

# 50 MeV/u $^{18}\text{O}$ 离子轰击 Be、Cu 和 Au 厚靶的中子产额和中子发射率\*

李桂生 张天梅 李宗伟 苏有武 张树民

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

**摘要** 用阈探测器中子活化法测量了 50 MeV/u  $^{18}\text{O}$  离子轰击 Be、Cu 和 Au 厚靶的总中子产额和前向中子发射率。实验结果表明,中子产额对靶核原子序数有一定的依赖性,较轻靶子的中子产额和中子发射率高于较重的靶子;当靶核(Cu)和入射离子单核能(50MeV)相同时, $^{18}\text{O}$  离子的中子产额约为 $^{12}\text{C}$  离子的 4 倍。

**关键词** 阈探测器 活化 重离子 中子产额 发射率

## 1 引言

在保健物理、中子剂量学和中子屏蔽研究中,中子产额和中子发射率是很重要的基本数据。它们与出射中子的强度、中子剂量当量和屏蔽厚度有着直接的关系。

从 60 年代开始,重离子反应的实验研究逐步由低能区( $E_i < 50\text{MeV/u}$ )向中能区( $50\text{MeV/u} < E_i < 200\text{MeV/u}$ )和高能区( $E_i > 200\text{MeV/u}$ )发展。从现已发表的文献看,重离子反应的中子产额和中子发射率研究主要集中在入射离子单核能为几个 MeV—20 MeV 的低能区。60 年代, E. L. Hubbard 等人<sup>[1]</sup>测量了单核能在 10 MeV 左右的重离子轰击几种厚靶的中子产额,实验结果表明,中子产额随入射离子单核能的增加而增加;在入射离子单核能相同的条件下,较轻重离子的中子产额高于较重重离子的中子产额;中子产额随靶核原子序数的增加而增加,但在 Cu—Pb 靶的较宽范围内,中子产额的变化不大。70 年代末到 80 年代初, F. Clapier 等人<sup>[2]</sup>在入射离子单核能低于 15 MeV 的重离子反应研究的基础上,并综合了其它一些研究结果<sup>[3-8]</sup>, 给出了一个适用于这一能量段重离子反应中子产额的经验拟合公式

$$Y(W, Z) = C(Z) \cdot W^{\beta(Z)}, \quad (1)$$

式中,  $W$  是入射离子的单核能 (MeV),  $Z$  是入射离子的原子序数,  $C(Z)$  和  $\beta(Z)$  是两个

1997-03-26 收稿

\* 国家自然科学基金资助 (19575053)

拟合参数. F. Clapier 的研究指出, 低能区重离子反应的中子产额  $Y$  数量级大约为  $10^{-5} - 10^{-3} \text{ n/ion}$ , 比同一能量下的轻离子反应中子产额低 2—3 个数量级; 入射离子单核能相同的重离子, 其中子产额随靶核质量的增加而略有增加, 但变化不大; 中子产额与入射离子在靶中的射程有关, 与反应系统的库仑位垒有关.

80 年代中期, 我国学者郭之虞和英国牛津大学核物理实验室的同事们<sup>[9]</sup>在 10 MV 串列加速器上完成了用单核能在 0.9—6 MeV 的低能重离子束轰击 12 种厚靶的实验研究, 较系统地测量了各种弹-靶组合下的数十个中子产额数据. 研究指出, 中子产额与入射离子的能量和质量有着强烈的依赖关系; 对给定的能量和离子种类而言, 中子产额也表现出对靶核的依赖. 在综合研究数据的基础上, 给出了一个中子产额拟合公式

$$Y = 8.8 \times 10^4 \bar{D}, \quad (2)$$

式中,  $\bar{D}$  是距靶 1 米处的平均中子剂量当量率.

综上所述, 低能区重离子反应中子产额的研究已经取得了一些实验结果, 并且得出了一些规律性的认识. 但是, 对中能区和高能区重离子反应中子产额的研究才刚刚开始, 还极少见这方面的报道.

## 2 实验原理和探测器

研究表明, 中能重离子反应出射中子的能谱比较复杂, 随着入射离子单核能的增加, 出射中子的最高能量也越来越高, 当单核能为 50 MeV 时, 出射中子能量可达 100 MeV. 20 MeV 以上的高能量中子所占的比例也越来越大, 甚至可以占到出射总中子数的 60% 以上<sup>[10-12]</sup>.

