

银河系化学元素的丰度特征和合成图像 (II): 太阳系原始同位素丰度异常及其解释

常瑞香 侯金良 傅承启

(中国科学院上海天文台 上海 200030)

摘 要

太阳系原始同位素组成是研究太阳系起源和演化的基础。评述了太阳星云的原始放射性核素丰度特征及解释此丰度特征的分子云自增丰模型、AGB 星污染模型和散裂反应模型。陨石包体中前太阳矿物颗粒的同位素组成异常表明,前太阳颗粒中低密度石墨、X 型碳硅石可能来源于超新星爆发,而 AGB 星或红巨星被认为是尖晶石和碳硅石的最可能的恒星来源。太阳系中比较特殊的氦和氘的同位素组成异常也与超新星爆发密切相关。

关键词 核反应:核合成,丰度—太阳系:形成—行星际介质

分类号: P148

1 引 言

元素的丰度是指各种化学元素及其同位素(核素)在各类物体中的相对含量。太阳不仅是离我们最近的恒星,可以通过各种技术来获得其化学组成,而且,陨石、彗星和行星等“天然化石”真实地记载着太阳系化学成分の詳細信息。因此,在天体化学领域,经常将太阳系元素丰度作为归一标准,在研究星系化学演化时尤其如此。这表明太阳系元素丰度的研究在元素的起源与演化、恒星内部核合成以及星系化学演化等方面占有重要地位。然而,诸多证据表明太阳系元素丰度不能代表太阳系形成时本地星际介质的化学组成^[1]。另外,太阳系原始同位素丰度异常也对是否可以将太阳系元素丰度作为归一标准提出了疑问。

太阳系同位素丰度异常是指无法由现知的正常变化过程来解释的同位素组成^[2]。引起同位素组成发生正常变化的过程有:(1)物理化学效应。由于同位素的质量和零点能的差别,使其化学反应速度、平衡系数和挥发性等性质产生微小差别,在天然过程中引起同位素分馏,使同位素组成发生变化;(2)原始放射性核素的衰变与自发裂变;(3)太阳系中发生的核反应,如宇宙线和太阳系物质相互作用发生的散裂反应等。

19 世纪末,基于地壳化学成分资料的积累,对太阳系元素丰度开始了系统研究。在研究

太阳系起源和演化时, 一个重要的初始条件是假设太阳系形成初期各部分的化学组成是相同的^[3]。本世纪 70 年代初, 随着质谱同位素技术的发展和碳质球粒陨石中稀有气体的研究^[4], 首先发现了太阳系中氦的同位素丰度异常, 这一发现是太阳系化学组成研究方面的重大突破, 虽然由于氦在陨石中丰度极低在当时未引起足够重视。直到 1973 年, Clayton 等人在碳质球粒陨石的难熔矿物相中发现氧同位素异常后^[5], 人们才开始强烈关注陨石中原始同位素丰度异常现象。

不同的元素合成于不同的恒星环境, 因此, 可以借助于太阳系原始同位素组成异常的研究来推测太阳系的诞生环境。需要指出的是, D/H 比值是太阳系原始同位素丰度异常的一个重要的组成部分^[2]。原初 D 丰度的观测值是标准宇宙大爆炸核合成理论的一个严格的约束条件。关于 D/H 比值, 文献 [6] 中已详细综述了其宇宙学意义和近期研究进展。

2 太阳星云的原始放射性核素

银河系中的恒星形成于不同的环境, 不同类型的恒星形成环境将具有不同的放射性核素丰度特征, 因此, 可以借助太阳星云的初始放射性核素组成来推测太阳系的诞生环境。

在恒星形成区, 有两种特征时标制约着放射性核素的丰度^[7]。

一种是长的冷却时标, 它与形成恒星的冷物质演化有关, 反映了物质从包含有大量新合成核素的星际介质高能相中的脱离和凝结。冷却时标应长于典型分子云的形成时间 ($\approx 10^7$ yr)。长寿命放射性核素由衰变引起的明显稀释能够反映这一时标。在恒星形成区, 如果稀释因子很小, 长寿命放射性核素将可能具有足够高的剩余丰度, 使得它们可以不受化学自增丰 (self-enrichment) 的影响。所以, 长寿命放射性核素能够保留恒星复合体 (stellar complex) 内冷物质平均年龄的信息^[7]。本文暂不讨论这一类放射性核素。

另一种特征时标是短的混合时标 ($10^6 \sim 10^7$ yr)。在恒星形成区, 大质量星诞生、演化, 并在它们母云附近爆发, 将其核合成产物混入被压缩的云的边界区域, 为下一次 (或引发) 恒星形成提供新合成的放射性核素。另外, 分子云也可能受到外来物质的污染 (如 Ia 型超新星、AGB 星等), 从而会影响其放射性核素丰度。与这种短的混合时标相对应的是短寿命的放射性核素, 其代表有 ^{41}Ca ($T_{1/2} = 1.03 \times 10^5$ yr)、 ^{26}Al ($T_{1/2} = 7.3 \times 10^5$ yr)、 ^{60}Fe ($T_{1/2} = 1.5 \times 10^6$ yr)、 ^{53}Mn ($T_{1/2} = 3.7 \times 10^6$ yr)、 ^{107}Pd ($T_{1/2} = 6.5 \times 10^6$ yr) 等 ($T_{1/2}$ 表示该放射性核素的半衰期)。这些短寿命放射性核素能够反映其载体在形成前后的短时间内曾受到过哪些物质的污染。

许多陨石是太阳系早期形成的星子的残存碎片。由于陨石形成较早, 前太阳星云的初始放射性核素在衰变前已被凝结在陨石的矿物颗粒之中。此后, 放射性核素的衰变使这些颗粒的同位素组成发生变化。因此, 陨石包体中矿物颗粒的同位素组成包含有前太阳星云放射性核素丰度特征的重要信息。

表 1 给出从陨石同位素组成异常分析得到的太阳系初始放射性核素丰度^[7]。由于陨石的形成时间略有差别, 对有些核素, 如 ^{60}Fe , 做了相应的时间改正。需要提到的是, 最近在 Efremovka 碳质球粒陨石中观测到了 ^{36}Ar 的超丰, 表明早期太阳星云中存在有放射性核素 ^{36}Cl ($T_{1/2} = 4.3 \times 10^5$ yr, ^{36}Cl 的 β 衰变产物是 ^{36}Ar), 估计 Efremovka 陨石形成时初始 $^{36}\text{Cl} / ^{35}\text{Cl}$ 约为 $(1.4 \pm 0.2) \times 10^{-6}$ ^[8]。陨石中 ^{36}Ar 超丰的观测结果尚有待于进一步证实。

