

# 太阳系行星系统的形成和演化

陈 丰<sup>1</sup>, 李雄耀<sup>2</sup>, 王世杰<sup>2</sup>

1. 中国科学院 地球化学研究所 矿床地球化学国家重点实验室, 贵阳 550002;
2. 中国科学院 地球化学研究所 环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550002

**摘 要:**本文评述了星云和星子假说、太阳星云的崩塌、星盘的形成和演化、颗粒生长、星子增生、类地行星和类木行星的形成、行星迁移, 以及太阳和行星的演化。

**关 键 词:**行星; 星盘; 星子; 迁移

**中图分类号:**P691 **文献标识码:**A **文章编号:**1007-2802(2010)01-0067-07

## Formation and Evolution of the Solar Planetary System

CHEN Feng<sup>1</sup>, LI Xiong-yao<sup>2</sup>, WANG Shi-jie<sup>2</sup>

1. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China;
2. State key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China

**Abstract:** This paper reviewed hypotheses of protostar nebula and planetesimals, collapse of the solar nebula, formation and evolution of disk, growth of grains, accretion of planetesimals, formation of terrestrial planets and giant planets, migration of planets, and evolution of the Sun and planets.

**Key words:** planet; disk; planetesimals; migration

在讨论太阳系行星系统的形成和演化之前, 我们先定义太阳系研究内容, 探讨太阳系行星系统形成和演化的环境, 以加深对太阳系行星系统形成的整体了解, 确认建立演化模式的必要约束。太阳系研究的内容包括:

(1) 太阳系范围: 八大行星; Kuiper 带(KBOs); 包括冥王星(Charon, Sedna, Quauar)和冰物体和彗星等; Oort 云: 彗星的近球状群集体, 乃至或多或少地进入太阳系内部的小星体。

(2) 太阳系动力学: 行星的轨道(有多种旋转)、卫星系统和行星环, 以及行星与太阳间距。

(3) 行星组成: 除了挥发份, 太阳系内各行星的元素丰度与同位素丰度均相近; 木星和土星内 H 和 He 的混合与太阳一致; 大行星 D/H 远大于太阳 D/H; 冷却物质重元素不是来自太阳: 氦在核反应  $10^6$

a 内是损耗的。

(4) 地质: 在第一个 800 Ma 的时候比现在有更多的小星体; 板块构造; 风化作用和空间风化等。

(5) 陨石: 撞击坑、组成成分、形成温度、具有最大丰度的 H 和 He 的星际气体, 或富集超新星产生元素、形成时间( $4.56 \times 10^9$  a); 形成时间尺度(cm/m 尺寸物体, 形成时间约  $10 \times 10^6$  a)。

(6) 生成物体(太阳:  $1 M_{\odot}$ , 即太阳质量; 类地行星: 约  $10^{-5} M_{\odot}$ ; 气体大行星: 约  $10^{-3} M_{\odot}$ ; 冰的星子和彗星: 约  $10^{-3} M_{\odot}$ ), 共约  $1.02 M_{\odot}$ 。

(7) 大致形成时间: 太阳系最老固体年龄约 4.568 Ga; 之后 13 Ma 火星形成; 之后 30~40 Ma 地球形成。太阳形成的 100 Ma 后地球受到火星尺寸物体撞击。两物体的重核形成新地球, 轻硅酸盐壳形成月球; 类木星行星: 木星、土星、天王星和海王

收稿日期: 2009-7-20 收, 2009-8-29 改回

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40803019, 40873055, 40673053); 中国科学院知识创新导向项目(KZCX2-YW-110); 国家 863 项目(2008AA 12A 213)

第一作者简介: 陈丰(1933—), 男, 研究员, 研究方向: 矿物学、天体化学。

星都必须在小于 10 Ma 的气体原行星盘寿命内形成。

(8) 存在问题:木星和土星的热发射:木星和土星热辐射比它们从太阳所收集到的能量大;它们的质量不足以进行核燃烧——至少需要  $13 M_{\text{木星}}$ ;可能解释:氢缓慢沉降到中心,释放重力能;另外,为什么天王星和海王星是冰的,而木星和土星主要含氢?

