

294MeV²⁰Ne + ¹⁵⁹Tb 反应发射中等质量 碎片的研究

谢元祥 罗清政 卢俊

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

B. Kotlinski H.W. Wilschut P.C.N. Crouzen H. Kaper

E.E. Koldenhof H.K.W. Leegte R.H. Siemssen

(K.V.I. 9747AA, Groningen, the Netherlands)

1993年8月5日收到

摘 要

在 294MeV²⁰Ne 轰击 ¹⁵⁹Tb 靶的反应中, 用 $\Delta E - E$ 望远镜测量了 10°—150° 发射的中等质量碎片 ($2 < Z \leq 11$) 的能谱。在后角区 ($> 90^\circ$) 这些能谱呈钟罩型, 峰位接近于出射道的库仑位垒。用运动源模型分析了这些能谱, 结果说明这些碎片来自于共同的源——非完全熔合所形成的复合核。用统计模型 GEMINI 程序拟合了碎片的电荷分布和角分布, 计算值和实验值很好的符合证实了中等质量碎片来源于复合核非对称的两体衰变。

关键词 中等质量碎片, 非完全熔合, 非对称两体衰变, 衰变宽度。

1 引 言

在低能区 ($< 10\text{MeV/N}$) 全融合反应形成复合核是重要的反应机制。人们对复合核的形成及衰变机理从实验和理论上均进行了广泛的研究, 通常观察到的复合核衰变方式为蒸发轻粒子 (n, p, α 等) 及裂变, 其产物的质量处于轻、重两个极端。在中能区 ($10 - 100\text{MeV/N}$), 复合体系具有较高的激发能和角动量, 被称为复杂碎片或中等质量碎片 ($Z > 2$) 的产物从复合核中发射出来的。该现象最早在 $90\text{MeV}^3\text{He} + {}^{207}\text{Ag}^{[1]}$ 反应中被观测到, 反应产物从 ${}^4\text{He}$ 、 ${}^7\text{Li}$ 、 ${}^9\text{Be}$ 、 ${}^{10}\text{B}$ 、 C 、 N 、 O 到 F 都存在, 从协变截面图可以看出在后角区的这些产物是从一个运动源以各向同性发射的。能谱的峰位对应于出射道的库仑位垒, 其值随着电荷数的增加而增加, 能谱的形状随电荷数的增加而变化, 由 α 粒子的 Maxwellian 形式逐渐演化到对称形状。

中能重离子轰击某些靶也观测到同样现象^[2]。这些实验采用逆运动学, 用不同的重炮弹轰击不同的轻靶子, 轰击能从低到高变化, 系统地研究了整个质量范围的中等质量碎片随炮弹的种类、轰击能和不同靶子的演化过程。

在我们的实验 ($294\text{MeV}^{20}\text{Ne}$ 轰击 ${}^{159}\text{Tb}$ 反应) 中, 由于轰击能量 ($14.7\text{MeV}/N$) 刚进入中能区, 所发生的反应仍带有低能区产物的特点。在擦边角, 在靠近炮弹的电荷数的产物能谱中, 观测到准弹性和深部非弹性成分。在后角区 ($>90^\circ$), 碎片产物 ($2 < Z \leq 11$) 的能谱均为单一钟罩型, 其峰位接近出射道的库仑位垒, 具有中等质量碎片的特点。由于后角区产物产生的机制比较单一, 本文着重对它们进行了研究: 由运动源模型的分析, 指出碎片主要来源于非完全熔合, 与文献 [3] 对 $290\text{MeV Ne} + \text{Au}$ 反应的分析一致, 在认定为非完全熔合形成复合核的前提下, 用统计模型 GEMINI 程序拟合了电荷分布和角分布, 计算值和实验值很好的符合证明了中等质量碎片的发射确实来源于复合核非对称的两体衰变。

