

# 原子核从何而来

靳根明

(中国科学院近代物理研究所 730000)

原子核是由质子和中子组成的。由确定的中子数和质子数构成的原子核被称为核素。目前实验上发现了3450多种不同的核素。每种核素都有自己的寿命。这些核素中,稳定的和至今没有观察到衰变的核素只有254种,另外有34种核素,其寿命比地球的年龄还长。它们在核素图上的位置——即 $\beta$ 稳定线,位于狭长区域的中央。除这些核素外,其他核素寿命都比较短,统称放射性核素,位于 $\beta$ 稳定线的两侧。离稳定线越远,核素的寿命越短,甚至即生即死。人们不禁要问,这3450多种核素是从何而来?这是一个较为复杂的问题,简单来说,核素有两种来源,即在宇宙演化中产生和实验室中人工合成。

## 一、宇宙演化合成的核素

### 1. 原初核合成——宇宙大爆炸后的核合成

要回答这个问题,首先看看宇宙是从何而来的。

依据大爆炸理论,宇宙始于大约133~139亿年前的一次大爆炸,并从此开始了宇宙的膨胀与演化(如图1所示)。直到今天宇宙的演化仍在进行。大爆炸后约1微秒,质子(p)和中子(n)及其反粒子就开始出现。随着宇宙的膨胀,它的温度也不断下降,质子和中子积累得越来越多。在温度降低到0.7 MeV以下时,质子和中子的相互碰撞便有机会结合形成氘核(D),并将多余的能量以 $\gamma$ 射线的形式放

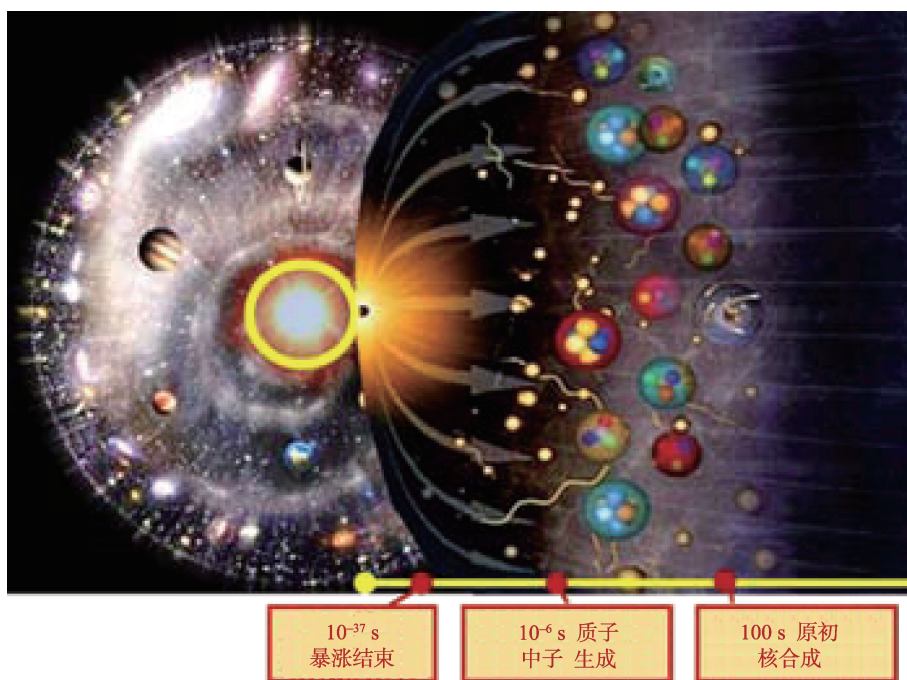


图1 宇宙之初

出,核反应表示式为:  $n+p \rightarrow D + \gamma$  或者  $p(n, \gamma)D$ 。氘核与质子碰到一起,就可能生成氦原子核,即  $D(p, \gamma)^3\text{He}$ , 氘核与氘核相碰也生成  $^3\text{He}$  并放出一个中子,即  $D(d, n)^3\text{He}$  (d表示炮弹核D的符号用小写字母)。氘核与中子相碰可能会生成有两个中子的氢同位素——氚( $^3\text{H}$ ), 也写作T。有了  $^3\text{He}$ 、T, 就有更多的机会生成更多种类的核素, 如  $^3\text{He}(n, p)T$ ,  $T(d, n)^4\text{He}$ ,  $^3\text{He}(d, p)^4\text{He}$ 。 $^4\text{He}$  的生成为进一步合成含有更多质子的原子核提供了机会, 如图2所示。不过, 随着宇宙的不断膨胀, 温度也在迅速地下降, 再加上核合成的路径上缺少质量数为5和8的稳定核素, 十几分钟后, 大爆炸核合成便终止了。在这短短的十几分钟内, 主要合成了D、T、 $^3\text{He}$ 、 $^4\text{He}$ 、 $^7\text{Li}$ 、 $^7\text{Be}$ 几个核素。那些比较重的核素生成量极少, 可以忽略。

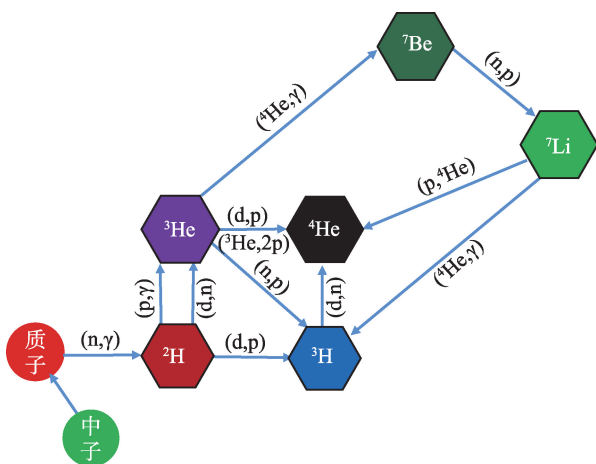


图2 原初核合成网络

大爆炸后38万年左右, 电子与原子核形成氢原子和氦原子。这些稳定的气体原子在温度进一步降低时会聚集成大小不等的气体星云。这些星云在重力的作用下不断地收缩聚集, 形成恒星。不过这是在大爆炸后几亿年的事情了。

