

蒙特卡罗方法在圆柱型多丝正比室 多路望远镜系统中的应用

程晶晶¹, 阮锡超², 周祖英², 蒋婧², 李霞², 黄翰雄², 唐洪庆², 凌球¹

(1. 南华大学核科学技术学院, 湖南衡阳 421001; 2. 中国原子能科学研究院, 北京 102413)

摘要:基于圆柱型多丝正比室的多路望远镜系统具有良好的粒子鉴别性能和真事件判选特性,可同时进行多个反应角度的测量,也可同时进行效应谱和本底谱的测量,适用于研究快中子引起的出射带电粒子的反应。简要介绍了该系统的基本结构及特点,并说明蒙特卡罗方法在该系统中的实际应用情况。

关键词:多丝正比室;多路望远镜系统;蒙特卡罗方法;MCNP程序;中子注量

中图分类号:TH743

文献标识码:A

文章编号:1000-6931(2007)06-0674-04

Application of Monte-Carlo Method in Multi-telescope System Based on Cylindrical Multi-wire Proportional Chamber

CHENG Pin-jing¹, RUAN Xi-chao², ZHOU Zu-ying², JIANG Jing²,
LI Xia², HUANG Han-xiong², TANG Hong-qing², LING Qiu¹

(1. School of Nuclear Science and Technology, University of South China, Hengyang 421001, China;

2. China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

Abstract: The multi-telescope system based on cylindrical multi-wire proportional chamber not only has perfect performance of particle and true event identification but also can measure multi-angle charged particle energy spectra and corresponding background at the same time. The system is suitable for study on charged particle emission induced by fast neutron reaction. The structure and performance of the multi-telescope system was introduced briefly and Monte-Carlo method used in this system was mainly described.

Key words: multi-wire proportional chamber; multi-telescope system; Monte-Carlo method; MCNP code; neutron fluence

1968年, G. Charpak等^[1]在CERN研制成功第一台可供使用的多丝正比室后,人们在此基础上研究和制造了一系列新型的探测器。这些探测器探测带电粒子具有定位精度高、时间分辨率好等优点,但在应用的过程中,有些参数

的测量很困难,有些不可能直接测量,而只能通过其它方式确定,如采用蒙特卡罗方法。圆柱型多丝正比室的多路望远镜系统具有良好的粒子鉴别性能和真事件判选特性,可同时进行多个反应角度测量和效应谱、本底谱测量,比较适

合用于研究快中子引起的出射带电粒子的反应^[2-3]。本工作介绍用于快中子引起出射带电粒子双微分截面测量的基于圆柱型多丝正比室的多路望远镜系统^[4-5],该系统的靶室部分由中国科学技术大学设计^[4],并说明蒙特卡罗方法在该系统中的实际应用。

1 多路望远镜系统简介

圆柱型多丝正比室多路望远镜系统(图1)主要由3部分组成:圆柱型多丝正比室、中心能量探测器、丝室气压稳定系统。多丝正比室由上下圆形底板(铝)构成,共有内、外两层阳极丝,内层16根,外层32根,阳极丝与阳极丝之间有1根隔离丝。阴极丝也有两层,分别为64根。工作时,阴极丝、上下底板和隔离丝均施加同电位的负高压,所有阳极丝均用100 MΩ电阻接地。

中心能量探测器为 CsI(Tl)晶体^[6]。整个多丝正比室采用流气方式工作,工作气体为 Ar 和 CO₂ 的混合气体。流气稳压系统主要由压力传感器、控制阀门和控制器组成。

多路望远镜系统的主要特点如下:1)由中心探测器和外层阳极丝中的一路可组成一组望远镜,整个系统共有32路望远镜,利用不同丝位置来确定核反应中带电粒子的出射角度,可同时进行16个反应角的测量;2)利用内外两层阳极丝可作为两重 ΔE 探测器,增强事件判选能力;3)可同时进行反应谱和本底谱的测量,缩短测量时间;4)采用厚靶可增加反应事件率,使测量同样的反应事件数所需时间减少。系统的不足之处是立体角小、效率较低,采用厚靶时,后续的厚靶数据处理较为复杂。

