

能量修正的 Glauber 模型对中能反应 总截面的影响*

王全进 叶沿林 江栋兴 华辉 李智焕
陈陶 李湘庆 葛愉成
(北京大学技术物理系 北京 100871)

摘要 叙述了对 Glauber 模型中的透射系数进行半经验的能量修正, 并利用该修正模型计算了 $^{12-14}\text{C}, ^6\text{Li}, ^7\text{Be}, ^8\text{B} + ^{12}\text{C}$ 和 $^6\text{Li}, ^7\text{Be}, ^8\text{B} + ^9\text{Be}$ 以及 $^{20}\text{Ne} + ^{12}\text{C}, ^{12}\text{C} + ^{27}\text{Al}$ 等系统的激发函数(能区范围 10—1000MeV/u), 经与实验值比较, 能量修正的 Glauber 理论计算值能够很好地描述中能条件下的反应总截面实验测量值.

关键词 能量修正 透射系数 Glauber 模型 反应总截面

1 引言

目前各种核理论主要是基于稳定核实验基础之上的, 它们在描述稳定核的性质方面都取得了一定的成功. 如果推广到远离 β 稳定线核, 这些理论是否仍然适用, 需要作哪些修正, 都有待于实验的证实和进一步回答. 放射性束流装置的相继建成^[1], 为远离 β 稳定线核甚至是滴线核的研究提供了必要的实验手段, 而利用这些装置产生的放射性核束所做实验的一个重大突破, 就是发现了中(质)子晕、中(质)子皮这一奇异核结构现象^[2-4]. 目前判断一个核是否具有奇异核结构主要通过以下几点判断: (1) 价核子的分离能; (2) 与物质的相互作用截面; (3) 碎裂反应产物的径向动量分布宽度; (4) 价核子的移去和转移反应截面; (5) 对于质子晕核, 电四极矩的大小. 在实际工作中, 往往需要将这些判据综合起来去判断一个核是否有奇异结构.

由于可以用相对低流强的核束进行实验, 测量这些核与稳定核之间的反应总截面(σ_R)已经成为实验上研究奇异核结构的一个重要而且有效的手段. 通过测量 σ_R , 可以得到许多反映原子核整体特性, 如核物质分布半径和核内质子及中子的密度分布等许多知识, 甚至可以提取核子相互作用的信息. 研究核反应总截面的一个非常重要的理论是基于自由核子-核子相互作用的, 并考虑了库仑修正的 Glauber 模型^{5,6}, 它成功地描述了高

2001-09-11 收稿

* 国家重点基础研究发展规划项目基金(G2000077400)资助

能情况下稳定核的反应截面,并成功地从实验测量得到的反应总截面中提取了核物质分布半径等许多重要参数. 由于 Glauber 理论是高能近似下的理论,没有考虑中能条件下重离子碰撞的特点,如平均场效应等,使得 Glauber 理论不能很好地描述中能条件下的反应总截面,这种情况对于远离 β 稳定核尤其是具有奇异结构的核更为突出. 而许多奇异核的实验又集中在中能区,使得人们无法利用 Glauber 模型从中能区测得的反应总截面值来提取核物质密度. 在 Glauber 理论中,输入密度的形式对中能条件下反应总截面有影响,如“Core + Tail”的密度形式能够减小中能条件下的理论描述值与实验值之间的差异^[7],但是也无法消除这种由于根本性原因导致的差异. 因此,为使 Glauber 理论能够更好地描述中能下的反应总截面,就不能简单地将自由核子-核子相互作用截面对整个空间进行体积积分,而必须考虑平均场效应在重离子碰撞过程中对反应总截面值的影响.

本文叙述了考虑能量修正的 Glauber 模型,并对 C 同位素^{12, 14}C + ¹²C、同中子素($N = 3$)⁶Li, ⁷Be, ⁸B + ¹²C, ⁹Be 以及¹²C + ²⁷Al, ²⁰Ne + ¹²C 等系统的反应总截面进行了计算,经能量修正的 Glauber 理论计算值与实验值非常吻合.

