

用 α 粒子模型描写 800MeV 的 $p-^{40}\text{Ca}$ 散射

阮文英

(华南理工大学应用物理系 广州 510640)

解文芳

(广东工学院物理系 广州 510090)

1993-12-24 收稿

摘 要

在 α 粒子模型下用 Glauber 理论计算了 800MeV 的 $p-^{40}\text{Ca}$ 散射微分截面,分析本领和自旋旋转参数,结果与实验较好地符合,文中还分析了 $p-\alpha$ 振幅中相因子的影响。

关键词 α 粒子模型, Glauber 理论,相因子。

使用核的 α 粒子模型描写高能质子与核的弹性散射已经做了一些理论分析^[1,2]。计算中所用的 $p-\alpha$ 元振幅采用唯象的参数化式拟合 $p-^4\text{He}$ 实验数据获得。由于缺乏 $p-^4\text{He}$ 散射自旋旋转参数 Q 的实验数据,由拟合所得的 $p-\alpha$ 振幅不可避免地存在不确定性。最近实验上测得了 800MeV 的 $p-^4\text{He}$ 弹性散射的 Q 数据^[3]。这些实验数据与已有的微分截面 $\frac{d\sigma}{dQ}$ 和分析本领 A , 数据一道构成一组完备的可观测量^[4], 可以很好地确定 $p-\alpha$ 振幅(其中的相因子除外)。此外一些具有明显 α 粒子结团结构的轻偶偶核与质子散射的 $\frac{d\sigma}{dQ}$, A , 和 Q 也都已精确地测量。因而可以构成对 α 粒子模型的严格检验。

我们曾用下列 $p-\alpha$ 振幅的参数化式

$$f_{pa}(q) = f_1(0)(1 - q^2/t_1)(1 - q^2/t_2)e^{-R_1^2 q^2/2} + f_2(0)(1 - q^2/t_3)(1 - q^2/t_4)qe^{-R_2^2 q^2/2}(A \cdot \sigma) \quad (1)$$

拟合 200MeV 附近 $p-^4\text{He}$ 散射的 $\frac{d\sigma}{dQ}$ 和 A ,^[5]。其中 t_i 为复参数, R_i^2 为实参数, $f_i(0)$ 是相应项的朝前振幅。(1)式与文献[5,6]分析 π -核散射中所用的 $\pi-\alpha$ 振幅参数化式相似。从拟合工作及随后的理论计算中知道,对于能量在 500MeV 以下的散射(1)式还是比较合适的。但从最近 800MeV 的 $p-^4\text{He}$ 散射实验数据看来,具有锯齿形的 Q 是(1)式不能给出的。因此需另外一种参数化式。

注意到最近 Bereshnoy 等人提出另外一种 $p-^4\text{He}$ 振幅的参数化式^[7],其中的自旋无关项和自旋打翻项均为双高斯,即

$$f_{pa}(q) = f_1(q) + f_2(q)\sigma \cdot \hat{n}, \quad (2)$$

其中

$$\begin{aligned} f_1(q) &= k[G_1 e^{-\beta_1 q^2} + G_2 e^{-\beta_2 q^2}], \\ f_2(q) &= k[G_3 e^{-\beta_3 q^2} + G_4 e^{-\beta_4 q^2}]q. \end{aligned} \quad (3)$$

上式中各参数不是独立的, 而是满足下列关系

$$\begin{aligned} G_2 &= \frac{3iG_1^2}{32\beta_1}, & G_4 &= \frac{3iG_1G_3\beta_1}{8(\beta_1 + \beta_3)^2}, \\ \beta_2 &= \frac{1}{2}\beta_1, & \beta_4 &= \frac{\beta_1\beta_3}{\beta_1 + \beta_3}. \end{aligned} \quad (4)$$

这样做的目的是使(2)式与从 NN 振幅导出的 $p\text{-}\alpha$ 振幅相一致^[7]. 事实表明, (2)式较之(1)式更能反映最近的实验数据. 因此在本文的计算中将使用(2)式而不是(1)式. 拟合实验的参数列于表 1^[7]. 拟合曲线与实验的比较在图 1 中给出, 两者在动量转移 $|t| \leq$

