

α 的结构对高能 α -核碰撞的影响

孔蕃信 柳继锋

刘 渊

(广西师范大学)

(中国科学院高能物理研究所)

摘 要

在 Glauber 理论上,采用刚性炮弹近似,计算了高能 $\alpha + \alpha$, $\alpha + \text{Ca}^{40}$ 弹性散射微分截面. 讨论了 α 核单粒子密度不同分布对散射的影响. 计算结果表明:炮弹核内的关联对散射的影响和以这种关联核作靶对散射的影响一样重要.

一、前 言

在中、高能核物理中,广泛使用高能炮弹来轰击原子核. 随着能量的增加,和低能时情况大不一样,这时炮弹不但可进入靶核内,而且可穿过靶核,这样炮弹便可从靶核内带出更多的靶核结构的信息. 所以,高能强子-核碰撞成为研究核结构的重要手段之一. 大量的理论分析也都表明:靶核结构对强子-核散射有明显的影响.

高能轻离子-核碰撞,尤其是 α -核碰撞,也是人们广泛研究的课题之一. 这里作为炮弹的已不再是一个简单的强子,而是具有一定结构的原子核,它们间的碰撞是一个很复杂的多体过程,碰撞不仅受到靶核内部结构的影响,还将受到炮弹核内部结构的影响. 对这类问题,过去只是采用了较简单的结构,忽略了炮弹内部细致结构对碰撞的影响. 为此,我们将以 α -核碰撞为例,讨论 α 内部细致结构对于 α -核弹性和非弹性碰撞的影响.

在本文中,我们将先就 α -核的弹性碰撞进行讨论,在 Glauber 理论上,采用刚性炮弹近似 (RPA),讨论 α 的不同密度分布对它和核碰撞的影响. 在第二节中,采用由电子散射所定出的 α 的单粒子密度分布的双高斯形式,给出了主要计算公式. 在第三节中,具体计算了 α - Ca^{40} 和 α - α 弹性散射,除了定性和实验结果一致外,还讨论了这种分布所反映的实质.

二、计算公式

由 Glauber 多重散射理论,质量数分别为 A_P 和 A_T 的两个原子核的弹性散射振幅可写成:^[1]

$$F_{A_P A_T}(q) = \frac{ik}{2\pi} \int d^2b e^{i\mathbf{q} \cdot \mathbf{b}} \langle \varphi_{A_P} \varphi_{A_T} | \Gamma(b, A_P, A_T) | \varphi_{A_P} \varphi_{A_T} \rangle, \quad (1)$$

式中剖面函数:

$$\Gamma(b, A_P, A_T) = 1 - \prod_{k=1}^{A_P} \prod_{j=1}^{A_T} [1 - \gamma_{jk}(\mathbf{b} + \mathbf{S}_k - \mathbf{S}_j)]. \quad (2)$$

\mathbf{q} ——传递动量; \mathbf{k} ——质心系中入射动量; φ_{A_P} 、 φ_{A_T} 分别为炮弹和靶核基态波函数; \mathbf{S}_k 、 \mathbf{S}_j ——核子坐标在碰撞参数平面上的投影.

$$\gamma_{jk}(\mathbf{b} - \mathbf{S}_k + \mathbf{S}_j) = \frac{1}{2\pi i k} \int d^2 q e^{-i\mathbf{q} \cdot (\mathbf{b} - \mathbf{S}_k + \mathbf{S}_j)} f(q). \quad (3)$$

在忽略核子-核子间自旋和同位旋相互作用时,核子-核子散射振幅可写成:

$$f(q) = \frac{k\sigma}{4\pi} (i + \rho) e^{-\frac{1}{2}\beta q^2}. \quad (4)$$

σ ——核子-核子碰撞总截面; ρ ——朝前散射振幅的实、虚比; β ——斜率参数.

