

文章编号: 1000-6931(2001)06-0547-04

## 串列加速器上扰动角关联探针核 产生截面测量

徐勇军, 王 荣, 于伟翔, 韩晓刚, 崔保群, 秦久昌, 许国基, 朱升云

(中国原子能科学研究院 核物理研究所, 北京 102413)

摘要: 在中国原子能科学研究院 HF-13 串列加速器上通过  $^{63}\text{Cu}(p, 2n)^{62}\text{Zn}$ 、 $\text{Cd}(p, xn)^{111}\text{In}$  和  $^{186}\text{W}(d, p)^{187}\text{W}$  核反应产生  $^{62}\text{Zn}$ 、 $^{62}\text{Cu}$ 、 $^{187}\text{W}$ 、 $^{187}\text{Re}$  和  $^{111}\text{In}$ 、 $^{111}\text{Cd}$  扰动角关联探针核, 测量了生成这些探针核的核反应截面。

关键词: 探针核; 产生截面; 扰动角关联

中图分类号: O571.413 文献标识码: A

扰动角关联是一种原子尺度的微观核物理研究方法, 通过测量放射性杂质原子或探针核的衰变参数得到作用在其上的超精细相互作用, 获得原子核的核矩以及原子核周围环境等信息。它具有灵敏度高、准确性好等特点, 在材料科学、生命科学、核物理和化学等方面得到了广泛应用<sup>[1]</sup>。扰动角关联探针核需满足一定的要求, 自然界中不存在能使用的天然放射性探针核, 必须通过核反应等方法来产生。扰动角关联探针核是由放射性母核衰变而成, 母核半衰期在几个小时到几十天最为适宜, 半衰期太长难以获得足够的放射性活度, 太短又不便于测量; 扰动角关联探针核应有级联衰变, 且级联衰变的中间态有一定的寿命, 如为 ns ~  $\mu\text{s}$  量级; 探针核衰变必须有明显的各向异性, 以测量超精细相互作用。因此, 满足上述要求的探针核很少, 寻找和合成新的探针核对发展和开拓扰动角关联研究有重要价值。

本工作通过  $^{63}\text{Cu}(p, 2n)^{62}\text{Zn}$ 、 $\text{Cd}(p, xn)^{111}\text{In}$  和  $^{186}\text{W}(d, p)^{187}\text{W}$  反应分别获得  $^{62}\text{Zn}$ 、 $^{62}\text{Cu}$ 、 $^{111}\text{In}$ 、 $^{111}\text{Cd}$  和  $^{187}\text{W}$ 、 $^{187}\text{Re}$  探针核, 并测量它们的核反应截面和进行扰动角关联测量。

### 1 实验

放射性探针核的母核  $^{62}\text{Zn}$ 、 $^{111}\text{In}$  和  $^{187}\text{W}$  分别由  $^{63}\text{Cu}(p, 2n)^{62}\text{Zn}$ 、 $\text{Cd}(p, xn)^{111}\text{In}$  和  $^{186}\text{W}(d, p)^{187}\text{W}$  反应产生。实验采用  $\phi 22\text{ mm}$  的金属铜、镉和钨靶, 质量厚度分别为 16.9、

收稿日期: 2000-09-13; 修回日期: 2001-02-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(19835050, 19935040)

作者简介: 徐勇军(1973—), 男, 四川大英人, 在读硕士研究生, 实验核物理专业

26.1、38.0 mg/cm<sup>2</sup>。实验在中国原子能科学研究院 HF-13 串列加速器上进行。入射粒子束斑直径为4 mm,入射粒子束流强度由束流积分仪测量。对<sup>63</sup>Cu(p,2n)<sup>62</sup>Zn反应,入射质子平均能量为22.9 MeV,流强650 nA,总入射质子数 $1.803 \times 10^{16}$ ;对Cd(p,xn)<sup>111</sup>In反应,入射质子平均能量为16.9 MeV,流强150 nA,总入射质子数 $1.357 \times 10^{16}$ ;对<sup>186</sup>W(d,p)<sup>187</sup>W反应,入射氘束平均能量12.6 MeV,流强700 nA,总入射氘核数 $3.154 \times 10^{16}$ 。辐照后的样品经一定时间冷却后进行放射性活度测量。活度测量使用高纯锗探测器,对<sup>60</sup>Co的1.332 MeV 射线的能量分辨率为2.1 keV。实验中记录的特征 射线的计数不低于 $2 \times 10^4$ 。

