

95MeV/u 的¹²C 炮弹产生的 二次束流强度研究

杨永锋

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

P. Roussel Chomaz

(GANIL, BP5027, 14021 Caen cedex, France) R. Bimbot

(IPN, 91406 Orsay, France)

1994-09-23 收稿

摘要

使用 GANIL 双消色差谱仪 LISE, 系统研究了 95MeV/u 的¹²C 束流轰击铍、铜和金靶所产生的二次束流强度。实验结果和程序 LISE 及 INTENSITY 的计算结果作了比较。结果表明：对于 β 稳定线附近的二次束流，由程序 LISE 及 INTENSITY 计算得到的二次束流强度峰值和实验结果基本相符。但对于远离 β 稳定线的二次束流，计算结果高于实验值。产生二次束流的最佳靶厚相应于束流在靶子中损失大约 30% 的能量。铍靶产生的二次束流强度高于其余两种靶子。

关键词 炮弹碎裂, 二次束流强度, 系统研究。

1 引言

近年来，基于用磁方法分离中高能重离子反应类弹碎片的二次束流装置相继建成（象法国 GANIL 的 LISE、美国 MSU 的 A1200、日本 RIKEN 的 RIPS 和德国 GSI 的 FRS 等），二次束流物理引起了物理学家越来越大的兴趣^[1]，象非常丰中子核的结构、奇异核形状和组态、超重核的合成及天体物理等。一大批基于次级反应产物再加速的二次束流装置也在提议之中。这种二次束流装置具有束流强度大和束流品质好的优点。在这种二次束流装置建成之前，基于分离类弹碎片的二次束流装置仍将在一段时间内发挥作用。但到目前为止，除了个别定量结果外^[2,3]，还没有人对基于分离类弹碎片的二次束流装置所产生的二次束流强度进行系统研究。此外，由于类弹碎片的产生截面还不太清楚，由经验公式来对二次束流强度进行估算往往有很大的不确定性。所以我们决定在 GANIL 双消色差谱仪 LISE^[4] 上对不同能量及种类的炮弹在不同的靶子上所产生的二次束流强度进行系统研究，通过此项研究期望得到以下结果：(1) 用薄靶来研究一系列反应系统零度类弹碎片的微分产生截面，结合以后可以得到的大角度实验数据，进而得到类弹碎片的产生截面，通过和理论计算比较来检验理论模型。(2) 得到一系列在

LISE 上产生的二次束流强度的数据, 这些数据可以直接用于以后 LISE 上所进行的实验, 经过角度接收范围及动量接收范围修正后, 可以用于其它基于分离类弹碎片的二次束流装置上所进行的实验。这些数据也可以改善现有的对二次束流强度进行估算的程序, 并推广到其它反应系统和入射能量。本文将给出 95MeV/u 的 ^{12}C 炮弹所产生的二次束流强度。

2 实验安排

实验在 GANIL 双消色差谱仪 LISE 上进行, 95MeV/u 的 ^{12}C 束流由 GANIL 加速器提供, 靶被放置在 LISE 通常的靶位。实验中共使用了铍、铜和金三种靶, 每种靶分别选取了三种不同的厚度, 对应于束流在靶中损失大约 1%、15% 和 40% 的能量, 详细情况列在表 1 中。反应产物由 LISE 谱仪分离并由放置在 LISE 消色焦点上的两

表 1 实验中所用靶子的一些特性

靶号	靶材料	靶厚 (mg/cm ²)	靶原子数 (10 ²⁰ 个/cm ²)	束流在靶中 能损 (MeV)	$B_0^{(1)}$ (T)
1	铍	44.5	29.77	9.9	1.433
2	铍	764	511.1	180	1.316
3	铍	1710	1144	448	1.110
4	铜	47.2	4.441	8.5	1.433
5	铜	785	73.86	148	1.338
6	铜	2064	194.2	435	1.122
7	金	97	2.965	13.7	1.430
8	金	1141	34.88	169	1.323
9	金	2845	86.97	472	1.091

