

核天体物理学的某些重大疑难问题*

彭秋和

(南京大学天文系 南京 210093)

摘要 本文简介与评述了当今核天体物理学的几个最为突出的重大疑难问题,如(1)恒星晚期演化研究中最关键的几个核反应截面的不确定性;(2)L型超新星爆发理论基本环节中的争论及其一些严重矛盾的问题;(3)I型超新星爆发现有理论和它迄今尚未能自洽地获得(观测到的)爆发这一重大矛盾的关键原因及为突破这个困难人们最近所作的较为成功的探讨^[25,26];(4)星际²⁶Al问题和它所面临的困难及提出合成²⁶Al核的可能新途径^[28].

关键词 核天体物理, 恒星演化, 超新星, 星际²⁶Al.

1 引言

核天体物理是核物理和天体物理之间的交叉学科.从天文学角度来说,它集中指向恒星(和太阳)的热核演化,剧烈爆炸星体(如新星、超星及演化活动的中子星)的热核过程,宇宙中特别是恒星内化学元素的核合成、星系化学演化、核X射线、核 γ 射线及中微子天文学等现代天体物理中重大热门课题的研究^[1].从核物理来说,在上述天体物理中起重要关键作用的核反应、中子俘获截面、远离 β 稳定线的短寿命放射性核素性质的研究等已成为近十年来实验与理论核物理学的核心问题之一.核反应 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 截面的重新测定已经导致大、中质量恒星演化理论的重新改写,它震惊了国际核物理学界和天文学界;1987年超新星曾是全世界科学界最关注的事件;它们以及星际²⁶Al之谜等核天体物理学重大疑难问题不仅吸引了世界上第一流的天文学家,而且使得包括诺贝尔物理学奖金获得者(Bethe, Fowler)在内的第一流物理学家和核物理研究所都投入到这些问题的研究.

当前,核天体物理学急待研究的问题相当多.单就重元素的核合成方面就有一系列正在探讨的疑难问题.例如,在晚型红巨星(AGB星)内部合成¹⁹F,放射性元素Tc以及s过程(即慢中子俘获过程)核素(特别是Ba和

稀土元素)的物理条件和中子源问题以及 γ 过程(快中子俘获过程)的天体物理场合问题.但因篇幅有限,本文将主要阐述当前最为突出的几个重大疑难问题.

2 恒星演化理论中热核反应率的不确定性

热核燃烧不仅长期有效地提供着恒星巨大的光和热的能源,而且不同阶段热核燃烧的兴衰过程驱使着恒星整体性质的演变.恒星演化史简直就是一部热核演变史.一颗质量较大的恒星通常会先后经历氢燃烧(主序星)、氦燃烧、碳燃烧、氮燃烧、氧燃烧和硅燃烧各个阶段^[2].在恒星内部温度($10^7 \sim 5 \times 10^9 \text{K}$)条件下,热核反应率的确定对恒星演化的研究是头等重要的.遗憾的是,迄今实验核物理尚不能深入到如此低能区(对轻核,要求达到keV的能区,对中量核,要求达到 $< 1 \text{MeV}$).目前,天文学采用的核反应截面数据几乎都从高中能核反应实验数据向低能区外推而来,往往不大可靠.因为有如下两个主要原因.

1)原子核可能存在一些尚不清楚的低共振能级,它们在低能核反应中起着关键作用.例如,80年代人们在接近Gamow能区更精确地测量了 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反应的截面,发现¹⁶O

在此反应的粒子能阈下的两个共振能级及其间的干涉效应起着最重要的作用,它们使这个反应截面比过去采用值要高 3~5 倍(但目前的不确定性仍高达 50%,而恒星演化研究要求误差至少低于 20%)^[3]. 这个核反应率决定着红巨星(氦燃烧)后期的碳氧丰度比. 同时,新实验结果大大地改变了大、中质量恒星演化的图像. 例如,对于 $25m_{\odot}$ (太阳质量)以上的大质量恒星,氦燃烧结束时的主要产物并不是以往认为的 ^{12}C ,而是 ^{16}O . ^{12}C 的丰度还不到 10%. 因而这些恒星可能越过、碳氮燃烧而直接进入氧燃烧阶段,即恒星演化的进程和结局都不同于过去的理论^[4,5]. 它不仅使恒星演化理论完全改写,而且也震惊了核物理界:必须重新测定所有有关的重要核反应截面.

