

^{248}Cm 和 ^{252}Cf 自发裂变瞬发中子谱测量*

包尚联 刘文龙 温琛林 樊铁栓

(北京大学重离子物理研究所 北京 100871)

巴登柯夫 马尧罗夫

(镭研究所 圣彼得堡 俄罗斯 194021)

摘要 用飞行时间方法测量 200keV—12MeV 能区内 ^{248}Cm 和 ^{252}Cf 自发裂变瞬发中子谱,以国际原子能机构推荐的 ^{252}Cf 自发裂变瞬发中子谱为标准,可以免去探测器效率刻度的问题并消除系统误差,提高测量精度. 实验用一个微型电离室作为裂变碎片探测器,两个硅晶体中子探测器测量中子及一套基于微机的 CAMAC 系统组成的飞行时间测量谱仪,在一个空旷的测量室内完成的. 飞行距离分别为 32.50 和 100cm,经过对数据的处理和分析给出了 200keV—12MeV 的中子能区内的实验数据. 用 Maxwell 分布对实验数据进行拟合,得到的核温度为 $(1.401 \pm 0.006)\text{MeV}$.

关键词 自发裂变 瞬发中子谱 微型电离室

1 引言

到目前为止,世界上由于使用裂变反应堆产生核能源已经累积了大量的以长寿命次要锕系(除了 ^{239}Pu 等主要核燃料以外的长寿命锕系元素核)元素为主要内容的核废料. 如何处理这些核废料是世界核能大国都在解决的重大环境和安全课题,各国也都在寻找新的干净核能源产生的技术路线. 已经提出的一个方案是用加速器驱动亚临界核反应堆装置进行核发电的技术路线. 这种装置可以把那些核废料添加到核燃料棒中去,使之参加核燃料的再循环而被消耗掉. 为此,需要对原子核反应堆中产生的长寿命次要锕系元素的物理性质进行深入、系统的研究和数据的测量,为这些装置的设计提供输入数据. 这里所说的长寿命次要锕系元素,半寿命在 10^5a 以上,总共大约有 20 多个核素,是当前核废料中的主要成分. 在实验测量方面,最大的困难是很难得到这些锕系元素的高纯同位素样品. 世界上目前只有美国和俄罗斯可以生产这些纯度比较高的同位素样品. 本项目的 ^{248}Cm 裂变源样品就是俄罗斯镭研究所提供的.

裂变瞬发中子是裂变过程中许多信息的来源,诸如裂变的总激发能,碎片的激发能和

2000-01-12 收稿

* 国家自然科学基金(19585001)和外国专家局专项基金资助

断裂时刻的形变能,形状达到平衡时的裂变碎片的核黏度和一系列其它重要核性质参数的来源. 裂变核是超形变核,它的核结构和核反应机制有特殊的规律. 裂变产生的碎片、中子和 γ 射线携带的有关核结构及其核子相互作用的信息,可以用于研究超形变核和多中子核的性质,其中几乎所有的碎片都是远离 β 稳定线的. 对这些问题的研究是低能核物理领域目前的前沿课题.

本项目的主要目的是测量 ^{248}Cm 自发裂变瞬发中子谱,这个核是核反应堆内长寿命核废料中比较典型的一个核素,加上 ^{248}Cm 本身可能的广泛应用前景^[1],及自发裂变中子谱实验数据与蒸发模型计算之间的分歧^[2],对 ^{248}Cm 自发裂变瞬发中子谱的测量还开展得不够多等原因,开展这方面的测量在科学和应用方面有重要价值. 为了减少测量中的系统误差,实验采用相对测量,即用同样大小、一起制作的两个微型电离室的阳极上真空蒸发源斑同样大小的 ^{248}Cm 和 ^{252}Cf 裂变碎片源. 把这两个源在同一个测量系统中交替进行测量,并在 32, 50 和 100cm³ 个飞行距离上进行测量,通过多次测量求平均,得到 ^{248}Cm 与 ^{252}Cf 能谱相应点的计数比值. 因为 ^{252}Cf 的自发裂变瞬发中子谱早已经被国际原子能机构确定为标准中子谱^[3],这就可以消除探测器效率刻度等造成的系统误差的影响,可以大大提高测量的精度.

