

# 84 MeV/核子的<sup>12</sup>C引起的 中能重离子反应的研究

K. D. Hildenbrand 来华学术报告概述

## 一、开展中能重离子反应研究的意义

对轰击能量较低的重离子反应已经进行了广泛的研究。此时质心系轰击能 $E_{cm}$ 超过库仑位垒 $V_B$ 约3~5 MeV/核子,在核接触时的相对速度 $V_{rel} \lesssim 3 \text{ cm/ns}$ ,反应时间 $\tau$ 大于 $3 \times 10^{-22} \text{ s/fm}$ 。核中核子的费米速度约为 $8 \text{ cm/ns}$ ,相当于 $\tau_F$ 为 $10^{-22} \text{ s/fm}$ ,因此时 $\tau \geq \tau_F$ 。大量实验表明此时主要发生二体反应,过程是绝热的。通过相互作用,能量、角动量、N/Z自由度及质量逐步发生弛豫。七十年代美国贝克莱的 Bevalac 加速器给出了相对论性的重离子束,质心系轰击能可达 $E_{cm} \approx 400 \sim 2000 \text{ MeV/核子}$ 。此时反应时间 $\tau \ll \tau_F$ 。一些实验表明此时发生的过程是高度非绝热的过程。对于擦边碰撞可用旁观参加者模式进行解释,对心碰撞主要过程是星裂。在这两种极端的反应中间应该有一个过渡区域,估计它发生在轰击粒子速度接近于核内核子的费米速度 $V_F$ 附近,相应的轰击能区在每核子几十 MeV 到一、二百 MeV 内,即中能重离子能区内,因此开展中能重离子反应的研究是很有意义的。作为一个例子我们可以看一下 Oherlund 等在贝克莱利用相对论性的<sup>12</sup>C束在核乳胶中降能达到86 MeV/核子产生的中能对心碰撞的结果。86 MeV/核子<sup>12</sup>C对心轰击银核可得到星裂反应,用乳胶记录到了这种事件。这似乎和相对论性重离子束对心碰撞的结果有点类似,但实际上这类事件发生的几率是很小的。中能重离子反应处于低能重离子反应和相对论性重离子反应之间,是比较复杂的,现在刚开始研究这个能区的重

离子反应。我们利用西欧核子中心的同步回旋加速器给出的84 MeV/核子的<sup>12</sup>C轰击 Be, C, ……Ta, Au, U靶,主要研究:1) 中能重离子可产生哪些类型的反应;2) 核上发生的动量转移;3) 较重碎片的产生及其关联。实验中轰击能虽然较高,但产生的重碎片动能并不太大,因此采用较薄的靶,厚度一般在 $300 \sim 500 \mu\text{g/cm}^2$ 之间。

## 二、CERN 同步回旋加速器及实验装置简介

该加速器建于1957年,是CERN最老的加速器,后来加速质子,现在改建成加速重离子。它的参数见下表:

|          |                  |
|----------|------------------|
| 引出半径     | 220 厘米           |
| 高 频      | 29~16.5 MHz      |
| 重复频率     | ~450 Hz          |
| 加速质子最大能量 | 600 MeV          |
| 束流强度     | 几个 $\mu\text{A}$ |

加速重离子时要求荷质比( $q/A$ )为 $1/2$ ,可把<sup>12</sup>C<sup>4+</sup>加速到86 MeV/核子,经剥离后给出84 MeV/核子<sup>12</sup>C<sup>6+</sup>才能由引出系统引出。此时每6.7毫秒给出一个束流脉冲,平均流强为 $10^{10}$ 粒子/秒。该加速器也加速过<sup>16</sup>O<sup>5+</sup>,由于 $q/A$ 不匹配束流减小100倍。1982年加速<sup>16</sup>N<sup>5+</sup>及<sup>18</sup>O<sup>6+</sup>,能量为86 MeV/核子;计划今年年底加速<sup>21</sup>Ne<sup>7+</sup>。该加速器存在两个问题:1) 束流没有时间结构;2) <sup>12</sup>C<sup>4+</sup>在剥离时有一部分裂成 $\alpha$ ,因而在<sup>12</sup>C束中央带着 $\alpha$

