

# 行星环 (II)

陈道汉

(中国科学院紫金山天文台)

## 提 要

本文评述了有关土星环的七个方面的理论研究: (1)东-西不对称性; (2)粒子大小分布; (3)环的稳定性; (4)环缝的共振起源; (5)密度波和挠曲波; (6)轮辐结构; (7) F环。

还评述了天王星环以及行星环中的碰撞、光度理论和起源等问题的研究。

## 一、土星环东西不对称性(经向亮度变化)

从1714年 Maraldi 首次观测到土星环的东-西亮度不对称算起,至今两个多世纪来的观测都证实这个现象是真实的。这种不对称性在A环上表现尤著。有的文献将这一现象称为A环亮度的经向(方位角方向)变化。这现象可简述为:土星A环的亮度在环粒与地球-土星连线相合之前的象限中较亮,在合以后的象限中则较暗。已出现几种理论尝试说明这一现象。

1978年, Ferrin 采用了环粒间的碰撞和珠串模型(BIAS模型)<sup>[1]</sup>。这模型涉及环粒表面反照率有系统的变化,并要求环粒有秩序地沿着细环运动。七十年代初,阿尔文实验证明这一模型是可能的。当时他在一艘飞船中放置了几个苹果,当飞船绕行星运动时,实验明确显示这些苹果在飞船中心按平行于轨道的方式排成一线<sup>[2]</sup>。

Colombo 等提出的密度尾迹是另一种机制<sup>[3]</sup>。在由同步自转、形状不规则的粒子构成的环中,如果环粒的长轴关于较差转动的后曳方向有统计倾向的倾斜,则A环亮度的经向变化就可获得说明。

1978年, Franklin 和 Colombo 援引了粒子的引力相遇在环粒周围产生的密度不对称理论<sup>[4]</sup>。这就是说,当粒子相互趋近到一定距离时,自吸引导致粒子相对集中于偏离径向 $60^\circ$ — $70^\circ$ 的地方。对于逆时针的轨道运动而言,正好是后曳方向。所以这一理论同密度尾迹说在现象学上是雷同的。

此外, Lumme 和 Irvine 在1979年提出一种“滴状模型”<sup>[5]</sup>。1980年 Piironen 和 Lukkari 通过土星环东西不对称与亮流星和陨石坠落的相关统计,支持了 Hämeen-Antilla 和 Itävuo 的看法:用流星体对环的撞击解释东-西不对称性<sup>[6,7]</sup>。

## 二、土星环粒按大小分布

自从1859年 Maxwell 论证了土星环的离散性以来,环粒大小分布就引起了科学家的兴

趣。1970年, Bobrov 用环粒间的相互遮掩理论讨论土星环的相曲线时, 提出环粒的大小按幂律分布  $n(a) \sim a^{-q}$ ,  $a$  为环粒半径。当  $q=2$  时, 有  $D \approx 0.005$ ,  $D$  为粒子所占环体积的份额, 称体密度<sup>[8]</sup>。1974年 Kawata 和 Irvine 也用  $q=2$  解释了土星环的“冲效应”, 并得  $0.013 \leq D \leq 0.05$ <sup>[9]</sup>。

1983年, Marouf 分析了“旅行者1号”的无线电掩实验结果, 认为在  $0.01 \leq a \leq 1$  米范围内, 宜用  $q=3.4$  和  $3.3$ ; 还认为粒子分布函数在  $a \approx 4-5$  米处截断, 在  $3 \leq a \leq 4$  米间的一个狭窄区间上达峰值<sup>[10]</sup>。该文简述了有关粒子大小分布的研究史, 颇值一观。

1983年, Gurnett 分析了“旅行者”的等离子体波观测结果, 提出近土星的微米量级粒子(位于G环稍外,  $\sim 2.88R_s$  处)的质量分布按  $m^{-3}$  变化<sup>[11]</sup>。

Hénon 在1981年提出一个土星环模型, 认为土星环的粒子大小可能在几个量级上都是连续分布的, 没有什么“典型的”粒子大小。基于这一观点的模型可以说明很多土星环特征: 视厚度, 雷达和无线电观测, “旅行者1号”发现的环缝数目和宽度分布以及光学厚度等<sup>[12]</sup>。

