

294MeV $^{20}\text{Ne} + ^{12}\text{C}$ 出射 α 粒子的研究

卢俊 谢元祥

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

摘要 实验测量了 294MeV $^{20}\text{Ne} + ^{12}\text{C}$ 反应中出射 α 粒子的单举能谱及角分布,用三源模型拟合了实验数据,大角度出射 α 粒子的实验结果表明了靶核碎裂(breakup)机制的存在.

关键词 运动源, 碎裂, 类弹源, 类靶源, 中等速度源.

1 引言

在重离子引起的核反应中,当炮弹的能量低于 10MeV/u 时,主要有全熔合反应(CF)、深部非弹性碰撞(DIC)和准弹性散射(QE)三种竞争的反应机制;当入射炮弹能量增至 10MeV/u 以上时,反应由完全熔合向非完全熔合过渡,随着炮弹入射能量的增高,参加熔合反应的核子数逐渐减少,出现了熔合前的轻粒子发射,如费米喷射、结团发射、大质量转移、碎裂反应和前平衡发射等.为了解释反应中出射轻粒子的实验结果和探讨轻粒子发射机制,人们作了大量的理论工作来分析实验数据,发展了如组合粒子模型、热斑模型、激子模型及炮弹碎裂等理论模型,但这些模型不能对大量的实验数据给出完整统一的解释,有待于进一步的探讨.

Symons 等人^[1]于 1980 年提出了一个构想简单的唯象模型——运动源模型.这个模型假设轻粒子是从一个运动着的粒子源上以麦克斯威尔型的能量分布各向同性发射的. T. Awes 等人^[2]用运动源模型拟合了 ^{16}O 轰击 ^{27}Al 、 ^{90}Zr 、 ^{197}Au 出射的 p、d、t、 α 粒子的能谱,计算中只考虑了平衡粒子源的轻粒子蒸发,除了高能入射时小角度的能谱低于实验值外,其余的能谱拟合得很好. B. V. Jacak 等人^[3]用旁观者-参加者模型的概念引入了中间源的计算,他们用类弹源(projectile-like),中等速度源(intermediate)和平衡蒸发源(equilibrium)对 137MeV $^{40}\text{Ar} + ^{197}\text{Au}$ 出

射的 p、t、 ^3He 能谱进行计算,结果要比单源拟合得好,尤其是小角度的能谱和能谱的低能部分.近年来,人们用运动源模型拟合了大量的实验数据,进一步发展和完善了运动源模型,对反应机制有了更深的认识.

H. Morgenstern 等人^[4]用飞行时间方法测量了 291MeV $^{20}\text{Ne} + ^{12}\text{C}$ 蒸发余核($M=24$)的速度谱,速度谱的矩心与产生全动量转移形成的 ^{32}S 复合核所预期值较好地符合,说明存在全熔合反应并且主要是全熔合反应.但随着蒸发余核质量的减小,速度谱的矩心略高于预期值,说明存在着靶核的碎裂过程. W. D. M. Rae 等人^[6]通过对 175MeV $^{20}\text{Ne} + ^{12}\text{C}$ 出射 ^{16}O 和 α 粒子的符合测量证实了弹核 ^{20}Ne 碎裂机制的存在.通过对所测量的反应 Q 值分析,指出靶核可以处于激发态,并可能发射轻粒子,如 α 粒子.

本文报告了 294MeV (14.7MeV/u) $^{20}\text{Ne} + ^{12}\text{C}$ 反应中 10° 、 15° 、 20° 、 25° 、 30° 、 40° 、 60° 、 80° 出射 α 粒子的能谱,并运用运动源模型进行了拟合,无论是能谱形状还是数值大小都得到了满意的结果.拟合表明在这个反应体系中,存在一个描述靶核碎裂的中等速度源.说明在实验中观测到靶核碎裂的贡献,这与 H. Morgenstern^[4,5] 测量蒸发余核速度所得结论相一致.

