

放射性核束引起的奇异核反应研究*

冯 军 沈文庆 王建松

(中国科学院上海原子核研究所 上海 201800)

摘 要 结合开展的工作,对放射性核束流引起的核反应总截面研究、放射性束流引起的熔合反应研究、放射性束流开展的天体物理核反应研究以及其它有关的核反应研究进行了评述,并对其可能的发展作了一些探讨.

关键词 放射性核束 核反应总截面 熔合反应 天体物理核反应

分类号 O571.42

1 引 言

原子核是物质微观结构的一个重要层次. 1896 年, 贝可勒尔(Beaquerel)发现天然放射性现象, 这是人们第一次观察到的核变化现象. 通常人们就把这一重大发现看成是核物理学的开端. 从 30 年代起, 最先利用的是包括中子、质子、氘、氚、 ^3He 及 α 等在内的轻粒子. 60 年代起开拓到包括 200 多个稳定核素的重离子. 70 年代成功地建成了极化离子源, 得到了极化质子、中子、质子、氘、氚、 ^3He 及 ^6Li 、 ^7Li 、和 ^{23}Na 等, 从 80 年代末开始出现放射性核束^[1~3], 使核反应探针在核素图上从稳定核素发展到不稳定核素, 从而给核物理研究及应用开辟了一个新局面, 成为当今世界核物理研究的前沿.

放射性奇异核次级束流是由具有一定衰变寿命或自然界不存在的放射性原子核所组成的束流. 通过放射性核束引起的核反应, 人们已获得了重要的研究成果^[1,2]: (1) 发现了 ^{11}Li 和 ^{11}Be 等核中存在中子晕, 表明奇异核 (N/Z 比较大的核) 中质子、中子可能解离, 从而出现一种纯中子物质, 同时, 这一发现推动了量子多体理论的发展; (2) 发现了新核素 ^{10}He 及其激发态, 这是目前人们所能知道的 N/Z 比最大的核; (3) 发现了 ^{11}Li 核中存在软模式 GDR 共振态. 由于放射性核束提供了核物理研究新的维度—同位旋, 从而突破了传

统核物理研究主要集中在稳定核的限制, 并对现有的基于稳定核的研究而建立起来的各种模型理论进行检验, 并可能观测到远离稳定线区域的核所特有的奇异现象. 同时, 放射性核束还给核物理应用提供了新的方法和广阔的前景. 尤其是用放射性核束开展的材料科学、生物医学、生命科学和核技术应用等方面的工作在这们科学分支刚出现时就被人们提出来了, 受到了重视, 因为放射性束流可直接把放射性核素注入材料、细胞, 甚至人体并进行在线测量, 这一特性使它在未来的应用中前途无量. 在日本的 21 世纪科研计划中, 日本将投资数亿美元, 建造世界上流强最大的放射性束流工厂^[2]. 国内, 中国科学院近代物理研究所已在 HIRFL 建造了国内第一条中能放射性束流线^[4], 二期工程也即将完成; 原子能研究院也在串列加速器上建成了低能放射性束流装置. 同时, 这两个研究单位在最近都提出了建造新的、流强更强、品质更好的大型放射性核束流装置的计划. 因此, 预计在 21 世纪, 随着这些设备的建成和投入运行, 这一领域的物理研究和应用将有大的发展.

这里结合本研究组开展的工作, 对放射性核束流引起的核反应总截面研究、放射性束流引起的熔合反应研究和用放射性束流开展的天体物理核反应研究, 以及其它有关的核反应研究进行了评述, 并对其可能的发展

* 国家杰出青年科学基金和上海市青年科技启明星基金资助课题.
1996 - 11 - 28 收稿.

作了一些探讨.

