

$^{17}\text{N} + ^{197}\text{Au}$ 反应中碎片与中子的符合测量*

李湘庆 华辉 江栋兴 叶沿林
陈陶 李智焕 葛愉成 王全进

(北京大学技术物理系 北京 100871)

吴和宇 靳根明 段利敏 肖志刚 王宏伟 李祖玉 王素芳

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

摘要 在 33.4MeV/u ^{17}N 束轰击 ^{197}Au 靶产生的反应中,利用放置于不同角度组合的 17 个中子探测器($4^\circ\text{--}83^\circ$)和 14 个半导体望远镜($2.3^\circ\text{--}9.0^\circ$)对反应产物碎片与中子进行了符合测量.经对所得实验角分布积分得到 $Z=3\text{--}6$ 元素的同位素产额分布.在参加者-旁观者模型框架下,采用 ^{17}N 原子核内部的不同密度分布计算了同位素产额分布并与实验数据做比较.

关键词 丰中子核 符合测量 同位素产额分布 参加者-旁观者模型 核子密度分布 相对论平均场

1 引言

放射性核束装置性能的提高为人们提供了丰富的远离稳定线直至中子和质子滴线的放射性核束流,利用它们研究放射性核的内部结构以及由它们引起的核反应机制是当今核物理学科一个前沿——放射性核束物理的基本内容^[1].其中通过放射性核束引起的核反应提取有关原子核内部结构的信息特别令人感兴趣.事实上 ^8He , ^{11}Li 等中子滴线核具有非常宽的中子密度分布,即中子晕结构存在的首批实验证据^[2]是通过与靶核的核相互作用总截面明显高于它们邻近原子核的实验结果得到的.

当然,通过放射性核束流引起核反应来研究放射性核本身的内部结构,所得核结构信息的可靠性密切依赖于核反应过程对所研究核内部结构影响的确切了解.对于研究远离稳定线原子核的内部结构这个目标来讲,放射性核束引起核反应是一个不可替代的手段,目前在这个方面国内外一些实验小组开展了很有特色的研究工作.其中在利用核反应获得有关核结构更精细信息的研究中,值得提出的有:在美国 NSCL,人们发展了一种基于单核子敲出反应(这是具有松散价核子的原子核发生周边碰撞时最主要的反应机制),通

2001-11-06 收稿

* 国家自然科学基金(10075003),国家重大基础研究项目(G2000077403)和 2000 年教育部优秀青年教师项目资助

过测量剩余核衰变 γ 射线来鉴别其反应导致的末态, 从而得到滴线核内部结构信息的独特方法. 这种方法的突出优点是具有很高灵敏度. Maddalena 等^[3] 利用此方法在小于每秒一个 ^{19}C 核的束流条件下, 确定了非常丰中子核 $^{17,19}\text{C}$ 基态的自旋宇称分别为 $3/2^+$ 和 $1/2^+$, 并且建议将 ^{19}C 的单中子分离能从推荐值 $S_n = 0.16 \pm 0.11\text{MeV}$ 调高至 $0.5-1.0\text{MeV}$. Chulkov 等^[4] 通过测量 240MeV/u ^6He 被敲出一个中子后反冲的非束缚残核 ^5He 的自旋排列, 得到 ^5He 组元 α 和 n 相对角动量的确切信息. 对于少数核子转移反应, Wolski 等^[5,6] 借助 25MeV/u ^6He 轰击 $400\mu\text{m}$ 厚 CH_2 靶, 测量 $^6\text{He} + ^1\text{H}$ 反应体系的 t 或双中子转移反应 $p(^6\text{He}, \alpha)t$ 产物的角分布, 结果表明 ^6He 的双中子结构有压倒的贡献, 与 ^6Li 的 $t + ^3\text{He}$ 结构相比, 在 ^6He 中 $t + t$ 集团结构的概率要小很多. 另外, Korshennikov 等^[7] 通过 50MeV/u ^8He 引起的单中子转移反应 $p(^8\text{He}, d)^7\text{He}$ 观测到具有非寻常性质的 ^7He 一个激发态, 它主要通过发射 $3n$ 而衰变成 ^4He , 而且得到 $^7\text{He}^*$ 非寻常结构态很可能是由处于 2^+ 激发态的 ^6He 芯与一个 $P_{1/2}$ 中子耦合而成的.

