第 44 卷 第 3 期 天 文 学 报 Vol.44 No.3
2003 年 8 月 ACTA ASTRONOMICA SINICA Aug., 2003

# 太阳系早期的短寿期放射性核素*

徐伟彪

(中国科学院紫金山天文台 南京 210008)

**摘要** 较详细地介绍全新的太阳系起源理论 ——X-wind 模式. 天体化学实验发现太阳系早期存在大量的短寿期放射性核素 (半衰期小于 100 Ma). 这些核素对太阳系的形成和演化有重要的影响. 一种理论认为, 这些核素是在恒星内部合成, 并由星风注入原太阳分子云, 星风产生的激波诱发分子云核的塌缩而形成原太阳. 另一种理论认为, 这些核素是高能粒子与原太阳分子云或太阳星云中的气体和尘埃相互作用的产物.

**关键词** 太阳系: 起源, 天体化学, 短寿期放射性核素

**中图分类号:** P 181

## 1 引言

短寿期放射性核素 (short-lived radionuclides) 是指半衰期在 100 Ma 以内的放射性同位素. 像 $^{26}$Al(半衰期 $T_{1/2} = 0.7$ Ma) 和 $^{41}$Ca ($T_{1/2} = 0.1$ Ma). 由于其半衰期相对于太阳系的年龄 (45.6 亿年) 来说很短, 这些核素在太阳系漫长的演化过程中早已衰变完毕, 现已不复存在. 所以这些核素又称为灭绝核素 (extinct radionuclides). 但是有很多证据表明, 太阳系早期存在大量的短寿期放射性核素. 这些证据大多保留在原始的球粒陨石中. 因为陨石的母体 (小行星) 体积较小 (小于几百公里), 自形成以来没有发生剧烈的地质变化, 较完整地保存了太阳系早期的演化历史. 对陨石中的短寿期放射性核素的研究, 可以为我们提供如下的重要信息: (1) 太阳原始分子云 (molecular clouds) 的物质来源及塌缩机制; (2) 太阳系早期发生的物理化学事件, 如: 双极喷流 (bipolar jets) 和猎户 FU 型星爆发 (FU Orionis outbursts); (3) 原太阳吸积盘 (accretion disk) 的演化历史; (4) 行星系统的形成和演化; (5) 恒星内部的核反应机制 (stellar nucleosynthesis); (6) 太阳系早期高能粒子辐射过程 (energetic particle interactions). 总之, 短寿期放射性核素与太阳系的形成和演化有着密切的关系, 是研究太阳系起源的一个重要工具 [1−3].

## 2 太阳系的起源

太阳作为一颗恒星, 其形成过程与一般恒星的成因机制有很多相似之处. 现代天文学理论和观测表明, 恒星的形成经历了几个不同的阶段 [4,5]. 恒星起源于寒冷 (开尔文温

