

## 56MeV—70MeV<sup>12</sup>C + <sup>28</sup>Si 弹性散射研究

沈文庆 尹淑芝 郭忠言 诸永泰 陈巨声 邬恩九 郭箕第 冯恩普 谢元祥  
(中国科学院兰州近代物理研究所)

### 摘 要

用大面积位置灵敏电离室测量了 69.5MeV, 66MeV, 59MeV 和 56MeV 轰击能量下 <sup>12</sup>C + <sup>28</sup>Si 弹性散射角分布. 用光学模型对实验数据进行了拟合, 并讨论了弹散角分布振荡及增强的可能原因.

重离子弹性散射是研究原子核表面性质的重要方法之一. 通过光学模型或各种半经典模型对实验数据的分析可以得到相互作用半径, 核表面厚度, 擦边角动量, 全反应截面等资料, 这是研究其它更为复杂的反应过程的基础. 特别是对轻系统的散射常常明显地受内部结构细节等因素的影响, 使轻系统的散射成为广泛的实验和理论研究的对象. 六十年代就发现 <sup>12</sup>C + <sup>12</sup>C, <sup>16</sup>O + <sup>12</sup>C, <sup>16</sup>O + <sup>16</sup>O 等弹性散射激发函数在轰击能达到大约是库仑位垒几倍的高度处有宽度约为 2MeV 的粗糙结构和宽度约为 150keV 的中间结构, 前者有时和全熔合成发射  $\alpha$ 、 $p$  等出射道的激发函数的结构有关联<sup>[1-3]</sup>. 提出了各种方法来解释这种现象, 例如准分子共振, 势共振等. 随后对 <sup>12</sup>C + <sup>28</sup>Si, <sup>16</sup>O + <sup>24</sup>Mg 等系统也发现了类似的现象, 虽然结构弱得多, 但是也不容易用传统光学势来拟合<sup>[4,5]</sup>. 与此现象同时存在的是后角弹散截面的增强和中间角度区角分布有较强烈的振荡. 有些作者认为中间角度区角分布的强烈振荡和背散射弹散增强及激发函数的粗糙和中间结构有关<sup>[6]</sup>.

1979年C. M. Cheng 等<sup>[7]</sup>测量了  $19\text{MeV} < E_L < 48\text{MeV}$  的 <sup>12</sup>C + <sup>26</sup>Si 弹散角分布, 发现  $E_L > 32\text{MeV}$  的弹散角分布出现振荡结构. 作者用有较浅虚部和实部且随入射能强烈变化的势来拟合这些弹散角分布. 随后 G. R. Satchler 等<sup>[6]</sup>测量了  $E_L = 186.4\text{MeV}$ ,  $131.5\text{MeV}$ ,  $74\text{MeV}$ ,  $60\text{MeV}$  下 <sup>12</sup>C + <sup>28</sup>Si 的弹散角分布. 发现高能 ( $186.4\text{MeV}$ ,  $131.5\text{MeV}$ ) 和 [7] 中的低能 ( $32\text{MeV}$  以下, 直到  $24\text{MeV}$ ) 的弹散角分布可用同一个光学势得到拟合, 但该势不能拟合能量介于  $32\text{MeV} < E_L < 74\text{MeV}$  之间的弹散角分布. 这段能区的弹散角分布和轰击能有强烈的依赖关系, 它们正好在后角弹散截面有较大增涨的能区. 估计在该能区有一种还未得到很好解释的机制, 例如某种类共振机制, 和通常的弹散相干造成了高度能量有关的行为. 在  $48\text{MeV}$  到  $74\text{MeV}$  内实验数据还不多, 1971年 I. Kohro 等<sup>[8]</sup>测量了  $E_L = 49.3\text{MeV}$ ,  $70\text{MeV}$ ,  $83.5\text{MeV}$  <sup>12</sup>C + <sup>28</sup>Si 弹散, 但质心角仅达  $40^\circ$  左右. 因此测量研究中间能区的 <sup>12</sup>C + <sup>28</sup>Si 弹散角分布还是有意义的.

