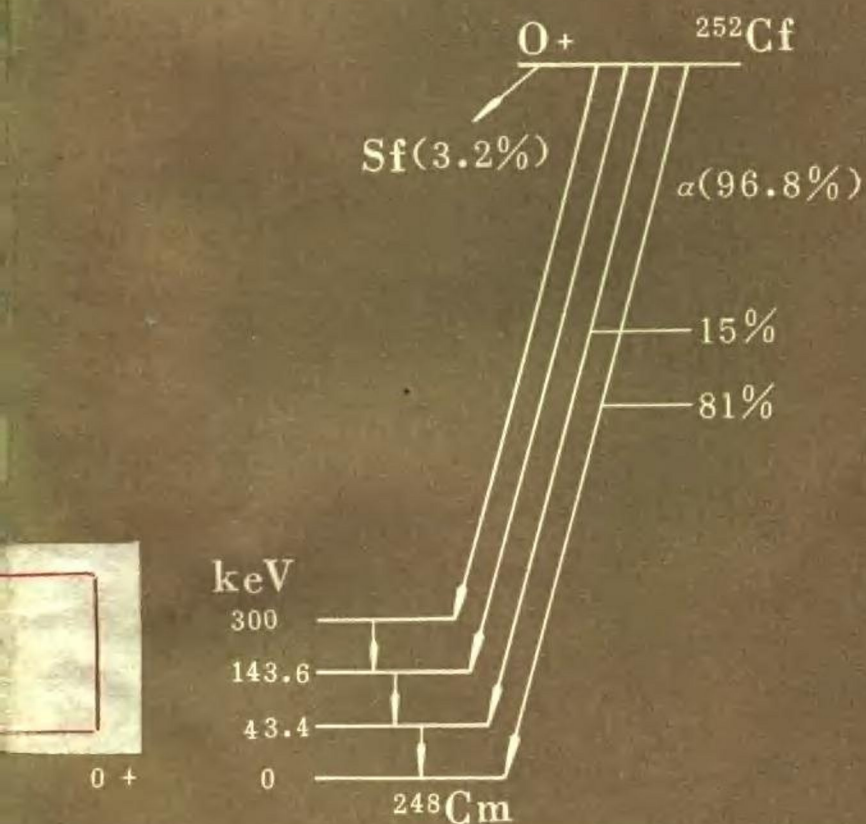


原子能出版社

钷-252的制备及应用

滕征森 编



内 容 提 要

本书系统地阐述了镭-252的核性质、生产方法、辐射防护、射线测量和制源工艺，并以较大的篇幅介绍了镭-252的各种实际应用。

镭-252是一种新型的高强度同位素中子源。它在中子物理、核工程、短寿命同位素生产、航天技术、地质勘探、海洋和油田开发、工业过程控制、放射医学、环保工作等领域中，发挥了愈来愈大的作用。此外，在中子活化分析、中子照相、辐射育种、考古断代、法庭科学方面，镭-252也受到广泛的重视。本书在讨论上述应用技术的同时，还搜集了大量的数据、图表，使读者能较全面地了解镭-252核素的有关知识。

本书可供从事放射性同位素及射线应用的科技人员、高等院校有关专业师生参考阅读。

镭-252的制备及应用

滕征森 编

原子能出版社出版

(北京2108信箱)

北京印刷一厂印刷

(北京市西便门)

新华书店北京发行所发行·新华书店经售



开本 $787 \times 1092 \frac{1}{32}$ ·印张 $9 \frac{3}{4}$ ·字数 216 千字

1983年 10月第一版·1983 年 10月第一次印刷

印数 1—1,100·统一书号: 15175·501

定价: 1.25元

前 言

镅-252在周期表中，是人类迄今能够大规模生产的最后一个核素，也是超铀元素中用途最大的一个。

自从1952年发现镅-252以来，至今已有近三十年的历史。在此期间，各国的科学家做了大量研究工作，找到了行之有效的生产方法，不少国家建立了镅-252分装和制源设备。目前，镅-252产品的销售和应用已遍及全世界，许多国家设立了镅-252应用技术推广站和情报中心，每隔几年就召开一次关于镅-252应用的国际会议，交流技术研究成果。

