

利用改进的 Glauber 模型对非奇异核核 反应总截面数据的拟合*

李加兴 郭忠言 肖国青 詹文龙 王建松 孙志宇 王 猛

田文栋 王武生 毛瑞士 王全进 宁振江 王建峰

(中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000)

(2001 年 12 月 7 日收到, 2002 年 4 月 27 日收到修改稿)

在对反应总截面的理论计算中, 现有的理论计算值与实验数据在 高能区可以很好的符合, 但在中能区理论值 低于实验值约 10%—20%. 通过对计算核反应总截面的 Glauber 模型加入有限程修正, 并对输入的核物质密度分布 采用双参数的费米密度分布形式, 计算结果表明, 理论计算值对于没有奇异结构的核在低中能区和高能区, 都与 实验数据很好符合.

关键词: Glauber 模型, 双参数密度分布函数, 反应总截面, 非奇异结构核

PACC: 2410, 2570

1. 引 言

核反应总截面(σ_R)是中、低能核反应研究的一个基本物理量. 通过实验测量 σ_R 与入射粒子的能量(E)、核子的质量数(A)、核中的质子数(Z)以及弹核和反应系统的同位旋(T_z)等的变化曲线可以提取反映原子核整体特性, 如核的物质密度分布, 质子与中子的密度分布, 形变和核内相互作用势, 以及介质中核子-核子碰撞截面等许多信息. 这些信息对核技术的应用也是非常重要. 近年来, 加速器和放射性束流(RIB)技术的发展, 为核物理研究开辟了广阔的同位旋空间, 大大促进了对奇异核反应的反应总截面的理论和实验研究. 在中能区域, 反应总截面对核的奇异结构更加灵敏, 因此放射性核束反应总截面的测量成为人们非常关注的实验方法之一.

1985 年, Tanihata 等人在 LBL 用 790 MeV/u ^{11}B 弹核碎裂产生 ^8He , ^6He , ^{11}Li 等放射性束流, 使之与 Be , C , Al 靶反应, 利用透射法测量相互作用截面(σ_1), 并推出核子密度分布半径. 实验发现, ^{11}Li 具有异常大的相互作用截面和密度分布半径, 即中子晕结构^[1]. 这是使用放射性束流的先驱实验之一. 随

着一些重离子放射性束流装置如 LISE/LISE3, FRS, A1200/A1900, RIPS, RIBLL 等先后投入运行, 使 RIB 引起反应机制研究, 中子晕核的研究, 远离 β 稳定线新核素的产生与鉴别等实验如虎添翼, 取得长足发展. 理论预言的许多晕核, 如 ^6He , ^{11}Li , ^{11}Be , ^{14}Be , ^8B , ^{19}C 等, 都得到了实验的验证和认同, 数以百计的新核素被鉴别.

RIBLL^[2]投入运行以来, 我们测量了许多放射性束流引起次级反应的反应总截面 σ_R ^[3], 用 Glauber 模型计算发现, 计算曲线在中低能区不仅与晕核的实验截面明显偏离, 与非晕核的实验数据偏离, 也与正常稳定核数据不一致. 因此, 我们首先寻找一种合适的密度分布函数, 使得用 Glauber 模型计算曲线与正常结构核的数据符合.

Kox 公式和 Shen^[4]公式是计算总反应截面的半经验公式, Kox 公式适合于中能区, 而 Shen 公式是拟合包括低、中、高能区大量 σ_R 实验数据点得出的, 它可以计算正常核引起反应的 σ_R , 但不能利用该公式得到更多关于核结构方面的信息. Glauber 模型^[5], BUU 方程和 RMF 理论都可以计算反应总截面 σ_R ^[6,7], 而且可以提取若干核结构相关信息, 如核物质密度分布、中子、质子密度分布等参数.

* 国家杰出青年基金(批准号: 19825115)和国家自然科学基金(批准号: 19735051)资助的课题.

