

行星环 (I)

陈道汉

(中国科学院紫金山天文台)

提 要

本文是关于行星环的现有观测资料的总结。

在太阳系中, 现知三个巨行星有环。它们是木星、土星和天王星。

土星环早在 1610 年 7 月就由伽利略观测到。1977 年 3 月, J. L. Elliot 和另一些观测组在观测天王星掩星事件时, 发现了天王星环。1979 年 3 月, “旅行者 1 号”发现了木星环。

行星环是近代天文学和行星科学中最有意义的课题之一。它们包含有十分有趣的动力学问题。导致它们形成并使之具有这样或那样结构的过程, 在行星和卫星的形成理论中也有着重要的地位。它们还提供研究太阳系早期吸积机制最好的机会。

理论研究的基础应该是观测资料。所以 (I) 文致力于资料的综述, 理论研究的进展则留待 (II) 文介绍。

一、土星环系资料

根据地面观测和空间探测, 得知土星环系的主体含有 A、B、C、D、E、F 和 G 等七个环。编号的次序是根据发现的先后而不是按它们离土星的远近。A、B、C 三个环是早就知道的。

表 1 土星环系

	位置(R_s)	宽度(公里)	光深
D 环	1—1.21	—	—
C 环	1.21—1.53	—	约 0.1
B 环	1.53—1.97	—	约 1
卡西尼缝	1.97—2.03	4200	约 0.06
A 环	2.03—2.26	—	约 0.5
恩克缝	2.21	876±35	—
F 环	2.32	约 30	约 1
G 环	2.8	—	—
E 环	3.5—4.91	—	10^{-6}
共轨卫星	2.51	—	—

注: 土星半径 $R_s = 60000$ 公里

D 环很暗, 到 1969 年才发现^[1]。它与 C 环的内缘隔开一个 1200 公里宽的盖林缝, 向里一直延伸到土星本体。E、F 和 G 三个环位于 A 环以外。E 环是 Feibelman 在 1967 年发现的^[2], 但确证较迟。它十分稀薄和宽广, 甚至连土卫三和土卫四也在 E 环内运行。1979 年“先锋 11 号”发现 F 环, 并证实了 E 环^[3]。次年“旅行者 1 号”肯定 D 环并发现 G 环。

有两个著名的环缝具有永久性, 它们是卡西尼缝(将 A 环和 B 环隔开)和恩克缝(位于 A 环上)。T. Gehrels 还将 A 环和 F 环之

间的宽约 3600 公里的空缺区域命名为“先锋缝”。

1980 年 3 月,地球通过土星环的环平面(edge-on 观测)。这次机会使天文学家确证有 E 环并发现 E 环有结构。Baum 等发现环物质径向分布在土卫二轨道处峰值,认为 E 环是新近起源的环^[4]。Brahic 等发现它在 $5.7R_2$ 处亦具亮度峰值^[5]。Terrile 等分析 E 环的反射率曲线后认为: E 环粒子很小(不到 5 微米),寿命也很短,它应当有一补充源^[6]。Dollfus 和 Brunier 以及 Lammy 和 Maaron 观测到 E 环亮度的径向分布随时间而变^{[7][8]}。这表明 E 环物质沿经度方向的分布不对称,可能有一部分是由束缚于某些卫星(尤其是土卫二)的平动点上的物质弧段所构成(不过,旅行者 1 号并没有观测到这样的物质弧段)。Dollfus 认为, E 环不像是 A、B、C 环那种经典意义下的盘,而是含有物质臂、弧段等特征的一个复杂而变动的扁平结构,它可能是由流星体撞击卫星后抛出的碎片^[9]。

上述七个环实际上是环系的主部,也可说是带区。1980 年 11 月,“旅行者 1 号”访问了土星,它使用高分辨率照相机拍照,发现土星环系具有更细致的结构^[10]。