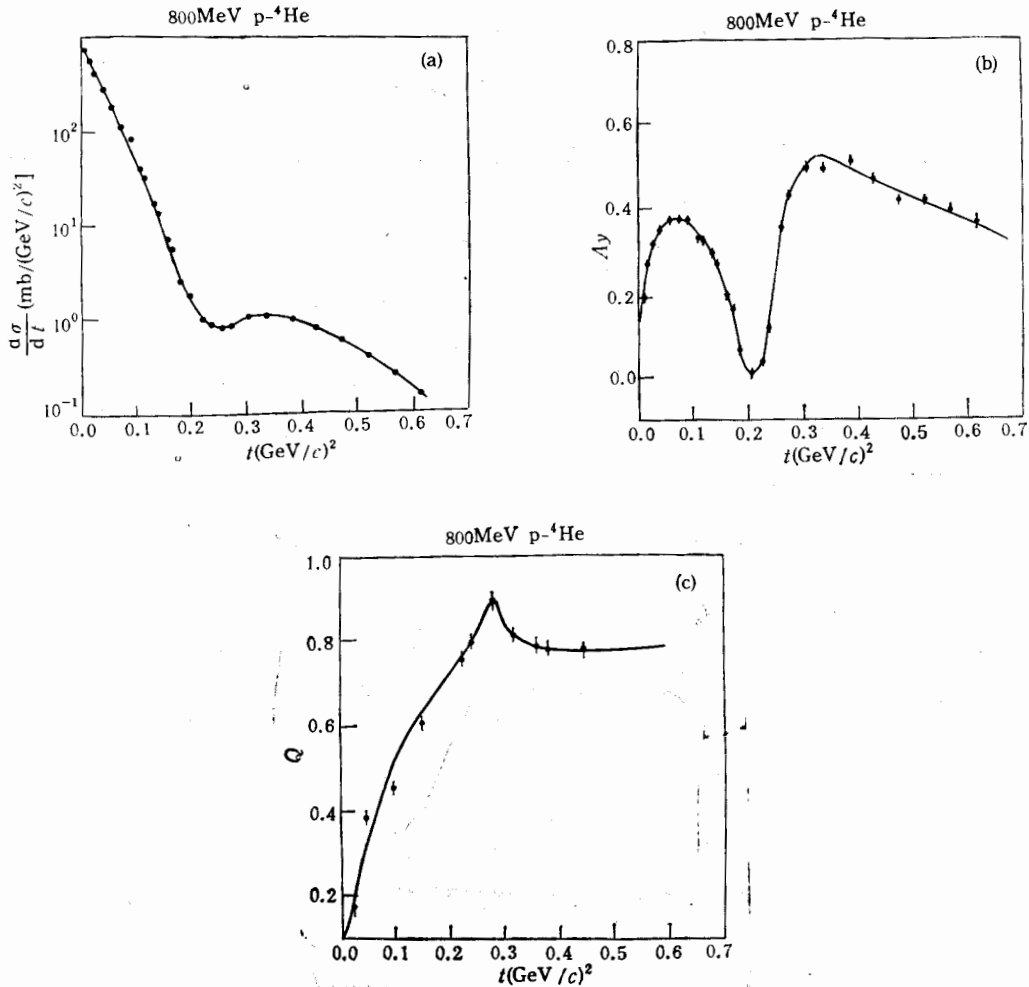


图 1 800MeV 的 $p\text{-}^4\text{He}$ 弹性散射实验数据与拟合曲线的比较
(a) 微分截面; (b) 分析本领; (c) 自旋旋转参数. 实验数据取自文献[3].

