

介质中的核子-核子碰撞截面及其 对原子核反应总截面的影响*

蔡翔舟 冯 军 沈文庆 马余刚 王建松 叶 巍

(中国科学院上海原子核研究所 上海 201800)

摘要 给出了一个在较大能量范围内描述介质中核子-核子碰撞截面的计算公式,并结合微观修正的 Glauber 模型,研究了介质效应对原子核反应总截面的影响.

关键词 介质效应 核子-核子碰撞截面 核反应

1 引言

核反应总截面 σ_R 是描述原子核反应基本特征的一个很重要的物理量,从中可以得到有关核反应、核结构和核内核子分布的信息.实际上,中子晕就是通过测量放射性奇异核束流引起反应的总截面而被发现的^[1].人们从理论和实验上都对核反应总截面进行了大量的研究^[2-8].描述 σ_R 最常用的微观理论是 Glauber 模型.我们小组在库仑修正的 Glauber 模型的基础上,引入小液滴模型给出的核内中子和质子分布,并假设核内中子分布的弥散度不再是常数,而与其分离能有关,同时考虑有限力程相互作用,发展了一个描述 σ_R 的微观修正模型^[3-5].在该模型的计算中,采用了自由空间中的核子-核子碰撞截面 $\sigma_{NN}^{\text{free}}$.但在重离子反应过程中,由于 Pauli 原理及核物质密度的影响,介质中的核子-核子碰撞截面是不同于自由空间中(也即实验测量)的核子-核子碰撞截面.介质效应对核子-核子碰撞截面的影响是一个很重要的研究课题,利用 Brueckner 理论通过求解多体近似的 Bethe-Goldstone (BG) 方程,可得到介质中的核子-核子碰撞截面,通常称之为 G 矩阵截面,但这种截面只能计算出几个密度和能量下的截面值,而且很难直接应用于核反应的有关计算.本文在 Li 等^[9,10]关于介质中的核子-核子碰撞截面的研究基础上,提出了一个新的描述介质中核子-核子碰撞截面的计算公式,并引入到微观修正的 Glauber 模型中计算 σ_R ^[3-5],使其能够更真实地反映核反应的特征.

1997-07-22收稿

* 国家杰出青年基金(19625513),国家自然科学基金(19675059),上海市科学技术发展基金(96XD14011)资助

2 计算公式和模型

许多小组对介质中的核子-核子碰撞截面进行了理论上的探讨. Li 等人^[9,10]采取 Bonn A 型核子-核子相互作用势和核物质分布的 Dirac-Brueckner 近似, 区分中子和质子, 使用微观理论计算了 $0-2\rho_0$ 之间的核物质密度 (ρ_0 是核物质饱和密度, 在这里取为 0.17fm^{-3}), 碰撞能量在 $50-300\text{MeV}$ 之间的截面值, 并通过拟合微观理论的数学求解计算值给出了介质中的核子-核子碰撞截面的参数化计算公式:

$$\begin{cases} \sigma_{nn} = [23.5 + 0.00256(18.2 - E_{\text{lab}}^{0.5})^4] \frac{1.0 + 0.1667E_{\text{lab}}^{1.05} \rho^3}{1.0 + 9.704\rho^{1.2}}, \\ \sigma_{np} = [31.5 + 0.092\text{abs}(20.2 - E_{\text{lab}}^{0.53})^{2.9}] \frac{1.0 + 0.0034E_{\text{lab}}^{1.51} \rho^2}{1.0 + 21.55\rho^{1.34}}, \end{cases} \quad (1)$$

其中 ρ 是核物质密度, 单位为 fm^{-3} , 介于 $0-2\rho_0$ 之间, E_{lab} 为入射粒子在实验室坐标的能量, σ_{nn} 是中子-中子 (或质子-质子) 碰撞截面, σ_{np} 是中子-质子碰撞截面. 公式 (1) 对介质中的核子-核子碰撞截面的表述分为两个部分: 前半部分描述自由空间中的核子-核子碰撞截面. 后半部分反映了在介质中截面随入射能和核物质密度的变化关系. 可以看出, 介质效应的引入导致了截面的下降, 它在整个中能区都具有很重要的影响, 随着能量的提高虽然有所减弱, 但依然存在.

