

中子能量在0.04—100电子伏范围内 U^{235} 裂变截面的相对测量

俞安孙 卢涵林 牛世文

利用建立在反应堆水平孔道旁的机械选择器中子谱仪,测量了中子能量在0.04—100电子伏范围的 U^{235} 裂变截面随能量的变化。谱仪在不同能区的分辨率分别为0.8, 1.4和2.7微秒/米。本文介绍了测量原理、探测器和实验安排等。得到了 U^{235} 裂变截面随能量变化的曲线。并且对能量在1.5电子伏以下的实验数据进行了分析,估计在 $E_0 \approx -1.38$ 电子伏附近可能存在负能级,并得到前两个能级的共振参数为 $E_0 = 0.299 \pm 0.014$ 电子伏, $\sigma_f \Gamma = 12.5 \pm 2.8$ 靶·电子伏和 $E_0 = 1.09 \pm 0.05$ 电子伏, $\sigma_f \Gamma = 13.3 \pm 3.3$ 靶·电子伏。这些结果与国外文献比较,在实验误差范围内相符合。

U^{235} 裂变截面的测量,除了对核反应理论和核裂变机制的研究有重要意义之外,也为反应堆设计提供了有用的数据。因此,早就引起了人们的重视。1955年以前发表的有关数据较少,直到1955年在第一次日内瓦和平利用原子能国际会议上,各国发表了大量资料^[1-4]。此后,随着中子源强度和仪器水平的提高,有可能在更好的分辨率条件下进行测量。塞勒(E. J. Sailor)^[5]等利用布鲁克海文晶体谱仪测出中子能量在10电子伏以下 U^{235} 裂变截面随能量的变化;海文斯(W. W. Havens)^[6]等在Nevis同步回旋加速器中子速度谱仪上用气体闪烁计数器测得6—50电子伏能区的数据;米裘登(A. Michaudon)^[7]等以沙克莱28兆电子伏电子直线加速器作为脉冲中子源,测量了7—95电子伏能区 U^{235} 的裂变截面;最近,加利福尼亚大学的包曼(Bowman)^[8]等也发表了他们在电子直线加速器上的测量结果。这些结果的精确度比以前有所提高,并从实验数据分析中获得大多数共振能级的裂变宽度 Γ_i 或 $\sigma_0 \Gamma_i$ (σ_0 为共振峰处的全截面值)。

从已经发表的实验资料中,可以看到 U^{235} 的裂变截面呈现出一些特征:(1)在热能区域裂变截面随能量的变化偏离 $1/v$ 规律,可能在零能级附近存在负能级(结合能级);(2)共振能级分布很密,平均能级间距为0.64电子伏^[8];(3)能级之间存在干涉,某些共振峰表现出不对称性,不满足布莱特-维格纳单能级公式。

裂变截面的测量一般分为绝对测量和相对测量,前者的任务是测量某一能量的(在低能区域一般是0.0253电子伏)裂变截面的绝对值,后者只测量裂变截面随能量的变化,然后取某一能量处的绝对值进行归一化。关于 U^{235} 裂变截面的绝对测量和中子能量在1.5电子伏以下的相对测量,在国内已经用晶体衍射中子谱仪进行了一些研究^[9],但是关于更高能量区域 U^{235} 裂变截面的资料,还缺乏实验数据。本文介绍利用建立在反应堆旁的机械选择器作为脉冲中子源,以飞行时间方法测量从0.04到100电子伏能区 U^{235} 裂变截面随能量的变化。

