

## 第十章

# 卫星和环系的起源与演化

在太阳系九大行星中，除了水星和金星，其余七颗行星都有天然卫星绕转。土星光环自发现以来的三个多世纪中，一直被认为是独一无二的行星奇观。1977年在天王星掩恒星观测中发现了天王星的环系，1979年“旅行者”空间探测器又发现了木星的环系。这样，卫星和行星环系便成为太阳系的一种较共同的特征。过去，对于这些行星附属物并不十分重视，主要兴趣在于发现新卫星和测定其轨道。而近年来卫星和行星环系的研究极为活跃，为改进卫星运动理论，为了解行星和卫星的性质和发生的过程，进行了多种观测和理论研究。卫星和行星环的研究为解决太阳系起源、演化问题更有意义，这是因为，至今仅仅观测到一个行星系“样品”，而卫星系却有好几个系统，尤其是木卫系、土卫系和天卫系——它们在不少方面象是小规模的行星系。而且，卫星这类小天体提供行星形成演化早期的多种消息。

关于卫星和行星环的起源演化，许多太阳系起源学说中都谈到一些，但大多是定性讨论，这在上册各章节已述，故不再赘述。本书中先概要介绍几种较近的卫星和行星环系的形成理论；接着，阐述我们对卫星和行星环系的研究；最后，介绍卫星和环系的演化问题。

### § 10.1 卫星和环系形成的几种理论

在太阳系起源各学说中，大多数着重阐述行星的形成问题，一般对卫星及行星环系形成的论述较少，只是在近年才充分认识卫

星和环系形成演化问题的重要性。并且空间探测也为这方面的研究提供了新资料。一般认为,卫星及环系形成过程与行星系相似,但也应说明卫星系与行星系的差别。在这一节,仅概述卫星与环系形成的四种理论。

### 一、卡米隆的理论

卡米隆认为木星、土星和天王星形成过程中都存在环星盘,规则卫星由环星盘形成,而不规则卫星是俘获来的小天体<sup>[1]</sup>。

木星、土星和天王星的环星盘形成过程不同。木星和土星的核有很大的质量,与密近双星演化类似,星云盘气体流入它们周围,形成很快转动的包层,由于对流(子午环流)、湍动粘滞和磁场作用,向外转移能量和角动量。当包层气体向核塌缩时,许多气体变为绕行星作轨道运动,形成顺向较差转动薄盘。天王星核的质量小,不会发生上述过程,他同意天王星形成晚期被较大物体碰撞的看法,这种碰撞导致天王星倾向自转,同时产生气体包层,形成很快转动的环星盘,因而天王星的环星盘物质与木(土)星盘有不同的化学组成。

由于引力能(木星、土星)或碰撞能(天王星)的释放,行星有很热的大气(几千度),至少环星盘内区有显著的离子成份,在行星原始磁场作用下,可以把行星自转角动量转移到环星盘,使盘与行星大气分离,也减慢行星自转;流体动力学过程(子午环流,湍动粘滞,也转移角动量。在环星盘冷却中,化学凝聚形成固体,沉向盘的中面,引力不稳定机制<sup>[2]</sup>很快地起作用,形成质量  $m_1$  物体的集团(总质量  $m_2$ )。在木星盘和土星盘中,  $m_1 \sim 3 \times 10^{18}$  克,  $m_2 \sim 10^{21}$  克;在天王星盘中,  $m_1 \sim 2 \times 10^{16}$  克,  $m_2 \sim 4 \times 10^{18}$  克。如同太阳系的情形,由于气体曳引,各物体团成为单体,各团之间的引力摄动,导致它们的相互碰撞、结合,最后形成土星、木星和天王星的规则卫星系。环星盘中的近行星区域里,面密度大,温度高,因而形成岩/冰比值较大的内卫星。引力不稳定性仅对环星盘中岩石组分起作用,

冰组分是后来冷却凝聚而集结到卫星上。由于环星盘的近行星区密度高，对辐射不透射，以及盘形成时绝热条件而产生初始高温，蒸发冰物质(可能也蒸发岩石物质)这一区的冷却时间长,延迟了冰的凝结。卡米隆认为，以上所述的就是木星、土星和天王星的规则卫星系形成的合理框架。海王星没有气体包层的动力学塌缩，也没有大掠碰来产生自转轴倾斜和形成环星盘（以及由盘形成规则卫星）；其次，也没有海王星赤道从近于自转不稳定而减慢到现值所需机制的迹象。海王星卫星属于不规则卫星。

不规则卫星可能是由引力不稳定性在太阳星云内独立形成的，后来才被行星俘获。贝利(Bailey)提出纯动力学俘获机制<sup>[43]</sup>，但受到伯恩斯(Burns)<sup>[44]</sup>和格林伯格(Greenberg)<sup>[45]</sup>等批评。卡米隆认为，可能存在涉及卫星与行星附近原始星云气体之间曳引效应的俘获机制。

## 二、萨弗隆诺夫等的理论

萨弗隆诺夫等认为<sup>[46]</sup>，绕太阳公转质点在生长行星引力场中因非弹性碰撞而被俘获，形成一些小物体，这些小物体和固体质点构成环绕行星的集团，规则卫星就形成于这种环行星集团中。这一理论的要点如下。

