

集团模型与 $\pi^{-13}\text{C}$ 单电荷交换反应分析

任永健^{1,2①} 左淑华²

(1 中国科学院理论物理研究所 2 中国农业大学工程基础科学部)

摘要 在 Glauber 理论框架下,对 $^{13}\text{C}(\pi^+, \pi^0)^{13}\text{N}$ 单电荷交换反应($T_\pi=150\text{ MeV}$ 和 165 MeV)进行分析,核波函数假定由价核子和 ^{12}C 核心组成,核心部分以独立 α 集团模型描述。计算表明,理论与实际符合得较好。

关键词 Glauber 理论; 单电荷交换反应; 集团模型

中图分类号 O 571. 425

Cluster Model and Analysis of Pion Single Charge Exchange Reaction on ^{13}C

Ren Yongjian^{1,2} Zuo Shuhua²

(1 Institute of Theoretical Physics, Academia Sinica 2 College of Applied Engineering Sciences, CAU)

Abstract The SCX reaction $^{13}\text{C}(\pi^+, \pi^0)^{13}\text{N}$ at $T_\pi=150\text{ MeV}$ and 165 MeV are analyzed by using the frame of the Glauber theory. The nuclear wave function is assumed to be constructed by a valence nucleon plus a core of ^{12}C which is described by an independent α cluster model. A good agreement between the theory and experiments is obtained.

Key words Glauber theory; SCX reaction; cluster model

独立 α 粒子模型^[1]已成功地应用于 ^{12}C , ^{13}C , ^{16}O 的弹性散射^[2,3]和某些重离子反应^[4]的研究,取得了较好的结果。最近,应用该模型对 ^{14}C 双电荷交换反应(DCX)的分析^[5],理论与实验符合得也很好。为进一步扩展该模型的应用范围,笔者在 Glauber 理论框架下,应用独立 α 粒子模型对 $^{13}\text{C}(\pi^+, \pi^0)^{13}\text{N}$ 单电荷交换反应进行计算,取得了预期的结果。

1 散射振幅

与文献[3]类似, ^{13}C 和 ^{13}N 的波函数为 $|^{13}\text{C}\rangle_{g.s.} = |n\rangle |^{12}\text{C}\rangle$ 和 $|^{13}\text{N}\rangle_{g.s.} = |p\rangle |^{12}\text{C}\rangle$ 。其中: $|n\rangle$, $|p\rangle$ 分别为价中子和价质子的波函数; $|^{12}\text{C}\rangle$ 是 ^{13}C (或 ^{13}N)的核心的波函数。 $|n\rangle$ 和 $|p\rangle$ 简单地取为壳模型下 $1p_{1/2}$ 轨道的谐振子波函数, $|^{12}\text{C}\rangle$ 的独立 α 粒子波函数取自文献[1]。由 Glauber 理论, $^{13}\text{C}(\pi^+, \pi^0)^{13}\text{N}$ 单电荷交换反应的散射振幅可表示为

$$F_{fi}(q) = \frac{iK_{\pi c}}{2\pi} \int d^2b \exp(iq \cdot b) \langle \Psi_f | 1 - \prod_{j=1}^4 [1 - \Gamma(\mathbf{b} - \mathbf{s}_j)] | \Psi_i \rangle \quad (1)$$

式中: $K_{\pi c}$ 是入射 π 介子在 π -核质心系中的动量; $\Gamma(\mathbf{b})$ 是断面函数,它可表为

$$\Gamma(\mathbf{b}) = \frac{1}{2\pi i K} \int d^2q \exp(-iq \cdot b) f_{\pi\alpha}(q)$$

收稿日期:1998-01-08

①任永健,北京清华东路 17 号 中国农业大学(东校区)72 信箱,100083

式中: K 是 π 介子在 π - x 质心系中的动量; x 表示价核子或 α 粒子, $f_{\alpha}(q)$ 为相应的振幅。当忽略自旋部分, π - N 振幅常取为

$$f(\mathbf{K}', \mathbf{K}) = f_0 + f_1(\mathbf{t} \cdot \boldsymbol{\tau})$$

其中 $\mathbf{t}, \boldsymbol{\tau}$ 分别为 π 介子和核子的同位旋算符。当只考虑 s 波和 p 波时, f_0 和 f_1 可近似表为

$$f_0 = A_0 + B_0 q^2$$

$$f_1 = A_1 + B_1 q^2$$

$$\mathbf{q} = \mathbf{K} - \mathbf{K}'$$

$$A_0 = \frac{1}{3} [f_{11}^0 + 2f_{31}^0 + 2f_{31}^1 + 2f_{13}^1 + f_{11}^1 + 4f_{33}^1]$$

$$B_0 = -\frac{1}{6K^2} [2f_{31}^1 + 2f_{13}^1 + f_{11}^1 + 4f_{33}^1]$$

$$A_1 = \frac{1}{3} [-f_{11}^0 + f_{31}^0 + f_{31}^1 - 2f_{13}^1 - f_{11}^1 + 2f_{33}^1]$$

