

放射性核引起的反应¹

葛凌霄 张晓东

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

摘 要 评述了放射性核自身的特征和它引起的反应机制研究. 论述了晕核、中子皮核、电磁断裂和软偶极共振以及放射性核所引起的弹性散射、转移反应和亚位垒融合等.

关键词 晕核 中子皮核 电磁断裂 反应机制

分类号 O571.4

1 引言

80 年代以来,世界上主要的核物理实验室,如 LBL、Ganil、MSV、Riken、和 Dubna 等,都先后在他们的中高能重离子加速器上,利用重离子碰撞的碎裂机制、产生了大量远离 β 稳定线的放射性核,将这些核作为二次束流用来研究它们自身的性质.放射性核束流的发展为核物理研究开拓了一个新领域,为研究粒子稳定性、极端条件下的核提供了可能性,也为研究具有特殊对称性的核创造了条件,通过放射性核引起的反应研究,会大大帮助人们去理解远离稳定线核的结构和特征,以及反应机制的特殊性,同时也对已建立起来的核模型进行检验和发展.

多年来,各个实验室的主要目标都集中于较轻的放射性核,如 ^{11}Li 、 ^{11}Be 、 ^{14}Be 、 ^{17}B 、 $^{6\sim 8}\text{He}$ 等同稳定的靶核引起反应的研究,主要测量了反应总截面、产生碎片的截面、电磁断裂截面以及发射中子角分布等,新近又扩展到亚位垒融合截面和转移反应的测量.同已知稳定核相比较,观测到下面主要现象:(1)大的反应总截面;(2)最后一个或两个中子有非常低的分离能;(3)碎片 ^9Li 有非常窄的横向动量分布和纵向动量分布;(4)在 ^{11}Li 同重靶的反应中,发现大的电磁断裂截面;(5)发现软的偶极模式共振;(6)发现极端窄的中子角分布;(7)观测到 ^{11}Li 引起弹性散射截面同

芦瑟福截面比值随角度增加的减小变得缓慢;(8)观测到 ^{11}Be 和 ^6He 引起的亚位垒融合截面大大增强;以及某些非弹性散射、转移反应和电荷交换反应的资料等.

通过这些现象的分析,1985 年由 Tanihata 及合作者^[1]通过 ^{11}Li 引起的反应总截面测量所提出的中子晕的概念已广泛得到接受,对滴线核来说,晕的出现对短程位阱所维系的松散束缚粒子是一个普遍的共同现象.我们知道,Myers 和 Swiatecki 质量公式预言,对 $A = 40 \sim 80$ 的核,中子滴线位于 $N/Z \simeq 2.25$,如考虑对效应和壳效应,高简并轨道将允许更多奇异核存在;中子多时,核的饱和密度会改变,在 $N/Z = 2 \sim 3$ 时,饱和密度小于稳定核的 15%;同时,随着中子数增多,有效质量也会改变,对相互作用、四极-四极相互作用和自旋-轨道相互作用都会随中子过剩而改变.所以,诸如离 β 稳定线有多远,核还存在?随着 N/Z 增大 (> 1.4) 或减小 (< 1) 原子核结构有什么变化?质子和中子密度分布有什么差别?有效相互作用有什么特征?以及丰中子或丰质子引起的反应机制有什么变化?这些问题还需要随放射性束流的进一步发展,由实验和理论共同努力来回答.

2 晕核

晕核没有一个严格的定义,它可以看作为一种状态.通过量子力学的隧道效应,这种状

态变得特别扩展,它的波函数大部分是在经典上禁戒的范围内^[2].最简单的晕核可考虑为在核芯之外由一个中子所组成的两体系统.如果用最后轨道的核子有小的分离能($S < 1 \text{ MeV}$)和异常大的反应总截面来判断,在

$A \leq 20$ 的质量范围,¹¹Be、¹¹Li、¹⁴Be 和 ¹⁷B 可被选择为中子晕核,⁸B 和 ¹⁷Ne 为质子晕核.表中列出的核中^[3],⁶He、¹⁷C 和 ¹⁹C 没有表现出总反应截面增强,但有很小的分离能.

表示 晕核的可能选择.实验分离能 S ,最后一个轨道核子数 N_{last} ,同标准公式 $R = 1.2A^{1/3}(\text{fm})$ 相比较,实验相互作用半径增强情况以及实验的四极矩

		I^π	S/MeV	N_{last}	Orbit	R_{int}	$ Q /\text{mb}$
		(enhancement)					
质子晕	¹⁷ Ne ₇	(1/2) ⁻	0.96	2	(2s _{1/2})	large	
	¹⁷ Fs	(5/2) ⁺	0.60	1	1d _{5/2}	no	58 ± 4
	¹² N ₅	1 ⁺	0.60	1	1p _{1/2}	no	26
	⁸ B ₃	2 ⁺	0.14	1	1p	some	68.3 ± 2.1
中子晕	¹⁹ C ₁₃	?	0.53	1	(1d _{5/2})	no	?
	¹⁷ C ¹¹	?	0.73	1	(1d _{5/2})	no	?
	¹⁷ B ₁₂	(3/2) ⁻	1.21	2	?	large	?
	¹⁴ Be ₁₀	0 ⁺	1.12	2	?	large	
	¹¹ Be ₇	(1/2) ⁺	0.50	1	2s _{1/2}	large	
	¹¹ Li ₈	(3/2) ⁻	0.29	2	1p _{1/2}	large	31.2 ± 4.5
	⁶ He ₄	0 ⁺	0.89	2	1p _{3/2}	no	