当前，一个值得重视的发展动向是， ^{252}Cf 中子激励的核燃料次临界中子倍增装置的出现。它能使 ^{252}Cf 源的中子强度或通量水平提高两个数量级，使之接近专用反应堆和大型加速器中子源的水平。这种简单而安全的装置扩大了镅-252的应用范围，进一步降低了购置和使用费用，所以，在强流中子的应用技术中，它已成为反应堆和大型加速器中子源的强劲竞争对手。

本书在写作过程中，承蒙中国科学院原子能研究所的吴克明、庄人杰、邵淑琴等同志审阅并提出宝贵意见，张淑卿同志在绘图方面付出了艰苦的劳动，笔者在此一并致以谢意。

作者

一九八〇年九月于中国科学院原子能研究所

目 录

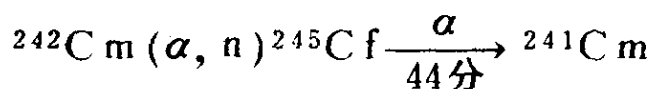
前言.....	III
第一章 铀的历史.....	(1)
第二章 铀的性质.....	(10)
第三章 铀-252的合成和生产.....	(26)
第一节 加速器合成铀-252.....	(26)
第二节 地下热核爆炸法合成铀-252.....	(31)
第三节 反应堆生产铀-252.....	(42)
第四章 各种铀-252放射源的制备.....	(92)
第一节 铀-252裸源的制备.....	(92)
第二节 铀-252密封源的制备.....	(103)
第五章 各种铀-252源的放射性强度和能谱的测量.....	(132)
第一节 铀-252的 α 粒子和裂片的测量.....	(132)
第二节 铀-252的自发裂变中子的测量.....	(137)
第三节 铀-252源中子能谱的测量.....	(145)
第六章 铀-252辐射屏蔽的估算.....	(150)
第一节 铀-252辐射屏蔽的估算方法.....	(155)
第二节 铀-252源屏蔽装置的设计.....	(171)
第七章 铀-252的应用.....	(178)
第一节 铀-252次临界中子倍增装置.....	(178)
第二节 铀-252中子源在反应堆启动、核武器引 爆和短寿命放射性同位素生产中的应用.....	(189)
第三节 铀-252中子源用于核燃料元件的质量检 验和能耗的测定.....	(193)
第四节 铀-252在中子照像中的应用.....	(210)

第五节	使用镭-252的中子活化分析·····	(227)
第六节	镭-252在地质勘探中的应用·····	(249)
第七节	镭-252在工业过程控制中的应用·····	(271)
第八节	镭-252在生物学上的应用·····	(279)
第九节	镭-252的其他用途·····	(291)
参考文献	·····	(298)

第一章 镅 的 历 史

一、镅-252的发现

一九五〇年美国科学家西博格 (G. T. Seaborg) 等人第一次发现了元素周期表中的第98号元素镅 (Californium)。他们利用设在美国加利福尼亚州伯克利劳伦斯实验室的60英寸回旋加速器, 加速35兆电子伏的氦离子 (α 粒子) 去轰击微克量的镭-242靶, 实现了下述核反应:



成功地合成了元素 Cf, 并正式命名为镅。

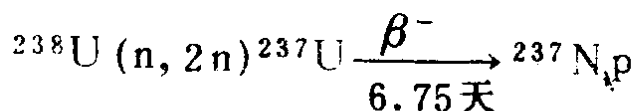
一九五二年十一月美国在太平洋上的埃尼维托克珊瑚岛 (Eniwetok Atoll) 进行了名为 “Mike” 的热核爆炸实验^[1], 曾经从爆炸的散落物中搜集到镅-252, 这是人类第一次发现这种镅的同位素。

二、镅在锕系元素中的位置和锕系元素在自然界的存在

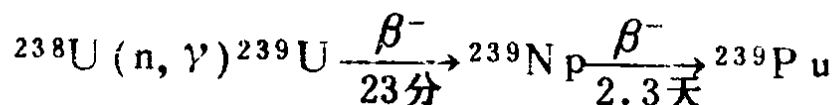
镅属于锕系元素, 是周期表中锕系的第十个元素。锕系元素从周期表的第89号元素锕 (Ac) 开始至第103号元素铪 (Lr) 止, 共计十五个元素, 其中第92号元素铀 (U) 以前的几个元素广泛存在于自然界, 是原子能工业不可少的重要原料。

