

# 轻入射粒子核反应系统的核势研究

吴和宇 靳根明

(中国科学院兰州近代物理研究所, 兰州 730000)

## 摘 要

从核与核作用的弹性散射出发, 收集各种能量和各种反应系统的光学模型参数和反应截面, 分析有效核力作用, 给出势能分布; 并与常见的几种核势的描述方式比较, 发现轻入射粒子系统的核势存在系统偏离, 用亲近势的形式进行了重新拟合。

## 一、引 言

核势是描述核与核之间的作用的重要物理量。用它来分析核反应的各种物理量以及核结构方面的问题。从折叠势, 能量密度势发展起来的核势形式大都建立在半经验的基础上。

核势对核反应机制有较大的影响, 即核反应机制与核势密切相关。因此, 可用核反应研究确定核势和检验核势。例如, 弹性散射是发生在核表层的相互作用的结果, 其截面与核势尾部的大小及形状的关系非常密切; 而熔合和深度非弹反应则取决于深部较小范围的核势, 这时两核相互作用距离较小, 会发生重叠和变形, 使得核势也会发生变化。所以用弹性散射来研究检验核势是比较好的一种方法。描述核核相互作用的光学模型势就是由对弹性散射的长期研究中得出来的, 这种核核相互作用势经常被用来描述核反应<sup>[1-27]</sup>。由于这种核势包含许多参数, 而且这些参数又不是唯一确定的, 同样的实验数据可以用许多套不同的参数进行描述, 这就给应用带来了许多麻烦, 限制了它的应用。在重离子反应研究中, 其平均值可用一些半经验的核势表达式对其进行描述, 例如 Bass, Nqo 等人给出的表达式<sup>[31]</sup>。

在利用光学势描述核核的弹性散射时发现, 利用许多套不同的势参数都可以对实验数据进行较好地再现, 其原因在于, 这许多套不同的势参数给出的核势曲线(实部和虚部分别)在一定的距离上相交<sup>[28, 29]</sup>(图 1)。这个交点位置  $r$  随着入射能量而变化。这表明对于一定能量的入射粒子, 其散射截面的角分布主要取决于核表面某一确定位置的核核相互作用势。实际上, 尽管采用的参数组不同, 但它们都正确地描述了这个确定位置的核势。这就是利用光学势能够正确描述弹性散射角分布的实验数据的实质。人们可以利用这一性质, 通过光学模型势对大量的反应系统在不同入射能时的弹性散射数据进行拟合,

得出较远距离上的核核作用势。由于现在有了很高入射能量的弹性散射实验数据，就可能对较近距离上的核势进行研究。

本文的目的就是希望利用上述方法，对已有的数据进行分析处理，得出不同距离上的

核核相互作用势，并与其它一些表达式所描述的核势进行比较，得出新的与实际更接近的核势参数表达式，以便利用。

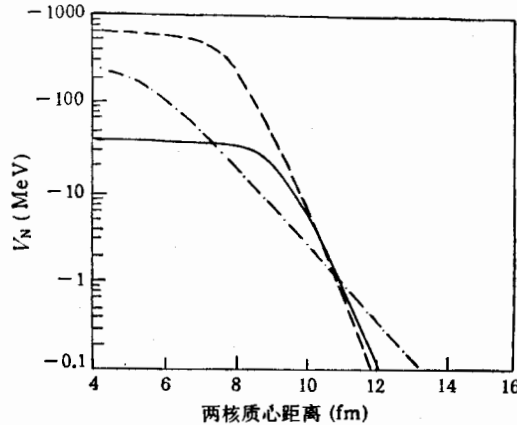


图1  $^{16}\text{O}+^{90}\text{Zr}$  反应的三组光学势  
实部曲线相交于一点

$E_{\text{lab}} = 60 \text{ MeV}$ . 引自 F.D. Becht et al,  
Nucl. Phys., A203(1973),1

其中  $Z_1, Z_2$  为靶弹核电荷数,  $R_C$  为库仑半径。

核势一般采用 Woods-Saxon 势:

$$V_N(r) = V/[1 + \exp((r - R_1)/a_1)] + i\omega/[1 + \exp((r - R_2)/a_2)]. \quad (3)$$

自旋-轨道耦合势:

$$V_{\text{SL}} = (\hbar/2mc)^2(\nabla V_N(r) \times \mathbf{L}) \times \boldsymbol{\sigma}. \quad (4)$$