1. 重要过程的特征时间。行星打扫供养区物质的特征时间，即其质量减少  $e$  倍的时间，

$$\tau_p = \frac{\rho_p R_p^3}{3(1+2\theta)\sigma R^3} P \quad (1)$$

式中， $\rho_p$  和  $R$  分别为行星的密度和半径， $R_p$  为行星最终半径， $\sigma$  为供养区固态物质的初始面密度， $P$  为行星公转周期， $\theta \approx 3 \sim 5$  为无量纲参数。例如地球生长末期， $\tau_p \approx 10^7$  年，地球在  $6 \times 10^7 \sim 10^8$  年扫进供养区总质量的 90% 因为  $P$  随日心距增大而增大，从(1)可见， $\tau_p$  亦增大，对于天王星和海王星， $\tau_p$  达 15 亿年。

物体聚集(质量增大  $e$  倍)的特征时间

$$\tau_0 = m / \frac{dm}{dt} \quad (2)$$

对于环行星物质团中的物体

$$\tau_0 \approx \frac{M}{M_0} \left( \frac{R_2}{R} \right)^2 \frac{r_{M_1}}{R} \left( \frac{r}{r_{M_1}} \right)^{n_1-3} P_2 \quad (3)$$

式中,下标 2 指环行星物质团中的量,  $M_0$  为物质团质量,  $R$  和  $M$  为行星的半径和质量,  $R_2$  为离行星的距离,  $r$  和  $r_{M_1}$  为团中物体的半径及最大物体半径,  $n_2$  为团中半径小于  $r$  的物体的空间密度分布指数:  $\rho_2(r) = \rho_2 \left( \frac{r}{r_{M_1}} \right)^{4-n_2}$ ,  $\rho_2$  为团的总密度. 一般总有  $\tau_0 \ll \tau_p$ , 这意味着, 从行星供养区来的物体所带来的各种扰动几乎完全被物质团中物体之间的碰撞和聚集消除, 因此, 团中物体的大小分布几乎主要取决于大物体 (卫星胎) 形成早期的聚集过程.

物质团密度  $\rho_2$  增加  $e$  倍的特征时间

$$\tau_0(R_2) = \rho_2 / \frac{d\rho_2}{dt} = \begin{cases} \frac{7-n_1-n_2}{4-n_2} \tau_0(r_{M_1}, R_2) \\ \quad (\text{当 } n_1+n_2 < 7 \text{ 时}) \\ \frac{1}{(4-n_2) \ln(r_{M_1}/r_{m_1})} \tau_0(r_{M_1}, R_2) \\ \quad (\text{当 } n_1+n_2 = 7 \text{ 时}) \\ \frac{n_1+n_2-7}{4-n_2} \left( \frac{r_{m_1}}{r_{M_1}} \right)^{n_1+n_2-7} \tau_0(r_{M_1}, R_2) \\ \quad (\text{当 } n_1+n_2 > 7 \text{ 时}) \end{cases} \quad (4)$$

其中  $\tau_0(r_{M_1}, R_2)$  为最大物体 ( $M_2$ ) 在离行星  $R_2$  处从行星供养区俘获  $M_2$  质量的特征时间,  $n_1$  为供养区物体半径分布律  $N(r_1) \propto r^{-n_1}$  的指数,  $r_{m_1}$  为最小物体半径.

由于潮汐演化, 卫星轨道半径  $R_2$  增大  $e$  倍的特征时间

$$\tau_t = R_2 / \frac{dR_2}{dt} \approx \left( \frac{4\pi\rho_\ell}{3} \right)^{5/8} \frac{R_2^{13/2} Q}{3k_2 G^{1/2} M^{7/6} m} \quad (5)$$

取  $R_2 \propto \xi M^{1/3} R_1$ , 得

$$\tau_i \propto \frac{\xi^{18/2} Q M R_1^{13/2}}{k_2 m} \quad (6)$$

式中,  $m$  为卫星质量,  $k_2$  为第二类勒夫(Love)数,  $Q$  为比耗散函数(Specific dissipation function)。

因为  $\tau_i$  与行星轨道半径  $R_1$  有关, 显然, 类地行星和巨行星有不同的潮汐效应, 而且由于巨行星的  $Q$  值大, 使  $\tau_i$  的差异更大, 所以, 类地行星的卫星系比巨行星的卫星系有更显著的潮汐演化(见 § 10.6)。

2. 卫星的形成. 环行星的物质团的主要特征(密度、聚集速率和所形成物体的大小)明显地跟它们离行星的距离有关. 更重要的是物质团的总体性质: 总质量(这在行星聚集期增加)和从密的内部降落到行星表面的质量. 当行星质量增大时, 物质团中所有物体的距离减小(因为角动量守恒,  $M R_2$  不变)当行星半径增大时, 物质团内部加入行星. 由于被俘获物体的角动量小于俘获距离处圆轨道上质点的角动量, 物质团也有一些收缩。

令行星生长到质量  $M$  时, 被俘获在环行星物质团的总质量为  $m_0$ , 而从物质团落到行星上的质量为  $m_p$ , 那么物质团的质量为  $m = m_0 - m_p$ ; 又令  $m_{p1}$  为  $m_p$  中跟  $M$  增加有关的部分,  $\sigma_p$  为物质团靠近行星处的面密度, 那么

$$dR/R = \frac{1}{3} dM/M, \quad dR_2/R_2 = -dM/M \quad (7)$$

$$dm_{p1} = 2\pi R \sigma_p (dR - dR_2) = \frac{8\pi}{3} R^2 \sigma_p \frac{dM}{M} \quad (8)$$