(1) B_0 是指 95MeV/u 的 ^{12}C 束流经过在靶中能量损失后所对应的 LISE 谱仪的磁场值, LISE 谱仪的曲率半径为 2.003 m。

个厚度分别为 300μm 和 1000μm 的半导体探测器组成的望远镜测量。LISE 的角度设置在零度, 角度接收范围设置在最大, 即横向和纵向都为 ±17mrad, LISE 的动量狭缝设置在 ±3mm, 对应于 0.35% 的动量接收范围。对每一个靶子, LISE 的磁场值从 0.6 特斯拉(T)调到最大值 1.6T, 步长 0.05T。LISE 的半径为 2.003m。由于半导体探测器只能承受一定的计数率, 在实验中初级束流的强度一般被控制在 0.1 至几百 enA。当束流强度较小时法拉第筒不够灵敏, 所以在靶前放置了一个二次发射探测器来进行束流强度测量。此探测器根据束流打在塑料薄膜上所发射的二次电子数来测量束流强度, 它由法拉第筒刻度并可根据需要从束流线上插入或移开。

3 实验结果及讨论

3.1 束流归一化

首先我们进行了束流归一化测量。在实验中发现当二次发射探测器放置于靶前时, 初级束流在此探测器中发生的反应会干扰半导体望远镜中所探测到的二次束流。所以采取以下方法进行束流归一化: 首先将二次发射探测器放置于靶前测量束流强度, 然后将

此探测器从靶前移开，测量短时间内（大约 10 s）半导体望远镜中所有二次束流的总计数，最后再将此探测器放置于靶前测量束流强度，检查束流强度是否改变。实验中对每个靶和磁场值都进行了以上测量，得到了主束流强度和半导体望远镜中测量到的所有二次束流的总计数率之间的关系。在以后的实验中从半导体望远镜中所测量到的所有二次束流的总计数，就可以得到对应的初级束流的累积强度，从而进行束流归一化。