### 三、土星环的稳定性理论

1859年 Maxwell 发表了“论土星环的运动稳定性”一文<sup>[13]</sup>。他证明了固体环内的应力会不可避免地造成环的瓦解。继而又证明了液环的不稳定性。最后研究了由相互独立的粒子(每个粒子绕土星作开普勒运动)构成的环的稳定性条件。1964—1965年, Cook 和 Franklin 发表长篇论文, 指出 Maxwell 论文中存在着忽略较差转动等三个错误, 重新讨论了环的稳定性, 并提出了忽略碰撞、绝热压缩、等温压缩等模式<sup>[14]</sup>。在关于环稳定性的近代研究中, Yabushita 计入了环的曲率、边缘效应以及径向密度分布, 所获结果与 Maxwell 大为不同<sup>[15]</sup>。

### 四、土星环缝的共振理论

1866年, Kirkwood 提出用环粒与卫星的共振来说明土星环的空隙区——卡西尼缝和恩克缝的起源。这一理论在一定程度上得到了观测结果的证实, 例如卡西尼缝的内边界与土卫一成 1:2 共振, 恩克缝与土卫二成 3:5 共振, A 环的外边界与土卫一成 2:3 共振。由于卫星之间的运动存在着频繁的通约性, 这样的共振常常不是唯一的。不过这中间恒可找到一个最强的共振。

本世纪二十年代, Goldsbrough 用共振理论讨论了卡西尼缝和恩克缝的起源<sup>[16]</sup>。1970—71年 Franklin 和他的合作者计算了由于卫星(特别是土卫一)摄动所造成的土星环亮度分布<sup>[17]</sup>, 计及土卫一的轨道偏心率, 算得了较宽的卡西尼缝以及与实际观测相符的 B 环内边界, A 环里也出现了若干结构。但卡西尼缝的计算位置仍偏离实际观测位置, 精确通约的轨道也并不对称地落入卡西尼缝内, 而是接近该缝的内边界。作者认为 B 环本身的质量移动了精确共振的位置<sup>[18]</sup>。他们还用土卫六的平均运动与环粒轨道进动之间的共振解释了盖林(Guerin)缝。

阿尔文认为土星环系中不存在共振效应<sup>[19]</sup>。理由是: (1) 卡西尼缝的中心并不在 1/2 共振位置; (2) 土卫一质量太小, 对环粒轨道不至于产生足够大的效应和可观的共振现象。

Holdberg 等从“旅行者 2 号”所得的环掩星资料, 证认出若干共振特征<sup>[20]</sup>。发现有三类共振: I 型共振通常是最强的共振且与卫星的轨道偏心率无关; II 型共振的强度正比于卫星的轨道偏心率, 其中有一些称为拱线共振者, 环粒轨道的拱线进动率等于卫星的平均轨道运动; 最后还有一类由土星自转引起的共振。

## 五、土星环中的密度波理论和挠曲波理论

在研究星系结构中发展起来的密度波和挠曲波理论, 近年来在土星环研究中获得了重要应用。

1978 年, Goldreich 和 Tremaine 用密度波理论说明卡西尼缝的起源、密度和位置<sup>[21]</sup>, 他们认为环粒对土卫一共振力的集体响应在 2:1 共振位置上建立了曳行旋涡密度波, 这种波携有负角动量并向外传播。波因非线性和粘滞效应而衰减。其负角动量转移到环粒。这样, 正好在 2:1 共振之外的环粒螺旋式地向内运动, 开拓出一个环缝。缝的内缘接近共振位置, 与卡西尼缝的内缘位置相符。

1981 年, Cuzzi 等用密度波解释了由“旅行者 1 号”观测到的卡西尼缝外区的结构<sup>[22]</sup>, 专门研究了其中亮带(位于离土星心 120,700 公里到 121,900 公里)的径向亮度起伏, 认为这种平缓起伏是由环粒拱线运动与土卫八的平均运动之间的共振所驱动的旋涡密度波。还算得了该区的面密度( $\sim 16$  克/厘米<sup>2</sup>)、运动粘滞率( $\sim 170$  厘米<sup>2</sup>/秒)和垂直标高( $\sim 40$  米)。