2 实验测量

实验是在北京大学重离子物理研究所裂变测量室一个长宽高分别为 5.5, 3.5 和 3.5m 的实验室内进行的. 同位素源和探测器被悬挂在该室的中间,以便减少室散射. 在这种环境下,测量的中子能区范围内, γ 射线和快中子的室散射引起的计数可以忽略不计^[4]. 实验中使用的裂变碎片探测器是一个微型裂变电离室,其结构如图 1 所示. ^{248}Cm 和 ^{252}Cf 源是直径为 3mm 的真空蒸发源,用 $35\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 的碳膜覆盖,以防止裂变碎片的反冲. ^{252}Cf 源的纯度为 99.9%,而 ^{248}Cm 的纯度大约为 95.2%,其中主要可裂变物质是: ^{244}Cm 为 0.04%, ^{245}Cm 为 0.2%, ^{246}Cm 为 4.5%. 我们使用的 ^{248}Cm 源是目前世界可以得到的最纯的同位素源. 在实验进行期间, ^{248}Cm 和 ^{252}Cf 源的强度分别为每分钟 5.16×10^3 和 2.1×10^5 个裂变数. 电离室内阳极和阴极的间距大约 2mm. 距离设置的原则是保证裂变碎片能量能够完全存积在电离气体中,而 α 粒子的能量只有一部分损失在电离气体内,这样可以加大裂变碎片和 α 粒子事件在能谱上的间隔,以便设置系统测量的能量阈值,在保证裂变碎片 100% 探测效率的基础上,减少 α 堆垒效应的影响. 对 ^{248}Cm 来说, α 和裂变事件的比值大约为 10.6 (^{248}Cm 自发裂变半衰期为 4.2×10^6 a, 而 α 衰变的半衰期为 4.0×10^5 a)^[5]. 相对 ^{252}Cf 的这个比值为 32.5 来说, α 堆垒不是测量中的主要问题. 电离室内使用的工作气体是 CH_4 和 Ar 的混合气体 (CH_4 为 95%)^[4], 因为 CH_4 的时间性能比较好, Ar 气可以提高测量信号的幅度.

系统测量中的中子探测器是 $\phi 50 \times 30\text{mm}$ 的苾晶体. 苾晶体的上升时间很快,可以提高飞行时间系统的时间分辨率. 测量时,把裂变电离室和中子探测器按照如图 2 所示的几何结构悬挂在离地面 200cm 的空间. 有关参数如表 1 所示,表中夹角 α_1 和 α_2 分别为裂变源平面的切线和两个中子探测器的夹角. 这些角度在不同飞行距离时是不同的. 为了

考虑中子角分布对裂变瞬发中子谱的影响,在 32cm 飞行距离上,把 α_1 和 α_2 改变到 20° 和 90° 方向,实验结果表明,在不同角度上测得的裂变瞬发中子谱形状在统计误差范围内没有变化. 在以上实验测量条件下,每个飞行距离上的数据都是多次重复测量的结果.

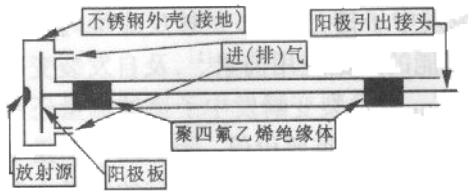


图 1 微型电离室结构示意图

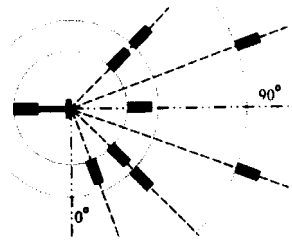


图 2 中子探测器空间位置分布

表 1 实验测量的几何参数

被测同位素	飞行距离(cm)	α_1	α_2	实验测量次数
^{252}Cf	32	45	135	6
	32	20	90	3
	50	45	135	5
	100	70	110	4
^{248}Cm	32	45	135	4
	32	20	90	2
	50	45	135	5
	100	70	110	7

