

论太阳系的起源*

戴文赛 胡中为

(南京大学天体物理研究室)

摘 要

在评价各种太阳系起源学说^[1]后,本文力求较全面、系统和有内在联系地论述太阳系主要特征和各类天体的起源。文中对太阳系形成的总过程进行了分析,对提丢斯-波得定则、角动量分布、木星、土星和天王星的卫星与环的形成、小行星起源等问题作了深入探讨^[2-3]。

太阳系的起源是个有重要研究意义的科学问题^[9,10]。地球的起源和早期史与太阳系的起源密切相关,但由于地球已经历了地质变化,难于了解它形成早期的情况,而某些行星和卫星可能还保留一些早期状态,为研究地球史提供借鉴。自康德和拉普拉斯的星云说提出太阳系起源这个科学问题以来,至今已有四十多种太阳系起源学说。近年来,这方面的研究更活跃,在内容和深度上都有很大进展,但尚无一个完整学说被大家所普遍接受。由于至今只能直接观测到太阳系这么一个行星系样品,而且是已演化后的现状,从现有资料和理论来探讨远在46亿年前发生的复杂过程,也是比较困难的。

近二十多年来,有关天文资料大量增加,例如,水星和火星以致小小的火卫上的许多凹坑(环形山),天王星环和木星环的发现,陨星和月岩的分析,水星、金星和木星及其卫星的空间探测资料,以及恒星形成与早期演化的资料等。我们特别注意综合这些资料,把行星系的形成与太阳的形成演化联系起来,力求较全面、系统和有内在联系地来研究太阳系主要特征的由来和各类天体的起源。

一、基本问题和论点

太阳系起源第一个基本问题是行星物质的来源问题。这方面的学说基本上可分为三类:灾变说(或分出说)、俘获说和共同形成说。我们的分析得出^[1],康德和拉普拉斯星云说的基本论点(即整个太阳系由同一个原始星云形成)是正确的,并发展了这一论点。我们认为,原始星云是从星际云瓦解出来的,一开始就有自转,并靠自吸引而收缩;星云中心部分形成太阳,外部因自转而扁化为星云盘,在盘中形成行星和卫星。原始星云既非康德的微粒(他也未提自转),也不是拉普拉斯的高温气体云,而是低温的气体尘埃云(尘埃占1%左右)。

本文1979年6月18日收到,1979年12月4日收到修改稿。

* 本文根据戴文赛教授为全国科学大会准备的报告稿和生前研究成果,由胡中为同志整理写成,并参与了本文部分研究工作。张明昌和初一同志参加了原稿的讨论。

由现代恒星演化的分析得出^[11,12]，恒星是从星际云自吸引塌缩形成的。已观测到许多低温、低密度的星际云以及从星际云向恒星演化的过渡天体（分子云、致密 HII 区、球状体、HH 天体、原恒星红外源等），且表明大的星际云瓦解而成团地产生恒星，还观测到一些恒星周围有气体尘埃盘^[13]。例如 RMon 和 MWC 349 两星的光谱能量分布有双峰：可见光的峰属恒星辐射；红外峰是盘中尘埃的热辐射，并且推算出盘质量与行星系同量级^[14,15]。

第二个基本问题是行星的形成方式问题。我们认为，先形成环体、原行星、中介天体及湍涡流规则排列等论点不能成立，而星子集聚论点是合理的^[1]。我们具体分析了星云盘内固体颗粒沉降到赤道面、形成“尘层”，以及尘层瓦解形成星子和星子集集成行星的过程。月球、水星、火星及其卫星上的凹坑正表明它们早期受到星子撞击；陨星中的球粒断裂、金刚石等也表明陨星母体受到撞击。

有几个学说（如文献 [16, 17] 也持上述两个论点，但在具体内容、分析方法和结果上跟我们不同。

二、原始星云的由来及其质量和角动量

1. 根据维里定理，忽略自转、磁场及湍动（这些作用是很次要的^[6]），只考虑引力势能和动能，可导出星际云塌缩条件为^[4]：

$$(M/M_{\odot})^2 \rho > 6.59 \times 10^{-20} (T/\mu)^3, \quad (1)$$

其中 M_{\odot} 为太阳现质量， M 为云质量， ρ ， μ ， T 分别为云的密度、平均分子量和绝对温度。观测给出， ρ 为 10^{-23} — 10^{-21} 克·厘米⁻³， T 为 10—300K。取 $\mu = 2.4$ ， $T = 50$ K， $\rho = 10^{-22}$ ，由 (1) 式得， $M > 2.44 \times 10^3 M_{\odot}$ ，即星际云质量比 M_{\odot} 大三个量级时，它才会自吸引塌缩。星际云塌缩到密度 10^{-15} 时，内部因不稳定而出现湍涡流，瓦解为上千个小云，其中之一是太阳系前身——原始星云。

2. 星际云瓦解的各小云演化为恒星，形成星团。太阳所属星团早已瓦解了。这个星团中可能有几个大质量恒星，它们很快演化为超新星，产生重元素及其同位素，其中一部分进入原始星云。超新星爆发促进原始星云的塌缩。太阳系重元素的最后大规模合成，大约距今 54—58 亿年^[18]；陨星、地球和月球的同位素年龄表明它们在 46 亿年前形成^[19]；恒星演化理论给出太阳年龄约为 50 亿年。

