

CNIC-01809

CAEP-0159

14 MeV 中子注量率测量技术比对研究

蒋 励 胡 俊 文德智

(中国工程物理研究院核物理与化学研究所, 绵阳, 621900)

摘 要

对伴随 α 粒子法测量 DT 中子源中子注量系统的稳定性及重复性进行了检验。通过铁活化法与伴随粒子法得到的中子注量相比较, 完成了预备实验。用 $4\pi\beta(\text{PC})-\gamma$ 符合标准装置测量活化后的铝箔的方法与伴随粒子法监测的中子注量率比对, 两者偏差小于伴随粒子法的扩展不确定度, 其中伴随粒子法标准不确定度为 1.6%, 铝活化法标准不确定度为 1.8%。

关键词: 伴随粒子法 中子注量 $4\pi\beta(\text{PC})-\gamma$ 符合标准装置

Study on Measurement Technique Contrast of 14 MeV Neutron Fluence

(In Chinese)

JIANG Li HU Jun WEN Dezhi

(Institute of Nuclear Physics and Chemistry, CAEP, Mianyang, 621900)

ABSTRACT

The stability and repetition of the associated-particle method to measure DT neutron fluence was tested. The neutron activation iron method was contrasted with the associated-particle method, the preparatory experiment was done. The neutron fluence measured with associated-particle method was contrasted with neutron activation Al method, the Al activated foil was measured with $4\pi\beta$ (PC)- γ coincidence standard device. The contrast result's standard deviation of the two method was less than the expand uncertainty of the associated-particle method. Therein, the uncertainty of the associated-particle method is 1.6%, the uncertainty of the activation Al method is 1.8%.

Key words: Associated-particle method, Neutron fluence, $4\pi\beta$ (PC)- γ coincidence standard device

引言

DT 反应产生的 14 MeV 中子作为一种高能中子源得到了广泛应用,在实验核物理、中子物理、加速器物理、放射性剂量学等领域有极其重要的作用。所有相关实验结果的可靠性首先取决于 14 MeV 中子注量率测量的准确性。建立相应的中子注量率测量标准是探测器标定、中子物理实验研究等各项工作的需要。所有这些测量,都涉及用伴随 α 粒子法测量中子注量(率)问题。为使测量结果具有可靠性、准确性和一致性及实验结果的可追溯性,除考虑排除或减小各种影响外,要求测量装置和测量系统标准化,保证实验结果重复稳定。为此,要求建立一套标准的用伴随粒子法测量 DT 中子源注量率的装置和测量系统。

本课题的目的是建立起测量 14 MeV 中子注量(率)的计量标准装置,通过比对等量值传递方法溯源到国家、部门或行业有关计量基准和计量标准,并建立量值传递技术以及基本的中子场校准设备,可直接或间接地初步满足用于模拟试验的中子注量(率)物理诊断测试系统的性能研究、检定(校准、刻度、标定)和测试要求。

1 采用的技术路线和技术方法

1.1 伴随 α 粒子法

1.1.1 伴随粒子法测量原理

K-400 中子发生器的中子注量用伴随粒子法给出。根据 $T(d,n)^4\text{He}$ 反应中 α 粒子和中子的对应关系,可以通过记录在核反应中产生的伴随 α 粒子方法来测量中子注量。对 DT 聚变中子注量测量方法而言,当 $E_d \leq 300$ keV 时,测量 θ_n 方向发射的伴随 α 粒子,距靶心 R 处 θ_n 方向的加速器聚变中子注量率 $\varphi(R, \theta_n)$ 为:

$$\varphi(R, \theta_n) = \frac{N(\theta_n)}{R^2 \Omega_\alpha} A_\alpha(\theta_n, \theta_n) B \quad (1)$$

式中: $\varphi(R, \theta_n)$ ——距靶心 R 处, θ_n 方向的中子注量率, $\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$;

$N(\theta_n)$ ——单位时间, θ_n 方向探测器所张立体角内发射的 α 粒子数, s^{-1} ;

R ——中子探测器与靶心的距离, cm ;

