

原子核天体物理简介*

钱永忠^{1,2,3,†}

(1 明尼苏达大学物理与天文系 美国 明尼苏达 55455)

(2 上海交通大学核天体物理中心 上海 200240)

(3 北京航空航天大学物理科学与核能工程学院 北京 100191)

2013-05-03 收到

† email: qian@physics.umn.edu

DOI: 10.7693/wl20130702

A brief introduction to nuclear astrophysics

QIAN Yong-Zhong^{1,2,3,†}

(1 School of Physics and Astronomy, University of Minnesota, Minneapolis, MN 55455, USA)

(2 Center for Nuclear Astrophysics, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

(3 School of Physics and Nuclear Energy Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

摘要 文章对原子核天体物理这一门重要交叉学科作了简单的介绍, 并以一批获得诺贝尔物理奖的成果为线索, 重点描述了大爆炸宇宙学、太阳中微子、恒星演化及其终点以及原子核物理与元素的起源等方面的进展与挑战。

关键词 核天体物理, 大爆炸宇宙学, 太阳中微子, 恒星演化, 元素核合成

Abstract A brief introduction to the important interdisciplinary field of nuclear astrophysics is given. With a number of results recognized by the Nobel Prize in Physics as a guide, the progress and challenges are described mainly for the big bang cosmology, solar neutrinos, stellar evolution and its end points, as well as nuclear physics and the origin of the elements.

Keywords nuclear astrophysics, big bang cosmology, solar neutrinos, stellar evolution, nucleosynthesis

* 国家自然科学基金(批准号: 11128510)资助项目

1 引言

原子核天体物理是一个令人振奋的重大交叉学科，在国际上一直作为基础研究领域的一个重要方向而备受关注。(原子)核天体物理的目的是，用构成物质的基本粒子的属性和相互作用来解释宇宙和各种天体环境中发生的纷繁复杂的现象。基本粒子和原子核的性质及其相互作用决定了宇宙和天体环境中各种释放能量或损耗能量以及改变粒子和原子核种类的微观过程，这些过程不仅直接影响初始宇宙中的大爆炸核合成和这以后恒星的形成、演化及核合成，而且还导致超新星、伽马暴等极端天体现象的发生。因此，核天体物理从宏观环境中的微观过程出发，对天体和星系的形成与演化以及元素的起源与宇宙的化学演化做细致深入的研究，从而在最小和最大的物质尺度之间架起了一座座奇妙的桥梁(见图1)。

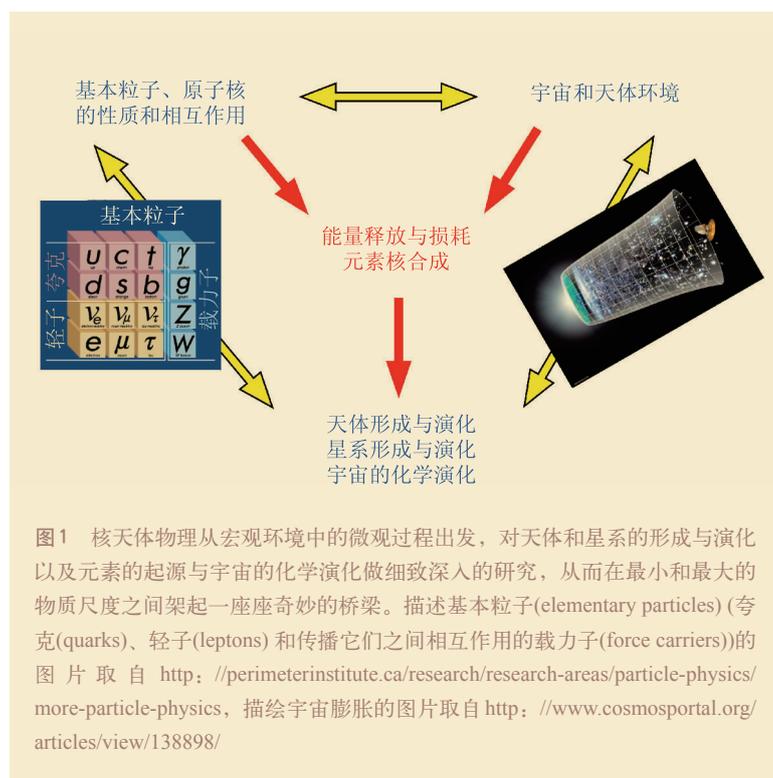
经过前20多年大量实验、观测和理论的研究，这一学科得到了飞跃的发展。突破性的重大成果包括：

(1)根据大爆炸核合成理论推出的宇宙重子密度与通过测量宇宙背景辐射各向

不均匀性得到的结果完全一致，这有力地支持了标准宇宙模型的建立；

(2)基于暗物质和暗能量的标准宇宙模型，为了解星系的形成和演化提供了坚实的理论基础，也给出了第一代恒星形成的初始条件；

(3)太阳内部核燃烧产生的中微子已被若干个实验所探测到，中微子振荡被实



验证实，从而揭示了超出标准粒子物理模型的现象；

(4)中微子在天体演化和爆炸以及各种元素核合成过程中所起的作用越来越明确，这使基本粒子和元素起源的关系更加密切；

(5)超新星爆发模型的发展以及对伽马暴和极超新星等崭新天体现象的观测和理论解释极大地增进了对核合成天体环境的了解；

(6)通过大型望远镜对各类恒星、星团及星系的元素丰度观测，为宇宙的化学演化提供了大量可靠的数据。

2 与核天体物理有关的诺贝尔物理学奖

下面以一批获得诺贝尔物理学奖的成果^[1](见表1)为线索，简单介绍一些核天体物理方面的研究工作，包括新近的进展和目前的挑战。

表1 若干与核天体物理有关的诺贝尔物理学奖

年度	获奖者	成果	相关讨论
1935	Chadwick	发现中子	见2.4节
1936	Hess	发现宇宙射线	见2.4节
1936	Anderson	(发现正电子)	
1938	Fermi	中子反应实验	见2.4节
1949	Yukawa	核力理论与介子的预言	见2.4节
1963	Wigner	核与粒子物理中的对称性原理及应用	见2.4节
1963	Mayer, Jensen	核壳层模型	见2.4节
1967	Bethe	核反应理论与恒星能源	见2.2节
1974	Ryle	(射电天文观测技术)	
1974	Hewish	发现脉冲星	见2.3.2节
1975	Bohr, Mottelson, Rainwater	核集体模型	见2.4节
1978	Kapitsa	(低温物理技术)	
1978	Penzias, Wilson	发现宇宙背景辐射	见2.1节
1983	Chandrasekhar	恒星结构与演化理论	见2.3.1节
1983	Fowler	核反应与元素的起源	见2.4节
1988	Lederman, Schwartz, Steinberger	发现 μ 中微子	见2.1节和2.3.2节
1993	Hulse, Taylor	发现双脉冲星系统及验证广义相对论	见2.3.2节
1995	Perl	(发现 τ 轻子)	
1995	Reines	发现电子反中微子($\bar{\nu}_e$)	见2.1节和2.3.2节
2002	Davis	太阳中微子观测	见2.2节
2002	Koshiha	大气、太阳及超新星中微子观测	见2.2节和2.3.2节
2002	Gioconni	发现宇宙X射线源	见2.3.2节
2006	Mather, Smoot	发现宇宙背景辐射能谱及各向不均匀性	见2.1节
2011	Perlmutter, Schmidt, Riess	发现宇宙加速膨胀	见2.3.1节

