

碳重离子散射研究*

李清润

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

杨永桐

(广西师范大学物理系 桂林 541001)

1993年3月25日收到

摘 要

建立起一个 α 折迭模型,在一个较宽的能量区域内对两个 ^{12}C 重离子间的弹性散射进行了研究。结果表明,模型能非常好地描述实验数据。

关键词 核集团结构,重离子散射,折迭模型。

重离子研究是原子核物理中的一个十分重要的领域。重离子散射是重离子反应中的最基本的过程,因此已经有了相当数量的实验测量数据的积累。这些丰富的实验数据为核结构和核反应的研究提供了新的机会和手段。在轻重离子系统中, $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$ 散射具有特殊兴趣,它的弹性角分布的测量是最为系统和完备的^[1]。这些实验可以为研究 ^{12}C 的核结构问题提供新的判据。

原子核 ^{12}C 是一个具有特殊兴趣的核。从传统的壳层模型观点,它是12个核子填充在 $1s$ 壳所构成。而从集团结构的观点, ^{12}C 是由3个 α 粒子所构成,这些在核内的 α 粒子基本上保持着自由 α 粒子的特性。

本文的目的是,利用两个 ^{12}C 原子核间的弹性散射作为手段,对 ^{12}C 核的 3α 结构观点进行一次检验。

从 α 粒子结构观点看,两个 ^{12}C 原子核间的散射可以看成是两个 3α 体系之间的散射问题。在描述重离子散射方面,目前最常被使用的是折迭模型。在这一模型框架下,可以由 α 粒子在 ^{12}C 核内的密度分布和 α - α 相互作用构造成入射 ^{12}C 核和靶 ^{12}C 核间的折迭势。这一模型和通常的折迭模型的基本不同点是,前者是把 α 粒子当作“基本粒子”处理,而后者的“基本粒子”则是核子。

根据折迭模型,基于 ^{12}C 的 α 粒子结构观点建立的双折迭势为

$$V(r) = \iint d\mathbf{r}_1 d\mathbf{r}_2 \rho_\alpha(\mathbf{r}_1) \rho_\alpha(\mathbf{r}_2) v_{\alpha\alpha}(\mathbf{r} + \mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2), \quad (1)$$

其中 ρ_α 是 ^{12}C 核内的 α 粒子密度分布, $v_{\alpha\alpha}$ 是入射核中的一个 α 粒子与靶核内的一个 α

* 国家自然科学基金和中国科学院 LWTZ-1298 经费资助。

粒子间的相互作用。

我们曾经提出一个 ^{12}C 的 3α 结构模型^[2]。根据这个模型, ^{12}C 原子核的基态波函数可以表示为

$$\Psi(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \mathbf{r}_3) = \Phi_\alpha(\mathbf{r}_1)\Phi_\alpha(\mathbf{r}_2)\Phi_\alpha(\mathbf{r}_3), \quad (2)$$

其中 \mathbf{r}_i 代表第 i 个 α 粒子的坐标, 函数 Φ_α 具有非常简单的表示式:

$$\Phi_\alpha(\mathbf{r}) = \frac{1}{\sqrt{2}} [O_{1r}(r) - O_{2r}(r)] Y_{00}(\theta, \varphi), \quad (3)$$

其中, $O_{1r}(r)$ 和 $O_{2r}(r)$ 是量子数分别为 $1s$ 和 $2s$ 的谐振子径向波函数, 而 $Y_{lm}(\theta, \varphi)$ 是球谐函数。

上面这一 ^{12}C 的 α 粒子结构模型曾经被电子散射^[2]、 π 介子散射^[3]和质子散射^[4]进行过成功的检验。现在我们将在重离子散射这一重要领域里对这一模型进行一次新的检验。

对于折迭势中的 α - α 相互作用, 采用 Buck 等人给出的位势^[5]

$$v_{\alpha\alpha}(r) = -122.6225 \exp(-0.22r^2). \quad (4)$$

上式给出在 MeV 能量单位。Buck 等人的上列位势能很好地给出质心能量在 0—20MeV 间, 近似地在 20—40MeV 间的 α - α 散射相移。

根据标准的折迭模型框架, 由(1)式给出的折迭势构成实部, 再加上一个 Woods-Saxon 形状的虚部和相应的库仑势, 得到下面的一个描述 $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$ 散射过程的光学势:

$$U(r) = NV(r) - iW_0/[1 + \exp(r - R_i)/a_i] + V_c, \quad (5)$$

其中 N 是重整化因子, V_c 是库仑作用势。

折迭模型的通常做法是, 把 N 和虚位势中的 W_0, R_i, a_i 一共四个量作为可调参量, 使用一个最小二乘法程序, 对角分布进行拟合, 以找出最佳的 N, W_0, R_i 和 a_i 的数值。对于不同的能量, 这些值会有所不同。因为我们的目的是检验 α

