

CNDC-85011

第四次核数据会议论文选编



中国核数据中心

一九八六年

第四次核数据会议论文选编

中国核数据中心

一九八六年

前 言

第四次核数据会由核工业部科技核电局主持于1983年12月16—22日在北京原子能研究院召开。全国有关大学和研究所等共31个单位的127名代表参加了会议。会上报告和交流了1978年第三次核数据会以来核数据工作的进展和研究成果，总结了经验，规划并安排了1984年—1985年的工作。为了扩大交流，推动工作，更好地为四化建设服务，我们选编了部分报告和在这期间的研究成果共65篇（其中摘要20篇），其内容涉及到核数据测量、评价、管理和理论计算以及群常数制作、宏观检验等，可供有关人员参考。应当指出，由于本选编只收进了没有发表过的部分文章和报告，因此，它不是这期间全部核数据工作的总结，而只能反映其中一部分情况。

本书由核数据中心刘廷进、刘桂生、袁汉铭、苏宗淦、申庆彪等同志选编，参加编辑工作的有汪晋忠、周福秀、晏世伟同志。由于水平所限和经验不足，缺点和错误在所难免，欢迎读者批评指正。

编 者

1986 年

Preface

The fourth nuclear data conference was held on December 16 to 22, 1983 in the Institute of Atomic Energy, Beijing. Altogether 127 representatives from 31 universities and Institutes all over the country were presented. During the conference, the progress and research achievements, which had been got since third nuclear data conference in 1978, were reported and exchanged, some experience in nuclear data field were summed up, and the work from 1984 to 1985 were planned and arranged. In order to extend exchanging and promote the work, part of the reports and some research achievements, which had been got from 1978 to 1983, were selected and compiled, they are 65 pieces altogether (including 21 pieces of abstracts). The contents refer to nuclear data measurement, evaluation, library management, theoretical calculation, group constant calculation and macroscopic test etc., it can be used as a reference for concerning person. It must be pointed out that only some of unpublished papers and reports are selected, so it isn't an entire sum up of the nuclear data work during this period, it only reflects partial situation.

The proceedings are selected and compiled by Liu Tingjin, Liu Guisheng, Yuan Hanrong, Su Zondi, Shen Qingbiao. It also compiled Wang Jinzhong, Zhou Fuxiu, Yan shiwei. For lack of experience, there must be some shortcomings and errors, welcome to point out and criticize.

Compiler

1986.

目 录

核数据的测量

次级中子能谱和角分布数据测量.....	中国原子能科学研究院二室一组 (1)
裂变产额绝对测量的 γ 能谱法.....	李泽、刘从贵、卢慧筠、刘永辉 (4)
裂变截面测量进展.....	叶宗垣 (8)

核数据的评价和管理

人机会话的计算机核截面评价系统CNCSES.....	
.....刘廷进、沈林兴、梁祺昌、王丽政、沈双林、刘纫秋、马丽珍、孙乃红、王谨 (13)	
人机会话式的角分布数据评价系统.....	王保生、刘仁康、沈林兴 (25)
人机对话的共振参数检验、评价和本底截面的获得.....	庄友祥、沈林兴、周德邻 (31)
中子共振积分的数值计算.....	李介平、顾永佩 (35)
核截面拟合程序概述.....	王丽政 (37)
单能点数据处理和复合截面计算.....	刘纫秋、刘廷进 (43)
核数据实验评价工作中的几个环节.....	袁汉铨 (46)
全套中子数据的计算机评价处理.....	刘廷进、梁祺昌、刘纫秋、孙乃红、马丽珍、王谨 (49)
关于热中子标准截面评价.....	袁汉铨 (56)
评价核数据库CENDL管理程序系统.....	沈林兴、马丽珍、唐永建、梁祺昌 (60)
ENDF/B-IV 格式数据的检索 (简介).....	马丽珍 (63)

理论计算

^{10}B 快中子反应截面的理论计算.....	刘曼芬、朴真烈 (65)
^{11}B 快中子反应截面的理论计算.....	张玉君、李支文 (71)
^{14}N 和 ^{16}O 中子反应核数据的理论计算.....	高广越 (76)
^{18}F 快中子弹性和非弹性散射截面的理论计算.....	刘曼芬、朴真烈 (82)
用光学模型、豪泽-费许巴赫及预平衡理论计算天然钠、镁、硅的快中子数据.....	
.....余自强、周洪模、左义欣、蔡崇海、张效成 (85)	
钚核中子数据的理论计算.....	卢涵林、范培国 (93)
快中子-铀核反应全套数据的理论计算.....	刘燕平 (99)
$E_n \leq 20\text{MeV}$ 铜的中子反应数据的理论计算.....	许定安 (105)
天然铀中子诱发反应数据的理论计算.....	邢进强 (109)
天然铀中子诱发反应的理论计算.....	施向军、王书暖、顾英圻、申庆彪、卓益忠、王思问 (113)
铀的快中子数据理论计算.....	刘敦桓 (119)
天然钍中子反应数据的理论计算.....	
.....苏宗涤、王书暖、李茶、施向军、申庆彪、陆中道、卓益忠、陆海涛、黄祥钟 (124)	
在计算中重核快中子数据统一程序 (MUP-1) 中所采用的理论模型.....	

