

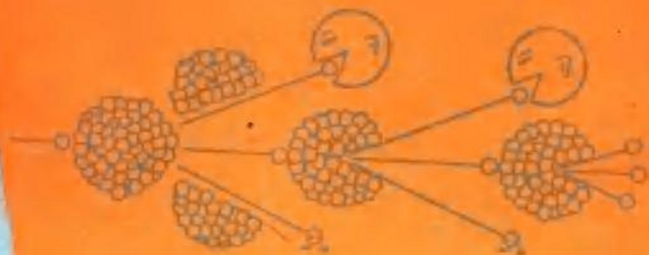
中学生课外读物



核能

它的原理 历史 现状和前景

郭星渠 著



3-49

人民教育出版社

核能的开发和利用是本世纪以来物理学发展的一个重大成果，也是新技术革命的重要内容之一。本书从18亿年前天然反应堆的有趣现象和第一座人工反应堆出发，介绍了人类认识核能的历史及有关核能的基本知识，比较具体地介绍了已经大量使用和正在发展的各种反应堆的基本结构和工作原理，并通过对各种能源的比较分析，说明核能将成为20世纪后世界的主要能源。

本书内容丰富，思路宽广，文字流畅，通俗易懂。可供对核能有兴趣的高中學生及其他具有中等文化程度的青年阅读，也可供中学教师 and 从事能源领域工作的工人、党政干部参考。

中学生课外读物
现代科学技术丛书

核 能

它的原理 历史 现状和前景

郭星渠 著

*

人民教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

人民教育出版社印刷厂印装

*

开本 787×1092 1/32 印张 3.75 字数 78,000

1986年5月第1版 1986年11月第1次印刷

印数 1—2,000

书号 7012·0945 定价 0.49 元

现代科学技术丛书

物理学科编委会

主编: 王殖东

编委: (按姓氏笔划为序)

王殖东 祁有龙 吕如榆 刘佑昌

张元仲 聂玉昕 唐孝威 郭奕玲

前 言

近两三百年来，物理学一直是近代科学技术发展的先导。本世纪以来，关于原子、原子核的研究和核能的开发，既是物理学的一个重大成果，也是新技术革命的重要内容之一。

核反应堆的诞生还只有四十多年，就已经取得了飞速的进展和广泛的运用。十多年前，核电成本已低于烧煤、油或天然气的火电站。由于核电站对放射性废物采取了严格的隔离和封闭措施，它的放射性污染比煤电站排出的天然放射性少。煤电站由于将大量的有害物质抛入空中，对人类健康的危害比核电站大几百倍。更主要的是，煤、石油、天然气的储量有限，它们都是不可再生的宝贵的化工原料，烧掉了十分可惜。现在人们已经感到石油资源不足，煤和天然气的资源到下世纪也会感到不足。随着煤、石油、天然气的日益枯竭和越来越多地转作化工原料，到下世纪，核能将逐渐成为世界能源的主要支柱。有的国家早在十多年前，就决定不再建火电站，只建核电站。核电的发展将越来越快。

今天的核电站，虽然已经是一种相当安全、清洁、经济的工业能源，但还只能利用铀资源中极少的一部分。随着可以经济开采的铀资源的日益减少，到下世纪初，能将铀资源的大部分加以利用的快中子反应堆，即快堆，将大量发展。经过半个多世纪的努力，聚变能源的开发已出现胜利的曙光。预计到下个世纪早期，通过聚变-裂变混合堆，将使聚变能源开始进

入实用阶段。人类将经过聚变-裂变混合堆,过渡到完全使用聚变能的时代。聚变能是一种比裂变能更安全、清洁,而且是无限丰富的能源,完全能够满足人类未来的需要。开发核能的广阔领域,正一代一代地吸引着无数勇于攀登的人们为之努力奋斗。

今天的青年,将成为核能的开发者和使用者。在本书里,主要介绍核能的原理,它的发展历史和现状,并通过对各种能源的比较分析,说明核能今后在我国及世界的发展前景。学过中学物理的人,都能读懂。对核能有兴趣的读者,特别是教师和从事这方面工作的同志,可以继续阅读作者写的《核能:20世纪后的主要能源》一书(原子能出版社,预定1986年出版)。在那本书里,作者对上述问题介绍得更深入。

