

中能轻奇异核反应总截面的激发函数测量*

沈文庆 冯 军 马余刚 王建松 方德清 蔡翔舟 苏前敏
(中国科学院上海原子核研究所 上海 201800)

摘 要 通过对中能区和相对论能区反应总截面的比较, 可了解核中核子密度分布的尾巴分量提供重要的信息, Glauber 模型的计算总是低估中能区的反应总截面, 对中子晕核和中子皮核, 这种低估更为严重. 因此, 基于 Glauber 模型从反应总截面提取核的大小存在着一些问题. 对一些轻的奇异核进行中能区核反应总截面的激发函数测量可能会有助于上述问题的解决.

关键词 激发函数 反应总截面 奇异核

分类号 O571.42

核的大小是原子核的一个重要性质. 核半径或均方根半径包含有原子核的壳效应、形状、形变和核的剩余相互作用等方面的信息. 从 80 年代开始, 通过各种相对论能量下的核-核碰撞测量了它们的相互作用截面, 借助于 Glauber 模型提取了这些核的半径, 同时发现了轻奇异核存在中子皮和中子晕. 核半径的同位素依赖性以及同量异位素的依赖性使奇异核结构特性的研究更深入了一步^[1~3]. 最近相对论平均场(RMF)和 Hattie-Fork-Bogliubov(HFB)计算预言, 许多不稳定的丰中子核和丰质子核都可能有中子和质子皮^[4,5]. 通过核反应截面的测量研究丰中子核和丰质子核是否存在中子晕、中子皮、质子皮和质子晕的特性成了人们非常感兴趣的课题. 为提取核半径, 通常有相互作用截面测量、碎裂反应产物动量分布、电四极矩测量及弹性散射角分布等不同的实验方法, 而核反应总截面的测量是最基本、最常用的方法.

在相对论能区(GeV/u), 适当选取势参数用 Glauber 模型能较好地拟合相互作用截面的实验值, 但人们发现在中能区(几十 MeV/u), 用这样的势参数的 Glauber 模型的

计算结果总是比总截面的实验值低^[2](图 1). 特别有趣的是, 中能区 Glauber 模型计算结果和实验值的差距对不同的核是不一样的. 对中子皮和中子晕核, 这种差距大大增强. 为了更好地描述这种差别, 文献[2]定义了一个差异因子 d :

$$d = \frac{\sigma_R(\text{exp}) - \sigma_R(\text{Gl})}{\sigma_R(\text{Gl})},$$

式中 $\sigma_R(\text{exp})$ 是中能区实验的总反应截面, 而 $\sigma_R(\text{Gl})$ 是势参数可拟合的同一反应在相对论能区实验反应总截面的 Glauber 模型用于中能区的计算值. 从图 2 给出的差异因子和中子过剩自由度的关系^[2]及图 3 显示的同量异位素的差异因子和同位旋的关系^[2]中可清楚地看出, 对稳定核或稳定线附近的核, 差异因子在 10%~20%, 而对中子晕核和中子皮核差异因子急剧增大, 可达 40%~50%. 特别是对⁸B, 中能区反应总截面测量表明它存在质子晕, 而相对论能区测量结果表明⁸B 不存在质子晕.

法国 GANIL、美国 MSU 和日本 RIKEN 曾测量了一批中能区核反应总截面的实验数据^[6~10]. 但是对 20~1 000 MeV/u

* 收稿日期: 1999-03-10.

国家自然科学基金(项目号 96705059)、上海市科学技术发展基金(项目号 96xd14011)和中科院九五基础性研究重大项目共同资助.

