

# 宇宙中最致密的物质(上)

刘雄伟<sup>1</sup> 徐仁新<sup>2</sup>

(1. 西华师范大学物理与天文学院 637002; 2. 北京大学物理学院 100871)

2024年2月,美国科学杂志(*Science*)公布了一项重大发现:詹姆斯·韦布空间望远镜(JWST)在编号为SN 1987A超新星的遗迹(图1)中心处找到存在致密天体的蛛丝马迹。这个致密天体的辐射激发了超新星遗迹气体中的氩和硫等离子,导致其发射出特定频率的红外光线,被JWST的红外光谱相机拍摄到<sup>[1]</sup>。SN 1987A于1987年2月爆发,这份37周年的厚礼立刻引起了天文学家和爱好者广泛关注,奔走相告。这颗致密星很可能是目睹超新星后的又一颗中子星;此前中国司天监发现了超新星SN 1054(见《宋会要辑稿》),后人于1968年在该处找到一颗中子星。

宇宙中存在一些极其致密的天体。这不足奇怪,黑洞即为一例:诺贝尔物理学奖委员会于2020年表彰了黑洞的理论研究和银河系中心超大质量黑洞的观测发现。其实,理论和观测均表明,宇宙

中还存在一类致密天体,它们的物质密度超过每立方厘米1亿吨!与之相比,地球上物质密度最高的金属钨,每立方厘米仅22.6克。不过,大爆炸理论和观测研究都表明,宇宙在诞生之初的成分以氢和氦为主,以及极少量的氘、锂等核素。那么,如此致密的天体是怎么形成的呢?它们又由什么神秘的物质组成?这一切,还得要从天体的结构与演化谈起。为此,我们先解释一下物质的基本结构。

## 1. 原子的秘密——炼金术的困难

众所周知,只要把更多的物质压缩到更小的体积密度就会变大。但是,物质在被压缩的时候都会产生内部压力来抵抗压缩,因此物质压至很大的密度往往是非常困难的。气态物质相对容易被压缩是因为它们的原子/分子相隔很远,压缩的过程中减少的其实只是原子/分子之间的空间,而原子/分子



图1 超新星遗迹 SN 1987A<sup>[2]</sup>

本身并没有被压缩。液体和固体中的原子已经靠得很近了,要再压缩就非常困难了。为何原子在被压缩时会产生更强大的阻力?怎样才能造出更致密的物质呢?这些问题的答案跟原子结构的本质有关。

原子由原子核和核外电子构成;其质量几乎全部集中于原子核,核外电子只占不到千分之一的质量。然而,原子核却只约占原子 $10^{-14}$ 的体积,其余的体积都被电子占领了,如图2。有了这个图像,我们就容易理解各种物质的密度了。除了由于核外电子的周期分布规律使得同一周期里的元素可能随原子量增大而体积变小之外,总的来说原子量越大元素组成物质的密度也越大。比如固态氢(原子量1)的密度只有 $0.086\text{ g/cm}^3$ ,钻石(原子量12)的密度为 $3.52\text{ g/cm}^3$ ,铁(原子量56)的密度为 $7.86\text{ g/cm}^3$ ,密度最大的金属锇(原子量190),密度为 $22.6\text{ g/cm}^3$ 。不难看出,要造密度大的物质,关键就是要让原子有更大的原子量,即原子核含有更多的质子和中子。

不过,人类在正确地认识到原子秘密之前,就有过很多试图改变物质结构的无效尝试,比如曾经风靡一时的炼金术。按照现在的认识来看,他们试图用化学方法改变原子结构,无疑只能徒劳。要造

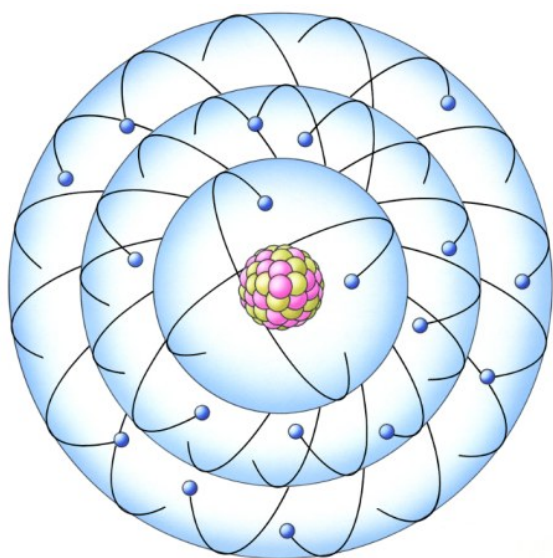


图2 原子结构示意图

出大原子核,就必须要有很大的力量将小原子核压到一起;显然,化学手段和机械力都远远不能满足这个要求。人类现在唯一掌握的可以短时满足这个要求的力量是原子弹爆炸时产生的巨大压力,可以引发氘、氚等轻核的聚变反应,生成氦原子核,同时释放出巨大的核聚变能。这就是氢弹的原理。科幻电影《流浪地球》里的行星发动机的基本原理也是把比较轻的元素聚变成更重的元素,释放出巨大的核聚变能。我国参与的“国际热核聚变试验堆”计划(ITER)的目的就是联合建造一座高功率的热核反应堆,可以稳定的进行氘、氚生成氦的核聚变反应并源源不断输出能量。这就是俗称的“人造太阳”。这种方式所能够提供的能量远远大于地球上其他能源的总和;若能最终成功,将有望彻底解决全球的能源问题。