测量原理

测量裂变截面时,通常将由裂变物质制成的薄膜置于裂变探测器中,由于中子入射而引起的裂变事件将在探测器中被记录。所记录的裂变计数 C_f 可以下式表示:

$$C_f = N \eta_f (1 - e^{-n \sigma_0}) \sigma_f / \sigma_0 \quad (1)$$

式中 N 为入射到裂变物质膜上的中子数; n_u 为探测器中所载裂变物质的厚度, 以裂变核数/厘米²为单位; σ_f 和 σ_0 分别为该核的裂变截面和全截面; η_f 是探测器记录裂变事件的效率。入射中子数 N 可以用很“薄”的载硼中子计数管来记录, 其效率随能量的变化服从 $1/\sqrt{E}$ 的规律, 那么计数管所记录的中子计数 C_n 可以表示为

$$C_n = N\eta_n/\sqrt{E}, \quad (2)$$

式中 E 表示入射中子能量; η_n 是当中子能量为 1 电子伏时计数管的效率。从(1)式和(2)式中消去 N , 可以得到

$$\sigma_f = \frac{\eta_n}{\eta_f} \frac{\sigma_0}{1 - e^{-n_u\sigma_0}} \frac{1}{\sqrt{E}} \frac{C_f}{C_n}. \quad (3)$$

当裂变探测器中所载裂变物质的量很少, 满足条件 $n_u\sigma_0 \ll 1$ 时, 那么(3)式将简化为

$$\sigma_f = K \frac{1}{\sqrt{E}} \frac{C_f}{C_n},$$

式中 K 是与能量无关的常数。这样, 裂变截面的相对测量就归之于测 C_f/C_n 随能量的变化。

实 验 装 置

1. 裂 变 电 离 室

在实验中以裂变电离室来记录裂变事件。要使裂变碎片能透过铀层而且能量损耗很小, 铀涂层应比较薄, 一般在 1 毫克/厘米²左右。为了照顾到有足够的计数率, 在裂变截面测量中广泛采用多层的电离室。我们使用的电离室的结构如图 1 所示。以面积为 200×50 毫米²、厚 0.1 毫米的铝箔作电离室的阳极。阴极也用同样的铝箔, 以电解沉积法在它的两面涂上浓缩 U^{235} (90%) 的氧化铀薄膜, 每面的铀薄膜厚度近于 1 毫克/厘米²。阴极共 10 片, 与 11 片阳极间隔平行排列, 极间距离约为 5 毫米。电离室载铀量总共为 1.85 克。电离室外壳用铝制成, 室内充氩气和 5% 的二氧化碳气体, 压力达一个大气压。由于铀同位素的 α 放射性较强, 在电离室中多个(5 个以上) α 粒子的堆叠脉冲可以与裂变脉冲的幅度相比较, 所以必需将 α 粒子的堆叠脉冲甄别掉。为了观察 α 粒子堆叠的情况, 曾测量了电离室分别包含三片、四片和七片涂铀层时的偏压曲线(图 2)。图 2 所示曲线的差异, 除了因为含铀量有差别以外, 还由于极间电容增加