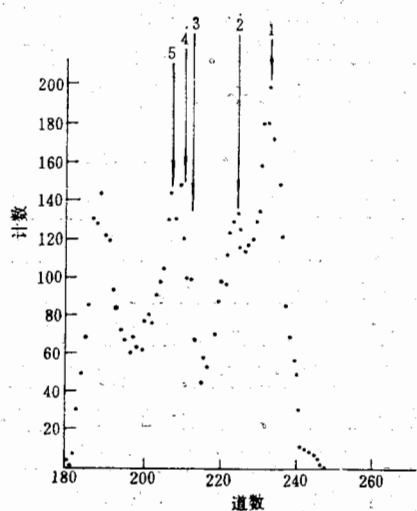


图 1 59MeV  $^{12}\text{C} + ^{28}\text{Si}$  在  $29^\circ \pm 0.5^\circ$  内的碳元素能谱。

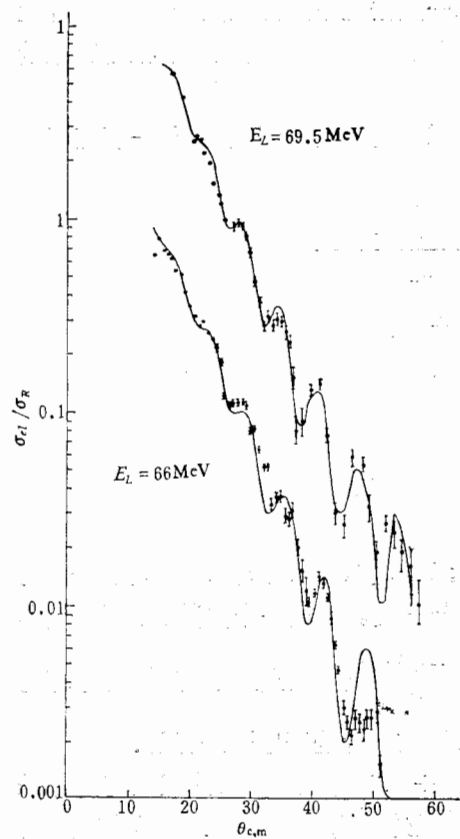


图 2  $E_L = 69.5\text{MeV}$ ,  $66\text{MeV}$  实验  $^{12}\text{C} + ^{28}\text{Si}$  弹散角分布及光学模型拟合。

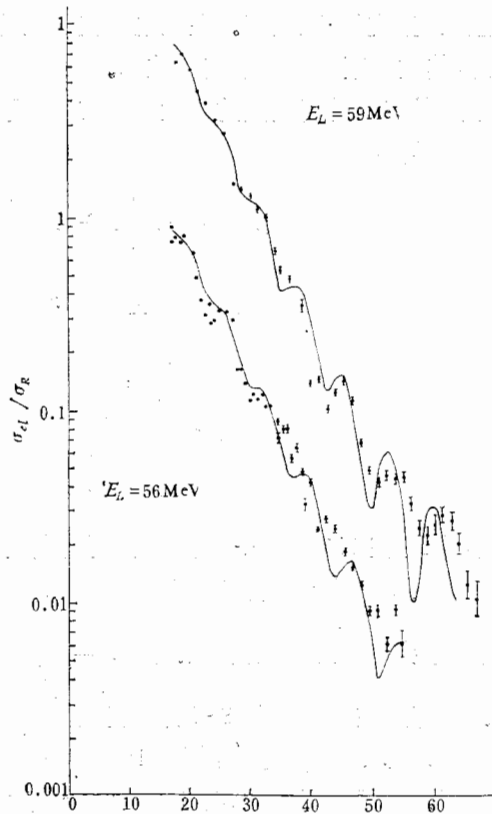


图 3  $E_L = 59\text{MeV}$ ,  $56\text{MeV}$  实验  $^{12}\text{C} + ^{28}\text{Si}$  弹散角分布及光学模型拟合。