1. A、B、C 环由几百个乃至上千个分立的细环所构成,看起来像是巨大唱片的纹道。早先 Dollfus 曾观测到土星环亮度有起伏,并将此现象解释为一系列窄环的物质集聚效应,现在获得了证实。

2. B 环上有若干明亮的径向楔形特征,它们像轮辐那样与土星磁场共转。看来,它们的出现与土星磁场的电磁效应有关。

3. 卡西尼缝内至少有 20 条细环,恩克缝内也有 2 条。此外还发现了打新的环缝。

4. F 环由三条支环构成,其中两条呈发辫状,另一条暗黑且稍宽。

表 2 土星环系的物理性质^[12]

物理参量	估计值或性质	观测和计算
环粒表面成份	H ₂ O 冰(加上陨石物质?)	1—3 微米反射谱
表面颗粒大小	≈25—125 微米	Mie 散射
环粒大小	$\langle r \rangle \leq 500$ 微米或 ≥ 2 厘米 $\langle r \rangle_{\text{冰}} \approx 2—15$ 厘米 $\langle r \rangle_{\text{金属}} \approx 1$ 米	1—3 微米反射谱 食观测 雷达和射电观测 双频雷达观测
反照率	$A_F \approx 0.63$ $A_B \approx 0.49$	光度观测
体密度	$D \approx 10^{-2}—10^{-3}$	用环粒间相互遮掩解释冲效应
环质量	$M_{\text{总}} = (6.2 \pm 2.4) \times 10^{-6} M_{\text{土星}}$ $M_B = 6 \times 10^{-6} M_{\text{土星}}$	引力摄动计算 将卡西尼缝位置视为土卫一的共振(2:1)效应
环厚度	1.56 ± 0.54 公里(蓝) Z = 0.80 ± 1.14 公里(红) 2.8 ± 1.4 公里(黄) 1.3 ± 0.3 公里	地球通过环平面(edge-on)时作观测
光学厚度	$\tau_E \approx 10^{-7}—10^{-8}$ $\tau_A \approx 0.5$ $\tau_B \approx 1.0$ $\tau_{\text{卡西尼缝}} \approx 0.06$ $\tau_D \approx 0.03$	掩星观测及沿环面(edge-on)观测

“旅行者 2 号”于 1981 年 8 月下旬飞过土星，补充和修改了上述结果^[11]：

1. 照片显示 B 环上的轮辐结构略微离开环平面。

2. 在恩克缝内清晰地拍到 2-3 条绞缠着的窄环。

3. 这回未见到 F 环的发辫结构，倒是在环内发现了五个独立的支环(一亮四暗)以及若干发亮的物质团块。

“旅行者”的探测资料支持和推广地面观测结果(表 2)，得到：A、B、C 环中最大的粒子直径约为 10 米，这类粒子在环中含量丰富，但更多的是 10 厘米量级的。粒子按大小分布的情况随区域而变；微米量级的粒子构成 F 环的大部，在 B 环的很多部位上也占有相当大的份额，甚至在 A 环上的外区中也有。但在 C 环以及卡西尼缝中却没有这么小的粒子。

据“旅行者 2 号”观测，土星环的最大厚度不超过 150 米。

二、天王星环系

天王星环非常暗弱，以前在大望远镜观测中也从未发现过有环。直到 1977 年 3 月 10 日，我国及美国、印度和南非等国观测了天王星掩恒星 SAO158687 的罕见天象后，才意外地发现了天王星环^[13-17]。其中以 J. L. Elliot 等在 KAO(全名为 Kuiper Airborne Observatory)上所作的观测最著名。他们从光度曲线的次掩情况推断出天王星有 α 、 β 、 γ 、 δ 和 ϵ 等五个环(编号次序按照环离天王星中心的远近为序)^[18]。我国紫金山天文台和北京天文台联合观测到 ϵ 环掩星事件，并与北京大学谢衷洁和程乾生合作，用数理统计方法检测到另四个小环^[17]。

嗣后，Elliot 和 Millis 对观测资料作了综合分析，指出在 α 环内侧存在三个小环，在 β 环与 γ 环之间也有一个小环，从而使天王星环总数达到 9 个^[13-14]。1978 年 4 月 10 日再次观测天王星掩星事件也证实天王星有九个环^[18-20]。