## 2. 恒星演化过程中的核素合成

宇宙中恒星的质量大小不一, 小的只有太阳的千分之一, 大的是太阳的上万倍, 甚至更大。由于恒星质量的不同, 其归宿也有差别(见图3)。

恒星演化过程中为什么会发生核反应呢? 这是因为在重力作用下, 恒星体积收缩, 引力势能转

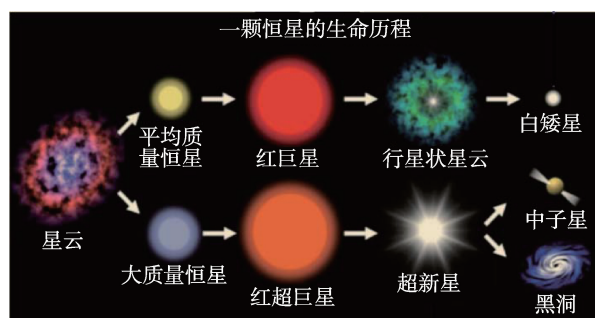


图3 恒星演化示意图

化成内能使其内部温度升高。在达到核物质的点火温度时, 就会产生核反应。核反应产生的热反过来抵抗重力导致的收缩。在核燃料消耗殆尽时, 重力将再一次战胜核反应产生的膨胀力, 导致恒星的下一次坍缩, 并进一步提升恒星的核心温度。在一个恒星的演化过程中, 由于内部温度的不同, 可以发生不同的核反应, 见表1。

表1 恒星演化中的核反应过程

核反应过程	所用燃料	核反应的产物	反应时的温度	历经的时间
氢燃烧	H	He	1~3千万度	$10^{10}$ s
氦燃烧	He	C	2亿度	$10^3$ s
碳燃烧	C	O, Ne, Na, Mg	8亿度	$10^2$ s
氧燃烧	Ne	O, Mg	15亿度	$10^1$ s
硅燃烧	O	Mg到S	20亿度	$10^1$ s
硅燃烧	Si	Fe, Ni	30亿度	$10^1$ s
坍缩		直到Th	>30亿度	0.3s

核燃烧过程其实就是以一种原子核为基本燃料的核反应过程。下面就每一种燃烧过程发生的背景作一些详细介绍。

### 氢燃烧

恒星形成之前, 其原始星云的体积就会不断地缩小, 核心温度不断地上升。当核心的温度达到约1千万度, 密度也达到每立方厘米上百克时, H核之间就会发生核反应, 并形成恒星。恒星的核心温度通常都高于星体中核燃料的点火温度。例如太阳, 在中心0.25太阳半径的区域内, 温度高达1500万度, 密度最高达  $160 \text{ g/cm}^3$ 。这里就发生着氢燃烧并放出巨大的核能, 核反应是太阳能量的真正源头。

在氢燃烧的过程中, 首先是  $p+p \rightarrow D + e^+ + \nu$ , 进而

有  $p+D \rightarrow {}^3\text{He}+\gamma$  和  ${}^3\text{He}+{}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He}+2p$  连个核反应过程。这一燃烧过程的总体效果是4个氢原子核聚合成一个 ${}^4\text{He}$ 原子核,放出了两个正电子、两个中微子和两条 $\gamma$ -射线(见图4),和大约27 MeV的能量。由于恒星内部的负反馈作用,产生能量的速率很稳定,因而能维持恒星的辐射长期恒定。在恒星内部的高密度和高温度的环境中, ${}^3\text{He}$ 和 ${}^4\text{He}$ 也有可能发生 ${}^3\text{He}({}^4\text{He},g){}^7\text{Be}$ 反应。 ${}^7\text{Be}$ 的半衰期 $T_{1/2}$ 为53.29天,会衰变为 ${}^7\text{Li}$ ,同时发射一个电子和中微子。 ${}^7\text{Li}$ 会发生 ${}^7\text{Li}(p,\gamma){}^8\text{Be}$ , ${}^8\text{Be} \rightarrow 2{}^4\text{He}$ 反应,又回到了氦。这也是为什么在恒星的氢燃烧过程中能够产生 ${}^7\text{Li}$ 的原因。

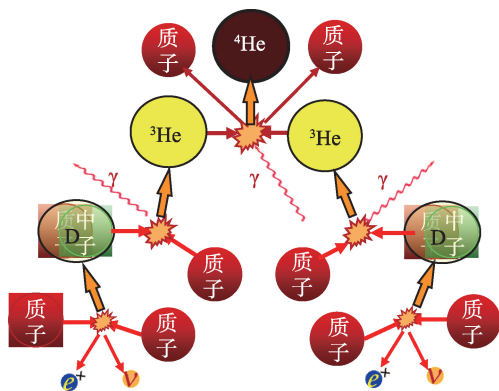
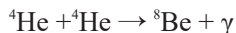


图4 氢燃烧过程中的核反应

### 氦燃烧过程

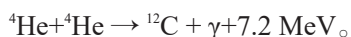
当一个恒星完成氢燃烧过程后,其核心便聚集了丰富的氦。氢燃烧的结束导致引力再次占据主导地位,恒星核心将进一步收缩,温度也会进一步升高。当温度达到氦核的点火温度时,恒星内部的氦原子核就会被燃烧,使恒星进入所谓的氦燃烧过程。

氦燃烧首先是3个氦原子核聚合成一个 ${}^{12}\text{C}$ 。这个反应分为两步走,第一步是两个氦原子核聚合在一起,形成一个 ${}^8\text{Be}$ (铍-8,铍元素的一个短寿命同位素):



虽然 ${}^8\text{Be}$ 的半衰期只有约 $10^{-16}$  s,但在一个氦原子核密度非常高的环境中, ${}^8\text{Be}$ 原子核在衰变前就可能与另外一个氦原子核相撞,从而发生核反应:  
 ${}^8\text{Be} + {}^4\text{He} \rightarrow {}^{12}\text{C} + \gamma$ 。

