

在 $33.4\text{MeV/u } ^{17}\text{N}$ 与 ^9Be 反应中 中子发射的起源*

华 辉 江栋兴 李湘庆 钱 涛

(北京大学技术物理系 北京 100871)

吴和宇 靳根明 詹文龙 段利敏 郭忠言

肖志刚 李祖玉 王素芳 张保国 王宏伟 胡佩钢

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

摘要 在不同角度测得的 $33.4\text{MeV/u } ^{17}\text{N} + ^9\text{Be}$ 反应中,发射中子的能谱具有复杂的形式,而且随着角度的增大显示出有规律的变化.发射中子至少来源于靶弹核间的核子-核子碰撞、 ^{17}N 的破裂反应以及熔合热核的统计蒸发三种不同起源.分析结果表明:反应体系三种起源的发射中子截面分别为 $4.49, 0.44$ 和 5.5b .

关键词 丰中子核 破裂反应 核子-核子碰撞 发射中子截面 统计蒸发

1 引言

随着新一代放射性核束装置的成功运行,现在人们已经可能利用多种放射性核束,特别是从十分远离稳定线直到滴线附近的核束来研究多种核反应过程.因为放射性核束诱发核反应过程可以在较宽的范围内系统地改变同位旋自由度、反应 Q 值、价核子数目和与核心束缚的松紧程度以及利用中子皮、中子晕等特殊密度分布,所以放射性核束引起的核反应不仅为核结构研究实现新的突破提供了前所未有的有力工具,而且使得深入研究核反应机制和核反应动力学性质随上述参量,特别是同位旋自由度的系统变化成为可能^[1-3].例如, I. Tanihata 等利用在 LBL 的放射性核束装置,测量了 $790\text{A}\cdot\text{MeV}$ 的 $^6\text{-}^{11}\text{Li}$ 和 $^3\text{-}^8\text{He}$ 核束与 Be, C 和 Al 等靶核的相互作用截面,发现 ^8He 和 ^{11}Li 对靶的相互作用截面明显大于邻近核素.对这一实验结果的理论分析最终导出 ^8He 和 ^{11}Li 核具有十分扩展的异常的中子密度分布即中子晕的存在^[4].

在由丰中子核引起的核反应中,相比于其它出射粒子,发射中子的概率更大,因而成为重要的实验观测对象,人们试图从中获得有关核反应过程和丰中子弹核中束缚较松的

1999-05-07 收稿

* 国家自然科学基金资助(19575003)

外层中子的有关信息.事实上,人们通过观测诸如¹¹Li,⁸He(最后一个中子的结合能分别为 0.196MeV 和 0.504MeV)等滴线附近的丰中子核,在不同靶上产生的中子发射,不仅从另一角度确认这些滴线丰中子核所具有的中子晕结构,而且还获得了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^[5,6].

本工作使用¹⁷N 作为弹核束流,它与稳定同位素¹⁵N₈ 相比,在中子闭壳层(N=8)外多两个中子,是接近稳定线的丰中子放射性核素.最后一个中子的结合能为 5.883MeV,虽不像中子滴线核那样具有很小的结合能,但是与核中核子的平均结合能相比还是明显小的.工作的目的是通过实验观测¹⁷N 在⁹Be 靶上引起的中子发射在不同出射角的能谱,了解其中子发射的不同起源及其贡献.

2 实验方法

实验是在兰州重离子国家实验室的 HIRFL + RIBLL 大型实验装置上完成的. RIBLL^[7] 利用 HIRFL 提供的中能重离子束流,在初级靶上产生弹核碎裂反应,并从碎裂产物中分析、纯化和鉴别感兴趣的放射性核束. RIBLL 的平面布局见文献[8]. 60MeV/u¹⁸O 束由 HIRFL 引出后轰击置于 T₀ 处 370mg/cm² 厚的⁹Be 靶发生弹核碎裂反应. 分析磁铁 D₁ 按磁刚度 Bρ 值分离碎片产物,由于在弹核碎裂反应中所有产物的速度几乎与弹核速度相同,这实际上就是分析碎片产物的质量数与电荷数之比值 A/Z. 选定确定 A/Z 值的产物再穿过位于 C₁ 处的一厚度为 270mg/cm² 的楔形 Al 减能片,由于产物在其中的能量损失依赖于 Z, A 和速度,通过改变其后第二个偏转磁铁 D₂ 的磁刚度则可挑选出具有所需 A 和 Z 值的纯化的¹⁷N 束,并经四极透镜将其聚焦在 T₁ 位置. 由于 RIBLL 的反对称双消色差结构,它不仅可以对分析过的放射性核束作进一步纯化而且必要时可以用作零角度的高精度磁谱仪. 在本实验中它只用来对¹⁷N 作进一步纯化,最终获得了能量 40MeV/u 高度纯化的¹⁷N 束.