表 1 太阳系短寿命放射性核素初始丰度

核素	半衰期 / 10^6yr	同位素比值
^{41}Ca	0.103	$^{41}\text{Ca}/^{40}\text{Ca} = (1.5 \pm 0.3) \times 10^{-8}$
^{26}Al	0.73	$^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al} \approx 5 \times 10^{-5}$
^{60}Fe	1.5	$^{60}\text{Fe}/^{56}\text{Fe} \approx 1 \times 10^{-8}$
^{135}Cs	2.3	$^{135}\text{Cs}/^{133}\text{Cs} \leq 1 \times 10^{-5}$
^{53}Mn	3.7	$^{53}\text{Mn}/^{55}\text{Mn} \approx 6 \times 10^{-6}$
^{107}Pd	6.5	$^{107}\text{Pd}/^{110}\text{Pd} \approx 9 \times 10^{-5}$
^{182}Hf	9.0	$^{182}\text{Hf}/^{180}\text{Hf} \geq 5 \times 10^{-6}$
^{205}Pb	15.0	$^{205}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 极小
^{247}Cm	15.6	$^{247}\text{Cm}/^{235}\text{U}_{4.57} < 4 \times 10^{-3}$
^{129}I	15.7	$^{129}\text{I}/^{127}\text{I} \approx 1.5 \times 10^{-4}$
^{92}gNb	36.0	$^{92}\text{Nb}/^{93}\text{Nb} = (1.5 \pm 0.3) \times 10^{-5}$
^{244}Pu	80.0	$^{244}\text{Pu}/^{238}\text{U}_{4.57} \approx 0.007$
^{146}Sm	103.0	$^{146}\text{Sm}/^{144}\text{Sm} = 0.008 \pm 1.0$

为了解释太阳系短寿命放射性核素的丰度特征，人们提出了三种不同的模型：(1) 超新星爆发引起的分子云自增丰模型^[7]；(2) 分子云受到从其附近经过的、正经历质量损失的 AGB 星 (渐近巨星支) 的污染^[9,10]；(3) 超新星爆发产生的宇宙线与分子云内部的其它核素相互作用产生的散裂反应^[11,12]。为了叙述方便，以上三种模型分别被简称为分子云自增丰模型、AGB 星污染模型和散裂反应模型。

2.1 分子云自增丰模型

Harper 提出超新星爆发引起的分子云自增丰模型^[7]，认为 II 型和 Ia 型超新星爆发的核合成产物污染了正在形成的前太阳星云，使太阳星云的放射性核素丰度特征明显改变。这一模型的主要依据是银河系内的短寿命放射性核素大部分来自于大质量星的 II 型或 Ib 型超新星爆发。下面将逐个讨论与超新星关系最密切的四种短寿命放射性核素 (^{107}Pd 、 ^{60}Fe 、 ^{53}Mn 、 ^{26}Al) 的核合成来源：

- ^{107}Pd ： ^{107}Pd 是由 r- 过程 (快中子俘获过程) 和 s- 过程 (慢中子俘获过程) 合成的， ^{107}Pd 的 β 衰变产生稳定核素 ^{107}Ag 。所以， ^{107}Ag 的恒星来源与 ^{107}Pd 的相同。通过拟合太阳系主要核素丰度分布，Kappeler 等人指出 95% 的 ^{107}Ag 来自于 r- 过程^[13] (这是由于 ^{107}Pd 的半衰期长于 s- 过程的典型时标， ^{107}Pd 还没来得及发生 β 衰变就已先俘获一个中子生成 ^{108}Pd ， ^{107}Ag 几乎被 s- 过程完全屏蔽)。因此， ^{107}Pd 可以看作是一个纯 r- 过程的放射性核素，即 ^{107}Pd 几乎全部来源于超新星爆发。
- ^{60}Fe ：关于银河系中的 ^{60}Fe ，目前尚不清楚其主要是来自于 Ia 型还是 II 型超新星爆发^[7,14]。大质量星的核合成计算表明，初始质量函数累加后，II 型超新星爆发抛出的 $(^{60}\text{Fe}/^{56}\text{Fe})_{\text{SNII}}$ 的质量比约为 0.0003^[15]，与 Harper 的估计值 (≈ 0.0004) 很接近^[16]。假设银河系的 II 型超新星爆发率是每百年 3 次、每次事件平均产生 $0.1M_{\odot}$ 的 ^{56}Fe ，Woosley 和 Weaver 的核合成计算预言现在的星际介质中约有 $2M_{\odot}$ 的 ^{60}Fe 来自于 II 型超新星爆发^[7,15]，而 Timmes 等人的估计值为 $(1.7 \pm 0.9)M_{\odot}$ ^[17]。另外，Ia 型超新星爆发率为每百年 0.02 次^[14]，每次事件产生的 ^{60}Fe 平均为每次 II 型超新星爆发的 100 倍，所以，Ia 型超新星爆发也可能是银河系中 ^{60}Fe 的另一个重要来源^[14,17]。

- ^{53}Mn : 根据太阳系核素丰度分布中 ^{53}Cr 的丰度分析, 可以确定 ^{53}Mn 的恒星来源^[7]。Timmes 等人发现 ^{53}Cr 几乎全部来源于超新星爆发 (在超新星核合成计算的模型中, 稳定核素 ^{53}Cr 由放射性核素 ^{53}Mn 或其短寿命母核 (precursor) ^{53}Fe 的 β 衰变产生^[15,18]), II 型和 Ia 型超新星爆发的产量相当^[19]。因此, ^{53}Mn 主要是超新星爆发的产物。
- ^{26}Al : 情况比较复杂。与上述放射性核素不同, 大量的 ^{26}Al 产生于超新星爆发前的恒星演化阶段。关于星际介质中 ^{26}Al 的来源问题, 彭秋和已给出了详细的综述^[20~22], 这里不再重复。超新星核合成的计算结果表明, ^{26}Al 的产生量随模型中各参量的不同而有很大差异^[22], 尤其是考虑了中微子过程后, 将对 ^{26}Al 的合成量产生很大的影响^[17]。尽管关于 ^{26}Al 是否主要来源于 II 型超新星爆发仍存在争论和许多不确定性^[22], II 型超新星仍足以解释银河系中观测到的所有的 ^{26}Al ^[17]。

从核合成角度来看, 短寿命放射性核素主要是超新星爆发的产物。Harper 的拟合结果表明, 除 ^{26}Al 有较大的偏离外 (实际的 ^{26}Al 比模型预言的要高 2 个量级), 超新星爆发引起的分子云自增丰模型能较好地拟合太阳系的原始放射性核素丰度特征^[7]。因此, 太阳星云可能受到超新星爆发产物的污染。然而, 若要认真考虑这一模型是否可以解释太阳系的诞生环境, 还需为 ^{26}Al 这一问题提供满意的答复。

