完全分离到二核融合成复合核之间,该模型描写了重离子碰撞时中间态分子单粒子能级交叉情况。在交叉点上价核子可以从一个能级向另一个较高的能级过渡,这就是Landau-Zener Promotion机制。在能级交叉处实际上是相应于势能中有一个Pocket,也就是说有可能存在一个亚稳态。该模型最早由W. Greiner等^[28]提出,近年来J. Y. Park^[29]作了大量工作,由原来仅描写对称的二个球形核发展到不对称的球形核以至两个大的变形核的情况,并研究了变形核的对称轴取向对能级交叉的影响^[30]。

上述的几种理论究竟哪种能够更全面地解释该领域的实验现象尚有待于实践的检验。

五、中国原子能科学研究院HI-13串列加速器上进行的共振结构研究

我院HI-13串列加速器能提供多种重离子束流,能量连续可调,束流品质好;另外

已建成的QDDD大型磁谱仪能量分辨率高 ($\sim 10^{-4}$), 运动学修正能力强 ($k=0.3$), 大立体角 (10msr) 并可进行 0° 测量, 这些都是进行重离子碰撞共振结构研究的有力工具。

我们计划将该领域的研究扩展到sd壳的所有核, 尤其是别人尚未涉及的其他奇核。并将偶核的结果进一步完善后进行比较, 或用其他反应道及 (^{16}O , ^{12}C) 转移反应道对已观测到的共振进行道关联检验。这对扩展该领域的数据, 研究该共振结构的机制都是十分必要的。

我们的实验研究工作将包括下列几个方面: ①首先对以前尚未涉及的某些奇核体系如 ^{12}C 与 ^{16}O 在 ^{23}Na , ^{31}P , ^{35}Cl , ^{39}K 上的散射激发函数进行研究。以上这八种碰撞体系均为某些理论所预言的具有后角共振的碰撞体系。在技术上采取倒过来打的办法即用 ^{23}Na , ^{31}P , ^{35}Cl , ^{39}K 束流轰击 ^{12}C 靶, 在 0° 测 ^{12}O 束流来代替原来加速 ^{12}C 在 180° 测量 ^{12}C 的办法, 这在运动学上是完全等价的。

②作道关联检验和比较。对于同一个复合体系的不同反应道, 包括转移反应道是否有道关联对研究该共振的机制有重大意义。我们可以测 $^{16}\text{O}+^{27}\text{Al}$ 与 $^{31}\text{P}+^{12}\text{C}$ 比较(复合体系均为 ^{43}Sc)。有理论曾预言入射能升高后共振将由 $^{31}\text{P}+^{12}\text{C}$ 体系转为 $^{27}\text{Al}+^{16}\text{O}$ 体系。还可以测量 $^{16}\text{O}+^{40}\text{Ca}$ 与已有的 $^{28}\text{Si}+^{28}\text{Si}$ 结果进行比较(复合体系均为 ^{68}Ni); 测量 $^{32}\text{S}+^{16}\text{O}$ 与 $^{24}\text{Mg}+^{24}\text{Mg}$ 的结果进行比较(复合体系均为 ^{48}Cr); 测量 $^7\text{Li}+^{24}\text{Mg}$ 与 $^{19}\text{F}+^{12}\text{C}$ 的结果进行比较(复合体系均为 ^{31}P)。此外目前仍缺乏sd壳下列核的 (^{16}O , ^{12}C) 转移反应道数据如 ^{19}F , ^{23}Na , ^{27}Al , ^{31}P , ^{32}S , ^{35}Cl , ^{39}K , ^{40}Ca 。这些都是值得作的。

对 $^{31}\text{P}+^{12}\text{C}$ 体系我们用小靶室和半导体探测器已作了初步测量。用 ^{31}P 轰击 ^{12}C 靶, 在 $\theta_L=11^\circ, 26^\circ, 41^\circ$ 测量了 ^{12}C 的弹性散射激发函数。这些角度分别相应于 ^{12}C 入射时 $\theta_{cm}=158^\circ, 128^\circ, 98^\circ$ 。能量范围由 $E_L=40$

-65MeV 。实验数据的初步分析结果表明在 $E_L=50\text{MeV}$ 以上有共振的迹象^[81]。

我们与国际上主要Tandem实验室及一些从事重离子碰撞中共振结构研究的著名学者已建立了一定的联系。我们将努力扩大和发展国际和国内的交流与合作, 并争取尽快在该领域取得一些成果。

