### 衛星集積過程における力学進化

### 荻原正博 (名大)



#### 《本発表の主な内容》

- Ogihara & Ida (2012)
- Sasaki et al. (2010)
- Canup & Ward (2006)
- Yoder (1979)
- Peale & Lee (2002)





全39スライド…

#### 井田茂(東工大)

佐々木貴教(東工大)、Francis Nimmo(UCSC)

衛星系形成小研究会 2012/8/22

イントロダクション

### (規則) 衛星系形成に注目

■ 太陽系の衛星系



### 規則衛星の形成に注目

衛星集積過程における力学進化

# (規則) 衛星系形成に注目

### ■ 太陽系外の衛星系

• ● 観測可能性(Kipping et al. '09) exoplanets.org | 8/20/2012 m>0.2M<sub>Earth</sub> → TTV+TDVで観測可能 100 Msin(i) [Jupiter Mass] 生命居住可能性 系外巨大惑星:1AU付近に → 系外衛星は生命居住可能!? 大気(バイオマーカー)はJWSTで 0.01 **検出可能**(Kaltenegger '10) 系外衛星に注目も 0.1 Semi-Major Axis [Astronomical Units (AU)]

(系内外)衛星系形成理論の構築を目指す

# (補足) TTV/TDV

- Transit Timing Effects
- Transit Timing Variation:惑星が衛星との共通重心周りを動くことでタイミングが変化





Fig. 1. Composition of the transit light curve from  $\Delta m_p$ and  $\Delta m_s$ .

Simon et al. (2007)

• Transit Duration Variation :

共通重心周りの運動により、みかけの公転速度が変化することで継続時間が変化



### 衛星系形成モデル



衛星系形成:ガス円盤進化・固体物質の供給などの条件に依存

# 衛星集積計算の条件

### ■ ガス円盤

- 最小質量モデル(e.g., Lunine & Stevenson '82)
- 定常降着円盤モデル (Canup & Ward '02)
- 最近の発展 (e.g., Fujii et al. '11, Tanigawa et al. '12)
- 円盤内縁 (e.g., Sasaki et al. '10)
- 中心惑星のギャップ形成 (e.g., Sasaki et al. '10)
- 固体の供給
  - ⊙ ダストとしての供給
    - ←ガスダスト比・流入の分布
  - 微惑星の捕獲

衛星集積過程における力学進化

不定性(ガス円盤・固体流入)をパラメータに押し込める →N体計算で衛星集積を追う(~200ラン)



荻原正博(名大)

7 /39

### ギャップ形成による周惑星円盤散逸



### 木星周りの規則衛星

### 土星周りの規則衛星

### ガリレオ衛星の特徴



semimajor axis	5.9 R <sub>J</sub> (0.0079 r <sub>H</sub> )	9.4 R <sub>J</sub> (0.013 r <sub>H</sub> )	15 R <sub>J</sub> (0.020 r <sub>H</sub> )	26 R <sub>J</sub> (0.035 r <sub>H</sub> )
mass	4.7×10 <sup>-5</sup> M <sub>J</sub>	2.5×10 <sup>-5</sup> M <sub>J</sub>	7.8×10 <sup>-5</sup> M <sub>J</sub>	5.7×10 <sup>-5</sup> M <sub>J</sub>
water mass fraction	rock	8%	45%	56%
MMRs	4:2:1 Laplace resonance			-
differentiation	分化			部分分化



EUROPA 2:1

JUPITER

- 形成後の軌道拡大(e.g., Goldreich '65, Yoder '79, Yoder & Peale '81)
- 追いつき移動(e.g., Peale & Lee '02)
- 内縁トラップ(Sasaki et al. '10, Ogihara & Ida '12)



軌道間隔の縮小→軌道周期比2:1でMMR捕捉

- 形成後の軌道拡大(e.g., Goldreich '65, Yoder '79, Yoder & Peale '81)
- 追いつき移動(e.g., Peale & Lee '02)
- 内縁トラップ(Sasaki et al. '10, Ogihara & Ida '12)





