

^{17}N 破裂反应产物的测量*

王宏伟 吴和宇 肖志刚 靳根明 段利敏 李祖玉
张保国 王素芳 胡佩钢 柳永英 詹文龙 郭忠言

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

江栋兴 华 辉 李湘庆 钱 涛

(北京大学技术物理系 北京 100871)

摘要 利用 RIBLL 提供的丰中子放射性束测量了 ^{17}N 在 ^{197}Au 和 ^9Be 靶上的破裂反应. 用 14 单元阵列探测器测量得到了前角带电粒子产额和关联粒子对的破裂截面, 得到了 ^{17}N 在 ^{197}Au 和 ^9Be 靶上的带电粒子破裂截面比为 4—5 倍, 结果表明对重靶核除了核破裂机制外还要考虑库仑破裂的贡献.

关键词 丰中子核 放射性束 破裂反应 破裂截面

1 引言

随着世界上主要实验室放射性束流装置(如法国的 LISE3、德国的 FRS、日本的 RIPS 以及中国兰州的 RIBLL^[1,2]等)的建成, 大批远离 β 稳定线的核素被用于核物理实验, 为人们研究这些核的质量、半径、结构、核物质密度分布、核激发、核衰变等性质以及引起的核反应提供了新的机遇. 当人们将研究对象从稳定核向滴线区核不断延伸时, 人们对原子核层次的微观世界的认识也将逐渐深化^[3,4].

在丰中子核引起的核反应中, 中子的发射几率增大. 人们通过研究丰中子核在不同靶上破裂的截面, 希望从中获得有关核反应过程和丰中子弹核中外层的弱束缚中子的有关信息^[5,6], 以及这些价中子在核碰撞过程中被库仑和核作用分离的详细知识. 另一方面, 这种丰中子核在不同靶上破裂产生的带电粒子也具有不同的产额比, 即破裂截面中包含了库仑作用和核相互作用两种贡献. ^{17}N 是处于稳定线和滴线过渡区的丰中子的放射性核素, 其最后一个中子的分离能为 5.883 MeV, 两个中子的分离能为 8.371 MeV (平均为 4.186 MeV). 为了研究库仑作用和核相互作用机制随靶核的变化关系, 我们选用了 ^{197}Au 和

2000-09-04 收稿

* 国家自然科学基金(19575003, 19735010), 中国科学院“九五”基础性研究重大科学基金(KJ95T-03)和国家重点基础研究发展规划(G2000077401)资助

^9Be 靶, 通过单举中子、中子 - 破裂碎片以及碎片 - 碎片的关联测量, 可以得到一些有关 ^{17}N 核的外层中子分布和破裂总截面的有关知识. 在此只讨论碎片 - 碎片关联测量的数据处理结果, 中子单举、中子 - 中子符合、中子 - 碎片符合的数据可参见文献[7,8].

2 实验布局

实验是在兰州近代物理研究所的放射性束流线(RIBLL)上进行的. 能量为 60MeV/u 的 ^{18}O 初级束由兰州重离子回旋加速器(HIRFL)引出, 轰击 2mm 厚的初级靶 ^9Be , RIBLL 收集、分析、鉴别弹核碎裂出射产物并挑选出 ^{17}N 束, 其纯度达到 97% , 强度为 $1 \times 10^6 \text{ Particles/s}^{[1]}$, 能量为 40MeV/u . 为了提高反应率, 使用 621mg/cm^2 厚的 ^{197}Au 靶和 370mg/cm^2 厚的 ^9Be 靶. 经过能损程序计算得到 ^{17}N 在两种靶的半厚度处的能量均为 $33.4\text{MeV/u}^{[7]}$. 实验的探测器布局如图 1 所示, 次级靶、平行板雪崩探测器(PPAC)及 14 单元 $\Delta E_1 - \Delta E_2 - E$ 探测器阵列放置在真空靶室中, 16 个 NE110 快中子闪烁探测器放置在大气中, 并用铅砖屏蔽. PPAC 用来调束, 以保证束流打在靶的中心. 在靶上没有发生反应的 ^{17}N 束通过阵列探测器的中心孔后经 $40\mu\text{m}$ 厚的 Ta 膜被引出. 破裂反应带电产物由 $\Delta E_1 - \Delta E_2 - E$ 探测器阵列鉴别和角分布测量.

