

惑星環の構造と力学的特性

道越秀吾

同志社大学

2014 年 8 月 28 日

概要

- 環の力学（特に粘性を中心に）
- 環の起源のモデルの概要

① 概要

② 土星の環の構造

③ 環の力学の基本

④ 粘性の理論

⑤ 土星の環の起源

概要

- 環の基本的な性質
- 粘性に関連する構造

- ① 概要
- ② 土星の環の構造
 - 基本的な物理量
 - 土星の環の代表的な構造
- ③ 環の力学の基本
- ④ 粘性の理論
- ⑤ 土星の環の起源

確認されている惑星環

- 土星

- 光学的厚み τ : 大きい (最大部分で 5 以上)
- 粒子サイズ : センチ～メートル

- 天王星

- 掩蔽観測により確認 (1977 年)
- 光学的厚み τ : 大きい ($\tau \sim 2$)

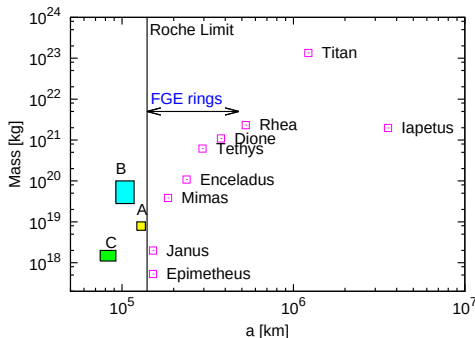
- 木星

- ボイジャーによるダストリングの発見 (1979 年)
- 光学的厚み τ : 非常に小さい ($\tau \sim 10^{-6}$)

- 海王星

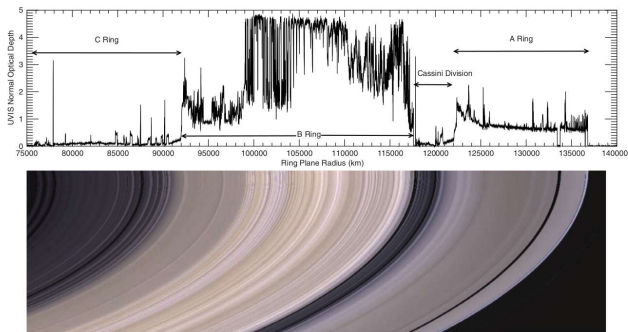
- ボイジャー 2 号による確認 (1989 年)
- 部分的に途切れたアーク (ring arc) の存在
- 光学的厚み τ : 小さい ($\tau \sim 0.1$)

土星の環と衛星



- Roche Limit を境にして環と衛星に分かれる
- 環全体の質量はほとんど B 環が占めており、Mimas 程度 (B 環の質量は正確ではないかも (e.g., Robbins et al. 2010))
- A 環, B 環の外端は衛星との共鳴で維持される
- A 環の外側にダストリング (F 環, G 環, E 環) ← 衛星から影響
- 内側の小さい衛星形成にはリングが関係 (Charnoz et al. 2010, Canup 2010)

Dense Ring の密度構造



Colwell et al. 2009

光学的厚さ τ

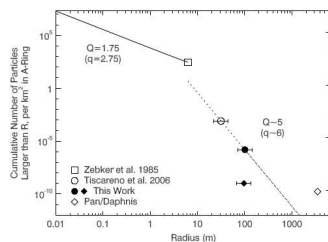
C 環	0.1 程度
B 環	1 以上
Cassini 間隙	0.1 程度
A 環	0.5 から 1 程度

粒子の物質とサイズ分布

$$n(R)dR \propto R^{-q}dR$$

- $R_{\min} = 10 - 30\text{cm}$
- $R_{\max} = 1 - 10\text{m}$, $q \sim 3$

(Zebker et al. 1985, French and Nicholson 2000)

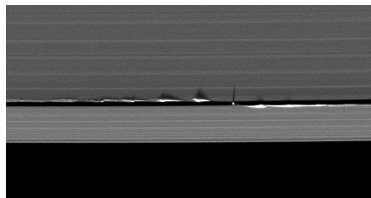
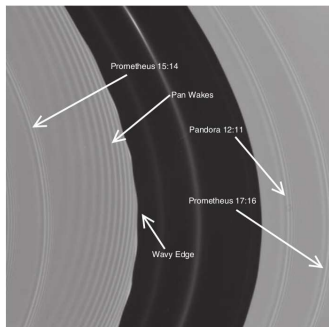


Tiscareno et al. 2008

- asteroid belt のサイズ分布 ($q \sim 3.5$), fragmentation の平衡分布 (Williams and Wetherill 1994, Tanaka et al. 1996)
- 水の氷でできている
- $10\text{m} < R < 1000\text{m}$ の小衛星 (moonlet) $\Rightarrow$ ベキが急 ($q \sim 5$)