2.2 AGB 星污染模型

Wasserburg 等人^[9,10] 以及 Cameron 等人^[22,23] 曾提出, 早期太阳系的 ^{41}Ca 、 ^{26}Al 、 ^{60}Fe 、 ^{107}Pd 主要来源于正经历质量损失的、低质量 AGB 星, 这些路过的 AGB 星可能曾靠近或进入太阳星云的内部。在这个模型中, ^{26}Al 通过 $^{25}\text{Mg}(\text{p},\gamma)^{26}\text{Al}$ 在 He 壳层中合成, 而 ^{41}Ca 、 ^{60}Fe 、 ^{107}Pd 分别通过 $^{40}\text{Ca}(\text{n},\gamma)^{41}\text{Ca}$ 、 $^{58}\text{Fe}(\text{n},\gamma)^{59}\text{Fe}(\text{n},\gamma)^{60}\text{Fe}$ 、 $^{106}\text{Pd}(\text{n},\gamma)^{107}\text{Pd}$ 在 He 燃烧壳层中合成。这些核合成产物被对流引起的第三次挖掘带到恒星表面, 由星风或超星风抛入星际介质 (在此之前, 恒星大气的化学成分已被两种混合机制改变。在红巨星阶段, 对流外包层深入到氢燃烧的内部区域, 将 CNO 循环产物带到恒星表面, 这称为第一次挖掘。第二次挖掘发生在大质量星核心氢耗尽后, 低质量恒星不发生第二次挖掘。第三次挖掘发生在 AGB 星热脉冲阶段, 深层对流将氢燃烧壳层的核合成产物带到恒星外包层, 使 AGB 星表面 s-核素和 ^{12}C 明显超丰)。通过调整自由参数, 这一模型可以较好地拟合早期太阳系中的 ^{41}Ca 、 ^{26}Al 、 ^{60}Fe 、 ^{107}Pd ^[9,10]。但 AGB 星污染模型无法解释早期太阳系中曾出现过 ^{53}Mn 这一事实^[9,10]。

AGB 星污染模型还存在一个不足之处: 为了能较好地拟合观测到的 ^{41}Ca 、 ^{26}Al 、 ^{60}Fe 、 ^{107}Pd , 模型要求 AGB 星的平均中子辐照量 $\tau_0 \approx 0.03\text{mb}^{-1}$ ^[9,10], 这比从拟合太阳系主要核素丰度分布得出的 $\tau_0 \approx 0.28\text{mb}^{-1}$ 约小一个量级^[13,25]。最近, Busso 等人的 s-过程核合成计算表明, AGB 星的中子辐照量 τ_0 的典型范围是 $0.2 \sim 0.6\text{mb}^{-1}$ ^[26], 且 τ_0 随金属丰度 Z 的增加而减少, 即: $\tau_0 \propto Z^{-1}$ ^[26,27]。由于低质量星需经过很长时间才能演化到 AGB 阶段, 能够污染原太阳星云的 AGB 星的金属丰度应该比太阳系的金属丰度要低。因此, 污染原太阳星云的 AGB 星的中子辐照量 τ_0 应该大于能较好地拟合太阳系核素丰度的 τ_0 。这更增加了上述问题的严重性。

另外, 低质量 AGB 星很少与恒星形成区成协。根据 Kastner 和 Myers 的估算^[28], 分子云在 10^6yr 中遇上一个外来 AGB 星的概率只为 1%。这似乎否定了 AGB 星污染模型。

2.3 散裂反应模型

Compton γ 射线天文卫星上天后, 星载 COMPTEL 探测器探测到了极高的来自 Orion 星云的宇宙线流量。分析表明, 它大约是太阳附近宇宙线流量的 30 倍。超新星爆发的抛射物与星际介质的相互作用会使宇宙线加速, 从而产生很高的宇宙线流量。Clayton 等人讨论了观测到的 γ -射线对早期太阳系的短寿命放射性核素丰度的影响, 并提出了宇宙线粒子与分子云内其它核素发生散裂反应产生 ^{26}Al 的模型, 有关的反应渠道为: $^{26}\text{Mg}(p,n)^{26}\text{Al}$ 、 $^{23}\text{Na}(\alpha, n)^{26}\text{Al}$ 、 $^{24}\text{Mg}(\alpha, pn)^{26}\text{Al}$ 、 $^{16}\text{O}(^{12}\text{C}, pn)^{26}\text{Al}$ 和 $^{16}\text{O}(^{16}\text{O}, \alpha pn)^{26}\text{Al}$ ^[11,12,29]。他们还指出, 散裂反应可能是早期太阳系 ^{53}Mn 、 ^{60}Fe 、 ^{107}Pd 和 ^{92}Nb 的又一来源, 反应渠道分别是: $^{56}\text{Fe}(p, \alpha)^{53}\text{Mn}$ 、 $^{64}\text{Ni}(p, p'\alpha)^{60}\text{Fe}$ 、 $^{108}\text{Pd}(p, p'n)^{107}\text{Pd}$ 、 $^{92}\text{Zr}(p, n)^{92}\text{Nb}$ 。

然而, 这一模型遇到两个重大的困难^[30,31]: 一是模型要求极高能量的宇宙线, 二是会导致 Li、Be、B 超丰。Clayton 等人讨论了这些问题, 他们指出有异常化学组成的 (anomalous composition)、低能量的宇宙线能够拟合出太阳系放射性核素丰度分布^[12]。然而, 这种极端条件的要求似乎说明, 散裂反应模型可能无法解释太阳系短寿命放射性核素丰度分布。

3 陨石中同位素丰度异常及其解释

陨石是珍贵的宇宙物质样品。陨石包体中单个矿物颗粒形成于不同类型的 (包括爆发性的) 恒星包层, 并在太阳系形成后仍得以幸存^[32,33]。在实验室对这些颗粒的研究, 能够提供关于恒星核合成、恒星演化及其内部物质的混合、矿物形成时恒星包层的物理和化学条件、早期太阳星云的矿物来源等方面的重要信息。

已被证认存在陨石包体中的矿物颗粒包括: 碳硅石 (SiC)、金刚石 (diamond)、石墨 (graphite)、刚玉 (corundum, Al_2O_3)、尖晶石 (spinel, MgAl_2O_4)、 Si_3N_4 等。所有这些矿物中, 研究较深入的是碳硅石、石墨和尖晶石。因为它们的尺度较大 ($> 1\mu\text{m}$), 且相对来讲含有较丰富的微粒, 能够用离子微探针针对单个矿物颗粒中的一些元素进行同位素分析。在碳硅石中有一小部分 (约 1%) 与其他碳硅石颗粒有完全不同的同位素组成^[34~38], 表明这种碳硅

石与其他的碳硅石有不同的恒星来源。为了加以区别, 将其称为 X 型碳硅石, 并将它和普通的碳硅石作为两种类型的矿物颗粒分别讨论。

图 1~5 给出从陨石中分离出的前太阳颗粒的同位素组成^[39]。图中实线或虚线均表示太阳系的相应值。由图 1~5 可见, 不同类型矿物的同位素组成有很大的差别, 例如, 碳硅石 (相对于太阳系) 有较高的 $^{14}\text{N}/^{15}\text{N}$ 和较低的 $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ 比值, 而大部分的石墨和 X 型碳硅石 (相对于太阳系) 有较低的 $^{14}\text{N}/^{15}\text{N}$ 和较高的 $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$,