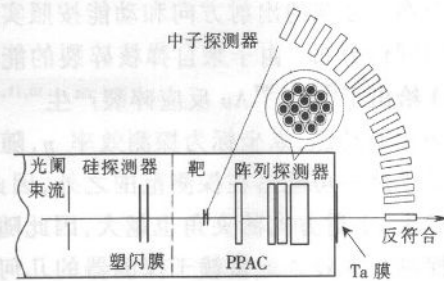


图 1 实验探测器布局

3 结果分析与讨论

图 2 给出了实验中测到的粒子的线性化谱(以 $^{17}\text{N} + ^{197}\text{Au}$ 反应为例). 图 2(a)为 $\Delta E_1 - \Delta E_2$ 探测器的粒子鉴别谱, 图 2(b)为 $\Delta E_2 - E$ 探测器的粒子鉴别谱, 其中一组代表一种

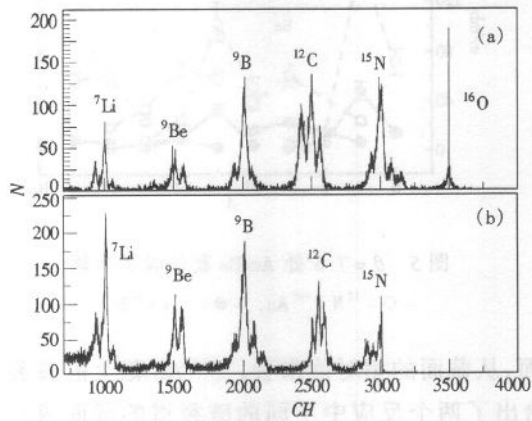


图 2 粒子线性化谱

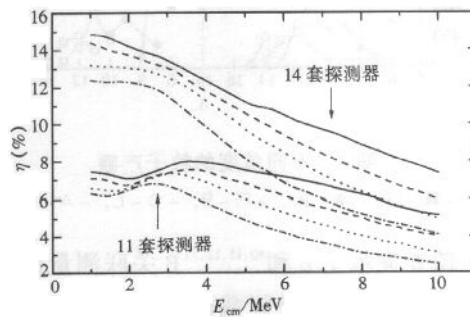


图 3 粒子的探测效率

— ^{10}B , - - - ^{11}B , ... ^{12}B , - · - ^{13}B .

元素,在每组中的一个峰代表一种同位素,峰位中较高的是最稳定的同位素,可以看到从 Li 到 N 的多个丰中子同位素均被检测到,对于 p, d, t 等也被检测到了,但由于其能量较高,在 ΔE_1 中引起的信号太小. 由于不同同位素的分布有较大的重叠,为了减小计数误差,对图中的每种元素分布采用多高斯峰拟合而得到各种同位素产额. 在图 2(a)中还鉴别到了 O 元素,它是 ^{17}N 的转移反应的产物,由于统计的关系,我们没有处理此类反应事件.

由于探测器阵列并没有覆盖整个前角范围,有很大的死区,为了校正不同的破裂道在探测器阵列中的几何探测效率,我们用 Monte Carlo 方法模拟了各个破裂反应道的运动学分布. 母核的出射方向和动能按照实验结果进行抽样,并假定碎片在母核运动系中按各向同性分布. 由于来自弹核碎裂的能量较高,因此在计算中没有考虑探测阈的影响. 图 3 给出了 $^{17}\text{N} + ^{197}\text{Au}$ 反应碎裂产生 $^{10,11,12,13}\text{B}$ 的探测效率,横坐标是碎裂为两碎片时粒子对的相对动能,纵坐标为探测效率 η ,随着相对动能的增大,粒子出射的夹角会增加,导致其中之一可能落在探测范围之外,因此探测效率逐渐降低. 而且,碎片的质量非对称性越大,出射方向的夹角也越大,因此随着硼粒子质量数的增大,探测效率也会下降. 由于探测效率较强地依赖于探测器的几何布局,如果不考虑最靠近束流的 3 套探测器,探测器在较低的相对动能处的探测效率略有下降. 实验中给出此探测器阵列测得粒子对的相对动能均为 3MeV 左右,在这一能量附近,探测器的探测效率约为 6%—8% 左右. 图 4 显示了实验测得的不同角度的粒子产额,随着角度的增大(从 2.81° 到 8.66°)和质量数 A 的增大,粒子的相对产额逐渐降低,这反映了破裂反应的特点,即随着角度逐渐远离束流方向,类弹碎片的产额逐渐降低,而轻粒子产额则相对上升. 图 5 比较了 $^{17}\text{N} + ^{197}\text{Au}/^9\text{Be}$ 反应在 $\theta = 7.6^\circ$ 处的截面. 从稳定粒子来看, Au 靶的粒子截面大约是 Be 靶的粒子截面的 4—5 倍,对于丰中子的同位素则因为探测器的分辨以及统计的因素,存在较大的误差,其截面相差不大.