1983 年, 徐遐生等用挠曲波理论解释了 A 环亮度的经向变化<sup>[23]</sup>。原来, “旅行者 2 号”发现在  $2.185R_s$  处出现一个波式与旋涡密度波截然不同的波列, 呈现经向亮度变化。徐遐生认为, 它起因于盘的自吸引使该地附近“起皱”, 作为一种扰动以扰曲波形式从内垂直共振(IVR)处的激发源向内传播。从这种挠曲波可以定出峰-谷垂直位移为 1.4 公里, 与地面观测得到的环厚度 1—2 公里相符。此乃环的全局厚度, 而“旅行者”掩星测量所得的小于 200 米值则系环的局部厚度。

## 六、土星 B 环上的轮辐结构

已有很多文献讨论这一特征。1981 年, Hill 和 Mendis 提出构成轮辐的物质颗粒是具有高静电势的带电尘粒<sup>[24]</sup>。这一思想成为后来很多工作的基础。其他作者主要是在荷电机制上派生出种种不同的观点。Thomsen 等认为轮辐粒子是从较大的母体那里被排斥出来的<sup>[25]</sup>。Carbary 等认为, 土星大气中的带状气流造成了电离层的超旋转并依靠场向电流在 B 环两端产生约 16 千伏的电势, 这电势沿着径向方向使得 1—10 微米的冰粒极化, 从而创造了轮辐<sup>[26]</sup>。但在环的尖角处和土星的前方轮辐形态相似, 则又似乎表明这一理论不能成立。其余大多数理论认为轮辐是一种带电尘粒飘浮在环面上空的现象。通常假定, 由于光压和微粒辐射, 盖在大环粒上的尘埃荷电并被静电举高, 从而局部地改变环的均匀照度致使轮辐清晰可见。Goertz 和 Morfill 于 1983 年提出一个较完整的轮辐形成模型<sup>[27]</sup>, 认为轮辐系由微米量级的带电尘粒构成, 流星撞击环创造出一个径向运动的稠密等离子体柱, 将尘粒升举于环面上方。

该柱在环处形成静电壁鞘使环荷电。其电场强度足以克服施于尘粒上的引力。等离子体柱的径向运动可以归因于经向(方位角方向)的极化电场。这一模型能够说明轮辐形成的动力学、尘埃的飘离环面、“年青”轮辐的径向排列等一系列问题,在轮辐出现的频数、空间分布和形成时间等问题上亦与观测结果相符。

Morfill 等接着讨论了轮辐的演化<sup>[28]</sup>。他们认为太阳的紫外辐射使微尘放电,形成一个在土星的偶极磁场中作绝热运动的电子云。环在吸收电子云后,环面局域电势大大改变,局域德拜长度减少。结果有更多的微米量级的尘埃飘浮出环面,使轮辐壮大,这一过程一直要继续到电子云消散为止。

Grün 等于 1983 年著文将轮辐分成三种类型:(i)延伸轮辐;(ii)窄轮辐;(iii)纤维状轮辐。它们不仅有不同的几何外观,而且活跃期也长短不一。他们导出轮辐的高度上限为 80 公里<sup>[29]</sup>。该文之末附有大量有关轮辐研究的论文。

1983 年, Morfill 和 Goertz 研究了土星环中的等离子体云<sup>[30]</sup>,描述了由流星体撞击产生的气体膨胀和电离。最初碰撞产生“撞击等离子体云”,中性气体喷溅物的进一步电离产生“次生等离子体”。文中讨论了它们的动力学、大小、密度和寿命,提出米级流星体撞击产生的大云能导致轮辐的形成。

Smoluchowski 用辐射感生的热疲劳、环粒间碰撞和流星撞击说明轮辐尘埃的起源<sup>[31]</sup>。

## 七、土星的 F 环

1981 年, Dermott 用牧羊卫星对环粒轨道的摄动解释 F 环的窄性及其发辫结构<sup>[32]</sup>,这是一种纯引力理论。

涉及电磁力的理论似更合理, Hill 和 Mendis 认为构成 F 环的尘粒带电<sup>[24]</sup>。F 环携带的电流超过  $10^5$  A。这样的电流能够改变环附近的磁场组态并在维持环的稳定性方面起着作用<sup>[33]</sup>。Kyrala 从 F 环及其粒子轨道的非平面性产生条件出发,探讨了动力学上的约束。指出只有与速度正交的力分量才能导致运动的非平面性,这就是说,非平面性是与不作功的力相联系的。磁力便是这样一种力,并且是造成 F 环呈发辫状的原因<sup>[34]</sup>。