2 引起的核反应总截面研究

带电粒子和靶核相互作用的反应总截面 σ_R 是表征核反应和原子核特征的一个基本量. 实验测得的 σ_R 与入射粒子能量的变化曲线, σ_R 与核的质量数 A 的变化曲线和 σ_R 与同位旋的变化曲线等, 可以提取许多反映原子核整体特性的物理量, 如核的大小、形变和核内质子、中子分布^[5~7]. 用放射性核束引起的核反应研究进行的第一个实验就是测量核反应的相互作用截面. 该实验是由日本的 Tanihata I 小组在美国 LBL 高能放射性核束流线上进行的. 根据实验结果提取的 ^{11}Li 、 ^{14}Be 和 ^{17}B 核的半径比相邻核约大 20%, 并且不再符合 $R=1.18 A^{1/3}$ 的规律^[2].

描述核反应总截面最常用的微观理论是 Glauber 模型. 假设入射弹核 P 和靶核 T 的初始状态处于基态, 相对动量为 $-\hbar K$, 通过反应, 弹核转移动量 $\hbar q$, 并处于激发态 α , 靶核接受转移的动量 $\hbar q$, 并处于激发态 β , 即

$$P(|\Psi_0\rangle) + T(|-K, \Theta_0\rangle) \rightarrow P(|q, \Psi_\alpha\rangle) + T(|1-K-q, \Theta_\beta\rangle) \quad (1)$$

那么, 反应总截面 σ_R 为

$$\sigma_R = \int db \{1 - |\langle \Psi_0 | \Theta_0 \rangle| \cdot \prod_{i \in P} \prod_{j \in T} (1 - T_{ij}) |\Psi_0 \Theta_0\rangle|^2\} \quad (2)$$

其中, T_{ij} 为核子-核子的碰撞几率, i, j 表示质子和中子. 上式表示 σ_R 包括除去形状弹性散射之外所有各种反应道的分截面总和. Tanihata 定义的原子核相互作用截面是指弹核和靶核相互作用后至少有一个核子转移的几率, 可表述为

$$\sigma_I = \int db [1 - \langle \Psi_0 | \Theta_0 | \prod_{i \in P} \prod_{i \in T} (1 - \Gamma_{ij}^*) | \Psi_0 \rangle \cdot \langle \Psi_0 | \prod_{i \in P} \prod_{i \in T} (1 - \Gamma_{ij}) | \Psi_0 \Theta_0 \rangle] \quad (3)$$

Ogawa 等人^[3]用(2)和(3)式计算入射能量高于几百 MeV/u 的 σ_R 和 σ_I 的差别, 计算结果为百分之几. 因此, Tanihata 用(2)式拟合实

验测得的原子核相互作用截面, 从而得到奇异核的核子分布, 发现 ^{11}Li 的中子分布有一个很长的尾巴, 由此提出了中子晕的概念. 但到目前为止, (2)和(3)式的差别在中能区域有多大, 还没有得到解决.

在考虑库仑修正和采用有限力程相互作用的同时又考虑核反应截面主要敏感于核表面, 因而核中核子分布采用高斯分布, 由(2)式可推得计算 σ_R 的解析表达式. 如果假设丰中子核的核子分布表面弥散度 t_n 不再是常数, 而是与分离能有关, 即

$$t_n = 2.3 + \frac{\hbar}{\sqrt{2N\epsilon m}} \text{ fm} \quad (4)$$

(其中 N 为原子核的中子数, m 为核的静止质量, ϵ 为中子分离能) 则可以得到一个计算较广能区的、适用于稳定核和奇异核的反应总截面的微观修正模型^[8], 较好地解释奇异核 (^8He 、 ^{11}Li 、 ^{14}Be) 反应总截面的反常增加. 图 1 为该模型的计算结果.

一种新的研究核反应总截面的方法^[9]是基于运输模型框架下, 计算粒子-粒子的平均碰撞数, 并通过假定碰撞次数的几率分布, 得到核反应的吸收几率, 从而计算核反应总截面. 由于在这个框架下, 核中平均场及两体核子碰撞的竞争能较好地得以体现, 因此可以考虑核态方程及介质中粒子-粒子碰撞的影响, 容易处理泡利阻塞效应等.