2002-12-09 收到原稿, 2003-03-25 收到修改稿

* 中国科学院百人计划 “引进国外杰出人才” 资助项目

标 10 度) 致密 (100 — 1000 个分子 /cm$^3$) 的分子云. 分子云包含的质量约为 $10^5$ ~$10^6$ 个太阳质量 ($M_\odot$), 其大小约为几十秒差距 (1 秒差距 = 3.26 光年 = 3.09$^{11}$ 公里). 在分子云中绝大部分是氢分子, 少量为 CO 和其他有机分子和尘埃. 分子云是银河系中质量最大但温度最低的天体. 大尺度的分子云受到高能事件 (energetic events) 的作用发生破碎而形成分子云复合体 (molecular cloud complex). 这些高能事件是与 O 星和 B 星的形成有关. 分子云内部的结构很复杂, 局部地区的密度会高出平均密度的 10 倍以上, 这就是天文学上所谓的分子云核 (cores), 它是恒星的发源地. 分子云核由于万有引力吸积周边的物质, 其质量不断增大, 内部温度也随着增高. 向内的吸引力和向外的热膨胀力相抵而使分子云核处于亚稳定状况. 当分子云核的质量超过一定界限, 或者其磁场双极扩散 (ambipolar diffusion of magnetic field lines), 或者受到星际空间中的激波 (shock wave) 的干扰, 向外的支撑力不能抵御向内的重力引力, 分子云核就发生塌缩. 物质以近于自由落体的方式 (free fall) 掉向中心, 并由内向外传播. 中心的密度不断提高, 温度也随着急剧上升, 热膨胀力逐渐增大并能抵御塌缩, 形成一个处于流体静力学平衡 (hydrostatic equilibrium) 的高温高密度的核心 — 原恒星. 在没有激波干扰的情况下, 分子云从形成到塌缩大约需经历 1 到 10 Ma. 分子云核一旦塌缩, 整个过程只持续 10 万年左右. 原恒星在形成初期, 被包裹在厚厚的星云包层 (envelope) 内, 光学上是观测不到的. 处于这个阶段的原恒星会伴随一些特殊的物理现象, 比如, 双极喷流. 原恒星向两个相反的方向喷射出超音速的分子气流, 形成一个奇特的天体 —HH 天体 (Herbig-Haro objects). 由于星云包层中的物质具有角动量, 它们并不是直接被吸引到原恒星中去, 而是先沉降到围绕原恒星旋转的吸积盘上, 然后再通过盘面的吸积逐渐进入原恒星. 这是一个渐进的过程, 随着星云包层的扩散, 吸积盘不断成长发育, 而进入金牛座 T 型星阶段 (T Tauri stars). 这时的原恒星失去了大部分的星云包层, 但仍保留发育完整的吸积盘. 吸积盘的演化伴随着重力能和动力能的消散和角动量的转换. 演化的时间长短很不确定, 在几十万年到几百万年之间. 行星系统在这个过程中发育成长, 吸积盘最终消失, 原恒星进入弱线金牛座 T 型星阶段 (weak-line T Tauri stars). 此时恒星内部温度升高, 引发核聚变反应, 并开始漫长的主星序 (main sequence) 演化阶段. 太阳本身就是一颗中年期 (年龄为 46 亿年) 的主序星.

以上所述代表了恒星形成的一般规律, 但是太阳系可能是一个特殊的恒星系统, 因为它具有发育完善的行星体系. 到目前为止, 天文观测只发现极少数的恒星带有行星体系. 因此太阳系的形成和演化过程可能带有特殊性. 另一个特别的地方是太阳系早期的短寿期放射性核素. 分子云从形成到塌缩大约需经历 1 到 10 Ma, 而太阳星云 (solar nebula) 的整个演化历史则长达 1 亿年左右. 很难想像这些短寿期放射性核素在经过几千万年的自由衰变 (free decay) 以后, 仍以很高的丰度 (abundances) 出现在太阳系早期的产物中.

## 3 太阳系早期短寿期放射性核素

在上世纪 50 年代 Urey[6] 首先提出短寿期放射性核素的衰变热能可能是引起太阳系早期小行星母体熔融和分异 (melting and differentiation) 的重要能量来源. 几年后,

