

46.7 MeV/u¹²C引起的弹核碎裂及轻带电粒子关联*

诸永泰

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

摘要 我们在 HIRFL 提供的 46.7 MeV/u 的¹²C 离子轰击⁵⁸Ni、¹¹⁵In 和¹⁹⁷Au 靶所引起的核反应中研究了弹核碎裂与转移反应的竞争,分别提取了对应于弹核碎裂和转移反应的类弹碎片的约化动量宽度.从粒子发射不稳定态的相对布居得到了不同反应系统的核温度参数.

关键词 弹核碎裂, 轻带电粒子关联, 核温度参数.

1 引言

在低能时,平均场效应占主要地位,一体耗散是主要过程,类弹碎片主要来自于深部非弹性碰撞过程(DIC)和准弹转移.在高能情况下,核-核作用时间比内禀自由度弛豫时间短,约化波长比核内核子间距离要短,核子-核子碰撞是主要过程,类弹碎片主要来自于弹核碎裂过程,可用 Abrasion - Ablation 图像予以解释.中能区(10~100 MeV/u)是介于低能和高能间的过渡能区.该能区的反应既具有低能下的耗散特点,又具有高能下的核子-核子碰撞特征,多种反应机制共存,相互竞争^[1].实验结果表明,中能重离子周边碰撞中的类弹碎片来源于不同的反应机制,其中包括:像低能时那样的少数核子转移、深部非弹性碰撞和有些类似于高能时的弹核碎裂.最初在中能区进行的⁴⁰Ar 入射的反应实验表明,存在类似于碎裂或破裂机制的过程,类弹碎片的同位素分布与高能情况类似.但是,中能区的反应有其自身的特点.很多中能区的实验证实了碎裂与转移的共存.在轰击能升高时,碎裂变得越来越重要.本工作主要研究过渡能区碎裂和转移的共存和竞争.

在中能重离子核反应中生成高激发核,它们的形成和衰变是感兴趣的研究领域.小相对动量的两粒子关联可用来测量粒子发射不稳

定态的相对布居,并进一步提取核温度参数^[2].用关联函数还可提取有关发射源大小的信息^[3].

为了研究中能区重离子引起的弹核碎裂及转移反应和高激发核的性质,我们在 HIRFL 上,用 46.7 MeV/u 的¹²C 束流轰击不同的靶核进行了实验.

2 实验

实验中采用 46.7 MeV/u 的¹²C 束轰击⁵⁸Ni、¹¹⁵In 和¹⁹⁷Au 三种靶核,这几种反应系统的实验条件及擦边角、靶核的 N/Z、弹核靶核复合系统的 N/Z 见表 1.

对这些反应系统的研究可以得到一些中能区反应机制随反应系统变化的知识.

实验是在 1.5m 直径的大散射室中进行的.我们用 3cm 厚的 CsI(Tl) 与 130、1500 和 5000 μ m 厚的半导体组成的望远镜探测器测量了反应中前方向 5°~20° 的出射产物,对类弹碎片进行了同位素鉴别^[4].小相对动量的轻带电粒子关联是用 3 \times 3 的 CsI(Tl) 九单阵列测量的,每个单元的面积 1 \times 1cm²,厚度为 1.5cm,用光二极管读出,用过零时间法进行粒子鉴别,可以很好地区分氢和氦的不同同位素^[5].它被放在 20° 处的转臂上,距靶 35cm,相邻单元的夹角为 2.5°,最大夹角为 7°,每个单

* 国家自然科学基金委资助课题

元所张的立体角为 0.86 msr. 实验中 α 粒子的能量阈为 8MeV.