3. 今天太阳系总质量为 $1.00135 M_{\odot}$ ，再加上太阳早期金牛 T 阶段抛射质量（估计为 10—20% M_{\odot} ）、星云盘内挥发和逃逸的气体及巨行星摄动抛掉的物体质量，估计原始星云总质量为 βM_{\odot} ($1 < \beta < 1.3$)。

4. 原始星云在星际云的湍涡流中形成，一开始就有自转，角动量矢量方向可以是现在太阳系角动量方向。有人认为（如文献 [20]）原始星云的自转来源于银河系的较差转动，这是不对的，因为事实上太阳系不变平面与银道面成 $61^{\circ}7$ 角。利用不可压缩流体的临界角速度 (Ω_c) 公式，

$$\Omega_c^2 / 2\pi G \rho = 0.36075. \quad (2)$$

假定原始星云收缩到海王星区原外边界时，发生自转不稳定，变为扁球体。令 $\beta_1 M_{\odot}$ 为原太阳质量，可算出原始星云的角动量 $J = 4.74 \times 10^{52} \beta^{3/2} \beta_1^{-1/2} \approx 4.74 \times \beta$ CGS 单位（取 $\beta \approx \beta_1$ ）。若取 $\beta = 1.05$ 和 $4/3$ ，则原始星云角动量为今天太阳系角动量的 158 和 200 倍^[4]。

三、星云盘的结构

1. 自转的原始星云塌缩中,因角动量守恒,自转角速度增大,当赤道面附近外部物质所受惯性离心力与中心部分的引力相抗衡时,便停下来,逐渐形成星云盘。由于星云盘已演化为行星系,因此需建立星云盘结构的理论模型,这是个很困难的问题。

2. 温度分布。原太阳形成后,星云盘的温度分布主要由太阳辐射 L 、星云盘物质的消光 $\tau(r)$ 及热辐射 $\sigma_s T^4(r)$ 决定,外来星光和宇宙线的作用可忽略,由能量平衡方程可得温度分布 $T(r)$:

$$L \exp[-\tau(r)] = 4\pi r^2 \sigma_s T^4(r). \quad (3)$$

各人对 L 和 $\tau(r)$ 取值不同,所得 $T(r)$ 也不同。Kuiper 得出^[21]:

$$T(r) = T_0 (r_{\oplus}/r), \quad (4)$$

r_{\oplus} 为日地距离, $T_0 = 300\text{K}$ 。近年陨星分析导出地球的吸积温度为 $T_0 = 544\text{K}$ ^[22], 采用此值可算出星云盘外边界 $T \sim 15\text{K}$, 内边界 $T \sim 1900\text{K}$ 。

3. 化学组成。木星的密度与太阳相近,其化学组成也应大致相同;碳质陨石的重元素相对丰度与太阳外部相同^[23]。因此,可认为太阳外部的化学组成^[24]代表星云盘的化学组成,仿 Whipple^[25]分为三类:土物质、冰物质和气物质。它们的成分、凝聚温度和含量见表 1。在星际物质中已观测到 SiO_2 , Fe_3O_4 等尘粒及 H_2O , $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 等冰粒,大小约 10^{-5} 厘米,占质量 1% 左右。星云盘各处温度不同,不同区域凝聚物成分不同,出现化学分馏。

表 1

	土物质	冰物质	气物质
成分	Fe, Si, Mg, Ni 及其氧化物	O, N, C 及其氢化物	H, H ₂ , He, Ne
凝聚温度	1600—400K	200—60K	20K 以下
含量(质量百分比)	0.4%	1.4%	98.2%

4. 面密度 $\sigma(r)$ 。有些人(如文献[17])用增广质量除以行星区面积得出面密度,其结果大致可表示为:

$$\sigma(r) \propto r^{-n}, \quad n \approx 2. \quad (5)$$

我们假定星云连续收缩中大致保持相似形状(图 1)。设不同两时刻赤道面留下同样质量 δM 的两环体 δR 和 δr , 则有

$$\delta r = r \delta R / R. \quad (6)$$

星云盘的面密度为:

$$\sigma_0(r) = \frac{\delta M}{2\pi r \delta r} = \frac{R \delta M}{2\pi \delta R} r^{-2}. \quad (7)$$

取 R , δR , δM 为常数,令 $A = \frac{R \delta M}{2\pi \delta R}$, 则

$$\sigma_0(r) = A r^{-2}. \quad (8)$$

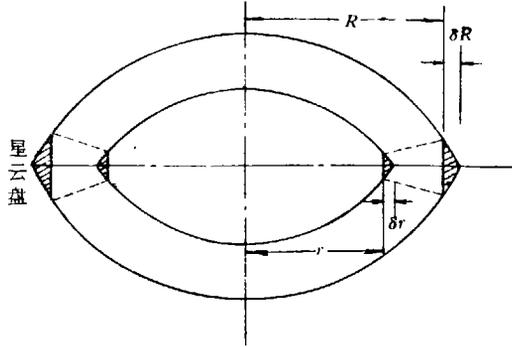


图 1 原始星云的收缩和星云盘的形成

行星胎由固态可吸积物质集聚形成, 令 α 为可吸积物质比率, 则可吸积物质的面密度为:

$$\sigma(r) = \alpha A r^{-2}. \tag{9}$$

常数 A 值可由地球质量 m_{\oplus} 定出,

$$m_{\oplus} = \int_{r_1}^{r_2} \alpha A r^{-2} \cdot 2\pi r dr. \tag{10}$$

地球由土物质形成, $\alpha = 0.4\%$, 地球区内、外边界 r_1 和 r_2 值见表 3, 由此得 $A = 5.19 \times 10^{27}$ 克。

