

土星の環のプロペラ構造

道越秀吾、小久保英一郎

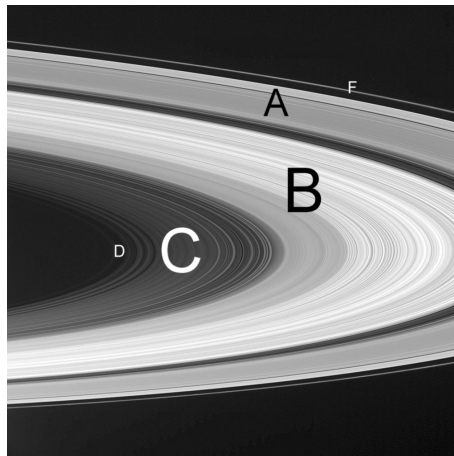
国立天文台 天文シミュレーションプロジェクト

2010年11月22日

概要

- 土星の高密度リングの小衛星周囲の局所 N 体シミュレーションを行なった
- リング密度が低い場合、プロペラ構造ができる
- リング密度が高い場合、自己重力 Wake 構造によってプロペラ構造がかき消される
- プロペラができる条件は (重力不安定波長) \ll (衛星のヒル半径)

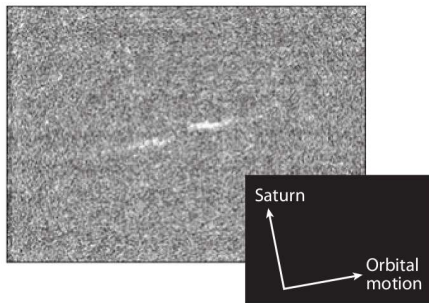
土星の環の概要



(Cassini/NASA)

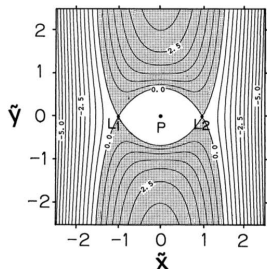
- 土星からの距離に応じて C リング、B リング、、と分類
- 各リングは面密度が大きく異なる。B リング、A リングは密度が濃く明るい
- 土星探査機 Cassini(2004 年-) による詳細な観測が行なわれており、様々な構造が明らかになってきた。
- A リングで **プロペラ構造** の発見 (Tiscareno et al. 2006)
- B リングで **embedded moonlet** の発見 (Porco et al. 2009)

Aリングにおける「プロペラ構造」の発見



- 半径方向の幅は 300m 程度、回転方向には 3km 程度
- 観測できない小さな小衛星 (moonlet) によって作られている
- A リングでは多くのプロペラが観測されている

Tiscareno et al. 2006

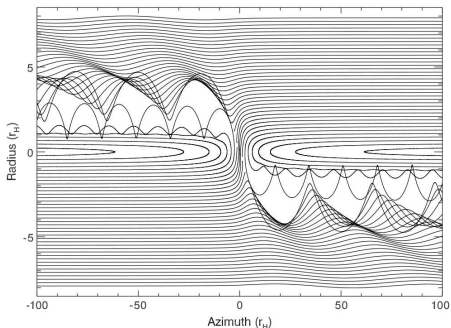


公転する天体まわりの回転系でのポテンシャル

ヒル半径の意味

- 中心星を公転する天体の重力が支配する領域
- 典型的スケール (ヒル半径) は $r_H = \left(\frac{m}{3M}\right)^{1/3} a_0$
- 無次元パラメータ $r_H/2r_p$ は重力の効き具合を特徴付ける

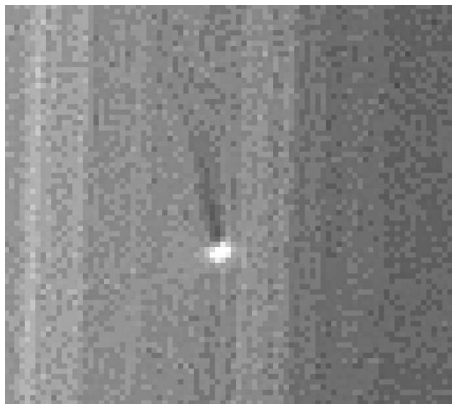
プロペラ形成の概要



衝突や粒子間重力を無視した場合の粒子軌道 (Tiscareno et al. 2008)

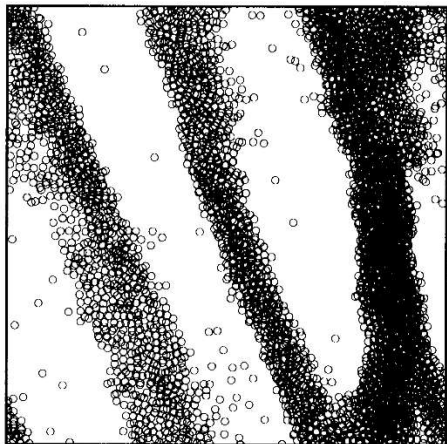
- 理論的には流体近似を用いて予言された (Spahn and Sremcevic 2000)
- 散乱によってヒル半径でスケールされる部分ギャップができる
- もし散乱が弱ければ粘性で埋まり部分ギャップができる (Spahn and Sremcevic 2000)

B リングに埋まった小衛星



- B リング (土星から 117000km)
- 太陽との位置関係により小衛星の影が見える
- 影より小衛星の大きさが見積もられている (直径 300m)
- 300m の小衛星があるのにプロペラ構造が見えない。

