

## 中子分布弥散度对反应总截面的影响\*

冯 军 沈文庆 马余刚

(中国科学院上海原子核研究所 上海 201800)

1992年10月16日收到

### 摘 要

在引入库仑场修正的 Glauber 模型基础上, 区分入射弹核和靶核中的中子、质子, 并考虑有限力程相互作用, 发展了一个计算核反应总截面的微观修正模型. 如果引入一个核内中子分布弥散度随中子分离能的变化关系, 则能较好地解释奇异核(如  $^8\text{He}$ ,  $^{11}\text{Li}$ ,  $^{11}\text{Be}$ ) 反应总截面的反常增加. 同时, 该修正模型还能在低能到高能的范围较好地拟合稳定核的反应总截面.

**关键词** 弥散度, 反应总截面, 奇异核, 分离能.

原子核反应总截面是核反应的基本特征之一. 它的测量对于研究核的结构、核内核子分布及相互作用都有很重要的意义<sup>[1-3]</sup>. Tanihata 实验小组<sup>[4]</sup>测量了由次级束流引起的核反应总截面, 实验发现  $N/Z$  较大的核的反应总截面比其邻近的核大很多. 这种实验现象引起了人们很大的兴趣, 促使人们从 Glauber 理论出发, 通过引入不同的核物质分布(自洽的托马斯-费米分布, Hartree-Fock 理论给出的分布, 相对论平均场理论给出的分布等), 对奇异核的反应总截面进行了理论上的探讨<sup>[5,6]</sup>. 这种分析方法需要进行多重积分(七维积分)及核中核子表皮分布的复杂计算, 并且只能拟合一个或几个核的实验结果, 普适性较差. 本文在库仑修正的 Glauber 模型基础上, 引入小液滴模型给出的核内中子、质子分布, 同时考虑有限力程相互作用, 发展了一个描述核反应总截面的微观修正模型. 该模型中, 核内中子分布的弥散度不再是常数, 而与原子核外层中子的分离能有关.

根据 Glauber 理论, 考虑有限力程相互作用, 原子核反应总截面可表述为<sup>[7]</sup>:

$$\sigma_R = 2\pi \int b db [1 - T(b)], \quad (1)$$

$$T(b) = \exp \left[ -\bar{\sigma}_{NN} \int d^2r_1 \int d^2r_2 f(|r_1 - r_2|) \rho_{ZT}(r_1) \rho_{ZP}(|r_2 - b|) \right], \quad (2)$$

其中,  $\bar{\sigma}_{NN}$  是核子-核子平均碰撞截面,  $b$  是碰撞参数,  $\rho_{ZT}(r_1)$ 、 $\rho_{ZP}(|r_2 - b|)$  为厚度函数, 有限力程相互作用函数  $f(r)$  按  $\int f d^2r = 1$  进行归一. 如果考虑零程相互作用, 则

\* 国家自然科学基金、兰州国家重离子物理实验室资助.

(2)式变为标准的 Glauber 理论中计算穿透系数的形式.

由于原子核表面核子密度分布的形式及中子、质子密度分布的差异对原子核反应总截面的影响很大,我们对入射弹核中的中子、质子和靶核中的中子、质子相互作用分别考虑,这样更能真实地反应原子核相互作用时的情形,则(2)式变为:

$$T(b) = \exp \left[ - \int d^2 r_1 \int d^2 r_2 f(|r_1 - r_2|) \cdot \sum_{i=n,z} \sum_{j=n,z} \sigma_{ij} \rho_{Ti}(r_1) \cdot \rho_{Pj}(|r_2 - b|) \right], \quad (3)$$

其中  $i = n, z, j = n, z$  分别表示靶核或弹核中的中子和质子;脚标 T, P 分别表示靶核和弹核  $\sigma_{ij}$  为核子-核子相互碰撞截面.