上面两个核反应过程合在一起,就成了 ${}^4\text{He} +$



随着 ${}^{12}\text{C}$ 原子核的产生,下面的核反应就有机会发生: ${}^4\text{He} + {}^{12}\text{C} \rightarrow {}^{16}\text{O} + \gamma + 7.16 \text{ MeV}$ 。当温度足够高时,还会发生 ${}^4\text{He} + {}^{16}\text{O} \rightarrow {}^{20}\text{Ne} + \gamma + 4.74 \text{ MeV}$ 和 ${}^4\text{He} + {}^{20}\text{Ne} \rightarrow {}^{24}\text{Mg} + \gamma + 9.31 \text{ MeV}$ 等核反应。

这一连串核反应的最终结果是使恒星中产生了碳、氧、氖、镁等一系列原子量为4的倍数的核素。

### 大质量恒星中的核燃烧过程

#### 碳燃烧

在大质量恒星中,氦燃烧生成的碳、氧元素,为恒星的进一步提供了燃料。氦燃烧完成后,恒星核心的压力和温度会进一步升高,当温度达到大约20亿度,密度达到大约每立方厘米100千克时,碳与碳相撞时可以融合成质量更重的原子核:氧、氖、钠、镁等元素的不同同位素,如图6所示,这就是所谓的碳燃烧过程。从图中还看到碳燃烧有一条路径可以生成中子,也就是说碳燃烧也是一种中子源,它会为生成更重的原子核提供炮弹(中子)。

#### 氦燃烧

碳燃烧过程会将大质量恒星核心所有的碳几乎消耗殆尽,产生氧/氖/镁的核心。由于重力的作用,使密度增加和温度上升达到氦燃烧的燃点,即氦吸收高能 $\gamma$ 射线,放出 $\alpha$ 粒子和氧。由于 $\alpha$ 粒子的存在,就会与周围的氦原子核发生反应,如 ${}^{20}\text{Ne} + {}^4\text{He} \rightarrow {}^{24}\text{Mg} + \gamma$ 。或者如果有 ${}^{21}\text{Ne}$ ,则可能会发生 ${}^{21}\text{Ne} + {}^4\text{He} \rightarrow {}^{24}\text{Mg} + n$ 反应。也会有 ${}^{23}\text{Na} + {}^4\text{He} \rightarrow {}^{26}\text{Mg} + p$ 反应发生。

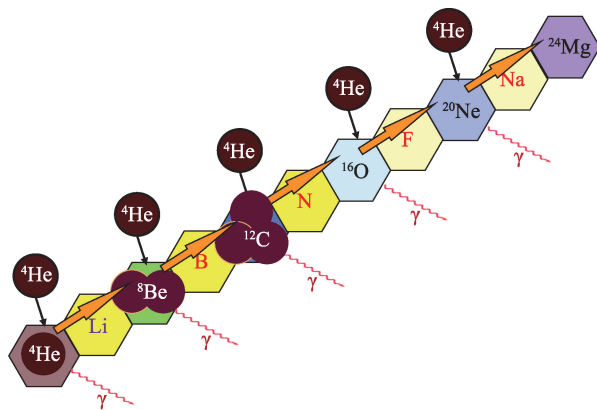


图5 氦燃烧链示意图

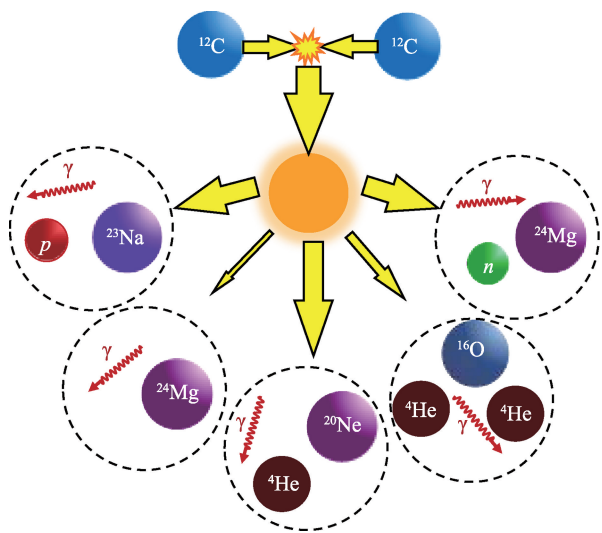


图6 大质量恒星中碳燃烧示意图

当氦燃烧时,氦会被耗尽使核心只有氧和镁堆积。

#### 氧燃烧

氦燃烧过后,恒星核心的温度进一步上升到约26亿度,密度增加到每立方厘米约200千克时,在氧元素丰富的壳层就会发生氧燃烧过程,其结果主要生成磷-31加质子和 $^{28}\text{Si}$ 加 $^4\text{He}$ 。也就是说,氧燃烧可以生成大量 $^{28}\text{Si}$ (34%),这就给进一步的较重核的合成提供了可能。

#### Si燃烧

当恒星核心部位的温度达到大约30亿度,密度达到大约每立方厘米10吨时,在Si非常丰富的壳层中就会发生硅燃烧。硅燃烧非常特殊,实际上是硅在很短的时间内连续地吸收 $^4\text{He}$ ,放出热量,生成不同元素的同位素,最终可以形生成Fe或Ni的同位素。在这个过程中,一系列新生的原子核也会吸收 $\gamma$ 射线,并放出 $^4\text{He}$ (见图7)。

硅燃烧阶段恒星核心的温度很高,原子核处于统计平衡状态,最终形成以比结合能最大的铁、镍同位素。此后恒星中的核燃烧就停止了。为什么不会生成更重的原子核呢?从原子核的结合能随质量数的变化图(图8)可以看出,合成比铁(镍)更重的原子核时就要吸收能量,使恒星核心的温度降低,从而失去核反应的条件。因为要生成更重的原子核,就需要有更高的环境温度。另外,由于硅燃烧