余自强、何国柱、刘敦恒、苏宗涤、王书暖、施何军、申庆彪	(129)
在光学模型中求S矩阵元的若干问题	余自强、周洪模、左义欣、徐承先 (133)
最优化方法在光学模型自动调参数中的应用	周洪模、余自强、左义欣、陈宝谦、徐承先 (138)
中子能量为 $3\text{ MeV} \leq E_n \leq 20\text{ MeV}$ 裂变核中子反应截面和次级中子能谱的统计理论计算	王书暖、晏世伟、孙子阳、陆中道、卓益忠、陆军、姜照汉、帅亚民 (144)
平均共振参数计算方法的比较	黄忠甫、吕国雄 (149)
裂变元素中子共振反应截面的Adler参数分析	丘国春、曹亨道 (155)

群常数和宏观检验

CNDC基准检验工作简介	刘桂生 (164)
反应堆多群常数程序RQCS和KQCS的简介	王跃清 (167)
中子、 γ 耦合计算的群常数制作	巫德章、杜书华 (173)
计算中子能谱的PBN近似方法	王友琴、张毓泉、徐锡源 (178)
弹性散射角分布数据的转换	余佩华 (185)
中子群常数处理系统NGCPS	刘朝芬、钱增祺、王友琴、李楚清、纳忠杰 (188)
D-D中子在 ${}^6\text{LiD}$ 球体内造氚率的测量	沈寄安、段绍节、陈家斌 (190)
14MeV中子在 ${}^6\text{LiD}$ 球和 ${}^7\text{LiH}$ 球中活化率和裂变率的测量	陈素和、周云生 (193)
20J快堆中心平均截面比测量	刘惠良、陈玉亭、张兴年 (198)
晶体散射核及声子谱的理论计算	项凤铎 (201)
热中子散射律的通用计算	胡永明、钟文发 (207)
热中子散射律数据库的设计	钟文发、胡永明 (216)
Fe、O、Na、N中子全截面的积分检验	余佩华 (222)
25 群群常数的积分检验	刘桂生、杨俊孝 (223)

摘 要

快中子激发曲线测量概况	卢涵林 (227)
14.2MeV中子在Mo上的弹性散射微分截面测量	曹建华、李景德、李业祥、谢大全、万代蓉、梁学才、万鸿声 (227)
14.5MeV中子的Cu、Si去弹截面测量 (初步)	包尚联、唐国有、仲文光、施兆民、陈金象 (228)
用于 $(n, n'\gamma)$ 反应的 γ 射线和快中子测量的飞行时间谱仪	北京师范大学低能核物理所参数组 (229)
快中子飞行时间谱仪中 $n-\gamma$ 分辨电路系统及其调试	曹建华、李景德、李业祥 (230)
快中子位置灵敏谱仪	万代蓉、代运生、梁学才、王春浩、曹建华 (232)
关于核数据的国际活动问题	袁汉镨 (233)
少体准粒子理论方法与现实核力	刘福庆 韩文述 (233)
计算中子集体态直接非弹性散射的DWBA方法	刘敦恒、申庆彪 (234)
利用Skyrme力的微观光学势计算核反应截面	田野、韩银录、王畅、申庆彪、卓益忠 (235)
连续区粒子发射双微分截面的理论计算	李茶、苏宗涤 (235)
中重核快中子总非弹性散射双微分截面和角分布的激子模型计算	

.....	晏世伟、王书暖、卓益忠 (336)
235:238U和239:240Pu的中子非弹能谱与分立能级非弹角分布系数的	
理论计算.....	施向军 (336)
中重核快中子数据计算统一程序的设计.....	张效成、周洪模、余自强 (337)
中重核快中子数据统一程序库格式的设计.....	左义欣、周洪模、蔡崇海 (338)
一个适用于天然元素靶的中子反应数据计算程序 (OM-WHF)	苏宗洙、李茶 (339)
适用于多同位素多能点的自动调节中子光学模型参数的方法.....	
.....	马中玉、顾英圻、赵小麟、施向军、申庆彪 (240)
一般自旋荷电粒子光学模型计算处理和程序简介.....	张本爱、莫俊永、庄伟 (241)
RTDENT: 用有限元法解二维定态中子迁移方程程序.....	崔树礼 (242)
中子群常数管理程序包.....	钱增祺 (242)

核数据的测量

次级中子能谱和角分布数据测量

中国原子能科学研究院二室一组†

一、引言

快中子引起的次级中子能谱和角分布数据对于核装置、聚变堆、裂变-聚变混合堆的设计研究是很重要的。因为这些装置中存在15MeV以下的中子同装置材料(包括核燃料,再生核,中子倍增剂、反射层,结构材料等)的相互作用,这些数据与锂的生成截面(通过 ${}^6\text{Li}(n, t)$ 反应和 ${}^7\text{Li}(n, n't)$ 反应)和 ${}^{238}\text{U}$ 的快中子裂变有直接的关系。

二、测量方法

在快中子飞行时间法发展起来之前,人们用乳胶法、闪烁法和其它方法进行快中子能谱的测量工作。目前这些方法已很少使用,而主要采用飞行时间方法。我们的主要测量工具是快中子飞行时间谱仪。这种谱仪一般有三种形式,即伴随粒子型、双探头型和脉冲束型。它们的零时刻参考讯号分别由与源中子相伴产生的粒子、散射探头和脉冲束给出。前二者因计数率的限制,中子源强度不能太大;后者则可允许很强的中子通量,因而可以大大节约测量时间或加长飞行距离。我们用这三种形式的飞行时间法都测量过数据,但用得较多的是伴随粒子型。飞行时间谱仪主要包括中子源、散射样品、中子探测器、电子学线路、数据获取系统以及零讯号系统。在脉冲束型飞行时间谱仪中,源中子一般采用氘、氚气靶,通过 $D(d, n)$ 或 $T(p, n)$ 或 $T(d, n)$ 反应,以得到较高的中子通量。中子探测器在向大体积、多探头方向发展,采用双截锥咽喉的屏蔽体。有条件的实验室一般采用同位素样品。零时刻讯号一般由高频讯号或脉冲束的感应讯号给出。数据获取系统一般采用计算机进行记录和在线处理。总之,飞行时间谱仪在向高分辨(远飞行距离)高数据获取率(多个大探测器)及数据获取和处理自动化的方向发展。

三、实验数据现状

从目前能得到的实验数据来看,次级中子能谱和角分布的数据是很少的,特别在8—13MeV之间,其中能谱的数据更少。详细情况如下:

D, 能谱——只有入射中子能量为14MeV的某些角度的能谱;角分布——9.1—13MeV之间,只有Karlsruhe一家测量,前向角数据不好, $\theta_{c.m.}$ 小于 44.5° ,无数据。

†执笔人唐洪庆。

T: 能谱——无数据; 角分布——0—13 MeV 之间无数据。其它某些点 (如1, 2, 3, 5, 6, 9, 18, 21 和 23 MeV) 只有一家数据。14 MeV 点, 只有大角区的数据。

${}^6\text{Li}$: 能谱——4.38 MeV (${}^6\text{Li}$), 5.74 和 7.5 MeV (${}^7\text{Li}$) 有一家 6—8 个角度的次级中子能谱数据。在 4.5—14 MeV 之间, 有一家核乳胶测量的数据, 计数统计差, 误差大; 角分布——1.5—7.5 MeV 之间有一些测量; 7.5—14 MeV 之间, 有一家测量。

${}^9\text{Be}$: 能谱——有一家入射中子能量为 5.9 MeV 和 10.1 MeV 的数据, 在 14 MeV 处有两家测量, 它们相差较大; 角分布——7 MeV 以下有一些测量数据。7 到 15 MeV 之间有一家测量 (14 MeV 处有多家测量)。

${}^{235}\text{U}$: 能谱——4—13 MeV 之间是空白; 角分布——6—13 MeV 之间是空白。

${}^{238}\text{U}$: 能谱——7.1—13 MeV 之间是空白; 角分布——8.6—13 MeV 之间是空白。

此外, 小角区 ($< 15^\circ$) 和高能区 (入射中子能量在 15—28 MeV 之间) 的实验数据也非常稀少。

上面是一些最感兴趣的核的次级中子能谱和角分布的实验数据情况。可以看出, 8—13 MeV 之间的实验测量是很少的。用飞行时间法测量的次级中子能谱只有一个, 这就是 LASL 测量的 10.1 MeV 中子引起的 ${}^9\text{Be}$ 的次级中子谱。

四、我们的测量工作

近七、八年来, 我们用飞行时间法测量了一些核的次级中子能谱和角分布。

在倍加器上, 我们建立了伴随粒子型快中子飞行时间谱仪。经过不断改进, 现在谱仪的时间分辨大约是 1 ns, α 粒子的计数率可达 $7 \times 10^4/\text{sec}$, 最大飞行距离可达 3 m 多。探测器由液体闪烁体 ST451 ($\phi 105 \times 50 \text{ mm}$) 和 XP2040 型光电倍增管组成, 放置在双屏蔽体中, 并采用了 n - γ 甄别线路, 这大大地降低了房间本底。配置了气垫型角分布仪, 能较方便地改变角度。用这台谱仪, 我们测量了 14 MeV 中子在 D, ${}^7\text{Li}$, ${}^9\text{Be}$, C, ${}^{238}\text{U}$ 等核上的散射中子角分布, 以及 $\text{D}(n, 2n)$ 的分角度的中子能谱。14 MeV 中子引起的 ${}^{238}\text{U}$ 的次级中子能谱也已在 1983 年底完成测量工作。

在我们的测量中, 单微分截面 (即归一后的角分布) 的总误差一般在 (4—10) % 之间。如果计数统计足够好, 总误差可达 4 % (这是目前国际上的一般水平)。双微分截面 (即归一后的能谱) 的误差主要来源于计数统计误差, 一般在 (5—12) % 之间。

我们测得的散射角分布同理论计算进行了比较。相移分析、光学模型和耦合道理论的计算结果, 分别与 D, ${}^9\text{Be}$, ${}^{238}\text{U}$ 核的弹性散射角分布的实验数据符合得相当满意。对于 ${}^7\text{Li}$ 核, 光学模型计算与实验值符合得不很好, 其主要原因是实验值中包括了 ${}^7\text{Li}$ 的 0.478 MeV 能级的非弹性散射中子。对于 $\text{D}(n, 2n)$ 反应的破裂中子能谱, 由于计算机容量的限制, 作了一些近似, 法捷耶夫方程计算结果与实验值符合得不十分理想, 但大体趋势还是一致的。

在回旋加速器上, 我们建立了脉冲束飞行时间谱仪。用这台回旋加速器能提供 4—14 MeV 的氦束和 ~ 3 —15 MeV 的质子束, 因而可以产生 8—13 MeV 之间的准单能中子。由于加速器的脉冲束较宽, 时间分辨差, 因此只能做散射角分布的工作。在这台加速器上, 我们建立了氦气靶装置。用这台谱仪, 我们测量了 11.6 MeV 中子在碳核上的散射中子角分布。在我们的测量中, 弹性和非弹性散射微分截面的总误差分别为 5 % 和 5.5 % (典型值)。

不久前, 我们用双探头飞行时间谱仪测量了 8.6 MeV 中子在氦核上的弹性散射角分布,

并探索了用这种方法测量 $D(n, 2n)$ 反应破裂中子能谱的可能性。目前, 我们已得到了初步结果, 但还未进行通量衰减、多次散射和有限几何修正。在前向角, 我们测得的结果比相近能量的其他结果略高。

此外, 我们还用双探头飞行时间法测量过一些放射性中子源和 ^{252}Cf 自发裂变的中子能谱。

总的来讲, 这七、八年来, 我们在以前工作的基础上, 建立了各种形式的快中子飞行时间谱仪, 测量了少数几个核的次级中子能谱和角分布。测量精度与国际上的一般水平相当。伴随粒子型和双探头型的时间分辨已达到了国际先进水平 ($\sim 1\text{ns}$)。但是由于我们的这三种谱仪都有各自的局限性或弱点——伴随粒子型不能容许较强的中子通量和只有 14MeV 一个能点, 双探头型只适用于某些特殊场合, 脉冲束型的时间分辨差, 改变能量不方便, 因此数据获取率低, 没有测出大批的数据。如果将倍加器改成脉冲调制, 那末能允许的中子源的强度就可增加约100倍 (与伴随粒子法相比), 因而就可大大加快测量速度。对于 14MeV 这个能点, 能够得到很干净的单能中子源。如果希望得到这个能点的大批次级中子能谱和角分布数据, 则在倍加器上进行ns脉冲调制是很必要的。