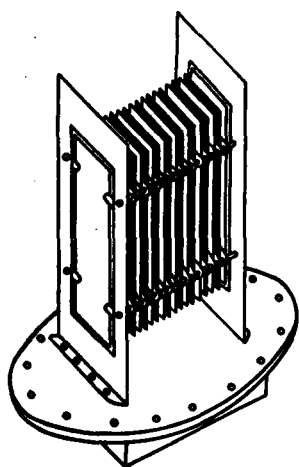


图 1 裂变电离室

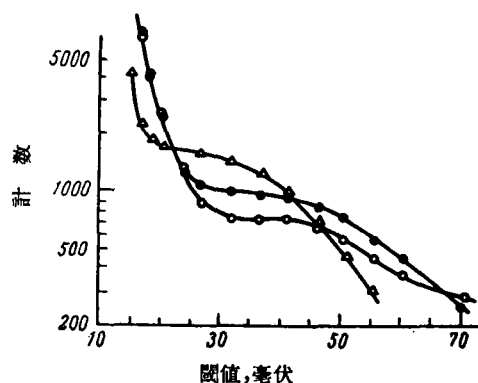


图 2 电离室的偏压曲线

- — 含 300 毫克 U^{235} ;
- — 含 400 毫克 U^{235} ;
- △ — 含 700 毫克 U^{235} 。

会引起脉冲幅度减小。在电离室包含三片、四片涂油层的情况中，载铀量较少，可以明显地将 α 堆垒脉冲与裂变脉冲区分开来；在电离室包含七片涂油层的情形中因载铀量增多， α 堆垒效应也变得较为严重。为了甄别掉大部分 α 堆垒脉冲，使裂变计数损失了大约10%。最后做成的电离室将所有阴极联在一起接负400伏电压，阳极分为独立的三组引出。每一组经过放大倍数为120的前置放大器，直接输给甄别器，它的甄别阈可在10—150毫伏间隔内变化。三组的特性基本上相同(图3, 4)。将三个甄别器的输出信号混合在一起，由长电缆从反应堆大厅引向多道时间分析器。

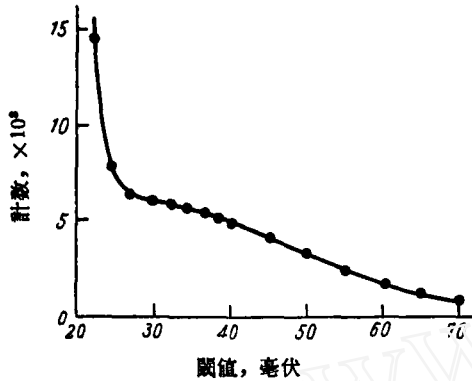


图3 收集电压为400伏时的偏压曲线

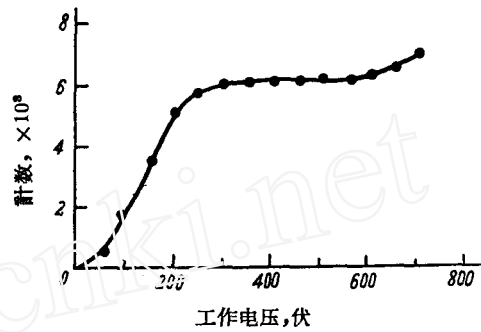


图4 甄别阈为30毫伏时计数随工作电压的变化

2. 中子探测器

在1电子伏以上能区进行测量时，用两支含浓缩硼(80% B^{10})的 BF_3 正比计数管来探测中子，计数管长25厘米，直径2厘米，内充气压近于60厘米汞柱。在1电子伏以下的能量范围内，为了减少计数管对中子的自吸收，用四支天然硼的 BF_3 正比计数管，其长25厘米，直径3.5厘米，内充气压约为30厘米汞柱，四支计数管分前后两排。在测量中计数管垂直于中子束，这样在所测能区中计数管是很薄的，可以认为其效率的变化服从 $1/\sqrt{E}$ 的规律。

3. 飞行时间谱仪

实验是在反应堆旁进行的。从水平孔道出来的中子束通过机械选择器形成脉冲中子束。中子飞行一定的距离后被探测器所接受，在多道时间分析器中记录下来。关于我们所使用的机械选择器和多道时间分析器在以前的文章^[10]中已有详述，这里不再重复。图5表示实验安排。从机械转子中心到探测器的飞行距离为13.32米。为了减少空气的散射，将10米长的飞

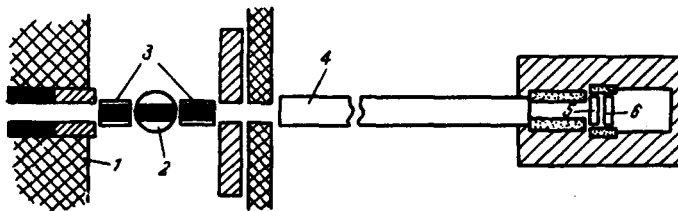


图5 实验安排示意图

- 1—反应堆水平孔道； 2—转子； 3—准直器； 4—飞行管道；
- 5—裂变电离室； 6— BF_3 正比计数管；
- ▨—铁沙水泥； ▩—含硼石蜡； ●—碳化硼； ■—铅。