^{17}N 是介于中子滴线与稳定核之间过渡区的一个丰中子核, 通过核反应提取它的密度分布是有意义的. 我们通过 33.4MeV/u ^{17}N 放射性束流在 ^{197}Au 靶上的弹核碎裂反应, 试图获得有关内部结构的信息. 迄今为止, 人们对于中能区弹核碎裂反应机制已有较多的了解, 并能较成功地预言碎裂产物的单举同位素分布^[8]. 实际上, 远距离碰撞过程(如少数核子转移和库仑或核作用引起弹核离解)对于单举类弹碎片同位素产额分布的贡献是不能排除的. 因此我们进行了碎片与中子的符合测量, 提取了弹核破裂反应中类弹碎片的同位素产额分布. 可以预期对这类实验数据的研究能够得到更精确的弹核结构信息. 本文在参加者-旁观者(Abrasion-Ablation)核反应模型框架下提取丰中子核 ^{17}N 内部核子分布的有关信息, 并研究了 ^{17}N 密度分布形式对同位素产额分布的影响.

2 实验方法和结果

^{17}N 是丰中子核, 最后一个中子平均结合能约 5.883MeV , 可以预期与质子相比, 中子具有更为扩展的分布. 在它引起的反应中, 发射中子是一个重要的出射道, 容易在实验上测得与中子符合的类弹碎片的同位素产额分布. 实验在兰州国家重离子加速器实验室的大型实验设备 HIRFL + RIBLL^[9] 上完成. 放射性核束 ^{17}N 是从 60MeV/u ^{18}O 初级束在厚 370mg/cm^2 ^9Be 靶上发生的弹核碎裂反应产物中经分离、纯化和能量分析后获得的. ^{17}N 核束流强度可达 10^4s^{-1} , 纯度好于 95% , 与靶作用的平均束流能量选为在 ^{197}Au 靶中半靶厚的能量约 33.4MeV/u .

16 个快塑料闪烁体探测器(NE110 耦合 XP2020 光电倍增管)用于探测反应中发射的中子. 它们被置于反应平面内, 距靶 1.5m 的圆周上, 覆盖 $4^\circ-83^\circ$ 的角度范围. 探测器的时间分辨好于 1.2ns , 经过飞行时间谱可以很好地实现中子- γ 甄别, 并以 γ 峰作为中子飞行时间的绝对零点得到不同角度的中子能谱^[10].

^{17}N 核在 ^{197}Au 靶上碎裂的不同碎片用覆盖角度 $2.3^\circ-9.0^\circ$ 的 14 个半导体望远镜来探测和鉴别. 每个望远镜由两个全耗尽面垒型硅探测器和一个 $\text{Si}(\text{Li})$ 型半导体探测器构成. 3 个 Si 探测器的灵敏层厚度分别为约 $350, 800$ 和 $3500\mu\text{m}$. 图 1 显示在 5.4° 望远镜测