3.2 二次束流强度测量

对所有九个靶，磁场从大到小，系统测量了二次束流的强度。从 ΔE -TOF（探测器和加速器高频 HF 之间的时间差）图，可以对每一种二次束流作出清楚无误的鉴别。

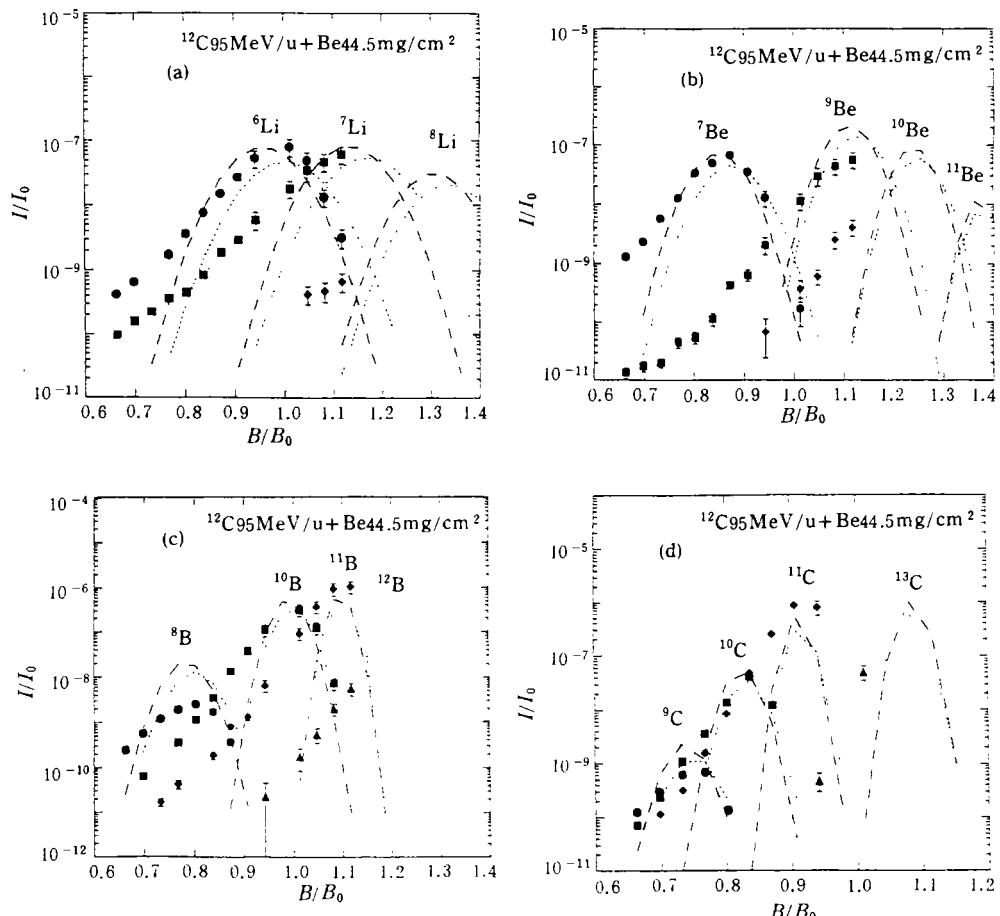


图 1 95MeV/u 的 ^{12}C 炮弹打 $44.5\text{mg}/\text{cm}^2$ 镍靶所产生的二次束流强度对 LISE 谱仪磁场值的分布
在所有图中点线是 LISE 程序的计算结果，长虚线是 INTENSITY 程序的计算结果。

各种实心符号是实验结果，具体如下：

- (a) ● ^{6}Li ; ■ ^{7}Li ; ◆ ^{8}Li . (b) ● ^{7}Be ; ■ ^{9}Be ; ◆ ^{10}Be . (c) ● ^{8}B ; ■ ^{10}B ; ◆ ^{11}B ; ▲ ^{12}B .
(d) ● ^{9}C ; ■ ^{10}C ; ◆ ^{11}C ; ▲ ^{13}C .

图 1 给出了 $44.5\text{mg}/\text{cm}^2$ 镍靶所产生的二次束流强度对 LISE 磁场值的分布。图中 I 为二次束流强度， I_0 为初级束流强度， B 为 LISE 的磁场值， B_0 为初级束流通过在靶中损

失能量后所对应的 LISE 磁场值。如果实验误差大于图中的符号时, 图中也给出了误差大小。误差包括以下几个方面: 二次束流强度测量及束流归一化测量中的统计误差和束流归一化时内插和外插所引起的误差。在图 1 中也给出了程序 LISE^[5] 和 INTENSITY^[6] 的计算结果。这两个程序分别是由 GANIL 的 D. Bazin 和 MSU 的 J. A. Winger 等编写的, 都用于对基于分离类弹碎片的二次束流装置所产生的二次束流强度进行快速估算, 并且用来计算谱仪的参数设置。三个铍靶所产生二次束流强度的峰值列在表 2 中, 其中表中所示值为二次束流强度和初级束流强度之比。

表 2 95MeV/u 的 ^{12}C 束流打铍靶所产生的二次束流强度峰值和初级束流强度之比

靶厚 (mg/cm ²)	44.5	764	1710
^6Li	8.5×10^{-8}	1.1×10^{-6}	1.3×10^{-6}
^7Li	<i>n</i>	1.1×10^{-6}	1.3×10^{-6}
^8Li	<i>n</i>	<i>n</i>	1.2×10^{-7}
^7Be	6.2×10^{-8}	8.6×10^{-7}	1.1×10^{-6}
^9Be	5.6×10^{-8}	8.4×10^{-7}	1.0×10^{-6}
^{10}Be	<i>n</i>	<i>n</i>	8.7×10^{-7}
^{11}Be	<i>n</i>	<i>n</i>	1.5×10^{-8}
^8B	2.4×10^{-9}	3.4×10^{-8}	2.7×10^{-8}
^{10}B	3.4×10^{-7}	4.0×10^{-6}	3.3×10^{-6}
^{11}B	1.1×10^{-6}	1.6×10^{-5}	1.8×10^{-5}
^{12}B	<i>n</i>	<i>n</i>	4.0×10^{-7}
^9C	7.4×10^{-10}	8.0×10^{-9}	<i>n</i>
^{10}C	4.1×10^{-8}	2.4×10^{-7}	3.2×10^{-7}
^{11}C	9.9×10^{-7}	9.4×10^{-6}	1.4×10^{-5}

