

超新星爆发理论中某些重要的核物理问题

彭 秋 和

一、导致恒星不稳定坍缩的主要物理因素

一颗恒星的演化史本质上就是它内部核心区域的热核(燃烧)演化史。一个质量较大的恒星在其演化的一生中将先后经历氢燃烧、氦燃烧、碳燃烧、氖燃烧、氧燃烧以及硅燃烧等热核燃烧阶段。不同质量的恒星经历它所有可能的热核演化之后,通常都要出现较为剧烈的演变。对于质量较低(例如 $M < 8M_{\odot}$)的恒星,要经历以前述剧烈热脉冲为特征的 AGB 星阶段,其核心逐渐收缩为白矮星,而星幔和包层则被向外抛射并膨胀成为行星状星云。大质量恒星 ($M > 8M_{\odot}$)则要经历更为剧烈的演变过程,例如像 II 型超新星那样的极其猛烈的爆发。

引起恒星不稳定坍缩的主要物理因素有: 1) 电子俘获(EC)过程: 大质量恒星经历了完全硅燃烧之后,其中心密度可达 $(3-5) \times 10^9 \text{g/cm}^3$ 以上,超过了(主要成分)铁原子核上电子俘获不稳定的密度阈值,费米面附近的大量自由电子将被铁族元素的原子核俘获。这时(铁)核心是不稳定的,它将迅速向中心坍塌(整个核心坍缩时标短于 1 秒)。电子俘获过程是导致 II 型(以及 I_b)超新星核心坍缩的主要物理因素。2) 广义相对论效应: 一个不再进行核燃烧,仅依靠简并电子压强(抗拒星体自引力压缩)支撑星体平衡的恒星质量一旦超过钱德拉塞卡尔极限质量 $M > M_{\text{ch}} = 5.84 Y_e^2 M_{\odot}$ (Y_e 是电子丰度)时,广义相对论效应将使整个恒星不稳定引力坍缩。对中,小质量的恒星(忽略辐射压),这条件等价于当星体的中心密度高于下述临界密度: $\rho_c > 2.6 \times 10^{10} \text{g/cm}^3$ 。3) 正负电子对湮灭产生中微子对过程: 当 $M > (60-100) M_{\odot}$ 的超巨质量恒星的核心区尚在进行氧燃烧时,温度已上升到 $5 \times 10^9 \text{K}$ 以上,

但中心密度却尚未达到 $1 \times 10^7 \text{g/cm}^3$,物质处于非简并状态。这时 γ 光子对碰撞转化为正负电子对及其逆过程大量进行,达到动态平衡。同时正负电子对湮灭产生中微子对的反应大量进行。它是引起超巨质量恒星不稳定坍缩的主要因素。4) 高能 γ 光子的光致裂变反应因素: 当星体核心温度超过 $5 \times 10^9 \text{K}$ (粒子热运动平均能量超过 0.5MeV) 时,普朗克分布中的高能光子的光致裂变反应将是导致星体坍缩的重要因素。

二、I_a型超新星爆发理论中的问题

关于 I_a 型超新星的爆发图像简述如下: 它的爆发起源于密近双星中吸积的大质量白矮星。但是这个吸积较为缓慢,不致于出现吸积表层的爆炸性氢燃烧(新星)。在 10^9 年内它吸积了足够多的物质,使得星体质量增长到超过钱德拉塞卡尔极限质量。广义相对论效应就导致这个超重白矮星整体坍缩。在坍缩过程中物质温度和密度急剧增加,一旦温度增长到碳核燃烧的点火温度以上,碳燃烧不仅迅猛点燃,而且由于高度电子简并状态使得核燃烧变成爆炸性的失控热核反应。核燃烧从初始的亚音速爆燃波非常快地发展为超音速的爆轰波。在不到 1 秒的时标内它使得整个星体完全炸光,在其中心几乎不留下致密残骸。当前 I_a 型超新星爆发理论尚在争论中的较重要物理问题简述如下。

1. 白矮星物质晶格的状态: 坍塌的白矮星物质高度致密,以至于原子核之间的库仑排斥能远超过它们的热运动能,等离子体耦合常数 $\Gamma (\equiv (Ze)^2 / akT, \text{其中 } a \text{ 是晶格常数,即离子间平均距离。})$ 超过某个临界值 Γ_c (对于单一成分的等离子体, $\Gamma_c \approx 155$), 物质凝聚成晶格点阵的固体状态。对于人们研究最多的 C-O 白矮星来说,碳,氧是处于分离的状态,还是混合在一起的呢? 若它们处于分离状态,必定引起较重的氧

南京大学天文系 南京 210008

核向中心沉淀,形成一个逐渐增大的由纯氧组成的核心,其外是碳的包层(外核心);如果碳,氧是相互混合的,它们组成紧密的合金是有序的还是无序的呢?这三种不同的固体状态却是决定着坍缩的白矮星核心碳燃烧点火的不同方式,甚至是决定星体最后是整体爆炸(呈现为 I_a 型超新星爆发)或是继续坍缩(形成中子星而不导致为 I_a 型超新星)的关键问题.遗憾的是,人们迄今尚无法判断它们是否分离,因为在微观上碳氧分离所消耗的能量低于总能量的1%.

