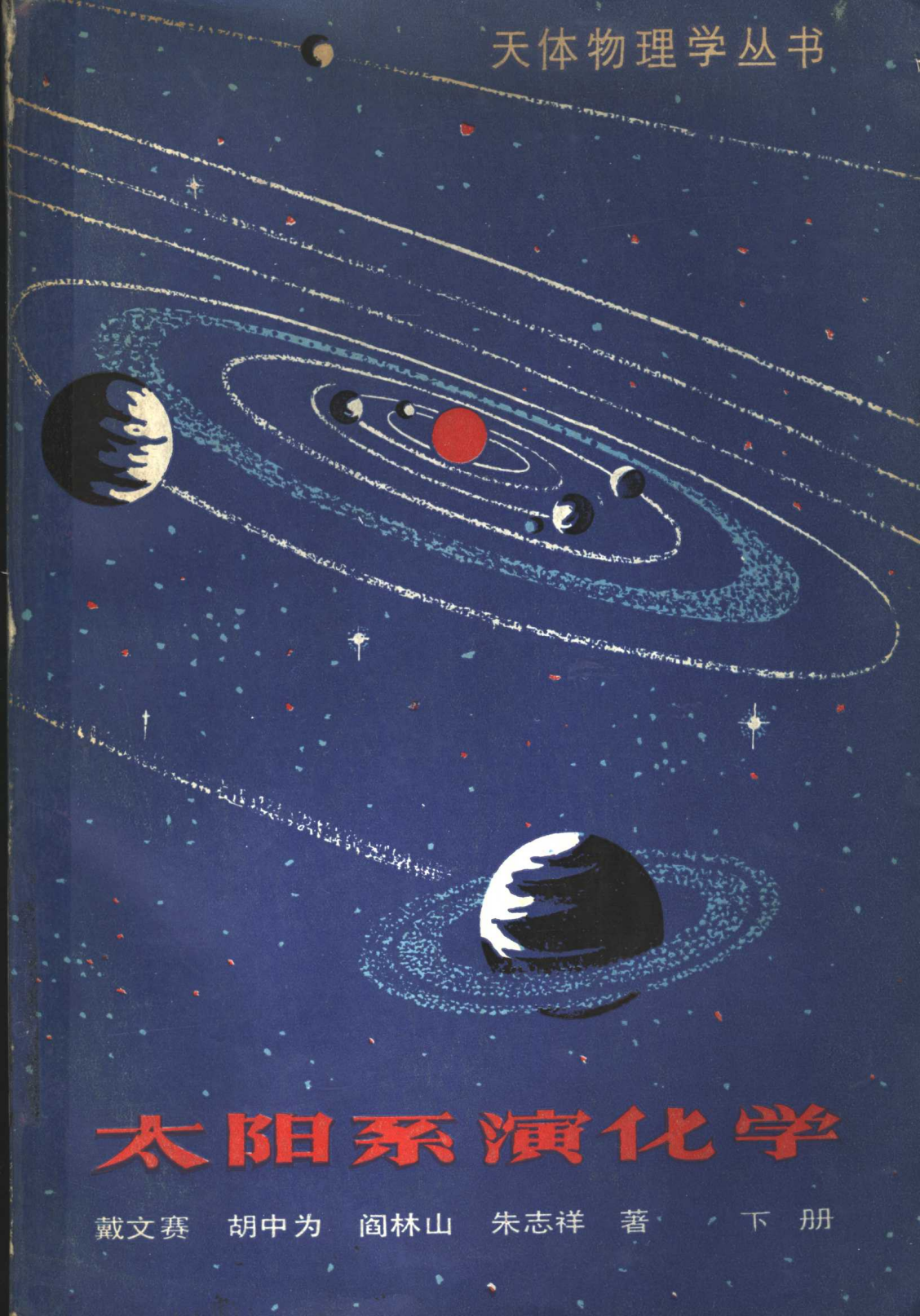


天体物理学丛书



太阳系演化学

戴文赛 胡中为 阎林山 朱志祥 著 下册

天体物理学丛书

太阳系演化学

下 册

戴文赛 胡中为 阎林山 朱志祥 著

上海科学技术出版社

天体物理学丛书
太阳系统化学
下 册

戴文赛 胡中为 著
阎林山 朱志祥

上海科学技术出版社出版
(上海瑞金二路 450 号)

新华书店上海发行所发行 上海商务印刷厂印刷

开本 850×1156 1/32 印张 12.375 字数 305,000
1986 年 1 月第 1 版 1986 年 1 月第 1 次印刷
印数 1—1,600