2 多路望远镜系统几何参数确定

图2所示为在快中子引起反应出射带电粒子的双微分截面测量实验中的中子源、靶环(样品)和探测器之间的几何关系示意图。

2.1 平均立体角

进行双微分截面测量时,需知中心探测器对靶所张的立体角,而中心探测器对靶上不同点所张的立体角是不同的,所以,只能对它们求平均,得到平均立体角。用蒙特卡罗方法计算的基本思路是:对于每路望远镜所对应的靶环,先从靶上随机抽取一点,求出该点与 CsI 晶体中心的距离,然后,用式(1)计算晶体对该点所张的立体角 ΔΩ:

$$\Delta\Omega = \pi r^2 \frac{(H+U)}{Y^3} \quad (1)$$

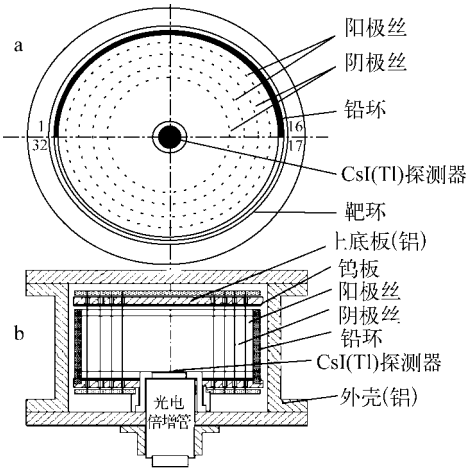


图1 多路望远镜系统结构示意图

Fig. 1 Scheme of multi-telescope system

a——顶视图;b——侧视图

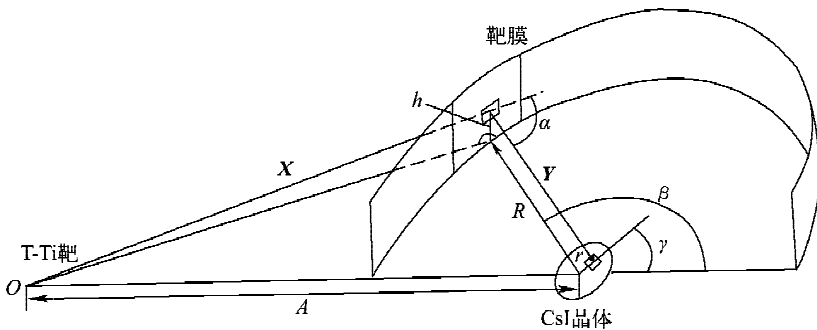


图2 多路望远镜系统几何示意图

Fig. 2 Geometry of multi-telescope system

式中: r 为晶体的半径; H 为抽样点离靶环底部的高度; U 为靶环底部离晶体表面的高度; Y 为抽样点到 CsI 晶体中心的距离。

2.2 平均距离

带电粒子从靶样品上出射后, 在到达中心能量探测器之前, 将在混合气体中损失部分能量, 损失的这部分能量与靶到 CsI 晶体探测器的平均距离相关。CsI 晶体与靶的平均距离可用晶体上任意一点与靶环上任意一点之间的距离求平均得到, 并考虑立体角权重。用蒙特卡罗方法计算平均距离时, 对于每路望远镜, 先从靶环上随机抽取一点, 再从晶体上随机抽取一点, 求出两点之间的距离并按式(2)计算立体角权重因子, 然后将距离相同的立体角权重因子分别进行累加, 得到不同距离所占的权重, 再加权计算得到平均距离:

$$\frac{d\Omega_1}{d\Omega_0} = \frac{H_1 + U}{H_0 + U} \cdot \frac{Y_0^3}{Y_1^3} \quad (2)$$

式中: H_1 和 H_0 分别为抽样点和靶环中心点距靶环底部的高度; Y_1 和 Y_0 分别为靶环上抽样点到 CsI 晶体上抽样点之间的距离和靶环上中心点到晶体中心点之间的距离。

