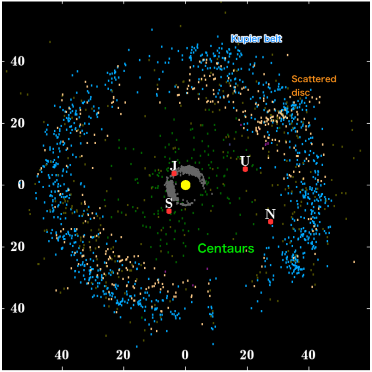
Chariklo の二重環の構造と衛星との相互作用による長期進化

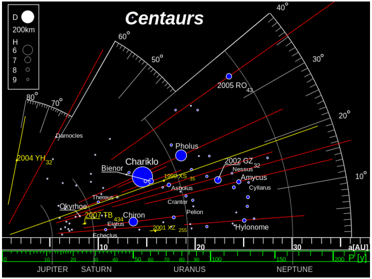
道越秀吾 (筑波大学)，小久保英一郎 (国立天文台)

目次

ケンタウルス族

- ケンタウルス族の天体 (Centaurs)
  - 軌道が木星〜海王星の間に収まっている小惑星
- ケンタウルス族の天体は不安定であり，巨大惑星との相互作用などで数百万年で失われる (Horner et al. 2004)
- Kuiper belt などにあった天体が現在の軌道に入ってきたものかもしれない
- ケンタウルス族で最大の天体が Chariklo
- Chariklo と Chiron でリングが発見されている





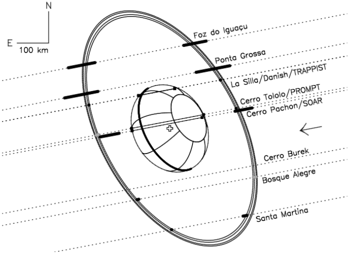
Wikipedia

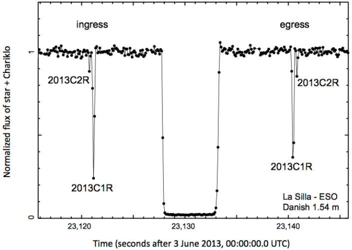
Chariklo

Chariklo とは

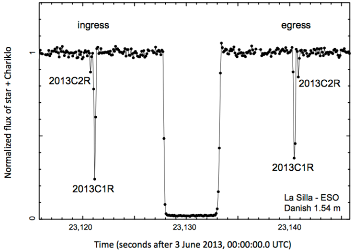
- ケンタウルス族で最大の天体 (平均半径 125km)
- 軌道長半径： 15.79 AU, 離心率：0.17, 軌道傾斜角：23.37 度
- 力学的寿命は約 1000 万年 (Araujo et al. 2016)
- 表面組成：水の氷がない (Duffard et al. 2014)

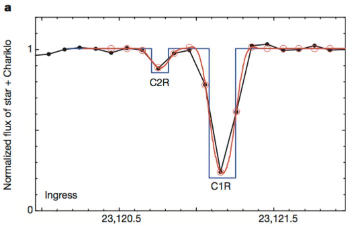
- リングが掩蔽観測により検出された (Braga-Ribas et al. 2014)





リングの性質





- ２本リングがあり，ギャップで隔てられている
- 内側の方が不透明度が高い

リング	位置	幅	Optical depth
Inner ring	390.6 km	5.5-7.1 km	0.317-0.449
Outer ring	404.8 km	3.4-3.6 km	0.05-0.07
Gap	..	8.7 km	..

目次

Chariklo リングに関する論点

- リング形成に関する問題 (Pan and Wu 2016, Hyodo et al. 2016)
  - どうやってリングができたか
  - いつできたか
  - 一般に Centaurs はリングを持ちやすいといえるか
- リングの物理的性質は？
  - 粒子サイズ，リングの質量 (Pan and Wu 2016)
  - 粒子の組成（粒子密度）
- リングの構造や力学
  - リングの寿命
  - 衛星は存在するか．衛星との相互作用
  - 楕円か．楕円形状の維持機構とその起源