星云盘各 r 处垂直于赤道面 (Z 向) 的体密度分布 $\rho(Z)$, 可由流体静力平衡方程得出^[4]:

$$\rho(Z) = \rho_0 \exp(-Z^2/h^2), \quad \rho_0 \equiv \rho_0(r) = \frac{\sigma_0(r)}{1.732h}, \quad h = \left(\frac{2kT_r}{\mu m_H GM} \right)^{1/2}, \tag{11}$$

其中 ρ_0 为赤道面处的体密度, h 为标高(可表征星云盘厚度)。将 (4) 式代入 (11) 式, 得

$$h = \left(\frac{2kT_0 r_{\oplus}}{\mu m_H GM} \right)^{1/2} r. \tag{12}$$

这表明, 星云盘内薄外厚, h 值为 $10^{11} - 10^{13}$ 厘米^[8]。

四、尘层、星子和行星的形成

1. 尘层的形成。星云盘中的小尘粒(包括冰粒)跟气体一起绕原太阳转动, 同时也作布朗运动, 彼此发生非弹性碰撞, 结合成颗粒(碰撞吸积), 其质量生长率为:

$$\frac{dm}{dt} = \rho v \sigma_c s, \tag{13}$$

式中 ρ 为可吸积物质密度, v 为平均相对速度, s 为粘附概率, $\sigma_c = 4\pi b^2$ 为碰撞截面 (b 为颗粒半径)。

作用于颗粒的力有: 太阳引力、惯性离心力、气体压力和阻力。它们可分解为平行于赤道面的径向分量和法向 Z 分量。在径向, 气体压力影响小, 主要是引力分量被离心力平衡; 在法向, 主要是在引力 Z 分量作用下, 颗粒克服气体阻力, 向赤道面沉降(图 2)。颗粒边沉降, 边集聚。利用上述关系可导出沉降时近似公式为^[6,8]:

$$t \approx 5.23 \times 10^{-10} \times \frac{A^{3/7} r^{9/14}}{(\alpha \rho_g)^{2/7}}, \tag{14}$$

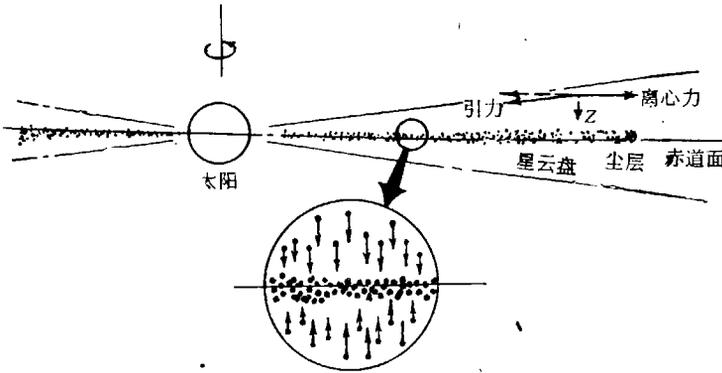


图 2a 尘层的形成(示意图)

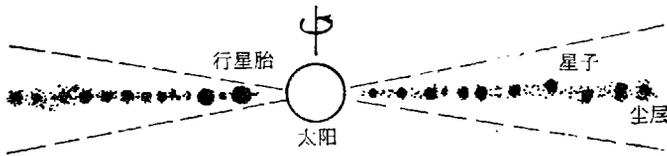


图 2b 尘层内柱子团集成星子,星子集成行星胎(示意图)

式中 ρ_g 为颗粒本身的密度, 计算得出, 沉降时间为 4.5×10^4 年(内区)到 6.2×10^5 年(外区)。

尘层厚度难以准确计算。假设尘层物质达到洛希密度, 那么尘层厚度为 10^6 厘米(内区)到 10^8 厘米(外区), 颗粒大小生长到 3.4 毫米(内区)到 0.04 毫米(外区)^[6], 这与陨石球粒大小^[26]量级符合。

2. 星子的形成。尘层的物质密度已足够大, 局部扰动会导致引力不稳定性, 使尘层瓦解为许多颗粒团。颗粒团的物质密度随时间而指数式增长, 超过洛希密度时就可以自吸引塌缩, 集聚成固体块——星子。对于较差转动的盘状体系, 引力不稳定性出现的条件为^[27,28,8]:

$$\omega^2 = k^2 v_s^2 + K^2 - 2\pi G \sigma k < 0, \quad (15)$$

式中 ω 为扰动频率, k 为波数, v_s 为声速, K 为“本轮频率”:

$$K^2 = 2\Omega \left[\Omega + \frac{d(r\Omega)}{dr} \right], \quad (16)$$

Ω 为转动角速度。对于开普勒转动, $K = \Omega$, 因而有

$$k^2 v_s^2 + \Omega^2 < 2\pi G \sigma k. \quad (17)$$

由此得出, 只有扰动波长 $\lambda = \frac{2\pi}{k}$ 满足下面不等式时, 才可能出现引力不稳定性,

$$\lambda < \lambda_+ = \frac{4\pi^2 G \sigma}{\Omega^2} \quad (v_s = 0 \text{ 时}), \quad (18)$$

$$\lambda > \lambda_- = \frac{v_s^2}{G \sigma} \quad (\Omega = 0 \text{ 时}). \quad (19)$$

