

α 粒子散射对 ^{16}O 集团结构的检验*

李清润

杨永栩

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039) (广西师范大学物理系 桂林 541001)

1992 年 12 月 16 日收到

摘 要

以轻重离子 ^4He 散射作为手段,对 ^{16}O 原子核的集团结构进行了检验.并与传统的核子结构模型做了对比.本文结果对 ^{16}O 集团结构提供一个支持.

关键词 原子核集团结构, 重离子散射, ^{16}O 核的结构.

重离子散射是重离子物理中的一个重要且基本的部分.在这方面,到目前为止已积累了相当数量的实验数据,它们为研究核反应机制和原子核结构开辟了一个重要领域.轻重离子 α 在原子核 ^{16}O 上的散射是实验测量数据最多也最完全的反应之一.因此,这些数据可以为研究 ^{16}O 的核结构问题提供一组新的判据.

从传统的壳模型观点看, ^{16}O 是由 8 个质子和 8 个中子组成的双满壳层原子核.因此,对 α 粒子与 ^{16}O 核散射的理论分析,过去也是以核子组成模型为出发点的^[1].

但是从另一方面看, ^{16}O 是一个典型的 α 粒子结构原子核.从集团结构模型观点看, ^{16}O 原子核的基态是由四个 α 粒子构成,这些核内的 α 粒子基本上保持着自由 α 粒子的特性.

本文的目的是通过 α 粒子与 ^{16}O 原子核散射这一重离子过程作为手段,对 ^{16}O 核的 4α 结构模型进行一次检验,并与传统的核子组成模型的结果进行对比.

在 α 粒子模型下, α 粒子与 ^{16}O 核的散射可以看成是入射的 α 粒子与 ^{16}O 核内的四个 α 粒子为散射心的散射过程.因此我们可以由两个 α 粒子间的相互作用和核内的 α 粒子密度来建立一个 α 粒子与 ^{16}O 原子核间的折叠势用以描述 α 粒子与 ^{16}O 间的散射过程.这样一个模型和通常使用来描述 $\alpha + ^{16}\text{O}$ 散射的双折叠模型的根本不同点是,在前一个模型里 α 粒子是“基本”粒子,而在后者核子是“基本”粒子.

在上述的 α 折叠模型下, α 粒子和 ^{16}O 核间的相互作用的实部可以被表示为:

$$V(R) = \int d\mathbf{r} U_{\alpha\alpha}(\mathbf{R} - \mathbf{r}) \rho_{\alpha}(\mathbf{r}), \quad (1)$$

这里, $\rho_{\alpha}(\mathbf{r})$ 代表 α 粒子在 ^{16}O 内的密度分布; $U_{\alpha\alpha}$ 代表入射 α 粒子和靶核内的一个 α 粒子间的相互作用.

我们曾提出一个 ^{16}O 的 4α 结构模型——独立 α 粒子模型^[2].这个模型曾经在电子散射^[2], π -核散射^[3]和质子散射^[4]中得到成功的检验.现在,本文中我们将通过重离子散射这一新的手段对该模型进行再一次的检验.

* 国家自然科学基金和中国科学院 LWTZ-1298 经费资助.

从我们在文献[2]中给出的 ^{16}O 的 α 粒子结构波函数,可以很容易求得方程(1)中所需要的 $\rho_{\alpha\alpha}$.其具体表示式这里从略.

方程(1)中包含的 $U_{\alpha\alpha}$,我们选用Buck等人给出的 α - α 相互作用势^[5]

$$U_{\alpha\alpha}(r) = -122.6225e^{-0.22r^2}. \quad (\text{MeV}) \quad (2)$$

这个相互作用势可以很好地再生 α - α 散射相移直到质心系能量40MeV.

由方程(1)求出 $V(R)$ 后,按着标准的折叠模型框架,选取一个Woods-Saxon形状的虚部,再把库伦作用包括进去,我们得到一个描述 α 粒子与 ^{16}O 核散射的复位势

$$U(R) = N_r V(R) - iW_0 \{1 + \exp[(R - R_l)/a_l]\}^{-1} + V_c, \quad (3)$$

这里 V_c 代表库伦势; N_r 称为重整化因子.

