

CNIC-00242

CN9000330

IAE-0054

中国核科技报告

CHINA NUCLEAR SCIENCE & TECHNOLOGY REPORT

0.1-18MeV单能快中子注量率的绝对测量和国际比对

THE ABSOLUTE MEASUREMENT AND INTERNATIONAL

INTERCOMPARISON OF 0.1-18MeV MONOENERGETIC

NEUTRON FLUENCE RATE

(In Chinese)



原子能出版社

中国核情报中心

China Nuclear Information Centre

CNIC-242
IAE-0054

0.1—18MeV单能快中子注量率 的绝对测量和国际比对

THE ABSOLUTE MEASUREMENT AND INTERNATIONAL
INTERCOMPARISON OF 0.1—18MeV MONOENERGETIC
NEUTRON FLUENCE RATE

(In Chinese)

马鸿昌 卢涵林 容超凡 郑金美 张淑萍

任培薛 赵文荣 巩玲华 杨小芸

(中国原子能科学研究院, 北京)

中国核情报中心
原子能出版社

北京·1988

摘 要

本文描述了用于0.1—18MeV单能快中子注量率绝对量的闪烁望远镜，半导体望远镜，含氢正比计数器和伴随粒子法等绝对测量装置，并刻度了用作这一能区次级标准的长中子计数器的效率。用这套装置参加了最近由国际计量局组织的快中子注量率测量的国际比对，并给出了比对结果。

关键词 中子测量标准 中子注量率 国际比对 传递装置

THE ABSOLUTE MEASUREMENT AND INTERNATIONAL INTERCOMPARISON OF 0.1—18MeV MONOENERGETIC NEUTRON FLUENCE RATE

Ma Hongchang Lu Hanlin Rong Chaofan

Zheng Jinmei Zhang Shuping Ren peixue

Zhao Wenrong Gong Linghua Yang Xiaoyun

(Institute of Atomic Energy, Beijing)

ABSTRACT

The methods for absolute measurement of 0.1—18 MeV monoenergetic neutron fluence rate are described, which include proton recoil telescope, semiconductor telescope, hydrogen filled proportional counter and associated partial method. A long counter used as secondary standard was calibrated by using these methods. The methods had a recent international intercomparison of neutron fluence rate organized by BIPM, and the results were given.

由加速器通过核反应产生的单能快中子注量率的测量是中子计量标准的重要内容之一。单能快中子已广泛地应用在核数据测量,反应堆设计,辐照实验和放射治疗中。核数据测量,特别是核反应截面的测量的准确度主要取决于中子注量率测量的准确度。剂量仪表和中子探测器的刻度,各种辐照实验都须要知道准确的中子注量。随着核技术的发展,对中子注量测量的准确度要求越来越高,因此提高中子注量测量技术是非常重要的。

利用低能加速器上的 $T(d, n)^3He$, $D(d, n)^3He$, $T(p, n)^3He$ 和 $^7Li(p, n)^7Be$ 反应可以获得0.1-18MeV的单能快中子。目前,在不同的能区发展了不同的测量注量的方法。就其能区而分,0.1—1.5MeV可利用含氢正比计数器。计数器内充以氢气或甲烷气体,因此有氢气正比计数器和甲烷正比计数器两种,分别用于这一能区的低能和高能两部分。1.5—5 MeV能区用半导体望远镜,在低于2.5MeV中子能量,为了减少散射影响,半导体望远镜通常抽成真空,因此又分真空和空气半导体望远镜两种。在5—18MeV能区用闪烁望远镜。以上几种方法都是基于以 $H(n, n)H$ 反应截面为基准的,因此也称为标准截面法。此外,在14MeV和2.5MeV两个能量点又可用伴随粒子法。除了以上绝对测量方法外,还可以用效率刻度好的长中子计数器作为0.1—18MeV中子注量测量的次级标准。

为了统一中子注量测量的量值,不断提高测量精度,自1981年起,总部设在法国巴黎的国际计量局(BIPM)组织了第二次中子注量率的测量的国际比对,主要由各国的标准实验室或相当于标准实验室参加。中国原子能科学研究院代表我国参加了这次比对,在所有比对的能量点上,取得了与国际上多数实验室一致的结果。

本文介绍我们所建立的中子注量测量装置和方法,以及国际比对的结果。

二、闪烁望远镜

1. 测量原理

中子打在含氢的辐射体上,产生n-p散射,在一定的几何条件下通过探测反冲质子数 N_p 来求出中子注量的:

$$\phi_n = \frac{N_p}{\epsilon} \quad (1)$$

式中, ϵ 为望远镜的效率。它是与望远镜的结构几何,n-p散射微分截面及辐射体含氢数目有关的量。望远镜的几何及辐射体中含氢数目可以精确的测定,因此n-p散射微分截面值是否准确是影响中子注量测量的主要因素。

60年代初,n-p散射微分截面都采用加麦尔(J.G.Gammel)的半经验公式:

$$\sigma(E_n, \theta) = \frac{\sigma(E_n)}{4\pi} \frac{1 + 2\left(\frac{E_n}{90}\right)\cos^2\theta}{1 + \frac{1}{2}\left(\frac{E_n}{90}\right)^2} \quad (2)$$