对于有限力程相互作用,常采用的形式为<sup>[7]</sup>:

$$f(r) = \frac{\exp(-r^2/\gamma_0^2)}{\pi\gamma_0^2}. \quad (4)$$

对于核中核子密度分布,常采用费米分布.由于原子核反应总截面主要敏感于核的表面,因而可用表面归一的高斯分布  $\rho(r) = \rho_0 \exp(-r^2/a^2)$ , 高斯分布的参数由费米分布在表面  $R = C, R = C + t/2$  ( $C$  为半密度半径,  $t$  为核子分布表面弥散度)处归一为高斯分布来得到.将核中核子分布选为高斯分布,代入(3)式则可去掉多重积分,得到简化的穿透系数的计算形式,并考虑库仑场修正,则得:

$$T(b) = \exp \left[ -\pi^2 \sum_{i=n,z} \sum_{j=n,z} \frac{\sigma_{ij} \rho_{Ti}(0) \rho_{Pj}(0) a_{Ti}^3 a_{Pj}^3}{\alpha_{Ti}^2 + \alpha_{Pj}^2 + \gamma_0^2} \cdot \exp\left(-\frac{b'^2}{\alpha_{Ti}^2 + \alpha_{Pj}^2 + \gamma_0^2}\right) \right], \quad (5)$$

$$b'^2 = \frac{b^2}{1 - V_c/E_{CM}} = \frac{b^2}{1 - 1.44 Z_T Z_P / (R_{int} E_{CM})}, \quad (\text{库仑修正}) \quad (6)$$

(5)式中脚标的意义同(3)式一样,  $\rho_{Ti}(0), \rho_{Pj}(0), a_{Ti}, a_{Pj}$  是弹核和靶核中质子密度分布、中子密度分布参数.它们的取值和文献[3]一致.不同的是中子分布表面弥散度采用下式:

$$t_n = 2.3 + \frac{\hbar}{\sqrt{2N\epsilon m}} \quad (\text{fm}), \quad (7)$$

其中,  $N$  为原子核的中子数,  $m$  为核子静止质量,  $\epsilon$  为中子分离能,计算中,每个核最后一个中子的分离能  $\epsilon_{1n}$  及最后两个中子的分离能  $\epsilon_{2n}$  由文献[8]得到,然后进行比较,取其中最小时进行计算.

首先考察对稳定核的情形.图1给出了用微观修正模型对  $^{14}\text{C} + ^{12}\text{C}$  核反应的

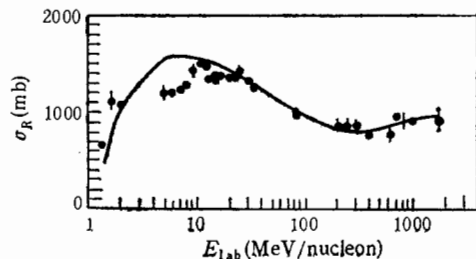


图1  $^{14}\text{C} + ^{12}\text{C}$  反应的激发函数

—本工作, ●实验点.

的计算结果.从图中可以看出,在低能区域,原子核反应总截面  $\sigma_R$  随着原子核入射能量的增加而增加;在中、高能区域,随着弹核入射能量的增加,  $\sigma_R$  反而下降,然后在较高能量处达到饱和.这种变化反映了两核相互作用时,核内核子-核子碰撞相互作用与核内平均场

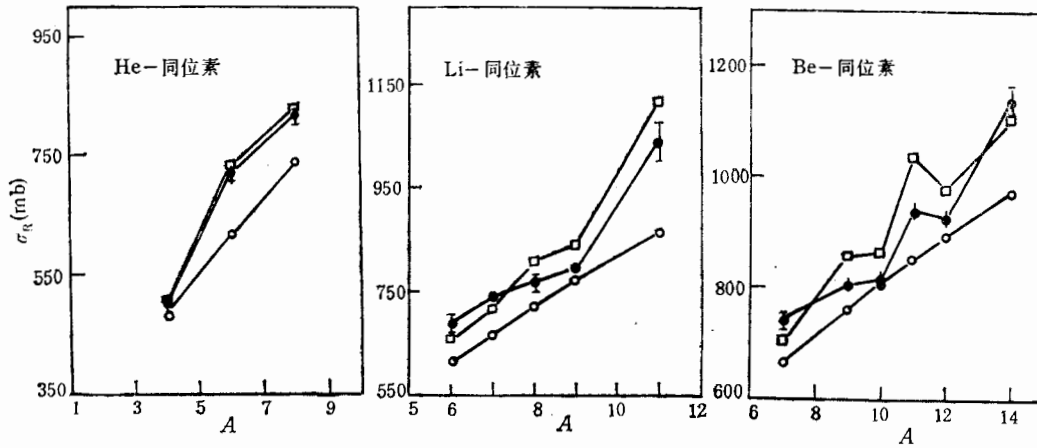


图 2 790MeV/u 的 Li 同位素与  $^{12}\text{C}$  反应的  $\sigma_R$  质量数  $A$  的变化关系

□ 本工作, ○  $r_n = 2.4\text{fm}$ , ● 实验点.

