

# $^{12}\text{C} + ^{28}\text{Si}$ 反应全熔合激发函数测量

郑纪文 梁国照 刘洪涛<sup>1)</sup>

白兴平 马骏 严建刚

(中国科学院近代物理研究所)

## 摘 要

我们用  $\Delta E-E$  计数器望远镜系统测量了入射能  $E_{\text{Lab}}$  在 43 MeV—70.5 MeV 范围内的  $^{12}\text{C} + ^{28}\text{Si}$  全熔合反应的激发函数。实验激发函数显示出某种宽振荡结构,宽度约为 2—3 MeV。对其平均行为分别用 Glas-Mosel 模型和势模型进行了理论拟合。在  $E_{\text{cm}} = 35-50$  MeV 范围内,临界距离模型和统计  $Y_{\text{rast}}$  线模型满意地复现了实验数据。

## 一、前 言

我们对于  $^{12}\text{C} + ^{28}\text{Si}$  体系的全熔合激发函数特别感兴趣,这是因为该体系的熔合和散射的某些实验结果显示出某种特殊的情况。我们知道在由  $^{12}\text{C}$  和  $^{16}\text{O}$  所组成的体系中,对全熔合激发函数观测到了显著的类共振结构,特别是存在宽度约为 2—3 MeV 的粗结构。与此同时,在弹性散射道和非弹性散射道中亦观测到异常现象:背角弹散截面有反常的抬高,背角弹性散射激发函数和非弹性散射激发函数中都有结构。在这类体系中,背角弹性散射激发函数和非弹性散射激发函数中的结构与熔合激发函数中的结构具有某种形式的关联。现在对  $^{12}\text{C} + ^{28}\text{Si}$  体系的散射实验表明,类似于  $^{12}\text{C}$  和  $^{16}\text{O}$  核所构成的体系,背角弹性散射激发函数具有明显的结构,除去宽度小于 0.25 MeV 的窄结构外,还存在宽度约为 2 MeV 左右的宽结构。同样,在非弹性散射激发函数中也存在类似的结构。因此在实验上搞清楚这个体系的全熔合激发函数是否存在结构及这种结构与弹性散射激发函数的结构是否有某种关联是个非常重要的问题,它将有助于理解熔合激发函数中结构的起源问题。

对于  $^{12}\text{C} + ^{28}\text{Si}$  体系的全熔合截面现有的实验结果,能量都在质心系 30 MeV 以下。早期, Jordan 等<sup>[1]</sup>人的实验结果截面是过低的,但是在  $E_{\text{cm}} \approx 25$  MeV 附近,已经观测到一个弱的宽结构。近期, Racca 等人<sup>[4]</sup>的实验结果表明,这个体系的全熔合激发函数中还有一系列的宽度约为 500 keV 的中间结构,与其结构峰值相应的熔合临界角动量相差  $1\hbar$ 。我们的实验能区是  $^{12}\text{C}$  离子能量在 43—70.5 MeV, 相应质心系能量范围是  $E_{\text{cm}} = 30-50$

本文 1985 年 6 月 6 日收到。

1) 北京大学。

MeV. 我们在这个能区测量该体系的全熔合激发函数, 目的有两个: 一是考查在这个能区中熔合激发函数是光滑的, 还是存在某种类共振结构? 二是希望能和现有的低能区数据衔接起来, 用经典势模型来分析整个激发函数, 考查哪个模型能最好地描写该体系的熔合激发函数. 我们对于这个问题是感兴趣的, 这是因为在该体系中实验所得到的熔合截面的饱和值约为 1000 mb, 它明显地低于临近体系的约为 1200 mb 的饱和截面值.

