

改进的 Glauber 模型对奇异核 反应总截面数据的拟合*

李加兴¹⁾ 王建松 郭忠言 肖国青 詹文龙
孙志宇 王猛 胡正国 陈立新 李琛 毛瑞士
(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

摘要 利用 Glauber 模型对奇异核的反应总截面进行计算时,对模型进行了有限程修正和库仑修正,并对奇异核输入的密度采用了核芯加价核子的形式,使得理论与实验在中高能下都得到了很好的符合.

关键词 Glauber 模型 反应总截面 双参数费米密度分布函数

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许多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-核子碰撞截面等信息.这些信息对核技术的应用也是非常重要的.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,因此放射性核束引起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, I. Tanihata 等人在 LBL 首先用 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_I),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,它促进了放射性束物理的研究和放射性束装置的发展.从此,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 物理研究、中子晕核的研究取得长足发展.理论预言的中子晕核,如 ^6He , ^{11}Li , ^{11}Be , ^{14}Be , ^{19}C 等都得到了实验的验证和认同.

现有的理论模型能描述反应总截面的主要有半经验的 SHEN 公式^[2]和用量子力学推导加半经典近似得到的 Glauber 模型^[3],另外还有利用 BUU 方程计算反应总截面的方法^[4,5].半经验的 SHEN 公式不能给出核内部的信息,因此不能利用该公式得到更多关于核结构方面的信息.

2 Glauber 模型

从 Glauber 理论出发,并由半经典光学模型可知,核反应总截面是与光学势的虚部相对应^[6]的

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

式中 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

2004-02-23 收稿

* 国家自然科学基金(10205019, 10105011, 10305015), 国家重点基础研究发展规划项目(G2000077401, G2000077404), 国家基金委创新研究群体科学基金(10221003)资助

1) E-mail: lijx@impcas.ac.cn

后,可以得到在 高能区核反应总截面的公式^[3,7]

$$\sigma_R = 20\pi \int_0^\infty b db (1 - T), \quad (2)$$

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

$$T = \exp \left[- \frac{\sigma_{NN}}{10} \int d^2 b_1 \rho_z^1(b_1) \rho_z^2(|b_1 - b|) \right]. \quad (3)$$

但是上式并没有考虑由库仑场引起的径迹程差,图 1 简略画出了分别考虑和不考虑库仑势场时弹核的轨迹偏移.由图可见,考虑库仑势场后的碰撞参数 b' 满足下式

$$kb' = \eta + (\eta^2 + k^2 b^2)^{1/2}, \quad (4)$$

k 是波数,索非末常数不为零且表示为

$$\eta = Z_P Z_T e^2 / h\nu. \quad (5)$$

再考虑有限力程相互作用,(3)式可以写为

$$T = \exp \left[- \frac{\sigma_{NN}}{10} \int d^2 b_1 \int d^2 b_2 f(|b_1 - b_2|) \times \right. \\ \left. \rho_z^1(b_1) \rho_z^2(|b_2 - b'|) \right], \quad (6)$$

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

$$f(r) = \frac{\exp(-r^2/\gamma_0^2)}{\pi\gamma_0^2}, \quad (7)$$

而 ρ^i 是核的密度分布, ρ_z^i 由下式定义

$$\rho_z^i = \int_{-\infty}^{+\infty} dz \rho_i [(b^2 + z^2)^{1/2}], \\ (i = 1(\text{中子}), 2(\text{质子})) \quad (8)$$

$\bar{\sigma}_{NN}$ 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:

$$\bar{\sigma}_{NN} = \frac{N_P N_T \sigma_{nn} + Z_P Z_T \sigma_{pp} + N_P Z_T \sigma_{np} + Z_P N_T \sigma_{pn}}{A_P A_T}. \quad (9)$$

在上述推导中对核子-核子截面做了近似,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,得到透射函数应为

$$T = \exp \left[- \frac{1}{10} \sum_{i,j=1}^2 \sigma_{ij} \int d^2 b_1 \int d^2 b_2 f(|b_1 - b_2|) \times \right. \\ \left. \rho_z^1(b_1) \rho_z^2(|b_2 - b'|) \right], \quad (10)$$

$i, j = 1$ 表示中子, $i, j = 2$ 表示质子.

