



(续)

施义晋

三、原子核裂变和核反应堆

重原子核如果开裂成二块中等重的原子核，可以放出很大的结合能。现在这事看起来是如此明白，但在裂变尚未发现的年代，即使当时最伟大的科学家也不免搞错了，更不用说伟大的卢瑟福根本不承认人类可以大规模利用原子能，虽然原子能利用的实现仅仅是几年后的事情。1934年意大利杰出的科学家费米开始用中子作炮弹轰击各种元素，他与约里奥·居里夫妇一样得到了他们用 α 粒子作炮弹得到的人工放射性同位素。但当他用中子轰击铀时，他就认为他得到了新的93号元素(铀是地球上天然存在的最重元素，是92号)，这显然是一个错误，但是人们普遍认为费米的结论是对的。当时有一对年轻的夫妇叫作诺达克的，他们在化学史上是很出名的，是镭的发现者，他们对费米的结论提出了怀疑，但是并没引起重视。

直到1938年底，哈恩·斯特拉斯曼在约里奥·居里夫人的工作启发下，从化学上完全确定了费米所宣称的93号元素不过是早已知道的钡，56号元素。92号铀被中子轰击之后变成了56号钡！这一下拨开了几年来一直缠绕在科学家头脑中的迷雾，梅特纳马上就提出了铀原子核在中子轰击下会裂成二块的思想。这个消息传到了当时的科学中心，丹麦哥本哈根波尔研究所时，波尔教授也不由得一拍他的脑门，大声说：“我们怎么会这么久没有想到这点呢！”

约里奥·居里马上进行了一些必要的，非常重要的工作，他测定了在铀原子核裂变时，不仅放出大量的能量而且还放出2—3个新中子，这就从原则上肯定了实现自持的链式反应的可能性。什么叫自持的链式反应呢？我们仍以大家熟悉的碳—氧化学反应为例，在普通状况下碳与氧是不会发生化学反应的，因此煤可以

露天堆着，但当把煤放到炉里点着了以后，煤在空气里就会自动的变成二氧化碳，并且放出的热量使另一部分煤燃烧，这个过程就像链条似的一节连着另一节，一部分的碳氧反应引起另一部分碳、氧发生反应，而且一经点火之后，不再需要外界另加热量，反应就可自己进行下去，这样的反应情况，我们称做为自持的。由于铀核裂变后，有新的中子放出来，而这些新中子如果能进一步引起

另外的铀核裂变的话，那么又有新的一代中子产生出来，这样铀核的裂变过程就成了一场自持的链式反应。

这样的可能性极大地激动了当时的科学家，更因为第二次世界大战的爆发，对新武器的研究需要，美国政府承担了这项原子能的计划。就在裂变现象发现后的第三年，或确切地说，第四年，1942年12月，费米领导的一个小组在美国的加利福尼亚大学实现了世界上第一个反应堆，到1945年7月美国西部的阿拉默果多尔爆炸了第一颗原子弹装置，原子能这个新的能源迅速地以吞噬千百万人生命的恶魔形象问世了。

因此原子弹实质上就是不加控制的瞬间就达到爆炸程度的铀原子核(现常用钚，94号元素，由反应堆制造)的自持链式反应，而反应堆则是一种在控制下的像锅炉一样平稳地燃烧的自持链式反应。由此也导致了它们设计结构上的大不相同。

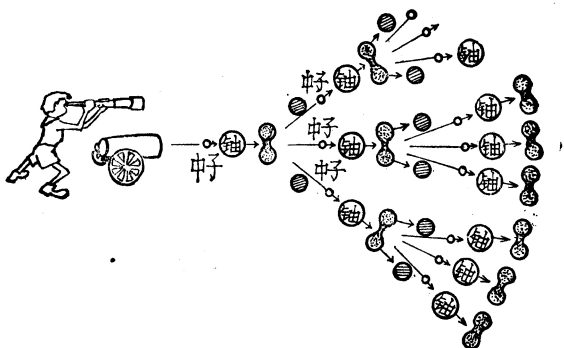


图 1

为了使铀核裂变反应的规模与速率能在可控制的条件下进行，需要采取与原子弹很不相同的措施，也就是说我们要采取的措施足以保证一个中子引起的铀核裂变，不多不少使产生的新中子中平均只有一个中子