粒子。

图1是实验装置示意图。图中1是50msr的大面积位置灵敏电离室(IC)，测  $A \geq 4$  的碎片给出E、Z、X、Y和飞行时间。2是IC的时间起始探测器。3是二层构成的，内层由10个位置灵敏平行板雪崩探测器组成，它是

测量碎片 ( $A \geq 12$ ) 的时间位置的测量装置，给出 $v$ 、 $\theta$ 和 $\varphi$ ；外层由10块塑料闪烁器组成，它是测轻碎片 ( $A \geq 1$ ) 的时间位置的测量装置，给出 $v$ 、E、 $\theta$ 和 $\varphi$ 。4是放在3内及3外的一些测高能带电粒子的Si—Si或Si—NaI望远镜。5是测零度附近出射产物的时间

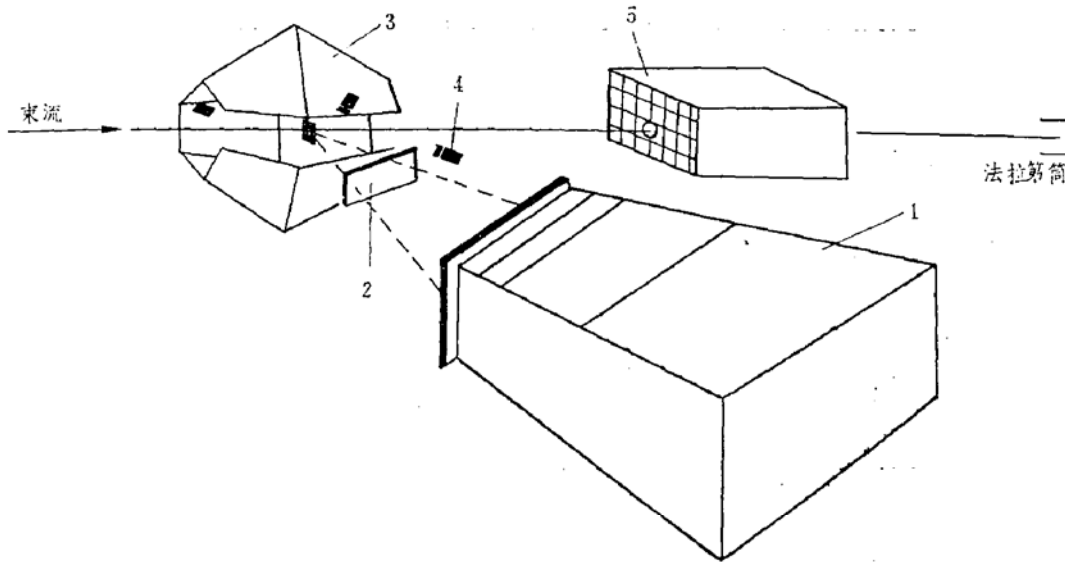


图1 实验装置示意图

位置的测量装置，它有27块塑料闪烁片和光电倍增管组成，给出 $v$ 、 $\frac{dE}{dX}$ 、 $\theta$ 和 $\varphi$ 。

### 三、重核上的动量转移

低能重离子主要产生二体反应，随后类弹和类靶发射轻粒子，这是二体反应跟随衰变的反应模式。

对于中能重离子一种可能产生的反应是前方向产生快产物的发射，可能是由入射粒子碎裂产生的。在整个系统平衡前有局部加热区域（有人称做热斑），它会发射粒子。反应初级阶段产生的余核由于激发能较高，通常还产生裂变。因此是一个多体问题。

在低能重离子反应中若余核发生跟随裂变，通常把入射粒子带入余核的动量作为判别反应机制的一个依据。例如全部动量转移表示较对心的碰撞较小的碰撞参数，产生的是全融合裂变；部份动量转移表示较大的碰撞参数。那末在中能重离子引起的反应中，

