

裂变瞬发中子多重性研究¹⁾

许谨诚 张焕乔 刘祖华

(中国原子能科学研究院,北京 102413)

本文介绍了裂变瞬发中子多重性这一研究领域的概况,着重介绍获第二届吴有训物理奖的“自发裂变和中子诱发裂变的瞬发中子多重性的研究”成果的主要内容和意义。

1939年核裂变现象的发现开始了大规模利用核能的新时期。核武器和核动力潜艇是核能在军事上的应用,它对人类社会在军事和政治上都产生了巨大的影响。在人类社会的经济方面,核能发电已经占全世界总发电量的17%以上,对不少国家核电已在能源中起着举足轻重的作用。我国第一个核电站也即将建成发电。大规模利用核能之所以可能,首先是由于在裂变时释放出大量的能量,更重要的是由于裂变可以实现自续的链式反应:当一个重核(如²³⁵U)被一个中子击中发生裂变时能放出二个以上的中子。在合适条件下这几个中子可以引起其他一定数量的²³⁵U核裂变。如果这个数目等于1,则裂变反应在同一水平下不断进行下去。如果它大于1,就会有越来越多的核发生裂变。在链式反应中裂变中子起着链条的关键性作用,因此裂变中子数目是一个重要的核参数。

核裂变过程是一个十分复杂的过程。当重核裂变时(如²³⁵U核被中子击中发生裂变或²⁵²Cf核发生自发裂变),绝大多数情况下首先分成两大块——裂变碎片,它们的质量数 A 和原子序数有一定的几率分布,叫质量分布和电荷分布 $[Y(A), P(Z)]$,并释放出大量能量。大部分能量(170 MeV)转化成两个碎片的动能 E_k ,其余为碎片的内激发能。处于激发态的碎片在极短的时间内($< 10^{-14}$ s)先放出中子——即裂变瞬发中子,接着发出一些 γ 射线退激到基态。不过这些处于基态的核素大多数由于中子数相对过多而属于不稳定核素,它们还要发生数次 β 衰变而最后变成稳定同位素。这个过程中还会发出少数中子——缓发中子,它的数目只有零点零几个。在下面我们将限于讨论对瞬

发中子的研究。

因为裂变是如此复杂的过程,涉及许多统计分布,因此在一次裂变中放出的瞬发中子数并不是一个定数,而是有一个统计分布 $P(\nu)$, $\nu = 0, 1, 2, \dots$ 为中子数。这个分布叫中子多重性分布,它的平均值 $\bar{\nu} = \sum \nu P(\nu)$ ——平均中子数或中子多重性,是人们直接关心的一个重要核参数。在核工程的设计计算中要求知道各种裂变核,特别是²³⁵U, ²³⁸U和²³⁹Pu这三种核的 $\bar{\nu}$ 值随引起裂变的的中子能量 E_n 的变化 $\bar{\nu}(E_n)$ 。因为它的作用重要,在所有的核参数中对 $\bar{\nu}$ 值的精度要求是最高的。在裂变发现后的几十年中世界各国的许多实验室对 $\bar{\nu}$ 值的测量进行长期不懈的工作,其目标是不断提高数据的精度和可靠性。中子多重性的测量对了解裂变机制也起着重要的作用。

一、²⁵²Cf自发裂变中子多重性的测量

²⁵²Cf由于有合适的自发裂变寿命(α 衰变半衰期2.645年,自发裂变分支比3.09%),可以做成强度合适的自发裂变中子源,因此它的 $\bar{\nu}$ 值被公认为一个国际标准。它用来对各实验室的测量装置和方法进行刻度和检验,而且不少裂变核的 $\bar{\nu}$ 值是相对²⁵²Cf自发裂变的 $\bar{\nu}$ 值来测量的,因此精确地绝对测量²⁵²Cf的 $\bar{\nu}$ 值就十分重要。从1965年以后,召开过多次专门的国际会议来讨论²⁵²Cf的 $\bar{\nu}$ 值,作出评价和提出新的测量要求。但是在70年代中期这么重要的一个数据,在三种主要测量方法得到的值之间存