本书的第一部分涉及的基本原理较多,初读时可能不易读懂。读者不妨继续阅读以下各部分,就可加深对基本原理的理解。

对于本书的缺点,希望各方面专家和广大读者多多批评指教。

郭星渠

1986年1月

目 录

前言

一、十八亿年前的天然反应堆.....	1
(一) 十八亿年前奇特的自然现象.....	1
(二) 铀 235 原子核怎么会分裂.....	4
(三) 为什么有核能放出来.....	8
(四) 为什么要让中子跑慢点.....	12
(五) 链式反应是怎么实现的.....	16
二、人工反应堆的诞生.....	21
(一) 第一座反应堆的建造.....	21
(二) 缓发中子使反应堆容易控制.....	26
(三) 用冷却剂将核能“运”出来.....	29
三、核电站已成为安全、清洁、经济的工业能源.....	32
(一) 军用生产堆是反应堆发展的先导.....	33
(二) 核潜艇揭开了动力堆发展的序幕.....	35
(三) 核电站比煤电站更安全、清洁、经济.....	38
(四) 当前轻水堆最多.....	45
(五) 重水堆节约核燃料.....	51
(六) 高温气冷堆吸引人们去探索.....	54
四、快堆将大量发展.....	60
(一) 为什么要发展快堆.....	60
(二) 快堆已日臻完善.....	67

五、聚变堆的研究将造福子孙万代.....	73
(一) 聚变能是无限丰富的优越能源.....	73
(二) 聚变的研究正取得迅速进展.....	78
(三) 混合堆是过渡的桥梁.....	86
六、未来的世界是使用核能的世界.....	90
(一) 一百年内外核能将成为世界的主要能源.....	90
(二) 核能的开发为人类展现出灿烂前程.....	99
(三) 我国也要大力开发核能.....	104

一、十八亿年前的天然反应堆

第一座人工反应堆，是1942年建成的。1972年人们发现，由于大自然的巧妙安排，远在人类诞生前约18亿年，在非洲加蓬共和国境内，曾出现过六座天然反应堆。今天世界各地建造的各种反应堆，所依据的原理与它们完全相同。因此，我们就从天然反应堆入手，来介绍反应堆的基本原理。

（一）十八亿年前奇特的自然现象 自然界里的物体，是由各种元素组成的。不同元素的原子不同。原子非常小。比如氢原子，要940万个排成一行，才有一毫米。原子是由原子核和电子组成的，电子绕着原子核运转。原子不但很小，而且里面十分空旷。如果我们将原子放大成直径上百米的球，原子核只是球中央的一颗小米。原子核的体积约占整个原子体积的几百万亿分之一，而它的质量却占整个原子质量的99.945%以上。

质量是物体惯性大小的量度。由于地球上同一地方，物体质量越大，它的重量也越大，所以人们在日常生活中常将质量与重量混为一谈。但这两个概念是不同的。质量是物体所含物质的量；重量是物体由于地球吸引而受到的力。在人造卫星上，物体处于失重状态，但质量并无变化。

单位体积的质量称为密度。原子核的密度比水的密度大一百多万亿倍。除最轻的原子核只有一个质子外，其余的原子核都是由质子和中子组成的。中子和质子统称核子。大约

六千万亿亿个中子有一克。质子比中子约轻 0.13%。绕原子核转的电子是分布在一定层次上的。最里面的第一层最多有 2 个电子,第二层可有 8 个。电子多时,还有第三层、第四层等。电子的质量大约是质子质量的 $1/1836$ 。质子带正电,电子带负电,中子不带电。电子的带电量与质子的带电量相等,只是符号相反。原子中的电子与质子数目相等,所以原子呈电中性。如果原子中的电子有一部分或全部脱离了原子,则原子变成带正电的离子。如果电子全部脱离了,这时的正离子就是裸露的原子核本身。得到了外来电子的原子是负离子。

只要原子核中的质子数目相同,组成的原子的化学性质就基本相同。这样一来,区别元素的唯一标志就是原子核中的质子数。元素周期表就是根据质子数给元素排队的。元素是质子数相同,因而化学性质基本相同的一类原子的总称。

但是质子数相同的原子核,如果中子数不同,因而核子总数不同时,它的核特性并不相同。于是又出现了核素这个专有名词。正如不同元素的化学性质完全不同一样,不同核素的核特性完全不同。质子数相同而中子数不同的核素,是同一种元素,在元素周期表中占据同一个位置,因而叫同位素。质子数不同的核素,在周期表中的位置不同,就不能叫同位素。不过在日常生活中,人们往往不注意核素和同位素这两个术语的上述差别,而用同位素这个术语代替核素。

