

# BF<sub>3</sub>长计数器效率刻度及其应用

张国辉, 陈金象

(北京大学 重离子物理研究所和重离子物理教育部重点实验室, 北京 100871)

**摘要:**利用<sup>238</sup>U裂变反应,通过测量裂变碎块的数量,能够较为准确地测量快中子注量。但这种方法在中子能量为1.6 MeV以下(裂变道未开或处于裂变截面第1个台阶上升处)和6.0~7.0 MeV能区(第2个台阶上升处)由于不确定度过大而不适用。本工作采用4种不同的核反应作中子源,对北京大学4.5 MV静电加速器中子实验大厅的BF<sub>3</sub>长计数器的相对效率进行了刻度。将<sup>238</sup>U(n,f)反应与相对效率已知的BF<sub>3</sub>长计数器相结合,解决了在上述能区准确测量中子注量的问题。

**关键词:**快中子;中子注量;BF<sub>3</sub>长计数器;效率

中图分类号:O571.54

文献标识码:A

文章编号:1000-6931(2007)01-0022-04

## Efficiency Calibration of BF<sub>3</sub> Long Counter and Its Application

ZHANG Guo-hui, CHEN Jin-xiang

(*Institute of Heavy Ion Physics, and Key Laboratory of Heavy Ion Physics, Ministry of Education, Peking University, Beijing 100871, China*)

**Abstract:** The absolute neutron fluence can be determined by the <sup>238</sup>U(n,f) cross-section and the number of the fission fragments. But this method can't be used in the neutron energy ranges of  $E_n < 1.6$  MeV and  $6.0$  MeV  $< E_n < 7.0$  MeV. Using four nuclear reactions as neutron source, the relative efficiency of BF<sub>3</sub> long counter in the neutron hall of 4.5 MV Van de Graaf accelerator at Peking University was calibrated. The absolute neutron fluence in the above mentioned energy ranges can be determined by the combination of the <sup>238</sup>U(n,f) reaction and the calibrated BF<sub>3</sub> long counter.

**Key words:** fast neutron; neutron fluence; BF<sub>3</sub> long counter; efficiency

在核物理中,凡涉及到中子与原子核相互作用方面的问题,诸如中子引起的原子核反应截面、微分截面以及双微分截面的测量等,都首先遇到中子注量的准确确定问题。中子注量测量的准确性直接影响各种数据测量的准确性。

中子注量的测量方法可归纳为标准截面法、伴随事件法和长计数器等测量方法。在我们进行快中子引起的轻核(n,x)反应微分截面实验研究中,采用BF<sub>3</sub>长计数器进行相对中子注量监测,用<sup>238</sup>U(n,f)反应进行绝对中子注量测

收稿日期:2005-07-14;修回日期:2005-08-16

基金项目:国家自然科学基金资助项目(10275001);教育部留学回国人员科研启动基金以及中国核数据中心资助项目;北京大学重离子物理教育部重点实验室开放课题

作者简介:张国辉(1964—),男,河北海兴人,副教授,博士,原子核物理专业

量<sup>[1,2]</sup>。然而,利用<sup>238</sup>U裂变反应在有的能区不能准确测定中子注量。

图1是<sup>238</sup>U裂变反应截面随中子能量的变化,数据取自ENDF/B-VI.8库。该反应截面在国际上已作为主要次级标准截面用于中子注量测量。由图1可见,截面随中子能量的增加呈现3个台阶形状。在中子能量为1.0 MeV附近,裂变反应刚开始。由于截面太小,截面不确定度较大,且难以测量到足够多的裂变事件。在1.2~1.6 MeV之间是第1个台阶的上升部分,反应截面随中子能量的增加而快速增大。中子能量的微小不确定性将引起对应截面的很大变化,因此,用<sup>238</sup>U裂变反应在该能区测量中子注量将产生很大的不确定度。在6.0~7.0 MeV之间是第2个台阶上升部分,这一台阶虽不像第1个台阶那么陡峭,但在该能区用<sup>238</sup>U裂变反应标准截面测量中子注量仍有较大的不确定度。因此,在 $E_n < 1.6$  MeV和 $6.0 \text{ MeV} < E_n < 7.0$  MeV两个能区,不能用<sup>238</sup>U裂变反应确定中子注量。在上述两能区之外,裂变截面随中子能量的变化较为平缓,因而,可以较为准确地确定中子注量。