2)不同的外推理论结果相差可能很大. 例如,利用更新的实验数据和较好的外推方法,我们^[6]发现 $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 和 $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ 的核反应截面明显低于当前国际上采用值:在低温 [$T_9 = (0.2 \sim 0.4)$], 其中 T_9 以 10^9K 为单位]和高温 ($T_9 \geq 5.0$) 的范围内(对应于 I_a 型超新星爆炸性碳燃烧温度),对 $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 反应,当前国际采用值高估了 7 倍以上. 即使对平稳的碳燃烧 [$T_9 \sim (0.8 \sim 1.0)$]和氧燃烧 [$T_9 \sim (1.5 \sim 3.0)$],上述两个核反应的国际采用值分别高估了 (3~5)倍和 (7~9)倍. 这将对大质量恒星的演化和超新星爆发的研究带来巨的影响. 例如,大质量恒星氧燃烧阶段的温度将从 $T_9 = 2.0$ (目前值)下降到 1.5;核燃烧产能率也大为降低,恒星经历氧燃烧阶段的时标将从当前计算值(几天)大大延长到几万年. 此时,大量弱作用过程(β 衰变等)及其相关联的不稳定核素在研究中不能忽略. 它们不仅使原来计算的核反应网络更加复杂化,而且使大质量恒星的核心在经历氧燃烧阶段后,物质中的中子剩余(η)明显增长,因而在进一步硅燃烧和核统计平衡阶段后核合成的结果将有明显的改变(更加有利于形成 ^{54}Fe 或 ^{56}Fe). 此外超新星爆发前夕(铁为主)星体核心区物

质电子丰度 ($Y_e = (1 - \eta)/2$) 明显地下降, Chandrasekhar 极限质量 ($m_{\text{ch}} = 5.80Y_e^2 m_{\odot}$) 降低,坍缩的(铁)核心质量减少,可能有利于 I 型超新星的瞬时爆发机制.

3 I_a 型超新星(简记为 SNI_a)

超新星的分类及其特征请参看参考 [28]. SNI_a 是最为明亮的一类超新星,其光极大时约为太阳光度的 1.5×10^{10} 倍. SNI_a 爆发时最典型的光谱特征是:(1)没有通常最常见的氢光谱线,表明星体基本上没有氢;(2)光极大最突出的光谱线为 Si II $\lambda 6355\text{\AA}$ (吸收线),同时出现 O-Si-Ca 各元素谱线;(3)爆发晚期(即几个月以后)最强的谱线是 [Fe I]、[Fe II] 和 [Co II] (电离原子的禁戒谱线)发射线,而氧的谱线不再出现. 从光谱线的多普勒加宽现象可以估计爆发时物质最大抛射速度超过 10000km/s . 无论哪类,超新星晚期光谱中呈现的铁谱线都被认为是爆发时核合成并抛射出的 ^{56}Ni (经 ^{56}Co) 衰变为 ^{56}Fe (以 SNI_a 产生最多,每个 SNI_a 抛射的 ^{56}Fe 超过 $0.6m_{\odot}$) 也正是由于这个衰变(以及次要的 ^{57}Co 、 ^{44}Ti 衰变)放出大量的能量成为超新星能在长达几年的时间里亮度缓慢(但指数方式)地衰减(而仍然相当明亮)的能源.

目前流行的观点(“标准模型”)是^[7]SNI_a 的爆发来自密近双星中吸积的白矮星(其化学成分主要为 C、O、Ne 及 Mg). 随着吸积进程,它的质量逐渐增长(时标约 10^9a),当它的质量超过 Chandrasekhar 极限(约 $1.38m_{\odot}$, 此时白矮星半径约 1600km)时,广义相对论不稳定性(以及随后核心区物质的电子俘获过程)将导致星体坍缩. 当中心密度超过 $(2 \sim 3) \times 10^9\text{g/cm}^3$ 和温度超过 $2.5 \times 10^8\text{K}$ 时,碳燃烧开始点火(核能释放率超过中微子能损率). (电子)简并物质内的热核反应在热力学上是极不稳定的,它将引起温度和核产能率急剧增长,首先形成局部失控碳燃烧(称为“碳闪”). 这种失控的碳燃烧波逐渐加速地向

四周传播,很快地传遍整个星体,导致它在高温($3 \times 10^9 \text{K}$ 以上)的热核大爆炸.爆炸后在中心处基本上(95%可能性)不留下任何致密的残骸,即全部向外炸成碎片.其核合成的主要特征是^[7,8]:(1)合成并抛射大量的⁵⁶Ni(最后衰变为⁵⁶Fe),其数量达(0.6~1.25) m_{\odot} /每 SNI_a 的⁵⁶Fe.银河系内非常丰富的铁(及铁族元素)的一半以上是由 SNI_a 提供的;(2)它将合成相当数量的从 Si 到 Ca 的中量核素.模型预言它们之间的相对丰度不仅同 SNI_a 的光谱观测分析基本一致,也同太阳系的标准相对丰度相符合.虽然理论已取得很大的成功,但实际上理论本身的许多环节与爆发基本过程仍在探讨和争论之中,理论预言与观测之间还存在着下列一些严重的矛盾.