2 实 验

实验是在荷兰 KVI 完成的, AVF 回旋加速器提供了 294MeV 的氦束, 用碾压方法制备的 Tb 靶厚度为 $3.9\text{mg}/\text{cm}^2$ (为防止轻元素的沾污, 靶子是在惰性气体中制备和传输到靶室)。探测器为两套金硅面垒 ΔE - E 望远镜; 一套测前角区 (10° - 80°), ΔE 厚 $49.6\mu\text{m}$, E 厚为 5mm , 光栏尺寸是 $\varphi 8$, 距离靶 13.5cm ; 另一套安置在束流另一边测后角区 (80° - 150°), ΔE 厚 $19.5\mu\text{m}$, E 厚为 2mm , 距离靶 7.5cm 。两套探测器分别装在不同的活动臂上, 在 10° - 150° 范围内测量了 12 组数据。所有 Si 探测器均冷却到 -20° , 为抑制次级电子, 在探测器的准直器前方均放置了小的磁铁。电流积分器测量了束流强度, 精密脉冲产生器刻度了电子学系统的线性, 用弹性散射峰刻度了能量, 事件被逐一记录在磁带上, 数据离线分析在近物所 VAX8350 上完成, 截面误差估计小于 20%。

3 实验的结果与分析

实验测量了从 α 粒子到 Na 粒子, 在 10° - 150° 角度范围内的能谱、角分布和电荷分布。图 1 给出了有代表性的 Li 及 C 的能谱。这些能谱的共同特点是: 在前角区能谱较宽, 高能尾巴伸向较远的地方; 对于较小电荷数的能谱只有一个峰, 而电荷数接近炮弹的能谱在擦边角附近出现了准弹和深部非弹性峰; 角度大于 90° 的能谱, 高能端的斜率不再变化, 能谱的峰位接近于出射道的库仑位垒, 但随着元素电荷数增加能谱高能端下降斜率也增加, 这个现象与文献 [1] 在大角度观测到的情形完全一致。

将能谱转换成速度平面中的洛仑兹协变形式, 在后角区发现对所有元素来说相同值的截面处于同一圆弧上, 恒定的洛仑兹协变截面中心即是源速度, 它小于全熔合速度。这些圆弧的存在说明了产物是从一个运动源各向同性发射出来的, 在前角区的协变截面图中可以看到产物来源于几种不同的机制: 炮弹的裂开, 准弹性, 深部非弹性等。图 2 给出了以 N 元素为代表的洛仑兹协变截面图。

对于后角区产物, 由于来源比较单一, 我们对它进行研究, 并用运动源模型来拟合所得能谱。假设在源的静止系内, 出射产物 (从 Li 到 Na) 是各向同性发射的, 能谱具有麦克斯韦尔分布形式:

$$\frac{d^2\sigma}{dE d\Omega} \propto E e^{-E/T}, \quad (1)$$

转换到实验室系,并对产物受到余核的库仑排斥做修正:

$$\frac{d^2\sigma_{lab}}{dE_{lab} d\Omega_{lab}} \propto E_{lab}^{1/2} E^{1/2} e^{-E/T}, \quad (2)$$

$$E = E_{lab} - ZE_C + E_1 - 2(E_{lab} - ZE_C)^{1/2} E_1^{1/2} \cos\theta_{lab},$$