n 指二次束流的峰值没有从我们的测量中得到。

从图 1 可以看出, 二次束流强度对 B/B_0 分布的峰位处于两个程序的计算之间, 但更接近于 LISE 的计算结果。在程序 LISE 中假设碎片速度等于初级束流速度, 在程序 INTENSITY 中则假设碎片速度和初级束流速度之间有一个速度移动:

$$\frac{v_f}{v_p} = \sqrt{1 - \frac{8(A_p - A_f)}{A_f E_p}}, \quad (1)$$

v_f 和 v_p 分别为碎片速度和束流速度, A_f 和 A_p 分别为碎片质量数和束流质量数, E_p 为束流能量。公式(1)假设从炮弹中去掉一个核子需要 8MeV 的能量^[7]。关于二次束流强度对 B/B_0 分布的宽度, 由于实验点不够密而不足以给出实验和计算的严格比较, 但可以看出对有些核, 象 ^6Li 和 ^7Be 等, 实验和计算相近。对另一些核, 如 ^{11}B 和 ^{11}C 等, 实验值明显大于计算值。在两个程序中都假设碎片的平行动量宽度满足 Goldhaber 的统计模型^[8]:

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

$\sigma_0 = 90\text{MeV}/c$ 。在实验中也明显观察到了二次束流的低能尾巴, 此低能尾巴产生于更耗散的反应机制, 在程序中未予以考虑。

二次束流强度的峰值是本实验的一个重要测量量, 将对以后所要进行的实验起重要
中国知网 <https://www.cnki.net>

参考作用。从图 1 可以看出实验结果和理论计算之间有一些不同，其主要原因是程序中所使用截面公式不够准确，两个程序中所使用截面公式都为 K. Summerer 的经验参数化公式 EPAX^[9]: $\sigma(A, Z) = Y(A) n \text{Exp}[-R(Z_p + \Delta + \Delta_m - Z)^n]$ ，(3)

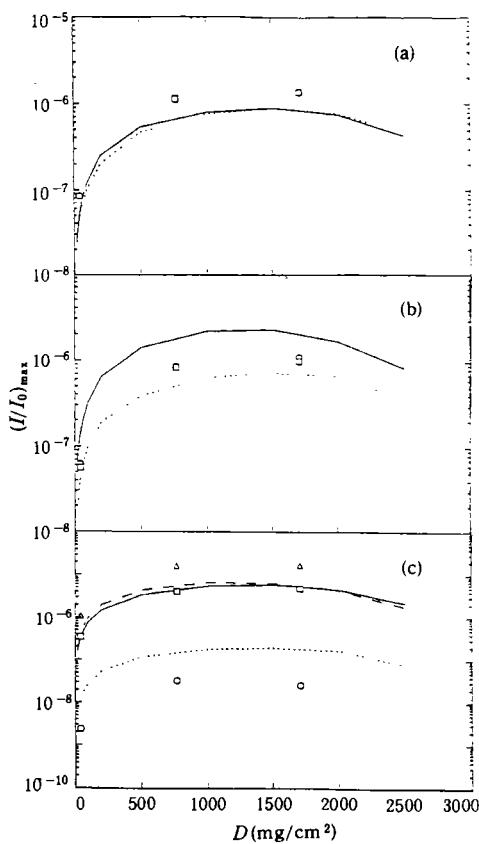


图 2 95MeV/u 的 ^{12}C 炮弹打铍靶所产生的二次束流强度峰值随靶厚的变化

- (a) ○ ^{6}Li 实验值; □ ^{7}Li 实验值; 点线和实线分别为 ^{6}Li 和 ^{7}Li 的 LISE 程序计算值。
- (b) ○ ^{7}Be 实验值; □ ^{9}Be 实验值; 点线和实线分别为 ^{7}Be 和 ^{9}Be 的 LISE 程序计算值。
- (c) ○ ^{8}B 实验值; □ ^{10}B 实验值; △ ^{11}B 实验值; 点线、实线和长虚线分别为 ^{8}B 、 ^{10}B 和 ^{11}B 的 LISE 程序计算值。

的计算结果趋势一致：开始二次束流强度随着靶厚的增加而线性增加，其后由于二次束流的动量分布变宽等原因而使得能被谱仪传输的部分减少，二次束流强度随着靶厚的增加而逐渐趋于平衡以至下降。产生最大二次束流强度的铍靶厚度大约为 $1300\text{mg}/\text{cm}^2$ ，相当于束流在靶中损失 30% 的能量。在最佳靶厚附近，二次束流强度随着靶厚变化不大，选取不同的靶厚可以得到不同能量的二次束流而不太多地降低二次束流强度。

