

裂 变 物 理 簡 况

肖 振 喜 黄 勝 年

裂变现象的发现(1938年底),迄今已二十余年。 U^{235} 等重核裂变时释放出巨大的能量,并且在一定条件下,可以形成链式反应。因此,裂变就成为当前利用原子能的主要物理基础。此外,研究裂变物理对于深入地了解原子核的结构也很重要。由于重大的经济意义和国防意义,二十年来,对裂变过程的研究,世界各国都进行了大量的工作。尽管如此,到目前为止,我们对裂变过程知道得还不很清楚。这是因为,裂变是一种极其复杂的现象:(1)引起裂变的粒子可以是各种适当能量的 $n, p, \alpha, d, \gamma, \pi, \dots$ 等等,或是自发进行;(2)可能裂变的核,包括了所有的铀以上的重原子核和超铀元素的核;(3)裂变碎片一般是两块,但也有三块的,可能还有四块的;裂变产物共有数百种,例如热中子引起 U^{235} 裂变的产物,就横跨74个质量单位($A = 80$ 到 $A = 154$);(4)伴随着裂变的同时或稍迟,还放出若干中子和若干 γ 量子,偶然还有其他的带电粒子(如 α 粒子);(5)裂变产物又放出一系列的具有不同半衰期的 β 射线。

研究裂变物理的主要目的,是为了掌握这种能够释放出巨大能量的核反应的规律,从而使我们能更好地利用它。最初的研究几乎局限于 U^{235} 的热中子裂变,随着原子能科学技术的发展,裂变物理的研究也愈来愈深广。热中子及快中子反应堆的建造,一方面要求更精确可靠地测定裂变参数,另一方面这些反应堆也提供了研究裂变的有利条件;各种能量加速器的出现,开辟了高能裂变(包括光致裂变)的新领域;超铀元素的陆续获得,使我们有可能对更多的原始核进行研究,从而探索裂变过程随 z 与 A 变化的规律;各种新探测技术(核子乳胶、云室、各种中子探测器、闪烁技术)的发展,特别是近年来液体与气体闪烁计数器及毫微秒脉冲电子学的成就,给了研究裂变以更多的新工具,使我们有可能比较深入细致地研究各种裂变现象,以及它们之间的相互关系。

现就裂变物理的两个组成部分——裂变参数的测定和裂变机构的研究——分述如下。

裂变参数的测定

为了设计各种反应堆,裂变同位素对各种能量中子的裂变截面 σ_f ,裂变中子能谱,每次裂变发出的平均中子数 $\bar{\nu}$ 及有效中子数 $\eta = \bar{\nu} \frac{\sigma_f}{\sigma_a}$ (即每吸收一个初级中子发出的次级中子平均数)等都是极重要的数据。由于对裂变规律还掌握得不够,这些数据只能靠实验测定。

在发现裂变现象以后,着重在对能起链式反应的各种物质(如 $U^{235}, U^{238}, Pu^{239}$ 等裂变物质)的热中子参数进行测量。近年来由于发展快中子堆的需要,对于快中子裂变参数测量得较多。

随着测量准确度的逐渐提高,这些参数的数值也年年有所更改。目前各国的数据尚有分歧。例如,测量得最多的热中子引起 U^{235} 裂变截面数值的变化范围为552—605巴恩,虽然每个实验发表的误差都在1%左右;1959年的 $\bar{\nu}$ 值较以前稍低,直接测出的 η 值与从截面推算出的 η 值也有小的分歧;裂变中子能谱的低能及高能两端还测得不够准确。

各种参数在不同能量区域中的测量还残缺不全。例如,对裂变平均中子数 $\bar{\nu}$ 与入射中子能量及不同裂变核的关系,所作过的测量结果如图1所示。图上直线是从蒸发模型推出的结