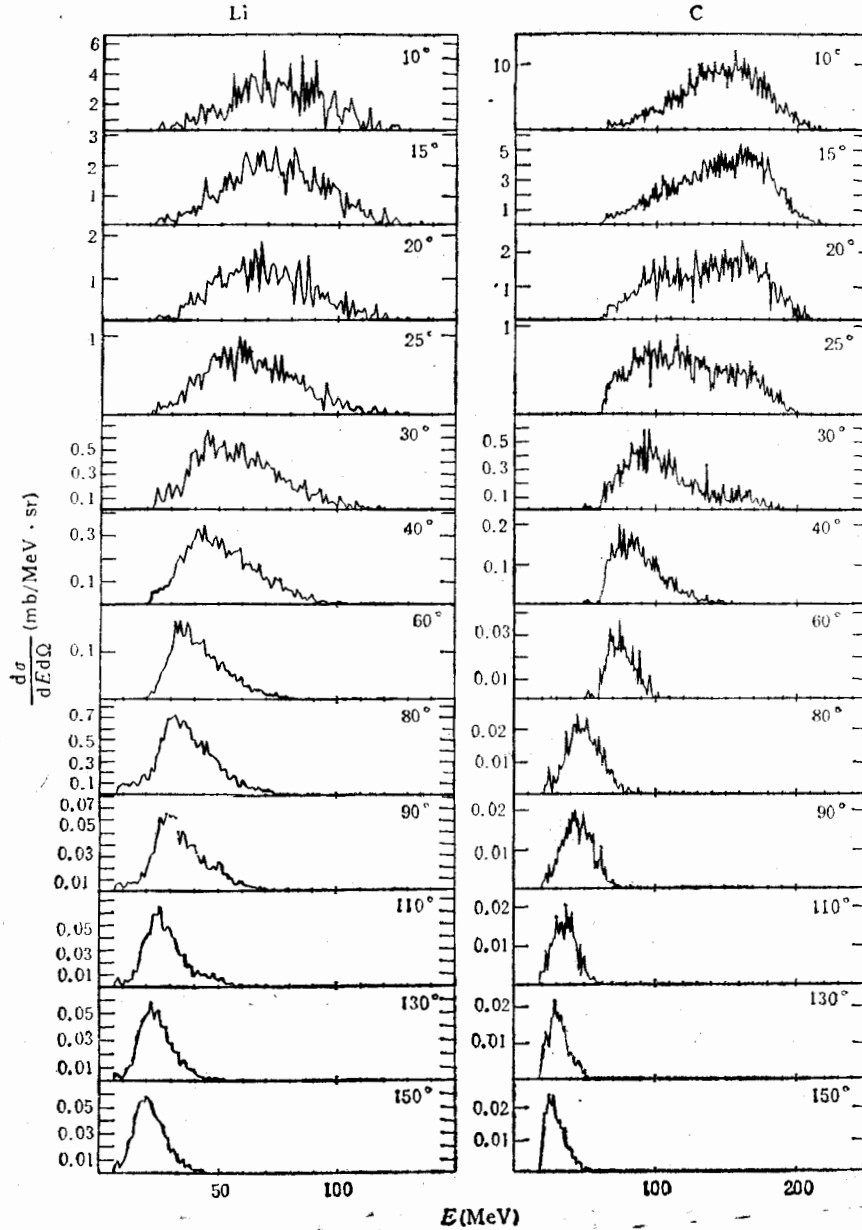


图1 $294\text{MeV}^{20}\text{Ne} + ^{159}\text{Tb}$ 反应中出射的 Li 及 C 元素的能谱

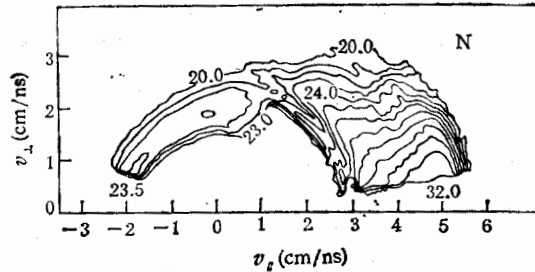


图 2 $294\text{MeV}^{20}\text{Ne} + {}^{139}\text{Tb}$ 出射的 N 元素在速度平面上的洛伦兹协变截面等高图

其中 $E_{i,a,b}$ 为产物在实验室系的能量, E_c 为单位电荷的库仑能, Z 为产物的电荷数, $E_1 = mv^2/2$, 为产物在源系内处于静止时在实验室系的动能, v 为源速度。

对从 Li 到 Na 拟合后角区能谱的参数列在表 1 中。

表 1 运动源模型拟合中等质量碎片所用的参数

元素 参数	Li	Be	B	C	N	O	F	Ne	Na
$v(\text{cm/ns})$	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45
$ZE_c(\text{库仑})$	24	28	30	35	38	41	45	50	48
$T(\text{MeV})$	6.5	6.8	7.2	7.5	7.8	7.9	8.5	8.8	8.8