## 二、实 验

实验是在本所 1.5 米重离子回旋加速器上进行的. 加速器引出能量为 72.5 MeV 的  $^{12}\text{C}$  离子, 用铝箔降低  $^{12}\text{C}$  离子能量. 铝箔是经仔细称重来确定厚度的. 由铝箔厚度和  $^{12}\text{C}$  离子在铝中的能程关系来确定通过铝箔降能后的  $^{12}\text{C}$  离子能量. 靶材料为天然硅, 利用真空蒸发制成无衬底靶, 厚度约为  $100 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ . 利用  $\Delta E-E$  望远镜系统鉴别和测量全熔合的蒸发余核.  $\Delta E$  探测器是气流式电离室, 阻止探测器  $E$  是 Si(Au) 面垒型半导体探测器. 电离室的有效长度为 4 cm, 充的气体是 Ar(90%) 和  $\text{CH}_4$  (10%) 的混合气体, 气压控制在 30mm 汞高附近, 相应质量厚度约为  $0.25\text{mg}/\text{cm}^2$ . 这样厚度的气体给散射离子  $^{12}\text{C}$  造成的能量损失约在 0.4—0.5 MeV, 蒸发余核的能量损失约在 4—5 MeV. 电离室的人射窗为  $0.8 \mu\text{m}$  厚的黄腊膜. 望远镜系统的分辨率约为 6—7%, 能分开  $Z \leq 13$  的各种元素. 对于反冲余核, 由于探测系统分辨本领的限制以及产物能量较低, 实验中未能分开各种元素.

实验中, 对于  $E_L = 46, 58, \text{和 } 70.5 \text{ MeV}$  三个能量点测量了余核角分布, 测量的角度范围是  $5^\circ - 35^\circ$ . 在  $E_L = 43.0 - 70.5 \text{ MeV}$  的范围内, 以  $\Delta E = 1 - 2 \text{ MeV}$  的步长, 选定了 20 个能量点, 在单一角度测量全熔合截面. 在全熔合激发函数的测量中, 把望远镜系统固定在  $9.3^\circ$ , 测量了该角度的微分截面, 利用小角弹性散射(假设是纯库仑散射)对截面做绝对归一. 对 46, 58 和 70.5 MeV 三个能量点测量的余核角分布做对角度的积分, 求出全熔合总截面. 它们与  $9.3^\circ$  的相应微分截面之比分别为 0.333, 0.324 和 0.346,

表 1  $^{12}\text{C} + ^{28}\text{Si}$  全熔合反应实验结果

$E_i$ MeV	43.0	45.2	46.6	48.4	50.3	51.8	52.7	54.1	55.3	56.3
$E_{CM}$ MeV	30.1	31.7	32.6	33.9	35.2	36.2	36.9	37.9	38.7	39.4
$\sigma_{CF}$ mb	723	912	978	945	1092	1095	1022	978	987	1000
$\Delta\sigma$ mb	28	36	39	35	41	39	39	40	36	39
$l_{cr}$	16.2	18.8	19.7	19.8	21.7	22.0	21.5	21.3	21.6	22.0
$E_i$ MeV	57.3	58.4	59.3	62.3	64.1	65.0	66.6	68.2	69.6	70.5
$E_{CM}$ MeV	40.1	40.9	41.5	43.6	44.8	45.5	46.6	47.7	48.7	49.4
$\sigma_{CF}$ mb	963	988	994	1110	1023	1108	1022	961	985	996
$\Delta\sigma$ mb	34	33	34	37	35	41	37	35	33	34
$l_{cr}$	21.7	22.3	22.5	24.4	23.7	24.9	24.2	23.7	24.3	24.6

没有看到随能量的系统变化,在 $\pm 3.5\%$ 之内为常数.这个差别大约相当于统计误差和产物鉴别带来的误差.这样我们就取其平均值 0.334 作为从  $9.3^\circ$  测量的微分截面计算总截面的换算系数.

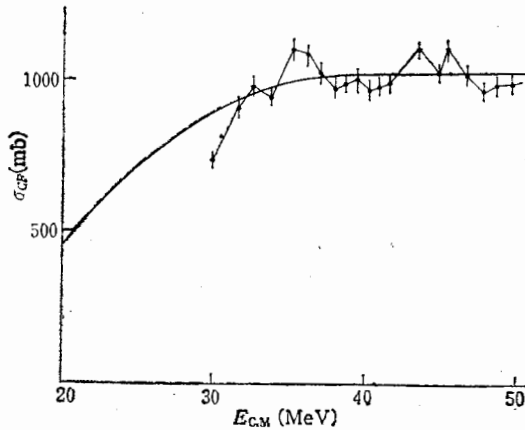


图 1 全熔合激发函数

在表 1 和图 1 中我们给出了对  $^{12}\text{C} + ^{28}\text{Si}$  体系测量全熔合总截面的实验结果,能量误差不大于 0.5 MeV. 标出的截面误差只是非系统性的误差,包括统计误差,产物鉴别误差及求角度积分时系数的误差. 此外,还有两项较大的误差. 一个是几何条件所造成的误差,估计约 6%,由于在整个激发函数的测量过程中,我们没有改变测量系统的任何几何条件,所以它对所有能量点的影响是同向的,且大体相同. 另一项是望远镜系统的低能切断阈,对此我们利用反冲余

