



元素起源与

◆王家骥

银河系年龄的测定

在化学元素周期表中有将近90种稳定元素和一些不稳定元素,各种稳定元素往往也有多种不稳定的同位素。人们把具有相同原子量的原子核称为核素。因此,元素就是具有相同质子数(即原子序数)的核素的总称。宇宙中某一元素(或者核素)按质量所占的比例称为这一元素(或者核素)的丰度。在宇宙元素的丰度分布中,氢和氦占了几乎全部,周期表中的其他元素加在一起也仅仅只占很小的比例。

根据现在的宇宙学理论,宇宙在一开始,即大爆炸之后,就出现了电子、质子和中子,由这些基本粒子结合形成的元素主要是氢和氦,其中前者约占四分之三,后者约占四分之一。除此之外,还有极微量的轻元素,例如锂、铍、硼(即原子序数小于6的元素)等。其他元素,包括更多的氦等轻元素都是在恒星内部或者恒星死亡时发生的一些核反应过程中形成的,是恒星生存和演化过程最重要的副产品。这种过程从130多亿年前宇宙中第一批恒星诞生时就已经开始,因此,研究各种元素的形成过程,利用放射性元素的半衰期测定它们的丰度,就可以确定宇宙中最古老的恒星的年龄,并为测定银河系

的年龄提供一种完全独立的方法。

恒星内部的核聚变反应

在恒星内部发生的较轻原子核聚合成为较重原子核的热核反应,可以说明直到铁系为止的几乎所有元素的同位素(原子序数在6到30之间)的丰度。这些核反应称为聚变,它们一般都是放热的,是恒星辐射能量的根本来源。在天体物理学中,通常把这种核聚变反应称为“燃烧”。当然,这里的“燃烧”与化学上的燃烧是完全不同的两种概念。

宇宙中的气体云在引力作用下会发生收缩,形成原恒星,其引力势能会转化为热能,使原恒星核心的温度升高。当原恒星的中心温度达到800万开时,氢燃烧就会被点燃。氢燃烧的最终结果是把四个氢原子核聚合成一个氦原子核。氢燃烧是恒星最基本的核聚变反应。但是,若原恒星的质量小于 $0.08M_{\odot}$ (M_{\odot} 为太阳质量),则其中心温度永远达不到800万开,因此,那里的氢燃烧永远不会被点燃,因而,这样的原恒星永远不可能变成一颗恒星,是恒星形成过程中产生的“次品”,称为褐矮星。

在恒星的一生中,氢燃烧持续的时间最长,占恒星寿命的绝大部分。一颗恒星的氢燃烧持续时间的长短完全取决于它的质量。对于质量与太阳相等的恒星,氢燃烧可以持续大约100亿年;而质量为太阳

质量8倍的恒星,氢燃烧只能持续约2000万年。

其实,上述氢燃烧始终只发生在恒星中心周围很小的区域内。当这个核心区域内的氢元素被逐渐耗尽,留下一个仅由氦元素组成的星核时,其内部的热核反应就会停止,于是,氢燃烧在氦星核外面的一个薄层内继续进行。在此薄层之外,是一个富含氢的包层,这个包层在氢燃烧薄层产生的热量驱使下会急剧膨胀,使恒星的直径增加数百倍,成为一颗红巨星。同时,氦星核在引力的作用下进一步收缩,中心温度进一步升高。当氦星核中心的温度达到1亿开时,氦燃烧被点燃。

氦燃烧把三个氦原子核聚合成一个碳原子核。由此生成的碳原子核又可吸收一个氦原子核,生成氧原子核。氧原子核还可吸收一个氦原子核,生成氦原子核,不过发生这一反应的概率很低。至于氦原子核进一步吸收氦原子核的概率就更低了,可以忽略不计。恒星的氦燃烧速度比氢燃烧快得多,对于太阳,氦燃烧阶段只能持续大约20亿年。

对于质量与太阳差不多或更小的恒星,氦燃烧阶段的结束意味着恒星的死亡。这时,氦燃烧留下的主要由碳、氧元素组成的星核进一步收缩,其中的物质变成电子简并态,密度增大到1吨/厘米³以上,成为一颗白矮星,而星核外面

王家骥:研究员,中国科学院上海天文台,上海200030。

Wang Jiayi: Professor, Shanghai Astronomical Observatory, CAS, Shanghai 200030.