2. 碳燃烧点火位置和核反应类型:在坍缩的白矮星内,首先点火的核反应究竟是哪种类型?是通常的热核反应呢,还是靠晶格中离子的零点振动能作为轰击能量的致密物质核反应呢?碳燃烧最早点火位置是在中心处还是在中心以外某处呢?这些问题的回答是同某些迄今尚未了解的物理因素密切相关.例如,它不仅同星体核心区内的密度,温度分布轮廓有关,而且同中微子发射率,对流驱动的Urca过程是否起重要作用都密切相关.此外,前述碳,氧是否分离或是无序或有序合金等问题更使核燃烧的点火问题变得更加复杂.迄今的所有关于 I_a 型超新星爆发的大多数计算研究都只是对碳,氧均匀混合的最简单模型进行的.

3. 有关对流Urca过程的作用:在致密的核心区出现的电子俘获过程产生的 β 不稳定核虽然不能在费米能级很高的核心区进行 β 衰变,但它可能随着星体核心内外物质对流而被输运到弱简并的外部区域再发生 β 衰变,这种过程称为对流的Urca过程.它等效于把电子的费米能量一部分转化为中微子对的能量发射出去,同时另一部分转化为电子的热运动能.这种过程究竟使星体增温还是降温?它能否推延或部分地抑制失控的碳燃烧?这些都是尚未确定的有争议的问题.

4. 失控核燃烧波的加速传播和超音速爆轰波的触发机制:

坍缩中的白矮星内碳燃烧一旦点火,由于物质的简并性质,它立即变成失控爆炸性的碳燃烧.最初,它是以热传导方式向外传播,其速度

为50km/s,远低于音速9500km/s.随着失控核燃烧的进行,当温度增加到使得碳燃烧速率超过某一临界值,其核燃烧的特征寿命短于对流在星体内的对流时标,低速爆燃波就进入了不稳定加速传播阶段.核心区只要有 $0.05M_{\odot}$ 的物质经过碳燃烧,其释放的热能足以使核心区域内密度因急剧膨胀而下降3.6倍.特别当核心区温度超过 1.0×10^9 K时,核燃烧时标(0.01s)短于声波穿过压力标高(450km)的时标(0.047s).这时,由于燃烧波前以内的物质经历了失控碳燃烧,在高温膨胀过程中其密度下降很多,反而低于波前外的密度,这就诱发了瑞利-泰勒不稳定性,使内外物质翻转,核燃烧波大大向外加速.但是,此后的具体物理过程以及它最后能否转化或触发超音速爆轰波?在这个重要问题上存在着很大的分歧与争论.现在流行的是某种延迟爆轰波模型:局部失控热核反应在星体中心附近多个点几乎同时点火.当各局部的温度上升到非常高时,在同星体半径可以相比较的尺度上将自发地发生核爆炸.核爆炸试验观察到这种爆轰波是超音速传播的,人们断定这种多点爆炸波必定触发超音速爆轰波.当它燃烧的火焰通过外层区域时,核燃烧温度并不太高,约为 $(3-5) \times 10^9$ K.最后核物质仅仅处于准统计平衡状态,核合成结果产生相当数量的Si-Ca中介质量核素.这正是 I_a 型超新星观测给出的要求.此外,这种爆轰波释放的总核能远远超过白矮星的引力束缚能,因而这种理论模型可以给出在 $SN I_a$ 爆发时观测到它的抛射物具有相当高的速度($> 1 \times 10^4$ km/s)和总动能($\sim 10^{51}$ ergs).这种延迟爆轰波模型在定性上似乎合理,但一些关键假设尚未能从理论本身自洽地给出,目前仍在继续定量计算研究中.

