

裂变产物丰中子核素的瞬发 γ 谱的实验研究

朱胜江

(清华大学现代物理系 北京 100086)

摘要 测量由 ^{252}Cf 等裂变产物的瞬发退激 γ 谱是获得诸多丰中子核素能级结构信息的重要手段之一. 本文对这种方法的一般原理、裂变产物所涉及的核区对核结构研究的意义、国外研究状况及清华大学核结构组与国外开展联合研究的情况作了介绍.

关键词 裂变, γ 谱能级, 自旋, 丰中子, 瞬发.

1 前言

从核素图上可以看出,对位于 β 稳定线右侧的丰中子核素远不如对左侧的缺中子核素研究得多. 其原因是从现行的重离子核反应中取得缺中子核素较容易;而取得丰中子核素,特别是那些远离 β 稳定线的核,是非常困难的. 目前大部分这类丰中子核素信息的获得来自于重核的裂变. 由于受裂变产物分布所限,已发现的丰中子核素大部集中于 $A = 100$ 与 $A = 140$ 为中心的两个区域内. 从核结构研究角度考虑,以上两个区域正处于 $A = 100$ 与 $A = 150$ 两个形变区及它们之间的过渡区. 对这些丰中子核素的研究,无疑对核结构的理解具有重要意义. 实验上不断发现新的有趣的现象. 例如,在 $A = 100$ 区,亚球壳效应与大的基态形变;从球形核到大形变核之间的突然转变;同一种核中,球形与大形变的“形状共存”等等. 这些事实对现有的理论研究提出了挑战. 以Zr丰中子核素为例,对 ^{100}Zr ($N = 60$)的大形变($\beta \sim 0.4$)的确立,理论上有两种意见:一种用球形壳模型来解释^[1,2],认为这种形变是由于在占据自旋轨道合伙态(spin-orbit partner states)的核子($g_{9/2}$ 质子与 $g_{7/2}$ 中子)之间的质子-中子同位旋标量相互作用所引起的;另一种则用形

变平均场的计算^[3,4]指出, $h_{11/2}$ 的中子侵入轨道在稳定形变中起主导作用. 到底哪种正确,目前相持不下. 又如,在 $A = 150$ 形变区的边

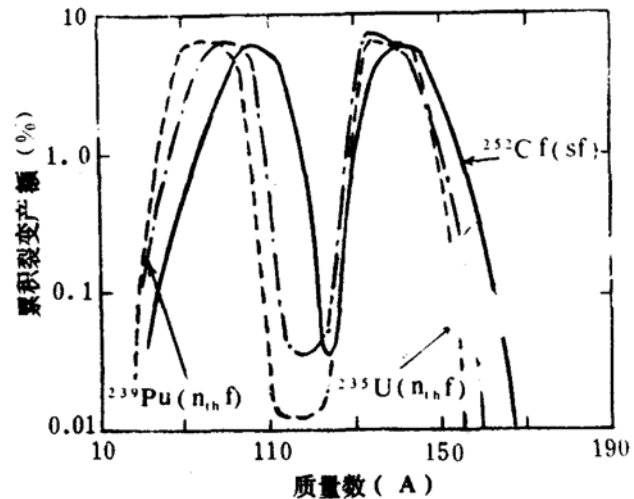


图1 ^{252}Cf 自发裂变与 ^{239}Pu 、 ^{235}U 热中子诱发裂变累计产额分布比较

变,从Ba~Sm,不少核具有八级形变的特征^[5],这是人们很感兴趣的问题. 而对这种八级形变的“软度”,即究竟是属于稳定的八级形变或是具有大幅度振动,目前尚不清楚. 再如,对 $56 \leq Z \leq 64$ 范围内的偶-偶同中异位素的系统性分析^[6a]表明,在 $N \leq 88$ 时,第一激发态(2^+)的能量随 Z 增加呈系统性上倾,在 $N = 90$ 时则相反,呈系统性下倾,理论

上需要进一步解释. 对处于这两个形变区之间的过渡性核(如 Ru, Pd, Cd, Xe 等), 属于振动区、软形变(或三轴形变)区, IBM 模型对这一区域很感兴趣, 如何深入理解这些过渡核的特性, 目前是核物理界讨论的热点之一. 当然还有更多需要研究的问题, 需要开展更多的实验与理论工作.