一般认为,太阳系行星是在太阳形成后,通过残留的原行星盘(Proplyds)物质凝聚而成。这也是普遍的行星形成途径。

Kant(1755), LaPlace(1796)提出太阳星云理论,其基本要点是:行星形成于太阳周围轨道的星盘上;行星轨道近于共面和环状;大多数年轻的恒星有星盘围绕;星盘形成于旋转分子云核的崩塌。但由于这一假说无法解释太阳相对于行星而言缺乏角动量,致使该假说屡经采纳和摒弃。直到 20 世纪 80 年代早期观察到太阳系外新生恒星的星盘时,才得以认同。

Chamberlain(1895)和 Safronov(1969)提出星子假说,认为行星通过三个阶段(星盘阶段、星子阶段、行星胚胎阶段)形成,这些阶段以各自的粒子相互作用上的差异为特征。首先,星云崩塌,形成星盘,星尘颗粒沉降到星盘中段的密度层,并开始它们之间自碰撞而粘附在一起,形成具有 0.01~10 m 尺度的肉眼可见物体,这些原星体的轨道在同一方向和同一平面上,类似于围绕土星的数百米厚度的环;星子阶段:在其后的  $10^4 \sim 10^5$  a,进一步的碰撞形成“星子”,达到 km 以上或相近的尺度,由引力相互作用驱动,使物体浓集到特定轨道,这些轨道之间有近于空旷的间隙;在第三阶段,星子间的引力相互作用,促成它们在轨道上的小变化,造成其后的碰撞,有的碰撞使星子破碎,但大多数产生一个较大的物体,或称行星胚胎。在类地行星区其质量约  $10^{23}$  kg 或更大,而在外太阳系则不确定。

为了叙述方便,我们把行星形成分为下列几个亚阶段:星际气体/云崩塌;气体摩擦形成星盘;冷星盘生长 m 级尺寸物体,形成星子;行星的急剧生长形成胚胎;行星形成,用碰撞碾磨、散射、撞击(早,晚期的重轰击)和辐射压方式来清除星体和行星迁移。实际上这些亚阶段彼此有一定的重叠。

## 1 原恒星星云形成和崩塌

星云假说认为经引力作用,孤立的巨大分子云崩塌形成太阳系。而陨石研究结果发现有短寿命  $^{60}\text{Fe}$  存在,该同位素只能在超新星爆发中形成。这

说明在太阳形成过程中附近发生了超新星爆发。其中一颗超新星的冲击波可能作用于以后形成太阳的分子云,造成了超密度区域,诱导该区崩塌,从而触发了太阳的形成。因为只有大质量、短寿命恒星才会产生超新星爆发。这说明太阳的形成并非孤立事件,而是形成于一个大的有多个恒星的诞生区<sup>[1,2]</sup>。

由于角动量守恒,星云塌陷时转动加快。随着星云浓缩,其中的原子相互碰撞频率增高,使动能转化成热能。其质量集中的中心越来越比周边热,在引力、气压、磁场力和转动惯量的相互竞争下,收缩的星云扁平化成了一个直径约 200 AU 的原行星盘,并在中心形成一个热的致密的原恒星(内部氢聚变尚未开始的恒星)。到此,这个后来形成太阳的原恒星已经是一颗金牛(Tauri)T 星类型的恒星。对金牛 T 星的研究表明它们常伴有  $0.001 \sim 0.1 M_{\odot}$  的前行星物质组成的星盘<sup>[3]</sup>。

原恒星气体云崩塌可以用 Jeans 判据来确定。简单的说,这些判据是:星云的自引力大于热能,自引力  $\sim GM^2/r \sim GM\rho r^2$ 。

式中,  $M, r$  分别为云的质量和半径,  $G =$  引力常数, 热能  $\sim Mv_s^2 \sim k^2 MT^2$ , 式中  $v_s, T$  分别为云的声速和温度,得

$$r = (\pi v_s^2 / G\rho)^{1/2}.$$

这样,在恒星形成区得到原恒星星云崩塌半径  $r$  约 0.1 pc(等于  $3 \times 10^{15}$  m),  $T$  约 10K;崩塌时间尺度  $t \sim r/v_s$  约  $10^6$  a。

## 2 星盘阶段

星盘是行星形成中一个必须经历的过程。它形成、发展和终结于恒星形成的早期,对于太阳系而言,这已经是遥远的不可重复的过去。而太阳系外行星的研究,揭示出大量年青恒星星盘,以及星盘组成和星盘演化的证据,使我们确认了星云假说的正确性<sup>[4]</sup>。

星盘形成的过程主要是径向崩塌和角动量补偿。首先形成扁平星盘,沿星云的旋转轴连续崩塌,在盘内克服星云云心引力;这时,星盘角动量通过摩擦转换为热能;在向心部位加热较强,即更为有效的摩擦,有较好的角动量转换;在盘中心原太阳形成。星云崩塌变成一个星盘的过程中,有一个重要的作用,就是太阳对星云的加热、蒸发和凝聚。新生太阳加热星云,近太阳处可达 2000 K,几乎全部星云物质汽化蒸发崩塌,继而随着星盘温度的冷却,物质从高温向低温不断凝聚;由于星盘本身的温度梯度和物质凝聚点的差异,造成星盘物质径向分馏:较热的