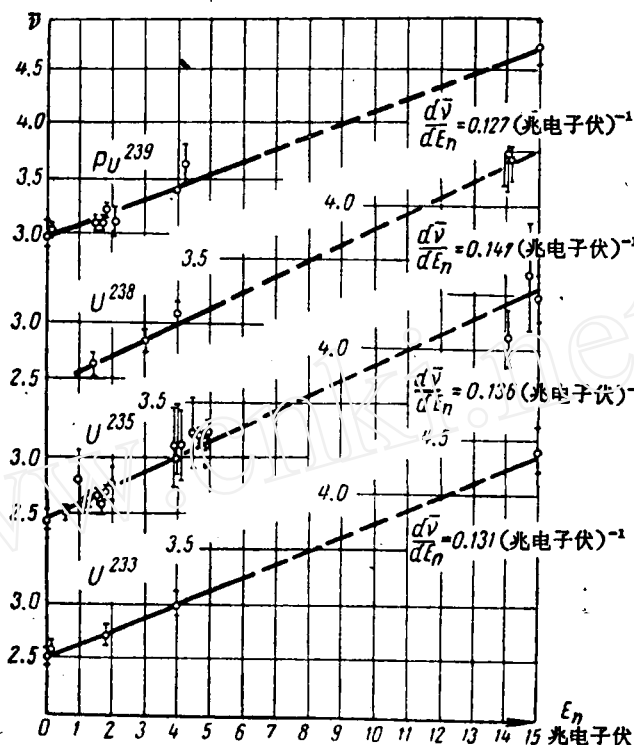


图 1 裂变时中子平均数 $\bar{\nu}$ 与入射中子能量 E_n 的关系

果。由图可以看出,入射中子能量从4—14兆电子伏间还是空白,还需进行大量的工作。

此外,在已测的能区内,这些参数的相对测量比较准确,最好的能达到1%左右,而绝对测量就很不准确,往往只能达到3%左右。进一步提高测量技术,把绝对测量精确度提高到1%也是当前的重要任务。

裂 变 机 构

理 论

1939年尼·波尔(N.Bohr,丹麦)及弗伦凯尔(Френкель,苏联)都利用液滴模型解释了裂变过程。这个模型把重原子核看成为带电液滴,从而计算得出裂变核的能量 E 与核形变参数 α 的关系,如图2所示。即核裂变时要经过一驼峰, E_f 为裂变阈能。他们还计算出 E_f 与裂变核的 z^2/A 为直线关系,这和实验结果粗略地相符合。对于裂变几率、裂变放出的能量,波尔等都进行了计算,并得出较好的结果。

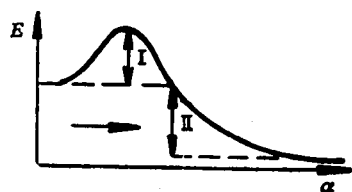


图 2 (I)为阈能 E_f
(II)为反应能

但是液滴模型不能解释其他一系列的实验事实,特别是象碎片质量分布的不对称性这样重要的现象。十几年来,很多理论工作者企图用各种假设来解释不对称裂变,如弗伦凯尔与符拉基米尔斯基(Владимирский)关于垒下裂变的假设,又如受·波尔(A.Bohr)、希尔(Hill)等企图用壳层影响来解释,但都还不能形成令人满意的理论。冯平贯建立了裂变的统计理论,得出的热中子引起 U^{235} 裂变的质量分布与实验符合得很好,但用到别的裂变时尚不符合。

碎 片

碎片的质量分布 研究碎片质量分布可以探讨位垒驼峰处的能级情况。如图3所示,质量分布一般是不对称的(双峰)。实验确定,随着入射粒子能量的增加,对称裂变逐渐取得优势。从图3还可以看出在质量分布曲线上有精细结构,这一现象用壳层模型可以定性地解释。

