

# 80 MeV 电子打靶次级中子产额 和角分布的测量

吴靖民 李建平 雷传蓐 刘列夫

(中国科学院高能物理研究所)

## 摘 要

本实验采用包有慢化体的铀活化探测器测量 80 MeV 电子打铅厚靶后次级中子的产额和角分布。测得次级中子按各向同性分布,中子产额为  $(2.20 \pm 0.13) \times 10^{12} \text{ n/s} \cdot \text{kW}$ , 与理论计算结果相符。

本文还就铀活化探测器是否适用于电子直线加速器中子场的测量问题进行了讨论,认为在电子能量小于 100 MeV 时该方法是可行的。

在电子直线加速器中,电子打靶时与靶原子核非弹性碰撞产生韧致辐射,进而由光致蜕变产生中子。了解次级中子的产额和角分布,在核物理实验中有重要意义,从辐射防护观点看,对于估计加速器周围部件、仪器设备、冷却水、空气的活化,以及相应的防护措施是必要的。此外,本文所采用的方法,原则上对测量 100 MeV 以下电子直线加速器中子场,以及估计低能电子加速器的中子污染问题是适用的。

本实验是在高能物理所 90 MeV 电子直线加速器上进行的。运行时电子能量为 81 MeV,束流脉冲强度约 300 mA,脉冲宽度 2.5 ns,重复频率 50 Hz。电子打靶分两种情况:一种是束流功率为  $3.12 \times 10^{-3} \text{ kW}$ ,电子沿束流  $0^\circ$  方向打入法拉第筒(由 9 cm 厚的铝和 13 cm 厚的铅组成);另一种是束流功率为  $3.04 \times 10^{-3} \text{ kW}$ ,电子经过偏转磁铁,与束流线成  $90^\circ$  方向打铅靶(铅厚 15 cm)。

## 一、测量方法和结果

本实验采用铀活化探测器测量次级中子,测量原理和方法详见文献[4]。测量时铀探测器距靶 100 cm,并与靶在同一束流水平面上,分别与束流线成  $0^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $60^\circ$  和  $90^\circ$ ,照射时间  $t_i$  为 1 小时,测量计数时间  $t_c$  为 1 分钟。

在两种打靶情况下,铀箔的测量计数列于表 1 中(括号内为统计涨落),相应的中子注量率  $\phi$  列于表 1 和图 1 中。从图中可以看到,次级中子接近于各向同性分布,并由此可求得单位束流功率下,电子打靶的中子产额:

$$Y = \frac{4\pi d^2 \phi_n}{P} \quad (\text{n/s} \cdot \text{kW})$$

式中  $P$  为电子束流功率 (kW),  $d$  为探测器至靶的距离 (cm).

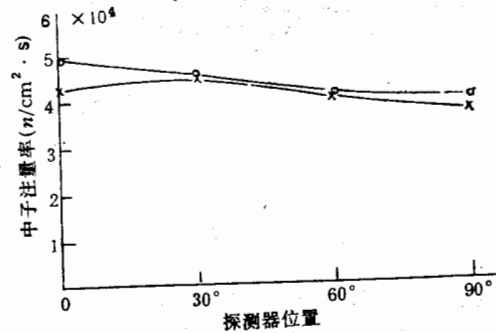


图 1 电子打靶中子注量率分布  
○ 情况 1; × 情况 2

表 1 次级中子测量结果

运行情况	0° 打靶				90° 打靶			
	1	2	3	4	5	6	7	8
铝箔编号								
铝箔质量 (g)	0.681	0.701	0.735	0.748	0.721	0.710	0.785	0.769
铝箔位置	0°	30°	60°	90°	0°	30°	60°	90°
衰变时间(分)	25	29	33	38	5	9	13	17
测量计数 (cpm)	$4.414 \times 10^4$ (±210)	$4.087 \times 10^4$ (±202)	$3.757 \times 10^4$ (±194)	$3.695 \times 10^4$ (±192)	$5.228 \times 10^4$ (±229)	$5.160 \times 10^4$ (±227)	$5.112 \times 10^4$ (±226)	$4.642 \times 10^4$ (±215)
中子注量率 (n/cm²·s)	$4.888 \times 10^4$ (±221)	$4.624 \times 10^4$ (±210)	$4.274 \times 10^4$ (±207)	$4.356 \times 10^4$ (±209)	$4.234 \times 10^4$ (±206)	$4.466 \times 10^4$ (±211)	$4.211 \times 10^4$ (±205)	$4.111 \times 10^4$ (±203)
平均中子注量率 (n/cm²·s)	$4.535 \times 10^4 (\pm 213)$				$4.256 \times 10^4 (\pm 206)$			