Reynolds[7] 在陨石中找到了第一个确切的证据，证明太阳系早期存在短寿期放射性核素 $^{129}$I($T_{1/2}$ = 15.7 Ma). 在以后的几十年研究工作中，人们在陨石中发现了大量的证据表明太阳系早期存在很多种短寿期放射性核素，包括 $^{41}$Ca 、 $^{26}$Al 、 $^{60}$Fe($T_{1/2}$ = 1.5 Ma) 、$^{10}$Be($T_{1/2}$ = 1.5 Ma) 、$^{53}$Mn($T_{1/2}$ = 3.7 Ma) 、$^{107}$Pd($T_{1/2}$ = 6.5 Ma) 、$^{182}$Hf($T_{1/2}$ = 9 Ma) 、$^{129}$I 、 $^{244}$Pu($T_{1/2}$ = 82 Ma)[1−3]. 表 1 列出了太阳系早期存在的各种短寿期放射性核素以及初始丰度. 其中，对 $^{26}$Al 的研究工作做得最深入 [8−11]. 早在 1976 年，华裔学者李太枫 (Lee Typhoon) 与加州理工学院的 Wasserburg 教授首次报道了太阳系早期短寿期放射性核素 $^{26}$Al 的证据 [8]. 他们在研究 Allende 碳质球粒陨石 (carbonaceous chondrite) 时发现，该陨石中的富钙富铝包体 (Ca, Al-rich inclusions, 简称 CAIs) 含有 $^{26}$Mg 正异常 (excesses), 并且 $^{26}$Mg 正异常的富集程度与 Al/Mg 比值成正比. $^{26}$Al 的衰变产物是 $^{26}$Mg. $^{26}$Mg 正异常表明矿物在形成时含有 $^{26}$Al, 此后 $^{26}$Al 衰变为 $^{26}$Mg, 而使矿物呈现 $^{26}$Mg 正异常. 由此推算出， CAIs 在形成时的 $^{26}$Al/$^{27}$Al 初始值为 $5\times10^{-5}$($^{27}$Al 是 Al 的稳定核素. 短寿期放射性核素的丰度一般用该元素的放射性核素与稳定核素的比值来表示)[8]. 人们很快发现，不同球粒陨石中的 CAIs 大多含有 $^{26}$Mg 正异常，其 $^{26}$Al/$^{27}$Al 初始最大值则为 $5\times10^{-5}$, 这个值也是在太阳系物质中所能测到的最大值 [9].

**表 1　太阳系早期存在的各种短寿期放射性核素以及初始丰度**

**Table 1　The short-lived radionuclides in the early solar system, their half-lives, and initial abundances**

| 核素<br>Parent nuclide | 衰变产物<br>Daughter nuclide | 半衰期 (Ma)<br>Half-life (Ma) | 初始丰度<br>Initial abundances |
|---|---|---|---|
| $^{41}$Ca | $^{41}$K | 0.1 | $^{41}$Ca/$^{40}$Ca≈$1.5\times10^{-8}$ |
| $^{26}$Al | $^{26}$Mg | 0.7 | $^{26}$Al/$^{27}$Al≈$5\times10^{-5}$ |
| $^{60}$Fe | $^{60}$Ni | 1.5 | $^{60}$Fe/$^{56}$Fe≈$2\times10^{-8}$ |
| $^{10}$Be | $^{10}$B | 1.5 | $^{10}$Be/$^{9}$Be≈$9\times10^{-4}$ |
| $^{53}$Mn | $^{53}$Cr | 3.7 | $^{53}$Mn/$^{55}$Mn≈0.9-4.4$\times10^{-5}$ |
| $^{107}$Pd | $^{107}$Ag | 6.5 | $^{107}$Pd/$^{108}$Pd≈$4.5\times10^{-5}$ |
| $^{182}$Hf | $^{182}$W | 9 | $^{182}$Hf/$^{180}$Hf≈$2\times10^{-4}$ |
| $^{129}$I | $^{129}$Xe | 15.7 | $^{129}$I/$^{127}$I≈$1\times10^{-4}$ |
| $^{244}$Pu | $\alpha$,SF* | 82 | $^{244}$Pu/$^{238}$U≈$7\times10^{-3}$ |

*SF: 自发裂变产物 (spontaneous fission products)

富钙富铝包体 (CAIs) 是毫米到厘米大小的矿物集合体，主要由高温难熔矿物 (refractory minerals) 组成. CAIs 大多出现在碳质球粒陨石中，普通球粒陨石 (ordinary chondrites) 和顽火辉石球粒陨石 (enstatite chondrites) 的含量较小. 一般认为， CAIs 是太阳系中最早形成的物体. 第一，其年龄最老 (4567 Ma)[12] ；其二， CAIs 含有多种短寿期放射性核素并且含量最高；第三，其矿物多为高温难熔，它们将首先从高温气体中凝聚出来.

