

20~46.2MeV/u $^{12}\text{C} + ^{64}\text{Cu}$ 反应中线性动量 转移及重余核质量产额分布研究*

靳根明 李文新 孙彤玉 吴定清 孙儒林 赵莉莉 尹新民 罗清政

(中国科学院代物理研究所 兰州 730000)

李 泽 敬友兴 李新华

(中国原子能科学研究院 北京 102413)

摘 要 利用核化学方法测量了 20~46.2MeV/u ^{12}C 与铜靶核碰撞中重余核产物的平均反冲射程及余核产额. 从而得到了该系统的线性动量转移及重余核质量产额分布随入射能量的变化. 讨论了线性动量转移与靶核几何尺寸及系统尺寸的关系. 利用两体衰变理论对重余核质量产额分布进行了分析. 并认为在这个能区, 该碰撞系统所形成的激发核的主要衰变模式是相继两体衰变.

关键词 线性动量转移, 质量分布, 衰变.

1 引 言

在几十 MeV/u 的入射能区, 核-核碰撞中产生的高激发核, 也叫热核, 是人们广泛关心的一个问题. 对这些产物核的深入研究可以了解以下几个重要的问题:

(1) 对热核激发能随入射能量变化的研究, 可进一步深入了解核-核碰撞的动力学过程, 进一步弄清在该能区的核-核碰撞中, 平均场作用是如何让位于核子-核子相互作用的.

(2) 对热核衰变余核的质量产额分布的研究, 可使我们了解碰撞中产生的热核的初始激发能的大小, 也可以知道热核能够承受多高的激发能. 同时, 通过测量其质量产额分布随入射能的变化, 还可深入了解原子核在高激发状态下的衰变性质及其与激发能的关系.

(3) 可以进一步了解热核的核性质、核结构与利用原有的理论模型预言的热核性质、核结构有什么区别, 进而检验和发展核理论.

根据现有的一些理论预言^[1~2], 当热核的温度, 或者激发能接近核的总结合能时, 就会出现一种新的所谓的“多重碎裂”衰变模式. 但是, 在低激发能时, 重核会发生裂变, 而且随激

发能的增加, 裂变几率增加. 那么, 人们很自然地会提出由两体裂变如何过渡到多重碎裂? 有人甚至怀疑, 在 100MeV/u 下的入射能区, 特别在低入射能区会发生多重碎裂, 并提出相继两体衰变的理论. 从实验结果而言, 到目前为止热核的衰变性质仍然是各执己见, 没有统一的结论. 有的实验结果和理论认为^[3], 入射能为几十 MeV/u 时, 重热核的衰变是相继两体的. 但另一些实验结果则显示: 入射能大于 40MeV/u 时, 重系统产生的热核衰变是以多重碎裂为主.

与此同时, 在核-核碰撞中, 沉积在热核系统中的激发能(或称线性动量转移)也是实验上特别关心的问题. 经过几年的研究, 认为核-核碰撞中能沉积在热核系统中的能量与反应的动力学过程有关, 即热核系统能存贮的能量是由单个核子通过一体和两体耗散而沉积的能量控制的. 从理论上讲, 只要入射核子相对靶核的速度相同, 它被陷在靶核中的几率就相同, 因而, 每个入射核子所能转移的最大平均线性动量也相同. 所以, 人们感兴趣的主要变化量是其初始入射速度与整个系统的质心速度之间的差别. 如果说, 这个速度差小于“结

* 国家自然科学基金委资助课题

合”速度,那么核子则会被陷进靶核中,否则只损失部分能量.但是,系统的几何尺寸,或者说靶核的核子数的大小对线性动量转移的影响也是存在的.从实验上讲,以往许多实验都是在不同的近似条件下进行的,有的区分了周边碰撞与中心碰撞,有的则没有区分,因此,对系统的几何尺寸对线性动量转移的影响没有进行深入的研究.这个问题的研究对确定热核所能承受的高激发能以及如何达到其最高激发能是不可少的.