$$B_1 = -\frac{1}{6K^2} [f_{31}^1 - 2f_{13}^1 - f_{11}^1 + 2f_{33}^1]$$

其中

$$f_{\alpha} \equiv \frac{1}{|K|} \exp(\delta_{\alpha}) \sin \delta_{\alpha}$$

式中 δ_{α} 是相移, $\alpha = [L I J]$, 它由文献[6]中拟合 300 MeV 以下的 π - N 实验数据的公式计算得到。 π - α 振幅由文献[7]拟合 π - ^4He 弹性散射实验得到, 并作为 Glauber 理论的输入量, 某种程度上也将 π 吸收及核结构效应包含了进去。

将 π - α 振幅和 π - N 振幅代入式(1)可得到 $^{13}\text{C}(\pi^+, \pi^0)^{13}\text{N}$ 单电荷交换散射振幅

$$F(q) = F_{\alpha}^{(1)}(q) + F_{\alpha}^{(2)}(q) + F_{\alpha}^{(3)}(q) + F_{\alpha}^{(4)}(q)$$

式中: $F_{\alpha}^{(1)}(q)$ 是只考虑价核子的电荷交换项; $F_{\alpha}^{(2)}(q), F_{\alpha}^{(3)}(q), F_{\alpha}^{(4)}(q)$ 分别是考虑核心贡献的 2 次、3 次和 4 次散射项。它们都是包含 Γ 函数与合流超比函数的多项式:

$$F_{\alpha}^{(1)}(q) = \frac{iK_{\pi\alpha}E_1}{2} \sum_{n=0,2}^4 C(n) \Gamma\left(\frac{n}{2} + 1\right) a_0^{n+2} {}_1F_1\left(-\frac{n}{2}, 1, \frac{a_0^2 q^2}{4}\right) \exp(-a_0^2 q^2/4)$$

$$F_{\alpha}^{(2)}(q) = -\frac{i3K_{\pi\alpha}E_1 N_K}{2} \sum_{n=0,2}^{12} G(n) \Gamma\left(\frac{n}{2} + 1\right) (2R_1)^{n+2} {}_1F_1\left(-\frac{n}{2}, 1, R_1^2 q^2\right) \exp(-R_1^2 q^2)$$

$$F_{\alpha}^{(3)}(q) = \frac{i3K_{\pi\alpha}E_1 N_K^2}{2} \sum_{n=0,2}^{20} H(n) \Gamma\left(\frac{n}{2} + 1\right) (2R_2)^{n+2} {}_1F_1\left(-\frac{n}{2}, 1, R_2^2 q^2\right) \exp(-R_2^2 q^2)$$

$$F_{\alpha}^{(4)}(q) = -\frac{iK_{\pi\alpha}E_1 N_K^3}{2} \sum_{n=0,2}^{28} I(n) \Gamma\left(\frac{n}{2} + 1\right) (2R_3)^{n+2} {}_1F_1\left(-\frac{n}{2}, 1, R_3^2 q^2\right) \exp(-R_3^2 q^2)$$

以上各式中 $K_{\pi\alpha}, N_K, R_1, R_2, R_3$ 均与文献[3]中相同, 式中的系数 $E_1, C(n), G(n), H(n), I(n)$ 分别为

$$E_1 = \frac{2\sqrt{2}}{3iK_{\pi\alpha}a_0^2} \quad (a_0 = 1.596)$$

$$C(0) = A_1 - 4B_1/a_0^2$$

$$C(2) = (2A_1 + 20B_1/a_0^2)/a_0^2$$

$$C(4) = -8B_1/a_0^6$$

$$\sum_{n=0,2}^{12} G(n)b^n = \sum_{n=0,2}^8 D(n)b^n \sum_{m=0,2}^4 C(m)b^m$$

$$\sum_{n=0,2}^{20} H(n)b^n = \sum_{n=0,2}^{16} D'(n)b^n \sum_{m=0,2}^4 C(m)b^m$$

$$\sum_{n=0,2}^{28} I(n)b^n = \sum_{n=0,2}^{24} D''(n)b^n \sum_{m=0,2}^4 C(m)b^m$$

其中 $D(n), D'(n), D''(n)$ 参见文献[8]中的附录。

2 结果及讨论

利用上述公式计算了 $T_\pi = 150, 165 \text{ MeV}$ 这 2 种情况下的 $^{13}\text{C}(\pi^+, \pi^0)^{13}\text{N}$ 单电荷交换反应, 并分别与实验数据和其他方法的计算结果进行比较, 见图 1。可以看出: 在 $T_\pi = 150, 165$

