

$^{19}\text{F} + ^{27}\text{Al}$ 反应产物的角分布、角分散 与耗散机制*

董玉川^{1,2} 王琦^{1;1)} 李松林¹ 段利敏¹ 吴和宇¹
徐华根^{1,2} 陈若富^{1,2} 徐珊珊¹ 韩建龙^{1,2} 李志常³
路秀琴³ 赵葵³ 周平³ 刘建成³ Sergey Yu Kun^{4,5}

1 (中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

2 (中国科学院研究生院 北京 100049)

3 (中国原子能科学研究院 北京 102413)

4 (Centro de Ciencias Fisicas, Campus Morelos UNAM, Cuernavaca, Morales, Mexico)

5 (Nonlinear Physics Group and Department of Theoretical Physics, RSPHYSSE, ANU, Canberra, ACT 0200, Australia)

摘要 完成了 114 MeV $^{19}\text{F} + ^{27}\text{Al}$ 深部非弹性碰撞产物的角分布测量. 分析了反应产物 B, C, N, O, F, Ne, Na, Mg 和 Al 的实验室系角分布, 讨论了反应形成的中间双核系统随时间演化过程中角分布所表现出的耗散特点. 从实验上提取了反应产物各元素的角分散参数并作了角分散参数的理论拟合, 讨论了角分散参数的物理意义以及角分散参数与耗散反应产物的电荷数 Z 之间的依赖关系.

关键词 耗散反应 角分布 角分散

1 引言

角分布的形状是核反应机制的重要判据之一. 例如复合核的形成, 有足够长的相互作用时间使系统内的各个自由度达到平衡, 从而反应产物的角分布表现为在质心系 90° 对称. 又例如单核子转移反应, 相互作用时间比较短, 反应产物的角分布在擦边角成峰. 深部非弹性碰撞是介于直接反应与复合核形成之间的一种反应机制, 反应产物的角分布往往显示出从前角区成峰到后角区平滑的过渡性质, 最典型的角分布形状就是前角区可以用一个斜率、后角区用另外一个斜率来拟合. 本文给出 114 MeV $^{19}\text{F} + ^{27}\text{Al}$ 深部非弹性碰撞产物 B, C, N, O, F, Ne, Na, Mg 和 Al 的角分布的实验结果, 讨论角分布所表现出

的耗散反应机制的特点; 从角分布提取实验的角分散参数, 作角分散参数的理论拟合, 包括量子分散和动力学分散, 并讨论角分散参数所揭示的物理意义.

2 实验简述

在中国原子能科学研究院完成了 $^{19}\text{F} + ^{27}\text{Al}$ 耗散反应产物的角分布测量. 114 MeV 的 $^{19}\text{F}^{8+}$ 束流由 HI-13 串列静电加速器提供, 轰击厚度为 $60\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 的 ^{27}Al 同位素靶, 在 Q3D 不锈钢带滑动密封散射室内安装了两套可以转动角度的气体电离室加半导体 ($\Delta E-E$) 望远镜. 作为 ΔE 探测器的电离室内充有长度 6 cm、气压 100 mb 的流动气体 P10, 剩余能量 E 沉积在电离室后部安装的厚度为 $500\mu\text{m}$ 的金硅面垒型半导体探测器内. 探测系统的中心测量角度分别

2004-06-09 收稿

* 国家自然科学基金(10175083), 国家重点基础研究发展规划项目(G2000077400), 中国科学院百人计划, 科技部重大专项前期研究专项基金(2001CCB01200)资助

1) E-mail: wangqi@ns.lzb.ac.cn

为实验室系 $9^\circ, 24^\circ, 40^\circ, 55^\circ, 70^\circ$ 和 85° . 同时, 还完成了 $^{19}\text{F} + ^{27}\text{Al}$ 耗散反应产物的激发函数测量以研究产物的统计特点并提取反应中所形成的中间双核系统的相互作用时间. 激发函数测量中束流 ^{19}F 的入射能量从 110MeV 到 118.75MeV , 能量步长 250keV .

