

# 长硼计数器测量脉冲中子的漏计数问题探讨

唐章奎, 李波均, 王 栋, 胡孟春, 杨高照

(中国工程物理研究院 核物理与化学研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘要:** 根据  $\text{BF}_3$  的探测原理, 中子在聚乙烯的输运过程及管内  $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$  反应机理, 通过大量的测量实验, 模拟出脉冲测量中  $\text{BF}_3$  漏计数概率很小的边界条件, 该测量方法适合目前脉冲中子装置中的中子产额测量。

**关键词:**  $\text{BF}_3$  计数器; 脉冲中子测量; 漏计数

中图分类号: TL814 文献标志码: A 文章编号: 1000-6931 (2010) S0-0480-03

## Counting Loss Problem of $\text{BF}_3$ Detector in Measuring Pulse Neutron Yield

TANG Zhang-kui, LI Bo-jun, WANG Dong, HU Meng-chun, YANG Gao-zhao

(Institute of Nuclear Physics and Chemistry, China Academy of Engineering Physics,

P. O. Box 919-212, Mianyang 621900, China)

**Abstract:** According to measuring experiments, neutron movement in polyethylene,  $\text{BF}_3$  detection principle, and  $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$  reaction in  $\text{BF}_3$ , the paper gave restricted condition that the counting loss of  $\text{BF}_3$  detector could be neglected in measuring the pulse neutron yield. As a result, this way adapts to some pulse neutron yields measuring.

**Key word:**  $\text{BF}_3$  detector; pulse neutron measuring; leaking-count

硼计数器测量中子的最大优点是有较长的能量坪响应特性, 如果慢化体结构设计合理, 中子能量从 10 keV 到 7 MeV, 其探测效率基本不变; 其次是对  $\gamma$  射线不灵敏, 可在  $n\gamma$  混合辐射场中测量中子。目前, 该方法已成为成熟的中子探测技术, 常作为反应堆和加速器中子监测的单粒子计数装置<sup>[1]</sup>。在脉冲中子测量中, 由于没有计数率的概念, 即一发中子脉冲技术管内产生的计数时间长度没法定标。因此, 无法用恒流测量中的漏计数来表征测量数据。随着中子管技术的发展, 脉冲产额不断提高, 其脉冲强度远大于加速器中子流强。而作为慢化型低计数率的中子探头  $\text{BF}_3$ , 在脉冲中子产额绝对测量实验中, 存在严重的漏计问题, 因此, 必须对  $\text{BF}_3$  脉冲中子测量技术作深入研究。

## 1 理论模拟

### 1.1 坪特性理论

根据中子输运和扩散理论, 中子在慢化体内随慢化体厚度按指数衰减, 从慢化体散射进入  $\text{BF}_3$  管内的中子数目  $N$  沿入射方向, 同样随慢化体厚度按指数衰减 (图 1)。

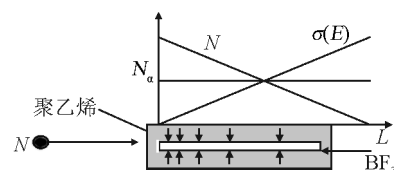


图 1 中子在慢化体内的作用机理

Fig. 1 Action of neutrons in slowing-material

收稿日期: 2010-05-11; 修回日期: 2010-06-09

作者简介: 唐章奎 (1965—), 男, 四川成都人, 硕士研究生, 从事中子物理及核测试实验研究

同时，进入 BF<sub>3</sub> 管的中子能量也随 BF<sub>3</sub> 管轴线入射距离按指数衰减，根据 <sup>10</sup>B(n, α)<sup>7</sup>Li 反应给出的反应截面，中子能量与 <sup>10</sup>B(n, α)<sup>7</sup>Li 截面 σ(E) 随中子能量按指数衰减，在 10 keV~7 MeV 范围内，在 BF<sub>3</sub> 管上任意横截面，计数 N<sub>α</sub> 正比于 N·σ(E) ≈ 常数。即在 BF<sub>3</sub> 管沿中子入射方向，单位长度产生 <sup>10</sup>B(n, α)<sup>7</sup>Li 反应概率是均等的。