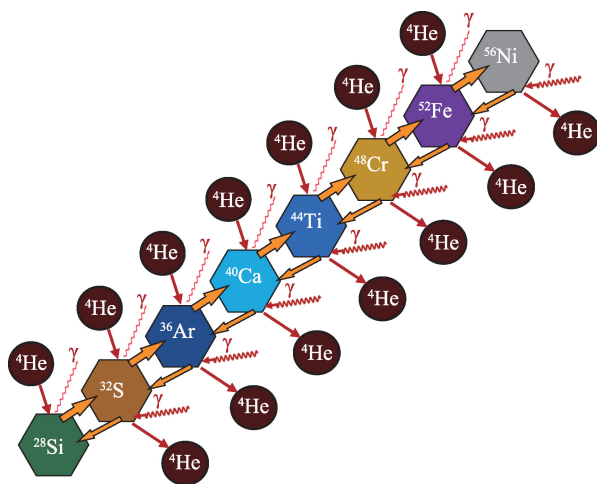


图7 硅燃烧中的核反应

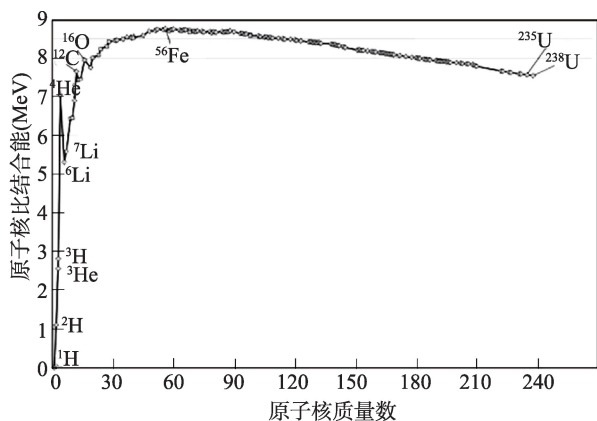


图8 原子核的比结合能的变化趋势

过程中能生成的重原子核只能是比较缺中子的,它们的寿命必定较短,与其他原子核融合的机会就很小。这两个原因导致硅燃烧截至在铁原子核附近。

#### 比铁重的原子核是如何形成的?

自然界存在着很多比铁重的原子核,如银,金,铅,铀等元素,它们又是如何形成的呢?直到现在,它还是一个没有完全弄清楚问题。科学家们推测,快速中子俘获过程(r—过程),慢速中子俘获过程(s—过程)应该是其来源的可能路线。

在某些天体过程,如在超新星暴发过程中,会形成中子密度极高的环境。这时,一个原子核同时会吸收许多个中子,形成一个中子数极多的原子核。由于中子数过多,它很快就连续发生 $\beta^-$ 衰变,最后成为一个新的稳定或长寿命的原子核。这一过程称为r—过程。通过这一过程可以合成到铅-208、

铀-235, 铀-238 这些非常重, 且中子丰度比较大的稳定原子核。这一过程中涉及一系列极端丰中子的原子核, 绝大部分核的性质都还不清楚。当前, 核物理学家正在努力探索合成这些核素, 并研究它们的性质。

s—过程发生于低中子丰度环境, 例如在红巨星阶段, 会通过  $^{12}\text{C} + \text{p} \rightarrow ^{13}\text{N} + \text{n} + \gamma$ ,  $^{13}\text{C} + ^4\text{He} \rightarrow ^{16}\text{O} + \text{n} + \gamma$  反应提供中子, 并引发重元素的中子俘获反应。上述环境中的这些核反应提供的中子数目有限, 可能在每立方厘米一亿个以下。从铁元素附近的原子

核开始, 通过连续吸收中子和  $\beta^-$  衰变过程, 即  $(Z, A) + \text{n} \rightarrow (Z+1, A+1) + \beta^- + \nu_e$  (电中微子), 慢慢地合成到很重的 82 号元素  $^{208}\text{Pb}$  和 83 号元素  $^{209}\text{Bi}$  原子核。

r—过程和 s—过程的都能生成丰中子核素, 那么, 缺中子核素在恒星的演化中又是如何合成的呢? 快质子吸收过程(rp—过程)

在这一过程中, 由于有丰富的质子存在, 环境温度又非常之高, 例如在 10 亿度左右, 种子核就可以快速地吸收质子, 然后放出正电子, 即  $\beta^+$  衰变, 退回到比较稳定, 即寿命比较长的核素(图 10)。用核反应式表示就是:  $X(\text{p}, \gamma)Y$ ,  $Y \rightarrow Z + \beta^+ + \nu_e$ ,  $Z(\text{p}, \gamma)R$ ,  $R \rightarrow T + \beta^+ + \nu_e, \dots$ 。这个核合成过程中生成的核素都是一些缺中子核素。这种过程一直持续合成到碲(Te)-105 为止。Te-105 包含 52 个质子和 53 个中子, 是一个寿命很短且发生  $\alpha$  衰变的原子核。在 Te-105 附近还有许多具有  $\alpha$  衰变的核素, 它们组成了一堵厚厚的墙, 阻止 rp—过程继续前进。

恒星演化的过程是漫长的, 是几十亿年到上百亿年的事情, 而一个原子核反应却是瞬间完成的(大约在亿亿分之一秒之内)。在漫长的过程中随时随地都可能发生核反应, 并把产生的核素积累下