表中给出了已有的用放射性束测量核反应截面的实验. 其中 σ_c 表示电荷交换反应截面; σ_γ 表示用 $4\pi\text{-}\gamma$ 方法测得的核反应总截面; σ_I 为核相互作用截面; σ_R 为核反应总截面; σ_{xn} 为削裂中子反应截面.

通过对新近完成的 ^{20}Na - ^{32}Na 放射性束引起的反应总截面实验数据^[10]的分析表明, 反应截面随同位旋的增加比预期的结果要小, 也没有观察到中子晕结构. 另外, 结合 ^{11}Li 、 ^{14}Be 存在中子晕结构, 可以提出中子晕结构是很丰中子核中普遍存在的一种结构, 还是轻丰中子核中个别核的特例结构的问题, 这是一个很有意义的研究课题.

值的注意的是, 通过测量核反应总截面

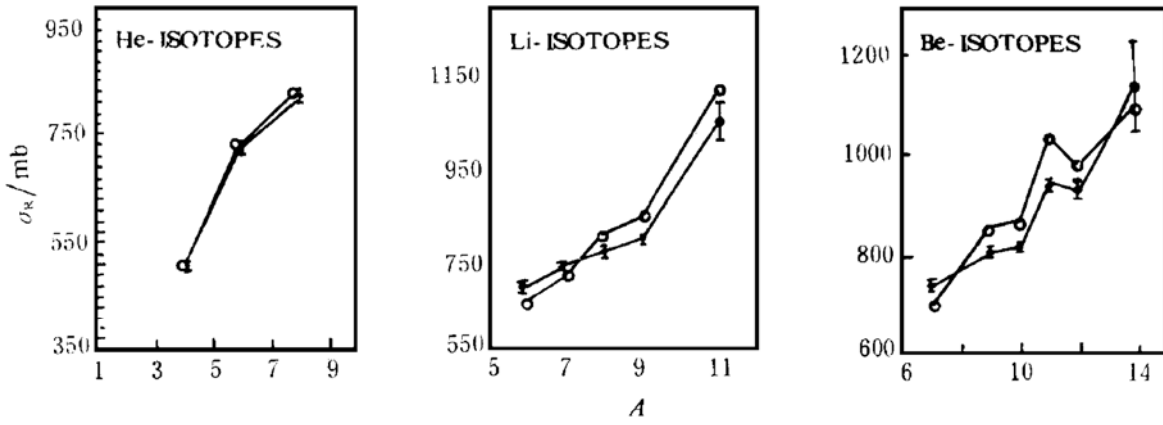


图 1 轻奇异核和碳靶反应的 σ_R 与质量数的关系 · 为实验值, ◦ 为计算值
表示 放射性束测量核反应截面的实验统计

截 面	E/u MeV	弹 核	靶 核	研究小组
σ_c	81	$^8\sim^{11}\text{Li}$	C Pb	Blank 1992
σ_c	1 000	$^{50,56}\text{Mn}$ $^{51,58}\text{Fe}$ $^{54,60}\text{Co}$ $^{55,62}\text{Ni}$	CH_2	Brohm 1992
σ_γ	50~0	$Z=5\sim 12$	Si	Mitting 1987
σ_γ	40~0	$Z=2, 10$	Cu	Saint-Laurent 1988
σ_γ	40~0	$Z=2\sim 13$	Si Cu	Villari 1989
σ_1	790	$^3\sim^8\text{He}$	Be C Al	Tanihata 1985
σ_1	790	$^6\sim^{11}\text{Li}$ $^7\sim^{10}\text{Be}$	Be C Al	Tanihata 1985
σ_1	790	^{11}Li $^{11}\sim^{14}\text{Be}$ $^8\sim^{15}\text{B}$	Be C Al	Tanihata 1988
σ_F	790	$^6,^8\text{He}$ ^{11}Li	C Pb	Kobayshi 1988
σ_1	800	^{11}Li	Be C Al Cu Pb	Kobayshi 1988
σ_1	43,75	^{11}Li	C	Shimoura 1991
σ_1	80	^{11}Li	C Al Cu Sn Pb	Blank 1993
σ_1	400,800	^{11}Li	p d Be C	Tanihata 1992
σ_1	700	^{17}N ^{17}F ^{17}Ne	Be C Al	Ozawa 1994
σ_R	40~0	$Z=2\sim 15$	Si	Villari 1991
σ_R	33	^{11}Be	C Al	Fukuda 1991
σ_{2n}	800	^{11}Li	Be C Al Cu Pb	Kobayashi 1989
σ_{2n}	30	^8He ^{11}Li ^{14}Be	Be Ni Au	Riisager 1991
σ_{2n}	80	^{11}Li	C Sn Pb	Blank 1993