粗略估算得出^[6], 整个尘层内可能都满足 $\lambda_- < \lambda_+$ 条件, 因而尘层瓦解为许多颗粒团。Гуревич 等^[29,16]用另外方法讨论了粒子团形成问题, 并得出粒子团在 10^4 — 10^5 年内塌缩为星子。我们估算得出^[8], 初始大星子质量为 10^{18} 克(内区)到 10^{20} 克(外区)。

3. 行星的形成. 大星子的引力较强, 更有效地吸积周围物质和小星子(引力吸积), 迅速长大. 初始星子大致绕太阳作开普勒运动, 还有随机运动; 星子接近时, 轨道偏心率 e 和倾角 i 的弥散度变大^[30], 各星子轨道变为交叉, 更频繁地接近和碰撞, 发生结合或碎裂(取决于相对速度). 物质不断地集聚于大星子上, 使其生长更快更大, 最大的星子成为行星胎, 再生长为行星.

星子集聚成行星的具体过程是复杂的, 难于严格理论计算. 一般说, 初期的星子数目多, 可用统计方法处理, 到了行星胎阶段, 大星子数目少, 成为困难的多体问题. 各人用不同方法算出的行星形成时间, 就地球而言, 竟差 3—4 个量级. 我们的简化估算得出^[6], 地球形成时间为 10^6 — 10^7 年, 木星(固态核)形成时间为 10^7 年, 水星为 10^4 — 10^6 年, 这与陨星分析结果(陨星母体的形成时间为几千万年^[26])大致符合.

五、行星的轨道运动和自转

1. 行星轨道运动的共面性、同向性、近圆性是它们在转动的薄尘层内形成的必然结果. 星子集聚是随机过程, 有其必然的统计规律, 也有一定偶然性. 星子生长过程中, e, i 平均化, 一般说, 大质量行星由更多星子集聚形成, 平均化较好, e, i 值小; 但平均化不会彻底, 特别是在形成晚期, 如果被残余大星子近心对撞时, e, i 值改变较大, 产生行星现在的 e, i 值(表 2).

表 2

行 星	e	i	ε
水 星	0.2056	$6^{\circ}17'$	$<28^{\circ}$
金 星	0.0068	$2^{\circ}10'$	177°
地 球	0.0167	$1^{\circ}37'$	$23^{\circ}27'$
火 星	0.0934	$1^{\circ}42'$	$23^{\circ}59'$
木 星	0.0484	$0^{\circ}23'$	$3^{\circ}05'$
土 星	0.0556	$0^{\circ}57'$	$26^{\circ}44'$
天 王 星	0.0472	$1^{\circ}06'$	$97^{\circ}55'$
海 王 星	0.0086	$0^{\circ}46'$	$28^{\circ}48'$
冥 王 星	0.2492	$15^{\circ}33'$	$\sim 62^{\circ}$

2. 我们认为, 行星的自转起源于被吸积星子的冲击, 即星子把角动量带给它. 在薄盘内作开普勒较差转动的星子落入行星胎, 总结果是使行星顺向自转^[31]. 令 x 表示行星相对于太阳而言的引力范围半径^[6], 即

$$x = (m/3M_{\odot})^{1/3}a \quad (20)$$

(a 为行星轨道半径), 那么行星最后获得角动量密度为^[31]:

$$j = \frac{1}{8} (GM_{\odot})^{1/2} a^{-3/2} (\xi x)^2, \quad (21)$$

ξ 为小于 1 的参数. 由此导出行星自转周期为几小时, 与观测值量级符合. (21) 式是对小星子导出的, 如果行星形成晚期被大星子掠碰, 就会改变自转状况, 使行星自转轴与公转轴有较大交角 ε (表 2). 金星的逆向自转、天王星和冥王星的侧向自转可用这种掠碰来解释.

我们计算得出, 金星胎可能被质量为它的 3% 的大星子逆向掠碰了赤道(图 3), 才使它变为逆向自转; 天王星则可能被质量为它的 5.4% 的大星子从近于垂直轨道向径方向掠碰(图