是否能把动量转移多少作为碰撞参数 $b$ 大小的量度呢？这正是我们研究动量转移的目的。中能重离子在重靶上引起反应时，余核裂开后两个重碎块都被探测器记录的符合事件，其 $\varphi_1 - \varphi_2$ 和 $\theta_1 + \theta_2$ 谱显示在图2中。 $\varphi_1 - \varphi_2$ 在 $180^\circ$ 成峰表明余核发生了两体裂开。若 $\theta_1 + \theta_2 = 180^\circ$ ，表示动量转移为0，余核是静止下裂开的。反应中动量转移增加时， $\theta_1 + \theta_2$ 减小。对每个系统发生动量全部转移时最小的 $\theta_1 + \theta_2$ 都可计算出来，图2中用箭头表示，实际测到的结果是在这二者之间而成峰。 $\theta_1 + \theta_2$ 可以作为动量转移多少的量度。图2中 $\theta_1 + \theta_2$ 可转换成反应中动量转移 $\Delta P$ 。发现对84MeV/核子 $^{12}\text{C}$ 轰击  $\text{U} \langle \Delta P \rangle = 1.2 \text{ GeV}/c$ ，对  $\text{Au} \langle \Delta P \rangle = 1.6 \text{ GeV}/c$ ，对  $\text{Ta} \langle \Delta P \rangle = 1.7 \text{ GeV}/c$ 。那末 $\Delta P$ 从大到小的变化，是否表明碰撞参数 $b$ 从小到大或反应从对心到擦边的变化呢？这还需要分析其它实验数据。

