

核裂变物理五十年发展概况¹⁾

卓 益 忠

(中国原子能科学研究院)

摘 要

核裂变的发现是具有划时代意义的,至今已五十周年了。本文着重介绍五十年来人们对核裂变现象机理的认识过程。这大体可以分为三个时期,在不同时期中,在理论与实验的结合,基础研究与应用的关系等方面都有不同的特点,本文对上述都作了叙述,并对我国学者的贡献加以肯定,预期今后核裂变物理还会是一个非常活跃的领域。

二十世纪前半世纪,原子核物理是自然科学最前沿的学科之一。它开始于 α 和 β 射线的发现,此后在这一领域中,新奇的发现一个接一个地出现,但其中没有一个能象发现核裂变那样巨大与深远地影响着人类的命运。

核裂变的发现是核物理基础研究的产物,五十年来它虽已在核能等方面得到了广泛的应用,但核裂变的基础研究一直没有间断并受到重视。由于实验条件的不断完善与新设备的建立,以及理论上的进展,直到今天它仍然是核物理研究中非常活跃的一个领域,而且在广度与深度方面也比以往发展得更加迅速。本文将着重回顾五十年来人们对核裂变现象的机理的认识过程。

一、核裂变发现的初期与液滴模型

当 O. Hahn 和 F. Strassman 用慢中子轰击天然铀时发现了核裂变的消息传开之后,核裂变的研究工作进展得非常迅速。在很短时间里许多科学家就已预见到实现链锁反应的可能性。费米于 1939 年 3 月 16 日(离核裂变发现的日子才 3—4 个月)就到华盛顿去告诉美国政府,一种新的具有巨大威力的爆炸物有可能成为现实。这个时期的核裂变工作能这样飞速地发展,一方面是因为从一开始人们就意识到其实际意义,另一方面是由于理论与实验紧密配合。当理论家们一知道此发现,马上就用液滴模型来进行解释,不仅给出了一个合理的图

象,并成功地解释了当时已知的实验事实,而且所做的预言也很快就被实验所证实。

核裂变的液滴模型是把原子核类比于带电液滴,其位能 $V(\alpha)$ 由库仑能和表面能两部分组成。对于一个球形(或近似于球形)的原子核,表面能是阻止形变发生,而库仑能则促使形

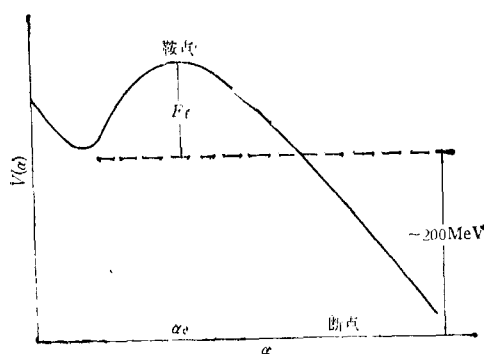


图 1 原子核液滴模型的位能曲线

变发生,当形变刚开始时,表面能增加要比库仑能的减少快,所以位能总的趋向是增加的,但当形变 α 达到某临界值之后,库仑能的减少比表面能的增加要快,因而体系的总位能很快地下降,最终导致核裂变。它的基本物理图象见图 1。

根据简单的液滴模型可以得到如下重要的结论:

1) 本文是作者于 1988 年 11 月 25 日在中国核学会举行的“核裂变现象发现五十周年纪念大会”上所作的报告。

1. 从原子核母核基态到裂变断点之间存在着一个裂变位垒，这就说明了虽然一些重核裂变后可以释放出大量能量（ $\sim 200\text{MeV}$ ），但由于原子核很稳定，所以要产生裂变必须给以一定的激发能。

2. 定量地估算了一些重核的裂变位垒高度，并考虑了核的奇偶效应，阐明了由慢中子引起裂变的只是天然铀同位素中含量仅有 0.7% 的 U^{235} 而不是 U^{238} 。