那么,宇宙里有没有可以持续的把轻元素聚变成重元素的地方呢?答案是肯定的,要不然,我们体内和地球上这么多种类的重元素就不会存在了。

## 2. 恒星核聚变——重元素的炼成

宇宙诞生之初形成的元素以氢和氦为主,还有极少量的氘、锂等低原子量的轻核素。我们人体和地球上各种重元素的来源,主要归功于恒星的核聚变反应。区别于短暂爆炸的核弹,恒星质量很大(比如,太阳质量是地球的33万倍),有非常强大的引力,可以在恒星核心区域维持非常高的压强和温度,从而使核聚变反应得以稳定地持续进行。

恒星形成于星际中的、以气态分子为主要成分的一团云(图3)。分子云在密度波、激波等的扰动下发生变化,在引力作用下逐步收缩,收缩过程释放的引力势能使温度逐渐升高,气体云的热压力也会随着温度的升高而增大。热压力的逐渐增加会抗衡引力,阻碍气体进一步收缩。

本质上,恒星的演化就是在压力和引力相互抗衡过程中进行的。如果一团原始气体云的质量远大于木星质量但又还不够大,当收缩后的热压力和引力达到平衡时其中心温度低于千万度,将无法产



图3 恒星形成示意图

生氢聚变反应,只有一些微量元素的聚变释放出微弱的能量,星体表面呈暗褐色。我们把这样的星叫作褐矮星。一般认为,质量超过0.08倍太阳质量的气体云,它收缩后中心的温度可以上升到千万度,就可以产生稳定的氢聚变反应,成为恒星。这个过程的核聚变总效果是将四个氢原子核(质子)聚变成一个氦原子核(两个质子加两个中子)。由于一个氢原子核比四个氢原子核(质子)的质量小,这个聚变反应会放释放出很多能量(根据相对论质能关系,释放的能量 $\Delta E = \Delta m \cdot c^2$ , $\Delta m$ 为质量差, $c$ 为光速),其中一部分能量被中微子带走,其余的能量以辐射能的形式释放出来。辐射会产生巨大的压力,与引力抗衡达到平衡,形成稳定的氢核燃烧。核聚变反应虽然很剧烈,但是整个恒星并不会像氢弹那样一下子炸光。压力和引力的平衡会让恒星的氢聚变反应持续很多年,比如太阳就可以持续大约一百亿年。天上的恒星大多数都处在这个阶段。我们把这个阶段叫作恒星的主序阶段,把处在主序阶段的恒星叫作主序星。

随着恒星氢聚变反应的进行,核心的氢越来越少、氦越来越多,直到最后再也无法进行稳定的氢聚变反应。氢聚变反应停止后,恒星内部的压力变小,引力又占了上风,会使恒星进一步收缩,内部的温度也随着收缩进一步升高。如果恒星的初始质量够大,恒星进一步收缩就可以让温度升高到引发氢燃烧产物氦的核聚变反应。因为恒星中心氦聚变的点火温度更高、燃烧很剧烈,它将会产生比主

序阶段更大的压力,使得恒星膨胀得更大,成为红巨星。比如我们的太阳在大约40-50亿年之后,就会进入这种不稳定的氦核聚变阶段。太阳那时候就会变得非常非常大,甚至会吞没地球。《流浪地球》的故事就来源于这个设定,但是大家可以放心:科学家们非常肯定地告诉我们,太阳现在很稳定,不会这么快变成红巨星。恒星的氢聚变反应可以合成更重的一些元素,碳、氮、氧等。只要恒星的质量足够大,碳、氮、氧还可以继续聚变成更重的元素,并随深度而一层一层地进行下去,形成越来越重的元素,一直到形成铁核。大质量恒星晚期的内部结构见图4。相应地,重元素的聚变温度更高,过程也越来越剧烈、越来越短暂。比如,一颗15倍太阳质量的恒星,其氢燃烧能够持续100万年,碳燃烧能持续600年,其最后生成的铁核只能稳定存在0.25秒(表1)。