2.1 大爆炸宇宙学和宇宙背景辐射

1929年, Hubble 通过光谱分析发现银河系周围的星系都在离它远去, 这个观测事实是大爆炸宇宙学(big bang cosmology)的一个重要依据。宇宙的膨胀自然地解释了星系光谱的红移, 而膨胀的起点就是宇宙创生之刻的大爆炸。经历了一段极其短暂的剧胀(inflation)之后, 初始宇宙处于一个包含所有基本粒子的极高温状态, 这些粒子之间只有一种相互作用。由于宇宙的温度随着膨胀而降低, 这种统一的相互作用最终分化成对应于低能量尺度上的弱、电磁和强相互作用。伴随着这个过程发生的还有一个重要事件: 净重子数(net baryon number)的产生, 也就是说, 从某个时刻开始, 宇宙中的重子数(B)比反重子数(\bar{B})多出远小于它们总数的某个值($B - \bar{B} \ll B + \bar{B}$)。随着温度的降低, 反重子与相同数目的重子湮灭, 只有极小一部分重子剩下来作为宇宙中普通物质的来源。对应于温度为 $T \leq 100 \text{ MeV}$ 或时间为 $t \geq 10^{-4} \text{ s}$ 的宇宙历史, 用成熟的物理知识就可以做如下描述: 此时, 夸克和胶子已经凝聚成中子和质子这两种重子, 宇宙中其他的主要粒子还有光子、电子、正电子以及三种不同味态(e, μ, τ)的中微子和反中微子。当温度降至约 0.07 MeV 时($t \sim 200 \text{ s}$), 中子已经和适当数目的质子合成为 ^2H , ^3He 和 ^7Li 等原子核(此即大爆炸核合成), 稍后正电子跟相同数目的电子湮灭, 剩下的电子正好中和所有原子核(包括大爆炸核合成用剩下来的质子)的正电荷。当温度降至约 0.3 eV 时($t \sim 4 \times 10^5$ 年), 电子与原子核结合形成原子, 这使光子不再有效地与普通物质发生相互作用。此后, 这些早期宇宙中的光子毫无阻碍地走向未来, 成为我们今天观测到的宇

宙(微波)背景辐射(cosmic microwave background radiation)。

Penzias 和 Wilson 因发现宇宙背景辐射而获得了1978年的诺贝尔物理学奖。有意思的是, 与他们分享那个奖的Kapitsa是低温物理的先驱, 而测量温度仅为 2.7 K 的宇宙背景辐射需要低温技术来冷却探测仪器的某些部件。宇宙背景辐射具有高度的各向同性, 并且它的能与黑体辐射高度吻合, 这为早期宇宙经历的热平衡状态提供了最直接的证据。但是, 宇宙创生时刻的量子涨落必定导致物质分布的不均匀性, 从而给背景辐射打上偏离各向同性的印记。Mather 和 Smoot 领导了COBE卫星实验对宇宙背景辐射能谱及其各向不均匀性(anisotropy)的首次精确测量, 因此获得了2006年的诺贝尔物理学奖。

Einstein 的广义相对论是描述宇宙时空结构的基本理论, 在这个框架内考虑普通物质和光子的耦合以及所有物质分布的不均匀性随时间的演化, 我们便可以根据不同的物理参数组合来计算对应的宇宙背景辐射的各向不均匀性。因此, 通过对这种各向不均匀性的观测, 就可以得出描述宇宙的确切物理参数组合。换言之, 宇宙背景辐射是一块解读宇宙物理参数的罗塞塔石碑(Rosetta Stone: 该石碑因刻有三种不同语言的同一段内容而成为研究古埃及历史的重要工具)。最近由 WMAP^[2](Planck^[3]) 卫星实验得出的宇宙的三个重要参数为: 暗能量(dark energy) 约占现在宇宙总能量密度的 72% (68%), 暗物质(dark matter) 约占 23% (27%), 而普通物质只占约 5% (见图 2)。最后一个参数对应的重子—光子比约为 6×10^{-10} , 即早期宇宙演化产生的净重子数不到光子总数的 10^{-9} 。

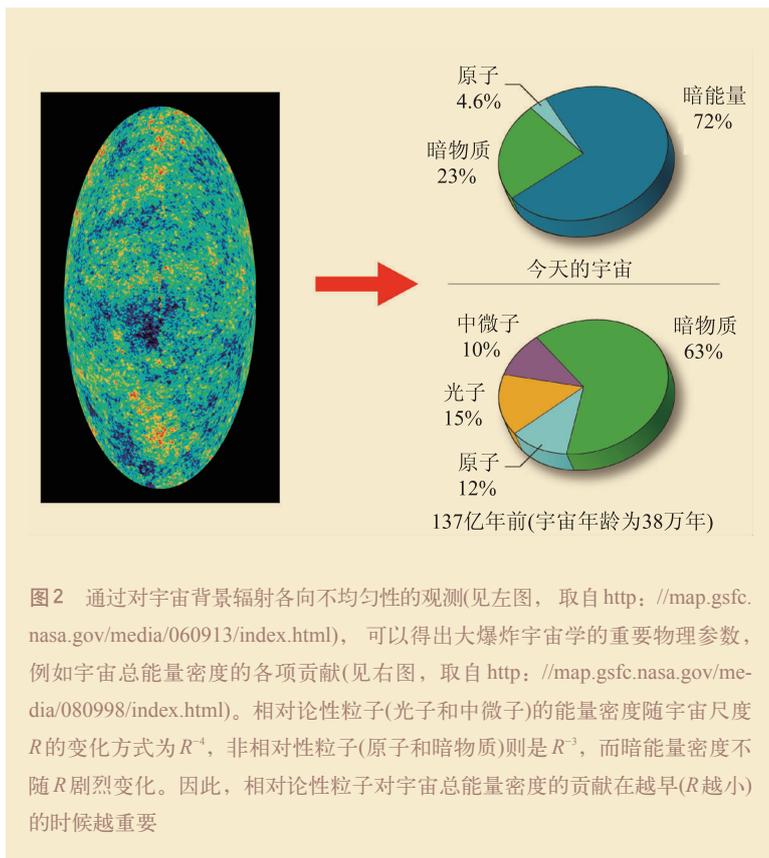
经典的大爆炸核合成理论^[4]只依赖于

两个参数：重子—光子比和温度约为 0.07—1 MeV 时宇宙中所有其他相对论性粒子与光子的能量密度比，而对后者的依赖性来自宇宙的膨胀率。Einstein 的广义相对论表明，宇宙的总能量密度决定它的膨胀率。相对论性粒子的能量密度随宇宙尺度 R 的变化方式为 R^{-4} ，非相对论性粒子则是 R^{-3} ，而暗能量密度不随 R 剧烈变化。因此，相对论性粒子对宇宙总能量密度的贡献在越早 (R 越小) 的时候越重要 (见图 2)，以致于在温度高于约 1 eV 时占主导地位。如果只有光子、电子、正电子和三种不同味态的中微子和反中微子对温度约为 0.07—1 MeV 时的宇宙总能量密度有贡献，那么大爆炸核合成所给出的元素丰度只依赖于重子—光子比。根据观测到的早期宇宙中氘 ($d \equiv {}^2\text{H}$) 的丰度，我们发现其对应的重子—光子比与通过观测宇宙背景辐射各向不均匀性得到的结果完全吻

合，而且相应的氦 (主要是 ${}^4\text{He}$) 丰度的理论值也与观测值一致。

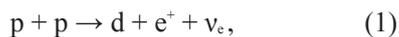
由上面的简略介绍可以看出，大爆炸宇宙学已经得到了宇宙背景辐射以及氦和氘的初始丰度等可靠的观测验证。在这个框架内，用两种不同的方法获得了一致的重子—光子比，这进一步说明了该宇宙学的高度自洽性。以此为基础，我们可以探索新的物理。例如，把通过观测宇宙背景辐射各向不均匀性得到的重子—光子比当作输入量，我们就可以用大爆炸核合成来研究温度约为 0.07—1 MeV 时宇宙中可能存在的相对论性粒子^[4]。这类粒子包括不参与弱相互作用的惰性中微子 (sterile neutrinos)：它们虽然不能直接来自于弱相互作用过程，但可以通过普通中微子的振荡而产生并成为宇宙能量密度的贡献者。此外，惰性中微子在粒子物理、天体物理和宇宙学中还有多种其他的影响^[5]。它们的重要性取决于它们的质量以及它们与普通中微子的混合参数等基本性质，而大爆炸核合成为研究这些性质提供了一条重要的途径。