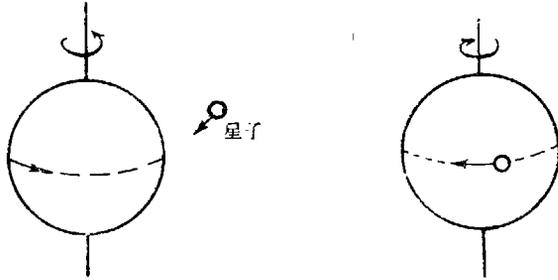


图3 大星子掠撞金星,使它变为逆向自转

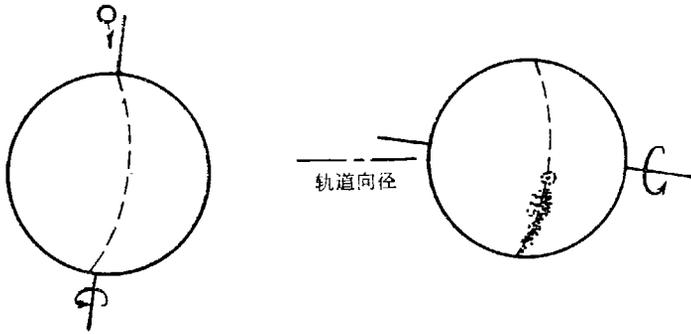


图4 大星子掠撞天王星使它变为侧向自转

4), 使它变为侧向自转^[5], 冥王星也是类似情况。

3. 太阳自转与行星公转同向, 这是它们由同一自转的原始星云形成的必然结果。但是, 太阳赤道面与不变平面不重合, 而有 $5^{\circ}56'$ 交角。我们分析得出, 如果太阳在金牛 T 阶段有 $\sim 10^{-1} M$ 。物质非径向抛射, 其反冲力矩就可以使太阳自转产生这样改变。

六、角动量分布问题

1. 现在太阳质量占太阳系的 99.865%, 而角动量只占 0.6% 不到; 相反, 行星及卫星总质量仅占 0.135%, 而其角动量总和却占 99% 以上^[6]。这一角动量特殊分布是太阳系起源的关键问题之一, 在文献 [4] 中专门论述了这一问题。

原太阳质量占原始星云的绝大部分, 它刚形成时角动量一定比现在大得多, 需某种机制转移掉它的角动量。Alfven 1942 年提出“磁耦合”机制^[22], 但因星云盘的电离度小, 此机制不够有效。1962 年 Schatzman 提出^[33], 太阳抛出的带电粒子沿着与太阳共转的磁力线运动, 带走了角动量。我们认为 Schatzman 机制是有效的, 因为太阳演化早期(金牛 T 阶段)自转快, 外层对流强, 磁场也强, 表层活动剧烈, 能够抛出很多带电粒子。计算表明, 太阳在金牛 T 阶段之前, 角动量需减少几十倍才能继续收缩, 这可能是湍动对流起作用。有人认为太阳内部自转快, 那么需被转移角动量, 还可小一个量级。

2. 一些研究者认为(如文献 [13]), 太阳抛出的物质全部或大部分进入星云盘, 把角动量带给星云盘。实际上, 星云盘很扁, 尘层更薄, 而太阳活动延伸到纬度 $\pm 30^{\circ}$ 以上, 比盘的张角

大 70 余倍, 所以, 太阳抛出的物质绝大部分不进入星云盘, 而是抛出太阳系, 并带走很大的角动量。星云盘原来已有足够的角动量, 使所形成的行星具有现在的角动量, 不需太阳角动量转移给它们。

3. 卫星系统的角动量分布与行星系统不同, 只有地月系中月球绕地球转动的角动量比地球自转角动量大 4 倍, 其它卫星系中, 都是质量大的中心体(行星)自转角动量比卫星绕转角动量大。卫星系统没有中心体角动量大量转移问题, 实际上行星演化与太阳不同, 不存在抛射带电粒子现象。

七、提丢斯-波得定则

1. 行星公转轨道半长径 a 的分布由提丢斯-波得经验公式表示:

$$a_n = 0.4 + 0.3 \times 2^{n-2} \text{ 天文单位,} \tag{22}$$

也可以表示为:

$$a_{n+1}/a_n \approx 1.73, \tag{23}$$

还有其它表示式参见文献 [34]。这是太阳系起源学说应予说明的规律, 很多人没有给出令人信服的说明。我们把相邻两行星的潮汐力相等处取为行星区分界线, 即把 $a_{n+1} - a_n$ 按 $m_{n+1}^{1/3} : m_n^{1/3}$ 比率划界, 决定行星区宽度 Δ , 算出的 Δ 值与引力范围 x 大致成正比(表 3)。林忠四郎^[17]、Safronov^[61] 也得出行星吸积范围比引力范围大一个量级。由于星子轨道有一定 e, i 值, 很大范围内的星子都可能被行星胎吸积, 这样就吧行星区宽度与吸积范围及引力范围联系起来, 而

表 3

行 星	a_n 观测	a_n 计算	a_{n+1}/a_n	行星区范围 ($\beta_1 r$)	$\Delta/2x$
水 星	0.387	0.4	1.87	0.287*—0.486	66.0
金 星	0.723	0.7	1.38	0.486—0.857	27.5
地 球	1.000	1.0	1.52	0.857—1.355	24.9
火 星	1.523	1.6	(1.77)	1.355—1.693*	23.3
(小行星)	2.7	2.8	(1.92)		
木 星	5.203	5.2	1.83	2.60*—7.80	15.7
土 星	9.52	10.0	2.02	7.80—15.82	19.8
天 王 星	19.2	19.6	1.57	15.82—24.47	9.22
海 王 星	30.2	38.8	1.31	24.47—37.97	8.69
冥 王 星	39.5	77.2		37.97—40.91*	7.76

* 水、火、木、冥四行星区的内外两半宽取为相同, 可能误差较大。

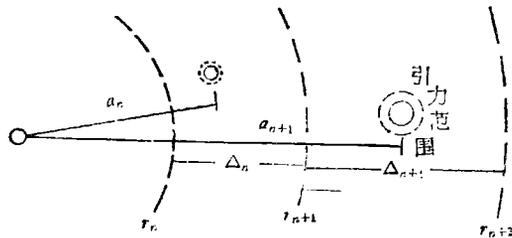


图 5 引力范围和吸积范围

原行星或其它行星形成方式不会得出这一结果。计算出的 $\Delta/2x$ 随 a 增加而减小, 这是因为尘层厚度随远离太阳而增加, 星子轨道 i 也大, 从而使吸积范围及行星区宽度 Δ 相应地减小^[2]。