1980 年中国宣布在 ϵ 环外侧检测到两个小环信息^[21]。同年 8 月 15 日，欧洲南方天文台的 P. Bouchet 等作了一次天王星掩星观测，除了证实原有的九个环以外，还额外获得七次掩星事件。其中两次在 ϵ 环与 δ 环之间，五次在 ϵ 环外侧^[22]。这些结果有待于进一步证实。

1981 年 3 月，Elliot 及其同事发表了 1980 年 8 月 15 日观测天王星掩星结果^[23]。新发现有：(1) α 环掩星时曾显示出星光强度的暂时升高。这表示 α 环可能是相隔很近的双环，或者像 ϵ 环那样有较复杂的结构；(2) η 环结构可分两部——约 60 公里宽的宽部以及位于宽部内侧的更致密的窄部。该文还给出了综合各次观测算得的环的形状和方位。

地面直接拍摄天王星环须用红外光。1979 年美国天文学家借助于 5 米口径望远镜拍摄了天王星环的红外像，工作波长为 2.2 微米。

到目前为止的天王星环系基本资料列于表 3。

天王星环与土星环大不一样。土星的 A、B、C 环很宽，相互间被较窄的缝隙所隔断。天王星环都很窄。除掉 ϵ 环可宽达 100 公里、 η 环具有上述宽部—窄部结构以外，其余的环都只有大约 10 公里宽，环与环之间是广阔的空区。 ϵ 环是偏心率不大的椭圆环，其余基本上系圆环。 ϵ 环的轨道倾角只不过 1° 左右，其他环的倾角更小，所以都可视为位于天王星赤道面上。

表3 天王星环系*

环	半长轴 a (公里)	10^3e (e 表偏心率)	平均宽度 $2\Delta a$ (公里)	深度
6	41865.5±32.1	1.36±0.07	—	[0.20]
5	42272.0±32.2	1.77±0.06	—	0.29
4	42600.1±32.3	1.24±0.09	—	0.21
α	44752.3±32.4	0.72±0.03	8.4	0.5
β	45695.6±32.4	0.45±0.03	8.4	0.4
η	47208.9±32.5	(0.03±0.04)	—	[0.20]
γ	47657.3±32.5	(0.04±0.04)	—	0.4
δ	48333.9±32.6	0.54±0.035	—	0.5
ϵ	51181.7±33.3	7.93±0.04	57.0±0.5	0.9

* 深度资料取自 J. L. Elliot et al., *A. J.* 83 (1978), 980. 方括号内数据取自 Nicholson et al., *A. J.* 83 (1978), 1240. 其余资料取自 Elliot et al., *A. J.* 86 (1981), 444. 以及 S. F. Dermott., *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A* 303 (1981), 261.

表列深度为掩的深度值。 ϵ 环的深度是 0.9, 相应的光学厚度为 2.3; 其余的掩深为 0.2—0.5, 相应的光学厚度为 0.2—0.7. 这些值与 B 环的光学厚度相当。

值得进一步叙述 ϵ 环的结构^[24]: (1) 环的内、外边缘掩深大, 表明物质向两边集中; (2) 环宽与离天王星距离间有线性关系; (3) 环的亮度轮廓相对稳定; (4) 椭圆环整体地绕天王星进动. Nicholson 等获得其进动率为 $1^\circ.374/\text{天}$ ^[20].

估计天王星环的几何反照率只有 0.05 左右. 这样低的反照率表明其环粒并不像土星环粒那样由冰覆盖. 它们可能具有碳质球粒陨石的成份. 富硅的环粒吸收大量的阳光, 所以看起来很暗黑. 若 ϵ 环的位置正好是洛希极限, 那么环粒的密度约为 3 克/厘米³. 迄今未知环粒的大小.