近太阳区富硅酸盐物质(Rocky);较冷的远太阳区富挥发份气体,这是后来形成类地行星和类木行星的物质基础。

星盘形成后,太阳风会不断清除星盘内的气体和尘埃,把它们吹向星际空间,经过3~10 Ma后星盘消散,星子生长基本结束。星盘的消散可能有局部效应和环境效应两类因素。局部效应包括:粘度演化、光蒸发作用、太阳风剥离、潮汐相互作用和行星形成等;环境效应包括在集群内恒星的遭遇,以及其他恒星的光蒸发等。

总体而言,星盘演化是扰动(turbulence)的,对于 $\mu\text{m}\sim\text{cm}$ 颗粒的沉降,扩散和粘附是主要的;而对于 $\text{km}\sim$ 地球尺度的星体,它们的碰撞和表面密度起伏(fluctuation)导致引力散射(scatter)是重要的。

星盘形成的时间尺度约为 $2\times 10^7$  a;星盘具有大部分太阳质量;星盘厚度约1/10原恒星星云直径;星盘内部(约1 AU) $>1500\text{K}$ ;星尘汽化,较大的分子解离,质量约 $0.03 M_{\odot}$ ;星盘外部( $>2$  AU)保持冷的星尘不变,有更多的分子气体。

### 3 颗粒生长

颗粒的沉降和生长的主要作用是颗粒之间的相互碰撞。首先,颗粒由恒星引力的垂直分量推进到星盘的中部平面上,其中大颗粒“下降”得更快;颗粒以较小颗粒的非弹性碰撞方式生长;这个过程非常快,并且在星盘内部快速形成的颗粒具垂直成层特征;扰动、混合和破坏性碰撞会减缓这个过程。

颗粒碰撞时涉及的机制有:热运动、扰动气体运动(漩涡漂流物)、引力沉降到中间平面和太阳引力使颗粒向内径向的漂移,以及由于气体拖曳使轨道衰减(向内漂移)等。

颗粒粘附是由于颗粒间低速碰撞使之粘附。颗粒粘附的持续进行,会产生少数大物体:

$\rightarrow 1\text{ mm}\rightarrow 1\text{ cm}\rightarrow 1\text{ km}$ 。

$\text{cm}/\text{m}$ 级颗粒的生长在星盘内部通过IR辐射快速冷却,岩石质分子快速结晶成长成 $\mu\text{m}$ 级颗粒;在星盘外部气体冻在尘粒上,尘粒开始凝聚。星尘粘附是通过凝聚和与气体分子的表面反应形成颗粒间的基质;较大的颗粒生长在非常薄(超出中间平面以外)的星盘上,在1 AU处的时间尺度: $<10^3\sim 10^5$  a(在远离太阳处缓慢发生)。

### 4 星子阶段

星子阶段的主要进程是:由碰撞过程产生大的

聚集体,例如 $1\text{ km}\rightarrow 1000\text{ km}$ ,质量约 $0.01 M_{\oplus}$ ( $M_{\oplus}$ 为地球质量),引力开始成为主要增生方式,这是一个快速增生过程,较大的物体比较小的物体增生更快;随着星子变得更大,碰撞更为稀少和更为激烈,原行星被碰撞所加热,使行星急剧生长。对于随机行星距离,模拟表明行星尺寸物体在 $10^6\sim 10^7$  a形成。

星子阶段的主要机制是碰撞作用。碰撞可能出现三种结果:增生、分散和破碎+再堆积/脱落。增生是目标物从碰撞中增加质量,低 $Q$ ;分散是目标物破坏,飞散成为自由碎片,高 $Q$ ;破碎+再堆积/脱落是目标物变为“碎石堆”,中 $Q$ 。出现哪种结果,取决于碰撞时的碰撞比能 $Q$ ,对于与目标物相比属于小冲击时,以下式定义其碰撞比能:

$$Q = mv^2 / 2M。$$

式中, $m$ 是撞击物质量, $M$ 是目标物质量, $v$ 是碰撞速度。根据碰撞比能可以确定物体的破坏阈值。对于特定大小物体破坏阈值 $Q_D$ ,定义为: $Q > Q_D$ 。