为了研究¹⁷N 在⁹Be 靶上引起的中子发射,370mg/cm² 厚的⁹Be 靶与一用作测量中子本底的空靶框同时置于 T₂ 处的靶架上^[8]. 用 Trim 程序计算得到在⁹Be 靶半厚度处的¹⁷N 能量为 33.4MeV/u. 距靶 1.5m 的水平面上,在束流方向一侧与之成 4°至 83°角度范围内安置 16 个 NE110 快中子闪烁探测器,每个闪烁体的几何尺寸为 5cm × 15cm × 15cm,通过光导将发生在闪烁体内的闪烁光子传输至 XP2020 快光电倍增管的光阴极上. 快中子闪烁探测器的时间分辨率好于 1.2ns. 利用 R. A. Cecil 等人发展的 Monte Carlo 程序,计算中子探测器的固有探测效率. 该程序在 M. W. Mcnaughton 等人编制的程序上作了如下改进:调整了 30MeV 以上能区中子在¹²C 上的非弹性散射截面;采用了新的闪烁体的光响应函数;确定逃脱的荷电粒子在闪烁体中的能量沉积以及考虑相对论运动学. 所以用 R. A. Cecil 等人的程序计算的结果与塑料和液体闪烁体对中子能区在 1—100MeV、探测阈值为 0.1—22MeV 等效电子能量时的中子固有探测效率实验值相符. 图 1 给出 5cm × 15cm × 15cm NE110 闪烁探测器在不同探测阈值(相应电子等效能量 MeV 值)时,固有探测效率随中子能量的变化关系. 可以看出,随着中子能量的增加,中子探测器的固有探

测效率光滑下降. 在中子能量很低时, 固有探测效率骤然下降则反映出中子在闪烁体入射表面上的反射和光收集效率的降低. 探测阈值的确定需用 1.333MeV γ 射线的康普顿散射边缘能量. 此时中子探测器固有的探测效率由 20MeV 的 34% 下降至 50MeV 的 26%.

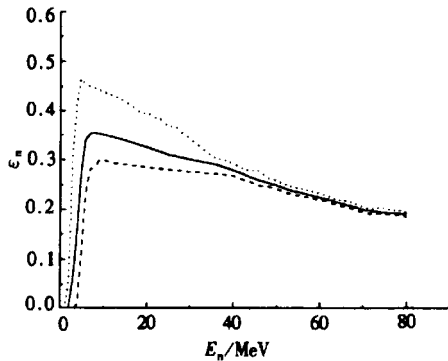


图1 对于 $5\text{cm} \times 15\text{cm} \times 15\text{cm}$ NE110 闪烁体, 中子探测效率与中子能量的关系
 \cdots 0.5MeV, — 1.0MeV, --- 1.5MeV.

发射中子的能谱是用飞行时间(TOF)方法测量的. 为拾取中子飞行时间的起始时间信号, 在 ^9Be 靶 T_2 前安置一闪烁薄膜定时探测器^[9], 它由 $50\mu\text{m}$ 厚的 BC-418 闪烁薄膜及一个 R2083 型光电倍增管组成. 在实验中, 数据获取系统的触发信号的形成是: 加速器高频信号与闪烁薄膜探测器信号以及任意一个快中子探测器的信号的重叠信号.

用 ORTEC462 Timer Calibrator 对 TDC 进行相对的时间刻度和变换线性检验. 中子 TOF 的绝对时间零点则利用同时记录的 γ 峰来确定, 相对于 γ 峰的时间加上 γ 光子飞行 1.5m 距离的时间 5ns 则为中子飞行 1.5m 所需的绝对 TOF, 进而则可将中子 TOF 谱转换为中子能谱.