近年来, 人们在地球上的天然铀、钍矿床中, 也发现过

少量的元素镎 (Np) 和钚 (Pu)。其中²³⁷Np大概来自天然铀与快中子发生的核反应:



²³⁹Pu则可能是天然铀俘获中子生成的, 核反应及衰变过程如下:



引起这些核反应的中子来源不外三个方面: 铀、钍的自发裂变; 矿床中的 α 射线与氧、锂、铍、硅等轻元素岩石成分的(α, n)反应和宇宙射线。

一九七二年洛斯·阿拉莫斯实验室的霍夫曼(D. Hoffman)在氟碳铈镧矿中, 又找到了钚的另一种同位素钚-244, 其数量约为该稀土矿总量的 $1/10^{20}$ 。²⁴⁴Pu的半衰期为 8×10^7 年, 而地球的年龄估计约为 4.5×10^9 年, 大概等于钚-244的60个半衰期, 这就是说: 估计在地球形成之初, 钚-244可能已经存在了, 数量是现在的 2^{60} 倍。这一数值与 10^{20} 粗略近似, 所以, 判断当时钚-244的数量很有可能与现在该稀土矿的储量近似。除此以外, 人们在天体光谱学的研究中, 业已发现不少超钚元素甚至超重元素在宇宙中存在的线索。但是, 在地球上, 第94号元素钚以后的元素, (通称之为“超钚元素”), 则全部是人造放射性元素。

许多国家在超钚元素的研究工作方面投入了很大力量, 近二、三十年间, 进展巨大。美国和苏联起步早、规模大、成绩最为显著, 美、苏两国政府拨出大量款额建造了高通量核反应堆、各种类型的加速器, 甚至在和平利用原子能的名义下, 专门为此进行地下热核试验。这里必须指出: 超钚元

素研究的重要性始终是与寻求新的、性能更理想的核裂变材料，开辟新的核能源分不开的，始终是与争夺核技术优势、试图制造更强有力的核武器分不开的。

三、“铷弹”之谜和氢弹的“裂变扳机”

众所周知，迄今人类利用的核裂变材料（也称“核燃料”）不过区区几种，这就是铀-233、铀-235和钚-239。最近，液体金属钠冷快中子增殖堆（LMFBR）技术的突破，又使过去只能作为“增殖材料”（即在反应堆中用来生产核燃料的原料）使用的铀-238，直接用作核裂变材料成为可能。许多实验数据表明，有些超铀核素的中子裂变截面很大，临界质量比铀-233、铀-235、钚-239都小得多，完全可能是很好的核裂变材料。我们在表1.1和表1.2中列出了某些核素的最小临界质量的数据，尽管这些只是国外为超铀核素化学处理和加工过程准备的安全控制用的数据，但对我们讨论超铀元素用作核裂变材料的可能性来说，也有一定的参考价值。

比较表1.1和表1.2中的临界数据，人们自然会想：假如超铀核素的裂变炸弹（原子弹）能够研究成功，或者用它来引爆核聚变炸弹（氢弹），即国外常称之为热核武器的“裂变扳机”，则无需乎公斤量的核裂变材料。以 ^{249}Cf 和 ^{251}Cf 为例，大概只需10—30克就足够了，其体积不过1—2立方厘米。早在六十年代曾经风靡一时的“铷弹”之说，正是这种想法。当时，许多人根据超铀核素临界质量的计算，认为铷将是一种理想的核裂变材料，用铷制成原子弹，将小如子弹的弹丸，可以轻而易举地发射到远方。

假如用铷弹取代原子弹作为氢弹的“裂变扳机”，必将加速氢弹的微型化进程，加速氢弹由战略核武器向战术核武

器的演变。大家知道，核爆炸主要发生四种核武器效应，这就是冲击波、热辐射、贯穿辐射和放射性污染。冲击波和热辐射是由核爆炸释放大量核能引起的；贯穿辐射是由核裂变和核聚变反应过程中放射出的大量中子、 γ 射线构成的；放射性污染主要来源于核裂变反应产生的大量裂变碎片——放射性裂变同位素。用钢弹引爆的氢弹，钢裂变反应对核爆炸的贡献和氘氚聚变反应比较起来，简直小得无足轻重，所以，爆炸后，对战区不会造成放射性污染，因此，可以称为名符其实的“干净的氢弹”。