计算出的不同尺度星子破坏阈值 $Q_D$ 表明,小物体强度占优势,由于有更多的缺陷,总体上它比更大的物体较弱;大物体引力占优势,由于它们的自身引力,比较抗破坏。研究证实,最弱的星子在 $100\text{ m}\sim 1\text{ km}$ 范围,其破坏阈值 $Q_D$ 最低,较大的物体会增生,除非它被激发成大的偏心率/倾角。

引力聚焦(gravitational focusing)会增加星子碰撞的几率。考虑质量为 $m$ 的两个物体,相对速度(在无穷远处) $\sigma$ ,引力偏转其弹道(trajectories)使之具有较大的碰撞截面,进而产生碰撞;能量和角动量的补偿产生引力聚焦总量

$$\Gamma = \pi R^2 (1 + v_{\text{esc}}^2 / \sigma^2)。$$

式中,右方第一项是物理碰撞截面,最后一项是引力聚焦的增量, $v_{\text{esc}}$ 为穿透(escape)速度;引力聚焦的简单结果是在很大程度上造成急剧(runaway)生长。

急剧生长通常是星子阶段后期的一个历程。如果都是小物体,将有 $v_{\text{esc}} < \sigma$ 和相对较低的碰撞速率和缓慢生长;如果有一个物体生长稍快,便使 $v_{\text{esc}} > \sigma$ ,物体增长更快,超过它的近邻,称为急剧生长。

星子到行星的演化可以用另一种方式来描述,即用集居数(population)来描述。集居数是在单位体积内物体(在此指星子)的数量。星子到行星的演化是在一个最初尺寸粗略相近星子的巨大集居数(population)的情况下开始的。星子到行星的演化可以描绘为靠拢遭遇(与引力聚焦相当)和急剧生长。

星子阶段的特点是从常规生长发展到急剧生

长。常规生长时,在一个最初尺寸粗略相近星子的巨大集居数(population)的情况下有大小分布和相对速度分布的集体增长。急剧增长的特点是最大的星子比其它星子更快生长,导致原行星胚胎迅速形成。同时,由星子引力造成它们在同心轨道上彼此以几个 Hill 半径相隔离。在考虑星子的引力相互作用时经常使用“行星作用范围球(Hill 球)”术语。Hill 球是指行星重力超过太阳重力潮汐而使周围星体能稳定存在的区域。描绘 Hill 球常用 Hill 球半径,即

$$r_{\text{Hill}} = \left( \frac{M_p}{3M^*} \right)^{\frac{1}{3}} a.$$

式中, $a$  是半主轴, $M_p$  为行星质量, $M^*$  为恒星质量。

从星子演化到类地行星的传统近似方法主要有两种:早期相统计处理(从气体凝结理论出发的运动学方法)和利用  $N$  体模拟的最终相。

## 5 行星胚胎阶段

行星胚胎(embryos)或原行星(protoplanet)阶段是行星形成中的最后的一段历程。类地行星胚胎在太阳形成 1 Ma 后长到  $0.05 M_{\oplus}$ ,然后就减缓聚集过程。这时太阳系内有 50~100 个月球到火星大小的行星胚胎<sup>[5,6]</sup>。

在行星胚胎阶段,由星子的急剧生长进入寡头(oligarchic)生长和大碰撞生长。在寡头生长时,增生减速,星子以质量  $M \geq 100 m_{\text{原行星}}$  进行散射(scattering),散射速度为

$$v_{\text{ran}} \propto r_{\text{Hill}} \propto M^{1/3},$$

这是一种有序生长!在寡头生长时段,对其有重要影响是 1 型迁移。

原行星之间彼此的引力扰动使轨道变得不稳定,产生行星胚胎间的大碰撞,碰撞前其质量近于  $0.1 M_{\oplus}$ 。其中的一次巨大碰撞导致了月球的形成<sup>[7]</sup>,另一次剥去了早期水星的外壳<sup>[8]</sup>。

在大碰撞时段,有许多因素会影响其进程。例如,气体大行星的扰动;引力气体拖曳,残余星子的动力学摩擦,气体星盘消散(*dispersal*)、清理(*sweeping*)和久期共振等。

从星子形成地球的大致情况是:星子( $N$  约  $10^{10}$ ,  $m$  约  $10^{-10} M_{\oplus}$ )→急剧/寡头生长( $T_{\text{grow}} = 10^5 - 10^6 a$ )→原行星( $N \geq 10$ ,  $m$  约  $0.1 M_{\oplus}$ )→气体星盘消散( $T_{\text{gas}} \leq 10^7 a$ )→大碰撞( $T_{\text{grow}}$  约  $10^7 - 10^8 a$ )→地球( $N=1$ ,  $m \geq 1 M_{\oplus}$ )。

