

46.2MeV/u $^{12}\text{C} + ^{64}\text{Ni}$ 、 ^{58}Ni 反应中发射的 轻粒子和复杂碎片*

尹淑芝 詹文龙 诸永泰 郭忠言
冯恩普 郝鸿飞 周建群 刘冠华

(中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000)

摘 要

用光二极管读出的 CsI(Tl) 闪烁探测器和多叠层硅望远镜, 测量了 46.2 MeV/u ^{12}C 引起各种靶 ^{64}Ni 、 ^{58}Ni 、 ^{12}C 、 ^{197}Au 、 ^{209}Bi 反应中所发射的轻粒子和中等质量碎片, 这些探测器对轻粒子和中等质量碎片有很好的能量分辨和质量分辨。单举的能谱用运动源模型进行了分析, 对各种靶在不同角度的中等质量碎片的产额进行了比较。由单举数据推出同位素产额比随靶质量变化的系统性, 讨论了 N/Z 自由度的平衡。

一、前 言

对核反应中发射的复杂粒子和碎片进行同位素鉴别, 并把它们作为中、高能核-核碰撞动力学研究的探针, 原因有两个^[1], 一是它们与 N/Z 自由度密切相关, 即发射碎片的 N/Z 之比是在核反应中平衡最快的自由度之一, 可以用碎片的同位素组成和达到平衡时的 N/Z 自由度, 推出反应过程的时间尺度; 二是复杂碎片的产额比联系着发射系统的熵, 熵作为核反应产物的状态变量, 它的测量将提供有关核反应初始阶段的信息。本文中的同位素产额比是从 ^{12}C 引起的 ^{64}Ni 、 ^{58}Ni 、 ^{197}Au 、 ^{209}Bi 、 ^{12}C 单举数据中得出的, 同位素产额比随靶质量有系统性的变化。

二、实 验

实验是在兰州近代物理所的重离子加速器 HIRFL 上完成的, 除 ^{12}C 靶只有几百 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 以外, 其它 ^{64}Ni 、 ^{58}Ni 、 ^{197}Au 、 ^{209}Bi 靶厚均在 $1\text{mg}/\text{cm}^2$ 以上, 测量和鉴别了反应中发射的轻粒子和中等质量碎片, 前角的半导体望远镜放置在 6° 、 7.5° 、 10.5° 和 12.5° , 中角区的半导体望远镜放置在 25° 、 30° 、 40° 和 55° , CsI(Tl)望远镜可在 20° — 60° 范围内转动,

本文 1990 年 11 月 24 日收到, 1991 年 8 月 6 日收到修改稿。

* 本课题是中科院七·五重大课题的子课题, 得到了中科院青年基金的支持。

每次间隔 5° 。前角区望远镜的半导体探测器的厚度分别是 100μ 、 200μ 和 5000μ ，中角区望远镜的半导体厚度分别为 200μ 、 500μ 和 3000μ 。CsI(Tl) 望远镜由两片厚度为 152μ 、 200μ 硅面垒探测器和 CsI(Tl) 闪烁体组成。在 CsI(Tl) 光输出望远镜中主要探测到 α 同位素和 p、d、t 等轻粒子，而在前角区和中间角区的望远镜中不仅探测到中等质量碎片同时也探测到轻粒子，但遗憾的是轻粒子在很多角度尤其前角区有严重的穿透。以前角 10.5° 为例，我们得到了直到 C 的很好的同位素分辨，但轻粒子 α 、p、d、t 有严重的穿透，图 1 给出此探测器的同位素分布。在中间角区的半导体探测器有同样较好的同位素分辨，以 55° 的结果为例，它能对 α 、p、d、t 进行很好的鉴别，探测器的阈较低，所以能谱较前角区探测器的能谱完整。

为了得到同位素的产额比，我们选用中间角区 20° 、 25° 、 35° 、 40° 、 55° ^{12}C 轰击 ^{64}Ni 、 ^{58}Ni 靶时的数据，为了比较同位素产额比随靶质量的系统性变化，同时还选用了 ^{197}Au 、 ^{209}Bi 靶时的数据。

三、实验结果

1. 单举能谱的运动源模型分析

在运动源模型中^[2]，轻粒子的发射来自有一定源速度的热斑的局部平衡的 Maxwell-Boltzmann 蒸发，用运动源模型符合大量数据的系统性，可提供这些符合参数的物理意义和有关机制的信息。用一个简单的运动源参数化可符合复杂碎片的能谱，我们假定了在源静止的框架内，轻粒子是各向同性发射，能谱的形式由下式表达：

$$\frac{d^2\sigma}{dE_{i,z}d\Omega} = \sigma_0 E_{i,z} \exp(-E_{i,z}/T), \quad (1)$$