图 1 给出的是入射能量为 114MeV 时 $^{19}\text{F} + ^{27}\text{Al}$ 耗散反应产物在 $\theta_{\text{lab}} = 24^\circ$ 得到的典型的 $(\Delta E-E)$ 散点图. 图 2 是反应产物的电荷分布, 整个望远镜系统的电荷分辨 $Z/\Delta Z \approx 30$.

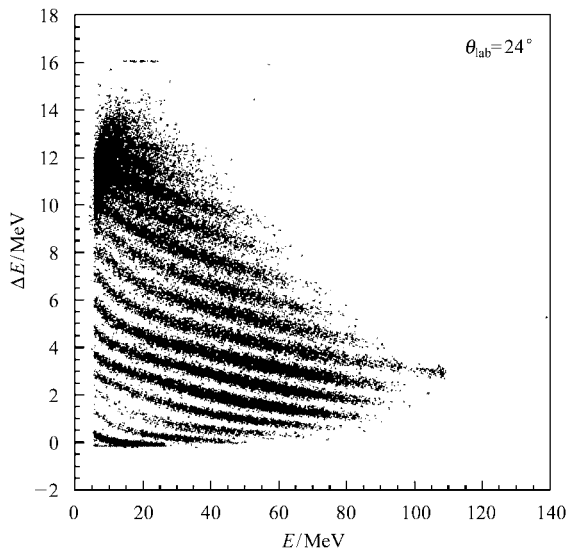


图 1 $114\text{MeV } ^{19}\text{F} + ^{27}\text{Al}$ 反应在 $\theta_{\text{lab}} = 24^\circ$ 得到的 $(\Delta E-E)$ 散点图

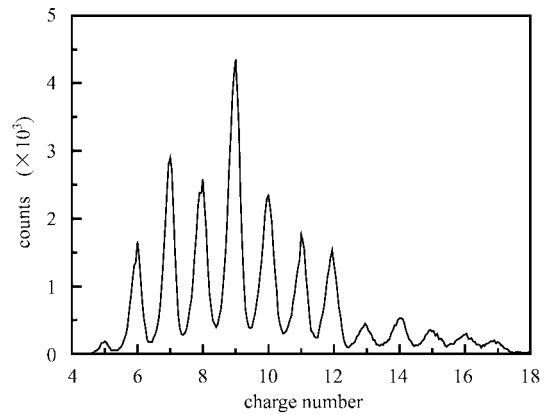


图 2 $114\text{MeV } ^{19}\text{F} + ^{27}\text{Al}$ 反应产物在 $\theta_{\text{lab}} = 24^\circ$ 的电荷分布

3 角分布

图 3 是 $114\text{MeV } ^{19}\text{F} + ^{27}\text{Al}$ 反应产物 B, C, N, O, F, Ne, Na, Mg 和 Al 的角分布. 其中, N, O, F, Ne, Na 和 Mg 各元素的角分布形状类同, 呈现出从前角区成峰到后角区平滑的过渡特点, 是典型的深部非弹反应产物的角分布形状. B 和 C 角分布的形状在前角区出现了明显的下降, 这是由于这两个元素从炮弹所转移出的核子数较多, 在反应初期没有足够的时间允许系统来彻底完成这一多核子转移过程.

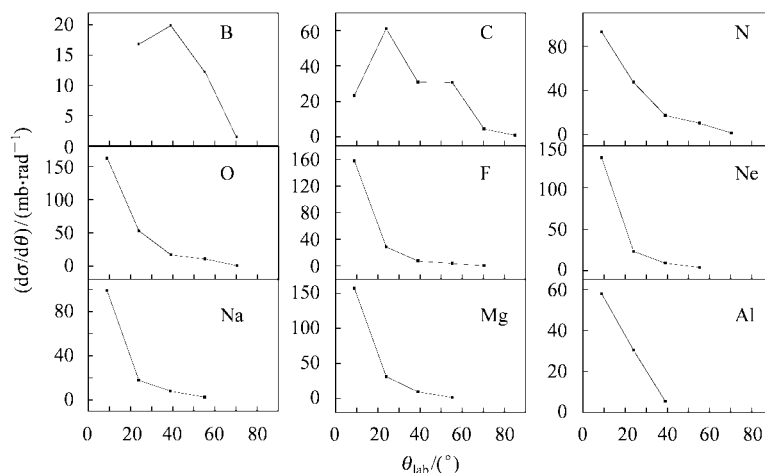


图 3 $114\text{MeV } ^{19}\text{F} + ^{27}\text{Al}$ 深部非弹反应产物的角分布

按照不同出射角度对 $114\text{MeV } ^{19}\text{F} + ^{27}\text{Al}$ 深部非弹性反应产物所作的元素分布如图 4 所示. 在 9° , 核反应处于初始阶段, 直接成分有显著的贡献, 少数

