

研 究 简 报

裂变碎块的电荷分布与碎块动能*†

李泽清 黄胜年 卓益忠 喻传赞

近几年来,在裂变物理方面最突出的实验事实,是发现了热中子引起的 U^{233} , U^{235} , Pu^{239} 的裂变,在对称裂变附近,碎块动能急剧下降,达 30—40 MeV 之多,但在 Cf^{252} 的自发裂变中,这种现象不明显^[1-5]. 于是,就提出了这些能量到哪里去了的问题^[6].

我们知道,原子核裂变时的总释放能 E_f 是分配给碎块的动能 E_k 和碎块的内部激发能 E_{exc} ; E_{exc} 后来由瞬发中子、瞬发 γ 光子等带走,即

$$E_f = E_k + E_{exc}, \quad (1)$$

所以对称裂变附近碎块动能的下降,或者是这附近的碎块内部激发能增大了,或者是总释放能下降了.

最近 Агалин 等人^[7]测量了热中子引起 U^{233} , U^{235} , Pu^{239} 裂变时次级中子数目与轻重碎块质量比之间的关系. 他们测量结果,在对称裂变处中子数目增加了不少,这在一定程度上补偿了动能的下降. 目前一般都认为碎块动能在对称裂变附近的下降是由多放出的中子带走,而对这种现象在机构上的解释,有所谓两种裂变方式的假设(即对称裂变和非对称裂变是两种各自不同的裂变机构),或认为在对称裂变附近的碎块远离满壳层,容易变形,因而两个碎块在断点距离较远,使动能下降. 但必须指出,我们在细致定量计算后发现,单独用对称裂变中子数增加的事实还不能在对称裂变整个区域内补偿动能的下降. 例如在轻重碎块质量比为 1.1 附近,动能仍然有很大下降,而中子数并没有很大的增加. 此外,上述机构还很难对近来实验上新发现的一些实验事实,如碎块动能随入射粒子能量的变化规律,在对称裂变附近高能 γ 增多的事实,给予满意的解释.

本文的目的,是在现有数据的基础上对裂变总释放能进行进一步分析和计算,从而对对称裂变附近的动能下降以及其他一些有关的现象作进一步的讨论. 我们的出发点是:假设在对称裂变附近,重碎块的最可几电荷 Z_p 保持 50 满壳层. 利用这个观点我们看到,不但在定量上能更好地解释对称裂变附近动能下降的问题,而且能比较自然地解释碎块动能随入射粒子能量变化的规律以及对称裂变附近高能 γ 光子增多的现象.

最近 Wahl 等人^[8]从分析实验数据得到的 Z_p 函数,在接近对称裂变处,重碎块的 Z_p 值有保持质子 50 满壳层的可能. 我们首先利用他们的半经验 Z_p 函数,假定对称裂变附近重碎块 Z_p 保持 50 满壳层,利用 Seeger 的半经验核质量表^[9],计算了热中子引起 U^{233} , U^{235} , Pu^{239} 裂变和 Cf^{252} 自发裂变时的释放能:

$$E_f(Z_1A_1, Z_2A_2) = M(Z, A) - M(Z_1, A_1) - M(Z_2, A_2), \quad (2)$$

* 1965 年 5 月 27 日收到.

† 本文初稿于 1963 年完成,因此近两年来一些新的结果未完全包括进去.

其中 $M(Z, A)$ 是裂变核质量, $M(Z_1, A_1)$, $M(Z_2, A_2)$ 分别为轻重碎块的质量. 计算结果如图 1 所示.