表 1 各反应系统的有关参数

靶核	靶厚 (mg/cm ²)	擦边角 $\theta_{\text{擦}}^{\circ}$	$(N/Z)_{\text{target}}$	$(N/Z)_{\text{comp.}}$
⁵⁸ Ni	1.046, 2.092	2.6°	1.07	1.06
⁶⁴ Ni	1.063	2.6°	1.29	1.24
¹¹⁵ In	4.81	4.2°	1.35	1.31
¹⁹⁷ Au	2.73, 4.53	6.3°	1.49	1.46

3 实验结果与讨论

3.1 类弹碎片的测量

用粒子鉴别望远镜探测器测量了 46.7 MeV/u 的 ¹²C 束轰击 ⁵⁸Ni、¹¹⁵In 和 ¹⁹⁷Au 三种靶核时反应中前方向 5°~20° 的出射产物, 对类弹碎片进行了同位素鉴别. 实验中, 在前冲角区测得离弹核较远的类弹碎片, 由于转移反应的贡献小, 其速度谱在稍小于束流速度处成峰, 这是弹核碎裂的有力证据.

在相对论重离子碰撞中发现, 在弹核参考系统中碎片的动量分布是高斯型的, 与碎片和弹核的质量有关, 而与靶核质量和轰击能量关系不大. Goldhaber 给出了动量分布宽度 σ 与碎片质量 A_f 之间的关系式^[6]

$$\sigma^2 = \sigma_0^2 \frac{A_f(A_f - A_p)}{A_p - 1} \quad (1)$$

式中, σ_0 为约化动量分布宽度, 它与碎片质量无关, 由费米运动所决定. 这一抛物线关系是在下面假设的基础上得到的: 核内核子间无关联, 仅满足运动学上的要求. σ_0 与核内核子的费米运动相关, 如果弹核内核子动量的方均值为 $(3/5)p_F^2$, 则 $\sigma_0 = 1/\sqrt{5}p_F$.

对碎片的速度谱进行拟合可得到动量分布宽度, 进而再按(1)式计算 σ_0 , 对不同的碎片得到的 σ_0 几乎都相同. 对其它几种反应系统, 这一结论也适用. 对反应中各种类弹碎片平均后, 可得到相同的 σ_0 值. 所得的结果列于

表 2.

表 2 46.7MeV/u ¹²C 弹核碎裂部分的动量分布宽度

碎片 靶	σ (MeV/c)				σ_0 (MeV/c)			
	⁶ Li	⁷ Li	⁷ Be	⁹ Be	⁶ Li	⁷ Li	⁷ Be	⁹ Be
⁵⁸ Ni	138.9	147.2	140.7	125.5	76.8	82.5	78.9	80.1
⁶⁴ Ni	138.8	148.3	146.0	125.4	76.7	83.2	81.9	80.1
¹¹⁵ In	134.7	147.7	147.6	129.8	74.4	82.8	82.8	82.8
¹⁹⁷ Au	136.9	140.0	143.4	123.8	75.7	78.5	80.4	79.0

σ_0 与重离子核反应中弹核入射能量的关系示于图 1, 图中的数据取自 ⁴⁰Ar、²⁰Ne 和 ¹⁴N 等弹核引起的重离子核反应^[7,8]. 对于 ¹²C (46.7 MeV/u) 引起的核反应, 我们得到 $\sigma_0 = 80 \pm 10$ MeV/c, 这个值接近于相对论能量下的 σ_0 值. 图中虚线是用 Friedman 模型计算的结果.