通常在研究核-核碰撞时,假定炮弹核在碰撞过程中始终处在基态. 由 Glauber 理论,可构成炮弹核和靶核子间的散射振幅 $P_j(q)$, 以 $P_j(q)$ 作为出发点,再来构成核-核散射振幅. 这样 $F_{A_P A_T}(q)$ 可写成:

$$F_{A_P A_T}(q) = \frac{i k}{2\pi} \int d^2 b e^{i\mathbf{q} \cdot \mathbf{b}} [1 - S_{0,0}(b)], \quad (5)$$

而

$$S_{0,0}(b) = \left\langle \varphi_{A_T} \left| \prod_{j=1}^{A_T} [1 - G_j(b - S_j)] \right| \varphi_{A_T} \right\rangle. \quad (6)$$

其中

$$G_j(b - S_j) = \frac{1}{2\pi i k} \int d^2 q e^{-i\mathbf{q} \cdot (\mathbf{b} - \mathbf{S}_j)} P_j(q), \quad (7)$$

$$P_j(q) = \frac{i k}{2\pi} \int d^2 b e^{i\mathbf{q} \cdot \mathbf{b}} \left\langle \varphi_{A_P} \left| 1 - \prod_{k=1}^{A_P} [1 - \gamma_{jk}(\mathbf{b} + \mathbf{S}_k)] \right| \varphi_{A_P} \right\rangle. \quad (8)$$

(5)–(8)式就是在刚性炮弹近似下,核-核弹性散射的一般表示式. 当 A_T 很大时,这时(6)式可以近似表示成

$$S_{0,0}(b) \simeq e^{-A_T \chi(b)} \\ \chi(b) = \int d^2 q S(q) P_j(q) e^{-i\mathbf{q} \cdot \mathbf{b}}. \quad (9)$$

$S(q)$ ——靶核子的形状因子,以(8)式代入(5)式就是光学极限的结果^[2].

当我们取电子散射所定出的 α 单粒子密度 $\rho(r)$ (关于这种分布的物理意义讨论见^[3]).

$$\rho(r) = \frac{\alpha_1^3 \alpha_2^3}{(\pi)^{3/2} (\alpha_2^3 - C \alpha_1^3)} (e^{-\alpha_1^2 r^2} - C e^{-\alpha_2^2 r^2}). \quad (10)$$

用(4)、(8)、(10)式可求出 $P_j(q)$.

$$P_j(q) = \frac{i k}{2} \sum_{n=0}^{\infty} F_{mn} e^{-1/2 m n q^2}. \quad (11)$$

$$F_{mn} = 96(-1)^{m+n+1} \frac{D^n}{m!(4-n)!(n-m)!} f_{mn} \left(\frac{\alpha_2}{\alpha_1} \lambda_1^2 \right)^{n-m} \left(\frac{C\alpha_1}{\alpha_2} \lambda_2^2 \right)^m$$

$$f_{mn} = \frac{1}{4[(n-m)\lambda_1^2 + m\lambda_2^2]}$$

$$D = \frac{\alpha_1^2 \alpha_2^2}{2\pi(\alpha_2^3 - C\alpha_1^3)} \sigma(1 - i\rho) \quad (12)$$

$$\lambda_1^2 = \frac{\alpha_1^2}{1 + 2\alpha_1^2 \beta^2}$$

$$\lambda_2^2 = \frac{\alpha_2^2}{1 + 2\alpha_2^2 \beta^2}$$

式(11)就是以双高斯密度作为 α 的单粒子密度所给出的 α -N 弹性散射振幅. 当 $C = 0$ 时, (11)式就变成以谐振子密度所给出的散射振幅. 如^[3]所讨论, C 表示了关联. 当 $C = 0$, 意即不考虑核内关联, $C \neq 0$, 即考虑了核内关联. 以(11)式代入(5)或(9)式, 便可讨论炮弹 α 内部细致结构对 α -核弹性散射的影响. 而微分截面为

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = |F_{A_P A_T}(q)|^2. \quad (13)$$