而提取的轻丰中子奇异核的核物质半径,不同实验的结果存在较大的分歧.例如,法国研究小组^[6]测得的 ^{17}C 、 ^{18}C 和 ^{19}C 的中子均方根半径随着核质量数A的增加而减少,特别是

^{19}C 的实验值非常小.但是最近MSU实验小组^[11]通过测定碎片角动量分布得出的结论, ^{19}C 是中子晕核.因此,对放射性束引起的反应总截面测定,不论是在实验上还是在理论

上都需要进一步去探索,特别是在提高实验精度或是发展新的测量方法. 理论方面,¹¹Li 和 C 靶反应的激发函数在低能端也没有得到

很好的解释,它是来源于奇异核结构的影响,还是碰撞过程动力学的影响,都是值得研究的课题.

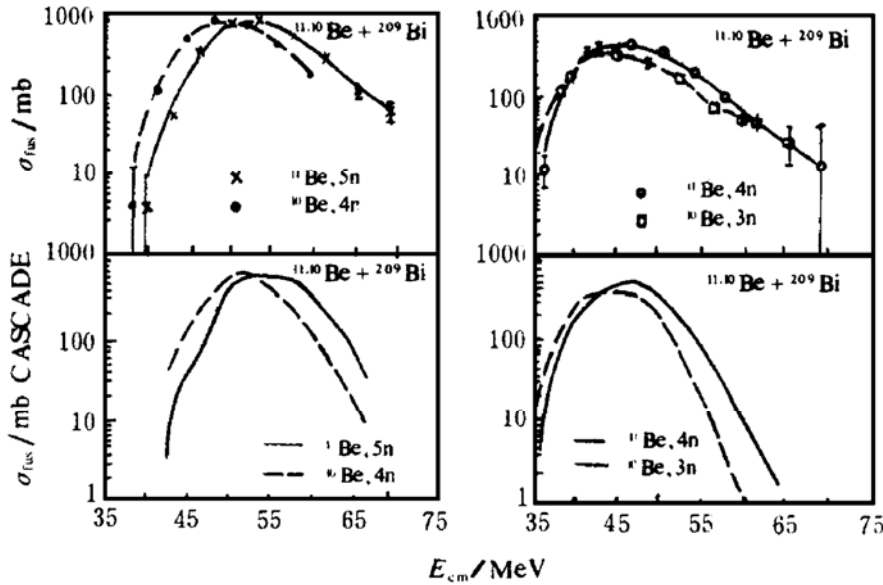


图 2 实验测得的^{10,11}Be+²⁰⁹Bi 熔合反应激发函数及 Cascade 计算结果

3 引起的熔合反应研究

在重元素(特别是超重元素)的合成中,中子俘获和转移反应起着重要的作用,并成功合成了一批重元素,但通过这种反应机制合成的重核素增加的中子数有限,使丰中子重核素的合成受到较大的限制. 熔合反应(特别是冷熔合反应)是合成超重元素的重要方法. 因重核素特别是丰中子重核素的中质比比自然界中的轻核素的中质比大(2.4/2.2),因此,很难选择合适的稳定核束与靶核的组合,经过直接熔合反应合成丰中子重核素,目前利用直接熔合反应合成的重核素基本上是缺中子的.