阈反应是能量在 100 MeV 以下中子反应的一大特征<sup>[13]</sup>, 因此, 选用合适的阈反应来测量不同能量的中子组份是一种比较简便、易行的方法. 本实验中, <sup>27</sup>Al、<sup>19</sup>F、<sup>12</sup>C 和 <sup>27</sup>Al 活化样品作为阈探测器分别用来测量能量大于 7、11、20 和 50 MeV 的中子, 其反应式分别是 <sup>27</sup>Al(n, α)<sup>24</sup>Na、<sup>19</sup>F(n, 2n)<sup>18</sup>F、<sup>12</sup>C(n, 2n)<sup>11</sup>C 和 <sup>27</sup>Al(n, 4p6n)<sup>18</sup>F. 阈探测器的参数列于表 1.

表1 阈探测器参数

阈探测器	<sup>27</sup> Al	<sup>19</sup> F	<sup>12</sup> C	<sup>27</sup> Al
活化反应	<sup>27</sup> Al(n, α) <sup>24</sup> Na	<sup>19</sup> F(n, 2n) <sup>18</sup> F	<sup>12</sup> C(n, 2n) <sup>11</sup> C	<sup>27</sup> Al(n, 4p6n) <sup>18</sup> F
反应阈能 (MeV)	7	11	20	50
平均活化截面 ( $10^{-31} \text{ m}^2$ ) <sup>[13, 14]</sup>	~45	~40	~22	~7
生成核半衰期	15.02h	1.83h	20.38 min	1.83 h
阈探测器材料	高纯Al	聚四氟乙烯	聚乙烯	高纯Al
活化样品尺寸 (mm)	φ40×2	φ40×5	φ40×5	φ40×2

## 3 实验

实验是在兰州重离子研究装置 HIRFL 物理实验大厅快化终端实验区进行的. 50 MeV/u<sup>18</sup>O 离子束通过偏转磁铁进入实验厅, 再通过两个四级透镜、准直光阑进入靶

室, 轰击厚靶. Be、Cu、Au 靶的厚度大于入射离子在其中的射程. 与厚靶相连的法拉第筒收集束流, 并由束流积分器记录.

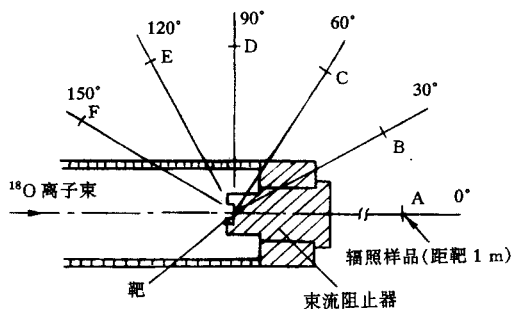


图1 阈探测器的布局

阈探测器放置在束流管道一侧的实验支架上. 实验支架的高度与束流管道中心线的高度相同. 图1是靶子周围阈探测器的布局,  $^{27}\text{Al}$ 、 $^{19}\text{F}$  和  $^{12}\text{C}$  活化样品放置在 A—F 6 个不同的位置上.

阈探测器分别在  $50 \text{ MeV/u}$   $^{18}\text{O}$  离子轰击 Be、Cu、Au 靶出射的中子场中辐照. 活化样品活性用 HPGe 和微机多道分析系统测量. 测量系统的探测效率用  $^{152}\text{Eu}$  标准源进行了刻度.

## 4 结果与讨论

实验测得  $^{18}\text{O}$  离子轰击 Be、Cu、Au 厚靶出射的  $E_n > 7$ 、11、20、50 MeV 中子的分布如图 2 所示.

低能重离子反应研究结果表明, 中子产额主要取决于入射离子的单核能<sup>[1]</sup>, 但与靶核也有一定的关系<sup>[2,9]</sup>. 为了估算总中子产额, 假定  $50 \text{ MeV/u}$   $^{18}\text{O}$  离子轰击 Be、Cu、Au 厚靶与  $41.7 \text{ MeV/u}$   $^{12}\text{C}$  离子轰击 Fe 厚靶出射中子有相似的能量分布和角分布. 利用  $41.7 \text{ MeV/u}$   $^{12}\text{C}$  离子轰击厚 Fe 靶时  $E_n > 11 \text{ MeV}$  中子约占出射总中子数的 47.5% 的数据<sup>[10,12]</sup>, 并由测得的角分布曲线积分, 可以求得中子产额和前向中子发射率 ( $180^\circ$  方向上的数据可由角分布曲线外推得到). 计算结果列于表 2.