2 实验

实验是在荷兰的 KVI 完成的,用 A. V. F 回

旋加速器产生的 294MeV ^{20}Ne 轰击位于直径为 1.2m 靶室中心的无衬 ^{12}C 靶, 靶厚 $174\mu\text{g}/\text{cm}^2$. 探测器为一套金硅面垒型 ΔE - E 望远镜系统, ΔE 探测器的厚度为 $50\mu\text{m}$, E 探测器厚度为 5mm, 探测器被冷却到 -20°C . 探测器光栏前装有磁铁, 以抑制二次电子的干扰. 探测系统安装在活动臂上, 实验中分别测量了 $10^\circ \sim 80^\circ$ 范围内 8 个角度出射的 α 粒子. 法拉第筒记录了束流的积分电荷量, 四套光二极管读出的塑料闪烁体探测器对称地放置在与束流方向水平和垂直夹角均为 3° 的位置上以监测束流的位置. 精密脉冲发生器 (ORTEC-448) 校正电子学系统的线性. 用 ^{241}Am α 源和 294MeV $^{20}\text{Ne} + ^{159}\text{Tb}$ 弹性散射的峰值进行能量刻度. 实验数据采用逐个事件方式记录在磁带上, 离线处理在近代物理所的 VAX-8350 上进行, 截面误差 $< 15\%$.

3 实验结果和分析

本实验入射炮弹能量几乎与文献[4]的一样. 对 294MeV $^{20}\text{Ne} + ^{12}\text{C}$ 这样的逆反应来说, 从运动学的讨论可预期: 周边碰撞出射的 α 粒子被压缩在实验室系很小的角度内 ($\theta_{\text{lab}} < 2.1^\circ$), 我们在实验中测得的 α 粒子来源于强的耗散过程 ($\geq 10^\circ$). 由于质心的速度很高, 蒸发 α 粒子被限制在前角区内 ($< 35^\circ$), 而且在实验室系能谱应该有高低两个能量组份. 而大角度的 α 粒子 ($\geq 40^\circ$) 只能来源于非平衡的过程.

图 1 的直方图给出了 $10^\circ \sim 80^\circ$ 角度范围内测得的单举 α 粒子能谱. 根据文献[4, 6]的实验结果, 294MeV $^{20}\text{Ne} + ^{12}\text{C}$ 出射的 α 粒子肯定存在全熔合的平衡蒸发源和非平衡的类弹源. 而从逆运动学分析得出蒸发源和类弹源的产物混在一起, 难以区分, 给提取这两个源 的参数造成了较大的困难.

我们在用运动源模型计算实验能谱过程中, 首先从 ^{20}Ne 和 ^{12}C 生成全熔合的复合核 ^{32}S 出发, 考虑平衡的蒸发源. 假定在源的静止系内, α 粒子能谱具有麦克斯威尔分布的形式

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

角分布为

$$W(\theta) = 1 + B \cos^2\theta \quad (2)$$

其中, B 为各向异性因子, 源的运动方向与束流方向平行. 在非相对论的情况下转换到实验室系, 并考虑 α 粒子与蒸发余核的库仑排斥有

$$\frac{d^2\sigma}{dE_L d\Omega_L} = N E_L^{1/2} E_1^{1/2} e^{-E/T}$$

$$E = E_L - V_c + E_1 - 2(E_L - V_c)^{1/2} E_1^{1/2} \cos\theta_L \quad (3)$$

其中, E_L 为 α 粒子实验室系的能量, V_c 为 α 粒子与蒸发余核的库仑能, $E_1 = mv^2/2$, v 为源在实验室系的速度.

其次, 对于前角区 ($\leq 40^\circ$) 能谱的高能部分, 引入了非平衡的类弹源. 在相对源静止的座标系中, α 粒子各向同性发射, 能谱具有

$$\frac{d^2\sigma}{dE d\Omega} = N E^{1/2} e^{-E/T} \quad (4)$$

转换到实验室系

$$\frac{d^2\sigma}{dE_L d\Omega_L} = N E^{1/2} e^{-E/T}$$

$$E = E_L + E_1 - 2E_1^{1/2} E^{1/2} \cos\theta_L \quad (5)$$

E_1 和 E_L 同上.

采用上面两个源后, 对小角区能谱的高能尾巴拟合得较好, 能谱的高能峰位也能准确地再现, 但对低能能谱无法拟合, 在大角区 ($\geq 40^\circ$), 这两个源几乎对能谱没有贡献.

根据文献[4]对存在靶核碎裂过程的描述, 我们引入了一个非平衡的中等速度源, 用于拟合大角区的能谱, 源的形式同类弹源一致. 考虑到各个源的贡献比份不同, 在拟合能谱时调整各个源的参数, 可以得到极好的结果: 无论是谱形还是数值都与实验结果相符. 图 1 给出了拟合的结果, 直方图为实验数据, 点线为类弹源, + 代表蒸发源, * 代表中等速度源的计算结果, 实线为三源拟合值. 表 1 给出了运动源的所有参数, 其中 N 为各个源的归一化常数, T 为源的表观温度, v 为实验室系的运动速度, V_c 为 α 粒子与蒸发余核的库仑作用能.