实验是用近物所 1.5m 迴旋加速器给出的  $^{12}\text{C}$  束进行的, 能量分辨约为 1%. 靶子是用真空蒸发制得的无衬靶, 厚度约  $110\mu\text{g}/\text{cm}^2$ . 实验中用大面积位置灵敏电离室<sup>[9]</sup>测量了 69.5MeV, 66MeV, 59MeV, 56MeV 下  $^{12}\text{C} + ^{28}\text{Si}$  的弹散角分布, 用 Al 降能片获得不同的人射能. 实验室角度覆盖范围约  $10^\circ - 50^\circ$ . 大面积位置灵敏电离室的  $Z$  分辨  $\frac{Z}{\Delta Z}$  约为 27,  $\theta$  方向角分辨约  $0.4^\circ$ ,  $\phi$  方向角分辨约  $0.3^\circ$ , 电离室阳极分成四片, 计算机离线相加后得到的总能量分辨约 2—3%. 实验装置和位置灵敏电离室性能及工作情况可参阅文献 [9]. 实验中用  $\Delta E - E$  粒子分辨技术鉴定出射粒子的  $z$ . 虽然本探测器不能分开碳的不同的同位素, 但由于出射不同于  $^{12}\text{C}$  的其它碳同位素的反应  $Q$  值甚负(都小于  $-10\text{MeV}$ ), 因此对弹性散射测量没有什么干扰. 在  $Z$  及  $\theta$  上加窗后得到的典型能谱可见图 1. 从能谱可以看到三个组份: 1) 弹散; 2)  $^{28}\text{Si}$  的第一激发态 (1.78MeV); 3) 4.439MeV  $^{12}\text{C}$  第一激发态, 4.618MeV  $^{28}\text{Si}$  第二激发态和 4.979MeV  $^{28}\text{Si}$  第三激发态混在一起的组份. 由于能量分辨不是非常好, 用高斯拟合法分别求出弹散分量, 从而得到弹散角分布. 四个轰击能量下的弹散角分布都有振荡结构, 且随轰击能量而变化. 图 2 和图 3 显示了四个轰击能量下的实验弹散角分布. 图上标的误差仅是统计误差. 而高斯拟合取出弹散分量, 束流测量误差, 靶厚, 立体角计算等带来的误差均未包括在内. 由于大面积位置灵敏电离室一次覆盖角度范围为  $20^\circ$ , 实际上每一轰击能下的弹散角分布测量中, 大电离室仅变换了一次角度. 在大电离室覆盖的角度范围内除统计误差及高斯拟合带来的误差外, 其它因素带进的误差都较小.

用光学模型对所测到的弹散角分布进行了拟合, 采用与角动量无关的伍兹-萨克森型七参数光学势:

$$V(r) = -V \left[ 1 + \exp \left( \frac{r - r_R(A_1^{\frac{1}{3}} + A_2^{\frac{1}{3}})}{a_R} \right) \right]^{-1} \\ - iW \left[ 1 + \exp \left( \frac{r - r_I(A_1^{\frac{1}{3}} + A_2^{\frac{1}{3}})}{a_I} \right) \right]^{-1} + V_c \\ V_c = \begin{cases} \frac{Z_1 Z_2 e^2}{r} & r \geq R_c \\ \left( \frac{Z_1 Z_2 e^2}{2R_c} \right) \left( 3 - \frac{r^2}{R_c^2} \right) & r \leq R_c \end{cases}$$

库仑半径  $R_c$  在  $1.5(A_1^{\frac{1}{3}} + A_2^{\frac{1}{3}})$  附近对计算不灵敏;  $V, r_R, a_R, W, r_I, a_I$  为可调参数. 调参数时从 Satchler 拟合 74MeV 及 60MeV 的光学势<sup>[6]</sup>出发, 先调一个参数, 得到最佳数值后固定该值再调别的参数. 用  $\chi^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left( \frac{\sigma^{\text{exp}} - \sigma^{\text{th}}}{\Delta\sigma^{\text{exp}}} \right)^2$  作为拟合实验数据的好坏的标准. 计算是在近物所 DJS-6 计算机上, 采用 ALGOL 语言编写的程序<sup>[10]</sup>进行的.

用 C. M. Cheng 等<sup>[7]</sup>的拟合 19MeV—48MeV  $^{12}\text{C} + ^{28}\text{Si}$  弹散角分布的能量有关势进行了计算. 用相当于 36MeV, 48MeV 及把能量依赖关系外推到我们能区的光学势参数均不能拟合我们的实验数据, 该势预言的中间角度弹散截面太大, 振荡太强. 36MeV 势比 48MeV 势偏离实验更远, 且随轰击能增加拟合也变差. 该势虚部几何参数比实部小得多,

具有较大透明性,且随能量增加  $V/W$  增大,这更增大了表面透明性. 在我们能区计算的弹散截面太大,说明在我们的轰击能区内势的透明性应相应地小一些. Satchler 等<sup>[6]</sup>同时拟合高能 (186.4MeV, 131.5MeV) 及低能 (32MeV 以下) 的普适势也不能拟合我们的实验. Satchler 拟合 74MeV 及 60MeV 的势虽可粗糙地拟合我们的数据,但不能对我们能区内四个轰击能的角分布同时得到较好的拟合,且随轰击能降低拟合变差. 这表明在我们的能区内势需要随轰击能略作变动. 虽对能量有依赖但不如 32MeV~48MeV 能区里那样强,势要有一定的表面透明性但也不如 32MeV~48MeV 能区那样大. 拟合我们四个轰击能的弹散角分布的光学模型参数可见表 I. 综上所述,且和 Cheng 及 Satchler 工作类比,可能意味着在我们的测量能区,他们指出的那种类共振机制对  $^{12}\text{C} + ^{28}\text{Si}$  中间角度弹散角分布的影响也是存在的. 拟合我们弹散的势的透明性小于 Cheng 的势的透明性,而且势和轰击能量的依赖关系不如 32MeV—48MeV 能区那样强,这可能意味着在我们轰击能区内这种影响稍小.