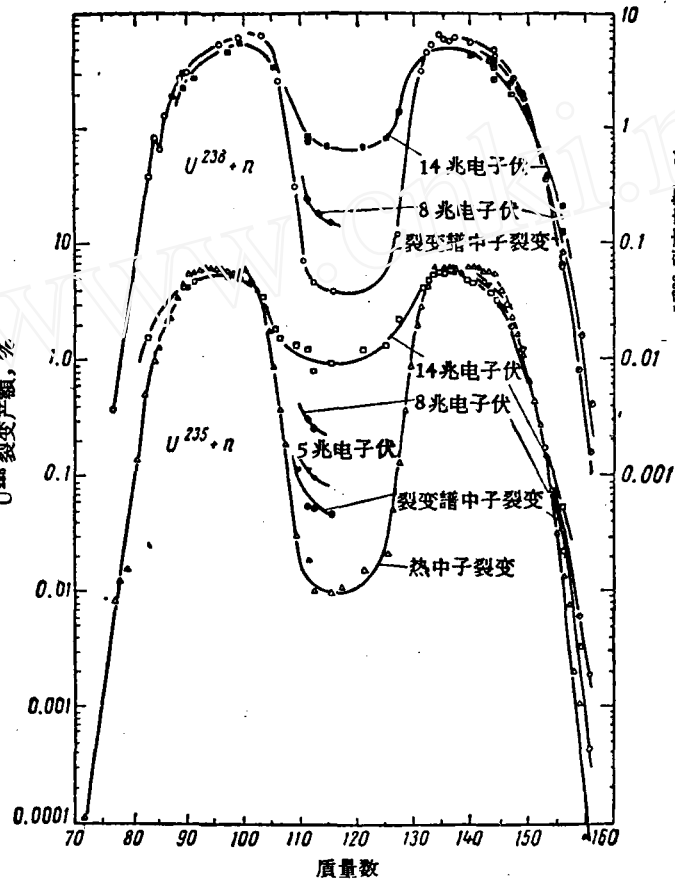


图3 裂变碎片质量分布

比 Ra^{226} 更轻的核裂变时,质量分布并不是双峰。无论用 11 兆电子伏的质子 (p) 或 22 兆电子伏的氦 (α) 轰击 Ra^{226} 时,都发现质量分布有三个峰。用 22 兆电子伏的 α 粒子打 Bi^{209} 核的情况,碎片质量分布是一个狭峰;而用相同能量的 α 粒子打 Th^{232} 以上的核时,则都是双峰(不对称裂变)。这种现象尚无合理解释。

1946 年钱三强、何泽慧等所发现的三、四分裂几率较二分裂几率小得多,从能量关系上考虑,不能解释为何三分裂几率如此之小。三分裂与二分裂几率之比与入射中子能量的关系,还需要进一步研究。

碎片的电荷分布 测量工作有一定结果,但对裂变机构的解释不多。

碎片的角分布 即碎片分飞方向与入射粒子方向的夹角分布。从实验已得出,当裂变核激发能在阈能附近的情况下,光致裂变碎片角分布是 90° 及 270° 处最大,而其他粒子引起的裂变是 0° 及 180° 处最大。这种各向异性的存在,说明了在位垒驼峰过后,核的有向排列没有被破坏。因此研究碎片角分布对驼峰能级可以有所了解。1956 年爱·波尔在尼·波尔液

滴模型基础上加上综合模型, 能根据角动量关系及裂变核的能级情况定性地说明碎片角分布的各向异性问题。

为了进一步了解位垒驼峰处的能级情况, 对于不同质量比的碎片角分布分别进行了测量。结果是, 质量比越大, 各向异性也越大; 测量还得出, 当激发能增加时, 各向异性减小, 这可能是由于位垒驼峰处能级密度增大之故。

碎片的动能 从测量得到的碎片动能分布与库伦能比较, 可以看出, 裂变过程是逐渐分开的, 即在断颈时二碎片间的距离大于它们相接触时的距离, 即碎片是象图 4 所示那样分开的。

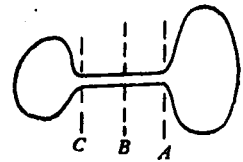


图 4 核裂变碎片分开时的情况

伴 随 辐 射

瞬时中子 在低能情况下每次裂变平均放出 2—3 个瞬时中子, 其平均能量为 2 兆电子伏。当入射粒子能量增加时, 中子数也增加, 而能谱变化不大。瞬时中子的来源可能有两个: (1) 裂变以前从复合核放出的, 叫蒸发中子; (2) 与裂变同时从颈部放出的; (3) 裂变以后由碎片放出的中子。弗拉瑟 (Fraser) 等 (加拿大, 1954) 测量裂变中子对碎片的角分布的结果, 大体表明, 裂变瞬时中子是由碎片放出的。角分布大致是: 中子在平行于碎片分飞方向的较垂直方向的为多, 而轻碎片放出的又比重碎片多约 30%。从测中子能谱及中子—中子角关联等结果, 也看出假设中子是从运动碎片系统各向同性地蒸发出来的说法是合理的。