Porco et al. 2009



Daisaka and Ida 1999

- Bリングでは自己重力不安定によって自己重力 wake が発生 (Salo 1995)
- wake 間の典型的な間隔は臨界重力不安定波長程度 $\lambda = 4\pi^2 G\Sigma/\Omega^2$ (Salo 1995)
- 自己重力 wake がプロペラ形成に影響を与えた可能性がある。

これまでのプロペラ形成のシミュレーション

- 自己重力なし、サイズ分布なし (Seiss et al. 2005)
- 自己重力あり、サイズ分布あり (Lewis and Stewart 2009)。ただし面密度が低く B リングに適用できない

本研究

- 自己重力、サイズ分布入りのローカルシミュレーション
- 面密度が高い場合 (B リングに対応) の計算も行なう
- プロペラ形成条件を明かにする

ヒル方程式

$$\frac{d^2 x_i}{dt^2} = 2\Omega v_{yi} + 3\Omega^2 x_i + \sum_j \frac{Gm_j}{r_{ij}^3} (x_j - x_i) - \frac{GM}{r_i^3} x_i$$

$$\frac{d^2 y_i}{dt^2} = -2\Omega v_{xi} + \sum_j \frac{Gm_j}{r_{ij}^3} (y_j - y_i) - \frac{GM}{r_i^3} y_i$$

$$\frac{d^2 z_i}{dt^2} = -\Omega^2 z_i + \sum_j \frac{Gm_j}{r_{ij}^3} (z_j - z_i) - \frac{GM}{r_i^3} z_i$$

- M は小衛星の質量。小衛星は座標原点に固定
- 局所回転系
- コリオリ力、粒子間重力、moonlet からの重力を含む

モデル

- 中心に moonlet をおいた局所座標系
- moonlet の大きさは半径 150m の球
- サイズ分布 ($R_{\min} = 2 \text{ m}$, $R_{\max} = 10 \text{ m}$)
- 粒子間および粒子 moonlet 間是非弾性衝突、摩擦は無視
- はねかえり係数は、Bridges et al. 1984 の衝突速度依存モデルを用いた
- Hard-sphere model

計算法

- 重力は直接法で計算
- 可変共有タイムステップ、2 次の Leapfrog 法
- 高密度モデルは 140 万體、低密度モデルは 20 万體
- **GRAPE-DR** を用いて計算

プロペラ形成

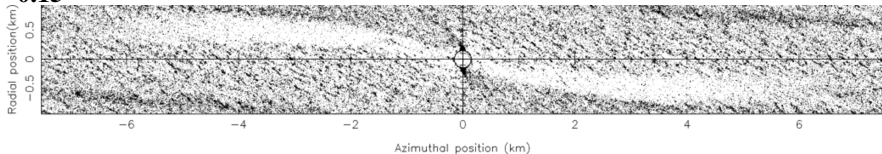


(可視化:国立天文台 4D2U プロジェクト 武田隆顕)

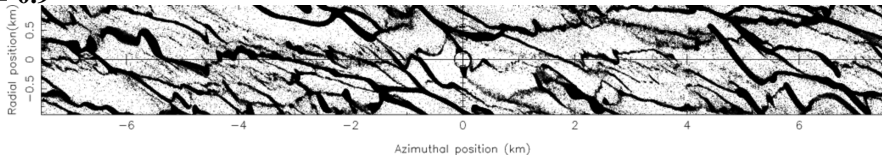
- 用いたモデルでプロペラ構造が出来る

低密度と高密度の場合

$\tau = 0.15$



$\tau = 0.9$



- 高密度の場合は wake がプロペラ領域にまで侵入している
- 高密度の場合はプロペラは見えないだろう
- 面密度がプロペラ形成を決めている

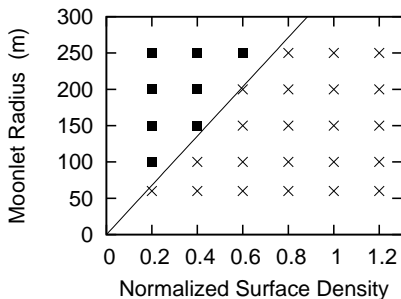
質量の比較による導出

- Wake に比べて moonlet が無視できること
- Wake の典型的な質量 $\Sigma\lambda^2$ が moonlet 質量 M よりも大きければ moonlet を無視できる

以下が条件。(r_H : moonlet のヒル半径、 λ : 重力不安定波長)

$$\Rightarrow \lambda \gg r_H$$

数値シミュレーションによる検証



- 密度が定常的に十分に減少している場合、プロペラ形成したとみなした。
- 条件 $\lambda \ll r_H$ (重力不安定波長 \ll ヒル半径) でよくプロペラ形成を説明する

$$\Sigma < \Sigma_{\text{cr}} = C \left(\frac{M_s^2 \rho_s}{144\pi^5 a^6} \right)^{1/3} R_s$$

今回の研究

- 自己重力を考慮して小衛星周囲の高密度リングのシミュレーションを行った
- 高密度の場合は、自己重力 Wake によってプロペラ構造がかき消されることが分かった
- プロペラが出来る条件は、(重力不安定波長) \ll (ヒル半径)

今後の課題

- moonlet のランダムウォークの拡散係数
- プロペラの形のパラメータ依存性