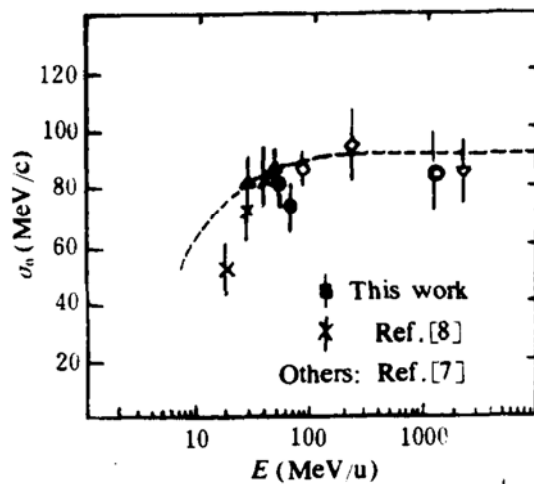


图 1 σ_0 与重离子核反应中弹核入射能量的关系

当碎片质量远离弹核时, 我们可以认为能谱的高能部分主要是碎裂的贡献, 转移的贡献可以忽略. 用 Abrasion 模型对各种反应系统的 ⁶Li、⁷Li、⁷Be 和 ⁹Be 等碎片的能谱可以拟合出碎裂部分的最可几能量 \bar{E} . 对于更重的类弹碎片如 ¹⁰B、¹¹B、¹⁰C 和 ¹¹C, 由于转移对其形成有贡献, 能谱的高能部分是弹核碎裂和转移贡献的迭加, 可将 ¹⁰B、¹¹B、¹⁰C 和 ¹¹C 等类弹碎片能谱中的高能部分分解为碎裂和转移部分. 将碎裂

贡献扣除后,余下的高能部分和低能部分可认为分别来自于转移和耗散,这样我们就可以粗略地将不同反应机制的贡献分开,从而可以进一步研究它们随反应系统的变化.对于转移部分所得到的约化动量分布宽度列于表 3.

表 3 46.7MeV/u¹²C 转移部分的动量分布宽度

碎片 靶	$\sigma(\text{MeV}/c)$				$\sigma_0(\text{MeV}/c)$			
	¹⁰ B	¹¹ B	¹⁰ C	¹¹ C	¹⁰ B	¹¹ B	¹⁰ C	¹¹ C
⁵⁸ Ni	61.1	46.5	60.3	47.9	45.3	48.5	44.7	47.9
⁶⁴ Ni	67.4	53.4	66.2	51.4	50.0	53.4	49.1	51.4
¹¹⁵ In	54.6	42.1	48.7	35.9	40.5	42.1	34.6	35.9
¹⁹⁷ Au	57.5	41.1	49.7	35.4	42.6	41.1	36.9	35.4

转移部分的约化动量分布宽度为 41 ± 8 MeV/c, 远小于碎裂部分的约化动量分布宽度. 这是因为对于转移反应, 由于动量守恒的限制, 核子是被转移到一定的末态, 因而相空间限制较严格, 而对于碎裂反应, 弹核的碎裂并不受此约束. 碎裂和转移的几率随靶核质量的增大而增加. 转移反应的贡献仅限于邻近弹核的碎片. 在这个能区内, 远离弹核的碎片主要来源于弹核碎裂. 实验结果表明, 在同一能量下, 弹核碎裂截面随靶核质量而增大, 这与 Abrasion 模型的结果是一致的. 同时, 碎裂几率还与被擦去结团的结构有关. 例如, 在 ¹²C 引起的反应中, 生成 $A_r = 7$ 的同量异位素 ⁷Li 和 ⁷Be 的碎裂几率不同. 比较 ⁷Li 和 ⁷Be 两种碎片, 对所有的反应系统, ⁷Li 的碎裂截面都要大一些. ⁷Li 对应于被擦去结团中含有三个质子和两个中子 (⁵Li 结团), 而 ⁷Be 对应于被擦去结团中含有两个质子和三个中子 (⁵He 结团), 结团结构不同导致碎裂几率存在差别. 再比较 ¹⁰C 和 ¹⁰B, ¹⁰B 的碎裂截面比 ¹⁰C 的碎裂截面大得多, ¹⁰B 对应于被擦去一个质子和一个中子, ¹⁰C 则对应于被擦去两个中子, 两个中子不能形成稳定的束缚态, 因而形成 2n 结团的几率也大大降低, 这导致较低的 ¹⁰C 碎裂截面. 同时碎裂几率与靶核的结构也表现出一定的关系, 将不同

反应系统的 ⁷Li、⁷Be 碎裂截面之比列于表 4. 可以看出, 当靶核的 N/Z 增加时, ⁷Li/⁷Be 碎裂截面之比也增加, 即 N/Z 较大的靶核更趋向于擦去质子较多的结团. 从而也可以解释, 为什么实验中 ¹¹B 的碎裂截面要比 ¹⁰C 的碎裂截面大的原因.