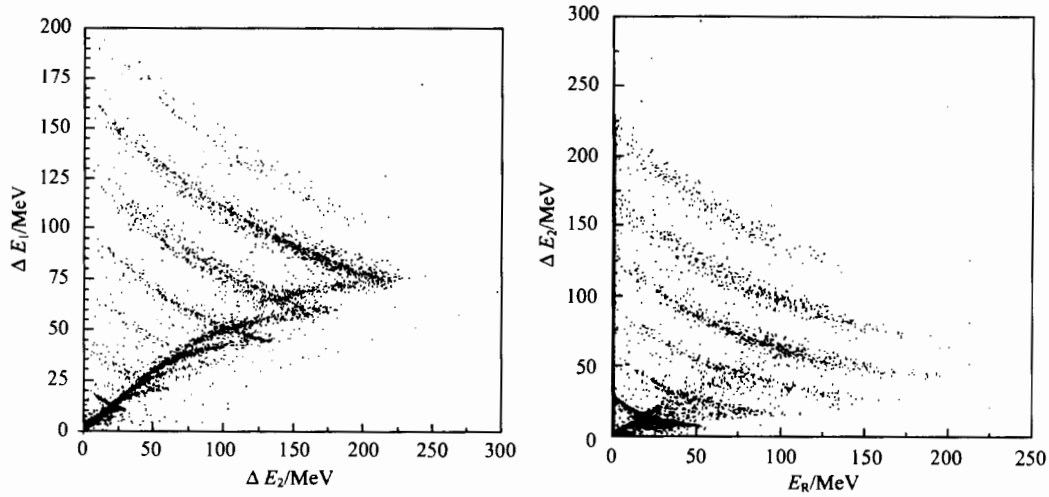


图 1 33.4MeV/u $^{17}\text{N} + ^{197}\text{Au}$ 反应中 5.4° 望远镜测得与中子符合的碎片散点图

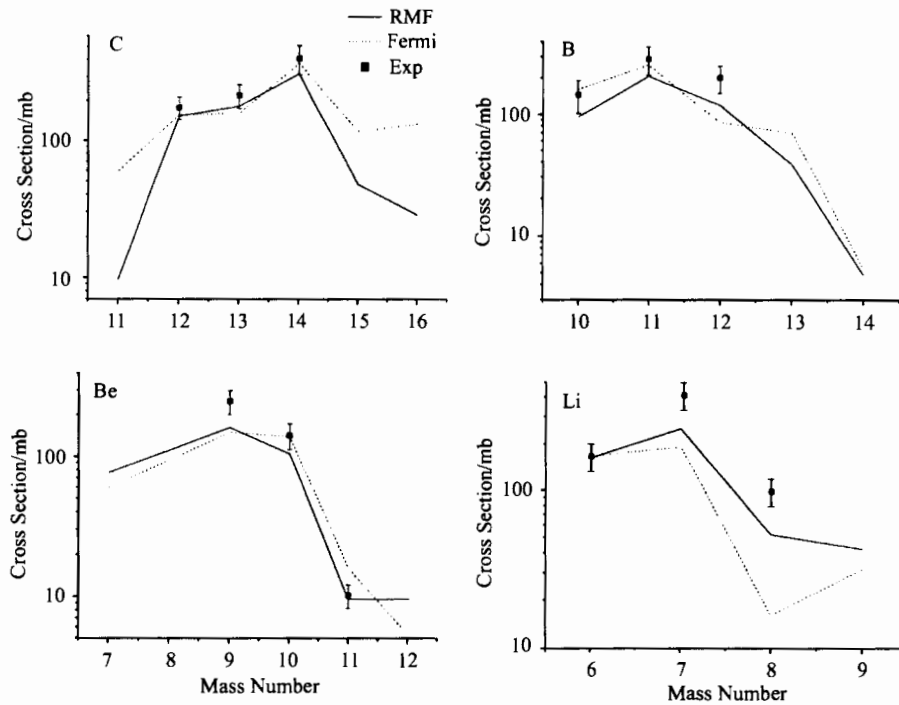


图 2 33.4MeV/u ^{17}N 在 ^{197}Au 靶上破裂碎片与中子符合的同位素产额分布

得与中子符合的碎片产物在 $\Delta E_1 - \Delta E_2$ 和 $\Delta E_2 - E_R$ 平面的事件散点图. 我们能够清楚地鉴别出反应产物 ^{6-8}Li , ^{9-11}Be , $^{10-12}\text{B}$ 和 $^{12-14}\text{C}$. 这些同位素产物的能谱在束流单核子能量附近成峰, 其角分布随散射角度增加而产额很快下降. 从这两个特征可以认为这些同位素产物来自于 ^{17}N 弹核的碎裂过程. 对于各种同位素角分布, 经过积分后得到与中子符合

的同位素的产额,在图 2 中以带误差棒的方块表示(图的详细解释见下节).从给出 $Z = 3-6$ 的同位素产额分布来看,对于远离 β 稳定线的同位素,如 Be 和 Li 的产额分别比相应的 β 稳定线附近的同位素下降了约 1 个量级和 4 倍.由于产额本身急剧下降以及鉴别引起的不确定性,图中只给出每种元素的 3 种同位素产额.