用光学模型得出的反应截面  $\sigma_R^{(pp)}$  及用  $\frac{1}{4}$  点法则从实验弹散角分布得出的反应截面  $\sigma_R^{(\frac{1}{4})}$  列在表 I 中,它们基本上是一致的,当然角分布振荡造成了  $\frac{1}{4}$  点法则取出的反应截面有较大的不确定性. 用 Wilcke<sup>[11]</sup> 的半经典方法计算的反应截面(表 I 中的  $\sigma_R^{(1)}$ ) 大于光学模型和  $\frac{1}{4}$  点法则求出的反应截面. 这和可能有某种类共振机制造成弹散加强和振荡的想法并不相矛盾. 由于实验测量中覆盖的角度不够大,束流能量分辨及探测器能量分辨不够高,没有取得后角弹性散射及弹性散射激发函数的数据. 未能作出对造成中间角区弹散加强和振荡产生机制的定量分析. 要搞清它的产生机制及其影响最好和该能区的背散射及弹性散射激发函数的数据,甚至包括其它出射道的数据一起共同分析才行.

表 I 光学模型参数及反应截面

轰击能 $E_L(\text{MeV})$	$V(\text{MeV})$	$R_s(\text{fm})$	$a_s(\text{fm})$	$W(\text{MeV})$	$R_t(\text{fm})$	$a_t(\text{fm})$	$\sigma_R^{(pp)}(\text{mb})$	$\sigma_R^{(\frac{1}{4})}(\text{mb})$	$\sigma_R^{(1)}(\text{mb})$
69.5	10	1.405	0.533	12.7	1.337	0.442	1551	1517	1894
66	10.3	1.405	0.533	12.3	1.337	0.442	1547	1392	1861
59	10.4	1.405	0.533	12.6	1.337	0.442	1499	1360	1778
56	10.8	1.406	0.533	12.6	1.337	0.442	1479	1350	1733

注: 各反应截面的含义可参见正文.

## 参 考 文 献

- [1] D. A. Bromley et al., *Phys. Rev. Lett.*, **4**(1960), 365.
- [2] J. V. Maher et al., *Phys. Rev.*, **188**(1969), 1665.
- [3] K. Siwek-Wilczynska et al., *Nucl. Phys.*, **A229**(1974), 461.
- [4] J. G. Cramer et al., *Phys. Rev.*, **C14**(1976), 2158.
- [5] M. R. Clover et al., *Phys. Rev. Lett.*, **40**(1978), 1008.
- [6] G. R. Satchler et al., *Nucl. Phys.*, **A346**(1980), 179.
- [7] C. M. Cheng et al., *Phys. Rev.*, **C20**(1979), 1024.
- [8] I. Kohno et al., *Journal of the Physical Society of Japan* **V30**(1971), 910.

- [9] 沈文庆, 诸永泰等, 高能物理与核物理, 待发表.  
[10] 范国英等, 近物所内部资料.  
[11] W. W. Wilcke et al., UR-NSRL-221 (1980).

## A MEASUREMENT OF THE ELASTIC SCATTERING FOR REACTION $^{12}\text{C} + ^{28}\text{Si}$ AT ENERGIES 56MeV—69MeV

SHEN WEN-QING YIN SHU-ZHI GUO ZHONG-YAN

ZHU YONG-TAI CHEN JU-SHEN WU EN-CHIU

GUO CHI-DI FENG EN-PU XIE YUAN-XIANG

*(Institute of Modern Physics, Academia Sinica)*

### ABSTRACT

The angular distributions of the elastic scattering for reaction  $^{12}\text{C} + ^{28}\text{Si}$  have been measured at the energies 69.5 MeV, 66 MeV, 59 MeV, 56 MeV using the large area position sensitive ionization chamber. The experimental data are fitted by use of the optical model. The probable reasons of the enhancement and oscillation of the elastic scattering angular distribution are discussed.