表 4 ¹²C 入射反应中的 ⁷Li、⁷Be 碎裂截面之比

靶核	⁵⁸ Ni	¹¹⁵ In	¹⁹⁷ Au
$(N/Z)_{\text{target}}$	1.07	1.35	1.49
$\frac{d\sigma}{d\Omega}(\text{frag.})(^7\text{Li}/^7\text{Be})$	1.08	1.47	1.70

3.2 轻带电粒子关联的测量

用九单元 CsI(Tl) 探测器阵列测量了反应中发射的小角关联的轻带电粒子. 用关联函数来分析由阵列的相邻单元所探测和鉴别的氢和氦的不同同位素的符合事件. 实验中关联函数 $R(q)$ 是由符合计数率 $Y_{12}(p_1, p_2)$ 和单举计数率 $Y_1(p_1)$ 及 $Y_2(p_2)$ 决定的

$$\sum_{p_1, p_2} Y_{12}(p_1, p_2) = C_{12} [1 + R(q)] \cdot \sum_{p_1, p_2} Y_1(p_1) Y_2(p_2) \quad (2)$$

其中, p_1, p_2 是粒子 1 和 2 的动量, q 是关联粒子对的相对动量, 它等于 $\mu(p_2/m_2 - p_1/m_1)$. 这里, 关联函数只是 $q = |q|$ 的函数, C_{12} 是归一化系数, 它由大 q 时 $R(q) = 0$ 的条件所确定, 在那里, 发射粒子间的末态相互作用可以忽略. 式(2)中的求和遍及所有的粒子能量和不同的探测单元组合.

实验中测量了 p- α 关联函数, 图 2a 中可看到两个明显的峰, $q = 15$ MeV/c 处的窄峰并不对应于质量为 5 的系统, 它是 ⁹B 的不稳定基态衰变 (⁹B \rightarrow 2 α + p), 而有一个 α 没有被探测到所形成的. 在 $q \sim 50$ MeV/c 处的较宽的峰对应于 ⁵Li ($J^\pi = 3/2^+$, $\Gamma = 1.5$ MeV, $\Gamma_a/\Gamma = 1$) 的非束缚态. 图 2b 给出了 d-³He 的关联函数, 其中的峰对应于 16.66 MeV 的 ⁵Li ($J^\pi = 3/2^+$, $\Gamma = 0.3$ MeV, $\Gamma_a/\Gamma = 0.86$) 态的衰变.

图 3 给出的是 d- α 关联函数, 其中的窄峰对应于 ${}^6\text{Li}$ 2.186 MeV ($J^\pi = 3^+, \Gamma_o/\Gamma = 1$) 的粒子不稳定态. 图 4 给出的是 α - α 关联函数, 其

中强的窄峰对应于 ${}^8\text{Be}_{g.s.}$ ($J^\pi = 0^+, \Gamma_o/\Gamma = 1$) 基态, 而小峰则对应于 3.04 MeV 的 ${}^8\text{Be}$ ($J^\pi = 2^+, \Gamma_o/\Gamma = 1$) 的激发态.

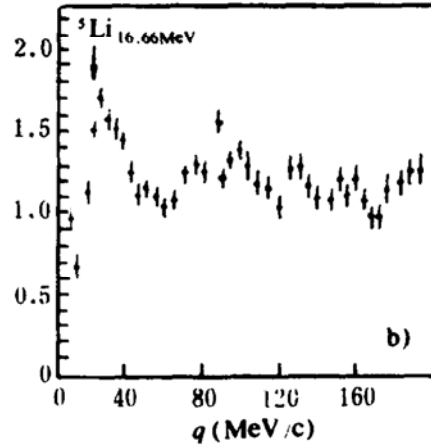
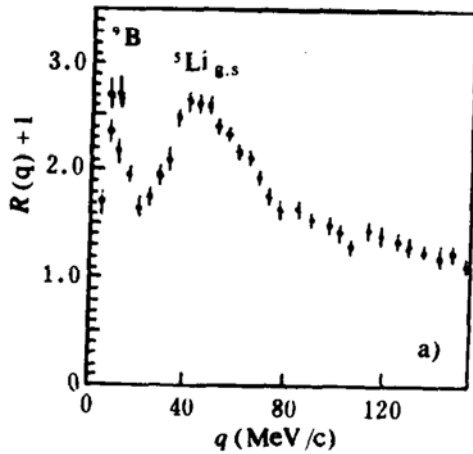