可以认为,晕核系统性质由波函数尾巴确定,而核芯作用是提供了结合位,保持系统在一起.最简单的两体问题,类似于氘的处理.在假设中子松散束缚和电子与芯之间相互作用是平方位阱的前提下,薛定谔方程可精确求出在位阱外部的中子波函数为 Yukawa 类型,即

$$\varphi(r) = \left(\frac{2\pi}{K}\right)^{-1/2} \frac{e^{-Kr}}{r} \left[\frac{e^{iKR}}{1 + (KR)^{1/2}} \right] \quad (1)$$

其中, R 为位阱宽度, $(\hbar K)^2 = 2\mu B_n = 2\mu E_s$, E_s 为中子分离能,自然中子密度分布为

$$\rho(r) = |\varphi(r)|^2 \quad (2)$$

K 确定了密度尾巴斜率的陡峭程度.对于晕核, E_s 很小,故密度分布尾巴拉得很长.中子动量分布是它的波函数的傅里叶变换:

$$f(P) \sim \frac{C}{P^2 + K^2} \quad (3)$$

同样,小的分离能导致了动量谱窄的峰.¹¹Li 引起的反应中,实验观测到碎片⁹Li 垂直动量分布的双峰,宽峰宽度为 $95 \pm 12 \text{ MeV}/c$,窄峰宽度为 $23 \pm 5 \text{ MeV}/c$.如果考虑移去中子对需要小能量、反应过程是周边的、碎片起源于核场(当核子分布刚刚互相接触)或库仑场,而且散射角非常小,反应动量转移 ΔP 相关于能量转移

$$\Delta P = P_f \cos\theta - P_i = E^*/v \quad (4)$$

v 是炮弹速度,在周边碰撞时转移能量很小.假定贮藏在核中的 E^* 导致碎裂成具有相同大小、相反方向的两碎片,如碎片质量为 a ,两集团间结合能为 ϵ ,则

$$E^* - \epsilon = \frac{P^2}{2(A-a)m_N} + \frac{P^2}{2am_N} \quad (5)$$

(5)式求平均,发现

$$\langle P^2 \rangle = \frac{2(A-a)am_N}{A} \langle K \rangle \quad (6)$$

$\langle K \rangle = \langle E^* \rangle - \langle \epsilon \rangle$ 为平均动能, 对于 $^{11}\text{Li} \rightarrow ^9\text{Li} + 2n$ 可以从实验宽度来提取平均动能. 对于宽峰宽度, $\langle K \rangle = 2.9 \pm 0.8 \text{ MeV}$, 窄峰宽度 $\langle K \rangle = 0.17 \pm 0.08 \text{ MeV}$ ^[4], 这正好提取相应于窄宽度的平均动能相应于移去两个中子的分离能. 如果考虑 Yukawa 类型波函数, 也会得到类似的结论. 这说明窄宽度来源于移去芯外两个晕中子, 反应了 ^{11}Li 是一个松散束缚两个中子的系统.

既然说晕核是由芯的位阱外微弱束缚的价核子的波函数量子力学穿透而导致的, 晕核破碎所导致的碎片动量分布中, P_{\perp} 分布与破碎靶相依赖, 而 P_{\parallel} 分布比起 P_{\perp} 来较小扰动. 实验观测到 ^9Li 碎片的 P_{\parallel} 分布和靶有微弱依赖, 其 P_{\parallel} 分布有很窄的宽度, 大约是正常束缚很紧的核碎裂宽度的 1/5. 对于 ^{11}Be 在不同靶上引起反应, 同样也观测到 P_{\parallel} 分布有类似很窄的宽度, 但宽度和破裂机制不相关, 似乎反映了晕中子的动量分布直接反映跟随直接破裂的芯的动量分布^[5].