Ω_α —— α 探测器对靶心所张的立体角, sr ;

θ_n ——出射中子和入射氘离子间的夹角, rad ;

θ_α ——出射 α 粒子和入射氘离子间的夹角, rad ;

B ——出靶室中子的衰减因子;

$A_\alpha(\theta_n, \theta_n)$ ——为各向异性修正因子,可表示为:

$$A_\alpha(\theta_n, \theta_n) = \frac{(d\omega/d\omega)_\alpha}{(d\omega/d\omega)_n} \approx \frac{[1 + (32/5)^{1/2} (\bar{E}_d/Q)^{1/2} \cos\phi_\alpha]^{-1}}{\left[1 + \frac{1}{4} (32/5)^{1/2} (\bar{E}_d/Q)^{1/2} \cos\phi_n\right]^{-1}} \quad (2)$$

式中: \bar{E}_d ——产生 $T(d, n)\alpha$ 反应的氘核平均能量, MeV ;

Q —— $T(d, n)\alpha$ 反应的反应能 Q 值, MeV ;

ϕ_α ——在质心系中 α 粒子出射角, rad ;

ϕ_n ——在质心系中中子出射角, rad 。

在加速器氦离子能量小于 400 keV 这种低能反应的条件下, $\phi_\alpha \approx \theta_\alpha$, $\phi_n \approx \theta_n$ 。本标准规定 $\theta_\alpha = 135^\circ$, $N(\theta_\alpha)$ 由下式给出:

$$N(\theta_\alpha) = \frac{\Delta N(\theta_\alpha)}{(1 - P_{Si})(1 - P_{th})P_t} \quad (3)$$

式中: $\Delta N(\theta_\alpha)$ —— α 粒子探测器的 α 粒子阈值和质子阈值之间的 α 粒子绝对计数率, s^{-1} ;

P_{Si} ——硅本底在 $\Delta N(\theta_\alpha)$ 中所占的份额;

P_{th} —— α 粒子阈损失在 $\Delta N(\theta_\alpha)$ 中所占的份额;

P_t —— α 粒子测量系统的死时间修正因子, 并由下式给出:

$$P_t = [1 - \Delta N(\theta_\alpha)\tau]^{-1} \quad (4)$$

式中: τ —— α 粒子电子学测量系统的死时间, s;

α 探测器对靶心所张的立体角 Ω_α 由下式给出:

$$\Omega_\alpha = \frac{\pi r^2}{R_\alpha^2} \quad (5)$$

式中: R_α ——靶心至半导体探测器光阑中心的距离, cm;

r ——探测器光阑的半径, cm。

1.1.2 测量装置

中子源为 K-400 中子发生器上产生的 DT 聚变中子源。D⁺ 能量为 250 keV。T-Ti 靶活性区 $\phi 12$ mm。靶片背面采用水冷。靶面法线与 D⁺ 束成 45°。α 粒子探测器为金硅面垒半导体探测器, 放在与 D⁺ 束成 135° 的方向上进行监测^[1], α 漂移管与氦离子漂移管成 45°, 且与氦靶片成 40°。靶室结构如图 1 所示。靶室的结构材料是不锈钢。氦漂移管内径 $\phi 17$ mm, 外径为 $\phi 20$ mm。探测器与靶心距离为 974 mm。探测器前光阑为 $\phi 1.072$ mm。