折叠模型的一般做法是,把重整化因子 N_r 和虚部的三个量 W_0, R_l, a_l 一共四个量作为自由参数,使用一个最小二乘法的程序找出与实验数据的最佳拟合.因为本文的目的是检验 α 模型,而不是追求得到最好的拟合,所以我们采取如下的做法:(i)把 R_l 和 a_l 两个参数固定,而只把 N_r 和 W_0 两个量作为自由参数来调节;(ii)我们没有使用最小二乘法的程序,而是用目视来评估找出“最佳”拟合.

在本文中,根据前人的工作^[6],我们把 R_l 和 a_l 取为 $R_l = 1.4A^{1/3}\text{fm}$, $a_l = 0.7\text{fm}$,约化库伦半径取为 $r_c = 1.3\text{fm}$,在所有的计算中不再变动这些参数值.

在 α 粒子模型下,我们计算了能量约为20—80MeV的能区内的 $\alpha + ^{16}\text{O}$ 的弹性散射的微分截面.这些实验数据的一个显著特点是,它们都是几乎覆盖整个角区的测量,因此对理论的检验就更为严厉.高于100MeV的能区虽也存在某些实验数据(例如 $T_\alpha = 104, 146\text{MeV}$ 下的实验),但因为Buck的 α - α 势最高只能近似地适用于80MeV的 α 入射能量,所以100MeV以上的能区已经超出了利用(2)式所建立的折叠势的适用范围.

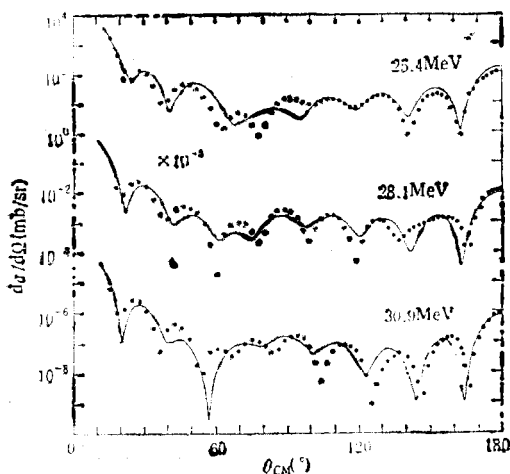


图1 $E_\alpha = 25.4, 28.1, 30.9 \text{ MeV}$ 下 $\alpha + ^{16}\text{O}$

弹性散射微分截面

曲线为本文理论结果,实验点取自[7].

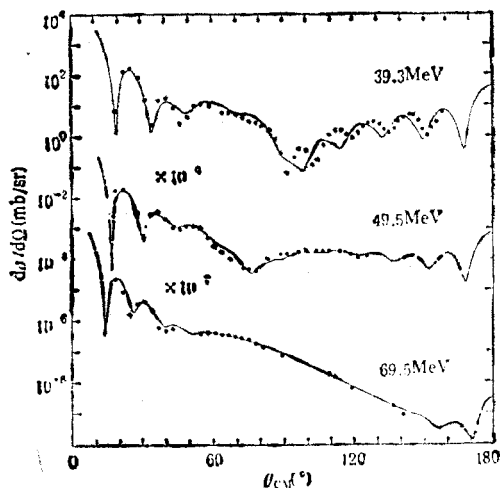


图2 $E_\alpha = 39.3, 49.5, 69.5 \text{ MeV}$ 下 $\alpha + ^{16}\text{O}$

弹性散射微分截面

曲线为本文理论结果,实验点取自[8].

在图1和图2中给出了我们在6种能量下的计算结果,如图中曲线所示.它们所对

应的参数 N_r 和 W_0 值给在表 1 中。从图中可以看到, α 折叠模型给出了对实验相当好的描述。

文献 [1] 中曾经对能量在 50MeV 附近的两组角分布进行过一个唯象光学势的分析, 即光学势的实部和虚部都取为 Woods-Saxon 型, 调节实部和虚部一共 6 个参数, 结果只能得到较差的符合。而本文中只包括一个可调参数 N_r 的实部位势能给出好的与实验符合这一事实表明, 折叠模型所导出的实部位势比一个纯唯象的 Woods-Saxon 形状势更接近真实位势。