2 裂变产物分布及退激过程

常用的重核的裂变分为诱发裂变(如 ^{235}U , ^{239}Pu)及自发裂变(如 ^{252}Cf , ^{248}Cm). 裂变产物是一个包含上百种丰中子核素的“宝库”. 重核的裂变绝大部分裂变成两个互补的

产物, 形成多种丰中子同位素. 产物的质量按累计产额分布如图 1 所示(取自 [6b]), 以 $A = 140 \sim 150$ 为中心, 不同重核略有差别. 图 2 为由 ^{252}Cf 裂变产物可以得到的丰中子产物分布图, 以 Sn 为界, 分成在从 Kr ($Z = 36$) 到 Gd ($Z = 64$) 的广泛范围内. 处于两个区域的中心地带, 产物相对强度较强, 容易测量; 边缘则较弱, 测量难度较大.

实验上对这些丰中子核结构的研究大体分两种方法, 一是用质量分离器, 分离出具有某种质量的核素后, 测量 β 蜕变后的 γ 谱. 另一种是测量瞬发退激 γ 谱, 后者正是我们讨论的重点.

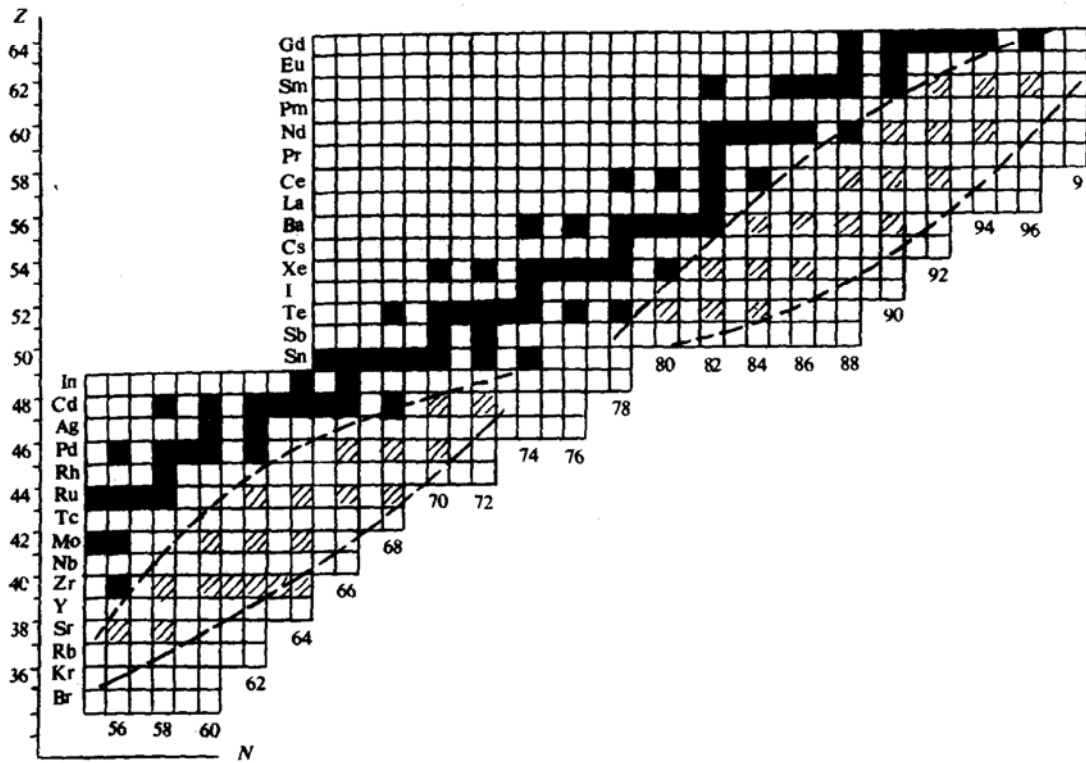


图 2 由 ^{252}Cf 自发裂变产物可得到的丰中子核素示意图. 虚线画出两个分布区, 斜线表示用瞬发 γ 谱法研究过的核

以裂变产物为形变偶-偶核为例, 裂变碎片的退激过程如图 3 所示(取自文献[7]). 与在束 γ 谱研究中, 重离子反应的退激过程

有类似之处. 裂变发生后, 两块碎片 F_1, F_2 沿相反方向飞出. 同时, 碎片本身沿运动方向轴高速旋转, 顺排角动量则垂直于此轴. 初始裂

变碎片除了具有较高的动能外,还具有约(15~20)MeV 的激发能. 此激发能通过发射中子与射线而逐步损失掉. 开始阶段主要发射中子, 带走大量激发能, 其后是发射 γ , 带走大量角动量. 在激发能约为(3~4)MeV 时, 发射分立 γ 射线, 如图 3 下部所示, 这就是瞬发 γ 谱测量对象. 一般自旋态可达 10^+ ~ 14^+ . 对于碎片为其他类型的丰中子核, 情形是类似的, 只不过分立 γ 谱的退激途径要复杂得多.