在入射能高于库仑位垒时, LS 耦合势相对于有心势可以忽略,多数实验给出包括库仑半径参数在内的七参数光学势。

## 2. 有效势和有效作用距离的提取

(1) 如果核反应截面用  $\sigma_R = R_{\text{eff}}^2(1 - V_C(r)/E)$  来描述, 根据实验数据我们可以提取有效作用半径, 同时, 我们也可得到有效作用核势:

$$V_{\text{Neff}} = V_{\text{OP}}(R_{\text{eff}}) - V_C(R_{\text{eff}}) \quad (5)$$

其中  $V_{\text{OP}}(R_{\text{eff}})$  为有效作用  $R_{\text{eff}}$  上的光学势实部,  $V_C(R_{\text{eff}})$  为相应点的库仑势。

(2) 用一组参数  $a_1 = \{a_{11}, a_{12}, \dots, a_{17}\}$  得到的光学势  $V_1(r_1, a_1)$  与用另一组参数得到的光学势满足  $\text{Re}(V_{\text{Neff}}(R_{\text{eff}}, a_1)) = \text{Re}(V_{\text{Neff}}(R_{\text{eff}}, a_2))$ , 也就是在某一确定的相互作用距离上有一确定大小的相互作用势。但在实验中, 由于实验条件的差异, 使实验数据有一定的偏差, 我们对用  $N$  组独立参数得到的  $M$  个近似解取平均,

$$V_{\text{Neff}} = \sum V_{\text{Neff}}(R_{\text{eff}}, a_i)/M, \quad (6)$$

$$R_{\text{eff}} = \sum R_{\text{eff}}(a_i)/M. \quad (7)$$

## 二、计算描述

### 1. 光学势

核与核的作用包括核势、库仑势和自旋-轨道耦合势三部分:

$$V_{\text{op}}(r) = V_C(r) + V_N(r) + V_{\text{SL}}(r, \mathbf{S} \times \mathbf{L}). \quad (1)$$

库仑势采用常见形式:

$$V_C(r) = Z_1 Z_2 e^2 / r, \quad (r \geq R_C);$$

$$V_C(r) = Z_1 Z_2 e^2 / 2R_C (3 - R^2/R_C^2), \quad (r < R_C). \quad (2)$$

(3) 有效势和有效半径对 C + C 系统归一

不同系统的相互作用是无法比较的，它依赖于弹靶质量和作用距离。为了增加可以比较的数据，我们把不同系统的有效势进行归一。为此我们考察势能的多种表达式，发现核势与质量的依赖关系为  $V_N \propto A_T^{1/3} A_P^{1/3} / (A_T^{1/3} + A_P^{1/3})$ ，依此关系用 C + C 系统进行归一，

$$V_{\text{Neff}}(C + C) = V_{\text{Neff}} A(C)^{1/3} / 2 / (A_T^{1/3} A_P^{1/3} / (A_T^{1/3} + A_P^{1/3})) \quad (8)$$

其中  $A(C)$  为  $^{12}\text{C}$  的质量数，此时  $V_{\text{Neff}}$  大小与系统质量无关。因核力为短程作用，作用势和表面距离密切相关，为了使得不同系统的数据可进行比较，对有效作用半径也作如下调整：

$$R_{\text{eff}}(C + C) = 2R_{1/2}(C) + R_{\text{eff}} - (R_{1/2}(P) + R_{1/2}(T)), \quad (9)$$

其中  $R_{1/2}$  为半密度半径。归一后势大小原则上与原系统无关，但发现当入射粒子的质量低于  $^{12}\text{C}$  时，其有效核势随入射粒子的质量数变小而变化。对此将在下一节详细讨论。