3 实验结果与讨论

图 2 给出实验得到的对于 $33.4\text{MeV}/u^{17}\text{N}$ 与 ^9Be 反应, 在不同角度发射中子的能谱. 这里, 已经扣除了用空靶框测得的本底中子能谱. 纵坐标是由 $\frac{d^2\sigma}{d\Omega dE} = \frac{N_n(E)}{N_i N_t \Omega \epsilon_n \Delta E}$ 计算的绝对双微分截面(b/sr/MeV). 式中 N_i 和 N_t 分别代表入射到 ^9Be 靶上 ^{17}N 粒子总数目和单位面积 ^9Be 靶原子核数目, Ω 和 ϵ_n 则分别为快中子探测器所张立体角和对能量 E 中子的固有探测效率, $N_n(E)$ 代表测得能量为 E 至 $E + \Delta E$ 能量范围的中子数目. 从图 2 可以看出, 中子能谱具有较为复杂的形式而且随角度不同发生明显变化. 这意味着对于 $33.4\text{MeV}/u^{17}\text{N}$ 轰击 ^9Be 引起反应探测到的中子具有不同的起源. 不同起源的贡献随探测角度不同而变化.

首先在很小角度, 位于 $E \approx 20\text{MeV}$ 附近出现一个峰, 随着角度增加该峰迅速变小, 并在 30° 附近几乎完全消失. 在扣除连续成分贡献后, 各个角度的峰面积即是图 3 所示的角分布. 对角度积分可得相应截面为 $(0.44 \pm 0.08)\text{b}$. 考虑到峰位相应能量比弹核单核子能量稍小以及在入射束流方向成峰的窄的角分布, 可以认为这些中子来源于在靶作用下 ^{17}N 破裂反应. 当然, 为了确认上述猜测, 进行破裂碎片(如 ^{16}N 或 ^{15}N) 与中子的关联测量及相应的核反应理论模型计算是十分必要的.

在破裂中子贡献可以忽略的大角度, 实验测得的中子能谱具有从低能延展至近 80MeV 的平滑分布. 虽然 10MeV 以下较低能量中子占优势地位, 但是更高能量的中子也明显可见. 量子分子动力学(QMD)模型可较好地解释这些高能中子的起源^[10]. 在

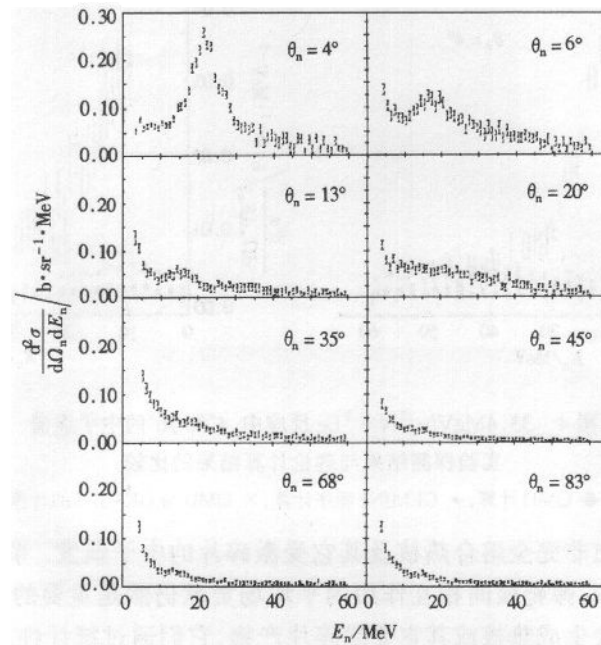


图 2 33.4MeV/u¹⁷N + ⁹Be 反应在不同角度发射中子的能谱

QMD 模型计算中,弹靶核的相互作用是通过核子间的二体、三体局域相互作用加上 Yukawa 表面相互作用及库仑长程作用发生的,其中局域二体相互作用和局域三体相互作用分别与核密度 ρ 与基态核密度 ρ_0 比值 (ρ/ρ_0) 和 $(\rho/\rho_0)^2$ 成正比,即

$$U^{loc} = -124(\rho/\rho_0) + 70.2(\rho/\rho_0)^2, \quad (1)$$

这相应于硬势参数. Yukawa 表面作用势为 $U^{Yuk} = t_3 \frac{\exp(-|r_1 - r_2|/m)}{|r_1 - r_2|/m}$, 其中方程参数 m 取为 1.5fm, $t_3 = -6.66\text{MeV}$. 计算中还考虑了粒子传播过程的泡利阻塞效应.