去引起下一次裂变。这个条件是至关重要的，如果一个中子引起下一代不止一个中子参加裂变，这个裂变反应的规模将一代一代按几何级数扩大，以致大到不可收拾。如果平均下一代只有少于一个中子能参加反应，那么反应堆即使起动了也要慢慢停下来。我们常用“增殖系数”这个指标来反映这个情况，如果增殖系数大于1，则反应规模将扩大，如果增殖系数小于1，则反应会停下来。增殖系数等于1，就称为达到临界。控制反应堆，就是控制增殖系数。

怎么控制这个增殖系数呢？关键在于控制中子与铀原子核碰撞的条件与有关因素。

首先我们了解到铀原子核不全是一吸收中子就会裂变的，特别是铀-238同位素的核对1百万电子伏特以下能量的中子只是吸收，而不裂变，而铀-235同位素的核则较易裂变，有趣的是，中子速度越小，它吸收中子的几率也越大，吸收后裂变的几率当然也增大，因此要想达到增殖系数为1的条件，首先想到的是增加铀燃料中铀-235的成份，也就是所谓浓缩铀。在天然存在的铀元素中铀-235只占0.7%，而铀-238占了99.3%，由于二种铀同位素化学性质极其相似，大部份浓缩方法只能靠这二种同位素的微小质量差，这是很困难的，也是很费资金的，因此很多反应堆直接采用了天然铀作燃料，而采用其他办法来提高增殖系数。当然，也有采用了浓缩铀的，例如把铀-235浓度提高到2%，总之，要看设计要求。

此外，燃料的形状也是很有讲究的，不同的形状，对 neutron 跑出燃料块的情况也是不一样的。因此反应堆的燃料块的形状也有好多种，不过还要考虑到散热等的要求，对形状提出了更多的限制，有的是棒状的，针状的，有的是板状的，甚至采用液体作燃料的都有。

要提高增殖系数另一条途径也是很易想现的，就是采用减速剂，所谓减速剂是一种与中子相撞后，几乎不吸收中子，而只是减少中子能量的原子核组成的物质。常用的有石墨，重水等，越轻的物质减速的效果越好。中子在裂变之后产生的瞬间，它的能量约为1—2百万电子伏特，每一连串与减速剂碰撞之后，它的能量很快达到了一般的运动速度（这样的中子常称为热中子，它与同样温度下的气体分子具有同样的速度）。热中子对铀-235的裂变几率要比快中子（能量大于几个千电子伏的）大几千倍。因此基于这个考虑，好多型的反应堆将燃料做成细棒状，裂变后的中子不经碰撞就进入到包在细棒周围的减速剂中去，在减速成热中子后，再进入燃料棒（燃料棒不止一根）这样中子就极易与铀-235碰撞而引起裂变，而不易与铀-238碰撞而被吸收，大大提高了增殖系数。