实验中测量了单举发射粒子的能谱，例

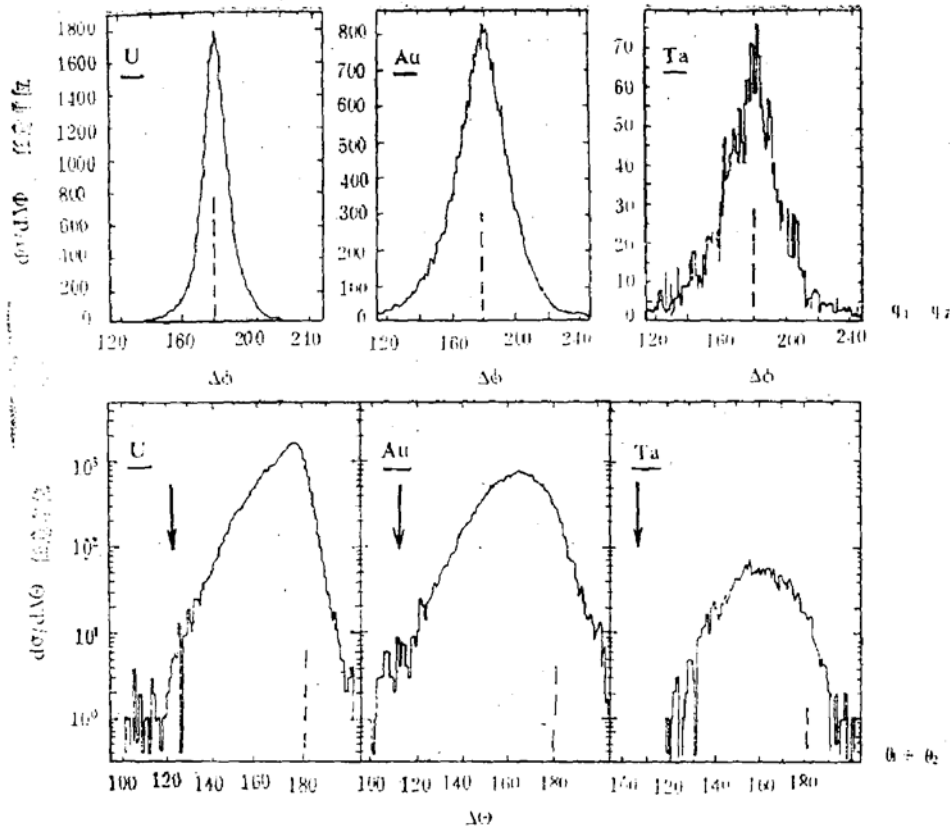


图2 记录到两个重碎片的符合事件的 $\varphi_1 - \varphi_2$ 谱和 $\theta_1 + \theta_2$ 谱

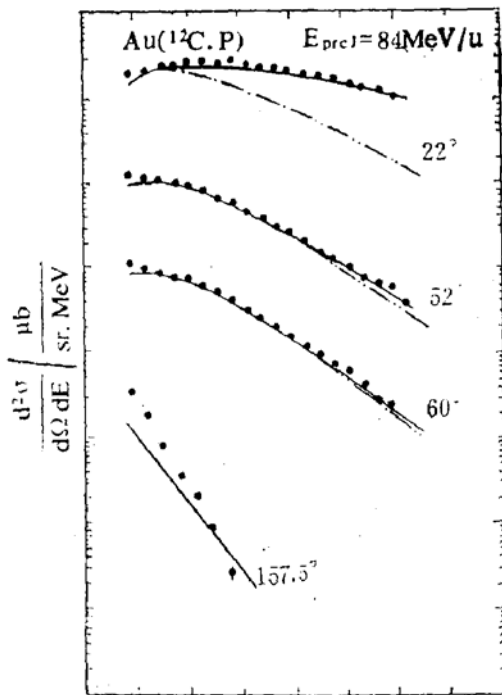


图3 84MeV/核子的 $^{12}\text{C}$ 轰击Au得到的不同角度的单举质子能谱

如质子谱显示在图3中。假设轻粒子是从运动着的发射源以麦克斯韦速度分布来发射粒

子的，测到的能谱可以用假设两个发射源来拟合，它们分别有速度 $V_1$ 、 $V_2$ 和温度 $T_1$ 、 $T_2$ 。拟合能谱得到的 $V_2 = 0.44c$ 近似等于束流速度， $V_1 = 0.18c$ 相应于动量转移为 $\langle \Delta P \rangle$ 时的余核速度。图3中实线是用两个源拟合的结果，虚线是只有 $V_1 = 0.18c$ 一个源时计算的结果，角度大于 $60^\circ$ 时它和两个源的计算结果一致。这说明发射的轻粒子可能有快的入射粒子碎裂产生的组份和余核预平衡及平衡发射轻粒子的组份。

对测到发射粒子同时测到两个重碎片的符合事件，即对 $^{12}\text{C} + \text{U} \rightarrow \text{裂变} + \text{X}$  (X为 $\alpha$ 、p等)反应，发现随转移动量 $\Delta P$ 增加发射粒子多重性增加，发射粒子各向异性(前角多重性/后角多重性)减小并趋向于1(图4、图5)。这是 $\Delta P$ 增大和碰撞参数 $b$ 减小有联系的一个证据。