相互作用相互竞争、转换的过程. 我们的计算结果很好地再现了这一过程, 从几个 MeV 一直到几个 GeV/u 的入射能量区域, 计算结果和实验值符合得都比较好. 对于其他一些稳定线附近的核反应系统(如  $^{14}\text{N} + ^{64}\text{Cu}$ ,  $^{12}\text{C} + ^{27}\text{Al}$ ,  $^{16}\text{O} + ^{40}\text{Ca}$ ). 修正微观模型也能较好地拟合实验数据.

对于 790MeV/u 的远离稳定线的奇异核在  $^{12}\text{C}$  靶上的反应总截面随质量数  $A$  的变化关系如图 2 所示. 图中空心圆圈表示中子密度分布弥散度  $r_n = 2.4\text{fm}$  时的情形, 从图上看, 计算值不能拟合实验结果. 空心正方形是假定核内中子分布弥散度按(7)式随分离能变化时的计算值. 对于 He 的同位素引起反应的  $\sigma_R$ , 计算值能很好地再现实验结果, 此时  $^6\text{He}$ ,  $^8\text{He}$  均用最后两个中子的分离能; 对于 Li 的同位素引起反应时的情形, 随着质量数  $A$  的增加, 即  $N/Z$  变大,  $\sigma_R$  也增加, 尤其是从  $^9\text{Li}$  到  $^{11}\text{Li}$ ,  $\sigma_R$  有一个较大的突变, 然而我们的计算能较好地反映这一趋势, 而且该计算还能再现  $\sigma_R(^{11}\text{Be})$  到  $\sigma_R(^{12}\text{Be})$  下降的细小变化.

图 3 给出了奇异核  $^{11}\text{Li}$  和  $^{12}\text{C}$  靶反应的激发函数. 从图上看, 考虑了核内中子密度分布随中子分离能的变化后, 在高中能时, 计算值和实验值符合得较好, 但在中能时有一定误差. 在我们的微观修正模型中, 原子核反应总截面与入射能量的依赖关系是由两核相互作用时核子-核子碰撞截面与能量的依赖关系及库仑场修正来体现. 由于库仑修正采用了直线轨道近似以及介质中核子-核子碰撞截面随轰击能的变化等因素并未考虑在内, 这会带来一定的误差.

计算中, 相互作用力程  $r_0 = 1\text{fm}$ , 这一取值和相互作用吸收矩阵计算给出的值一致<sup>[5]</sup>. 原子核相互作用时核子-核子碰撞截面采用文献[7]所给出的形式, 它们是通过拟合 10MeV—1GeV 的自由核子-核子碰撞截面而得到的解析式

图 4 是一些核的中子密度分布表面弥散度随中子分离能的变化关系. 从图上看, 对于  $^{12}\text{C}$ 、 $^{27}\text{Al}$  等稳定核, 其中子密度分布的弥散度在 2.4fm 附近, 与小液滴模型预言的值相接近. 这是由于稳定核外层中子分离能较大, 因而按照(7)式计算的  $r_n$  基本上是一恒

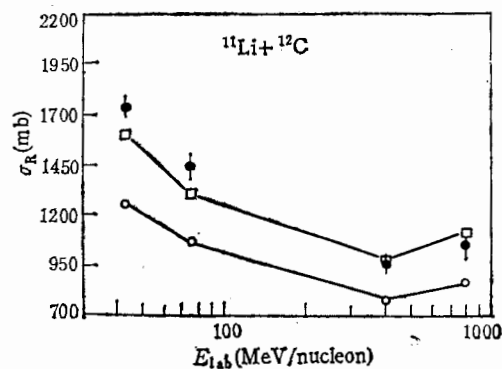


图3 奇异核  $^{11}\text{Li}$  和  $^{12}\text{C}$  靶反应的激发函数  
符号的意义同图2.