2. 令 r_n, r_{n+1} 分别表示第 n 个行星区的内、外边界, 那么行星质量应为:

$$m_n = \int_{r_n}^{r_{n+1}} \alpha_n A r^{-2} \times 2\pi r dr = 2\pi\alpha_n A \ln \frac{r_{n+1}}{r_n} \quad (24)$$

或

$$r_{n+1}/r_n = \exp\left(\frac{m_n}{2\pi\alpha_n A}\right) \quad (25)$$

而行星区宽度

$$\Delta = r_{n+1} - r_n \quad (26)$$

由上两式可导出:

$$\frac{\Delta_{n+1}}{\Delta_n} = \frac{\exp\left(\frac{m_{n+1}}{2\pi\alpha_{n+1}A}\right) - 1}{\exp\left(\frac{m_n}{2\pi\alpha_n A}\right) - 1} \times \exp\left(\frac{m_n}{2\pi\alpha_n A}\right) \quad (27)$$

另一方面, 若行星区宽度完全正比于引力范围, 即

$$\Delta_n \propto x_n = \left(\frac{m_n}{3M}\right)^{1/3} a_n,$$

则有

$$\frac{\Delta_{n+1}}{\Delta_n} = \left(\frac{m_{n+1}}{m_n}\right)^{1/3} \times \frac{a_{n+1}}{a_n} \quad (28)$$

由上两式可得:

$$\frac{a_{n+1}}{a_n} = \left(\frac{m_n}{m_{n+1}}\right)^{1/3} \times \frac{\exp\left(\frac{m_{n+1}}{2\pi\alpha_{n+1}A}\right) - 1}{\exp\left(\frac{m_n}{2\pi\alpha_n A}\right) - 1} \times \exp\left(\frac{m_n}{2\pi\alpha_n A}\right) \quad (29)$$

若存在条件

$$m_{n+1} = m_n = m, \quad \alpha_{n+1} = \alpha_n = \alpha, \quad (30)$$

则得

$$\frac{a_{n+1}}{a_n} = \exp\left(\frac{m}{2\pi\alpha A}\right) = \text{常数} \quad (31)$$

或用 (25) 式, 化为 $\frac{a_{n+1}}{a_n} \approx \frac{r_{n+1}}{r_n}$, 这可与观测比较。实际上, 星子集聚成行星的过程更复杂, 不满足条件 (30) 式, 因而比值 a_{n+1}/a_n 不完全是常数, 还与行星质量及 α 值有关。

3. 因为尘层的密度随远离太阳而减小, 由星子生长率公式, 即 (13) 式并取引力吸积截面 $\sigma_c = b^2 \left(1 + \frac{2m}{bv^2}\right)$, 可看出靠近太阳的行星先形成。水星胎形成后, 金星区已有了大星子, 它同水星胎争夺边界区物质。如果它离水星近, 因边界区物质少, 不会生长快, 而它外面的大星子才可能长为金星胎; 但金星胎也不会更远, 因为还与地球区大星子争夺物质。尘层内可吸积物质的数量限定了行星质量, 使金星胎定居于 $\Delta_c/\Delta_* \approx x_c/x_*$ 处。由于吸积过程的随机性,

m_{\oplus} 与 Δ_{\oplus} 值可能有一定偏差, 这可不必付诸潮汐作用等原因。其它行星依次如此定居。

星云盘内可吸积物质只有 $0.00135M_{\odot}$, 这就限定了所形成的行星数目。如果可吸积物质增加 12 倍, 木星区宽度将增加 2.3 倍, 星云盘只形成 3 个大行星; 若增加 340 倍, 则只形成一个天体, 太阳系便成为双星系了。

4. 规则卫星与行星的距离, 也可用与 (22) 或 (23) 式相似的公式表示, 这表明规则卫星的形成方式与行星相似, 也是由星子集聚形成的。

八、行星的大小、质量和密度分布

1. 行星可分为三类: 类地行星、巨行星和远日行星。各行星的质量、半径和密度列于表 4。显然, 行星的大小和质量分布特征是两头小、中间大, 而密度分布特征是类地行星大、巨行星小、远日行星中等。这种特征是行星形成总过程的必然结果, 反映了各类行星在形成条件上的差别。类地行星区温度高, 只有土物质凝聚, 冰物质和气物质绝大部分挥发掉; 远日行星区太阳引力弱, 逃逸速度小, 大部分气物质逐渐逃离太阳系, 这就导致三个区的化学组成差异(表 5)。含土物质的类地行星密度大; 巨行星含气物质多(见下节), 因而密度小。从星云盘可吸积物质的密度及行星区宽度, 算出行星质量分布是两头小、中间大。由行星质量和密度也导出大小分布特征。

表 4

行 星		质量(克)	平均半径(公里)	平均密度 (克·厘米 ⁻³)
类地行星	水	3.33×10^{27}	2440	5.4
	金	4.87×10^{27}	6052	5.2
	地	5.98×10^{27}	6371	5.5
	火	6.42×10^{27}	3383	3.9
巨行星	木	1.90×10^{30}	49940	1.3
	土	5.69×10^{29}	57930	0.7
远日行星	天	8.74×10^{28}	25370	1.2
	海	1.03×10^{29}	24580	1.7
	冥	1.4×10^{28}	1350	1.5