1986年, 我院的串列加速器将提供使用。在这台加速器上, 我们有一个快中子飞行时间装置, 能用三个探头同时进行测量。最大飞行距离可达6米, 脉冲束宽约为 1ns 。利用 $D(d, n)$ 和 $T(p, n)$ 或 $T(d, n)$, 能够得到 $8-14\text{MeV}$ 或更高能量的准单能中子, 因而这台飞行时间谱仪将是测量这些入射能区的次级中子能谱和角分布的有力工具。我们打算在这台加速器上进行 $8-13\text{MeV}$ 的次级中子能谱和较完整的角分布测量。在这个能区进行次级中子能谱测量是很困难的。目前, 国外几乎没有发表这方面的测量工作, 至今只有两个实验室(LASL和TNL)试测过Be, Fe, Ni等核的次级中子能谱 (对于Be, 入射能量是 10.1MeV ; 对于Fe, Ni等核, 入射能量是 10MeV 和 12MeV)。主要困难是在这个能区不能得到单能中子。我们打算利用准单能中子源, 花些功夫测量这方面的数据。至于散射中子角分布, 利用常规的飞行时间谱仪, 测量的角度范围一般在 $15^\circ-160^\circ$ 之间。我们准备建立小角散射测量系统, 将角度范围扩展到 5° , 甚至更小。

我院的串列加速器上这套飞行时间谱仪美中不足之处是脉冲束流太小, 重复频率为 1MHz 时, 平均束流只有 $0.95\mu\text{A}$, 约为国际上同类谱仪脉冲状态下平均束流的三分之二。因此我们希望对离子源进行预聚束, 并对离子源进行改进, 提高直流输出, 从而增大脉冲束流, 提高数据获束率。

另外, 不知在我们的串列加速器上, 脉冲束拖的“尾巴”有多大多长, 因而也难以估计“尾巴”对能谱测量精度的影响。如果事先不采取措施消除“尾巴”, 能否进行有意义的能谱测量工作, 也是值得怀疑的。消除“尾巴”的办法是引述后清扫系统。Munich大学和Rochester大学在初级中子能谱的测量中曾采用过这种装置。在试测了 10MeV 和 12MeV 中子引起的铁、镍等核的次级中子能谱后, TNL在他们的串列加速器上也配置了后清扫系统。因此, 如果希望尽早得到 $8-13\text{MeV}$ 之间的、较好的中子能谱数据, 后清扫装置 (如有可能, 包括后聚束) 必须趁早添置。

上面就是我们组近几年来在次级中子能谱和角分布方面所做的工作和将要开展的工作, 以及希望改进的条件。如果条件允许 (如保证一定的用器时间, 脉冲束的“尾巴”拖得不是太大太长或配置了后清扫装置), 可望在1990年之前, 在 $8-13\text{MeV}$ 能区, 得到某些重点核的次级中子能谱数据。

裂变产额绝对测量的 γ 能谱法

李泽 刘从贵 卢慧筠 刘永辉

一、引言

裂变产额的测定无疑是重要的,产额数据是测定反应堆燃耗的重要数据。在工程上对它的要求越来越高,由此促进了测量工作的不断发展。目前人们很重视随激发能变化的测量,不同能量的中子和 γ 引起裂变的研究工作在陆续发表。在测量方法上也有所变化,过去大量热中子工作是用质谱法做的。在单能快中子和 γ 工作中,由于源弱,除了个别产物核外,多数测量工作是用放化法和 γ 能谱法完成的。特别是七十年代以来, γ 能谱法得到了广泛应用,很多工作是以 γ 能谱法为主,用放化法填补质量分布的谷区和两翼。

我所的实验测量工作,七十年代基本上是用放化法完成的,做了下述工作:热中子和裂变谱中子(包括热中子引起 ^{235}U 裂变和 ^{252}Cf 自发裂变产生的裂变谱中子)引起 ^{235}U 裂变14MeV中子引起 ^{235}U 和 ^{238}U 裂变,以及3 MeV和5 MeV中子引起 ^{238}U 裂变。

1980年开始建立起 γ 能谱法测量技术,我们先后完成了 ^{252}Cf 自发裂变,14MeV中子引起 ^{238}U 裂变和8 MeV中子引起 ^{238}U 裂变的测量工作。 ^{252}Cf 的测量工作是为了建立方法,14MeV中子引起 ^{238}U 裂变的工作大大扩大了测量的产物核素的数目,而8 MeV中子引起 ^{238}U 裂变的测量工作是与放化法共同完成的,质量分布的谷区和两翼的低产额核素是用放化法测定的。因放化法在别处已有所介绍,下面主要汇报一下 γ 能谱法工作的进展。为了提高准确度,我们对绝对测量产额方法进行了仔细研究。

二、测量方法

1. 样品的照射和裂变率的绝对测定

1) 捕集片技术。用这个技术绝对测量了 ^{252}Cf 自发裂变。0.3 μg 的 ^{252}Cf 电镀源,用小立体角法测定其总强度。源装置的主体角是用 α 源刻度的,主体角为 0.374π ,在这样立体角下,源的总强度为 $(1.226 \pm 0.018) \times 10^4$ 裂变/sec(参考时间是1980年7月24日)。裂变产物用高纯铝片收集,对其收集效率进行了仔细研究。金、铝、云母和涤纶等四种捕集片对裂变产物的收集效率相同。