空隙

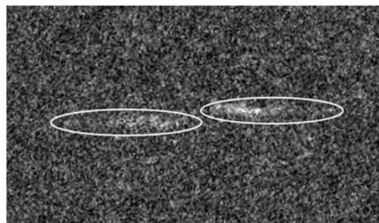
- 空隙の形成
 - 空隙内の衛星による重力散乱 (エンケ空隙、キラー空隙)
- **粘性拡散**とのバランスで空隙の幅が決まる



キラーの空隙と衛星ダフニス

エンケの空隙 (Colwell et al. 2009)

プロペラ

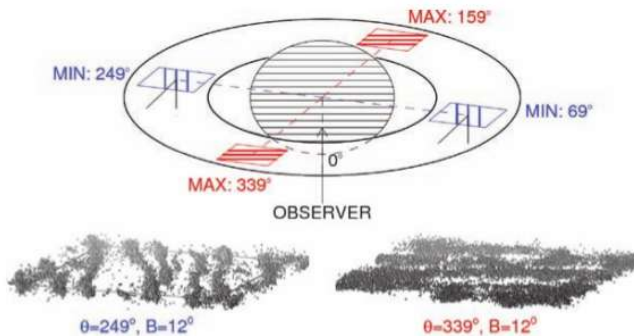


Tiscareno et al. 2006

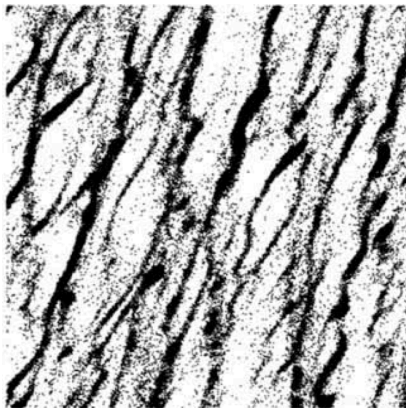
- 回転方向に揃った2つの微小な模様
- 大きさは動径方向に数百メートル
- 小衛星による部分ギャップと関係？
 - ⇒ 方位角方向の長さは粘性係数と関係

非軸対称構造

- 観測によって非軸対称構造の存在が示されていた (e.g., Dones et al. 1993, French et al. 2007)
- 角度はおよそ 20°



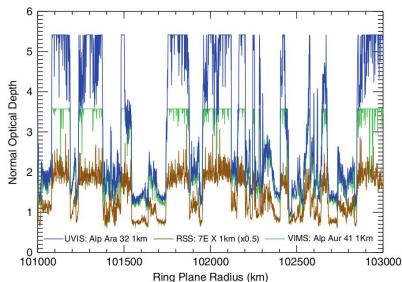
非軸対称構造の原因



シミュレーション例 (Robbins et al. 2010)

- A リングと B リングの一部で非軸対称性が見られる
- 自己重力ウェイク構造と考えられる (Salo 1992, 1995)
- 重力粘性の原因

B リング中心部分の Bimodal 構造



(Colwell et al. 2007)

- B リングの中心部分で $\tau \simeq 1.5$ 程度の領域と $\tau > 4$ の領域が交互に見られる (Colwell et al. 2007)
- 高 τ の幅は数 10km から 150km 程度
- 見積もられる粘性 $\Rightarrow$ 拡散時間は短い ($T \sim 5 \times 10^5 \text{yr}$) $\Rightarrow$ 構造が維持されている
- 粘性不安定が提案された (Lissauer et al. 1981) $\Rightarrow$ 現在ではその発生は否定的に考えられている
- 力学機構はまだはっきりしていない

小スケール軸対称周期構造

- 150m から 250m 程度の小スケール構造の存在が掩蔽観測によって分かった。
- A リングの中でも比較的 τ が高い場所と B リングの一部領域
- 自己重力ウェイク構造と違って傾き角が無い (Thomson et al. 2007, Colwell et al. 2007)
- $\Rightarrow$ 粘性過安定が1つの候補

概要

- ① 概要
- ② 土星の環の構造
- ③ 環の力学の基本
 - オプティカルデプスとヒル半径
 - 重力不安定
 - ランダム速度
 - 自己重力ウェイク
- ④ 粘性の理論
- ⑤ 土星の環の起源

ヒル半径

土星まわりに2つの天体があった場合、**潮汐力よりも自己重力が効く距離**

ヒル半径

$$R_H = \left(\frac{m_1 + m_2}{3M_{\text{Sat}}} \right)^{1/3} a$$

無次元化されたヒル半径

$$\begin{aligned}\tilde{r}_H &= \frac{R_H}{r_1 + r_2} = \left(\frac{\rho}{\rho_{\text{Sat}}} \right)^{1/3} \left(\frac{a}{R_{\text{Sat}}} \right) \frac{(1 + \mu)^{1/3}}{1 + \mu^{1/3}} \\ &= 0.82 \left(\frac{\rho}{900 \text{kg m}^{-3}} \right)^{1/3} \times \left(\frac{a}{100,000 \text{km}} \right)\end{aligned}$$