本文简述 Glauber 模型理论,描述利用 Glauber 模型拟合实验数据的比较并指出输入一种两参数费米密度分布函数,利用 Glauber 模型计算 σ_R ,计算结果与实验数据很好符合。

2. Glauber 模型

从 Glauber 理论出发,并由半经典光学模型^[8]可知,核反应总截面是与光学势的虚部相对应^[9,10]

$$\sigma_R = (K/E_K) \psi_K^* | \text{Im} V | \psi_K, \quad (1)$$

式中的 ψ_K 是动量为 K 的入射核的波函数, $\text{Im} V$ 是核势的虚部.利用分波法,并对势函数做一系列近似之后,可以得到在 高能区核反应总截面的公式^[5,11]

$$\sigma_R = 2\pi \int_0^\infty b db (1 - T), \quad (2)$$

其中 b 是碰撞参数,对零程核相互作用,透射函数 $T(b)$ 可写为

$$T = \exp \left[- \frac{\sigma_{NN}}{10} \int d^2 b_1 \rho_1^i(b_1) \rho_2^i(|b_1 - b|) \right]. \quad (3)$$

考虑有限程相互作用,上式可以写为

$$T = \exp \left[- \frac{\sigma_{NN}}{10} \int d^2 b_1 \int d^2 b_2 f(|b_1 - b_2|) \rho_1^i(b_1) \rho_2^i(|b_2 - b|) \right]. \quad (4)$$

式中有限程相互作用函数 $f(r)$ 由 $\int f d^2 r = 1$ 进行归一,经常采用的形式为

$$f(r) = \frac{\exp(-r^2/\gamma_0^2)}{\pi \gamma_0^2}, \quad (5)$$

而 ρ^i 是核的密度分布, ρ_Z^i 由下式定义:

$$\rho_Z^i = \int_{-\infty}^{+\infty} dz \rho_i((b^2 + z^2)^{1/2}) \quad (i = 1, 2), \quad (6)$$

$\bar{\sigma}_{NN}$ 是 n-n, p-p 和 n-p 相互作用碰撞截面的平均,一般可由下式计算:

$$\bar{\sigma}_{NN} = \frac{N_p N_T \sigma_{nn} + Z_p Z_T \sigma_{pp} + N_p Z_T \sigma_{np} + Z_p N_T \sigma_{pn}}{A_p A_T}. \quad (7)$$

在上述推导中对核子-核子截面作了近似,输入核子的密度分布.若要区分中子和质子,需要分别输入靶和炮弹的质子点密度和中子点密度,得到透射函数应改为以下式表示:

$$T = \exp \left[- \frac{1}{10} \sum_{i,j=1}^2 \sigma_{ij} \int d^2 b_1 \int d^2 b_2 f(|b_1 - b_2|) \rho_1^i(b_1) \rho_2^j(|b_2 - b|) \right], \quad (8)$$

$i, j = 1$ 表示中子, $i, j = 2$ 表示质子.

炮弹的质子和中子密度是可调的,可以假设它是各种函数的分布形式,调节它来拟合核反应总截面的实验值.这里我们可以同时调整炮弹核的中子和质子密度分布形式^[12],也可以用理论模型(如 Hartree-Fock, RMF 等)计算质子(或中子)的密度分布,或用其他实验方法得到的实验值分布,然后调节中子(或质子)的密度分布,使它与实验值符合^[13].因此希望实验测量核反应总截面的多个能量点的激发函数,这将使理论拟合实验数据提取核内的核子分布更可靠.

3. 对实验数据的拟合

首先,利用 Glauber 模型,考虑零程相互作用,输入单参数的 HO 密度分布计算激发函数 $\sigma_R - E$ 曲线,计算结果如图 1 所示(取自文献[14]).其中实线是 Glauber 模型的计算结果,虚线是利用 BUU 模型计算所得的结果.可以看出, Glauber 模型的计算结果在 高能时可以和实验结果有很好的符合,但在中能区,二者之间却有很大的差异. BUU 模型的计算结果比 Glauber 模型有了很大的改善,但仍不能正确描述中能下的实验结果. Ozawa 等人在此基础上引入一个半经验的差值因子 d ^[14]:

$$d = \frac{\sigma_{\text{exp}} - \sigma_{\text{cal}}}{\sigma_{\text{cal}}}, \quad (9)$$

其中 σ_{exp} 是实验测得的值, σ_{cal} 表示 Glauber 模型计算值.然后根据 d 值的大小,来判别该核是否具有奇异结构.但是,这个差值因子 d 物理意义很不明确, d 值的界限也很难确定.总之,采用单参数的 HO 分布输入 Glauber 模型,计算曲线不能很好地拟合中低能核反应截面实验数据.