式中 $\sigma(E_n)$ 为 n-p 散射全截面, θ 为质心系中子散射角。这个公式假定: n-p 散射微分截面在能量低于 10 MeV 是各向同性的, 高于 10 MeV 为 90° 对称。用加麦尔的半径公式计算出的望远镜效率用于注量测量上通常比伴随粒子法高 3—4%。70 年代初, 霍普金斯 (J.G. Hopkins) [1] 等经过分析研究指出, 加麦尔公式中的两个假设是不成立的。事实上质心系 n-p 散射微分截面在能量低于 30 MeV 时, 0° 方向的微分截面均低于 180° 方向的微分截面。霍普金斯根据相移分析把质心系微分截面用勒让德多项式表示:

$$\sigma(E_n, \theta) = \sum_{i=0}^4 C_i P_i(\cos\theta) \quad (3)$$

C_i 为勒让德多项式展开系数。我们用此微分截面公式 [2], 根据望远镜不同的几何结构计算了望远镜的效率为:

$$m = 10^{-27} P m$$

式中 P 为辐射体中单位面积氢原子数, m 即为望远镜几何因子, 它与望远镜几何和 n-p 散射截面有关的量。80 年代初, 托马斯 (D.J. Thomas) [3] 等指出在效率计算中要用实验室系的微分截面表达式, 从质心系向实验室系过渡应采用相对论的转换公式。为此我们推导了相对论转换因子 [4]:

$$R \approx 1 + \frac{E_n}{2mc} \quad (5)$$

式中 m 为质子质量, E_n 为入射中子能量, c 为光速。这样使望远镜的效率计算更趋完善, 正确。表 1 为采用不同的微分截面公式计算的望远镜效率的比较。从表中可见, 当中子能量较低时, 如 $E_n = 1.0$ MeV, 三种方式计算的效率差异不大于 0.5%。然而当中子能量很高时, 如 $E_n = 20$ MeV, 这种差异达 8%, 就必须考虑了。

表 1 采用不同的 n-p 散射截面公式计算的望远镜 m 值的比较

望远镜几何 L, ρ	中子能量 (MeV)	加麦尔公式 非相对论转换	霍普金斯公式 非相对论转换	霍普金斯公式 相对论转换
1.5 1/5	1.0	8.602	8.632	8.639
	10	1.924	1.957	1.966
	20	1.014	1.035	1.045
4 1/16	1.0	1.286×10^{-3}	1.271×10^{-3}	1.274×10^{-3}
	10	2.847×10^{-3}	2.897×10^{-3}	2.913×10^{-3}
	20	1.522×10^{-3}	1.562×10^{-3}	1.583×10^{-3}

注: L, ρ 定义见图 3

2、几何结构

我们设计的望远镜由聚乙烯辐射体, dE/dx 半导体探测器和 CsI 晶体加光电管组

成，见图1。这是一个两重符合装置。中子打在聚乙烯辐射体上产生反冲击质子，反冲击质子由 dE/dx 和 E 探测器两重符合记录。这样可大大降低本底，聚乙烯辐射体为高纯均匀的圆片，厚度在 $40-60\text{mg}/\text{cm}^2$ 之间。

dE/dx 半导体为穿透型的，直径为 23mm ，厚度为 $100-300\ \mu\text{m}$ 之间。CaI 晶体为直径 25mm ，厚为 1mm 的晶体。辐射体光窗到 E 探测器之间的距离为 80mm 。辐射体安装在四位置自动旋转装置上，其中三个位置放不同厚度的辐射体，另一空位置用于本底测量。测量到的反冲击质子谱见图2。

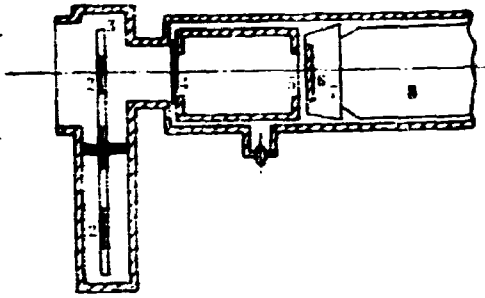


图1. 闪烁望远镜结构图

1. 中子源 2. 辐射体 3. 旋转盘 4. dE/dx 半导体
5. 钨片光窗 6. CaI 晶体 7. 光导 8. 光电倍增管

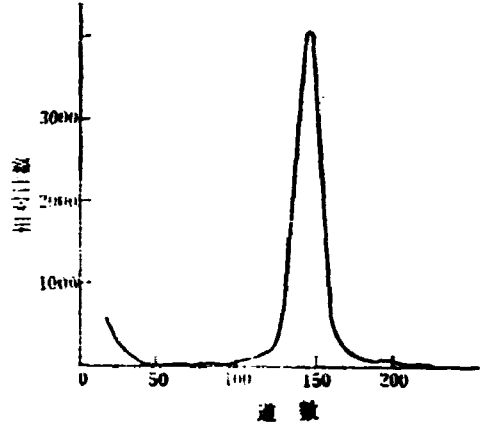


图2. 闪烁望远镜测量的符合反冲质子

3. 修正和误差

实验是在高压倍加器上进行的，以 $T(d, n)^4\text{He}$ 反应作中子源，入射氦束能量为 200keV ，束流为 $10\ \mu\text{A}$ 。望远镜放在距靶 $10-20\text{cm}$ 之间与入射氦束成 0° 或 45° 方向。测量到的中子注量要作如下修正：靶头散射修正，靶与望远镜之间物质引起的中子衰减与散射修正，辐射体面积修正等。总的测量不确定度为 $\pm 1.8\%$ ，见表2。

