

# 重离子弹性散射中原子核 短程关联效应的研究

卢世琪 王如琳 马维兴  
(中国科学院高能物理研究所)

## 摘 要

本文在刚性炮弹近似下,利用 Glauber 多重散射理论,研究了原子核中短程关联对高能重离子弹性散射的影响。计算了 1.37 GeV 的  $\alpha$ - $^{12}\text{C}$  的弹性散射,并与实验结果进行了比较。结果表明,短程关联对微分截面的影响在较大角度是重要的。

## 一、引 言

原子核中核子-核子间存在着排斥心。核子间由这种非常强的短程排斥性相互作用引起的关联称做原子核的短程关联<sup>[1]</sup>。在原子核壳模型位势中,没有包含这种短程关联的作用。考虑了这种关联,必将对原子核的独立粒子波函数引起一些修正,由此也会影响到重离子碰撞中的各种过程。

近几年来,关于短程关联的研究已经引起了广泛的兴趣。人们试图用它来改进高能电子、质子的弹性散射以及  $(p, 2p)$ 、 $(\pi, N)$ <sup>[2]</sup> 和  $\pi$ -核<sup>[3]</sup> 散射等的理论结果,特别是在分析大动量转移过程的现象时,认为应当考虑到短程关联的作用,有些作者也曾提到用关联效应来改进核-核碰撞中的结果,但是,由于原子核有多个核子,考虑了核子间的关联之后,问题就很复杂,至今尚未见到有这方面的工作。

本文在刚性炮弹近似下,应用 Glauber 多重散射理论,以核子-核子散射为元振幅,讨论了 Jastrow 关联<sup>[4]</sup>对 1.37 GeV 的  $\alpha$ - $^{12}\text{C}$  弹性散射角分布的影响,在推导散射振幅时,我们采用了行列式方法,这样就把所有可能的高次散射项的贡献都考虑了,为讨论短程关联效应提供了可靠的基础

## 二、考虑了短程关联效应的 $\alpha$ - $^{12}\text{C}$ 多重散射振幅

在 Glauber 近似与刚性炮弹近似下,  $\alpha$ - $^{12}\text{C}$  的散射振幅为

$$F(\mathbf{q}) = \frac{i\mathbf{k}}{2\pi} \int d^2b e^{i\mathbf{q}\cdot\mathbf{b}} \left\{ 1 - \left\langle \psi_c^J \left| \prod_{j \in c} \left\langle \phi_\alpha \left| \prod_{k \in \alpha} \left[ 1 - \Gamma(\mathbf{b} - \mathbf{s}_j + \mathbf{s}_k) \right] \cdot \left| \phi_\alpha \right\rangle \right| \psi_c^J \right\rangle \right\}. \quad (1)$$

式中  $\mathbf{q}$  是动量转移,  $\mathbf{k}$  是人射动量,  $\mathbf{s}_j$  是  $^{12}\text{C}$  中第  $j$  个核子的座标  $\mathbf{r}_j$  在垂直于入射方向的平面上的投影,  $\mathbf{s}_k$  是  $\alpha$  粒子中第  $k$  个核子的座标  $\mathbf{r}_k$  在垂直于入射方向的平面上的投影,  $\mathbf{b}$  是碰撞参数,  $\Gamma(\mathbf{b} - \mathbf{s}_j + \mathbf{s}_k)$  是靶核中第  $j$  个核子和炮弹核中第  $k$  个核子之间的两体剖面函数. 我们选取两体基本振幅的形式为

$$f_{\text{NN}}(\mathbf{q}) = \frac{ik_N\sigma}{2\pi} (1 - i\rho) e^{-\frac{1}{2}\beta^2 q^2}, \quad (2)$$

因而

$$\Gamma(\mathbf{b} - \mathbf{s}_j + \mathbf{s}_k) = \frac{(1 - i\rho)\sigma}{4\pi\beta^2} e^{-|\mathbf{b} - \mathbf{s}_j + \mathbf{s}_k|^2/2\beta^2}.$$

其中  $\sigma$  是核子-核子散射总截面,  $\rho$  是向前振幅的虚实比,  $\beta^2$  是斜率,  $k_N$  是核子的动量.

(1) 式中  $\phi_\alpha$  是  $\alpha$  粒子的波函数, 我们取为

$$\phi_\alpha = \prod_{k \in \alpha} \left( \frac{4\nu_0^3}{\sqrt{\pi}} \right)^{1/2} e^{-\nu_0^2 \mathbf{r}_k^2/2} \quad (3)$$

$\nu_0$  是谐振子参数.