1) SNI_a 的前身星究竟是什么样的白矮星?由于对于导致 SNI_a 爆发的吸积白矮星质量的要求(必须是质量比较接近 Chandrasekhar 极限的大质量白矮星)以及对它周围环境[要求吸积率在($10^{-9} \sim 10^{-6}$) m_{\odot}/a 范围内,过小则导致的是新星爆发而不是超新星;过大则形成红巨星包层甚至双星的共同大气包层]的条件太苛刻,以致尚无任何观测证据,而且理论上或天文统计上都难以确定什么样的白矮星能够成为 SNI_a 的前身星.虽然人们较多地研究 C+O 白矮星导致 SNI_a 的爆发,但从光谱研究在密近双星中找到的(接近 $1.30m_{\odot}$)大质量白矮星大多数都是 ONeMg 白矮星而不是 C+O 白矮星.近年来人们开始研究吸积的 ONeMg 白矮星(但它最后是坍缩成中子星或是导致 SNI_a 的爆发问题尚未定论)以及双白矮星系统导致 SNI_a 的可能性.

2) 碳燃烧点火的类型和地点问题 对 C+O 白矮星引起的 SNI_a 来说,点火时碳燃烧究竟是通常的热核反应呢或是 C+O 晶格点阵的零点振动能引起的核反应呢?此外,核燃烧首先点火的地点是在星体中心或是中心以外的某处呢?这些是相当复杂的问题,它们同一系列尚未探明的因素密切相关^[9].例如,星

体中心的密度、温度和星体内温度分布,等离子体激元的中微子发射以及对流驱动的 Urca (中微子发射)过程的作用等.更重要的因素是白矮星内 C+O 合金是无序或是有序状态或者甚至处于 C、O 分离(固态氧聚集在星体中心)的状态的确定.例如:(1)对无序的 C+O 合金状态来说,星体中心碳燃烧点火时物质密度在相当大的范围内[($2 \sim 3$) $\times 10^9 \sim 1.5 \times 10^{10} \text{g/cm}^3$]都是可能的,其具体值是由白矮星的初始质量吸积率和内部温度来决定的,目前仍当成可调参数.但当星体中心密度在 $9.5 \times 10^9 \sim 1.5 \times 10^{10} \text{g/cm}^3$ 范围内的,碳燃烧是由晶格点阵的振动能触发的.而当中心密度在($2 \sim 3$) $\times 10^9 \text{g/cm}^3$,且核心区温度超过 $1 \times 10^9 \text{K}$ 时,碳燃烧则是通常的热核反应.(2)如果处于有序 C+O 合金状态,且氧(数目)含量高于碳,则核反应 $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$ 是不会发生的.只有在 $\rho_c \simeq 2 \times 10^{10} \text{g/cm}^3$ 时, $^{12}\text{C} + ^{16}\text{O}$ 和 $^{16}\text{O} + ^{16}\text{O}$ 的核反应及¹⁶O 电子俘获过程才能大量发生.(3)如果白矮星是内处于 C、O 分离状态,并且引入逐渐增长的对流核心(这时对流驱动的 Urca 过程将起作用)将导致核反应在中心外面某处首先点火.1989 年,Godon 等人利用固体物理方法研究发现:在 1% 的精度内,C 和 O 的微观分离并不需要能量^[10],因而目前无法决定它们的状态.现今所有计算研究工作的假设都缺乏可靠根据.

3) 核燃烧波前的传播问题 白矮星内核反应一旦点火,它会很快地发展为局部失控热核燃烧,并立即向内外扩散.初始时刻,它总是通过热传导而后发展为湍流混合,但燃烧波的波前开始时以($10^{-2} \sim 10^{-3}$)倍声速(声速约为 9500km/s)亚声速传播(称为爆燃波),随后加速地传播.但是,燃烧波前究竟是自始至终都是亚声速传播呢?或是发展为超声速的爆轰波(形成激波)呢?这正是人们目前研究的焦点问题之一,因为它是决定着 SNI_a 最后核合成结果的关键问题:当核燃烧波前传播速度接近或超过声速时,星体膨胀也不会明显抑制失控热核反应导致的温度剧