为了使增殖系数更增大些，人们常在燃料棒—减速剂系统（常称作“堆芯”或“活性区”）外包上一层称为反射层的物质，顾名思义就是说，当中子从堆芯中泄漏出

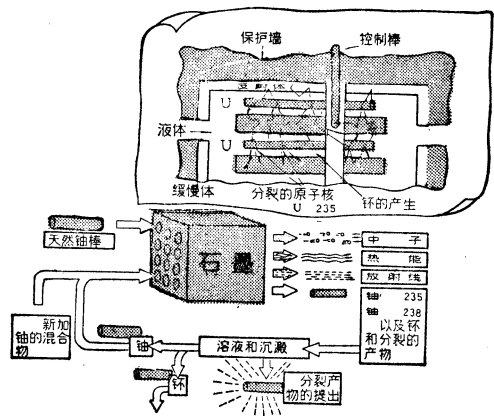


图 2

来了可以反射回去的意思。这些材料也常采用石墨，重水等。

增殖系数通过以上种种办法是可以提高到1甚至1以上的。但我们知道光有这些还是不行，万一条件一改变（这在反应堆运行过程中常发生的）增殖系数大于1了，我们怎么能维持反应堆正常运行呢？此外，反应堆开动之后，我们要它停下来，又怎么办呢？因此还得求助于能把增殖系数减小的办法，一个很有效的办法就是采用一种叫做镉的元素，它的原子核具有特别大的中子吸收几率，中子一碰上它，立即就给“吃掉”了。因此我们可以把镉做成棒，放在一定部位，当需要提高增殖系数时，我们可把它提出反应堆芯外一点，要减小增殖系数时把它再插进去一点，这样就达到了控制自如的地步了。反应堆的安全性大大提高了。

当然上面所讲的这些不过相当于一个普通锅炉中的炉膛，作为锅炉还得有热交换回路。反应堆里同样有热交换系统，把铀核裂变后产生的热量带出来，一则保护反应堆本身不致烧坏，二则这份热量是要用来为人服务的。反应堆中的热交换剂除了考虑有大的载热效率外，还必须经得起反应堆芯内强烈的辐照，常用的载热剂有二氧化碳、重水，也有用金属钠的。

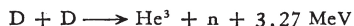
目前这种热中子类型的反应堆技术已相当成熟，它的发电成本已可与煤、石油的火力发电厂相竞争。另外，英国在研究快中子类型的反应堆（通称“快堆”）方面也投入了很大人力物力。快堆是一种很有意思的装置，它的燃料会越烧越多，就是说，有点像永动机，当然它与永动机是根本不同的。它的巧妙在于设计思想上，我们上面提到铀-238能吸收中子而不裂变，它变成什么了呢？它经过二个放射性β衰变后变成了钚-239，这是一种很好的原子能燃料，与铀-235一样受热中子轰击很易裂变，不过比铀-235更容易。我们也知道，每次裂变之后，一个中子能产生2—3个新中子，我们只要保证一个中子继续为铀-235所吸收让其余的被铀-238吸收变成钚-239，这样不就可以燃料越烧越

多吗？我们所要做的是添加不是燃料的铀-238，及时取出多余的钷-239，这不是一幅有趣而有意义的图景吗？

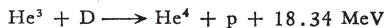
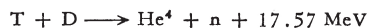
大家也许会问，既然石油和煤这类地球上储量很丰富的化石燃料都维持不了人类许久的消耗，埋藏量更稀少的铀难道能维持更长的时间吗？其实铀在地球上的储量不算少，不算陆地上的矿藏，光是海水中溶解的铀盐就有四十亿吨，可供人类使用二百万年。而且每年河流还在把二万七千吨铀冲进海洋。

四、原子核裂变反应与可控热核反应

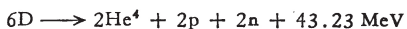
原子核裂变反应有一个严重的问题是，它的放射性废物的处理。我们知道在裂变过程中，有几百种放射性同位素会产生出来，有的放射性很强，有的很弱，也有的放射性寿命很长，要几百万年放射性活动才会小下去，当然有的很短，要不了几秒钟，它的放射性就消失了。对一些放射性很强，寿命又相当长的（如几百年，几千年的）放射性废物的处理是当前很棘手的一门课题。人类目前对放射性的强度与寿命没有一点可以改变它的办法。现在唯一的办法就是将那些放射性废物尽可能缩小体积，变成玻璃质的东西，找一个地质上很安全的地方埋起来。这个方法又笨又贵，但这是目前唯一的好办法。因此有不少人倾向于寻找没有放射性废物的，即使有也是容易处理的新能源。而聚变反应恰恰具有这样的优点。那么什么是聚变反应呢？我们上面谈到过，当轻原子核聚合成中等重量的原子核时，这种反应在结合能上是有利的，就是说是放能反应。例如我们从氘核的聚变反应为例来看一看。氘核聚变可有下列四种方式：