$\psi_c^J$  取含有二体关联的 Jastrow 波函数, 即

$$\psi_c^J = \frac{1}{\sqrt{12!}} \begin{vmatrix} \tilde{\varphi}_1(\mathbf{r}_1), \tilde{\varphi}_1(\mathbf{r}_2), \dots, \tilde{\varphi}_1(\mathbf{r}_{12}) \\ \tilde{\varphi}_2(\mathbf{r}_1), \tilde{\varphi}_2(\mathbf{r}_2), \dots, \tilde{\varphi}_2(\mathbf{r}_{12}) \\ \dots \\ \tilde{\varphi}_{12}(\mathbf{r}_1), \tilde{\varphi}_{12}(\mathbf{r}_2), \dots, \tilde{\varphi}_{12}(\mathbf{r}_{12}) \end{vmatrix} \quad (4)$$

式中

$$\begin{aligned} \tilde{\varphi}_{1s} &\doteq C^{1s} \phi_{1s} + C^{2s} \phi_{2s}, \\ \tilde{\varphi}_{1p} &\doteq C^{1p} \phi_{1p} + C^{2p} \phi_{2p}. \end{aligned} \quad (5)$$

经计算  $C^{1s} = 0.9624$ ,  $C^{2s} = 0.2719$ ,  $C^{1p} = 0.9431$ ,  $C^{2p} = 0.3324$ .

可解析求得 (1) 式中之

$$\begin{aligned} &\left\langle \psi_c^J \left| \prod_{j \in c} \left\langle \phi_\alpha \left| \prod_{k \in \alpha} \left[ 1 - \Gamma(\mathbf{b} - \mathbf{s}_j + \mathbf{s}_k) \right] \right| \phi_\alpha \right\rangle \right| \psi_c^J \right\rangle \\ &= \left\{ \tilde{A}(00,00) \left[ \frac{2}{3} \tilde{A}(10,10) + \frac{1}{3} \tilde{A}(11,11) \right] \tilde{A}(1-1,1-1) \right. \\ &\quad - \sqrt{\frac{2}{3}} \tilde{A}(10,00) \sqrt{\frac{2}{3}} \tilde{A}(00,10) \tilde{A}(1-1,1-1) \\ &\quad \left. - \sqrt{\frac{1}{3}} \tilde{A}(1-1,11) \sqrt{\frac{1}{3}} \tilde{A}(11,1-1) \tilde{A}(00,00) \right\}^4, \end{aligned} \quad (6)$$

其中  $\tilde{A}(LM, L'M')$  定义为

$$\tilde{A}(LML'M') = \int [C^{L'} \varphi_{L'M'}^{L'}(\mathbf{r}_j) + C^{2L'} \varphi_{L'M'}^{2L'}(\mathbf{r}_j)]^* \left\langle \phi_\alpha \left| \prod_{k \in \alpha} [1 - \Gamma(\mathbf{b} - \mathbf{s}_j + \mathbf{s}_k)] \right| \phi_\alpha \right\rangle$$

$$- \Gamma(\mathbf{b} - \mathbf{s}_j + \mathbf{s}_k)] |\psi_0\rangle [C^L \varphi_{LM}^L(\mathbf{r}_j) + C^{2L} \varphi_{LM}^{2L}(\mathbf{r}_j)] d\mathbf{r}_j, \quad (7)$$

$C^L, C^{2L}$  等为 Jastrow 波函数的混合系数, 取 (5) 式之值.

$$\begin{aligned} \varphi_{00}^{1L}(\mathbf{r}_j) &= \left(\frac{4v^3}{\sqrt{\pi}}\right)^{1/2} e^{-\frac{1}{2}v^2 r_j^2} Y_{00}, \quad \varphi_{00}^{2L}(\mathbf{r}_j) = \left(\frac{6v^3}{\sqrt{\pi}}\right)^{1/2} \left(1 - \frac{2v^2}{3} r_j^2\right) e^{-\frac{1}{2}v^2 r_j^2} Y_{00}, \\ \varphi_{1M}^{1L}(\mathbf{r}_j) &= \left(\frac{8v^5}{3\sqrt{\pi}}\right)^{1/2} r_j e^{-\frac{1}{2}v^2 r_j^2} Y_{1M}, \\ \varphi_{1M}^{2L}(\mathbf{r}_j) &= \left(\frac{20v^5}{3\sqrt{\pi}}\right)^{1/2} r_j \left(1 - \frac{2v^2}{5} r_j^2\right) e^{-\frac{1}{2}v^2 r_j^2} Y_{1M}. \end{aligned} \quad (8)$$