统一书号: 13119·1223 定价: 3.35 元

编 著 者 增 序

戴文赛教授所著《太阳系演化学》(上册)已出版三年多了。由于他的不幸病逝,本书下册无法由他亲自执著了。许多读者希望早日见到下册,上海科学技术出版社和天体物理学丛书编委会委托我们来续写下册。这对我们来说无疑是相当困难的。戴文赛教授生前曾拟订了全书总计划大纲,但由于病情急剧恶化,没有来得及留下编著下册的详细意见,而且近年来太阳系演化研究又有许多新进展,我们用了两年多时间,在调研基础上分工合作写成此下册,以此告慰我们的恩师,供有志于太阳系演化研究的同志们参考。

下册基本上按照戴教授的原订大纲编著,仅根据具体情况对部分章节作些更动。下册共有九章,第十一章和第十五章由阎林山同志编著,第十八章由朱志祥同志编著,其余六章由胡中为同志编著,最后由胡中为同志整理和修订全册。每章分别概述了有关问题的研究进展情况和代表性理论,同时具体阐述戴教授和我们的研究与论述。戴教授生前对太阳系起源的一系列研究已形成戴文赛学说,在国内外引起了一定的反响,这一学说的基本内容已在“中国科学”1980年3期“论太阳系的起源”一文中作了概括总结。

下册初稿于1982年初写完,除编著者相互审订外,天体物理学丛书编委会和上海科学技术出版社委托陈道汉、刘麟仲、周兴海、王思潮、郑家庆等同志审订,编著者谨向上述同志及其他支持与帮助的同志致谢!

此书下册的内容,尤其是我们的论述,如有缺点错误,欢迎批评指正。

编著者

1983年7月

目 录

编著者增序

第十章 卫星和环系的起源与演化	1
§ 10.1 卫星和环系形成的几种理论	1
§ 10.2 木星、土星、天王星的卫星及环系的形成	16
§ 10.3 卫星结构和热史模型	29
§ 10.4 卫星的轨道演化	34
第十一章 月球的起源和演化	46
§ 11.1 分裂说	48
§ 11.2 俘获说	56
§ 11.3 双星吸积说	61
§ 11.4 月球的内部结构和演化史	68
§ 11.5 月球的轨道演化	77
第十二章 行星及卫星的距离规律	87
§ 12.1 距离规律的几种表述公式	87
§ 12.2 距离规律的电磁理论	93
§ 12.3 距离规律的引力理论	95
§ 12.4 距离规律的星云理论	98
§ 12.5 我们对距离规律的说明	116
第十三章 太阳系角动量问题	129
§ 13.1 太阳系角动量分布特征和问题	129
§ 13.2 磁耦合机制	132
§ 13.3 沙兹曼机制	137
§ 13.4 湍动粘滞机制	149
§ 13.5 超声湍动对流机制	158
§ 13.6 磁流波机制及其他机制	163
§ 13.7 太阳系角动量分布的说明	174

第十四章 小行星的起源和演化	179
§ 14.1 对小行星起源的几种看法	180
§ 14.2 我们对小行星起源的研究(上)	185
§ 14.3 我们对小行星起源的研究(下)	192
§ 14.4 小行星的演化	201
第十五章 彗星的起源和演化	210
§ 15.1 彗星的结构和性质	211
§ 15.2 彗核模型	215
§ 15.3 彗星起源的几种理论	220
§ 15.4 星云盘外缘区的结构与彗星的起源	227
§ 15.5 彗星的轨道演化	237
§ 15.6 彗核的蒸发和彗星寿命	244
§ 15.7 彗星与小行星及流星体的演化关系	255
第十六章 行星自转的起源和演化	261
§ 16.1 行星自转起源研究的一些进展	261
§ 16.2 行星自转规则性的起源	271
§ 16.3 行星自转不规则性的起源	278
§ 16.4 行星自转的演化	283
第十七章 陨星与太阳系早期史	296
§ 17.1 陨星分类和太阳系早期化学	296
§ 17.2 陨星的吸积条件与太阳系的热史	307
§ 17.3 陨星年代学	314
§ 17.4 陨星的磁性与太阳系早期磁场	322
§ 17.5 陨星的形成和演化	330
第十八章 地球的形成及早期演化	345
§ 18.1 地球的构造	345
§ 18.2 地球形成过程中的能量平衡	355
§ 18.3 地幔和地核的形成	366
§ 18.4 海陆和大气层的形成	376
§ 18.5 地球形成和早期演化的轮廓	383

