

一种新阈探测器的实验验证和重离子 靶区中子测量

李桂生 张天梅 苏有武 李树伟
(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

摘要 验证了用 ^{209}Bi 作为一种新的阈探测器测量高能中子的可能性,并利用 ^{115}In 、 ^{27}Al 、 ^{19}F 、 ^{12}C 和 ^{209}Bi 组成的阈探测器组合测量了中能重离子反应实验靶区出射中子的注量率分布、能量分布和剂量当量率分布。

关键词 阈探测器, 实验验证, 中子谱, 剂量当量率

中图分类号 O571.5, O571.54

中子能谱测量是核物理和保健物理的重要研究课题之一。从中子能谱可以获得核激发能级的数据,也可以获得有关核反应堆和核武器的有关数据,对核反应堆和核武器的设计、制造有重要意义。在保健物理研究和实际应用中,中子能谱数据对中子屏蔽的计算、设计和重离子反应出射中子剂量当量的准确测量,特别是高能中子剂量当量的准确测量有十分重要的意义。

核反冲法、核反应法(核乳胶法)与中子飞行时间法是中子能谱测量的最常用的方法。一般说来,核反冲法的适用范围在1 MeV以下区域;核乳胶法可测的中子能量在0.5—1 MeV。20世纪70年代以前,用飞行时间法可以测量30 MeV的中子,但是其设备复杂且需要有很大的实验场地^[1],以保证足够的飞行距离,实际使用起来相当困难。特别是要用飞行时间法测量中能重离子反应的出射中子时,出射的中子能量相当高,例如,用单核能50 MeV的重离子轰击靶子时,出射中子的最高能量可达100 MeV左右,约为入射离子单核能的2倍;30—100 MeV的中子占出射总中子的绝大部分^[2],飞行时间法遇到了困难。虽然,随着探测器技术和电子学技术的迅速发展,高性能探测器和电子元器件得到了广泛应用,飞行时间法也有了新的发展,近年来,也看到了用飞行时间法测量高能中子的报道^[3],但尚不清楚其具体方法和设备,而且要在国内完成这样的实验也是比较困难的。

与飞行时间法相比,用阈探测器活化法测量中子能谱是一种技术比较简单而且比较实用的方法。

国内曾用此法测量过反应堆的中子能谱,国外也曾用过此法测量过低能重离子反应出射中子的能谱^[4,5]。但是,由于使用的阈探测器数量少,可直接测量的中子能量在20 MeV以下,还要用比较复杂的数学解析方法才能得到高能段的中子能谱,这样得到的中子能谱无疑将会引起较大的误差。

我们曾经用 ^{27}Al 、 ^{19}F 、 ^{12}C 、 ^{27}Al 组合测量过一些重离子反应的出射中子^[6,7],但是,由于使用的阈探测器只有4种,只能将出射中子的能量分成5段,测得的中子能量分布比较粗糙,而且,用于测量能量大于50 MeV中子的 $^{27}\text{Al}(n,4p6n)^{18}\text{F}$ 反应的反应截面数据太少,难以得到较好的结果。为了测得更为细致的中子能谱分布,我们使用一种新的阈探测器开展了探索研究。

1 阈探测器

1.1 一种新的阈探测器

经过几年详细调研,我们找到了一种新的探测器—— ^{209}Bi 。迄今为止,在国内外尚未看到它作为一种阈探测器而被使用过。从它的中子反应激发曲线^[8](图1)可以看出,它具有很好的阈探测器特征。更重要的是,利用不同的反应道,可以一次得到能量分别大于7、14、23、32、40、50、60、70、80 MeV的中子,这是很难得的优点。使用 ^{209}Bi 测量100 MeV以下中子的能谱,不仅可以使中子能谱测量得更为细致,而且可以用一种探测器获得更多的数据,大大地提高了工作效率,也减少了使用多个探测器而引起的误差,从而提高测量的精度。