实验测量的电子学系统详见参考文献[6]. 测量系统的主机是一个基于微机的 CAMAC 系统,其中时间-幅度转换(TAE)插件是专门设计的. CAMAC 控制器、相应的计算机接口电路和微机都是通用的. 系统的最大优点是简单可靠,飞行时间谱仪的时间分辨率高,有关系统硬件的详细描述见参考文献[7]. 中子和 γ 的分辨是利用中子和 γ 在中子探测器中的打拿极信号和阳极信号的关联特性,通过软件动态地算出一条分辨曲线,而不是通过调整电子线路来实现的,具有很好的 n- γ 分辨能力(图 3). 有关系统软件的详细材料请看参考文献[6].

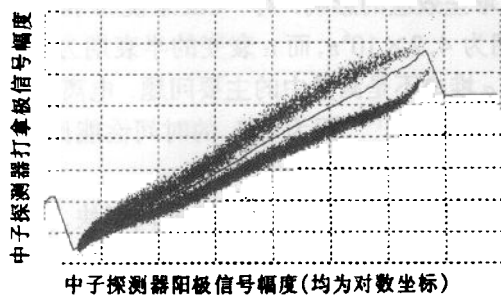


图 3 n- γ 分辨曲线

系统允许多维数据同时采集按照事件记录硬盘上,不同维数据之间可以任意组合以便进行一维或二维显示.

该测量系统的另一个优点是用软件设置的动态的时间-幅度校正. TAE 对时间测量用的起始信号和停止信号由专门的前沿定时电路实现. 采用前沿定时是因为输入信号幅度有比较大的动态范围,在前沿定时中,信号幅度的变化会

引起定时的不确定性,影响系统的时间分辨率.为此,系统用软件方法动态地测量时间晃动量,然后进行校正.这种方法一方面简化了电路,降低了成本,可以得到比恒定时更为理想的定时效果.另一方面软件的动态本底窗口的设置,可以大大节省用硬件设置窗口的费用,同时极大地减少了本底数据,为离线处理打好基础.

3 数据处理和结果

为了保证实验数据的可靠性,实验数据的处理首先是把同一飞行距离、同一角度上的实验数据,但是不同时间分开测量得到的飞行时间谱,按照瞬发 γ 峰的位置平移到相同的位置.根据瞬发 γ 峰的半宽度确定的系统时间分辨率,由多次测量中的平均时间分辨率作为最后谱仪系统的分辨率为 2.5 ns.再根据这个分辨率及数据采集时的总道数,确定每 6 道数据归并为一个实验数据点并确定数据的误差.把同一飞行距离上不同时间测量的谱合并,得到同一飞行距离上的一个飞行时间谱.然后,对不同角度、同一飞行距离上飞行时间谱进行归并,得到这一飞行距离上的一个飞行时间谱.然后把 3 个飞行距离上测量的谱,在同一个坐标系中表示出来,其中低能端的数据主要用 32 cm 飞行距离上测量的结果,6 MeV 以上能区主要用 100 cm 的数据,但是 3 个飞行距离上测量的数据一致性比较好,没有再进行归一.最后得到 200 keV—12 MeV 能区内的一个统一的飞行时间谱.对 ^{248}Cm 和 ^{252}Cf 数据分别进行处理,最后得到 ^{248}Cm 与 ^{252}Cf 能谱相应点的计数比值,见图 4.图中标出的实验点误差是经过加权平均之后总的统计误差.由于 ^{252}Cf 的自发裂变瞬发中子谱已经被国际原子能机构确定为核温度等于 1.42 MeV 的麦克斯维分布谱^[3].我们用 ^{252}Cf 自发裂变瞬发中子谱得到探测器的效率,并用麦克斯维函数对 ^{248}Cm 的能谱进行拟合,最后得到的在测量的中子能区内核温度为 1.401 (± 0.006) MeV.根据以往的测量经验,在数据处理中,空气散射问题在这个能区内可以忽略的原则^[4]没有给予考虑.室壁散射通过设置获取域的方法,将散射中子排除在获取域之外.飞行距离的不确定性主要来源于探测器的厚度.我们使用的茂晶体只有 30 mm 厚,由飞行距离不确定性引起的误差在谱仪的时间分辨率以内,可以忽略.