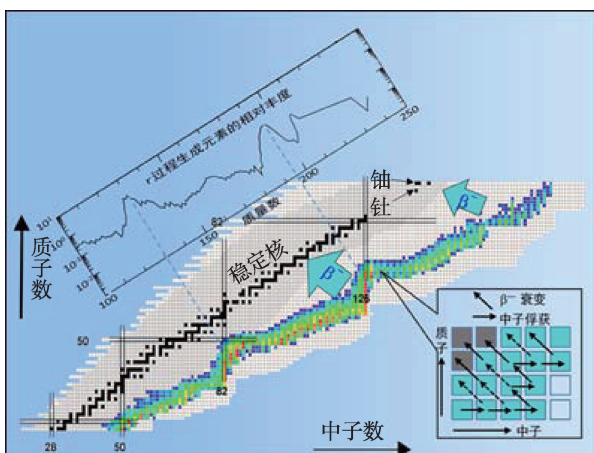


图9 r过程

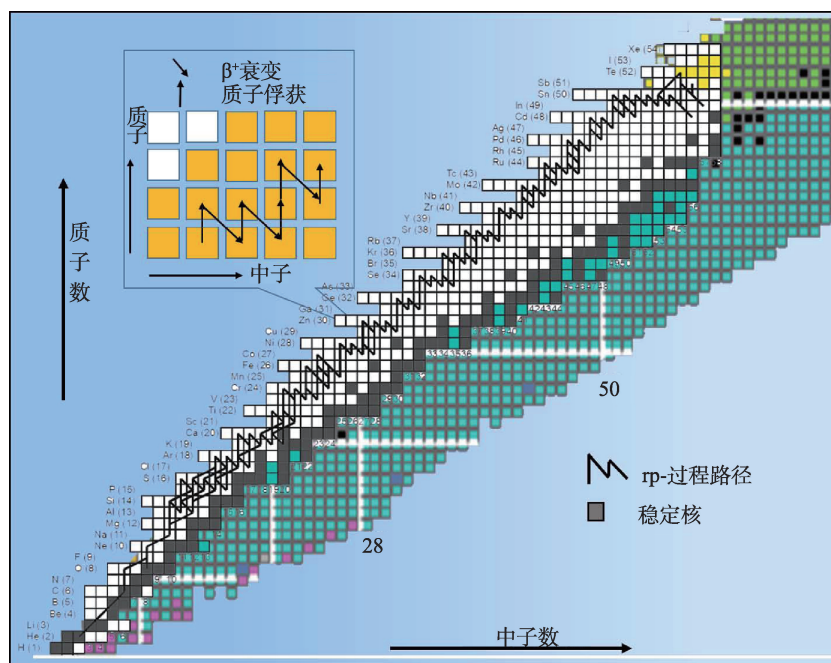


图10 快质子吸收核合成过程的路径

来,形成了现在的宇宙。根据对地球物质或古老陨石的测定得知了太阳系中的元素丰度分布,也称为宇宙元素丰度分布(图11)。可以看出,氢和氦的丰度最高,锂、铍和硼的丰度显著降低,而后,从碳元素开始,就从另一个高位逐渐降低。还可以看到铁元素附近的元素丰度也很突出。这都是元素的稳定原子核,或者是具有特长寿命的原子核的丰度分布。

无论如何,宇宙演化过程留下的原子核都是稳定的或是有非常长寿命的原子核,而且数目非常有限,这对研究原子核的性质变化规律远远不够。为此,科学家就在实验室开展了原子核的合成和研究。

## 二、实验室中原子核的诞生

国际上第一位对原子核进行嬗变的人是卢瑟福,他虽然没有合成新的核素,但是他通过核反应将一种核素变成了另一种核素。1919年,卢瑟福利用来源于镭原子核衰变放射出的 $\alpha$ 粒子轰击纯的氮气,不仅发现了质子,还产生了氧,核反应式是 $^{14}\text{N} + \alpha \rightarrow ^{17}\text{O} + \text{p}$ 。当然, $^{17}\text{O}$ 的鉴别还是布兰克特在1925年完成的。1932年,查德威克利用 $^9\text{Be}(\alpha, \text{n})^{12}\text{C}$ 反应发现了中子。1934年,意大利物理学家费米就

开始利用中子轰击从氢到铀的一系列靶原子核,发现了许多新的核素(同位素)。同时,也发现中子在物质中穿行时会被慢化,慢化后的中子更容易在U原子核上引起反应。在利用中子轰击92号元素U时,他认为得到了元素序号为93的新元素。基于上述成果,他于1938年11月10日获得了诺贝尔奖。几乎同时,德国物理学家哈恩等用实验证实,费米认为的93元素,其实是U吸收中子发生裂变所生成的53号元素钡的一个同位素,并于同年11月22日将文章投到《自然》杂志,次年1月发表。费米听到消息后,很快重复实验,证实了哈恩的结果。随后,费米坦率地检讨了自己的错误判断。并在裂变的基础上,很快提出一种假说:当铀核吸收中子发生裂变时,会放射出中子,这些中子又会击中其他铀核,使其发生裂变,这样的反应过程一直继续下去,直到全部原子被分裂。这就是著名的链式反应理论,为原子核裂变能的利用奠定了坚实基础。

近百年来,在实验室中合成和研究的新核素已接近3200种。

### 1. 合成新核素应具备的条件

天然存在的287个核素,远远不能满足人类探

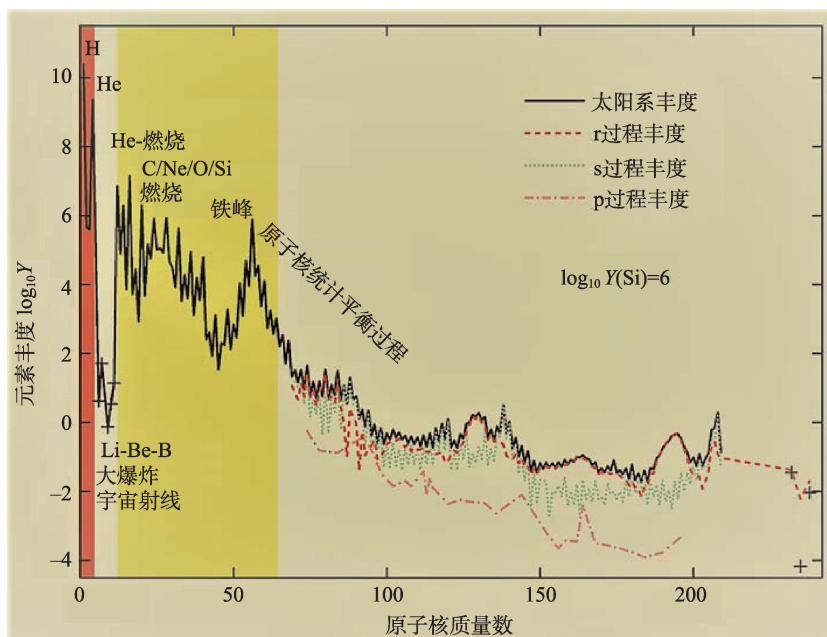


图11 太阳系中元素丰度分布

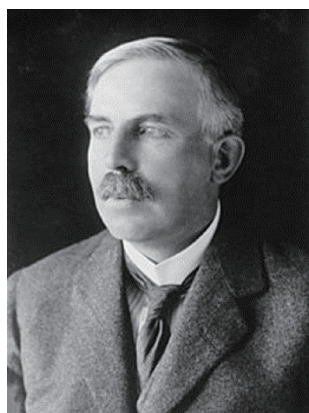


图12 E. 卢瑟福(1871-1937)