3 基于 Abrasion-Ablation 模型对同位素分布的解释

Abrasion-Ablation 模型^[11]最初提出是为解释相对论能区重离子周边过程的产物分布.该模型把碰撞过程分成擦去(Abrasion)阶段和紧随的退激消融(Ablation)阶段.在擦去阶段弹靶核发生纯几何相切,弹核和靶核未发生重叠部分而形成类弹和类靶两块碎片,因其几乎不参与碰撞,仅因表面积的变化获得较小的激发能被称作旁观者;重叠部分由于强的核相互作用而被高度激发形成所谓的“火球”,也被称作参加者,随后完全以散裂成单个核子而发射出去.所以 Abrasion-Ablation 模型又称旁观者-参加者模型或火球模型.擦碎模型对核反应分 4 个阶段进行处理:(1)从弹核(或靶核)中擦去的核子数与碰撞参数 b 之间的关系得到类弹、类靶碎片的质量数;(2)求出类弹碎片的电荷分布;(3)类弹碎片的激发能;(4)考虑类弹碎片的蒸发修正后,得到最终的出射碎片.

此后,人们在该模型框架下做了多方面的改进.首先,在中能区除了核子-核子两体相互作用外,平均场的作用不能忽略,由平均场作用引起碰撞过程中的耗散机制会增加类弹、类靶碎片的激发能.Dayras 等^[12]考虑了基态分离能的贡献,令碎片总激发能 $E^* = \alpha S_{\text{abr}} + (1 - \alpha) E_{\text{gg}}$,式中 E_{gg} 为基态分离能,可以用液滴模型来计算, S_{abr} 为擦去过程中表面积改变对激发能的贡献, α 为小于 1 的可调参数,用以调节基态分离能对总激发能的贡献大小.Bonasera 等^[13]则具体地在擦去阶段加入一个能量耗散过程,即认为弹靶核间的平均场相互作用会形成一个双核体系.通过弹靶核间的核子交换,不仅将轨道角动量转变成双核体系的转动角动量,而且还将相对运动动能转换成内部激发能量.所以在擦去阶段,旁观者会获得更高的激发能.其次,在最初的 Abrasion-Ablation 模型中,假定弹核的中子和质子具有相同的密度分布,而且认为是尖锐截止的.显然这是过于简化的处理,它不仅直接影响类弹碎片的中子、质子数目及比值,而且还因表面张力系数与核子密度分布相关,影响到旁观者的激发能量,从而间接地影响到模型对出射碎片产物的预测.

还需指出,目前 Abrasion-Ablation 模型计算结果几乎都用来解释弹核碎裂反应的单举类弹产物的实验数据.实际上,远距离碰撞过程(如少数核子转移和库仑或核作用引起弹核离解)对于单举类弹碎片同位素产额分布的贡献是不能排除的.本文试图利用实验测得的与中子符合的碎裂产物同位素产额分布,经过与基于 Abrasion-Ablation 模型,使用不同弹核密度分布的计算结果相比较以期获得更为精确的弹核内部的密度分布.