先行研究の紹介

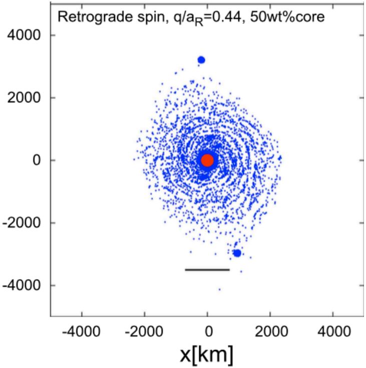
- リング形成 (Pan and Wu 2016, Hyodo et al. 2016)
- 楕円リングからの質量推定 (Pan and Wu 2016)
- 粘性拡散によるリング寿命の見積もり (Braga-Ribas et al. 2014, Pan and Wu 2016)

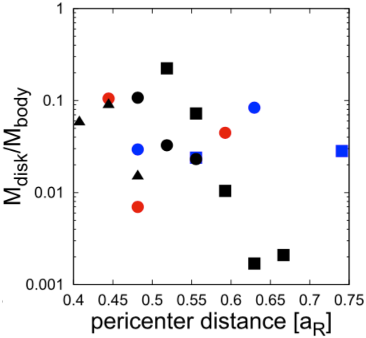
リング形成モデル

- 1 衝突による質量放出でリング形成 (Pan and Wu 2016)
  - Chariklo への天体衝突で物質放出．1 %以下しかリングとして残らない
  - 衝突する天体は大きい必要がある．リング質量が 1 km 程度の天体に相当 $\Longrightarrow$ 5 km ぐらいの天体が衝突した．
  - カイパーベルトで形成された場合，リングを形成するような衝突の確率は低くない
  - しかし，リング拡散時間が短いので生き残らない？
- 2 衛星の破壊 (Pan and Wu 2016)
  - カイパーベルトにいたときに小さい衛星を持っていたとする
  - 海王星との近接遭遇により衛星が摂動を受けて，Chariko のロッシュ限界の内側に移動
  - 潮汐力で破壊されてリングが形成される
  - しかし，このようなイベントの確率は低い ($\Longrightarrow$ 数%しかリングを持てない)
  - また，1km サイズの小さい衛星は，カイパーベルトにいるうちにより小さな天体との衝突で破壊されやすい． $\Longrightarrow$ 小さい衛星はそもそも存在できないかもしれない
- 3 ガス放出 (Pan and Wu 2016)
  - 昇華したガス (CO) が Cahriklo から放出
  - ダスト形成．ダストの衝突でリングが形成される
- 4 潮汐による表面層の剥ぎ取り (Hyodo et al. 2016, 次のスライド)

潮汐破壊によるリング形成

- 小惑星が，巨大惑星と近接遭遇して，ロッシュ限界の内側を通過 $\Longrightarrow$ 潮汐力で部分破壊されてリングが形成される (Hyodo et al. 2016)
- SPH シミュレーション





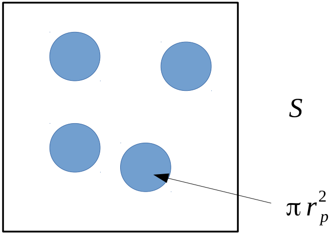
- ０．１％から１０％程度がリングになる．高密度のコアが必要
- 最終的にはロッシュ限界の外側へ拡散して，衛星と細いリングができる？(土星の F リング形成, Hyodo and Ohtsuki 2015)

リングの質量

- リングの質量やリング粒子の大きさは，観測的な制限がついていない

等サイズ粒子でできており，optical depth が高くない場合 (Salo and Karjalainen 2003, Robbins et al. 2010)

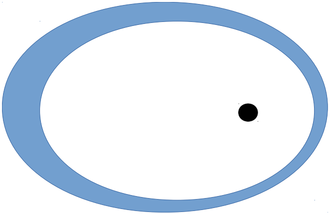
$$\tau = \frac{\pi r_p^2 \times N}{S} = \frac{1}{(4/3)\rho_p r_p} \frac{(4\pi/3)\rho_p r_p^3 N}{S} \simeq \frac{3\Sigma}{4 r_p \rho_p}$$



- 密度は物質組成などで決まるのでそれほど幅は大きくない ($\rho_p = 0.5$–$1.0\,\mathrm{g\,cm^{-3}}$)
- τ は観測より 0.38(Inner ring) と 0.06(Outer ring)
- $\Longrightarrow$ 面密度（またはリング質量）と粒子半径が縮退

楕円リング

- Inner ring は場所によって，リングの幅が変化
- $\Rightarrow$ 楕円リングの可能性 (Braga-Ribas 2014, Pan and Wu 2016)