## 6 类地行星生长

类地行星形成过程的基本问题是它的质量和轨道的形成。它们从星子到行星胚胎,再到类地行星,是连续合并一直到形成稳定组构的过程,少数行星通常更稳定,即使行星较大,而谐振(*Resonances*)——在轨道周期的公度性(*commensurabilities*)会动摇系统,一般说来,稳定组构可以维持百万年,星子、胚胎以及类地行星之间的大碰撞和混沌意味着多样性。

总体而言,类地行星生长是通过一系列的连续合并来达到稳定组构,类地行星形成的顺序是:1)急剧(*runaway*)生长:粘度扰动/气体拖曳确定  $\sigma$ 。一个物体在质量增加上远快于所有它的近邻。2)寡头(*Oligarchic*)生长:最后大物体变得厚重的足够经过动力学摩擦加热星子集居数。这减少了引力聚焦,并缓慢生长。一系列星子→寡头→达到在每个环形区占优势。3)总装配(*Final assembly*):寡头最终扰动进入交叉(*crossing*)轨道,碰撞和最后并入类地行星。4)清理(*clean-up*):任何继续存在的小物体依附于行星或被喷射。在系统最后水从外部处到达。

行星增长的时间尺度和证据有:活动气体增生相  $< 1$  Ma,后来的气体盘寿命约 5~10 Ma,后者有来自 *T Tauri* 星的证据;星子和行星胚胎的形成非常早,应当在活动气体增生相之后,这有陨石为证;类地行星的形成大致在 50~100 Ma 后,月球约于 40 Ma 形成,这有 *Hf-W* 数据;大行星形成于气体星盘(它们含 H 和 He)被分散之前;如果天王星和海王星形成于它们的目前距离,那么,快速增生是不太可能的。

类地行星形成的时间过程大致是:原行星星盘的颗粒生长到星子约  $10^6 a$ ,星子急剧生长/寡头阶段约  $10^{5-6} a$ ;高速阶段约  $10^{7-8} a$ ;与恒星有较大距离的类地行星形成时间较长。

## 7 大行星形成

类木行星的形成于类地行星不尽相同。类地行星由高熔点的物质形成,如铁、镍和硅酸盐。这些物质很少,大约只占星云质量的 0.6%,所以类地行星不可能长得太大。类木行星形成于冰线之外,冰线在火星与木星轨道之间,其外水和甲烷等挥发份达到冰点。学者认为木星刚好处于冰线之外并不是偶然的。因为冰线聚集了大量由于向内降落的冰状物质蒸发而来的水,形成了一个低压区,加速了尘粒在

环绕轨道上的运动速度,阻止它们飞往太阳。冰线起到了一个壁垒的作用,导致尘粒在距离太阳约 5 AU 处迅速聚集。巨量的物质聚集成一个大约有  $10 M_{\oplus}$  的行星胚胎,再通过吞噬周围星盘的氢而迅速增长,只用了 1000 a 就达到  $150 M_{\oplus}$ ,最终木星达到  $318 M_{\oplus}$ 。土星质量明显比较小可能是因为它比木星晚了 n Ma 形成,当时所能使用的气体少了很多<sup>[9]</sup>。太阳系外行星研究表明,1~3 Ma 年的恒星多富含气体,而超过 10 Ma 年的恒星星盘含很少到几乎没有气体,显示它内部的巨大气体行星已经停止生长<sup>[9]</sup>。

大行星形成有两个基本模式:核增生模式和星盘不稳定模式。

核增生模式建立在类地行星形成模式的基础上。首先,以与类地行星同样的方式建立一个核;核变得质量大到足以维持在一个充实的气体星盘内(在星盘中  $v_{\text{esc}} > c_s$ )。以星子与核撞击产生的热/气体的准稳态收缩,使气体星盘处于静力学平衡状态。

核增生模式大体上可以分为核增生模式和扩展核增生模式。标准核增生模式以 Pollack 的论文为代表<sup>[10]</sup>。它的特点是:以星子增生方式形成行星;其顺序是  $M_{\text{core}} > 10 \sim 20 M_{\oplus} \rightarrow$  气体增生  $\rightarrow$  大行星;其缺点是有的行星形成时间尺度大于或等于星盘寿命,这表现为行星形成的时间尺度问题。Pollack 在大约 10 Ma 时间内,在适当质量增强的星盘内形成木星和土星的考虑时,结合天文物理学约束,很容易找到在 3~5 Ma 形成这些行星的模式;然而,对于天王星和海王星而言,在它们目前的区域内在合理的时间内形成行星是相当困难的,这要求非常大的引力聚焦因子和没有清理发生等一系列特殊条件。除非设想天王星和海王星形成在比目前更靠近太阳的位置,才能满足星盘消散时间的要求。