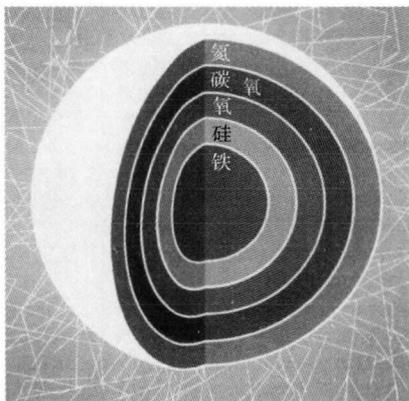
的包层则被抛出，扩散到星际空间，形成行星状星云。行星状星云这个名称其实并不符合实际情况，这样叫完全是因历史上的原因。事实上，行星状星云可以有各种形状，很多完全不像行星的圆面，不过相对来说还算比较规则。

在氢燃烧结束之后，质量比太阳大得多的恒星可以进一步依次点燃碳燃烧、氧燃烧、硅燃烧等聚变反应，生成更重的元素，最终生成铁元素。因此，质量足够大的恒星，最终将形成如同洋葱一般由不同元素组成的分层结构。铁的生成对于恒星来说是一场灾难，因为任何由铁原子核生成更重原子核的反应都需要吸收热量，因此，此时的恒星不可能再依靠铁原子核的聚变来获取能量。失去能量来源的恒星，其星核将迅速而猛烈地收缩，在极其巨大的压力之下，其中物质的质子会发生逆 β 衰变，转变成中子，并处于中子简并态，密度可达每立方厘米几亿吨，成为一颗中子星。与此同时，恒星会发生猛烈的爆发，四散飞扬的炽热气体可使恒星的亮度一下子增加上亿倍，然后慢慢变暗。天文学家把恒星的这种爆发现象称为超新星。也有一些恒星，在超新星爆发的时候彻底炸毁，不留下中子星。

不管是行星状星云的扩散，还是超新星爆发后留下的炽热气体遗迹的扩散，都会使恒星在核聚变反应中生成的那些元素扩散到星际空间，最终与星际气体混合，成为形成下一代恒星的原料。因此，很明显，形成越晚的恒星，将含有越多除氢、氦之外的重元素。

恒星内部的中子俘获过程

上述原子核合成的一般模型不能解释元素周期表中原子序数大于30的元素的形成过程。由于所有这



大质量恒星晚期元素分层结构示意图 外面是很厚的氢包层，内部的星核呈现元素分层结构。

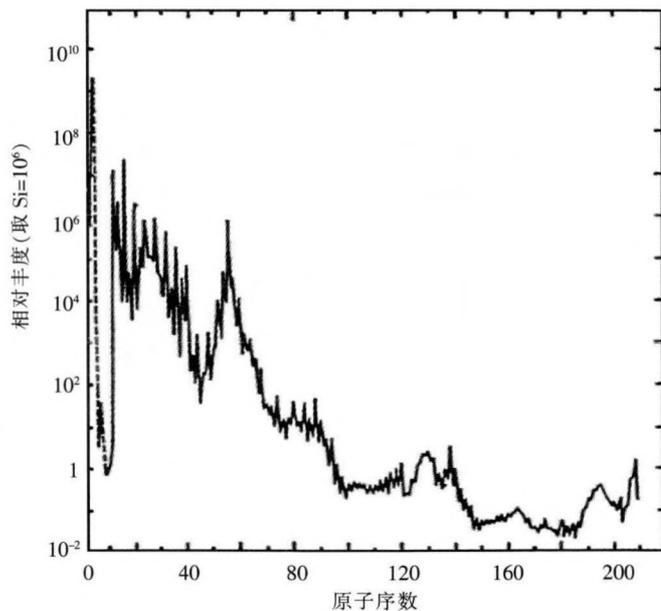
些元素的丰度加在一起也只有氢的丰度的一亿分之一，因此它们一定是在恒星内部或者整体演化中一些较为短暂甚至瞬时发生的过程中形成的。而且，如上所述，比铁重的元素不能通过铁原子核的聚变反应来生成。事实上，原子序数大于30的元素几乎都是通过铁系元素的核俘获自由中子产生的，这些元素统称为中子俘获元素。因为中子不带电荷，所以原子核中质子所带的正电荷不会阻止中子俘获反应的发生，因此，所需要的只是大量的自由中子。