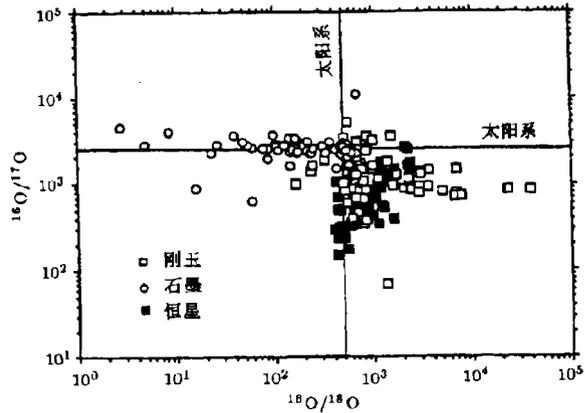


图 1 石墨、尖晶石和恒星的氧同位素组成的比较^[39]

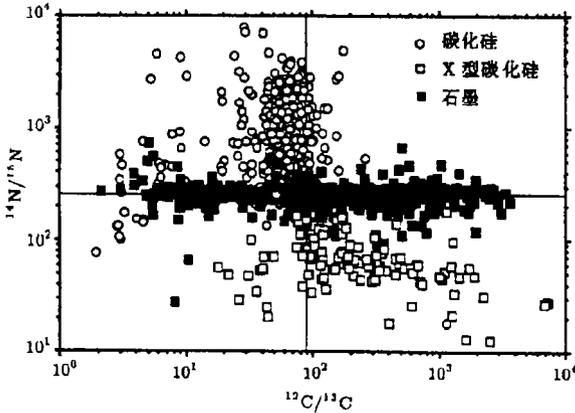


图2 碳硅石、X型碳硅石和石墨颗粒的碳和氮的同位素比值^[39]

且有较高的 $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$ 比值 (量级为 0.1)^[34~36]。在有些情况下还发现有 ^{44}Ca 和 ^{49}Ti 的超丰^[34,37,38]。低密度石墨的 Si、C、N 的同位素组成特征与 X 型 SiC 的相似, 但还有 ^{18}O 的明显超丰 (达到太阳系的 200 倍)^[40,41], 且有些还有 ^{41}Kr 的超丰^[41]。

低密度石墨 ^{18}O 的明显超丰, 表明它来自于大质量星^[40,41]。 ^{18}O 在恒星氦壳层中由 ^{14}N (由先前的 CNO 循环产生) 的不完全氦燃烧合成, 反应渠道为 $^{14}\text{N}(\alpha, \gamma)^{18}\text{F}(e^+, \gamma)^{18}\text{O}$ 。对于低质量和中等质量的恒星, ^{18}O 在达到恒星表面前已被破坏, 从而无法凝结在星际尘埃中。但对于大质量星, 富含 ^{18}O 的壳层可以在 Wolf-Rayet 星从碳序到氮序的转换或在 II 型超新星爆发过程中被抛出。由于 Wolf-Rayet 星无法解释石墨颗粒中 ^{15}N 和 ^{28}Si 的超丰^[40], II 型超新星被认为是最可能的恒星来源。

低密度石墨和 X 型碳硅石中 ^{44}Ca 的超丰, 是其来自于超新星的最有力的证据^[34,37,38]。 ^{44}Ca 的超丰是颗粒形成后, 由放射性核素 ^{44}Ti ($T_{1/2} = 47\text{yr}$) 的衰变引起的。由于 ^{44}Ti 只能在超新星的内层区域合成^[17,43,44], 它的出现表明超新星内部曾发生过深度混合。另一个证据是低密度石墨的 ^{41}Kr 的超丰^[41]。 ^{41}Kr 的超丰最可能是由放射性核素 ^{41}Ca ($T_{1/2} = 1.05 \times 10^5\text{yr}$) 的衰变引起的, 相应的 $^{41}\text{Ca}/^{40}\text{Ca}$ 比值高至 0.017^[41]。这比 s- 过程核合成计算给出的 AGB 星表面的比值 ($(0.3 \sim 1.5) \times 10^{-4}$) 高^[10], 但与 II 型超新星的核合成计算结果相吻合^[15]。

且石墨有较大的 ^{18}O 超丰, 这表明它们来自于不同类型的恒星包层。以下将以其最可能的恒星来源为线索, 逐个讨论这些矿物颗粒的同位素组成。

3.1 来源于超新星的矿物

陨石中有三种星周尘粒 (circumstellar grains) 可能来自于超新星: 低密度石墨^[38,40,41]、X 型碳硅石^[34,36~38]、 Si_3N_4 ^[42]。 Si_3N_4 颗粒比较少见, 它与 X 型碳硅石有相似的同位素组成^[42]。X 型碳硅石超丰较高的同位素 (相对于太阳系) 有 ^{15}N ($^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ 最高达太阳系的 23 倍)、 ^{28}Si (达太阳系的 4 倍)、 ^{12}C (达太阳系的 80 倍),

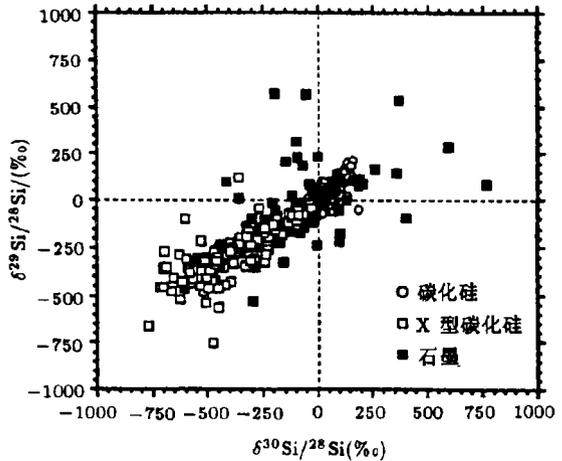


图3 碳硅石、X型碳硅石和石墨颗粒的硅同位素比值^[39]

其中 $\delta A/B \equiv [(A/B)_{\text{样品}} / (A/B)_{\text{太阳}} - 1] \times 1000$, 表示样品的同位素比值与太阳的偏离程度

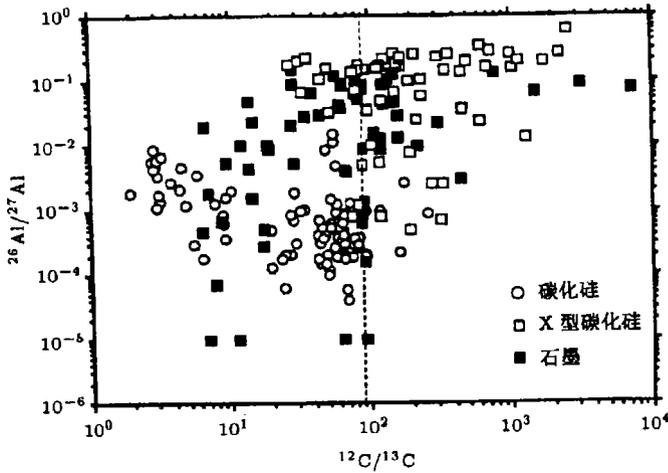


图 4 碳硅石、X 型碳硅石和石墨颗粒的 $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ 和 $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$ ^[39]