在激发能较高时, 从测量次级中子能谱, 以及碎片角分布各向异性工作中都看出有 (1) 类蒸发中子存在。目前还没有工作证实是否有 (2) 类中子存在。

惠茨顿 (Whetstone) (美国, 1958) 利用飞行时间技术, 测量了 Cf^{252} 自发裂变时, 某一特定质量碎片放出的中子数。结果如图 5 所示。在对称裂变附近, 轻碎片比重碎片放出中子数多

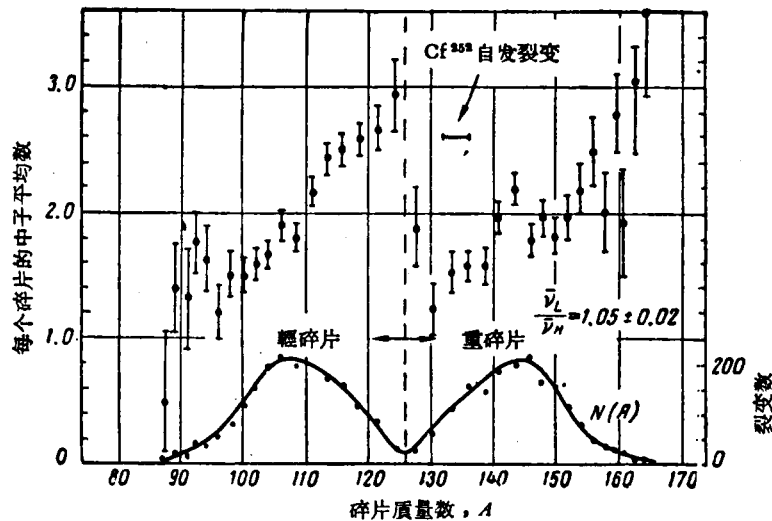


图 5 裂变中子产额与碎片质量的关系 (下面的曲线为碎片质量分布曲线)

3—4 倍。在极不对称裂变时, 反而是重碎片放出中子多。阿巴林 (Апалин) (苏联, 1960 年) 的实验也得到了类似的结果。这现象的初步解释是: 裂变断颈时如图 4 所示, 如果从 A 断开, 在质量上是较对称的, 但在能量上极不对称, 轻碎片的激发能大得多, 因而放出中子也多; 最可几裂变是在中间 B 点断开。如果在 C 处断开, 质量极不对称, 重碎片激发能较大, 因而放中子

多。

γ射线 每次裂变约有8—10个γ量子发出,总能量约8兆电子伏左右。一般认为裂变γ射线是当碎片放完中子后,激发能低于中子结合能时放出的。实验得出,尚有大量的寿命为 10^{-9} 秒的低能γ射线($E_{\gamma} < \frac{1}{4}$ 兆电子伏),从测得的γ能谱看来,这低能部分可能是从不同碎片的转动能级跃迁放出的。现在正利用γ碎片角分布等工作来进行研究。

β射线与缓发中子 它们的来源业已阐明。这是从有过剩中子的不稳定碎片变为稳定核过程中放出的。

在裂变机构方面目前的发展趋势是,一方面对更多种类的核,更多种类的粒子和更广泛的能量范围进行测量,企图建立系统的经验规律;另一方面是愈益向着更精细的研究方向发展,如更多地研究裂变过程各种现象之间的相互关系,从而探讨其机构。在裂变机构的领域中,亟待进行的工作是大量的。举例来说如:1. 由2—10兆电子伏能量的中子或其他粒子引起裂变的实验(如测量碎片各向异性)很重要,因为此时激发能不太高,反应过程较简单,根据实验数据易于得到清楚的结论,但在这个能区内测量得很不够;2. 测量在一次裂变过程中碎片质量,中子与γ数目及碎片、中子、γ夹角之间的依赖关系。这一类细致的工作现在刚开始,实验做得还不多;3. 精细地测量各种能量粒子引起裂变的碎片质量分布与能量分布。例如在用几个共振峰处(几个电子伏)的低能单色中子引起裂变的情况下,可以阐明质量分布是否与起始能级态有关的问题;4. 研究裂变过程的时间关系,如裂变碎片的断颈分飞时间,放出中子、放出γ射线的时问之测定等;5. 为了更好地研究空间关系(各种角分布),可以考虑用极化粒子(包括极化中子)来引起裂变。上述这些实验可能比较困难,但却是很意义的。在这些问题上如果能够获得丰富的数据,定将大大推动裂变理论的发展,有助于我们对裂变过程的理解。