核子转移产物 O 和 Mg 的截面最大, F 的产额也不低, 随着被转移核子数的增加, 总的变化趋势是反应产物的截面渐次减少. 在 24° 的元素分布中, 与 9° 的

元素分布相比较,截面下降最突出的是 F,其次是 O 和 Mg,这表明随着相互作用时间的增长,产物中直接反应的成分迅速减少,耗散成分渐次增强. 在 40° 和 55° , 反应中的耗散程度更加加深,元素分布有了明显的结构效应,凡电荷数 Z 为偶数的产物都有比较高的截面,而电荷数 Z 为奇数的产物截面都比较

低. 在 70° 以后角区的元素分布中,各产物反应截面迅速下降,奇偶结构效应也已经难以看到. B 元素的情况比较典型,不管在哪个角度出射,反应截面始终都不大,这是因为它出射所需要转移的核子数太多的缘故.

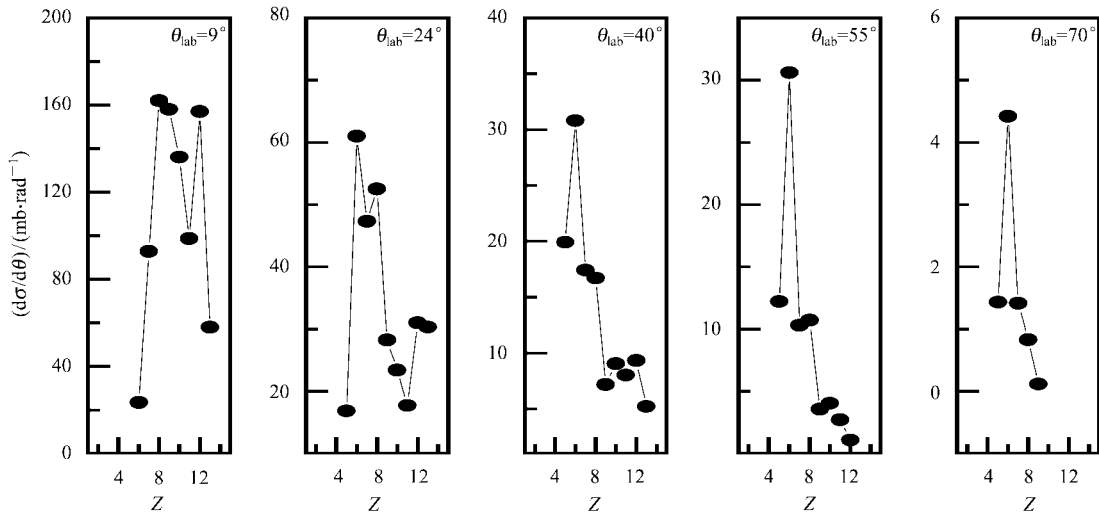


图 4 $^{114}\text{MeV } ^{19}\text{F} + ^{27}\text{Al}$ 深部非弹产物在不同出射角度的元素分布

4 角分散的实验提取

根据 Strutinsky 模型^[1],擦边碰撞中不同角度的微分截面 $d\sigma/d\theta$ 相对于反应振幅中有贡献的有限分波数呈现出指数变化的行为:

$$\frac{d\sigma}{d\theta} \propto e^{-|(\theta - \theta_0)/\xi|^2} + e^{-(\theta + \theta_0)/\xi^2}, \quad (1)$$

其中 ξ 称为角分散参数, θ_0 是角分布曲线中最大值所对应的散射角.

下面,分别讨论如何确定 θ_0 的大小以及角分散的物理意义.