Showalter 和 Burns 在假定了全部环粒沿偏心轨道运动的条件之下,用数值方法研究了牧羊卫星对窄环的短期效应,试图说明 F 环的性质<sup>[35]</sup>。从发辫长度与牧羊理论期望值相符,表明卫星是有牵连的,牧羊卫星的短期效应也是重要的。但是,仅仅这样的数值模拟还模拟不出发辫结构,看来一个完善的解释势必涉及其他效应。

## 八、天王星环

共振理论曾用于说明土星环缝的形成,在那里,共振起着扫荡粒子的作用。但共振也会产生深度不同的位阱,藉以保持粒子轨道组态的稳定。Dermott 和 Gold 提出用三体共振(粒子与两个卫星)作为决定天王星环系轨道结构的机制就是后一种情形<sup>[36]</sup>。但这一理论与实际观测间总有些不符,特别是三体共振的强度不足以说明环宽。所以这一理论是值得争议的。

但它又能较正确地预报  $\epsilon$ 、 $\gamma$ 、 $\alpha$  和 No.5 环的位置。所以又不能草草摒弃。Ip 将天卫五-天卫一共振的作用视为在共振位置附近形成窄环的触媒，似为一种理论变型<sup>[37]</sup>。

为了解释天王星环的起源和窄性，Dermott 提出马蹄铁轨道模式<sup>[38]</sup>。该理论认为，在天王星轨道上有一系列的小卫星。环的物质是从这些卫星上撒落下来的。它们被小卫星的 1:1 共振摄动捕获而运行于马蹄铁形轨道上，形成了天王星环，轨道稳定性条件将环粒约束在很窄的条带里。但这一理论没有涉及环系的轨道组态。

Goldreich 和 Tremaine 提出用位于每一天王星环两侧（质量约  $10^{19}$  克，离环约 500 公里）的一对假设牧羊卫星对环粒的约束来说明天王星环为什么那么窄<sup>[39]</sup>。“旅行者 1 号”在土星 F 环两侧发现两颗牧羊卫星支持了这一理论。

## 九、行星环中的碰撞过程

行星环环粒之间的碰撞会显著改变它们的空间分布以及环的轨道组态，从而影响环的演化——粒子轨道渐趋圆形，环系变扁。将行星环视为绕中心天体作开普勒运动的粒子系统，关于其非弹性碰撞的结果现在流行着两种观点：(i) 环变扁和径向拓宽，这是 1947 年 Jeffreys 提出的<sup>[40]</sup>；(ii) 形成窄环和喷流。

### 1. 数值研究

为了模拟部分非弹性碰撞，Trulsen 提出了  $\beta$  模型<sup>[41]</sup>。结果表明，不管如何选择初态以及非弹性度， $e$  和  $i$  的分布都迅速趋于形式为

$$F(x) = x^n e^{-\alpha x}$$

的瑞利分布。式中  $x=e, i$ 。这种模型并不产生轨道的径向聚集。嗣后，Trulsen 改用雪花模型(Snowflake model)模拟，亦即认为粒子状如雪花，具有“绒毛”结构。这时近掠碰撞只造成绒角的断裂，粒子乃具有部分可穿透性<sup>[41]</sup>。结果表明，近心点矢量迅速调节到呈分布形式

$$F(\mathbf{P}) \sim \exp[-\alpha(\mathbf{P} - \mathbf{P}_0)]$$

如此看来似乎具有窄结构以及校准了的近日点矢量的二维粒子喷流是可能形成的。但实际上未必如此。因为碰撞粒子系总有一种趋于能量均分的倾向。所以即使起初是  $i=0$  的二维系，也会很快地转换成  $\langle e \rangle \approx \langle i \rangle$  的三维系，从而引起径向加宽。Trulsen 将结果应用于土星环系。遵循这条路线进行工作的尚有 Brahic, Hénon 和 Ip 等<sup>[42-44]</sup>。

在“旅行者 1 号”揭示土星环系具有细环结构以后，Lukkari 用计算机数值模拟了土星环中密度起伏的碰撞放大。结果表明，密度极大值会不可逆地急剧升高<sup>[45]</sup>。