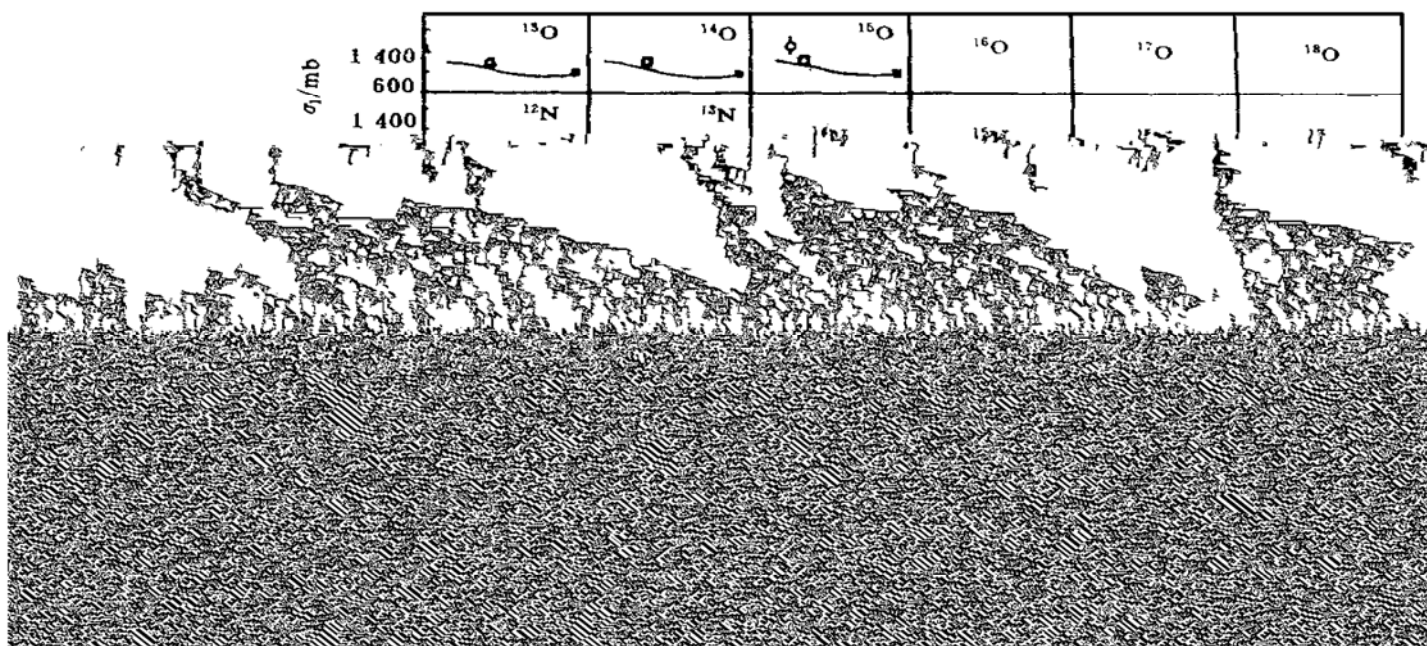


图 1 与 C 靶作用的一些弹核的反应总截面的激发函数^[2]

实线是 Glauber 模型计算结果.

能区内的同一核的核反应总截面的激发函数实验数据确实是不多的, 特别是中能下的数

据较少. 对⁸He、¹⁴Be、⁹C、¹⁰C、¹²N、¹³N、¹³O 和¹⁴O 等, 在中能区只有一个能量点的实验数据. 由于核子-核子相互作用截面在中能区对轰击能非常敏感, 随轰击能下降, 核子-核子相互作用截面急剧增加, 这使得核反应总截面对核子分布尾巴区的核子分布更灵敏. 因此测量一些轻的奇异核在中能区的核反应总截面的激发函数, 与相对论能区的数据比较对搞清这些问题是极其重要的.