为了清楚地说明靶材料对二次束流强度的影响，用所有靶子的数据求平均值，得到

其中 Z_p 为 β 稳定电荷， Δ 为对 β 稳定电荷的偏离值， Δ_m 为炮弹 N/Z 的记忆效应。公式中的参数来自于对大量靶碎裂截面和弹碎裂截面的拟合，并且假定 $E_p > 40\text{MeV/u}$ 时，截面为公式 (3) 计算结果与能量无关，当 $E_p < 40\text{MeV/u}$ 时，截面为零。公式 (3) 的计算结果好于理论模型的计算结果^[9]，是现有最常用的计算类弹碎片和类靶碎片截面的公式。从图 1 可以看出：对于 β 稳定线附近的二次束流，象 ^{6}Li 、 ^{7}Li 、 ^{7}Be 和 ^{10}B ，LISE 的计算值和实验值相近。对于相对束流减少一个质子和一个中子的二次束流， ^{11}B 和 ^{11}C ，实验值高于 LISE 的计算值。说明在能量 95MeV/u 转移反应仍起重要作用，对二次束流的产生有贡献，而程序中没有考虑这一贡献。对于远离 β 稳定线的二次束流，象 ^{8}Li 、 ^{11}Be 、 ^{8}B 、 ^{12}B 和 ^{9}C ，实验值远小于 LISE 的计算值。对于 ^{9}Be ，实验值小于 LISE 的计算值，而对于 ^{10}Be 和 ^{10}C ，实验值和 LISE 的计算值相符。这可能是由于 ^{9}Be ($S_n = 1.665\text{MeV}$) 的最后一个中子的结合能很小，而 ^{10}Be ($S_n = 6.812\text{MeV}$) 和 ^{10}C ($S_n = 21.286\text{MeV}$) 的最后一个中子的结合能比相邻核大^[10]，前者很容易发射最后一个中子而衰变，而后者则不易。还看出对二次束流强度程序计算值和实验值的符合程度对薄靶和厚靶完全一致，说明程序中对初级束流和二次束流在靶子中的能损、能散和多次散射等处理切合实际。

铍靶所产生的二次束流强度峰值随靶厚的变化示于图 2 中。可以看出实验点和 LISE

了铜靶和金靶所产生的二次束流强度峰值与铍靶所产生的二次束流强度峰值之比, 结果示于图 3 中。对于最厚靶和中等厚靶由于二次束流强度随着靶厚变化缓慢, 计算时直接用铜靶和金靶所产生的二次束流强度除以铍靶所产生的二次束流强度; 对于薄靶由于二次束流强度随着靶厚的增大而线性增加, 而束流在三个薄靶中所产生的能量损失不完全相同, 计算时将三个薄靶所产生的二次束流强度归一到相同的能损然后相除。从图 3 中可以看出: 对所有二次束流铍靶产生的强度最大, 其原因是对于相同的束流在靶中能损, 铍靶包含较多的原子数(见表 1); 另外对于铍靶逆的反应运动学也有利于在零度收集反应产物。这两个因素超过铍靶引起的弹碎裂截面较小这一不利因素。此外从图 3 中还可以看出, 铜靶和金靶可以产生相对较强的缺中子二次束流。