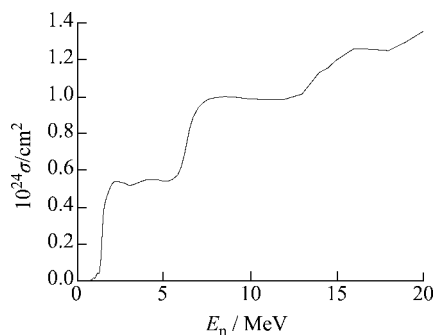


图1 <sup>238</sup>U裂变反应截面随中子能量的变化

Fig.1 <sup>238</sup>U fission cross section vs. neutron energy

<sup>238</sup>U裂变反应截面虽随中子能量的提高呈现台阶式增加,然而,BF<sub>3</sub>长计数器对中子的探测效率则与中子的能量关系不大。因此,系统地BF<sub>3</sub>长计数器进行相对效率刻度,将<sup>238</sup>U(n,f)反应标准截面与相对效率已知的BF<sub>3</sub>长计数器相结合,可以解决上述能量范围内的中子注量准确测量问题。

## 1 BF<sub>3</sub>长计数器相对效率刻度

### 1.1 测量方法与实验安排

BF<sub>3</sub>长计数器相对探测效率刻度采用相对测量法。中国原子能科学研究院核物理研究所的BF<sub>3</sub>长计数器效率已经通过不同的方法予以确定,用它作为标准对本工作的BF<sub>3</sub>长计数器进行刻度。刻度实验在北京大学4.5 MV静电加速器上进行。实验安排采用如图2所示的对称方式。两个BF<sub>3</sub>长计数器相对束流线左右对称放置,且与中子靶的距离相等。两个长计数器屏蔽体的中心到靶头的距离均为3.12 m。在每个中子能点上,两套长计数器系统同时开始测量,同时结束。原则上,两个长计数器的计数之比即为它们在该能点的效率之比。实验中,采用挡影锥的方法,在每个能点,对2个BF<sub>3</sub>长计数器的本底计数占总计数的比例进行测量。实验中观测到,随中子能量不同,上述比例各异;对同一能点,两个BF<sub>3</sub>长计数器的上述比例基本相同。这是因为,两个BF<sub>3</sub>计数管以及屏蔽体的结构基本相似,因此,它们对本底中子灵敏度的差异较小。实际测量时,由于中子靶点、中子大厅散射本底等可能有一定的左右不对称性,因此,在每个能点,对两个长计数器测量3次,互换位置(包括各自的屏蔽体)之后再测量3次。对6次测量的结果求取平均。

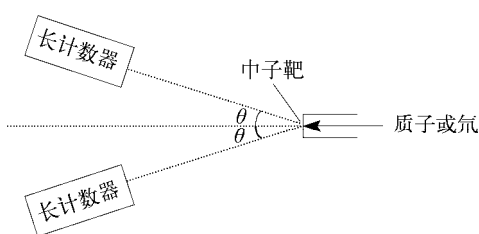


图2 实验安排示意图

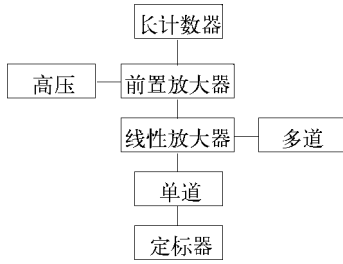
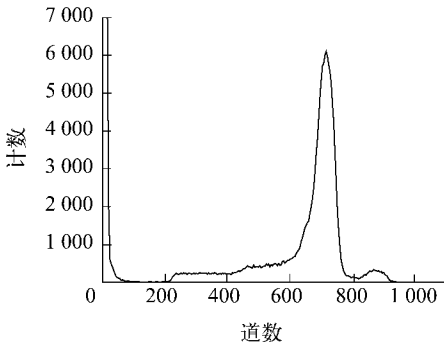
Fig.2 Setup of experiment