表 1.1 ^{235}U 、 ^{233}U 和 ^{239}Pu 的最小临界数据

纯金属，无反射层	^{233}U	^{235}U	^{239}Pu
临界质量，公斤	7.5	22.8	5.6(α -Pu) 7.6(δ -Pu)

表 1.2 可裂变的超铀核素的最小临界质量

核 素	临界质量，克	浓度*，克/升
^{242}mAm	23	5
^{243}Cm	213	40
^{245}Cm	42	15
^{247}Cm	159	60
^{249}Cf	32	20
^{251}Cf	10	6

* 达最小临界质量的近似浓度

七十年代出现的所谓“第三代核武器”——中子弹，据报道是一种小型化的用原子弹引爆的氢弹。 ^{235}U 和 ^{239}Pu 的最小临界质量决定了这种炸弹在爆炸时核裂变反应对核爆炸的贡献将占相当份额，虽然中子辐射的杀伤作用被明显突出出

来，但其他三种核武器效应也会发挥一定作用。爆炸后，战区难免有不同程度的放射性污染，故中子弹并不是纯中子弹，更不像宣传的那么“干净”。与此形成鲜明对照的是人们设想中的钢弹引爆的微型化氢弹，这才是纯中子弹。由于钢裂变反应对核爆炸的贡献和氘氚聚变反应比较起来，可以忽略不计，爆炸的TNT当量又可以做得很小，所以，它爆炸时产生的冲击波和热辐射也很小，爆炸后，放射性对战区的污染微乎其微，唯有热核反应放出的大量快中子将发挥巨大威力，最大限度杀伤敌人的有生力量，作为战术核武器肯定很有威慑力。

从五十年代末美国开展名为“犁头”的热核爆炸生产同位素的计划开始，到六十年代底止，美国围绕着钢的生产研究，投入了大量的人力、物力，地下核爆炸法和反应堆生产双管齐下，劲头可谓足矣！

但是，从现在技术发展的水平来看，“钢弹”是难以实现的。因为无论地下核爆炸方法还是反应堆生产的钢，都不能满足核裂变材料的基本要求。首先 ^{252}Cf 和 ^{254}Cf 两种核素含量过高，它们的自发裂变截面很大，容易过早引发核链锁反应；裂变性能较好的两种核素 ^{249}Cf 和 ^{251}Cf 的含量又太少。表1.3列出美国用地下热核爆炸法和高通量同位素生产堆合成的钢的同位素组成，清楚地说明了这个问题。另外，钢生产十分困难，造价昂贵，产率极低。美苏两国的生产能力也很有限，在七十年代钢的贮备数量只有几克。在和平利用方面，钢作为一种出类拔萃的同位素中子源的原料，却为造福人类发挥出异乎寻常的作用，受到世界的普遍推崇。

不过，“超铀裂变扳机”至今仍是个谜。除去钢以外的其他超铀核素，例如某些易于合成的镅、锔同位素是否可能大

表 1.3 美国地下热核爆炸法和高通量同位素堆(HFIR)生产的钼的同位素组成

质 量 数	原 子 数 比**	
	“Hutch”*合成的钼	HFIR生产的钼
249	—	0.0012
250	—	0.0083
251	0.48	—
252	1.00	1.00
253	0.19	0.0059
254	0.18	0.0007

* “Hutch”(矿车) 是1969年 7 月美国在内华达核试验场进行的地下热核试验的代号。

** 原子数比是以生成的²⁵²Cf原子数为 1 的相对比值。

规模生产？是否可能制成氢弹的“核裂变扳机”呢？

四、钼-252的研制和生产发展概况

一九五二年十一月美国在它首次进行的热核试验过程中，找到了钼-252。同年四月，美国在爱达荷州的爱达荷法尔市的材料试验堆(MTR)开始了钚-239的反应堆照射计划，着手反应堆生产钼-252的研究^[2]。六年后，总计生产了大约30微克。以后，美国在南卡罗来纳州的萨凡那河工厂(简称SRP)的反应堆先后安排了所谓“超钚I”(1959—1963年)和“超钚II”(1961—1964年)两个生产计划。在反应堆的辐照孔道内照射钚-239，共计生产出：