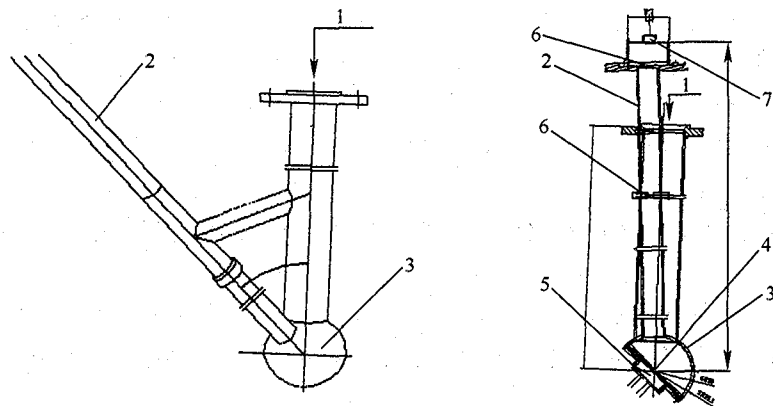


图 1 靶室结构示意图

1—氦离子束方向; 2— α 漂移管; 3—靶室; 4—氦靶; 5—水冷; 6—光阑; 7—135° α 探测器

在 135° 方向 α 粒子漂移管道上设置两道光阑, 在距靶心 493 mm 处有直径约为 $\phi 9$ mm 第一道光阑, 在距靶心 952 mm 有直径约为 $\phi 5$ mm 第二道光阑, 主要防止 α 粒子、D⁺ 核在管道中散射进入半导体探测器, 光阑直径大小的确定以不影响探测器测量靶上发射的 α 粒子为准。通过调节光路及光阑大小, 使探测器对靶的活性区无死角。

半导体前的光阑直径的准确测量很重要(通常加工的直径为一准圆),它直接影响 Ω_s 的准确度。直径的大小由所需 α 粒子计数大小(R 一定时)而定。半导体探测器前需加铝膜,它的作用是:

(1)吸收掉散射 D^+ 核,使其进不到探测器中,避免了半导体探测器的辐射损伤,增加了使用寿命;

(2)将DT反应的 α 粒子和DD反应的质子分开,通过对质子的测量得到DD反应中子注量,由此评估它对实验的影响;

(3)有屏蔽光的作用,一旦靶室中有发光产生,可以使光进不到半导体探测器中,使其正常工作。

1.1.3 α 粒子探测器和电子学系统

在 135° 和 178.2° 两个方向上同时用金硅面垒半导体探测器测量DT反应伴随产生的 α 粒子。伴随 α 粒子监测系统的电子学方框图如图2所示。

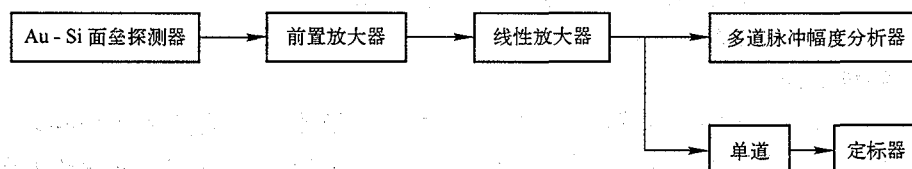


图2 伴随粒子法监测系统方框图

1.2 14 MeV 中子注量率测量比对方案

1.2.1 技术方案

采用铝活化片作为传递媒介,应用 $^{27}\text{Al}(n, \alpha)^{24}\text{Na}$ 核反应测量中子注量率^[2]。此反应产物 ^{24}Na 半衰期适中(14.959 h),衰变 β, γ 易测准,反应截面 σ 在阈上变化平缓。由中国工程物理研究院核物理与化学研究所将铝活化片置于K-400加速器所产生的中子场里,选取适当的辐照位置照射一定时间,同时用伴随粒子法测量中子注量,记录下照射时间。由核工业放射性计量测试中心采用 $4\pi\beta(\text{PC})-\gamma$ 符合标准装置测得其反应产物 ^{24}Na 在某一确定时刻的活度,按放射性衰变规律推算到停止照射时 ^{24}Na 的活度或核数目即可计算出中子注量率。

设铝片 ^{27}Al 总的核数目是 N_1 ,停止照射时单位时间 ^{24}Na 的绝对数目为 N_2 ,对中子注量率不稳定的修正因子为 k_φ , $^{27}\text{Al}(n, \alpha)^{24}\text{Na}$ 反应的截面是 σ_0 ,则中子注量率可表示为:

$$\varphi = \frac{N_2}{k_\varphi N_1 \sigma_0} \quad (6)$$

其中:

$$N_2 = \frac{Ak_e k_b \lambda e^{\lambda(t_2-t_1)} (t_3 - t_2)}{[1 - e^{-\lambda(t_1-t_0)}][1 - e^{-\lambda(t_3-t_2)}]} \quad (7)$$

$$k_\varphi = \frac{n[1 - e^{-\lambda(t_1-t_0)/n}]}{e^{\lambda(t_1-t_0)} - 1} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n C_i e^{\lambda(t_1-t_0)/n}}{\sum_{i=1}^n C_i} \quad (8)$$