国家自然科学基金(19875070)资助

第一作者:李桂生,男,1939年2月出生,1964年毕业于兰州大学,核物理专业,副研究员

收稿日期:2001-10-09,修回日期:2001-12-17

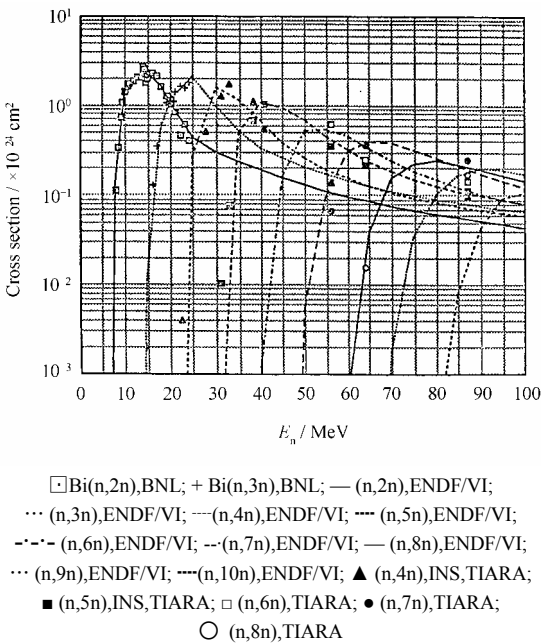


图 1 ^{209}Bi 的中子反应截面

Fig.1 Cross section curves of ^{209}Bi bombarded with neutrons

1.2 阈探测器组合

从理论上说,尽管用 ^{209}Bi 一种探测器就可以将中子能量分为 9 段,但在实际应用中却存在具体困难。表 1 为阈探测器组合和替代探测器。从表 1 可以看出, $(\text{n},4\text{n})$ 和 $(\text{n},5\text{n})$ 反应道中生成的产物核的半衰期分别为 6.24d 和 15.31d,需要的辐照时间太长,实际上很难实现; $(\text{n},2\text{n})$ 和 $(\text{n},3\text{n})$ 反应产物核的半衰期更长,更无法实现。为了解决这一实际问题,我们采用了其它替代反应:分别用 $^{27}\text{Al}(\text{n},\alpha)^{24}\text{Na}$ 、 $^{19}\text{F}(\text{n},2\text{n})^{18}\text{F}$ 、 $^{12}\text{C}(\text{n},2\text{n})^{11}\text{C}$ 反应测量能量大于 7、11、20 MeV 的中子。遗憾的是,找不到可用于测量能量大于 30 MeV 中子的替代反应。表 2 给出了实验使用的阈探测器参数。表 2 中探测器尺寸为直径×厚度。

1.3 阈探测器的制作

铋、镉探测器用纯度为 99.99%的高纯铋和高纯镉制成。由于金属铋的物理性质极脆,机械加工非

表 1 阈探测器组合和替代探测器

阈能 Threshold energy / MeV	反应 Reaction	产物核寿命 Product nucleus life ($T_{1/2}$)	替代探测器 Replacing detector		
			阈能 Threshold energy / MeV	反应 Reaction	产物核寿命 Product nucleus life ($T_{1/2}$)
1.5	$^{115}\text{In}(\text{n},\text{n}')^{115\text{m}}\text{In}$	4.49 h			
7	$^{209}\text{Bi}(\text{n}, 2\text{n})^{208}\text{Bi}$	3.68×10^5 a	7	$^{27}\text{Al}(\text{n},\alpha)^{24}\text{Na}$	15.02 h
14	$^{209}\text{Bi}(\text{n}, 3\text{n})^{207}\text{Bi}$	38 a	11	$^{19}\text{F}(\text{n},2\text{n})^{18}\text{F}$	109.7 min
23	$^{209}\text{Bi}(\text{n}, 4\text{n})^{206}\text{Bi}$	6.24 d	20	$^{12}\text{C}(\text{n},2\text{n})^{11}\text{C}$	20.38 min
32	$^{209}\text{Bi}(\text{n}, 5\text{n})^{205}\text{Bi}$	15.31 d			
40	$^{209}\text{Bi}(\text{n}, 6\text{n})^{204}\text{Bi}$	11.22 h			
50	$^{209}\text{Bi}(\text{n}, 7\text{n})^{203}\text{Bi}$	11.76 h			
60	$^{209}\text{Bi}(\text{n}, 8\text{n})^{202}\text{Bi}$	1.72 h			
70	$^{209}\text{Bi}(\text{n}, 9\text{n})^{201}\text{Bi}$	108 min			
80	$^{209}\text{Bi}(\text{n},10\text{n})^{200}\text{Bi}$	36.4 min			