这里， $E_{i,z}$ 是在源静止框架内碎片刚从源中分裂出来的初始动能， σ_0 是归一常数， T 是表现温度参数，在实验室系中非相对论的表达式为：

$$\frac{d^2\sigma}{dE_{1,b}d\Omega} = \sigma_0 [(E_{1,b} - V_x) E_{i,z}]^{1/2} \exp(-E_{i,z}/T), \quad (2)$$

$$E_{i,z} = E_{1,b} - V_x + E_0 - 2[E_0(E_{1,b} - V_x)]^{1/2} \cos \theta_{1,b}, \quad (3)$$

$E_{1,b}$ 是实验室系中碎片的动能， E_0 是质量为 m_f 的碎片以源速度 v_0 运动时的动能， $E_0 = m_f v_0^2/2$ ， V_x 是库仑位垒， $\theta_{1,b}$ 为粒子在实验系中的出射角。 $\beta = \frac{v_0}{c}$ 是光速用 β 参数表示源的速度 v_0 ，在我们的分析中，应用了三个源^[3]：

$$\frac{d^2\sigma}{dE d\Omega} = \frac{d^2\sigma_p}{dE d\Omega} + \frac{d^2\sigma_i}{dE d\Omega} + \frac{d^2\sigma_f}{dE d\Omega}, \quad (4)$$

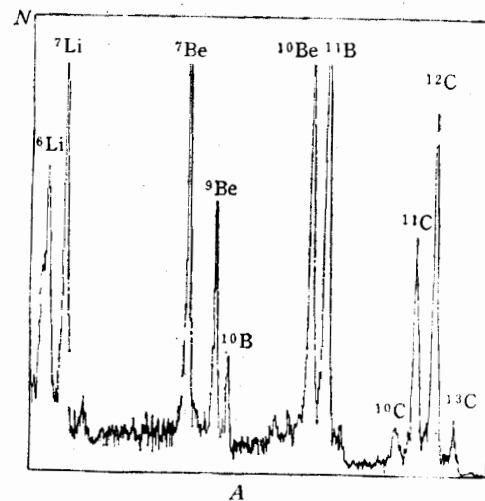


图 1 46.2MeV/u ^{12}C 轰击 ^{64}Ni 时，在 10.5° 的同位素分布

这三个源连系着不同的物理过程,在前角的发射截面中弹核碎裂占优势,主要由接近束流速度的 p 源引起的,在大角度区,由接近复合核速度的 t 源起主要作用,在中间角区的能谱和截面主要由具有束流速度一半的中间速度源 i 贡献的。图 2 给出了 $^{12}\text{C} + ^{64}\text{Ni}$ 时, 40° 的 ^6Li 、 ^7Li 的归一化能谱和用运动源模型拟合的结果,实线是源模型拟合结果,误差棒仅含统计误差。符合的结果表明在 40° 的中间角度上,表示弹核碎裂的 p 源可以忽略,仅考虑中等速度源和复合核速度源对能谱的贡献,同时拟合两条曲线,得到的符合参数为:

$$\sigma_t = 7.5, \beta_t = 0.045, T_t = 6.5\text{MeV}, V_{zt} = 8.6\text{MeV},$$

$$\sigma_i = 6, \beta_i = 0.19, T_i = 12.1\text{MeV}, V_{zi} = 5.7\text{MeV}.$$

下标 i 表示中等速度源, t 表示复合核源, σ_t , σ_i 分别代表了复合核源和中等速度源的归一常数。为了比较,我们以光速 c 为单位列出束流速度 $V_p = 0.3167c$, $\beta_p = 0.3167$; 复合核速度 $V_{CN} = 0.05c$, $\beta_{CN} = 0.05$ 。