对于很大质量范围内的恒星，在其生命的晚期，在内部发生原子核聚变的反应层内会产生大量自由中子，它们成为中子俘获反应所需要的中子的来源。例如，在一般恒星的氢聚变反应层中，碳和氧的生

成过程都可以释放出中子；更进一步，大质量恒星中，碳聚变生成镁的反应层中也释放出中子。

然后，这些中子就会被一些原子核俘获。由于这些中子的流量很低，在相继的两次中子俘获事件之间几乎有足够的时间发生 β 衰变（即原子核内的某个中子释放一个电子变成质子），于是，原来生成的含有较多中子的某种元素的同位素就变成了原子序数更大（即含有更多质子）的另一种元素。这一相对来说较慢的事件链称为慢中子俘获过程（即s过程），这一过程产生的中子俘获元素约占一半。

一些大质量恒星在成为超新星而爆发时，其核心在转变为中子星的同时，会释放出大量自由中子，其密度可高达 10^{23} /厘米³左右。这些中子会被外层正在爆发的气体中的原子核吸收，使其原子量迅速增加。但由于在这种情况下，中子的增加远比 β 衰变的发生来得快，质子数在非常短暂的时间内还没有改变，



宇宙中元素丰度与原子序数的关系 氢和氦在宇宙元素的丰度分布中占了几乎全部，其余元素的丰度随其原子序数的增加而迅速下降，且原子序数为偶数的元素丰度比与其相邻的两个原子序数为奇数的元素丰度高。

于是大约几秒钟内就可以产生大量极富中子的原子核。

超新星的爆发极其快速,以致在喷射的物质中自由中子的来源很快枯竭。由于极富中子的原子核很不稳定,在自由中子来源枯竭之后,将迅速经历一系列 β 衰变,使多余的中子变为质子,从而使其原子序数增大。同时,原子核内的质子数和中子数也逐步趋向平衡,原子核变为稳定,成为一种更重的元素。以这种方式产生中子俘获元素的过程称为快中子俘获过程(即r过程)。

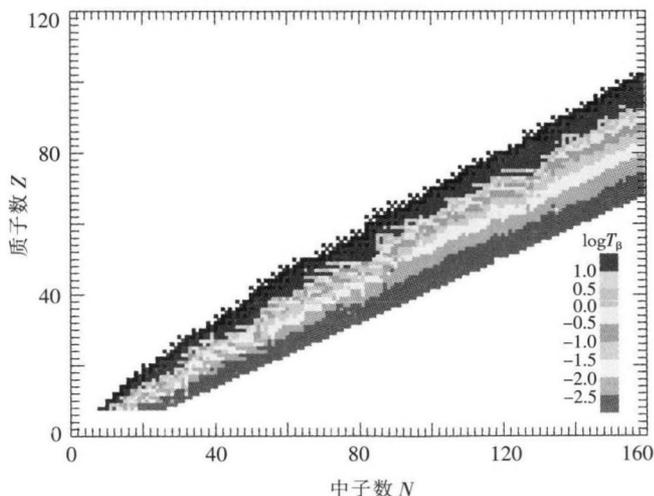
银河系年龄的测定

根据已知长寿命放射性核的衰变时间(即半衰期),从某些放射性中子俘获元素的丰度数据可以测定银河系中最年老恒星的年龄,从而定出银河系的年龄。这种放射性年龄测定方法称为核纪年法。例如,钍的半衰期是140亿年。用当代最大的天文望远镜,加上高分辨率光谱仪,已经能够检测到恒星的钍,并作出相应的年龄估计。根据最新的研究结果,银河系中最年老恒星的年龄范围估计在110~150亿年。