前角方向的时间位置测量装置可测到入射粒子碎裂的碎片。这些碎片的速度集中在 $0.8 \sim 1$ 倍的束流速度范围内，因此仅有塑料

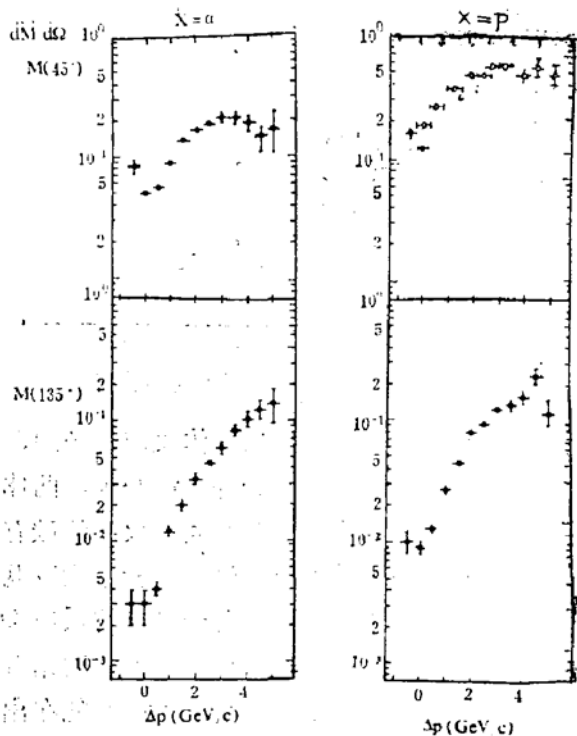


图4 发射粒子多重性和动量转移的关系

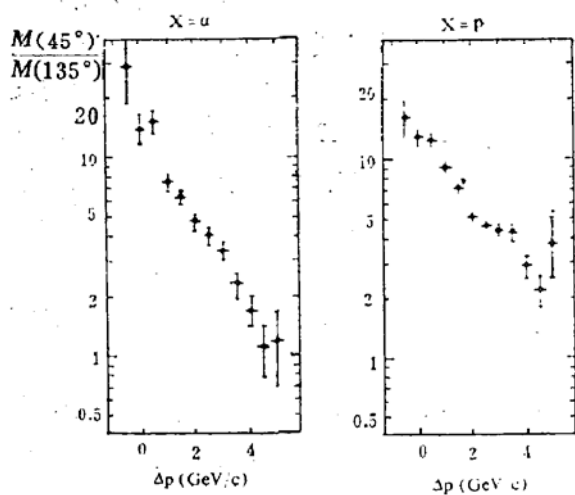


图5 发射粒子各向异性 and 动量转移的关系

闪烁片测到的  $\frac{dE}{dX}$  就可以区分不同元素。与测到两个重碎片符合的入射粒子碎块的多重性作为  $\Delta P$  的函数显示在图6中。出射C、B元素时，在  $\Delta P = 0$  附近成峰，出射元素变轻时分布变宽，峰位向  $\Delta P$  变大方向移动。图7中显示了三个动量转移间隔内的元素分布。 $\Delta P$  变大时 H:He 产额增大，这说明  $\Delta P$  增大时入射粒子裂成更小的碎块。入射粒子裂成更小碎块是和较小的碰撞参数相关的，因而也给

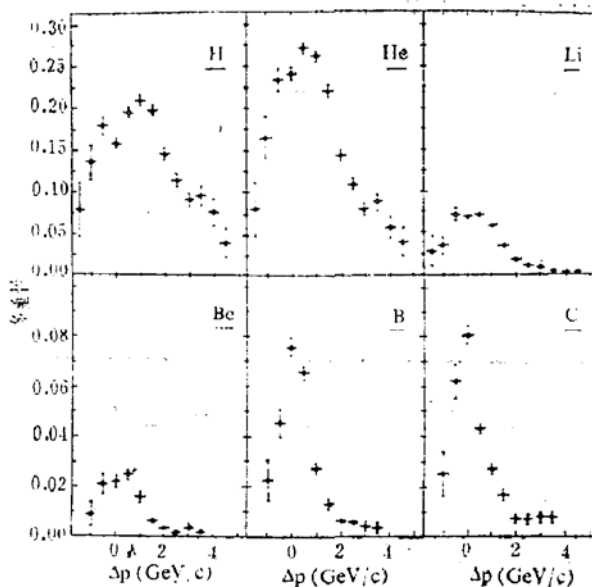


图6 前方向出射不同元素时，多重性和动量转移  $\Delta P$  的关系

出了  $\Delta P$  变大表明碰撞参数变小、碰撞更对心的证据。

#### 四、实验中观察到的反应类型

用 LIH 表示轻粒子时间位置测量装置中测到的粒子，用 HIH 表示重粒子时间位置测量装置中测到的粒子，用  $0^\circ$  表示  $0^\circ$  方向时间位置测量装置中测到的粒子。对  $84\text{MeV}/\text{核子}^{12}\text{C}$  轰击 Au 靶测到的各种符合事件的几率可见下表：

| 事件类型                  | 几率   | 几率和 |
|-----------------------|------|-----|
| HIH                   | 0.01 | 65% |
| HIH + $0^\circ$       | 0.03 |     |
| LIH                   | 0.22 | 31% |
| LIH + $0^\circ$       | 0.43 |     |
| LIH + HIH             | 0.13 | 31% |
| LIH + HIH + $0^\circ$ | 0.18 |     |

只测到轻粒子 (LIH) 未测到重粒子 (HIH) 的几率达 65%，它们是什么机制产生的还不清楚。轻粒子时间位置测量装置测到

的多重性分布为下表:

| 多重性 | 几 率   |
|-----|-------|
| 1   | 0.36  |
| 2   | 0.28  |
| 3   | 0.27  |
| 4   | 0.08  |
| 5   | <0.01 |