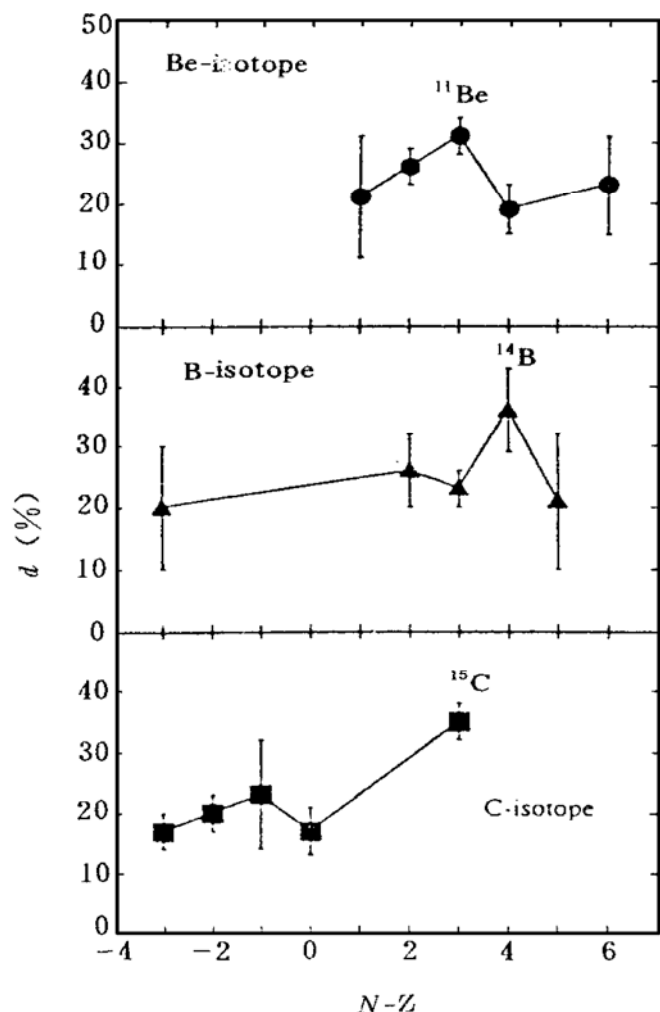


图 2 对 Be、B 和 C 不同同位素的差异因子 d 和中子过剩自由度 $N-Z$ 的关系^[2]

用 Glauber 模型拟合实验核反应总截面从而提取核的大小或核内的核子分布是一个值得探讨的问题. 这种拟合中需要确定的因素有介质中核子-核子相互作用截面和核势参数或核内核子分布的形式, 而核内核子分布形式中至少有核的均方根半径和弥散度两个因素, 因此对有多个实验点的核反应总截面的激发函数的拟合, 将会提供较高的约束条件, 使提取的核半径数据更为可靠. 我们曾对介质中的核子-核子相互作用截面对核反应总截面的影响作过深入的研究^[11], 发现可以用较好的介质中的核子-核子相互作用截面的能量依赖性的半经验公式来得到对核反应总截面稍好的拟合, 但这种影响不大, 大致只占核反应总截面的 10%. 不能解释在

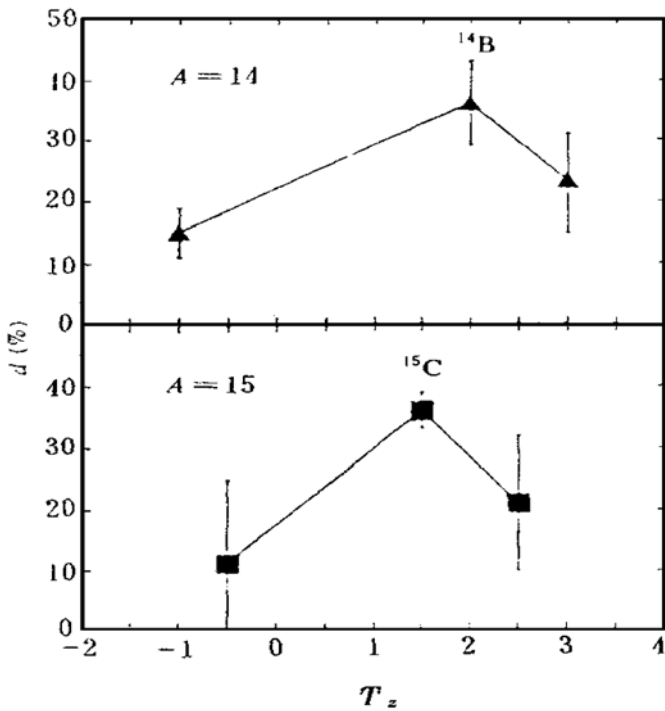


图 3 对 $A = 14$ (\blacktriangle) 和 $A = 15$ (\square) 的同量异位素的差异因子 d 和同位旋依赖关系^[12]

中子皮和中子晕核附近差异因子的增强和稳定核的 20% 左右的差异因子. 另一途径是用其他方法来拟合核反应总截面. 我们曾尝试用输运理论的 BUU 方程或是量子分子动力学 (QMD) 方法来拟合核反应总截面^[12]. BUU 方程和 QMD 方法描述了反应过程中的碰撞动力学, 它们包含了介质中核子-核子相互作用截面、核物质的态方程和泡利阻塞效

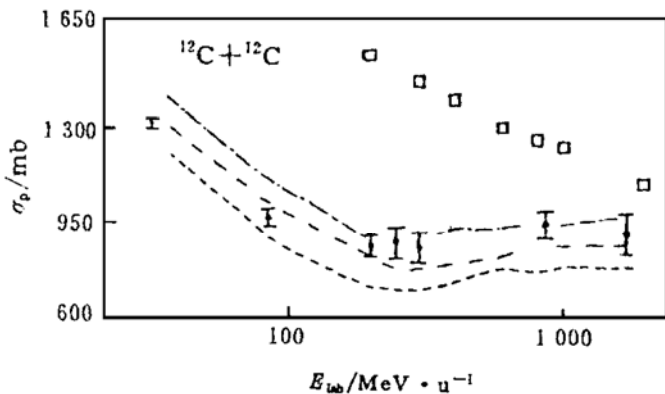


图 4 核子-核子相互作用截面和动力学对反应总截面的影响^[12]