取  $\sigma_p \propto R^{-b}$ , 可化上式为

$$\frac{dm_{p1}}{dM} = f_1(b) \frac{m}{M} \quad (9)$$

$$f_1(b) = \begin{cases} \frac{4}{3} \frac{2-b}{(R_{L1}/R)^{2-b}-1} & b \neq 2 \text{ 时} \\ \frac{4}{3 \ln(R_{L1}/R)} & b = 2 \text{ 时} \end{cases} \quad (10)$$

$$R_{L_1}/R = (\rho_0/3\rho^*)^{1/3}, \quad \rho^* = \frac{3M_\odot}{4\pi R_1^3} \quad (11)$$

其中  $R_{L_1}$  为拉格朗日点  $L_1$  的距离。令被俘获物质中因角动量小而从物质团落到行星的质量为  $m_p$ , 可假定

$$\frac{dm_p}{dm_o} = f_2(b) \quad (12)$$

又物质团质量  $m_o$  的增加由 (4) 式的  $\tau_o$  决定, 可取为

$$\frac{dm_o}{dt} = \frac{m}{\tau_o} \quad (13)$$

同样地, 行星质量增长方程为

$$\frac{dM}{dt} = \frac{M}{\tau_M} \quad (14)$$

则有

$$\frac{dm_o}{dM} = \frac{\tau_M}{\tau_o} \frac{m}{M} = \alpha \frac{m}{M} \quad (15)$$

从 (15) 和 (12) 可得  $dm_p/dM$ , 又利用 (9) 式, 可得出从物质团落到行星上的总质量 ( $m_p = m_{p1} + m_{p2}$ ) 的方程,

$$\frac{dm_p}{dM} = \left[ f_1(b) + f_2(b) \frac{\tau_M}{\tau_o} \right] \frac{m}{M} = \alpha_1 \frac{m}{M} \quad (16)$$

$$m = m_o - m_p \quad (17)$$

或改为  $m$  的方程

$$\frac{dm}{dM} = \left\{ [1 - f_2(b)] \frac{\tau_M}{\tau_o} - f_1(b) \right\} \frac{m}{M} = \alpha_2 \frac{m}{M} \quad (18)$$

上述  $m$ 、 $m_o$ 、 $m_p$  的方程仍含一未知量  $\tau_M$ 。行星质量生长率为

$$\frac{dM}{dt} = \pi R^2 \rho_1 V_1 (1 + 2\theta) + \frac{dm_p}{dt} \quad (19)$$

从 (14)、(16) 和 (19) 可得

$$\tau_M = \tau_{M_0} \left( 1 - \alpha_1 \frac{m}{M} \right) \approx \tau_{M_0} \left( 1 - \alpha_{10} \frac{m}{M} \right) \quad (20)$$

其中,  $\tau_{M_0}$  和  $\alpha_{10}$  是  $m=0$  时的  $\tau_M$  和  $\alpha_1$  值,

$$\tau_{M_0} = \frac{4R\rho_0}{3(1+2\theta)\rho_1 V_1}, \quad \alpha_{10} = f_1(b) + f_2(b) \frac{\tau_{M_0}}{\tau_o} \quad (21)$$

表 10.1 给出各种物质团模型的参数, 其中  $W$  为平均俘获概率, 在模型 II 中, 取

$$W(R_2) \approx \beta \frac{2\theta R}{R_2 + 2\theta R}, \quad R_2 < R_{L_1} \quad (22)$$

当  $m_p \ll M$  和  $\tau_M \approx \tau_{M_0}$  时, (15)~(18) 及 (20) 有较简单解. 若  $\tau_{M_0}/\tau_0$  与  $M$  无关, 又假定  $b$  为常数, 则  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$  也为常数, 方程 (15)~(18) 可直接积分,

$$m = m_0 \left( \frac{M}{M_0} \right)^{\alpha_1}, \quad m_p = \frac{\alpha_1}{\alpha_2} m, \quad m_0 = \frac{\alpha}{\alpha_2} m \quad (23)$$

在表 10.2 中, 对  $n_1 = 3.5$ ,  $(r_{M_1}, r_{M_2})^{1/2} = 0.1R$ ,  $r_{M_1}/r_{M_2} = 10^{12}$ ,  $n_2$  取不同值时, 给出了物质团各模型的特征数.

表 10.1 物质团模型的参数

| $b$       | 1.0   | 1.5  | 2.0  | 2.5  | 3.0  | 模 型                |
|-----------|-------|------|------|------|------|--------------------|
| $f_1(b)$  | 0.007 | 0.05 | 0.25 | 0.67 | 1.33 | I, $W = \text{常数}$ |
| $f_2(b)$  | 0.4   | 0.6  | 0.8  | 0.9  | 0.99 |                    |
| $f_3(b)$  | 0.71  | 0.88 | 0.97 | 0.98 | 0.99 |                    |
| $\bar{W}$ | 0.04  | 0.14 | 0.25 | 0.36 | 0.42 | II, $\beta = 1/2$  |