测量结果表明:

(1) 在入射离子和入射单核能相同的条件下, 中子产额和中子前向发射率表现出对靶核原子序数的依赖性, 较轻靶子的中子产额和中子发射率比较重的靶子高;

(2) 单核能相同 ( $50 \text{ MeV/u}$ ) 的两

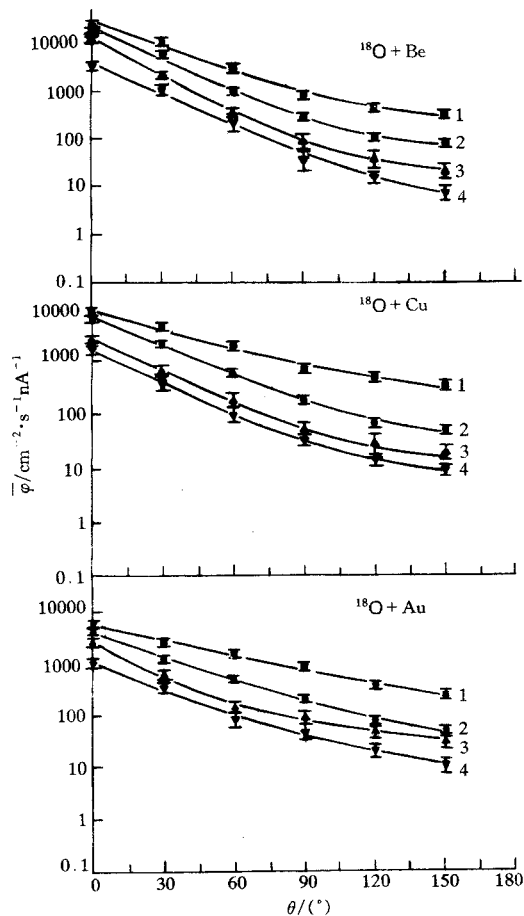


图 2  $^{18}\text{O}$  离子轰击厚 Be、Cu、Au 靶出射中子的分布曲线 1、2、3、4 分别表示  $E_n > 7 \text{ MeV}$ 、 $E_n > 11 \text{ MeV}$ 、 $E_n > 20 \text{ MeV}$ 、 $E_n > 50 \text{ MeV}$ .

表2 50MeV/u<sup>18</sup>O离子的中子产额Y和前向中子发射率S<sub>n</sub>

反应	Y / 10 <sup>-2</sup> n/ion					S <sub>n</sub> / 10 <sup>8</sup> n/s · nA	
	E <sub>n</sub> >7 MeV	E <sub>n</sub> >11 MeV	E <sub>n</sub> >20MeV	E <sub>n</sub> > 50MeV	总中子产额	E <sub>n</sub> > 11 MeV	E <sub>n</sub> > 20 MeV
<sup>18</sup> O+Be	42.6	26.0	8.2	3.6	54.8	2.00	0.61
<sup>18</sup> O+Cu	19.2	9.1	3.0	1.7	20.7	1.60	0.50
<sup>18</sup> O+Au	14.5	6.9	3.1	1.6	14.9	0.49	0.21
50 MeV/u <sup>12</sup> C+Cu <sup>[15]</sup>					5.5	0.24	0.14

种入射离子分别轰击同一种靶核(Cu), <sup>18</sup>O离子的总中子产额高于<sup>12</sup>C离子的总中子产额. 由此可见, 中子产额与入射离子也有一定的依赖关系. 可以预见, 当用50 MeV/u的<sup>18</sup>O和<sup>16</sup>O离子分别轰击Cu厚靶时, 由于<sup>18</sup>O是一个丰中子核, 而且生成的复合核具有较高的激发能, 因此, <sup>18</sup>O离子比<sup>16</sup>O离子应有较高的中子产额.

