

π 核双电荷交换反应与核结构

刘宪辉 吴宗恩 黄朝晖 李扬国

(中国科学院高能物理研究所) (广西大学) (中国科学院高能物理研究所)

摘 要

用 Glauber 多次散射理论和相干涨落核模型, 计算了能量在 (3,3) 共振区的 π^+ 介子在 ^{16}O 和 ^{18}O 靶核上引起的双电荷交换反应截面. 理论计算的 $^{18}\text{O}(\pi^+, \pi^-)^{18}\text{Ne}_{g.s.}$ 和 $^{16}\text{O}(\pi^+, \pi^-)^{16}\text{Ne}_{g.s.}$ 反应截面的比值, 很好的符合实验值. 理论预言了 $^{18}\text{O}(\pi^+, \pi^-)^{18}\text{Ne}_{g.s.}$ 微分截面角分布在角度为 23° 附近有极小值, 实验表明了这个极小的存在.

π 核双电荷交换 (DCE) 反应改变靶核的两个单位电荷, $\Delta T_z = \pm 2$, 它是研究核结构的一类重要反应. 最近发表的同位旋相似态间跃迁的 $^{18}\text{O}(\pi^+, \pi^-)^{18}\text{Ne}_{g.s.}$ 和同位旋非相似态间跃迁的 $^{16}\text{O}(\pi^+, \pi^-)^{16}\text{Ne}_{g.s.}$ 反应截面的一些数据^[1-5] 表明这类反应的特点为:

1. 相似态间跃迁几率与非相似态间跃迁几率之比, 不像人们所想的那末大. 比如 $T_{\pi^+} \approx 140\text{MeV}$. 在 0° 处, 两者之比值只为 2.3 ± 0.7 .
2. 反应截面随 T_{π^+} 变化的曲线, 在 (3,3) 区附近表现为一平缓凹槽, 而 π 核弹散截面或总截面在此处却都是一个宽峰.
3. 角分布出现了峰, 谷的绕射花纹^[5].

为研究这些特点与反应机制和核结构的关系, 本文用 Glauber 理论和核结构的相干涨落模型来计算 π^+ 与 ^{18}O 和 ^{16}O 的 DCE 反应. Glauber 多次散射理论的 DCE 振幅为^[6]

$$F_{fi}(\mathbf{q}) = \frac{ik}{2\pi} \int d^{(2)}bc e^{i\mathbf{q}\cdot\mathbf{b}} \langle \phi_f | \frac{1}{2} \sum_{j \neq k} \Gamma_j^{ex}(\mathbf{b} - \mathbf{s}_j) \Gamma_k^{ex}(\mathbf{b} - \mathbf{s}_k) \times \prod_{l \neq j \neq k} (1 - \Gamma_l^{el}(\mathbf{b} - \mathbf{s}_l)) | \phi_i \rangle, \quad (1)$$

式中符号与文献 [6] 相同. 如果不考虑原子核中间激发态对 DCE 反应的贡献, 则 (1) 式可分成双电荷交换及弹散两部分, 而写成

$$F_{fi}(\mathbf{q}) = ik \int bdb J_0(qb) \langle \phi_f | \frac{1}{2} \sum_{j \neq k} \Gamma_j^{ex}(\mathbf{b} - \mathbf{s}_j) \Gamma_k^{ex}(\mathbf{b} - \mathbf{s}_k) | \phi_i \rangle \times \langle \phi_i | \prod_{l \neq j \neq k} (1 - \Gamma_l^{el}(\mathbf{b} - \mathbf{s}_l)) | \phi_i \rangle. \quad (2)$$

^{16}O 附近的轻核结构, 已有了广泛的研究. 特别是能级集体激发的性质, 在微观描述

上无规位相近似的相干涨落模型有很大的成功。为此我们用这类结构波函数来研究 π^+ 与 ^{16}O , ^{18}O 的双电荷交换反应。我们采用文献 [7] 中对 ^{16}O 附近核的结构的表述和符号, 引进声子算符, 认为 ^{16}O 的基态是声子真空态, ^{18}O , ^{18}Ne 的基态是一个声子态, ^{16}Ne 的基态是一个声子和一个声子空穴态等等。在我们的具体计算中, 为了研究组态涨落对反应过程的影响, 我们把与涨落有关的系数 y_0 作为参数, 变化范围从 0—0.305。

在计算 (2) 式双电荷交换反应的矩阵元时, 我们用两种近似处理方法。(i) 玻色近似: 即把声子看为玻色子处理。(ii) 截止近似: 波函数按费米子展开, 如 ^{16}O 基态

$$|^{16}\text{O}\rangle = |\psi_0\rangle = C_0|0\rangle + C_2(\eta_{LST}^\dagger \xi_{LST}^\dagger)_{000}|0\rangle + \dots \quad (3)$$