表 10.2 物质团各种模型的特征数

| $n_2$               | 3     | 3.4   | 3.5   | 3.6  | 3.7  | 模 型                                                                         |
|---------------------|-------|-------|-------|------|------|-----------------------------------------------------------------------------|
| $\tau_{M_0}/\tau_0$ | 0.7   | 2     | 5     | 20   | 120  | I, $n_1 = 3.5$<br>$W = \text{常数}$<br>$\gamma\xi W = 1.6$<br>$b = 2$         |
| $\alpha_{10}$       | 0.8   | 1.8   | 4.2   | 16   | 96   |                                                                             |
| $\alpha_{20}$       | 0.11  | 0.15  | 0.75  | 3.8  | 24   |                                                                             |
| $m_p/m$             |       | 12    | 5.6   | 4.2  | 4.0  |                                                                             |
| $\tau_{M_0}/\tau_0$ | 1.0   | 3     | 7     | 30   | 180  | II, $n_1 = 3.5$<br>$W = (22)$ , $\beta = 1/2$<br>$\gamma\xi = 1$<br>$b = 2$ |
| $\alpha_{10}$       | 1.25  | 3.16  | 7.02  | 29   | 175  |                                                                             |
| $\alpha_{20}$       | -0.22 | -0.16 | -0.04 | 0.65 | 5.2  |                                                                             |
| $m_p/m$             |       |       |       | 45   | 34   |                                                                             |
| $\tau_{M_0}/\tau_0$ | 0.56  | 1.66  | 3.8   | 17.5 | 104  | II, $b = 1.5$                                                               |
| $\alpha_{10}$       | 0.54  | 1.51  | 3.41  | 15.4 | 92   |                                                                             |
| $\alpha_{20}$       | 0.017 | 0.15  | 0.41  | 2.0  | 12.4 |                                                                             |
| $m_p/m$             | 32    | 10    | 8.3   | 7.5  | 7.4  |                                                                             |

当  $\alpha_2 > 0$  时, 物质团的质量随  $M$  增加 当  $\alpha_2 > 2/3$  时, 物质团的面密度随  $M$  增大 在  $\alpha_2 > 1$ , 物质团的不透明度增大. 从表 10.2 可见, 适合  $W = \text{常数}$  的参数值是  $b=2$  和  $n_2=3.5 \pm 0.1$ , 而适合  $W=(22)$  的参数值为  $b=1.5$  和  $n_2=3.5 \pm 1$ . 从物质团落到行星的质量是卫星质量的  $5 \sim 10$  倍. 从行星自转考虑, 可得出后一值接近月球物质团的上限. 适于不透明物质团的  $b$  和  $n_2$  值会较小. 在  $n_2$  值大时, (19) 式中不能忽略质量  $m_p$ , 简单解(23) 不正确, 在这种情况下, 可取  $\tau_M$  对  $m$  的线性关系 [(20) 式第二部分], 但对大的  $n_2$  (即  $n_1+n_2 > 7$ ), 也应考虑物质团的不透明度.

总之, 选用合理的模型参数, 可求出足够质量的环行星的卫星物质团, 由它发展成卫星系. 但是, 为了确证这样过程的总情景, 需作更详细研究. 参数  $n_2$ 、 $r_{M_1}$  和  $b$  应从过程本身的动力学来估计. 然后可得到物质团形成和演化中的条件的更确定判断. 卫星聚集的更详细研究也应包括增长物体的轨道演化. 由于潮汐力, 质量足够大且靠近行星的卫星向外运动, 而不落到行星上, 它们可演化为卫星, 它跟邻近的外卫星胎共振. 然而, 月球潮汐演化中不发生这样俘获.

### 三、阿尔文等的理论

阿尔文等注重木卫系、土卫系和天卫系在许多基本方面相似于行星系, 即都是由一些绕转体和中心体组成的体系, 认为这三个卫星系是太阳系起源的关键所在. 他们由这三个卫星系中的空间群化现象, 提出卫星形成时期起作用的物理现象, 即所谓临界速度现象及带结构<sup>[7]</sup>. 他们提出的规则卫星起源理论的要点如下.

1. 带结构. 对于绕转体和中心体组成的天体系统, 若令  $M_c$  为中心体的质量,  $R_0$  为绕转体的轨道半径, 定义

$$\Gamma = \frac{M_c}{R_0} \quad (24)$$

$G\Gamma$  就是绕转体(单位质量的)势能. 图 10.1 绘出了太阳系的带结



构( $\log I \sim \log M_o/M_\odot$  关系), 可看出, 木卫、土卫和天卫位于比  $\log I = 19$  小的一个(或两个)带及  $\log I = 19 \sim 20$  的另一带中, 只有木卫五位于  $\log I > 20$  的第三带中。他们认为, 月球和海卫一可能是原先的行星, 后被行星俘获为卫星, 故图中把它们画在行星一列中。他们认为太阳系的带结构有重要物理意义。

当气体云受中心天体的引力而向中心天体降落中, 速度越来越大, 当动能大到等于气体组成元素的电离能时, 质点间相互碰撞而电离。这些电离质点受中心体磁场作用, 便停留在离中心天体