²⁴²Pu 930克 ²⁴³Am 300克
²⁴⁴Cm 330克

为后来的高通量堆中子照射生产钼-252提供了起始靶料^[3]。为了应付对于放射性同位素能源²⁴⁴Cm的需求，曾于1964年和1965—1967年间在萨凡那河工厂插入了“钼I”和“钼II”

两个阶段生产计划^[3-6]，前后共生产 3 公斤镅-244和约 8.8 毫克镅-252，还将副产品²⁴²Pu 7.6 公斤、²⁴³Am 0.64 公斤和 0.68 公斤的²⁴⁴Cm 拨做以后生产镅-252的靶料。在此期间，SRP 的高通量堆照孔道达到 5.4×10^{15} 中子/厘米²·秒^[7]，从此开始了高通量中子照射的进程^[8]。然而，镅-252的正式高通量堆照生产计划则始于 1966 年 9 月，当时位于美国田纳西州的国立橡树岭实验室（ORNL）的高通量同位素堆（HFIR）建成投产^[9]。1969 年萨凡那河工厂的高通量阵列堆芯改建工程完毕，以“铜Ⅱ”计划的部分副产品作为靶物，生产镅-252^[10]。据估计，这个堆连续运行 16 个月可产生将近 2 克镅-252，其中的 0.7 克送往化学分离厂，其余仍放在 SRP 堆的标准孔道中，以较低的中子通量继续照射，来补偿靶子中镅-252的衰变损失，这是一种储备镅-252的好方法。以上是从 1969 年开始的“铜Ⅰ”计划和“靶连续堆照”计划。除此之外，还开展了所谓“钷燃烧”计划，以比过去“铜Ⅰ”和“铜Ⅱ”计划低得多的成本，为高通量堆生产镅-252源源不断地供应高级靶料。与此配套的化学分离厂是设在橡树岭实验室的超铀处理厂（简称 TRU），负责高通量堆照射靶物的化学处理，从中分离出各种超铀核素：钷-242、镅-243、镅-244、镅-249、镅-252、镅-253、镅-257等，还包括放射性制靶。后来，SPR 建成了一套多用途化学处理设备（简称 MPFF）处理超钷靶物，进一步扩大了美国对超钷元素和裂变产物的综合处理能力^[12]。

表 1.4 列出美国超铀处理工厂历年生产超铀核素的统计概况。现在该厂大约以设计能力之半运行着，每年制造并处理 200 克镅靶，分 2 次处理，实际年产量为：

表 1.4 超铀处理工厂(TRU)超铀核素的生产

财政 年度	^{242}Pu , 克	^{243}Am , 克	^{244}Cm , 克	^{249}Bk , 毫克	^{252}Cf , 毫克	^{253}Es , 微克	^{257}Fm , 毫微克
67	87	25	134	0.34	5.6	14	0
68	0	188	212	0.05	0.5	0	0
69	15	5	57	2.2	15	98	0.07
70	8	13	72	7.6	52	369	0.19
71	10	3	439	37	284	714	0.72
72	16	3	350	66	513	945	0.85
73	5	4	240	49	428	1551	1.25
74	0	2	87	39	386	2169	1.5
75	0	3	104	75	717	3750	1.9
76	0	2	50	29	277	1700	0.7
总计	141	248	1745	305	2678	11310	7.2

^{249}Bk 50毫克 ^{252}Cf 500毫克

^{253}Es 2毫克 ^{257}Fm 1毫微克

目前, 美国是世界上最大的铀-252生产国, 它的产品除满足国内应用研究的需要之外, 还远销海外, 以氧化铀和氧化铀-钚金属陶瓷丝半成品的化学形式运往欧、美各国, 由各家制源厂商分装制成不同形状、规格的放射源, 满足各国对铀-252的研究和多种应用的实际需要。譬如: 美国路易安那州的伽玛 (Gamma) 工业公司、加利福尼亚州的通用电气公司、俄亥俄州的孟山都科学研究公司、英国的阿默沙姆放射化学中心、法国原子能委员会所属的封特耐欧罗兹和马尔库尔核中心均属此类厂家^[13]。超铀处理厂 (TRU) 是美国能源研究开发署 (ERDA) 的重元素研究计划规定的铀-252生产、贮存、分配中心。