计算时用费米子对易关系, 但只取展开式的 C_0, C_2 项。至于弹散矩阵元部分, 简单地用密度近似处理, 把它表为

$$\begin{aligned} \langle \psi_i | \prod_{l \neq j \neq k} (1 - \Gamma_l^{cl}(\mathbf{b} - \mathbf{s}_l)) | \psi_i \rangle &= \left[1 - \int \rho(r) \Gamma^{cl}(\mathbf{b} - \mathbf{s}) d\mathbf{r} \right]^{A-2}, \\ \rho(r) &= \frac{4\alpha^3}{A\pi^{3/2}} \left(1 + \frac{A-4}{6} (\alpha^2 r^2) \right) \exp(-\alpha^2 r^2). \end{aligned} \quad (4)$$

式中 $\rho(r)$ 是 $A \leq 16$ 的核中单核子平均密度分布函数, α 为谐振子参数, πN 振幅用分波展开, 由于 π 的能量在 (3, 3) 区, 故只需取 S, P 波^[8]。

把已算出的电荷交换矩阵元部分及弹散矩阵元部分代入 (2) 式, 并对 \mathbf{b} 积分, 则得到跃迁振幅 $F_{ji}(\mathbf{q})$ 。最后⁸由式

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = |F_{ji}(\mathbf{q})|^2 \quad (5)$$

就可求出双电荷交换反应的微分截面。

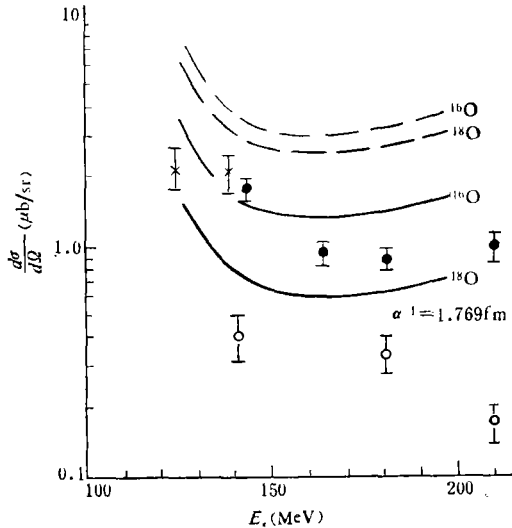


图 1 $\pi^+ - ^{16,18}\text{O}$ 双电荷交换反应截面随 E_c 变化曲线

图中曲线为理论计算值的 1/4

— $y_0 = 0$; - - - $y_0 = 0.305$
 \times $^{18}\text{O} \theta = 0^\circ$, \bullet ^{18}O , \circ $^{16}\text{O} \theta = 5^\circ$

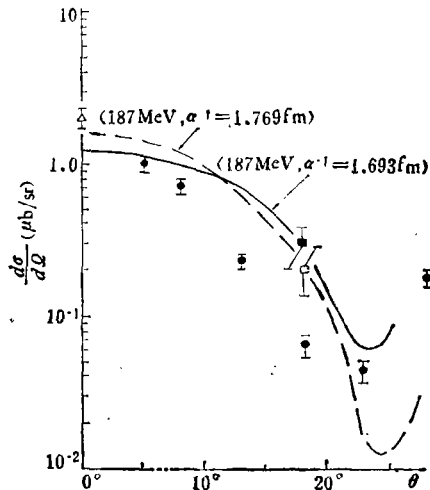


图 2 $\pi^+ - ^{18}\text{O}$ 双电荷交换反应微分截面的角分布

图中曲线为理论计算值的 1/4

\bullet (164 MeV)^[13] \blacksquare (184 MeV)^[13]
 \square (148 MeV)^[13] \triangle (139 MeV)^[13]

我们现把计算的主要结果列于表 I, II. 及绘于图 1, 2. 表 I 为用玻色近似和截止近似计算的 ^{18}O 与 ^{16}O 的双电荷交换反应截面的比值 R .

$$R = \frac{d\sigma}{d\Omega} (^{18}\text{O}(\pi^+, \pi^-)^{18}\text{Ne}) / \frac{d\sigma}{d\Omega} (^{16}\text{O}(\pi^+, \pi^-)^{16}\text{Ne}).$$

表 II 为双电荷交换反应两体矩阵元

$$ik \int dbb J_0(qb) \left\langle (n_1 l_1)_{00}^2 \left| \frac{1}{2} T_1^{c\pi} T_2^{c\pi} \right| (n_2 l_2)_{00}^2 \right\rangle$$

之值. 图 1 为双电荷交换反应微分截面随入射 π 介子能量变化曲线. 图 2 为 $^{18}\text{O}(\pi^+, \pi^-)^{18}\text{Ne}_{g.s.}$ 反应微分截面的角分布 $\frac{d\sigma}{d\Omega}(\theta)$. 在两图中曲线上的值为计算值的 $\frac{1}{4}$.

