

用阈探测器活化法测量 50MeV/u 重离子 实验靶区的中子注量率、能谱和中子产额

李桂生 王 经 赵彦森 李文健 张天梅 李宗强

(中国科学院近代物理研究所, 兰州, 730000)

用阈探测器中子活化法测量了 50MeV/u ^{12}C 离子实验靶区的次级中子平均注量率、角分布、粗略能谱, 并估算了重离子反应的中子产额。

关键词 重离子反应 实验靶区 阈探测器 中子活化 注量率 中子谱 产额

入射离子能量在 10MeV/u 左右的低能重离子反应中, 出射中子主要来自复合核退激的蒸发和裂变过程, 其能量在几个 MeV 量级, 同时, 也有部分能量较高的中子出射。当入射离子能量达到 50MeV/u 或更高时, 由前平衡过程发射的较高能量的中子增加而使出射中子能谱出现了一个中等能量区和一个较高能量区^[1]。因此, 中能重离子反应出射的中子能量高, 最高能量可达入射离子单核能的两倍以上, 能谱复杂, 而中子产额和次级中子注量率比轻核反应的低, 其精确测量是一个比较复杂和困难的问题。

重离子反应的中子产额、出射次级中子的能谱和注量率, 决定了实验靶区的剂量场, 也决定了加速器和实验区的中子屏蔽, 因此, 研究重离子反应次级中子的能量、注量率分布和中子产额不仅对保健物理研究, 而且对重离子物理和中子物理研究都有着很现实的意义。目前, 国外已发表的这类研究均在低能区。我们对中能重离子反应次级中子的能量、注量率、角分布进行了实验测量, 并估算了中子产额, 得到了一些有学术价值和实用价值的结果。

1 测量原理和实验条件

在 0—100MeV 能区, 许多中子反应都具有阈反应的性质^[2]。因此, 选用一组合适的阈反应探测器进行中子活化测量, 就可以把该能区的中子分为不同的能量组分, 测量各能量组分的平均中子注量率和粗略的中子能谱。

实验选用的阈探测器及有关参数列入表 1。热中子用典型的铟活化法测量。天然铟有两种稳定同位素 ^{113}In (4.3%) 和 ^{115}In (95.7%)。在热中子轰击下, 通过 (n, γ) 反应的生成核 ^{114}In 、 ^{116}In

收稿日期: 1992-07-21 收到修改稿日期: 1993-06-15

和 $^{116}\text{In}^m$ 的半衰期分别为 71.9s、14.1s 和 54.1min。因此,选用 $^{115}\text{In}(n,\gamma)^{116}\text{In}^m$ 反应测量热中子,其反应截面 $\sigma = 1.91 \times 10^{-26} \text{m}^2$ [2]。

用反应阈能 $\sim 6\text{MeV}$ 的 $^{27}\text{Al}(n,\alpha)^{24}\text{Na}$ 反应测量 $E_n > 6\text{MeV}$ 的中子。中子能量在 6—100MeV 区域,其反应截面 $\sigma \sim 4.5 \times 10^{-30} \text{m}^2$,生成核 ^{24}Na 的半衰期为 15.02h。

$^{19}\text{F}(n,2n)^{18}\text{F}$ 、 $^{12}\text{C}(n,2n)^{11}\text{C}$ 和 $^{27}\text{Al}(n,4p6n)^{18}\text{F}$ 反应分别用来测量 $E_n > 11\text{MeV}$ 、20MeV 和 50MeV 的中子,反应截面分别为 $\sim 4.0 \times 10^{-30} \text{m}^2$ [3]、 $2.2 \times 10^{-31} \text{m}^2$ 和 $7 \times 10^{-31} \text{m}^2$ [2]。生成核 ^{18}F 和 ^{11}C 均为 β^+ 衰变体,衰变几率分别为 96.9%和 99.76%;半衰期分别为 109.8min 和 20.38min。

根据中子活化理论,样品辐照期间的平均中子注量率由下式给出:

$$\bar{\varphi} = \frac{N_2 \cdot \lambda}{N_1 \cdot \bar{\sigma} (1 - e^{-\lambda t_0}) [e^{-\lambda(t_1-t_0)} - e^{-\lambda(t_2-t_0)}] \cdot \epsilon \cdot \eta} \quad (\text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1})$$

式中, N_1 是样品中活化核的原子核数; $\bar{\sigma}$ 是在所测能区内活化截面的平均值(cm^2); λ 是生成核的衰变常数(min^{-1}); N_2 是在测量时间($t_2 - t_1$)间隔内所测 γ 射线峰下净计数; t_0 是样品照射时间(min); ϵ 是测量系统对选定 γ 射线的探测效率; η 是 γ 射线的分支比。