行管道抽空。紧接着飞行管道的是 70 厘米长的 B_4C 准直器，将中子束的面积限制为 20×5 厘米²（与电离室内铀涂层的面积相同）。经过准直后的中子束入射到裂变电离室。中子计数管置于电离室后面，探测器外面用含硼石蜡作屏蔽。用两组 128 道时间分析器同时记录来自中子计数管和裂变电离室的计数。用两组 32 道时间分析器分别记录裂变和中子的本底计数。由于机械转子在一定转速时存在相应的切割能量，小于切割能量的中子不能通过转子，对大于切割能量的中子，透过函数也是随着能量而变化的。因此，要求对不同能区选择适宜的转速；此外，多道时间分析器一次能测量的时间范围也有限，所以对 0.04—100 电子伏能区的测量工作必需分段进行。整个测量工作分成的三个区段，如下表所示。

能量区段, 电子伏	转子转速, 转/分	分析器道宽, 微秒	分辨率, 微秒/米
4.5—100	1500	4	0.8
0.6—10	900	8	1.4
0.04—1	600	32	2.7

测量结果

对于实验中测得的数据考虑了下列修正。

1. 本底的修正

在我们的工作中本底比较严重。实际测量表明透过转子的快中子本底构成了本底的主要部分。由于快中子通过转子物质的有效厚度随着转子位置（指转子缝与中子束夹角）而变化，显然，本底也应该随转子位置有相应的变化。我们用两种方法测量了本底的变化，当转子静止时，测量了本底随着它的不同位置的变化；当转子转动时，以 In, Au, W 等厚样品挡住中子束，利用时间分析器测量它们分别在 1.45, 4.9, 18 电子伏大共振峰处的本底，再推算到所对应的转子位置。这两种方法测量的结果是相符合的。在实际测量时，测本底的两组 32 道时间分析器，工作在相对于脉冲中子束的零时间延迟约 8500 微秒处。此时，能量大于转子切割能量的中子都已到达探测器。但这样记录的本底与两组 128 道分析器中各道所记的有差别，利用测得的本底随转子位置的变化对此作了修正。

2. 吸收与自吸收修正

电离室内电极的吸收和铀层的自吸收对裂变计数有影响；电离室放在中子计数管前面，因而对中子计数有影响； BF_3 正比管的实际效率偏离 $1/\sqrt{E}$ ；综合考虑上述三种因素。在低能区由于硼和铀截面变大，这些影响也随之增加。但是总的说来，因为我们使用的裂变探测器和中子计数管都是比较薄的，这些效应并不严重，只在能量低于 1.5 电子伏的区域对此进行了修正，在近于 0.04 电子伏处由此引起的修正小于 2%。

3. 飞行距离修正

裂变电离室与中子计数管的实际飞行距离不同，它们的中心位置差 11 厘米。对能量低于 0.1 电子伏的中子来说，这个差别可能引起其飞行时间有一道之差。当能量小于 0.2 电子伏时，由于已接近堆中子谱的麦克斯韦峰，中子强度很快地随着能量的减小而增加；同时，因为转子透过函数随能量的改变，在 0.06 电子伏以下，随着能量减少中子强度又很快下降。鉴于这种变化，上述飞行距离的差别对实验所带来的影响是必需要考虑的。在小于 0.3 电子伏能区，应用

