

## 链式反应

链式反应：有焰燃烧都存在链式反应。当某种可燃物受热，它不仅会汽化，而且该可燃物的分子会发生热解作用从而产生自由基。自由基是一种高度活泼的化学形态，能与其他自由基和分子反应，而使燃烧持续进行下去，这就是燃烧的链式反应。

在物理学中，铀核裂变的假说一经提出，所有的物理实验室立刻沸腾起来了，对这一现象展开了紧张的研究。在不到一年的时间内，所发表的有关核裂变的科学论文，总共达一百多篇，这在物理史上是没有前例的。在很短的时期内，不但搞清楚了核裂变的基本特性，并且揭示了这一发现的深刻意义。

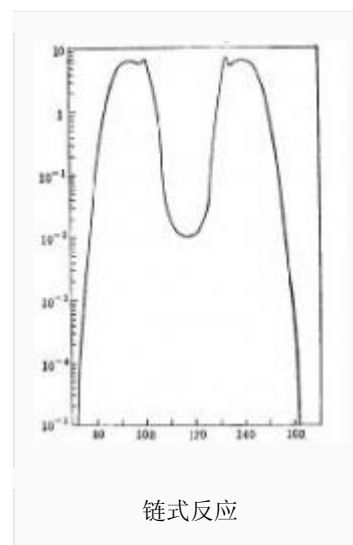
铀核吸收一个中子以后，按三十多种不同的方式发生裂变，生成的碎片又发生一系列的 $\beta$ 衰变，因此，一共产生三十多种元素的近三百种同位素。难怪费米、伊伦·居里、哈恩等当时第一流的科学家都被这种现象迷惑了那么长的时间。

旁图所示是铀 235 裂变碎片的质量分布曲线。从图中可以清楚地看到，分布曲线有两个峰，一个在质量数 95 附近，一个在质量数 138 附近。双峰曲线表示，铀核裂变时，绝大部分是不对称裂变，对称裂变的几率是很小的(质量数 118 附近)。这种不对称裂变，在裂变现象发现后不久就通过各种实验方法得到确证，但是在核理论已经取得巨大进展的今天，这种不对称裂变的原因，依然是一个谜。

铀核裂变时，分裂成两个碎片的情况是最常见的，也曾观察到分裂成三个(甚至四个)碎片的情况，不过发生的几率很小，只有千分之几。这种所谓“三裂变”现象，是我国著名核物理学家钱三强、何泽慧夫妇于 1946 年首先发现的。三裂变的几率虽然很小，但由于它能更清楚地说明裂变机制，所以目前仍在对它进行研究。

核裂变所生成的碎片一般都是中子过剩的，它们以发射电子( $\beta$ 衰变)的方式逐渐将过剩的中子转变成质子，即通过一连串的 $\beta$ 衰变而到达稳定状态。由于这个缘故，大多数裂变产物通常都是 $\beta$ 放射性同位素。为什么核裂变产生的碎片通常是中子过剩的呢？为什么不是缺少中子或中子数与质子数正合适呢？

我们知道，原子核是由质子和中子(统称核子)组成的。核子之间存在一种很强的作用力，叫做核力，这种力是一种短程吸引力。在原子核内，这种作用力很强，在原子核外，迅速降到零，核子就是靠这种力保持在原子核内的。另外质子间还存在静电斥力，随着原子序数的增加，即随着原子核内质子数的增加，静电斥力也增大。因此，为维持核的稳定性，需要更多的过剩中子所产生的核力来平衡这一斥力。因而，稳定原子核的核内中子数和质子数的比值，随着原子序数的增加而变大。例如轻元素碳、氧等的中子数与质子数之比为 1，中等质量的元素溴、钡等为 1.3，而铀、钍等重元素则增大到 1.6。原子核的中子数和质子数之比若小于或大于相应的合适比值，都将是不稳定的。



对于铀核裂变的情况来说，铀的中子数与质子数之比约为 1.6，那么，生成的碎片的中子数与质子数之比当然也是 1.6 左右。但是裂变生成的是中等质量的元素，它们在中子数与质子数之比为 1.3 左右时才是稳定的。显然，这些碎片是中子过剩的，必然会以  $\beta$  衰变的方式，使中子数与质子数之比降到 1.3 左右，从而达到稳定状态。

不过由此也自然会产生这样的问题：在铀核裂变的过程中，是否会有一些过剩的中子不留在碎片内，而直接以自由中子的形式发射出来呢？这个重要问题曾由许多科学工作者加以研究，结果表明，铀核裂变时确实会放出一些自由中子，这些中子通常叫做次级中子。在讲述这一事实所蕴含的巨大意义之前，我们先来看一看另一个重要的事实：在铀核裂变放出次级中子的同时，还会释放出巨大的能量，请看下面的计算：