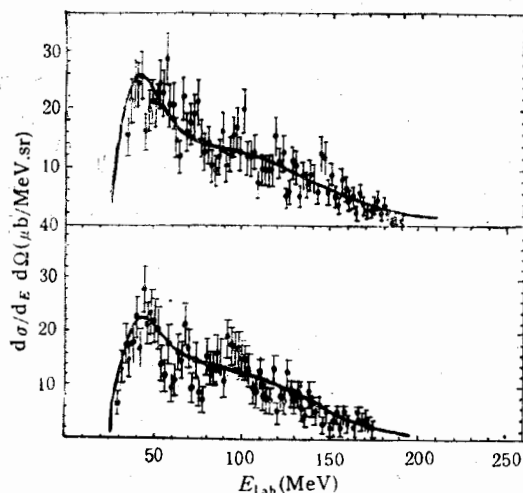
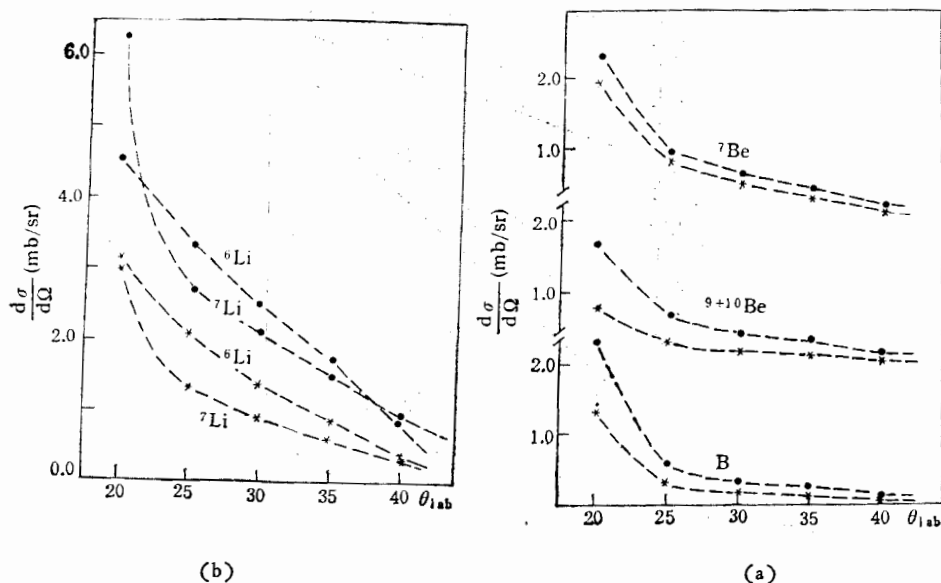


图 2 $46.2\text{MeV/u } ^{12}\text{C} + ^{64}\text{Ni}$, 在 40° 时 ^6Li 、 ^7Li 的能谱,实线是用运动源模型的拟合结果,误差棒仅含统计误差

2. 同位素产额对靶核质量数的依赖

图 3 中给出了 $^{12}\text{C} + ^{64}\text{Ni}$ 、 ^{58}Ni 不同靶核在不同角度上的 B , ^{9+10}Be 、 ^7Be 、 ^7Li 、 ^6Li 等反应产物截面,由图可见, ^{64}Ni 靶时各种产物的截面值总是高于 ^{58}Ni 靶时的各种产物的截面值,尤其是前角丰中子同位素 ^{9+10}Be 的截面 ^{64}Ni 靶时比 ^{58}Ni 靶时高得更多(相对于 ^7Be 而言), ^7Li 的截面值也表现出同样的规律(相对于 ^6Li 而言),造成这种物理现象的原因比较复杂,但定性地可作如下解释: ^{64}Ni 靶核比 ^{58}Ni 靶更丰中子,弹核向靶核转移质子时, ^{64}Ni 靶核比 ^{58}Ni 靶核可能更容易得到质子,所以在丰中子靶核时产生丰中子反应产物的几率要比相对地缺中子靶时的几率大。同一元素的同位素产额比对靶核质量数的依赖关系见表 1,表中列出了 ^{64}Ni 、 ^{58}Ni 靶时在不同角度处的 $^{9+10}\text{Be}/^7\text{Be}$ 、 $^7\text{Li}/^6\text{Li}$ 的比值。


 图 3 46.2 MeV/u ^{12}C 轰击 $^{64}\text{Ni}, ^{58}\text{Ni}$ 靶时产生的同位素产额对靶质量数的依赖

 (a) 对 B, $^{9+10}\text{Be}, ^7\text{Be}$, (b) 对 $^6\text{Li}, ^7\text{Li}$

 * ^{58}Ni ● ^{64}Ni

表 1 同位素产额比(在不同角度上)

$^{9+10}\text{Be}/^7\text{Be}$	20°	25°	35°	40°
^{64}Ni	0.716	0.661	0.799	0.626
^{58}Ni	0.398	0.301	0.373	0.325
$^7\text{Li}/^6\text{Li}$	20°	25°	35°	40°
^{64}Ni	1.368	0.815	0.908	1.126
^{58}Ni	0.989	0.639	0.686	1.024

从表中的比值可看出同位素产额比 $^{9+10}\text{Be}/^7\text{Be}$ 、 $^7\text{Li}/^6\text{Li}$, 对 ^{64}Ni 靶的值大于 ^{58}Ni 靶的值, 即对 ^{64}Ni 靶来说产生丰中子同位素的几率更高一些, 进一步的物理分析也是必要的。