### 三、结果和讨论

#### 1. 比较

能够对同一反应系统，在同一入射能下的实验数据进行好的描述的不同光学势参数组之间的联系在于它们确定了  $V_{\text{Neff}} \sim R_{\text{eff}}$  关系图中的一个共同的点。这一点对应一个确定的作用势和作用距离，但描述光学势的参数较多，在有效作用区间，势的大小也很接近，实验上难以准确拟合，因此给出的参数组对应的有效作用点模糊了，变成一个小的区间。对 C + C, Li(a) + C, H + C 几种系统的光学参数进行分析，给出了有效作用势和有效作用距离(图 2)。从图中可看出，不同系统之间存在一定偏离，这种偏离不仅是质量数差异产生的而且也包含了作用距离差异的效果。我们对更多系统分析拟合，提取有效作用势和作用半径并归一到 C + C 系统进行比较(图 3)。结果发现重粒子与重靶核的作用与各种唯象势符合，特别与亲近势符合最好；而轻入射粒子在重靶上的散射数据存在系统偏离，与入射粒子有关，分布为几条带。现在按入射粒子分类与唯象核势进行比较。

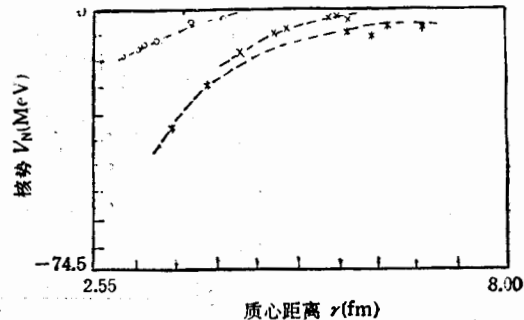


图 2 用参数组的光学势方程解出的  $^{12}\text{C}$ 、 $^6\text{Li}$ 、 $^1\text{H}$  与  $^{12}\text{C}$  作用的有效势和有效半径。  
弹性散射：●  $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$ ，×  $^6\text{Li} + ^{12}\text{C}$ ；○  $^1\text{H} + ^{12}\text{C}$

指数势通常形式： $V_N = -d a_s A_1^{1/3} A_2^{1/3} \exp(-\xi/d) / R$ ， $(10)$   
其中  $d = 1.35\text{fm}$ ， $a_s = 17\text{MeV}$ ， $R, \xi$  分别为两核的质心距离和表面距离， $r_0 = 1.07\text{fm}$ 。

汤川势通常形式： $V_N = -g^2 \exp(-M\pi R/\hbar) / R$   $(11)$   
其中  $M\pi$  为  $\pi$  介子的质量， $g^2/\hbar c = 0.1 - 15.0$ ， $c$  为光速。

BASS 势通常形式： $V_N = -d a_s A_1^{1/3} A_2^{1/3} e(\xi) / R$ ， $(12)$

$$e(\xi) = [A \exp(\xi/d_1) + B \exp(\xi/d_2)]^{-1}, \quad (13)$$

半密度半径为  $R_{1/2} = 1.16A^{1/3} - 1.39A^{-1/3} \text{fm}$  ( $A=1$  时,  $R_{1/2}=1$ ), 其中  $d = 1.35 \text{fm}$ ,  $d_1 = 3.3 \text{fm}$ ,  $d_2 = 0.65 \text{fm}$ ,  $A = 0.3 \text{MeV}^{-1} \text{fm}$ ,  $B = 1.061 \text{MeV}^{-1} \text{fm}$ .