1.2 死时间问题

BF<sub>3</sub> 计数器在测量过程中漏计数来自于 3 个方面：

1) BF<sub>3</sub> 管本身，α 粒子在电离放大时形成的区域性离子云，阻碍同一区域内在几十 μs 时间内的连续计数，导致漏计现象，这种现象无法进行实验观察，更无法修正；

2) 不同地点同时（时间间隔小于电离放大后的脉冲宽度）发生 <sup>10</sup>B(n, α)<sup>7</sup>Li 反应，形成 1 个叠加波形，这种漏计可用示波器观测；

3) 前放、主放和定标器的带宽不够，产生漏计数（这里不作讨论）。

正比计数管的固有死时间为：

$$t_D = \frac{r_c - a^2}{\frac{2\mu^+}{p} \left[ \ln \frac{V}{b/a} \right]} \quad (1)$$

式中：a、b 为计数管的阳极和阴极半径；μ<sup>+</sup> 为离子质量；p 为管内大气压；V 为计数管工作电压。

式（1）中，死时间与工作电压 V 成反比关系，且与计数管内气压和计数管直径有关。因此，不同的工作电压和不同的计数管型号，其死时间是不同的。

实际上，BF<sub>3</sub> 的死时间与其它探测器的死时间有一定的差别。它不但与粒子脉冲之间的时间分布有关，且与脉冲的空间分布有关<sup>[2]</sup>。在 BF<sub>3</sub> 管中，α 的射程约为 1 cm，在电离过程中，形成离子云，其感生电场与外加工作电场反向，从而削弱了外加电场对同区域的 <sup>10</sup>B(n, α)<sup>7</sup>Li 反应产生的荷电粒子的正比放大和收集（图 2）。

外加电场要彻底消除离子云产生的反向电场，恢复其正比放大性能，根据电动力学原理，需几十甚至上百 μs 的时间。在这段时间内，同一离子云区域内，<sup>10</sup>B(n, α)<sup>7</sup>Li 反应很

难被放大输出第 2 个脉冲。离子云的区域大小，目前没有详细的文献和资料。根据 α 的射程，同时考虑电场的边缘效应，可粗略地将 BF<sub>3</sub> 管的单位长度定为 1 cm，每 1 只 BF<sub>3</sub> 计数器都是由长度为 α 射程的若干小 BF<sub>3</sub> 串联构成。因此，根据式（1），每只小 BF<sub>3</sub> 的死时间约为 10<sup>-4</sup> s。

在脉冲中子测量中，首先要计算给定产额的中子脉冲在慢化体内的输运过程及慢化寿命。若在平均慢化寿命时间内产生的计数小于测量系统带宽，漏计数可忽略。否则，会产生较大漏计数。脉冲测量研究中，理论上可根据 MCNP 程序跟踪中子在慢化体内历史过程<sup>[3-4]</sup>，获得 <sup>10</sup>B(n, α)<sup>7</sup>Li 脉冲序列随时间分布。经计算，14 MeV 中子在慢化体平均寿命为 120 μs。

根据以上分析，我们认为在脉冲中子测量中，其脉冲计数 N 满足 N ≤ L（L 为 BF<sub>3</sub> 计数管长度，cm）时，其漏计的概率很小。

考虑到 BF<sub>3</sub> 计数器在脉冲中子测量过程中计数的随机性，在漏计数可以忽略的条件下，计数的统计涨落很大。因此，需采用多只计数管组成阵列结构来减少统计涨落。

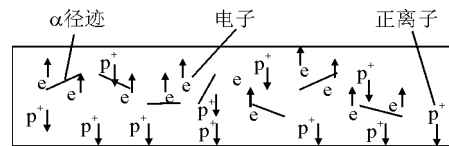


图 2 BF<sub>3</sub> 管内离子、电子的微观运动示意图  
Fig. 2 Motion of ions and electrons in BF<sub>3</sub>

2 实验验证

采用北京综合仪器厂生产的 BF<sub>3</sub> 计数管（φ27 mm×300 mm），厂家给出计数率不大于 10<sup>5</sup> s<sup>-1</sup>，死时间约为 10 μs。实验中，采用长硼与 PMT 闪烁探测器同步测量脉冲中子产额的方法，实验布局如图 3 所示，测量数据列于表 1（N<sub>1</sub>~N<sub>8</sub> 分别代表 8 只计数管的测量计数）。