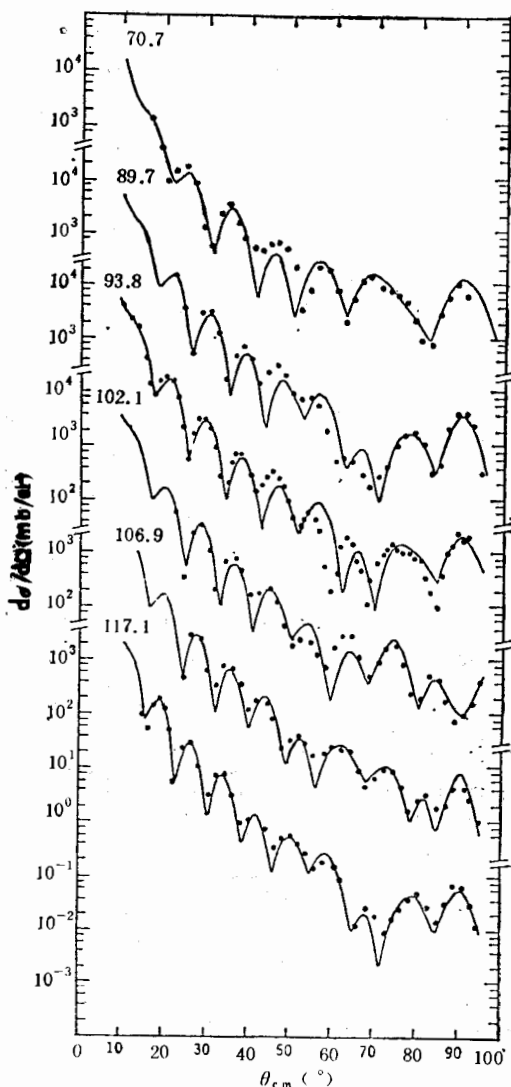


图1 $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$ 弹性散射微分截面
曲线旁的数字代表入射能量(单位 MeV)。曲线是本文 α 折迭模型结果。实验点取自[1]

表1 α 折迭势参数

$E(\text{MeV})$	70.7	89.7	93.8	102.1	106.9	117.1
N	0.86	0.95	0.97	0.97	0.94	0.92
$W_0(\text{MeV})$	8.5	13.0	13.5	14.5	15.0	16.0

模型的预言能力,而不是去追求获得最佳拟合,所以在本文中采取如下的做法:(i)减少可调参数的数目,把 R_i 和 a_i 的值固定,只允许 N 和 W_0 可以调节。这样,减少了理论框架中的自由度,从而提高了对模型检验的严厉性。(ii)不使用最小二乘法程序达到最佳拟合,而根据目视的评估选定“最佳”拟合。这可大大节省计算机时间。

根据前人的结果^[1],取定 $R_i = 1.22(A_1^{1/3} + A_2^{1/3})\text{fm}$, $a_i = 0.54\text{fm}$ 。约化库仑半径取为 1.3fm 。使用公式(1)–(5),计算了70–120MeV间6种能量下的 $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$ 弹性散射的角分布,并与实验结果^[1]一起给在图1中。对应的参数 N 和 W_0 的值列在表1中。

从图1中看到,本文的 α 折迭模型能够给出对实验结果非常好的描述。假如采取通常折迭模型的做法,允许参数 R_i 和 a_i 可以调节并使用最小二乘法找寻最佳拟合,可以预期将会得到更好的与实验的符合。但是本文的目的是检验 α 模型,而不是寻求最佳拟合,就达到这一目的而言,图1中所显示的结果已经足够好了。

重整化因子 N 是一个反映折迭模型是否成功的重要量。 $|N - 1|$ 的值越小,标志着模型越成功。一般的折迭模型是建立在原子核的核子结构基础上的。是以核子在核内的密度去折迭某种有效核子-核子相互作用而构成。Brandan 等人曾使用当前最流行的DDM3Y有效核子-核子相互作用,建立一个描述 $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$ 的折迭模型^[6]。他们采用标准的折迭模型做法,即使用四个可调参数的最小二乘法拟合,得到的结果是,其 $|N - 1|$ 的值大约在15–20%之间变化。本文的 α 折迭模型给出的值约为5–10%。这一结果表明, α 模型所导出的实部位势比核子结构模型导出的势更加接近真实位势。

本文中使用 α 折迭模型分析了橡树岭实验室给出的这组实验数据,这组实验数据是最完备的。比这组实验更高的能区,例如200MeV以上也有 $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$ 角分布的实验测量,但覆盖的角区要小多了。由于我们的折迭势使用了(4)式的Buck势,这个势的能量适用范围是有限制的,所以200MeV以上的 $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$ 实验数据,已不适宜使用本文所得到的折迭势来进行分析了。

结论:本文基于 ^{12}C 原子核的 3α 结构模型,建立起一个折迭势来描述 $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$ 散射过程。理论结果在一个较宽能量范围内与实验数据很好地符合。与基于核子组成模型所得到的折迭势比较,本文的 α 折迭势更接近真实位势。 ^{12}C 原子核的 α 结构观点,继在电子散射、 π 介子散射和质子散射中得到成功的检验之后,现在又在重离子散射中再一次获得一个有力的支持。

参 考 文 献

- [1] R. M. Wieland, R. G. Stokstad, G.R. Satchler and L. D. Rickertsen, *Phys. Rev. Lett.*, **37** (1976) 1458.
- [2] Li Qingrun, Chen Shengzhong and Zhao Enguang, *High Energy Phys. Nucl. Phys.*, **5** (1981) 531.
- [3] Li Qingrun, *Nucl. Phys.*, **A415** (1984) 445.
- [4] Li Qingrun and Zhou Jinli, *J. Phys.*, **G17** (1991) 663.
- [5] B. Buck, H. Friedrich and C. Wuehler, *Nucl. Phys.*, **A275** (1977) 246.
- [6] M. E. Brandan, M. Rodriguez-Villafuerte and A. Ayala, *Phys. Rev.*, **C41** (1990) 1520.

A Study of Carbon Heavy Ion Scattering

Li Qingrun

(*Institute of High Energy Physics, Academia Sinica, Beijing 100039*)

Yang Yongxu

(*Department of Physics, Guangxi Normal University, Guilin 541001*)

Received on March 25, 1993

Abstract

By using the folding model, the elastic scattering between two carbon heavy ions is studied in a wider energy range. The results show that the model gives a very good description of the experimental data.

Key words nuclear cluster structure, heavy ion scattering, folding model.