核能谱的经验公式做了修正,这种修正的误差在最高能量点估计大约为 3.5%,它随能量的降低而增加,到最低能量点时大约为 12%. 这样总误差在最高能量点约为 8% ( $\pm 85$  mb),在最低能量点约为 14% ( $\pm 100$  mb).

### 三、结果讨论

#### 1. 激发函数的模型分析

图 (2) 给出了本实验结果及其它实验结果. 从实验能区来讲,我们的能区正好和其它实验能区衔接起来了. 本结果在最低能量 ( $E_{\text{cm}} = 30\text{MeV}$ ) 时截面过低,可能是由探测器的阈造成的. 30 MeV 以下的四组数据分歧很大,基本上可分为两组. Jordan 的结果偏低<sup>[1]</sup>,而 Gary<sup>[2]</sup>, Lesko<sup>[3]</sup> 和 Racca<sup>[4]</sup> 的三组数据大体相符. 这两组截面大约相差 150mb,但在最高能量 30 MeV 时都达到约 1000 mb 的截面值. 我们在 30 MeV 以上的数据可以与低能区的结果光滑地联结起来. 激发函数的平均行为表现出从位垒区到临界距离区变化. 饱和区截面平均值约为  $1020 \pm 85$  mb.

我们且不管激发函数的结构,先讨论它的平均行为. 全熔合激发函数一般是用经典势模型来描写的. 在低能区,认为是光学势实部的位垒穿透决定了熔合截面,可以写成

$$\sigma_{CF} = \pi k^2 \sum_l (2l+1) T_l, \quad (1)$$

其中  $T_l$  为  $l$  分波的位垒穿透系数. 在一定能量以上,当临界距离成为限制熔合的更苛刻的因素时,熔合截面可以写成

$$\sigma_{CF} = \pi R_{cr}^2 \left(1 - \frac{V_{cr}}{E}\right), \quad (2)$$

其中  $R_{cr}$  和  $V_{cr}$  分别为临界距离和临界势. 在  $s$ -波近似的假设下,对位垒采用抛物线近

似, Glas 和 Mosel<sup>[5]</sup> 把两种限制机制合并在一方程中

$$\sigma_{CF} = \frac{\hbar\omega_0}{2} \frac{R_B^2}{E} \ln \frac{1 + \exp[2\pi(E - V_B)/\hbar\omega_0]}{1 + \exp\left[\frac{2\pi}{\hbar\omega_0} [E - V_B - (E - V_{cr})R_{cr}^2/R_B^2]\right]} \quad (3)$$

方程中共五个调整参数:  $R_B$ 、 $V_B$ 、 $R_{cr}$ 、 $V_{cr}$  和  $\hbar\omega_0$ , 其中  $R_B$  和  $V_B$  分别为熔合位垒半径和位垒高度,  $\hbar\omega_0$  为位垒曲率参数, 除在次位垒能区, 计算截面对它不灵敏, 这样我们把  $\hbar\omega_0$  固定在 5 MeV, 以  $R_B$ 、 $V_B$ 、 $R_{cr}$  和  $V_{cr}$  为调整参数来符合实验的熔合激发函数. 对于 30 MeV 以下的实验结果我们取高组数据. 图 2 中给出了符合曲线. 参数是:  $R_B = 7.2\text{fm}$ ,  $V_B = 13.0\text{ MeV}$ ,  $R_{cr} = 5.70\text{ fm}$ ,  $V_{cr} = 0$ . 这里要指出,  $R_B$  与系统值相比是偏低的, 同时  $V_B$  似乎也偏低. 这或许说明对于这个体系,  $s$ -波近似适应性不够好.