3. 裂变位垒高度与 Z^2/A (Z 为质子数， A 为核子总数) 有关，并存在一个极限值：

$$(z^2/A)_{\text{lim}} \approx 48.$$

当一个核的 z^2/A 大于此极限值时，裂变位垒的高度为零，所以这种核是不稳定的，自然界中不存在。

4. 由于存在着裂变位垒，象 U 等同位素的自发裂变（即不受激发，从基态通过量子隧道穿透而产生裂变）的寿命相当长，如对 U^{238} 的估算值 $\sim 10^{22}\text{a}$ ，比它的 α 衰变寿命还长。

慢中子引起裂变的是 U^{235} 而不是 U^{238} ，这一点很快就被实验所证实，它在以后的核能应用上起了极为重要的作用。自发裂变现象也于 1940 年为苏联学者 G. N. Flerov 和 K. A. Petrzhak 所发现，我国学者钱三强与何泽慧于 1946—1947 年发现了三分裂与四分裂的重要核裂变现象。

液滴模型，特别是 N. Bohr 与 J. Wheeler 的经典著作奠定了人们对核裂变机制认识的基础，但当时有一些重要问题（例如核裂变质量不对称分布），液滴模型不能给以解释。

此外，由于军事应用，后来许多有关核裂变的研究转为秘密进行，直到 1955 年第一次日内瓦和平利用原子能会议时才完全公开。

二、壳修正、双峰位垒、形状同质奇能态等的发现

1. 四十年代末五十年代初，Mayer 和 Jensen 提出了核壳模型。由于它成功地解释了单粒子的许多性质，因而得到核物理界的普遍

物理

承认。壳模型的基本特征是单粒子能级分布存在有不均匀的壳层结构，当核子数填到满壳时核的结合能最大，最为稳定，因为在两壳层之间有一个较大的能隙 [图 2(a)]。上面提到的液滴模型则对应于均匀单粒子能级分布 [图 2(b)]。

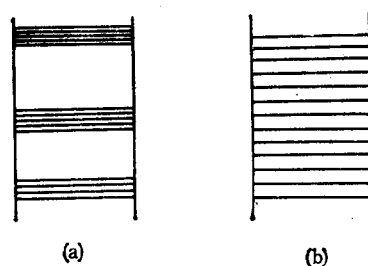


图 2 (a) 核壳模型的能级分布；(b) 液滴模型的能级分布

显然在计算核裂变位能随形变变化时，应当考虑到这种壳结构效应。V. M. Strutinsky (1966) 提出了如何把壳修正考虑进来的方法。他建议将单粒子能分为两部分，即光滑部分与涨落部分，光滑部分用液滴模型来代替，涨落部分即称为壳修正能。人们考虑到修正，于是位能随核形变可以表示为

$$V(\alpha) = V_{\text{液滴}}(\alpha) + \delta V_{\text{壳}}(\alpha) + \delta V_{\text{对}}(\alpha),$$

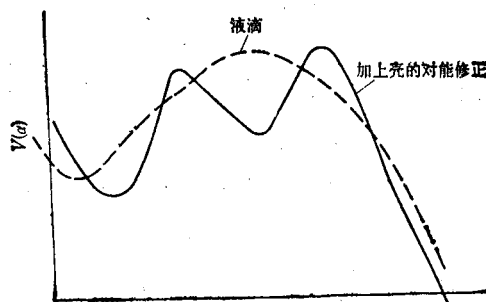


图 3 裂变位垒的双峰结构

其中 α 表示形变。这一修正意外地导致了首先在理论上预言裂变位垒的双峰结构 (图 3)。

2. 另外在六十年代初，Dubna, Polikanov 等人用 ^{22}Ne 轰击 ^{242}Pu ，企图合成 104 号元素时，却意外地发现了自发裂变半寿命为 14ms 的 ^{242}Am 。它比正常情况的半寿命快 10^{20} 倍，并且自旋也不高，一时人们对此很难理解。双峰裂变位垒结构的理论出来后人们才恍然大悟，这