类弹源的速度为束流速度的 87%, 对应于炮弹的非平衡过程. 我们认为是炮弹的碎裂, 即

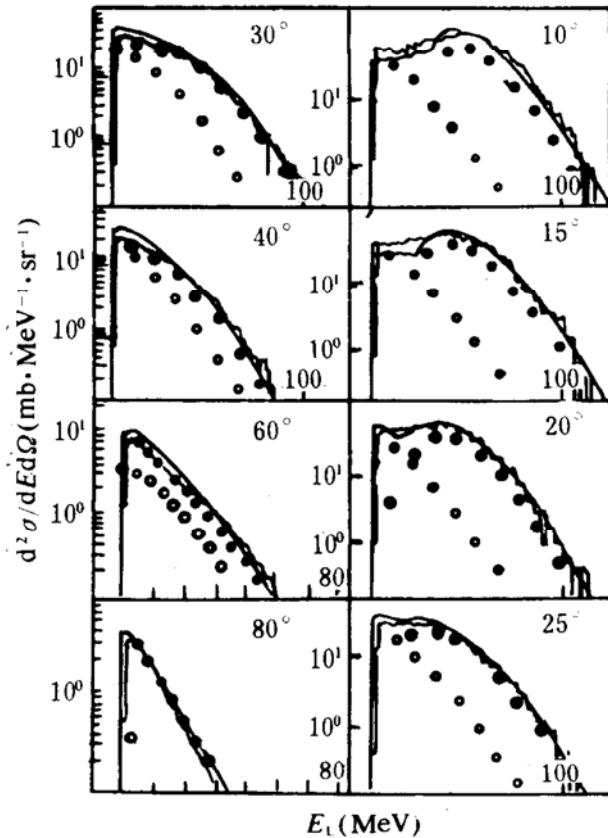


图 1 实验测量 α 粒子能谱与三源拟合能谱的比较

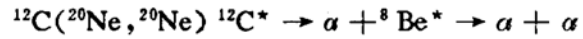
当 ^{20}Ne 束通过靶核附近时, 碎裂出一个 α 粒子, 这部分 α 粒子是小角区高能 α 粒子的主要来源. 蒸发源的速度为全熔合的复合核速度, 是弹核和靶核发生全熔合所形成的平衡源.

表 1 三源计算参数

源 型	N	$T(\text{MeV})$	$v(\text{cm/ns})$	$V_c(\text{MeV})$	B
蒸 发 源	6.5	4.50	3.32	2.5	0.6
类 弹 源	7.5	3.50	4.60	0.0	0.0
中等速度源	9.0	6.88	1.80	0.0	0.0

中等速度源的速度为 1.8cm/ns, 比复合核的速度还要低, 但是表观温度很高, 是大角度 α 粒子和小角区低能 α 粒子的主要来源. 这个源所对应的物理过程是什么呢? 我们认为它描述的是靶核的碎裂过程. ^{12}C 靶为 α 集团结构, 每个 α 集团中核子间作用较强, 结构相对稳定, 单个核子很难挣脱集团的束缚而导致结构的破裂. 但 α 集团间的作用较弱, 在受到弹核的激发

时, 很容易破坏 α 集团间的约束, 以 α 集团的形式发射粒子. 对 $^{20}\text{Ne} + ^{12}\text{C}$ 反应, ^{12}C 在炮弹 ^{20}Ne 逼近时, 可能经历下列反应:



因而, 中等速度源描述的是靶核的 α 粒子的非平衡发射过程, 即 α 粒子来源于靶核的碎裂和剩余类靶碎片 ^8Be 的相继衰变.

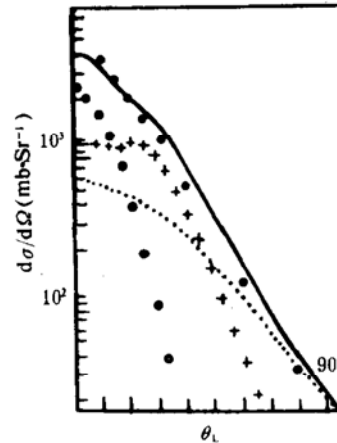


图 2 实验测量 α 粒子的角分布和三源计算结果. • 实验值; 实线 三源拟合值; + 蒸发源; ... 中等速度源; o 类弹源.

图 2 给出了测量 α 粒子的角分布和三源计算的结果. 实验测量的角分布呈指数下降型. 类弹源主要在小角区起作用, 随着角度的增大, 这部分截面下降很快; 复合核蒸发源在前角区变化平缓, 40° 后很快下降, 与逆运动学计算相一致; 中等速度源在小角区作用很小, 随着角度增大, 它的贡献逐渐增大, 50° 后起主要作用.