假定铀 235 吸收一个中子后，裂变成一个溴 85 核和一个镧 148 核，同时放出三个中子。铀 235 的质量为 235.124，溴 85 的质量为 84.938，镧 148 的质量为 147.96，中子的质量为 1.009。

因此裂变前的质量总和为： $235.124 + 1.009 = 236.133$

裂变后的质量总和为： $147.96 + 84.938 + 3 \times 1.009 = 235.925$ ；

裂变过程中质量的减少为： $236.133 - 235.925 = 0.208$

这些损失的质量到哪儿去了呢？根据爱因斯坦相对论可知，它们变成了能量。爱因斯坦推导出一个著名的质能转换公式： $E = mc^2$ ，其中  $c$  是光速（约等于每秒 30 万公里）， $m$  是静止物体的质量， $E$  是静止物体所含的能量。由这个公式可以方便地计算出铀核裂变放出的能量约为 194 兆电子伏。近似地说来，每次裂变大约释放 200 兆电子伏的能量，

这个数值是非常巨大的，比如说，1 克铀 235 完全裂变所释放的能量，相当于 2,000,000 克（2 吨）优质煤完全燃烧时所释放的能量。也就是说，裂变能大约要比化学能大二百万倍！

铀核裂变时，一是放出中子，二是放出巨大的能量，这两种可贵的性质紧紧地吸引着人们的注意力。人们特别感兴趣的是每次裂变究竟能放出多少个中子，因为这关系到究竟能否实现链式反应，也就是关系到能否在实际利用原子能方面开辟一条道路的问题。

经过许多科学工作者的努力，很快就确定了每个铀 235 核发生裂变时平均约放出 2.5 个中子。大自然为我们作了这一具有特殊意义的安排：次级中子数大于 1！从而使铀核裂变现象的发现成为不平凡的发现。如果每次裂变产生的平均次级中子数小于 1 的话，那么这一发现的价值和我们对它的兴趣就完全不同了。

一个铀核在一个中子作用下发生裂变，如果裂变时放出两个次级中子，这两个次级中子又引起两个铀核发生裂变，放出四个次级中子，这四个中子再引起四个铀核发生裂变……。如此下去，反应的规模将自动地变得越来越大，一幅铀核链式反应的图景，立即展现在我们面前，它吸引了多少科学家啊！

确实，科学家们为实现核裂变链式反应，使之造福于人类，而付出了巨大的劳动，现在让我们从理论上先分析一下实现链式反应的条件。中子是实现核裂变链式反应的媒介，因此要使一个体系的链式反应能持续地进行下去，就必须使中子的数目至少不随时间而减少。

我们通常把体系中某一代中子数与上一代中子数之比称为中子增殖系数，用  $k$  表示。当  $k = 1$  时，体系中的中子数目保持不变，链式反应以恒定的速率持续进行，这种状态称为临

界。 $k > 1$  时，中子数目将越来越多，链式反应的规模越来越大，这时称为超临界。而  $k < 1$  时则称为次临界，此时中子数目逐渐减少，链式反应规模越来越小，直至最后停息。

天然铀中主要含有铀 235 和铀 238 两种同位素，前者约占 0.72%，而后者约占 99.27%。经研究表明，铀 235 在各种能量的中子作用下，均可能裂变，而铀 238 只有在能量大于 1.1 兆电子伏的中子轰击下才可能裂变，而且前者的裂变几率大大地超过后者。因此，要造成链式反应，实际上只能利用天然铀中含量极少的铀 235。

为简便起见，我们先来考虑一个由纯铀 235 构成的体系。在这种体系内，中子的命运大致有两种，一是被铀 235 吸收，引起裂变(小部分不引起裂变)，从而使中子数目增加；二是从体系的表面泄漏出去，损失掉。因此，对于这样的体系，只要由裂变增加的中子数不小于泄漏损失的中子数，链式反应即能维持。

我们假定有一个纯铀 235 的体系，该体系中原有 100 个中子，其中 49 个从体系的表面泄漏出去而损失掉；其余 51 个被铀 235 吸收，而其中又有 10 个不引起裂变(使铀 235 转变成铀 236，就维持链式反应而言，这也是一种损失)，只有 41 个中子引起裂变。按比较精确的数值，每次裂变平均产生 2.46 个中子。因此一共能放出  $2.46 \times 41 \approx 100$  个中子。这样，该体系的中子增殖系数  $k = 1$ ，这就是说，链式反应能持续进行了。

如果泄漏出去的中子数多于 49 个，必然使  $k$  值小于 1，链式反应就不能维持。而如果泄漏出去的中子数少于 49 个，这样  $k$  值就大于 1，链式反应的规模就越来越大。