表2. 闪烁望远镜测量中子注量的不确定度

误差与来源	不确定度(%)
统计涨落	± 0.8
辐射体成份	± 0.5
氢 $n-p$ 散射截面	± 1.0
辐射体到靶距离	± 0.7
光窗直径	± 0.8
m 值内插	± 0.5
散射修正	± 0.5
总不确定度	$\pm 1.8\%$

三、半导体望远镜

1. 原理和结构

半导体望远镜是用于 $1.5-5\text{MeV}$ 能区中子注量绝对测量装置。它的原理及注量计

算公式与闪烁望远镜是一致的，只是由于测量的能量低，因此 γ 射线及其它带电粒子本底较小，不必用两重符合。它是由聚乙烯辐射体及金硅面垒型探测器组成，其原理见图3。辐射体厚度为5—10mg/cm²的CH₂。金硅面垒型探测器灵敏体直径为 ϕ 25mm，电阻率在2000 Ω -cm以上。辐射体和探测器距离为36mm，分别用 ϕ 18mm的白金光阑来限定其有效灵敏面积。测量本底时取下装有辐射体的盖代之以无辐射体的盖。对于中子能量低于2.5MeV时，反冲质子射程短，为了减少散射影响，就必须把半导体望远镜抽成真空，构成真空望远镜。当中子能量更低时，可以把辐射体紧贴于探测器表面，组成半导体反冲计数器。其测量原理与计算公式则与含氢正比计数器类似。

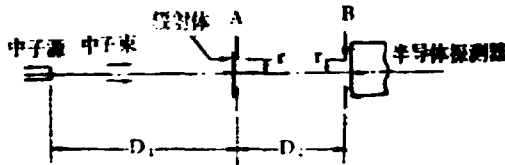


图3. 半导体望远镜结构示意图
 $\rho = r/D_2$, $L = D_1/D_2$

2. 实验和误差

实验也是在高压倍加器上进行的，以D(d, n)³He反应为 neutron 源，钨靶厚度为0.6mg/cm²，束流为60 μ A，用压缩空气冷却靶室。测得的反冲质子谱见图4，测量的总不确定度为 $\pm 1.9\%$ 。半导体望远镜测量中子注量误差见表3

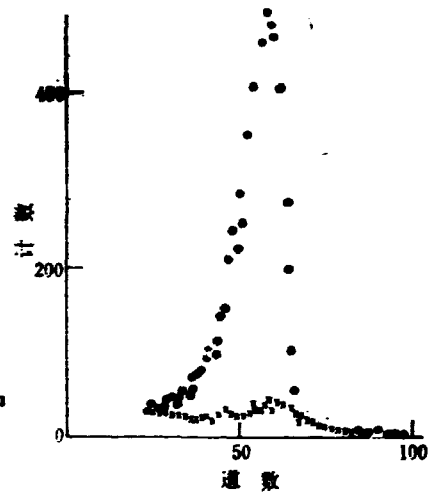


图4. 半导体望远镜测得的反冲质子谱

表3 半导体望远镜测量中子注量误差

误差来源	不确定度(%)
氢 nP 散射截面	1.0
样品重量	0.8
距离	0.6
中子散射截面	0.2
本底	0.8
中子能量	0.2
统计涨落	1.0
效率内插	0.2
总不确定度	$\pm 1.9\%$

四、含氢正比计数器

含氢正比计数器是用于keV能区中子注量绝对测量的一种常用方法，它具有探测效率高，精确度好， γ 本底影响小的优点。只要准确测定灵敏体积和计算反冲质子理论

谱, 测量误差可好于 $\pm 2\%$ 。

1、测量原理

与望远镜法所不同的是, 含氢物质不是用固态的聚乙烯薄膜, 而代之以在正比计数器内充含氢气体, 如氢气, 甲烷气等。入射中子与氢原子发生弹性散射, 通过记录反冲质子谱来确定入射中子注量的。反冲质子的能量和 n - p 散射截面可表示如下:

$$E_p(\theta) = E_n \cdot \cos^2(\theta) \quad (6)$$

$$\sigma_n(E_n) = 3\pi [1.206E_n + (-1.86 + 0.09415E_n + 0.0001306E_n^2)]^{-1} + \pi [1.206E_n + (0.4223 + 0.13E_n)^2]^{-1} \quad (7)$$

式中 E_n 和 E_p 分别为入射中子和反冲质子能量, θ 为反冲角。从理论上讲反冲质子谱应是能量从 0 到 E_n 的矩形谱。如果是平行中子束入射, 则在管中产生的反冲质子数为:

$$N_p = \Phi_n \pi R^2 L n^{\sigma_n}(E) \quad (8)$$

$$= \Phi_n N_H n^{\sigma_n}(E)$$

则:

$$\Phi_n = \frac{N_p}{N_H \cdot \sigma_n(E)} \quad (9)$$

$$\Phi_n = \Phi_n D^2 \quad (10)$$

式中, L , R 为分别正比计数器的灵敏体长度和阴极内半径, n 和 N_H 为灵敏体内单位体积和总的氢原子数, N_p 为反冲质子总数, D 为源至正比计数器的几何中心距离, $\sigma_n(E)$ 为氢的 n - p 散射截面, φ_n 和 Φ_n 分别为单位面积和单位立体角的中子注量。当中子源与正比计数器间距离较近时, 中子束不能认为是平行束, 这时可以采用点源对圆柱体活化的公式来计算中子注量。单位立体角内中子注量为:

$$\Phi_n = \frac{N_{1/2}}{\pi R_s \sigma_n \delta \Delta I M_{1/2}} \quad (11)$$

$$\Delta I = \left(h_2 \ln \frac{h_2^2 + 1}{h_1^2} - h_1 \ln \frac{h_1^2 + 1}{h_2^2} \right) + 2 (\operatorname{arctgh} h_2 - \operatorname{arctgh} h_1) \quad (12)$$

$$h_1 = L_1/R, \quad h_2 = L_2/R$$

式中 L_1 和 L_2 分别表示点源与灵敏体积“前面”和“后面”之间的距离。 $N_{1/2}$ 和 $M_{1/2}$ 分别为实验测量和理论计算的反冲质子谱的半面积计数和半面积几率。