5. 核合成问题:1) 现有的大多数 $SN I_a$ 理论模型都会出现铁族元素的某些同位素(例 ^{54}Fe 和 ^{58}Ni)合成过多的结果. $^{54}\text{Fe}/^{56}\text{Fe}$ 和 $^{58}\text{Ni}/^{56}\text{Fe}$ 这两个相对丰度要比太阳系的标准值分别高出2倍和5倍.目前人们断定银河系的铁族元素一半以上是由 $SN I_a$ 提供的,因此这些模型的计算结果是不合理的.造成这个矛盾的原因是由于碳爆轰波阶段时间较长,在高密简并下电子的费米

能超过许多核素的电子俘获能阈值,电子俘获过程大量进行,不可避免地产生较多的丰中子铁族元素 ^{54}Fe 和 ^{58}Ni (或 ^{60}Fe),使它们的丰度超过太阳标准值的2倍和5倍.这个矛盾就I_a型超新星核合成理论中著名的“电子俘获问题”.2)在大多数模型中,会残存一定数量未燃尽的 ^{16}O ,它将在SNI_c后期光谱中呈现出来,但是光谱观测却否定了它.这是一个尚未解决的问题.

三、II(以及I_b)型超新星爆发理论中的严重困难

SNI_{II}和SNI_b(以及SNI_c)等核心坍缩型超新星的爆发机制有两大类:

1. 瞬时爆发机制:大质量恒星经历了完全核燃烧之后,核心区密度超过密度阈值 $1.14 \times 10^9 \text{ g/cm}^3$,在 ^{56}Fe 原子核上的电子俘获过程导致恒星核心不稳定引力坍缩.坍缩中的核心由坍缩行为截然不同的内核心与外核心两部分组成:a)内核心处于亚音速的同模坍缩状态.物质向内坍缩速度随 r 线性地增加; $V_r \propto r$.内核心的质量 $M_{\text{内核心}} \sim 0.6M_{\odot}$.b)外核心几乎处于自由坍塌状态,物质向星体中心坠落的速度大约为自由下落速度的一半.在内外核心交界面附近,物质下落速度可达光速的1/8-1/4,其值超过局地声速.随着星体坍缩的进行,星体中心的密度迅速增长.一旦它达到原子核密度以上,核子的非相对论简并压强超过了电子的相对论简并压强,变成了稳定的系统,不再坍缩.但由于惯性,直到中心密度达到(2-4) ρ_{nuc} 时,内核心的坍缩才完全中止.而内核心外围的物质却继续以超音速坍塌,它们猛烈地撞击在突然停止坍缩的坚硬的内核心上.在内核心外不远处立即产生一个强大的向外行进的反弹激波,激波能量高达 $E_{\text{shock}} \sim 10^{51} - 10^{52} \text{ ergs}$.激波波阵面后的温度上升到 10^{11} K 以上,平均热运动能量高达10MeV,超过了 ^{56}Fe 每个核子平均的结合能(8.8MeV).铁族元素的原子核很快地被热光子打碎.因此,如果 $M(\text{外核心}) < E_{\text{激波}} / (-\delta E / \delta m)$,则激波可以冲出外核心.而且当它完全摧毁外核心的全部铁核以后,初始激波能量只要尚能剩下1%以上的能量(即

$> 10^{49} \text{ ergs}$),残留的激波就可以把整个星幔和大气层抛向太空,形成超新星的爆发.上述图像就称为瞬时爆发机制.但是,如果 $M(\text{外核心}) > E_{\text{激波}} / (-\delta E / \delta m)$,则在上述反弹激波尚未穿透外核心,即在它的波前尚未到达外核心的外边界之前,激波能量全部都消耗在铁核光致裂解的过程中.它不仅不可能把星幔和大气层吹散,形成超新星的爆发,而且由于核心外围的星幔和大气继续向中心坠落,原来向外行进的反弹激波转变成为一个吸积驻激波.也就是说,这种情形下瞬时爆发机制失败.综上所述,瞬时爆发机制能否成功的关键在于它的外核心的质量是否过大?迄今爆前超新星所有合理的模型计算表明,其外核心质量都过大.

2. 中微子延迟爆发机制:超新星的核心坍缩后成为一个新生的高温中子-质子星.由于在坍缩过程中自引力势能的转化,其初始温度高达 10^{11} K 以上.威尔逊设想:如此高温的新生中子-质子星能够在很短的时标产生非常强大的中微子流,中微子平均能量约为10MeV,总能量高达 10^{52-53} ergs .这个中微子流很快地被输运到半径约40km的中微子球表面.通过中微子同各种粒子(e^- , e^+ , p , n , $\alpha \dots$,包括氧,碳等原子核)相互作用,流量非常强大的中微子动量将产生极为强烈的冲压.正是这个强大的冲压把整个星幔和大气高速地抛向太空.从中微子流的产生,以及它到达中微子球表面和它同物质相互作用,引起超新星爆发这一系列过程的总时标大约只有一秒钟左右.他提出的这种图像称为中微子延迟爆发机制,成为后来有关核心坍缩型超新星爆发机理研究的主流方向.但是,这种机制中有两个关键问题尚未解决:1)新生的高温中子-质子星能否在非常短的时标内产生如此巨大的中微子流?产生它的具体物理过程是什么?2)虽然中微子流如此强大,它们同物质相互作用究竟能否产生如此强大的向外冲压,导致超新星的爆发,而且爆发物质向外的初始速度高达 $1 \times 10^4 \text{ km/s}$ 左右,爆发总动能达到 10^{49} ergs ?