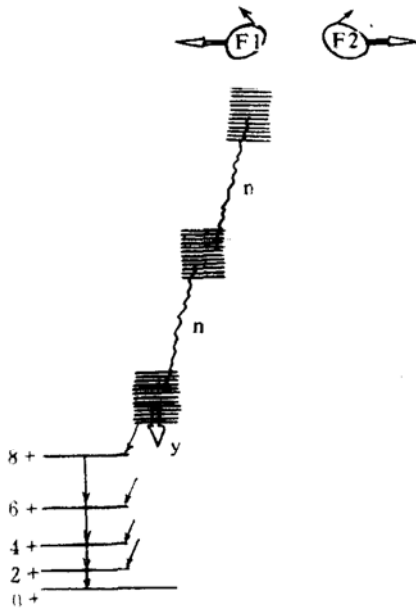


图 3 裂变的退激过程示意图(取自文献[7])

由此可以看出, 现行的在束 γ 谱的测量技术与数据分析技术完全可以用来做裂变瞬发 γ 谱的测量.

3 国外研究状况及实验方法

用同位素分离法测量丰中子核素 β 衰变后的 γ 谱, 做得较普遍, 在迄今为止的多次远离 β 稳定线的国际讨论会上都有相当数量的报道, 至今仍是很感兴趣的课题. 如在德国 Jürich 反应堆上的 JOSEF 分离器上对

^{104}Mo 、 ^{106}Mo 的能级结构研究^[8,9], 法国的 Laue—Langvin 研究所在 OSTIS 分离器上对丰中子 Ba、La 和 Pr 等核素的研究^[10,6c-d], 美国的 Brookhaven 国家实验室在 TRISTAN 同位素分离器上对 Ce、La 等核的研究^[6c,e,f,g] 以及美国的 Idaho 的 ESOL 分离器对 $A = 150 \sim 160$ 区的一系列丰中子核的寿命研究^[6a,11] 等等, 都做了出色的工作. 这种测衰变谱的优点是便于能级结构的深入研究, 由于分离出质量数, γ 谱的识别较易. 缺点是受衰变机制所限, 衰变后的自旋态不能测得太高; 对于非常远离 β 稳定线的丰中子核素, 由于受半衰期所限, 分离起来很困难; 实验设备庞大、复杂.

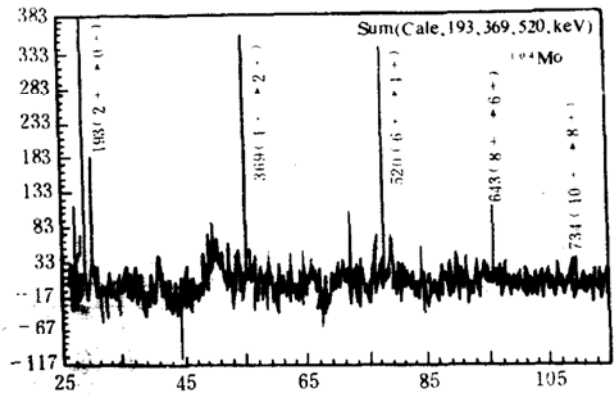


图 4 ^{104}Mo 的“门”符合加谱

对于瞬发 γ 谱的测量, 多用 ^{252}Cf 自发裂变源. 其优点是可获得较高的激发态, 不受产物寿命的限制, 原则上可以测到所有裂变丰中子核素的退激 γ 谱; 利用在束 γ 谱的符合技术, 一次测量可以获得众多的丰中子核素的信息, 可节省大量的实验时间; 设备相对简单, 不需要反应堆或同位素分离器. 缺点是低激发态的能级结构不能研究得很细, 对测量系统要求高, 由于包含的核素多, 数据分析工作相当复杂.