三、木星环

早在 1974 年“先锋 11 号”访问木星时, 就曾在离木星中心 $1.7R_J$ (R_J 为木星半径, 等于 71400 公里) 处探测到高能带电粒子的吸收特征, 亦即在粒子通量随时间变化的曲线上呈现多峰结构, 用现有木卫结构无法解释这一现象. 1976 年, Acuna 和 Ness^[25] 及 Fillius^[26] 提出用木星的尘埃环来说明. 可惜无人从事定量研究以导出这一假设环的物理性质. 相反地, 倒是有人批评这一观念, 认为带电粒子的大气吸收也会产生这样的效应^[27]. 1979 年 3 月, “旅行者 1 号”拍摄到木星环的光学像. 同年 7 月, “旅行者 2 号”又获得更多的情报^[28]. 所获结果总结于表 4. 1979 年, Beklin 和 Wynn-Williams 在夏威夷用地面红外观测检测到木星环^[29].

木星环系由亮环、暗环和晕三部分构成. 环的厚度不会超过 30 公里. 晕的延伸范围可达环面上上下下各 10000 公里. 晕在暗环上延伸到最高点, 其外边界比亮环的外缘稍远. 木星环在光学上很薄. 亮环的不透明度很低, 只有大约万分之一的阳光能被环粒截收. 靠近亮环的外缘有一突出的亮带, 宽约 700 公里. 暗环比亮环要暗几倍. 从环的亮度随散射角改变情况推算出环粒的大小约为 2 微米. 这类粒子在吸收高能质子和电子方面效率很低, 不足以说明“先

表 4 木 星 环

	位置(R_J)	宽度、直径(公里)	光 深
暗环, 内半径	1	—	7×10^{-6}
外半径	1.72 ± 0.01	—	—
过渡层	1.72	1500	—
亮环, 内半径	1.72 ± 0.01	6000	3×10^{-5}
外半径	$1.81 \pm 0.01^+$	—	—
亮带§	1.79	700	—
晕	1—1.81	10000*	—
木卫 1979 J1	1.79	30—40	—
木卫 1979 J3	1.79	≈ 40	—

⁺ 有迹象表明这个环延伸至 $1.84 R_J$,

* 为环平面以上的高度

§ 它比周围的环亮 10%

锋 11 号”测到的高能带电粒子通量的减少。为了说明这一情况，环中还应直径为 1 厘米的粒子。

就微米量级的环粒而言，其寿命由于下述原因而非常短暂($\leq 10^2 - 10^3$ 年): 辐射压力; 玻印廷—罗伯逊效应; 行星磁场的电磁扰动; 高能磁层离子的溅射; 微流星的撞击和剥蚀。这个寿命时标远远小于太阳系年令。木星环能成为一个相对稳定的结构，必须仰仗一种能随时补充环粒的源，以维持小尘埃粒子的数量。已经提出几种可能的源: (1) 木星磁层俘获进入其内的带电流星物质; (2) 彗星和流星的碎片; (3) 木卫一火山爆发; (4) 内卫星受到撞击后的喷出物。

仔细检查“旅行者”拍摄的照片，发现木星环的外缘有两个暗而小的卫星。这就使得最后一种机制很有前景。情景如下: 粒子从受击(受流星体撞击)卫星的表面溅射出来，由于玻印廷—罗伯逊效应，它们螺旋式地逐渐向内运动。若由初始碰撞抛出的粒子有很宽的尺度范围，那么由于被流星体碎割和大粒子本身的碎裂，能够连续地产生微米量级的环粒。观测到的木星环亮度轮廓就是这种微米量级的环粒或得或失间的一种平衡。

四、海 王 星 环

从来关于海王星环的光学观测报告都是未确证的，至今还是这样。

据 W. G. Hoyt 说，W. Lassell 曾在 1846 年 10 月 10 日用 24 英寸反光镜肉眼看到过海王星环并在次年得到剑桥大学天文台台长 R. J. Challis 的证实。后者说海王星环的半径是海王星半径的 1.5 倍^[90]。这大概是最早的报告。但其后很多人在寻找海卫的观测中，都说没有海王星环。Lassell 的意见遂被人淡忘。

近年来，由于天王星环和木星环的发现，天文学家重新燃起了寻找海王星环的希望。他们观测海王星掩星事件，试图发现海王星环。

1980 年 8 月 21 日，P. Nicholson 和 T. Jones 观测了海王星掩星事件，报告说观测到一个可能的环掩事件。投影到海王星赤道面上，环离海王星中心的径向距离是海王星赤道半径