式中： λ —— ^{24}Na 的衰变常数；

t_0, t_1, t_2 和 t_3 ——分别为活化片照射的开始时间、停止时间，活化测量的开始时间、停止时间；

A —— $4\pi\beta(\text{PC})-\gamma$ 符合计数器在测量时间 $(t_3 - t_2)$ 内的平均计数率；

k_c, k_b ——分别是探测器的效率校正因子和各类本底校正因子；

C_i ——把照射时间分成 n 等份，伴随粒子监测在第 i 个间隔内的计数。

绝对测量不确定度来源要求考虑以下几个方面：

- (1) 样品称重不确定度；
- (2) 样品离靶距离不确定度；
- (3) 时间控制不确定度；
- (4) 截面不确定度；
- (5) α 粒子测量不确定度；
- (6) ^{24}Na 活度测量不确定度。

其中前三项不确定度相对较小，且便于分析，第四项由核数据评估，后两项分别由伴随粒子法测量系统，及 $4\pi\beta-\gamma$ 符合标准装置给出。其中，公式(6)，(7)，(8)也适用于铁活化法。

1.2.2 结果及证书

由核工业放射性计量测试中心对测量数据进行处理，计算中子注量率，并与中物院核物理与化学所采用伴随粒子法测量的中子注量率的结果进行比对，在不确定度范围内一致，表明中物院核物理与化学所采用伴随粒子法给出的中子注量(率)的量值是准确、可靠的，并由国防科工委放射性计量一级站出具比对结果证书。

2 实验数据处理及结果

伴随粒子法数据处理，主要用金硅面垒探测器和相应的电子学系统测量由靶上发射的 α 粒子数，并归一到单位时间的计数。然后经本底修正(硅本底，对旧靶有竞争反应本底)、阈损失修正、 α 粒子计数系统的死时间损失修正，得到绝对的 α 粒子计数。K-400 加速器上入射氦粒子能量为 250 keV，氦靶为厚靶，可查表^[3] 计算得 $\bar{E}_\alpha = 134$ keV。135°方向的 α 粒子探测器，光阑半径 $r = 0.536$ mm， $R = 974$ mm，中子与氦束成 103°， $\Omega_\alpha = \frac{\pi r^2}{R^2}$ ，平均中子能量为 13.93 MeV。由式(1)计算出加速器聚变中子 103°方向 4π 中子注量率 ϕ_n ：

$$\phi_n = 1.54 \times 10^7 N(\theta_\alpha) \quad (9)$$

式中： $N(\theta_\alpha)$ ——为 135°记录系统监测得到的 α 粒子计数率。

2.1 伴随粒子监测的重复性

为了检验 135°伴随粒子法监测数据的重复性，在与氦束成 135°和 178.2°两个角度同时用金硅面垒对 α 粒子进行测量。对获取的数据进行分析则可得出 135°伴随粒子法监测数据的重复性(见表 1)。

表 1 伴随粒子法监测重复性

测量次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	均值	标准偏差
178.2°/135° 计数比较	1.278	1.28	1.279	1.285	1.28	1.281	1.277	1.281	1.284	1.281	0.2%

由加速器单能中子源常用数据手册,可推算出 135°和 178.2°伴随粒子法监测 103°方向中子注量与 α 粒子转换系数分别为 1.54×10^7 , 1.2×10^7 , 两者的比值为 1.283。由表 1 给出的实验比值为 1.281。两者的比值偏差小于 1%。由表 1 可知,平均值的标准偏差小于不确定度的三分之二 ($0.2\% < 1.1\%$), 即标准装置的重复性满足要求。