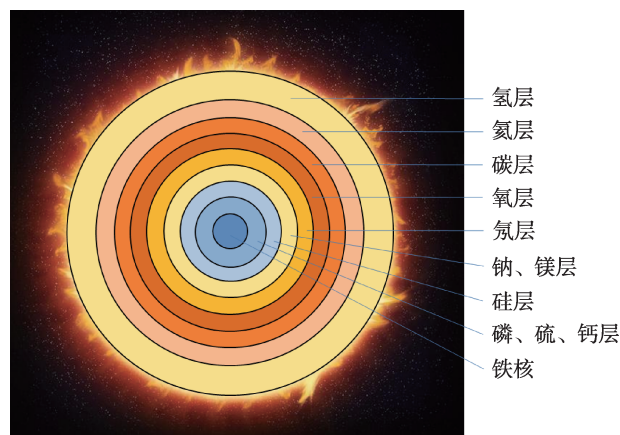


图4 大质量恒星晚期内部结构示意图



表1 15倍太阳质量恒星的演化时标

| 演化阶段 | 持续时间   | 温度(K) | 密度(g/cm <sup>3</sup> ) |
|------|--------|-------|------------------------|
| 氢燃烧  | 100 万年 | 4 千万  | 1                      |
| 氦燃烧  | 10 万年  | 2 亿   | 1 千                    |
| 碳燃烧  | 600 年  | 6 亿   | 2 万                    |
| 氧燃烧  | 6 个月   | 10 亿  | 1 千万                   |
| 硫燃烧  | 1 天    | 40 亿  | 3 千万                   |
| 铁核   | 0.25 秒 | 60 亿  | 30 亿                   |

那么,恒星的核聚变是不是就能够产生宇宙中所有的重元素呢?答案是否定的。核聚变反应能够持续发生需要满足一个必要条件:聚变过程中需要释放出能量。根据相对论质能关系,新合成的原子核的静质量要小于参与合成的原子核的总质量。科学家们发现,恒星核聚变能形成的最重原子核是<sup>56</sup>Fe。宇宙中原子量小于铁的元素,大多数都可以通过恒星的核聚变反应产生。那么,比铁重的元素,比如黄金、白银,还有镭、钚这些特别重的元素又是怎么来的呢?

3. 恒星的死亡坍缩——超重元素和致密天体的诞生

研究表明,初始质量小于十来倍太阳质量的恒星,在合成铁元素之前就会停止核燃烧。这类恒星的中心物质收缩形成白矮星,比如氢白矮星、碳氧白矮星、氧氖镁白矮星等,而外层物质被恒星晚期强大的辐射照射而膨胀,最终演化为行星状星云。太阳只是一颗质量中等偏小的恒星,在氢聚变结束后无法形成稳定的氢聚变反应,会在短暂的不稳定氢聚变反应后结束燃烧,外部被吹成红巨星再冷却后成为行星状星云,中心部位收缩成由电子的量子简并压支撑的白矮星。一倍太阳质量的白矮星大小和地球差不多,中心密度超过每立方厘米几十吨,远远超过地球上能够造出的任何物质。不过,白矮星还不是宇宙中最致密的天体。

初始质量更大的恒星,它的核燃烧就可以一层一层的进行下去,直到最后形成一个巨大的铁核心,核燃烧才停止。在核燃烧停止后,缺少强大的

压力与引力抗衡(电子简并压也无法抵抗恒星中心铁核的自引力),铁核将在自身强大的引力作用下剧烈收缩(引力坍缩)并释放出巨大的引力势能。此时释放的引力能比恒星核燃烧所释放出的总能量还多。这些能量大部分会在极短时间内释放出来,其中有部分能量以光子的形式表现,使得恒星的亮度瞬间变得非常亮,甚至可以超过整个星系的亮度!这就是超新星爆炸,它是宇宙中最剧烈的爆炸现象。爆炸过程中会出现不稳定的大规模核合成过程,可以产生很多比铁更重的元素。超新星爆炸将合成的重元素抛射到星际空间。

大质量恒星中心的铁核最终的命运是什么?这取决于它的总质量。铁核在引力作用下的收缩非常剧烈,以至于会把电子压进原子核,和质子结合成中子。铁核的质量如果不是特别大的话,它收缩后可能会生成大量中子,这些中子的简并压或许可以与引力相抗衡,阻止进一步坍缩,成为一颗中子星。质量特别大的铁核,自引力也特别强,在坍缩过程中产生的任何压力(热压、简并压)都无法抗衡引力,最终坍缩成黑洞。那么究竟多大质量的铁核会塌缩成黑洞,多大质量的铁核可以形成稳定的中子星呢?这主要取决于中子星能够抵抗自引力的极限质量。很遗憾,至今尚不能通过可靠的理论计算给出这一极限,但一般认为它不会超过三倍太阳质量。也就是说,超过三倍太阳质量的致密星应该是黑洞。

那么,中子星和黑洞究竟有什么不一样,观测上又怎么区分它们,我国在相关领域的科学研究又怎么样呢?我们将在下一篇文章(《宇宙中最致密的物质(下)》)进行介绍。

参考文献:

[1] Fransson, C. 等, Emission lines due to ionizing radiation from a compact object in the remnant of Supernova 1987A[J], Science, 2024, 383, 898-903.

[2] McCray R. 等, The remnant of supernova 1987A [J], Annu. Rev. Astron. Astrophys., 2016, 54:19-52.