最早测量裂变瞬发 γ 谱始于 60 年代中期, 直到 1970 年, 没有得到象样的实验结果. 1970—1972 年间, 随着符合技术的初步发展, 对 ^{252}Cf 自发裂变产物的瞬发 γ 谱的测量

掀起一个小小的热潮,并取得重要的实验结果.美国 Texas 大学核研究中心的 Hopkis 等人^[12]用 X 射线符合,测量了多种丰中子核素的 γ 谱线,但未能建立起相应的能级图.与此同时,美国 Laurence 辐射实验室的 Cheiftz、Wilhelmy 等人^[13,7]采用改进了的实验方法,测²⁵²Cf 的瞬发 γ 谱.用两个测量裂变碎片的探测器和两个 Ge 探测器测量 X 射线或 γ 射线,然后用裂变碎片- γ 符合或 X 射线- γ 符合,识别了 $A \sim 100$ 区与 $A \sim 150$ 区的 20 多种丰中子偶-偶核素的低自旋态跃迁,一般自旋态可达 $4^+ \sim 6^+$,同时测量了一些核的能级寿命、产额分布及碎片的动量分布等.最重要的是,他们首次发现了 $A \sim 100$ 区的 ¹⁰⁰Zr ($N = 56$) 的大形变及相应的形变区(那时⁹⁸Sr 大形变尚未发现),为研究这个新形变区做了开创性的工作.

在其后的很长一段时间内,核结构研究的中心集中于用重离子反应研究高自旋态及远离 β 稳定线的核素(多为缺中子核).丰中子核的研究主要采用同位素分离法.

随着在束 γ 谱实验技术的发展,特别是大规模反康普顿 Ge 探测器系统的建立及数据获取、谱分析技术的改进,对²⁵²Cf 等裂变瞬发 γ 谱的测量重新引起人们的注意.在 Argonne 国家实验室,由美国、英国、丹麦组成的合作小组对²⁵²Cf 瞬发 γ 谱进行了测量,利用 7 个反康普顿 Ge 探测器系统测 γ 射线及低能光子谱仪测 X 射线,辅以 14 个 BGO 探测器组成的多重过滤器(只用一重)进行符合测量.他们只对¹⁴²Ba、¹⁴⁴Ba 和¹⁴⁶Ba 三个核进行了认真的分析,大大扩展了三个核的能级纲图,发现了¹⁴⁴、¹⁴⁶Ba 的重要的八极形变带.其后,同样的组,用改进了的设施,测量了²⁴⁸Cm 的瞬发 γ 谱,着重于对 Zr 丰中子核素的研究,除将¹⁰⁰Zr、¹⁰¹Zr 和¹⁰²Zr 推向更高自旋态外,新建了¹⁰³Zr、¹⁰⁴Zr 的能级图^[14],为理论上分析 Zr 核的大形变及此区内形变的理论研究提供了宝贵的实验数据.同时也说明,用裂变瞬发 γ 谱法分析复杂的奇 A 核的

能级也是完全可行的.

4 我们目前与国外合作研究情况

从目前测量²⁵²Cf 等裂变产物的瞬发 γ 谱的状况看,所研究过的核素只限于裂变产物很少的一部分,而且主要限于偶-偶核(当然是产额比较高的部分).即便研究过的这部分,大部分核的自旋态也测得不高,而较深入的研究也只限于近期的 Zr 与 Ba 两种同位素中的某些核,所以,研究过的偶-偶核的自旋态可以进一步向高处发展,能级可以测得更细致.对于约占总数四分之三的奇 A 核或奇-奇核,有的能级图尚未建立,已建立的多从衰变谱中所得.这一大片地区可用瞬发 γ 谱方法进一步开展研究.