测得的中子谱对此作了修正,这部分修正小于3.5%。能量小于0.3电子伏时分析器记录的中子计数随能量的变化如图6所示。

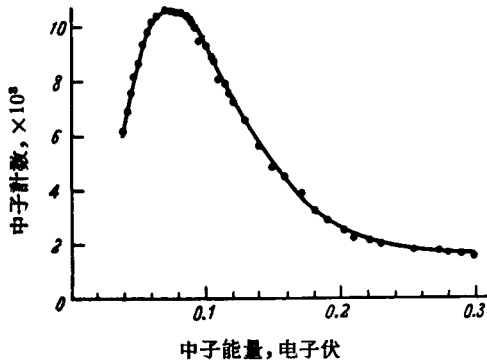


图6 中子能量小于0.3电子伏时时间分析器记录的中子数随时间的变化

测量数据经过上述修正后,在0.04—0.1电子伏区间与用晶体衍射谱仪测量的结果相比较并归一化,最后得到 U^{235} 裂变截面随能量的变化曲线,如图7所示。在0.29, 1.1, 2.0, 3.0, 3.5, 4.9, 6.5, 7.2, 8.9, 12.5电子伏处出现共振峰。由于分辨率不足,3.0和3.5与6.5和7.2电子伏的共振峰没有完全分开。能量大于10电子伏处测得的截面变化实际上是很多的共振能级迭加的结果。

实验误差的主要来源是统计误差,这主要是由于计数率比较低和严重的本底所引起的。能量大于8电子伏的区域,中子计数本底约占45%左右,裂变计数本底平均来说要占60%。在1—8电子伏区域,由于转子转速的降低,中子本底减少到30%。但这区域的裂变计数率太低,本底仍很严重,增加到70%以上。热能区域的情况较好,从0.04—0.3电子伏,裂变本底为30—50%,中子本底为10—25%。总的说来,在能量大于8电子伏处,大多数实验点的误差小于 $\pm 8\%$;1—8电子伏区,误差一般小于 $\pm 16\%$;0.3电子伏以下,误差在 $\pm(2-4)\%$ 。