索原子核世界的需求。为了探知到底能有多少种核素,它们的性质如何,核物理学家千方百计地在实验室合成和研究新的原子核。到目前为止,总共合成和研究了3200多个核素。

如何按照人们的意愿在实验室里造出一个新的原子核呢?唯一的办法就是利用高速的粒子(离子)轰击已有的原子核,使其发生核反应,从而产生新原子核。为此就需要三种工具:粒子(离子)束,靶原子核和原子核鉴别设备。目前,国际上一些主要的核物理实验室都有比较先进的核反应设备。

## 2. 合成新核素的几种途径

原则上各类核反应都可以用来生成新核素。不过,为了以最低成本尽快地获得所要的目标核,就要选择一种最好的途径。

合成新核素,首先需要选准目标。在不同的时代,有不同的研究对象,但都是从简到难,从离稳定线最近的核素开始,或者是从已有的核素开始,一步一步地向外扩展。

下面介绍几种典型的生成新核素的方法,包括中子俘获反应,复合核过程,重原子核裂变和炮弹核的碎裂。

俘获中子合成新核素(同位素)

在1932年,卡德威克发现中子后仅仅一年,美国芝加哥大学的几位学者就利用这种新的粒子——中子轰击氟( $^{19}\text{F}(\text{n}, \alpha)^{16}\text{N}$ ),并用一种称作威尔逊云室的探测器(图13)观测到了 $^{16}\text{N}$ 的飞行径迹。尽

管还不能确定 $^{16}\text{N}$ 是不是稳定的,但这是第一例利用中子俘获制造新原子核的实验。随后,意大利物理学家费米利用中子轰击从氢到铀的一系列靶原子核,得到了许多新的原子核。

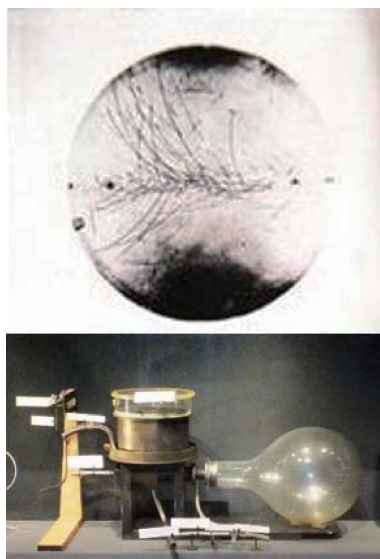


图13 查尔斯·威尔逊发明的云室(下)及云室中的粒子径迹(上)

随着中子源的发展,通过中子俘获反应生成的新原子核快速增加,例如,从1935年到1945年的10年间,利用加速器中子源就产生了80多个新核素。

核反应堆是一个很好的中子源,它可以提供非常高的中子流强度(通量),能够用来通过中子俘获反应合成丰中子的新原子核。用来合成118号元素的靶原子核 $^{249}\text{Cf}$ (98号元素的一个同位素)就是在核反应堆中经过不断吸收中子获得的。从1945年到1966年之间,在反应堆内通过中子吸收反应发现了大约30个超铀新核素,其中大部分新核素都是在化学分离后利用质量谱仪鉴别出来的。在二战期间,美国为了制造原子弹的另一种高效炸药—— $^{239}\text{Pu}$ 期间,建造了反应堆,在反应堆上首先发现了超铀新核素 $^{242}\text{Am}$ 。在20世纪80年代,美国科学家在利弗莫尔的池型反应堆中,通过中子的照射发现了 $^{255}\text{Cf}$ 和 $^{256}\text{Es}$ 。前苏联科学家在他们的高中子通量反应堆SM-2上,通过辐照Pu和Cf靶材料,发现了 $^{247}\text{Pu}$ 和 $^{257}\text{Es}$ 。

核爆是一个中子通量极高的场所,在核爆中心,一秒内每平方厘米面积上有高达 $10^{20}$ 中子通过。因

此,像在天体环境中的快速中子俘获过程那样,在此场所  $^{238}\text{U}$  瞬时吸收多个中子,在经过一系列的 $\beta$ -衰变后,形成许多超铀元素的丰中子同位素。例如,在美国的Mike氢弹试验的场地就收集到从铀到镆(100号元素)的70多种新的新核素(见图14)。

重核裂变也是一种合成新核素的重要途径。

在重原子核参与的核反应中,包括粒子吸收和高能重离子碰撞,重原子核或者新产生的重原子核,都有可能发生裂变,裂变产物中就会有新核素。

中子诱发重核裂变可以说在重核裂变现象的确认中起到了关键作用。也是新核素生成的主要途径(见图15)。利用反应堆中子源和加速器中子源

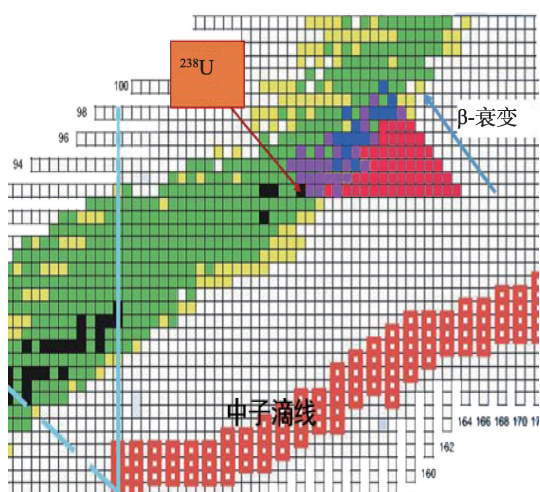


图14 在核爆炸中合成的新核素(图中红色三角区)