为了深入了解热核的衰变性质随激发能的变化以及线性动量转移与靶核核子数的关系,我们用放射化学的方法测量了 $^{12}\text{C}+^{64}\text{Cu}$ 反应中重余核的质量产额分布和其射程分布,并将其结果与理论计算进行了比较.核化学方法与物理方法相比,其优点是可以测量反冲能量很小的重余核.这一部分余核在物理测量中由于探测器阈值的限制而丢失.

2 实验原理及安排

2.1 平均射程的测量原理

由于实验时间和测量条件的限制,我们用平均射程的方法测量了重余核的反冲射程.其原理如下:由于重余核的角分布是非常前向成峰的,在厚靶中生成的重余核穿出靶而被收集箔俘获的部分与留在靶中的部分之比 F ,与重余核的平均射程有关. F 与靶厚 W 的乘积 FW 则是余核的平均射程.

2.2 实验安排

实验是在兰州重离子加速器上进行的. ^{12}C 束流的初始能量为 46.7 MeV/u.每次照射的靶堆由 8 个相同的靶单元组成.每一个靶单元中包括一片 17.9 mg/cm² 的天然铜靶和放在靶前后两面的收集箔(Mylar).每片收集箔厚 10.4 mg/cm².为了调节入射能量,在相邻的两个靶单元间插入降能片.入射到每一片靶子上的 ^{12}C 束流的能量分别为 46.2、42.3、38.5、34.8、31.1、27.5、24.0 和 20.5 MeV/u.每次照射时间为 18 小时.照射结束后 25 分钟开始对靶和收集箔进行测量.

余核 γ 活性离线测量是在铅室中进行的.四台探测器的相对效率在(10~40)%之间.能量分辨为 2.1~2.5 keV(对 ^{60}Co 的 1332.3 keV γ 射线).

3 结果与讨论

3.1 线性动量转移

根据测到的各种余核的 FW 值,通过能程关系,得到了各入射能下的速度分布.具体处理方法在别处已进行了详细描述^[4].从余核的反冲速度随余核质量数的变化中可以清楚地看到,在各种入射能下余核质量数越低于靶核质量数,其反冲速度就越大,最后达到一平衡值.这清楚地表明了从周边碰撞到中心碰撞的变化.我们取速度分布中的平坦部分为中心碰撞产生的重余核的平均反冲速度,而认为上升部分则是对应于周边碰撞产生的余核的反冲速度.此外,还看到随着入射能量的增加,相应于中心碰撞产生的重余核的平均反冲速度逐渐减少,从 20.5 MeV/u 的 0.8(v_r/v_{CN})降低到 46.2 MeV/u 的 ~ 0.5 (v_r/v_{CN}).这表明,随着入射能的增加,每个核子能够沉积在热核系统中的能量在逐渐减少.根据下式我们可以计算出中心碰撞中的线性动量转移

$$\rho = \frac{(m-n)v_i}{mv_i} = \frac{(m-n+M)v_r}{(m+M)v_{CN}}$$

其中, m 为弹核质量, n 假设为碰撞中直接从弹核中以弹核速度逃逸的粒子数, M 为靶核质量, v_i 为入射核速度.同时根据上式可计算出直接从弹核中逃逸的核子数 n

$$\begin{aligned} n &= m - \frac{Mv_r}{v_i - v_r} = m - \frac{M}{v_i/v_r - 1} \\ &= m - \frac{M}{[(m+M)/m] \cdot v_{CN}/v_r - 1} \end{aligned}$$

其结果列在表 1.该系统的线性动量转移随能量的变化见图 1.从图中我们可以看出,随入射能的增加,每个弹核核子转移到复合系统中的线性动量先是增加而后下降.平均每个弹核核子转移的最大动量发生在 ~ 30 MeV/u 处附近,其值为 155 MeV/c.u.,这与其它实验结果