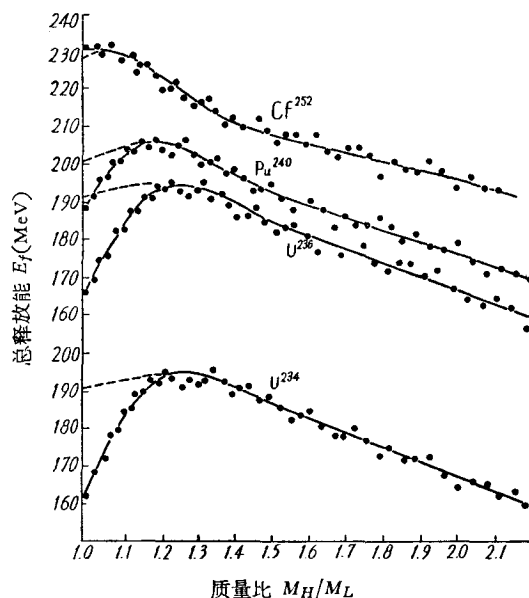


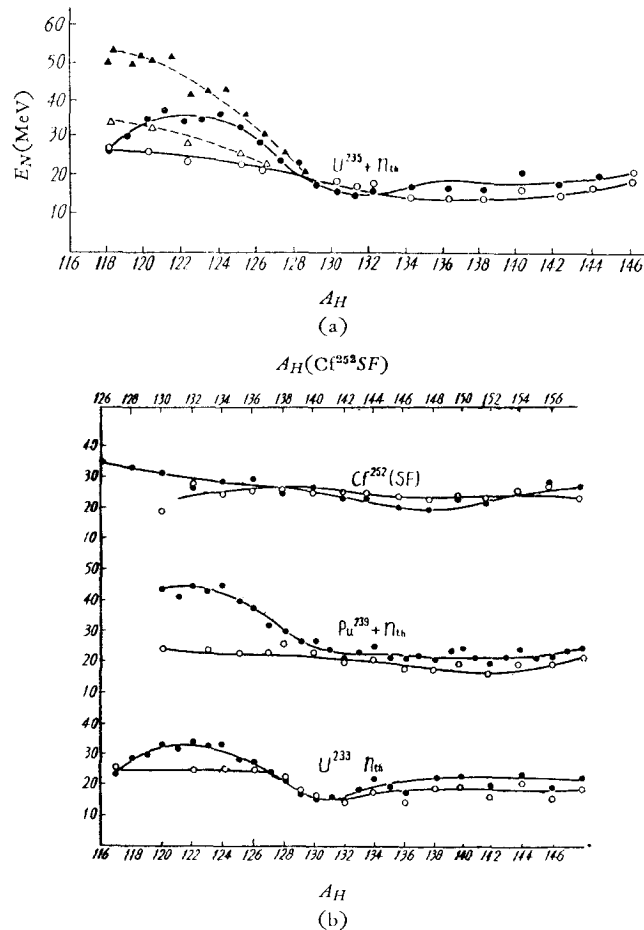
图 1 原子核裂变时的总释放能
虚线代表对称裂变时电荷为均匀分布的结果.

由图 1 看到, 热中子引起 U^{233} , U^{235} , Pu^{239} 裂变时, 对称裂变的总释放能都下降很多, 而 Cf^{252} 则没有明显的下降. 由此可见, 总释放能下降可能也是使得动能下降的一个重要因素.

为了进一步验证重碎块 Z_p 保持 50 满壳层的观点, 我们把上述方法计算的 E_f 值代入 (1) 式中, 看是否在定量上自洽. 我们取 Milton 等人^[1]用时间飞行方法测量的动能数据, 同时假定 γ 带走的能量 E_γ 与质量比无关. 取 Cf^{252} 的 $E_\gamma = 8.5$ MeV, 其余的三个核的 $E_\gamma = 7.5$ MeV. 于是按 (1) 式就可以得出中子带走的能量 E_N . 另一方面, 我们又可以由实验上所测量的中子数与碎块质量数关系的数据, 算出中子所带走的能量

$$E_N = \sum_{i=1}^{\nu} (E_b(i) + E_{nk}(i)), \quad (3)$$

其中 ν 为中子数, E_b 为中子结合能, E_{nk} 为中子所带走的平均动能, 取为 1 MeV. 中子数 ν 值基本上取自 Terrell^[10] 所搜集和修正以后的结果. 但是在 Terrell 所给数据中, 除 Cf^{252} 外, 对其余三个核都缺少在对称裂变附近中子数的数据. 对于这三种核, 我们补充了 Апалин^[7] 的结果. 最近他们对热中子引起 U^{233} , U^{235} , Pu^{239} 裂变, 更精确地测量了对称裂变附近中子数随质量比的关系. 由于我们假定对称裂变附近重碎块 Z_p 保持 50 满壳层, 因此可以假定这些中子完全是由轻碎块放出的. 我们利用 Terrell 同样方法, 对质量弥散效应进行了修正. 知道了中子数 ν , 利用公式 (3) 对中子结合能逐一相加, 就可以算出蒸发中子所带走的能量. 把它和从公式 (2) 推出的中子能量 E_N 进行比较, 结果见图 2. 考

图2 中子带走的能量 E_N 与碎块质量之间的关系(a) $U^{235} + n_{th}$;(b) $U^{233} + n_{th}$, $Pu^{239} + n_{th}$ 及 $Cf^{252}(SF)$.