2.3 角孔径函数

为测量各角度的出射粒子能谱, 必须知道各路望远镜对应的反应角。由于每路望远镜所对应的样品靶区有一定几何尺寸, 中心能量探测器又有一定面积, 因此, 每路望远镜所探测到的从靶出射的带电粒子并非只在一个角度, 而是一个分布, 可用角孔径函数的概念来描述每路望远镜内的反应角分布^[4-5]。角孔径函数的计算方法是, 将靶环与 CsI 晶体分成若干面元, 任两个面元之间的反应角由下式计算:

$$\alpha = \pi - \arccos \frac{\mathbf{X} \cdot \mathbf{Y}}{|\mathbf{X}| \cdot |\mathbf{Y}|}$$

$$\begin{cases} \mathbf{X} = (A + R \cos \beta, R \sin \beta, h + u) \\ \mathbf{Y} = (R \cos \beta - r \cos \gamma, R \sin \beta - r \sin \gamma, h + u) \end{cases} \quad (3)$$

式中: \mathbf{X} 为中子源与样品上抽样点所形成的矢量; \mathbf{Y} 为样品上抽样点与 CsI 晶体上抽样点所形成的矢量; α 为反应角; A 为中子源到 CsI 晶体中心的距离; R 为靶环半径; r 为 CsI 晶体的半径; h 为样品上抽样点到样品底部的距离; u 为样品底部到 CsI 晶体表面的距离。

对每个反应角, 用式(2)计算立体角相对权重, 得到角孔径函数 $W(\alpha)$ 。图 3 所示为实际应用的计算结果。从 1 号望远镜对应的反应角 31° 变化到 16 号望远镜对应的反应角 161° , 角分辨(孔径函数的半高宽)除前两个望远镜的角分辨为 18.5° 和 15.6° 外, 其余在 $11^\circ \sim 15^\circ$ 之间。

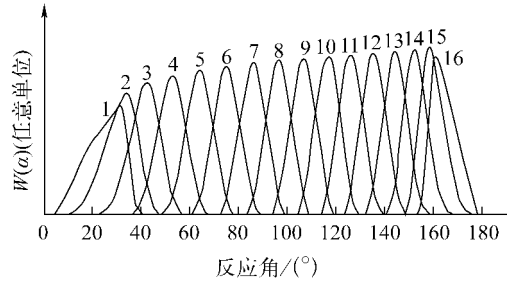


图 3 多路望远镜系统的角孔径函数
Fig. 3 Angular acceptance functions of various telescopes
1~16 为望远镜编号

3 中子注量沿靶环分布模拟

多路望远镜系统可同时测量 16 个反应角。因所使用的样品面积较大, 不同丝所对应的样品靶区与中子源间的距离和角度各不相同, 需要对样品靶环上的中子注量进行刻度。为此, 用蒙特卡罗计算程序 MCNP 通过模拟计算获得中子注量沿靶环的相对分布。

3.1 几何描述

为防止程序跟踪中子到无穷远处, 需增加 1 个假想的将整个靶室和中子源都包括在内的球曲面。图 4 示出了多丝正比室的几何描述, 图中数字是 MCNP 程序输入卡中定义的曲面标号。

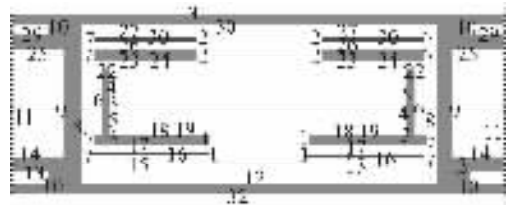


图 4 靶室的几何描述

Fig. 4 Geometry specification of multi-wire chamber

3.2 模拟计算结果

模拟计算时, 坐标原点取在多丝正比室的外壳底板的下底面中心点, 中子源位置为

(0.0 cm, -50.0 cm, 5.05 cm), 参考点位置为 (0.0 cm, -25.0 cm, 5.05 cm)。模拟计算结果列于表 1。

表 1 中子注量相对值沿靶环分布的模拟计算结果

Table 1 Calculated relative neutron fluence along sample

编号	注量相对值	不确定度/%	编号	注量相对值	不确定度/%
1	0.417 94	0.56	9	0.235 66	0.34
2	0.406 78	0.43	10	0.235 83	0.61
3	0.388 08	0.39	11	0.226 43	0.22
4	0.360 82	0.35	12	0.221 13	0.24
5	0.332 28	0.50	13	0.216 59	0.39
6	0.304 15	1.18	14	0.213 75	0.70
7	0.256 72	1.32	15	0.210 01	0.30
8	0.232 10	0.34	16	0.208 50	0.42