- Chariklo は赤道面方向に膨らんでいる $\Longrightarrow J_2 > 0 \Longrightarrow$ 歳差運動

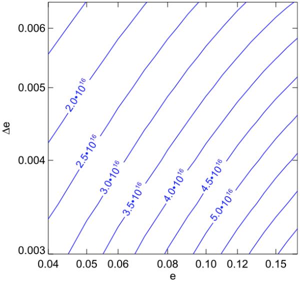
$$\frac{d\varpi}{dt} = \frac{3}{2} J_2 \Omega \left(\frac{R_C}{a} \right)^2 \propto a^{-7/2}$$

内側の歳差が早い．内側と外側の近点の位置がずれるタイムスケール

$$T_p = 2\pi / \Delta \left(\frac{d\varpi}{dt} \right) = 17\,\mathrm{months}$$

Apse alignment によるリング質量の見積もり

- リング質量が大きいほど自己重力による逆方向の歳差の効果が強まるので，リング質量を選ぶと歳差を止められる
- Pan and Wu (2016) では，より詳細なモデルを構築．リングを N 個の領域にわけて，自己重力による ϖ の変化と，J_2 による変化を相殺する条件を求めた．



- $m_{\mathrm{ring}} \sim$ (1-10) $\times\, 10^{16}$ g
- $\Longrightarrow \Sigma \sim$ (1-10) $\times\, 100\,\mathrm{g\,cm^{-2}}$, $r_{\mathrm{p}} \sim$ 1-10 m
- ただし，このモデルでは，粒子間の衝突 (Chiang and Goldreich 2000) やリングの内部構造が考慮されていない
- ちょうど良い質量 (ちょうど良い離心率) になっているのは偶然？そもそも離心率の起源は？

リングの拡散時間

- Braga-Ribas (2014) により粘性拡散時間が見積もられている．
- 衝突によるエネルギー散逸のため，ランダム速度による viscosity (Translational visocosity, Goldreich and Tremaine 1978) が卓越できない
- ランダム速度が 0 でも生じる粘性，Collisional visocosity を考慮 $\Longrightarrow$ 粒子の大きさがわかると角運動量輸送率が見積もられる (Shukhman 1984, Araki and Tremaine 1986)

$$\nu_{\mathrm{col}} \simeq \Omega r_p^2 \tau$$

これより粘性拡散時間は

$$T_\nu \simeq \frac{W^2}{\nu} \sim 10^4\text{–}10^5\ \mathrm{years}$$

- 潮汐破壊でできたとすると，この時間内に惑星との近接遭遇がおきたはず．
- 過去 10^5 年内の近接遭遇の可能性は高くはないが，否定はできない (Araujo et al. 2016)
- 拡散を遅くするメカニズム（羊飼い衛星）も考えられる

目次

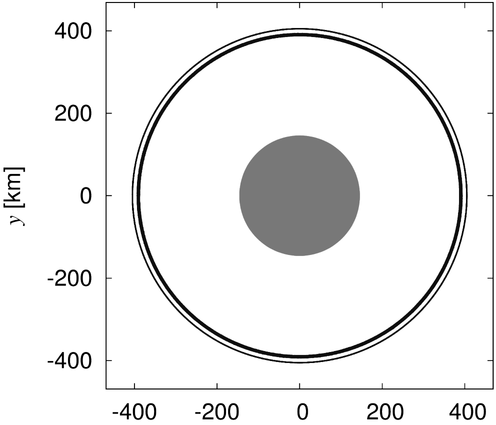
シミュレーション手法

- グローバル N 体シミュレーション

$$\frac{\mathrm{d}^2\mathbf{r}_i}{\mathrm{d}t^2} = -GM_\mathrm{C}\frac{\mathbf{r}_i}{|\mathbf{r}_i|^3} - \sum_{j\neq i} Gm_\mathrm{p}\frac{\mathbf{r}_{ij}}{(r_{ij}^2+\epsilon_\mathrm{g}^2)^{3/2}} + \mathbf{f}_\mathrm{col},$$