从表中可以看到: 中等质量碎片的源速度全都相同(0.45cm/ns), 这暗示这些碎片是从一个共同的源发射的。这个值是复合核的速度(0.6cm/ns)的四分之三, 相应于炮弹在靶附近裂开, 出射一个 α 粒子, 然后再与靶组合成一体。由非完全熔合形成复合体, 并由此发射各种碎片。

从能谱高能端斜率决定的表观温度, 随着碎片的质量增加而增加, 尽管在拟合能谱时, 温度在 0.5MeV 范围内变化均能得到好的结果, 但是温度逐渐升高这一趋势是存在的。这反映了发射的碎片越重, 其源具有的温度越高。对于 $3 \leq Z \leq 11$ 碎片的平均温度为 7.7MeV, 文献[4]给出 $15\text{MeV}/N$ 时 $C + \text{Ag}$, $C + \text{Au}$ 的表观温度分别为 7.2 ± 1.0 ($3 \leq Z \leq 13$) 和 6.2 ± 1.0 ($4 \leq Z \leq 11$), 我们的数据与此吻合, 此值比通常认为的复合核温度要高。

用统计模型 GEMINI^[2] 程序计算了发射碎片的截面, 该程序考虑了从轻粒子蒸发到对称分开的所有可能衰变过程。

蒸发轻粒子 ($Z \leq 2$) 的宽度用 Hauser-Feshbach 理论, 对复合核 (A_0, Z_0, J_0, E^*) 发射粒子 ($A_1, Z_1, J_1, \varepsilon$) 形成余核 (A_2, Z_2, J_2, U_2) 的衰变宽度为:

$$\Gamma_{J_2}(Z_1, A_1, Z_2, A_2) = \frac{2J_1 + 1}{2\pi\rho_0} \sum_{l=|J_0 - J_1|}^{J_0 + J_1} \int_0^{E^* - B - E_{\text{rot}}(J_2)} T_l(\varepsilon) \rho_2(U_2, J_2) d\varepsilon \quad (3)$$

其中 ρ_0 为复合核能级密度, ρ_2 为余核能级密度, ε 是粒子动能, l 是粒子出射的轨道角动量, B 是结合能, $U_2 = E^* - B - E_{\text{rot}}(J_2) - \varepsilon$ 是余核激发能, $E_{\text{rot}}(J_2)$ 是余核的转动

加形变能。穿透系数 $T_l(\epsilon)$ 用锐截止近似:

$$T_l(\epsilon) = \begin{cases} 0, & \text{对 } \epsilon < E_c + \hbar^2 l(l+1)/2\mu R^2 \\ 1, & \text{对 } \epsilon \geq E_c + \hbar^2 l(l+1)/2\mu R^2 \end{cases} \quad (4)$$

其中 μ 为约化质量, R 为强吸收半径

$$R = \begin{cases} 1.16 A_2^{1/3} + 2.6(\text{fm}), & \text{对 中子、质子} \\ 1.16 A_2^{1/3} + 3.7(\text{fm}), & \text{对 } \alpha \end{cases} \quad (5)$$

库仑能 E_c 为

$$E_c = \begin{cases} 1.44 Z_2 / (1.18 A_2^{1/3} + 3.928), & \text{对 质子} \\ 2.88 Z_2 / (1.18 A_2^{1/3} + 4.642), & \text{对 } \alpha \end{cases} \quad (6)$$

能级密度采用自旋相关费米气体能级密度表达式

$$\rho(U, J) = (2J + 1) \left[\frac{\hbar^2}{2\mathcal{I}} \right]^{3/2} \frac{\sqrt{a} \exp(2\sqrt{aU})}{12 U^2}, \quad (7)$$

\mathcal{I} 是余核或鞍点形状处的转动惯量, a 是能级密度参数取为 $A/8.5$.