1) 本文介绍的工作获中国物理学会第二届吴有训物理奖。

表1 ^{252}Cf 自发裂变中子平均数 $\bar{\nu}_p$ 数据比较 (1978)

作者	方法	年代	原来值	订正值
Moar et al.	NPL 镓浴法	1961	3.77 ± 0.07	3.727 ± 0.055
Colvin et al.		1965	3.700 ± 0.031	3.700 ± 0.028
White and Axton		1968	3.796 ± 0.025	3.796 ± 0.037
Axton		1974	3.700 ± 0.020	3.725 ± 0.019
权平均值				3.728 ± 0.0186
De-Volpi and Porges	镓浴	1970	3.725 ± 0.017	3.725 ± 0.030
Colvin & Sowerby	硼堆	1965	3.713 ± 0.015	3.713 ± 0.015
Hopkins & Diven	液体闪烁体	1963	3.780 ± 0.031	3.770 ± 0.031
Asplund-Nilsson		1963	3.808 ± 0.037	3.778 ± 0.060
Boldeman et al.		1977	3.745 ± 0.016	3.745 ± 0.016
本工作		1978	3.743 ± 0.018	3.743 ± 0.018

在明显的系统偏差, 差别达 2% (参见表 1), 尽管一些单个测量的精度已好于 0.5%。对 $\bar{\nu}$ 值的各种测量方法可以分为两大类: 非符合法和符合法。非符合法分别测量 ^{252}Cf 样品的裂变率 n_f 和中子发射率 n_n , 则 $\bar{\nu}_i = n_n/n_f$, 它包括了缓发中子的贡献。镓浴法和硼堆法(分别用镓浴和硼堆来测中子发射率)均属于这一类。由于裂变数和中子数分别测定, 均可达到高的精度, 镓浴和硼堆技术相当成熟。表 1 中给出了 1978 年以前这两种方法给出的较好的 $\bar{\nu}$ 值。符合法中一种较先进的方法是用液体闪烁体记录中子, 所用装置简要地用图 1 表示。用电离室探测到的裂变碎片信号去触发电子学线路, 记录与之符合的来自中子探测器的裂变中子脉冲数。由脉冲数

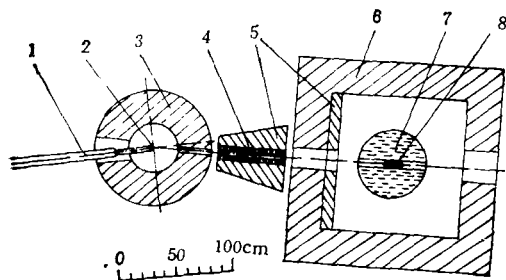


图1 实验装置示意图
1. 加速器管道; 2. 中子靶; 3. 硼-石蜡屏蔽; 4. 铁准直器; 5. 铅屏蔽; 6. 硼-石蜡屏蔽; 7. 中子探测器; 8. ^{239}Pu 电离室

的平均值 $\bar{\nu}$ 和中子探测效率 η 可得 $\bar{\nu}_p = \bar{\nu}/\eta$ 。这种方法的优点是还能得到多重性分布 $P(\nu)$ 以及多重性与碎片各种特性的关联。这种方法要达到高的精度很不容易, 要求发展探测技术以尽可能高的效率来探测裂变和中子。绝对测量还要求对中子探测器的效率与中子能量的变化

表2 有关 $\bar{\nu}_i$ (^{252}Cf) 数据的比较(1988)

