

円盤のパターン形成

道越秀吾 (京都女子大学)

銀河円盤や原始惑星系円盤、惑星環など、宇宙には多様な円盤天体が存在し、スパイラル構造・リングレット・ギャップといったパターンが普遍的に観測される。スケールは大きく異なる一方で、自己重力と差動回転、対象によっては外部重力摂動といった共通要素が、構造形成を支配しているものもある。

そこで本講演では特に土星の環を、円盤力学の理論・数値シミュレーションを検証するための「精密な実験場」として捉える。土星の環では、約 10^5 km スケールの大域構造に対して最良で ~ 0.1 km の解像度で観測が行われ、さらに公転周期に比べて十分に長期の観測が蓄積しているため、理論との詳細比較が可能である。

土星のメインリング (A 環・B 環・C 環) は主として氷粒子からなる粒子系であり、粒子サイズ分布は概ね

$$n(R) \propto R^{-q}, \quad q \sim 2.75 \quad (1)$$

で与えられ $R_{\min} \approx 10\text{--}30$ cm、 $R_{\max} \approx 1\text{--}10$ m 程度が示唆されている [1]。また、粒子のヒル半径は粒子サイズと同程度であり、重力相互作用と物理的な衝突が重要な物理過程である。

以下では、円盤自身の状態によって生じる自発的構造形成と、衛星などの外部摂動源によって生じる構造に分けて議論する。

1 自発的構造形成

外部摂動がなくとも、円盤自身の状態（面密度・粘性・エネルギーバランスなど）により自発的に構造が生じうる。まず、ロッシュ限界より内側の領域において、Toomre の Q

$$Q = \frac{c_r \kappa}{3.36 G \Sigma} \quad (2)$$

が小さい条件で、非弾性衝突を伴う自己重力粒子系では自己重力ウェイクが発生する。N 体計算では $Q < 2$ のときに形成されることが示されている [2]。このウェイクは回転方向に対しておよそ 20 度傾いた trailing な密度構造として現れ、典型的な半径方向のスケールは ~ 100 m 程度である [3]。直接撮像は困難だが、観測角によって明るさが変わる非対称性として存在が支持される。この構造は円盤の角運動量輸送率に効くため重要な構造である。

粘性が面密度に強く依存し ($\nu \propto \Sigma^\beta$ など)、 β が臨界値 (~ 1) を超えると、エピサイクル振動の振幅が増幅される [4]。局所シミュレーションでは数百 m~1 km 程度の軸対称リングレット状構造が再現され、A 環で観測される sub-km 構造の一部を説明しうる。一方で、過安定における自己重力の役割や大域効果などはまだ検討されておらず今後の課題である。

2 衛星による構造形成

衛星の公転と環粒子のエピサイクル運動が共鳴するリンドブラッド共鳴点で、スパイラル密度波が励起される。線形理論では、密度波は共鳴点から衛星の方向にしか伝搬できず、反対側はエバネッセント領

域になる [5]。波長や減衰長の解析から、その場所の面密度や粘性を推定でき、観測と理論の架橋となる。

衛星近傍では複数の共鳴が重なり、空間的に連続なトルクが働いて環物質を衛星から遠ざかる向きに移動させ、ギャップが形成される [5]。ギャップ幅は広げるトルクと粘性拡散で埋める作用の釣り合いで定まる見積もられている。

さらに、ギャップ縁では鉛直方向の顕著な構造が見られる。たとえば B リング外端には影の長さから高さ ~ 3.5 km と見積もられる構造があるが、その起源は未解決問題である。一方、Keeler gap 縁については、自己重力を含むグローバルシミュレーションにより、縁の複雑構造や鉛直方向は粒子衝突による跳ね上げで説明可能であることが示されている [6, 7]。

ギャップを開くほど大きくない埋没した小天体でも、局所的な S 字状の構造（プロペラ）を作る [8]。A 環の狭い領域に多数見つかっており、代表的サイズは直径 40–500 m 程度とされる。

3 まとめと今後の課題

土星の環では、自己重力ウェイク (~ 100 m) から密度波・ギャップ (km ~ 100 km) に至るまで、多様なスケールのパターンが同一天体内で観測される。高解像・長期観測データにより、理論・シミュレーションと直接比較できる点で、土星環は円盤ダイナミクスの「精密な実験場」として重要な天体である。

一方で未解決問題も多い。たとえば、一部の密度波では、谷に沿って塊状構造 (straw-like clumps) が顕著に現れ、その起源は未解明である。また、B リング外端の km スケールの鉛直構造や、B リングの ~ 100 km 構造の起源などは、既存の理論やシミュレーションでは説明できていない。これらの理解には、自己重力・非弾性衝突などを同時に扱い、異なるスケール間の結合（ウェイク × 波動 × 永年進化）を同時に扱える理論とシミュレーションの高度化が必要であり、今後の課題である。

参考文献

- [1] Zebker, Howard A., Essam A. Marouf, and G. Leonard Tyler. Saturn's rings: Particle size distributions for thin layer models. *Icarus* 64.3 (1985): 531-548.
- [2] Salo, Heikki. "Simulations of dense planetary rings: III. Self-gravitating identical particles." *Icarus* 117.2 (1995): 287-312.
- [3] Michikoshi, S., Fujii, A., Kokubo, E., & Salo, H. (2015). Dynamics of self-gravity wakes in dense planetary rings. I. Pitch angle. *The Astrophysical Journal*, 812(2), 151.
- [4] Schmit, U., & Tscharnutter, W. M. (1995). A fluid dynamical treatment of the common action of self-gravitation, collisions, and rotation in Saturn's B-ring. *Icarus*, 115(2), 304-319.
- [5] Meyer-Vernet, N., & Sicardy, B. (1987). On the physics of resonant disk-satellite interaction. *Icarus*, 69(1), 157-175.
- [6] Torii, N., Ida, S., Kokubo, E., & Michikoshi, S. (2024). Global N-body simulation of gap edge structures created by perturbations from a small satellite embedded in Saturn's rings. *Icarus*, 415, 116029.
- [7] Torii, N., Ida, S., Kokubo, E., & Michikoshi, S. (2025). Global N-body simulation of gap edge structures created by perturbations from a small satellite embedded in Saturn's rings II: The effect of satellite's orbital eccentricity and inclination. *Icarus*, 116608.
- [8] Michikoshi, S., & Kokubo, E. (2011). Formation of a propeller structure by a moonlet in a dense planetary ring. *The Astrophysical Journal Letters*, 732(2), L23.