球粒陨石的另一个重要组成部分是球粒 (chondrules). 球粒是毫米级大小的球形硅酸盐矿物集合体. 它在球粒陨石中的含量可高达 80%. 大量的研究工作表明，球粒是太阳系早期短暂的 (几分钟) 高温 (1800—2100 K) 事件的产物，但是其物理背景却鲜为人知. 研究发现，在球粒陨石中大部分球粒并不含有 $^{26}$Al. 少量球粒含有 $^{26}$Mg 正异常，但是

其 $^{26}Al/^{27}Al$ 初始值要比 CAIs 的低一个数量级以上 ($\leq 1\times10^{-5}$)[13,14]. 假如 $^{26}Al$ 在原始太阳星云中分布均匀, 那么 CAIs 和球粒的 $^{26}Al/^{27}Al$ 初始值的差异意味着球粒至少要比 CAIs 晚形成 2 Ma 以上.

天文观测也证实银河系星际介质中存在大量短寿期放射性核素 $^{26}Al$(2-5 $M_\odot$). 1984 年, Mahoney 等 [15] 用 HEAO 3 空间卫星的 $\gamma$- 射线谱仪, 首次在银河系发现 $^{26}Al$ 衰变时释放出的 $\gamma$ 谱线 (1.8 MeV). 他们估计银河系星际介质中的 $^{26}Al/^{27}Al$ 为 $\sim 1\times10^{-5}$. 这个比值远远低于太阳系的初始值. 观测结果引起了人们的疑问, 为什么太阳原始星云经过数千万年的演化发展, 其 $^{26}Al$ 的丰度不减反增.

## 4 短寿期放射性核素的来源

首先我们需要了解短寿期放射性核素的可能来源. 目前有两种不同的理论解释太阳系早期短寿期放射性核素的起源. 一种理论认为, 这些核素是恒星内部核反应的产物, 然后由星风 (stellar winds) 注入原太阳分子云 (the protosolar cloud), 并与分子云中的物质相混合. 星风产生的激波诱发分子云核的塌缩而形成原太阳. 由于分子云核塌缩的过程时间较短 (10 万年左右), 这些核素并没有衰变完毕, 很多短寿期放射性核素仍以较高的丰度出现在太阳系早期产物中. 另一种理论则认为, 短寿期放射性核素是高能粒子与原太阳分子云 (the protosolar cloud) 或太阳星云 (the solar nebula) 中的气体和尘埃相互作用的产物.

### 4.1 恒星核合成 (Stellar nucleosynthesis)

恒星成因理论主要有两个方面, 一是天体物理理论计算, 另一方面来自实验室恒星尘埃的同位素分析. 理论研究表明, 短寿期放射性核素可形成于几种不同的恒星环境下, 如: AGB 星 (asymptotic giant branch stars), WR 星 (Wolf-Rayet stars) 和 II 型超新星 (Type II supernova). AGB 星是晚年期恒星, 此时的恒星已完成氦燃烧核反应, 体积开始增大而成为巨星. Cameron[2] 和 Wasserburg 等 [16] 计算了短寿期放射性核素在 AGB 星中的产率, 发现 $^{26}Al$ 、$^{41}Ca$ 、$^{60}Fe$ 和 $^{107}Pd$ 能与陨石中观察的结果相吻合, 但是 AGB 星不能产生 $^{10}Be$ 和 $^{53}Mn$. WR 星是大质量的恒星 ($> 25M_\odot$), 它在演化过程中丢失了大部分的质量 (mass-lossing) 而形成强劲的星风. WR 星能产生适量的 $^{26}Al$ 、$^{41}Ca$ 和 $^{107}Pd$, $^{60}Fe$ 的产率偏低, 而 $^{10}Be$ 和 $^{53}Mn$ 则不能形成 [17]. II 型超新星也能产生 $^{26}Al$ 、$^{41}Ca$ 、$^{60}Fe$ 和 $^{53}Mn$, 但是 $^{26}Al$ 的产率相对偏低 [18].