放射性束流的出现为熔合反应提出了新的机遇,使该领域的研究又充满了新的活力. 由具有特殊核结构和较大中质比组成的放射性核束,为通过直接熔合反应合成丰中子重核素提供了二个非常有利的条件:(1) 可选择符合最终需要的合成重核素中质比的反应系统.(2) 可选择具有中子皮或中子晕结构的核组成的束流,使之与靶核耦合效应引起反应

系统熔合位垒不同程度的降低,从而提高熔合截面. 因此,用丰中子放射性束与重核进行熔合反应合成重丰中子核素是放射性束研究的一个重要课题.

目前,用放射性束进行熔合反应从理论上已作了许多研究. 研究表明,是有中子皮和中子晕结构的核引起的熔合反应截面将会有大的增加. 实验研究在法国 GANIL 和日本 RIKEN 进行. 法国小组测量了位垒附近能量的¹¹Be、⁹Be 放射性束和²³⁸U 靶核发生反应的熔合截面,观测到在位垒能量下面,¹¹Be+²³⁸U 的熔合截面比⁹Be+²³⁸U 的熔合截面有较大的增加,而在位垒之上,两个反应系统的截面基本一致. 图 2^[12]是日本小组测得的放射性束流¹¹Be、¹⁰Be+²⁰⁹Bi 反应的激发函数. 从图上可见,是有中子晕结构的¹¹Be 引起的熔合反应截面并没有增加. 两个小组的实验都是开创性的,但比较粗糙. 由于受到现有放射性束流强度和探测设备分辨率等条件的限制,目前还不能得出精确的实验结果. 国内的有关小组将在新建成的兰州重离子加速器放射性核束装置(RIBLL)上,用改进的探测设备对 5~6 MeV/u 能量的放射性核束^{9~12}Be

和 ^{209}Bi 进行熔合反应,开展深层次的细致研究,从而探讨合成超重核素的可能性.

4 天体物理核反应研究

核反应在天体演化和宇宙演化过程中扮演着极为重要的角色. 它不仅是恒星的主要能源,而且导致了各种化学元素及其同位素的产生. 一般来说,无论是早期宇宙还是恒星中,中重核的合成是用远离 β 稳定线的路径进行的(S 过程除外),稳定线两侧有数千种不稳定核素被卷入. 各种元素及其同位素的丰

度分布是沿着这些路径的连续核反应和朝向稳定线方向的衰变(通常是 β^\pm 衰变)之间竞争的结果. 由于这一过程中的核反应都是奇异核反应,因此,以往的实验很难进行. 目前,关于远离 β 稳定线的短寿命核的反应截面几乎还没有实验数据,这是核天体物理继续发展所面临的一个严峻挑战. 放射性核束的出现使实验室研究这些反应成为可能. 因此,核天体物理成为当前国际核物理学界发展放射性核束大潮的主要动力之一.