2.2 伴随粒子法监测的稳定性

为了检验 135°伴随粒子法监测中子注量的稳定性,采用长计数器放在实验大厅的固定位置与 135°伴随粒子法同时监测,得出两者的比值,实验数据列于表 2。

表 2 伴随粒子法监测稳定性

测量次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	均值	标准偏差
测量时间	04-09-03	04-09-06	04-09-07	04-09-08	04-09-09	04-09-10	04-09-13	04-09-14	04-09-15	04-09-17	—	—
135°/长计数器 计数比值	0.364	0.363	0.363	0.361	0.358	0.36	0.362	0.361	0.36	0.363	0.362	0.2%

从表 2 的数据可知,伴随粒子法监测与长计数器监测值之比偏差小于 1.6%,说明伴随粒子法监测是稳定可靠的。

2.3 铁活化法与伴随粒子法比对

为了在量值比对及溯源之前,对活化法的方法及条件进行准备,开展了铁活化法与伴随粒子法的比对。

在水平面与氘束成 103°方向上,用铁活化片放在距靶心 24.5 cm, 34 cm, 49.55 cm, 79.95 cm 和 100.7 cm 的位置进行照射活化,同时用 135°方向伴随粒子法进行监测。铁活化片为圆片状,直径为 $\phi 18$ mm,厚度为 0.3 mm。铁活化片活性用 HPGe 探测器测量。所用 ORTEC 公司的 HPGe 探测器晶体直径为 58.3 mm,晶体长度为 63.0 mm,外表层非活性锗层厚度为 0.7 mm,对钴源 1332 keV 能量的分辨率为 0.1%。846.6 keV 的探测效率为 0.045。

纯铁片在中子照射下将产生 $^{56}\text{Fe}(n,p)^{56}\text{Mn}$ 反应,根据停止照射后用高纯锗测得的 ^{56}Mn 的活度,按其放射性衰变规律就可推算出中子注量。设铁箔 ^{56}Fe 总的核数目是 N_1 ; 停止照射时单位时间 ^{56}Mn 的绝对数目为 N_2 ; 对中子注量率不稳定的修正因子为 k_p ; $^{56}\text{Fe}(n,p)^{56}\text{Mn}$ 反应在能点 14 MeV 的截面是 $\sigma_0 = 1.19 \times 10^{-25}$ b ($1 \text{ b} = 10^{-28} \text{ m}^2$); 则可借用公式

(6),(7)和(8)推算出中子注量率。其中伴随粒子法不确定度为 1.6%,铁活化法不确定度约为 5%。实验数据处理列于表 3。

表 3 伴随粒子法与铁活化法比对结果

距离/cm	伴随粒子法	铁活化法	活化法/伴随法
24.5	1.052×10^{14}	1.091×10^{14}	1.037
34	1.149×10^{14}	1.198×10^{14}	1.043
49.55	1.06×10^{14}	1.091×10^{14}	1.029
79.95	1.171×10^{14}	1.226×10^{14}	1.047
100.7	2.233×10^{14}	2.333×10^{14}	1.045

2.4 伴随粒子法的不确定度

加速器 DT 聚变中子注量率测量的不确定度主要来源于 α 粒子计数、各向异性因子、立体角和出靶室衰减因子。测量结果的不确定度列于表 4。

表 4 测量结果的不确定度

序号	影响因素	不确定度来源	A 类 ¹⁾ / %	B 类 ²⁾ / %
1	α 粒子计数	1. α 粒子计数的统计	0.5	—
		2. 卡阈损失	—	0.6
		3. α 粒子库仑散射	—	0.5
		4. α 粒子管道中的 α 粒子散射	—	0.3
		5. 硅本底	—	0.2
		6. 阈漂移(包括 α 谱峰位的漂移)	—	0.1
		7. 半导体探测器的 α 粒子计数效率	—	0.1
2	各向异性 因子 $A_n(\theta_a, \theta_n)$	1. 入射氦离子的平均能量	—	0.8
		2. 氦离子散射引起入射角的变化	—	0.5
		3. 靶点偏心引起入射角的变化	—	0.2
		4. 氦离子管道和 α 粒子管道间的夹角	—	0.2
		5. $(d\omega/d\omega')_a / (d\omega/d\omega')_n$ 的计算误差	—	0.2
3	立体角 Ω_a	1. 靶至探测器光阑间距离的测量	—	0.5
		2. 探测器光阑的测量	—	0.2
		3. 靶点偏心	—	0.2
4	出靶室 衰减因子		—	0.2
合成不确定度 u_c			1.6	
扩展不确定度 $U(k=2)$			3.2	