2、结构和参数

正比计数器结构见图 5。它是由阳极、阴极和场管组成, 阳极为 5μ 直径的钨丝, 阴极是直径为 50mm 圆柱形黄铜材料, 两端是不锈钢场管, 直径为 6mm。场管用于确定正比计数器的灵敏体积。阳极和阴极分别加上正负高压, 场管接地, 外壳为不锈钢筒。这种阴极和外壳分开的结构使灵敏体积可不受外界压力的变化而改变, 因而能精确测定, 同时可使阴极材料做得很薄, 以减少本底。加工正比计数器的工艺过程包括装配, 检漏, 热抽纯化氢气, 抽真空, 充气和封装等过程, 每步都必须十分仔细, 清洁。

在阴极和阳极上所加的电压, 只有当电压比使两场管间的静电场是均匀分布时, 灵敏体长度才等于两场管间的距离, 这时所测的反冲质子谱才能与理论谱符合。电压比的理论计算公式如下:

$$\frac{V_+}{V_-} = \frac{\ln a/r_c}{\ln a/r} - 1 \quad (13)$$

式中 a 为阴极半径, r_c 为阳极半径, r 场管半径。

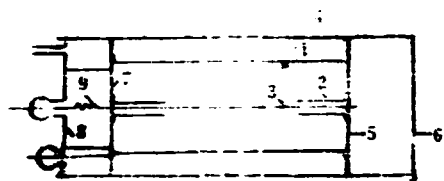


图5 正比管结构示意图

- 1—阴极(0.3mm黄铜); 2—场管(不锈钢);
- 3—中心丝(Φ0.03mm~0.05mm钨丝)
- 4—外壳(Φ~0.6mm不锈钢); 5、7—前后云母;
- 6—盖; 8—底; 9—弹簧

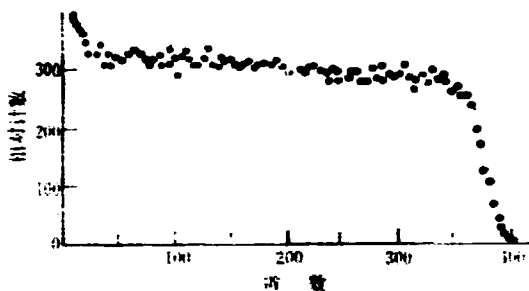


图6. 正比计数器测得的反冲质子谱
 $E_n = 565\text{KeV}$

3. 实验和误差

实验是在静电加速器上进行的, 以 ${}^7\text{Li}(p, n){}^7\text{Be}$ 和 $\text{T}(p, n){}^3\text{He}$ 反应做中子源。正比计数器放在距靶100cm, 0° 方向处。正比计数器输出脉冲经前置放大器再送入多道脉冲幅度分析器被记录。在中子能量为565keV时测得的反冲质子谱见图6。大厅散射本底用档石蜡锥方法测量。计数器各部分结构对中子的散射和衰减要进行修正。正比计数器测量中子注量率的误差见表4。

表4. 正比计数器测中子注量的误差

误差来源	不确定度 (%)
计数统计	0.5
距离	0.3
灵敏体积	1.0
气压温度	0.4
理论谱计算	0.8
本底	0.5
修正因子	0.5
(n,p) 散射截面	0.7
中子能量	0.5
总不确定度	±1.8%

五、伴随粒子法

伴随粒子法即是通过在核反应中产生中子的同时, 用记录伴随产生的带电粒子方法来确定中子注量率的。此法简单, 精确度高, 因而被广泛地应用中子注量的绝对测量

中¹³。

1、伴随 α 粒子法

在高压倍加器上利用T (d, n) ⁴He反应可获得14MeV的单能中子。此反应在质心系中, 当氘能低于200 keV时是各向同性的。因此, 在与能量为 E_d 的入射氘束成 φ 角处, $\Delta\Omega_\alpha$ 立体角内测得 N_α 个 α 粒子时, 则在与入射氘束成 θ 角处, 单位立体角内的中子注量 $\phi_n(\theta, E_d)$ 为:

$$\phi_n(\theta, E_d) = \frac{N_\alpha}{\Delta\omega_\alpha} A_\alpha \quad (14)$$

式中 A_α 为各向异性修正因子:

$$A_\alpha = \left(\frac{d\omega}{d\omega'}\right)_\alpha / \left(\frac{d\omega}{d\omega'}\right)_n \quad (15)$$

$\left(\frac{d\omega}{d\omega'}\right)_\alpha$ 和 $\left(\frac{d\omega}{d\omega'}\right)_n$ 分别为 α 粒子和中子实验室系立体角 $d\omega$ 对质心系的立体角 $d\omega'$ 的转换因子。探测 α 粒子的立体角 $\Delta\Omega_\alpha = \frac{\pi r^2}{R^2}$, r, R 分别为探测器前光阑的半径和光阑到靶的距离。