经典的大爆炸核合成理论也存在一个问题，这跟锂的丰度有关。在银河系中的许多铁丰度不同的古老星体表面，观测到一个几乎恒定的锂 (${}^7\text{Li}$) 丰度，这很自然地被认为是大爆炸核合成给出的初始值。但是，根据分析宇宙背景辐射各向不均匀性得到的重子—光子比，经典大爆炸核合成理论预言的 ${}^7\text{Li}$ 丰度是这个观测值的 3 到 4 倍^[6]。这个明显的差别是源于古老星体表层某种物理过程导致锂的消耗，还是经典的大爆炸核合成理论需要引进新的物理，比如加入某种有适当寿命并能产生高能衰变产物的基本粒子？沿着这两个方向寻找答案是当前富有意义的核天体物理研究课题。



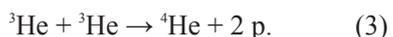
2.2 恒星的能源和太阳中微子^[7]

以质量计算, 大爆炸核合成使早期宇宙中的所有气体都含有约 75% 的氢(主要是质子 $p \equiv {}^1\text{H}$)、约 25% 的氦(主要是 ${}^4\text{He}$) 和极少量的锂(几乎都是 ${}^7\text{Li}$)。包含原始氢和氦的气体受万有引力的作用汇聚起来, 形成大大小小的恒星, 恒星内部的高温不仅使对应的压强可以与引力抗衡, 从而保持稳定的结构, 而且还导致热核反应, 把氢和氦合成为更重的元素。这种核燃烧过程释放的能量使恒星持续发光, 以太阳为例, 它内部的主要核燃烧过程起始于:

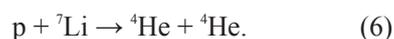
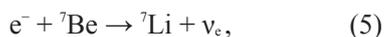
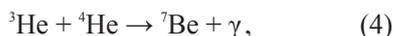


这个所谓的 pp 过程(由两个质子反应开始的过程)终止方式主要有以下两种:

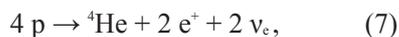
(1) 约 85% 的机会是



(2) 约 15% 的机会是

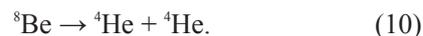
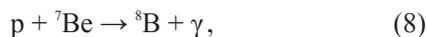


不管以哪种方式终止, 上面这些核反应可以概括为



这个过程导致约 27 MeV 的能量被释放(包括来自 $e^- + e^+ \rightarrow 2\gamma$ 的贡献), 这些能量除了很少一部分被电子中微子(ν_e) 带走, 其余全部用来让太阳发光发热。因此, 我们可以根据太阳的功率算出其内部每秒约有 2×10^{38} 个电子中微子产生。如果要观测这些中微子, 我们还需要了解它们的能谱: 反应式(1)释放的 pp 中微子(由两个质子反应(见(1)式)产生的中微子)能量仅为 0—0.42 MeV, 但总数目最多; 反应式(5)释放的 ${}^7\text{Be}$ 中微子能量为 0.38 MeV 和

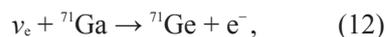
0.86 MeV 两个值, 总数目也很可观。因为中微子与物质的反应截面随其能量迅速增加, 所以下面这个稀有过程(仅约 10^{-4} 的机会)产生的最高能量约为 15 MeV 的 ${}^8\text{B}$ 中微子也是观测的重要对象:



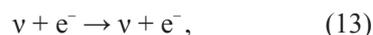
1960 年代末, Davis 开始用下列反应进行最早的太阳中微子实验:



根据反应的阈值, 主要探测的是 ${}^8\text{B}$ 和 ${}^7\text{Be}$ 中微子。因为探测到的电子中微子只有标准太阳模型预言的 1/3(见图 3), 这个实验引发了著名的太阳中微子疑难(solar neutrino puzzle)。为验证和深入了解这个问题, 相继有多个其他实验对太阳中微子进行了观测。在前苏联(SAGE)和意大利(GALLEX 和 GNO)进行的实验是选用阈值仅为 0.23 MeV 的下列反应:



主要用来探测 pp, ${}^7\text{Be}$ 和 ${}^8\text{B}$ 中微子。而在日本神冈(Kamiokande 和 SuperK)进行的实验则是利用下列弹性散射:



通过散射后的电子在水中发出的切伦科夫辐射来探测高能量的 ${}^8\text{B}$ 中微子。这些实验进一步确立了太阳中微子疑难(见图 3)。

Bahcall 对推动太阳中微子研究起了举足轻重的作用, 并长期致力于完善标准太阳模型的研究。中微子的产生率对太阳内部的温度分布极其敏感, 因为声速也取决于这个分布, 通过对太阳表面震动(日震)的观测和分析, 可以很好地限制太阳模型。利用这些限制以及从大量实验获得的相关核反应的可靠数据, Bahcall 与合作者的标准太阳模型对中微子产生率的预言精确到 16% 以内(见图 3)。这个重要工作使得太阳中微子疑难更加明确, 并促使

标准太阳模型预言的中微子探测器中的事件总发生率与实验结果的比较(参考文献: Bahcall-Serenli 2005[BS05(OP)]^[81])

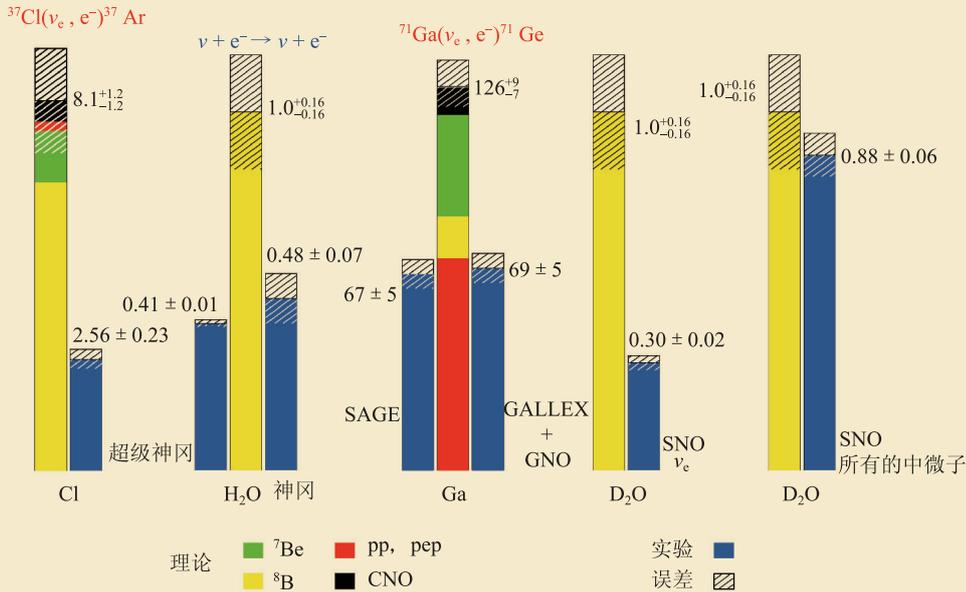
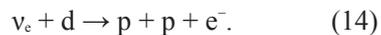


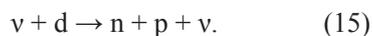
图3 标准太阳模型(以BS05(OP)^[81]为例)对中微子实验的预言与测量值的比较,明确地揭示了太阳中微子疑难以及中微子振荡对此疑难的解释,详见文中讨论。图片取自 <http://www.sns.ias.edu/~jnb/>(图中SAGE为前苏联—美国镓靶实验, GALLEX为镓靶实验, GNO为镓靶中微子观测所, SNO为萨德伯里中微子观测所)

人们面对一种超出标准粒子物理模型的可能性: 中微子经过太阳内部到达地球上的探测器以前, 可能发生味态转换(flavor transformation), 即中微子振荡(neutrino oscillations)。

为验证太阳中微子振荡, 在加拿大进行了SNO实验, 它是利用含氘的重水来观测不同种类的中微子。由于采用的反应阈值较高, 这个实验主要探测 ^8B 中微子。这些中微子的能量低于15 MeV, 只有保持为电子中微子时才可以发生下列带电流(charged current, CC)反应:



当 μ 或 τ 中微子有足够能量($\gg 15$ MeV)产生 μ 子或 τ 子时才能发生类似的带电流反应, 而只要能量超过2.2 MeV, 所有参与弱相互作用的三种中微子(ν_e, ν_μ, ν_τ)都可以引起截面相同的下列中性流(neutral current, NC)反应:



如果存在太阳中微子振荡, 那么起初在太阳内部产生的 ^8B 电子中微子有一部分会转换为 μ 或 τ 中微子, 从而不能被带电流反应式(14)测到(这同样适用于反应式(11)和(12))。但不管振荡如何在这三种中微子之间发生, 由中性流反应式(15)测到的中微子总数就是太阳内部起初发出的 ^8B 电子中微子的数目。因此, 不论标准太阳模型的精确度如何, 只要中性流反应式(15)测到的中微子总数超过带电流反应式(14)测到的电子中微子数目, 那么太阳中微子振荡就被这个设计美妙的实验证实了。

SNO实验结果表明, 到达探测器时太阳发出的 ^8B 电子中微子约有2/3已经转换成 μ 或 τ 中微子, 并且由中性流反应式(15)测到的中微子总数也很好地证实了标准太阳模型的预言(见图3和4)。除此之外, 因为 μ 或 τ 中微子也可以和重水中的电子发生弹性散射(elastic scattering, ES)

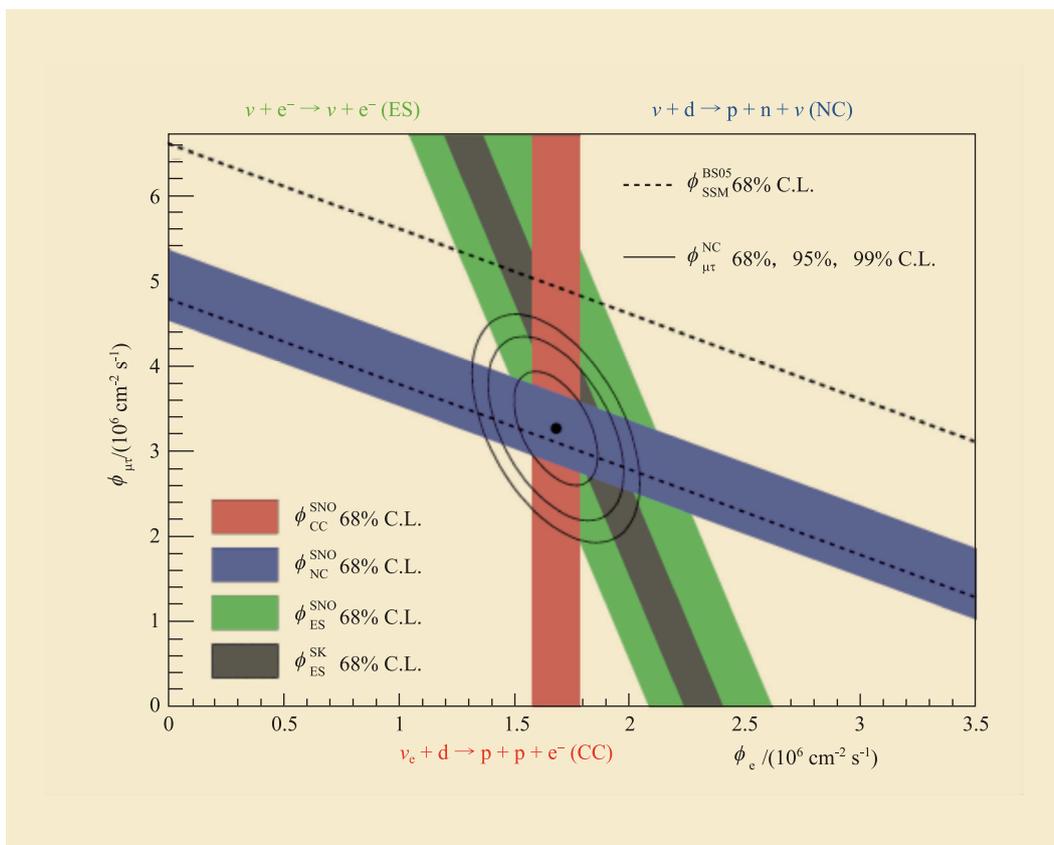


图4 SNO 实验关于到达探测器的电子(ϕ_e)和 μ 或 τ ($\phi_{\mu\tau}$)中微子束流的结果以及与超级神冈(SK)结果和标准太阳模型(standard solar model, SSM, 即BSM^[8])预言的比较。详见文中讨论。图片取自 <http://t2k-experiment.org/neutrinos/beyond-the-standard-model/>

使其产生切伦科夫辐射,但散射截面只有电子中微子的1/7,所以由弹性散射测到的反应事例是对电子中微子和 μ 或 τ 中微子的加权平均。这个结果与带电流反应式(14)和中性流反应式(15)测到的不同种类的中微子的数目非常自洽,并且与超级神冈(SuperK)用轻水中同样的散射得到的结果也完全一致(见图4)。

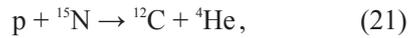
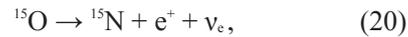
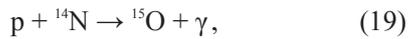
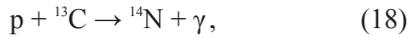
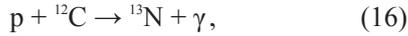
中微子振荡($\nu_e \rightleftharpoons \nu_\mu, \nu_\tau$)不仅解决了太阳中微子疑难,而且还解决了关于宇宙射线产生的大气中微子(atmospheric neutrinos)的疑难($\nu_\mu \rightleftharpoons \nu_\tau$)。太阳中微子实验的先驱Davis与领导神冈和超级神冈实验并对太阳和大气中微子进行观测的Koshiba分享了2002年的诺贝尔物理学奖(神冈实验还在1987年观测到了来自大麦哲伦云(Large Magellanic Cloud)星系中一颗超新星的中微子,见本文第2.3.2节)。现在中微子振荡已被多个实验组利用反应堆和加

速器产生的中微子证实,描述这个超出标准粒子物理模型现象的参数也几乎全都被测定^[9],在中国进行的大亚湾反应堆中微子实验对此作出了重大贡献^[10]。

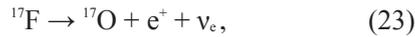
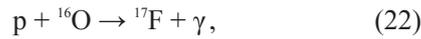
明白中微子振荡以后,我们可以把中微子当作深入了解太阳的工具。标准太阳模型有一个假设:太阳形成时气体的高度混合使它的化学成分具有均匀的分布。上面提到,标准模型给出的太阳内部的声速与日震分析得到的结果非常吻合。但是,根据最新分析,太阳表面CNO和Ne的丰度比以前得到的值低25—40%,使用新的丰度明显降低了标准模型和日震分析的吻合程度。要回复到原有的吻合程度同时又接受新的太阳表面丰度,一个可能的途径是,确认太阳系的形成过程是否导致太阳内部和表层的丰度有一定的差别^[7]。

有意思的是,除了上文给出的那些核反应外,太阳内部还可以发生以下所谓的

CN 循环:



以及由 ${}^{16}\text{O}$ 引发的下列反应:



Bethe 因为提出了上面这些反应会在恒星内部发生以及相关的研究工作而获得了 1967 年的诺贝尔物理学奖。这些反应仅提供约 1% 的太阳的能量, 但反应式(17), (20) 和(23) 释放的中微子数目大大超过 ${}^8\text{B}$ 中微子。这些 CNO 中微子最高能量分别为 1.2, 1.7 和 1.7 MeV, 探测它们需要新的实验。这类实验虽然有很大的难度, 但获得的结果可以检验太阳内部 CNO 的初始丰度是否与表面的最新观测值一致,