## 二、测量值的修正

影响测量值的因素主要有三个: 靶的自吸收、靶室散射和读数装置的定标系数。

### 1. 靶的自吸收

电子打靶后次级中子产额与靶的厚度有关。文献[1]给出了相互间的关系曲线, 当靶厚度  $x$  大于电子辐射长度  $x_0$  的 10 倍时, 其相对产额最大。本实验条件下,  $x/x_0$  远大于 10, 次级中子因靶的自吸收而减弱, 铅对巨共振中子的减弱系数  $\lambda_n = 0.04 \text{ cm}^{-1[2]}$ , 作为一次近似, 取自吸收修正因子  $\eta_1$  为

$$\eta_1 = e^{0.04(13-5.6)} = 1.34 \quad (\text{情况 1})$$

$$\eta_1 = e^{0.04(15-5.6)} = 1.46 \quad (\text{情况 2})$$

铅的

成都

关。

100

的中

正因

求得

讨论  
电子

MeV

降低

中子

的影

铅的辐射长度为 0.56 cm, 考虑到电子微分径迹长度的分布, 靶的实际自吸收要更大些。

## 2. 靶室的散射

靶室的空间是有限的, 中子经过靶室内地面、天棚、墙壁和加速器设备等引起散射, 形成额外的贡献, 其大小与靶和探测器之间的距离, 以及它们与地面或天棚之间的距离有关。在本实验条件下, 靶与探测器间距离为 100 cm, 它们距地面和天棚分别为 120 cm 和 100 cm, 文献[3]给出其散射贡献分别为 6% 和 8%, 合计为 14%, 取散射修正系数  $\eta_2$  为

$$\eta_2 = \frac{1}{(1 + 14\%)} = 0.877$$

实际上, 由于中子的多次散射, 贡献会更大些。散射对中子的贡献和靶的自吸收引起的中子减弱, 在一定程度上互相弥补。

## 3. 读数装置的定标系数

读数装置的定标系数为  $3.4 \pm 0.2$  ( $\text{cpm} \cdot \text{g}^{-1}$ ) [ $\text{n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ] $^{-1}$ , 引起测量误差的修正因子  $\eta_3$  为:  $\eta_3 = 1 \pm 0.059$

经修正后的中子产额为

$$Y_0 = (2.15 \pm 0.13) \times 10^{12} \text{ (n/s} \cdot \text{kW)} \text{ (情况 1)}$$

$$Y_0 = (2.25 \pm 0.13) \times 10^{12} \text{ (n/s} \cdot \text{kW)} \text{ (情况 2)}$$

求得中子的平均产额为  $(2.20 \pm 0.13) \times 10^{12}$  ( $\text{n/s} \cdot \text{kW}$ )。

# 三、讨 论

## 1. 铟活化法对电子加速器的适用性

文献[4]对于铟活化探测器测量 30 MeV 电子直线加速器次级中子的问题作了研究讨论, 认为它是有效的。但是, 随着加速器能量的提高, 可能出现新的问题, 现以 100 MeV 电子直线加速器为例, 分析讨论。

### (1) 能量响应问题。

直径 12.5 cm 的慢化体可以有效地慢化能量从几个 keV 到 15 MeV 的中子<sup>[5]</sup>。100 MeV 电子打靶可产生能量大于 15 MeV 的中子, 随着中子能量的提高, 慢化体的慢化能力降低, 从而降低探测器的探测效率。但是, 100 MeV 电子打靶后主要产生的仍然是巨共振中子<sup>[5]</sup>, 其平均能量为几个 MeV, 大于 15 MeV 的中子只占 10% 左右, 所以, 对能量响应的影响是很小的。