表 2 阈探测器参数

阈探测器 Threshold detector	反应 Reaction	阈能 Threshold energy / MeV	平均截面 Average cross section / $\times 10^{-31}\text{m}^2$	产物核半衰期 $T_{1/2}$ of product nucleus	探测器材料 Material of detector	探测器尺寸 Dimension of detector / mm
^{115}In	$^{115}\text{In}(\text{n},\alpha)^{115\text{m}}\text{In}$	~1.5	~171	4.49 h	High purity In	ϕ 40×1.0
^{27}Al	$^{27}\text{Al}(\text{n},\alpha)^{24}\text{Na}$	~7	~45	15.02 h	High purity Al	ϕ 40×2.0
^{19}F	$^{19}\text{F}(\text{n},2\text{n})^{18}\text{F}$	~11	~40	109.7 min	Teflon	ϕ 40×5.0
^{12}C	$^{12}\text{C}(\text{n},2\text{n})^{11}\text{C}$	~20	~22	20.38 min	Polyethylene	ϕ 40×5.0
^{209}Bi	$^{209}\text{Bi}(\text{n},5\text{n})^{205}\text{Bi}$	~32	~528	15.31 d	High purity Bi	ϕ 40×4.0
^{209}Bi	$^{209}\text{Bi}(\text{n},6\text{n})^{204}\text{Bi}$	~40	~104	11.22 h	High purity Bi	ϕ 40×4.0
^{209}Bi	$^{209}\text{Bi}(\text{n},7\text{n})^{203}\text{Bi}$	~50	~151	11.76 h	High purity Bi	ϕ 40×4.0
^{209}Bi	$^{209}\text{Bi}(\text{n},8\text{n})^{202}\text{Bi}$	~60	~20	1.72 h	High purity Bi	ϕ 40×4.0
^{209}Bi	$^{209}\text{Bi}(\text{n},9\text{n})^{201}\text{Bi}$	~70	~8	108 min	High purity Bi	ϕ 40×4.0
^{209}Bi	$^{209}\text{Bi}(\text{n},10\text{n})^{200}\text{Bi}$	~80	~3	36.4 min	High purity Bi	ϕ 40×4.0

常困难，我们采用真空熔融法制成直径为 40 mm、厚度为 4 mm 的金属铋圆片，避免了在熔融过程中产生氧化物。而金属铋的物理性质很软，采用机械碾压法制成直径为 40 mm、厚度为 1 mm 的金属铋圆片。直径为 40 mm、厚度为 2 mm 的铝探测器和直径为 40 mm、厚度为 5 mm 的氟、碳探测器是分别用 99.99% 的高纯铝片、聚四氟乙烯棒和聚乙烯棒机械加工而成的。

2 实验方法

实验是在重离子加速器国家实验室兰州重离子研究装置 (HIRFL) 快化终端区于 2001 年元月完成的。一束由电子回旋共振 (ECR) 离子源产生的 ^{12}C 离子束经过预加速器 (SFC) 加速后注入到分离扇回旋加速器 (SSC) 中，引出束单核能为 78 MeV。 ^{12}C 离子束在实验靶室中轰击厚度略大于其射程的 Au 靶，并发射大量中子。

阈探测器组合被放置在束流管道一侧的实验平台上，距靶 1m，与束流方向分别成 0° 、 30° 、 60° 、 90° 、 120° 和 150° ，在出射中子场中照射。探测器中心的高度与束流管道的中心线高度相同。照射结束后，探测器的活性用由微机多道分析器和高纯锗 γ 探头组成的系统测量，系统对 γ 射线的探测效率用 ^{152}Eu 标准 γ 源进行刻度。

3 结果与讨论

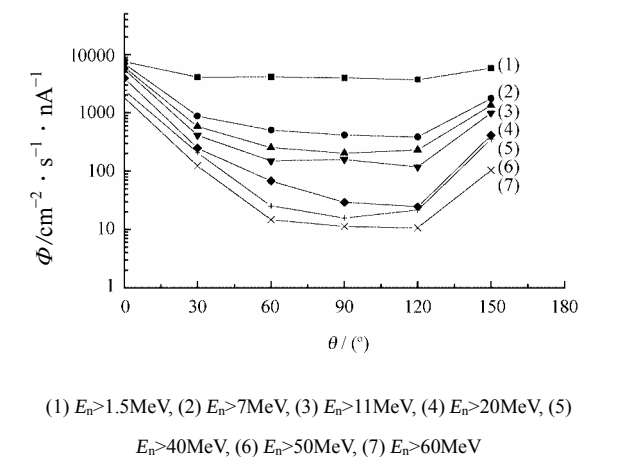
由于加速器的聚焦效果不好，束流没有全部穿过靶室前的准直光栏而进入靶室，有部分束流打在了束流管道和准直光栏上，因此无法得到 78 MeV/u $^{12}\text{C}+\text{Au}$ 的中子剂量学参数，实验测到的是重离子加