实验是在 HIRFL 物理实验大厅快化实验区进行的。实验布局如图 1 所示, $\sim 40\text{cm}$ 长的放化实验靶室紧接加速管道,其末端是底厚 $\sim 6\text{cm}$ 的法拉第筒,法拉第筒前有一 $\sim 600\text{mg}/\text{cm}^2$ 的 Au 靶。束流由束流积分器和记录仪记录。

阈探测器在辐照前称重,用无水乙醇清洗后装入清洁纸样品袋,放在中子场中辐照。 In 、 Al 探测器在束流前方向距靶 1m 处照射; F 、 C 探测器在与束流方向成 0° 、 30° 、 60° 和 90° 角、距靶 1m 处照射,辐照及测量条件已在表 1 中列出。

活化样品的放射性用高纯锗探测器和带有自动解谱程序的 ORTEC 7051 多道系统分析测量。测量前,用直径为 2mm 的圆盘状 ^{152}Eu 标准源对系统的探测效率进行了刻度。每次测量结束后再取 ^{152}Eu 源标谱,检查仪器的稳定性。

为了认定所测 γ 射线是否来自所选探测器的活化生成核,还进行了半衰期测量。结果确认所测 γ 线分别来自反应生成核 $^{116}\text{In}^m$ 、 ^{24}Na 、 ^{18}F 、 ^{11}C 和 ^{18}F 。实验发现, Al 靶生成物的 511keV 线除有 $T_{1/2} = 108\text{min}$ 的组分外,还有 $T_{1/2} = 8.5\text{h}$ 的组分。初步分析,后一组分可能来自 Al 中杂质 Fe ,这还待进一步研究确定。

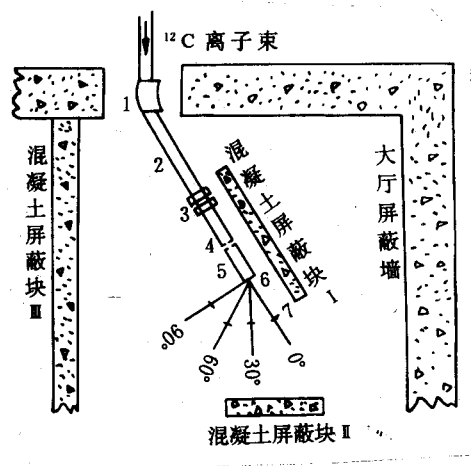


图 1 实验区布局

- 1——偏转磁铁;2——束流管道;3——四极透镜;
4—— $\phi 10\text{mm}$ 光阑;5——实验靶室;
6——靶子和法拉第筒;7——阈探测器。

表1 阈探测器参数,辐照和测量条件

阈探测器	^{115}In	^{27}Al	^{19}F	^{12}C	^{27}Al
活化反应	$^{115}\text{In}(n, \gamma)^{116}\text{In}^m$	$^{27}\text{Al}(n, \alpha)^{24}\text{Na}$	$^{19}\text{F}(n, 2n)^{18}\text{F}$	$^{12}\text{C}(n, 2n)^{11}\text{C}$	$^{27}\text{Al}(n, 4p6n)^{18}\text{F}$
阈能/MeV	热中子	6	11	20	50
活化截面/ 10^{-31}m^2 [3,4]	191×10^3	~ 45	~ 40	~ 22	~ 7
生成核半衰期 $T_{1/2}$	54.1min	15.02h	109.7min	20.38min	109.7min
活化样品材料	高纯 In	纯 Al	teflon	polythene	纯 Al
样品尺寸/ mm^2	$\phi 40 \times 0.5$	$\phi 40 \times 2$	$\phi 40 \times 10$	$\phi 40 \times 10$	$\phi 40 \times 2$
辐照平均流强/nA	3.3	3.5	3.3	4.4	3.5
样品辐照时间 t_0 /min	510	1042	470	120	1042
等待时间 $t_1 - t_0$ /min	32	116	100	10	116
测量时间 $t_2 - t_1$ /min	6	120	6 12(90°样品)	6 12(90°样品)	120

2 实验结果与讨论

(1)中子注量率 活化法测量的中子注量率代表了辐照期间照射到活化样品上的中子注量率的平均值。实验测得的距靶 1m 处的平均中子注量率列入表 2。

表2 中子注量率和角分布的测量结果

中子能量, E_n	单位束流的平均中子注量率 $\bar{\varphi}/\text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{nA}^{-1}$			
	0°	30°	60°	90°
热中子	0.4×10^4			
>6MeV	5.3×10^4			
>11MeV	4.8×10^4	3.5×10^4	1.4×10^4	1.1×10^4
>20MeV	2.6×10^4	1.7×10^4	0.7×10^4	0.4×10^4
>50MeV	1.9×10^4			