### (2) 对 $n, \gamma$ 的分辨问题

电子加速器的辐射场成分以韧致辐射为主, 当光子能量超过  $\text{In}(\gamma, n)$  反应阈值 ( $K_n = 9.03 \text{ MeV}$ ) 时, 产生  $^{115}\text{In}(\gamma, n)^{114\text{m}}\text{In}$  光核反应, 文献[4]讨论了由于铟的  $(\gamma, n)$  与  $(n, \gamma)$  反应截面不同, 以及  $^{114\text{m}}\text{In}$  和  $^{116\text{m}}\text{In}$  半衰期不同, 两者产生活度之比为  $10^{-8}$ 。对 100 MeV 电子加速器, 光子注量率比中子强  $10^4$  ( $0^\circ$  方向)  $\sim 10^2$  ( $90^\circ$  方向), 此外, 超过  $\text{In}(\gamma, n)$  反应阈值的光子占总光子数的 50%<sup>[5]</sup>, 所以,  $^{114\text{m}}\text{In}$  与  $^{116\text{m}}\text{In}$  活度之比为  $5 \times 10^{-3}$

8  
0.769  
90°  
17  
 $142 \times 10^4$   
 $\pm 215$   
 $11 \times 10^4$   
 $\pm 203$

, 当靶  
远大于  
作为

( $0^\circ$  方向)  $\sim 5 \times 10^{-5}$  ( $90^\circ$  方向), 亦即,  $^{115}\text{In}$  由于中子作用产生的  $\beta$  发射率要比光子产生的大 2—4 个数量级。可见, 铟活化探测器对  $\gamma$  射线是不灵敏的, 具有较高的  $n$ 、 $\gamma$  分辨率。此外, 辐射场中  $\gamma$  光子在探测器慢化体中产生的中子, 同辐射场本身的中子相比是很少的。因此, 本方法可适用于 100 MeV 电子直线加速器中的中子测量。

## 2. 测量与理论计算的比较

已有不少学者对电子打靶中子产额问题作了研究<sup>[1,6]</sup>, 近年来, W. P. Swanson 根据电磁级联理论, 并在光子微分径迹长度分布的基础上, 进一步考虑了光子谱的分布, 以光子的固有谱代替了原来的矩形谱, 作了二次近似计算<sup>[7]</sup>, 求得电子轰击不同靶材料时的中子产额, 同时还给出了电子能量大于 60 MeV 时, 某些高  $z$  材料中子产额的经验公式:

$$Y = 1.21 \times 10^{12} z^{0.66 \pm 0.05} \quad (\text{n/s} \cdot \text{kW})$$

对于铅 ( $z = 82$ ), 则:  $Y = (2.22 \pm 0.15) \times 10^{12} (\text{n/s} \cdot \text{kW})$ 。

本测量结果  $(2.20 \pm 0.13) \times 10^{12} (\text{n} \cdot / \text{s} \cdot \text{kW})$  与 Swanson 计算结果相符。但是, 两者符合得极好却属偶然, 因为对测量值只作了一次近似修正, 更何况实验条件的不同, 有时会有较大的差异。

## 参 考 文 献

- [1] W. P. Swanson, Radiological Safety Aspects of the Operation of Electron Linear Accelerators, IAEA-188 VIENNA 1979.
- [2] J. H. Poole, Shielding for the SRS Storage Ring, DL/SCI/P-199A 1979.
- [3] F. H. 阿蒂克斯, 辐射剂量学, 第三卷(下)原子能出版社, 1981.
- [4] 李建平等, 高能物理与核物理, 11(1987), 314.
- [5] H. W. 帕特森, 加速器保健物理, 原子能出版社, 1983.
- [6] W. P. Swanson, Health Physics, Vol. 35(Aug.) 1978, 353.
- [7] W. P. Swanson, Health Physics, Vol. 37(Sept.) 1979, 347.

# YIELD AND ANGULAR DISTRIBUTION MEASUREMENT OF NEUTRON RELEASED BY 80 MeV ELECTRON INCIDENT ON TARGET

WU JING-MIN LI JIAN-PING LEI ZHONG-HENG LIU LIE-FU

(Institute of High Energy Physics, Academia Sinica)

## ABSTRACT

Measurements of secondary neutron yields and angular distribution released by 80 MeV electron incident on Pb thick target with moderated Indium foils are described. The angular distribution of neutron is isotropic and the yield is  $(2.20 \pm 0.13) \times 10^{12} \text{n/s} \cdot \text{kW}$ , these results agree with that of the theoretical calculation.

The possibility of using moderated Indium foil to measure the neutron field around the electron linear accelerator with energy less than 100 MeV is also discussed, and the answer is positive.

目的  
电荷  
成,  
数管  
流量  
变化

为直  
曲线  
量电  
大,  
所庄  
灵敏  
器是  
261  
冲幅