对于 $Z > 2$ 的重碎片的发射, 是根据 Moretto 跃迁态公式计算衰变宽度:

$$\Gamma(Z_1, A_1, Z_2, A_2) = \frac{1}{2\pi\rho_0} \int_0^{E^* - E_{\text{sad}}(J_0)} \rho_{\text{sad}}(U_{\text{sad}}, J_0) d\epsilon, \quad (8)$$

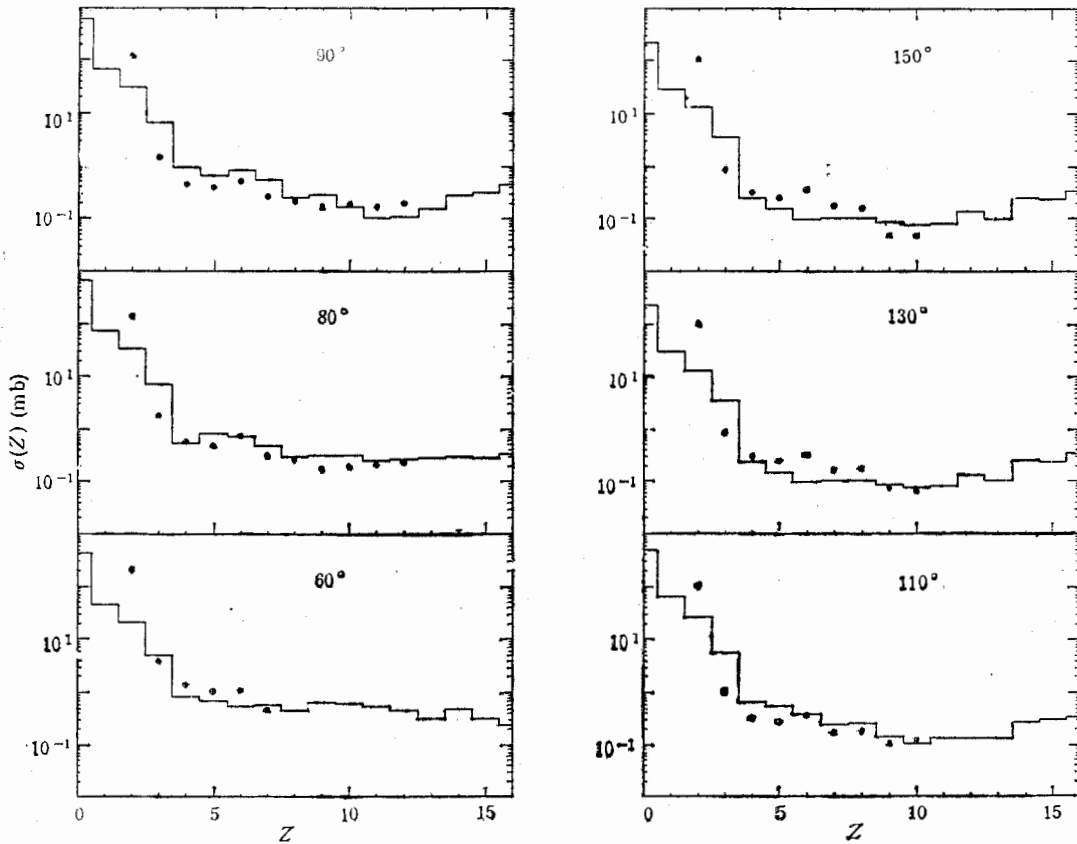


图3 $294\text{MeV } ^{20}\text{Ne} + ^{197}\text{Tb}$ 反应中出射的中等质量碎片电荷分布的实验值与计算值比较

这里 $U_{\text{a,d}}$ 和 $\rho_{\text{a,d}}$ 是条件鞍点结构的热能和能级密度

$$U_{\text{a,d}} = E^* - E_{\text{a,d}}(J_0) - \varepsilon, \quad (9)$$

$E_{\text{a,d}}(J_0)$ 是鞍点结构的形变加转动动能, 它作为质量非对称参数和角动量的函数由转动有限程液滴模型 (RFRM) 给出。能级密度仍用费米气体能级密度。