公式 (1) 是通过拟合微观模型的计算结果首次提出的包含介质效应的核子-核子碰撞截面的解析表达式. 但是, 该公式对相互作用能量进行了截断, 在低能和高能端都偏离了真实的核子-核子相互作用, 而且, 迄今为止, 也没有人用它来对真实可测的物理量进行检验. 如图 1 所示, 实心圆圈是实验测量到的自由空间中的核子-核子碰撞截面实验数据, 点划线是公式 (1) 在 $\rho = 0$ 的情况下的描述. 当能量大于 400MeV 以后, σ_{nn} 和 σ_{np} 的值呈指数上升, 并超过自由空间中的核子-核子碰撞截面的实验值, 这显然与真实情况相违背. 本文将公式 (1) 取 $\rho = \rho_0$ 代入 Glauber 模型计算了核反应总截面, 发现计算值大大小于实验值. 因此, 我们提出了一个新的描述介质中的核子-核子截面的计算公式:

$$\begin{cases} \sigma_{nn} = (13.73 - 15.04\beta^{-1} + 8.76\beta^{-2} + 68.67\beta^4) \frac{1.0 + 7.772E_{\text{lab}}^{0.06} \rho^{1.48}}{1.0 + 18.01\rho^{1.46}}, \\ \sigma_{np} = (-70.67 - 18.18\beta^{-1} + 25.26\beta^{-2} + 113.85\beta) \frac{1.0 + 20.88E_{\text{lab}}^{0.04} \rho^{2.02}}{1.0 + 35.86\rho^{1.90}}, \end{cases} \quad (2)$$

其中 β 是入射弹核速度同光速之比. 该公式中, 介质中的核子-核子碰撞截面随着核物质密度的提高而逐渐下降, 而随着入射能的增加介质效应有所减弱, 介质中的核子-核子碰撞截面向自由空间中的截面靠近. 同公式 (1) 比较, 首先, 公式 (2) 采用 Gupta 等人^[7]的公式替换公式 (1) 中的前半部分. Gupta 等人的公式是拟合能量在 $10\text{MeV}-1\text{GeV}$ 范围内的大量实验数据而得到的自由空间中的核子-核子碰撞截面, 从而解决了公式 (1) 无法成功地外推到低能和高能端的问题. 其次, 对体现介质效应的后半部分重新做了拟合. 在公

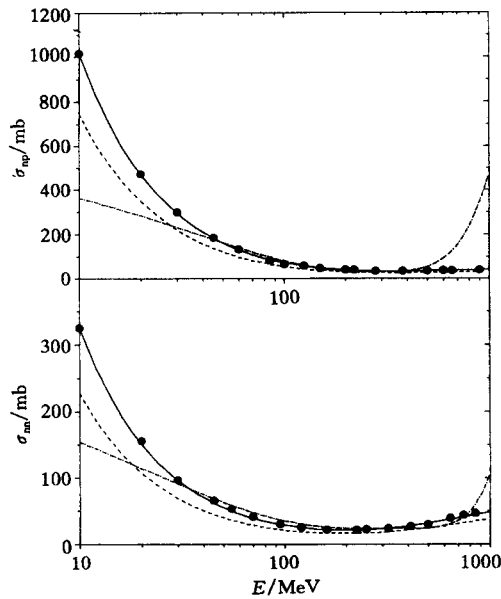


图 1 核子-核子碰撞截面与相互作用能量的关系

- : 实验测量得的自由空间核子-核子碰撞截面;
- · — · : Li G Q 等人在 $\rho = 0$ 时的计算结果;
- : 本工作用公式 (2) 在 $\rho = 0$ 时的计算结果;
- : 本工作用公式 (2) 在 $\rho = \rho_0$ 时的计算结果.