○—○—○ 由已知中子数, 对中子结合能、中子带走的平均动能逐一相加的结果;

●—●—● 由总释放能 E_f , 减去碎块动能 E_k 和 γ 光子带走的能量 E_γ ;

△—△—△ 计算方法同曲线 1, 但假定碎块电荷为等链长分布;

▲—▲—▲ 计算方法同曲线 2, 但假定碎块电荷为等链长分布.

考虑到各种可能的误差(动能、中子数目、中子结合能等), 我们发现, 在允许的误差范围内, 除 Pu^{239} 外, 其他三个核大致上相符. 若按等链长或电荷均匀分布的 Z_p 来进行计算, 从(2)和(3)得出的 E_N 差别将更大. 作为例子, 对于 U^{235} 在等链长假设下算得的 E_N 也画在图 2 上. 从现有实验数据的可靠性和计算结果看来, 我们觉得重碎块 Z_p 保持 50 满壳层这一假设, 比较容易解释动能在对称裂变附近下降的现象.

此外, 我们已经提到, 裂变碎块动能与入射粒子能量有密切关系. 精细的实验指出, 在非对称裂变区域, 碎块动能不随入射粒子能量变化; 但在对称裂变附近, 碎块动能与入射粒子能量关系甚大. Коваленко 等人^[11]利用热中子和 14.5 MeV 中子引起 U^{235} 裂变, 发现在对称裂变处, 后者的动能要比前者大 25 ± 5 MeV. 他们后来又对 U^{233} 进行同样实验, 也发现 14.5 MeV 中子引起的裂变比起热中子引起的裂变来, 碎块动能大 20 ± 5 MeV^[12].

同时有不少实验证明,当入射中子能量高于一定值以后,入射中子能量的增加不再引起动能改变。 γ 射线和 α 粒子引起裂变也有类似现象^[13-15]。对这些现象,有人^[16]企图用两种裂变方式来解释,对称裂变方式所固有的碎块动能比较小(这就可以解释动能下降的实验),而且是一种快过程,因此随入射粒子能量的增加,对称裂变碎块动能也增加,其增加的量就等于入射粒子的能量。但是我们看到,这不能解释热中子和14.5 MeV中子引起 U^{235} 和 U^{233} 裂变时动能改变达 ~ 20 MeV之多的事实,也无法解释当入射粒子能量高于一定值以后,动能不再随入射粒子能量的增加而增加。同样,若认为对称裂变附近的碎块远离满壳层,容易变形^[17],因而对称裂变时拉得更长,两个碎块距离远,故使得动能下降,中子数上升。这样虽然可以定性说明动能下降中子数增多的原因,但仍然很难完满地解释对称裂变动能随入射粒子能量改变的规律。但是用 Z_p 保持50满壳层的观点,就很容易理解这些规律。我们计算释放能时发现,对于 U^{235} 和 U^{233} 热中子裂变,若对称裂变重碎块 Z_p 不是保持50满壳层,而是均匀分布($Z_p = 46$),那么后者释放能刚好增加 ~ 25 MeV,因此在快中子裂变时,动能的增加可能正是50质子壳被打破以后,释放能增加的结果。而当激发能足够高时, Z_p 壳层已破,不再起作用,这时动能就不再随入射粒子能量而改变。因此用这种观点,很容易同时解释对称裂变动能随入射粒子能量变化的现有实验结果。此外,在对称裂变附近,高能 γ 光增多的实验^[8]也有利于重碎块 Z_p 保持50满壳层的假设。因为在这种情况下,重碎块中子结合能较大,预计会有较多的大能量 γ 光子。

在对称裂变附近,重碎块 Z_p 保持50满壳层是否正确,还有待更进一步的实验事实来判断,我们认为下面一些实验有助于验证这个观点。

1. 热中子引起裂变或自发裂变情形。

(1) 测量对称裂变附近分碎块中子数与碎块质量数的关系,因为按照重碎块 Z_p 保持50满壳层观点,在对称裂变附近,中子数是非常不对称的,轻碎块放的多,而重碎块放的少。