恒星内部合成短寿期放射性核素的直接证据来自对陨石中的恒星尘埃的实验室分析结果. 近 20 年来的陨石学研究和发展, 诞生了一门新兴学科 — 实验天体物理学 (Laboratory astrophysics). 人们用化学和物理的方法, 从陨石中分离出微小的 ($10^{-9}$ 到 $10^{-6}$ 米) 矿物颗粒, 通过对其同位素组成的分析研究, 证明它们是来自红巨星、 AGB 星和超新星的恒星尘埃. 这些恒星尘埃是由星风带入太阳原始分子云的, 它们经历了太阳系早期一系列的物理化学过程, 最终凝集在原始球粒陨石中 [19,20]. 已发现的恒星尘埃有: 金刚石 (diamond) 、石墨 (graphite) 、 SiC(silicon carbide) 、刚玉 (corundum) 、 $Si_3N_4$ 等.

对这些恒星尘埃的同位素组成分析表明，它们含有很高丰度的短寿期放射性核素，如：$^{26}Al/^{27}Al$ 在 $10^{-5}$ 到 $10^{-1}$ 范围 [19,20].

### 4.2 高能粒子辐射 (Spallation)

高能粒子辐射也能产生短寿期放射性核素. 原太阳分子云 (the protosolar cloud) 或太阳星云 (the solar nebula) 中的气体和尘埃在宇宙射线 (cosmic rays) 或高能粒子 (solar energetic particles) 的辐射下, 可以产生多种短寿期放射性核素, 如: $^{26}Al$ 、$^{41}Ca$ 、$^{53}Mn$ 和 $^{10}Be$[21−23]. 特别是 $^{10}Be$, 这个核素是不能在恒星内部合成的，但它却出现在太阳系早期产物 CAIs 中 [24]. 这一发现为辐射理论提供了强有力的证据. 高能粒子辐射理论也有局限性，理论计算表明，在一定条件下产生适量的 $^{26}Al$ 同时会产生过量的其他短寿期放射性核素. 最新的理论模式考虑特殊的物体结构可以克服这个困难 [25]. 但是，高能粒子辐射却不能产生 $^{60}Fe$ 核素.

## 5 短寿期放射性核素的研究意义

研究太阳系的形成和演化, 时间尺度是一个非常重要的因素. 太阳系最早的产物是什么时候形成的？原太阳吸积盘的生存期限、行星系统的形成和内部分异在时间跨度上的分布, 等一系列问题都能帮助我们深入了解太阳系的成因. 放射性同位素年代学是研究太阳星云演化和行星分异过程的重要工具. 长寿期放射性核素可以测定绝对年龄 (absolute ages), 如： U-Pb 系统、 Sm-Nd 系统、 Rb-Sr 系统和 Re-Os 系统等，其中 U-Pb 法准确度和精确度最高. 目前，用 U-Pb 法测得的太阳系最早产物是 CAIs, 其年龄为 4567.2±0.6 Ma, 而球粒的年龄相对较轻，为 4564.7±0.6 Ma[12]. 由于技术上的局限性，长寿期放射性同位素年代学所能达到的最高精度为 1 Ma. 对研究太阳系早期发生的物理化学事件，这样的精度是不够的. 而短寿期放射性核素由于其半衰期很短, 能够提供高精度的年代学. 但短寿期放射性核素只能测定相对年龄 (relative ages). 比如： CAIs 中的 $^{26}Al/^{27}Al$ 含量为 $5\times10^{-5}$, 球粒的含量很低 ($\leq1\times10^{-5}$), 而玄武质无球粒陨石 (basaltic achondrites) 中基本不含有 $^{26}Al(<1\times10^{-7})$[8−11,13,14]. 假如 $^{26}Al$ 在太阳系初期分布均匀，这个结果表明 CAIs 最早形成，球粒则晚 2 Ma 以后形成，而小行星母体的分异则在 CAIs 形成后 6 Ma 以后才开始. 这就说明原太阳吸积盘的生存期限在几百万年左右.

短寿期放射性核素年代学的一个重要基础是假定这些核素在早期太阳系内分布均匀. 不同时期形成的物体就含有不同含量的短寿期放射性核素，早形成的含量高，晚形成的含量低. 如果某物质在短寿期放射性核素衰变完后才形成，则其中就不含这些核素. 短寿期放射性核素是否在早期太阳系内分布均匀，这是一个长期被争论的问题. 如果短寿期放射性核素在早期太阳系内分布不均匀，则它就失去了年代学的意义. 不同的短寿期放射性核素含量反映了太阳系局部不同的分布，这些物质可能是同时形成的，也可能不同时.