ここで $\mu = m_2/m_1$ とする。

土星の環では、 $\tilde{r}_H \lesssim 1$ 程度

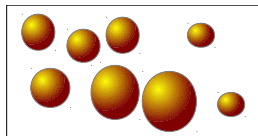
土星の環の力学の基本パラメータ

 τ

Dynamical optical depth

$$\tau = \frac{\sum_i \pi r_i^2}{S}$$

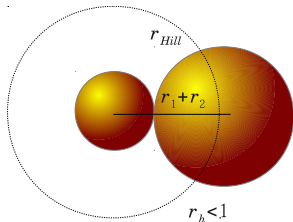
平面で見た filling factor $\Rightarrow$ 面密度
と関係


 S

無次元化されたヒル半径

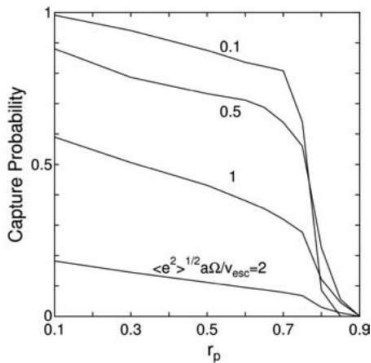
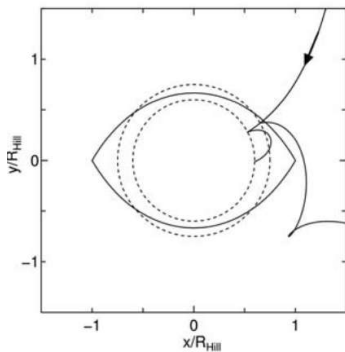
$$\tilde{r}_h = \frac{1}{\tilde{r}_p} = \frac{R_{\text{Hill}}}{R_1 + R_2}$$

直感的には $\tilde{r}_h < 1$ のときは相手の
粒子を束縛できない



降着

- ヒル半径に対して物理半径が大きい時 ($\tilde{r}_H \lesssim 1$) 降着できない (Ohtsuki 1993)
- $\tilde{r}_H \lesssim 1$ で環、 $\tilde{r}_H \gtrsim 1$ ではアグリゲート



重力不安定

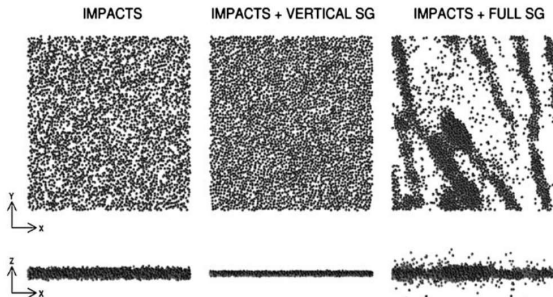
Toomre の Q 値

$$Q = \frac{c_r \kappa}{3.36 G \Sigma}$$

- κ : エピサイクル振動数
 - c_r : r 方向の速度分散
 - Σ : 面密度
-
- 無衝突系の軸対称解析 (Toomre 1964) $\Rightarrow Q < 1$ で**自己重力不安定**
 - $Q \lesssim 2$ で**非軸対称構造の形成** (Julian and Toomre 1966, Salo 1992)

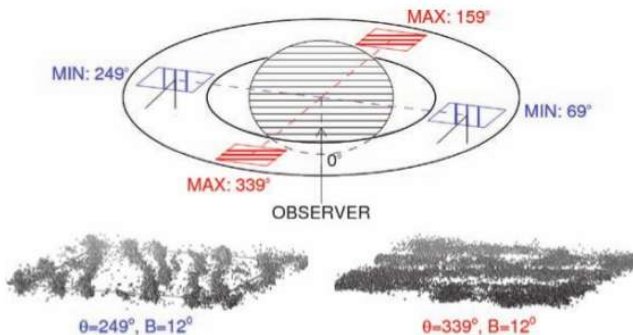
自己重力ウェイク

- $\tilde{r}_H \lesssim 1$ (降着できない) でかつ $Q \lesssim 2$ (重力不安定) のとき
- 重力による粒子の塊の形成, 潮汐力による破壊 $\Rightarrow$ 自己重力ウェイク (または Spiral chaos (Toomre 1991))
- 特徴的スケール $\lambda = \frac{4\pi^2 G \Sigma}{\Omega^2}$
- ピッチ角 ($\sim 20^\circ$) はパラメータ ($\tau, \tilde{r}_H, \epsilon$) に依存しない
 - 衝突を無視しても同じ角度 ($\sim 20^\circ$) $\Rightarrow$ 円盤の回転則 (e.g, κ/Ω) だけで決まっている (Michikoshi and Kokubo 2014)