而 Klakow 等人的结论完全忽视了介质效应的能量相关性, 只简单地给出其同核物质密度的关系, 因此使得他们的公式在内容形式和实际应用中都显得过于粗糙.

我们采用修正的 Glauber 模型来计算核反应总截面 $\sigma_R^{[3-5]}$. 根据该模型, σ_R 可表示成:

$$\sigma_R = 2\pi \int b db [1 - T(b)], \quad (3)$$

用高斯分布代替核子密度的费米分布, 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) 处规一为高斯分布来得到, 同时考虑对碰撞参量 b 的库仑修正, 穿透函数 $T(b)$ 可以写成:

$$T(b) = \exp \left[-\pi^2 \sum_{i=n,z} \sum_{j=n,z} \frac{\sigma_{ij} \rho_{T_i}(0) \rho_{P_j}(0) \alpha_{T_i}^3 \alpha_{P_j}^3}{\alpha_{T_i}^2 + \alpha_{P_j}^2 + \gamma_0^2} \exp \left(-\frac{b'^2}{\alpha_{T_i}^2 + \alpha_{P_j}^2 + \gamma_0^2} \right) \right], \quad (4)$$

$$b'^2 = \frac{b^2}{1 - V_c / E_{CM}} = \frac{b^2}{1 - 1.44 Z_T Z_P / (R_{int} E_{CM})}, \quad (5)$$

(4)、(5) 两式中, $\gamma_0 = 1\text{fm}$ 为相互作用力程, 和相互作用吸收矩阵计算给出的值一致; $i = n, z, j = n, z$ 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, $\rho_{T_i}(0), \rho_{P_j}(0), \alpha_{T_i}, \alpha_{P_j}$ 靶核和弹核中质子密度分布及中子密度分布的参数, b 是碰撞参量, 以

式 (2) 中, 当 $\rho = 0$ 时, 它与 Gupta 的公式的计算结果在较大能区内完全重合. 当 $\rho = \rho_0$ 时, 随着能量的提高, 介质中的核子-核子碰撞截面由自由空间中截面的 70% 上升到 85%. 而在 Li 等人的计算中, 介质中的截面只有自由空间中的 50% 左右.

另外, Klakow 等人^[11]在用软模式的核状态方程 (EOS) 计算核反应平衡能时, 发现使用介质中的核子-核子碰撞截面等于自由空间中截面的 80%, 计算得到的平衡能最好地拟合实验数据, 从而提出 $\sigma_{NN}^{\text{in-medium}} = 0.8 \sigma_{NN}^{\text{free}}$. Haar 等^[12]利用相对论性的 Dirac-Brueckner 近似, 讨论了高能核子和反冲粒子在稠密的核介质中的性质, 也得出了相同的结论. 这个结论现在在 BUU^[8, 13, 14]、QMD^[15] 等量子输运理论模型中通常被采用, 它同本文的公式 (2) 是相符合的. 但是, 实际上介质效应在各个能区的影响是有差别的,

上参数的取值见文献 [3, 4], 其中, 中子分布弥散度不再是常数, 而与其分离能有关. σ_{ij} 为使用公式 (2) 给出的介质中的核子-核子碰撞截面, 式中 ρ 取为 ρ_0 .