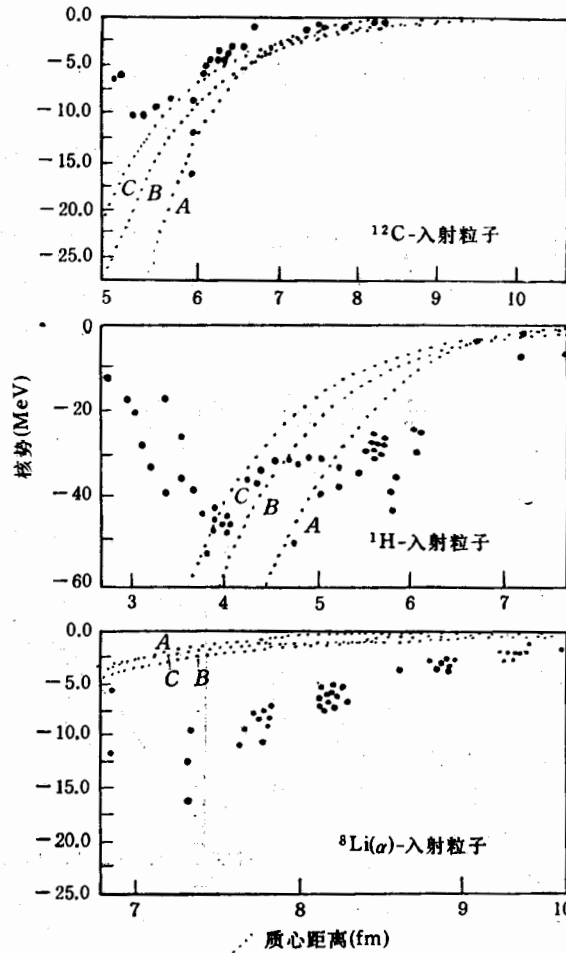


图3 唯象核势汤川势(A)、指数式(B)、BASS 势(C)与实验值(小黑点)比较  
不同系统均作 C+C 归一。归一后不同系统仍存在不同偏离

由图 3、4 可见,  $^{12}\text{C}$  作为入射粒子其核势与唯象势符合较好,在中高能入射时定性符合,与亲近势符合最好。只是在距离较小时,才与亲近势有所偏离。

$^6\text{Li}(\alpha)$  散射作用势,在低能区比唯象势预言高出几倍,符合较差,只能在趋势上符合。

由于质子的实验数据较多,可以得出较为完整的核势曲线。从图 4 中可以看出,实验上得到的核势曲线似乎与亲近势曲线形状相似,但存在一相位差。

## 2. 亲近势形式拟合

用亲近势形式描述重粒子与重粒子的核势作用较好,已广泛地被人们接受。为了方便使用,把这几种轻入射粒子与重核的相互作用势用亲近势的形式进行拟合。

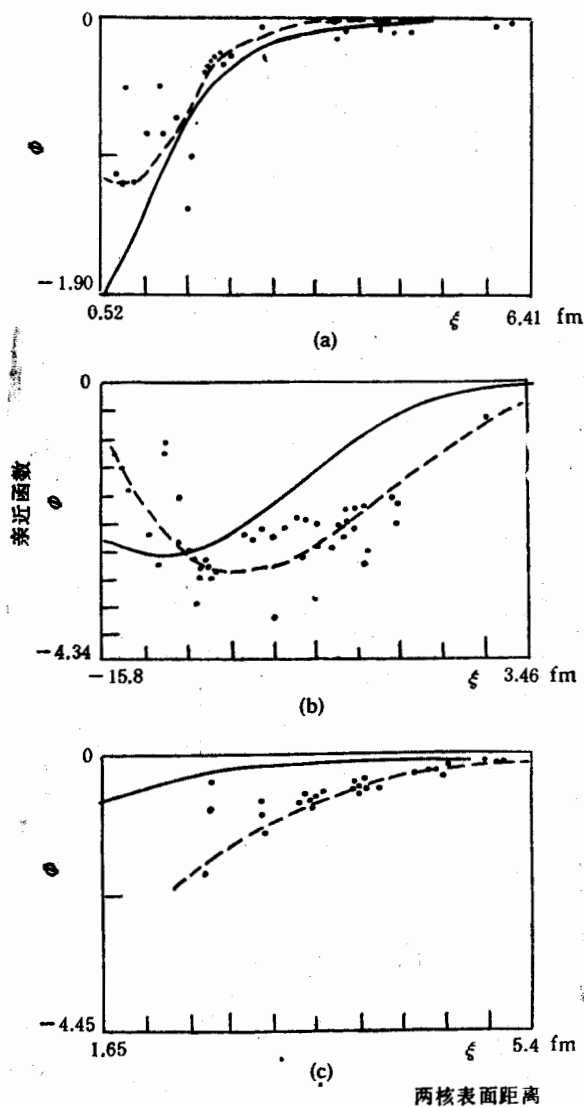


图 4 实线为通常亲近势函数

虚线为新拟合参数的亲近势函数,点为实验点

a)  $^{12}\text{C}$  作入射粒子 b)  $^1\text{H}$  作入射粒子 c)  $^6\text{Li}(\alpha)$  作入射粒子

$$V_N = 4\pi\gamma R_1 * R_2 \phi(\xi) / (R_1 + R_2) \quad (14)$$

其中  $\gamma$  为核表面张力系数,  $R_i$  为核的半密度半径 ( $A=1$  时,  $R=1\text{fm}$ ),  $\phi(\xi)$  为亲近