2、伴随质子法

在高压倍加器上利用D (d, n) ³He反应可以获得2.5MeV的单能中子。当然可以通过测量³He粒子来求出中子注量。但由于³He粒子能量较低(~ 0.77 MeV)不易探测, 所以通常利用测量该反应的竞争反应D (d, p) T放出的质子数来求中子注量的。在与入射氘束成 φ 角处, $\Delta\Omega_p$ 立体角内记录到 N_p 个质子, 则与入射氘束成 θ 角处单位立体角内中子注量 $\phi_n(\theta, E_d)$ 为:

$$\phi_n(\theta, E_d) = \frac{N_p}{\Delta\omega_p} A_p \quad (16)$$

式中 A_p 为各向异性修正因子。

$$A_p = \left(\frac{d\omega}{d\omega'}\right)_p \cdot \frac{\sigma_n(E_d)}{\sigma_p(E_d)} \cdot \frac{h_n(\theta')}{\left(\frac{d\omega}{d\omega'}\right)_n} \quad (17)$$

$\left(\frac{d\omega}{d\omega'}\right)_p, \left(\frac{d\omega}{d\omega'}\right)_n$ 分别为质子和中子的实验室系立体角 $d\omega$ 对质心系立体角 $d\omega'$ 的转换因子, $h_n(\theta'), h_p(\theta')$ 分别为中子和质子的角分布修正因子, θ' 为质心角, $\sigma_n(E_d)/\sigma_p(E_d)$ 为该两反应的截面比。

3、实验装置

我们设计了三种伴随粒子靶管, 一种是探测器位于入射氘束成 90° 方向的(称 90° 靶管), 一种是位于 135° 方向的(称 135° 靶管), 和同时有二个方向(90° 和 135°)的三通靶管。探测器为金硅面垒型, 其有效灵敏直径为 $\phi 8$ mm, 用于伴随 α 粒子法测量的探测器的电阻率为 $100-500 \Omega \cdot \text{cm}$, 用于伴随质子法测量电阻率为 $1000-2000 \Omega \cdot \text{cm}$ 。在探测器光阑前挡 1μ 厚的铝箔以阻止散射氘束进入探测器。实验测到的 α 粒子谱及质

子谱见图7和图8。

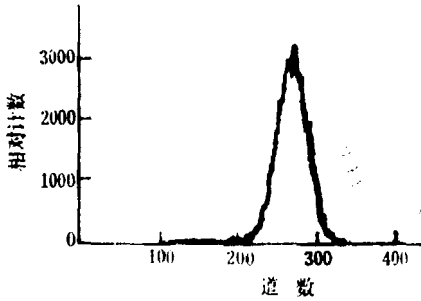


图7 α 粒子谱

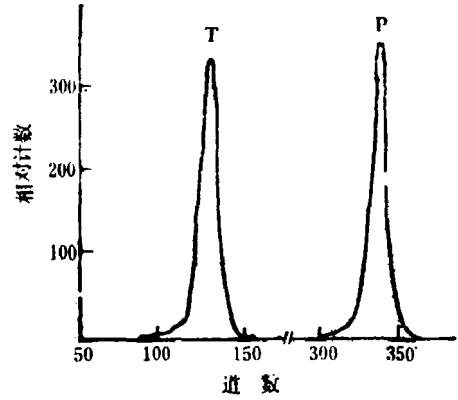


图8 质子谱

伴随粒子法测量中子注量误差见表5。

表5. 伴随粒子法测量误差 (%)

误差来源	伴随 α 粒子法		伴随质子法	
	90°靶管	135°靶管	90°靶管	135°靶管
统计误差	0.1	0.1	0.3	0.3
本底修正	0.3	0.3	0.1	0.1
死时修正	0.3	0.6	0.2	0.2
立体角误差	0.6	0.6	0.6	0.6
靶点位置偏移	0.5	0.5	0.5	0.5
各向异性修正	0.3	1.0	1.5	1.5
竞争反应	0.3	0.3		
总不确定度	±1%	±1.3%	±1.7%	±1.7%

六、精密长中子计数器

精密长中子计数器^①是一种简便而可靠的快中子探测器，它具有效率高，探测效率随中子能量变化缓慢的特点，因而被广泛用作中子注量测量的次级标准。

长中子计数器由BF₃计数管和聚乙烯慢化体，碳化硼塑料热中子屏蔽层构成。聚乙烯慢化体为直径388mm，长度为419mm的圆柱体，在中心位置插入BF₃管。BF₃管为无氧铜外壳，外径38.1mm，厚1mm，内充¹⁰B浓缩到96.3%的BF₃气体，压力为400mmHg，200mmHg和100mmHg三种，工作电压分别为1500伏，1100伏和1000伏。碳化硼塑料插在聚乙烯圆柱体四周中用于吸收大厅本底等热中子。在长中子计数器的前表面挡一片0.5mmCd片，用于吸收热中子。加速器来的快中子在慢化体中充分慢化后由BF₃管记录，因此它具有很好的平响应。