从传统的核子组成模型出发, 对于 $\alpha + ^{16}\text{O}$ 这一过程, 可看成是由 4 个核子组成的人射核被由 16 个核子组成的靶核散射的过程。在折叠模型框架下, 可以用两个原子核的核子分布密度与某种核子-核子相互作用折叠而得到一个双折叠势来描述这一反应过程。文献 [1] 曾经使用一种当前最流行的核子-核子有效相互作用即 DDM3Y 相互作用, 构成一个 DDM3Y 折叠模型对 $\alpha + ^{16}\text{O}$ 散射进行过分析。对于角分布的拟合情况, 从总体上看, DDM3Y 模型和本文的 α 模型处于同样好的水平; 在某些细微结构上 DDM3Y 模型拟合得稍好些。但应该提到的是, 在这个 DDM3Y 模型中他们使用了一个包括 6 个可调参数的虚部(傅里叶-贝塞尔函数展开型) 并且是使用最小二乘法程序去找寻最佳的拟合。与此对照, 本文模型其虚部只有一个可调参数, 并且没有利用最小二乘法程序而只是在几个有限的参数变化中来选取“最佳的”拟合。不难期望, 如果我们也采用同样的做法, 则 α 模型将会给出更好的拟合。但是, 我们的目的是检验 α 模型的预言能力, 而不是要去寻找最佳拟合; 对于达到这样一个目的而言, 我们在图 1 和 2 中所展示的结果已经是足够好了。

α 折叠模型所需要的重整化因子 N_r 值列在表 1 中。从表中看到, 在 25—50MeV 能区内 N_r 大约在 0.84—0.90 之间。而对于较高能量 69.5MeV 的情况, N_r 显著下降到 0.77。这一下降的原因, 是因为 Buck 势((2)式)在 $E_\alpha \approx 60—80$ MeV 能量区域内给出相移的能力已经变差^[2], 因此由它所构造的折叠势在此能区内的适用性也变差。从核子间的有效相互作用的研究中得知, 其相互作用强度是随能量增加而减弱的, 由此我们可以推知, α - α 相互作用也会随能量增加而减弱。因此可以想到, Buck 势在高能量 60—80 MeV 能量段给出了过强的相互作用。可以预期, 一个在 60—80MeV 能区内更加实际的 α - α 相互作用势, 可能导致 N_r 增大而更向 1 接近。

N_r 是一个有意义的量。它与 1 偏离的大小即 $|N_r - 1|$ 的值, 标志着一个折叠模型的成功程度。对于 DDM3Y 模型, N_r 与 1 的偏离约为 35—40% (在 $E_\alpha \approx 30—50$ 能区); 而对于本文的 α 模型, 其值约为 10—16%。这一比较表明, α 结构模型所导出的折叠势比核子组成模型所导出的折叠势更接近真实位势。

表 1 折叠势参数

$E_\alpha(\text{MeV})$	25.4	28.1	30.9	39.3	49.5	69.5
N_r	0.90	0.85	0.86	0.84	0.85	0.77
$W_0(\text{MeV})$	6.2	6.5	8.0	12.0	17.0	23.0

结论: 本文从 ^{16}O 原子核的 α 粒子结构观点出发, 对一个宽广能区内的 $\alpha + ^{16}\text{O}$ 散射过程进行了分析. 理论结果与实验很好地符合. 与同样理论框架下的核子组成模型比较, α 模型导出的位势更接近真实位势. 通过本文研究, ^{16}O 原子核的 α 粒子结构观点又得到了一次有力的支持.

参 考 文 献

- [1] Abele et al., *Z. Phys.*, **A326** (1987) 373.
- [2] 李清润、陈生忠、赵恩广, 高能物理与核物理, **5**(1981)531.
- [3] Li Qing-run, *Phys. Rev.*, **C30** (1984) 1248.
- [4] 李清润、周金礼, 高能物理与核物理, **16**(1992)229.
- [5] B. Buck, H. Friedrich and C. Wheathly, *Nucl. Phys.*, **A275** (1977) 246.
- [6] P. P. Singh et al., *Phys. Rev. Lett.*, **23** (1969) 1124.
- [7] A. Cowley and G. Heymann, *Nucl. Phys.*, **A146** (1970) 465.
- [8] F. Michel et al., *Phys. Rev.* **C28** (1983) 1904.

An Examination of the Cluster Structure for ^{16}O by Means of 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 December 16, 1992

Abstract

The cluster structure of ^{16}O is examined by means of heavy-ion scattering. The comparison of the present results with those by other models is made. The results provide a support to the cluster structure of ^{16}O .

Key words Nuclear cluster structure, Heavy-ion scattering, Structure of ^{16}O .