因而具有重大的意义。

2.3 恒星的演化及其终点

由于热核反应必须克服核之间的库仑排斥, 燃烧越重的核需要的温度越高。当一颗恒星燃烧完中心的氢后, 它的中心部分会在重力作用下收缩, 使得温度升高到可以燃烧氦。这种在用完一种核燃料后由于中心部分收缩导致下一种核燃料被点燃的过程可以重复。因为温度随着半径的增大而递减, 当恒星中心在燃烧较重的核时, 中心外面有适当温度的壳层也可以同时燃烧较轻的核。这样一来, 恒星的演化就会形成一个所谓的“洋葱”结构: 从里到外各种核按从重到轻的方式分布。

恒星内部能达到的最高温度取决于恒星的质量: $8 M_{\odot}$ (8 个太阳质量) 以下的小到中等恒星只能把氢烧成氦和把氦烧成碳和氧, 而 $10 M_{\odot}$ 以上的大恒星 (massive star) 还能把这种燃烧过程继续下去, 最终可以合成铁。前者的演化终点是, 中心部分成为由电子简并压支撑的含 CO 的白矮星 (white dwarf), 外部气体被抛出形成行星状星云 (planetary nebula); 而后者的演化终点是, 含铁的中心部分在重力作用下会塌缩形成中子星 (neutron star) 或黑洞 (black hole), 外部的的气体被这个过程引发的核心塌缩型超新星 (core-collapse supernova) 抛出 (见图 5)。8— $10 M_{\odot}$ 的恒星的演化比较复杂, 最后有可能形成含 ONeMg 的白矮星, 或者形成中子星并引起核心塌缩型超新星爆发。这类恒星的演化还有很多具体问题尚待解决。一般来说, 恒星的质量越大, 其演化速度越快: $1 M_{\odot}$ 的恒星寿命约为 10^{10} 年, $2 M_{\odot}$ 的约为 2×10^9 年, 而 $15 M_{\odot}$ 的约为 10^7 年。

2.3.1 白矮星和 Ia 型超新星

$1 M_{\odot}$ 左右的恒星经过演化留下约

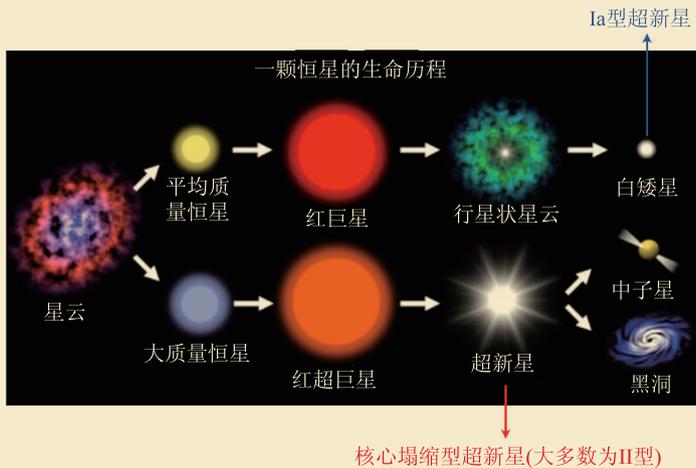


图 5 恒星演化及其终点的示意图。Ia 型超新星 (type Ia supernova) 发生在含白矮星 (white dwarf) 的双星系统里, 而核心塌缩型超新星 (core-collapse supernova) 的前身恒星 (progenitor) 可以是单星, 也可以是双星系统的一员。详见文中讨论。图片取自 <http://flightline.highline.edu/iglozman/classes/astronotes/stellarevolution.htm>

0.5 M_{\odot} 的白矮星，与其重力抗衡的是非相对论性电子的简并压。随着白矮星质量的增长，提供简并压的电子趋于相对论性。这导致白矮星质量的上限约为 1.4 M_{\odot} ，称为 Chandrasekhar 质量极限。Chandrasekhar 因为这个工作和其他对恒星结构与演化理论的贡献而获得了 1983 年的诺贝尔物理学奖。

约有一半的恒星处于双星系统。当系统中较重的成员演化形成白矮星后，它可以通过吸积尚在演化的伴星的气体来增加质量；当质量达到 Chandrasekhar 质量极限时，这颗白矮星含的 CO 可以被点燃并迅速释放能量，引起超新星爆发。这类超新星不含氢的谱线，根据光谱分类，被称为 Ia 型超新星 (type Ia supernovae, SNe Ia)。还有一种可能：双星系统先演化形成双白矮星系统，然后通过辐射引力波损失能量，使轨道收缩，最终在发生双白矮星合并 (merger) 时也会产生 Ia 型超新星。

Ia 型超新星爆发的能量来自于把 CO 烧成周期表中铁附近元素对应的原子核 (Fe group nuclei)，因此它们是铁的重要来源。此外，因为简单来说，爆发机制是一触 Chandrasekhar 质量极限即发，Ia 型超新星发出的光的总功率 P 随时间的变化有比较统一的规律。经过观测的检验和校准，这个统一的变化方式可以用来根据观测到的亮度 $B \propto P/r^2$ ，推算 Ia 型超新星离我们的距离 r 。再加上通过光谱测出的红移 z ，Ia 型超新星为我们提供了反映宇宙几何性质的距离与红移的关系 $r(z)$ 。Perlmutter, Schmidt 和 Riess 领导了这项工作，从而发现了宇宙正在加速膨胀这个惊人的结果。他们因此获得了 2011 年的诺贝尔物理学奖。

需要说明的是，Ia 型超新星形成的途径和爆发的具体机制目前尚无定论，因

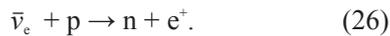
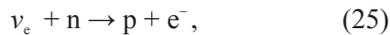
为其在宇宙学上的应用，对它们的深入研究是天体模拟计算的一个重大课题^[1]。

2.3.2 核心塌缩型超新星和中子星、黑洞以及中微子

大恒星的核心在演化过程中，为了点燃新的核燃料而不断收缩升温，最后在耗尽核能成为含铁的核心时密度高到可以使电子的简并压与重力抗衡，也就是说，大恒星的铁核心 (Fe core) 类似白矮星。因为周围壳层中的核燃烧还在合成铁，所以铁核心的质量可以增加。当铁核心增长到 Chandrasekhar 质量极限时，任何能量损耗过程 (实际上主要是电子俘获引起的中微子发射 (neutrino emission from electron capture) 和光子导致的核离解 (photo-dissociation of nuclei)) 都可以使它塌缩。在塌缩过程中，铁核分成内外两部分：声波在内核有足够的时间传播运动的信息，使之成为一个整体，而外核的各层物质均以超声速塌缩，相互之间以及与内核没有联系。当内核中心密度超过核物质密度时，状态方程的变化使内核停止塌缩并整体反弹，与还在塌缩的外核相遇产生冲击波 (shock wave)。这个冲击波在向外行进时，把外核的铁离解成中子和质子，因为损失能量太多，在还没冲出外核时就停滞不前。继续塌缩的外核带动铁核外的物质一起向内核堆积，形成一个初始中子星 (proto-neutron star)。核物质的状态方程决定中子星有个质量上限，如果冲击波不能被激活，铁核外物质的塌缩最终会使初始中子星超过这个上限，从而塌缩成黑洞；相反，如果冲击波被激活，从而阻止铁核外物质的塌缩，并使它们向外扩展，这就导致核心塌缩型超新星的爆发，初始中子星也能保持稳定，最后成为中子星遗留下来。

初始中子星的重力束缚能约为 3×10^{53}

ergs, 由于它的高温高密度环境, 释放这些能量最有效的方式是发射中微子和反中微子对(e , μ 和 τ 三种味态)。其中一部分电子中微子和反中微子可以与初始中子星外面物质里的中子和质子发生以下反应:



初始中子星发射的电子中微子和反中微子, 只要把它们携带能量的1%通过这些反应提供给停滞的冲击波(见图6), 就可以得到通常观测到的核心塌缩型超新星爆发的能量(约为 10^{51} ergs)。这类超新星通常含氢的谱线, 根据光谱分类称其为II型超新星(有些大恒星通过星风或双星系统中的质量转移, 失去了最外面的氢外壳, 它们形成的核心塌缩型超新星就没有氢的谱线, 根据光谱分类, 将其称为Ib或Ic型超新星)。

上面描述的中微子导致的核心塌缩型超新星爆发机制, 在8—10 M_{\odot} 的前身恒星(progenitor)中已被数值模拟实现。另外, 大量数值模拟计算表明, 这种机制很

可能也适用于10—20 M_{\odot} 的前身恒星^[12]。有观测显示, 20 M_{\odot} 以上的前身恒星核心塌缩时很可能产生黑洞和两种新型的超新星: 极超新星(hypernova)和弱超新星(faint supernova)。前者能量比普通核心塌缩型超新星的能量高数十倍, 而后者则低数十倍。这两种新型超新星的爆发机制很可能与黑洞吸积盘和喷流有关, 其中极超新星与伽玛暴(gamma-ray burst)有着密切的关联。

普通核心塌缩型超新星和极超新星在爆发时产生质量可观的铁以及比铁重的元素, 这些产物与前身恒星演化过程中合成的比铁轻的元素一起在爆发时被抛出, 从而影响宇宙的化学演化。所有与核心塌缩有关的超新星留下的中子星或黑洞也为天文观测增添了众多内容, 其中包括:

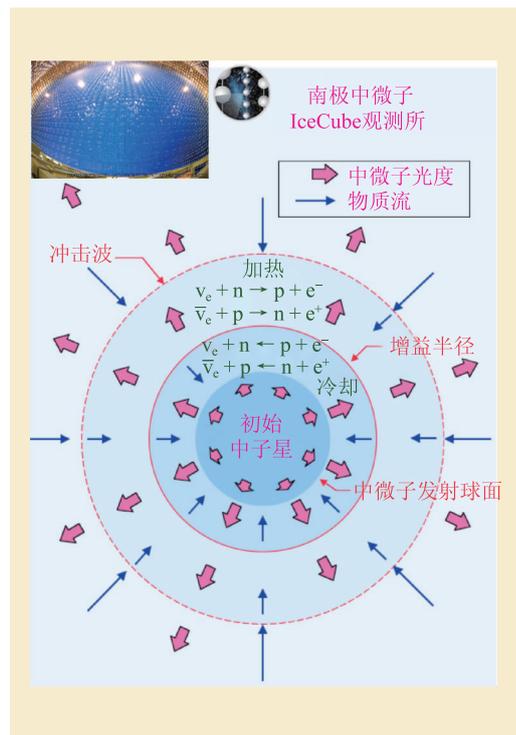
(1) 脉冲星是转动的、具有强磁场的中子星, 它是Hewish用射电望远镜发现的, Hewish因此分享了1974年的诺贝尔物理学奖;

(2) Hulse和Taylor发现了一个双脉冲星系统, 并用它验证了广义相对论中的引力波发射理论, 因此获得了1993年的诺贝尔物理学奖;

(3) 中子星和黑洞吸积周围气体成为宇宙中的X射线源, 这一现象是Gioconni发现的, 他因此而分享了2002年的诺贝尔物理学奖。

最后, 中微子在普通核心塌缩型超新星中起着举足轻重的作用, 对极超新星和弱超新星来说也至少是一种信号, 并且这些基本粒子还会发生味态转换。因此, 观测来自与核心塌缩有关的超新星的中微子对了解这类超新星内部的各种物理过程(包括与中微子有关的各种核合成以及不同形式的中微子振荡)有着不可替代的作用。神冈和IMB探测器在1987年观测到了约20个来自大麦哲伦云星系中一颗超

图6 中微子导致的核心塌缩型超新星爆发机制示意图(取自 <http://astronomyonline.org/Stars/Supernova.asp>)。详见文中讨论。一颗在银河系中的核心塌缩型超新星可以在超级神冈(见图的左上方, 取自 <http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/sk/gallery/index-e.html>)和南极中微子观测所的IceCube(见图的右上方, 取自 <http://icecube.wisc.edu/>)探测器中产生大量中微子事例, 这样的数据对了解这类超新星内部的各种物理过程(包括与中微子有关的各种核合成以及不同形式的中微子振荡)有着不可替代的作用



新星的中微子。与此相比，如果银河系中有一颗类似的超新星爆发，超级神冈和 IceCube 探测器可以观测到成千上万个中微子，这样的数据将为超新星和中微子研究带来重大的收获。

2.4 原子核物理和元素的核合成

上文已经讲到，早期宇宙膨胀过程中的大爆炸核合成留下了氢、氦和锂这三种最轻的元素。周期表中所有其他元素都是由这以后形成的恒星制造的(见图 7)，其中包括：

(1) 恒星内部的核燃烧可以生成氦以及从碳到铁这些元素，具体说来，大部分碳来自小到中等恒星内的核燃烧，铁则是在 Ia 型和核心塌缩型超新星爆发时产生的，而碳和铁之间的元素大部分来自核心塌缩型超新星爆发时或其前身恒星演化过程中的核燃烧；

(2) 大恒星爆炸形成核心塌缩型超新

星时产生的高能宇宙射线与星际介质的反应可以制造锂、铍、硼(Hess 因发现宇宙射线而分享了 1936 年的诺贝尔物理奖)；

(3) 铁以后的元素统称为重元素，它们主要是通过小到中等恒星内部的慢速俘获中子过程，即慢过程(slow neutron capture process, s process)以及与大恒星有关的快速俘获中子过程，即快过程(rapid neutron capture process, r process)产生的。

Chadwick 发现了中子(1935 年诺贝尔物理奖)，从而开辟了原子核物理这个新领域。Fermi 在一系列实验中用中子轰击原子核，发现这可以生成新的放射性核，因而获得了 1938 年的诺贝尔物理奖。在天体中发生的慢和快过程是这些实验的推广：如果俘获中子产生的不稳定原子核的中子俘获率低于其 β 衰变率，这就是慢过程，反之便是快过程。根据 Mayer 和 Jensen 提出的核壳层模型(1963 年诺贝尔物理奖)，当中子能级的壳层被依次填满时，对应的中子数为 $N = 2, 8, 20,$

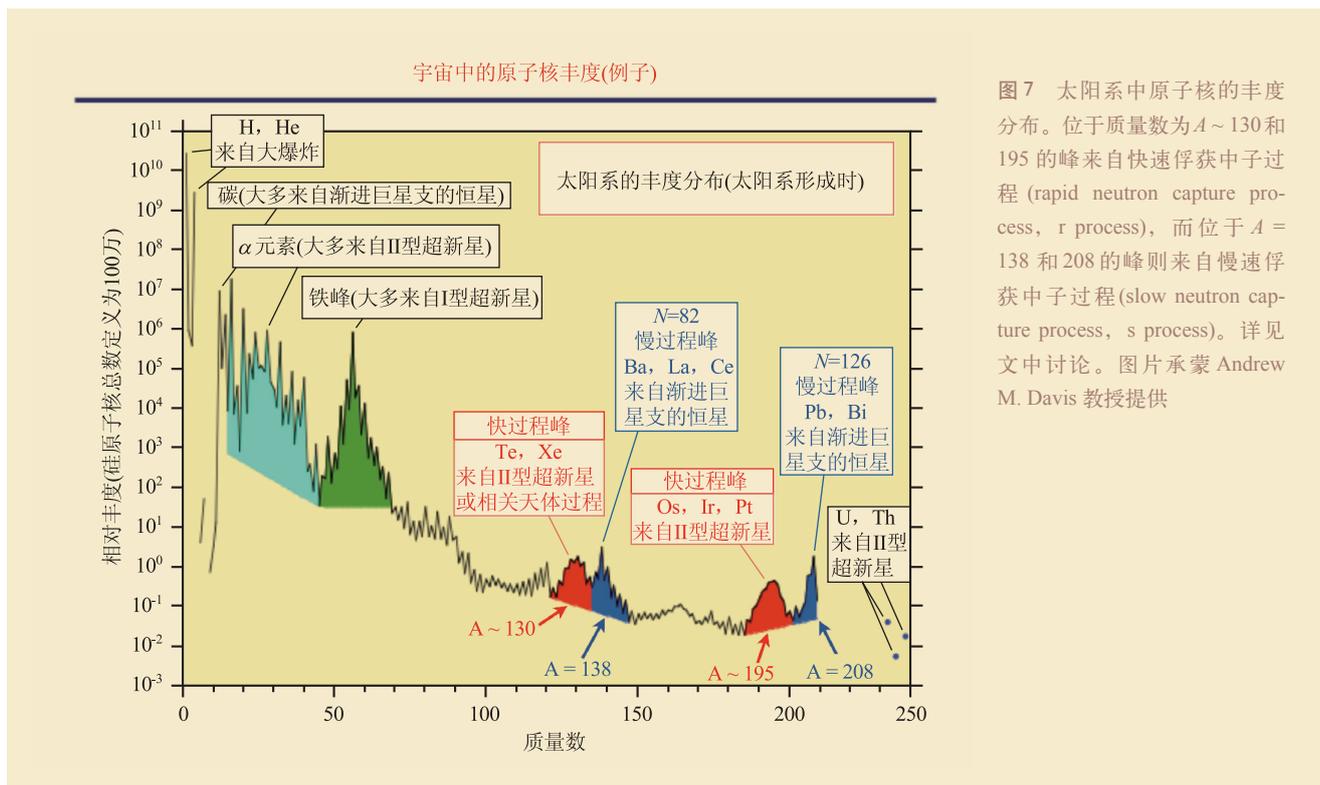
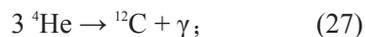