### 1.2 电子学系统

两套BF<sub>3</sub>长计数器的电子学系统相同,系统的方框图示于图3。实验过程中,用多道测量到的典型谱形示于图4。用定标器计数时,单道阈值定在150道处。标准与待测BF<sub>3</sub>长计数器的高压分别为1 800 V与1 700V。

### 1.3 中子源系统

采用3种不同的固体靶、4种不同的核反

图3  $\text{BF}_3$  长计数器的电子学系统方框图Fig. 3 Block diagrams of electronics for  $\text{BF}_3$  long counter图4  $\text{BF}_3$  长计数器的谱形Fig. 4 Spectrum from  $\text{BF}_3$  long counter

应作中子源,产生 0.1~14.1 MeV 能量范围的准单能中子。采用的核反应、中子靶及其厚度、入射带电粒子能量、长计数器所处角度(图 2 中的  $\theta$ )和相应的中子能量列于表 1。中子能点数为 9,中子能量数据是采用自行编制的程序计算结果,考虑了核反应动力学以及靶的厚度对中子能量的影响。曾经在个别能点用飞行时间法对程序计算结果进行过检验。实验过程中的带电离子(质子或氦)束流强度约为  $3 \mu\text{A}$ 。每次记录定标器计数均需使测量时间在 200 s 以上,同时使  $\text{BF}_3$  长计数器的读数在 40 000 以上。

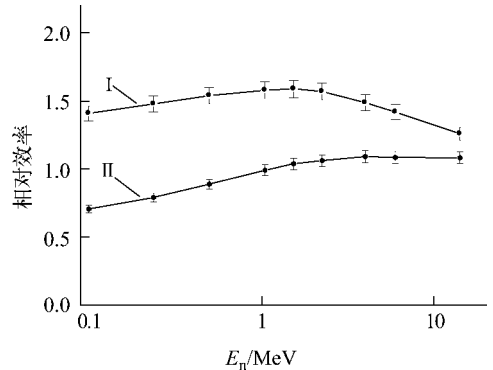
#### 1.4 $\text{BF}_3$ 长计数器相对效率刻度

图 5 所示为  $\text{BF}_3$  长计数器相对效率实验刻度结果。不确定度由如下两方面决定:标准  $\text{BF}_3$  长计数器效率数据的不确定度;每个能点 6 次测量结果的标准偏差。图 5 中的 2 条曲线是相对效率实验刻度结果。其中,曲线 I 是计数管全部插入屏蔽体中的相对效率曲线,曲线 II 是待测量计数管从屏蔽体内向后抽出 5.5 cm 时的相对效率曲线。由图 5 可见,尽管采用了 4 种核反应进行刻度,相对效率曲线在不同的

表 1 对  $\text{BF}_3$  长计数器进行效率刻度所用的中子能量  
Table 1 Neutron energies for efficiency calibration of  $\text{BF}_3$  long counter

反应	固体靶种类	靶厚/ ( $\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2}$ )	入射离子 能量/MeV	角度 $\theta / ^\circ$	中子能量/ MeV
${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$	LiF 靶	0.062 4	1.93	30	0.10
			2.04	30	0.24
			2.56	30	1.54
$\text{T}(p,n){}^3\text{He}$	TTi 靶	0.80	1.47	30	0.50
			2.04	30	1.05
			3.33	30	2.25
$\text{D}(d,n){}^3\text{He}$	DTi 靶	1.50	1.20	30	4.00
			3.33	30	5.97
$\text{T}(d,n){}^4\text{He}$	TTi 靶	0.80	1.20	100	14.1

能区是平滑连接的。值得注意的是,曲线 I 在 1.0~2.5 MeV 之间和曲线 II 在 2.3~14.1 MeV 之间几乎是水平的。这对解决  $E_n < 1.6$  MeV 和  $6.0 \text{ MeV} < E_n < 7.0 \text{ MeV}$  两能区内准确测定中子注量问题十分有利。

图5  $\text{BF}_3$  长计数器相对效率Fig. 5 Relative efficiency of  $\text{BF}_3$  long counter

I——计数管全部插入屏蔽体中;