Experiment	$\bar{\nu}_i$
液体闪烁体	
Asplund-Nilsson et al. (1963)	3.792 ± 0.040
Hopkins and Diven (1963)	3.777 ± 0.031
Boldeman (1974)	3.755 ± 0.016
Zhang and Liu (1979)	3.754 ± 0.018
Spencer et al. (1982)	3.782 ± 0.007
镓浴	
White and Axton (1968)	Superseded
Axton et al. (1969)	Superseded
De Volpi and Porges (1970)	3.747 ± 0.019
Aleksandrov et al. (1975)	Superseded
Bozorgmanesh (1977)	3.774 ± 0.023
Aleksandrov et al. (1980)	3.758 ± 0.015
Smith and Reeder (1984)	3.767 ± 0.011
Axton and Bardell (1984)	3.7509 ± 0.0107
硼堆	
Colvin and Sowerby (1965)	3.739 ± 0.021
Edwards et al. (1982)	3.761 ± 0.029
推荐	
Axton (1984)	3.7661 ± 0.0054

做出精确的刻度,发展到70年代中期才达到0.5%的精度。不巧的是两种方法各自的平均值之间差2%,而且液体闪烁体法又有高低两个数据,这说明存在一些未了解的因素产生系统误差。正是在这样的背景下,中国原子能科学研究所的张焕乔等同志开展对 ^{252}Cf 自发裂变 $\bar{\nu}_p$ 值的精确的绝对测量,以澄清存在的分歧。这就要求对实验作出精确合理的设计,尽可能地排除产生系统误差的因素,并对一些效应做出合理的修正。为此他们建立了大体积的球形载轧液体闪烁探测器^[1],它对裂变中子的探测效率高于70%,利用实验和Monte Carlo方法计算高精度地确定了中子探测器的效率曲线,建立了相应的高稳定电子学线路^[2]。经过仔细的考虑各种效应的修正得到的测量值为 $\bar{\nu}_p = 3.743 \pm 0.018$ (或 $\bar{\nu}_t = 3.754 \pm 0.018$)。这是我国第一个这方面的标准数据。表2是1988年Boldeman在日本Mito召开的裂变中子发射物理顾问会议上作的最新评价的结果^[3]。可以看到,在张焕乔等人的测量之后,三种方法都有一些精度更高的测量结果,三种方法之间的分歧也已消除,国际评价推荐值为 3.7661 ± 0.0054 。而张焕乔等的测量值与推荐值之间的差仅为0.3%,在液体闪烁体法的各个值中与推荐值的差别最小。经过时间的考验,表明他们的结果是精确可靠的,测量水平是高的。它为这一国际标准值的建立作出了重要的贡献。

二、 ^{239}Pu 为快中子诱发裂变的瞬发中子平均数随中子能量的变化 $\bar{\nu}_p(E_n)$

快中子使 ^{239}Pu 裂变的 $\bar{\nu}_p(E_n)$ 是70年代我国核事业发展提出的重要测量任务。这个核数据虽然重要,但到70年代中期国际上只有少数几家发表过数据(见图2),这是因为它的高精度测量难度很大。用符合法测量要解决三个技术难点:第一, ^{239}Pu 有很强的 α 放射性,在裂变探测器中频率很高的 α 脉冲叠加起来会产生假的裂变信号,因此要发展裂变探测技术既克服强 α 脉冲的堆垒效应,又能高效率地探测裂变

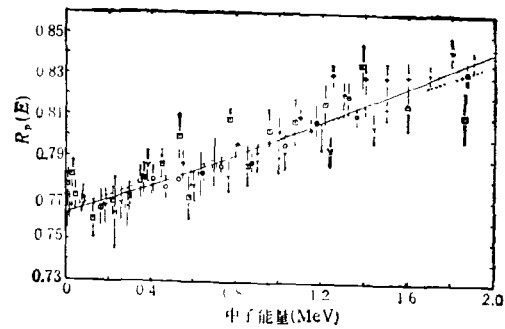


图2 ^{239}Pu 为快中子裂变时瞬发中子平均数随中子能量的变化, $\bar{R}_p = \bar{\nu}_p(\text{Pu})/\bar{\nu}_p(\text{Cf})$
 Y张焕乔等(1980); □ Gwin et al. (1986);
 ◇ Soleilhac et al. (1970); △ Volodin et al. (1972);
 + Nupreisov et al. (1975); ○ Frehaut et al. (1980);
 — Manero and Konstantin (1972); --- ENDF/B-V