苏联的铀-252生产中心设在季米特洛夫格勒的列宁原子反应堆研究所, 它用SM-2 高通量堆 (中子通量为 5×10^{16}

中子/厘米²·秒)照射铜系氧化物-铝金属陶瓷靶物,就地化学处理。据报道^[13a]1974—1975年间曾获得约10毫克²⁵²Cf,产品纯度如下:

同位素纯度:

²⁵² Cf	80%	²⁵⁰ Cf	10%
²⁵¹ Cf	3%	²⁴⁹ Cf	7%

裂变产物含量(居里/克):未检出

总 γ 照射剂量率中裂变产物所占比例:1%

非放射性杂质的浓度:3—10克/克Cf

该所承担部分制源工作,此外,莫斯科的库尔恰托夫原子能研究所也发表过制源的文章。在这基础上,苏联开展了铜-252的应用研究,这反映在1976年召开的全俄超铀元素化学会议的总结报告中^[15-19]。

法国原子能委员会(CEA)除分装美国进口的铜-252之外,还在封特耐欧罗兹和马尔库尔核研究中心进行铜-252的堆照生产、分离和应用研究^[20]。小的实验超铀靶在OSIRIS和EL-III堆照射,工业靶在CELESTIN堆照射。据称1976年已取得几十毫克²⁴²Cm、克量级²⁴³Am和²⁴⁴Cm以及微克级²⁵²Cf,关于制源也有专门的报道。设在西德的欧洲超铀研究所曾研究过处理长期堆照AmO₂-Al靶分离超铀元素的试验流程,并利用美国进口的原料制造铜-252中子源。日本原子能研究所曾在材料试验堆(JMTR)照射镅-241靶,分离过微量铜^[21-23]。至于铜-252的应用研究现已遍及全球,美国能源研究开发署(ERDA)、国际原子能机构(IAEA)等许多组织定期举行学术专题讨论会,交流应用研究的成果。

第二章 铀 的 性 质

铀的化学性质和其他铀系元素，特别是超铀元素极其相似，化学分离十分困难，这是由铀系元素电子壳层结构的相似性决定的。

铀的电子壳层结构是 $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^2 4p^6 4d^{10} 4f^{14} 5s^2 5p^6 5d^{10} 6s^2 6p^6 5f^{10} 7s^2$ ，如果失掉3个5f电子，便形成稳定的半充满壳层结构 $5f^7 7s^2$ ，所以，铀的最稳定化合价态是+3价。铀的氧化物是 U_2O_3 ，氧化铀的熔融温度竟高达2300℃左右，热稳定性极佳。

一、铀-252的核性质

铀-252是 α 放射性同位素， α 衰变半衰期2.638年，它放射的 α 射线的能量分别是：6.1183兆电子伏(分支比占82%)和6.0757兆电子伏(分支比占15%)，纯净铀-252的 α 放射性比度是533居里/克 ^{252}Cf 。

铀-252最重要的核性质是自发裂变时放出大量中子，产额为 2.35×10^{12} 中子/秒·克 ^{252}Cf ，自发裂变的半衰期为 85.5 ± 0.5 年(占衰变的分支比3.1%)，这种按自发裂变能谱分布的中子平均能量是2.348兆电子伏。过去十几年间，人们用不同方法准确地测定了它的自发裂变中子能谱，并常常用下述方程来描述能量为 E 的中子数目。

$$N(E) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{1}{T} \right)^{3/2} E^{1/2} \exp[-(E/T)]$$

式中的 T 表示麦克斯韦温度 (Maxwellian Temp.), 文献中 T 的数值落在 1.367 和 1.57 兆电子伏之间; E 表示中子的能量。

镭-252 的有效半衰期 (α 蜕变和自发裂变全包括在内) 是 2.646 ± 0.004 年。镭-252 α 蜕变放热 18.8 瓦/克, 自发裂变放热 19.7 瓦/克²⁵²Cf。所谓“自发裂变”是指原子核在不受外来粒子作用和没有外界激发条件存在时, 自行分裂成两块或多块碎片的核过程。它和核衰变过程一样, 也遵从放射性衰变的统计规律; 自发裂变的几率一般随原子序数而增大。自发裂变与中子诱发裂变的不同点, 就在于前者是个自发过程, 而后者是由于各种外来粒子 (例如: α 粒子、中子、 γ 光子等) 的轰击, 使原子核或复合核受激而以核裂变的方式释放出激发能。