在上述反应中生成的氚 T 与氦-3 He^3 可进一步与氘 D 反应



将这四个反应式加起来，我们得到



就是说六个氘核经过聚变反应可以变成二个 He^4 核、二个质子、二个中子而且伴随着放出 43.23 百万电子伏特的能量。按单位质量计算聚变反应能要比裂变反应能大三倍，因此聚变反应是能量更高的新能源，此外我们知道 He^4 核就是氦，它本身是没有放射性的，除了这些 He^4 核、质子、中子轰击在周围的器壁上，会产生放射性元素外，这聚变反应本身没有放射性产物（中子有弱 β 放射性）。所以，人们也常说聚变反应是乾淨的，所谓“乾淨”的氢弹实质上是轻核聚变占主要成份的原子弹，而所谓中子弹实质上是辐射中子较多，但爆炸力较小的氢弹。

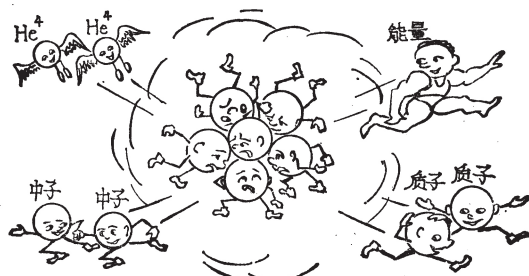


图 3

聚变反应还有一个优点是它的燃料来源是地球上极其丰富的水，我们知道在天然水中含有重水，只要将重水分解就可得氘，而重水与普通水的分离远远要比把铀-235 与铀-238 分离容易得多，故轻核聚变反应从很多方面来看是有很大优越性的。但是轻核聚变反应要作为一个能源为人类谋福利，看来不是在本世纪可以做到的事，在本世纪如果能做到初步点火，使“点燃”后放出的能量能与为点燃这场反应所消耗的能量相当，那就是一件非常重大的事件了。困难在哪里呢？

我们知道引起核反应的力是核力，核力是一种作用距离非常短的力，不像重力与电磁力能在远距离起作用，核力只能在 10^{-13} 厘米距离上起作用，也就是说要使二个原子核之间能发生核反应，它们相互靠近到至少在 10^{-13} 厘米距离内。对于裂变反应来讲，这个要求没带来非常严重的限制，因为引起反应的中子不带电，它可以容易地靠近铀核，只要铀核正好在它飞行的道路上。但对于聚变反应来说，这个要求就带来了非常严重的困难，因为参加聚变反应的二个原子核都带有正电荷，例如氘核带有一份正电荷，当它们相互靠近时，二个氘核之间出现越来越大的库伦斥力，因此要使二个氘核接近到 10^{-13} 厘米距离内使核力发生作用之前，它们必须克服这个库伦力——像通常所称的“库伦位垒”，据计算只有当氘核的动能大于 1 千电子伏特时，才有可能发生聚变反应。

因此要使氘核聚变反应成为可能，首先必须使氘核具有千电子伏以上的能量，当然用加速器来达到这个能量是没什么困难的，但这代价太大了，只能在实验室里做实验用，作为能源我们希望像碳氧化学反应一样，只要开始时将碳或氧加热到燃点，这个反应就能自持地进行下去，我们也希望将氘核加热到“燃点”，使氘核在这个温度下具有平均动能在千电子伏以上，这样也可实现自持的氘核聚变反应。

这个温度多高呢？对氘核聚变反应要求一亿度。这个温度下任何物质都会变成等离子体，物质的第四态。因此不存在一个具体的容器可以来承受这么高的温度。当然办法还是有的，既然在这么高的温度下，物质全变成了等离子体，那么就可以用磁场来束缚这些