注: 1) A 类评定按测量数据处理的一种统计计算方法进行, 用得到的实验标准偏差表征。

2) B 类评定是借助于可利用的有关信息进行科学判断, 确定估计的标准偏差。

3 14 MeV 中子注量率测量比对结果

3.1 实验布置

为了对伴随粒子法测量中子注量率的方法进行评估,采用了铝活化法与 135°伴随粒子法测量结果比较。实验中把 $\phi 18$ mm 铝活化片放在与氘束成 103°方向,距靶心 12.5 cm 中子场中进行照射,同时用 135°方向伴随粒子法监测。

3.2 量值比对结果

伴随粒子监测仪器系统:上海电荷灵敏前置,偏压为 9 V,主放大器为 ORTEC 572A,粗调为 20,细调为 12.0,成形时间 1 μ s,多道为 ORTEC 集成计算机插卡。 α 峰位在全谱位置约为 0.36 处。

把探测系统测量的由靶上发射的 α 粒子数,归一到单位时间的计数。然后经本底修正(硅本底,对旧靶有竞争反应本底)、阈损失修正、 α 粒子计数系统的死时间损失修正,得到绝对的 α 粒子计数。由式(9)计算出加速器聚变中子注量率。由核工业放射性计量测试中心采用 $4\pi\beta$ (PC)- γ 符合标准装置测得其反应产物²⁴Na 在某一确定时刻的活度,按放射性衰变规律推算到停止照射时²⁴Na 的活度或核数目即可计算出中子注量率。两种方法给出的中子注量率及不确定度列于表 5。其中,Al 活化法不确定度列于表 6。

表 5 两种方法测量中子注量率

方法	中子注量率	扩展不确定度(k=2)
伴随粒子法	2.73E+10	3.2%
Al 活化法	2.77E+10	3.6%

表 6 铝活化法测量结果的不确定度

序号	不确定度来源	A 类/%	B 类/%
1	样品称重不确定度	—	0.05
2	样品离靶距离不确定度	—	0.5
3	时间控制不确定度	—	0.1
4	α 粒子测量不确定度	—	1.2
5	截面不确定度	—	1
6	²⁴ Na 活度测量不确定度	—	0.5
合成不确定度 u_c			1.8
扩展不确定度 $U(k=2)$			3.6

用伴随粒子法监测到靶点处 4π 方向上中子注量率为 2.730×10^{10} ,用 $4\pi\beta$ - γ 符合标准装置测量²⁴Na 活度推算出靶点处 4π 方向上中子注量率为 2.766×10^{10} ,两种方法相差由计算可得

$$(2.730 \times 10^{10} - 2.766 \times 10^{10}) / 2.730 \times 10^{10} \times 100\% = 1.31\%$$

由表 5 所给出的两种方法的结果,实验相差小于 1.4%,可以得出两种测量方法在不确定度范围内是相符的,伴随粒子法给出的中子注量率是可靠的。

4 结 论

该实验方法可行,易于实现,且结果可信。进行了系统的试运行,稳定性和重复性达到要求。与国防科工委放射性计量一级站进行了量值比对,得出两种测量方法在不确定度范围内是相符的,伴随粒子法给出的中子注量率是可信的,完成了预定目标。

参 考 文 献

- 1 刘荣等.用大角度伴随粒子法测量中子产额及其校对实验.核电子学与探测技术,1999,19(6):428~432
- 2 国防科工委科技与质量司组织编写.电离辐射计量.北京:原子能出版社,2002,243~275
- 3 中国科学院原子能研究所.加速器单能中子源常用数据手册.1976