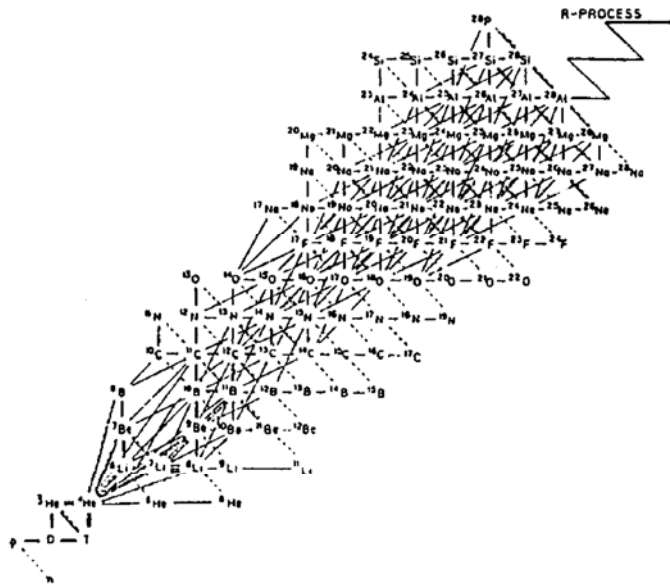


图 3 不均匀大爆炸原子核合成反应网络图

根据不均匀模型核合成理论,通过 Be 和 B 的原始丰度水平的计算值与观测值的比较,可给出大爆炸后 1 秒至几分钟宇宙的不均匀程度,进而给出 10^{-5} s 时夸克-强子相变的信息. 图 3^[3]是不均匀大爆炸原子核合成反应网络的一部分. $A \geq 9$ 核的形成主要发生在丰中子低密度区, ^8Li 起着跨越 $A=8$ 质量空隙的桥梁作用,产生和消灭 ^8Li 的反应对形成 $A \geq 9$ 的核素具有决定性意义. 所以,下列反应的截面是有头等的重要性: $^8\text{Li}(d, n)^9\text{Be}$ 、 $^8\text{Li}(\alpha, n)^{11}\text{B}$ 、 $^8\text{Li}(n, \gamma)^9\text{Li}$ ($^8\text{Li}(d, p)^9\text{Li}$)、 $^8\text{Li}(d, t)^7\text{Li}$ 、 $^8\text{Li}(^3\text{He}, t)^8\text{Be}$ 、 $^8\text{Li}(t, n)^{10}\text{Be}$ 以及 $^6\text{He}(\alpha, n)^9\text{Be}$.

对于 P-P 反应链, $^7\text{Be}(p, \gamma)^8\text{B}$ 反应特别重要,因其反应产物 ^8B 的 β^+ 衰变的中微子是太阳中微子丢失问题的核心. 已有不少用放射性束 ^7Be 引起的反应截面测量,但因靶厚确定带来 30% 的误差,因此需用放射性 ^{11}Be 束来作更可信的直接测量. 白希祥小组^[13]在原子能研究院的放射性束流线 GIRAFFE 上,用质心系能量为 5.8 MeV 的放射性束 ^7Be ,测量了 $^7\text{Be}(d, n)^8\text{B}$ 反应的微分截面,推算出的反应截面为 58 ± 4 mb,并用 DWBA 理论拟合了反应的角分布,得出 $^7\text{Be}(p, \gamma)^8\text{B}$ 反应的天体物理因子 $S_{17}(0)$ 为 25.6 eVb. 图 4 为不同实验值给出的 $S_{17}(0)$ 的比较. 从图上可看出,

白希祥小组的实验值比已往的理论和实验值略高,从而为讨论 B 太阳中微子丢失现象提供了新的实验数据.这是迄今为止,用放射性束研究天体核反应最成功的一个实验.

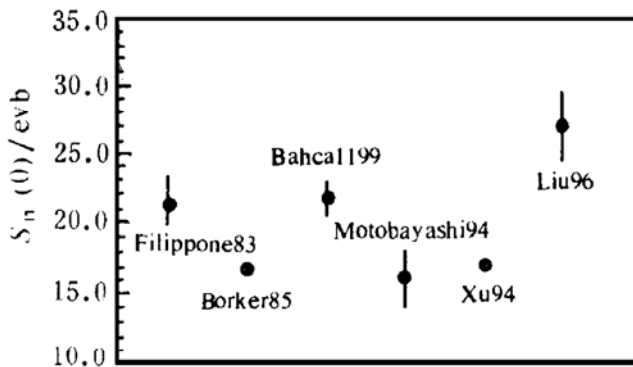


图 4 ${}^7\text{Be}(p, \gamma){}^8\text{B}$ 反应的 $S_{17}(0)$ 因子

美国 Boyd R N 小组^[14]用中能放射性束流装置将能量降低到能,尝试研究 ${}^{15}\text{C}(n, \gamma){}^{16}\text{C}$ 反应.实验主要是通过测量 ${}^{15}\text{C}(n, \gamma){}^{16}\text{C}$ 反应产生 ${}^{16}\text{C}$ 域值以上能级的发射中子的能量,然后用理论模型推算 ${}^{15}\text{C}(n, \gamma){}^{16}\text{C}$ 的反应截面.该截面对天体物理学非均匀模型产生重核素的核反应链具有重要意义.由于降能后,放射性束的强度及能量分辨受到很大影响,该实验并没有得到反应截面,只初步得到了 ${}^{16}\text{C}$ 中子发射域值以上的激发能级分布.