2) 厚靶的照射 ^{238}U 的测量工作是用厚靶,天然铀金属片,其厚度为 $0.3\text{--}0.8\text{g}/\text{cm}^2$ 。用双裂变室中的薄标准样品测定绝对裂变率。8MeV中子引起 ^{238}U 裂变测量工作,是在中国原子能研究院1.2米回旋加速器上做的。利用 $\text{D}(\text{d}, \text{n})^3\text{He}$ 反应得到单能中子。气体靶的尺寸为 $\phi 22 \times 30\text{mm}$,充有经过净化的氘气,气压为4个大气压,中子能量为 $(8.27 \pm 0.11)\text{MeV}$ 。打在样品上的中子通量为 $10^7 \text{n}/\mu\text{A} \cdot \text{sec} \cdot \text{cm}^2$ 。用飞行时间技术测量中子能谱,本底中子的贡献也做了相应校正。

2. 裂变产物的测定

130 cm^3 同轴Ge(Li)探测器对1332.5 keV γ 射线的能量分辨率(FWHM)为1.85 keV

数据的获取和处理是在SCORPIO-8000多道计算机系统上进行的, γ 谱的自动找峰, 能量刻度和峰面积的计算都是用谱分析程序库(SAPL)中的相应程序完成的。裂变产额是用自编程计算的。 Ge(Li) 探测器的效率, 用 ^{241}Am , ^{147}Nd , ^{144}Ce , ^{141}Ce , ^{99}Mo , ^{111}Ag , ^{22}Na , ^{137}Cs , ^{95}Zr , ^{46}Sc , ^{60}Co , ^{182}Ta 等 γ 源进行绝对刻度。这些 γ 源, 除了 ^{241}Am 是用小立体角法标定的外, 其余的都是用 $4\pi\beta\text{-}\gamma$ 符合方法标定的。效率的实验点用经验函数——对数多项式分段拟合。总误差, 对低于263.4keV的低能段为4.2%, 高能段为2.4%。

三、裂变产额的计算

考虑下面的衰变链: $A \rightarrow B \rightarrow C$, 并假定衰变链中A核的所有先驱核的半衰期比起A核的半衰期和测量时间都短得多, C核为稳定核, 则有:

$$Y_A = AR_s/I_\gamma e_\gamma \left\{ \frac{\lambda_s}{\lambda_A(\lambda_s - \lambda_A)} K_A M_A + \left(\frac{Y_B}{\lambda_s Y_A} - \frac{\lambda_A}{\lambda_s(\lambda_s - \lambda_A)} K_B M_B \right) \right\} \quad (1)$$

$$K_A = e^{-\lambda_A t} (1 - e^{-\lambda_A \Delta t})$$

$$K_B = e^{-\lambda_B t} (1 - e^{-\lambda_B \Delta t})$$

$$M_A = \sum_{i=1}^N N_s e^{-\lambda_A \Delta t_i} (1 - e^{-\lambda_A \Delta T_i})$$

$$M_B = \sum_{i=1}^N N_s e^{-\lambda_B \Delta t_i} (1 - e^{-\lambda_B \Delta T_i})$$

式中: Y_A 为A核的累积产额; Y_B 为B核的独立产额; AR_s 为B核子全能峰面积; λ_A , λ_s 分别为A, B核的衰变常数; I_γ 为 γ 射线的绝对强度; e_γ 为探测器的效率; N_s 为 ΔT_i 间隔内平均裂变率, ΔT_i 为照射第i的时间间隔, Δt_i 为第i间隔结束到照射结束之间的间隔; t_i 为冷却时间, 即从照射结束算起到测量开始的时间间隔, Δt 为测量时间。

为了估算 Y_B/Y_A 和稳定核素C对链产额的贡献, 认为电荷分布服从表达式:

$$P(Z) = \frac{1}{\sqrt{\pi c}} \exp \left[-\frac{(Z - Z_p)^2}{c} \right] \quad (2)$$

对 ^{252}Cf 自发裂变而言, 其中 $c=0.8$, Z 为所求原子核的电荷数; Z_p 为最可几电荷数, 是从裂变电荷分布的等位移假设和裂变碎片发射中子数目估算出来的。对8MeV中子引起 ^{238}U 裂变是用Nethaway经验公式计算的。

除此之外, 还做了如下校正: 级联 γ 相加符合校正; γ 谱仪时间堆积损失校正; 对于厚的照射靶子, γ 自吸收校正是非常重要的, 已做了仔细研究。

四、独立产额的测定

把(1)式稍加变化, 可得到:

$$AR_s/I_\gamma e_\gamma F_A = Y_A + Y_B F_B/F_A \quad (3)$$

$$\text{其中 } F_A = \frac{\lambda_s}{\lambda_A(\lambda_s - \lambda_A)} K_A M_A - \frac{\lambda_A}{\lambda_s(\lambda_s - \lambda_A)} K_B M_B$$

$$F_B = \frac{1}{\lambda_B} K_B M_B$$

照射一个样品, 做 n 次测量, 得到 n 组 $AR_1/I, e, F_1$ 和 F_2/F_1 数值, 这条直线的斜率就是 Y_2 , 截距为 Y_1 , 从而得到分独立产额 $Y_2/(Y_1+Y_2+Y_0)$ 。值得说明的是做精确的测量并不太容易, 要求源比较强, Y_2 比较大, 才能得到比较好的结果。我们用这个方法测量了 ^{252}Cf 自发裂变的 ^{134}I 和 ^{135}Xe 的分独立产额。因为我们的源装置设计合理, 主体角固定, 并能绝对测量裂变率, 源虽然较弱, 但可以测量多个样品, 并得到了较好的结果。 ^{134}I 和 ^{135}Xe 的分独立产额分别为 0.268 ± 0.048 和 0.086 ± 0.012 , 与Thierens的结果很好符合, 对电荷分布的测定做了一个好的开端。