的系统性相符合。

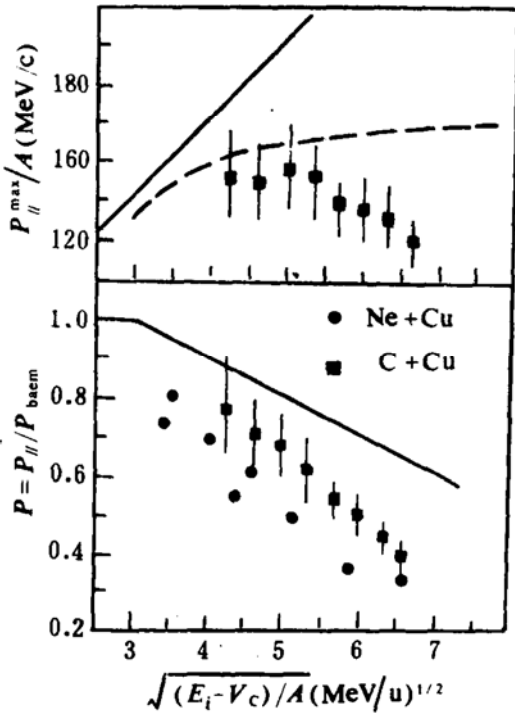


图 1 ¹²C+Cu 碰撞系统线性动量转移与入射速度的关系

表 1 20.5~46.2 MeV/u ¹²C+Cu 碰撞中的线性动量转移比例 ρ 及相应激发能 ϵ^*

| E_i (MeV/u) | ν_{\parallel}/ν_{CN} | n | ρ | ϵ_{max}^* (MeV/u) | T (MeV/u) | |
|------------------|----------------------------|------|--------|-------------------------------|-----------|-------|
| | | | | | (A/10) | (A/8) |
| 20.5 | 0.80 | 2.75 | 0.77 | 2.30 | 4.8 | 4.3 |
| 24.0 | 0.74 | 3.53 | 0.71 | 2.50 | 5.0 | 4.5 |
| 27.5 | 0.72 | 3.79 | 0.68 | 2.80 | 5.3 | 4.7 |
| 31.1 | 0.67 | 4.43 | 0.63 | 2.94 | 5.4 | 4.8 |
| 34.8 | 0.59 | 5.43 | 0.55 | 2.94 | 5.4 | 4.8 |
| 38.5 | 0.55 | 5.91 | 0.51 | 3.05 | 5.5 | 4.9 |
| 42.3 | 0.51 | 6.39 | 0.46 | 3.13 | 5.6 | 5.0 |
| 46.4 | 0.45 | 7.10 | 0.41 | 3.07 | 5.5 | 5.9 |

注: T 是根据 $E^* = 2QT^2$ 提取的核温度。

与以前我们利用同样的实验方法得出的 ¹²C+¹⁸¹Ta、⁹³Nb 中的线性动量转移^[5]的比较见图 2。从图中可以看出,在同样的入射能量下,相应于中心碰撞的线性动量转移的大小随靶核的尺寸增大而线性增大。这与理论预言基本

相符。从微观上讲,靶核的尺寸越大(核子数越多),入射核子在靶核中走的路径越长,与靶核核子碰撞的次数越多,损失动量就越大。而平均线性动量转移(考虑周边碰撞和中心碰撞两者的平均结果) $\langle P_{\parallel} \rangle / P_{CN}$ 则与碰撞系统的非对称性有明显的关系。这一点从简单的几何关系就可以得到解释。非对称性越大,入射核子平均在靶核中穿行距离越长,平均转移的线性动量就越大。