- 形成後の軌道拡大(e.g., Goldreich '65, Yoder '79, Yoder & Peale '81)
- 追いつき移動(e.g., Peale & Lee '02)
- 内縁トラップ(Sasaki et al. '10, Ogihara & Ida '12)



- 形成後の軌道拡大(e.g., Goldreich '65, Yoder '79, Yoder & Peale '81)
- 追いつき移動(e.g., Peale & Lee '02)
- 内縁トラップ(Sasaki et al. '10, Ogihara & Ida '12)



### それぞれをN体計算で検証

# 内縁トラップ:計算条件

- ガス円盤
  - 面密度分布+内縁
  - Ο 進化:ギャップ形成
- 固体流入
  - O フラックスに従い→ m~10<sup>-7</sup> M<sub>P</sub>
- 固体が受ける力
  - 密度波によるe,aダンピング
     潮汐力(潮汐トルク、潮汐散逸)
- 積分・時間進化
  - Ο 軌道進化:4次のエルミート法
  - 円盤進化:モデル化



### 内縁トラップ:計算条件



# 内縁トラップ:計算結果



荻原正博 (名大)

17/39

# 内縁トラップ:計算結果



# (補足)潮汐相互作用

- 潮汐散逸によるe,aの進化
  - 軌道進化時間(準静的散逸)

$$\begin{array}{lcl} t_{e,\mathrm{tide}} &=& -\frac{e}{\dot{e}} = \frac{4}{63} \frac{M}{M_{\mathrm{P}}} \left(\frac{a}{R}\right)^5 \tilde{\mu} Q \Omega^{-1} \\ &\simeq& \frac{4}{63} \left(\frac{M}{M_{\mathrm{P}}}\right)^{-2/3} \left(\frac{a}{R_{\mathrm{P}}}\right)^{13/2} \left(\frac{\rho}{\rho_{\mathrm{P}}}\right)^{5/3} \tilde{\mu} Q \Omega^{-1} \\ &\sim& 10^9 \left(\frac{M}{10^{-4} M_{\mathrm{P}}}\right)^{-2/3} \left(\frac{a}{20 R_{\mathrm{P}}}\right)^{13/2} \left(\frac{\tilde{\mu} Q}{1000}\right) \,\,\mathrm{yr} \end{array}$$

$$Q \simeq \frac{E_0}{\Delta E}$$

- 潮汐散逸によるイオの加熱の具体的な値
- 潮汐トルク
   軌道進化時間

$$\mathbf{a}_{\text{p,tide}} = -\frac{a}{\dot{a}} = \frac{Q_{\text{P}}}{3k_{2,\text{P}}} \left(\frac{M}{M_{\text{P}}}\right)^{-1} \left(\frac{a}{R_{\text{P}}}\right)^{5} \Omega$$
  
 $\sim 10^{13} \left(\frac{Q_{\text{P}}}{10^{5}}\right) \left(\frac{k_{2,\text{P}}}{0.5}\right)^{-1} \left(\frac{M}{10^{-4}M_{\text{J}}}\right)^{-1} \left(\frac{a}{20R_{\text{J}}}\right)^{13/2} \text{ yr}$ 

● 木星のQ」への制限(Yoder 1979)

$$2 \times 10^5 < Q_{\rm J} \ll 2 \times 10^6$$
  
2:1MMRを維持 E散逸よりも十分大きい

## 円盤内縁での移動停止



Eccentricity Trap

<sup>The trapping of eccentric planets near the edge requires slow migration (Ogihara et al. 2010)</sup>

衛星集積過程における力学進化

荻原正博(名大) 20/39





number -> eccentricity trap (type I)

2:1 MMRs -> gas density (e-damping, a-damping)