增,星体绝大部分的温度将上升到 $8 \times 10^9 \text{K}$ 以上,核燃烧达到原子核间热统计平衡阶段(称为完全核燃烧),其产物绝大部分都变为铁族元素;如果核燃烧波前的传播速度始终保持远低于声速,则失控热核燃烧引起的温度增长在相当程度上被星体热膨胀所抵消,星体温度最高只能达到 $(3 \sim 5) \times 10^9 \text{K}$,大多数物质只经历着不完全核燃烧(最多进入硅燃烧而不会达到核统计平衡状态),产生的核素主要是从 Si 到 Ca 的中量核素.近来多数人倾向于改进的爆燃波模型(称为延迟爆轰波模型):人为地调节爆燃波前的传播速度,使它加速地最后演变为爆轰波.但不仅要考虑因电子俘获过程(它使电子的 Fermi 能的一部分转变为原子核的热运动能)加热而使晶体状态熔化为液体状态^[9],对流驱动的 Urca 过程(发射中微子),而且强烈地依赖于流体动力学的不稳定性(主要是 Rayleigh-Taylor 不稳定性)以及燃烧波前的严重扭曲(Woosley 引入分数维的燃烧波前^[8]),这正是当前研究的重大难题之一.

4) Branch-Pakovskii 相关性 虽然所有的 SNI_a 的光变曲线(包括光极大时的光度和光度衰减方式)都相近,但实际上不同 SNI_a 的光极大光度、光度衰减速率及光极大时物质抛射速度等观测量之间不仅有差别^[11,12],而且它们之间存在着统计相关性:(光度)愈亮的 SNI_a,其(光球)膨胀速度愈快,光极大后光变曲线下落愈缓慢.这称为 Branch-Pakovskii 相关性^[13,14],它已成为 SNI_a 模型需要解释的重要现象,但迄今尚未有合理的解释.

5) 核合成问题 虽然现有的 SNI_a 模型可以相当成功地合成足够数量的 ^{56}Ni (衰变为 ^{56}Fe)以及适当数量的中量(从 Si 到 Ca)核素,但是所有模型都几乎不可避免地合成过多的 ^{54}Fe 和 ^{58}Ni ($^{54}\text{Fe}/^{56}\text{Fe}$ 和 $^{58}\text{Ni}/^{54}\text{Fe}$ 的相对丰度分别比太阳系“标准”值高出 5 倍和 2 倍).其物理原因是由于低速爆燃波的传播时标较长,高密简并物质中电子俘获过程大量进行,

它使核物质“中子化”过程加速,中子剩余增长到使丰中子核 ^{54}Fe 、 ^{58}Ni 较多地合成.这个矛盾有时称为“电子俘获”问题^[7]. Woosley 提出碳燃烧的“延迟爆轰波”模型^[8]不仅未解决 ^{54}Fe 、 ^{58}Ni 过多的矛盾,还得出每个 SNI_a 可以合成并抛射 $10^{-4} m_{\odot}$ 的 ^{60}Fe ,在长达 $2 \times 10^6 \text{a}$ (^{60}Fe 的平均寿命)期间内银河系内可以累积 $1 m_{\odot}$ 的 ^{60}Fe ,现代空间观测技术可以探测到它衰变时放射的 59keV、1.17MeV 和 1.33MeV 三条(等强度) γ 光子发射线,但这个预言未能被空间探测所证实^[8].这些矛盾是现有 SNI_a 理论最大的困难之一.此外,现有 SNI_a 模型还预言产生大量的 ^{16}O ,而在 SNI_a 晚期光谱中却缺乏明显的氧的谱线^[8].

应该强调,如果我们关于核反应 $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$ 截面^[6]远低于目前国际采用值的结论是正确的,那将对 SNI_a 的爆发理论产生重大影响.

4 I 型超新星

一般认为,初始主序质量较小的恒星 ($0.5 m_{\odot} < m_{\text{主序}} < 8 m_{\odot}$) 经过氢、氦燃烧阶段后将经过红巨星的渐近分支阶段(AGB 阶段)而演化为白矮星加上外围的行星状星云^[5].而 $m_{\text{主序}} > 8 m_{\odot}$ 的恒星将经历碳燃烧或其后继的核燃烧阶段,最后演化为剧烈的超新星爆发.对于初始主序质量不大的恒星 ($8 m_{\odot} < m_{\text{主序}} < 25 m_{\odot}$),在经历 I 型超新星爆发后,其核心将残留一个中子星(质量约为 $(1 \sim 2) m_{\odot}$),而 $m_{\text{主序}} > 25 m_{\odot}$ 的大质量恒星,超新星爆发后,其核心可能坍缩成为黑洞.质量范围在 $8 m_{\odot} < m_{\text{主序}} < 12 m_{\odot}$ 的恒星晚期热核燃烧与简并核心(其核燃烧是失控的,相当不稳定)间的复杂关系尚未探明^[2,4],而质量非常巨大的恒星[例如, $m_{\text{主序}} > (40 \sim 60) m_{\odot}$],其氢、氦燃烧阶段的巨大辐射压强、等离子体湍动不稳定性以及脉动不稳定性(不仅外层大气的部分电离区不透明度变化导致不稳定,而且此时核心区热核燃烧也具有脉动不稳定,)等因素导致的星风质量损失规律尚未搞