自己重力ウェイクの存在

- 非軸対称構造の存在が示されていることから、AリングとBリングの一部には自己重力ウェイク構造が存在すると思われる

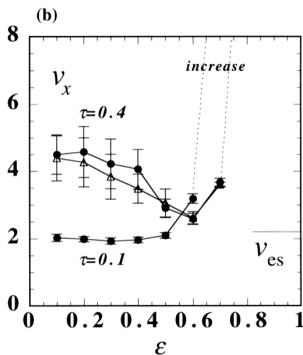


ランダム速度

- **ランダム速度**によって**重力不安定**が起きるか決まる

$$Q = \frac{C_T \kappa}{3.36 G \Sigma}$$

- 衝突係数 ϵ が臨界値 (~ 0.65) より大きい場合は熱不安定が発生する (Goldreich and Tremaine 1978, Salo 1995)
- ϵ が小さければ定常値が存在。 ϵ 依存性は顕著ではない



ランダム速度を変化させる要因

- 粘性加熱 (加熱) (Goldreich and Tremaine 1978, Shukhman 1984) (⇒ 式の意味は後で)

$$\frac{dc^2}{dt} = \left(\frac{dv}{dx}\right)^2 \nu = f_{trans} c^2 + f_{col} (R\Omega)^2$$

$$f_{trans} = 0.15 \times \frac{9}{4} \frac{\tau}{1 + \tau^2} \Omega, \quad f_{col} = \frac{9}{4} \tau \Omega$$

- 重力散乱 (加熱) (Ida 1990)

$$\frac{dc^2}{dt} = f_{vs} \frac{v_{esc}^4}{c^2}$$

$$f_{vs} = \frac{\Omega \tau \log \Lambda}{4}$$

- 衝突散逸 (冷却) (e.g., Goldreich and Tremaine 1978)

$$\frac{dc^2}{dt} = -f_{damp} c^2$$

$$f_{damp} = \frac{1}{6} \Omega \tau (1 - \epsilon^2)$$

$$\frac{dc^2}{dt} = \underbrace{f_{trans} c^2 + f_{col} (R\Omega)^2}_{\text{粘性加熱}} + \underbrace{f_{vs} \frac{v_{esc}^4}{c^2}}_{\text{重力散乱}} - \underbrace{f_{damp} c^2}_{\text{衝突散逸}}$$

安定解の場合 ⇒ RHS=0 からランダム速度

粘性加熱卓越の場合のランダム速度

$$\frac{dc^2}{dt} = \underbrace{f_{trans}c^2 + f_{col}(r_p\Omega)^2}_{\text{粘性加熱}} + \underbrace{f_{vis}v_{esc}^4/c^2}_{\text{重力散乱}} - \underbrace{f_{damp}c^2}_{\text{衝突散逸}} = 0$$

$$\Rightarrow c = \sqrt{\frac{f_{col}}{f_{damp}}} r_p \Omega = \frac{2.4}{\sqrt{1-\epsilon^2}} r_p \Omega$$

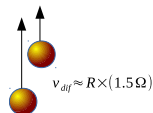
速度は $2r_p\Omega$ 程度

衝突 (粘性) 卓越の場合のランダム速度

衝突時のシアの速度差 $\Rightarrow$ ランダム速度に変換
($\tilde{r}_H < 0.6$)

$$v_{\text{ran}} \sim 2r_p\Omega$$

※ $f_{trans}c^2$ が卓越することはない



重力卓越の場合のランダム速度

$$\frac{dc^2}{dt} = \underbrace{f_{\text{visc}} c^2 + f_{\text{pl}} \left(\frac{r_H Q}{4} \right)^2}_{\text{粘性加熱}} + \underbrace{f_{vs} \frac{v_{esc}^4}{c^2}}_{\text{重力散乱}} - \underbrace{f_{damp} c^2}_{\text{衝突散逸}} = 0$$

$$\Rightarrow c = \left(\frac{f_{vs}}{f_{damp}} \right)^{1/4} v_{esc} = \frac{1.6}{(1 - \epsilon^2)^{1/4}} v_{esc}$$

典型的には v_{esc} 程度

重力卓越の場合のランダム速度

重力散乱が卓越 $\Rightarrow$ 脱出速度程度 ($\tilde{r}_H > 0.6$)

$$v_{\text{ran}} \sim v_{\text{esc}} = \sqrt{\frac{Gm}{R}}$$

- 脱出速度になる理由
 - 重力の散乱断面積 < 幾何断面積 $\Rightarrow$ 衝突が卓越 $\Rightarrow$ 速度減少
 - 重力の散乱断面積 > 幾何断面積 $\Rightarrow$ 重力散乱が卓越 $\Rightarrow$ 速度増加
- 「重力の散乱断面積 $\sim$ 幾何断面積」で落ち着く
- $mv^2 \sim \frac{Gm^2}{R} \Rightarrow v \sim v_{esc}$