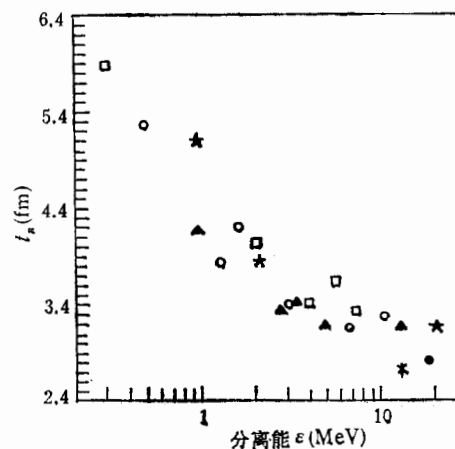


图4 中子分布弥散度与中子分离能的关系  
★ He 同位素, □ Li 同位素, ○ Be 同位素,  
▲ B 同位素, ●  $^{12}\text{C}$ , \*  $^{27}\text{Al}$ .

定值. 而对于奇异核, 其核外中子受核力的束缚较弱, 外层中子的分离能较小, 使得中子分布的弥散度较大. 对于  $^{12}\text{Be}$  核, 最后一个中子的分离能 ( $3.169\text{MeV}$ ) 大于  $^{11}\text{Be}$  最后一个中子的分离能 ( $0.504\text{MeV}$ ), 从而使得  $^{12}\text{Be}$  核的中子密度分布弥散度比  $^{11}\text{Be}$  核的中子密度分布弥散度小, 因而我们的计算能够反映出  $R$  随质量数  $A$  的细小变化(图2所示).

从上面的描述可以看出, 从考虑有限力程相互作用的库仑场修正的 Glauber 理论出发, 如果把弹核、靶核中的质子、中子相互作用分别对待, 并假定中子分布弥散度随核外中子分离能而变化, 则可以得到一个简单的计算原子核反应总截面的微观修正模型. 该模型能够对较广能区的稳定线附近的核反应总截面进行描述, 同时, 还可用来解释奇异核的反应总截面. 因此, 我们认为原子核反应总截面与核的中子分离能有一定的关系. 对于稳定线附近的核, 由于其核中中子结合得较紧密, 因而外层中子的分离能较大, 从而使得核内中子密度分布弥散度基本保持不变; 而对于  $N/Z$  较大的奇异核, 由于核外层单中子或双中子的分离能较小, 使得奇异核的中子密度分布弥散度有较大的增加, 从而使其引起的反应总截面有较大的增加.

### 参 考 文 献

- [1] S. Kox et al., *Phys. Rev.*, **C35** (1987) 1678.
- [2] P. J. Karol et al., *Phys. Rev.*, **C11** (1975) 1205.
- [3] Shen Wenqing and Wang Bing et al., *Nucl. Phys.*, **A491**(1989) 130.
- [4] I. Tanihata et al., *Phys. Rev. Lett.*, **55** (1989) 2676.
- [5] G. F. Bertsch et al., *Phys. Rev.*, **C39** (1989) 1154.
- [6] M. Sato et al., *Phys. Lett.*, **B162** (1985) 217.
- [7] S. K. Charagi et al., *Phys. Rev.*, **C41** (1990) 1610.
- [8] A. H. Wapstra et al., *Nucl. Phys.*, **A432** (1985) 55.

## Effect of Surface Diffuseness of Neutron Distribution on Nuclear Total Reaction Cross Section

Feng Jun Shen Wenqing Ma Yugang

(*Institute of Nuclear Research, Academia Sinica, Shanghai 201800*)

Received on October 16, 1992

### Abstract

The effect of surface diffuseness of neutron distribution on total reaction cross section  $\sigma_R$  is discussed based on coulomb-modified Glauber model. Considering a relation of surface diffuseness of neutron distribution with the neutron separation energy of nuclei, the large increasing of nuclear total reaction cross section for exotic nuclei (such as  ${}^6\text{He}$ ,  ${}^8\text{He}$ ,  ${}^{11}\text{Li}$ ,  ${}^{11}\text{Be}$ ) on  ${}^{12}\text{C}$  target can be reasonably explained. The total reaction cross section for a large number of stable nuclear systems can also be reproduced over an energy range beginning with the coulomb barrier to a few GeV/nucleon.

**Key Words** Diffuseness, Reaction cross section, Exotic nuclei, Separation energy.