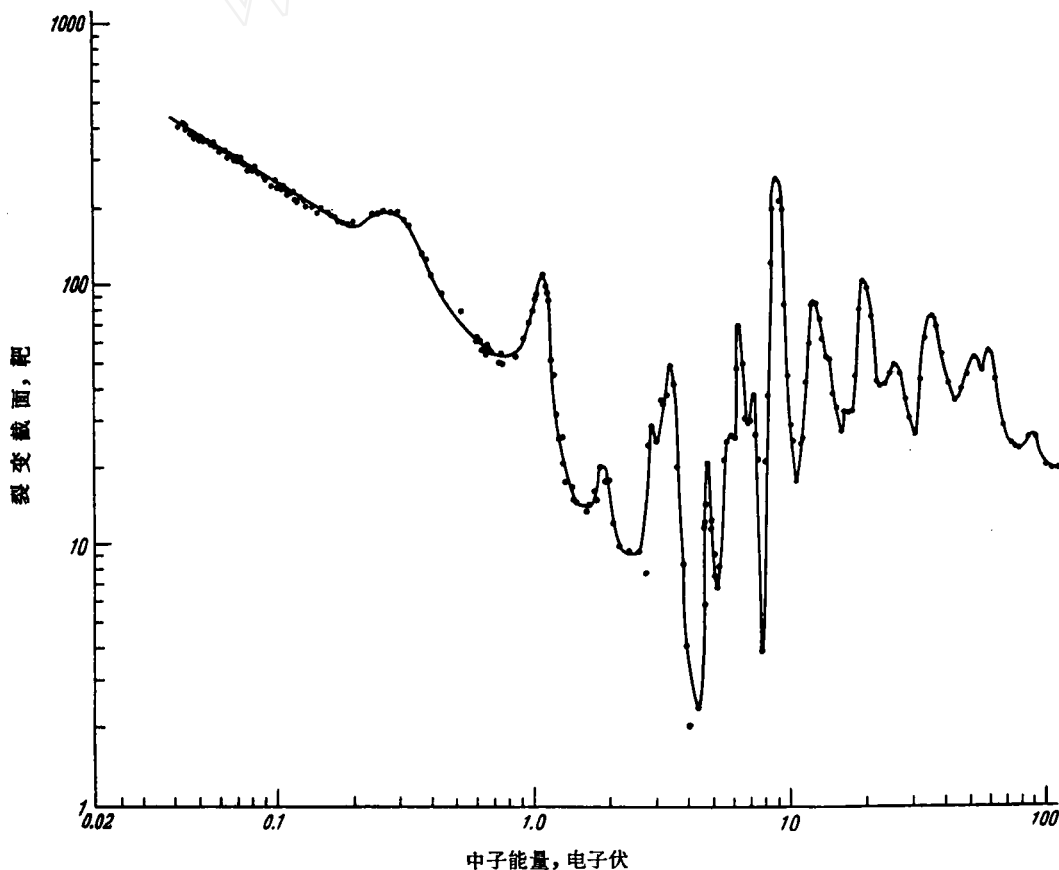


图7 U^{235} 裂变截面

在 1.5 电子伏以下能区,利用比较简单的方法^[11]对实验数据进行了处理。为了解释低能处裂变截面的变化偏离 $1/\sqrt{E}$ 的规律,引入可能存在的负能级。根据我们的实验结果估计的负能级为: $E_0 \sim -1.38$ 电子伏, $\sigma_{f_0}\Gamma^2 \sim 510$ 靶·电子伏²。从测得的截面曲线中扣去负能级和 $1/\sqrt{E}$ 部分的贡献后,用面积分析方法得到前两个共振能级的参数为:

$$\begin{aligned} E_0 &= 0.299 \pm 0.014 \text{ 电子伏}, & \sigma_{f_0}\Gamma &= 12.5 \pm 2.8 \text{ 靶} \cdot \text{电子伏}; \\ E_0 &= 1.09 \pm 0.05 \text{ 电子伏}, & \sigma_{f_0}\Gamma &= 13.3 \pm 3.3 \text{ 靶} \cdot \text{电子伏}. \end{aligned}$$

结 束 语

上述对 0.04—100 电子伏能区 U^{235} 裂变截面测量得到的裂变截面随能量变化的曲线,与国外用同类水平的仪器测量的结果^[1,2] 相比大致符合。对 1.5 电子伏以下的实验数据作了分析,所得到的负能级与前两个能级的共振参数也与文献的结果在误差范围内相一致。由于仪器分辨率不够,能量在 1.5 电子伏以上的多数能级没有完全分开。测量结果的实验误差较大,主要原因在于机械转子的材料性能不佳,由此引起严重的本底。

何译慧先生对我们工作的热情关怀与支持,杨頌同志多次提出有益的意見和經常給予帮助,我們致以深切的感謝。

参 考 文 献

- [1] V. L. Sailor, Proc. Intern. Conf. Peaceful Uses of Atomic Energy, Geneva, 1955, vol. 4, p. 199.
- [2] J. E. Lynn and N. J. Pattenden, ibid, vol. 4, p. 210.
- [3] J. M. Auclair et al., ibid, vol. 4, p. 235.
- [4] Y. B. Adamchuk, ibid, vol. 4, p. 216.
- [5] E. J. Shore and V. L. Sailor, Proc. 2nd Intern. Conf. Peaceful Uses of Atomic Energy, Geneva, 1958, vol. 15, p. 118.
- [6] W. W. Havens et al., *Phys. Rev.*, **116**, 1538 (1959).
- [7] A. Michaudon et al., *J. Phys. Radium*, **21**, 429 (1960).
- [8] Bowman et al., *Phys. Rev.*, **130**, 1482 (1963).
- [9] 叶春堂, 原子能科学技术, 第 4 期, 349 (1964).
- [10] 中国科学院原子能研究所, 原子能科学技术, 第 1 期, 15 (1960).
- [11] B. R. Leonard, Proc. Intern. Conf. Peaceful Uses of Atomic Energy, Geneva, 1955, vol. 4, p. 193.

(編輯部收稿日期 1964 年 4 月 30 日)