是从第二阱自发裂变的,因而称之为形状同质能态。

3. 为了精确测量中子截面,人们发现对于激发能比裂变位垒低的中子裂变,其共振峰比中子全截面的共振峰稀得多,并且分成几乎是等间隔的小群。开始人们对此也难于理解,也是在裂变双峰位垒理论出现之后才明白。

随后人们又从各个角度证实了双峰裂变位垒的存在,如发现了从第二阱退回到第一阱的 γ 退激发,发现第二阱上的转动带能谱等等。

由于壳修正理论一开始是独立发展而不是为了解释某些实验,人们对这个理论方法(称为宏观-微观方法)就比较相信。于是在六十年代末和七十年代初,人们纷纷用此方法来计算更重的核(尚未合成的)稳定性问题,并在理论上预言了在核 $Z=110$ 附近存在有较稳定的超重核。一时在许多国家掀起了寻找超重核的热潮,象其他一些理论预言那样,虽然至今尚未找到这种超重核,但这并不排除将来有可能找到,而且在寻找过程中也会大大促进科学与技术的进步。

三、核裂变物理的近期发展情况

由于实验条件的不断完善,高能加速器、重离子加速器等建造,使得实现核裂变手段更加多样化,内容也更加丰富。在理论上仅考虑核裂变的位能已经不够了,还必需考虑动力学过程。这里将1989年4月3日在核裂变发现地西柏林召开的纪念核裂变发现五十周年纪念会所要讨论的课题列在下面,也许有助于了解当前核裂变研究的范围、规模以及今后发展的趋势。

1. 核裂变的静态性质:

- (1) 自发裂变,寿命系统学;
- (2) 复杂粒子放射性;
- (3) 位能面;
- (4) 第二阱的谱学。

2. 仪器设备:

- (1) 核裂变探测技术的历史回顾;
- (2) 实验技术的近期发展。

3. 通过复合核形成的裂变(低能):

- (1) 轻粒子与光子引起的裂变;
- (2) 裂变碎块角分布;
- (3) 裂变碎块的质量,能量和电荷分布;
- (4) 冷裂变碎块的质量,能量和电荷分布;
- (5) 能级密度;
- (6) 三分裂的核裂变。

4. 核裂变动力学:

- (1) 核裂变动力学的微观理论;
- (2) 核裂变动力学的宏观理论;
- (3) 耗散机制;
- (4) 断点物理。

5. 高温和高自旋复合核裂变:

- (1) μ/\bar{p} ,超核(A, Z 等)引起的裂变;
- (2) 重离子引起裂变的实验情况;
- (3) 反应时间;
- (4) 核裂变用于研究重离子反应;
- (5) 在重离子融合裂变中的角分布与质量分布。

6. 融合的极限:

- (1) 融合裂变(快裂变,不完全融合);
- (2) 非常重元素的产生。

纵观五十年来核裂变物理发展情况,核裂变这一领域在深度与广度方面都比过去发展得更迅速。在传统的低能及自发裂变方面,由于测量精度的提高,发现了象冷裂变这样新的裂变模式,高能粒子引起的裂变,由于复合核处在高激发态,壳层修正等量子效应就不那么重要了,可以用经典理论在相当多的核数范围对核裂变机制进行研究。重离子引起裂变的内容更加丰富,由于带进高角动量,使裂变位垒降低,很多动力学效应显得重要。现在我们知道,核裂变与重离子反应都是原子核大振幅的集体运动,研究这种有限量子体系的非平衡态动力学过程的意义不仅对核物理,而且对整个物理学领域都是重要的,因为它介于真正微观(几个自由度)与宏观(无限大系统自由度)之间。

我国核物理工作者结合核能的应用,在裂变中子数、中子能谱、裂变截面和裂变产额等方

(下转第378页)