三、计算结果和讨论

为了更好地讨论炮弹 α 内部细致结构对弹性散射的影响, 分别对 $2.55\text{GeV } \alpha + \alpha$ 和

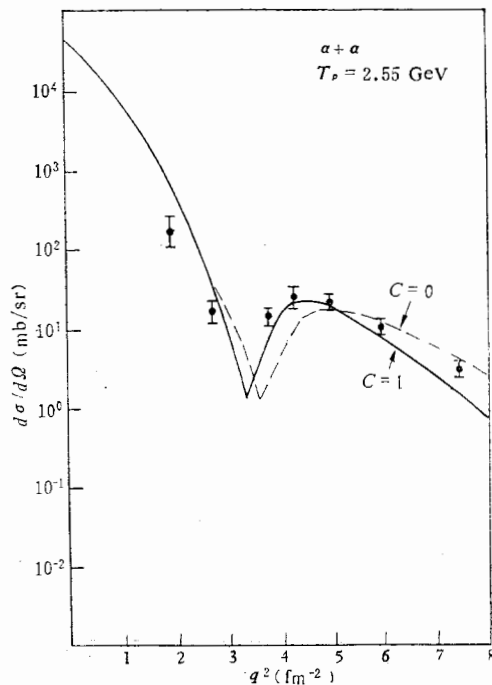


图 1 $\alpha + \alpha$ 弹性散射微分截面的角分布

1.37GeV $\alpha + \text{Ca}^{40}$ 的弹性散射进行了计算,分别进行了讨论.

i) 2.55GeV $\alpha + \alpha$ 弹性散射

和^[4]中类似,在计入关联后, $\alpha + \alpha$ 弹性散射振幅可完全解析地表示出来.但由于表示式太长,这里我们就不再给出,只给出计算结果.具体计算时, $\sigma = 3.7\text{mb}$; $\beta = 0.346$; $\rho = -0.1$; $\alpha_1^2 = 0.72\text{fm}^{-2}$; $\alpha_2^2 = 3.7\text{fm}^{-2}$; $C = 1$.

计算结果如图(1)所示.图(1)中实线表示 $C = 1$ 的计算结果,虚线表示 $C = 0$ 的计算结果,由于我们侧重于讨论炮弹内部结构对散射的影响,没有作定量的调节,所以不论 $C = 0$ 或 $C = 1$ 它们和实验结果(取自^[5])都定性相符.其次当 $C = 1$ 时,所得结果和 $C = 0$ 的相比,更加集中于小角度范围内.在所使用的近似方法下,计算还表明,当只考虑炮弹中关联对散射的影响和只考虑靶中关联的影响相同.

ii) 2.55GeV $\alpha + \text{Ca}^{40}$ 的弹性散射微分截面.

这时由于靶核子较多.为简化计算,我们采用 RPA 下的光学极限近似.根据^[6], Ca^{40} 的单核子形状因子为

$$S(q) = \left(1 - \frac{q^2}{q_A^2}\right) \left(1 - \frac{q^2}{q_B^2}\right) e^{-\delta^2 q^2} (e^{-\delta^2 q^2}) \quad (14)$$

将(14)式代入(9)式可得:

$$\chi(b) = 10 \sum_{n=1}^4 \sum_{m=0}^n F_{mn} \frac{1}{P_{mn}} e^{-\frac{b^2}{4P_{mn}}} \left\{ 1 - \frac{q_B^2 + q_A^2}{q_A^2 q_B^2} \cdot \frac{1}{2P_{mn}} \left(2 - \frac{b^2}{2P_{mn}} \right) + \frac{1}{q_A^2 q_B^2} \cdot \frac{1}{8P_{mn}^2} \left(16 - \frac{8b^2}{P_{mn}} + \frac{b^4}{2P_{mn}^2} \right) \right\}. \quad (15)$$