所谓  $s$ -波近似是在位垒穿透模型中假设不同的  $l$  分波的有效位垒半径不随  $l$  变化, 都取  $l = 0$  分波的值  $R_B$ . 现在我们不用这个假设, 直接用方程 (1) 来计算熔合截面. 假设能穿透位垒的轨道就被捕获发生熔合. 这样对于不同轨道角动量  $l$  的有效势

$$V_l(r) = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{r} + V_N(r) + \frac{l(l+1)\hbar^2}{2\mu r^2}, \quad (4)$$

只有存在势阱的势曲线才可能发生捕获. 对核势  $V_N(r)$  取亲近势<sup>[6]</sup>. 这样  $^{12}\text{C} + ^{28}\text{Si}$  体系的有阱存在的角动量是  $l < 23$ , 相应轰击能量为 40.5 MeV. 在轰击能量继续提高时,

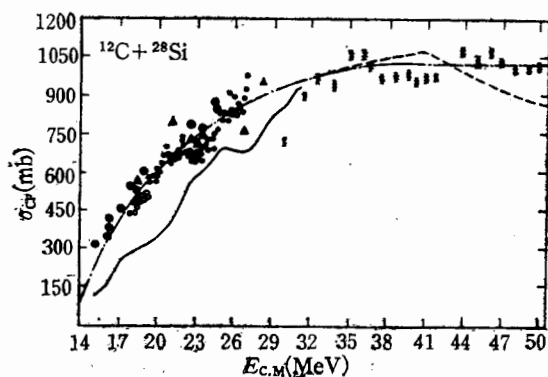


图 3

截面将下降, 如图 3 中曲线 1 所示. 在 38 MeV 以下与实验符合很好, 在 38 MeV 以上不能描写实验结果. 需要引入临界距离的概念, 即假设在  $R_{cr}$  处发生阻尼, 不仅径向动能下降到零, 且轨道角动量由初始值  $l_{in}$  下降到  $l_f = fl_{in}$ . 阻尼系数  $f$  在滚动极限中为  $5/7$ , 在粘结极限中  $f = [1 + (I_1 + I_2)/(\mu R_c^2 + I_1 + I_2)]^{-1}$ .  $R_c$  为两核半密度半径之和,  $I_1$  和  $I_2$  分别为两核的惯性矩. 这样在一定范围之内阻尼前没有阱的角动量  $l_{in}$ , 在阻尼后的  $l_f$  还存在势阱, 可以发生熔合. 这样计算的截面如图 3 中曲线 2 所示, 临界半径取  $R_{cr} = 1.07(A_1^{1/3} + A_2^{1/3})$ . 计算与实验的符合是好的. 以亲近势为基础的经典势模型, 若假设在  $R_{cr} = 1.07(A_1^{1/3} + A_2^{1/3})$  的临界距离上发生强阻尼, 能很好地描写  $^{12}\text{C} + ^{28}\text{Si}$  体系

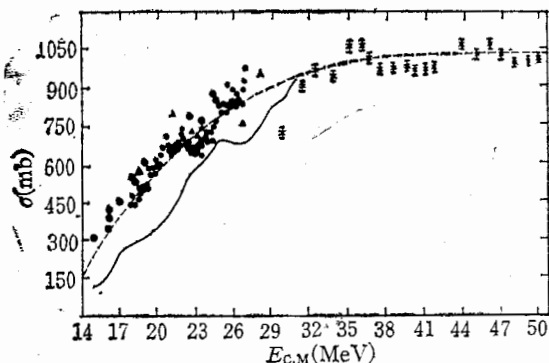


图 2

\*——本工作 ———— W. J. Jordan et al.<sup>[1]</sup> ●——S. Gary et al.<sup>[2]</sup> ▲——K. T. Lesko et al.<sup>[3]</sup> ○——R. A. Racca et al.<sup>[4]</sup>

的全融合激发函数。其中位垒参数为:  $R_B = 7.90\text{fm}$ , ( $r_B = 1.48\text{fm}$ ),  $V_B = 13.8\text{MeV}$ , 比 Glas-Mosel 公式提取值更接近于系统值。在  $R_{cr} = 5.70\text{fm}$  时, 亲近势给出  $V_{cr} = 0.48\text{MeV}$ , 近于零。