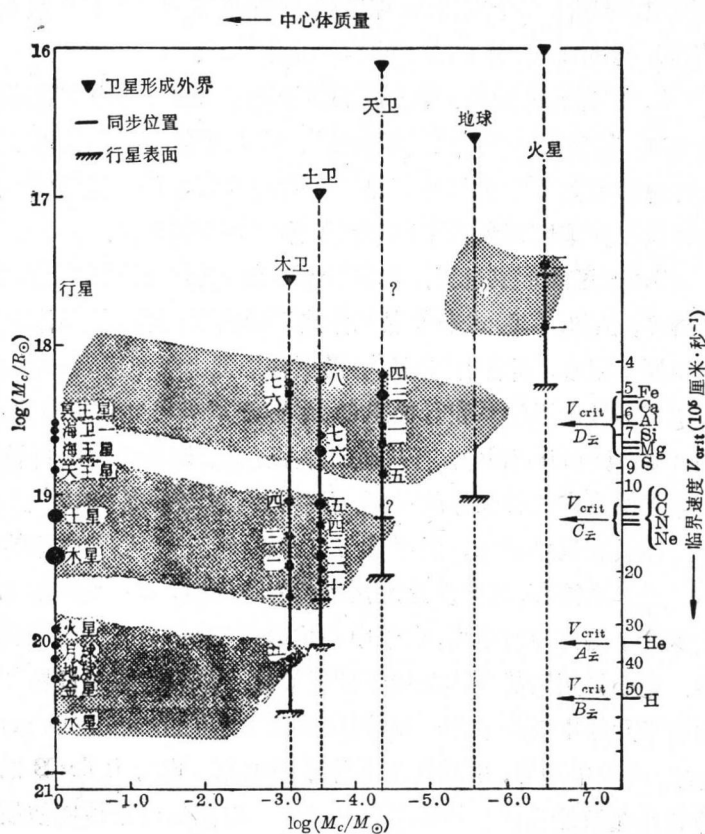


图 10.1 太阳系的带结构

一定距离处，这样便形成了对应于带结构的电离云。令  $U_i$  为电离电位， $e$  为电子电荷， $m$  为气体质点的质量，则有

$$eU_i = \frac{1}{2} m v_i^2 = \frac{GM_i m}{R_i} \quad (25)$$

式中， $v$  为质点速度，下标  $i$  代表第  $i$  种元素的质点。上式亦可写为

$$\Gamma_i = \frac{M_i}{R_i} = \frac{eU_i}{Gm} = \frac{v_i^2}{2G} \quad (26)$$

图 10.1 右侧标出一些元素原子的  $U_i$  或  $v_i$ ，可看出这些元素可分为三组，对应于三个电离云，它们分别含元素周期表的第 I、II、III-IV 行的元素，这代表了物质的基本性质。

2. 临界速度现象。由 (25) 式可得出，降落气体电离而形成电离云时，其速度  $v_i$  称为“临界速度”。在几个实验室都发现了这种临界速度现象<sup>[8,9]</sup>，并且也提出了一些较为复杂的理论<sup>[10,11]</sup>，阿尔文强调临界速度现象在宇宙等离子体中有重要意义。

3. 卫星的形成过程。电离云形成的实际情况要比上述的复杂得多，例如，(25) 式未考虑气体热运动因素；降落的气体不是纯的单原子组成，还含有“杂质”，需更仔细地考虑电离云形成过程。阿尔文等提出卫星系和行星系的形成都遵守共同的伴生原理 (hetegonic principle)，有共同的伴生过程，即在磁化的自转中心天体周围形成绕转天体的过程。伴生过程示意于图 10.2。假定中心天体具有偶极磁场，且磁轴与自转轴重合，环绕中心体的气体(源)云自由降落，当降落速度达到临界速度时，与那里先前存在的磁等离子体碰撞而电离，由于中心体磁场作用，电离气体形成电离云。中心体周围的气体类似于日冕情况，可称之为“超日冕”自转和磁场及导电等离子体一起，构成单极发电机 (homopolar generator)，产生电动势，驱动等离子体中的电流。电磁力  $\mathbf{I} \times \mathbf{B}$  把中心体角动量及能量转移给周围等离子体。电流的纤维性质使超日冕中产生类似日珥的气体区 (称之为“超日珥”)，超日珥比周围等离