Schroder 等^[2]总结了重离子耗散反应角分布的形状,给出了一个分类判据:

$$\eta = (E_{\text{cm}}/V_{\text{coul}} - 1) l_{\text{gr}}/J, \quad (2)$$

这里的 E_{cm} , V_{coul} , l_{gr} 和 J 分别是反应中炮弹的入射能、系统的库仑位垒、擦边角动量和转动惯量. 作者指出,当 $\eta \geq 2 \times 10^{21} \text{ rad/s}$ 时,角分布形状是前冲型的,即 $\theta_0 = 0$. 在我们的实验条件下, $V_{\text{coul}} \approx 20.5 \text{ MeV}$, $l_{\text{gr}} \approx 41 \hbar$, $J \approx 7.82 \times 10^{-42} \text{ MeV} \cdot \text{s}^2$, 即 $\eta \approx 7.80 \times 10^{-21} \text{ rad/s}$, 于是式(1)简化为:

$$\frac{d\sigma}{d\theta} \propto e^{-(\theta/\xi)^2}, \quad (3)$$

就是说,微分截面的对数是散射角平方的线性函数. 用最小二乘法作线性拟合,从角分布(如图 3)中提取了实验的角分散参数 ξ , 并作出了 $^{19}\text{F} + ^{27}\text{Al}$ 反应中不同产物 B, C, N, O, F, Ne, Na, Mg 和 Al 的电荷数 Z 所对应的 ξ 的分布,如图 5 所示. 显然,产物中转移的核子数越多,它的角分散也就越大. 换句话说,耗散反应产物的角分散对于产物的电荷数 Z 有明显的依赖关系,深的耗散意味着大的角分散.

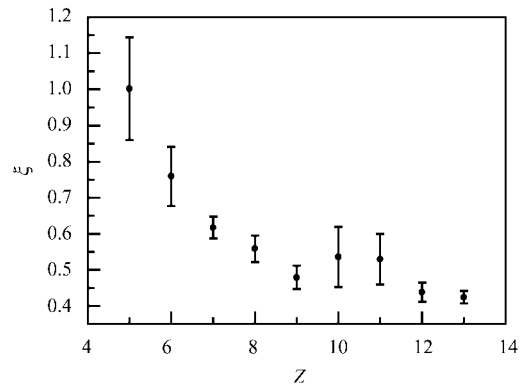


图 5 $^{114}\text{MeV } ^{19}\text{F} + ^{27}\text{Al}$ 深部非弹产物的实验角分散参数

5 角分散的理论拟合

正如 Strutinsky 所指出的^[1],角分散 ξ 由两部分组成:量子分散与动力学分散. 量子分散取决于入射道角动量分布的宽度 Δl ,动力学分散取决于反应期间对反应幅度有贡献的分波的相干长度 λ_c .

$$\xi^2 = \frac{2}{\Delta l^2} + \frac{2}{\lambda_c^2}, \quad (4)$$

Δl 可以作出如下的估算:

$$\Delta l = \frac{al_{gr}}{R_1 + R_2}, \quad (5)$$

其中 a 是核的表面弥散度,通常取核的半径 $R_i = 1.3A^{1/3}$ fm,相干长度 λ_c 反映了出射道效应,在耗散反应中可以估算如下^[3]:

$$\lambda_c = \frac{J}{\hbar \Delta l \tau}, \quad (6)$$

这里双核系统的转动惯量取为

$$J = \frac{A_1 A_2}{A_1 + A_2} (R_1 + R_2)^2, \quad (7)$$

系统的相互作用时间 τ 能够从时间-能量的测不准关系中得到

$$\tau = \hbar / \Gamma, \quad (8)$$

式中的能量相干宽度 Γ 可以取自反应产物的能量自关联函数,而能量自关联函数能够从激发函数的实验测量中提取^[4,5]. 关于从 $^{19}\text{F} + ^{27}\text{Al}$ 耗散反应激发函数的实验测量中提取产物的能量自关联函数的问题,我们将另文给出详细的分析和论述,这里只引用其部分结果,即给出能量相干宽度 Γ 的数值,如图 6 所示.