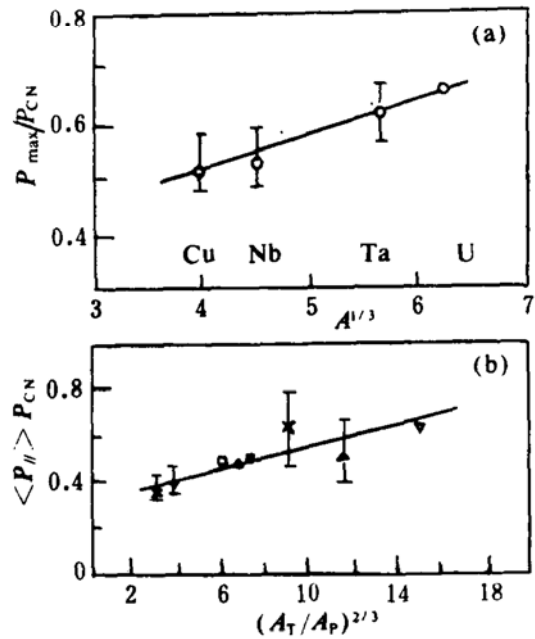


图 2 碰撞系统的线性动量转移与其核子数的依赖关系

如果不考虑反应 Q 值,便可根据线性动量转移得出碰撞中复合系统的初始激发能 ϵ^* (表 1)和相应于不同能级密度参数的核温度。应该指出,这里得到的最大激发能只表明该碰撞系统所能达到的激发能,而不是这个质量范围内的核所能承受的最大激发能。

3.2 重核质量产额分布

尽管在实验上测量了大量产物核的截面,但这些也仅只是反应产物的一部分。为了获得产物的质量分布,引入高斯电荷分布函数来估计测不到的产物核的生成截面。对应确定质量数的电荷分布峰位,由 $E_p(A) = K_0 + K_1A + K_2A^2$ 给出。分布宽度参数 δ_k 取 $A=48$ 和 $A=56$ 的 δ_k 平均值。由碰撞产物的高斯型电荷分布

曲线计算得到质量产额分布. 随着入射能量的增加, 余核质量产额分布的峰宽在增加, 特别是峰位向较低质量数方向移动. 重余核质量产额分布与入射能有密切的关系. 随着入射能量的增加, 分布斜率量指数下降, 与激发能的关联也是如此. 但是, 当入射能量进一步增加时, 中心碰撞形成的复合系统能否得到更高激发能, 还有待进一步的实验证实. 因为有的理论认为随着入射能的增加, 中心碰撞形成的复合系统的激发能一直增加^[6].

对碰撞余核的质量分布随激发能的发展, 理论早已有预言, 但不同的理论预言的结果则有很大差别. 主要的理论有统计碎裂^[1,2]和级联两体衰变. 根据 Morretto 的理论, 高激发的核是通过级联的两体衰变过程退激的. 根据这种模型的假设, 激发核退激过程中发射的轻粒子、复杂粒子以至裂变碎片都可以作为两体过程处理. 实现这种模型计算的常用程序为 GEMINI Monte - Carlo 模拟程序^[3]. 为了简单起见, 在计算复合系统的激发能时, 只考虑了核的表面能和体积能的变化, 而且非全熔合反应占总反应截面的份额作为可调参数.

我们利用 GEMINI 程序分别计算了 24.0、31.1、38.5 和 46.2 MeV/u 入射能时 ¹²C+Cu 反应产物的质量分布, 表 2 列出了计算中所采用的最大角动量和平均激发能.

表 2 Monte - Carlo 模拟计算中的参数

| $E_i(\text{MeV/u})$ | 24.0 | 31.1 | 38.5 | 46.2 |
|---------------------|-------|-------|-------|-------|
| 最大角动量(\hbar) | 45 | 40 | 30 | 30 |
| 平均激发能 (MeV) | 151.0 | 191.9 | 227.3 | 235.8 |
| 实验值 (MeV) | 181 | 210 | 213.8 | 214.6 |

计算结果与实验数据的比较见图 3. 可以看出, 理论与实验的符合较好. 理论模拟较好地反应了重余核质量分布随入射能量的变化. 但如果仔细观察会发现, 当入射能升高后, 实验上低质量区的余核产额明显地高于理论值, 而且在所使用的参数中, 最大角动量和激发能似乎都需要增大. 这些迹象可能表明, 用这种

模型描述高激发核的退激时必须有所改进.

4 结 论

本工作利用核化学方法对 20 ~ 46.2 MeV/u 的 ¹²C+Cu 碰撞系统作了较为详细的研究, 测量了该反应系统在不同入射能量时产生的各种重余核的平均反冲射程, 推导出了碰撞过程中的线性动量转移. 同时还测量了不同入射能时各种重余核的产额, 并根据高斯型电荷分布计算出了重余核的质量产额分布.