速器快化终端实验靶区实际的中子分布。

3.1 中子注量率分布和角分布

图 2 和表 3 给出了实验测量的中子注量率分布。从图 2 和表 3 可以看出如下几个特点：

- (1) 从总体上看，能量大于 1.5 MeV 的中子基本上趋近于各向同性分布；
- (2) 随着中子能量越来越高，前冲分布的趋势越来越明显，特别在前角 $0^\circ\text{--}60^\circ$ 方向上；
- (3) 在大于 120° 的后角方向上，中子注量率出现逐渐升高的趋势，特别是在 150° 方向上。这并不代表重离子反应出射中子的特点，而是由于加速器聚焦不好，束流打在附近的束流管道上而产生的中子被探测器记录所致。而曲线的中间部分变化相对比较平缓。



(1) $E_n > 1.5\text{MeV}$, (2) $E_n > 7\text{MeV}$, (3) $E_n > 11\text{MeV}$, (4) $E_n > 20\text{MeV}$, (5) $E_n > 40\text{MeV}$, (6) $E_n > 50\text{MeV}$, (7) $E_n > 60\text{MeV}$

图 2 距靶 1 m 处的中子注量率分布

Fig.2 Neutron fluence rate distribution at somewhere 1 m from the target

表 3 距靶 1 m 处的中子注量率

Table 3 Neutron fluence rates at somewhere 1 m from the target

E_n / MeV	$\Phi / \text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{nA}^{-1}$					
	0°	30°	60°	90°	120°	150°
>1.5	7.57×10^3	4.11×10^3	4.16×10^3	4.01×10^3	3.72×10^3	5.85×10^3
>7	6.99×10^3	8.76×10^2	5.05×10^2	4.15×10^2	3.85×10^2	1.67×10^3
>11	6.06×10^3	5.83×10^2	2.52×10^2	2.02×10^2	2.29×10^2	1.33×10^3
>20	5.52×10^3	4.14×10^2	1.49×10^2	1.58×10^2	1.18×10^2	9.89×10^2
>40	3.95×10^3	2.47×10^2	6.82×10^1	2.93×10^1	2.44×10^1	4.12×10^2
>50	2.42×10^3	2.07×10^2	2.52×10^1	1.57×10^1	2.12×10^1	3.53×10^2
>60	1.82×10^3	1.23×10^2	1.46×10^1	1.12×10^1	1.06×10^1	1.04×10^2

3.2 中子能谱分布

图 3 和表 4 给出了测量的实验终端区域实际中子能谱分布的实验数据。由于没有适合于测量能量大于 30 MeV 中子的替代阈探测器,实验只能给出 20—40 MeV 的中子注量率。此外,由于 ^{209}Bi 的 $(n,5n)$ 反应生成核的半衰期太长 (15.31d), $(n,9n)$ 和 $(n,10n)$ 反应的截面太小,而实验照射时间只有 30 h,生成的产物核太少,无法测到。

按照一般的重离子反应中子能谱分布的规律,谱峰应该出现在中子能量略小于入射离子单核能的位置,即 60—70 MeV 处,在更高能量处应逐渐降下来。由于实验只能测到 $E_n>60$ MeV 的中子,无法测量 $E_n>70$ MeV 和 $E_n>80$ MeV 的中子,因此这个能谱是不完整的。用 ^{209}Bi 测量的较完整的能谱应