4 结 论

我们在拟合中引进了类弹源、蒸发源和中等速度源的计算, 使三源拟合得到了满意的结果. 中等速度源对大角度能谱的拟合起主要作用. 用靶核碎裂机制可以合理地解释 $^{20}\text{Ne} + ^{12}\text{C}$ 逆反应中大角度观测到 α 粒子的实验现象, 说明中等速度源所对应的物理过程是靶核的碎裂, 即我们实验上直接观测到靶核碎裂的 α 粒子.

把三种角分布积分,得到这三种源的 α 粒子发射截面分别为:类弹源 2.92b,中等速度源 2.99b,蒸发源 6.20b,发射 α 粒子的总截面为 12.10b. 实验测量的 α 粒子总截面为 11.79b,在 2.3% 内符合. 该截面比 294MeV $^{20}\text{Ne} + ^{159}\text{Tb}^{[7]}$ 测得的 α 粒子总截面大得多,这与弹核和靶核均为 α 集团结构有关.

对于靶核碎裂现象,要揭示碎裂的详细过程,需要符合测量的实验数据.

作者感谢 Prof. R. H. Siemssen 热情指导,感谢 Dr. B. Kotlinski 和 Dr. H. W. Wilschut 的协力

合作.

参 考 文 献

- 1 Symon T J M, et al. Phys. Lett., 1980, 94B : 131
- 2 Awes T C, et al. Phys. Rev., 1982, C25 : 2361
- 3 Jacak B V, et al. Phys. Rev., 1987, C35 : 1751
- 4 Morgenstern H, et al. Phys. Lett., 1982, 113B : 463
- 5 Morgenstern H, et al. Phys. Rev. Lett., 1984, 52 : 1104
- 6 Rae W D M, et al. Phys. Rev., 1984, C30 : 158
- 7 谢元祥等. 高能物理与核物理, 1993, 17(3) : 283

Study of α -particle Emission in the Reaction of $^{20}\text{Ne} + ^{12}\text{C}$ at 294MeV

Lu Jun Xie Yuanxiang

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

Abstract Inclusive energy spectra and angular distribution of α -particles have been measured in the reaction of 294MeV ^{20}N bombardment of ^{12}C target. Three sources fitting was performed for the experimental data. The fact of α -particle emission at large angles indicates the process of target breakup.

Key Words moving source, breakup, target-like source, projectile-like source, intermediate source.

建设中的核数据相关程序库

随着经济的迅速发展与计算机的普及,许多行业不但建立了自己的数据库、信息库,还建立了相关的程序库.为满足核数据计算本身的需要,中国核数据中心经过几年的酝酿,于 1989 年建立了自己的相关程序库.本文介绍建库目的,库的现状与模式,库收集程序的范围及分类,以及评审办法.

1 建库的目的

多年来,核数据工作取得了很大成绩,其间核数据中心与核数据协作网的同志们研制了很多关于理论计算、实验编评、群常数制作、库管理服务程序,并有选择地开发了一些国外有关程序,随着核数据工作的深入,新的程序不断出现,质量也逐渐提高.迄今,全套中子数据和带电粒子数据的计算程序以及评价处理的有关程序已基本配套,核数据检验、存储、检索、绘图以及用于库管理的其它程序亦渐完善配套.这些程序都是国家的宝贵财富,为了收集、管理进而推广使用这些程序,避免重复研制,浪费人力物力,1989 年核数据中心建立了自己的核数据相关程序库.

程序库的另一个任务是负责我国与 NEA Data Bank 的联络.1984 年,我国参加国际原子能机构以后,打开了与 NEA Data Bank 免费交换程序的渠道.我们接受 NEA Data Bank 有关程序的出版物并分发给国内有关单位;根据国内需要向 NEA Data Bank 索要程序提供给国内用户;根据 NEA Data Bank 的要求,代其收集国内程序及有关材料等等,按 NEA Data Bank 要求的格式录制后寄去.

通过这一渠道,我们要来了 100 多个大型有用程序,其中不少是关于反应堆、核电站的,有的已转录到核电软件中心库;有的是关于核数据计算以及群常数制作的,有的正广泛用于放射性物质在运输中对环境影响的计算.这些大型程序如果向外国买,价格是很昂贵的,不少程序价值在十万美元以上.

作为交流,我们也送一些国内程序到 NEA Data Bank.该 Bank 有个模型程序库,我们送去的程序数目在这个库中占第二位,仅次于美国.

(下转 54 页)