\square 是老的级联模型计算的, 模型中没有考虑吸引的核平均场, 因此大于实验值; \rightarrow 、 $-$ 和 $-$ 是 BUU 方程计算值, 但核子-核子相互作用截面分别取 σ_{Cug} 、 $0.8 \sigma_{\text{Cug}}$ 和 $0.6 \sigma_{\text{Cug}}$ 得到的.

应等因素, 是研究中能核-核碰撞的重要工具之一. 图 4 显示了由 BUU 计算的 $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$ 中能区到相对论能区的核反应总截面的激发函数^[12]. 计算使用了软势及 0.6、0.8 和 1.0 倍的 Cugnon 参数化核子-核子相互作用截面. 核子分布采用矩形分布. 图 5 显示了计算拟合的 $^{11}\text{Li} + ^{12}\text{C}$ 、 $^{11}\text{Be} + ^{12}\text{C}$ 、 ^{27}Al 奇异核反应总截面的激发函数^[12]. 在核子矩形分布的假设下拟合实验数据, 得到了 ^{11}Li 的 $r_0 = 1.60 \text{ fm}$, 对 ^{11}Be 的 $r_0 = 1.5 \text{ fm}$, 与 Glauber 模型提取的值大致一致. 改造这种计算中的核子分布形式(初始核子抽样函数), 例如费米分布型或带中子晕型的分布, 研究适合于奇异核势的形式和介质中相互作用截面, 可能会得到更好地拟合中能核反应总截面的实验激发函数, 从而提取核半径(或核子分布形式)的方法. 这可能有助于解决没有细致考虑动

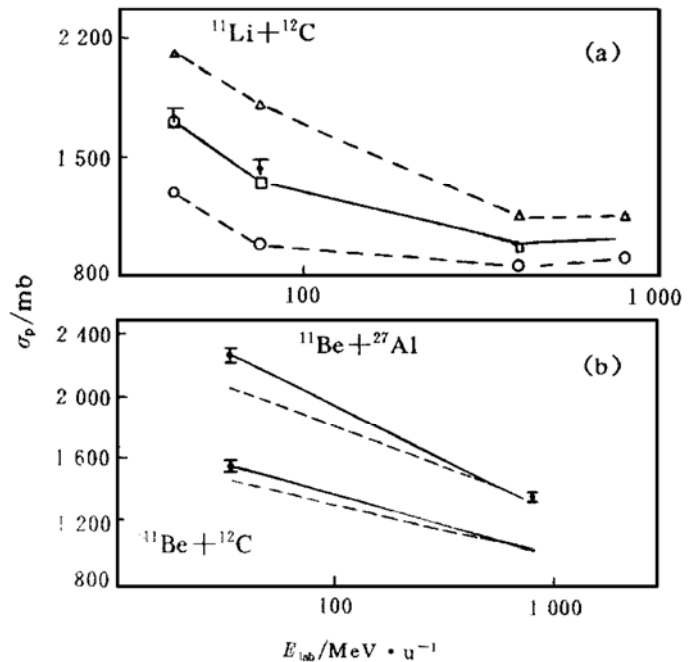


图 5 计算的 $^{11}\text{Li} + ^{12}\text{C}$ 、 $^{11}\text{Be} + ^{12}\text{C}$ 、 ^{27}Al 奇异核反应总截面的激发函数和实验值的比较(带误差棒的点代表实验值)^[12]

(a) 对 $^{11}\text{Li} + ^{12}\text{C}$ 反应, ^{12}C 的 $r_0 = 1.33 \text{ fm}$, \triangle 、 \square 和 \circ 分别表示对 ^{11}Li 的 $r_0 = 1.80$ 、 1.60 和 1.33 fm 的计算结果; (b) 对 $^{11}\text{Be} + ^{12}\text{C}$ 、 ^{27}Al 的反应, 对 ^{11}Be 、 ^{27}Al 、 ^{12}C 的 r_0 分别取为 1.5 、 1.25 、 1.33 fm , $-$ 和 $-$ 分别表示硬势和软势的计算结果.

力学过程的 Glauber 模型计算中能核反应总

截面偏低的问题.