的 1.5 倍^[81]。但该资料不完全, 又无佐证性观测。

J. L. Elliot 等观测了 1981 年 5 月 10 日和 21 日两次海王星掩星事件^[82], 都没有检测到海王星环。但他们计算出, 若海王星有位于赤道面上的环, 而环宽又大于 5 公里, 环半径大于 31400 公里, 则环的光深不会大于 0.07。

Vilanova 大学的 C. Harris 在 1981 年秋作博士论文时, 使用的资料是 1968 年 4 月 7 日新西兰约翰山天文台的海王星掩星资料。他发现星光在本体掩附近有一不规则的次掩, 亮度减少约 30%。他认为这是海王星有环的证据。估计环的内边缘离海王星表面约 3600 公里, 外边缘约离 7900 公里, 环平面接近海王星赤道面。E. Guinan 等在分析同一资料后认为, 如果这一事件由赤道环造成, 则环的内、外半径分别为 29800 公里和 36125 公里 (取海王星半径为 25045 公里)^[83]。

Guinan 的分析与 Elliot 的观测不符。可以用环的几何来说明。也可能是海王星的极位置定不准的缘故。

理论上考虑海王星有没有环是困难的。因为已知的三个行星环的起源问题还没有答案。太阳系中有四个巨行星, 其中三个已知带环。如果行星环是巨行星形成过程中直接或间接的后果, 那么海王星似亦理应有环。如果注意到卫星与环的关系, 那么海卫三的发现 (这表明海王星还应有若干小卫星) 更使有环的希望增加。但另一方面, 三个带环的行星都有规则卫星系统, 而海王星的卫星系统却是不规则的。这样, 海王星又未必有环。

印度尼赫鲁中心的 J. Rawal 在研究了太阳系内稳定的共振轨道以后认为, 在海卫一以内有四条稳定轨道, 靠里面的一对轨道 (离海王星中心的距离为 35000 公里和 58000 公里) 可能是海王星环系的位置。

A. Dobrovolskis 认为, 由于海卫一的摄动将造成环平面的翘曲。海王星若有环, 也不会赤道面上, 而是对海王星赤道有值为 0° — 15° 、 165° — 180° 或约 90° 的倾角^[84]。

五、地 球 环

根据化石植物学资料, 大约在 3400 万年以前, 在始新世末地球上冬季温度下降了 20°K (但夏季温度不变)。这种情况持续了大约 1—2 百万年。也就在那一时期内, 有五种放射虫突然绝灭了。

美国的 J. A. O'Keefe 认为, 最直接的解释是当时曾有一个地球环^[85]。由于这个环遮蔽了赤道上的部分阳光, 地球表面才有点变冷。他指出地球上最大的天然玻璃陨石场的年令也正好是 3400 万年, 它从美国的大西洋海岸和加勒比海跨越北美洲, 然后经太平洋中部延伸到印度洋, 构成一个 180° 的弧形地带。O'Keefe 认为玻璃陨石场成因于地球环物质的坠落地面, 而地球环则起源于月球上的火山爆发, 月球火山的位置在月面东经 30° 和 150° 间以及月面纬度北纬 15° 、南纬 15° 处。若物质在月面上的脱离速度为 2.5—3.0 公里/秒, 则 20% 的物质能到达地球大气。速度更慢的物质回落到月面, 更快的则逃逸并进入绕日轨道。

他估计玻璃陨石场的物质总量为 10^9 — 10^{10} 吨, 因此在地心轨道上的环物质应有 5×10^9 — 5×10^{10} 吨。他采用 2.5×10^{10} 吨的数据, 这相当于 10 立方公里的岩石质量。将质量这么大

的物质以半径为 50 微米的颗粒形式分布于从 1.5 至 2.5 地球半径的环形区域中, 可得光学厚度为 0.3。这样选取颗粒半径的目的是使得它们在玻印廷—罗伯逊效应和地磁层等离子体扫荡的作用下能维持 1—2 百万年。后来, 由于多种因素地球环逐渐消失。例如: 环内部的粒子因高层大气的阻尼而坠落地面(形成上述玻璃陨石场); 微陨星的冲击破坏; 太阳风对环粒的驱赶等。