2 能量修正的 Glauber 模型简介

从 Lippmann-Schwinger 方程出发,利用分波法,并考虑库仑修正,可以得到在能区核反应总截面的公式^[5,6]:

$$\sigma_R = 2\pi(1 - V_C(R_{\text{int}})/E) \int_0^{\infty} b db (1 - T), \quad (1)$$

其中 b 是碰撞参数, $T(b)$ 为考虑有限力程相互作用的透射函数:

$$T(b) = \exp[-\bar{\sigma}_{NN}\chi(b)], \quad (2)$$

$\bar{\sigma}_{NN}$ 为能量相关的平均核子-核子相互作用,在我们讨论的情况下区分质子和中子的相互作用, $\chi(b)$ 为散射项:

$$\chi(b) = \int d\mathbf{b}_1 d\mathbf{b}_2 \tilde{\rho}_1(b) \tilde{\rho}_2(b) \tilde{\rho}_3(\mathbf{b}_1 + \mathbf{b} - \mathbf{b}_2), \quad (3)$$

其中

$$\tilde{\rho}(b) = \int_{-\infty}^{\infty} dz \rho(\sqrt{b^2 + z^2}). \quad (4)$$

(3) 式中的下标数字 1 和 2 分别表示弹核和靶核, 3 表示核力作用的有效力程. 在实际的计算中,人们往往取核力的作用距离为 1fm ^[8]. 对于相距为 r 的相互作用粒子之间,引进局部平均自由程^[9]:

$$\Lambda(r) = \left[\sigma_{NN} \times \int d\mathbf{r}_1 d\mathbf{r}_2 \rho_1(r) \bar{\rho}_2(r) \rho_3(\mathbf{r}_1 + \mathbf{r} - \mathbf{r}_2) \right]^{-1}, \quad (5)$$

因此透射系数和入射参数 b 的关系可用下式表示:

$$T(b) = \exp\left[-\int_{-\infty}^{\infty} \frac{dz}{\Lambda(r)}\right]. \quad (6)$$

通过对 Glauber 理论计算结果与大量实验值进行比较,结果发现 Glauber 理论计算在中能条件下均低于实验值约 20%, 对于可能具有奇异结构的核,其差别还要大,甚至可达

50%^[10,11]。造成理论计算值与实验值之间较大差别的主要原因是:在理论计算时,将透射系数 $T(b)$ 过于简单化,仅仅当成是自由核子-核子作用截面与核物质空间密度分布的函数,忽略了中能条件下,通过平均场其他核子也间接参与了核反应,从而对反应总截面产生影响。

在重离子碰撞过程中,由于平均场效应的影响,没有直接产生作用的核子也能够通过平均场而参与反应,使得透射系数必然减小,从而导致中能下反应总截面的增大,而这种平均场的效应在中低能条件下,由于相互作用时间增大而不能忽略。很显然,平均场效应对反应总截面的影响是与能量相关的。在目前讨论的情况下,我们假定这种效应只与能量有关,而与反应系统的其他参量(如同位旋效应等)无关,为此提出了半经验能量修正的透射系数:

$$T' = \exp\left[-\sigma_{NN} \times \chi(b) \times \left(1 + \left(a + \frac{b}{\ln E}\right)\right)\right], \quad (7)$$

其中 E 为弹核实验室系的能量, a 和 b 为参数,它们经如下方式确定:

(1) 当 $E = 1000 \text{ MeV/u}$ 时,透射系数 $T' = T$;即假定在能量为 1000 MeV/u 时,平均场效应对反应总截面的影响完全消失。

(2) 于 $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$ 反应系统的实验数据较多,弹核和靶核都完全相同,能区分布较广,从中能到高能基本都有,用最小二乘法拟合 $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$ 系统从中能到高能下的反应总截面实验值,以保证确定参数 a 和 b 所需要的另外一个方程。

经上述方式,我们得到了能量修正的透射系数

$$T' = \exp\left[-\sigma_{NN} \times \chi(b) \times \left(1 + \left(-2.1 + \frac{14.5063}{\ln E}\right)\right)\right], \quad (8)$$

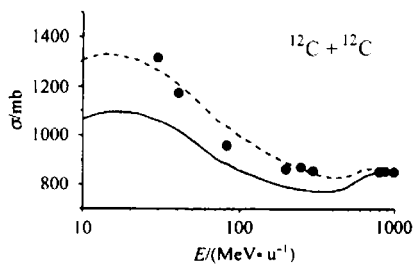


图 1 经能量修正 Glauber 模型计算 $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$ 反应总截面值与实验值的比较