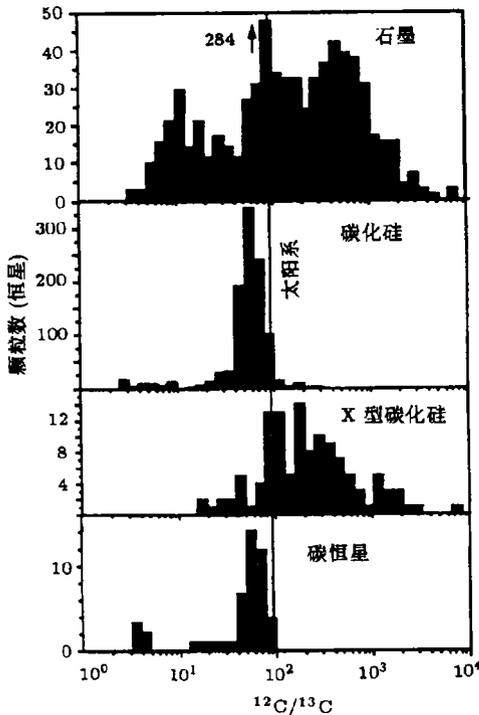


图 5 碳硅石、X 型碳硅石、石墨颗粒和碳星的 $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ 分布^[39]

II 型超新星的核合成计算结果能定性解释 X 型碳硅石、低密度石墨和 Si_3N_4 颗粒的同位素组成特征：超新星 He/C 带富含 ^{18}O 和 ^{15}N ，He/N 带 $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$ 的比值比较高， ^{28}Si 能通过氧燃烧在超新星内层区域合成^[34,38,41,42]。然而，为了定量拟合观测数据，要求超新星爆发时发生深度的、不同带之间有选择的混合^[34,37,38,42]。有观测证据表明超新星爆发时曾发生了深度混合^[45,46]，并且，流体动力学计算也得到了宏观尺度上的混合^[47~49]，但仍未得到微观尺度上混合的计算结果^[44]。

尽管 II 型超新星的核合成能定性解释低密度石墨及与其相似的同位素组成，在定量拟合时，仍存在问题^[42]。最严重的问题是 II 型超新星的核合成不能解释较高的 $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$ 比值并伴随有较高的 ^{15}N 超丰。X 型碳硅石中 $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$ 的最高比值（最高至 0.6）比超新星核合成模型预言的任何值（如模型预言初始质量为 $15M_{\odot}$ 的 II 型超新星爆发产生的 $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$ 比值最高，数值为 0.4）都高，并且最高比值是在 He/C 带，而不是在 He/N 带^[17]。由于 He/N 带中氮的含量很高，且更多的是 ^{14}N ，

高的 $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$ 必将同时有高的 $^{14}\text{N}/^{15}\text{N}$ 比值^[42]，这与观测结果不相符合。另一个问题是硅

同位素的比值。虽然超新星的不同带之间的有选择的混合能解释 ^{28}Si 的超丰, 但无法得到观测到的硅同位素的比值 (如图 3)^[42]。

3.2 来源于红巨星 (包括 AGB 星) 的矿物

3.2.1 碳硅石

通常认为大部分的碳硅石颗粒来源于 AGB 星, 原因如下: (1) 单个碳硅石颗粒的 $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ 分布与碳星的非常相似 (见图 5); (2) 星际介质中的碳质尘埃主要来自于 AGB 星^[39]; (3) AGB 星外包层含有尘埃, 且表现出碳化硅的典型的辐射特征^[50,51]; (4) 陨石中大部分的碳硅石有 Kr、Xe、Ba、Nd、Sm 等 s-核素的超丰^[32], 而 AGB 星是 s-核素的主要来源。

大部分碳硅石 (相对于太阳系来讲) 有较高的 $^{14}\text{N}/^{15}\text{N}$ 和较低的 $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ 比值 (见图 2)。 ^{13}C 和 ^{14}N 主要是 CNO 循环的产物。经过第一次挖掘, 恒星内部区域的氢燃烧产物被带到恒星表面, 使得恒星在 AGB 阶段开始时, 外包层已有丰富的 ^{13}C 和 ^{14}N , 相应的 $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ 和 $^{14}\text{N}/^{15}\text{N}$ 分别为 20~30、500~850^[52,53]。此后, 第三次挖掘将氢燃烧合成的 ^{12}C 带到恒星表面, 使 $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ 比值升高^[54~56]。因此, 第一次和第三次挖掘相结合, 可以解释大部分碳硅石的 C、N 同位素组成异常。

然而, 有些碳硅石的 $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ 比值低于 20, 与以上模型不相符合。引入 HBB (hot-bottom burning) 模型后, 仍未解决这一问题^[39,53]。HBB 发生在 AGB 星的热脉冲间隔, AGB 星外包层的深层对流使包层底部发生氢燃烧。HBB 其间, 整个外包层被氢燃烧带包围, 使得恒星表面富含 CNO 循环产物, $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ 比值低至 3.5^[57]。然而, HBB 的氢燃烧将第三次挖掘出的 ^{12}C 合成 ^{14}N , 使 AGB 星无法演化为碳星^[58], 而 $\text{C}/\text{O} > 1$ 是形成碳硅石的必要条件。另外, 对于 $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ 较低的那部分碳硅石, HBB 模型预言的 $^{14}\text{N}/^{15}\text{N}$ 比观测到的值要高^[57,59]。所以, 目前尚未解决 $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ 较低的那部分碳硅石中碳和氮同位素组成问题, 这是对核天体物理的一项挑战。

3.2.2 尖晶石

由于恒星内层区域的 CNO 循环产生 ^{17}O 而破坏 ^{18}O , 第一次挖掘能够解释大部分尖晶石 (相对于太阳系) 较高的 ^{17}O 超丰和中等程度的 ^{18}O 的欠丰 (见图 1)。然而, 尖晶石氧同位素组成弥散较大, 说明它们不是来自于同一颗星, 而是分别形成于不同初始质量、不同初始化学组成的多颗星的外包层。因为红巨星外包层的 $^{16}\text{O}/^{17}\text{O}$ 是初始质量的函数, 而 $^{16}\text{O}/^{18}\text{O}$ 主要与初始化学组成有关^[59]。