## 2 结果和讨论

用探测器记录到的特征 射线计数由下式计算核反应截面:

$$N(t_0) = \frac{N_A}{M} \int_0^{t_0} I(t) \exp(-\lambda(t_0 - t)) dt \quad (1)$$

$$N = N(t_0) \exp(-\lambda(t_1 - t_0)) (1 - \exp(-\lambda(t_2 - t_1))) f_d \frac{1}{(1 + \epsilon)} \quad (2)$$

式中: $t_0$ 为辐照时间; $N(t_0)$ 是辐照结束时生成的放射性核数; $I(t)$ 为束流强度; $\rho$ 为样品面密度; $f$ 为同位素丰度; $M$ 为摩尔质量; $\lambda$ 是生成放射性核素的衰变常量; $N_A$ 为阿佛伽德罗常数; $t_1 - t_0$ 是冷却时间; $t_2 - t_1$ 是放射性活度测量时间; $\epsilon$ 为探测效率; $f_d$ 是分支比; $1/(1 + \epsilon)$ 为发射 射线的几率, $\epsilon$ 为内转换系数。

实验测量误差主要包括:探测器效率误差1.5%,靶质量和不均匀性误差2.5%,统计误差1.5%,入射束流测量误差1.5%, 射线强度和衰变参数等的误差2.5%,总误差为4.4%。

表1 <sup>62</sup>Zn、<sup>187</sup>W和<sup>111</sup>In的核反应产生截面

Table 1 The measured cross sections for production of <sup>62</sup>Zn, <sup>187</sup>W and <sup>111</sup>In

靶材料	质量厚度/mg cm <sup>-2</sup>	核反应	入射能量/MeV	10 <sup>27</sup> /cm <sup>2</sup>
铜	16.9	<sup>63</sup> Cu(p,2n) <sup>62</sup> Zn	22.9 ±0.1	101 ±4
镉	38.0	Cd(p,xn) <sup>111</sup> In	16.9 ±0.4	230 ±10
钨	26.1	<sup>186</sup> W(d,p) <sup>187</sup> W	12.6 ±0.4	212 ±9

表1列出了实验测量的上述几个反应的截面值及误差。在本工作前,国内外对<sup>62</sup>Zn、<sup>187</sup>W和<sup>111</sup>In的产生截面也有测量,但分歧较大。以往的测量大多采用迭靶技术,误差较大。本工作采用薄靶方法,测量的数据较为可靠。

Andelin<sup>[2]</sup>和陶振兰等<sup>[3]</sup>在1~16 MeV能区测量了<sup>186</sup>W(d,p)<sup>187</sup>W反应截面,在12.6 MeV时的截面值分别为 $2.67 \times 10^{-25}$  cm<sup>2</sup>和 $1.99 \times 10^{-25}$  cm<sup>2</sup>,两家数据分歧较大。本工作的结果与陶振兰的数据在误差范围内一致。

Tarkanyi<sup>[4]</sup>、Skakun<sup>[5]</sup>、Marten<sup>[6]</sup>和Otozai等<sup>[7]</sup>采用浓缩同位素靶测量了<sup>111</sup>Cd(p,n)<sup>111</sup>In和<sup>112</sup>Cd(p,2n)<sup>111</sup>In的反应截面。在16.9 MeV时,Skakun和Otozai测量的<sup>112</sup>Cd(p,2n)<sup>111</sup>In的截面值约为 $8.20 \times 10^{-25}$  cm<sup>2</sup>,Tarkanyi、Skakun和Marten测量的<sup>111</sup>Cd(p,n)<sup>111</sup>In的截面值约为 $1.40 \times 10^{-25}$  cm<sup>2</sup>。Tarkanyi给出的<sup>112</sup>Cd(p,2n)<sup>111</sup>In激发曲线在约16 MeV和约20 MeV