扩展核增生模式的特点是:大行星形成于短期之内,约为数 Ma 年;在它们形成时行星可以迁移;能够计算迁移和星盘演化。扩展核增生模式的证据包括:太阳系行星形成,和太阳系外行星的形成证据。

扩展核增生模式可以按顺序分为三相:1 相指生长的行星大多数由固体物质组成。行星经历急剧增生,直到输运带耗尽。在此相中固体增生远快于气体增生。2 相是指固体和气体增生速度小,且近于与时间无关。该相控制整个演化时间尺度。3 相出现急剧气体增生。急剧气体增生开始于固体与气体质量近于相等。

在 1996~2006 年,有大量的工作来精化核增生

模式。包括:物理改进(状态方程;包膜不透明性)和附加的物理微扰(核的迁移;星盘扰动;胚胎之间的竞争;星盘的时间演化)。

假定气体星盘块头足够大,在气体内造成引力不稳定。导致引力不稳定的两个基本要求:在星盘内星盘环形成导致轴对称不稳定,可以用 Toomre 稳定判据(Stability Criterion)  $Q$  来确定,

$$Q = c_s K / \pi G \sigma \approx 1$$

式中  $c_s$  为气体声速,  $K$  为角速度。第二个要求对碎片的冷却时间必须小于半轨道周期。

引力不稳定可能依赖于在星盘内的冷却时间,即快速冷却。对于什么使星盘快速冷却到足以允许崩塌成大行星? 目前已知的是,辐射冷却不能有效达到足以允许崩溃;但是不清楚的是:在一个详尽的星盘模式中的现实的冷却(包括对流)系统是什么?

## 8 行星迁移

对于行星形成理论来说,主要问题是天王星和海王星的形成时间尺度问题<sup>[11]</sup>。如果它们在目前的位置上形成,需要数亿年的时间。这就意味着天王星和海王星可能是在更靠近太阳的地方——接近甚至介于木星和土星之间形成的,后来才向外迁移<sup>[12]</sup>。

基于太阳系外行星,特别是热木星的发现,以及太阳系内行星、小行星和 Kuiper 带物体、太阳系外行星的轨道和偏心率研究,发展了行星迁移理论,同时解决了天王星和海王星形成的时间尺度问题。这是近年来星云和星子假说中的最重要的进展。

在原恒星星盘内的行星、行星胚胎和星子迁移可以分为:1 型迁移、2 型迁移和 3 型迁移。

1 型迁移的特点是:在气体盘内形成的行星激发了盘中的密度波,这产生改变行星轨道角动量的转矩;使之向内或向外迁移。这种向内或向外的演化统称为 1 型迁移。

近于木星的大质量原行星会出现 2 型迁移。当行星增长到近于木星质量时,它们展开间隙(gaps),清理星盘内的间隙,如果  $r_{\text{Hill}} > H$  (星盘半厚度),这波激发它们变成激波,或者是行星潮汐转矩超过粘滞转矩;当星盘继续增生到这个行星上,这行星和它的间隙将被拖曳向太阳,即向内迁移出现。

3 型迁移的正转(corotation)转矩起源于马蹄形(horseshoe)区域,中等质量和大质量行星能经历 3 型迁移。正转转矩也能减慢 1 型迁移。

值得注意的是, Tsiganis et al. (2005) 提出 Nice 模式<sup>[13]</sup>。它的关键概念是,演化时木星与土星进入

2:1 谐振, 谐振激发了外侧星体的偏心率, 导致外侧星子带由于散射而突然损耗, 这引起木星、土星、天王星、海王星、Kuiper 带和 Oort 云的一系列变化, 造成月球的晚期重轰击。

## 9 行星演化的未来

从长远说, 太阳系最大的改变将来自太阳自身衰老而带来的改变。随着太阳内部的氢源的燃烧, 会变得更热且燃烧更快。其结果是, 太阳年龄每增加 1.1 Ga 就会更亮 10%<sup>[14]</sup>。随着太阳的辐射输出增强, 它的适居带外移, 地球表面会热到水完全蒸发, 地表生命都将绝迹<sup>[15]</sup>。大量水蒸气, 这种强温室气体, 加速了全球升温, 使地球上的所有生命更快地灭绝。这时, 可能火星的表面温度逐渐升高, 现在冻结在表面土壤下的水和二氧化碳会被释放到大气中, 产生的温室效应会暖化这颗行星, 直到它达到今天地球一样的状况。3.5 Ga 后, 地球的表面环境会变得跟今天的金星类似<sup>[15]</sup>。