表 5

区	土物质 (Si, Fe, Mg 及其氧化物)	冰物质 (N, C, O 及其氢化物)	气物质 (H, H ₂ , He Ne)
类地区	~1	10^{-4}	$10^{-7} - 10^{-11}$
巨行星区	0.02	0.07	0.91
外行星区	0.105	0.680	0.12

九、木星、土星、天王星及其卫星和环的形成

卫星的形成与行星的形成有相似之处, 但也有不同地方, 不能简单地看作小规模重复, 应作具体分析。在由星子集聚形成这一点上, 卫星与行星相似, 但不同类型的卫星(规则卫星和不规则卫星)以及各行星的卫星, 形成过程不完全一样。

1. 木星和土星的卫星和环的形成过程相同^[5]. 星云盘的木土区温度低, 土物质和冰物质都凝聚, 原料丰富, 星子生长快. 星子先集聚成木星和土星的固态核. 固态核生长到 10^{25} 克左右, 其表面逃逸速度超过气体分子的热速度, 即,

$$\frac{2Gm}{b} > \frac{3kT}{\mu m_H} \quad (32)$$

它可以吸积气体, 随着核质量生长, 吸积气体的范围也增大, 逐渐形成气壳, 气壳的赤道半径 y 由下式决定:

$$\frac{2Gm}{y} = \frac{3kT}{\mu m_H} \quad (33)$$

只要气壳半径 y 小于引力范围 x , 它就不会被太阳的潮汐力瓦解. 这些气体原来绕太阳转动, 所形成的气壳有自转并扁化. 用 (21) 式并取 $y = 5x$, 可算出气壳的角动量. 气壳后来塌缩到固态核上, 形成木星和土星的中层(金属氢)和外层(液态分子氢), 同时产生顺向自转. 由 (21) 式与

$$J = \frac{2}{5} \gamma m R^2 \times \frac{2\pi}{P} \quad (34)$$

取 $\gamma = 0.4$, 算出木星自转周期 $P = 6^h 28^m$, 与观测值 $9^h 50^m$ 相近. 气壳的自转也导致木星和土星成为扁球体.

规则卫星轨道半长径 $a < y$, 表明它们形成于气壳之内. 气壳形成后, 被行星吸积的星子, 因气壳阻尼, 速度变小, 一部分星子留在气壳内, 绕固态核转动, e, i 变小, 形成星子盘, 星子集聚成规则卫星. 这一过程与行星相似, 所以规则卫星轨道也有共面性、同向性、近圆性, 遵循提丢斯-波得定则.

气壳塌缩时, 卫星轨道也缩小几倍, 最里面的卫星落入洛希限内, 被行星的潮汐力瓦解, 形成环. 算出土星环总质量为土星的 7×10^{-6} , 这与观测新值 5×10^{-5} ^[35] 相近 (也有人得到 3.5×10^{-4} 或 10^{-7}). 最近发现木星有暗的碎石环, 而土星环则是冰块组成, 这种差别可以用木星附近温度高, 冰物质熔化挥发来解释.

2. 木星和土星的不规则卫星是在气壳外形成的, 很可能是俘获的残余星子, 因而质量小, 轨道 e, i 值多样化, 也不符合提丢斯-波得定则.

3. 天王星的卫星与木卫、土卫的形成过程不同^[5]. 天王星区可吸积物质的密度小, 固态核生长慢, 由于该区气体逐渐逃逸, 没有形成发展的气壳. 天王星形成晚期受到大星子掠碰, 由于没有气壳阻尼, 碰撞猛烈, 撞出很多物质, 其中大部分落回天王星上, 一部分在天王星的新赤道面绕转. 虽然刚碰出的物质很热(可达 10^3K), 但因膨胀和辐射, 0.2 年内就冷却凝聚, 形成绕星盘, 集聚成卫星, 而在洛希限内的物质, 因受潮汐力, 不能形成卫星, 而形成环带. 1977 年发现在土星与天王星轨道之间的小天体 (Chiron, 直径几百公里), 它可能是残存星子, 而早期应有更多的大星子, 因此存在上述碰撞的可能性.

十、冥王星及其卫星的起源

冥王星远, 观测资料贫乏, 直到去年从冥卫发现才算出较准确的质量和密度值, 确定它属于远日行星一类^[7]. 冥王星的质量和体积都是九大行星中最小的, 但其轨道的 e, i 值却是

大的,而且近日距小于海王星轨道半长径。长期以来,许多人同意 Lyttleton 的看法^[36],认为冥王星以前曾是海王星的卫星,它和海卫一都绕海王星顺向转动,它们曾走近,引力摄动使海卫一绕冥王星转过 180° ,变为逆行,而冥王星则获得额外速度,脱离海王星而成为第九个行星。根据新数据,海卫一质量是冥王星的 24 倍,按照相遇理论^[37], Lyttleton 的看法不再成立。

我们认为,冥王星原是海王星轨道内的大星子,由于与另一星子近心对撞,使其轨道的 e , i 值变大。后来,与天王星情况类似,冥王星又被另一星子掠碰(可算出此星子质量为冥王星的 8%),碰撞力矩使冥王星变为侧向自转,撞出物质的一部分形成了冥卫,也许还形成几个卫星及环。