表 1 亲近函数参数

	$G_1$	$G_2$	$G_3$	$G_4$	$G_5$
亲近势	2.54	0.0852	2.54	3.437	0.75
$^1\text{H}$ 系统	3.1	0.13	2.54	4.5	1.2
$^{12}\text{C}$ 系统	2.6	0.15	2.50	3.437	0.65
$^6\text{Li}(\alpha)$ 系统				14.0	1.0

势函数.

$$\phi(\xi) = -(\xi - G_1)^2/2 - G_2(\xi - G_3)^3, \quad \xi > 1.25111\text{fm} \quad (15)$$

$$\phi(\xi) = -G_4 \exp(-\xi/G_5), \quad \xi \leq 1.25111\text{fm} \quad (16)$$

其中  $G_1, G_2, G_3, G_4, G_5$  为拟合参数, 结果如表 1, 表中第一行参数为原始参数, 以下三行为拟合得到的参数, 拟合情况如图 4.

### 3. 拟合检验

实验点是一系列有效作用距离和与其相应的势, 从实验点拟合的数据要成功地由实验验证后才能被人们接受. 用拟合势曲线参数分析了一系列反应系统的库仑位垒和垒半径的实验值和其它唯象势结果比较(见表 2), 从表中的数值可以看出它比 BASS 势和指数势更接近实验值, 说明拟合是有价值的. 由于 H 和 Li(a) 的特点, 实验上很少给出位垒半径的精确值, 但从拟合本身看, 将会很有价值.

表 2 库仑位垒和垒半径比较

系 统	实验值		指数势		BASS 势		拟合势	
	$B_c(\text{MeV})$	$R_b(\text{fm})$	$B_c(\text{MeV})$	$R_b(\text{fm})$	$B_c(\text{MeV})$	$R_b(\text{fm})$	$B_c(\text{MeV})$	$R_b(\text{fm})$
$^{12}\text{C} + ^{14}\text{N}$	7.00	7.0	5.84	8.9	7.03	8.0	7.17	6.98
$^{12}\text{C} + ^{15}\text{N}$	6.80	7.35	5.77	8.9	6.95	8.0	6.87	7.25
$^{12}\text{C} + ^{16}\text{O}$	7.50	7.6	6.68	8.8	7.95	8.0	7.84	7.32
$^{12}\text{C} + ^{18}\text{O}$	7.45	7.8	6.55	9.1	7.78	8.3	7.63	7.34
$^{12}\text{C} + ^{19}\text{F}$	8.20	7.7	7.47	8.9	8.76	8.2	8.35	7.30
$^{12}\text{C} + ^{152}\text{Sm}$	46.8	10.9	45.7	10.3	46.8	10.8	46.5	9.9

## 四、结 论

利用光学模型势对收集到的弹散数据进行了拟合处理、分析比较, 得到了不同入射粒子 ( $^1\text{H}$ — $^{12}\text{C}$ ) 时反应系统的核核作用势. 发现其核势形状与 Bloki 等人的亲近势<sup>[30]</sup>所描述的形状非常接近, 与其它类型的势函数曲线相差较大. 但是亲近势函数只能对  $^6\text{Li}$  以上的人射粒子与核的相互作用势有较好的定量描述, 对  $^6\text{Li}$  以下的粒子与核的相互作用势不能作定量的描述. 出现这种情况的原因可能是, 当  $A > 12$  时, 表面核子形成一个稳定的弥散层, 核核作用可以用唯象势描述, 而轻入射粒子作用情况不一样.

(1) 半密度半径的确定在核势的计算中起了相当重要的作用, 重粒子的半密度半径很好确定, 而轻粒子如  $^1\text{H}, ^6\text{Li}, ^4\text{He}$  的半密度半径都不能精确确定.

(2) 亲近势和其它唯象核势的一个基本假定是两个互相作用的核表面光滑且曲率半径不太小, 而对轻粒子和很重的重粒子并不这样, 它的表面起伏较大, 且有一个较小的曲率半径.

为了使用方便, 我们用亲近势的形式对轻粒子与核的作用势重新进行了拟合, 得到了一套新参数. 对轻入射粒子组成的系统, 使用这套新参数, 亲近势可以较好地重现系统的相互作用势.