提出早期太阳系内短寿期放射性核素分布不均匀主要有以下几个原因： (1) 按照均匀理论假设， CAIs 是太阳系中最早形成的物体. 它们形成以后要在原太阳吸积盘上停

留 200 万年以上, 等球粒形成后, 再与球粒一起凝聚到球粒陨石中, 最终聚集成小行星母体. 然而, 动力学计算表明, 厘米大小的 CAIs 在原太阳吸积盘上只能停留 1 万年左右, 它们就会被吸积到原太阳中去 [26]. 怎样在原太阳吸积盘上储存厘米大小的 CAIs 长达 200 万年以上, 是一个悬而未决的难题 [11]. (2) 进一步的研究发现, 少数 CAIs 不含短寿期放射性核素, 但是却有其他同位素的异常. 这类难熔包体被称为 FUN 包体 (Fractionation and Unidentified Nuclear isotopic anomalies)[27]. 有人认为, 短寿期放射性核素由星风注入原始太阳分子云后, 没有与太阳系物质充分混合均匀. (3) 早期太阳系内短寿期放射性核素的来源问题并没有确定. 如果这些核素是由高能粒子辐射产生, 则其在太阳系内的分布就会不均匀.

然而, 早期太阳系内短寿期放射性核素分布不均匀的证据并不确凿. 如果这些核素在注入原始太阳分子云后没有与太阳系物质充分混合均匀, 我们应该观察到几倍, 几十倍甚至几百倍的其他同位素的异常. 比如, 氧同位素. 但是, 实际上氧同位素在太阳系内的分异程度仅为百分之几. 另外, CAIs 与球粒的 U-Pb 绝对年龄差异基本上与 $^{26}$Al 的相对年龄结果相辅. 由于其化学组成的差异, 一般认为不同的球粒陨石 (如: 碳质球粒陨石, 普通球粒陨石和顽火辉石球粒陨石) 是在太阳系内不同部位形成的. 然而, 不同的球粒陨石中的 CAIs 却具有相同的 $^{26}$Al 含量. 球粒也如此, 不同的球粒陨石中的球粒 $^{26}$Al 含量都很低. 这也间接地说明短寿期放射性核素在早期太阳系内分布均匀.

## 6 太阳系起源的新思想

太阳系起源是一个非常复杂的科学问题, 长期以来, 人们提出了很多种理论和模式来研究和探讨其成因. 从以上的讨论我们可以看到, 各种理论都有其特点, 但也具有局限性. 如: 恒星合成理论能很好地解释大多数短寿期放射性核素在早期太阳系内的分布规律, 但是却不能解释 $^{10}$Be 的观测结果. 这里我们较详细地介绍一个新的太阳系起源理论 —X-wind 模式. 这个理论是由天体物理学家徐遐生 (Frank H. Shu) 教授和天体化学家李太枫 (Typhoon Lee) 博士共同提出 [22,23,28]. X-wind 模式目前在天体物理界和天体化学界引起极大的反响, 并被广泛接受.

X-wind 模式基于天体物理理论, 天文观测和天体化学实验, 是 3 个不同学科领域有机结合的结果. 天文观测发现, 恒星在形成初期, 普遍存在沿垂直于吸积盘方向, 向正反两极喷射高速气流现象, 即所谓的双极喷流 (bipolar jets). 天体物理理论认为, 这是由于吸积盘上的物质在向原恒星吸积的过程中, 与原恒星磁场相互作用的结果. 一部分物质被吸积到原恒星中去, 另一部分物质以高速气流向两极喷射, 并消耗和降低整个系统的角动量. X-wind 模式认为原太阳与吸积盘并非直接相连 [22], 由于原太阳的磁场作用, 吸积盘在离原太阳核心 0.06 AU($\approx 13\,R_\odot$ 太阳半经) 处被截断 (truncated), 此处称为 X- 区 (X-region). 在这个区内, 三分之二的物质沿着原太阳磁场线被吸积到原太阳中去, 三分之一的物质以高速气流向两极喷射, 而其中一部分物质又被抛落到原太阳吸积盘的不同部位. X-wind 模式认为球粒就形成于 X- 区, 并被双极喷流抛落到太阳星云的不同部位.