表 I $\pi^+ - ^{18}\text{O}$ 的双电荷交换反应截面比值 R

T_π (MeV)		95		126		140		150		187	
y_0		0.0	0.305	0.0	0.305	0.0	0.305	0.0	0.305	0.0	0.305
玻色近似	只算电荷交换项	2.32	1.58	2.88	1.70	3.29	1.74	3.65	1.75	4.28	1.58
	算全部项	1.90	1.29	2.26	1.27	2.25	1.21	2.21	1.20	2.17	1.20
截止近似算全部项		1.90	1.87	2.26	1.90	2.25	1.83	2.21	1.80	2.17	1.79
实验值						$2.3 \pm 0.8^{1.2}$					

$\alpha^{-1} = 1.693\text{fm} \quad \theta = 0^\circ$

表 II 双电荷交换反应两体矩阵元

$(n_2 l_2)_{00}^2$ \ / \ $(n_1 l_1)_{00}^2$	$(1d)_{00}^2$	$(2s)_{00}^2$	$(1p)_{00}^2$
$T_\pi = 140\text{MeV}$			
$(1d)_{00}^2$	$-0.2297 - i0.2438$	$-0.0091 - i0.1135$	$0.0206 + i0.1402$
$(2s)_{00}^2$		$-0.0119 - i0.1602$	$0.0245 + i0.1066$
$(1p)_{00}^2$			$0.0165 - i0.1590$
$T_\pi = 187\text{MeV}$			
$(1d)_{00}^2$	$0.2638 + i0.0199$	$0.1150 + i0.0007$	$-0.1449 - i0.0223$
$(2s)_{00}^2$		$0.1558 - i0.0060$	$-0.0051 + i0.0192$
$(1p)_{00}^2$			$0.2978 + i0.0750$

$\alpha^{-1} = 1.693\text{fm} \quad \theta = 0^\circ$

分析实验和计算结果, 我们认为:

1. 由表 I 和图 1 可见, ^{18}O 与 ^{16}O 反应截面比值 R 的计算值与实验值完全吻合. 都说明 R 值不大. 这表明由于核子的成对结构及 πN 振幅的 p 波作用, 同位旋非相似态间的跃迁显著增大. 表 II 中两体跃迁矩阵中的非对角元并不比对角元小很多, 也清楚地说明了这点.

2. 对 ^{16}O , 取 y_0 之值很小时, 便能使计算值与实验一致, 故我们认为在 ^{16}O 基态中组态涨落成份不应太大。

3. 实验的角分布^[5]形状与我们计算的吻合, 正如我们预言的在 $\theta = 23^\circ$ 附有一明显的谷^[1]。

4. 令谐振子参数 α^{-1} 之值由 1.693fm 到 1.832fm 之间变化, 截面值改变 20%, 但 R 值几乎不变。

5. 考虑弹散部份是重要的, 因它起了 π 场被核场扭曲的作用, 它使截面减弱 20—40 倍, 但对 R 之值影响很小, 见表 I。

作者对张宗焯, 鲍诚光, 赵维勤同志的许多宝贵意见和讨论表示衷心的感谢。

参 考 文 献

- [1] R. L. Burman et al., *Phys. Rev.*, **C17**(1978), 1774.
- [2] T. Mark et al., *Phys. Rev.*, **38**(1977), 149.
- [3] R. J. Holt et al., *Phys. Lett.*, **69B**(1977), 55.
- [4] P. Perrin et al., *Phys. Lett.*, **63B**(1977), 301.
- [5] S. J. Greene et al., Proc. of the 8th Intern. Conf. on High Energy Phys. and Nucl. Structure, (1979), 1E23.
- [6] 李扬国, 刘宪辉, 马维兴, 中国科学, **18**(1975), 38.
- [7] 张宗焯等, 物理学报, **26**(1977), 54.
- [8] J. M. McKinley, *Rev. Mod. Phys.*, **35**(1963), 788.

π -NUCLEAR DOUBLE CHARGE EXCHANGE REACTION AND NUCLEAR STRUCTURE

LIU XIAN-HUI

(*Institute of High Energy Physics, Academia Sinica*)

WU ZONG-EN HUANG CHAO-HUI

(*Qangsi University*)

LI YANG-GUO

(*Institute of High Energy Physics, Academia Sinica*)

ABSTRACT

Using Glauber's multiple scattering theory, and using coherent fluctuation nuclear model, the double charge exchange (DEC) reaction cross sections for π on ^{16}O and ^{18}O have been calculated. The calculated values of the ratio of $\sigma(^{18}\text{O}(\pi^+, \pi^-)^{18}\text{Ne})_{\text{g.s.}}$ to $\sigma(^{16}\text{O}(\pi^+, \pi^-)^{16}\text{Ne})_{\text{g.s.}}$ fit the experimental data quite well. Just as predicted by our calculation, the angular distribution of $^{18}\text{O}(\pi^+, \pi^-)^{18}\text{Ne}_{\text{g.s.}}$ in a recent experiment, exhibits an evident dip around 23° .

1) 我们进行工作时, 角分布实验只在 $T_* = 187\text{MeV}$. 18° 处测出一个实验点^[4], 在我们完成本工作即将送稿时, 见到在第八次国际高能物理与核结构会议录发表的 $T_* = 164\text{MeV}$ 的角分布新实验数据与我们计算曲线形状十分吻合。