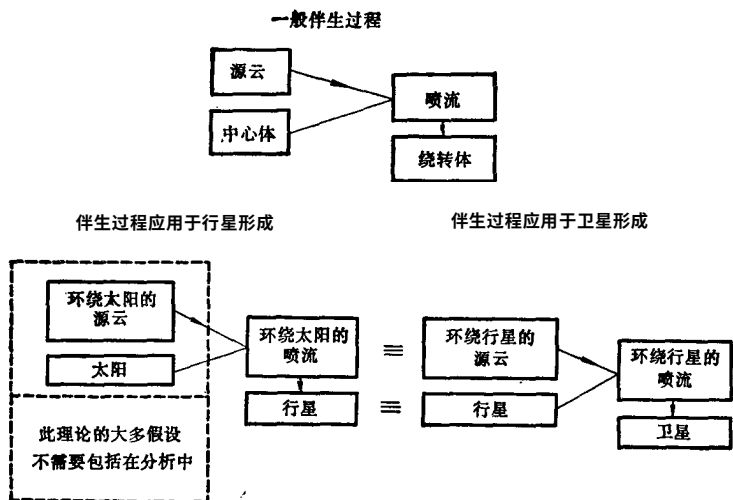


图 10.2 伴生过程

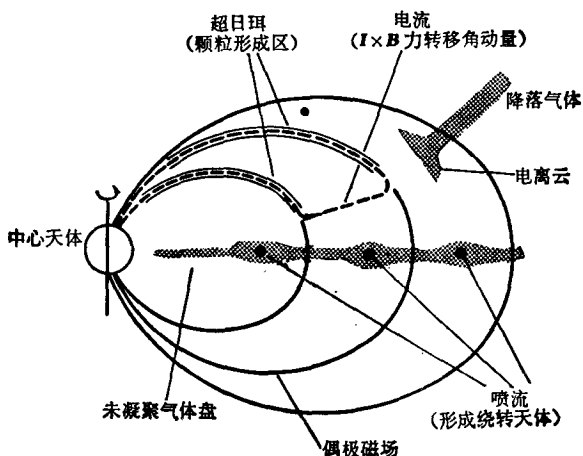


图 10.3 绕转体的形成

子冷且密度大，在那里发生颗粒凝聚，通过非弹性碰撞，这些颗粒演化为一些‘喷流’ (§ 5.1)。未凝聚气体在赤道面上形成薄盘，喷流演化形成绕转天体 (§ 5.1)。在中心体为行星时，上述演化过程

就形成卫星。

#### 四、普伦蒂斯和特哈尔的理论

近年来,普伦蒂斯(A. J. R. Prentice)提出一种新拉普拉斯说<sup>[13]</sup>,阐述了原始星云演化为拉普拉斯型的环系以及环系形成行星过程的理论(将在 § 12.4 一中简述这一学说)。他和特哈尔(D. ter Haar)又用这一理论来论述大行星(木星、土星和天王星)的规则卫星与环系的形成<sup>[14]</sup>,兹摘述于下。

1. 环系的形成。木卫系、土卫系和天卫系与行星系有相似性,说明它们的形成都经历了同样的演化过程。大行星先形成密的核  $m_c$ , 周围是转动气体包层;由于超声湍动对流而出现湍动张力,  $\langle \rho_i V_i^2 \rangle = \beta \rho G M(r) / r$ , 其中  $\rho$  为气体密度,  $M(r)$  为半径  $r$  内的质量,  $\beta$  为湍流参量 ( $\beta \sim 0.1$ )。由于物质向中心密集(要求转动惯量系数  $\alpha_f = I / M_e R^2 \approx 0.01 \sim 0.02$ ,  $M_e$ ——包层质量,  $R$ ——赤道半径)以及湍动和转动,包层赤道表面形成密度高的无湍动带。当包层收缩到半径  $R_0$  时,离心力与引力平衡,赤道无湍动带便从包层脱开,形成车胎状的第一环,令其质量为  $m$ , 在环内的角速度和密度分布[在对称于转动轴的柱坐标  $(R, z)$  中]为

$$\omega(R, z) \approx (GM R_0)^{1/2} / R^3,$$
$$\rho(R, z) \approx \frac{\alpha m}{4\pi^2 R_0^3} \exp\left[-\frac{1}{2} \alpha \xi^2 / R_0^2\right] \quad (27)$$

其中,  $M = M_e + m_c$  是  $R_0$  内的总质量,  $\alpha = \mu G M / \mathcal{R} T_0 R_0$  ( $\mathcal{R}$  为气体常数),  $\xi^2 = (R - R_0)^2 + z^2$  是离圆轨道  $R = R_0$  的距离。

第一个环脱下后,湍动包层继续收缩,又重演上述过程,脱下第二个环,依此下去,就形成一系列环,各环的轨道半径满足方程

$$R_n / R_{n+1} = [1 + m / (M_e \alpha_f)]^2 \quad (28)$$

如果包层收缩大致相似,以致  $m / M_e$  和  $\alpha_f$  保持常数,则  $R_n$  成等比级数。各环中凝聚出的固态物质向环的平均轨道集中,形成星子,它们再聚集成卫星。

2. 理论模型. 假定(28)式对木卫系、土卫系和天王卫系都成立, 取  $R_n/R_{n+1}$  为观测的平均值, 取中心核质量为  $m_0 \sim 10 M_\oplus$  (地球质量),  $\alpha_f = 0.02$ , 令  $M_0$  等于行星的观测质量  $M$  减核质量  $m_0$ , 由(28)可算出环质量. 其次, 调整参数  $\beta$  和  $\alpha$ , 构造质量  $M$  的转动包层(化学上均质的)模型, 使之得出上述的  $\alpha_f$  和  $\langle R_n/R_{n+1} \rangle$  值, 也能计算各气体环脱下时的温度以及凝聚物的组成和质量, 计算结果列于表 10.3 和图 10.4, 这大致与观测符合, 也可解释卫星在大小和化学组成方面的差异.