5 其它有关的核反应研究

随着放射性核束强度和品质的改进,已可用它来做一些弹散和非弹散反应.轻核引起的弹性散射对原子核反应光学模型的研究具有重要意义.同时,它们还会提供更多关于中子晕结构的信息,尤其是利用逆运动学实验构型,选取感兴趣的奇异核.由于运动学的实验构型,反应产物的能量分辨不由轰击束流决定,而是由探测到的质子的能量分辨决定,再选用薄靶,则可得较高的能量分辨.

实验研究了中能放射性核束引起的弹性散射.图 5 给出了奇异核弹性散射的实验角分布.从图中可见,奇异核 ${}^{11}\text{Li}$ 和 p 弹性散射的截面比稳定核的截面小 50%,两个小组用光学模型拟合了实验分布^[2].一个小组是由

质量数大于 40 获得的光学参数拟合了实验结果.拟合结果发现,该组参数可以很好地拟合 ${}^6,7\text{Li}$ 和 ${}^9\text{Li}$ 的结果,但不能拟合 ${}^{11}\text{Li}$ 的结果.为此,对光学模型的虚部参数作了调整后,才可很好地拟合了 ${}^{11}\text{Li}$ 实验结果.相反,另一小组改变了光学模型的实部,也能对 ${}^{11}\text{Li}$ 实验结果给出合理的拟合.这些拟合的最大不同是所采用的势阱深度和表面弥散度的不同.第一个小组用了具有较长尾巴的虚部势,第二个小组拟合则用了很浅的实部.物理上浅的势阱反映了碎裂过程.从这两种极端光学势参数能拟合实验数据的特点来看,可以设想还可找到其它参数.光学模型参数的不确性,使这类研究目前还不能对中子晕结构对核相互作用势的形成发挥何种作用得出结论.光学势与同位旋的依赖关系还没有很好解决.

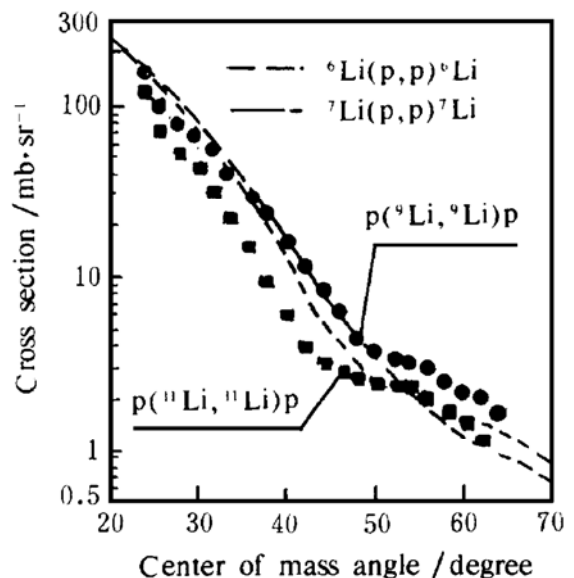


图 5 轻奇异核和质子弹性散射实验角分布

滴线和滴线以外的核性质的研究是对常规核理论的一个检验,也是对现有核物理实验技术的一个挑战.迄今为至,用放射性核束引起反应的谱学方法,仅合成了 8 个丰中子不稳定核,并且主要集中在轻奇异核.人们正在尝试获得由较重的奇异核组成的放射性束流^[15].实验上已取得了如下结果:(1)观测到了 ${}^8\text{He}$ 的激发态,(2)发现了 ${}^{10}\text{He}$ 新核素,(3)获得了 ${}^{10}\text{Li}$ 核的 s 组态的新数据,(4)对 ${}^{12-14}\text{Be}$ 核的谱学进行了研究,(5)发现了 ${}^{16}\text{B}$ 新核