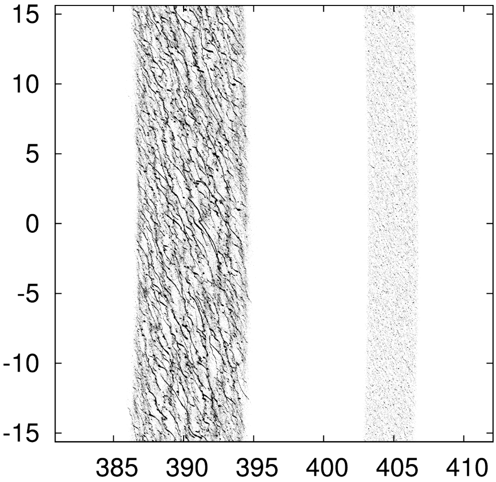
- 非弾性衝突を考慮 (Soft sphere model)
- 粒子半径は $r_\mathrm{p} = 2.5$–$10\,\mathrm{m}$
- 密度は $\rho_\mathrm{p} = 0.05$–$1.00\,\mathrm{g\,cm^{-3}}$
- 粒子数は２０００万～３億５０００万
- 重力はツリー法（N 体ライブラリ FDPS, Iwasawa et al. 2016)

典型的な結果：全体構造



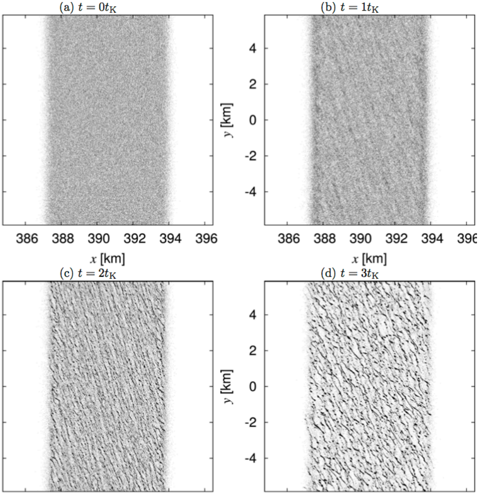
- $r_{\mathrm{p}} = 5\,\mathrm{m}$, $\rho_p = 0.5\,\mathrm{g\,cm^{-3}}$, $t = 10T_{\mathrm{K}}$
- 全体的な構造は現れない．リングは維持される

典型的な結果



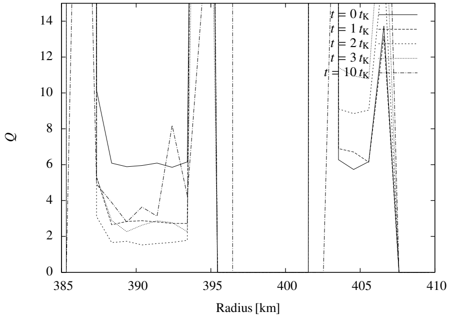
- 小さな構造で満たされている

Innner ring の初期進化



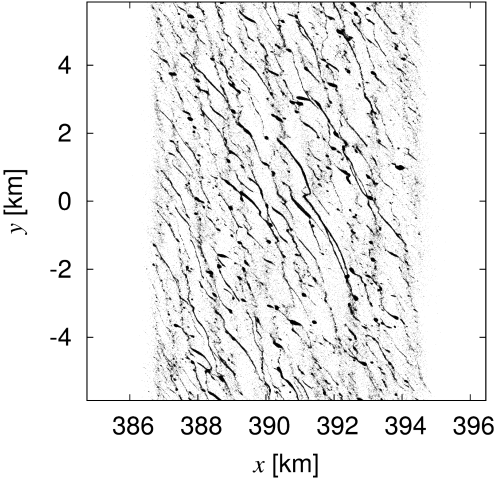
- 初期ではランダム速度が高い場合 ($Q > 2$) でも，エネルギー散逸により Q が下がって重力不安定が発生する．
- 重力不安定が発生した後は，数回転後には，トレーリング構造の生成・破壊が繰り返される状態になる．
- 土星のリングのウェイク構造と同じ (Salo 1992)
- スイング増幅メカニズム (Toomre 1981, Michikoshi and Kokbuo 2016) が関係しているといわれている (Salo et al. 2004, Michikoshi et al. 2015)