从实验观测的反应总截面, 可提取相互作用半径的大小, 同时, 采用 Glauber 模型 (eikonal 近似) 也可以给出密度分布的知识. 目前, 已有很多模型和方法来研究滴线核的密度分布^[6], 采用单个高斯函数不能符合数据, 但采用高斯函数的芯加上 Yukawa 型尾巴, 有好的符合 [方程(1)], 哈特里-福克和壳模型所采用的平均场近似, 困难在于考虑核表面性质即晕核性质, 它们的修正都是挑选最后一个轨道核子的分离能, 用实验值唯象限制后, 才能还原大半径的实验结果. 似乎在晕核中, 中子之间的关联, 中子和核芯关联变得非常重要, 可能还会包括其它附加的关联, 超出了平均场近似, 使得平均场近似限制了它的正确性. 如果假设简谐振子波函数每个轨道有不同尺度参数, 即振子强度 α , 对于 ^{11}Li 和 ^9Li 核芯占据 $1s_{1/2}$ 和 $1p_{3/2}$ 轨道, 晕中子占据 $1p_{1/2}$ 轨道, 其密度分布具有如下解析形式

$$\rho_{\text{core}}(r) = \frac{1}{\pi^{3/2}} \{ 4\alpha_1^3 \exp[-(\alpha_1 r)^2] + \frac{10}{3} \alpha_2^3 \cdot (\alpha_2 r)^2 \exp[-(\alpha_2 r)^2] \} \quad (7)$$

$$\rho_{\text{halo}}(r) = \frac{4}{3\pi^{3/2}} \alpha_3^3 (\alpha_3 r)^2 \exp[-(\alpha_3 r)^2] \quad (8)$$

其中, 尺度参数 $\alpha_1 = 0.687 \text{ fm}^{-1}$, $\alpha_2 = 0.454 \text{ fm}^{-1}$ 和 $\alpha_3 = 0.336 \text{ fm}^{-1}$ 分别对应于 $1s_{1/2}$, $1p_{3/2}$ 和 $1p_{1/2}$ 轨道. 上述密度分布可给出同实验一致的 ^{11}Li 均方根半径, 由它计算的反应总截面也和实验值很好符合^[7]. 集团轨道壳模型 (COSM) 比起壳模型来, 单粒子轨道由核芯和价核子之间位确定, 人们知道, 核芯和价核子之间位不同于核芯中一个核子的位. 在 COSM 中, 中子坐标不涉及 ^{11}Li 的质心, 而是 ^9Li 芯的质心, 价中子的振荡参数同属于核芯, 与核子的结构参数不联系. 模型用几个自由参数建立唯象波函数, 而自由参数是用实验数据来确定的. 由于双中子晕, 三体方法和模型也得到一定的发展^[6].

3 中子皮核

表中说明, ^6He , ^{17}C 和 ^{19}C 没有显示出反应总截面的增大, 人们认为 ^6He 有厚的中子皮, 而 ^{17}C 和 ^{19}C 在分离能上显示出晕特征, 但实验没有晕效应的信号, 这似乎说明在核子的最后占有轨道 ($1d_{5/2}$) 存在大的离心位垒, 这种位垒可阻止波函数尾巴的增长, 因此晕核可能仅发生于 $s(l=0)$ 和 $p(l=1)$ 的轨道.

中子皮是涉及到具有相对高密度、相当多中子的一种现象, 而中子晕由具有极端扩展分布的松散束缚的一个或两个中子所引起. 中子皮可以发生在任何轨道, 总的来说, 隧道效应仅仅是中子皮形成的一个方面. 同中子晕比较, 中子皮似乎显示更多的宏观性和在较小扩展下较大的束缚能力. 自然, 在中子皮中: $\rho_n(r) > \rho_p(r)$, 但中子密度不能太稠密, 如果定义一个内部边界 R_1 和外部边界 R_2 , 那么, 皮的厚度定义为 $R_2 - R_1$, 其条件是

$$\rho_n(r) \geq \rho_p(r) \quad r \geq R_1 \quad (9)$$

$$\rho_n(r) \geq \frac{1}{100} \rho_n(0) \quad r \geq R_2 \quad (10)$$

可以认为,在内部范围,中子和质子密度仍然近似相同,质子的均匀内部半径同中子有类似的值,中子和质子密度的和(总密度)仍然大约为 0.15 fm^{-3} . 关于中子皮核的讨论,最多的是采用相对论平均场(H-F)计算^[8],这种计算似乎对中子皮形成机制和平均位有较好理解.

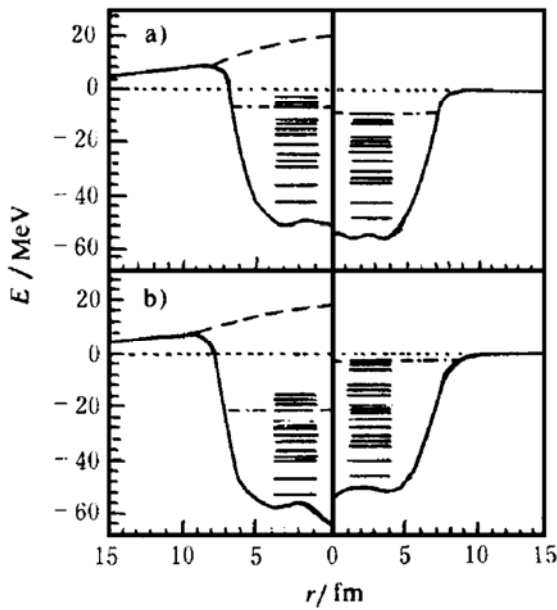


图 1 分别对于(a)¹³³Cs 和(b)¹⁸¹Cs 质子(左边)和中子(右边)平均场量. 实线表示 H-F 位, 质子包括库仑项(虚线)