在衰变的每一步都考虑了从中子、质子等轻粒子蒸发到对称裂变的所有可能的两体衰变, 每一步衰变后, $Z > 2$ 的次级重碎片允许再次衰变直到激发能全部耗尽。重碎片的发射和余下部分的激发能分配以假设两碎片具有相同的核温度而进行。角动量分配使用了粘滞极限假设, 激发能和角动量分配的涨落都相应考虑了。

电荷分布是通过对人射道 l 分波求和得到:

$$\sigma(Z) = \pi\lambda^2 \sum_{l=0}^{l_{\text{max}}} (2l+1) T_l(Z), \quad (10)$$

$T_l(Z)$ 是特定的衰变步长在角动量为 l 时的几率, l_{max} 是熔合模型给出的最大角动量。

考虑到运动源模型对能谱的拟合结果, 在计算时是用非完全熔合的情况, 此时

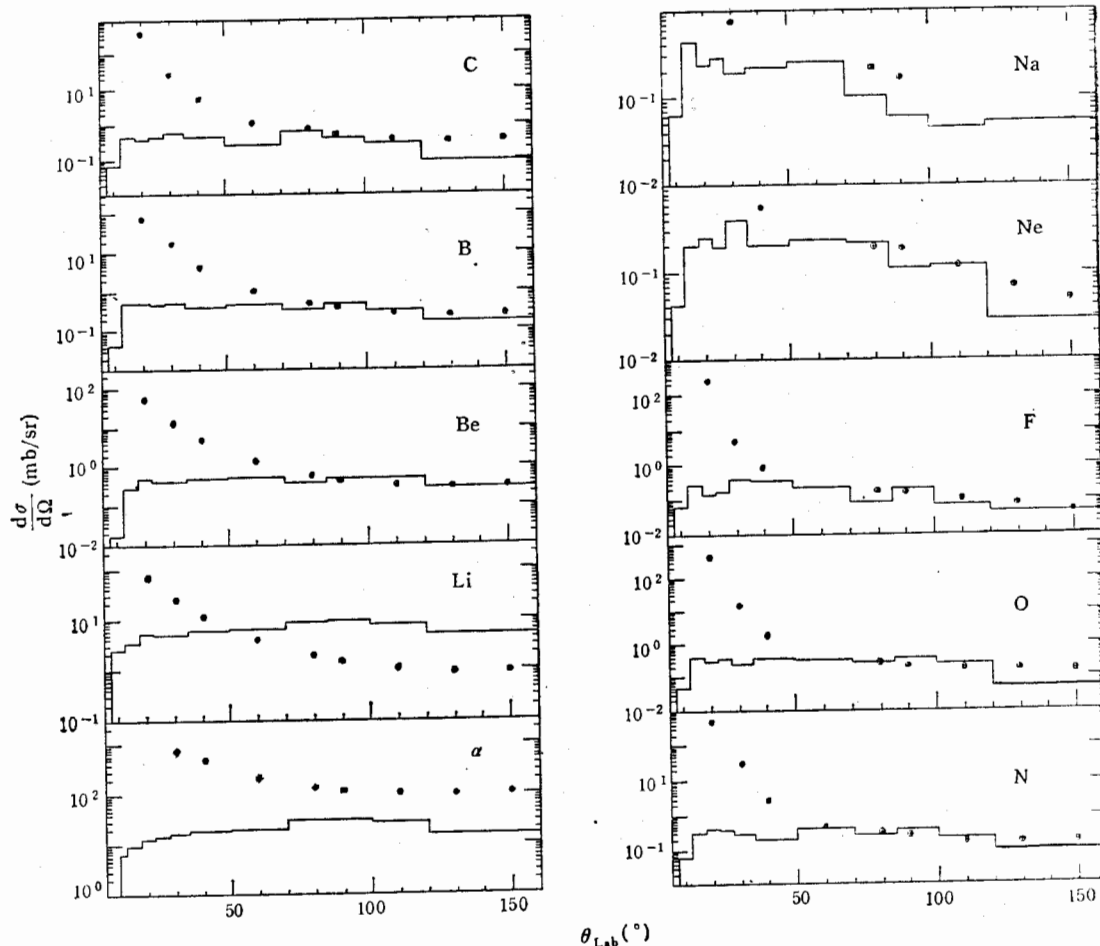


图 4 $294\text{MeV}^{20}\text{Ne} + ^{159}\text{Tb}$ 反应出射的中等质量碎片的实验角分布和计算值比较

$E^* = 190\text{MeV}$, 最大角动量为 $77\hbar$ 。

图3给出6个角度处测得的中等质量碎片电荷分布(实点)与复合核统计衰变模型 GEMINI 计算的结果(直方图)的比较。计算值无论从形状或大小来看均与实验值拟合得较好。

在计算中角动量是该统计模型输入参数中唯一不确定量, 因此限制了对实验进行定量比较, 采用理论值 l_{\max} 计算结果与实验的定量比较, 由图可见也是相当满意的, 截面分布的形状及其大小可由激发能和角动量分布的合理假设来解释, 这是复合核统计衰变过程的明显特征。

图4给出了 $Z = 2$ 到 $Z = 11$ 等十种中等质量碎片的角分布 $d\sigma/d\Omega$, 实点为实验值, 直方图是计算的结果。对于 $Z \geq 4$ 碎片而言, 计算值无论是形状或大小都与实验值一致。实验值在小角区高于理论值是因为单举测量中没有扣除准弹、深部非弹等非平衡过程产物的贡献。对所有的 Z 值计算给出的角分布大致是平的, 这与低能重离子反应中核裂变测得角分布相似。这意味着中等质量碎片正是来源于核的两体裂变过程, 这时的核裂变已不再是单一的对称裂变, 而是包括了所有可能的非对称分裂行为。

总之, 由于 GEMINI 在研究低、中能核反应的中等质量碎片出射中取得了很大的成功, 为了解释本次实验中所测得的碎片产额、特征及来源, 采用 GEMINI 程序做了计算。计算值与实验值很好的符合表明: 从低能到中能的过渡区 ($14.7\text{MeV}/N$ ^{20}Ne) 反应中的中等质量碎片出射同样是来源于复合核的两体衰变过程。复合核在此能区仍是主要的反应机制。

参 考 文 献

- [1] L.G. Sobotka et al., *Phys. Rev. Lett.*, **51**(1983)2187.
- [2] R.J. Charity et al., *Nucl. Phys.*, **A483**(1988)371.