因几何安排情况相同, 为方便比较, 将文献 [5] 中实验结果归一到本模拟计算的结果上, 归一点取在相对误差较小的 11 号望远镜上 (图 5)。从图 5 可看出, 除 1 号和 16 号望远镜结果相差较大外, 通过 MCNP 程序模拟计算的结果与文献 [5] 中的实验结果基本一致。

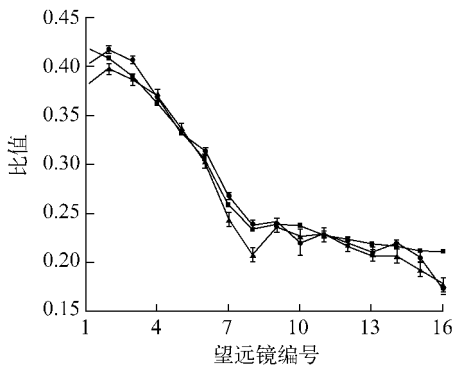


图 5 中子注量相对值沿靶环分布的刻度曲线

Fig. 5 Distribution

of relative neutron fluence along sample

■——MCNP 程序计算值; ●——A 半边所对应靶区的实验值;
▲——B 半边所对应靶区的实验值

4 小结

由于中子引起的出射带电粒子的核反应截面较小, 研究工作较为困难。目前, 中子引起反

应出射带电粒子的双微分截面的实验数据十分缺乏, 且已有的一些数据分歧也较大, 大量核素的此类数据有待实验测量。根据圆柱型多丝正比室多路望远镜系统的特点, 该系统比较适合在此类测量实验中应用, 但其部分系统几何参数无法进行实验测量, 只能通过蒙特卡罗方法计算获得。本文对部分几何参数的确定给出了具体的计算方法, 同时提出了用 MCNP 程序对中子注量沿靶环的分布进行模拟计算, 并将模拟计算结果与文献 [5] 的结果作了比较, 肯定了模拟的可靠性, 从而为该系统在快中子引起反应出射带电粒子的截面测量实验中的应用打下了基础。

参考文献:

- [1] CHARPAK G, BOUCLIER R, BRESSANI T, et al. The use of multi-wire proportional counters to select and localize charged particles [J]. Nucl Instrum Method, 1968, 62:262-264.
- [2] DERNDORFER C, FISCHER R, HILLE P, et al. Investigation of the $^{50}\text{Cr}(n,\alpha)^{47}\text{Ti}$ reaction at $E_n = 14.1$ MeV [J]. Z Phys, 1981, A301: 327-334.
- [3] GRAHAM S, AHMAD M, GRIMES S, et al. Cross sections and spectra for (n, xp) and $(n, x\alpha)$ reactions on ^{58}Ni and ^{60}Ni at energies of 9.4 and 11 MeV [J]. Nucl Sci Eng, 1987, 95:60-69.
- [4] DERNDORFER C, FISCHER R, HILLE P, et al. Application of a multi-wire proportional chamber for the measurement of differential $(n, \text{charged particle})$ cross sections [J]. Nucl Instrum Method, 1981, 187:423-433.
- [5] 叶邦角. 用多路望远镜系统测量 $E_n = 14.6$ MeV 的 $^{93}\text{Nb}(n, xp)$ 核反应的双微分截面 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 1992.
- [6] 叶邦角, 范为, 范扬眉, 等. 一个 CsI(Tl) 探测器脉冲形状分辨 p, α 和 γ 的电路 [J]. 核电子学与探测器技术, 1994, 14(3):129-134.
YE Bangjiao, FAN Wei, FAN Yangmei, et al. A circuit based on CsI(Tl) pulse shape discrimination to identify proton, alpha and gamma [J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 1994, 14(3):129-134 (in Chinese).