$0.7(\text{GeV}/c)^2$ 内是相符的。

表1 800MeV 的 $p-\alpha$ 振幅的参数值

$\text{Re}\beta_1$	$\text{Im}\beta_1$	$\text{Re}\beta_3$	$\text{Im}\beta_3$	$\text{Re}G_1$	$\text{Im}G_1$	$\text{Re}G_3$	$\text{Im}G_3$
0.424	-0.025	0.490	0.052	-0.330	1.258	0.177	0.295

(G_1, β_1, β_3 单位为 fm^2 , G_3 单位为 fm^3)

在独立 α 粒子模型中基态波函数可表示为单粒子波函数的乘积。基态 ^{40}Ca 中 α 粒子分布的形状因子取自文献[8], 表示为

$$S_\alpha(q) = (1 - q^2/q_a^2)(1 - q^2/q_b^2)\{1 + \alpha[1 - \cos(\gamma^2 q^2)]\} \cdot \exp(-\delta^2 q^2), \quad (5)$$

其中

$$\begin{aligned} q_a^2 &= 1.400\text{fm}^{-2}, \quad q_b^2 = 4.163\text{fm}^{-2}, \\ \alpha &= 0.225, \quad \gamma^2 = 0.616, \\ \delta^2 &= \frac{R^2}{4} \left(1 - \frac{1}{N}\right), \quad N = 10, \quad R = 1.671\text{fm}. \end{aligned}$$

本文以 Glauber 理论作为框架, 以(2)式和(5)式作为基本输入量, 由此可以解析地导出 $p-^{40}\text{Ca}$ 弹性散射的振幅, 它包含自旋无关和自旋打翻两项^[2]

$$F(q) = G(q) + H(q)\sigma \cdot \hat{n}. \quad (6)$$

实验上可观测的微分截面 $\frac{d\sigma}{dQ}$ 、分析本领 A_y 和自旋旋转参数 Q 分别定义为

$$\begin{aligned} \frac{d\sigma}{dQ} &= |G(q)|^2 + |H(q)|^2, \\ A_y &= \frac{2\text{Re}[G(q) \cdot H(q)^*]}{|G(q)|^2 + |H(q)|^2}, \quad Q = \frac{2\text{Im}[G(q) \cdot H(q)^*]}{|G(q)|^2 + |H(q)|^2}. \end{aligned} \quad (7)$$

图2中的实线给出本文关于 $\frac{d\sigma}{dQ}$, A_y 和 Q 的理论计算结果。它们在定性上都与实验符合得相当不错。对于 800MeV 这一能量, 基于通常的核子模型的理论计算仍不尽人意, 不论是相对论性的还是非相对论性的^[9]。原因可能是多方面的。众所周知, NN 振幅中包含五个具有不同自旋结构的独立项。确定这些项需对 $p-p$ 和 $p-n$ 散射做九个独立的实验测量。这在目前仍难以办到。因此从实验上确定 NN 振幅要比确定 $p-\alpha$ 振幅困难得多, 因为 ^4He 核本身的自旋和同位旋均为零。此外在理论计算中要把 NN 振幅的五项全都包括进去也不是一件容易的事情^[10]。

为便于比较, 图2中还给出了文献[9]基于 KMT 光学位和相对论脉冲近似光学位的计算结果。在 KMT 光学位的计算中包含了二阶项的贡献, 即泡利关联、短程的动力学关联以及入射质子磁矩与靶核库仑场间的旋-轨相互作用。在我们的框架中这些效应已经部分地包含在 $p-\alpha$ 元振幅中。从整体上看, KMT 光学位对自旋观测量的计算峰谷位置正确但幅值偏小。相对论光学位对 ^{40}Ca 的计算结果是好的, 但对其他核就不尽人意了^[9]。