图 2 ${}^{12}\text{C} + {}^{58}\text{Ni}$ 反应, a) p- α 关联函数图, b) d- ${}^3\text{He}$ 关联函数图

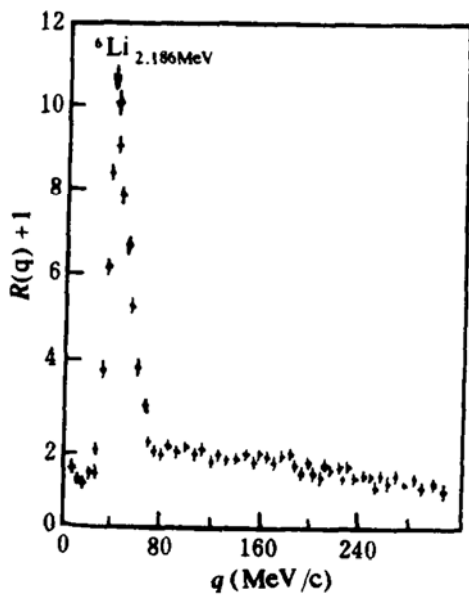


图 3 d- α 关联函数

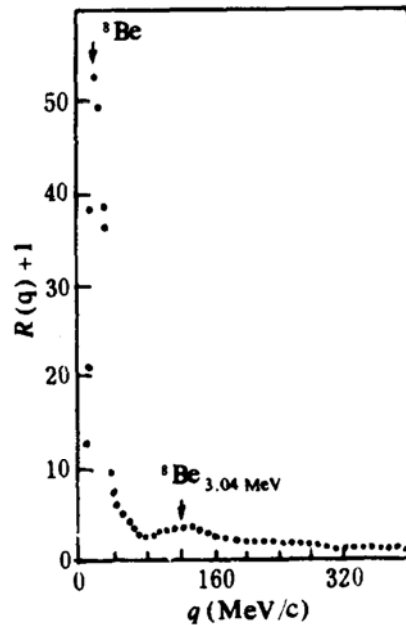


图 4 α - α 关联函数

所有这些含有粒子不稳定态的关联函数, 在发射系统发射前已达到化学平衡的假设下, 都可用来确定发射系统的核温度参数, 从这些激发态的相对布居可提取高激发核系统的发射温度^[2]. 温度为 T 的热力学体系发射某一复杂粒子并且其相应的激发能为 E_i 的几率是

$$P_i \propto g_i \exp \left[-\frac{E_i}{T} \right] \quad (3)$$

其中, g_i 为 i 能级的简并度. 通过测量非稳定的复杂粒子的衰变产物就可定出非稳定核或稳定核低激发态的产额. 如果对同一种复杂粒子测量两种不同的激发态的相对布居

$$\frac{P_i}{P_j} = \frac{g_i}{g_j} \exp\left(-\frac{(E_i - E_j)}{T}\right), \quad (4)$$

就可以提取核温度. 对实验关联函数中的峰下的产额进行几何探测效率的修正, 就可得到这些非稳定粒子态的产额. 我们重点研究了 ${}^5\text{Li}_{g.s.}/{}^5\text{Li}_{16.66\text{MeV}}$ 、 ${}^6\text{Li}_{g.s.}/{}^6\text{Li}_{2.186\text{MeV}}$ 及 ${}^8\text{Be}_{g.s.}/{}^8\text{Be}_{3.04\text{MeV}}$ 三种非稳定粒子不同激发能级的相对布居数的比值, 对于不同靶核系统所得到的结果见表 5.