- [3] C.H. Egelhaaf et al., *Nucl. Phys.*, **A405**(1983)397.
- [4] A.D. Panagiotou et al., *Phys. Rev. Lett.*, **52**(1984)496.

Investigation of Intermediate Mass Fragments Emitted in the Reaction of 294MeV ²⁰Ne + ¹⁵⁹Tb

Xie Yuanxiang Luo Qingzheng Lu Jun

(*Institute of modern physics, Academia Sinica, Lanzhou 730000*)

B. Kotlinski H. W. Wilschut P. C. N. Crouzen H. Kaper

E. E. Koldenhof H. K. W. Leegte R. H. Siemssen

(*K. V. I. 9747AA, Groningen, the Netherlands*)

Received on August 5, 1993

Abstract

Intermediate mass fragments ($2 < Z \leq 11$) emitted from 294 MeV ²⁰Ne + ¹⁵⁹Tb reaction have been measured by ΔE - E telescope counters at the angle of 10° – 150° region. The energy spectra of the fragments at back angle ($>90^\circ$) have bell shape, and their peaks locate near the Coulomb barrier of exit channel. The analysis of the energy spectra has been done in terms of moving source and indicate that all the fragments are emitted from a common source, the compound nuclei formed in incomplete fusion process. The charge and angular distributions of the fragments originated from the asymmetric binary decay of the formed compound nuclei have been calculated based on statistical GEMINI code, and the results are in well agreement with the experimental data.

Key words intermediate mass fragment, incomplete fusion, asymmetric binary decay, decay width.