清楚,而且大质量恒星核心区如何坍缩成黑洞的具体过程更不清楚^[15]. 上述质量范围的恒星演化及其超新星爆发过程是近年来人们探讨的热门课题,但至今尚未有明确的图像. 近 20 余年来研究得较多、爆发前恒星演化图像比较明确的是质量范围在 $12m_{\odot} < m_{\text{主序}} < 25m_{\odot}$ 的恒星. 下面简要介绍有关它们最后的 (I 型)超新星爆发的标准模型及其存在的关键疑难问题.

这些恒星演化将经历氢、氦、碳、氦、氧及硅各个可能的热核燃烧阶段,最后形成一个基本上由铁族元素组成的核心,其质量约为 $(1.10 \sim 1.25)m_{\odot}$. 其外面从内向外依次分布着硅、氧、氦、碳、氦、氢各个燃烧壳层以及更外面的很厚的大气包层(这种结构称为“葱头模型”)^[2]. 这时核心区密度超过 $2 \times 10^9 \text{g/cm}^3$ 简并电子气体的 Fermi 能超过了 ^{56}Fe 核上的电子俘获能阈值,因而 $^{56}\text{Fe} \xrightarrow{e^-} ^{56}\text{Mn} \xrightarrow{e^-} ^{56}\text{Cr}$ 过程大量进行,电子丰度下降,电子简并压不能抗拒引力的压缩. 在核心收缩过程中,不仅物质密度增长,加速电子俘获过程,而且温度将急剧上升到 10^{10}K 以上,按 Planck 分布的高能热光子致使铁核光致裂解,消耗大量热能. 上述过程联合作用使向内的(万有)引力远远超过气体压强(此时,绝热指数大大低于稳定性的临界值 $4/3$. 事实上,由于电子俘获过程大量进行,电子丰度(Y_e)下降到约 0.36,它使 Chandrasekhar 极限质量($m_{\text{ch}} = 5.80Y_e^2 m_{\odot}$)下降到约 $0.75m_{\odot}$,广义相对论不稳定性最后导致了星体核心急剧地向内坍缩. 坍缩过程图像如下:内核心(约 $0.5 \sim 0.7m_{\odot}$)亚音速地均匀坍缩(降落速度同它离中心的距离成正比);外核心几乎自由落体地坍缩(速度约为自由落体速度的一半)、其最大速度为 $1/8$ 光速. 核心以外的星幔及整个大气包层也都相继地向内坍缩. 当中心处达到原子核密度的 2~4 倍(不确定性同所采用的核物质状态方程紧密相关),内核心坍缩突然停止,释放的引力能可达 $6 \times 10^{44}\text{J}$ 释放的引力能随压强波向外传播,在内外核心交界面外约 $0.2m_{\odot}$ 处堆

积而形成一个外快速行进的反弹激波(Mach 数略大于 1)坍缩到反弹激波的形成时标仅约 20ms),峰值温度可达 10^{11}K . 如此高温下的热光子($E_{\gamma} \sim 10\text{MeV}$)立即将激波路径附近的铁族原子核几乎全部光致碎裂($^{56}\text{Fe} \rightarrow 13\alpha + 4n$,并将 α 粒子进一步裂解为质子和中子),平均耗能 8.8MeV/u 以上或约 $1.5 \times 10^{44}\text{J}/0.1m_{\odot}$,它使反弹激波很快地衰减. 如果外核心不大(小于 $0.4m_{\odot}$),则激波仍能穿透这个核心. 此后它的温度降到 10^{10}K 以下,不能使原子核进一步光致裂解,但只要残存的激波能量为初始时的 1%(即 10^{42}J)以上,它就足以使星体核心以外的物质(包括整个星幔和大气包层)猛烈地向外抛射. 而且星幔内各个核燃烧壳层相继爆炸性核燃烧加速了这个过程. 通过光谱观测到的各种(除氢、氦以外)元素都是通过星幔中的爆炸性核燃烧过程合成的. 这种超新星爆发机制称为 SN I 的瞬时爆发机制. 但是,人们发现,除了极特殊的模型外,上述超新星核心的质量都太大,超过了 $1.1m_{\odot}$ (外核心超过 $0.4m_{\odot}$),因而反弹激波尚未穿透铁核心之前就已经完全消失,外围物质继续向内坍缩而形成向内的吸积驻激波,因而不能触发超新星的向外爆发. 这是 70 或 80 年代困惑核天体物理学家最重大的疑难问题.