五、结果与讨论

对 ^{252}Cf 自发裂变, 我们获得了从 ^{85}Kr 到 ^{157}Eu 共44个质量链产额, 质量分布曲线表示在图1。测得的质量链的数目, 比起现已发表的, 包括质谱法, 放化法和 γ 能谱法的工作, 我们的数目为最多。测得的轻峰上的产额和为66.6%, 重峰上的和为80.31%, 未测到的, 用内插和外推法估算出来, 得到总的轻峰产额和为99.76%, 重峰上的总和为102.08%, 与归一化值

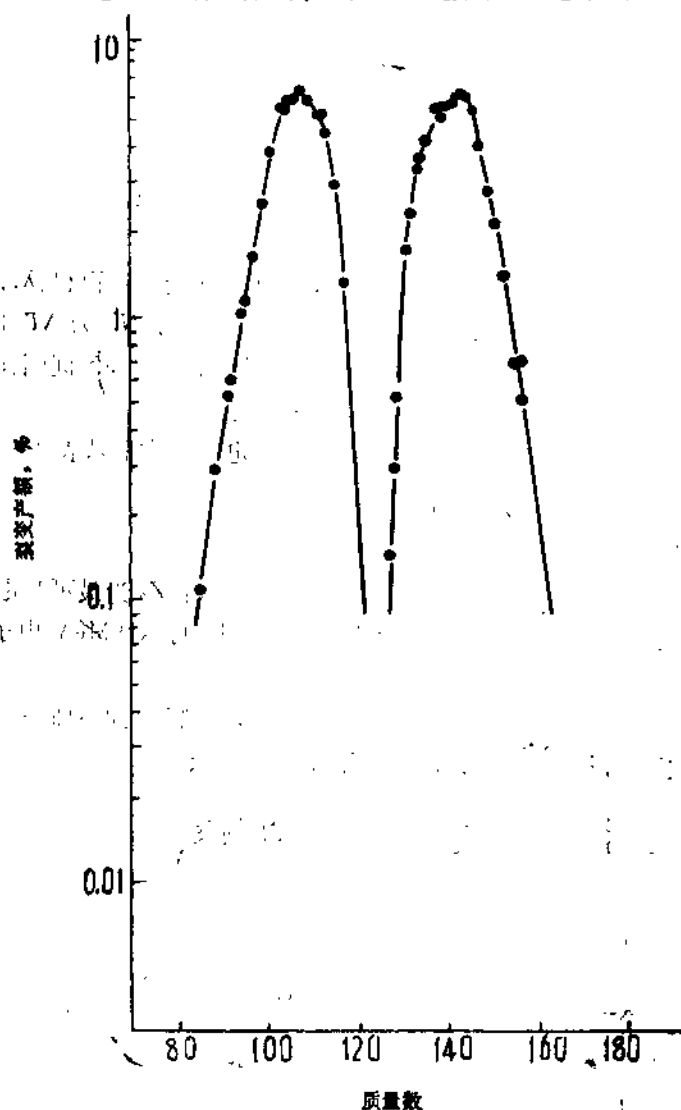


图1 ^{252}Cf 自发裂变的质分布

100%很好符合。再一次说明我们的绝对测量是正确的。轻峰平均质量数为106.6, 重峰平均质量数为141.8, 得到的平均中子数目为 3.56 ± 0.50 , 也与实验值3.732符合。测得的绝对产额数目为最多, 已发表的工作只测了少数几个核素的绝对产额, 其中最多的是苏联曾做了七个核素的绝对测量, 而我们做了44个质量链产额的绝对测量。用捕集片技术做绝对测量是首次探索成功。捕集片技术具有很多优点, 可做非破坏性测定, 节省靶样品, 特别对难以得到的样品, 如超铀元素, 更加显示出其优越性; 对 γ 能谱法而言, 大大减少本底和干扰峰; 对放化法来说, 可简化化学分离流程。因而这个技术得到了广泛应用, 但是过去只能用于相对测量, 当它被用来做绝对测量时, 就能发挥更大的作用。

8.3MeV中子引起 ^{235}U 裂变的测量, 也同样得到了较好的结果。共测量13个 ^{238}U 靶、217个 γ 谱, 获得从 ^{85}Kr 到 ^{151}Pm 共33个链产额和1个累积产额, 均为绝对测量结果。与发表的文献相比也是测量核素数目为最多的工作。这些数据与放化法的数据一起表示在图2的质量分布曲线中。用内插和外推法估测出来的产额, 轻峰和重峰的产额总和分别为101.52%和