图 4 给出 33.4MeV/u¹⁷N + ⁹Be 反应中,4° 和 76° 实验测得中子能谱与 QMD 计算结果的比较.

可以看出, QMD 计算的中子能谱在实验误差范围内能够定量地重现实验测得的 40MeV 以上的高能中子能谱. 这表明对于所研究的核反应体系,核子-核子碰撞引起的高能中子发射具有不可忽略的贡献. 对角度的积分,得到核子-核子碰撞产生中子发射总截面为 4.49b. 容易预测:随着靶核质量数增加,这截面会随之增加. QMD 计算表明在 33.4MeV/u¹⁷N + ¹⁹⁷Au 反应中,核子-核子碰撞产生中子发射总截面可达 (49.4 ± 1.6) b, 比⁹Be 靶情形增加约一个数量级.

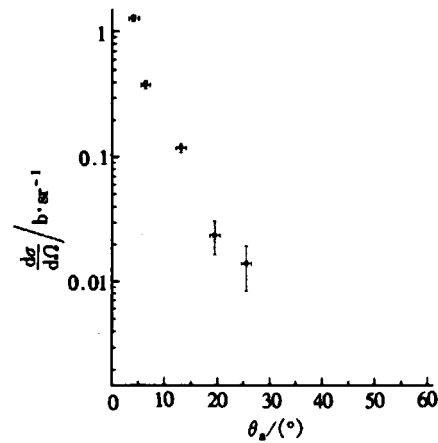


图 3 33.4MeV/u¹⁷N + ⁹Be 反应发射的成峰中子的角分布

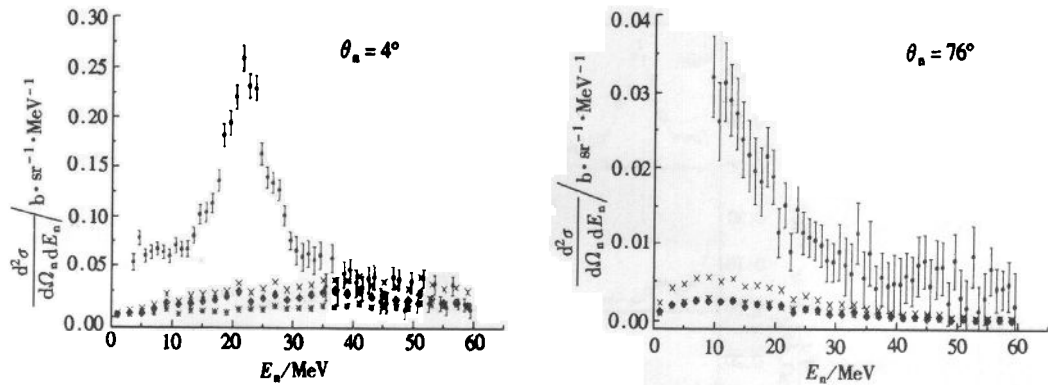


图4 33.4MeV/u¹⁷N+⁹Be反应中,4°和76°的中子能谱

实验探测结果与理论计算结果的比较

● 实验数据,◆ QMD计算,* GEMINI程序计算,× QMD与GEMINI的计算结果之和。

另外还应该指出非完全熔合热核及其它受激碎片的中子蒸发.事实上,在本文研究的反应体系和能区中,弹靶核间相互作用的平均场贡献仍然是重要的.通过非完全熔合或深度非弹性反应会生成热核或其它受激碎片产物,它们通过统计性地蒸发中子应是重要的退激方式.基于这样的定性分析,我们利用GEMINI统计蒸发计算程序^[11]对33.4MeV/u¹⁷N+⁹Be反应统计蒸发中子进行了计算.在GEMINI程序中,考虑了平衡热核蒸发轻粒子、非对称和对称分裂的所有可能衰变方式,采用Monte Carlo方法模拟一个热核的整个衰变链过程.在每次衰变中,一个母核衰变成两个次级产物,随后跟踪所有产物的次级产物,直到其激发能很低不再足以继续衰变为止.在GEMINI计算中,预先知道衰变热核的性质(A、Z、激发能)是十分重要的.但是,对于我们研究的反应体系,这些重要的输入参数并不知道.为此,假定弹、靶核在最小熔合距离 $r_{\alpha}(A_p^{1/3} + A_T^{1/3})$ ($r_{\alpha} = 1.00\text{fm}$,相应 $l_{\alpha} \equiv 40\hbar$)形成了完全融合复合核,其激发能为397.4MeV,反冲速度为5.25cm/ns.在图4中小角度(4°)熔合热核的统计蒸发虽比核子-核子碰撞的贡献更少,但在30MeV以上能区,其贡献是不能忽略的,可以看出QMD与GEMINI的计算结果之和能够更好地重现实验测得的高能部分的(35MeV以上)中子能谱.对于在大角度(76°),这两种贡献大小差不多相同,它们都主要贡献于10MeV附近的较低能量中子.但是,比实验测得的此能区的中子截面明显偏小.通过对GEMINI计算的双微分截面作能量和角度积分得到的33.4MeV/u¹⁷N+⁹Be反应中熔合热核蒸发中子截面为5.5b.