碎片;第二,用加速器通过核反应中子源来产生所需能量的快中子来引起 ^{239}Pu 裂变时,只有极少量中子打在 ^{239}Pu 样品上,绝大多数源中子会对中子探测器造成很大的本底,因此要为中子源和探测器设置良好的屏蔽,尽可能地降低这种本底;第三,要精心地设计实验几何和中子源周围的屏蔽,减少其他能量的中子,尤其是低能中子对源中子的污染,以保证打在 ^{239}Pu 样品上的中子能量的良好的单色性。也是在70年代中期开始,张焕乔等人着手发展相应的技术手段来进行这项测量。除了前面提到的液体闪烁体中子探测器之外,他们发展了一种多层快速电流电离室。整个电离室由十个分电离室组成,装载的 ^{239}Pu 样品量达105mg(总 α 放射性强度为 $2.2 \times 10^8 \text{Bq}$),对裂变碎片的探测效率好于90%,达到当时国际先进水平^[4]。所用实验装置示意于图1。他们经过几年的努力完成了 E_n 在0.1—1.5 MeV能区的测量。图2给出了他们的结果,也画出了其他几家较好的结果作为比较。该图取自1986年Gwin的评述文章^[5]。他们测量结果的误差与其他工作结果的误差相近,但他们的结果首先揭示出在 $E_n > 1.2 \text{MeV}$ 时 $\bar{\nu}_p(E_n)$ 的斜率有减小的趋势。这一点为以后Gwin的测量所证实,并在美国的评价核数据库ENDF/B-V中得到反映,在 $E_n > 1.2 \text{MeV}$ 能区,ENDF/B-V的推荐曲线低于1972年Manero等人给出的推荐曲线。

三、 ^{252}Cf 自发裂变 $\bar{\nu}_p$ 与碎片特性的关联研究

上面两节中介绍的研究是为了核数据的需要。但裂变中子多重性的测量也可作为核裂变机制研究提供重要的信息。碎片放出的中子数目近似与碎片的激发能成正比，而多重性分布进一步代表了激发能的分布，因此测量 $\bar{\nu}$ 与碎片的质量 A 、电荷 Z 和动能 E_k 的关联可以反映激发能的分配与这些参量的关系。为此需要用符合法做多参量关联测量。图 3 给出了 ^{252}Cf 自发裂变的 $\bar{\nu}_p$ 与碎片质量 A 的关系，呈现出有名的锯齿形分布^[6]。由此可以推断出在裂变核断开的时候， $A \sim 130$ 的碎片由于接近双幻数，形状接近球形，变形能小，获得的激发能少，因此放出中子数少。与之相反 $A \sim 120$ 的核容易发生变形，在断裂时变形较大，获得较多激发能，因此放出中子数多。这个例子说明了 $\bar{\nu}_p$ 的关联测量为我们提供了如此生动的一幅断裂瞬间的图象。

张焕乔小组利用前面介绍的装置对 ^{252}Cf 自发裂变的 $\bar{\nu}_p$ 与碎片的 A, Z, E_k 的关联作了较系统的测量。因为碎片的 A, Z, E_k 都分布在较宽的范围，为了指示小几率处的特性，每种测量都要获取几百万个事件数以得到较好的统计。他们还还对事件发生几率低近两个数量级的伴随长程 α 粒子的三分裂(除两个大碎片外，还伴随着一个轻带电粒子，如质子、氘、 α 粒子等)作了测量。为了解裂变机制提供了大量的信息。下面介绍两个结果。