3. 同位素产额比对复合系统 N/Z 自由度的依赖

因为前角区轻粒子发射机制较复杂, 所以在图 4 中我们选取了 35° 处的 $^4\text{He}/^3\text{He}$ 的比作为复合系统 N/Z 的函数, 同时给出了相同实验条件的另一轮实验 120° 的 $^6\text{He}/(^3\text{He} + ^4\text{He})$ 的比。这里使用的同位素产额比是对同位素能谱积分后得到的。同位素的产额比强烈地依赖于靶的选择, 与靶的相关性质表现为与复合系统的 N/Z 自由度成近似线性关系, 暗示出在发射轻粒子和复杂碎片之前, 系统的 N/Z 自由度已经达到平衡, 从某种意义上来说, 复合系统是轻粒子和复杂碎片的主要发射源。

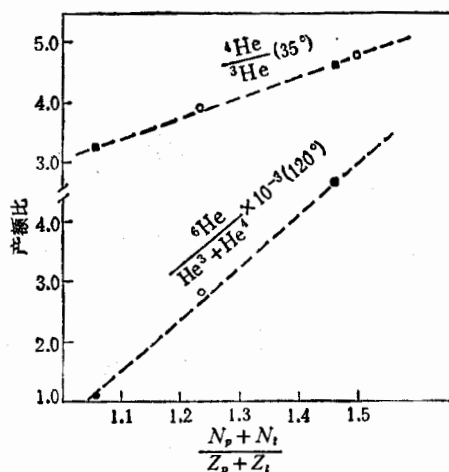


图4 46.2MeV/u ^{12}C 轰击 ^{64}Ni 、 ^{58}Ni 、 ^{197}Au 、 ^{209}Bi 在 $\theta_{\text{lab}} = 35^\circ$ 得到的同位素产额比 $^4\text{He}/^3\text{He}$ 和 $\theta_{\text{lab}} = 120^\circ$ 的 $^6\text{He}/(^3\text{He} + ^4\text{He})$ 作为复合系统 N/Z 的函数

● ^{58}Ni ○ ^{64}Ni ■ ^{197}Au □ ^{209}Bi

注: 对产额比 $^6\text{He}/(^3\text{He} + ^4\text{He})$ 随 N/Z 变化曲线来自相同实验条件的另一轮实验。

四、结论和讨论

我们测量了 ^{12}C 轰击 ^{64}Ni 、 ^{58}Ni 、 ^{197}Au 、 ^{209}Bi 靶核产生的单举的 p 、 d 、 t 、 ^3He 和 ^4He 的能谱和轰击 ^{64}Ni 、 ^{58}Ni 靶核时产生的中等质量碎片, 对 Li 、 Be 、 B 同位素单举能谱数据可用具有三个源的参数化的运动源模型分析。得到了同位素产额对靶核质量数的依赖关系以及同位素产额比与反应系统 N/Z 自由度的依赖关系。进一步的研究需要作符合实验和与轻粒子多重性相关联的实验, 这样更有利于搞清楚轻粒子和复杂粒子发射的来源和机制, 同时就单举数据来说, 对研究同位素产额比与反应系统 N/Z 自由度的依赖性也需要在实验上补充新的数据。

作者感谢近物所 HIRFL 加速器的运行人员, 数据获取和 NIM 仪器库的工作人员, 给予本实验在各方面的支持以及提供的良好的实验条件。

参 考 文 献

- [1] W. Trautmann, *Nucl. Phys.*, **A471** (1987), 191c—204c.
- [2] D. J. Fields, *Phys. Rev.*, **C30** (1984), 1912c—1923c.
- [3] N. Brummund, *Nucl. Phys.*, **A453** (1986), 349c—364c.

**Light Particle and Complex Fragments Emission
from ^{12}C Induced Reactions on
 $^{58}\text{Ni}, {}^{64}\text{Ni}$ at $E/A=46.2\text{MeV}$**

YIN SHUZH I ZHAN WENLONG ZHU YONGTAI GUO ZHONGYAN FENG ENPU

XI HONGFEI ZHOU JIANQUN LIU GUANHUA

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

ABSTRACT

Energy spectra of light charged particles and complex fragments emitted in the interaction of 46.2 MeV/u ^{12}C with different target $^{58}\text{Ni}, {}^{64}\text{Ni}, {}^{12}\text{C}, {}^{197}\text{Au}$ and ^{209}Bi have been measured by telescopes, consisting of CsI (T1) and surface barrier detector stacks. These telescopes for light charged particles and complex fragments have good energy resolution and mass identification. The inclusive data have been analysed within a moving source parametrization. The complex fragment yields from different targets have been compared at several angles. The systematic variation of deduced isotope yields ratios with different reaction systems is used to determine the N/Z degree of freedom equilibration of the system achieved.