十一、小行星的起源

这是太阳系起源的一个重要问题。我们认为,小行星的形成是太阳系形成总过程的一个必然结果,并作了定量分析^[6]。

星云盘的温度分布等条件,决定了小行星区到木星区是冰物质从不凝聚到凝聚的过渡区。由于木星区多了冰粒可吸积物质,最初就形成较大星子,而且生长快。这些大星子间的摄动使部分大星子轨道 e 值增大,可以穿过小行星区。计算得出,木星区内侧的大星子生长到 2.68×10^{26} 克时,就有大星子轨道穿过小行星区中部,而此时小行星区最大星子只生长到 2.46×10^{23} 克。因此,小行星区物质(包括星子)可被木星区来的大星子吸积并带走,小行星区物质逐渐被转移到木星区。小行星区的可吸积物质少了,星子生长便停顿在‘半成品’状态,长不成大行星。木星区过来的星子的摄动,使小行星区星子的随机速度大大增大,它们碰撞时不是结合,而是撞碎,这就导致小行星形状不规则、有一定的质量谱和轨道多样化。有些小行星成为陨星母体,后来母体又碰碎,有的碎块落到地球上,成为陨星。小行星区星子撞裂的大量碎屑,或被太阳风驱走,或因坡印廷—罗伯逊效应而最终落入太阳及内行星上,所以今天小行星总质量很小。

参 考 文 献

- [1] 戴文赛、陈道汉,天文学报,17(1976),93—105.
- [2] 戴文赛、胡中为,自然杂志,5(1978),25—30.
- [3] 戴文赛,天文学报,16(1975),123—130.
- [4] 戴文赛,天文学报,17(1976),165—175.
- [5] 戴文赛,天文学报,18(1977),192—202.
- [6] 戴文赛、胡中为,天文学报,20(1979),33—42.
- [7] 戴文赛、胡中为,科学通报,5(1979),215—216.
- [8] 戴文赛,太阳系演化学(上册),上海科学技术出版社,1979.
- [9] 戴文赛,天体演化研究的意义和方法,光明日报,1978,6,13.
- [10] 戴文赛,天体的演化,科学出版社,1977.
- [11] IAU Symp. 75, *Star Formation* (ed., de Jong, T. Maeder, A.), D. Reidel Publishing Company, Dordrecht-Holland/Boston-U. S. A., 1977.
- [12] Werner, M. W., et al., *Science*, 197(1977), 4305, 723—732.
- [13] Su-shu Hung (黄授书), *Icarus*, 18(1973), 339.
- [14] Low, F. J., Smith, B. J., *Nature*, 212(1966), 675.
- [15] Thompson, R. L., Strittmatter, P. A., *The Moon and the Planets*, 19(1978), 2: 207.
- [16] Safonov, V. S., *Evolution of the Protoplanetary Cloud and Formation of the Earth and the Planets* Israel Program for Scientific Translations, Jerusalem, 1972.
- [17] Hayashi, C., et al., *Progress of Theoretical Physics*, 44(1970), 1580.
林忠四郎,天文月报,70(1977),1:6.

- [18] 侯德封, 欧阳自远, 于津生, 核能转变与地球物质的演化, 科学出版社, 1974.
- [19] York, D., Farguhar, R. M., *The Earth's Age and Geochronology*, Pergamon Press, London, 1972.
- [20] Mitra, V., *Astrophysics and Space Science*, **39**(1976), 387.
- [21] Kuiper, G. P., in *Astrophysics* (ed. Hynek J. A.), Mc Graw-Hill, New York, 1951, 第八章.
- [22] Anders, E., in *From Plasma to Planets* (ed. Elvius A.), Wiley, New York, 1972, 133.
- [23] Alfvén, H., Arrhenius, G., *Evolution of the Solar System* NASA, Washington, 1976, 259.
- [24] Barshay, S. S., Lewis, J. S., *Ann. Rev. Astronomy and Astrophys.*, **14**(1976), 81.
- [25] Whipple, F. L., *Proc. Nat. Acad. Sci.*, **52**(1964), 565.
- [26] 贵阳地球化学研究所, 中国科学, 1978, 3, 325.
- [27] Toomre, A., *Ap. J.*, **139**(1964), 1217.
- [28] Поляченко, В. А., Фридмен, А. М., *А. Ж.*, **49**(1972), 157.
- [29] Гуревич, Л. Э., Лебединский, А. И., *Изв. АН СССР XIV*(1950), 765.
- [30] Hayashi, C., et al., *Publ. Astr. Soc. Japan*, **29**(1977), 163.
- [31] Lyttleton, R. A., *MNRAS*, **158**(1972), 463.
- [32] Alfvén, H., *On the Origin of the Solar System*, Oxford Univ. Press, London, 1954.
- [33] Schatzman, E., *Annales d'Astrophysique*, **18**(1962), 18—29.
- [34] Nieto, M. M., *The Titius-Bode Law of Planetary Distances*, Pergamon Press, London, 1972.
- [35] Yabashita, S., *MNRAS*, **142**(1969), 201.
- [36] Lyttleton, R. A., *MNRAS*, **97**(1937), 108.
- [37] 戴文赛, 恒星天文学, 科学出版社, 1965, 245.