图 1 中的 Glauber 模型计算曲线没有考虑有限程的修正,是否因为这个原因才使中能区域计算与实验产生差异呢?我们选择 ^{12}C 炮弹,采用单参数的 HO 分布并考虑有限程修正, Glauber 模型计算 ^{12}C 轰击 ^{12}C 的激发曲线,结果示于图 2(数据取自文献[15, 16]).可以看出,中能区域的理论值与实验值的差距减小了很多,但偏离仍然很大,不能符合.我们选择 $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$ 系统是因为该系统的实验数据较多,覆盖了中、高能广阔区域,便于理论计算与实验数据的比较.

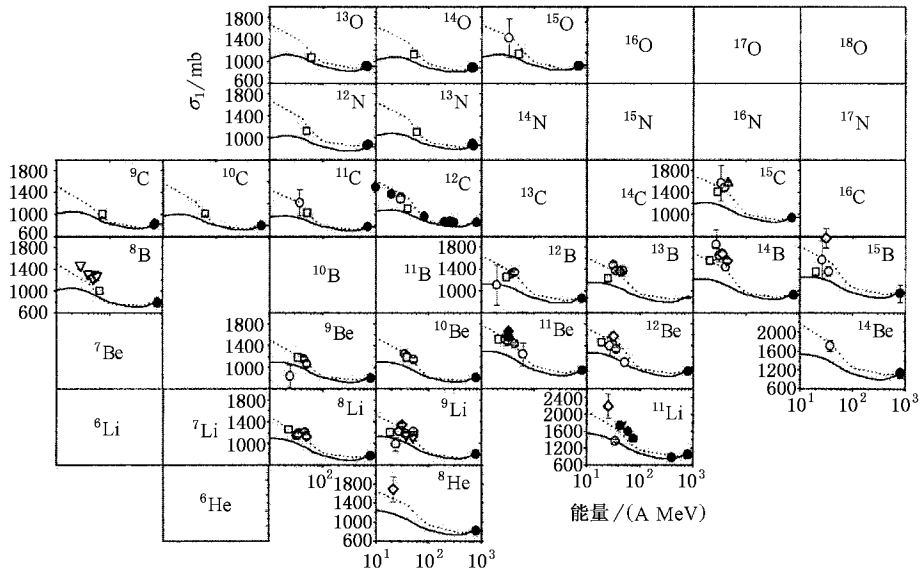


图 1 利用单参数的 HO 密度分布代入 Glauber 模型计算的结果与实验结果的比较

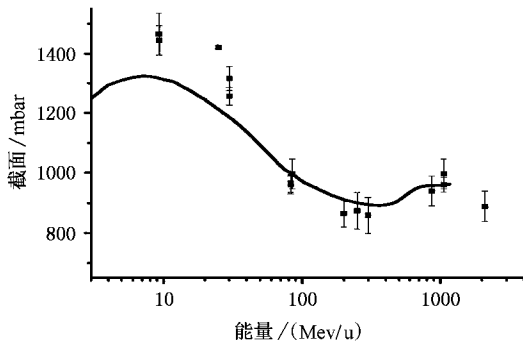


图 2 把 ^{12}C 的单参数的 HO 密度分布代入考虑了有限程修正 Glauber 模型所得的激发曲线与 ^{12}C 轰击 ^{12}C 实验数据的比较

Skyrme-Hartree-Fock (SHF) 模型, 可以计算核物质密度分布. 我们利用它给出的密度分布输入 Glauber 模型, 计算了 ^{12}C 轰击 ^{12}C 的激发函数 $\sigma_{\text{R}}-E$ 曲线 (图 3). 计算曲线在较广泛的能区与实验值符合很好, 只是在低能区计算值比实验点高一些. 这与以往高能区理论与实验符合, 而中能区理论计算值偏低现象不同. 由此我们可以认为, 在 Glauber 模型中考虑有限程修正是对的, 输入合适的密度分布函数也是至关重要的. 也许输入合适的核物质密度分布函数, 并考虑有限程修正, 就可以用 Glauber 理论较准确的计算出核的反应总截面, 进一步提取核的半径等信息. 从图 1 至图 3 的理论计算与实验数据的符合情况分析, 我们也可以得出这样的结论, 单参数的 HO 密度分布不能正确反映核的内部信息, 而 SHF 模型较能正确的给出 ^{12}C 这个核的密度分布. 但是, 进

一步对 C 同位素链的计算与拟合, 我们发现 SHF 模型可以正确描述 β 稳定线附近的核的密度分布, 但在远离 β 稳定线时, 还有一些差距^[17].