约 5.4 Ga 之后, 太阳将进入红巨星阶段, 不断膨胀。在 7.5 Ga 内, 太阳会膨胀到半径 1.2 AU, 相当于现在大小的 256 倍。太阳表面温度降到约 2600 K, 光度增高, 达到现在太阳光度的 2700 倍。红巨星阶段的强星风, 将带走它自身 33% 的质量<sup>[15, 16]</sup>。

当太阳膨胀后, 它会吞掉水星, 很可能一并吞掉金星。太阳会吞噬地球的现在的轨道, 但由于太阳的质量损失和更弱的引力, 会使行星的轨道向外移动。如果仅仅如此, 金星和地球可能会逃离火海<sup>[16]</sup>, 但最近的研究认为, 地球可能还是会因为与太阳的外层潮汐作用而被吞噬<sup>[15]</sup>。

随后, 太阳核心周围壳里燃烧的氢将增大核的质量, 直到达到现今太阳质量的 45%。此时密度和温度很高, 以致于氦开始聚变成碳, 导致氦闪; 太阳的半径缩小到 11 倍于现在(主序星)的半径, 光度骤降, 表面温度升至约 4770 K, 成为一颗水平分支星。氦聚变阶段只持续 0.1 Ga。最终, 它再使用外层的氢和氦贮备, 并且第二次膨胀, 变成渐近巨星分支星。这一阶段持续 30 Ma, 之后, 再过 0.10 Ma 的过程中, 太阳将失去它的残留外层, 抛射出巨大的物质流形成了行星状星云<sup>[17]</sup>。

对行星而言, 随着太阳风的风速巨幅增加, 行星物质丢失使其轨道发生混乱: 部分行星彼此相撞, 另一部分被抛离太阳系, 剩下的则会被潮汐作用而撕裂<sup>[18]</sup>。这时, 太阳成为一颗白矮星, 一种非常致密的天体, 由简并态的碳和氧组成, 是其最初质量的

54%, 但只有地球大小。最初的光度约为现在太阳光度的 100 倍, 由于达不到碳和氧的核聚变温度, 它将逐渐冷却。

随着太阳的衰亡, 它的引力随着它的质量丢失而减弱。如果金星、地球和火星在这时候还存在, 它的轨道会大约位于 1.4、1.9 和 2.8 AU, 速度减慢。所有的行星将成为昏暗的和寒冷的, 没有任何形式的生命。2 Ga 后, 太阳核心的碳和氧将冷却, 所剩的 90% 的质量形成晶体。再过数十亿年, 太阳将完全停止闪耀, 最终成为黑矮星<sup>[19]</sup>。

太阳系形成的时间框架是用放射性同位素方法来测定。在太阳星云早期凝缩中形成的陨石可以估计太阳系的年龄。几乎所有的陨石(例如, Canyon Diablo 陨石)给出的年龄都是 4.6 Ga<sup>[20]</sup>。

## 10 小 结

从星尘到行星的发展过程中, 引力发挥越来越大的作用。星尘的颗粒生长主要是以低速的非弹性碰撞方式增生; 在星子和行星胚胎阶段, 碰撞机制, 引力聚焦产生大的聚集体; 从星子形成后, 引力作用更为突出, 出现了各种各样的星体迁移, 决定了当前和今后太阳系行星系统的组构演化。

太阳系行星系统的基本化学组成特征是由星盘阶段星尘的热分馏所决定的, 但这很可能只是一个极端的特例。太阳系外行星研究观测到许多的热木星说明, 行星迁移会使行星系统的基本化学组成特征变得更加复杂。

行星迁移理论研究表明, 热木星的形成的先决条件要求相当于木星或更大质量的行星存在, 质量因素是重要的。但热木星的多样性, 说明具体行星的最终质量可能更多地取决于它所经历的偶然事件, 而不是仅仅依赖于其宿主恒星的质量。

对于星盘组成和颗粒生长研究主要依靠实验测定结果; 大颗粒生长则包括实验结果和计算机模拟, 而星子、行星胚胎和行星迁移的研究主要依赖于计算机模拟。

在上述工作中得到了大量时间尺度的研究成果, 其中彼此有所不同。我们取其大致时间尺度为: 原恒星星云崩塌约  $10^6$  a; 星盘形成约  $10^7$  a; cm/m 级颗粒生长, 在 1 AU 时间尺度  $10^3 \sim 10^5$  a; 星子形成于  $10^5 \sim 10^6$  a; 对于随机行星距离, 模拟表明行星尺寸物体在  $10^6 \sim 10^7$  a 形成。