在公式(8)中, E 的单位为 MeV/u 。

图 1 为经能量修正(虚线所示)与未经修正(实线所示)的 Glauber 模型计算得到的 $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$ 激发函数与实验值(圆点所示)之间的比较,很显然,经能量修正的 Glauber 模型计算得到的反应总截面与实验值符合得很好,在高端与实验值仍然符合较好,在中高能区,计算值与实验值相比,有大有小,使得误差均匀分布,而且误差的绝对值也非常小,尤其在中低能区($< 100 \text{ MeV/u}$),理论描述值有非常大的改善。图 1 中的实验数据均取自文献[2,11,12]。

3 计算结果与讨论

为了检验能量修正的 Glauber 模型对其他系统反应总截面在中低能区的影响,了解这种修正是否具有系统性,我们还用该半经验的能量修正模型对 ^{13}C , ^{14}C , $^{20}\text{Ne} + ^{12}\text{C}$, $^{12}\text{C} + ^{27}\text{Al}$ (图 2 所示)以及 ^6Li , ^7Be , $^8\text{B} + ^{12}\text{C}$, ^9Be (图 3 所示)等系统的反应总截面进行了计算,在所有的计算中,都使用相同的一套 a, b 参数值。

计算结果表明,对于 $^{20}\text{Ne} + ^{12}\text{C}$ 和 $^{12}\text{C} + ^{27}\text{Al}$ 系统,与非能量修正的 Glauber 模型相比,计算值有非常可观的改善,基本与实验值符合,实验值也是忽大忽小地分布在理论曲线上,误差的绝对值较小.而对于 $^{13}\text{C}, ^{14}\text{C} + ^{12}\text{C}, ^{12}\text{C} + ^{27}\text{Al}$ 以及 $^6\text{Li}, ^7\text{Be}, ^8\text{B} + ^{12}\text{C}, ^9\text{Be}$ 反应系统的总截面,理论计算值能够非常好地与实验值符合.图 2 和图 3 中的虚线、实线以及圆点的意义与图 1 中的完全相同,图中的实验值均取自文献[2,11—14].

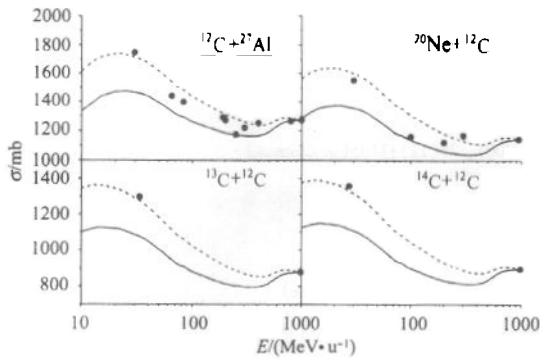


图 2 经能量修正 Glauber 模型计算 $^{13,14}\text{C}, ^{20}\text{Ne} + ^{12}\text{C}, ^{12}\text{C} + ^{27}\text{Al}$ 反应总截面值与实验值的比较

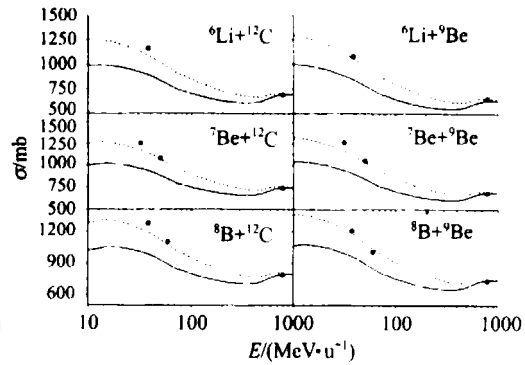


图 3 经能量修正 Glauber 模型计算 $^6\text{Li}, ^7\text{Be}, ^8\text{B} + ^{12}\text{C}, ^9\text{Be}$ 反应总截面值与实验值的比较

为了便于比较,我们引进误差因子:

$$\chi^2 = \sum_n \frac{(\sigma_{\text{exp}} - \sigma_{\text{cal}})^2}{\sigma_{\text{exp}}^2} \quad (9)$$

式中 σ_{exp} 为实验测量得到某一能量下的反应总截面值, σ_{cal} 为相同能量下的理论计算值.对于 $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$ 系统(一共有 9 个实验数据点),考虑能量修正的 Glauber 模型的 $\chi^2 = 0.01124$,相对应的方均根误差为 3.53%,而没有考虑能量修正的计算 χ^2 值则为 0.08931,相对应的方均根误差为 9.96%.在我们计算中所有系统(总共 46 个实验数据点)的 $\chi^2 = 0.0791$,相对应的方均根误差为 4.15%,而与之相对应的没有考虑能量修正的 χ^2 值为 0.6711,相对应的方均根误差为 12.08%.很显然,经能量修正的 Glauber 模型已经能够比较好地描述中高能区的反应总截面值.