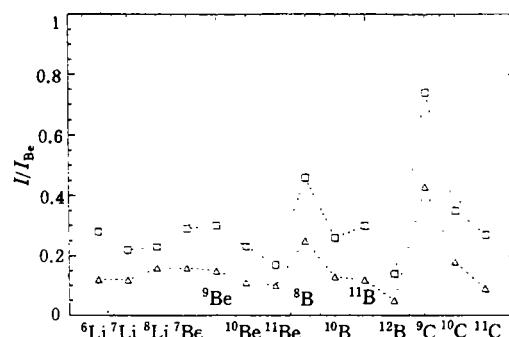


图 3 铜靶和金靶所产生的二次束流强度峰值
和铍靶所产生的二次束流强度峰值之比
□ 铜靶; △ 金靶。

4 结 论

本文使用 GANIL 双消色差谱仪 LISE, 对 95MeV/u 的 ^{12}C 打铍、铜和金靶所产生的二次束流强度进行了系统研究。所得结果可以对以后在 LISE 和类似于 LISE 的二次束流装置上所进行的实验起参考作用。实验结果与程序 LISE 和 INTENSITY 的计算结果作了比较。在程序中假设碎片速度等于束流速度的条件下, 可以对二次束流强度对 B/B_0 分布的峰位给予较好的估算。同时明显观测到了产生于更耗散反应机制的二次束流的低能尾巴。关于二次束流强度对 B/B_0 分布的峰值, 对于 β 稳定线附近的二次束流, 程序 LISE 及 INTENSITY 的计算结果和实验结果基本相符; 但对于远离 β 稳定线的二次束流, 计算结果高于实验值。说明由 K. Summerer 公式所计算的类弹碎片产生截面对我们所研究的轻炮弹不适用。 ${}^{11}\text{C}$ 和 ${}^{11}\text{B}$ 强度的实验值高于程序的估算值说明转移反应对二次束流的产生有贡献。而 ${}^9\text{Be}$ 、 ${}^{10}\text{Be}$ 和 ${}^{10}\text{C}$ 等强度实验值和程序估算值的比较说明最后一个中子的结合能对二次束流的强度产生影响。产生最大二次束流强度的靶厚对应于束流在靶子中损失大约 30% 的能量。铍靶产生的二次束流强度大于铜靶和金靶, 铜靶和金靶可以产生相对较强的缺中子二次束流。说明对所研究的反应系统, 在所研究的能量, 纯的炮弹碎裂反应没有发生, 各种反应机制都起作用。由于 LISE 谱仪最大磁场值的限制, 本实验没有观测到非常丰中子的二次束流, 但通过计算结果和实验结果的比较, 看到了现存估算二次束流强度的程序所存在的缺陷。为了用类似于 LISE 和 INTENSITY 程序对二次束流强度进行好的估算, 需进一步研究类弹碎片的产生截面。

参考文献

- [1] International Workshop on the Physics and Technique of Secondary Nuclear Beam, Dourdan, France, March 23–25, 1992 and Third International Conference on Radioactive Nuclear Beam, MSU, May 24–27, 1993.
- [2] R. Bimbot et al., *Z. Phys.*, **A322** (1985) 443.
- [3] R. Bimbot, Report IPNO-DER, 87–35 (1987).
- [4] R. Anne et al., *Nucl. Instr. and Meth.*, **A257** (1987) 215.
- [5] D. Bazin, 私人通信.
- [6] J. A. Winger et al., *Nucl. Instr. and Meth.*, **B70** (1992) 380.
- [7] V. Borrel et al., *Z. Phys.*, **A314** (1983) 191.
- [8] A. S. Goldhaber, *Phys. Lett.*, **B53** (1974) 306.
- [9] K. Summerer et al., *Phys. Rev.*, **C42** (1990) 2546.
- [10] G. Audi, A. H. Wapstra, the 1993 Atomic Mass Evaluation, *Nucl. Phys.*, **A565** (1993) 70.

Study of Production of Secondary Beams from 95MeV/u ^{12}C Projectile

Yang Yongfeng

(Institute of Modern Physics, The Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000)

P. Roussel Chomaz

(GANIL, BP5027, 14021 Caen cedex, France) (IPN, 91406 Orsay, France)

R. Bimbot

Received 23 September 1994

Abstract

A systematic study about the production of secondary beams in 95MeV/u $^{12}\text{C} + \text{Be}$, Cu and Au targets was performed by using the GANIL doubly achromatic spectrometer LISE. The maximum values of the secondary beam production calculated by programs LISE and INTENSITY are in agreement with the experimental results for the secondary beams near the β stability line. However, the calculations are larger than the experimental results for the secondary beams far from the β stability line. The optimum target thickness for the production of secondary beams corresponds to about 30% beam energy loss in the target. Beryllium target was found to offer higher production for all the secondary beams than copper and gold targets.

Key words projectile fragmentation, secondary beams intensity, systematic study.