如果从 β 稳定线增加中子数目,在内部范围,中子密度增加,质子密度减小,两者的均方根半径都会逐渐增加. 由于中子-质子相互作用强于质子-质子和中子-中子相互作用,随着中子密度增加,质子的平均位变深,使质子更紧束缚,反而会造成质子密度在内部强的阻尼和束缚轨道数目增加. 由于质子密度降低,使中子位变浅. 当核有更多中子时,核位变得更浅,中子的费米能 ϵ_F^n 增大,很多中子会束缚得较松散,这就意味着,中子密度分布向外扩展. 当 $N \gg Z$ 时,在核的外部范围,中子和质子密度分布的比例被破坏了,使得出现中子皮. 图 1 是相对论 H-F 计算的中子和质子的势能,¹³³Cs 是稳定核, U_p 和 U_n 有类似

形状(除库仑位外),即 $\epsilon_F^p \sim \epsilon_F^n$; 而¹⁸¹Cs 是远离稳定线核,这时 U_n 不同于 U_p ,特别在表面, U_p 变深,即 $\epsilon_F^p > \epsilon_F^n$.

相对论平均场计算还发现在核内部范围,随着中子数增加,中子的有效质量 m^*/m 变大,而质子的 m^*/m 变小. 应用到质子皮情况,似乎对于高 Z 的核,不大可能形成质子皮,只可能在低 Z 核形成质子皮.

随着 N/Z 远离稳定线 N/Z ,会产生中子皮效应. 可以预料,相对于表面形变的恢复力会直接受到中子皮影响,皮上中子的激发会感受到较微弱的恢复力,这会导致中子粒子-空穴激发的新模式. 中子皮出现会影响核反应,皮上的中子会早于质子接触其它核,会流入稳定核中,要比正常核中子有更大的迁移率, ϵ_F^p 的不同好象一个驱动力,会增强反应截面,可能出现快中子流等现象.

有些作者称,⁶He 和⁸He 可看作第二类型的中子晕核,虽然具有通常的半径,但中子分布的均方根半径远大于芯⁴He 的半径,⁶He 和⁸He 分别有二个中子和四个中子在核芯⁴He 之外. 利用相互作用总截面来判断中子和质子分布的差别是困难的,但可以获得反应总截面 σ_1 和中子迁移截面的关系^[9]. 对于⁶He,两个中子迁移截面为 $\sigma_{-2n}({}^6\text{He}) = \sigma_1({}^6\text{He}) - \sigma_1({}^4\text{He})$,左右两边值各为 $189 \pm 14 \text{ mb}$ 和 $219 \pm 8 \text{ mb}$,两者非常接近. 对于⁸He, $\sigma_{-2n}({}^8\text{He}) + \sigma_{-4n}({}^8\text{He}) = \sigma_1({}^8\text{He}) - \sigma_1({}^4\text{He})$,左右两边值分别为 $297 \pm 19 \text{ mb}$ 和 $314 \pm 8 \text{ mb}$. 这是否能说明,⁶He 和⁸He 可用⁴He 芯加晕中子来描述呢? 但实验发现⁸He 中子分离能是 2.6 MeV .

4 电磁断裂和软巨共振

在 高能 ($1 \sim 200 \text{ GeV/u}$) 重离子碰撞中,已经观测到大的电磁断裂截面(EMD). 在核之间的高能电磁反应中,最主要的激发机制是巨偶极共振(GDR)的单光子激发^[10]. 对于晕核,如¹¹Li 和高 Z 靶核引起反应,也观测到特别大的 EMD 截面^[11],如果用 Glauber 模型

计算核过程对总截面的贡献,那么

$$\sigma_1^{\text{EMD}} = \sigma_1^{\text{exp}} - \sigma_1^{\text{Nccl}}$$

可以发现, $\sigma_1^{\text{EMD}}(^{11}\text{Li} + \text{Pb}) = 1.27 \pm 0.64 \text{ b}$, $\sigma_{-2n}^{\text{EMD}}(^{11}\text{Li} + \text{Pb}) = 0.76 \pm 0.09 \text{ b}$, 而对稳定核 ^{12}C , $\sigma_1^{\text{EMD}}(^{12}\text{C} + \text{Pb}) = 90 \pm 35 \text{ mb}$, 对奇异核与轻靶反应, $\sigma_1^{\text{EMD}}(^{11}\text{Li} + ^{12}\text{C}) \sim 40 \text{ mb}$, 仅占总反应截面很小部分^[9], 这说明了晕核的结构效应, 在电磁或库仑相互作用参加反应时就显得特别突出.