1982~1984 年, Wilson 提出的“中微子延迟爆发”机制^[17]已成为当今 I 型超新星爆发机制研究的主导方向. 根据最近的观点^[16],在星体核心坍缩后形成的高温(10^{11}K)的质子中子星将发射 $5 \times 10^{45}\text{J}$ 以上的中微子(这是从 SN1987A 探测到的中微子总能量),其平均能量约 $10\text{MeV}/(\nu, \bar{\nu})$. 在物质密度高达 $3 \times 10^{11}\text{g/cm}^3$ 的高密区,由于中微子同物质相互作用 $[\nu e^- (e^+) \text{ 散射和 } \nu N \text{ (重原子核) 相干散射 (其截面正比于 } A^2)]$,中微子的平均自由程远小于星体致密区半径,因而 $(\nu, \bar{\nu})$ 暂时滞留在星体核心区附近,形成中微子球,半径约 40km,表面物质密度约为 10^{11}g/cm^3 中微子逐渐从其表面泄漏出来的时标约为 1s,这

些中微子通过与物质相互作用,把能量与动量传递给吸积驻激波,逐渐使它很快减弱并转向为外向流,使原已消失的反弹激波复活,导致了超新星的爆发.虽然上述图像是很诱人的,但实际上下列关键问题并未得到解决.

1)强大中微子流产生的具体物理机制是什么?产生的时标有多大?实际上,Wilson最初的设想是它们自洽地产生于吸积驻激波波阵面后(朝向中心一侧)的高温(10^{10}K)、高密($>3\times 10^{11}\text{g/cm}^3$)区域内自由核子上的电子(或正电子)俘获过程.但这种可能性很快地被较合理的星体模型计算否定.例如,1993年Burrows & Goshy从吸积驻激波的稳定性研究中发现,这种自洽方式能有效提供上述强大中微子流的必要前提是物质向内降落吸积率须高于某个临界值(约 $20m_{\odot}/\text{s}$)^[18],远高于目前估计合理值($0.1\sim 0.5$) m_{\odot}/s)^[19].因此,Wilson & Mayle修改了他们的假设^[20,21],即上述强大中微子流主要来自坍缩核心刚形成的高温质子中子星.此后,高温质子中子星通过哪些具体的物理过程来产生如此强大(而且在SN1987A中已探测到)的中微子流,已成为超新星爆发机制研究中的核心问题之一.1993年,Mayle等人研究了 π 介子核物质状态方程对超新星爆发动力学的影响^[22].同年Gentile等人研究了从核物质到(u,d)夸克物质的相变对超新星爆发的影响^[23].这些研究对上述中微子流的产生问题并未得到本质上的解决.

2)即使假定了从刚形成的高温质子中子星内能够在很短的时标内产生如此强大的中微子流,那么它们如何能在0.5s内从致密核心中输运出来?在中微子球内它们又如何具体地同物质相互作用而从中微子球内泄漏出来?这些正是近年人们研究得较多的问题.事实上,由于在中子星内,密度高于 10^{13}g/cm^3 ,中微子从其中扩出来的时标将长达几十秒,因而不能依靠中微子扩散机制.人们提出了各种可能的对流方案来解决这个问题.例如,1988年Wilson & Mayle提出了neutron-fin-

ger(或称双扩散)不稳定性引起的对流^[20],其时标为几百毫秒.1993年Burrows & Fryxell提出^[24]:在最初10毫秒内由负熵梯度引起Schwarzschild对流(但在15毫秒后负熵梯度就会被抹平),而10毫秒后物质对流是由轻子数的负梯度(即轻子数随径向向外而减少)引起的Ledoux对流.由于上述对流过程,可以提高中微子光度,引起中微子闪耀.

3)观测表明,超新星爆发过程中物质抛射的总动能为 10^{44}J ,其物质最大抛射速度可达 $1\times 10^4\text{km/s}$ (SN1987A的最大抛射速度达 $3\times 10^4\text{km/s}$).现今绝大多数I型超新星模型计算甚至都无法自洽地解决爆发机制,当然更无法算出如此巨大的抛射动能.即使极特殊的可爆发的模型,也无法得到如此巨大的爆发动能.

4)按照现有的模型,强大的中微子反冲压强将使超新星核心同外围的星幔物质明显地分离开来,其间形成一个密度非常低(约 10^4g/cm^3),而辐射场非常强(温度达 10^{10}K 以上)的“辐射泡”^[16].强大的辐射压驱使其外面星幔物质内的(向外)快速激波复活,引起SN I的爆发.而这“真空辐射泡”区域很可能是重核素合成的快中子俘获过程的主要场所^[27].此外,Woosley提出,在SN I内中微子诱导的核反应可以合成相当数量的 ${}^7\text{Li}$ 、 ${}^{11}\text{B}$ 、 ${}^{19}\text{F}$ 、 ${}^{22}\text{Na}$ 、 ${}^{26}\text{Al}$ 等核素^[7,8].但这些问题至今只是相当粗糙的观念,是否合理和正确尚在激烈争论之中.