1977 年 Walsh 等^[7]提出 ^{252}Cf 自发裂变的单碎片瞬发中子平均数 $\bar{\nu}_p(A)$ 中存在奇偶效应，即偶质量碎片的 $\bar{\nu}$ 值比相邻奇质量碎片高。为此张焕乔等人不仅测了 $\bar{\nu}_p(A)$ ^[6]，还测了 $\bar{\nu}_p(Z)$ ^[8]，两者都没有显示出奇偶效应，他们并且对为什么不表现奇偶效应作出了合理的解释，澄清了这个问题。

他们的 ^{252}Cf 自发三分裂的 $\bar{\nu}_p(E_\alpha)$ 关联测量结果表明 $\bar{\nu}_p$ 与长程 α 粒子的能量 E_α 之

物理

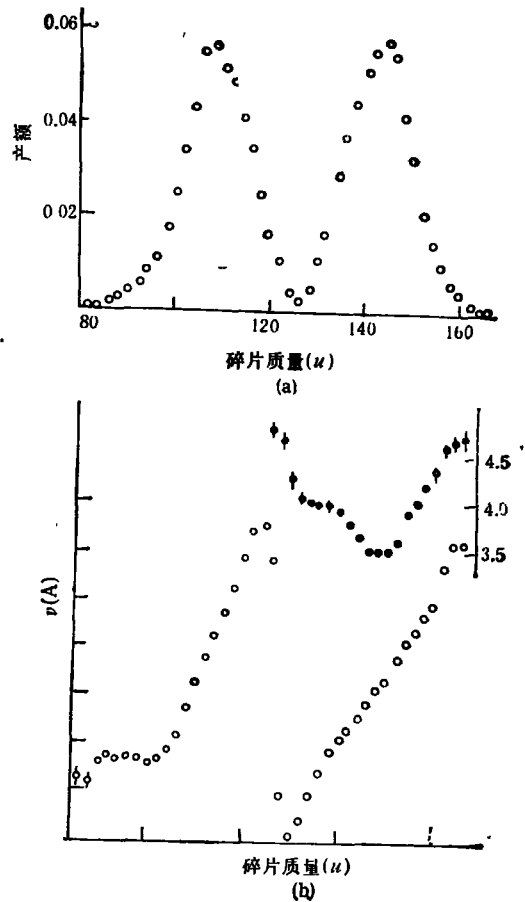


图 3 (a) ^{252}Cf 自发裂变时发射中子前的碎片质量产额曲线
(b) ^{252}Cf 自发裂变时瞬发中子平均数随单碎片质量的变化(\circ), 和两个互补碎片总中子平均数与重碎片质量的变化(\bullet)

间存在负关联。这定性地给出了如下图象：在三分裂时如果碎片变形大，一方面碎片放出中子数高，另一方面碎片间距离较大，两碎片和 α 粒子之间库仑能小，从而最终 α 粒子的动能低。反之，碎片变形小则导致发射中子数少而 α 粒子高。三点电荷模型计算可以解释 α 粒子动能分布，但初始条件的选择缺少物理基础，而中子多重性的测量结果为此提供了物理图象。

裂变中子多重性研究内容十分丰富，由于篇幅限制，这里仅介绍了一部分。下面简略地介绍中子多重性研究的一些最近进展作为结束语。

当核反应产生的复合核激发能足够高，如

几十 MeV 时,有可能先放出中子,剩余核激发能还高于裂变势垒而发生裂变,裂变碎片再放出几个中子.这称为多次机会裂变.裂变前放出中子数目 $\bar{\nu}_{pr}$ 和裂变中子数 $\bar{\nu}_f$ 的大小反映了放中子和裂变两种过程的竞争.在 80 年代以前,这种竞争用 Bohr-Wheeler 的鞍点统计理论来描述.这两种中子由于发射源不同,因此相对于碎片的运动方向,中子的能量-角分布是不同的.实验上用关联飞行时间技术可以把它们区分开来.80 年代开始有一些实验结果表明,在重离子核反应时裂变前中子数 $\bar{\nu}_{pr}$ 比 Bohr-Wheeler 理论预言的要高出不少^[10].这种分歧是因为 Bohr-Wheeler 理论把裂变过程中核从基态越过鞍点看作瞬态过程,而实际上这个过程需要时间,理论上要用非平衡态的扩散过程来描写^[11].正是这个过程给了发射中子更多的机会,提高了 $\bar{\nu}_{pr}$.新的理论可以较好地解释 $\bar{\nu}_{pr}$,并且从中可以确定核的性质的一个重要参数——核粘滞系数的数值^[12].这个参数在其他核过程中是很难确定的.