(2) 测量对称裂变附近,分碎块 γ 的能量与质量数关系。按照本文的观点,在对称裂变附近,重碎块高能 γ 光子增多(因为中子结合能大),轻碎块低能 γ 光子增多(因为中子结合能小)。上面已经提到过的实验,发现在对称裂变附近高能 γ 光子有所增多,但没有测量低能 γ 光子是否增多。

(3) 测量对称裂变附近 β 数目与碎块质量数的关系。按对称裂变附近重碎块 Z_p 保持50满壳层的观点,轻碎块要放出大量 β ,而重碎块是稳定核,不放 β 。最近有人做了 β 数目与质量数关系的实验^[19],也有锯齿状趋势,但是在对称裂变附近没有数据。

2. 快粒子引起的裂变。

(1) 测量 Pu^{239} 热中子和高能量粒子(如14 MeV中子)引起裂变时,对称裂变动能之差,因为按照总释放能的估计,保持 $Z_p = 50$ 与电荷均匀分布时的 $Z_p = 47$,其差比较小,只有10 MeV左右。

(2) 测量快粒子引起裂变时,在对称裂变附近所有次级粒子(中子, γ 光子, β 粒子)随碎块质量数的关系。若这时重碎块不再保持 Z_p 为50,而是均匀电荷分布,即它们将与碎块质量数关系不大。

总之,进一步从实验上直接或间接地澄清裂变碎块电荷分布,对进一步理解裂变机构

是有很重要意义的。

最后, 作者感谢何泽慧先生、于敏先生的关怀和讨论, 以及叶宗垣同志提供的实验结果与讨论。

参 考 文 献

- [1] Milton, J. C. D. and Fraser, J. S., *Phys. Rev. Letters*, **7** (1961), 67.
- [2] Gibson, W. M., Thomas, T. D. and Miller, G. L., *Phys. Rev. Letters*, **7** (1961), 65.
- [3] Niday, J. B., *Phys. Rev.*, **121** (1961), 1471.
- [4] Alexander, J. M. and Gazdik, M. F., *Phys. Rev.*, **120** (1960), 874.
- [5] 叶宗垣、刘宝星 (未发表).
- [6] Hanna, G. C., Proc. of Int. Conf. on Nucl. Structure (Canada, 1960), p. 862.
- [7] Ападин, В. Ф., Грицюк, Ю. Н., Кутиков, И. Е., Лебедев, В. И., Микаэлян, Л. А., *ЖЭТФ*, **43** (1962), 329; 2053.
- [8] Wahl, A. C., Ferguson, R. L., Nethaway, D. R., Troutner, D. E., Woelsher, K., *Phys. Rev.*, **126** (1962), 1112.
- [9] Seeger, P. A., *Nucl. Phys.*, **25** (1961), 1.
- [10] Terrell, J., *Phys. Rev.*, **127** (1962), 880.
- [11] Каваленко, С. С., Петржак, К. А., Адамов, В. М., *Атомн. энерг.*, **13** (1962), 474.
- [12] Каваленко, С. С., Петржак, К. А., Адамов, В. М., *Атомн. энерг.*, **15** (1963), 320.
- [13] Бочагов, Б. А., Комар, А. П., Солякин, Г. Е., *ЖЭТФ*, **43** (1962), 1611.
- [14] Whetstone, S. L., Jr., Leachman, R. B., *Bull. Am. Phys. Soc.*, II, **6** (1961), 376.
- [15] Дьяченко, П. П., Кузьминов, Б. Д., Куцаева, Л. С., Околович, В. Н., Смиреньки, Г. Н., Утюжников, А. Н., *ЖЭТФ*, **45** (1963), 8.
- [16] Селецкий, Ю. А., Эйсмонт, В. П., *ЖЭТФ*, **43** (1962), 1005.
- [17] Vandenbosch, R., *Nucl. Phys.*, **46** (1963), 129.
- [18] Cooperman, E. L. and Roy, R. R., *Phys. Rev.*, **132** (1963), 371.
- [19] Armbruster, P., Meister, H., *Z. Phys.*, **170** (1962), 274.