表 5 核温度 (MeV)

靶核 反应道	${}^{58}\text{Ni}$	${}^{115}\text{In}$	${}^{197}\text{Au}$
${}^5\text{Li}_{g.s.}/{}^5\text{Li}_{16.66\text{MeV}}$	3.07 ± 0.03	3.30 ± 0.04	3.20 ± 0.03
${}^6\text{Li}_{g.s.}/{}^6\text{Li}_{2.186\text{MeV}}$	3.03 ± 0.06	2.90 ± 0.07	3.30 ± 0.06
${}^8\text{Be}_{g.s.}/{}^8\text{Be}_{3.04\text{MeV}}$	2.89 ± 0.08	2.40 ± 0.10	2.29 ± 0.09

从表 5 可以看出, 对于 ${}^8\text{Be}_{g.s.}/{}^8\text{Be}_{3.04\text{MeV}}$ 得到的核温度要比其它非稳定粒子得到的结果低一些. 我们认为这是因为所用的束流为 ${}^{12}\text{C}$ 均具有 α 结团结构, 在周边反应的低激发时, 就很容易碎裂为一个 α 粒子和 ${}^8\text{Be}$, 它对实验测量的关联函数的贡献使核温度有所降低. 这也为实验所证实, 对动能和大的 (周边反应产生的) α - α 关联事件得到了低的核温度.

4 小 结

在 46.7 MeV/u ${}^{12}\text{C}$ 轰击 ${}^{58}\text{Ni}$ 、 ${}^{115}\text{In}$ 和 ${}^{197}\text{Au}$ 靶的核反应中, 研究了弹核碎裂和它与转移反应的共存和竞争. 得到的对应于弹核碎裂过程的类弹碎片动量分布宽度为 80 ± 10 MeV/c, 接近于高能情况下的值. 对转移反应过程得到的类弹碎片动量分布宽度为 41 ± 8 MeV/c, 由于相空间的限制, 它小于弹核碎裂时的宽度. 通过小相对动量轻粒子的关联测量, 得到了一些产物的粒子不稳定态的相对布居, 从而提取了系统的核温度参数, 它约为 3 MeV.

本工作主要参加者有詹文龙、郝鸿飞、刘冠华、郭忠言和周建群等, 作者感谢 HIRFL 和公共实验室的全体人员的支持和帮助.

参 考 文 献

- 1 Gregoire C, et al. Ann. Phys. Fr., 1986, 11: 323
- 2 Pochodzalla J, et al. Phys. Lett., 1985, B161: 275
- 3 Koonin S E. Phys. Lett., 1977, 70B: 43
- 4 周建群等. 高能物理与核物理, 1992, 16(10): 933
- 5 Xi H F, et al. Nucl. Inst. & Meth., 1992, A320: 504
- 6 Goldhaber A S, et al. Phys. Lett., 1974, 53B: 306
- 7 Borrel V, et al. Z. Phys., 1986, A324: 205
- 8 Zhu Yongtai, et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys., 1990, 14: 195

Projectile Fragmentation and Light Charged Particle Correlation Induced by 46.7 MeV/u ${}^{12}\text{C}$ Ion

Zhu Yongtai

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

Abstract The projectile fragmentation and its competition with the transfer reactions have been studied in the reactions induced by 46.7 MeV/u ${}^{12}\text{C}$ ion on the ${}^{58}\text{Ni}$, ${}^{115}\text{In}$ and ${}^{197}\text{Au}$ targets. The reduced momentum distribution widths of the projectile-like fragments for projectile fragmentation and transfer reactions were extracted from the experimental data respectively. The nuclear temperature parameters were obtained from the relative populations of the unstable particle emission states for different reaction systems.

Key Words projectile fragmentation, light charged particle correlation, nuclear temperature parameter.