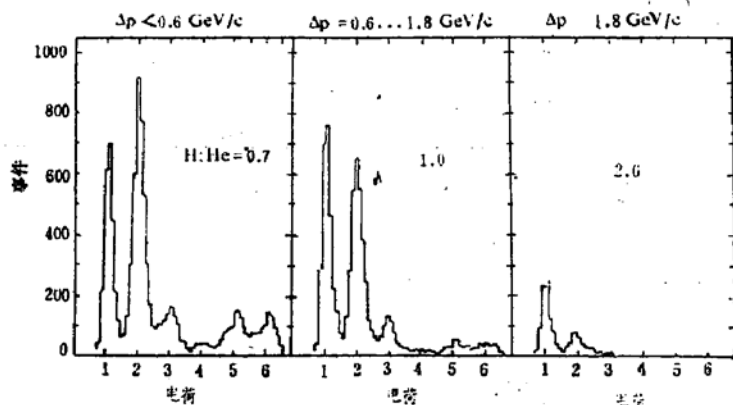


图7 不同动量转移间隔内的前方向出射碎片的元素分布

可见高多重性的几率很小,因此只测到轻粒子的事件不太可能来自星裂反应。

### 五、在轻靶上的反应

84MeV/核子的<sup>12</sup>C轰击轻靶时发现:原子序数大于入射粒子原子序数的产物非常少,似乎这并不是粒子蒸发造成的,而是在反应的初级阶段产生的产物的A就小于或等于靶的A。当轰击<sup>12</sup>C靶和铍靶时,都有类似的结果。

这似乎表明经过反应后靶还可存活,而入射粒子不能存活,似乎反应必然导致入射粒子的碎裂。

测到的不同角度产物的实验室能谱显示在图8中,它们集中在能量为几十MeV的区域中。

为什么出射碎片的实验室动能这样小呢?这也是一个不好解释的问题。

(上接5页)

年,创业的十年。它为今后的发展培养了人才,积累了经验,探索了领域,打开了局面。展望未来,在第二个十年里,我国第一台

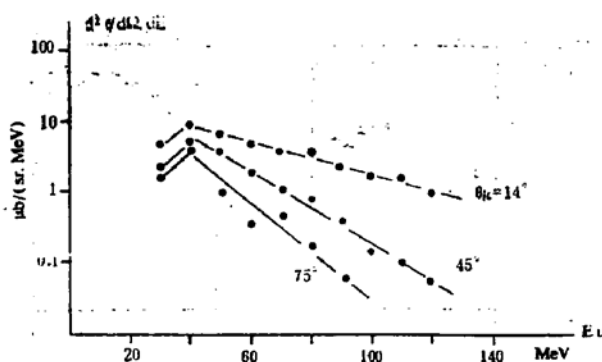


图8 出射产物在不同角度下的实验室能谱

假设发生两体反应,在45°观察到50~100MeV的<sup>12</sup>C,两体运动学表明在小角度反冲的碳有较高的能量,这是实验中没有观察到的;而且对于这样的反应Q值高达-200MeV,而<sup>12</sup>C的结合能小于100MeV,因而不能在出射道再测到<sup>12</sup>C。

一种可能的解释是入射粒子在反应前就发生了碎裂,例如裂成3个α,只有一个参加反应。此时参与反应的能量 $E_{in}' = \frac{1}{3}E_{in}$ ,动量 $\vec{P}_{in}' = \frac{1}{3}\vec{P}_{in}$ ,而且反应后只能观察到类靶余核 $A_{res} \leq 12$ 。这样对大的碰撞参数,靶碎片在大角度发射,例如75°时,需要 $|Q| \leq 10$ MeV;对小碰撞参数,靶碎片在小角度发射,例如15°时需要 $|Q| \leq 60$ MeV;对中间情况例如45°时需要 $|Q| \leq 40$ MeV。因而84MeV/核子的<sup>12</sup>C轰击轻靶的主要过程,可能是入射粒子的碎裂。

上述中能重离子引起的反应的研究,是由西德重离子研究中心、海德堡马克思-普朗克核物理研究所和西德敏斯特大学合作进行的。你们所的诸永泰先生在西德工作期间参加了这一实验工作。

(沈文庆)

大型重离子加速器系统将建成并投入运行。一个与之配套的、先进的重离子物理实验室的建设也将按计划实现。重离子物理研究必将走向一个新的阶段,开创出新的局面。