### 2. 理论研究

在弹性碰撞中，由于相对动量的改变，能量从一个自由度偏向另一自由度，结果使粒子分布在相空间中拓宽；非弹性碰撞则使相对动量的数值减少，引起粒子分布函数在相空间中紧缩，从而导致轨道聚集。

Baxter 和 Thompson 将非弹性碰撞造成的轨道聚集问题归结为用波耳兹曼方程

$$-\frac{\partial f}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \frac{\partial f}{\partial \mathbf{r}} + \nabla U \cdot \frac{\partial f}{\partial \mathbf{v}} = I(f, f)$$

描述粒子系随时间的变化<sup>[46]</sup>。其中  $U$  是中心天体的引力势。在讨论轴对称二维系时, 粒子分布函数可写为  $f(L, e^2)$ ,  $L = a(1 - e^2)$  为角动量。当  $f(L, e^2) = h(L)\psi(e^2)$  时, 则有关于角动量分布  $h(L)$  的方程如下

$$\frac{\partial h}{\partial t} = D(L) \frac{\partial^2}{\partial L^2} h^2(L, t).$$

这个方程与扩散方程

$$\frac{\partial}{\partial t} n(\mathbf{r}, t) = \nabla \cdot \mathbf{D} \cdot \nabla n(\mathbf{r}, t)$$

相似。若碰撞是接近理想的非弹性碰撞, 则  $D(L)$  可以小于零。这就出现所谓“负扩散”——物质向密集区集中。此时角动量分布的局部极大值升高, 造成轨道聚集和形成阿尔文喷流。

Hämeen-Antilla 发表过一组文章专论开普勒轨道的统计力学<sup>[47]</sup>。讨论中计入粒子大小的弥散、摄动和引力相遇等效应。主要结果是, 若弹性随碰撞速度而减少, 那么粒子集束成窄环就是可能的。理论的成功之处在于预言了土星环由分立的细环构成。

Goldreich 和 Tremaine 讨论过土星环中的速度弥散<sup>[48]</sup>。碰撞引起的粘滞应力将有序的轨道运动能量转换成无规运动的动能, 同时非弹性碰撞又将无规运动的能量耗散掉。速度弥散起着调节和平衡作用。在平衡条件下, 碰撞粒子的恢复系数  $\epsilon$  可表示成光深  $\tau$  的函数:  $\epsilon^2 \approx 1 - 1/(1 + \tau^2)$ 。他们进一步指出, 连续的能量耗散加上角动量守恒将引起盘的径向加宽。在进一步假定相空间中的环粒分布函数为速度空间中的三轴高斯分布, 并采用一定的碰撞模型以后, 可由理论上导出  $\epsilon(\tau)$  关系以及速度椭球的三轴比。1983 年, Borderies 等将上述速度弥散的讨论推广到靠近孤立的卫星共振扰动区, 所得结果可用于理解行星环的锐边缘以及密度波衰减等<sup>[49]</sup>。为了解释有些行星环所呈现的锐边缘(光深从  $\sim 1$  陡降为 0), Borderies 等还用卫星与环粒间的轨道共振来说明<sup>[50]</sup>。

在作掩星观测时, 土星环和天王星环中某些窄环在光变曲线上均呈 W 型形状。Eshleman 等为了说明这一特征提出了一个模型<sup>[51]</sup>。这个模型认为, 物质的环边集聚是处于绞缠的椭圆轨道上的粒子所拥有的自然现象。两个边缘由同样的粒子确定。这个模型还能解释细环中粒子按大小整理有序, 以及稠密的细环能够经受碰撞而不损失能量等现象。

牧羊卫星对环的作用是个新的动力学课题。现在这方面工作尚处于开始阶段, 1983 年, Greenberg 讨论了存在阻尼机制时环粒对牧羊卫星的响应<sup>[52]</sup>。

## 十、行星环的光度理论

长时期观测而累积起来的土星环光度资料是理解土星环性质的核心资料之一。土星环的主要光度特征为: (i) 环的亮度随位相角  $\alpha$  线性变化; (ii) 近  $\alpha = 0$  时, 亮度陡增, 称为“冲效应”; (iii) 环的亮度-位相曲线与波长有关。理论的任务是要说明观测到的土星环光度特征。最早的光度理论为 Seeliger 所提出, 而后 Irvine 和 Bobrov 发展了这一理论<sup>[53][8]</sup>。Kawata 和 Irvine 将环粒相互遮掩理论和近代的光散射理论结合在一起, 成功地解释了土星环的光度特征<sup>[9]</sup>。陈道汉等一并讨论了漫反射和漫透射, 讨论了考虑遮掩效应的高次散射问题<sup>[54]</sup>。