最后,从实验测得的不同角度中子能谱及角分布可以清楚地看出,除了上面讨论过的中子发射起源外还存在其它组份,它主要贡献于10MeV以下的低能中子,而且如果前述中子发射源产生的中子在实验室系中具有前冲角分布,它发射的中子都应具有相当平坦的角分布.虽然不能排除探测器周围物体的多次散射中子的影响,也可以怀疑在扣除用空靶框测量的中子本底时,由于¹⁷N束流斑点和位置的移动而未正确减去,但是在中子与破裂碎片(^{15,16}N)的关联数据中,仍然明显地观测到这种低能中子成份的存在.它是否来自深部非弹反应的激发产物的蒸发?对此进行研究似乎是有意义的.

作者对肖国青博士和孙志宇在 RIBLL 运行中作出的贡献、中国科学院高能物理研究所无偿提供 NE110 闪烁体材料以及吕军光副研究员的帮助表示诚挚感谢。

参考文献(References)

- 1 Basic Science in RI Beam Factory. RIKEN. 1994
- 2 The Isospin Laboratory Research Opportunities with Radioactive Nuclear Beams. LALP, 91—51
- 3 The Spiral Radioactive Ion Beam Facility. GANIL. R9402
- 4 Tanihata I et al. Phys. Rev. Lett., 1985, **55**:2676; Phys. Lett., 1985, **B160**:380
- 5 Anne R, Bimbot R, Dogny S et al. Nucl. Phys., 1994, **A575**:125
- 6 Shyam R, Banerjee P. Nucl. Phys., 1992, **A540**:341
- 7 ZHAN WenLong, GUO ZhongYan, LIU GuanHua et al. Nucl. Instr. Meth. (in press)
- 8 Cecil R A, Anderson B D, Madey R. Nucl. Instr. Meth., 1979, **161**:439—447
- 9 ZHAO YouXiong, ZHAN WenLong, GUO ZhongYan. Nucl. Instr. Meth., 1995, **A355**:464—468
- 10 Aichelin J. Phys. Rep., 1991, **202**:233
- 11 Charity R J, Bewman D R, LIU Z H et al. Nucl. Phys., 1988, **A476**:516

Origins of the Neutrons Emission in the Reaction of 33.4MeV/u ¹⁷N on ⁹Be *

HUA Hui JIANG DongXing LI XiangQing QIAN Tao

(Department of Technical Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

WU HeYu JIN GenMing ZHAN WenLong DUAN LiMin GUO ZhongYan

XIAO ZhiGang LI ZuYu WANG ShuFang ZHANG BaoGuo

WANG HongWei HU PeiGang

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

Abstract In the reaction of 33.4MeV/u ¹⁷N on a target ⁹Be, the measured neutron spectra at different angles exhibit a complex pattern and vary regularly as a function of the detected angle. The detected neutrons probably come from the three origins: nucleon-nucleon collisions between the projectile and target, break-up of ¹⁷N and statistical evaporations from the hot nuclei. By analyzing the measured neutron angular distribution and calculating with QMD and GEMINI for the reaction concerned, 4.49, 0.44 and 5.5 barns were obtained for neutron emission cross sections due to the three origins mentioned above, respectively.

Key words neutron-rich nucleus, break-up reaction, nucleon-nucleon collision, neutron emission cross section, statistical evaporation

Received 7 May 1999

* Supported by National Natural Science Foundation of China (19575003)