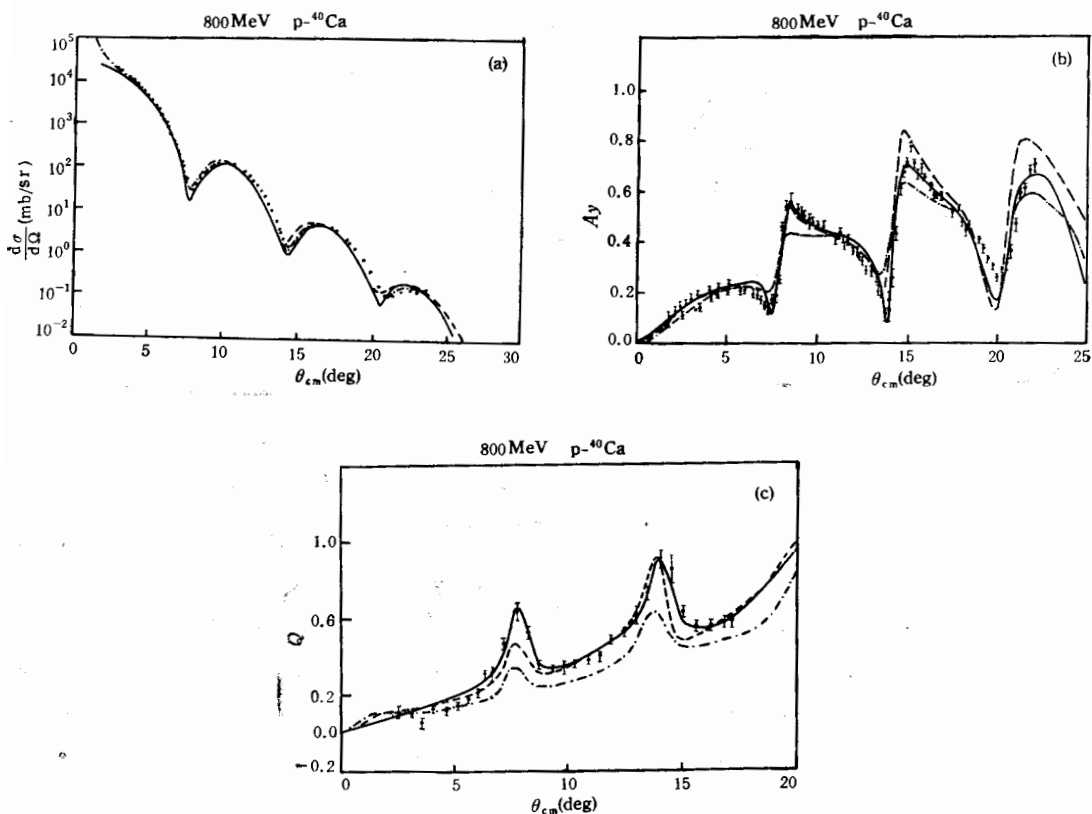


图 2 800MeV 的 $p-^{40}\text{Ca}$ 弹性散射理论计算与实验的比较

实线是本文的结果;折线是相对论光学位计算结果;折点线是 KMT 光学位计算结果. 取自文献[9].

除 ^{40}Ca 核外我们还计算了 800MeV 的质子与 ^{12}C 和 ^{16}O 的弹性散射. 结果与 ^{40}Ca 一样,都和实验符合得较好. 限于篇幅这里不再罗列出关于这两个核的计算结果.

$p-\alpha$ 振幅中的复相位因子无法在 $p-^4\text{He}$ 散射实验中加入以确定,但会在多重散射(干涉)中显示其存在. 为了探究计算结果对复相因子的敏感程度,在(2)式右边乘以相因子 $e^{i\gamma q^2}$, 其中 γ 为可调实参数. 选择这样的相因子只是为了便于计算,并不意味着从物理上考虑定会有这样的相因子出现. 计算中发现三个量中 Q 对 γ 的变化最为敏感,因此以下将着重讨论 Q .

Q 的变化以峰值处尤为明显. 计算的结果是这样的:(1) 当 γ 从 0.0 朝正方向增加时,图 2(c) 中的峰开始略有升高, $\gamma \geq 0.26\text{fm}^2$ 之后开始回落,在 $\gamma > 1.00\text{fm}^2$ 以后整根曲线几乎演变成一根直线了,但仍大致保留原先 $\gamma = 0.0$ 时的趋势;(2) 当 γ 从 0.0 朝负方向增加时峰逐渐变成谷,在 $\gamma \leq -0.24\text{fm}^2$ 之后谷开始变浅,整根曲线逐渐趋于平滑. 图 3 给出了 γ 分别取 0.5, 0.0, -0.5fm^2 时 Q 随散射角的变化曲线来说明这些现象.