现代天文观测发现，被包裹的原恒星 (embedded protostars) 发射大量软的和硬的 x 射线，其强度会发生周期性的变化 [30]. 另外，双极喷流的精细结构分析显示出结节结构 (chains of Herbig-Haro knots). 这表明从原恒星喷射出的物质流不是恒定的，而是几年到几百年的周期性变化. 这些变化可能与吸积盘的物质吸积率有关 [28,29]. 改良的 X-wind 模式 [28,29] 认为 X- 区 (X-region) 会在 30 年的时间尺度上沿吸积盘面方向向原太阳推进和退缩 (radial excursions). CAIs 形成于位于原太阳与 X- 区之间的磁场重连带 (reconnection ring). 在这个区间的 CAIs 受到 x 射线耀斑 (x-ray flares) 和高能粒子的辐射而生成短寿期放射性核素. 为了克服传统辐射理论所面临的困难， X-wind 模式认为 CAIs 具有壳层结构 (core-mantle structures), 内部由难熔物质组成，外部的相对挥发性物质部分地阻挡了辐射作用，而产生适量的各种短寿期放射性核素. 形成于 X- 区的球粒由于吸积盘物质的阻挡，不能产生大量的短寿期放射性核素. CAIs 和球粒被高速气流抛射到原太阳吸积盘的不同部位，并又通过盘面的吸积逐渐进入 X- 区. 最终， CAIs 与球粒一起凝聚到球粒陨石中，并聚集成行星母体.

X-wind 模式预测早期太阳系物质含有短寿期放射性核素 $^{10}$Be, 这个结论几年后被天体化学实验所证实 [24]. 2000 年， McKeegan 等人在 Allende 碳质球粒陨石的 CAIs 中找到了 $^{10}$Be 的证据. X-wind 模式较成功地解释了太阳系早期短寿期放射性核素的分布规律，克服了 CAIs 与球粒在形成过程中的 200 万年时间差问题. 最新的天文观测显示原恒星伴随强力的 x 射线活动 (x-ray activities), 说明原恒星在磁场的作用下，能够产生大量的高能粒子. X-wind 模式并不能解释短寿期放射性核素 $^{60}$Fe. 但是， $^{60}$Fe 只是在形成较晚的分异陨石 (differentiated meteorites) 中出现，而早期形成的 CAIs 并不含有 $^{60}$Fe. X-wind 模式还有待于进一步发展和完善，使之能解决更多的太阳系起源的基本问题，如：太阳系早期的氧同位素异常.

## 7 结论

太阳系的起源是一个古老而又复杂的科学难题，目前主要有 3 个研究途径：理论力学和动力学模拟恒星星云的形成和演化，对年轻星和原恒星 (young and forming stars) 的天文观测，对陨石及地外物质的天体化学实验室研究. 在 3 个不同的领域研究同一个对象 — 太阳系起源，得到的结论应该是相同的. 换一句话说，其中某一领域得到的结论，被证明是准确无误的. 这样的结论可以用来指导和限制其他领域的研究工作. 然而，由于这 3 个领域的研究人员的背景知识相差很大，相互之间的交流活动还很缺乏. 本文介绍的 X-wind 模式，就是这 3 大领域有机结合的成功典范.