## 十一、行星环的起源

行星环的起源理论主要包含潮汐理论、凝聚理论和碰撞理论三种。

潮汐理论认为在洛希极限以外形成的卫星走近行星时, 将被行星的潮汐力所瓦解, 从而形成行星环。这里要注意两点: (i) Aggarwal 和 Oberbeck 将洛希极限的公式推广到刚体卫星上<sup>[55]</sup>; (ii) Dermott 引入了洛希区概念, 按照这一概念, 可以指望位于洛希区内的任意形状的卫星撒落下来的松散粒子构成了环物质<sup>[58]</sup>。

凝聚理论认为环粒在它们的现有位置附近从气相凝聚而成<sup>[56]</sup>。

碰撞理论假定在现在的环位置上有一个或几个卫星。它们比环粒的平均大小要大得多, 但又小得足以使得由流星撞击产生的碎片能从它们的表面逃逸。在一定条件下, 撞击出的碎片不再被母体重新捕获而构成环绕行星转动的环<sup>[57]</sup>。

我国天文学家戴文赛认为土星环是由于规则卫星的轨道缩小进入洛希极限后瓦解而成, 天王星环则起源于大星子撞击(使之侧向自转)时所撞出的物质<sup>[58]</sup>。

阿尔文的环形成理论与众不同, 在他的等离子体凝聚模式中, 土星的环和环缝被视为“演化的影子”(例如 C 环是光环自己的影子, 卡西尼缝是土卫一的“演化影子”等)<sup>[19]</sup>。

### 参 考 文 献

- [1] Ferrin, I., *Nature*, 271 (1978), 528.
- [2] Alfvén, H., *Science*, 173 (1971), 522.
- [3] Colombo, G. et al., *Nature*, 264 (1976), 344.
- [4] Franklin, F. A. and Colombo, G., *Icarus*, 33 (1978), 279.
- [5] Lumme, K. and Irvine, W. *Ap. J. Lett.*, 204 (1976), L55.
- [6] Hämeen-Anttila, K. A. and Itävuori, H., *Astrophys. Space. Sci.* 41 (1976), 57.
- [7] Piironen, J. O. and Lukkari, J., *The Moon and the Planets*, 23 (1980), 373.
- [8] Bobrov, M. S., in *Surfaces and Interiors of the Planets and Satellites*, p.376, ed. by A. Dullfus, (1970).
- [9] Kawata, Y. and Irvine, W. M., *IAU Symp. No.65*, (1974), 441.
- [10] Marouf, E. A. et al., *Icarus*, 54 (1983), 189.
- [11] Gurnett, D. A. et al., *Icarus*, 53 (1983), 236.
- [12] Hénon, M., *Nature*, 293 (1981), 33.
- [13] Maxwell, J. C., in *Scientific Papers of James Clark Maxwell*, ed. by I. W. D. Niren, Cambridge Uni. Press, London (1890).
- [14] Cook, A. F. and Franklin, F. A., *A. J.*, 69 (1964), 173; 70 (1965), 704.
- [15] Yabushita, S., *M. N.*, 133 (1966), 247; 142 (1969), 201.
- [16] Goldsbrough, G. R., *Phil. Trans. Roy. Soc. London, Ser. A*, 222 (1921), 101; *Proc. Roy. Soc., London, Ser. A*, 101 (1922), 280; *Ibid.*, 106 (1924), 526.
- [17] Franklin, F. A. and Cook, A. F., *A. J.*, 75 (1970), 195.
- [18] Franklin, F. A. et al., *Icarus*, 15 (1971), 80.
- [19] Alfvén, H. and Arrhenius, G., *Evolution of the Solar System*, NASA, SP-345.
- [20] Holdberg, J. B. et al., *Nature*, 297 (1982), 115.
- [21] Goldreich, P. and Tremaine, S., *Icarus*, 34 (1978), 240.
- [22] Cuzzi, J. N. et al., *Nature*, 292 (1981), 703.