表 10.3 规则卫星的理论质量和成分

| 卫星系  | $\langle R_n/R_{n+1} \rangle$<br>观测 | 湍动<br>参数<br>$\beta$ | 行星包<br>层质量<br>$M_0 (M_\oplus)$ | 气体环<br>质 量<br>$m$ (克) | 各环凝聚物<br>( $10^{24}$ 克)                                                        | 卫星的观<br>测 质 量<br>( $10^{24}$ 克)                                              |
|------|-------------------------------------|---------------------|--------------------------------|-----------------------|--------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| 木卫系  | 1.65                                | 0.100               | 310                            | $1.0 \times 10^{28}$  | 岩(石物质) 50<br>岩 + $H_2O$ 冰 120                                                  | 木卫一, 90;<br>木卫二, 50;<br>木卫三, 150;<br>木卫四, 110                                |
| 土卫系  | 1.30                                | 0.080               | 85                             | $1.4 \times 10^{27}$  | 岩 6<br>岩 + $H_2O$ 冰 16                                                         | 土卫十, 0.01;<br>土卫一, 0.04;<br>土卫二, 0.08;<br>土卫三, 0.6;<br>土卫四, 1.2;<br>土卫五, 2.7 |
| 天王卫系 | 1.46                                | 0.084               | 5                              | $1.2 \times 10^{26}$  | 岩 0.6<br>岩 + $H_2O$ +<br>$NH_3$ 冰 1.6<br>岩 + $H_2O$ + $NH_3$<br>+ $CH_4$ 冰 2.1 | 天王五, 0.17<br>天王一, 1.3;<br>天王二, 0.5;<br>天王三, 4.4;<br>天王四, 2.5                 |

3. 聚集时标. 在卫星物质聚集过程中, 气体环对于颗粒的聚集和多余能量的耗散起关键作用. 若气体环被蒸发或散开, 或因行星的热扰动, 则破坏(27)式的角速度和密度分布, 会中断分凝和聚集, 若分凝时间  $t_s$  超过气体环的寿命  $\tau_f$  ( $\tau_s > \tau_f$ ), 则只有部分凝

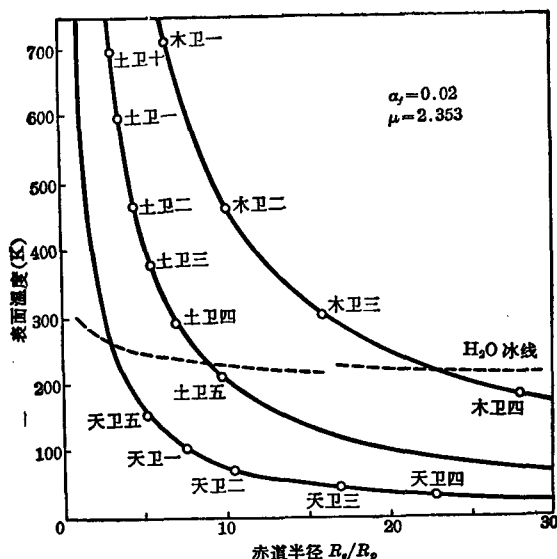


图 10.4 木星、土星、天王星塌缩包层端动多层球模型

聚物质聚集形成卫星，其余部分随气体环散开而被带走。因此，全部可凝聚物质聚集成卫星的条件为  $\tau_s < \tau_f$ ，此外，还要求聚集时间  $\tau_a < \tau_f$ 。对于各卫星作了这三个特征时间的具体计算，结果表明，存在  $\tau_a < \tau_f$ ， $\tau_a$  一般为 1~25 年，而  $\tau_f$  为十几年到几百年，都远小于原行星包层收缩时标 ( $10^7 \sim 10^8$  年)；而  $\tau_s$  与环中颗粒大小有密切关系，木星的四个伽利略卫星几乎包含各气体环中的全部凝聚物，大多土卫也是岩质的，而预料天卫是冰质为主的。图 10.5 为包层从  $30R_p$  ( $R_p$  为现在的极半径) 收缩中赤道半径  $R_e$  的演化。

4. 规则卫星系的内边界。按上述理论，可算出最里面卫星与行星表面之间也形成  $n$  个环，但这些环的气体密度大于  $10^{-8}$  克·厘米 $^{-3}$  (相当于 1 个大气压)，它们受压缩以及收缩包层的强烈的热扰动，难于发生分凝和聚集，而且由于它们在洛希极限之内，易散开而不形成卫星。按照这一理论，天王星应当有两个更远的卫星带，分别位于离天王星 2.5 和 3.5 倍天王星半径 (65000 和 90000

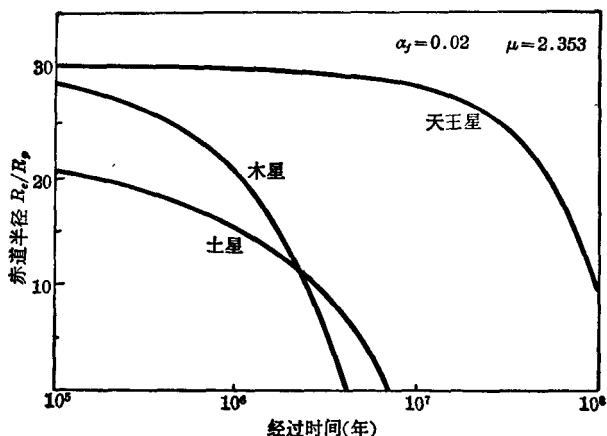


图 10.5 行星包层的演化

公里)处;在木星半径四倍左右处可能有一岩石带(质量小于  $2 \times 10^{21}$  克);土卫十与 A 环之间(151300 公里处)可能有方丹和拉森(Fountain, Larson)<sup>[15]</sup> 猜想的小卫星流。