最后,计算了 $^{19}\text{F} + ^{27}\text{Al}$ 耗散反应产物角分散的

理论值,并与实验结果进行了比较,两者的符合还是比较好的,如图 7 所示. 其中,量子分散仅仅取决于反应道,对于不同的反应产物来说,都在 0.4 左右. 显然,在耗散反应中,产物的动力学分散是不能忽略的,这种分散强烈地与产物的电荷数 Z 相关,总的趋势是,产物的耗散程度越深,其动力学分散也就越大.

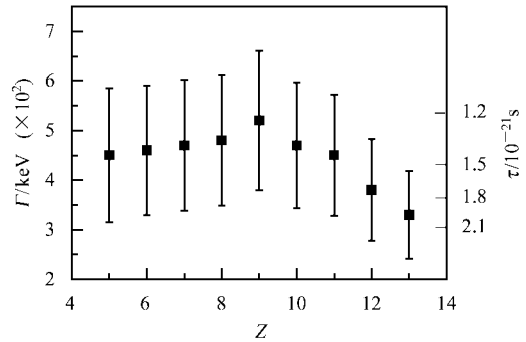


图 6 114MeV $^{19}\text{F} + ^{27}\text{Al}$ 耗散反应产物的能量相干宽度

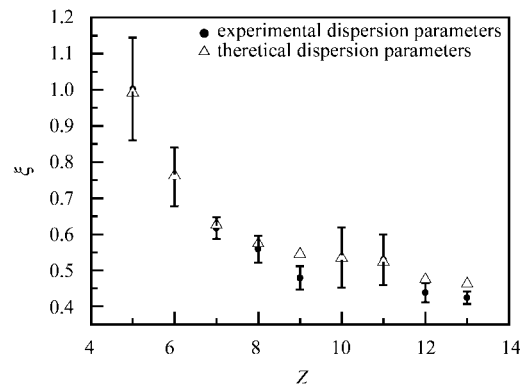


图 7 114MeV $^{19}\text{F} + ^{27}\text{Al}$ 耗散反应产物角分散参数的实验结果与理论计算值

参考文献 (References)

- 1 Strutinsky V M. Phys. Lett., 1973, **B44**:245
- 2 Schroeder W U et al. Ann. Rev. Nucl. Sci., 1977, **27**:465
- 3 Acul Magd A Y et al. Phys. Lett., 1979, **B83**:27
- 4 WANG Qi et al. Phys. Lett., 1996, **B388**:462
- 5 Berceanu I A et al. Phys. Rev., 1998, **C57**:2359

Angular Distributions and Angular Dispersions of the Dissipative Products in $^{19}\text{F} + ^{27}\text{Al}$ Reaction *

DONG Yu-Chuan^{1,2} WANG Qi^{1; 1)} LI Song-Lin¹ DUAN Li-Min¹ WU He-Yu¹
XU Hua-Gen^{1,2} CHEN Ruo-Fu^{1,2} XU Hu-Shan¹ HAN Jian-Long^{1,2} LI Zhi-Chang³
LU Xiu-Qin³ ZHAO Kui³ ZHOU Ping³ LIU Jian-Cheng³ Sergey Yu Kun^{4,5}

1 (Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

2 (Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

3 (China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

4 (Centro de Ciencias Fisicas, Campus Morelos UNAM, Cuernavaca, Morales, Mexico)

5 (Nonlinear Physics Group and Department of Theoretical Physics, RSPHysSE, ANU, Canberra, ACT 0200, Australia)

Abstract Angular distributions of fragments B, C, N, O, F, Ne, Na, Mg and Al induced from the reaction of $^{19}\text{F} + ^{27}\text{Al}$ have been measured at the beam incident energy of 114 MeV. The angular distributions and the element distributions at different angles were analyzed to provide an evolution process of the intermediate dinuclear system. The angular dispersion parameters were extracted from the experimental data and compared with the theoretical results. The dynamic dispersions for the dissipative products are not negligible and depend strongly on the charge number Z of the fragments, the deeper dissipation the more dynamic dispersion.

Key words dissipative reaction, angular distribution, angular dispersion

Received 9 June 2004

* Supported by NSFC (10175083), Major State Basic Research Development Program (G2000077400), One Hundred Person Project of Chinese Academy of Sciences and National Key Program for Basic Research, Ministry of Science and Technology (2001CCB01200)

1) E-mail: wangqi@ns.lzb.ac.cn