## 参 考 文 献

- [ 1 ] J. F. Mateja, A. D. Frawley, P. B. Nagel, *Phys. Rev.*, **C20**(1979), 176.  
 [ 2 ] W. Bauhoff, *Phys. Rev.*, **C31**(1985), 263.  
 [ 3 ] A. F. Zeller, Y. W. Lui, R. E. Tribble, *Phys. Rev.*, **C22**(1980), 1534.  
 [ 4 ] J. R. Comfort, B. C. Karp, *Phys. Rev.*, **C21**(1980), 2162.  
 [ 5 ] E. Norbeck, P. T. Wu, C. R. Chen, *Phys. Rev.*, **C28**(1984), 1140.  
 [ 6 ] C. C. Sahm, T. Murakami et al., *Phys. Rev.*, **C34**(1986), 2165.  
 [ 7 ] P. Schcandt, W. W. Jacods et al., *Phys. Rev.*, **C24**(1981), 1522.  
 [ 8 ] W. M. STEWART, N. BRON, R. F. LEONARD, *Phys. Rev.*, **171**(1968), 1316.  
 [ 9 ] M. C. Mermaz, *Phys. Rev.*, **C27**(1983), 2019.  
 [ 10 ] R. Vandenbosch, M. P. Webb et al., *Phys. Rev.*, **C17**(1978), 1672.  
 [ 11 ] R. Huffman, A. Galonsky, R. Marham, *Phys. Rev.*, **C22**(1980), 1522.  
 [ 12 ] H. Doubre, J. C. Jacmart et al., *Phys. Rev.*, **C15**(1977), 692.  
 [ 13 ] W. Henning, Y. Eison et al., *Phys. Rev.*, **C15**(1977), 292.  
 [ 14 ] C. M. Perey, F. G. Perey, J. K. Dickens, *Phys. Rev.*, **175**(1968), 1460.  
 [ 15 ] G. M. Greenlees, G. J. Pyle et al., *Phys. Rev.*, **171**(1968), 1115.  
 [ 16 ] S. Krewald, A. Djaloeis, S. Gropel, *Phys. Rev.*, **C24**(1981), 966.  
 [ 17 ] T. Yamaya, O. Satch et al., *Phys. Rev.*, **C37**(1988), 2589.  
 [ 18 ] A. Nadasen, P. Schwandt et al., *Phys. Rev.*, **C37**(1988), 136.  
 [ 19 ] C. B. Fulmer, R. M. Wielland et al., *Phys. Rev.*, **C20**(1979), 670.  
 [ 20 ] S. Kubono, M. H. Tanaka et al., *Phys. Rev.*, **C31**(1985), 2082.  
 [ 21 ] C. B. Fulmer, J. B. Ball et al., *Phys. Rev.*, **181**(1969), 1565.  
 [ 22 ] A. Ingemarsson, O. Jonsson, *Nucl. Phys.*, **A388**(1982), 664.  
 [ 23 ] Jean Mougey, *Nucl. Phys.*, **A387**(1982), 109c.  
 [ 24 ] E. E. Gross, J. R. Beene et al., *Nucl. Phys.*, **A401**(1982), 362.  
 [ 25 ] G. R. Satchler, *Nucl. Phys.*, **A100**(1967), 497.  
 [ 26 ] HANS JOCHEN, TROST, PETER LEZOCH, *Nucl. Phys.*, **A462**(1987), 333.  
 [ 27 ] D. Bandyopadhyay, S. K. Samaddar, *Nucl. Phys.*, **A462**(1987), 587.  
 [ 28 ] "NUCLEAR HEAVY-ION REACTIONS", P. E. Hodgson.  
 [ 29 ] «LECTURE NOTES IN PHYSICS .92. NUCLEAR INTERACTION», Edited by B. A. Robon.  
 [ 30 ] Bloki et al., *Ann. Phys.*, (N. Y.) **105**(1977), 427.  
 [ 31 ] "Nuclear Reactions with Heavy Ions", Reiner Bass, (1980).

## Study of the Nuclear Potential for Light Projectile

WU HEYU JIN GENMING

(Institute of Modern Physics, Academia Sinica, Lanzhou 730000)

## ABSTRACT

There exist a lot of parameters of optical model from elastic scattering and the cross sections of nuclear reaction. The effective distance and its nuclear potential have been analysed. Comparing with other phenomenological potentials, The systematic differences for light projectile system have been found and fitted using a new set of proximity nuclear potential parameters.