就上述第一个问题,人们先后曾引入 π 凝聚产生强大中微子流的模型,核物质转向(u, d)

夸克物质的相变过程来产生中微子流的方式,但均未获得成功. 1995年,我们南京大学研究小组提出了由超新星坍缩核心形成的高温中子-质子星内相继出现的核物质——(u, d)两味夸克-(s, u, d)三味夸克的相变过程,将在短于1微秒的时标内产生大量中微子流,其平均能量为10MeV左右,总能量达 10^{52} ergs以上. 这种相变过程导致星体核心区中出现负熵梯度引起内外物质的Schwarzschild对流将使这强大中微子流迅速抵达中微子球表面. 我们提出的这种机制大大有利于中微子延迟爆发机制. 在我们的初步探讨中,我们用理想费米气体作为夸克系统的最简单模型. 很快地,印度德里大学的一个研究小组在我们研究的基础上,进一步计入了夸克之间相互作用,发现中微子流量将增强1/4左右. 目前这方面研究还在深入之中. 至于第二个问题,迄今仍然也是悬案. 人们不仅考虑了已知各种粒子同中微子的相互作用,而且还探讨了在致密等离子体中,等离子体振荡有可能引起这种相互作用的增强. 但上述中微子流仍然无法产生如此强大的冲压. 也就是说,即使中微子延迟爆发机制,在理论上人们仍然无法自洽地实现超新星的爆发.

四、电荷屏蔽效应对电子俘获过程的影响

在目前有关 γ 暴天体起源的研究中发现,它们基本上同大质量($M > 25M_{\odot}$)核心坍缩有关,自然地同超新星爆发机制的研究密切相关. 而超新星爆发机制的研究陷入了严重困境. 我们有必要从各种可能的物理角度来重新探讨超新星内部的物理过程. 例如,由于导致超新星核心坍缩的首要原因是电子俘获过程,因此我们应当重点研究它.

1. 电荷屏蔽效应对超新星内电子俘获率影响的计算研究:

与J. Bahcall曾研究过的主序星内(自由电子处于玻耳兹曼-麦克斯韦分布的)电子俘获过程不同,超新星内电子俘获过程是当电子的费米能超过电子俘获的能阈值时,费米面附近的电子打入原子核而发生的. 在这种情形下,电

荷屏蔽效应对电子俘获过程有着重要影响: 1)降低入射电子的能量, 2)使超过电子俘获能阈值的电子数目减少, 3)等效于提高了电子俘获的能阈值. 我们已经对这一问题进行过初步试探性研究. 我们发现在超新星内物质高密度环境下电荷屏蔽效应对少数几种原子核上电子俘获率的影响可达30%—80%.

2. 电荷屏蔽效应对II型和I_b型超新星坍缩核心质量影响的研究

电荷屏蔽效应提高了电子俘获过程的有效能阈值,由此明显地提高了爆前超新星核心坍缩的临界密度阈值,这必将导致实际坍缩核心质量低于迄今国际上计算的数值. 只要坍缩核心质量减少3%—5%,至今仍然一筹莫展的超新星瞬时爆发机制有可能成功. 但是,如果我们采用等离子体强屏蔽的Salpeter公式,则发现它只能使超新星坍缩核心的质量降低1%. 但是,10年前人们就已指出,在相当致密的星体核心,应当用更复杂的方法(这种方法类似于固体理论中的格林函数方法)替代Salpeter公式来描述电荷强屏蔽效应. 在电子俘获过程的计算中如何利用这种方法来计算电荷屏蔽效应增强因子,是一个迫切的课题.

五、某些有关核天体物理问题

1. 在对碳,氧核燃烧($^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$ 和 $^{16}\text{O} + ^{16}\text{O}$)核反应率的研究中,我们发现目前国际上采用的这两个热核反应率仍然是70年代以前的外推估计值,它们分别高估了(3—4)和(7—10)倍. 目前国际上也有人提出应该从实验上按天体物理环境重新研究这些核反应,但由于技术上的困难,至今仍未进行. 如果我们的探讨是正确的,则它对爆前超新星内部温度,密度及电子丰度都有重要影响,很有可能它会改变(II型和I_b型)超新星坍缩核心质量.

2. 最初步探讨显示,晚期恒星内部某些核燃烧(例如氦燃烧)阶段的热核燃烧很可能出现混沌现象,可能导致恒星晚期演化图案更加丰富多彩. 它有可能解释观测到的各个II型超新星之间元素丰度的较大差异.