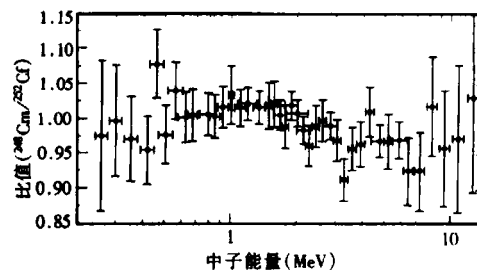


图4 ^{248}Cm 与 ^{252}Cf 的相对比值

4 结论和讨论

在目前可以达到的实验条件下,测量了 ^{248}Cm 和 ^{252}Cf 自发裂变瞬发中子谱的比值.由于进行的是相对测量,而且在不同距离和不同角度上进行了多次测量,所有的实验数据都是一致的.从整个实验数据看,低能端的数据误差比较大,需要测更低能区的数据,以便确定低能端自发裂变瞬发中子谱的走向,需要用对低能中子更为灵敏的探测器进行更多的测量.

参考文献 (References)

- 1 Batenkov O I, Blinov A B, Blinov M V et al. Proc. of Inter. Conf. On Nuclear Data for Science and Technology at the Forschungszentrum Jülich, Fed. Rep. Of Germany 13—17 May, 1991. 523—525
- 2 BAO Shang-Lian. Proc. Of the Beijing Inter. Symposium on Fast Neutron Physics, 9—13 Sep. 1991, 73—75
- 3 Mannhart W. Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig, Fed. Rep. Of Germany, IAEA Report, IAEA-TECDOC-410, 1987, 158—170
- 4 LIU Jin-Quan. Doctoral Thesis of Dept. Technology Physics, Peking University, 1993, 32—35 (in Chinese)
(刘金泉. 北京大学技术物理系博士论文, 1993. 32—35)
- 5 Blinov M. IAEA report IN DC(NDS)-114/GT, 1995
- 6 LIU Wen-Long, BAO Shang-Lian, FAN Tie-Shuan et al. Nuclear Electronics and Detect Technology, 2000, 12 (in Chinese)
(刘文龙, 包尚联, 樊铁栓等. 核电子学和核探测技术, 2000, 12)
- 7 BAO Shang-Lian, WEN Chen-Lin, LIU Wen-Long et al. Science and Technology of Nuclear Energy, 2000 (in Chinese)
(包尚联, 温琛林, 刘文龙等. 原子能科学技术, 2000 (待发表))

Measurement of $^{248}\text{Cm}/^{252}\text{Cf}$ Spontaneous Prompt Fission Neutron Spectrum

BAO Shang-Lian LIU Wen-Long WEN Chen-Lin FAN Tie-Shuan

(The Institute of Heavy Ion Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

O. Batenkov M. Majorov

(V. G Klopov Radio Institute, The Second Munnsky Av. 28, 194021 Saint Petersburg, Russia)

Abstract In order to treat the waste material of nuclear power and develop new type of clean nuclear power, it is necessary to measure the neutron data of long half life nuclei existed in the waste material. The prompt spontaneous neutron spectrum is one of the most important nuclear data for new type nuclear power facilities as well as for understanding the mechanism of fission neutron emission. The measurements of $^{248}\text{Cm}/^{252}\text{Cf}$ spontaneous prompt fission neutron spectrum in the neutron energy range from 200keV to 12MeV were performed by using TOF method. A micro-ionization chamber was used as fission fragment detector and stilbene crystal as neutron detector. The flying paths of neutrons for the measurements were 30 cm, 50cm and 100cm respectively. The spontaneous prompt fission neutron spectrum of ^{248}Cm was fitted by the Maxwellian distribution and the temperature was determined as $(1.401 \pm 0.006)\text{MeV}$ in the corresponding neutron energy range.

Key words spontaneous fission, neutron spectrum, micro-ionization chamber

Received 12 January 2000

* Supported by NSFC (19585001) and Fundation of Foreign Expert Bureau of China