长中子计数器的效率定义为:

$$\epsilon\Omega = \frac{Nc}{I(\theta)} \quad (18)$$

式中 Nc 为长计数器扣除本底后的净计数, 本底用挡锥法测量, $I(\theta)$ 为长计数器所在 θ 方向上单位立体角内的中子注量。

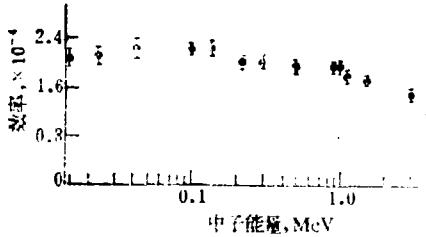


图9. 长计数器效率曲线

我们用闪烁望远镜, 半导体望远镜, 含氢正比计数器以及伴随粒子法刻度的长中子计数器的绝对效率, 能区从 0.1—15 MeV。除了 14 MeV 能量点以外, 长中子计数器均放在距靶 0° 方向 1.2 米处。另有一放在 30° 方向, 距靶 2 米处的长中子计数器用作监视器。刻度的效率曲线见图 9。

七、不同方法之间的相互校验

为了检验各种方法的可靠性, 在一些共同的能区, 不同的方法可作相互对比。如 14 MeV 中子注量测量的闪烁望远镜和伴随 α 粒子法, 2.5 MeV 中子注量测量的半导体望远镜和伴随质子法。以上两种对比均在高压倍加器上进行, 实验测量布置见图 10。望远镜放在距靶 15—30 cm 之间, 放在与入射氘束成 0° 和 45° 方向, 入射氘能分别为 150 keV, 200 keV 和 250 keV, 在以上不同实验条件下, 望远镜和伴随粒子法均在 $\pm 2\%$ 以内符合。此外, 在 500 keV 能量点, 充氢气和充甲烷气的正比计数器也相互作了对比, 也在误差范围内一致。

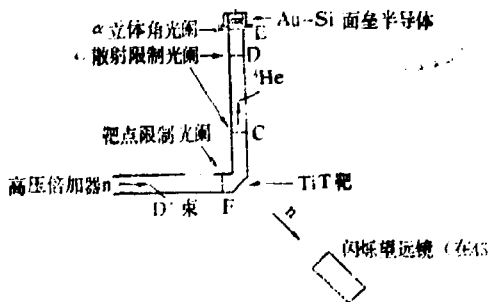


图 10 实验装置示意图

八、中子注量测量的国际比对

1981年起, 由国际计量局 (BIPM) 组织的第二次中子注量的国际比对, 共有 10 个实验室参加, 参加实验室和比对内容见表 6 和表 7。采用四种传递方法, 五个能量点, 现分述如下。

表6 中子注量国际比对参加的实验室

实验室代号	国名及实验室名
NBS	美国, 国家标准局
BIPM	法国, 国际计量局
PTB	西德, 技术物理实验室
ETL	日本, 电子技术研究所
NPL	英国, 国家物理实验室
BARC	印度, 巴巴原子能研究中心
IAE	中国, 原子能研究院
IRK	奥地利, 维也纳大学
CBNM	比利时, 西欧核测量中心局
VNIIM	苏联, 门捷列夫计量院

表7 中子注量国际比对内容

比对内容	中子注量			
方法	$^{115}\text{In}(n, r)$ 反应	$^{115}\text{In}(n, n')$ 反应	Nb/Zr 截面比	裂变室
能量点	144keV 565keV	2.5MeV 7.0MeV 14MeV	14MeV	144keV 565keV 2.5MeV 5.0MeV 14MeV
原子能院参加项目	参加	参加	参加	参加

注: 利用 $^{115}\text{In}(n, n')$ 反应的中子注量比对, 原子能院仅参加 14MeV 能量点, 并与BIPM进行了 2.5MeV 中子注量的双边比对

1、以Nb—Zr作传递样品的14MeV中子注量和能量的比对。

这是由英国NPL的V、E、Lewis负责组织的。由于 $^{93}\text{Nb}(n, 2n)^{92}\text{Nb}$ 反应截面在14MeV附近几乎不随中子能量变化, 而 $^{90}\text{Zr}(n, 2n)^{89}\text{Zr}$ 反应截面在同一能区随中子能量的增加而陡峭上升, 因此测量 ^{93}Nb 的活度与中子注量之比作为中子注量的比对, 而 ^{93}Nb 和 ^{90}Zr 活度之比作为中子能量的比对。铌和锆样品均为5mm直径, 25mm长的园柱体, 纯度为99.9%, 一起封装在聚乙烯片中, 由英国NPL发往各实验室。各实验室在各自的加速器上距靶20cm处用中子照射2h, 然而立即寄回NPL, 在他们的井型Ge(Li)探测器上测量 γ 活度。由于 ^{90}Zr 和 ^{93}Nb 的半衰期较长(分别为78.43h和243.6h)这就有可能统一在英国作活度测量, 从而避免了用各自的 γ 探测器带来的误差。

14MeV中子注量和能量的比对结果见图11和图12。有九个实验室参加了比对, 除少数几家外, 大多数结果都符合得很好。我们1981年测量的结果稍偏高是由于入射氘束没准直好, 1982年照射时采用“芯靶”, 在很好准直条件下, 其结果与国际平均值仅差-0.6%。中子能量的比对, 各实验室给出的值均高于NPL刻度值。NPL是采用硅探测器法测量的, 而多数实验室是理论计算的, 但理论计算由于缺乏氘在氘靶中的能量损

失率及氟在靶中分布的准确数据，必然会带来一定的系统误差，因此进一步研究平均中子能量的测量方法有一定的实际意义。

1984年，BIPM又组织了一次包括我院在内的五家实验室的一次小型比对，各家采用相同的实验条件，即入射氘束能量为200keV，在45°和0°方向同时照射两个Nb-Zr样品，对中子注量的比对，在两个不同角度我们的结果均与1981年的国际平均值在0.5%以内一致，这说明我们用伴随粒子法测量14 MeV中子注量的结果是可靠的。