核素或同位素是根据质子数和核子总数来区分的,它们有两种表示方法:一种是在元素符号的左上角标明核子总数,左下角标明质子数,如 ${}_{92}^{235}\text{U}$ 。有时将左下角的质子数省

略,因为写出了元素符号,对应的质子数就确定了;另一种是在元素名词后标明核子总数,如铀-235,也可以不加连字符,如铀 235。它们都指核子总数为 235 的铀的一种同位素。

有的同位素有放射性,称**放射性同位素**,它会自发地放射出 α 、 β 、 γ 等射线。 α 射线是有两个质子和两个中子的氦原子核,带正电; β 射线是电子,带负电; γ 射线是光子,不带电,没有静质量,它是一种波长很短的电磁波。每一种放射性同位素都按自己固定不变的速度衰变为别的核素,这个速度用**半衰期**表示,它不受化学变化和通常的温度、压力等因素影响。半衰期是放射性同位素的原子核衰变一半所需的时间。没有放射性的同位素不会自发衰变,称为**稳定同位素**。现在已经发现 109 种元素,其中第 43 号锝、61 号钷、93 号镎以及 95—109 号元素是人工制造的,其余是自然界存在的。这些元素,一共有 2500 多种同位素,其中约 260 种是稳定同位素,2300 多种是放射性同位素。

铀是目前最重要的核资源。自然界中的铀称为**天然铀**,有三种同位素:铀 238,占 99.27%;铀 235,占 0.724%;铀 234,占 0.06%。这三种同位素的核特性相差很大,只有铀 235 原子核才容易裂变。

七十年代初以前,人们在地球上各处找到的天然铀,其中铀 235 的含量都在 0.724% 左右。1969 年 7 月美国阿波罗 11 号飞船从月球取回的岩样,其中铀 235 在铀元素中的比例,也差不多是上面的数值。我们称 0.724% 为铀 235 的**天然丰度**。也就是说,自然界里的铀,不管它是单独存在的,还是以极低的含量存在于矿石或海水中的,任意找出十万个铀原子,其中

铀 235 原子大约是 733 个。之所以不是 724 个,是因为铀 235 原子比铀 238 原子轻。

可是 1972 年 5 月,法国科学家发现,从加蓬共和国奥克洛矿区来的矿石,铀 235 的含量普遍偏低,有的竟不到 0.29%。这一惊奇的发现,引起了各国科学家的注意。现场勘测资料表明,远在人类诞生前,距今约 18 亿年时,由于大自然的巧妙安排,在奥克洛矿区,至少有六座天然反应堆,断断续续地运行了几十万年,释放出相当于两千多万吨煤燃烧放出的热量。

那么,大自然是怎样创造出这一奇迹的呢?为什么铀 235 原子核容易裂变,别的不容易裂变?为什么别的地方的铀矿不容易形成天然反应堆,奥克洛矿区却容易形成,并在 18 亿年前出现呢?为了说明这些问题,我们先来看看铀 235 原子核为什么容易裂变?

(二) 铀 235 原子核怎么会分裂 现代科学证实,原子核的密度是每立方厘米一亿多吨。原子核之所以能如此紧密地结合在一起,是由于各个核子之间有强大的核力,互相吸引。核力是一种在万亿分之几毫米的极短距离内起作用的力。中子和中子,中子和质子,质子和质子之间的核力基本相同,与质子带的电荷关系不大。当核子间的距离进一步减小时,核力就变成排斥力。由于核子之间相互作用的核力很强,所以称核力为强相互作用。

由于核力的上述性质,原子核内部各处的密度近似相等,只是在原子核表面,密度有所降低。根据这一特点,三十年代丹麦物理学家尼·玻尔(N·Bohr, 1885—1962)提出了液滴模型,认为原子核就象一滴密度均匀的球形液滴一样。近年深

• 4 •

人的研究表明，不同原子核的形状有差别，它们并不完全象球。因而科学家们还提出一系列其他模型，来解释原子核里的各种现象。但在解释原子核的集体行为如裂变时，由液滴模型所作的计算与实验基本符合。