南京大学天文系最近也参与了超新星爆发机制的探讨研究^[25,26].我们从Gentile等人1993年的研究^[23]出发,进一步提出与计算了新生的高温质子中子星内(u,d)两味夸克物质转变为包括奇异夸克在内的三味(u,d,s)夸克物质的相变过程: $u+e^{-}\leftrightarrow d+\nu_e$, $u+e^{-}\leftrightarrow s+\nu_e$, $u+d\leftrightarrow u+s$.获得如下结论:(1)在相变过程中产生的中微子总能量可达 $8\times 10^{45}\text{J}$,比前人理论提高了1~2倍;(2)相变时标短于 $1\mu\text{s}$;(3)中微子温度可增高2~3倍,使每个中微子能量明显增加,大大有利于中微

子加热机制(即中微子能量部分转移给物质的热运动能量);(4)相变过程使内核心物质比熵明显增加,而外核心物质比熵不变,导致从内向外较大的负熵梯度,引起大规模的 Schwarzschild 对流,使(30~50)%的中微子在大约 0.5s 内从新生质子中子星内释放出来,这大大有利于 SN I 的爆发;(5)中微子光度比原有理论提高了 2~3 倍,超过了 Burrows & Goshy 提出的能使吸积驻激波反转为外向激波的中微子光度下限的要求^[18],能实现中微子延迟爆发机制;(6)Burrows & Goshy 发现^[18],通过“中微子加热”机制(转化效率约为 1.4%),中微子能量转化为超新星爆发的动能近似正比于中微子光度的 3.5 次方.而我们计算的中微子光度比原有理论提高 2~3 倍,因而有希望成为超新星的强爆发模型.

但是,我们的上述研究仅限于一种特殊的爆前星体模型.至于对更多、更普遍的星体模型,上述图像是否仍然成立?目前北京应用数学所超新星研究小组正在进一步研究这个问题.

5 星际²⁶Al 问题

80 年代初期人们就已经探测到较强的星际 1.809MeV γ 射线,它是²⁶Al 衰变为²⁶Mg 过程(半衰期为 7.2×10^5 a)伴随出现的.由此推算银河系内目前存在着 $2 \sim 3m_{\odot}$ 的²⁶Al.它们是通过哪些类型恒星内部合成产生的?这是当代核天体物理学的重大疑难问题之一.几乎绝大多数恒星演化学家、新星与超新星理论研究者及许多核物理学家都卷入到这个问题的研究,但至今仍然是个迷惑不解之迷.本文作者从 MgAl 反应链以及相关的 NeNa 循环出发,结合最新的核物理实验结果,分析了当前所有有关星体模型在星际²⁶Al 问题上面临困难的物理原因,并提出通过反应 $^{14}\text{N} + ^{16}\text{O}$ 合成²⁶Al 的 SNI_a 模型的初步设想^[28,29].

最后,我借此文介绍如下一些值得研究的重要课题供我国学者参考.

1)关键性热核反应,例如, $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 、 $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$ 和 $^{16}\text{O} + ^{16}\text{O}$ 的实验研究,以及它们对大、小质量恒星演化,对 SN I 和 SNI_a 爆发的研究.

2)SN I 的中微子延迟爆发机制的研究,特别结合核物理理论研究超新星核心内中微子流的产生和输运过程,中微子球以及它同降落物质的相互作用,导致星体爆发的外行激波的复活过程.

3)结合对 $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$ 核反应的研究,对 SNI_a 爆炸性碳燃烧的爆燃波和爆轰波混合模型进行深入的数值模拟计算研究.

4)对星际放射性核素(特别是²⁶Al、²²Na、⁴⁴Ti 和⁵⁶Co)的有关核反应及其天体来源进行实验与理论研究.结合国际上有关进展,分析迄今国际上已提出的有关星际²⁶Al 来源的种种天体模型(特别是有关新星、SN I 和 SNI_a 模型)的优缺点和不成功的具体原因(特别是核物理原因),并从核物理角度寻求产生星际²⁶Al 的其它可能核合成方式及其天体来源(例如 SNI_a)的可能性.

5)对化学特殊星(特别是处于 AGB 阶段的红巨星)的天文(分光)观测研究,以期待发现与收集大样本的 S 核素和¹⁹F 反常丰富的化学特殊星的观测资料.此外,利用核物理的实验手段,开展化学成分反常的陨石的核化学分析研究,以探讨原始太阳系星云的化学元素丰度分布.