Q の進化



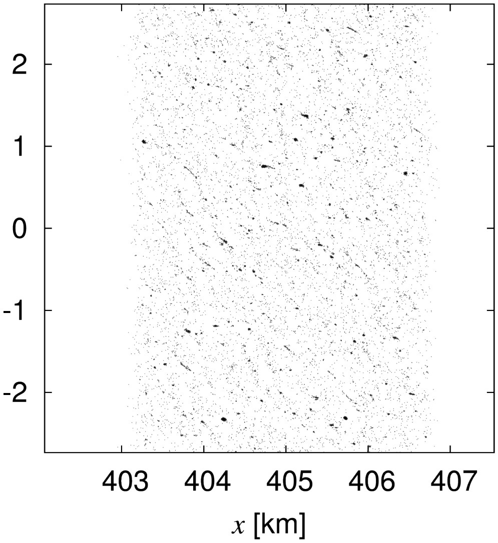
- Inner ring では Q が低く重力不安定が発生

典型的な結果:Innner ring



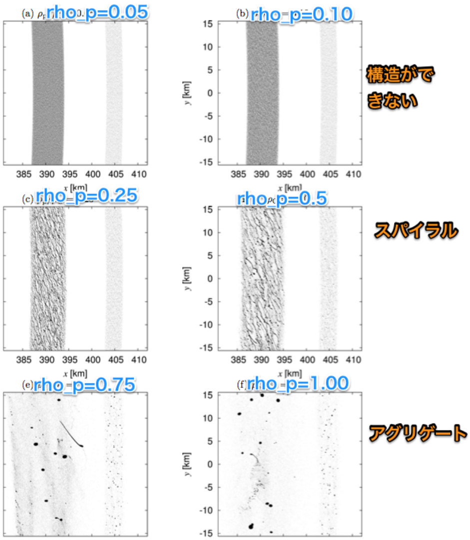
- 微小なスパイラル（ウェイク構造）で満たされている．降着して大きなアグリゲートになることはない

典型的な結果:Outer ring



- エネルギー散逸率が低いため重力不安定は起きないが，小さなアグリゲートが見られる．Roche 限界に近いところなので，一時的なアグリゲートか？

粒子密度依存性 (rp=10m)



- accretion するかどうかは，粒子のヒル半径で決まる (Ohtsuki 1993, Karjalainen and Salo 2004)

$$\frac{r_{\mathrm{H}}}{2r_p} > 1.1 \Leftrightarrow \frac{\rho_{\mathrm{P}}}{\rho_{\mathrm{C}}} > 0.52$$

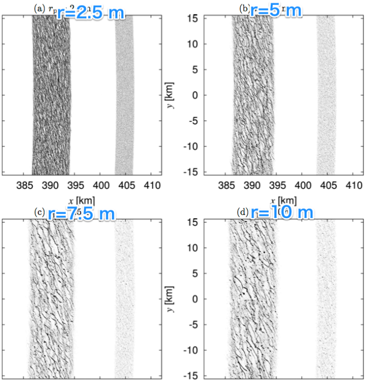
- スパイラルができるかどうは重力不安定が発生するかどうかで決まる．平衡ランダム速度は $\frac{2r_p}{r_{\mathrm{H}}}$ の関数なので，スパイラル形成条件がかける (Salo 1995, Ohtsuki and Emori 2000)

$$0.65 < \frac{r_{\mathrm{H}}}{2r_p} < 1.1 \Leftrightarrow 0.11 < \frac{\rho_{\mathrm{P}}}{\rho_{\mathrm{C}}} < 0.52$$

- $\frac{\rho_{\mathrm{P}}}{\rho_{\mathrm{C}}} < 0.11$ では構造は何もできない

リングが維持されるには $\rho_p/\rho_C < 0.52$ が必要

半径依存性 (rho=0.5g/cc)

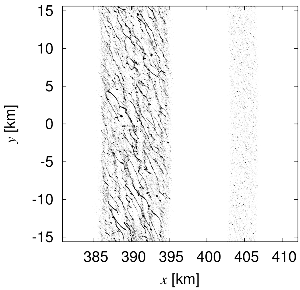


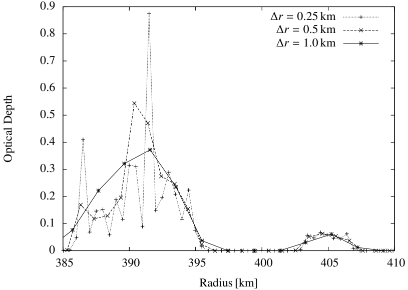
- スパイラルができるかどうかは，密度のみで決まる
- 半径を変えると空間スケールに違いが見られる
- スパイラルは重力不安定で形成されるので，典型的なスケールは重力不安定波長

$$\lambda_{\mathrm{cr}} = \frac{4\pi^2 G\Sigma}{\Omega^2} = 1.46 \left(\frac{\rho_{\mathrm{p}}}{\rho_{\mathrm{C}}}\right) \left(\frac{r_{\mathrm{p}}}{10\,\mathrm{m}}\right) \mathrm{km},$$