引起的裂变反应中先后发现200多个新核素。其中,1971年西欧核子中心在反应堆近旁成功建造了在线同位素分离器以后,就发现了大约70个新核素,其中绝大部分都是短寿命新核素。

20世纪90年代,发现高能重离子弹核轰击靶核后会发生裂变,从此,短寿命新核素的合成获得了突破。在短短的几年中,通过高能重离子弹核的裂变就发现了将近230个新核素。特别是发现了像 $^{74}\text{Fe}$ 、 $^{80}\text{Ni}$ 、 $^{82}\text{Cu}$ 、 $^{188}\text{Lu}$ 等一系列极丰中子的新核素,使核素图丰中子一侧的范围得以大大扩展。

#### 复合核反应

复合核反应通常是指重离子与靶核发生全熔合的过程。实际上,轻粒子与靶核熔合的反应也是一种复合核反应过程。1919年,卢瑟福利用 $\alpha$ 粒子轰击纯的氮气发现质子,以及1932年查德威克用来

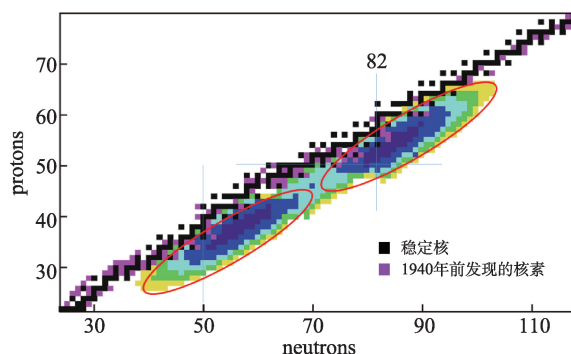


图15 热中子诱发 $^{235}\text{U}$ 裂变的碎片分布(红圈内部分)



图16 U400是前苏联建造的一个等时性回旋加速器,1978年投入运行,可将质量数 $A=4-209$ 的重粒子加速到 $29-3\text{ MeV/u}$



发现中子的核反应,可以说是最早的复合核反应生成新核素的应用。随着加速器提供的粒子种类和能量的增加,利用轻粒子束引起的复合核反应生成的新核素达到250多个。为合成更重的新原子核,就需要加速器能够提供更重的炮弹核,这也促进了重离子加速器的建造。自从20世纪60年代后半期重离子加速器的相继建成,大大促进了复合核反应合成新核素的进程,特别是促进了超重元素的合成。在随后的几十年中通过复合核反应的途径合成了近千种新的核素。

复合核反应生成的新核素都是缺中子的。早期由于利用非对称反应系统(弹核与靶核的质量差别很大),而且生成的目标新核素距离 $\beta$ 稳定线不是太远,因此,生成几率较高。但是随着生成的目标核逐渐远离稳定线,生成几率越来越小。例如,通过复合核反应生成超重核的截面只有 $10^{-33}$ — $10^{-38}$ 巴量级,(1巴= $10^{-24}$  cm<sup>2</sup>, 1 pb= $10^{-12}$ 巴)(见图17)。因此,需要创新的技术方法,包括弹靶组合,目标核的收集和鉴别,加速器束流强度的提升等。例如,选择 $^{48}\text{Ca}+^{249}\text{Cf}$ 反应系统用来合成118号超重核素。超重核合成的工作流程如图18。

超重核合成的难度,不仅是需要在高通量反应堆中经过250多天的多轮辐照和分离,才能得到几

十毫克的靶材料,将在天然钙只有0.187%丰度的 $^{48}\text{Ca}$ 富集到67%,并将其加速成为约 $3\times 10^{12}/\text{s}$ 的束流,更难的是在几天或几十天内,将几个目标核从几亿亿个不同的原子核中准确地鉴别出来。半个多世纪以来,核物理学家不断努力,推动了重离子加速器技术以及先进实验探测手段的创新,使得人工合成超重新元素和新核素的科学研究取得了长足的进步,已合成了从103号到118号的16种新元素,包括它们的许多同位素。但是,还没有到达理论预言的‘超重稳定岛’。要登上稳定岛,领略岛上的奇异风光,仍需长期而艰巨的努力。