根据上述测量数据和文献[4,5]绘出的 41.7MeV/u $^{12}\text{C} + \text{Fe}$ 反应的理论能谱和角分布,可以近似得到 50MeV/u $^{12}\text{C} + \text{Cu}$ (厚靶)实验靶区 0°方向 1m 处的总中子注量率。假定该反应与 41.7MeV/u $^{12}\text{C} + \text{Fe}$ 反应有类似的能谱和角分布,从文献[5]表 2 知,10MeV 以下的中子占出射总中子数的 $\sim 52\%$,所以,50MeV/u $^{12}\text{C} + \text{Cu}$ (厚靶)实验靶区 0°方向距靶 1m 处单位束流的平均总中子注量率约为 $1.9 \times 10^5 \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{nA}^{-1}$ 。

(2)次级中子能谱 由表 2 所列数据按各反应的反应阈能顺序递减,得到 0°方向距靶 1m 处粗略的中子能谱(图 2)。从图 2 可以看出,能量大于入射离子单核能(50MeV)的出射中子仍占有相当的比例,这和理论分析是一致的。

(3)中子产额估算 在许多情况下,中子的总产额(每个入射离子所产生的次级中子数)是一个十分重要的参数。厚靶的总中子产额可以表示为:[6]

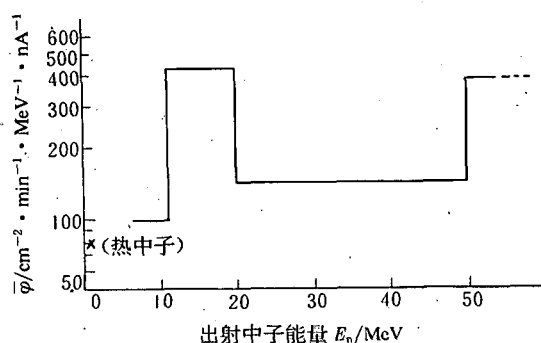


图2 中子能谱

$$Y = \int_0^R \Delta y \cdot dt$$

其中, $\Delta y = \iint_{4\pi} \frac{d^2\sigma}{d\Omega \cdot dE} \cdot dE \cdot d\Omega \cdot \frac{N_A}{A}$ 代表薄靶的中子产额; R 为入射离子在靶中的射程, N_A 为阿伏伽德罗常数; A 为靶核的质量数。

根据实测的 $E_n > 11\text{MeV}$ 中子的角分布曲线(图3), 从 $0^\circ - 90^\circ$ 积分, 利用 $41.7\text{MeV/u } ^{12}\text{C} + \text{Fe}$ 理论能谱的两个近似估算(1) 10MeV 以下中子占出射总中子的 $\sim 52\%$, (2) $0^\circ - 90^\circ$ 发射的中子占出射总中子的 $\sim 90\%$, 并且对次级中子穿过铜质法拉第筒厚度的减弱作了修正, 求得 $50\text{MeV/u } ^{12}\text{C}$ 离子轰击厚度略大于其射程的厚铜靶时的每个 ^{12}C 离子总中子产额 $Y = 5.5 \times 10^{-2}$ 。

用类似的方法, 我们还得到 $50\text{MeV/u } ^{12}\text{C}$ 离子轰击厚度略大于其射程的厚铜靶时, 单位束流轰击下束流前方向 2π 立体角内出射的 $E_n > 11\text{MeV}$ 、 $E_n > 20\text{MeV}$ 的中子强度, 即 $S_n(E_n > 11\text{MeV}) = 2.42 \times 10^7 \text{s}^{-1} \cdot \text{nA}^{-1}$ 、 $S_n(E_n > 20\text{MeV}) = 1.37 \times 10^7 \text{s}^{-1} \cdot \text{nA}^{-1}$

(4) 利用中能重离子反应出射中子的能量可高达入射离子单核能的两倍以上和高能量中子集中在前方向发射的性质, 使我们有可能利用中能和高能重离子反应的次级中子束作为一种比 14MeV 中子源能量更高的高能量中子源, 从而实现一些反应阈能大于 14MeV 的中子核反应, 开展核结构、核反应机制、中子物理及用高能量中子合成新核素的探索等研究工作。