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对解决太阳系起源、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——它们在不同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^[1]。

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^[2]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^[43],但受到伯恩斯(Burns)^[44]和格林伯格(Greenberg)^[45]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^[63],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。这一理论的要點如下。

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, ρ_p 和 R 分别为行星的密度和半径, R_p 为行星最终半径, σ 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, τ_p 亦增大,对于天王星和海王星, τ_p 达 15 亿年。

物体聚集(质量增大 e 倍)的特征时间

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

对于环行星物质团中的物体

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

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: $\rho_2(r) = \rho_2 \left(\frac{r}{r_{M_1}} \right)^{4-n_2}$, ρ_2 为团的总密度. 一般总有 $\tau_o \ll \tau_p$, 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 ρ_2 增加 e 倍的特征时间

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

其中 $\tau_o(r_{M_1}, R_2)$ 为最大物体 (M_1) 在离行星 R_2 处从行星供养区俘获 M_1 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

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

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 τ_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 τ_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_{p_1} 为 m_p 中跟 M 增加有关的部分, σ_p 为物质团靠近行星处的面密度, 那么

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

$$dm_{p_1} = 2\pi R \sigma_p (dR - dR_2) = \frac{8\pi}{3} R^2 \sigma_p \frac{dM}{M} \quad (8)$$

取 $\sigma_p \propto R^{-6}$, 可化上式为

$$\frac{dm_{p_1}}{dM} = f_1(b) \frac{m}{M} \quad (9)$$

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

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

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 τ_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($m_p = m_{p_1} + m_{p_2}$)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 τ_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， τ_{M_0} 和 α_{10} 是 $m=0$ 时的 τ_M 和 α_1 值，

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

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

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

当 $m_p \ll M$ 和 $\tau_M \approx \tau_m$ 时, (15)~(18) 及 (20) 有较简单解. 若 τ_M/τ_0 与 M 无关, 又假定 b 为常数, 则 α_1 和 α_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 $n_1 = 3.5$, $(r_{M_1}, r_{M_2})^{1/2} = 0.1R$, $r_{M_1}/r_{m_1} = 10^{12}$, 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, $W = \text{常数}$ II, $W = (22)$ II, $\beta = 1/2$
$f_2(b)$	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	

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
τ_{M_0}/τ_0	0.7	2	5	20	120	I, $n_1 = 3.5$ $W = \text{常数}$ $\gamma\xi W = 1.6$ $b = 2$
α_{10}	0.8	1.8	4.2	16	96	
α_{20}	0.11	0.15	0.75	3.8	24	
m_p/m		12	5.6	4.2	4.0	
τ_{M_0}/τ_0	1.0	3	7	30	180	II, $n_1 = 3.5$ $W = (22), \beta = 1/2$ $\gamma\xi = 1$ $b = 2$
α_{10}	1.25	3.16	7.02	29	175	
α_{20}	-0.22	-0.16	-0.04	0.65	5.2	
m_p/m				45	34	
τ_{M_0}/τ_0	0.56	1.66	3.8	17.5	104	II, $b = 1.5$
α_{10}	0.54	1.51	3.41	15.4	92	
α_{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_g , 简单解 (23) 不正确, 在这种情况下, 可取 τ_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 、 τ_M 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^[7]. 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_0 为中心体的质量, R_0 为绕转体的轨道半径, 定义

$$\Gamma = \frac{M_0}{R_0} \quad (24)$$

$G\Gamma$ 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($\log \Gamma \sim \log M_c/M_\odot$ 关系), 可看出, 木卫、土卫和天卫位于比 $\log \Gamma = 19$ 小的一个(或两个)带及 $\log \Gamma = 19 \sim 20$ 的另一带中, 只有木卫五位于 $\log \Gamma > 20$ 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