已提出两种反应机制解释这种现象. 第一种是所谓“软模式巨共振”. 类似于高能重离子碰撞中, 对电磁断裂的处理方法, 在电磁相互作用的多极展开中, E1(偶极)分量可以最优先的. 对晕核, 集体偶极激发模式大概有三种可能, 这就是 ^9Li 芯中的中子相对于质子振动($Z=3$ 、 $N=6$ 和 $A=9$); ^{11}Li 中所有中子相对于质子振动($Z=3$ 、 $N=8$ 和 $A=11$); ^{11}Li 中的 ^9Li 芯和外面中子集团振动. 这三种模式中的前两种属于正常 GDR, 其对电磁断裂截面的贡献与稳定核相类似, 不能解释晕核与高 Z 靶核异常的电磁断裂截面. 而 ^9Li 芯相对于两中子振动模式是晕核可能特有的集体运动模式. 如果假定有这样的集体运动, 其激发能大致仅 1 MeV, 也就是说, 这样的一种偶极振动激发会发生在非常小的能量下, 在能量权重和规则限制下, 产生一个大的跃迁强度机制. 但我们知道, 偶极共振这样一种核的集体运动, 有比较长的寿命. 最近, 很多作者提出, 由于芯和高 Z 靶核强的库仑相互作用, 结合能非常小的晕和芯没有时间形成偶极共振这样一种集体运动, 所以, 他们提出了直接碎裂反应机制.

考虑一中子晕核 ^{11}Li 和高 Z 靶核在大的碰撞参数下碰撞, ^{11}Li 沿库仑轨道运动. 可以想象, 靶核芯会发生电磁相互作用, 而靶与晕中子无库仑相互作用, 核芯在反应前将被减速, 反应后被加速, 核芯和晕中子会产生不同的速度, 这样, 核芯和晕中子将不经过偶极共振而直接跃迁到连续态. 经对这样的过程计算发现, 由于晕中子长的尾巴, 同样在低激发

能下出现偶极共振峰.

对异常大的电磁断裂截面的解释, 还没有完全定论. 对 ^{11}Li 在 28 MeV/u 的碎裂研究^[12], 发现后加速效应, 从而支持直接碎裂, 但能谱却显示出 Breit-Wigner 分布支持偶极共振的矛盾结果, Nakamura T 等人^[12]用 ^{11}Be (72 MeV/u) + Pb 反应同样观察到后加速效应, 能谱也同直接碎裂的结果一致.

5 反应机制

松散束缚的晕核的一个主要特征现象, 是断裂反应给出了朝前的窄的动量分布, 定性来说, 这同晕核的大尺寸一致. 当然, 还需要对晕波函数作用和反应机制做出定性理解, Anne 研究了 41 MeV/u ^{11}Be 和 Be、Ti 与 Au 靶的反应^[13], 测出了单中子的单峰和多峰角分布, 研究了核和库仑机制的相对作用. 发现在 $0^\circ \sim 20^\circ$ 之间, 对于 Au 靶, 库仑贡献对小角度是主要的. 图 2 表示了库仑激发电论 (CE) 给出的结果, 以及既包括库仑又包括衍射断裂 (SUD) 的结果^[2,13].

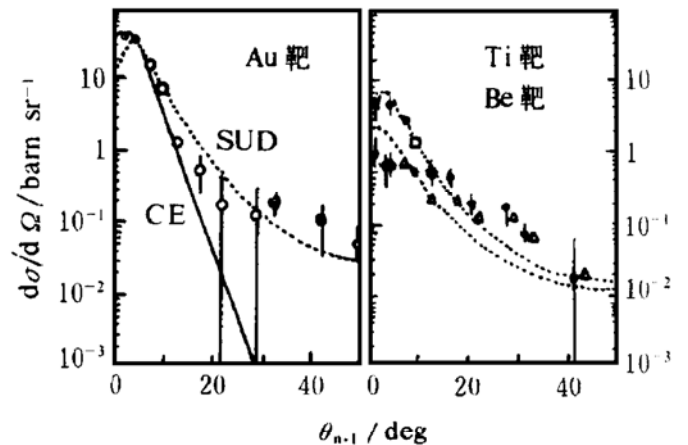


图 2 (a) 在 Au 靶上的单中子角分布 ($^{10}\text{Be} + n$), CE 是库仑激发电论计算结果, SUD 包括了库仑和衍射断裂. (b) 对于 Ti 和 Be 靶, 仅仅画出了包括库仑和衍射断裂结果

当碰撞参数小于核芯和靶核半径和时, 会发生核芯和靶的激烈碰撞, 开放了核芯破裂反应道. 在突然近似下, 晕中子动能不会改变. GSI 用 460 MeV/u 的 ^{11}Be 束, 在 ^{11}Be 和 ^{10}Be 符合测量下, 研究了核芯破裂道, 发现中

子有宽广的角分布,测出宽度 $\Gamma(^{10}\text{Be}) = 98 \text{ MeV}/c$ 、 $\Gamma(^7\text{Li}) = 66 \text{ MeV}/c$ 和 $\Gamma(^9\text{Li}) = 36 \text{ MeV}/c$ [2].