議論：観測で Wake が検出できるか？

- シミュレーションデータから Optical depth を再構成した．





半径 10 m, 密度 0.5 g cm^{-3}, 重力不安定波長 0.72 km

- 解像度が重力不安定波長を下回ると Wake 由来の構造が見える
- 観測の空間解像度は $1\,\mathrm{km}$ 程度で Wake 構造が見えない $\Longrightarrow \Delta r \gtrsim \lambda_{\mathrm{cr}}$

$$r_{\mathrm{p}} \lesssim 13.7 \left(\frac{\rho_{\mathrm{P}}/\rho_{\mathrm{C}}}{0.5}\right)^{-1} \left(\frac{\tau}{0.38}\right)^{-1} \mathrm{m},$$

議論：本当の拡散時間

- スパイラルの作る重力ポテンシャルは角運動量輸送を飛躍的に加速する (Daisaka et al. 2001, Takeda and Ida 2001)

$$\nu = 26 \left(\frac{r_{\mathrm{H}}}{2 r_{\mathrm{p}}} \right)^5 \frac{G^2 \Sigma^2}{\Omega^3}$$

- これを用いて拡散時間を計算すると,,

$$T \simeq 1.1 \left(\frac{r_{\mathrm{p}}}{10\,\mathrm{m}} \right)^{-2} \left(\frac{\rho_{\mathrm{p}}}{0.5\,\mathrm{g\,cm^{-3}}} \right)^{-11/3} \mathrm{years}$$

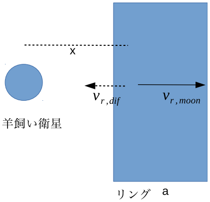
- １年で拡散はありえないだろう.
- $r_p = 1\mathrm{m}$ だとおよそ１００年．これでもかなり短い
- $\Longrightarrow$ 羊飼い衛星があれば拡散をゆっくりにできる

議論：羊飼い衛星

- 粘性トルクと衛星によるトルクが打ち消しあって拡散を止める (Goldreich and Tremaine 1982)

衛星によるトルクによる v_r

$$v_{r,moon} = 0.8\left(\frac{m_s}{M_C}\right)^2\left(\frac{a}{x}\right)^4 a\Omega$$



- 粘性による速度

$$v_{r,dif} \simeq -\frac{3}{\sqrt{r}\Sigma}\frac{\partial}{\partial x}(\nu\Sigma)$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(\nu\Sigma) = 0.27\left(\frac{m_s}{M_C}\right)^2\frac{a^5}{x^4}\Omega\Sigma \Longrightarrow \Sigma(x) = \Sigma_0\left(1 - \frac{0.27\alpha}{3(1+\alpha)}\frac{a^5\Omega}{\nu_0 x^3}\left(\frac{M_s}{M_c}\right)^2\right)^{1/\alpha}$$

これより衛星の質量と距離の関係がわかる

$$M_{\mathrm{s}} \simeq 4.1\left(\frac{\nu d^3}{\Omega a^5}\right)^{1/2} M_{\mathrm{C}} = 1.3\times10^{17}\left(\frac{d}{100\,\mathrm{km}}\right)^{3/2}\left(\frac{\rho_{\mathrm{p}}}{0.5\,\mathrm{g\,cm^{-3}}}\right)^{11/6}\left(\frac{r_{\mathrm{p}}}{1\,\mathrm{m}}\right)\mathrm{g},$$

目次

まとめ

まとめ

- Chariklo の二重リングのグローバル N 体シミュレーションを行った
- リングが安定に存在するには，リングの密度は Chaiklo の密度の半分以下でなければならない
  - ⟹ 潮汐破壊による形成モデルと無矛盾 (Hyodo et al. 2016)
- Wake が見えないことから粒子半径の上限は１０メートル程度.
- しかし，衛星がない場合は，非常に早い拡散が生じる (１〜１００年程度)
- ring の縁から１００ km 離れたところに羊飼い衛星があれば寿命が伸びる