一部分尖晶石的 $^{16}\text{O}/^{18}\text{O}$ 比值较高, 它们的氧同位素组成无法通过改变恒星的初始金属丰度来解释。它们中 $^{16}\text{O}/^{17}\text{O}$ 较低的一部分可能来自于中等质量的 AGB 星, 这些 AGB 星的 HBB 过程能有效破坏 ^{18}O ^[60]。然而, 只有质量大于 $4M_{\odot}$ 的 AGB 星才有 HBB 过程^[60], 而且这类星的 $^{16}\text{O}/^{17}\text{O}$ 一般小于 1.0×10^3 ^[59,60], 无法解释 $^{16}\text{O}/^{17}\text{O}$ 较高、同时 ^{18}O 欠丰较大的尖晶石的同位素组成。为此, Boothroyd 等人引入了一种深度混合过程, 称为 “cool bottom processing”^[60]。在这一模型中, 氢燃烧壳层和对流外包层的底部发生混合, 将 ^{18}O 带到高温区域, 在那儿 ^{18}O 被破坏。如上所述, 深度混合能够得到有些碳硅石的低的 $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ 比值, 却无法解释其较高的 $^{14}\text{N}/^{15}\text{N}$ 比值。另外, 少量的尖晶石 ^{17}O 和 ^{18}O 均超丰。对这些颗粒的同位素组成异常, 目前还没有很好的解释。

3.3 其他恒星来源

Wolf-Rayet 星和新星也曾被认为是陨石中前太阳矿物颗粒的恒星来源^[34,40]。Wolf-Rayet

星的氢燃烧可以产生高的 $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$ 比值和 ^{15}N 的超丰^[61,62]，但这一模型无法解释恒星尘中硅同位素组成异常^[34,40]。新星的爆炸性氢燃烧也可产生高的 $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$ 比值和 ^{15}N 的超丰^[63,64]，但同时生成大量的 ^{13}C ，从而有较低的 $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ 比值^[65]，这与观测事实不相符合。另外，新星核合成模型无法解释恒星尘的硅同位素组成异常和 X 型碳硅石中 ^{44}Ca 和 ^{49}Ti 的超丰^[34]。

4 陨石中惰性气体的同位素丰度异常

在同位素组成异常方面，惰性气体的研究很少。作为代表，这里只给出最常提到、研究较深入的氦和氩同位素组成异常及其解释。

4.1 氦同位素丰度异常

根据目前已有的地内和地外物质氦同位素测定的结果，绝大部分数据落在 Ne-A (行星的氦同位素组成)、Ne-B(太阳风的氦同位素组成) 和 Ne-S (宇宙线散裂反应产生的氦同位素组成) 所组成的三角形内，但发现陨石的石墨颗粒富含 ^{22}Ne 成分^[32]，称为 Ne-E，如图 6 所示，图中 S、P、CR 分别相应于太阳、行星和宇宙线的氦同位素组成。太阳的 $^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne} \approx 13$ ，地球大气层的 $^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne} \approx 9.8$ ，而 Ne-E 组分的 $^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne} < 0.01$ ， $^{21}\text{Ne}/^{22}\text{Ne} < 10^{-4}$ ，几乎是纯净的 ^{22}Ne ^[32]。因此，Ne-E 的成因不可能是太阳系内正常同位素组成变化，而是由短寿命放射性核素 $^{22}\text{Na}(T_{1/2} = 2.6 \text{ yr})$ 的衰变产生的。

与上述超新星引起的分子云自增丰模型相一致，Clayton 给出的对 Ne-E 异常组分的解释可能是最好的：这些石墨颗粒可能是超新星爆发膨胀的最初几小时内凝结形成的，与此同时，在超新星壳层中新合成的、具有可追溯数

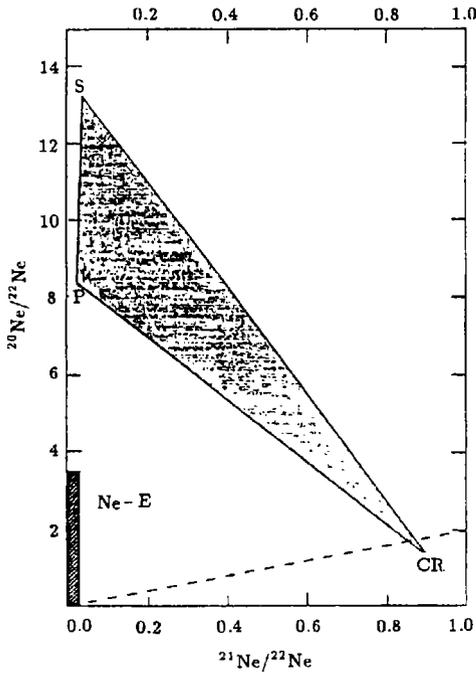


图 6 氦的三种核素相关图^[2]

量的 ^{22}Na 也被凝结而包含在这些颗粒中^[66]。Clayton 提出的超新星爆发时有尘埃凝结的预言^[66,67]，被 SN 1987A 观测的结果所证实^[46]。

Clayton 等人还详细讨论了早期宇宙线产生相当数量 ^{22}Na 的可能性^[12,63]。在气体阶段，反应 $^{22}\text{Ne}(p, n)^{22}\text{Na}$ 可以保持 $^{22}\text{Na}/^{22}\text{Ne} = 3 \times 10^{-10}$ ，然而，若要解释 Ne-E 的同位素组成异常，需要石墨矿物能够同时足够快地增长，使新合成的 ^{22}Na 在衰变前就已被凝结在矿物之中。另一方面，如果考虑到固体的辐射，反应 $^{25}\text{Mg}(p, \alpha)^{22}\text{Na}$ 将在矿物颗粒中产生足够多的 ^{22}Na ，但为达到矿物 Ne-E 中的 ^{22}Ne 的高丰度，同时也生成大量的氦的其它同位素^[68]，这就要求热颗粒能迅速抛出 ^{20}Ne 、 ^{21}Ne ，且紧接着发生年时标的快速冷却，以保留 ^{22}Na 的衰变产物 ^{22}Ne 。所以，正经历恒星形成的分子云中的宇宙线辐射可能与石墨矿物颗粒的氦

同位素丰度异常有关^[12]。

4.2 氙的同位素异常

尽管金刚石矿物颗粒非常小 (约 2×10^{-7} cm), 以至于 $10^6 \sim 10^7$ 个颗粒中才有一颗包含 1 个氙原子, 其氙同位素的异常组成经常被认为是与 II 型超新星相联系的证据^[69,70]。这种组成异常的氙被记为“HL-Xe”, 因为它们的特征是氙的重 (H) 和轻 (L) 同位素相对于中等质量同位素有明显的超丰。图 7 给出 HL-Xe 相对于太阳系的氙组成的超丰, 其中 HL-Xe 和太阳系的数据分别取自文献^[71]和^[72]。

金刚石矿物中氙的同位素组成异常经常被解释为 p- 过程和 r- 过程的异常, 但 HL-Xe 的丰度异常不能直接由平均的 p- 过程和 r- 过程产生的氙与正常组成 (即太阳系的) 的氙简单混合产生, 因为那会使两个纯 r- 核素 ^{134}Xe 、 ^{136}Xe 有相同的超丰因子, 也会使两个纯 p- 过程核素 ^{124}Xe 、 ^{126}Xe 的超丰相等^[73], 而这与观测结果显然不符 (参见图 7)。因此, HL-Xe 被认为是在一些特殊的核合成过程 (比如中子暴 (neutron burst)) 或是介于 r- 和 s- 过程间的“微 r- 过程” (mini-r-process)^[69,74] 中产生的。然而, 在一些 C3V 陨石中, H-Xe 所含的 ^{136}Xe 约占这些陨石的 ^{136}Xe 总量的 8%^[71], 根据对太阳系氙同位素组成的分析可知^[72], 这与 H-Xe 的 ^{136}Xe 含量在太阳系中所占的比重相同^[73]。这表明产生 HL-Xe 的核合成过程应当是正常的, 而不是一种仅仅用来解释氙同位素组成的特殊的过程^[73]。