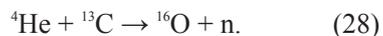
图 7 太阳系中原子核的丰度分布。位于质量数为 $A \sim 130$ 和 195 的峰来自快速俘获中子过程 (rapid neutron capture process, r process)，而位于 $A = 138$ 和 208 的峰则来自慢速俘获中子过程 (slow neutron capture process, s process)。详见文中讨论。图片承蒙 Andrew M. Davis 教授提供

28, 50, 82 和 126 这些所谓的幻数(类似惰性气体原子的电子壳层结构)。铁以后的重原子核涉及的中子幻数为 $N = 50, 82$ 和 126, 根据具有这些中子幻数的原子核的特性, 我们可以对俘获中子过程产生的原子核丰度分布作出简单的定性描述。太阳系中重原子核的丰度分布有两组峰: 一组位于质量数 $A \sim 80, 130$ 和 195 处; 另一组位于 $A \sim 88, 138$ 和 208 处(图 7 只标记了最明显的位于 $A > 120$ 的峰)。后一组峰对应的稳定原子核 ^{88}Sr , ^{138}Ba 和 ^{208}Pb , 分别具有 $N = 50, 82$ 和 126 个中子, 因为它们的中子壳层已经填满, 它们很难俘获中子变成其他核, 于是在慢过程中被积累起来从而产生丰度分布的这一组峰。另外三个位于 $A \sim 80, 130$ 和 195 的峰对应的稳定原子核(以 ^{80}Se , ^{130}Te 和 ^{195}Pt 为代表)虽然不具有中子幻数, 但是它们由快过程制造的不稳定的母核(以 ^{80}Zn , ^{130}Cd 和 ^{195}Tm 为代表)却分别具有 $N = 50, 82$ 和 126 个中子。这些母核与快过程涉及的其他不稳定核相比要稳定得多, 因此在快过程中被积累起来, 然后通过一系列 β 衰变成为质量数相同但不再具有中子幻数的稳定核, 后者便对应于上述丰度分布的峰。

观测表明, 小到中等恒星处于渐近巨星支(asymptotic giant branch, AGB) 阶段时就会发生慢过程。这些 AGB 星体的核心是由碳和氧组成的, 但不发生核燃烧, 核心外有一个氦壳层, 并通过下列反应制造碳:



氦壳层外还有一个氢壳层在把氢烧成氦, 这种结构的不稳定性导致氢和氦壳层之间以及氦壳层和氢外壳之间物质的混合, 由此引发 CN 循环的最先两个反应(见(16)式和(17)式)以及



以上一系列反应最重要的结果是产生了中子。如果这些 AGB 星体对应的恒星形成较晚, 它们的初始成分就含有比它们先形成的大恒星制造的铁(绝大部分是 ^{56}Fe)。铁原子核慢速俘获中子, 并开始生成重元素, 这就是慢过程。慢过程的产物混合到氢外壳后就可以通过光谱分析测量: Merrill 在 1952 年就测到了锝(Tc)^[13]。锝的特殊性在于它的原子核都是不稳定的, 其中 $^{97}, ^{98}, ^{99}\text{Tc}$ 的半衰期最长, 依次为 $2.6 \times 10^6, 4.2 \times 10^6, 2.1 \times 10^5$ 年。因此, 在 AGB 星体表面观测到锝的谱线为这些星体内发生的慢过程提供了最直接的证据。

与慢过程相比, 快过程的研究要困难得多^[14]。这是因为快过程需要极高的中子密度, 而能提供这种条件的天体环境, 例如双中子星合并^[15], 由于其特殊性很不容易被观测证实。此外, 快过程牵涉到大量 β 衰变很快的核, 而目前有关这些核性质的数据非常缺乏, 这导致我们不能充分利用观测到的快过程丰度分布来检验快过程的天体模型。要改变这个状况, 除了对各种可能发生快过程的天体环境开展进一步研究, 我们还需要核物理实验和理论的帮助。因为牵涉的不稳定核太多, 建立一套统一合理的核理论模型是计算快过程丰度分布必要的基础。实验提供的不稳定丰中子核的性质除了可以直接应用到快过程计算中, 更重要的是可用它来检验和校准核理论模型。Fowler 就是以这种理论与实验相结合的方式为恒星演化与核合成提供了大量关键的核反应数据, 因此分享了 1983 年的诺贝尔物理奖。就元素的起源来说, 快过程是一个还需要攻克的重要堡垒, 而发展一整套适用于快过程的核理论模型是这项艰巨任务中的一个关键部分, 这项研究或许还会给核理论带来新

的突破(与核理论有关的诺贝尔物理奖参见表1)。

3 任务与展望

由上面的简单介绍可以看出,经过大量实验、观测和理论的研究,核天体物理工作者已取得一批突破性的重大成果。然而,宇宙中与元素起源有关的许多现象还有待于解释,有些相关的基本粒子(特别是中微子)的属性和相互作用还需要更清楚深入的了解。因此,探索基本粒子跟元素起源和宇宙化学演化的关系是当前物理学和天文学的一个重要任务。欧美国家长期以来一直把核天体物理作为最重要的基础研究课题之一。例如,美国国家科学院设立的关于宇宙物理学的委员会在2003年总结了新世纪的11个重大科学问题^[16],其中三个就与这项研究密切相关:

(1)中微子的质量是多少,它们是如何影响宇宙的演化的?

(2)超高温度和密度下有什么新的物质状态?

(3)从铁到铀这些重元素是怎样制造出来的?