6)从核物理实验和理论上研究重元素核合成的 s 过程和 r 过程中起关键作用的中子俘获截面问题以及研究各种可能的中子源.

7)对于红巨星的 AGB 演化阶段的核合成过程及其环境进行理论研究,并结合天文红外和射电观测资料,分析 S 核素(如 Ba、Sr、Zr、Tc)及¹⁹F 呈现反常超丰的天体物理原因,由此促进中小质量恒星演化以及行星状星云形成过程的研究.

8)探讨新星爆炸性核燃烧和 rp 核合成问题,重点对²⁰Na、²⁷Si 等重要短寿命不稳定核素的结构和有关核反应进行实验研究.

9)利用放射性束流研究远离 β 稳定线的短寿命丰中子核的性质及其有关核过程.结合超新星爆发的研究,探讨 r 过程核合成的天体物理场合与性质,并探讨核物理学上迄今未能发现自然存在超重核素稳定岛的天体物理原因.

10)开展在中子星超强磁场下热核反应的研究,探讨I型X射线爆和宇宙 γ 射线爆的关键物理环节.

11)对非均匀宇宙大爆炸理论中重要的短寿命核素及其有关过程(如 ${}^8\text{Li}(\alpha, n){}^{11}\text{B}$ 共振态性质)进行实验研究,并开展原初宇宙核合成的研究.

12)积极开展核X射线、核 γ 射线天文学与宇宙线天文学的研究.

参 考 文 献

- 1 彭秋和. 物理通报, 1993, 5: 1
- 2 Woosley S E. Nucleosynthesis and Chemical Evolution, Geneva Observatory, Switzerland, 1986, 1
- 3 Barker F C. Proc. of International Symp. on Nucl. Astrophysics 'Nuclei in the cosmos', 1990, MPA/4, 163
- 4 Chiosi C. Nucleosynthesis and Chemical Evolution, Geneva Observatory, Switzerland, 1986, 199
- 5 Kippenhahn R, et al. Stellar Structure and Evolution, Springer-verlag Berlin Heidelberg, 1990
- 6 何建华等. 天体物理学报, 1992, 12: 122
- 7 Woosley S E. Supernovae, Springer Verlag Berlin, 1990, 182
- 8 Woosley S E. Supernovae, Elsevier Science Publishers B. V., 1991, 1
- 9 Canal R, et al. Supernovae, Spriger Verlag, New York, Inc., 1991, 535
- 10 Godon P, et al. White Dwarfs, Berlin; Springer Verlag, 1989, 85
- 11 Branch D, et al. Ap. J. (Lett.), 1982, 252: L81
- 12 Phillips M M, et al. Pub. Astrom. Soc. Pacific, 1987, 99: 592
- 13 Pskovskii Y P. Soviet Astron., 1977, 21: 675, 1977, 28: 658
- 14 Branch D. Ap. J., 1982, 285: 35
- 15 Langer N, et al. Astron. Astrophys., 1994, 290: 819
- 16 Bethe H A. Rev. Mod. Phys., 1990, 62: 801
- 17 Wilson J R. Numerical Astrophysics, Boston: Jones and Bartlett, 1985, 422
- 18 Burrows A, et al. Ap. J., 1993, 416: L75
- 19 Bethe H A. Ap. J., 1993, 412: 192
- 20 Wilson J R, et al. Phys. Rep., 1988, 163: 63
- 21 Wilson J R, et al. Phys. Rep., 1993, 227: 97
- 22 Mayle R W, et al. Ap. J., 1993, 418: 398
- 23 Gentile N A, et al. Ap. J., 1993, 414: 701
- 24 Burrows A, et al. Ap. J., 1993, 418: L33
- 25 戴子高等. 天文学报, 1994, 35(4)
- 26 戴子高等. Ap. J., 1995
- 27 Woosley S E, et al. Ap. J., 1994, 433: 229
- 28 彭秋和. 物理学进展, 2(1995)1
- 29 彭秋和. 4th MPG-CAS Workshop on high Energy Astrophysics and Cosmology, 1993, 74

Some Puzzles in Nucleoastrophysics

Peng Qiuhe

(Department of Astronomy, Nanjing University, Nanjing 210093)

Abstract Some puzzles being anxious to be solved are reviewed in this paper, which include cross sections of the nuclear reactions being important for the stellar evolution, the key problems and difficulties in the theory of both type I_a and I supernova, and the problem of interstellar medium ${}^{26}\text{Al}$. Some research subjects of nucleoastrophysics are also proposed.

Key Words nucleoastrophysics, stellar evolution, supernova, interstellar medium ${}^{26}\text{Al}$.