3 计算结果和讨论

图 2, 3 给出了本工作对不同系统的计算结果, 作为比较, 图中给出了使用相同的模型

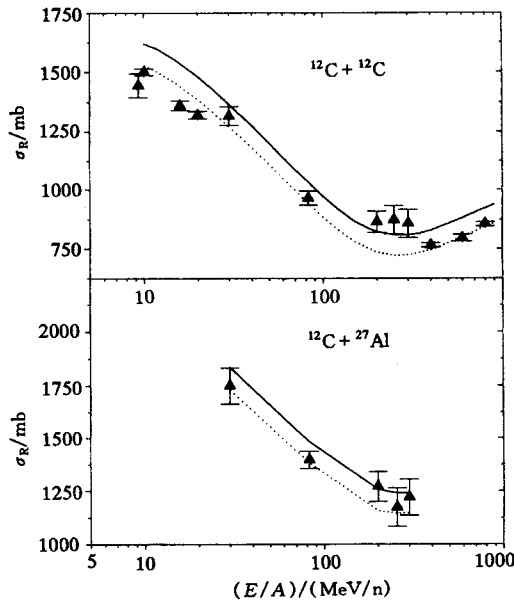


图 2 稳定核引起反应的原子核反应总截面与轰击能量的关系

▲: 实验值;: 本工作;
——: 不考虑介质效应时 Glauber 模型计算值.

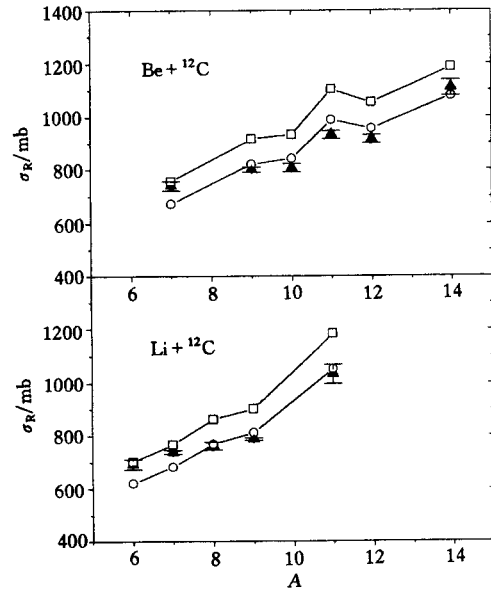


图 3 奇异核引起反应的原子核反应总截面与质量数 A 的关系 (轰击能为 790MeV/u)

▲: 实验值; ○: 本工作; □: 不考虑介质效应时 Glauber 模型计算值.

但没有考虑介质效应的计算值.

图 2 中, 对于 ^{12}C 分别轰击 ^{12}C 和 ^{27}Al 靶的稳定核反应系统, 本工作能够很好地反映核反应总截面随能量的变化趋势, 随着能量的升高截面下降, 到 200MeV/u 左右达到饱和并逐步回升, 同没有引入介质效应的结果相比总截面下降了 $5\% - 10\%$. 在低能区和高能区, 考虑介质效应后, 拟合结果有较大改善, 但在中能区和实验值相比还存在一定的偏差. 实际上, 中能区的重离子反应主要是受到平均场、两体碰撞和 Pauli 阻塞效应三方面因素制约, 从而使反应机制变得复杂起来, 给实验中精确测量带来一定困难. 另外, 由于 Glauber 多体散射理论基础是高能粒子散射, 在处理中、低能重离子反应的有关问题时, 亦会带来一定误差. 由于 BUU 模型能较好地处理平均场和 Pauli 阻塞效应, 所以最好能结合 BUU 模型来分析中能区的总截面数据, 但是这将大大增加计算的复杂性.

图 3 是 790MeV/u 的 Li 和 Be 放射性核束流轰击 ^{12}C 靶的反应总截面随质量数 A 的变化曲线. 从图中可以看出, 考虑介质效应引起的核子-核子碰撞截面减小后, 计算结果比

使用自由空间核子-核子碰撞截面有较大的改善,尤其对 neutron halo 核也能拟合得很好,这也可以从 χ^2 误差的计算值看出计算值对实验值的拟合程度. 这里定义 $\chi^2 = \sum_n \frac{(\sigma_{\text{exp}} - \sigma_{\text{cal}})^2}{\sigma_{\text{exp}}^2}$, 其中, σ_{exp} 是实验值, σ_{cal} 是理论计算值. 对 Li 和 Be 同位素反应的计算发现, 没有引入介质效应的 $\chi^2 = 0.17$, 而本工作的 $\chi^2 = 0.035$, 拟合有了明显的改善.