本文使用 J. Gaimard^[14]编写的 Monte-Carlo 模拟程序,关于从弹核中擦去核子数目的计算完全用纯几何的考虑,球形弹核 A_p (半径 R_p)以碰撞参数 b 与球形靶核 A_T (半径 R_T)发生作用时,从弹核中擦去的核子数 a 可以表示为

$$a(\nu, \beta) = A_p F(\nu, \beta), \quad \nu = \frac{R_p}{R_p + R_T}, \quad \beta = \frac{b}{R_p + R_T}, \quad (1)$$

其中 $F(\nu, \beta)$ 是无量纲参数 ν 和 β 的函数, 则由 b 和 a 的关系得到初始类弹碎片的产生截面

$$\sigma(A_p - a) = \pi \{ [b(a - 0.5)]^2 - [b(a + 0.5)]^2 \}. \quad (2)$$

关于激发能的计算, 因为用 Dayras 建议的类弹总激发能公式计算结果与 A. Bonasera

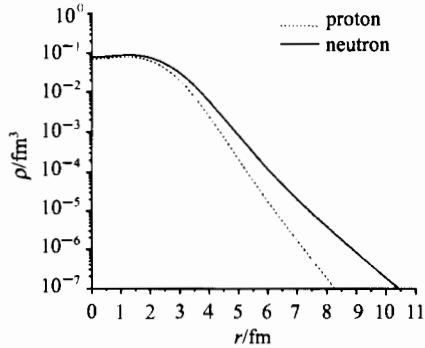


图 3 RMF 计算的 ^{17}N 核内的中子和质子密度分布

方法计算的类弹总激发能相比, 仅在类弹碎片质量明显远离弹核时才有大的差别. 所以用 Dayras 建议的公式并选用 a 值为 0.75 来获得类弹碎片的激发能. 关于 ^{17}N 的核内密度分布, 计算中用两种密度分布. 一种认为 ^{17}N 核中, 中子和质子都具有 Fermi 型密度分布 $\rho(r) = \rho_0 / [1 + \exp(r - R)/d]$, 并且使用相同参数 $R = 1.25A^{1/3}\text{fm}$, $d = 0.54\text{fm}$, $\rho_0 = 0.17\text{fm}^{-3}$. 这是一组与稳定核几乎相同的参数值. 计算得到同位素产额用虚线列在图 2 中. 另一种用由相对论平均场 (RMF) 理论, 并考虑 ^{17}N 核中配对效应计算得到的密度分布, 结果如图 3. 可以看到在 ^{17}N 核中中子与

质子密度分布在 2—3fm 以外就有显著差别, 在约 6fm 以外中子“皮”能够清楚可见. 能够预期, ^{17}N 的这种密度分布会反映在经弹核碎裂反应后产物的同位素产额分布中, 结果由实线列在图 2 中. 虽然两种密度分布的计算结果对于有的同位素产额是相同的, 但对于同位素产额分布, 即使每种元素只有 3 种同位素, 两者差别还是明显的, 如 Li, Be 的同位素产额分布. RMF 理论计算的 ^{17}N 密度分布与实验数据符合较好, 说明由相对论平均场得到的密度分布更合理地描述了 ^{17}N 内部结构. 预期若能在更宽的同位素范围与实验的同位素产额分布相比较, 可以对弹核内部密度分布进行更为严格的检验, 从而提取确切的弹核密度分布.

4 总结

在 33.4MeV/u ^{17}N 在 ^{197}Au 靶上产生弹核碎裂反应中, 用符合测量方法获得与中子符合的类弹碎片 $Z = 3-6$ 的同位素产额分布, 并基于 Abrasion-Ablation 模型框架, 使用不同密度分布计算相应同位素产额分布做了比较, 结果表明: 对于丰中子弹核 (特别是中子滴线核), 与中子符合的弹核碎裂产物同位素产额分布是一个既容易测量而又对弹核密度分布灵敏的观测量. 在旁观者-参加者模型框架下, 利用合适的弹核密度分布计算得到的弹核碎裂产物的同位素产额分布能较好地重现实验测量的与中子符合的碎裂产物的同位素产额分布. 为提取更确切的弹核密度分布, 实验得到尽可能宽的同位素产额分布是十分有益的. 与 Fermi 参数化密度分布相比, RMF 场理论考虑配对效应得到的 ^{17}N 密度分布能更好地解释实验同位素产额分布.