(5) 重离子反应的总中子产额随入射离子能量的增加而增加, 与入射束流强度成正比。可以设想, 如果能进一步提高入射离子的能量, 使达到 100MeV/u 或更高, 束流强度达到几十 nA 乃至 100nA , 就有可能获得 $S_n(E_n > 20\text{MeV}) = 10^9 - 10^{10} \text{s}^{-1} \cdot \text{nA}^{-1}$ (前向 2π 立体角) 的实际可利用的中子源强。利用这种次级中子源的角分布特性, 在前向小角度上的中子注量率可比 14MeV 加速器中子源的中子注量率高出许多倍, 必定可以做出更多、更新的研究成果。

(6) 关于 $E_n > 11\text{MeV}$ 和 $E_n > 20\text{MeV}$ 的次级中子角分布, 已有专文报道^[7], 这里不再讨论。

(7) 该实验所测量的中子, 既有 ^{12}C 离子与靶材料 ($\text{Au} + \text{Cu}$) 相互作用出射的中子, 也包括了 ^{12}C 离子从束流输运部件 (如偏转磁铁、准直光栏等) 上击出的次级中子和实验靶区的散射中子, 因此, 实验测得的是该实验小区中子的实际分布。

(8) 实验测量的误差主要来源于中子活化截面的选取。当阈能以上的截面值随中子能量的变化比较平坦时 (如 $^{12}\text{C}(n, 2n)^{11}\text{C}$ 反应), 实验误差较小; 当截面变化较大时 (如 $^{27}\text{Al}(n, \alpha)^{24}\text{Na}$ 和 $^{19}\text{F}(n, 2n)^{18}\text{F}$ 反应), 由于采用了平均截面, 引起的误差较大, 要得到比较精确的结果, 需要作计算机处理。本实验的误差大约在 $\pm 15\%$, 这完全能满足保健物理和一般核物理实验的需要。

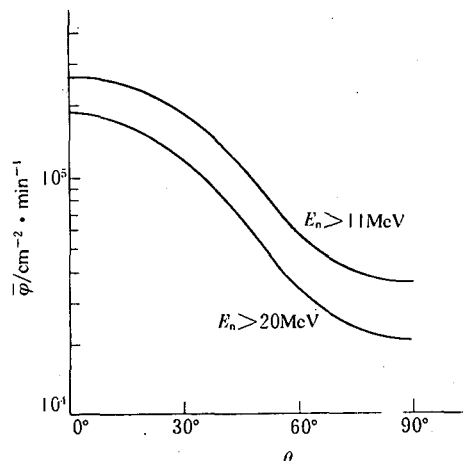


图3 出射中子角分布曲线

作者对赵之正同志和中国科学院近代物理研究所制靶组、加速器运行人员的大力支持表示感谢。

参考文献

- 1 Cecil R A, Anderson B D, Baldwin A R, et al. Inclusive Neutron Production by 337MeV/Nucleon Neon Ions on Carbon, Aluminum, Copper, and Uranium. *Phys Rev C*, 1981, 24: 2013.
- 2 Charalambus St, Dutrannois J, Goebel K. CERN/DI/HP 90, 1966.
- 3 Hargreaves D M, Stevenson G R. Rutherford Laboratory, RP/PN 37, 1959.
- 4 Bertini H W, Santoro R T, Herman G W. Calculated Nucleon Spectra at Several Angles From 192—, 500—, 700—, and 900 MeV ^{12}C on ^{56}Fe . *Phys Rev C*, 1973, 14(2): 530.
- 5 李桂生. 无屏蔽条件下用 10-in 单球 rem 计测量中能重离子反应中子剂量当量时的理论修正. *核技术*, 1993, 16(6): 370.
- 6 Study Group of NUMATRON, NUMATRON—High Energy Heavy Ion Facility, Institute for Nuclear Study, University of Tokyo, Japan, 1977.
- 7 李桂生等. 50MeV/u ^{12}C 离子实验靶区出射中子角分布实验测量. *高能物理与核物理*, 1993, 17(6): 499.

NEUTRON FLUENCE RATE, NEUTRON SPECTRUM AND NEUTRON YIELD MEASUREMENT WITH THE THRESHOLD DETECTOR ACTIVATION METHOD IN 50MeV/u ^{12}C —ION EXPERIMENTAL TARGET AREA

LI GUISHENG WANG JING ZHAO YANSEN
LI WENJIAN ZHANG TIANMEI LI ZONGQIANG
(Institute of Modern Physics, Academia Sinica, Lanzhou, 730000)

ABSTRACT

The average fluence rate and angular distribution of secondary neutrons with the threshold detector activation method in 50MeV/u ^{12}C -ion experimental target area are measured and the yield of secondary neutrons is estimated.

Key words Heavy ion reaction Experimental target area Threshold detector Neutron activation Fluence rate Neutron spectrum Yield