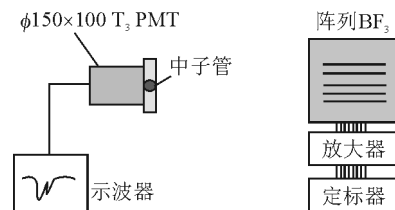


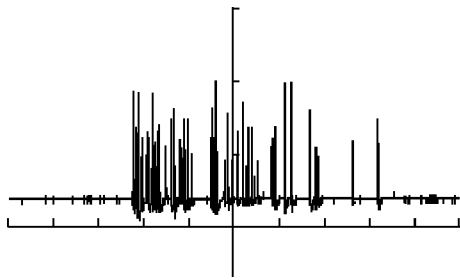
图 3 PMT 与阵列 BF<sub>3</sub> 同步测量中子脉冲  
Fig. 3 Synchronization measuring neutron through PMT and BF<sub>3</sub>

表1 BF<sub>3</sub>阵列与PMT探测器的线性关系测量数据Table 1 Data of measuring neutron through BF<sub>3</sub> and PMT

序列	8路BF <sub>3</sub> 阵列								大面积PMT闪烁		
	N <sub>1</sub>	N <sub>2</sub>	N <sub>3</sub>	N <sub>4</sub>	N <sub>5</sub>	N <sub>6</sub>	N <sub>7</sub>	N <sub>8</sub>	ΣN	探测器波形积分面积S	ΣN/S
1	21	10	16	20	16	12	11	14	120	1.88	63.94
2	14	13	13	10	8	14	14	12	98	1.67	58.75
3	14	23	22	22	20	19	15	18	153	1.92	79.69
4	10	17	17	13	17	13	21	15	123	1.88	65.46
5	15	15	14	18	12	15	18	18	125	1.88	66.42
6	18	13	16	19	26	17	8	13	130	1.88	69.22
7	9	18	10	16	16	15	23	11	118	1.81	65.27
8	9	12	15	21	15	12	13	13	110	1.78	61.80
9	25	21	29	16	13	18	18	18	158	1.97	80.36
10	21	19	14	13	14	18	15	19	135	1.94	69.59

由表1可看出,每个计数管的脉冲中子计数在30个以内,采用阵列结构的主要目的是增加测量的总计数,减少测量的统计涨落。如果以PMT闪烁探测器为测量基准,则BF<sub>3</sub>在计数N满足 $N \leq L$ ,其测量结果与PMT闪烁探测器相差约10%,说明测量数据是可靠的。

在实验中,当单管的计数超过60个时,从数字化示波器上能够观察到明显的漏计数(图4);其测量数据与闪烁体探测器测量结果存在倍数差异,测量结果列于表2(相对测量)。

图4 示波器观察到BF<sub>3</sub>测量计数Fig. 4 Image of BF<sub>3</sub> measured in oscillograph

### 3 结论

根据中子在慢化体内的运输的理论以及<sup>10</sup>B(n, α)<sup>7</sup>Li反应给出的反应截面,表明在单位长度的BF<sub>3</sub>管中,其反应的概率均等;经

过多次的实验测量结果,得出对单发中子脉冲,其单管计数在L范围内,漏计数的概率很小的结论。此外,为减少统计涨落,在脉冲中子测量中应采用多只计数管组成阵列结构。

表2 BF<sub>3</sub>与PMT同步测量脉冲中子产额Table 2 Data of measuring neutron through BF<sub>3</sub> and PMT

序号	N <sub>1</sub>	N <sub>2</sub>	N <sub>3</sub>	BF <sub>3</sub> 测量	PMT测量
				中子管产额	中子管产额
1	81	85	95	1.26	2.26
2	71	80	75	1.09	1.88
3	80	77	68	1.09	2.27
4	91	97	88	1.34	3.22
5	79	75	90	1.18	2.75

### 参考文献:

- [1] 汲长松. 中子探测实验方法[M]. 北京: 原子能出版社, 1998.
- [2] 安继刚. 电离辐射探测器[M]. 北京: 原子能出版社, 1995.
- [3] 裴鹿成, 张孝泽. 蒙特卡罗方法及其在粒子输运问题中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 1980.
- [4] 许淑艳. 蒙特卡罗方法在实验核物理中的应用[M]. 北京: 原子能出版社, 1996.