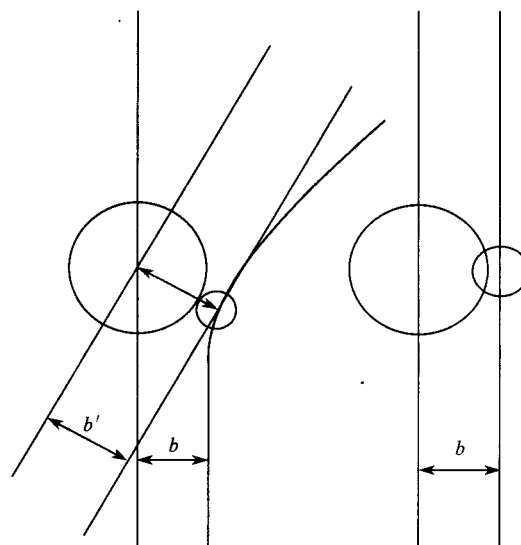


图 1 考虑和不考虑库仑势场时的弹核轨迹偏移

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^[8],也可以用理论模型(如 Hartree-Fock 和 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^[9].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 利用 Glauber 模型对奇异核反应总截面进行拟合

Glauber 模型加上单参数的谐振子(HO)密度分布是当今最常用的计算反应截面的方法,计算结果与在 高能下实验数据可以很好的符合,但在中能下却有很大的差距.为了从中能 RIB 反应截面数据判断有无奇异结构, Ozawa 等人引入了一个差值因子 d ^[10], d 的定义为

$$d = \frac{\sigma_{exp} - \sigma_{cal}}{\sigma_{cal}}, \quad (11)$$

其中 σ_{exp} 是实验测得的值, σ_{cal} 表示计算值.根据 d 值得大小,来判别该核是否具有奇异结构.但是,这个参数到底有多大意义呢?因为它同样也没有直接反应出核的内部信息.而且,用 d 值的大小来判别

是否具有奇异结构是一个很模糊的概念.

我们认为,中能下理论与实验数据偏差的主要原因有两条:一是在利用 Glauber 模型计算过程中没有考虑对有限程的修正和库仑修正,这对实验结果有着不小的影响;另外,核内结构是很复杂的,不可能只利用一个参数就可以把核的密度分布明确地表示出来.这种单参数的 HO 分布不能很好地反映出核的密度分布结构.

有人在对奇异核的计算时,将原来单参数的 HO 分布做了修改.保持核芯的密度分布仍与原来的相同,而在核芯的外部附加了一个晕^[11].这种晕有不同的形状,如带尾巴的密度分布具体形式如下:

$r \leq r_0$ 时,为单参数的密度分布形式;

$r > r_0$ 时,有几种代表性的尾巴分布形式:

$$\text{HO} + \text{Exponet}(\rho_0/r^a),$$

$$\text{HO} + \text{Yukawa}(\rho_0 \exp(-r/a)/r^2),$$

$$\text{HO} + \text{Gauss}(\rho_0 \exp(-r^2/a)),$$

其中 r_0 是假定核物质密度分布为一方势阱分布时的物质均方根半径.且尾巴的密度分布在 r_0 处具有连续性.图 2 是王全进博士等人加尾巴的计算结果(虚线)^[12],图中粗实线为不加长尾计算结果.由图可见,加长尾的计算曲线在中能段对实验值拟合有了很大的改善.假定任何核都具有尾巴结构,而尾巴的大小决定了该核是否具有奇异结构.从图中还可以看出,尽管加了尾巴,反应总截面计算值有了很大的提高,但还不能很好地与实验结果符合,越是远离 β 稳定线的核偏离越大.