ウェイクの発生条件

ウェイクが無い場合のランダム速度 (Salo 1995, Ohtsuki 1999)

$$v_{\text{ran}} \sim \begin{cases} 2r_p\Omega & \tilde{r}_h < 0.5 \\ v_{\text{esc}} & \tilde{r}_h > 0.5 \end{cases}$$

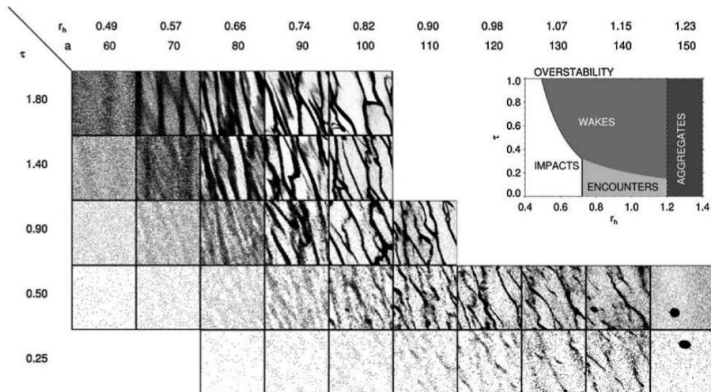
$$Q = \frac{v_{\text{ran}}\kappa}{3.36G\Sigma} \sim 2$$

より重力不安定の発生条件 (Ohtsuki and Emori 2000)

$$\tau > \begin{cases} 0.08\tilde{r}_h^{-3} & \tilde{r}_h < 0.5 \\ 0.2\tilde{r}_h^{-3/2} & \tilde{r}_h > 0.5 \end{cases}$$

- τ と r_h が大きいほどウェイクが形成されやすい

自己重力ウェイク発生の条件



概要

- ① 概要
- ② 土星の環の構造
- ③ 環の力学の基本
- ④ 粘性の理論
 - Translational Viscosity
 - Collisional Viscosity
 - 重力粘性
 - 粘性による構造形成
- ⑤ 土星の環の起源

粘性

- 粘性の意味：速度場の異なる流体素片間の運動量交換

希薄ガスの場合

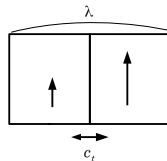
$$\nu \sim \lambda_{\text{mfp}}^2 \omega_{\text{col}}$$

($\omega_{\text{col}} = \lambda_{\text{mfp}}/c$ は衝突頻度)

- L を一回の衝突で運動量を運ぶ距離として

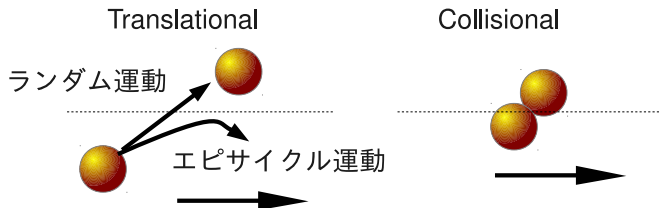
$$\nu \sim L^2 \omega_{\text{col}}$$

と一般化するとリング系の粘性は理解できる



各粘性の概要

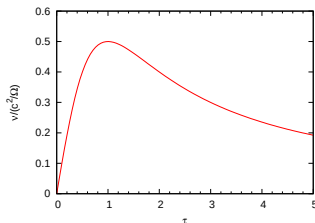
- Translational viscosity (Goldreich and Tremaine 1978)
 - 基本的にはガス粘性と同じ
 - 低密度の場合はエピサイクル運動の効果が効くように拡張
- Collisional viscosity (Shukhman 1984, Araki and Tremaine 1986)
 - 粒子の有限サイズ効果 $\Rightarrow$ ランダム速度がゼロでも運動量輸送可能
- 重力粘性 (Daisaka et al. 2001, Yasui et al. 2012)
 - 非軸対象密度構造と自己重力による角運動量輸送に起因



Translational viscosity

- 局所回転系での Boltzman 方程式 + BGK 近似 (または triaxial Gaussian の仮定) で以下の式を導ける (粒子の体積効果は無視)(Goldreich and Tremaine 1978)

$$\nu = \frac{c^2}{\Omega} \frac{\tau}{1 + \tau^2}$$



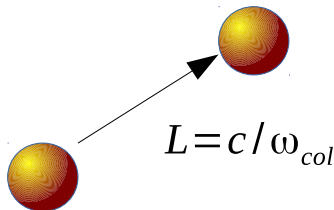
高密度 (高 τ) の場合と低密度 (低 τ) の場合について考える

Translational viscosity(高密度極限)