用转移反应研究丰中子同位素也在进行中,柏林的 HMI 选用 ^{14}C 作为束流,所采用的反应机制为:双电荷交换($^{14}\text{C}, ^{14}\text{O}$),同位旋转移 $\Delta T = 2$ 来研究 ^{10}He 和 ^{14}Be ;用 $3n$ 削裂加 $1p$ 拾取($^{14}\text{C}, ^{12}\text{N}$), $\Delta T = 2$ 研究 ^{16}B ;用($^{14}\text{C}, ^{13}\text{N}$), $\Delta T = 3/2$ 研究 ^{11}Li 、 ^7He 和 $3n$;用三个中子拾取($^{14}\text{C}, ^{17}\text{F}$), $\Delta T = 3/2$ 来研究 ^{11}Li [14], 试图找到 ^7He 和 $3n$ 系统的激发态,但至今仍是矛盾的结果. 如果 $3n$ 共振存在,会对核子-核子相互作用产生重要结果,采用 $^2\text{H}(^{14}\text{C}, ^{13}\text{N})3n$ 反应,未观察到共振. 采用 $^6\text{Li}(^{14}\text{C}, ^{13}\text{N})^7\text{He}$ 反应仍和前面类似. ^{10}He 是双幻核,但是不稳定的,应用 $^{10}\text{Be}(^{14}\text{C}, ^{14}\text{O})^{10}\text{He}$ 来研究 ^{10}He , 反应机制是两个质子拾取和两个中子削裂,由测量反应谱可见, ^{10}He 的共振比较明显,观察到 ^{10}He 的三个共振态和宽度. 另外,还测量了 ^{14}Be 和 ^{16}B 的谱.

奇异核在靶上引起的的弹性散射研究,可以对核结构给出一些细节资料,如核的基态密度分布和有关位势的参数. 在逆运动学情况下,质子在奇异核上的散射被认为是提供密度分布的有用工具. 对于稳定核,用几百 MeV 到千 MeV 的质子作为探针,研究核密度分布已经很成功,因为在这个能量下,弹性质子散射可以精确由衍射多次散射理论来描写,而这种理论相关于测量的核物质半径. 上述方法应用于非稳定核,用放射性束轰击质子,测量质子弹散截面. 理论估计,在小散射角时,质子散射对研究晕核大小是灵敏的. 在这方面已经有一些测量结果[15],如 GSI 用 $674 \text{ MeV}/u$ $^8\text{He} + p$ 散射、 $717 \text{ MeV}/u$ $^6\text{He} + p$ 和 $699 \text{ MeV}/u$ $^4\text{He} + p$ 散射,支持了 ^8He 中子皮的存在. 另外,在 $60 \text{ MeV}/u$ 能量下,也测量了 $^9\text{Li} + p$ 、 $^8\text{He} + p$ 的散射,发现 $^{11}\text{Li} + p$ 的截面两倍小于其它同位素截面,截面减小可定性的理解为 ^{11}Li 稀松束缚中子容易从炮弹中跑掉所致.

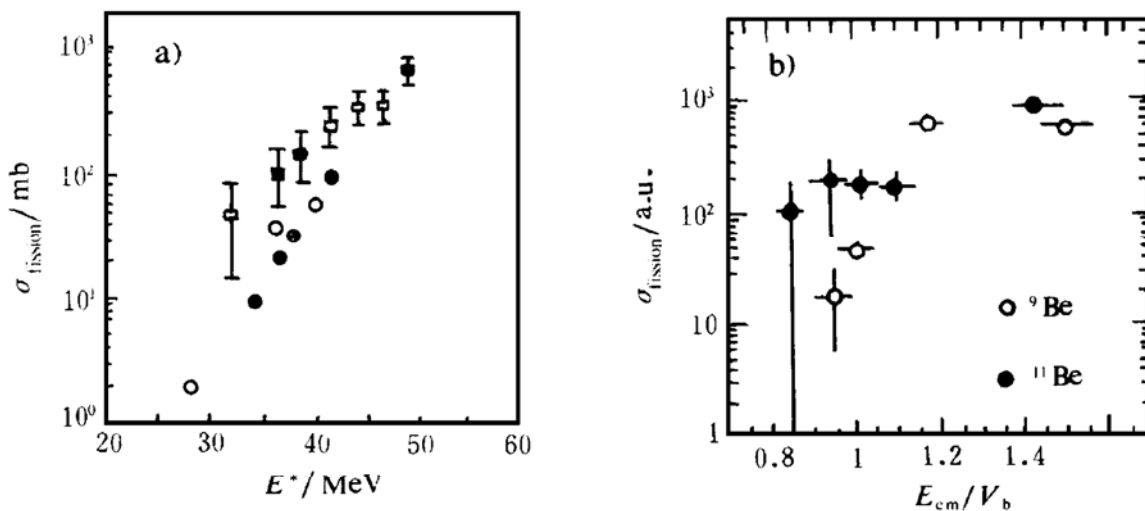


图 3 (a) 融合裂变反应 $^6\text{He} + ^{209}\text{Bi}$ (\square)和 $^4\text{He} + ^{209}\text{Bi}$ (\bullet)激发函数
(b) $^9\text{Be} + \text{U}$ (\circ)和 $^{11}\text{Be} + \text{U}$ (\bullet)的融合截面作为 E_{cm}/V_b 的函数