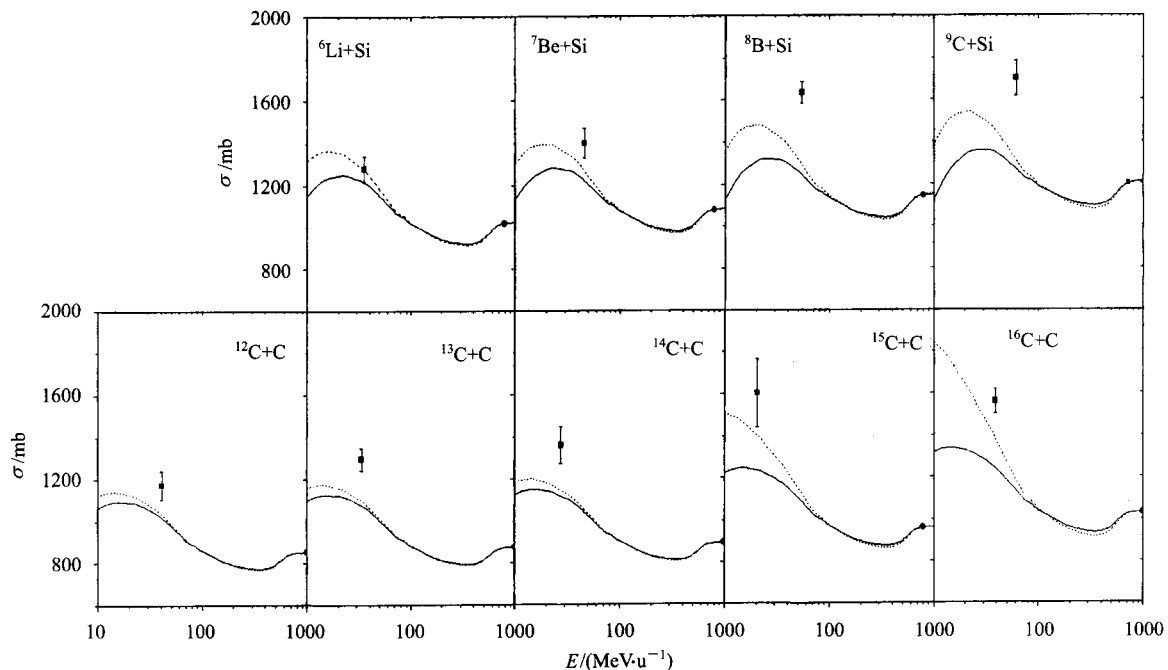


图 2 利用加尾巴的单参数的 HO 密度分布代入 Glauber 模型所得的结果与实验结果的比较

我们曾在拟合反应截面数据时,采用了考虑有限程修正和库仑修正的 Glauber 模型,并输入了如下双参数的费米密度分布的函数:

$$\rho(r) = \rho_0 \left[1 + \exp\left(\frac{r-c}{a}\right) \right]^{-1} \text{fm}^{-3}, \quad (12)$$

在中高能下对于稳定线及其附近的核,拟合结果与实验数据都可以很好地符合,但对于远离的奇异核,拟合仍有很大的差距^[13].为了能够正确描述奇异核的结构和性质,现在采用了一种核芯加价核子的密

度分布形式.对于每个奇异核的核芯,我们采用现有的非奇异核的密度分布形式,然后加一个(或几个)有弥散结构的核子,计算时仍采用考虑了库仑修正和有限程修正的 Glauber 模型.例如,对于⁸B,我们采用⁷Be 加上一个有奇异结构的质子的密度分布形式.其中⁷Be 采用能正确反应非奇异核的结构的双参数费米的密度分布,另外一个质子也是双参数的费米密度分布,但它的分布比正常核子的分布大得多,具有很大的弥散(奇异性),如图 3 所示.拟合时

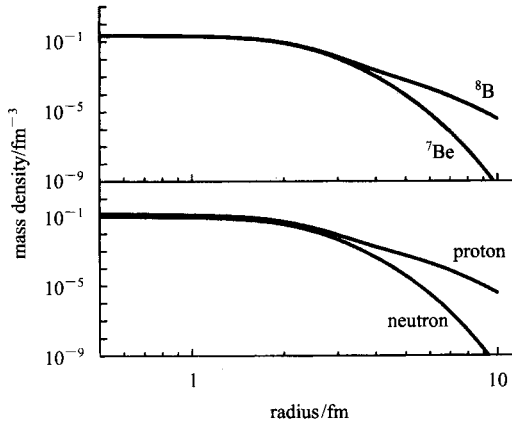


图 3 ^8B 和 ^7Be 的物质密度分布的比较
及 ^8B 内质子和中子的密度分布

使用的 ^8B 的实验数据来自于文献 [12, 14, 15]. 图 4 是我们的核芯加价核子对于 ^8B 与 ^{28}Si 和 ^8B 与 ^{12}C 拟合实验数据曲线. 可以看出理论计算值与实验值在中高能下都非常好的吻合. 这说明这种核芯加价核子形式是能够正确反映 ^8B 这种奇异核的结构.