处出现 2 个峰,约 20 MeV 处的峰与 Skakun 和 Otozai 的结果一致。这种蒸发型反应的激发曲线一般都是单峰,Tarkanyi 在约 16 MeV 附近的峰是不合理的。Tarkanyi 在 16.9 MeV 下测量的  $^{112}\text{Cd}(p,2n)^{111}\text{In}$  的截面值约为  $1.014 \times 10^{-22} \text{ cm}^2$ ,也明显偏高。迄今,尚未见到用天然 Cd 测量产生  $^{111}\text{In}$  的截面。本工作采用了天然 Cd,在 16.9 MeV 下测量了  $^{111}\text{In}$  的产生截面,测量值为  $2.30 \times 10^{-25} \text{ cm}^2$ 。

由  $^{63}\text{Cu}(p,2n)^{62}\text{Zn}$  反应产生  $^{62}\text{Zn}$  的截面测量值比较分散。在 22.9 MeV 时,Kopecky<sup>[8]</sup>的测量值为  $6.5 \times 10^{-24} \text{ cm}^2$ ,Ghoshal<sup>[9]</sup>的为  $2.00 \times 10^{-25} \text{ cm}^2$ ,Meadows<sup>[10]</sup>的  $1.19 \times 10^{-25} \text{ cm}^2$ ,Greene 等<sup>[11]</sup>的为  $8.7 \times 10^{-24} \text{ cm}^2$ ,Grutter<sup>[12]</sup>的为  $7.5 \times 10^{-24} \text{ cm}^2$ ,Williams 等<sup>[13]</sup>的为  $1.35 \times 10^{-25} \text{ cm}^2$ 。本结果在误差范围内与 Greene 和 Meadows 的符合。

另外,对在 HF-13 串列加速器上产生的  $^{62}\text{Zn}/^{62}\text{Cu}$ 、 $^{111}\text{In}/^{111}\text{Cd}$  和  $^{187}\text{W}/^{187}\text{Re}$  扰动角关联探针核进行了扰动角关联测量,取得了满意的结果。测量中使用的探针核的衰变参数<sup>[14]</sup>列于表 2。

表 2 扰动角关联探针核  $^{62}\text{Zn}/^{62}\text{Cu}$ 、 $^{187}\text{W}/^{187}\text{Re}$  和  $^{111}\text{In}/^{111}\text{Cd}$  的衰变参数  
Table 2 Decay parameters for  $^{62}\text{Zn}/^{62}\text{Cu}$ ,  $^{187}\text{W}/^{187}\text{Re}$  and  $^{111}\text{In}/^{111}\text{Cd}$   
as probe nuclei of perturbed angular correlation

探针核	I		I		母核半衰期/h	子核中间态 平均寿命/ns	I
	E/MeV	强度	E/MeV	强度			
$^{62}\text{Zn}/^{62}\text{Cu}$	0.597	0.26	0.041	0.26	9.2	6.6	2 <sup>+</sup>
$^{187}\text{W}/^{187}\text{Re}$	0.480	0.22	0.072	0.11	23.7	801.3	9/2 <sup>+</sup>
$^{111}\text{In}/^{111}\text{Cd}$	0.171	0.90	0.245	0.94	67.3	122.7	5/2 <sup>+</sup>