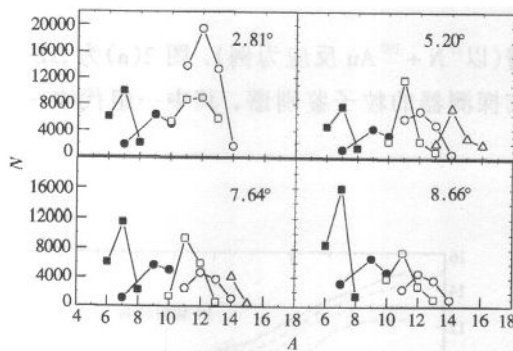


图 4 不同角度的粒子产额

—■— Li, —●— Be, —□— B, —○— C, —△— N.

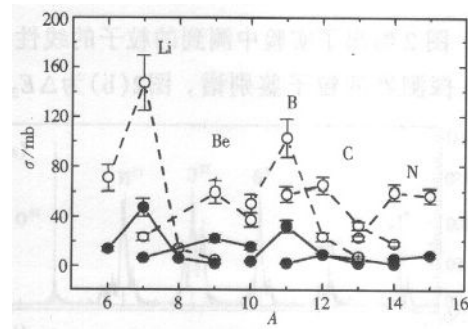


图 5 $\theta = 7.6^\circ$ 处 Au/Be 靶的粒子产额

—○— $^{17}\text{N} + ^{197}\text{Au}$, —●— $^{17}\text{N} + ^9\text{Be}$.

图 6 显示了 α 和 $^{10,11,12,13}\text{B}$ 关联测量的截面,从截面的相对值来看,在 ^{197}Au 靶上的破裂截面约为 ^9Be 靶的破裂截面的 4—5 倍(表 1 给出了两个反应中不同的破裂道的截面值). 在理论分析中将弹核破裂截面表示为 $\sigma_i = \sigma_N + \sigma_C + \sigma_{CN}$, σ_N 为核相互作用引起的破裂截面, σ_C 为库仑相互作用引起的破裂截面, σ_{CN} 为核相互作用与库仑相互作用的相干项的贡

献,由于核相互作用和库仑相互作用的作用力程不同,在实际考虑中常常忽略 σ_{CN} 项的影响. 因此,一般认为在⁹Be 靶中¹⁷N 的破裂截面主要是由核相互作用引起的,而在¹⁹⁷Au 靶中,库仑作用对破裂截面的贡献将占重要地位. 在中子数据处理中,利用核衍射破裂模型对¹⁷N + ⁹Be 反应中与氮碎片符合测量的中子能谱计算,以及理论计算的与中子关联的氮碎片能谱均能定性地解释实验结果,也表明对⁹Be 靶,核作用引起的破裂反应是主要的,而库仑作用引起的破裂基本上可以忽略,对于 Au 靶,仅考虑核作用引起的破裂不能解释实验数据,还必须考虑库仑作用引起的破裂,而且可能是造成破裂的主要机制^[7,8,9]. 带电粒子的测量结果也反映了重靶核的这种库仑破裂贡献,在我们的测量中给出的¹⁷N 在 Au 和 Be 靶上的截面相差为 4—5 倍,而中子的测量结果^[9] 则给出¹⁷N 在 Au 和 Be 靶上中子发射的总截面分别为 (120 ± 20) b 和 (15.2 ± 1.7) b,即其中子发射总截面相差约 10 倍,而包含¹⁷N → ¹⁶N + n 和¹⁷N → ¹⁵N + 2n 两个破裂道的截面的实验值分别为 (0.19 ± 0.04) b 和 (2.8 ± 0.6) b.

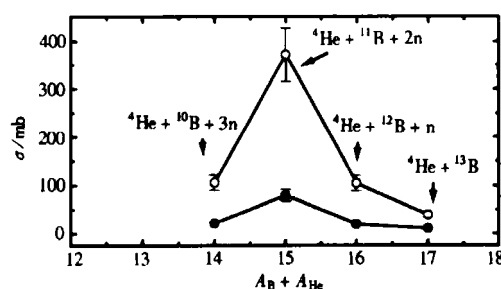


图 6 ¹⁷N + ¹⁹⁷Au (- ○ -), ⁹Be (- ● -) 破裂截面

由于实验测量中存在着非完全熔合、深部非弹等不同的反应机制以及测量精度的影响,定量地分析核相互作用与库仑相互作用贡献的大小是非常困难的. 为了深入地了解库仑和核相互作用机制的贡献,进行精确的实验测量和理论分析是具有重要意义的.