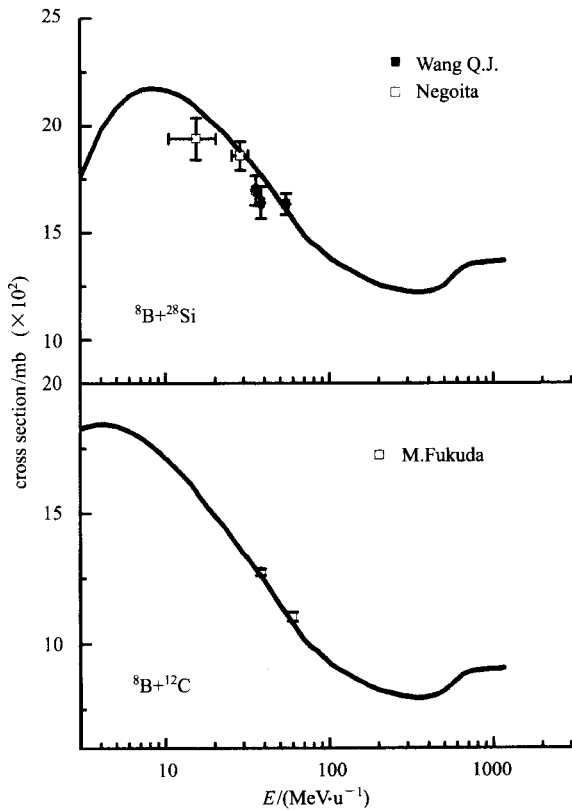


图 4 利用核芯加价核子的密度分布代入 Glauber 模型所得的计算结果与 ^8B 实验数据的比较

^8B 是丰质子的奇异核, 对于丰中子的奇异核,

选用 ^{15}C 作丰中子核的代表来验证一下这种核芯加价单核子(或多核子)的密度分布形式. 将 ^{15}C 看成是由 ^{14}C 加一个具有奇异结构的中子组成的. 其中, ^{14}C 的密度分布形式仍采用前面的双参数费米的密度分布. ^{15}C 拟合结果如图 5, 图中实验数据取自文献 [16]. 可以看出计算值与实验值可以很好的符合, 为了便于比较, 在图中也放了 ^{16}C 对 C 靶的激发函数. 可以看出 ^{15}C 的激发函数比 ^{16}C 的明显要高, 这反映出 ^{15}C 具有晕结构的本质. 同时给出了 ^{15}C 的密度分布图, 见图 6. 由上述可以看出 ^8B 和 ^{15}C 相对于其相邻的核, 都有一个延展的密度分布, 也即具有奇异的结构.

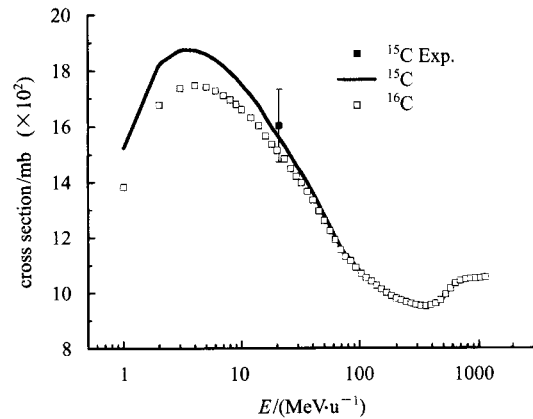


图 5 利用核芯加价核子的密度分布代入 Glauber 模型计算的结果与 ^{15}C 实验结果的比较

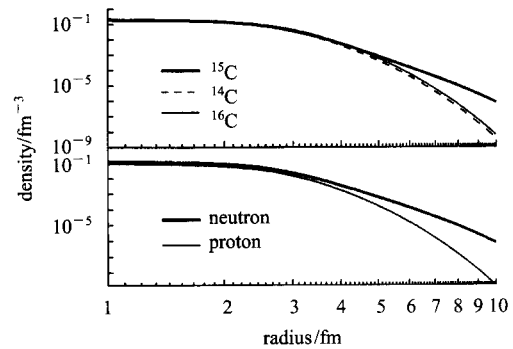


图 6 ^{15}C 与其邻近核 ^{14}C , ^{16}C 的物质密度分布的比较及 ^{15}C 内质子和中子的密度分布

对于在 RIBLL 实验中确认为具有奇异结构的核 ^{12}N , 采用了与处理 ^8B 和 ^{15}C 相同的方法来分析它 [17], 其中它的核芯我们认为是 ^{11}C , 然后它的外围有一个奇异的质子. 得出的计算结果与实验值在中高能都符合得很好. 而且还可以从 ^{12}N 与 ^{11}C 的物质

密度分布的比较及 ^{12}N 内质子和中子的密度分布的比较看出, ^{12}N 相对于其核芯 ^{11}C 来说有一个延展的密度分布.