不同于势模型, 统计 yrast 线模型<sup>[7]</sup>认为是复合核的统计性质限制了重离子体系融合形成复合核。在  $(E^*, l)$  相空间中, 统计 yrast 线是与 yrast 线相平行, 相距  $\Delta Q$  的一条线, 可以写成

$$E^* = \frac{l(l+1)\hbar^2}{2J} + \Delta Q, \quad (5)$$

其中  $J$  是复合核的惯性矩, 刚体值为  $J = \frac{2}{5} MR^2$ ,  $M$  和  $R$  分别为复合核的质量和半径。这样, 用统计 yrast 线符合实验数据有两个参数, 半径参数  $r_0 = R/A^{1/3}$  和复合核可能的最小内激发能  $\Delta Q$ 。图 4 给出了从实验截面提取的临界角动量和复合核激发能的关系。图中给出了用方程 (5) 符合实验点的结果, 符合参数是:  $r_0 = 1.18\text{fm}$ ,  $\Delta Q = 10.8\text{MeV}$ 。这个结果与分析大量数据得到的系统结果是相符的。  $E_{cm} < 35\text{MeV}$  时, 实验点偏离这条直线, 这是因为位垒穿透效应限制了融合过程。

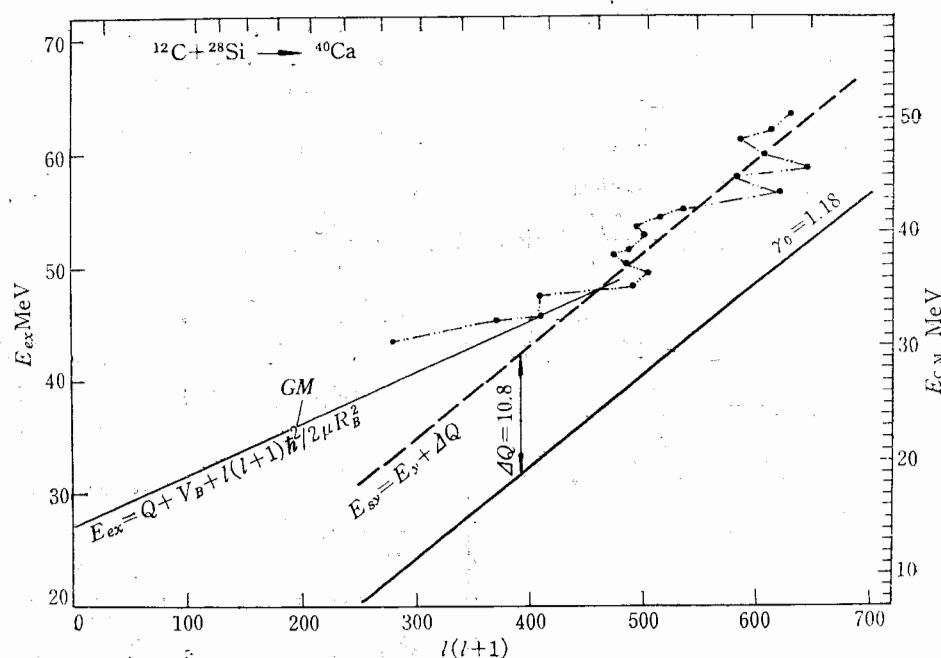


图 4 复合核激发能与临界角动量之关系

$$Q = 13.0\text{MeV} \quad V_B = 15.1\text{MeV} \quad R_B = 7.59\text{fm} \quad \mathcal{I} = \frac{2}{5} MR^2 \quad R = r_0 A^{1/3}$$

## 2. 激发函数中的结构

在  $^{12}\text{C} + ^{28}\text{Si}$  反应中, 全融合截面随能量的变化并不是光滑的, 而是存在某些结构。在  $30\text{MeV}$  以下的低能区, Jordan 等人观测到在  $25\text{MeV}$  有一弱结构, 峰在  $25\text{MeV}$ , 谷约