太阳对太阳系行星形成和演化无疑是决定性的。但行星迁移理论的出现, 也说明星子到行星对行星系统的影响也是不可或缺的。在太阳系行星演

化中,在两方面的共同作用下,热木星会不会变成类地行星?它的轨道还会有什么样的变化?都是有意思的问题。

太阳系外恒星或恒星系统可能会影响太阳系行星系统的形成,例如,对于太阳星云的形成和崩塌,太阳星盘的冷却,行星迁移的干扰都可能具有重要意义。

#### 参考文献 (References):

- [1] Hester J J, Desch S J, Healy K R, Leshin L A. The Cradle of the Solar System[J]. *Science*, 2004, 304: 1116-1117.
- [2] Bizzarro M, Ulfbeck D, Trinquier A, Thrane K, Connelly J N, Meyer B S. Evidence for a Late Supernova Injection of  $^{60}\text{Fe}$  into the Protoplanetary Disk[J]. *Science*, 2007, 316: 1178-1181.
- [3] Küker M, Henning T, Rüdiger G. Magnetic Star-Disk Coupling in Classical T Tauri Systems[J]. *Astrophys. J.*, 2003, 589: 397-409.
- [4] 陈丰,李雄耀,王世杰. 太阳系外行星研究进展[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2009, 28(4): 390-393.  
Chen Feng, Li Xiongyao, Wang Shijie. Advanced of the Extrasolar Planets[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2009, 28(4): 390-393. (in Chinese with English abstract)
- [5] Petit J M, Morbidelli A. The primordial excitation and clearing of the asteroid belt[J]. *Icarus*, 2001, 153: 338-347.
- [6] Kominami J, Ida S. The effect of tidal Interaction with a gas disk on formation of terrestrial planets[J]. *Icarus*, 2001, 157: 43-56.
- [7] Canup R M, Asphaug E. Origin of the moon in a giant impact near the end of the Earth's formation[J]. *Nature*, 2001, 412: 708-712.
- [8] Solomon S C. Mercury: The enigmatic innermost planet[J]. *Earth Planetary Sci. Lett.*, 2003, 216: 441-455.
- [9] Lin D N C. The Genesis of Planets[J]. *Sci. Amer.*, 2008, 298(5): 50-59.
- [10] Pollack J B, Hubickyj O, Bodenheimer P, Lissauer J J, Podolak M, Greenzweig Y. Formation of the giant planets by concurrent accretion of solids and gas[J]. *Icarus*, 1996, 124: 62-85.
- [11] Thommes E W, Duncan M J, Levison H F. The formation of Uranus and Neptune among Jupiter and Saturn[J]. *Astron. J.*, 2002, 123: 2862-2883.
- [12] Levison H F, Morbidelli A, Van Laerhoven C, Gomes R, Tsiganis K. Origin of the structure of the Kuiper Belt during a dynamical instability in the orbits of Uranus and Neptune [J]. *Icarus*, 2007, 196: 258-273.
- [13] Tsiganis K, Gomes R, Morbidelli A, Levison H F. Origin of the orbital architecture of the giant planets of the solar system[J]. *Nature*, 2005, 435: 459-461.
- [14] Hecht J. Fiery future for planet earth[J]. *New Scientist*, 1994, (1919): 14.
- [15] Schroder K P, Robert Cannon Smith R C. Distant future of the sun and earth revisited[J]. *Month. Not. of the Royal Astron. Soc.*, 2008, 386: 155-163.
- [16] Sackmann I J, Boothroyd A I K E, Kraemer K E. Our Sun. III. present and future[J]. *Astrophys. J.*, 1993, 418: 457-468.
- [17] Balick B. Planetary nebulae and the future of the solar system. <http://www.astro.washington.edu/balick/WFPC2/>.
- [18] Gänsicke B T, Marsh T R, Southworth J, Rebassa-Mansergas A. A gaseous metal disk around a white dwarf[J]. *Science*, 2006, 314: 1908-1910.
- [19] Fontaine G, Brassard P, Bergeron P. The potential of white dwarf cosmochronology [J/OL]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 2001, 113: 409-435. doi:10.1086/319535. <http://www.journals.uchicago.edu/doi/full/10.1086/319535>.
- [20] Wallace G E. Earth's place in the solar system[M]. *Earth Systems: Processes and Issues*. Cambridge University Press, 2000, 45-58.