粒子。我们知道带电粒子有一个性质，它要么沿着磁力线运动，要么绕着磁力线打转转。磁场越强，它打转转的半径越小。因此对于很强的磁场，带电粒子就好像穿在竹签上的糖葫芦，只能沿着竹签运动，而不能离开。因此磁场就像一个容器能“装”高温等离子体。但是问题并没有完全解决，因为我们要“装”的不是一般温度的等离子体，是一亿度的等离子体。那怕这种等离子体密度极其稀薄，在这样的高温下，伴随的压力也是巨大的。为了使我们现今能制造的“磁瓶”能“装”住这个等离子体，我们不得不极大地减小等离子体密度。现今常采用的密度为每立方厘米 10^{13} 个氦核。如果我们知道，在常温下大气的密度为 $3 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ，就可知道这个密度几乎已是真空了。

由于氦核气体是这样的稀薄，因此要想产生足够数量的聚变反应来抵偿加热到一亿度所消耗的能量，必须使等离子体能维持足够长的时间，现今最好的装置已达到了一秒的量级。如果能把密度再提高到 10^{14} cm^{-3} 或时间延长到 10 秒量级，我们就达到了“能量抵偿”即初步点火的目标了。目的地好像是很接近了，但困难仍然是巨大的。因为到目前我们并没有更好的磁场能承受等离子体压力的进一步增大（由于密度的提高），我们只能寄希望于进一步增长等离子体的维持时间，要做到这一点，有二方面问题必须考虑，首先一亿度高温的等离子体是一个强烈的 X 射线源，由于 X 射线的不断辐射带走了很多能量，等离子体温度会很快下降。第二，这么一个高温、高压的等离子体存

在着多种多样的振荡方式，也就会产生多种多样的共振（只要外界有一小扰动）来破坏等离子体的聚集状态——这就是常说的不稳定性。时间越长，产生共振的可能性就越大，产生共振的方式也就越多，就像走钢丝杂技，站在钢丝上的时间越长，掉下来的可能性就越大，要维持等离子体越困难。

有没有另外的路子呢？人们想到，如果不能做到完全可控，能否做到局部可控呢？就是说，采用“氢弹”爆炸的方式但将“氢弹”做得尽可能小，用一连串的微型氢弹爆炸代替完全控制的连续的稳定“燃烧”。这就是当前研究得挺热门的“惯性压缩原理”。这个想法是这样：将氦氘混合物做成约为 0.1 毫米大小的小球，让它落入一个反应室，当它掉到适当位置时，几组相对方向的激光器同时开动。当激光照射到小球上的瞬间将小球加热到一亿度，由于表面层氦氘的急速蒸发，产生了一个向心的压力激波，如果加热时间限制在 1 个毫微秒内，而且激光功率足够大，据计算，氦氘小

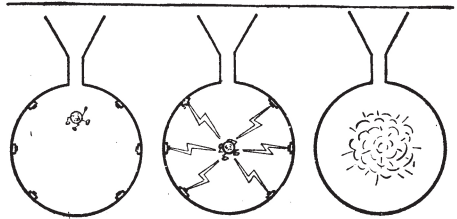


图 4

球内的密度可以再增加一万倍（如原来采用的是固化氦氘小球，密度为 $5 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$ ），这样即使加热后的小球只能存在一个毫微秒，也足可达到初步点火条件，即加热能量等于反应产生能量。理论上预言的情况是令人响往的，但目前为止，仅观察到几百倍的密度压缩，且从密度与持续时间的乘积（所谓 $n\tau$ 值）看，离点火条件还差二个数量级，即 $n\tau$ 值仍需提高 100 倍以上。

当然，可以不一定靠激光束来“点火”，也可用带电粒子束代替，有人说这可能更有希望达到点火条件。

总之，聚变反应作为能源优点很多，但困难亦不少，有待于今天的青年同志们努力！（完）

（插图 牛枢学）