清华大学现代物理系核结构研究组与美国橡树岭国家实验室及美国 Vanderbilt 大学正在联合开展此项研究.计划分两步:第一步是进行初步测量,进行实验技术及数据分析方面的探索,实验已在 88 年完成.用²⁵²Cf 自发裂变源放于冲气电离室内,电离室用以测量裂变碎片信号, γ 射线是由新建成的具有 20 个反康 Ge 探测器组成的近 4π 立体角的“轻便晶体球”装置来测量的.采用裂变碎片- γ - γ 符合法,有效地除去蜕变 γ 与杂散 γ ,得到 1.5×10^7 个有用符合事件.数据分析大部分是在清华大学进行的.在国家自然科学基金及教委优秀青年基金的支持下,我们已初步建立了一套 Vax 2000 工作站 γ 符合谱图像分析系统,移植了较新的国外谱分析程序.此项工作的数据分析工作即将完成.着重于将偶-偶核的自旋态推向高处.虽然所测事件总数不算高,仍可发现几十条新谱线,研究的范围达 30 多种丰中子偶-偶核素.图 4 给出一个“门”符合加谱的例子,从谱形上可以清楚地看出对于丰中子¹⁰⁴Mo 核的各个 E2 级联跃迁 γ 峰.我们准备从系统性原理出

发对, $A=100$ 区与 $A=150$ 区的形变特性进行讨论. 第二步的工作是进行较深入的研究, 实验用 $\gamma-\gamma$ 符合与 X 射线- γ 符合, 仍在美国橡树岭国立实验室进行. 实验工作已经完成, 获得了约 3×10^9 个符合事件. 目前正在建矩阵, 假如数据正常的话, 将由清华大学与 Vanderbilt 大学共同担负分析数据的任务, 可望得到更多的丰中子核素的信息. 由于数据分析工作量大, 所涉及核素范围广, 估计要花两三年时间.

在裂变瞬发 γ 谱方法中, 除了用符合法测能级图外, 其他重要的测量方法, 如符合角关联测量, 能级寿命测量和内转换系数测量等都是可以进一步开展的工作. 而这些测量对于能级图的完善、确定自旋宇称、进一步了解这些丰中子核的结构特性和形变特性等具有非常重要的意义. 目前, 中科院近代物理所与原子能研究院都有了较完善的在束 γ 谱测量装置与数据处理能力, 也可开展这方面的工作.

参 考 文 献

- 1 Federman P, Pittel S. Phys. Lett., 1977, 69B : 385, Phys. Rev., 1979, C20 : 820
- 2 Etchegoyen A, et al. Phys. Rev., 1989, C39 : 1130
- 3 Faessler A, et al. Nucl. Phys., 1974, A230 : 302
- 4 Kumar A, Gunye M R. Phys. Rev., 1985, C32 : 2116
- 5 Urban W, et al. Phys. Lett., 1988, B200 : 424, Phys. Lett., 1987, B185 : 331
- 6 Proc. 4th Int. Conf. On Nuclear Far From Stability. Vol. 2, Helsingor, Denmark, Jan. 1981, P557, P602, P587-589, P562, P569, P567
- 7 Wilhelm J B, et al. Phys. Rev. Lett., 1970, 25 : 1122, Phys. Rev., 1972, C5 : 2041
- 8 Kern B D, et al. Z. Phys., 1982, A306 : 161
- 9 Shizuma K, et al. Z. Phys., 1983, A311 : 71
- 10 Scott S M, et al. J. Phys., 1980, G6 : 1291
- 11 Fifth Int. Conf. On Nuclear Far From Stability. Rosseau Lake, Ontario, Canada, 1987, P782
- 12 Hopkins F F, et al. Phys. Rev., 1971, C4 : 1927
- 13 Cheifetz E, et al. Phys. Rev. Lett., 1970, 25 : 38, Phys. Rev., 1971, C4 : 1913
- 14 Hotchkis M A C, et al. Phys. Rev. Lett., 1990, 64 : 3123

Experimental Study of Prompt γ Emission Neutron Rich Nuclides Produced in Fission

Zhu Shengjiang

(Physics Department, Qinghua University, Beijing 100086)

Abstract It is an important way for getting the information of neutron rich nuclides to measure the prompt emission γ spectrum when the fission products of ^{252}Cf de-excited. In this paper we introduce the general principle of the way, the meaning of the nuclear area related by fission products for structure research, the research condition abroad and the nuclear structure group of Qinghua University cooperation with foreign scientists.

Key Words fission, γ spectrum, level, spin, neutron rich, prompt emission.