## 参 考 文 献


1 Wasserburg G J, Papanastassiou D A. Some short-lived nuclides in the early solar system – A connection with the placental ISM. In: Essays in Nuclear Astrophysics. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1982, 77-140
2 Cameron A G W. Nucleosynthesis and star formation. In: Protostars and Planets III. Tucson, Arizona: Univ. Arizona Press, 1993, 47-73
3 Goswami J N, Vanhala H A T. Extinct radionuclides and the origin of the solar system. In: Protostars and Planets IV. Tucson, Arizona: Univ. Arizona Press, 2000, 963-994
4 Shu F H, Adams F C, Lizano S. ARA&A, 1987, 25: 23-81
5 Alexander C M O'D, Boss A P, Carlson R W. Science, 2001, 293: 64-68
6 Urey H C. Proc Nat Acad Sci U S, 1955, 41: 127-144
7 Reynolds J H. Phys Rev Letters, 1960, 4: 8-10
8 Lee T, Papanastassiou D A, Wasserburg G J. Geophys Res Lett, 1976, 3: 109-112
9 MacPherson G J, Davis A M, Zinner E K. Meteoritics, 1995, 30: 365-386
10 Hsu Weibiao, Crozaz G. Geochim Cosmochim Acta, 1996, 60: 4571-4591
11 Hsu Weibiao, Huss G R, Wasserburg G J. Earth Planet Sci Lett, 2000, 182: 15-29
12 Amelin Y, Krot A N, Hutcheon I D, et al. Science, 2002, 297: 1678-1683
13 Huss G R, MacPherson G J, Wasserburg G J, et al. Meteor&Planet Sci, 2001, 36: 975-997
14 Hsu Weibiao, Huss G R, Wasserburg G J. Meteor&Planet Sci, 2003, 38: 35-48
15 Mahoney W A, Ling J C, Wheaton WA, et al. ApJ, 1984, 286: 578-585
16 Wasserburg G J, Busso M, Gallino R, et al. ApJ, 1994, 424: 412-428
17 Arnould M, Paulus G, Meynet G. A&A, 1997, 321: 452-464
18 Cameron A G W, Höflich P, Myers P C, et al. ApJ, 1995, 447: L53-L57
19 Zinner E. K. Meteor. & Planet. Sci., 1998, 33:549-564
20 Krestina N, Hsu Weibiao, Wasserburg G J. Lunar Planet Sci Conf, 2002, XXXIII, CD-ROM 1425
21 Clayton D D, Jin L. ApJ, 1995, 451: 681-699
22 Shu F H, Shang H, Lee T. Sci, 1996, 271: 1545-1552
23 Lee T, Shu F, Shang H, et al. ApJ, 1998, 506: 898-912
24 McKeegan K D, Chaussidon M, Robert F. Science, 2000, 289: 1334-1337
25 Gounelle M, Shu F, Shang H, et al. ApJ, 2001, 548: 1051-1070
26 Weidenschilling S W. MNRAS, 1977, 180: 57-70
27 Wasserburg G J, Lee T, Papanastassiou D A. Geophys Res Lett, 1977, 4: 299-302
28 Shu F H, Shang H, Glassgold A E, et al. Science, 1997, 277: 1475-1479
29 Shu F H, Shang H, Gounelle M, et al. ApJ, 2001, 548: 1029-1050
30 Montmerle T. Irradiation effects in the environment of young low-mass stars and in the early solar nebula. In: Astronomy with radioactivities. Max-Planck-Institut für Extraterrestriche Physik Internal Report no. 274, 1999

# Short-lived Radionuclides in the Early Solar System

HSU Wei-Biao
(*Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing* 210008)

**Abstract** It reviews the evidence for short-lived radionuclides in the early solar system and evaluates models for their origins. The stellar model requires that some freshly-nucleosynthesized radionuclides were injected into the protosolar cloud shortly before it began to collapse. The spallation model suggests that these isotopes were the products of interaction between energetic particles and gases/dusts in the protosolar cloud or solar nebula. A brief discussion was given to the new theory for the solar system formation—X-wind model.

**Key words** solar system: formation, astrochemistry, short-lived radionuclides

**更正**：44 卷第 2 期第 127 页第 2 行和第 5 行 “6 个 ” 应改为 “7 个 ”, 表 1 中 “moon” 应改为 “month. 第 128 页第 3 、 4 、 7 行中 “公里” 应改为 “万公里”,(2) 式中的 $v$ 应改为 “v”, 倒数第 6 行 “比热” 应改为 “比热之比”. 第 132 页第 9 行 “360” 应改为 “360 秒”, 倒数第 6 行 “$\rho =$” 应改为 $\rho$. 第 133 页图 10 中 “10-12” 应改为 “$10^{12}$”.