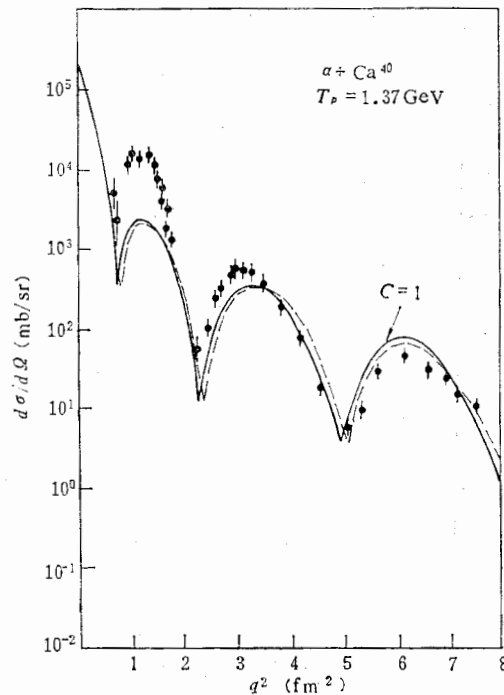


图2 $\alpha + \text{Ca}^{40}$ 弹性散射微分截面的角分布

其中

$$P_{mn} = f_{mn} + \delta^2$$

以(15)式作为 $S_{0,0}(b)$ 代入(5)式,便可求得弹性散射振幅。

具体计算时所使用参数为: $q_A^2 = 1.4 \text{ fm}^{-2}$; $q_B^2 = 4.16 \text{ fm}^{-2}$; $\delta^2 = 1.07 \text{ fm}^2$; $\sigma = 28 \text{ mb}$; $\rho = -0.35$; $\beta = 0.46 \text{ fm}^2$ 。其它参数 α_1 、 α_2 和 C 均同上。计算结果如图(2)所示,实线为 $C = 1$ 的计算结果,虚线为 $C = 0$ 的计算结果。它们均定性和实验一致(实验结果取自^[7])。和 $\alpha + \alpha$ 情况类似, $C = 1$ 时结果比 $C = 0$ 的结果更集中于小角度,由于没有计入靶的关联而两者的差异不如 $\alpha + \alpha$ 的大。

总之, $\alpha + \alpha$ 和 $\alpha + \text{Ca}^{40}$ 的结果都表明: 由于炮弹中 $C \approx 0$, 改变了炮弹核中心区域核子分布密度, 使中心区核物质变稀。这样散射也就更加集中在小角度内。也就是说, 在刚性炮弹近似下, 炮弹核中关联效应对散射的影响和以这种核作靶时对散射的影响的重要性一样。

参 考 文 献

- [1] R. J. Glauber, *Lectures in theor. Phys.*, Vol. 1(1959), 315.
- [2] W. Czyż and L. C. Maximon, *Ann. of Phys.*, 52(69), 59.
- [3] C. Wilkin et al., *Phys. Rev.*, 174(68), 1179.
- [4] 李扬国等人, 原子核物理, 3(81)213.
- [5] Berger et al., *Nucl. Phys.*, 294(78), 465.
- [6] Germond and Wilin, *Nucl. Phys.*, A249(75), 457.
- [7] G. D. Alkhazov et al., *Nucl.*, A280(77), 365.

INFLUENCE OF NUCLEAR STRUCTURE OF He^4 ON He^4 - NUCLEUS COLLISIONS AT HIGH ENERGIES

KONG FAN-XIN LIU JI-FENG
(Guangxi Teachers Training University)

LIU YUAN
(Institute of High Energy Physics, Academia Sinica)

ABSTRACT

Adopting rigid projectile approximation, the elastic scattering differential cross section for $\alpha + \alpha$ and $\alpha + \text{Ca}^{40}$ at high energies are calculated on the basis of Glauber's theory. The influence of different single particle density of He^4 on elastic scattering is discussed. The calculated results show that the correlation in projectile is of the same importance as that in target.