我们知道，中子的泄漏与体系的表面积成正比，而中子的产生则与体系中裂变物质的量，即与体系的体积成正比。对于一定形状的体系，当其尺寸(亦即质量)增加时，体积的增加要比表面积的增加来得快，因而使中子的相对泄漏变小。由此可知，为实现自持链式反应( $k = 1$ )，存在一个裂变物质的最小体积(或质量)，这就是所谓临界体积(或临界质量)。

显然，临界体积或临界质量与体系的几何形状有关。扁平或细长的形状都使表面积与体积的比值增大，从而增加中子的相对泄漏。以圆柱形体系为例，当其直径小于一定数值时，即使把高度无限加大，也不能使其达到临界状态；同样，当高度小于一定数值时，用加大直径的办法也无法使它达到临界。对于一定的体积，以球形的表面积为最小，所以球形体系具有最小的临界质量。

临界质量与体系的物质组成当然有很大的关系。对于纯铀 235 组成的球形体系，临界质量约为 50 公斤，临界直径约为 16.8 厘米。有些体系，由于非裂变物质含量太大，非裂变吸收太严重，即使把尺寸放大到无限大，也不能达到临界状态，纯粹由天然铀组成的体系便属于这种情况。

那么，有没有办法能使天然铀体系达到临界呢？有办法。我们先来分析一下纯粹由天然铀组成的体系内中子的活动情况。由于这种体系除了铀 235 外，还含有大量的铀 238，所以中子的活动情况要复杂一些。大致说来，可以分为以下四种情况：

(1) 中子(不论速度快慢)被铀 235 吸收，大部分引起裂变，小部分只被吸收而不引起裂变，因此总的效果是使中子数目增加。

(2) 能量大于 1.1 兆电子伏的中子，被铀 238 吸收，引起裂变，使中子数有所增加。

(3) 能量小于 1.1 兆电子伏的中子，被铀 238 吸收，但不引起裂变，因而使中子数目

减少。

(4)中子从体系的表面泄漏出去而损失掉。

方便起见，我们暂且忽略(4)，只考虑前三种情况，这种没有中子泄漏的体系相当于一个无限大的天然铀体系。这样，使中子数增加的是情况(1)和(2)，使中子数减小的是情况(3)。要使体系能维持链式反应，只要这两个方面取得平衡就行了。

但情况(2)引起的中子数增加是不多的，这是因为能量大于1.1兆电子伏的中子与铀238碰撞时，只有很少一部分被吸收而引起裂变，大部分散射回来，损失掉部分能量

这样，能否维持链式反应，就要看情况(1)和(3)哪个是主要的了。在天然铀中，铀235只占一百四十分之一，所以，中子碰上铀235的机会要比碰上铀238的机会小得多。如果在同样的碰撞机会下，对热中子来说(能量下降到周围介质原子平均动能水平的中子称为热中子)，它引起铀235裂变的可能性却要比被铀238吸收的可能性大190倍。因此对热中子而言，情况(1)将超过(3)，使增殖系数 $k$ 大于1。

问题在于，中子在损失其能量变成热中子之前，在能量5~100电子伏的区域内，特别容易被铀238吸收(称为共振吸收)。结果 $k$ 还是小于1，链式反应难以维持。因此，要维持链式反应，就要采取某种措施，使中子的速度迅速减慢，越过强烈吸收中子的共振吸收区域，变成热中子。使用慢化剂，就能达到这一目的。

我们来看一看物体碰撞减速的情况。当一个较小的物体去碰质量大的物体时，例如用乒乓球碰桌子时，乒乓球几乎以原来的速度弹回来，动能损失很小；而当一个乒乓球去碰另一个乒乓球时，由于两者质量几乎相等，乒乓球大约将会损失掉一半的动能。因此采用原子核质量与中子质量相近的物质作慢化剂，则慢化性能比较好。当然还要求慢化剂对中子的吸收能力很小

按上述要求，重氢是一种很合适的慢化剂，它的质量只比中子重一倍，吸收中子的能力又很低。实际使用时，一般不用重氢气体，因为它的密度太小，而是用重氢与氧化合成的重水。石墨也是一种优良的慢化剂，虽然慢化能力比重水差一些，但是价格要比重水便宜得多。

使用了慢化剂以后，大部分中子就迅速地被慢化成热中子，从而使情况(3)减少，使情况(1)增加。这样，就能使原来的非临界体系变成临界体系。例如，用重水或石墨作慢化剂，就能使天然铀体系达到临界状态。普通水也可用作慢化剂，但它吸收中子的能力较大，只有与加浓铀一起，才能构成临界体系

考虑到情况(4)，实际体系总是有一部分中子泄漏出去的，这就要求体系有足够大的尺寸，使泄漏出去的中子数只占很小的比例，以使 $k$ 值大于1，保证链式反应的进行。若在体系周围包上一层能反射中子的所谓反射层，使泄漏出去的中子一部分可以反射回来，那就更有利于链式反应的进行了。所以通常采用石墨作反射层。