当两个重离子发生碰撞时其轰击能量有多少可以转为激发能,有没有极限?这是重离子核反应机制研究的一个基本问题.另一方面,一个核能承载的最大激发能是多少也是一个热烈争论的问题.前面说过中子多重性是发射中子的核的激发能的一个很好的量度,因此在重离子核反应,尤其是中能区,中子多重性测量被广泛

地用来研究上面提出的这些问题.例如,法国的 GANIL 实验室为此建立了一个体积为 3000 l 的载钆液体闪烁探测器系统^[13],并且得到一些重要而有趣的结果^[14];当他们用能量为 1080 到 3080 MeV 的 ⁴⁰Ar 去轰击 ¹⁹⁷An 和 ²³²Th 靶时,中子多重性测量结果表明,发生对心碰撞形成的热核其激发能在大约 650 MeV 时达到饱和,所对应的核温度约为 5 MeV.这为研究以上问题提供了很好的数据,但这些问题的明确的解答还有待进一步的系统的研究,而中子多重性的测量将起十分重要的作用.

- [1] 许谨诚等,原子能科学技术 1(1978),14.
- [2] 张焕乔,刘祖华,原子核物理 1(1979),9.
- [3] J. W. Boldeman, Proceedings of A Consultants Meeting On physics of Neutron Emission in Fission, MITO CITY, Japan, 24-27 May (1988) INDC (NDS)-220, (1989), 21.
- [4] 张焕乔等,原子核物理2(1980),29.
- [5] R. Gwin et al., Nucl. Sci. Eng., 94 (1986),365.
- [6] 丁声耀等,原子核物理6(1984),201.
- [7] R. L. Walsh et al., Nucl. Phys., A, 276 (1977), 189.
- [8] 丁声耀等,原子核物理6(1984),9.
- [9] 刘祖华,张焕乔,原子核物理3(1981),281.
- [10] G. Gavron et al., Phys. Rev. C, 35, (1987), 579.
- [11] D. J. Hinde et al., Phys. Rev. C, 37 (1988),2923.
- [12] Wu Xizhen et al., Chin Phys (New York) 1(1981), 671.
- [13] Lu Zhongdao et al., Phys. Rev. C, 42, (1990), 707.
- [14] J. Galin et al., Hot Nuclei Studies with A 4 π -Neutron Detector, GANIL p. 89.
- [14] D. X. Jiang et al., Nucl. Phys. A, 503, (1989), 563.

周培源国际科技交流基金首次颁奖

周培源国际科技交流基金首届颁奖仪式于 1991 年 4 月 27 日在北京人民大会堂隆重举行.中国科学院院长、周培源国际科技交流基金委员会主任周光召及卢嘉锡、唐敖庆、陈敏章、张百发、裴丽生等有关领导出席.该基金委员会向唐有祺、孙振纯、赵忠贤、邱希白等 18 位老、中、青科技人员和第 19 届国际昆虫学大会组织委员会等三个集体分别颁发了大奖、交流奖和鼓励奖.为表彰我国赴科威特考察并做出重要贡献的石油灭火专家和大气研究专家,该基金

还授予特别奖.基金委员会主任周光召同时宣布,与中国物理学会、北京协和医院等十个学会和单位联合设立专项国际交流奖励基金,以促进我国与国际间的科技交流.

“周培源国际交流基金”成立于 1990 年,其宗旨是奖励我国优秀科技工作者参加国际民间科技交流活动及在此项领域中做出重要贡献的科技人员.

(程义慧)