中子由于不带电，所以与带正电的原子核之间没有静电斥力，最容易从外边穿过原子核外的电子层，射进原子核。当中子进入原子核时，原子核就增加了由这个中子带来的多余的结合能^①。

中子与靶原子核结合时带来的多余的结合能越大，原子核受到的激发就越大，因而越不稳定。这个受激发的原子核就象受力的液滴一样，处于不稳定状态，发生振荡。于是就出现两种情况：如果中子带来的多余的结合能不够大，或者中子带来的多余的结合能很快以 α 、 β 、 γ 等射线的形式放出来，则原子核的振荡很快稳定下来，不会分裂；如果中子带来的能量足够大，而且吸收中子后组成的复合核来不及将获得的结合能释放的话，原子核就由球体变成椭球，由椭球变成哑铃状，如图 1-1 所示。由于距离的加长，两半哑铃之间的吸引

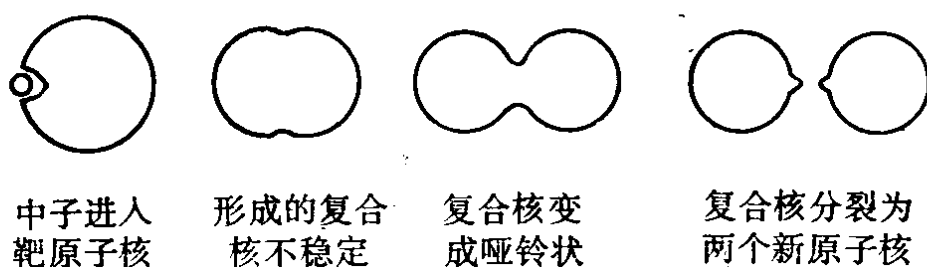


图 1-1 原子核的分裂过程

① 原来互相独立的粒子或粒子团(原子核、原子、分子)结合在一起时所放出的能量称为结合能。后面将看到，这是由于互相独立的粒子或粒子团，结合在一起时静质量发生亏损造成的。

力已相当微弱，复合核就进一步分裂成两个各自独立的新球体。这种新球体是原来的原子核的裂变产物，又称裂变碎片。裂变产生的这两个新原子核也不稳定，还会进一步衰变，释放出多余的粒子和能量后才成为稳定的原子核。

不同的原子核俘获中子后得到的结合能不同。铀 235 原子核有 92 个质子和 143 个中子。俘获中子后，中子将和质子一样是成双配对的。实验表明，在这种情况下，靶原子核所得到的中子结合能大，这是铀 235 容易裂变的第一个原因。

一种原子核是否容易裂变，既与外来中子的激发有关，又与它本身的状况有关。外因是变化的条件，内因是变化的依据，外因要通过内因起作用。原子核是一个吸引与排斥的对立的矛盾统一体。带正电的质子间有静电斥力；核子间又由于核力互相吸引。由于核子间的引力与质子间的斥力平衡，所以原子核内的核子能够团结成一个整体。这种团结是相对的。当外来的中子挤进原子核后，原子核内部吸引与排斥的平衡，就有可能在新组成的复合核中遭到破坏。

质子之间的排斥力，与质子数 Z 的平方成正比；而核子间的引力，却正比于核子总数 A 。因而排斥和吸引，是按不同的规律分别与质子数和核子总数联系在一起的。所以，不同的原子核，不但俘获中子后由于中子结合能不一样而受到的激发程度不同，而且俘获中子后形成的复合核的稳定程度也不同，因而为使原子核分裂所需加入的能量是不同的。会引起原子核分裂的最低能量，称为**临界裂变能**，可以根据液滴模型算出。

不同原子核裂变所需的临界裂变能，随 Z^2/A 的增加而

减少。表 1-1 是不同的原子核俘获中子后组成的复合核所得到的中子结合能，以及为使它裂变所需的临界裂变能。表中 eV 和 MeV 分别是电子伏特和百万电子伏特，是核科学中常用的能量单位。2614 亿亿 eV 或 26.14 万亿 MeV 的能量，可使一克水升高 1°C。

表 1-1. 几种核素的临界裂变能和俘获中子后得到的中子结合能

靶原子核	俘获中子后生成的复合核	复合核的 $\frac{Z^2}{A}$	复合核的临界裂变能 MeV	复合核得到的中子结合能 MeV
钍 232	钍 233	34.76	6.5	5.1
铀 238	铀 239	35.40	5.5	4.9
铀 235	铀 236	35.86	5.3	6.4
铀 233	铀 234	36.17	4.6	6.6
钚 239	钚 240	36.81	4.0	6.4