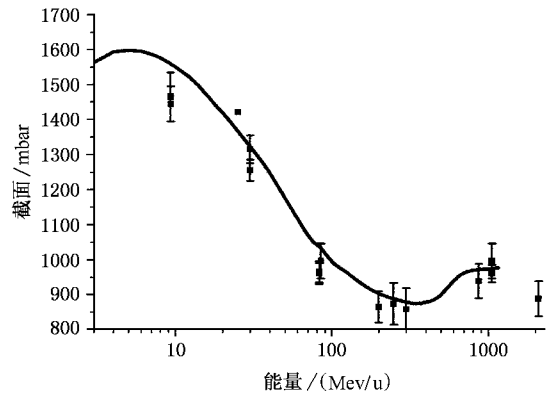


图 3 利用 SHF 计算的密度分布代入 Glauber 模型所得的激发曲线与 ^{12}C 轰击 ^{12}C 实验数据的比较

考察现有的多种密度分布函数, 输入 Glauber 模型拟合实验数据均有不尽人意的不同程度的偏差, 为此, 我们尝试引入一种双参数的费米密度分布函数, 其形式为

$$\rho(r) = \rho_0 \left[1 + \exp\left(\frac{r-c}{a}\right) \right]^{-1} \text{fm}^{-3}, \quad (10)$$

其中, ρ_0 , a 和 c 是系数, 因为我们要求归一化, 所以该分布中只有两个系数是自由的. 显然, 系数的调节较单参数密度分布复杂. 同时, 对 Glauber 模型采用有限程修正, 我们取 $r_0 = 0.9\lambda$ (取自文献 [5]); 我们也在 Glauber 模型计算中加入了库仑修正. 利用高能

区曲线与实验数据进行拟合,确定其参数,再带入 Glauber 模型计算整个能区的激发函数。

图 4 是我们输入上述双参数密度分布函数计算的 ^{12}C 轰击 ^{12}C 的激发函数与实验值的比较。可以看出,在中高能区域,曲线与实验结果符合很好,中、低能区也能够很好与实验点符合。说明这种双参数的费米密度分布可能较好描述 ^{12}C 的密度分布。我们又用这种密度分布形式去计算 C 的其他同位素 ^{11}C , ^{12}C , ^{13}C , ^{14}C 和 ^{16}C 的激发函数。结果发现,计算结果与实验值符合得都很好。只有 ^{15}C 的结果比实验值偏小,这可能与 ^{15}C 具有奇异结构^[14,16]有关。我们也拟合了大量其他元素同位素的实验数据,包括 B, C, N, O, F 和 Ne 的同位素链,理论和实验都得到了很好的拟合。但对具有奇异结构的核 ^8B , ^{12}N 却不能很好的得到拟合^[17],普遍存在计算曲线低于实验值现象。因此,我们认为,这种双参数费米密度分布函数

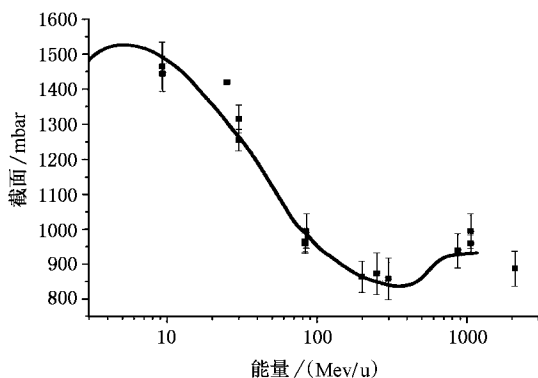


图 4 利用双参数的费米密度分布代入 Glauber 模型所得的 ^{12}C 轰击 ^{12}C 激发曲线与实验数据的比较

能较好反应正常核的密度分布,将它输入 Glauber 模型,考虑有限程修正和库仑修正,理论计算曲线与实验数据很好一致。

4. 讨 论

如上所述,我们利用 RIBLL 产生的中能 RIB 引起的次级反应,通过透射法测量 RIB 引起次级反应的总截面 σ_R ,研究质子晕核密度分布等性质。在研究过程中,我们也测量了许多正常结构的 RIB 的 σ_R ,采用简单的 HO 密度分布函数输入 Glauber 模型,计算的激发曲线与实验数据严重不符。为此,我们首先选择实验数据最多的已知正常核 $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$ 反应系统,输入不同的密度分布函数形式和对 Glauber 模型做适当修正,计算激发函数 σ_R-E ,检验曲线与实验数据拟合情况。结果,我们找到了双参数费米密度分布函数,考虑库仑修正和有限程修正的 Glauber 模型,可以很好地拟合从高能到低中能区域实验数据,改善了以往理论与实验在高中能符合但在中能有很大差距的状况。