II——待测量计数管从屏蔽体内向后抽出 5.5 cm

## 2 $\text{BF}_3$ 长计数器相对效率曲线的应用

在进行快中子引起的轻核  $(n, x)$  反应微分截面实验研究过程中,将原子数目已知的  ${}^{238}\text{U}$  裂变样品(质量为  $(7.85 \pm 0.10) \text{ mg}$ ,  ${}^{238}\text{U}$  丰度为 99.999% 以上)与待测样品(如  ${}^6\text{LiF}$ )背对背置于双屏栅电离室内阴极上。电离室的极板与束流方向垂直,电离室的中心位于束流延长线上(与束流成  $0^\circ$  角),样品到中子靶头的距离为 18.8 cm。在测量  ${}^6\text{Li}(n,t){}^4\text{He}$  反应前向( $0^\circ \sim$

90°)事件的同时,在后向(90°~180°)测量<sup>238</sup>U裂变碎块数目,以确定绝对中子注量。采用BF<sub>3</sub>长计数器进行相对中子注量监测<sup>[1,2]</sup>,长计数器屏蔽体中心到靶头的距离为3.12 m,位于与束流成0°角方向。如上所述,由于裂变截面呈台阶形状,在 $E_n < 1.6$  MeV与 $6.0$  MeV  $< E_n < 7.0$  MeV两个能区不能用<sup>238</sup>U裂变反应确定中子注量。在测得BF<sub>3</sub>长计数器相对效率曲线以后,可以通过<sup>238</sup>U裂变测量邻近能点的绝对中子注量,由长计数器在待测能点与邻近能点的效率之比得到上述两能区的中子注量。

以2004年12月的实验测量为例,采用北京大学4.5 MV静电加速器加速质子,利用T(p,n)<sup>3</sup>He反应产生准单能中子,中子能量为1.05、1.54与2.25 MeV<sup>[3]</sup>。在3个能点均用BF<sub>3</sub>长计数器进行相对中子注量监测(计数管全部插入屏蔽体中),在2.25 MeV能点,用<sup>238</sup>U裂变反应确定绝对中子注量,进而由BF<sub>3</sub>长计数器相对效率曲线I在这3个能点的相对效率得到1.54与1.05 MeV两个能点的绝对中子注量。由于能量相近,且BF<sub>3</sub>长计数器相对效率几乎相同,所以,引起的不确定度较小(2.5%以下)。同理,可根据长中子管相对效率曲线II和相邻能点的<sup>238</sup>U裂变计数确定6.0~7.0 MeV能区的绝对中子注量。

### 3 结论

本工作采用3种固体靶、4种核反应作准单能中子源,在北京大学4.5 MV静电加速器中子实验大厅,对BF<sub>3</sub>长计数器的相对效率进行了刻度。在未增加实验设备的情况下,解决了在 $E_n < 1.6$  MeV与 $6.0$  MeV  $< E_n < 7.0$  MeV两个能区用<sup>238</sup>U裂变反应不能准确测定中子注量的问题。

感谢中国原子能科学研究院核物理研究所卢涵林研究员的热情帮助以及北京大学重离子物理研究所4.5 MV静电加速器运行组的大力支持。

#### 参考文献:

- [1] ZHANG Guohui, TANG Guoyou, CHEN Jinxiang, et al. Differential cross section measurement for the <sup>6</sup>Li(n,t)<sup>4</sup>He reaction at 3.67 and 4.42 MeV[J]. Nucl Sci Eng, 2000, 134(3): 312-316.
- [2] ZHANG Guohui, TANG Guoyou, CHEN Jinxiang, et al. Measurement of differential cross-sections of the <sup>6</sup>Li(n,t)<sup>4</sup>He reaction at 1.85 and 2.67 MeV[J]. Nucl Sci Eng, 2003, 143(1): 86-89.
- [3] ZHANG Guohui, CAO Rongtai, CHEN Jinxiang, et al. Differential and angle integrated cross-section measurement for the <sup>6</sup>Li(n,t)<sup>4</sup>He reaction at  $E_n = 1.05, 1.54$  and  $2.25$  MeV[J]. Nucl Sci Eng, 2006, 153(1): 41-45.