将 (7) 式 (6) 式代入 (1) 式, 则考虑了  $^{12}\text{C}$  的关联效应的  $\alpha$ - $^{12}\text{C}$  弹性散射振幅为

$$F(\mathbf{q}) = ik \int_0^\infty b db J_0(qb) \{1 - (R_l + iI_m)\}, \quad (9)$$

弹性散射的角分布为

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = |F(\mathbf{q})|^2. \quad (10)$$

### 三、计算结果

(2) 式中的参数取为 345 MeV 入射的自由核子-核子散射的参数<sup>[6]</sup>,

$$\sigma = 2.84 \text{ fm}^2, \quad \rho = 0.26, \quad \beta^2 = 0.045 \text{ fm}^2.$$

$\alpha$  粒子和  $^{12}\text{C}$  的谐振子参数分别取为

$$v_0^2(^4\text{He}) = 0.5541 \text{ fm}^{-2}, \quad v^2(^{12}\text{C}) = 0.401 \text{ fm}^{-2}.$$

计算结果及其与实验的比较如图 1

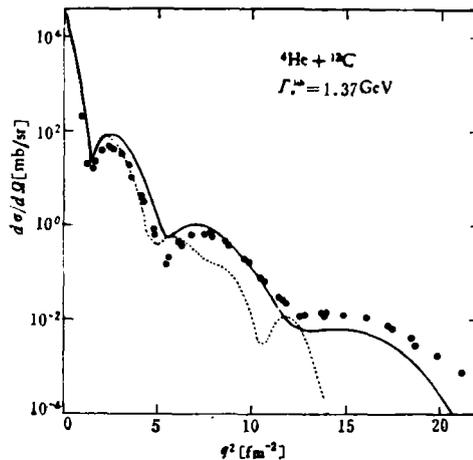


图 1  $\alpha$ - $^{12}\text{C}$  弹性散射角分布, 理论计算与实验比较

— 考虑了  $^{12}\text{C}$  中的关联效应的计算结果; ..... 没考虑关联效应的计算结果<sup>[5]</sup>;  
..... Saclay 的实验数据

## 四、讨 论

计算中, 我们没有引入任何可调参数, 如图所示, 理论曲线的峰谷位置与其绝对值和实验符合都较好。短程关联效应的影响也是重要的。这一结果, 支持了我们在“重离子碰撞中多重散射机制的研究”<sup>[5]</sup>一文中的观点, 即认为高能重离子碰撞可以视为是核子-核子间的多重散射的结果。但在  $q^2 > 14(\text{fm})^{-2}$  处, 理论曲线与实验稍有偏离, 若将  $\alpha$  粒子中的关联效应也考虑进来, 结果可能得到更好的改进。

总之我们在刚性炮弹近似下, 利用 Glauber 多重散射理论, 研究了重离子散射中的短程关联效应。在对实验材料的分析中, 我们没有引用任何可调参数, 同时考虑了所有可能的高次散射项的贡献, 得到了与实验结果满意的符合, 这一方面更强烈地支持了我们在“高能重离子碰撞中多重散射机制的研究”一文中所提出的多重散射机制, 另一方面也清楚地表明在重离子的多重散射中短程关联效应是重要的。

## 参 考 文 献

- [1] R. Guardiola, *Nucl. Phys.*, **A234**(1974), 458.
- [2] W. Kratschmer, *Nucl. Phys.*, **A298**(1978), 477.
- [3] 马维兴、林春灿, 高能物理与核物理, **4**(1980), 302.
- [4] V. Gillet, 5th int. Conf. on High Energy Phys. Nucl. Struct., p. 340.
- [5] 王如琳、马维兴, 高能物理与核物理, **5**(1980).
- [6] T. S. Baner et al., *Phys. Rev.*, **C19**(1979), 1438.

## INVESTIGATION OF THE EFFECT OF NUCLEAR SHORT RANGE CORRELATION IN HEAVY ION SCATTERING

LU SHI-QI WANG RU-LIN MA WEI-XING

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

### ABSTRACT

Based on the “Rigid Projectile” approximation and the Glauber’s multiple scattering theory. The influence of the nuclear short range correlation on elastic scattering of high energy heavy ion is discussed. The elastic  $\alpha$ - $^{12}\text{C}$  scattering at 1.37 GeV is calculated and compared with experimental data. It is show that the influence of the unclear short range correlation on differential cross section is quite important.