但是,该模型只能较好拟合正常结构核(非晕核)的实验数据,不能描述具有奇异结构的核实验数据,即这种双参数费米密度分布函数适合描述正常核,对于非正常核,必须寻找不同的密度分布函数形式。

感谢兰州重离子加速器国家实验室(HIRFL),兰州放射性束流线(RIBLL)提供的 RIB 和实验条件。

[1] Tanihata I, Hamagaki H, Hashimoto O *et al* 1985 *Phys. Rev. Lett.* **55** 2676
 [2] Guo Z Y, Zhan W L, Liu G H *et al* 1999 *Acta Phys. Sin.* (Overseas Edition), **8** 21
 [3] Ning Z J, Li J X, Guo Z Y *et al* 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 644 (in Chinese) 宁振江、李加兴、郭忠言等 2001 物理学报 **50** 644
 [4] Shen W Q, Wang B, Feng J *et al* 1989 *Nucl. Phys. A* **491** 130
 [5] Charagi S K and Gupta S K 1990 *Phys. Rev. C* **41** 1610
 [6] Ma Y G, Shen W Q, Feng J *et al* 1993 *Phys. Lett. B* **302** 386
 [7] Ma Y G, Shen W Q, Feng J *et al* 1993 *Phys. Rev. C* **48** 850
 [8] Feng J *et al* 1994 *High Energy Phys. and Nucl. Phys.* **18** 97 (in Chinese) 冯 军等 1994 高能物理与核物理 **18** 97
 [9] Karol P J 1975 *Phys. Rev. C* **11** 1203

[10] Hussen M S, Rego R A, Bertulani C A 1991 *Phys. Rep.* **201** 279
 [11] Devries R M *et al* 1980 *Phys. Rev. C* **22** 1055
 [12] Tanihata I, Hamagaki H, Hashimoto O *et al* 1985 *Phys. Lett. B* **160** 380
 [13] Liatard E *et al* 1990 *Europhys. Lett.* **13** 401
 [14] Ozawa A, Tanihata I, Kobayashi T *et al* 1996 *Nucl. Phys. A* **608** 63
 [15] Kox S, Gamp A, Perrin C *et al* 1987 *Phys. Rev. C* **35** 1678
 [16] Fang D Q, Shen W Q, Feng J *et al* 2000 *Chinese Phys. Lett.* **17** 655
 [17] Li J X 2001 *Doctoral Thesis* (Lanzhou: Institute of Modern Physics, the Chinese Academy of Science) (in Chinese) 李加兴 2001 博士学位论文 (兰州:中国科学院近代物理研究所)

Fitting the data of non-exotic structural nuclear total reaction cross section with a corrected Glauber model^{*}

Li Jia-Xing Guo Zhong-Yan Xiao Guo-Qing Zhan Wen-Long Wang Jian-Song
Sun Zhi-Yu Wang Meng Tian Wen-Dong Wang Wu-Sheng Mao Rui-Shi
Wang Quan-Jin Ning Zhen-Jiang Wang Jian-Feng

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

(Received 7 December 2001; revised manuscript received 27 April 2002)

Abstract

In the theoretical calculation of total reaction cross section, the results can fit the experimental data very well at high energy, but they are about 10%—20% lower at intermediate energy. In this work the finite range correction has been added to the Glauber model, and a Fermi-density-distribution with two parameters has been chosen as the input density distribution of the nucleus. This shows that the results of the theoretical calculation are in agreement with the experimental one for non-exotic structural nucleus, both at high and intermediate energy regions.

Keywords: Glauber model, Fermi-density-distribution function with two parameters, total reaction cross section, non-exotic structural nucleus

PACC: 2410, 2570

^{*} Project supported by the National Foundation for Outstanding Young Scientists of China (Grant No. 19825115) and by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 19735051).