核天体物理研究还极大地推动了放射性核束物理这一原子核科学前沿的高速发展。这是因为有许多天体过程涉及到大量短寿命原子核,而这些核的关键反应截面及衰变性质构成了揭示天体中的物理过程所不可缺少的基本数据。美国下一个重大核物理装置就是制造放射性稀有核束的FRIB^[17](Facility for Rare Isotope Beams),德国正在兴建类似的FAIR^[18](Facility for Antiproton and Ion Research),日本也准备在其最大的综合研究机构理化研究所^[19](RIKEN)升级同类装置RIBF^[20](Radioactive Isotope Beam Factory)。中国在这方面

已有较好的基础,与此相关的大型实验装置包括中国科学院近代物理研究所的兰州重离子加速器^[21](Heavy Ion Research Facility in Lanzhou, HIRFL)及其冷却储存环^[22](Cooler Storage Ring, CSR)和放射性束流线^[23](Radioactive Ion Beam Line in Lanzhou, RIBLL),还有中国原子能科学研究院正在升级改造的HI-13串列加速器及以此为基础的北京放射性核束设施^[24](Beijing Radioactive Ion Beam Facilities, BRIF)。

近年来中国在基础科学研究方面还有很多其他投入,并在一些重大研究领域取得了国际瞩目的成就,其中包括2012年3月大亚湾反应堆中微子实验^[25](Daya Bay Reactor Neutrino Experiment)中有关新型中微子振荡的突破性成果^[10]。如上所述,不仅中微子的性质及其与物质的相互作用对研究各种元素核合成过程极其重要,而且大量关于原子核性质和核反应的数据以及理论模型也不可或缺。除了上面提到的与此相关的国内大型实验装置,其他重要设施还有锦屏山极深地下实验室^[26](China Jing-Ping Deep Underground Laboratory, CJPL)和上海同步辐射光源^[27](Shanghai Synchrotron Radiation Facility, SSRF)。前者对各种需要低本底的高灵敏度实验至关重要,包括暗物质探测、中微子探测和反应截面极小的低能核反应的测量,而后者可以支持对极端天体环境中伽马光子与物质相互作用的研究,还可以通过逆反应来研究释放光子的核过程。

此外,与核天体物理研究直接相关的国内大科学装置还有用于大型巡天的郭守敬望远镜^[28](Large Sky Area Multi-Object Fiber Spectroscopic Telescope, LAMOST)以及其他天文观测设备。中国还拥有世界上最快的超级计算机之一的天河-1A号^[29]。这些一流的装置为积累天文

观测数据以及进行大型天体物理数值模拟提供了坚实的平台。

国内目前尚欠缺的是对天体物理和天文观测与微观过程之间各种相互联系进行交叉合作研究,特别是原子核物理界与天体物理和天文观测领域的交流很少,还没有利用各自的优势组成一个科研合作实体。与国际上在这方面的发展趋势相比,反差尤其明显。例如,美国的核天体物理联合研究所^[30](Joint Institute for Nuclear Astrophysics, JINA)以圣母大学(University of Notre Dame),密歇根州立大学(Michigan State University)和芝加哥大学(University of Chicago)为中心,在美国国家科学基金会的支持下已经运作10余年,为原子核理论和实验与天体物理和天文观测之间的国际交流与合作作出了重大贡献。德国于2008年成立了极端物质研究所^[31](Extreme Matter Institute, EMMI),联合13个国际伙伴单位对宇宙中高温或高密度条件下的物理过程(尤其是核天体物理)开展合作研究。日本东京大学在上世纪末就成立了原子核科学研究中心^[32](Center for Nuclear Study, CNS),利用理化研究所(RIKEN)强大的实验优势进行核天体物理等方面的各种国际交流,其组织的“物质起源与星系演化”(Origin of Matter and Evolution of Galaxies, OMEG)系列会议已成为国际核天体物理领域的重要会议之一。

可喜的是,国内很多研究者已经意识到核天体物理的重要性,并开始组建原子核与粒子物理理论和实验与天体物理和天

文观测相结合的国际、国内合作研究平台。2012年5月,有数十位同行在上海参加了一个集思广益的核天体物理研讨会^[33]。2013年5月初,约70位中美核物理工作者参加了在北京大学举行的中美奇特核物理理论研究所^[34](China-US Theory Institute for Physics with Exotic Nuclei, CUSTIPEN)成立大会,并探讨了奇特核性质及其对天体物理的影响^[35]。5月底,在国际、国内有关专家的大力支持下,上海交通大学物理与天文系成立了中国首个原子核天体物理中心(Center for Nuclear Astrophysics, CNA),有50余位来自中国、美国、德国和日本的研究人员参加了成立大会暨研讨会,其中30余位专家学者在会上作了关于核天体物理及相关领域最新进展的报告^[36]。该中心的首要任务是全面开展核天体物理领域的研究,并积极推动与国际、国内相关机构的合作和交流。

核天体物理不仅处于科学的前沿,而且它的发展还将不断促进人们对基本粒子、原子核、天体、宇宙以及它们之间关系的深入了解。中国在这方面的研究已具备一定的基础,如果能抓住时机与国际接轨,吸引相关的优秀国际人才,经过一段时期的努力,一定可以在这一基础科学的重要领域发挥巨大的作用。

致谢 感谢季向东和孙扬两位教授,与他们的讨论使我受益匪浅。文中插图所用原始资料的来源已在图注中给出,为更好地配合文中讨论,对这些材料做了不同程度的补充和修改,在此一并说明。

参考文献

- [1] http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/
- [2] http://lambda.gsfc.nasa.gov/product/map/current/params/lcdm_wmap9.cfm
- [3] Ade P A R, Aghanim N, Armitage-Caplan C et al. arXiv: 1303.5076
- [4] Steigman G. Annu. Rev. Nucl. Part. Sci., 2007, 57: 463
- [5] Abazajian K N, Acero M A, Agarwalla S K et al. arXiv: 1204.5379
- [6] Fields B D. Annu. Rev. Nucl. Part. Sci., 2011, 61: 47
- [7] Haxton W C, Robertson R G H, Serenelli A M. arXiv: 1208.5723
- [8] <http://www.sns.ias.edu/~jnb/SNdata/sndata.html>
- [9] Beringer J et al (Particle Data Group). Phys. Rev. D, 2012, 86: 010001
- [10] An F P, Bai J Z, Balantekin A B et al. Phys. Rev. Lett., 2012, 108: 171803
- [11] Hillebrandt W, Niemeyer J C. Annu. Rev. Astron. Astrophys., 2000, 38: 191
- [12] Janka H-T. Annu. Rev. Nucl. Part. Sci., 2012, 62: 407
- [13] Merrill P W. Astrophys. J., 1952, 116: 21
- [14] Arnould M, Goriely S, Takahashi K. Phys. Rep., 2007, 450: 97
- [15] Goriely S, Bauswein A, Janka H-T. Astrophys. J., 2011, 738: L32
- [16] http://www.nap.edu/catalog.php?record_id=10079
- [17] <http://www.frib.msu.edu/>
- [18] <http://www.gsi.de/en/research/fair.htm>
- [19] <http://www.riken.go.jp/en/>
- [20] http://www.nishina.riken.go.jp/facility/RIBF/about_e.html
- [21] http://www.imp.cas.cn/kyzb/HIRFL/201112/t20111226_3417413.html
- [22] http://www.imp.cas.cn/kyzb/CSR/201112/t20111226_3417433.html
- [23] http://www.imp.cas.cn/kyzb/RIBLLI/201112/t20111226_3417426.html
- [24] http://www.ciae.ac.cn/subpage/pingtai_3.htm
- [25] <http://dayabay.ihep.ac.cn/twiki/bin/view/Public/>
- [26] Normile D. Science, 2009, 324: 1246
- [27] <http://ssrf.sinap.ac.cn/1/jianjie.htm>
- [28] <http://www.lamost.org/public/?locale=zh>
- [29] http://nssc-tj.gov.cn/resources/resources_1.asp#TH-1A
- [30] <http://www.jinaweb.org/>
- [31] <http://www.gsi.de/emmi/>
- [32] <http://www.cns.s.u-tokyo.ac.jp/>
- [33] <http://news.sciencenet.cn/sbhtmlnews/2012/7/260264.shtm>
- [34] <http://custipen.pku.edu.cn/>
- [35] <http://news.sciencenet.cn/htmlnews/2013/5/78184.shtm>
- [36] <http://www.physics.sjtu.edu.cn/cna2013/>

超低温真空探针台



- 无需制冷剂 • 直流, 微波, 光纤
- 4K-800K • 可增加磁铁
- 多达8个探针臂 • 客户定制
- 模块化设计

实验室低温制冷系统



4K-1100K
光谱学应用



<1.7K冷头
非光学



**Advanced Research
Systems**

Email: ars@arscryo.com

www.arscryo.com