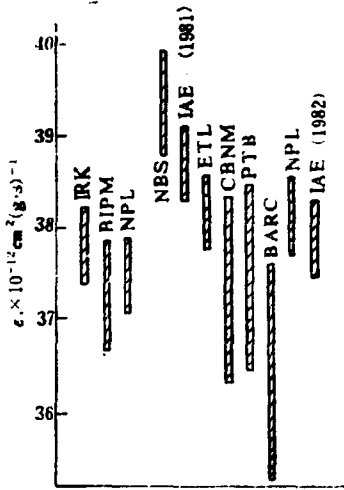


图 11. 14 MeV 中子注量的比对结果

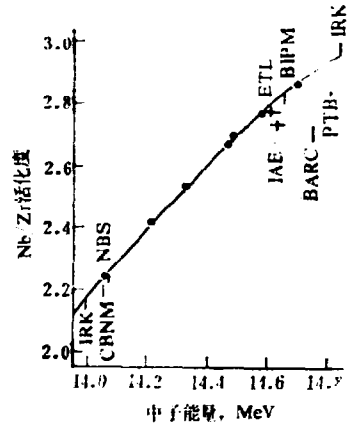


图 12. 14MeV 中子能量比对结果
——NPL的刻度曲线

2、以钢样品作传递方法的 2.5, 5.0 和 14.8 MeV 的中子注量的国际比对。

这项比对是由欧洲核测量中心局 (CBNM) 的 H·Liskien 负责的，共有 6 个实验室参加了 2.5 MeV 的注量比对，3 个实验室参加了 5 MeV 的比对，9 个实验室参加了 14.8 MeV 的比对。

比对是在 1981—1982 年间进行的，由 CBNM 把钢样品 ($\phi 2.0 \times 0.5 \text{ cm}$ 圆柱，纯度为 99.99%) 发放到各实验室，各实验室在各自加速器上距靶 20 cm 处照射样品 5 h，通过 $^{115}\text{In}(n, n)^{115m}\text{In}$ 反应生成半衰期为 4.486 h 的 ^{115m}In ，再在各自的 Ge(Li) 或 NaI 探测器上测量 336 keV 的 γ 光电峰。为了对各自的 γ 探测器的效率归一化，同时发送标准的 ^{51}Cr 源， ^{51}Cr 源 (半衰期为 27.7 d) 发出 320 keV 的 γ 射线，此能量非常接近于 ^{115m}In 的 336 keV 的 γ 射线能量，比量为单位中子注量引起的 ^{115m}In 活度与标准 ^{51}Cr 源的 γ 活度之比。

比对结果见图 13，对两个较低的中子能量 2.5 MeV 和 5 MeV，除苏联 (VNIIM) 外，各实验室的结果都符合得很好。而对于 14.8 MeV 中子注量，各家结果分散性很大，这是由于该反应对能量较低的本底中子很灵敏，低能中子的反应截面要比 14.8 MeV 中子的截面大得多，这些本底中子来自大厅散射中子，靶头散射中子及 D-D 中子。因此对结果暂不发表，由 PTB 实验室对散射效应进行计算和研究。我们没能赶上参加 2.5 MeV 和 5.0 MeV 的中子注量的国际比对。因此，在 1985 年 10 月份，我们与 BIPM 进行了

2.5 MeV 的中子注量的双边比对, 用我们的半导体望远镜法与他们的伴随粒子法在 BIPM 的 Sames 中子发生器上作了比对, 结果仅差 0.6%。在各自误差范围内符合得很好。见图 14。

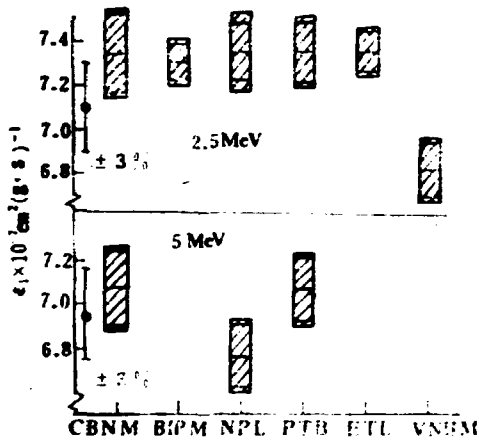


图 13. 2.5 MeV 和 5 MeV 中子注量比对结果
带点的误差棒表示 $\pm 3\%$ 的误差

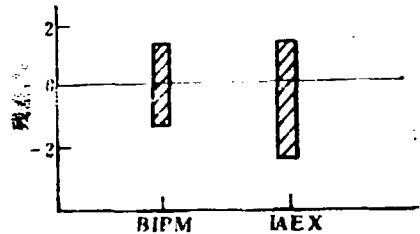


图 14. BIPM 和 IAE 对于 2.5 MeV
中子注量的双边比对

3、以 $^{115}\text{In}(n, \gamma)^{116m}\text{In}$ 反应作媒介的 144keV 和 565keV 的中子注量的国际比对。

这是由英国 NPL 的 T. B Ryves 负责组织的, 包括我们在内的共六个实验室参加。比对是在 1983-1985 年间进行的。组织者将钢样品, $4\pi\beta$ 流气式正比计数器, ^{60}Co 检验源和轻型样品架依次传递到各参加比对的实验室。钢样品直径为 2.54cm, 厚度为 50 μm , 由一同样大小的薄铝片作底衬, 固定在轻型样品架上。两片钢样品放在与靶不同高距上同时照射 2 h, 以导出大厅本底中子的影响。也可用一钢片放在距靶 2 m 处来测量大厅本底。照射后产生的 ^{116m}In 的 β 活度 (半衰期为 54.12min) 由 $4\pi\beta$ 计数器来测量。为了检验 $4\pi\beta$ 计数器工作的可靠性, 由 ^{60}Co 检验源来监视其计数, 比对量为单位中子注量的饱和 β 放射性。