Ganil 对 $^{11}\text{Li} + ^{28}\text{Si}$ 弹散测量[16], 观察到 σ/σ_R 分布,同 ^6Li 弹散相比较可看出,随角度减小,变化较缓慢,这不能用两核质量差别来解释. 在很低能量下,也测量了 $^6\text{He} + \text{Pb}$ 的弹散[17]. 目前,对弹散实验数据仍用光学模型来分析,结果支持了 ^6He 有正常半径的论据.

用较轻中间质量的丰中子炮弹引起亚位垒融合的理论分析指出[18],由于低的融合位垒和同伴随中子晕的低激发能模式的耦合会大大增加亚位垒融合截面,但也有人指出[19],由于同破裂道的耦合,会严重的限制融合截面. 近来, $^{11}\text{Be} + \text{U}$ 和 $^6\text{He} + \text{Bi}$ 的亚位垒融合

激发函数测量得到了很有意义的结果. 图 3 (a) 是 ${}^6\text{He} + {}^{209}\text{Bi}$ 融合裂变反应的激发函数^[17], 发现在相同激发能时, ${}^6\text{He} + {}^{209}\text{Bi} \rightarrow {}^{215}\text{At}$ 的裂变截面几倍高于 ${}^4\text{He} + {}^{209}\text{Bi} \rightarrow {}^{213}\text{At}$ 的裂变截面. 图 3(b) 是 ${}^{11}\text{Be} + \text{U}$ 融合激发函数^[20], 同 ${}^9\text{Be} + \text{U}$ 相比较, 也同样观察到 ${}^{11}\text{Be} + \text{U}$ 的截面高于 ${}^9\text{Be} + \text{U}$ 的截面, 图中 $E_{\text{cm}}/V_{\text{b}} = 1.1 \sim 1.2$ 数据点迷糊不解.

人们知道, 稳定核的亚位垒融合截面大于一维的位垒穿透计算, 这是由于同非弹性和转移道的耦合, 结果降低了融合位垒的高度所致. 与使用有微弱束缚中子的放射性核作炮弹, 亚位垒融合截面可以有更大增强, 这可能是由于它的密度分布扩大到大距离, 使得晕核的位垒低于稳定核. 另外, 晕核有强的低能 E1 态, 这些模式的激发也可以耦合至融合道, 导致融合截面增强. 由于中子-质子相互作用强于中子-中子相互作用, 非常大的 N/Z 比同样是降低位垒的因素.

总的来说, 放射性核引起的反应机制研究是一个刚刚开始的话题, 很多问题还不清楚, 有待于实验和理论的进一步研究.