Ott 提出了一种模型^[73]。该模型认为 H-Xe 是由典型的 r- 过程 (即产生大部分太阳系的 Xe 重同位素的 r- 过程) 产生的, 但要求 r- 过程结束后, 氙同位素在它的放射性母体衰变为稳态氙这一过程完成之前就从其母体中隔离出来, 典型的隔离时标是几小时。为使上述隔离机制成为可能, Ott 提出了三种可能的机制。第一种是结晶。问题的关键在于, 在几小时内是否可能以结晶的方式达到隔离。通常认为超新星爆发时结晶的形成是以月而不是以小时的时标进行的^[75,76], 观测结果似乎也支持这一点^[77]。然而, 仍有计算表明, 特定的条件下有可能在 10^4 s 内结晶^[78]。另一种机制是 r- 过程产物在几小时内被一些矿物颗粒俘获, 然后其不稳定母体在金刚石矿物内发生核衰变。最后一种可能的机制是离子-中性物质的电荷态分离。显然, 以上三种机制都必须发生在超新星爆发的环境中^[73]。

Ott 的模型不但可以定量给出 $^{131}\text{Xe}/^{136}\text{Xe}$ 、 $^{132}\text{Xe}/^{136}\text{Xe}$ 、 $^{129}\text{Xe}/^{132}\text{Xe}$ 、 $^{131}\text{Xe}/^{132}\text{Xe}$ 比值, 还可定性解释 H-Xe 和 H-Kr 的一些特性^[47]。然而, 上述三种可能的分离机制中, 是否有一种可以在超新星爆发环境中以小时的时标发生仍需进一步的研究。而且, Ott 提出的模型在定量拟合 L-Xe 的同位素组成时, 给出的 $^{124}\text{Xe}/^{126}\text{Xe}$ 比值比太阳系的要高得多^[73]。

5 结 束 语

长期以来, 太阳系元素丰度被认为是太阳系形成时本地星际介质的化学组成。然而, 随

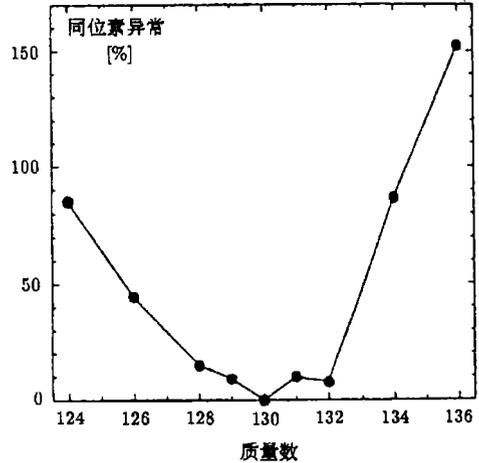


图 7 金刚石矿物中氙同位素相对于太阳系的超丰 (%)^[73]

着太阳系原始同位素丰度异常、恒星以及不同星际场所观测到的元素丰度与太阳系元素丰度偏离等现象的发现^[1]，能否将太阳系元素丰度当作归一标准已得到越来越多的人的关注。

在恒星形成区，不同的环境将具有不同的放射性核素丰度特征。考察太阳星云的原始放射性核素丰度特征可以获得太阳系诞生环境方面的重要信息。太阳星云的短寿命放射性核素¹⁰⁷Pd、⁶⁰Fe和⁵³Mn的丰度与超新星爆发引起的分子云的自增丰模型相一致，表明太阳星云在形成前后的短时间内可能混入了II型超新星爆发的核合成产物，但这一模型仍不能圆满解释目前存在的²⁶Al问题。AGB星污染模型和散裂反应模型也被用来解释太阳星云的原始放射性核素丰度特征，然而，目前这两种模型还存在不少的困难。

另外，陨石包体中前太阳矿物颗粒形成于不同类型的(包括爆发性的)恒星包层，它们是研究太阳系形成环境的另一探针。已被证认的前太阳颗粒中低密度石墨、X型碳硅石可能来源于超新星爆发，而AGB星或红巨星被认为是尖晶石和碳硅石的最可能的恒星来源。太阳系中比较特殊的氦和氘的同位素组成异常也与超新星爆发密切相关。

尽管仍存在不少细节问题，从太阳系原始同位素丰度异常来看，原太阳星云在形成前后曾受到系外物质(尤其是II型超新星爆发)的污染是一种可能的解释。这一点与太阳附近20pc内不存在大质量星的观测事实是一致的。太阳系形成后，这些大质量星可能早已经历了超新星爆发阶段。

致谢 本文作者衷心感谢南京大学天文系彭秋和教授和上海天文台束成钢博士提出的宝贵意见和建议。

参 考 文 献

- 1 Grevesse N, Noels A, Sauval A J. In: Stephen S H, George S eds. Cosmic abundances, proceedings of the sixth annual october astrophysics conference in college park, Maryland, 1995, ASP Conference Series, No. 99, 1996: 117
- 2 Trimble V. *Astron. Astrophys. Rev.*, 1991, 3: 1
- 3 Podosek F A. *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, 1978, 16: 293
- 4 Black D C. *Geochim. Cosmochim. Acta.*, 1972, 36: 377
- 5 Clayton R N et al. *Science*, 1973, 182: 485
- 6 侯金良. *天文学进展*, 1997, 15: 352
- 7 Harper C L Jr. *Ap. J.*, 1996, 466: 1026
- 8 Murty S V S, Goswami J N. *Ap. J.*, 1997, 475: L65
- 9 Wasserburg G J, Busso M, Gallino R et al. *Ap. J.*, 1994, 424: 412
- 10 Wasserburg G J, Gallino R, Busso M et al. *Ap. J.*, 1995, 440: L101
- 11 Clayton D D. *Nature*, 1994, 368: 222
- 12 Clayton D D, Jin L. *Ap. J.*, 1995, 451: 681
- 13 Kappeler F, Gallino R, Busso M et al. *Ap. J.*, 1990, 354: 630
- 14 Woosley S E. *Ap. J.*, 1997, 476: 801
- 15 Woosley S E, Weaver T A. *Ap. J. Suppl. Ser.*, 1995, 101: 181
- 16 Harper C L Jr. *J. Phys. G*, 1993, 19: S81
- 17 Timmes F X, Woosley S E, Hartmann D H et al. *Ap. J.*, 1995, 449: 204
- 18 Weaver T A, Woosley S E. *Phys. Rep.*, 1993, 227: 65
- 19 Timmes F X, Woosley S E, Weaver T A. *Ap. J. Suppl. Ser.*, 1995, 98: 617
- 20 彭秋和. *物理学进展*, 1995, 1: 79
- 21 彭秋和. *天文学进展*, 1995, 13: 305