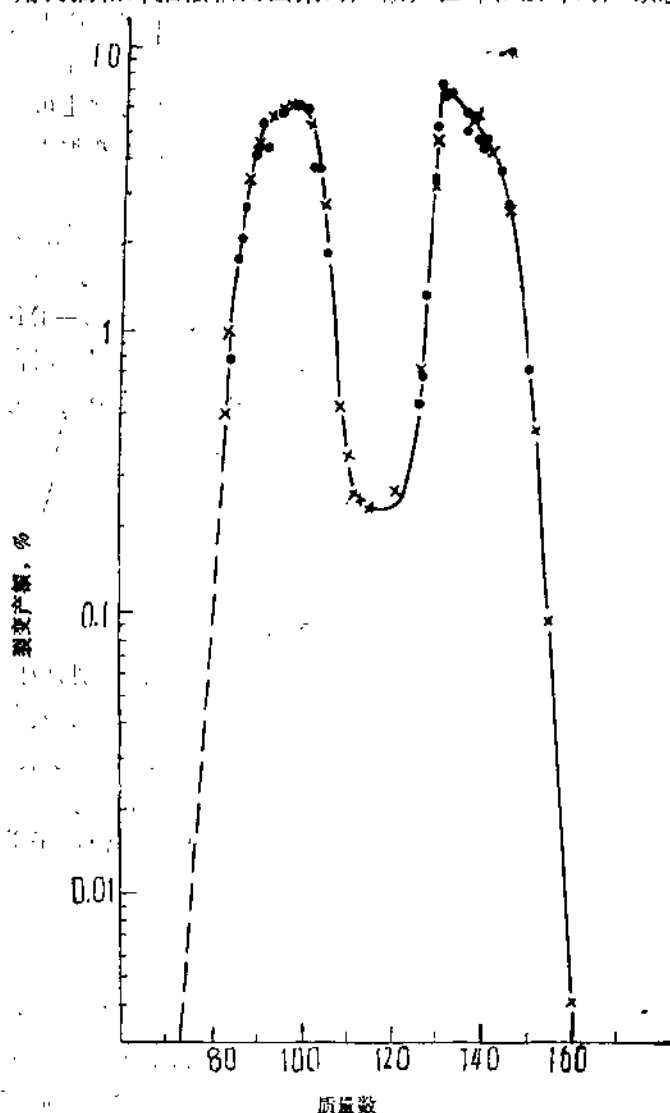


图2 8.3MeV中子引起 ^{235}U 裂变的质量分布

●——原子能谱法数据; x——放化法数据。

100.78%，这与100%在误差范围内很好符合，说明裂变率和裂变产物的绝对测定是正确的。轻重峰的平均质量数分别为97.3和138.3，平均中子数 $\bar{\nu}=3.4\pm0.2$ ，与实验编评值 3.543 ± 0.015 也很好符合。总之，用能谱法做了上述二种情况的绝对测量，都是成功的。

裂变截面测量进展

叶宗垣

快中子引起重核裂变的截面值是一个重要的核数据，随着原子能应用的发展，对它的精度要求也在逐渐提高。自从裂变现象发现以来，特别是在五十、六十年代，进行过大量的实验测量。各核大国对该数据进行过一再的编评，力求提高数据的可靠性和精度。与此同时，理论计算工作也是一直不停地进行着。但是，目前许多国家仍在不断地进行测量，主要目的也是在提高结果的精度，同时也扩大核素和能量范围。

我们在七十年代初，从测量热中子引起 ^{235}U 的裂变截面开始，到现在为止的十多年中，已对几个主要的核素 ^{235}U 、 ^{238}U 、 ^{239}Pu 、 ^{238}U 和 ^{237}Np 在力所能及的能量范围内，进行了比较系统的测量。包括的能区有：热中子，共振中子，30 keV—1.5 MeV，3—6 MeV和14—18 MeV的快中子。从测量方法来说，从相对于 ^{235}U 截面的比值测量逐步发展到用含氦正比管，反冲望远镜和伴随粒子等技术的绝对测量。从结果的精度来说，从相对值误差为2.4—2.8%提高到绝对值误差为2%的水平。

这里就裂变截面测量工作的发展概况作一综合叙述。

一、实验技术问题

1. 裂变碎片探测

记录裂变事件的主要问题是克服天然 α 衰变本底脉冲的叠加，特别是对半衰期短的钍、钷元素更是这样。我们实验中使用的是平板型浅电离室。裂变核素样品放在电离室的阴极上，极间距离1 cm，室内充以一个大气压的气体。这样，游离距离小于裂变碎片射程，有利于减少 α 堆垒本底。室内气体，早期使用的是氩气加少量的二氧化碳。后来测强 α 衰变的钷核裂变时，就改充纯甲烷气体。同时使用快电流前置放大，快放大等快电子学技术，这就提高了裂变脉冲对 α 脉冲的甄别。

2. 裂变核样品

在裂变截面测量中裂变事件是从记录裂变碎片在电离室中产生的脉冲来得到，这就使得裂变样品的载量不能太多，而且要求分布均匀。样品定量的是否准确，直接关系着裂变截面值的精度。测量中所使用的样品都是用分子电镀法制备的。衬底用铂箔或不锈钢片。使用的定量方法有：残液称重法， α 比放射性法， α 衰变率测定法，恒流库仑法，滴定法等。对于每一种核素至少用两种以上的方法作比较，从而确定核数目及精度。用伴随粒子法定截面时，还要对样品均匀性进行测试。所用过样品的性能见表1。

表1 样品的特性

核 素	ϕ , cm	数量, mg	定量误差, %	不均匀引起面密度误差, %
^{235}U	2.60	~ 1.1	1—1.5	1.1
^{235}U	2.60	~ 1.1	1.1	
^{235}Pu	2.60	~ 1.0	1.0	1.2
^{237}Np	2.60	~ 0.5	1.0	
^{235}U	2.60	~ 1.0	1.0	

二、裂变截面值的相对测量

裂变截面值的相对测量〔1, 2〕在这种测量中是以 ^{235}U 的裂变截面作为标准。其测量方法是将待测样品和标准样品(^{235}U)背对背地放置在双电离室的中心电极上。中子照射时, 同时记录两个收集电极产生的脉冲数目。由记数比值及样品核数目、探测器记录效率、自吸收及非单能中子裂变本底等校正以后得到截面比值。使用这种测定方法的特点是可以消除或减小中子通量的绝对刻度、束流不稳定、靶点偏离等因素所造成的误差。它的问题是日前 ^{235}U 裂变截面本身的精度还不是很高的, 得出的待测同位素截面值的误差也就偏大。

三、裂变截面值的绝对测量

在裂变截面绝对值的测定中, 中子通量的标定是一个主要问题, 先后采用过三种方法:

1. 用含氢正比计数管刻度1.0, 0.5 MeV两个能量点的中子通量, 对 ^{235}U 和 ^{238}U 的裂变截面进行绝对测量〔1〕。使用这种方法, 误差来自含氢正比管的探测效率、计数管和电离室相对于中子源距离的量度、束流监测的稳定性、裂变记数的误差和样品核数目的误差等。最后得到结果的总误差为5%。

2. 将标定中子通量的质子反冲望远镜的辐射体与裂变核样品背对背放置, 用这种方法测量了1.0—1.6 MeV和3.5—5.6 MeV能区的裂变截面绝对值〔3, 4〕。实验安排如图1所示。