从表 1-1 可以看出，铀 235、铀 233、钚 239 的质子数都是偶数，中子数都是奇数， Z^2/A 大。所以它们俘获中子后组成的复合核的临界裂变能都小，而且均小于中子结合能，这是它们容易裂变的第二个原因。因此，铀 235 等原子核俘获任何中子，不管这个中子有无动能，所组成的复合核，只有少部分通过释放多余的能量而稳定下来，大部分则很快裂变。这三种核素，我们称为释放裂变能的核燃料。其中只有铀 235 是天然的。铀 233、钚 239 分别是钍 232、铀 238 吸收中子形成的复合核钍 233、铀 239，经过两次 β 衰变生成的。由于钍 232、铀 238 能变成核燃料，所以它们又叫可再生材料。

在弄清了铀235等俘获中子后容易分裂的道理后,就可以进一步来了解铀 235 裂变后的现象。

(三) 为什么有核能放出来 铀 235 俘获一个中子后,除了少数变成铀 236, 放出 γ 等射线外, 大多数分裂成两个中等质量的原子核。由于铀等重原子核内的中子数差不多是质子数的 1.6 倍, 而中等质量的原子核, 中子数只有质子数的 1.3 倍左右, 所以铀裂变后的一个重要现象是, 有多余的中子在裂变中释放出来。铀 235 除了分裂成两个原子核外, 在极个别的情况下, 正如我国物理学家钱三强(1913—)、何泽慧(1914—)夫妇 1947 年所发现的那样, 也会分裂成三个或三个以上的原子核。由于每次裂变所产生的中等质量的原子核不尽相同, 所以总共约产生 80 种核素。这些核素大都不稳定, 除放出中子外, 还会放出 β 、 γ 等射线, 经过两、三次衰变后, 才逐渐变成稳定的原子核。这是裂变反应堆产生强放射性的原因。所以一群铀 235 原子核裂变, 大约可以产生两百多种核素, 它们称为铀 235 的裂变产物。

1000 个铀 235 原子核裂变, 约放出 2430 个中子。这些中子, 有 99.3% 以上, 即大约 2414 个, 是在裂变后 10^{-14} 秒左右放出的, 称为瞬发中子, 能量大多在 1—2MeV 范围内。另有约 0.645%, 即大约 16 个中子, 是裂变产物在衰变时逐渐放出的, 平均能量约 0.5MeV, 称缓发中子。

铀 235 裂变后, 除产生很强的放射性, 释放出大量中子外, 还要释放出大量能量。这是由于不同的原子核, 每个核子所具有的平均结合能不同而产生的。平均结合能又称比结合能, 它是分散的单个核子结合成原子核时, 平均每个核子放出

的能量。

图 1-2 是不同核素的平均结合能。横坐标是核子数 A ，它代表不同的核素；纵坐标是每个核子的平均结合能。在核子数 50 以内，平均结合能随核子数的增加而增加，但在 ${}^4_2\text{He}$ 、 ${}^8_4\text{Be}$ 、 ${}^{12}_6\text{C}$ 等处分别有突起的高峰。在核子数 50 左右即铁的附近，平均结合能达到最大值，随后缓慢下降，到铀 238 附近降为 7.6 MeV。