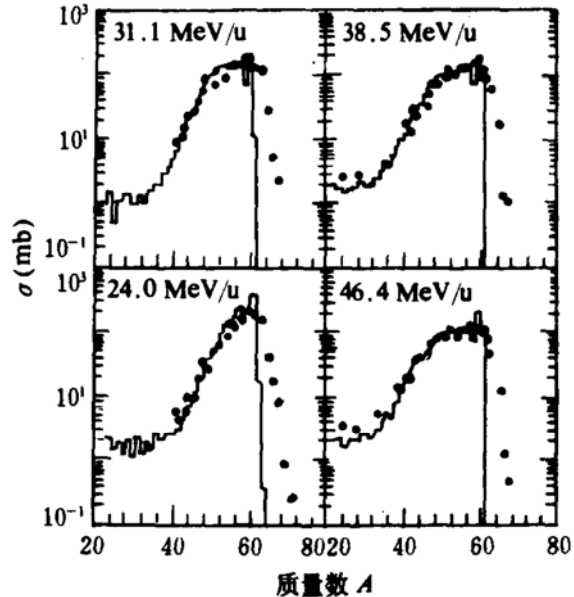


图 3 重余核质量产额分布与计算结果的比较

本工作的结果表明, 随着入射能的增加, 碰撞过程中线性动量转移逐渐减少, 而且对中心碰撞而言, 线性动量转移的大小与弹核的大小关系不甚密切, 但与靶核的大小有密切关系. 平均线性动量转移则与弹核及靶核的大小均有关系. 每个入射核核子的平均线性动量转移随入射能量的增加而变化的现象说明, 在低入射能时 (<30 MeV/u) 平均场起着主要作用, 而当入射能量 > 30 MeV/u 时, 平均场的作用则逐渐让位于核子-核子相互作用, 这时入射核核子的速度与核子在核内的“结合”速度之差决定了线性动量转移的大小.

重余核质量产额分布的结果表明,随着入射能的增加,沉积在复合系统中的激发能也在增加,使得重余核产额分布的宽度增大. 激发能的增加有饱和趋势,这可能使得利用这种入射离子轰击靶核时,不能产生非常高激发能的复合系统. 在我们所使用的入射能量范围内,所得到的重余核产额分布基本可以利用级联两体衰变的模型进行描述,但在最高入射能时,实验数据与理论描述有偏高的迹象. 这是否表明,在这个激发能下,高激发核的衰变过

程开始发生变化,仍需要进一步实验证实.

参 考 文 献

- 1 Gross D. H. E., et al. Phys. Lett., 1988, B200: 397
- 2 Bondorf J. Phys. Lett., 1985, B162: 30
- 3 Charity R. J., et al. Nucl. Phys., 1988, A340: 371
- 4 李文新等. 原子核科学技术, 1990, 24: 60
- 5 李文新等. 高能物理与核物理, 1990, 14: 1110
- 6 Durand D. Nucl. Phys., 1992, A541: 266

Study of Linear Momentum Transfer and Mass Distribution of Residues in Collisions of ^{12}C with ^{64}Cu at 20~46. 2MeV/u

Jin Genming Li Wenxin Sun Tongyu Wu Dingqing
Sun Rulin Zhao Lili Yin Xinming Luo Qingzheng

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

Li Ze Jing Youxing Li Xinhua

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

Abstract The linear momentum transfer (LMT) and mass distribution of the residues in the collisions of ^{12}C with ^{64}Cu in energy region of 20 ~ 46. 2MeV/u were measured by using radiochemical method. Comparing the LMT in this system with that in other systems, linear dependence of the maximum LMT for central collision on geometry of target nucleus was obtained, and the average LMT then depended on the geometry of whole system.

Comparison of the mass distribution measured here with theoretical calculation indicated that the excited nuclei formed in the collisions at this energy region tended to sequential binary decay.

Key Words linear momentum transfer, mass distribution, decay.

(上接 42 页)

These results have been explained by statistical binary decay model. It seems that the compound-like system with high temperature about 4~5 MeV has been formed through incomplete fusion with incident energy up to ~50 MeV/u and it decays by fission and light particle emission.

Key Words linear momentum transfer, statistical binary decay, incomplete fusion, nuclear temperature.