镭-252 自发裂变的研究已经相当深入。它自发裂变产生的裂片质量分布曲线与铀-235 的中子诱发裂变相似, 也是不对称的双峰曲线。裂变产额的极大值 (峰值) 分别在质量数 105 和 143 两处, 对应的裂片产额分别等于 7.59% 和 7.04%。图 2.1 绘出镭-252 自发裂变和铀-235 中子诱发裂变的裂变产额质量分布曲线。对比两条曲线可以知道: 二者的峰谷比相同, 都在 500 左右, 镭-252 重裂片峰的轻质量一侧几乎与铀-235 的曲线重合; 在两峰之间是狭窄的波谷, 质量数 124 是狭谷的最低点, 对应的裂片产额 $\leq 8 \times 10^{-3}\%$ [24, 25]。表 2.1 列出镭-252 自发裂变的裂变产额的实测数据。

许多人曾用双电离室法、飞行时间法、固体探测器等测定了镭-252 自发裂变的裂片瞬时动能分布曲线, 现示于图 2.2。所测数据列入表 2.2 中, 这是由惠茨通 (S. L. Whetstone)^[51] 用飞行时间法测定的。

表 2.1 铜-252自发裂变的裂片产额分布

核素名称	裂片产额, %	核素名称	裂片产额, %
Mg-28	$\leq 7.1 \times 10^{-5}$	Pd-112	3.65 ± 0.18
K-43	$\leq 1.1 \times 10^{-4}$	Ag-113	4.23 ± 0.38
Ni-66	$\leq 6.8 \times 10^{-5}$	Cd-115	2.28 ± 0.13
Zn-72	$\leq 6.2 \times 10^{-5}$	In-117	≤ 1.0
As-77	$\leq 8.8 \times 10^{-5}$	Sn-121	0.142 ± 0.008
As-78	$(1.07 \pm 0.18) \times 10^{-3}$	Sn-125	$(9.3 \pm 0.4) \times 10^{-3}$
Br-83	$(2.14 \pm 0.93) \times 10^{-2}$	Sb-127	0.130 ± 0.008
Sr-89	0.32 ± 0.01	Sb-129	0.615 ± 0.017
Y-91	0.59 ± 0.06	I-131	1.27 ± 0.18
Y-93	0.83 ± 0.03	Te-132	1.75 ± 0.03
Zr-95	1.37	I-133	2.77 ± 0.20
Zr-97	1.54 ± 0.15	I-134	4.2 ± 0.6
Mo-99	2.57 ± 0.03	I-135	4.0 ± 0.6
Mo-101	4.1 ± 0.8	Xe-135	4.33 ± 0.08
Ru-105	9.2 ± 1.4	Cs-136	3.5×10^{-2}
Rh-105	5.99 ± 0.21	Cs-137	4.40
Pd-109	5.69 ± 0.59	Cs-139	4.94
Ag-111	5.19 ± 0.29	Ba-139	5.73 ± 0.16
Ba-140	6.32 ± 0.54	Eu-156	$(7.03 \pm 0.08) \times 10^{-1}$
Ce-141	5.9 ± 0.3	Tb-161	1.5×10^{-1}
Ce-143	5.94 ± 0.35	Dy-166	$(1.80 \pm 0.16) \times 10^{-2}$
Pr-143	7.4 ± 1.5	Er-169	$(1.72 \pm 0.41) \times 10^{-3}$
Nd-147	4.69 ± 0.08	Tm-172	$\leq 4.4 \times 10^{-4}$
Pm-149	2.65	Tm-174	$\leq 4.0 \times 10^{-4}$
Pm-151	2.18	Yb-175	$\leq 2.3 \times 10^{-4}$
Sm-153	1.41 ± 0.03	Lu-177	$\leq 9.6 \times 10^{-5}$

表 2.2 铜-252自发裂变的裂片性质

轻裂片的能量, MeV	105.7
重裂片的能量, MeV	80.0
总裂片能量, MeV	185.7 ± 1.8
重裂片的初始质量	143.6
轻裂片的初始质量	108.4
重核质量/轻核质量比值	1.334