- 22 彭秋和. 天文学进展, 1995, 13: 315
- 23 Cameron A G W. *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, 1988, 24: 441
- 24 Cameron A G W, Thielemann F K, Cowan J J. *Phys. Rep.*, 1993, 227: 283
- 25 Gallino R, Raiteri C M, Busso M. *Ap. J.*, 1993, 410: 400
- 26 Busso M, Lambert D L, Beglio L *et al.* *Ap. J.*, 1995, 446: 775
- 27 Clayton D D. *M.N.R.A.S.*, 1988, 234: 1
- 28 Kastner J H, Myers P C. *Ap. J.*, 1994, 421: 605
- 29 Cameron A G W. *Nature*, 1994, 368: 192
- 30 Casse M, Lehoucq R, Vangioni-Flam E. *Nature*, 1995, 373: 318
- 31 Ramaty R, Kozlovsky B, Lingenfelter R. *Ap. J.*, 1995, 438: L21
- 32 Anders E, Zinner E. *Meteoritics*, 1993, 28: 490
- 33 Ott U. *Nature*, 1993, 364: 25
- 34 Amari S, Hoppe P, Zinner E *et al.* *Ap. J.*, 1992, 394: L43
- 35 Nittler L R, Amari S, Walker R M *et al.* *Meteoritics*, 1993, 28: 413
- 36 Hoppe P, Pungitore B, Eberhardt P *et al.* *Meteoritics*, 1994, 29: 474
- 37 Hoppe P, Strebel R, Eberhardt P *et al.* *Science*, 1996, 272: 1314
- 38 Nittler L R, Amari S, Zinner E *et al.* *Ap. J.*, 1996, 462: L31
- 39 Zinner E. In: Stephen S H, George S eds. *Cosmic abundances, proceedings of the sixth annual october astrophysics conference in college park, Maryland, 1995*, ASP Conference Series, No. 99, 1996: 147
- 40 Amari S, Zinner E, Lewis R S. *Ap. J.*, 1995, 447: L147
- 41 Amari S, Zinner E, Lewis R S. *Ap. J.*, 1996, 470: L101
- 42 Nittler L R, Hoppe P, Conel M *et al.* *Ap. J.*, 1995, 453: L25
- 43 Woosley S E, Weaver T A. *Ap. J.*, 1994, 423: 371
- 44 Timmes F X, Woosley S E, Hartmann D H *et al.* *Ap. J.*, 1996, 464: 332
- 45 Shigeyama T, Nomoto K. *Ap. J.*, 1990, 360: 242
- 46 Colgan S W J, Haas M R, Erichson E F *et al.* *Ap. J.*, 1994, 427: 874
- 47 Miiller E, Fryxell B, Arnett W D. *Astron. Astrophys.*, 1991, 251: 505
- 48 Herant M, Benz W. *Ap. J.*, 1992, 387: 294
- 49 Herant M, Woosley S E. *Ap. J.*, 1994, 425: 814
- 50 Keady J J, Hall D N B, Ridgway S T. *Ap. J.*, 1988, 326: 832
- 51 Ridgway S T, Keady J J. *Ap. J.*, 1988, 326: 843
- 52 Iben I Jr, Renzini A. *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, 1983, 21: 271
- 53 Hoppe P, Amari S, Zinner E *et al.* *Ap. J.*, 1994, 430: 870
- 54 Boothroyd A I, Sackmann I J. *Ap. J.*, 1988, 328: 653
- 55 Boothroyd A I, Sackmann I J. *Ap. J.*, 1988, 328: 671
- 56 Gallino R, Ratteri C M, Busso M. *Ap. J.*, 1993, 410: 400
- 57 Brown L E, Clayton D D. *Ap. J.*, 1992, 392: L79
- 58 Boothroyd A I, Sackmann I J, Ahern S C. *Ap. J.*, 1993, 416: 762
- 59 Boothroyd A I, Sackmann I J, Wasserburg G J. *Ap. J.*, 1994, 430: L77
- 60 Boothroyd A I, Sackmann I J, Wasserburg G J. *Ap. J.*, 1995, 442: L21
- 61 Dearborn S P, Blake J B. *Ap. J.*, 1985, 288: L21
- 62 Prantzos N, Casse M. *Ap. J.*, 1986, 307: 324
- 63 Clayton D D. *Ap. J.*, 1984, 280: 144
- 64 Starrfield S, Sparks W M, Truran J W. *Ap. J.*, 1985, 291: 136
- 65 Truran J W. *Nucleosynthesis and Its Implications on Nuclear and Partical Physics*, Dordrecht: Reidel, 1986. 97
- 66 Clayton D D. *Nature*, 1975, 257: 36
- 67 Clayton D D. *Ap. J.*, 1975, 199: 765
- 68 Clayton D D, Dwek E, Woosley S E. *Ap. J.*, 1977, 214: 300
- 69 Clayton D D. *Ap. J.*, 1989, 340: 613

- 70 Clayton D D, Meyer B S, Sanderson C I et al. *Ap. J.*, 1995, 447: 894
71 Huss G R, Lewis R S. *Geochim. Cosmochim. Acta.*, 1995, 59: 115
72 Pepin R O, Becher P H, Rider P E. *Geochim. Cosmochim. Acta.*, 1995, 59: 4997
73 Ott U. *Ap. J.*, 1996, 463: 344
74 Howard W M, Meyer B S, Clayton D D. *Meteoritics*, 1992, 27: 404
75 Clayton D D. *Space Sci. Rev.*, 1979, 24: 147
76 Dwek E. *Ap. J.*, 1988, 329: 814
77 Cheralier R A. *Nature*, 1992, 355: 691
78 Lattimer J M, Schramm D N, Grossmann L. *Ap. J.*, 1977, 219: 230

Abundance Characteristic and Synthesis Scenario of the Galactic Chemical Elements (II): On the Isotopic Anomalies of Solar System

Chang Ruixiang Hou Jinliang Fu Chengqi

(*Shanghai Astronomical Observatory, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030*)

Abstract

The isotopic composition of Solar system is the base for studying the origin and evolution of the solar system. The present study reviewed the abundance distribution of extinct radio-nuclides in the solar system and the proposed interpretations: (1) self-contamination of the protosolar cloud by supernovae; (2) contamination by a passing AGB star and (3) high-flux cosmic-ray spallation in the protosolar cloud. Isotopic compositions of presolar grains in primitive meteorites suggest that low density graphite grains and the rare X type SiC grains come from supernovae, yet AGB stars and red gaint stars are stellar sources for SiC grains and corundum grains. Compositions of isotopically anomalous HL-Xe carried by interstellar diamonds and Ne-E carried by graphite particles in meteorites are strongly correlated to the supernova environment.

Key words nuclear reactions, nucleosynthesis, abundances—solar system: formation—interplanetary medium