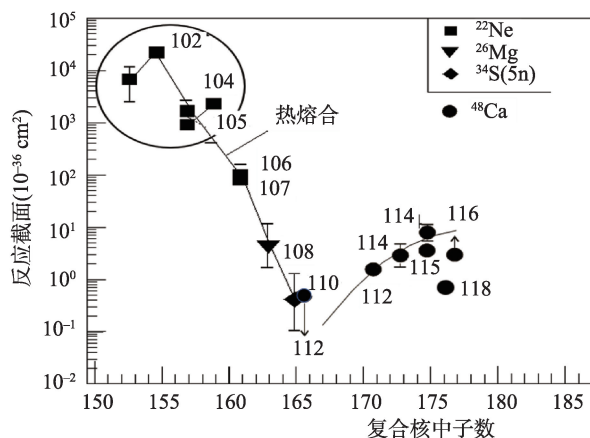


图17 超重核生成截面的变化

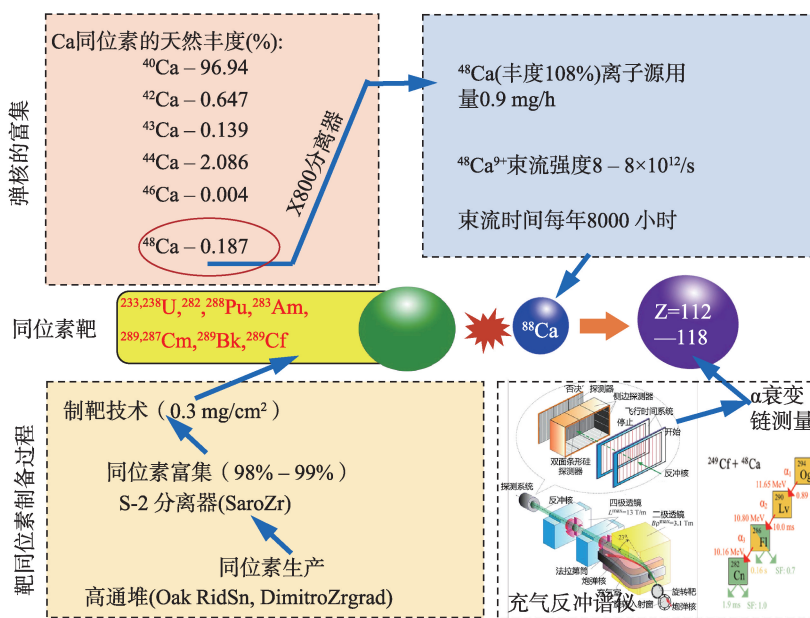


图18 超重核合成的流程图



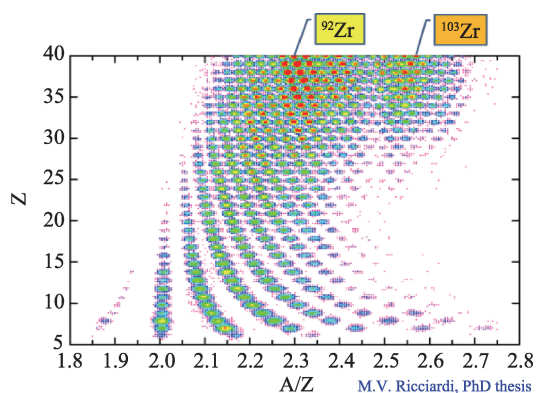


图21 高能<sup>238</sup>U弹核碎裂产生的部分核素

以来,利用弹核碎裂反应生成了许许多多的新核素,特别是质子滴线附近的核素和极丰中子核素,从而进一步扩大了核素图的版图。例如德国的重离子物理实验室利用每个核子 1000 兆电子伏的 <sup>238</sup>U 与 Ti 原子核碰撞,一个实验下来就可观察到几百种核素(见图 21)。1990 年以后观测到的所有核素中,除了超铀区的以外,绝大部分都是通过炮弹核碎裂反应生成的。特别是在原子核序数小于 20 的区域,合成的新核素都达到了中子滴线,例如观察到了 <sup>7</sup>H, <sup>21</sup>B, <sup>31</sup>F, <sup>39</sup>Na, <sup>43</sup>Al, <sup>47</sup>P, 和 <sup>59</sup>K。

由于炮弹核的碎裂可以产生大量的远离稳定线的核素,包括了极缺中子和极丰中子的核素,因此,这种反应方式也用来产生放射性束流——用弹核碎裂的产物当作新的炮弹,去轰击靶原子核,以研究那些极丰中子或者极缺中子原子核的性质,将来也可能用来合成新的超重原子核。国际上几个著名的

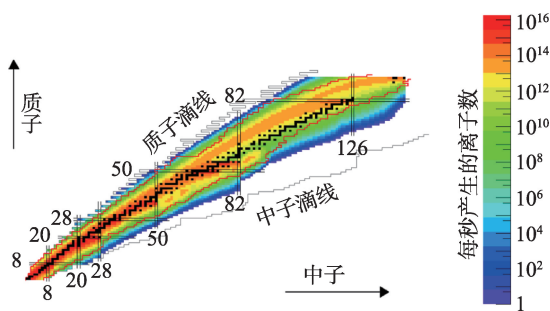


图22 我国正在建设的强流重离子加速器预期产生的放射性离子强度分布图

核物理实验室都建造了放射性束流装置,如法国的 GANIL,美国的 MSU,西欧核子中心,日本的 RIKEN,中国科学院近代物理研究所等。我国正在建设的强流重离子加速器也可以提供非常强的高能重离子束流,用它轰击不同的靶核所获得的放射性离子的产额非常高,有可能用来合成新的超重元素。

近百年来,实验室合成的新核素有 3000 多种,大大扩展了核素图的版图,也使人们对原子核的认知不断地深入。

总之,实验室中生成新核素的途径有多种,但是归根结底,都是通过原子核之间的较为强烈的碰撞,即核反应而产生的。在实验室中,为了使原子核之间发生反应,就必须使一个原子核或两个原子核都具有较高的速度,然后使其与其他原子核碰撞。为了使原子核具有一定的速度,就必须建造离子(粒子)加速器。同时,还需要有探测原子核(离子)的工具——核探测器。如何探知原子核将在下一篇中介绍。

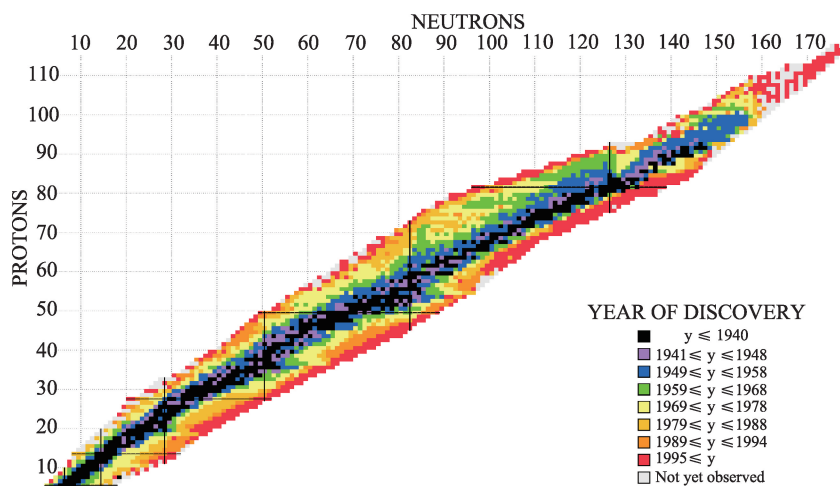


图23 不同年代实验室合成的新核素