- 高頻度衝突するので、軌道はほぼ直線 $\Rightarrow$ 衝突距離 $\lambda_{mfp} = c/\omega_{col}$
- 衝突頻度 $\omega_{col} = \tau\Omega$

$$\nu \simeq L^2 \omega_{col} = \frac{c^2}{\Omega \tau}$$

- つまり、普通のガスの粘性と同じ



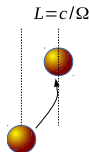
Translational viscosity(低密度極限)

- 低密度 $\Rightarrow$ 衝突時間が長いので粒子が移動中にコリオリ力で曲がる $\Rightarrow$ 衝突距離の見積もりが変わる
- エピサイクル振動の振幅 $\sim c/\Omega$ を衝突距離とみなす

$$\lambda_{mfp} = \frac{c}{\Omega}$$

- 衝突頻度 $\omega_{col} = \tau\Omega$

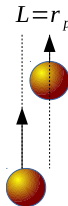
$$\nu = L^2\omega_{col} = \frac{c^2\tau}{\Omega}$$



Collisional viscosity

- collisional viscosity (Shukhman 1984, Araki and Tremaine 1986)
 - 粒子のサイズが有限なのでランダム速度がゼロでも運動量輸送可能
- 衝突距離は粒子サイズ程度

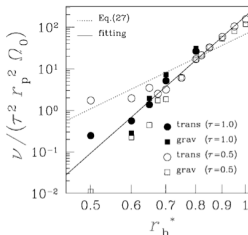
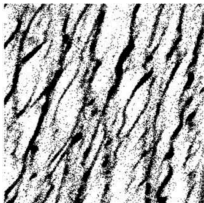
$$\nu = L^2 \omega_{col} = \Omega r_p^2 \tau$$



重力粘性

- 自己重力ウェイク構造 $\Rightarrow$ 角運動量輸送
- 重力不安定の典型的なスケール λ , Ω を用いて

$$\nu \propto \lambda^2 \Omega \Rightarrow \nu = C(\tilde{r}_h) \frac{G^2 \Sigma^2}{\Omega^3}$$



- 修正因子がシミュレーションより求められている: (Daisaka et al. 2001)

$$C(\tilde{r}_h) = 26 \tilde{r}_h^5$$

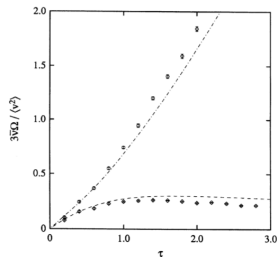
- C を解析的な導出はできていない
 - $\Rightarrow$ 自己重力ウェイク構造の物理的特性の理解が必要不可欠だろう (振幅や波長など)

どの粘性が効くか？(重力粘性, Translational, Collisional)

Wake ができない場合

- Translational + Collisional でよく説明される (Wisdom and Tremaine 1988)

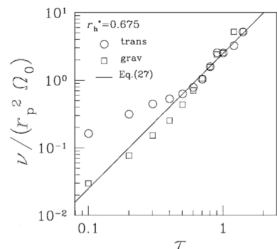
$$\nu = \underbrace{\frac{c^2}{\Omega} \frac{\tau}{1 + \tau^2}}_{\text{Translational}} + \underbrace{\Omega r_p^2 \tau}_{\text{Collisional}}$$



Wake ができる場合

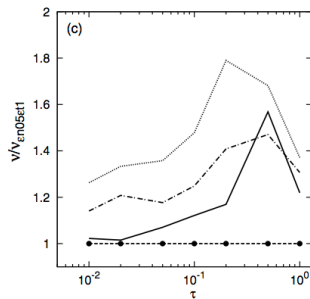
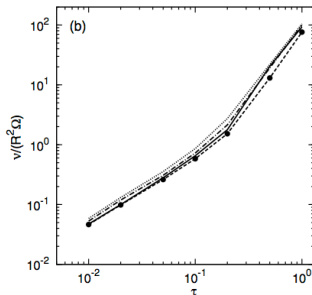
$$\nu_{\text{grav}} \simeq \nu_{\text{trans}} > \nu_{\text{col}} \Rightarrow \nu_{\text{total}} = 2\nu_{\text{grav}} \text{ よって、}$$

$$\nu = 52 \tilde{r}_h^5 \frac{G^2 \Sigma^2}{\Omega^3}$$



スピンの効果

スピンの考慮 $\Rightarrow$ ファクター 2 程度変わる (Yasui et al. 2012)