### 参考文献:

- [1] Christiansen J. Hyperfine Interactions of Radioactive Nuclei[M]. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo, 1983. 45~280.
- [2] Andelin RL. Cross Section Measurement for the Reaction  $^{186}\text{W}(d,p)^{187}\text{W}$  at Energy From 1 to 16 MeV: LA-2880[R]. USA: Los Alamos National Laboratory, 1963.
- [3] 陶振兰,朱福英,裘惠源.  $^{182\sim 186}\text{W}(d,2n)^{182\sim 186}\text{Re}$  和  $^{186}\text{W}(d,p)^{187}\text{W}$  反应的激发函数[J]. 原子核物理, 1981,3:242~248.
- [4] Tarkanyi F, Szelecsenyi F, Kopecky P, et al. Cross Section of Proton Induced Nuclear Reaction on Enriched  $^{111}\text{Cd}$  and  $^{112}\text{Cd}$  for the Production of  $^{111}\text{In}$  for Use in Nuclear Medicine[J]. Appl Radiat Isot, 1994, 45:239~249.
- [5] Skakun EA, Klyucharev AP, Rakivnenko YN, et al. Excitation Functions of (p,n) and (p,2n) Reactions on Cadmium Isotopes[J]. Izv Akad Nauk SSSR, Ser Fiz, 1975, 39:24~33.
- [6] Marten M, Schuring A, Scobel W, et al. Preequilibrium Neutron Emission in  $^{109}\text{Ag}(^3\text{He},xn)$  and  $^{111}\text{Cd}(p,n)$  Reactions[J]. Z Phys, 1985, A322:93~103.
- [7] Otozai K, Kume S, Mito A, et al. Excitation Functions for the Reactions Induced by Protons on Cd up to 37 MeV [J]. Nucl Phys, 1966, 80: 355~348.
- [8] Kopecky P. Proton Beam Monitoring via the  $\text{Cu}(p,x)^{58}\text{Co}$ ,  $^{63}\text{Cu}(p,2n)^{62}\text{Zn}$  and  $^{65}\text{Cu}(p,n)^{65}\text{Zn}$  Reactions in Copper[J]. Int J Appl Radiat Isot, 1985, 36:657~661.

- [9] Ghoshal SN. An Experimental Verification of the Theory of Compound Nucleus[J]. Phys Rev, 1950, 80: 939 ~ 942.
- [10] Meadows JW. Excitation Functions for Proton-induced Reactions With Copper[J]. Phys Rev, 1953, 91: 885 ~ 889.
- [11] Greene MW, Lebowitz E. Proton Reactions With Copper for Auxiliary Cyclotron Beam Monitoring[J]. Int J Appl Radiat Isot, 1972, 23: 342 ~ 344.
- [12] Grutter A. Excitation Functions for Radioactive Isotopes Produced by Proton Bombardment of Cu and Al in the Energy Range of 16 to 70 MeV[J]. Nucl Phys, 1982, A383: 98 ~ 108.
- [13] Williams IR, Fulmer CB. Excitation Functions for Radioactive Isotopes Produced by Protons Below 60 MeV on Al, Fe, and Cu[J]. Phys Rev, 1967, 162: 1 055 ~ 1 061.
- [14] Firestone RB, Shirley VS. Table of Isotopes[M]. New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore: A Wiley-Interscience Publication, John Wiley & Sons, Inc, 1996. 291, 876.

## Cross Section Measurements for Production of Perturbed Angular Correlation Probe Nuclei at HF-13 Tandem Accelerator

XU Yong-jun, WANG Rong, YU Wei-xiang, HAN Xiao-gang,  
CUI Bao-qun, QIN Jiu-chang, XU Guo-ji, ZHU Sheng-yun

*(Department of Nuclear Physics, China Institute of Atomic Energy,  
P. O. Box 275-50, Beijing 102413, China)*

**Abstract:** The probe nuclei  $^{62}\text{Zn}/^{62}\text{Cu}$ ,  $^{187}\text{W}/^{187}\text{Re}$  and  $^{111}\text{In}/^{111}\text{Cd}$  for perturbed angular correlation studies are produced at the CIAE HF-13 tandem accelerator through the nuclear reactions  $^{63}\text{Cu}(p, 2n)^{62}\text{Zn}$ ,  $\text{Cd}(p, xn)^{111}\text{In}$  and  $^{186}\text{W}(d, p)^{187}\text{W}$ . The production cross sections of these nuclei are measured.

**Key words:** probe nuclei; production cross section; perturbed angular correlation