参考文献

- [1] K. A. Erb et al., Physics Today/January (1979)P34
E. Almqvist et al., Phys. Rev. Lett. 4(1960)515
- [2] B. Shivakumar et al., Phys. Rev. Lett. 57(1986)1211
- [3] Li Qingli et al., Chin. Phys 2(1982)197 (A Publication of the American Institute of Physics)
李庆利等 <原子核物理> 2(1980)316
- [4] D. A. Bromley, Nuclear Molecular Phenomena, edited by N. Cindro (North-Holland, Amsterdam, 1978) pp3-60
H. Feshbach, J. Phys. (Paris) Colloq. 37 c5; Suppl. 11, (1976)37
T. M. Cormier, Ann. Rev. of Nucl. and Parti. Science 32 (1982)271
K. A Erb and D. A. Bromley, Heavy-Ion Resonances Treatise on Heavy-Ion Science Vol3 pp 201-309
- [5] Proceedings of The International Conference on Resonances in Heavy-Ion Reaction (Hvar, Adriatic Coast, Yugoslavia, 1977)
- [6] Resonance in Heavy Ion Reactions Proceedings of International Workshop on "Resonance in Heavy Ion Collisions" (Bad Honnef, Germany 12-15 Oct. 1981)
- [7] Proceedings of The International Nuclear Physics Conference (Harrogate U. K. 25-30 August 1986)
- [8] O. Tanimura and U. Mosel, Phys. Rev.

- C24 (1981)321
- [9] S. Kubono, Proceedings of The Beijing International Symposium on Physics at Tandem(Beijing, China 26-30 may, 1986) p240
- [10] R. L. Mc Grath et al., Phys. Rev. 24 (1981) 2374
- [11] K. Nagatani et al., Phys. Rev. Lett. 43 (1979)1480
- [12] D. Konnerth et al., Phys. Rev. Lett. 45 (1980)1154
- [13] R. M. Freeman et al., Phys. Rev. C24 (1981)2390
- [14] H. Doubre et al., Phys. Rev. Lett. 35 (1975)508
H. Donbre et al., Phys. Rev. C15(1977) 693
- [15] D. L. Hanson, D. A. Bromley et al., Phys. Rev. C9(1974)1760
- [16] M. Hugi et al., Phys. Rev. C25(1982) 2403
- [17] C. F. Maquire et al., Phys. Rev. Lett. 53(1983)548
- [18] A. Roy et al., Phys. Rev. C20 (1979) 2143
- [19] D. A. Bromley, Proceedings of The International Conference On Nucleus-Nucleus Collision (Michigan State University September 26-October 1, 1982) Nucl. Phys. A400 (1983)3c-28c
- [20] R.R. Betts et al., Phys. Rev. Lett. 43 (1979)253
- [21] P. Braun-Munzinger et al., Phys. Rev. Lett. 38 (1977) 944, Phys. Rev. C24 (1981) 1010
- [22] J. Barrette et al., Phys. Rev. Lett. 40 (1978)445
- [23] M. R. Clover et al., Phys. Rev. Lett. 40 (1978)1008
- [24] B. A. Robson et al., Phys. Lett B123 (1983)160
S. Kubono et al., Phys. Lett. B81(1979) 140
D. Shapira et al., Phys. Rev. Lett. 43 (1979)1781
- [25] W. Von Oertzen and B. Imanishi, Physics Reports 155 No 2 (1987)29-136
W. Von Oertzen and H. G. Bohlen, Physics Reports 19 No 1 (1975)1-61
- [26] Guozhu He et al., Phys. Rev. C30(1984) 534
Chengqun Gao et al., Nucl. Phys. A438 (1985)281
宁平治 等《高能物理与核物理》9 No 1(1985) 101
- [27] D. Shapira et al., Phys., Rev. Lett. 43(1979)1781
Phys. Lett. 114B (1982) 111
Phys. Rev. Lett. 53 (1984) 1634
Phys. Rev. Lett. 57 (1986) 1211
- [28] J. Maruhn and W. Greiner
Z. Phys 251 (1972) 431
- [29] J. Y. Park et al.,
Phys. Rev. C21 (1980) 958
Phys. Rev. C33 (1986) 1674
Phys. Rev. C25 (1982) 1902
- [30] J. Y. Park and Moon Hoe Cha
Proceedings of The International Symposium on "Perspectives in Nuclear Physics" (Madras, India, January 19-23, 1987)
- [31] 李庆利等³¹P+¹²C弹性散射激发函数研究”
全国第七届核物理会议论文集
- [32] F. Plasil, Oak Ridge National Laboratory Review No 3 (1986) 211