为检验该修正模型是否适用于具有奇异核结构的核,我们用同样的方法计算了 $^{11}\text{Li}, ^{11}\text{Be}, ^8\text{B}, ^9\text{C}, ^{15}\text{C}$ 以及 ^{12}N 等晕核从中能到高能区的激发函数,却发现计算值仍然低于实验值约 10%,如图 4 所示,图中的方块为实验点,虚线和实线的意义同图 1.造成这种差别的原因是,计算中将这此核当成与正常核一样来处理,而没有考虑晕核的微观结构.

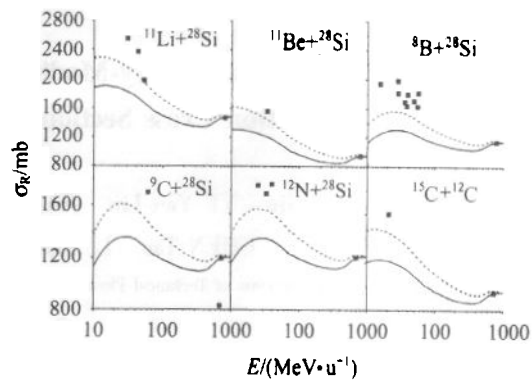


图 4 能量修正 Glauber 模型计算 $^{11}\text{Li}, ^{11}\text{Be}, ^8\text{B}, ^9\text{C}, ^{15}\text{C}$ 以及 ^{12}N 与硅及碳靶反应总截面值与实验值的比较

虽然能量修正的 Glauber 模型计算正常核的中高能下反应总截面取得了成功,但是所用方法带有一定的任意性,能量修正的形式并不是惟一的^[13],但本工作至少告诉我们,适当的修正是必要的,也是容易做到的,如何从理论本质上来考虑平均场效应以及晕核微观结构对反应总截面的影响,这将是我们的工作中进一步研究的内容.

参考文献 (References)

- 1 ZHAN Wen-Long et al. Science in China (Series A) 1999, (42)5:529V
- 2 Tanihata I et al. Phys. Rev. Lett., 1985, 55:2626
- 3 Tanaka I et al. J. Phys., 1996, G22:157
- 4 WANG Quan-Jin et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys., 2001, 25(12):1165 (in Chinese)
(王全进等. 高能物理与核物理, 2001, 25(12):1165)
- 5 Hussien M S et al. Phys. Rep., 1991, 201:279
- 6 Charagi S K et al. Phys. Rev., 1990, C41:1610
- 7 WANG Quan-Jin et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys., to be published (in Chinese)
(王全进等. 高能物理与核物理, 密度分布形式对 Glauber 模型计算 σ_R 的影响, 待发表)
- 8 CAI Xiang-Zhou et al. Phys. Rev., 1998, C58:572
- 9 de Vismes A et al. Phys. Rev., 2000, C62:064612
- 10 Ozawa A et al. Nucl. Phys., 1996, A608:63
- 11 FANG D Q et al. Phys. Rev., 2000, C61:064311
- 12 Kox S et al. Phys. Rev., 1987, C35:1678
- 13 Fukuda M et al. Nucl. Phys., 1999, A656:209
- 14 Chulkov L et al. Nucl. Phys., 1996, A603:219

Influence of Energy-Modified Glauber Model on Total Reaction Cross Section at Intermediate-Energy *

WANG Quan-Jin YE Yan-Lin JIANG Dong-Xing HUA Hui LI Zhi-Huan
CHEN Tao LI Xiang-Qing GE Yu-Cheng

(Department of Technical Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract A phenomenological energy-modified transparency function in Glauber model is presented. The reaction cross sections for a lot of light nuclear reaction systems such as: $^{12-14}\text{C}$, ^6Li , ^7Be , ^8B + ^{12}C and ^6Li , ^7Be , ^8B + ^9Be , ^{20}Ne + ^{12}C , ^{12}C + ^{27}Al at the energy range from 10MeV/u to 1000MeV/u have been calculated. The most of the calculated results reproduce the experimental data very well.

Key words energy-modified transparency function, Glauber model, reaction cross section

Received 11 September 2001

* Supported by Major State Basic Research Development Program(G2000077400)