- [23] Shu, F. H. et al., *Icarus*, **53** (1983), 185.
- [24] Hill, J. R. and Mendis, D. A., *The Moon and the Planets*, **24** (1981), 431.
- [25] Thomsen, M. F. et al., *Geophys. Res. Lett.*, **9** (1982), 423.
- [26] Carbary, J. F. et al., *Ibid.*, **9** (1982), 420.
- [27] Goerts, C. K. and Morfill, G. E., *Icarus*, **53** (1983), 219.
- [28] Morfill, G. E. et al., *Icarus*, **53** (1983), 230.
- [29] Grün, E. et al., *Icarus*, **54** (1983), 227.
- [30] Morfill, G. E. and Goerts, C. K., *Icarus*, **55** (1983), 111.
- [31] Smoluchowski, R., *Icarus*, **54** (1983), 263.
- [32] Dermott, S. F., *Nature*, **290** (1981), 454.
- [33] Hill, J. R. and Mendis, D. A., *Geophys. Res. Lett.*, **9** (1982), 1069.
- [34] Kyrälä, A., *The Moon and the Planets*, **25** (1981), 129.
- [35] Showalter, M. R. and Burns, J. A., *Icarus*, **52** (1982), 526.
- [36] Dermott, S. F. and Gold, T., *Nature*, **267** (1977), 590.
- [37] Ip, W.-H., *Nature*, **272** (1978), 802.
- [38] Dermott, S. F. et al., *A. J.*, **84** (1979), 1225; *Icarus*, **43** (1980), 338.
- [39] Goldreich, P. and Tremaine, S., *Nature*, **277** (1979), 97.
- [40] Jeffreys, H., *M. N.*, **107** (1947), 263.
- [41] Trulsén, J., *Astrophys. Space Sci.*, **12** (1971), 329; **17** (1972), 241; **18** (1972), 3; **17** (1972), 330.
- [42] Brahic, A., *Icarus*, **25** (1975), 452; *Astron. Astrophys.*, **54** (1977), 895.
- [43] Brahic, A. and Hénon, M., *Astron. Astrophys.*, **59** (1977), 1.
- [44] Ip, W.-H., *Proc. 8th Lunar Sci. Conf.*, p.67. (1977).
- [45] Lukkari, J., *Nature*, **292** (1981), 433.
- [46] Baxter, D. C. and Thompson, W. B., in *Physical Studies of the Minor Planets*, p. 319 ed. by T. Gehrels, (1971); *Ap. J.*, **183** (1973), 323.
- [47] Hämeen-Anttila, K. A., *Astrophys. Space Sci.*, **37** (1975), 309; **43** (1976), 145; **46** (1977), 133; **51** (1977), 429.
- [48] Goldreich, P. and Tremaine, S., *Icarus*, **34** (1978), 227.
- [49] Borderies, N. et al., *Icarus*, **55** (1983), 124.
- [50] Borderies, N. et al., *Nature*, **299** (1982), 209.
- [51] Eshleman, V. R. et al., *Icarus*, **54** (1983), 212.
- [52] Greenberg, R., *Icarus*, **55** (1983), 207.
- [53] Irvine, W. M., *J. G. R.*, **71** (1966), 2931.
- [54] 陈道汉, 董明, 武志贤, 杨修义, 中国科学, (1978), No.5, 538.
- [55] Aggarwal, H. R. and Oberbeck, V. R., *Ap. J.*, **191** (1974), 577.
- [56] Pollack, J. B., *Space Sci. Rev.*, **18** (1975), 3.
- [57] Pollack, J. B. et al., *Icarus*, **20** (1973), 263.
- [58] 戴文赛, 天文学报, **18**(1977), 192; 戴文赛, 胡中为, 中国科学, (1980), No.3, 254.

## Planetary Rings ( II )

Chen Daohan

(Purple Mountain Observatory, Academia Sinica)

### Abstract

Seven problems of the theoretical work on the Saturn's rings are reviewed. They are: (1) east-west asymmetry, (2) size distribution, (3) stability, (4) formation of the



---

gap due to resonance, (5) density wave and bending wave, (6) spokes and (7) F-ring.

Work on Uranian rings and some general problems of the planetary rings including the collision process in the rings, the photometric theory and their origin are also elucidated.