4 结论

综上所述,对于 Glauber 模型,考虑有限程修正和库仑修正,将奇异核看成核芯加价核子结构,密度

输入双参数费米分布,计算结果能够很好地与实验值符合,并能清楚判明有无奇异结构.这说明,该形式能够较好地反应奇异核内的物质分布结构.但我们拟合的实验数据还较少,同时,现有的实验数据,特别是关于奇异核反应总截面的数据还较少.所以,应该多在反应总截面这方面做一些实验,来进一步验证这种核芯加价核子形式的有效性和可能性.

参考文献 (References)

- 1 Tanihata I, Hamagaki H, Hashimoto O et al. Phys. Rev. Lett., 1985, **55**:2676
- 2 SHEN W Q, WANG B, FENG J et al. Nucl. Phys., 1989, **A491**:130
- 3 Charagi S K et al. Phys. Rev., 1990, **C41**:1610
- 4 MA Y G, SHEN W Q, FENG J et al. Phys. Lett., 1993, **B302**:386
- 5 MA Y G, SHEN W Q, FENG J et al. Phys. Rev., 1993, **C48**:850
- 6 Karol P J. Phys. Rev., 1975, **C11**:1203
- 7 Devries R M, PENG J C. Phys. Rev., 1980, **C22**:1055
- 8 Tanihata I, Hamagaki H, Hashimoto O et al. Phys. Lett., 1985, **B160**:380
- 9 Liatard E, Bruandet J F, Glasser F et al. Euro. Phys. Lett., 1990, **13**:401
- 10 Ozawa A, Tanihata I, Kobayashi T et al. Nucl. Phys., 1996, **A608**:63
- 11 Fukuda M, Mihara M, Fukao T et al. Nucl. Phys., 1999, **A656**:209
- 12 WANG Quan-Jin. Doctoral Thesis. Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Science, Lanzhou, 2000(in Chinese)
(王全进. 博士论文, 中国科学院近代物理研究所, 兰州, 2000)
- 13 LI Jia-Xing, GUO Zhong-Yan, XIAO Guo-Qing et al. Acta. Phys. Sin., 2003, **52**(1):58 (in Chinese)
(李加兴, 郭忠言, 肖国青等. 物理学报, 2003, **52**(1):58)
- 14 Negoita F, Borcea C, Carstoiu F et al. Phys. Rev., 1996, **C54**:1787
- 15 Fukuda M, Mihara M, Fukao T et al. Nucl. Phys., 1999, **A656**:209
- 16 FANG D Q, SHEN W Q, FENG J et al. Chin. Phys. Lett., 2000, **17**:655
- 17 LI Jia-Xing. Doctoral Thesis. Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Science, Lanzhou, 2001 (in Chinese)
(李加兴. 博士论文, 中国科学院近代物理研究所, 兰州, 2001)

Fitting the Data of Exotic Structural Nuclear Total Reaction Cross Section with a Corrected Glauber Model *

LI Jia-Xing¹⁾ WANG Jian-Song GUO Zhong-Yan XIAO Guo-Qing ZHAN Wen-Long
SUN Zhi-Yu WANG Meng HU Zheng-Guo CHEN Li-Xin LI Chen MAO Rui-Shi
(Institute of Modern Physics, The Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract In order to fit the total reaction cross section of exotic nuclei, by using Glauber model, we consider that the exotic nuclei is composed of a core and valence nucleon(s), 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 core of the exotic nucleus for the special distribution of the valence nucleon(s), has a large dispersion. The results of the theoretical calculation are in agreement with the experimental one for nucleus with exotic structure, both at high and intermediate energy regions.

Key words Glauber model, total reaction cross section, Fermi-density-distribution with two parameters

Received 23 February 2004

* Supported by NSFC(10205019, 10105011, 10305015), Major State Basic Research Development Program of China (G2000077401, G2000077404) and NSFC for Innovative Research Group(10221003)

1) E-mail: lijx@impcas.ac.cn