作者感谢周善贵博士提供用 RMF 理论计算的 ^{17}N 核内密度分布. 感谢中国科学院近代物理研究所加速器运行、探测器制备及 NIM 库等良好的技术支持.

参考文献 (References)

- 1 DOD/NSF, USA, Nuclear Science: A Long Range Plan, 1996; NuPECC Report, Nuclear Physics in Europe Highlights and Opportunities, 1997
- 2 Tanihata I, Hamagaki H T, Hashimoto O et al. Phys. Rev. Lett., 1985, **55**:2676; Phys. Lett., 1985, **160B**:380
- 3 Maddalena V, Aumann T, Bazin D et al. Phys. Rev., 2001, **C63**:024613
- 4 Chulkov L V, Aumann T, Aleksandrov D et al. Phys. Rev. Lett., 1997, **79**:201
- 5 Wolski R, Fomichev A S, Rodin A M et al. Phys. Lett., 1999, **B467**:8—14
- 6 Oganessian Yu Ts, Zagrebaev V I, Vaagen J S. Phys. Rev. Lett., 1999, **82**:4886
- 7 Korshennikov A A, Golovkov M S, Ozawa A et al. Phys. Rev. Lett., 1999, **82**:3581
- 8 SHEN Wen-Qing. Special Topic of Particle and Nuclear Physics, The 2ed Physics Graduate Student Summer School, Peking University, 2000. 7. 17—8. 12 (in Chinese)
(沈文庆. 粒子物理与核物理专题讲义, 第二届全国物理学研究生暑期学校, 北京大学, 2000. 7. 17—8. 12)
- 9 SUN Zhi-Yu, ZHAN Weng-Long, GUO Zhong-Yan et al. Chin. Phys. Lett., 1998, **15**(11):790
- 10 HUA Hui, JIANG Dong-Xing, LI Xiang-Qing et al. HEP & NP, 2000, **24**(6):512 (in Chinese)
(华辉, 江栋兴, 李湘庆等. 高能物理与核物理, 2000, **24**(6):512)
- 11 Browan J D, Swiatecki W J, Tang C F. Lawrence Berkchey laboratory Report No. LBL-2908, 1973
- 12 Dayras R, Pagano A, Barrette J et al. Nucl. Phys., 1986, **A460**:299
- 13 Bonasera A, Toro M D, Gregoire C. Nucl. Phys., 1987, **A463**:653
- 14 Gaimard J J, Schmidt. Nucl. Phys., 1991, **A531**:709

Coincident Measurement between Neutron and Fragment in Reaction $^{17}\text{N} + ^{197}\text{Au}^*$

LI Xiang-Qing HUA Hui JIANG Dong-Xing YE Yan-Lin
CHEN Tao LI Zhi-Huan GE Yu-Cheng WANG Quan-Jin
(Department of Technical Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

WU He-Yu JIN Gen-Ming DUAN Li-Min XIAO Zhi-Gang
WANG Hong-Wei LI Zu-Yu WANG Su-Fang

(Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Science, Lanzhou 730000, China)

Abstract In the reaction induced by 33.4MeV/u ^{17}N beam on ^{197}Au , the coincident measurement between neutron and fragment was performed with the different combinations of 16 neutron detectors at 4° — 83° and 14 telescopes at 2.3° — 9.0° . Integrating the measured angular distributions of the different isotopes, the isotopic yield distributions of $Z = 3$ — 6 elements are obtained. Based on the Abrasion-Ablation model, isotopic yield distributions are calculated using different density distributions for the projectile ^{17}N and compared with the experiment data.

Key words neutron-rich nucleus, coincident measurement, isotopic yield distribution, Abrasion-Ablation model, density distribution, relativistic mean field

Received 6 November 2001

* Supported by NSFC (10075003), Major State Basic Research Development Program (G2000077403) and Foundation of Chinese Ministry of Education