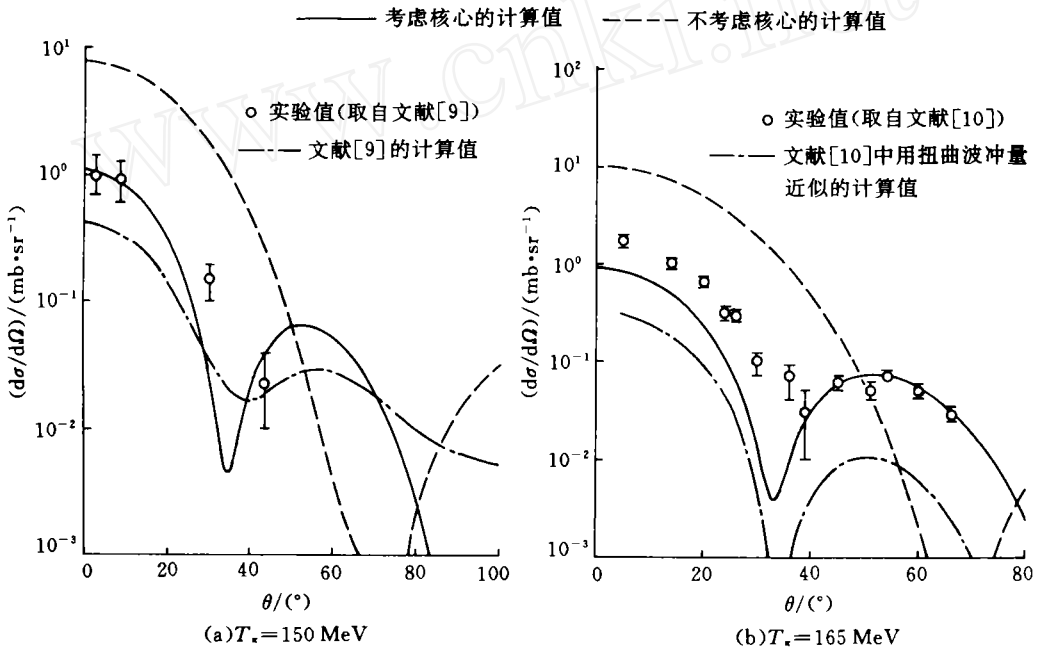


图 1 $^{13}\text{C}(\pi^+, \pi^0)^{13}\text{N}$ 微分截面

MeV 这 2 种情况下, 考虑核心贡献的计算值与实验值比较接近, 能较正确地反映角分布的形状和峰谷的位置, 本文的理论计算分别优于文献[9]和[10]。因此, 对于 $^{13}\text{C}, ^{13}\text{N}$ 的情况, α 粒子集团模型是一很好的近似描述。在只考虑价核子贡献时, 2 种能量情况下的角分布理论值比实验值大近 1 个数量级, 而当考虑核心贡献后, 理论值与实验值符合较好。其原因是: 核心对 π 介子的吸收效应, 被 π - α 振幅自动包含且当考虑核心作用时, 散射振幅有 4 项, 分别对应 1, 2, 3, 4 次散射, 这些项的位相关系互相抵消, 使理论值更接近于实验值。总之, 对于单电荷交换反应, 独立 α 粒子模型是一较好的描述, 核心对散射振幅的贡献仍然相当重要。这一点与文献[3]得到的结论是一致的。

参 考 文 献

- 1 Li Qingrun, Chen Shengzhong, Zhao Enguang. The independent α particle model of light nuclei. High Energy Phys Nucl Phys, 1981, 5: 531
- 2 Li Qingrun, Chen Shengzhong, Zhao Enguang. Low energy pion scattering from nuclei and the α -particle model. Nucl Phys, 1982, A384: 466
- 3 任永健, 黄清波, 左淑华, 等. α 粒子模型下的 π^\pm - ^{13}C 弹性散射. 中国农业大学学报, 1997, 2(4): 32
- 4 Xia L H, He G Z. Transfer mechanism for 3α in heavy ion scattering. Phys Rev, 1987, C35: 1797
- 5 Zhao Enguang, Zeng Guomo, Liu Yuxin. Analysis of $^{14}\text{C}(\pi^+, \pi^-)^{14}\text{O}$ reaction at 50 MeV. Commun Theor Phys, 1996, 25: 381
- 6 Rowe G, Salomon M, Landau R H. Energy-dependent phase shift analysis of pionnucleon scattering below 400 MeV. Phys Rev, 1978, C18: 584
- 7 Binon F, Duteil P, Gouanere M, et al. Scattering of negative pions on heliun. Nucl Phys, 1978, A298: 499
- 8 李清润, 陈生忠, 赵恩广. α 粒子模型下的 π^- - ^{12}C 散射, 高能物理与核物理, 1981, 5(6): 641
- 9 Liu L C. Two-nucleon processes in a coupled-channel approach to pion-nucleus single-charge-exchange reactions. Phys Rev, 1981, C23(2): 814
- 10 Doron A, Alster J, Erell A, et al. Angular distributions of single pion charge exchange reactions to isobaric analog states in light nuclei. Phys Rev, 1982, C26(1): 189