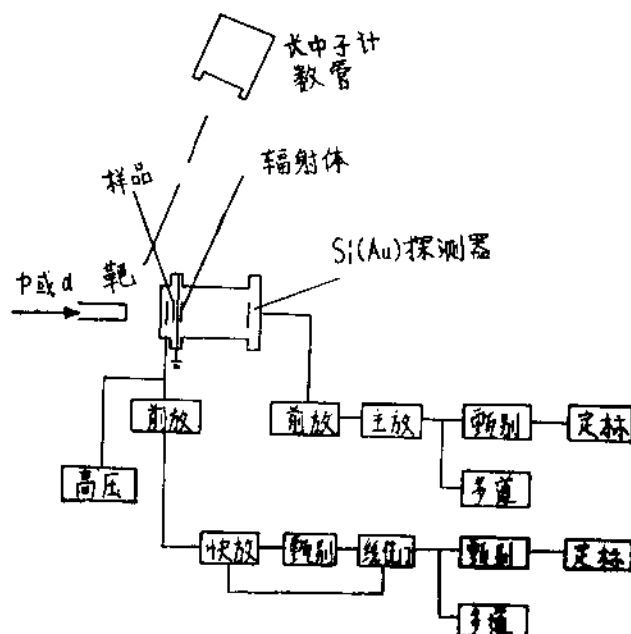


图1 用反冲望远镜法测裂变截面的实验示意图

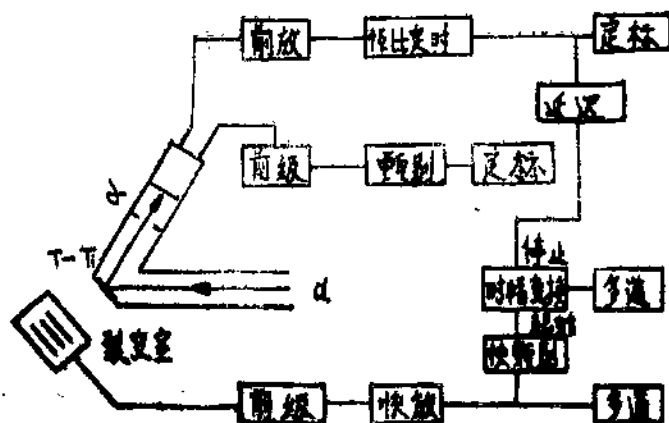


图2 用伴随粒子时间关联法的实验示意图

使用这种方法的特点是：（1）避免了测中子记数和裂变记数由于位置、能量和时间上的差异所带来的不确定性；（2）减少了由于监测记录不稳定和靶点漂移所引起的误差。实验误差主要来自：裂变核数目、散射中子校正、穿透损失校正、辐射体含氢核数目、n-p散射截面和几何因子、中子在探测器中引起的带电粒子本底的扣除等。

用此种方法测量了 ^{239}Pu 、 ^{238}U 和 ^{237}Np 的裂变截面值，误差在2—3%之间。

3. 用伴随粒子技术测量14MeV能区裂变截面绝对值〔4〕：利用 $\text{T(d,n)}^4\text{He}$ 反应同时产生中子和 α 粒子，其 α 具有约3MeV的能量，利用中子与 α 粒子运动学上关联的特点，同时记录裂变碎片和 α 粒子，得到裂变截面值。实验安排如图2所示。测量时，使用时间关联代替符合

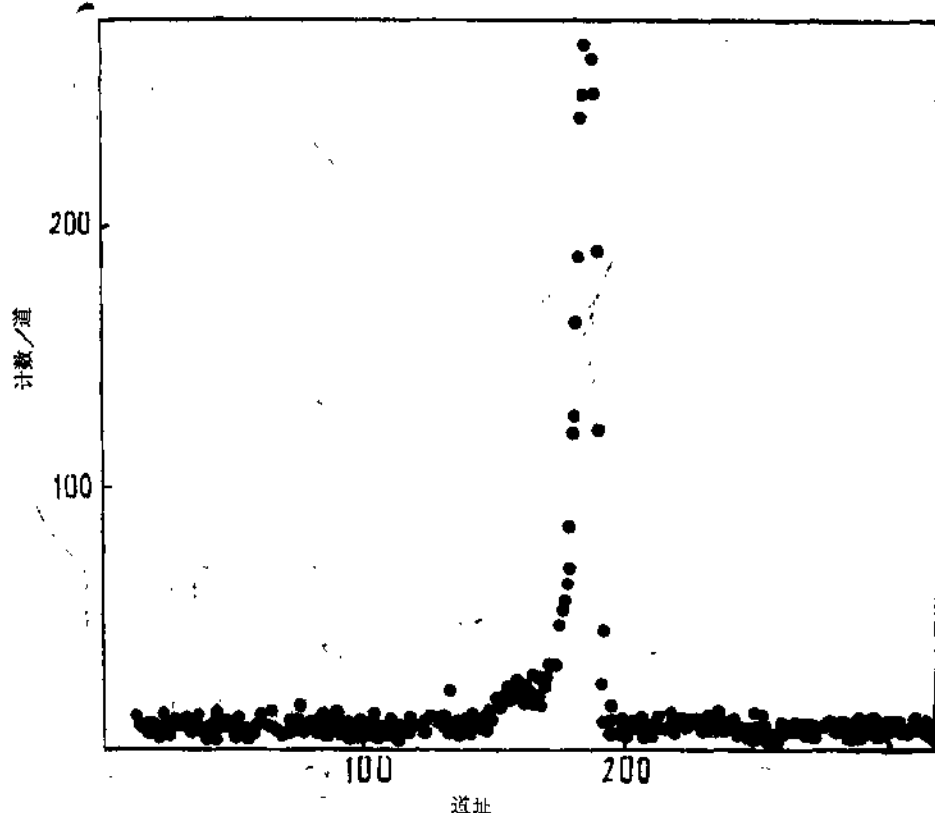


图3 一个典型的时间关联谱形