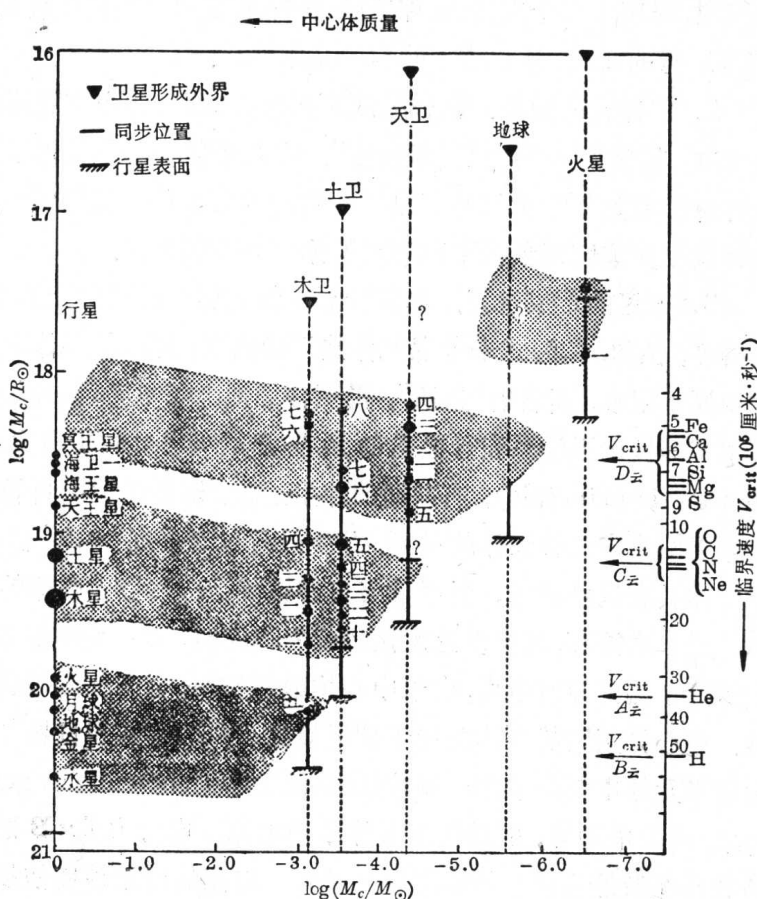


图 10.1 太阳系的带结构

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

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

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

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

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^[8,9], 并且也提出了一些较为复杂的理论^[10,11], 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 princiole), 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

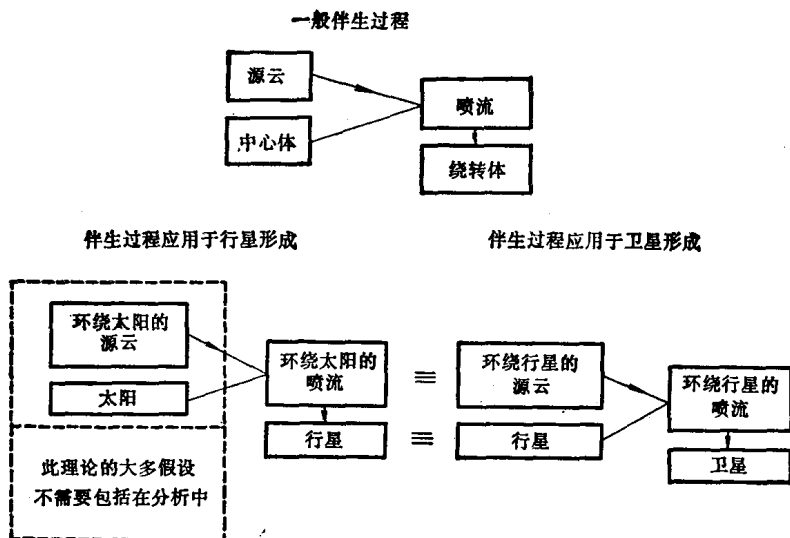


图 10.2 伴生过程

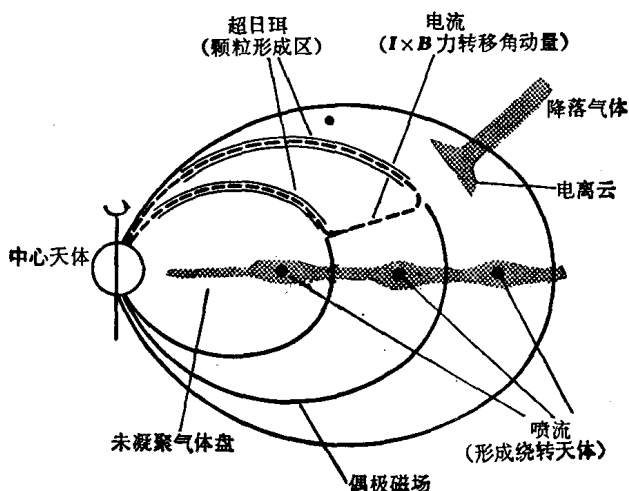


图 10.3 绕转体的形成

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