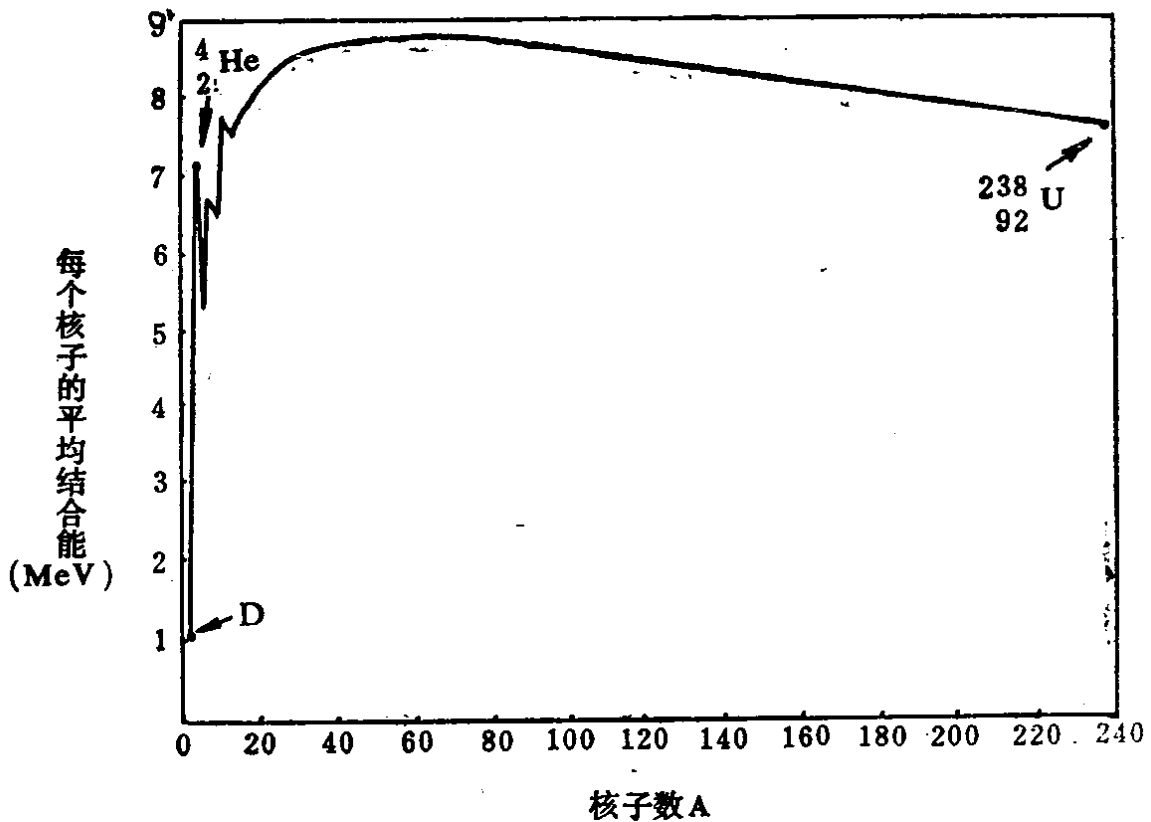


图 1-2 不同核素每个核子的平均结合能

平均结合能越大的原子核，核子结合得越紧密。由于铀 238 等重原子核每个核子的平均结合能小于中等质量的原子核，所以当铀等重原子核分裂成中等质量的原子核时，就有额外的结合能进一步释放出来。由裂变而释放的这种能量称裂变能。当更轻的原子核结合成氦、铍、碳等稍重的原子核时，

也就是聚变时,也会放出额外的结合能,这种能量称**聚变能**。裂变能和聚变能都是**核能**。总而言之,平均结合能较小的原子核变成平均结合能较大的原子核时,不管是通过聚变还是裂变,都会释放能量。核子数 50 左右的铁等元素,由于平均结合能最大,无论裂变或聚变,都不放出能量,还需要从外界获得能量。

质量和能量有一定联系。爱因斯坦(A. Einstein, 1879—1955)于 1905 年提出狭义相对论,推导出著名的**质能联系方程** $E=mc^2$,这个方程为说明上述现象和计算核能的释放提供了依据。

已经证实,分离的核子组成原子核时,原子核的质量比构成它的砖头——中子和质子的质量总和要小。这部分亏损的质量以结合能的形式释放出来。重元素裂变或轻元素聚变时,也发生质量亏损,导致裂变能或聚变能的释放。

铀 235 裂变时可以产生这样或那样的裂变产物。现以裂变成钡和氪为例,来分析其能量的释放:



上述方程是核反应方程式。U、n、Ba、Kr 分别代表铀核、中子、钡核、氪核。由于左下角是质子数,左上角是核子总数,所以中子写成 ${}_0^1\text{n}$ 。核反应前后的质子、中子数不变,所以方程两边左上角数字之和以及左下角数字之和,分别相等。

上述核反应前后发生了质量亏损,亏损的数值 Δm 可由左边总质量减右边总质量算出:

$$\begin{aligned} \Delta m = & (235.0439 + 1.00867)\text{u} - (136.9061 + 96.9212 + \\ & + 1.00867 \times 2)\text{u} = 0.2080\text{u}. \end{aligned}$$