素,(6)研究了奇异核的偶极激发和软模式巨共振现象

此外,随着重的放射性核束流的获得,还可开展放射性核束引起的裂变反应、转移反应、预平衡反应等方面的研究.用放射性核束研究裂变可检验当前的宏观-微观模型,计算表明,原子核壳结构的结合能效应对融合及裂变路径有很大影响.利用放射性幻数核 ^{132}Sn 束流合成 ^{264}Fm 可研究这一机制.此外,用放射性束可研究从铅到最重核的对称到不对称的低能裂变的演化过程,从中可了解导致裂变核的势能面的形貌及动力学演化.

参 考 文 献

- Hansen P H, Jonson B, The Neutron-halo of Extremely Neutron-rich Nuclei. *Europhys Lett*, 1987, V4:409~414
- Tanihata I. Neutron Halo Nuclei. *J Phys*, 1996, G22:157~198
- Boyd R N. *Physics with Radioactive Nuclei Beams*, *Inter J of Modern Physics*, 1994, E3:249:334
- 詹文龙,郭忠言,周建群等. HIRFL 上的放射性次级束流线. *高能物理与核物理*, 1994, V18:39~46
- 冯 军,沈文庆,王 柄. 用奇异核束流进行反应总截面测量及意义. *核物理动态*, 1988, V5:14~16
- Shen Wenqing, Wang Bing, Feng Jun et al. Total Reaction Cross Section for Heavy Ion Collisions and Its Relation to the Neutron Excess Degree of Freedom. *Nucl Phys*, 1989, A491:130~146
- Al-khalili J S, Tostevin J A, Thompson I J. Radii of Halo Nuclei from Cross Section Measurements. *Phys Rev Lett*, 1996, V76:3903~3914
- Feng Jun, Shen Wenqing, Ma Yugang et al. The Separation Energy Dependence of the Nuclear Cross Section. *Phys Lett*, 1993, B305:9~12
- Ma Y G, Shen W Q, Feng J et al. Study of the Total Reaction Cross Section via the Reaction Dynamical Model. *Phys Rev*, 1993, C48:850~856
- Suziki T, Geissel H, Bochkarav O et al. Neutron spin of Na Isotopes Studies via Their Interaction Cross Sections. *Phys Rev Lett*, 1995, 75:3241~3244
- Bazin D, Brown B A, Fawerbach M et al. One-neutron Halo of ^{19}C . *Phys Rev Lett*, 1995, 74:3569~3572
- Yoshida A, Aoi N, Fukuda T et al. Measurement of Fusion Cross Section with Neutron Halo Nuclei. *Nucl Phys*, 1995, A588:109C~112C
- Liu Weiping, Bai Xixiang, Zhou Shuhua et al. Angular Distribution of the $^7\text{Be}(d, n)^8\text{B}$ Reaction at $E_{\text{cm}} = 5, 8$ MeV and the $S_{17}(0)$ for the $^7\text{Be}(p, \gamma)^8\text{B}$ Reaction. *Phys Rev Lett*, 1996, V77:611~614
- Raimann G, Ozawa A, Boyd R N et al. Level in ^{17}C above the $^{16}\text{C} + \text{neutron}$ Threshold. *Phys Rev*, 1996, C53:453~458
- Feng Jun, Shen Wenqing, Ma Yugang et al. Isotopic Fragmentation Distribution of ^{129}Xe on ^{90}Zr and ^{197}Au Targets at Intermediate Energy. *Phys Rev*, 1994, C50:2420~2423

Study of Exotic Nuclear Reaction Induced by Radioactive Nuclear Beam

FENG Jun SHEN Wenqing WANG Jiansong

(Shanghai Institute of Nuclear Research, the Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

Abstract The study of total nuclear reaction cross section, nuclear fusion reaction, nuclear reaction of astrophysics and related reactions induced by radioactive nuclear beam are reviewed in this paper. The future development of this field is discussed.

Key Words radioactive nuclear beam total nuclear reaction cross section nuclear fusion reaction nuclear physics of astrophysics