该达到 $E_n>80$ MeV。图 3 最后一段偏高的原因在于它包含了 60—140 MeV 之间的所有中子。

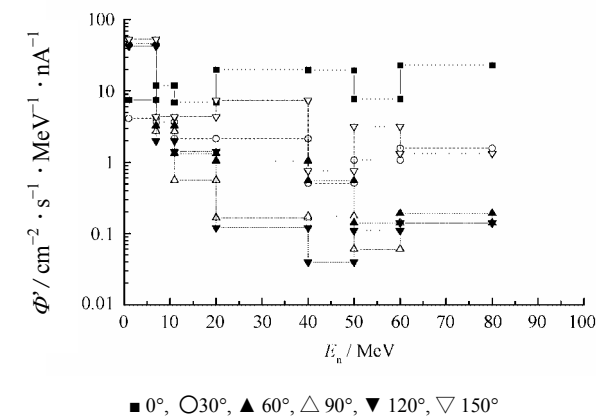


图 3 距靶 1 m 处的中子能谱分布

Fig.3 Neutron spectrum distributions at somewhere 1 m from the target

表 4 中子能量分布实验数据

Table 4 Experimental data of neutron energy distribution

E_n / MeV	$\Phi / \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{nA}^{-1}$					
	0°	30°	60°	90°	120°	150°
1.5 — 7	0.58×10^3	3.23×10^3	3.66×10^3	3.59×10^3	3.34×10^3	4.18×10^3
7 — 11	0.93×10^3	2.87×10^2	2.53×10^2	2.13×10^2	1.56×10^2	0.34×10^3
11 — 20	0.54×10^3	1.69×10^2	1.03×10^2	0.44×10^2	1.11×10^2	0.34×10^3
20 — 40	1.57×10^3	1.67×10^2	8.08×10^1	1.29×10^1	0.94×10^1	5.77×10^2
40 — 50	1.53×10^3	0.40×10^2	4.30×10^1	1.36×10^1	0.32×10^1	0.59×10^2
50 — 60	0.60×10^3	0.84×10^2	1.06×10^1	0.45×10^1	0.86×10^1	2.49×10^2
> 60	1.82×10^3	1.23×10^2	1.46×10^1	1.12×10^1	1.06×10^1	1.04×10^2

3.3 中子剂量当量率分布

图 4 给出了测得的实验靶区中子剂量当量率分布。与中子注量率分布的趋势一样,中子剂量当量率分布也不是随出射角增大而呈下降的趋势,在大角度上反而有所升高。

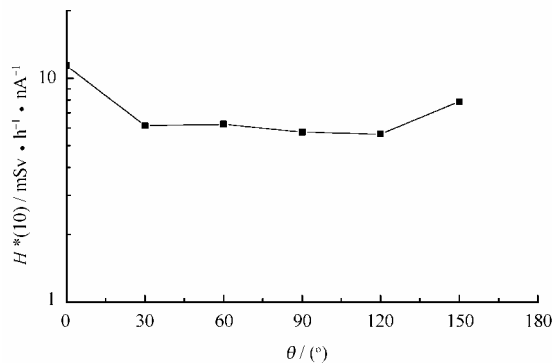


图 4 距靶 1 m 处的周围剂量当量率分布

Fig.4 Ambient dose equivalent rate per nA beam current at somewhere 1m from the target versus neutron emission angle

4 结语

本实验研究的目的不只是测量中能重离子反应实验靶区出射中子的能量分布和剂量当量率分布,更重要的是通过实验来验证 ^{209}Bi 作为一种新的阈探测器测量高能中子的可能性。到目前为止,我们只看到了 ^{209}Bi 中子反应截面的测量曲线,但尚未见到它作为一种阈探测器被应用于中子测量的报道。实验结果表明,我们使用 ^{209}Bi 的 $(n,6n)$ 、 $(n,7n)$ 、 $(n,8n)$ 反应成功地测到了能量分别大于 40 MeV、50 MeV 和 60 MeV 的中子。这充分说明, ^{209}Bi 是一种很有实用价值的中子阈探测器,可以在中子测量中得到广泛应用,为高能中子测量提供一种新的手段。我们相信,只要有足够的实验时间, ^{209}Bi 肯定也可以测到能量大于 30 MeV、70 MeV 和 80 MeV 的中子,这样,就可以将 100 MeV 以下的中子能谱分为 10 段,使中子能谱测量迈上一个新的台阶。

参考文献

- 1 刘圣康. 中子物理. 北京: 原子能出版社, 1986
- 2 Gabriel T A, *et al.* ORNL-TM-4334, 1973
- 3 Cecil R A, Anderson B D, Baldwin A R, *et al.* Phys Rev, 1981, **C24**: 2013—2029
- 4 Kazuo SHIN, Takatsugu SAITO, Masahiko FUJII, *et al.* Nucl Instr Meth, 1981, **187**: 587—594
- 5 Broome T A, Perry D R, Stapleton G B. Health Physics, 1983, **44**: 487—499
- 6 LI Guisheng, ZHANG Tianmei, LI Zongwei, *et al.* Nucl Sci Tech, 1997, **8**(4): 239—242
- 7 LI Guisheng, ZHANG Tianmei, LI Zongwei, *et al.* Nucl Instr Meth, 2000, **A452**: 452—457
- 8 Imamura M, Shibata S, Uwamino Y, *et al.* JAERI TIARA Annual Report, April 1994—March 1995

Experimental verification of a new threshold detector and neutron measurement in heavy ion target area

LI Guisheng ZHANG Tianmei SU Youwu LI Shuwei

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

Abstract The possibility of using ^{209}Bi as a new threshold detector to measure high-energy neutrons was explored. Fluence rate, energy spectrum and dose equivalent rate distributions for the emitted neutrons in the heavy ion target area were measured by a detector complex of ^{115}In , ^{27}Al , ^{19}F , ^{12}C and ^{209}Bi .

Key words Threshold detector, Experimental verification, Neutron spectrum, Dose equivalent rate

CLC O571.5, O571.54