最近,在银河系一颗最年老恒

星的光谱中检测到了铀。把这一元素的丰度与钍以及其他几种元素的丰度进行比较,估计这颗恒星的年龄为 125 ± 30 亿年,与其他恒星根据钍得出的年龄估计值相符合。钍和铀的原子量比较接近,与其他原子量相差很大的元素相比,通过对它们之间的丰度比较,可以得出较为可靠的年龄测定值。

当然,这些恒星还不是银河系中最早形成的恒星。银河系中的第一代恒星具有非常大的质量,超过太阳质量的100倍。在这样的恒星内部,核聚变反应极其快速,甚至只持续几百万年,因此,这些最早形成的恒星已经死亡、消失了很长时间。但是,与银河系的年龄相比,由于它们的形成时间与人们今天在银河系中观测到的最年老恒星的形成时间之差完全可忽略不计,因此,可以把这些最年老恒星的年



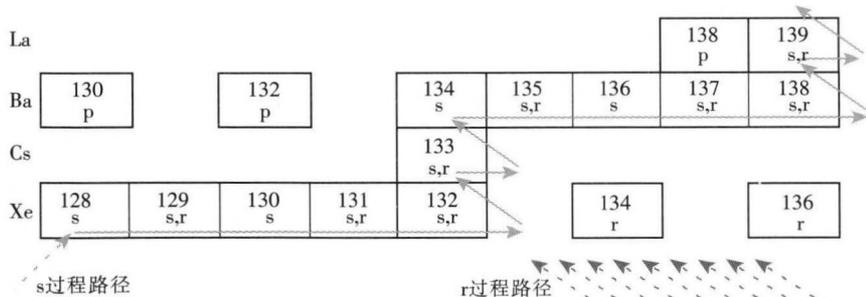
核素图 在一给定的质子数(原子序数) Z 处,越靠左侧的同位素越富含质子,而越靠右侧的同位素越富含中子。稳定的原子核用最黑的颜色表示。从左上方到右下方不同的灰度表示 β 衰变半衰期逐渐缩短(见图中右下角的灰度标,用秒的对数表示)。

龄看作银河系的年龄。

据其他多种方法测定,从大爆炸起算,宇宙的年龄在140亿年左右。假定从大爆炸到银河系形成所相隔的时间为10亿年,那么上述由核纪年法测定的银河系年龄与宇宙年龄是相容的。

用作银河系年龄估计依据的钍和铀是r过程的产物,因此,测定银河系年龄的一个关键性因素是这两种元素还没有衰变之时在发生这些r过程场所的初始丰度。初始丰度的推测不但需要知道这些场所的物理条件,而且还要知道生成这两种元素的富含中子的原子核的特性(例如质量)。由于几乎没有什么实验数据可以利用,这些原子核的特性不得不依靠理论模型来推测,这给用核纪年法测定银河系年龄带来了较大的不确定性。为了减小这种不确定性,需要进一步进行广泛的观测和理论研究。

关键词: 化学元素 核聚变 恒星
中子俘获过程 银河系
核纪年法



r过程和s过程示意图 图中同一水平线上是同一元素具有不同原子量的同位素,原子核俘获中子后,路径向右移动;原子核中的中子变为质子后,路径向左上方移动;s过程中,原子核一面俘获中子,一面把部分中子变为质子,其路径是一条折线;r过程中,原子核先俘获大量中子,然后不断把多余的中子变成质子,其路径是指向左上方的直线;方框内的字母r和s分别表示这种原子核可由s过程或r过程生成,p表示质子过程。