(3) 由于入射<sup>18</sup>O离子和Be靶都是相对丰中子的核, 而且, <sup>18</sup>O离子轰击Be靶时生成的复合核的激发能明显高于轰击Cu、Au厚靶时复合核的激发能, 因此, <sup>18</sup>O离子轰击Be靶时有较高的中子产额.

(4) 出射中子在前向2π立体角内的中子发射率与中子产额有相同的变化规律. 如果要使前向中子发射率达到10<sup>9</sup>量级, 对入射束流I的要求列在表3中.

表3 前向中子发射率达到10<sup>9</sup>量级时需要的50MeV/u<sup>18</sup>O离子束流I

反应	E <sub>n</sub> > 11 MeV		E <sub>n</sub> > 20 MeV	
	S <sub>n</sub> / 10 <sup>8</sup> n/s · nA	I / nA	S <sub>n</sub> / 10 <sup>8</sup> n/s · nA	I / nA
<sup>18</sup> O+Be	2.00	>5	0.61	>16
<sup>18</sup> O+Cu	1.60	>7	0.50	>20
<sup>18</sup> O+Au	0.49	>20.5	0.21	>50

由表中所列数据可以看出, 只要入射束流分别大于16、20、50nA, 上述3种反应出射的E<sub>n</sub>>20 MeV中子的前向发射率即可达到10<sup>9</sup>量级. 可以预计, 当入射束流分别大于约10、15、35nA时, 由上述3种反应可以获得E<sub>n</sub>>14 MeV、前向中子发射率达到10<sup>9</sup>量级的实用中子源.

作者衷心感谢赵之正副研究员在实验中给予的帮助和支持, 感谢参加加速器运行和测量值班的全体同志的辛勤劳动.

## 参 考 文 献

- [1] Hubbard E L, Main R M, Pyle R V. Phys. Rev., 1960, **118**:507—514
- [2] Clapier F, Zaidins C S. Nucl. Instr. and Meth., 1983, **217**:489—494
- [3] Clapier F. Oeme des Merisiers, 1979
- [4] CEN-S / SPR / SRJ / 78—341, 1977
- [5] Service de Radioprotection-IPN Orsay(internal report), 1978
- [6] Festag J G. 5th International Congress of IRPA, Jerusalem, 1980
- [7] Ohnesorge W F, Butler M H et al. Health Physics, 1980, **39**:633—636
- [8] Tugn J W N et al. HS-RP / TM 180—68 CERN Technical Memorandum, 1980

- [9] Guo Z Y, Allen P T, Doucas G et al. Nucl. Instr. and Meth., 1987, **B29**:500—507
- [10] Bertini H W, Santoro R T, Hermann O W. Phys. Rev., 1976, **C14**:590—595
- [11] Gabriel T A et al. ORNL-TM-4334, 1975
- [12] Li Guisheng. Nuclea Techniques (in Chinese), 1993, **16**:370—376
- [13] Charalambus St, Dutrannois J, Goebel K. CERN/DI/HP 90, 1966, 1—39
- [14] Hargreaves D M, Stevenson G R. Rutherford Laboratory RP/PN 37, 1969, 1—7
- [15] Li Guisheng, Wang Jing, Zhao Yansen et al. Journal of Nuclear and Radiochemistry (in Chinese), 1993, **15**:193—197

### Neutron Yields and Neutron Emission Rates in the Forward Direction for 50 MeV / u $^{18}\text{O}$ -ion on Thick Be, Cu, Au Targets \*

Li Guisheng    Zhang Tianmei    Li Zongwei    Su Youwu    Zhang Shumin

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

**Abstract** The neutron yields and the neutron emission rates in the forward direction for 50 MeV/u  $^{18}\text{O}$ -ion induced reactions on thick Be, Cu, Au targets have been measured using the threshold detector activation method. The measured results indicate that the neutron yield and the neutron emission rate depend on the atomic number of target nuclei; neutron yield for the lighter target is greater than that for the heavier one. The neutron yield for 50 MeV / u  $^{18}\text{O}$ -ion on Cu is about four times as large as that for 50 MeV / u  $^{12}\text{C}$ -ion on Cu when incident energies per nucleon are identical.

**Key words** threshold detector, activation, heavy ion, neutron yield, emission rate

---

Received 26 March 1997

\* Supported by the National Natural Science Foundation of China (19575053)