对于 $\frac{d\sigma}{d\Omega}$ 和 A_y 而言,只要 $|\gamma|$ 比较大曲线就会趋于光滑,对 γ 正负号的改变不敏感.

事实上若将 f_{pa} 换成复共轭 f_{pa}^* 则 $\frac{d\sigma}{d\Omega}$ 和 A_y 的计算结果不变,但 Q 改变正负号.

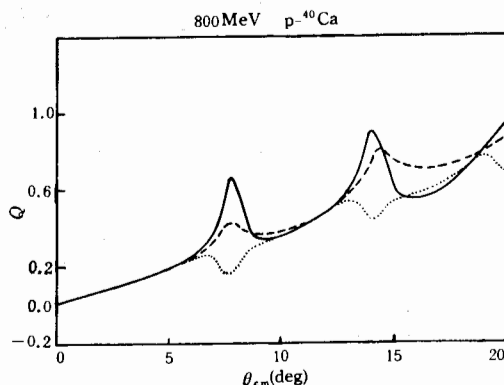


图3 800MeV 的 $p\text{-}^{40}\text{Ca}$ 弹性散射自旋旋转参数计算结果随 r 的变化
实线对应于 $r = 0.0\text{fm}^2$; 折线对应于 $r = 0.5\text{fm}^2$; 点线对应于 $r = -0.5\text{fm}^2$.

总之,轻偶偶核的 α 粒子模型可以很方便地用于描写高能质子与核的弹性散射。但计算结果与 $p\text{-}\alpha$ 振幅中相位因子的关系较为敏感。目前实验上还无法直接将相位因子测出,因此在唯象的 $p\text{-}\alpha$ 振幅中选取适当的相位因子是成功的关键。一般而言,可以存在好几种参数化形式都能拟合 $p\text{-}^4\text{He}$ 散射实验数据。选择不同的参数化形式意味着选择不同的相位。如果 $p\text{-}\alpha$ 振幅不是直接用参数化式拟合实验产生,而是用唯象光学位(相对论的或非相对论的)拟合实验产生的,则其中的相因子将取决于光学位的几何形状。如果对基于 α 粒子模型的理论分析有足够的信心并认为 $p\text{-}\alpha$ 振幅中的相位因子能够在多重散射中加以确定。则本文的方法将有助于澄清唯象光学位不确定性的问题。

参 考 文 献

- [1] Tan Zhenqiang, Ruan Wenying, *Nucl. Phys.*, **A514**(1990) 295.
- [2] Ruan Wenying, Duan Yiwu, *Commun. Theor. Phys.*, **18**(1992) 479.
- [3] C. A. Whitten, private communication.
- [4] G. A. Moss et al., *Phys. Rev.*, **C21**(1980) 1932.
- [5] F. Binon et al., *Nucl. Phys.*, **A298**(1978) 499.
- [6] Li Qing-run, *Nucl. Phys.*, **A415**(1984) 445.
- [7] Y. A. Bereshnoy et al., *J. Phys.*, **G18**(1992) 85.
- [8] J. F. Germond, C. Wilkin, *Nucl. Phys.*, **A249**(1975) 457.
- [9] R. W. Ferguson et al., *Phys. Rev.*, **C33**(1986) 317.
- [10] J. P. Auger et al., *J. Phys.*, **G12**(1986) 317.

Description of $p\text{-}^{40}\text{Ca}$ Scattering at 800 MeV Using the α -Particle Model

Ruan Wenying

(Department of Applied Physics, South China University of Technology, Guangzhou 510640)

Xie Wenfang

(Department of Physics, Guangdong Institute of Technology, Guangzhou 510900)

Received 24 December 1993

Abstract

In this paper the Glauber theory is used to calculate the differential cross section, analysing power and spin rotation parameter of $p\text{-}^{40}\text{Ca}$ scattering at 800MeV on the basis of the α -particle model. Reasonably good agreement the experimental data is obtained with. The effect of the $p\text{-}\alpha$ phase is also analysed.

Key words α -particle model, Glauber theory, phase factor.