我们在 1985 年上半年完成了实验测量工作, 实验是在本院静电加速器上进行的, 利用 $^7\text{Li}(p, n)^7\text{Be}$ 反应作中子源, 所用锂靶厚度为 $\sim 60 \mu\text{g}/\text{cm}^2$, 底衬为 0.3mm 厚的铝片, 其直径为 14mm, 当入射质子束能量为 $1.942 \pm 0.005 \text{ MeV}$ 和 $2.295 \pm 0.005 \text{ MeV}$ 时, 在 0° 方向就能获得能量为 $144 \pm 10 \text{ keV}$ 和 $565 \pm 10 \text{ keV}$ 的中子。束流为 $12 \mu\text{A}$, 靶点直径为 0.6cm。两片钢样品分别放在距靶 8 cm 和 12 cm 处照射, 另一铝样品放在距靶 2 m, 45° 方向处当作本底片。中子注量用含氦正比计数器测量, 正比计数器放在距靶 1 m 处, 用挡铅法测量大厅本底, 另用一放在 30° 方向的长中子计数器监视样品照射期间的注量随时间的变化, 用 $4\pi\beta$ 计数器测量到的 β 活度, 还必须对大厅本底, 靶头散射本底以及空气散射等因素作修正。大厅散射本底用不同距离的二片铝片同时照射的距离平方反比法和远距离的本底片法测量, 靶头散射中子本底由蒙特卡罗法计算。

由六实验室参加的这次比对, 结果见图 15 和 16。对于 144keV 除一家数据偏高外, 其余的实验室在 3% 以内一致, 我们的结果正好落在平均值上。对于 565 keV 中子能

量，分散性大些，而我们的结果是最接近平均值的实验室之一。

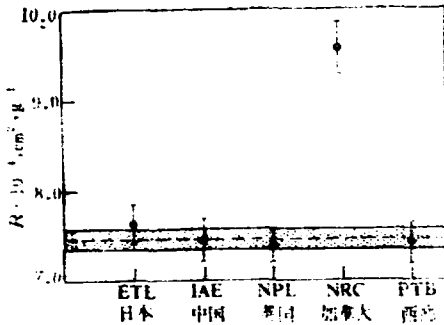


图 15. 144 keV 中子注量比对结果

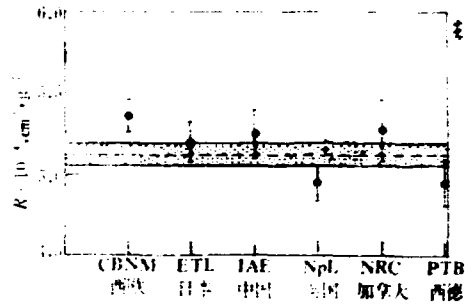


图 16. 565 keV 中子注量比对结果

九、结 束 语

我们建立的这套用于 0.1—18MeV 中子注量率绝对测量装置，包括闪烁望远镜，半导体望远镜，含氢正比计数器，伴随粒子法和长中子计数器等及其使用能区，测量不确定度和国际比对结果等列在表 7 中。这套装置可完整地用在 0.1—18MeV 中子能区的注量测量中，无论从测量的不确定度或国际比对的结果来看，这套装置已达到了国际先进水平，并已用在中子反应截面测量，中子管产额的刻度，中子探测器和剂量仪表的刻度中，均取得了满意的结果。

原子能研究院中子物理研究室的许多同志在中子注量测量方面做了大量的工作，这套装置的大部分机械设计和制图由金玲同志完成的，并对指导和关心本工作的黄胜年同志表示感谢。

表 7. 中子注量绝对测量装置性能

测 量 方 法	闪烁望远镜	半导体望远镜	CH ₄ 正比计数器	H ₂ 正比计数器	伴随α粒子法	伴随质子法
使用能区 (MeV)	5—18	1.5—5	0.5—1.5	0.1—0.5	14	2.5
不确定度 (%)	1.8	1.9	1.8	1.8	1.0	1.7
国际对比结果 (与平均值偏离)		0.6%	2.2%	0%	0.6%	
相互之间对比	1.0%					1.5% 望远镜与 半导体望远镜
	与伴随粒子法					

参 考 文 献

1. J. c. Hopkins et al *Nucl Data TablesA* 137(1971)
2. 李际周等 原子能科学技术 1,100(1977)
3. D. J. Thomas et al *Nucl Instr Mech* 174 321(1983)
4. 马鸿昌等 原子能科学技术 4,589(1983)
5. 李际周等 原子能科学技术 3, 211(1977)
6. 蒋崧生等 原子能科学技术 1,98(1975)
7. Liskien, H *Metrologia* 20,55(1984)
8. LeWis, V, E *Metrologia* 21, 49(1984)
9. 道川太一 保健物理 19,158(1984)
10. Ryves T. B *Metrologia* (1987)
11. 马鸿昌等 原子能科学技术 1,14(1987)
12. 马鸿昌等 加速器中能中子源常用数据手册, 原成(76)-026 1976

书号: 15175-00242

P.O.Box 2103

Beijing, China