5. 土星环的形成。包层均匀收缩期(温度  $\propto R_0^{-1}$ )到一定时候終了,然后缓慢收缩,引力能的释放减少,温度下降,超声湍流程度相伴地减小,即  $\beta$  值变小,这又导致赤道面形成密集气体环,当  $\beta < 0.05$  之后,便不再脱掉孤立环,而是留下连续的气体盘,盘中各点的轨道角速度接近于开普勒运动。气体盘中的凝聚物质沉降到中面,可形成盘片,然而,由于气体密度大( $> 10^{-3}$  克·厘米<sup>-3</sup>)而搅动强,细的类岩凝聚物不能有效地沉降;若温度降低到水冰凝聚,可形成稍大颗粒,就可有效地向中面聚集,颗粒直接碰撞可能生长为卫星星子,但由于它们处于洛希限内,行星的潮汐瓦解作用阻止它们生长为卫星而保持为盘,可能由于跟洛希限外的卫星轨道共振,盘中物质再分布而成为环系。用这一理论算出土星的 A 和 B 环之间脏冰凝聚物最大质量为  $2 \times 10^{25}$  克,主要物质是水冰。对于天王星,包层一直收缩到  $1.5R_0$  才开始脱下盘,若原天王

星不脱下气体开普勒盘，就能解释天王星周围不存在冰盘，当然在亚开普勒盘凝聚的物质将螺旋式地落到行星上，他们认为天王星从未达到形成冰盘时期。

原木星包层的表面温度不会降到很低，来使脱下的气体盘中冰凝聚，因而木星没有冰环系，洛希限内的木卫五可能是被俘获的碳质小行星。海王星未得到显著的原始的氢包层，因而不形成规则卫星和环系。

6. 不规则卫星的起源。最外面的规则卫星代表行星包层收缩中第一次出现转动不稳定性地点，不规则卫星可能是被俘获的冰星子。所有海王星卫星都是被俘获来的。

## §10.2 木星、土星、天王星的卫星及环系的形成

这一节阐述我们对卫星和环系形成的研究<sup>[16,17]</sup>。我们认为，卫星系与行星系的某些相似性反映了它们形成中经历过类似过程，这就是它们主要地都在环绕中心天体的气体尘埃盘中，通过星子聚集而形成绕转体；然而，卫星系与行星系有很多不同，不能简单地把卫星系的形成看作是行星系形成的小规模重演，而应当具体情况具体分析。例如，太阳（行星）系有角动量特殊分布问题 (§1.4)，卫星系不存在这个问题。不同类型的卫星（规则卫星和不规则卫星）以及不同行星的卫星都有不同的具体形成过程。当讨论卫星系形成时，应当把它作为整个太阳系起源演化的一个环节，不能孤立地仅注意特殊性，要联系太阳系形成的总过程来具体阐明卫星系形成的各种问题。

### 一、木星的卫星和环系的形成

木星和土星的性质相似，都是“巨行星” (§1.2, §9.4)，它们的内部结构也相似 (图 10.6) 由氢、氦组成的液态中层和外层，主要由土物质组成的固态 (或液态) 岩核<sup>[18]</sup>，它们都有很多卫星以及



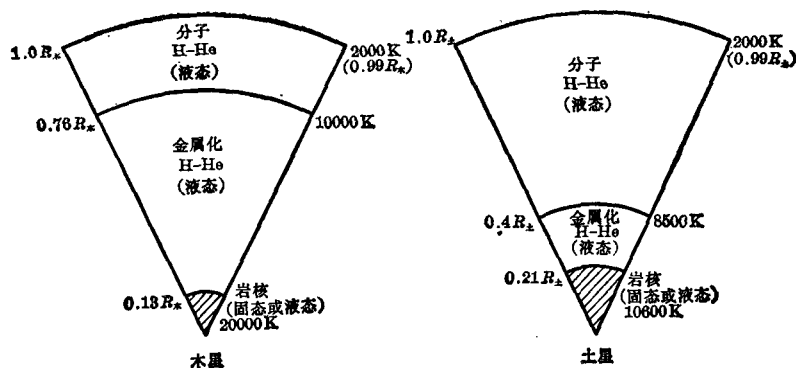


图 10.6 木星和土星的内部结构

环系。木星和土星及其卫星和环系的形成过程大致相同，如 § 9.4 所述，在星云盘的木土区温度低，土物质和冰物质都凝聚，固态可吸积物质多，一开始就形成较大星子，并很快生长，最大星子成为木星和土星的初始固态核。固态核质量生长到  $10^{25}$  克量级时，其引力场足够强，能够吸积气体。随着固态核生长，被吸积的气体增多，在固态核周围形成气壳。后来被吸积的星子经过气壳时，由于受气体阻尼，有部分星子留在气壳内，它们由原来绕太阳公转变为绕固态核转动，形成星子盘，聚集形成卫星。气壳质量足够大时，就塌缩到固态核上，成为液态的中层和外层，而在木星和土星的洛希限内的物质演化为环系。这里先讨论木星及其卫星系情况。

如 § 9.4 中所述，固态核能够吸积气体时的最小质量为

$$m_{\star} = \frac{9(kT)^{3/2}}{(32\pi\rho_g)^{1/2}(G\mu m_H)^{3/2}} \quad (29)$$

对于木星，取  $\rho_g = 1.513 \text{ 克} \cdot \text{厘米}^{-3}$ ， $T = 104.6 \text{ K}$  (§ 8.5, 表 8.1)。算得  $m_{\star} = 9.14 \times 10^{24} \text{ 克}$ 。随着固态核质量  $m$  增大，被吸积气体增多，吸积范围增大，吸积范围的半径  $y$  由下式决定

$$\frac{2Gm}{y} = \frac{3kT}{\mu m_H} \quad (30)$$