表 1 33.4MeV/u 的¹⁷N 在¹⁹⁷Au 和⁹Be 靶上的截面值

| 关联粒子对 | σ_{exp}^{Au}/mb | σ_{exp}^{Be}/mb | 关联粒子对 | σ_{exp}^{Au}/mb | σ_{exp}^{Be}/mb |
|--|------------------------|------------------------|---|------------------------|------------------------|
| ⁴ He + ¹⁰ B + (3n) | 106.974 | 20.696 | ⁶ Li + ¹⁰ Be + (1n) | 4.782 | 1.104 |
| ⁴ He + ¹¹ B + (2n) | 370.478 | 80.832 | ⁷ Li + ⁷ Be + (3n) | 4.972 | 1.072 |
| ⁴ He + ¹² B + (1n) | 104.955 | 19.579 | ⁷ Li + ⁹ Be + (1n) | 11.273 | 3.204 |
| ⁴ He + ¹³ B | 38.904 | 10.803 | ⁷ Li + ¹⁰ Be | 9.331 | 2.257 |
| ⁶ Li + ⁷ Be + (4n) | 1.989 | 0.606 | ⁸ Li + ⁷ Be + (2n) | 1.364 | 0.289 |
| ⁶ Li + ⁹ Be + (2n) | 4.778 | 1.365 | ⁸ Li + ⁹ Be | 2.065 | 0.582 |

参考文献 (References)

- ZHAN Wen-Long, GUO Zhong-Yan, LIU Guan-Hua et al. Science In China, 1999, A29(1):77—84 (in Chinese)
(詹文龙, 郭忠言, 刘冠华等. 中国科学, 1999, A29(1):77—84)
- GUO Zhong-Yan, ZHAN Wen-Long, SUN Zhi-Yu et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys. 1999, 23(3):237—243 (in Chinese)

- (郭忠言, 詹文龙, 孙志宇等. 高能物理与核物理, 1999, 23(3): 237—243)
- 3 Basic Science in RI Beam Factory. RIKEN. 1994
 - 4 The Spiral Radioactive Ion Beam Facility. GANIL. R9402
 - 5 Anne R, Bimhot R, Dongny S et al. Nucl. Phys., 1994, A575:125
 - 6 Shyam R, Banerjee P. Nucl. Phys., 1992, A540:341
 - 7 HUA Hui, JIANG Dong-Xing, LI Xiang-Qing et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys., 2000, 24(6):512—517(in Chinese)
(华辉, 江栋兴, 李湘庆等. 高能物理与核物理, 2000, 24(6):512—517)
 - 8 HUA Hui, JIANG Dong-Xing, LI Xiang-Qing et al. Chin. Phys. Lett., 2000, 17(3):188—190
 - 9 HUA Hui. Doctor Thesis. Beijing University. 1999 (in Chinese)
(华辉, 博士论文. 北京大学. 1999)

Measurement of Products in ^{17}N Breakup Reaction*

WANG Hong-Wei WU He-Yu XIAO Zhi-Gang JIN Gen-Ming
DUAN Li-Min LI Zu-Yu ZHANG Bao-Guo WANG Su-Fang
HU Pei-Gang LIU Yong-Ying ZHAN Wen-Long GUO Zhong-Yan
(*Institute of Modern Physics, The Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China*)

JIANG Dong-Xing HUA Hui LI Xiang-Qing QIAN Tao
(*Department of Technical Physics, Peking University, Beijing 100871, China*)

Abstract The breakup reaction of neutron-rich nucleus ^{17}N on ^{197}Au and ^9Be targets has been measured at RIBLL (Radioactive Ion Beam Line at Lanzhou). The product yields and the cross sections of charged particles in pair at forward angles were measured with the 14-unit detector array. The detection efficiency of the detector system was corrected by using Monte Carlo method. The breakup cross sections show that the ratio of the breakup cross section on ^{197}Au to ^9Be is 4—5. The cross sections of different breakup channels were also obtained. The results indicate that for a heavy target, except the contribution of nuclear dissociation, the Coulomb dissociation contribution has to be taken into account.

Key words neutron-rich nucleus, radioactive ion beam, breakup reaction, breakup cross section

Received 4 September 2000

* Supported by National Natural Science Foundation of China (19575003, 19735010), Major Subjects of The Chinese Academy of Sciences (KJ95T-03) and Major State Basic Research Development Program (G2000077401)