Galilean moons are formed for a wide range of parameters



#### ■ パラメータ変えたN体計算例



衛星集積過程における力学進化

# 内縁トラップ:組成への示唆



### Ice line :viscous heating vs. blackbody radiation



### 内縁トラップ:まとめ

■ ガリレオ衛星の特徴を再現する条件

● 質量

・臨界質量 ≦ 5x10<sup>-5</sup> M<sub>J</sub>

$$rac{\eta_{
m ice} f_{
m d,in}}{C_{
m I} f_{
m g}} \lesssim 0.5$$

- 軌道間隔・配置
- $\cdot$  eccentricity trap

 $f_{
m g} \lesssim 10^4$  $C_{
m I} \lesssim 1$ 

- 離心率
- ・潮汐散逸で現在の値に
- 組成・カリスト集積時間
- ・氷境界の位置 and/or 衝突蒸発
- ・カリスト集積時間 (≧5x10<sup>5</sup>年 Barr & Canup '08)



### 追いつき移動:計算条件

- ガス円盤
  - 面密度分布+内縁なし
  - Ο 進化:ギャップ形成
- 固体流入
  - O フラックスに従い→ m~10<sup>-7</sup> M<sub>P</sub>
- 固体が受ける力
  - 密度波によるe,aダンピング
  - 潮汐力(潮汐トルク、潮汐散逸)
- 積分・時間進化
  - 軌道進化:4次のエルミート法
  - 円盤進化:モデル化







### 追いつき移動:計算条件



衛星集積過程における力学進化

### 追いつき移動:計算結果



荻原正博(名大)



### 追いつき移動により2:1MMRはみられない

衛星集積過程における力学進化



## 形成後の軌道拡大:形成後の計算



衛星集積過程における力学進化

# 形成後の軌道拡大:形成前の計算



### 形成後の軌道拡大:形成前の計算

### 「形成後の軌道拡大」の初期条件はみられない



### 木星周りの規則衛星

### 土星周りの規則衛星

### 土星系の特徴



semimajor axis	20 R <sub>J</sub> (0.018 r <sub>H</sub> )
mass	2.3×10 <sup>-4</sup> M <sub>S</sub>
water mass fraction	~50%
differentiation	部分分化?



個数(=固体密度分布)は N体計算で再現可能か?

### 土星系:計算条件

- ガス円盤
  - 面密度分布+内縁なし
  - 進化:ギャップ形成なし
- 固体流入
  - O フラックスに従い→ m~10<sup>-7</sup> M<sub>P</sub>
- 固体が受ける力
  - 密度波によるe,aダンピング
     潮汐力(潮汐トルク、潮汐散逸)
- 積分・時間進化
  - 軌道進化:4次のエルミート法
  - 円盤進化:モデル化





荻原正博(名大)

34/39

#### :計算条件 土星糸



衛星集積過程における力学進化







#### r=20Rpで1個が形成の為に…

外側でM<sub>crit</sub>になるとき 内側の衛星は既に落下

様々な条件でN体計算してみる



■ パラメータを変えた例



荻原正博(名大)

37/39

衛星集積過程における力学進化



### まとめ+α

### ■ 木星系形成

● 内縁トラップ(Ogihara & Ida 2012, Sasaki et al. 2010)

#### 広いパラメータ(ガス面密度、タイプI移動)で形成

● 追いつき移動 (Peale & Lee 2002, Canup & Ward 2006)

#### N体計算では再現困難

● 形成後の軌道拡大 (Yoder 1979)

#### 初期条件をN体計算では再現困難

- 土星系形成
  - 結果 (Sasaki et al. 2010, Canup & Ward 2006) N

#### N体計算では再現困難

荻原正博(名大)

39/39

- 議論:惑星系形成理論から
  - 局所的衛星形成(例:デッドゾーン境界 Dzyukevich '10など)
  - 外側移動? (例:共回転トルク、微衛星駆動)