参 考 文 献

- 1 Tanihata I, Hamagaki H, Hashimoto O et al. Measurements of Interaction Cross Section and Nuclear Radii in the Light p-shell Region. *Phys Rev Lett*, 1985, 55: 2676~2679
- 2 Jonson B. Halo Nuclei and Other Exotics. *Nucl Phys*, 1995, A583:733~746
- 3 Sagawa H. Perspectives on Study of Unstable Nuclei near Drip Lines. *Nucl Phys*, 1995, A583:755~762
- 4 Hussein M S, Rego R A, Bertulani C A. Microscopic Theory of the Total Reaction Cross Section and Application to Stable and Exotic Nuclei. *Phys Rep*, 1991, 201:279~334
- 5 Kelley J H, Austin Sam M, Kryger R A et al. Parallel Momentum Distributions as a Probe of Halo Wave Functions. *Phys. Rev Lett*, 1995, 74:30~33
- 6 Zhukov M V, Danilin B V, Fedorov D V et al. Bound State Properties of Borromean Halo Nuclei: ${}^6\text{He}$ and ${}^{11}\text{Li}$. *Phys Rep*, 1993, 231:151~199
- 7 张晓东, 葛凌霄. QMD 模型对 ${}^{11}\text{Li}$ 引起反应的研究. *高能物理与核物理*, 1996, 20:270~276
- 8 Fukunishi N, Otsuka T, Tanihata I. Neutron-skin and Proton-skin Formations in Exotic Nuclei far from Stability. *Phys Rev*, 1993, C48:1648~1655
- 9 Sugimoto K, Tanihata I. In *Structure and Reaction of Unstable Nuclei*. Singapore: World Scientific, 1993, 325
- 10 Bertulani C A, Baur G. Electromagnetic Processes in Relativistic Heavy Ion Collisions. *Phys Rep*, 1988, 163: 299~408
- 11 Kobayashi T, Shimoura S, Tanihata I et al. Electromagnetic Dissociation and Soft Giant Dipole Resonance of the Neutron-dripline Nucleus ${}^{11}\text{Li}$. *Phys Lett*, 1989, 232:51~55; Blank B, Gaimard J J, Geissel H et al. Reaction Cross Section Measurements of the Neutron-rich Isotopes ${}^8, {}^9, {}^{11}\text{Li}$ at 80 MeV/nucleon. *Z Phys*, 1991, A340:41~50; Tanihata I. Structure of Neutron-rich Nuclei Studied by Radioactive Beam. *Nucl Phys*, 1991, A522:275C~292C
- 12 Nakamura T, Shimoura S, Kobayashi T et al. Coulomb Dissociation of a Halo Nuclens ${}^{11}\text{Be}$ at 72 A MeV. *Phys Lett*, 1994, B331:296~301
- 13 Anne R, Arnell S E, Bimbot R et al. Dissociation Reaction of the ${}^{11}\text{Be}$ one Neutron Halo, The Interplay between Structure and Reaction Mechanism. *Phys Lett*, 1993, B304:55~59
- 14 Bohlen H G, Gehauer B, Kirchner Th et al. Study of Light Neutron-rich Nuclei with ${}^{14}\text{C}$ Induced Reactions. *Nucl Phys*, 1995, A583:775~782
- 15 Neumaier S, Alkhazov G D, Andronenko M N et al. Study of the Nucleon Density Distribution of ${}^6\text{He}$ and ${}^8\text{He}$ by Proton Elastic Scattering in Inverse Kinematics. *Nucl Phys*. 1995, A583:799~802; Moon C B, Fujimaki M, Hirezaki S et al. Measurements of ${}^{11}\text{Li} + \text{p}$ and ${}^9\text{Li} + \text{p}$ Elastic Scattering at 60 MeV. *Phys Lett*, 1992, B297:39~43; Korsheninikov A A, Yoshida K, Aleksandrov D V et al. Experimental Study of ${}^8\text{He} + \text{p}$ Elastic and Inelastic Scattering. *Phys Lett*, 1993, B316:38~44
- 16 Anne R, Araell S E, Bimbut R et al. Observation of Forward Neutrons from the Break-up of the ${}^{11}\text{Li}$ Neutron Halo. *Phys Lett*, 1990, B250:19~23
- 17 Penionzhkevich Yu E, Cherepanov E A, David I et al. Investigation of the Elastic Scattering and Fission Reaction Induced by ${}^6\text{He}$ Beam. *Nucl Phys*, 1995, A583:791~794
- 18 Takigawa N, Sagawa H. Interaction Potential and Fu-

- sion of a Halo Nucleus. *Phys Lett*, 1991, B265:23~28;
 Dasso C H, Donangelo R. Fusion Enhancement via the
 Soft Dipole Mode in Neutron-rich Nuclei. *Phys Lett*,
 1992, B276:1~3
- 19 Hussein M S, Pato M P, Canto L F et al. Near-barrier
 Fusion of ^{11}Li with Heavy Spherical and Deformed Tar-
 gets. *Phys Rev*, 1992, C46:377~379
- 20 Fekou-Youmbi V, Sida J L, Alamanos N et al. Sub-
 coulomb Fusion with Halo Nuclei. *Nucl Phys*, 1995,
 A583:811~816

Study of Reaction Induced by Radioactive Beams

GE Lingxiao ZHANG Xiaodong

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

Abstract The characteristic of the nuclei far from stability and the mechanism of the reactions induced by these nuclei are reviewed. The discussion includes the structure beyond the dripline and examples of elastic and inelastic scattering, inverse kinematic and nuclear break up, and of subbarrier fusion using radioactive beams.

Key Words halo nuclei neutron skin electromagnetic dissociation reaction mechanism

(上接第 61 页)

优惠政策,如在还贷期内减免所得税,所获利润用于建设新的核电机组,使核电逐步具有自我发展能力,走自我发展的道路。

4)调整核能技术的科研和设计体制,理顺各科研、设计院所的工作关系,明确各单位的分工与工作重点及发展方向.建议科研院所应以科研为主,进行先进动力堆型关键技术的试验研究,而工程设计包括先进堆型核电和核供热站项目的可行性研究则应以设计院为主来承担。

综上所述,核能在我国能源发展中将越来越起重要作用,为此必须制定正确的发展战略和技术路线并有效地实施.这样,在 21 世纪内核能事业,尤其是核电必将取得重大的发展。

参 考 文 献

- 1 American Nuclear Society. *Nuclear News*, 1996, 39 (3):29~44

A Personal Opinion on Technology Developing Line of Nuclear Energy in China

XU Jiming

(*Beijing Institute of Nuclear Engineering, Beijing 100840*)

Abstract The position and role of nuclear energy in china's energy sources development is briefly outlined and a proposal about strategic principles and technology line of china's nuclear energy development in recent 10~20 years is put forward.

Key Words nuclear energy nuclear reactor nuclear power nuclear heating