最后, 还计算了包括稳定核和奇异核在内的 40 多个系统反应总截面及其总的 χ^2 , 本工作的结果很好地再现了实验数据, 总的 $\chi^2 = 0.91$, 而没有引入介质效应的 $\chi^2 = 1.54$, 可见, 通过本文提出的介质中的核子-核子碰撞截面的计算公式引入到核反应总截面的计算中, 使得对实验值的拟合在很大程度上有了改善.

4 小结

本文讨论了介质效应对核子-核子碰撞截面的影响, 给出了一个描述介质中的核子-核子碰撞截面的计算公式, 通过将它引入到库仑修正的 Glauber 模型中计算 σ_R , 对于大量的反应系统, 在广泛的相互作用能量范围内对实验数据的拟合有了较大的改善, 表明介质效应对原子核反应总截面有一定影响.

参 考 文 献

- [1] Tanihata I, Hamagaki H, Hashimoto O et al. Phys. Rev. Lett., 1985, **55**:2676—2679
- [2] Kox S et al. Phys. Rev., 1987, **C35**:1678—1691
- [3] Feng J, Shen W Q, Ma Y G et al. Phys. Lett., 1993, **B305**:9—12
- [4] Shen W Q, Wang B, Feng J. Nucl. Phys., 1989, **A491**:130—146
- [5] Feng J, Shen W Q, Ma Y G. High Energy Phys. and Nucl. Phys. (in Chinese), 1994, **18**(2):97—101
(冯军, 沈文庆, 马余刚. 高能物理与核物理, 1994, **18**(2):97—101)
- [6] Suzuki T, Geossl H, Bochkara O. Phys. Rev. Lett., 1995, **75**:3241—3244
- [7] Charagi S K, Gupta S K. Phys. Rev., 1990, **C41**:1610—1618
- [8] Ma Y G, Shen W Q, Feng J et al. Phys. Rev., 1993, **C48**:850—856
- [9] Li G Q, Machleidt R. Phys. Rev., 1993, **C48**:1702—1712
- [10] Li G Q, Machleidt R. Phys. Rev., 1994, **C49**:566—569
- [11] Klakow D, Welke G, Bauer W. Phys. Rev., 1993, **C48**:1982—1987
- [12] Haar B T, Malfliet R. Phys. Rev., 1987, **C36**:1611—1620
- [13] Bertsch G, Brown G E, Koch V et al. Nucl. Phys., 1988, **A490**:745—755
- [14] Li B A. Phys. Rev., 1993, **C48**:2415—2418
- [15] Aichelin J et al. Phys. Rep., 1991, **202**:233—360

In-medium Nucleon-Nucleon Collision Cross Section and Its Effect on Total Nuclear Reaction Cross Section *

Cai Xiangzhou Feng Jun Shen Wenqing Ma Yugang
Wang Jiansong Ye Wei

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

Abstract New formulas for the in-medium nucleon-nucleon collision cross section are presented, in which the nuclear matter density and the incident energy are included. These formulas are used to study the total nuclear reaction cross section based on a Coulomb-modified Glauber model. The calculation can reproduce the experimental results of both stable nuclei and exotic nuclei induced reactions over energy range from 10MeV / nucleon to 1GeV / nucleon.

Key words medium effect, nucleon-nucleon collision cross section, nuclear reaction

Received 22 July 1997

* Supported Partly by the National Science Fund for Distinguished Young Scholar under the Grand (19625513), National Science Foundation of China under the Grand (19675059) and Shanghai Science and Technology Development Fund under the Grand (96XD14011)