在 21 和 26 MeV, 这是一个宽结构。Racca 等人观测到一系列的中间结构, 宽度约为 500 keV, 这些结构峰位分别是 19.6 MeV, 20.6 MeV, 22.0 MeV, 23.9 MeV 和 25.1 MeV, 由截面提取的角动量以  $1\hbar$  为间隔。我们在 30 MeV 以上的结果, 也存在结构, 其峰位在  $\sim 35.5$  MeV, 或许在 44.5 MeV 附近还有一个峰, 这是宽度在 2 MeV 以上的宽结构。这两个峰值截面相应的临界角动量分别是  $22\hbar$  和  $24.3\hbar$ 。我们仔细考查 Racca 的实验结果, 可以看到除去中间结构, 实际上还有某种宽结构, 在 21—22 MeV 和  $\sim 25$  MeV, 有宽结构峰存在。另外, Racca 在 27 MeV 和 Lesko 在 28 MeV 的截面都有较高数值, 我们认为可能有一个峰。根据 Jordan 的数据和我们数据的联结衔接情况, 我们设想在 32 MeV 还可以有一个能量峰。当然这两个峰的实验证据是不足的, 在这里可以当作一个推测。这样对于激发函数中的宽结构将有以下峰位: 22, 25, (27.5), ( $\sim 32$ ), 35.5 和 44.5 MeV。而在这些能量点提取全熔合临界角动量相间可能是  $2\hbar$ 。

背角弹性散射激发函数现在有 35 MeV 以下的的数据, 见图 5<sup>[8]</sup>。它有很强的振荡结构, 其峰位分别在 20.5, 23.5, 26, 30, 34 MeV, 而谷位约在 18, 22, 25, 27.5, 32 和 36 MeV。与前面给出的熔合激发函数中的宽结构的峰位相比较, 我们可以看到, 熔合激发函数中的宽结构和背角弹性散射激发函数中的结构是成反向关联的。

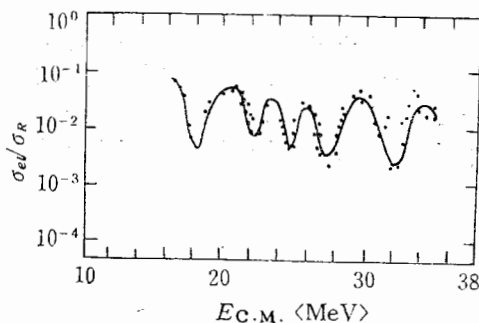


图 5  $^{12}\text{C} + ^{28}\text{Si}$  反应背角弹性散射激发函数

### 3. 结论

我们从  $^{12}\text{C} + ^{28}\text{Si}$  体系的全熔合截面现有数据的分析中得到以下结论。

(1) 该体系的熔合激发函数可以用 Glas-Mosel 公式符合, 但得到的位垒半径和位垒高度偏低。以亲近势为基础的势模型可以很好地复现激发函数。

(2) 在  $E_{cm} = 35-50$  MeV 范围内, 临界距离模型和统计 yrast 线模型都能满意地复现实验数据, 单此体系不能判定那个模型更适宜。

(3) 该体系的熔合激发函数中可能存在一系列的宽结构, 它们与背角弹性散射激发函数中的结构是反向关联的。这些结构的角动量可能相间  $2\hbar$ 。

### 参 考 文 献

- [ 1 ] W. J. Jordan et al., *Phys. Lett.*, **87B**(1979), 38.
- [ 2 ] S. Gary et al., *Phys. Rev.*, **C25**(1982), 1877.
- [ 3 ] K. T. Lesko et al., *Phys. Rev.*, **C25**(1982), 872.
- [ 4 ] R. A. Racca et al., *Phys. Lett.*, **129B**(1983), 294.
- [ 5 ] D. E. Glas and V. Mosel, *Nucl. Phys.*, **A237**(1975), 429.
- [ 6 ] J. Block et al., *Ann. of Phys.*, **105**(1977), 427.
- [ 7 ] S. M. Lee et al., *Phys. Rev. Lett.*, **45**(1980), 165.
- [ 8 ] J. Barrette et al., *Phys. Rev. Lett.*, **40**(1978), 445.

## MEASUREMENT OF THE COMPLETE FUSION EXCITATION FUNCTION FOR $^{12}\text{C} + ^{28}\text{Si}$ REACTION

ZHENG JI-WEN LIANG GUO-ZHAO LIU HONG-TAO\* BAI XING-PING

MA JUN YAN JIAN-GANG

*(Institute of Modern Physics, Academia Sinica)*

### ABSTRACT

The excitation function for  $^{12}\text{C} + ^{28}\text{Si}$  complete fusion reaction was measured in incident energy 43—70.5 MeV with a  $\Delta E-E$  counter telescope. The experimental complete fusion excitation function shows some gross oscillation structures. The mean behaviour of the experimental data fits the potential model and the statistical Yrast line model well.

---

\* Beijing University.