参 考 文 献

- [1] Guerin, D., *Sky & Tel.*, 40 (1970), 88.
- [2] Feibelman, W. A., *Nature*, 214 (1967), 793.
- [3] Gehrels, T. et al., *Science*, 207 (1980), 434.
- [4] Baum, W. A. et al., *B. A. A. S.*, 12 (1980), 700.
- [5] Brahic, A. et al., *ibid.*, 12 (1980), 700.
- [6] Terrile, R. J. & Tokanaga, *ibid.*, 12 (1980), 701.
- [7] Dollfus, A. & Brunier, S., *C. r. hebd. seanc Acad. Sci., Paris*, B290 (1980), 261.
- [8] Lammy, P. L. & Mauron, N., *B. A. A. S.*, 12 (1980), 728.
- [9] Dollfus, A., *Phil. Trans. R. Soc. London*, A303 (1981), 281.
- [10] Smith, B. A. et al., *Science*, 212 (1981), 163; Collins, S. A., *Nature*, 288 (1980), 439.
- [11] Message, P. J., in "Sun and Planetary System", p. 357; Pollack, J. B. & Cuzzi, J. N., *Sci. Amer.*, 245 (1981), No. 5, p. 112.
- [12] Ip, W.-H., *Space Sci. Rev.*, 26 (1980), 39.
- [13] Elliot, J. L. et al., *Nature*, 267 (1977), 330.
- [14] Millis, R. L. et al., *Nature*, 267 (1977), 330.
- [15] Bhattacharyya, J. C. et al., *Nature*, 267 (1977), 331; *The Moon and the Planets*, 21 (1979), 393.
- [16] *IAU. Cir.*, No. 3051.
- [17] 陈道汉、武志贤、杨修义、吴月珍、蒋世仰、黄永伟、叶基棠、翟迪生、谢衷洁、程乾生、张晋, *中国科学*, (1978), 3, 325.
- [18] Elliot, J. L. et al., *A. J.*, 83 (1978), 980.
- [19] Millis, R. L. & Wssserman, L. H., *A. J.*, 83 (1978), 993.
- [20] Nicholson, P. D. et al., *A. J.*, 83 (1978), 1240.
- [21] 陈道汉、杨修义、武志贤、谢衷洁、程乾生、蒋世仰, *科学通报*, 26 (1981), 292.
- [22] Bouchet, P., *IAU Cir.*, No. 3503.
- [23] Elliot, J. L. et al., *A. J.*, 86 (1981), 127; 444.
- [24] Dermott, S. F., *Phil. Trans. R. Soc. London*, A303 (1981), 261.
- [25] Acuna, M. H. & Ness, N. F., *J. G. R.*, 81 (1976), 2917.
- [26] Fillius, W., in T. Gehrels (ed.), *Jupiter*, Uni. of Arizona Press, Tucson, p. 896.
- [27] Roederer, J. G. et al., *J. G. R.*, 82 (1977), 5187.
- [28] Smith, B. A., *Science*, 206 (1979), 927.
- [29] Beklin, E. E. & Wynn-Williams, C. G., *Nature*, 279 (1979), 400.
- [30] Hoyt, W. G., *Sky & Tel.*, p. 284, April, 1978.
- [31] Nicholson, P. D. & Jones, T. J., *IAU Cir. No. 3515*, (1980).
- [32] Elliot, J. L. et al., *Nature*, 294 (1981), 526.
- [33] Guinan, E. F. et al., *B. A. A. S.*, 14 (1982), 658.
- [34] Dobrovolskis, A. R., *Icarus*, 43 (1980), 222.
- [35] O'Keefe, J. A., *B. A. A. S.*, 12 (1980), 510.

Planetary Rings (I)

Chen Dao-han

(Purple Mountain Observatory, Academia Sinica)

Abstract

The data of planetary rings are summarized.