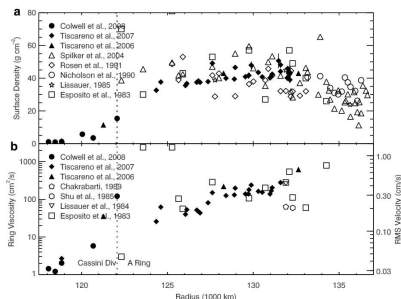
粘性係数

(摩擦無しの場合に対して) 規格化された粘性係数

- 実線 ($\epsilon_n = \epsilon_n(v), \epsilon_t = 0.5$), 点線 ($\epsilon_n = 0.5, \epsilon_t = 0$), 棒点線 ($\epsilon_n = 0.5, \epsilon_t = 0.5$), 棒線と円 ($\epsilon_n = 0.5, \epsilon_t = 1.0$)
- より広いパラメータで適用可能なフィッティング公式への拡張 (Yasui et al. 2012)

土星の環の面密度と粘性の推定

- 衛星の inner Lindblad 共鳴からの密度波
- 観測と理論の比較から A リングの面密度 ($\Leftarrow$ 波長) と粘性 ($\Leftarrow$ 減衰のスケール) が推定されている (e.g., Colwell et al. 2008)
- A リングの面密度 ($\sim 40\text{g/cm}^2$)、粘性 ($\sim 100\text{g/cm}^2$)



粘性に関連する力学機構

リング系の粘性は面密度 (τ) に依存性がある:

$$\nu = \nu(\Sigma) \propto \tau^\beta$$

- β の値によっては、**不安定**や**過安定**となりうる。
 - $\Rightarrow$ 数100メートルの波長の軸対称密度構造の説明？

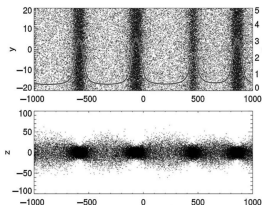
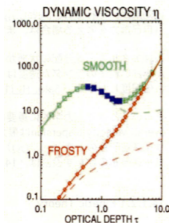
- **粘性過安定** (Kato 1978, Borderies et al. 1985, Schmidt and Salo 2003, Latter and Ogilvie 2006)
- **粘性不安定** (Lukkari 1981, Salo and Schmidt 2010)
- **シアレイト不安定** (Tremaine 2003)

粘性不安定

粘性不安定の条件

$$\nu = \nu(\Sigma) \propto \tau^\beta$$

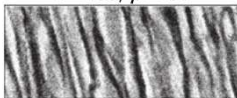
$$\frac{\partial \eta}{\partial \Sigma} = \frac{\partial(\Sigma \nu)}{\partial \Sigma} < 0 \implies \beta < -1$$



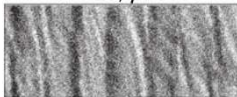
- 自己重力が効かず、特定の衝突散逸モデル (Smooth model) と τ がある条件を満たすとき ($\tau \sim 1$) で不安定が発生 (Salo and Schmidt 2010)

粘性過安定

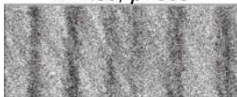
$R=1.00, \rho=450$



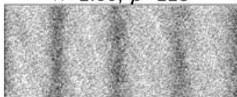
$R=1.25, \rho=360$



$R=1.50, \rho=300$



$R=2.00, \rho=225$



$$\nu = \nu(\Sigma) \propto \tau^\beta$$

- β が大きい場合 $\beta > \beta_{\text{cr}} \implies$ 粘性過安定
 - 線形解析 : $\beta \gtrsim 0$ (Schmit and Tscharnuter 1995)
 - シミュレーション : $\beta \gtrsim 1$ (Salo et al. 2001)
- 重力粘性では $\beta = 2$ (Daisaka et al. 2001) $\implies$ 粘性過安定の条件を満たす
- シミュレーションでは半径方向に振動する密度パターンが見られる

概要

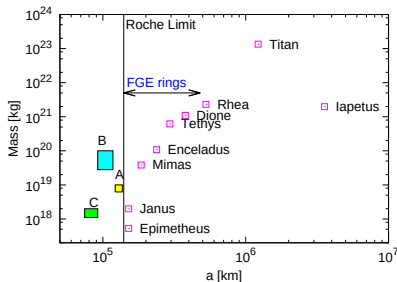
- 粘性の応用
- 環の起源の簡単なまとめ

- ① 概要
- ② 土星の環の構造
- ③ 環の力学の基本
- ④ 粘性の理論
- ⑤ 土星の環の起源
 - 土星の環の形成モデルへの制限
 - 代表的な形成モデル

土星の環の質量

● 環の質量

- 太陽系の他の環より大きい $\Rightarrow$ 衛星ミマス程度 ($\sim 3.7 \times 10^{19} \text{ kg}$) との見積もり (Esposito et al. 1983)
- 衛星 1 個分程度の質量の説明ができるか



粘性拡散の見積もり

粘性拡散のタイムスケールは

$$T \sim \frac{\Delta r^2}{\nu}$$

- A リングの拡散時間:

$\Delta r = 15000\text{km}$, $\nu \sim 100\text{cm}^2/\text{s}$ (粘性は観測より)

$$T \sim 0.7\text{Gyr}$$

- B リングの拡散時間

$\Delta r = 25000\text{km}$, $\nu \sim 50\text{cm}^2/\text{s}$ (Daisaka et al. 2001, $\tau \sim 1$)

$$T \sim 4\text{Gyr}$$

- C リングの拡散時間

$\Delta r = 20000\text{km}$, $\nu \sim 0.27\text{cm}^2/\text{s}$ (Goldreich Tremaine 1978, $\tau \sim 0.1$)

$$T \sim 700\text{Gyr}$$

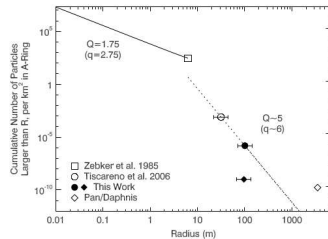
- A リングの拡散時間は太陽年齢より1桁小さい
- C リングの拡散時間は太陽年齢よりずっと長い

粒子のサイズ分布

$$n(R)dR \propto R^{-q}dR$$

- $R_{\min} = 10 - 30\text{cm}$
- $R_{\max} = 1 - 10\text{m}, q \sim 3$

(Zebker et al. 1985, French and Nicholson 2000)

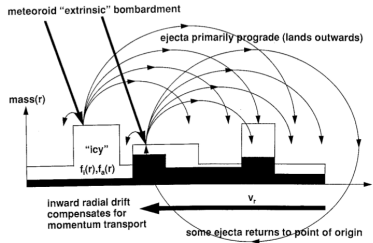


Tiscareno et al. 2008

- **ベキは fragmentation の平衡分布に近い**
- **最小でセンチメートル程度の粒子が多数存在**

流星物質との衝突の影響

- 流星物質が環に衝突 $\Rightarrow$ 環物質がとばされ再配置がおきる
(Ballistic Transport (e.g., Ip 1983, Durisen et al. 1995))
- 物質組成の変化 $\Rightarrow$ アルベドの変化
 - 流星物質で汚染されすぎるとアルベドが説明できない
 - $\Rightarrow$ アルベドからの制限 $T \sim 0.1\text{Gyr}$ (Cuzzi and Estrada 1998)
 - 実際の質量が大きい、または、流星物質の flux が小さければ時間の見積もりが長くなる



Cuzzi and Durisen 2008

土星の環の起源モデルへの制約まとめ

- 環の質量
 - 衛星ミマス程度 ($\sim 3.7 \times 10^{19} \text{kg}$)
- 物質組成
 - 純粋な水の氷 $\Rightarrow$ つまり岩石成分がほとんど含まれていない
- 環の年齢
 - 拡散時間 $\Rightarrow T \sim 0.7 \text{Gyr}$
 - アルベド変化 $\Rightarrow T \sim 0.3 \text{Gyr}$
 - 見かけ上太陽系年齢より若い
- 粒子サイズ
 - 3 に近いベキ $\Leftarrow$ 破壊の平衡サイズ分布に近い
 - 最小でセンチメートル程度 $\Rightarrow$ センチメートル程度の小さい粒子が作られるプロセスは？

土星の環の起源 (1): 周惑星円盤起源説

- 周惑星円盤起源説 (Pollack et al. 1973)
 - 土星の周りの円盤の中でリングが形成された
- 利点
 - 小さい粒子は作りやすいかもしれない
- 問題点
 - 粘性拡散や汚染による年齢の説明
 - 氷粒子だけにどうするか？岩石成分を除去する方法
 - ガスドラッグによる粒子落下?(c.f., 微惑星形成問題)

土星の環の起源 (2): 彗星起源説

- 彗星起源説

- 大きな彗星が土星のロッシュ限界内側を通過 $\Rightarrow$ 潮汐力で破壊して環になる (Dones 1991)

- 利点

- 水の氷しかないのは自然に説明できる

- 問題点

- 彗星の捕獲率は低く、環の質量が説明できない

土星の環の起源 (3): 衛星破壊説

- 衛星破壊説

- 外側にあった衛星がロッシュ限界の内側に移動 $\Rightarrow$ 壊れて環になる

- 利点

- 質量は説明できる

- 問題点

- 氷粒子だけにどうするか? ($\Rightarrow$ 衛星の氷外層をはぎとり、岩石成分は土星に落ちればよい (Canup 2010))
- 汚染問題は始め質量が大きければ解決する (Canup 2010)
- 物質強度を考えると小さな粒子まで破壊されない可能性
 - $\Rightarrow$ 小さい粒子にするには、小惑星衝突等が必要かもしれない。しかし、衝突確率は低い