我们建议测量 ${}^6\text{He}$ 和 ${}^6\text{Li}$ 中能核反应总截面的激发函数. ${}^6\text{He}$ 是中子晕核(或中子皮核),它的波函数也已知道,它对于反应机制是很灵敏的. ${}^6\text{Li}$ 作为稳定核可与 ${}^6\text{He}$ 进行比较.对同量异位素链 $A=11$,包括正常核和中子晕核,若能测量它们在中能区的核反应总截面的激发函数,也应该是对解决上述问题极有用的数据.是否存在质子晕,由中能区和相对论能区实验数据提取的结论互相矛

盾.因此,缺中子核的中能区核反应总截面激发函数也是非常有意义的实验数据.根据兰州国家重离子加速器实验室的奇异核次级束 RIBLL 现在的条件,同时也建议测量 ${}^{17}\text{F}$ 缺中子核的中能区核反应总截面的激发函数.对中能区奇异核核反应总截面的激发函数,实验测量加上对 Glauber 模型的改进或用 BUU 和 QMD 等类方法计算核反应总截面,可能会对中能区实验中研究丰中子和缺中子核的奇异核结构特性提供更好的方法.

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*, 1986, 55: 2 676~ 2 679
- 2 Ozawa A, Tanihata I, Kobayashi T *et al.* Interaction Cross Sections and Radii of Light Nuclei. *Nucl Phys*, 1996, A608: 63~ 76
- 3 Suzuki T, Geissel H, Bochkarev O *et al.* Nuclear Radii of Na and Mg Isotopes. *Nucl Phys*, 1998, A630: 661~ 677
- 4 Hirata D, Toki H, Watabe T *et al.* Relativistic Hartree Theory for Nuclei far from the Stability Line. *Phys Rev*, 1991, C44: 1 467~ 1 475
- 5 Fukunishi N, Otsuka T, Tanihata I *et al.* Neutron-skin and Proton-skin Formations in Exotic Nuclei far from Stability. *Phys Rev*, 1993, C48: 1 648~ 1 655
- 6 Mittig W, Chouvet J M, Zhan Wenlong *et al.* Measurement of Total Reaction Cross Section of Exotic Neutron-rich Nuclei. *Phys Rev Lett*, 1987, 59: 1 889~ 1 891
- 7 Saint-Laurent M G, Anne R, Bazin D *et al.* Total Cross Section of Reactions Induced by Neutron-rich Light Nuclei. *Z Phys*, 1989, A332: 457~ 465
- 8 Villari A C C, Mittig W, Plagnol E *et al.* Measurements of Reaction Cross Sections for Neutron-rich Exotic Nuclei by a New Direct Method. *Phys Lett*, 1991, B268: 345~ 350
- 9 Fukuda M, Ichihara T, Inabe N *et al.* Neutron Halo in ${}^{11}\text{Be}$ Studied via Reaction Cross Sections. *Phys Lett*, 1991, B268: 339~ 344
- 10 Warner R E, Kelley J H, Zecher P *et al.* Evidence for a Proton Halo in ${}^8\text{B}$: Enhanced Total Reaction Cross Sections at 20 to 60 MeV/nucleon. *Phys Rev*, 1995, C52: R1 166~ R1 169
- 11 Cai Xiangzhou, Feng Jun, Shen Wenqing *et al.* In Medium Nucleon-nucleon Cross Section and Its Effect on Total Nuclear Reaction Cross Section. *Phys Rev*, 1998, C58: 572~ 575
- 12 Ma Yugang, Shen Wenqing, Feng Jun *et al.* Study of the Total Reaction Cross Section via the Reaction Dynamic Model. *Phys Rev*, 1993, C48: 850~ 856

Excitation Function Measurement of Total Reaction Cross Section at Intermediate Energy for Light Exotic Nuclei

Shen Wenqing Feng Jun Ma Yugang Wang Jiansong Fang Deqing
Cai Xiangzhou Su Qianming

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

Abstract A comparison of interaction cross section at relativistic and (下转第 164 页)

(上接第136页)

intermediate energy provides important information about the existence of tail component in the density distribution. The Glauber model calculation always underestimates the total reaction cross section at intermediate energy. The differences are enhanced for halo and skin nuclei. The method to extract the size of nuclei via Glauber model seems to have some ambiguity. The excitation function of total reaction cross section at intermediate energy for some light exotic nuclei should be measured. Such experimental data will possibly give the chance to solve above problem.

Key words excitation function total reaction cross section exotic nuclei

Classifying number 0571.42