

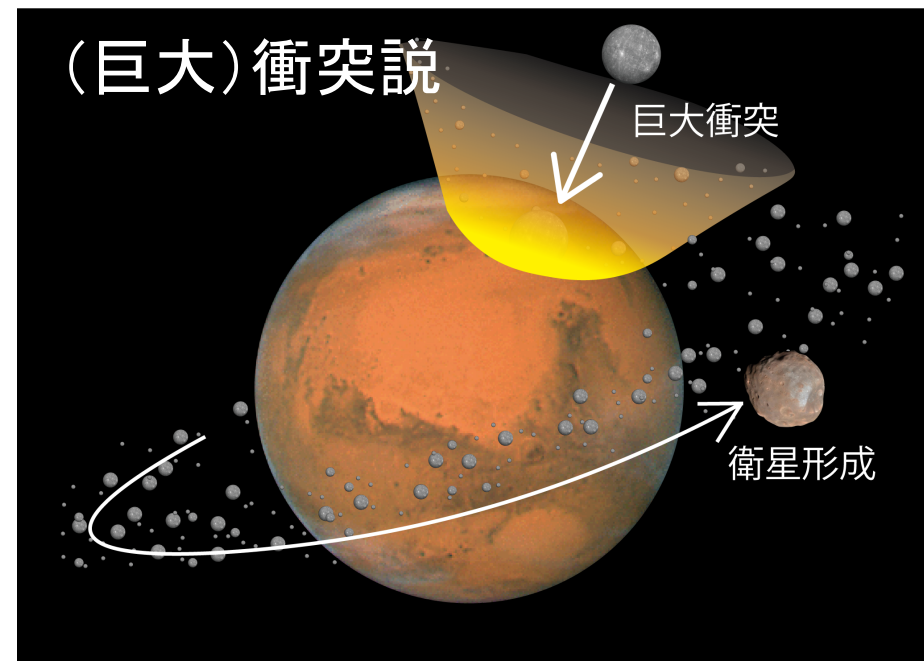
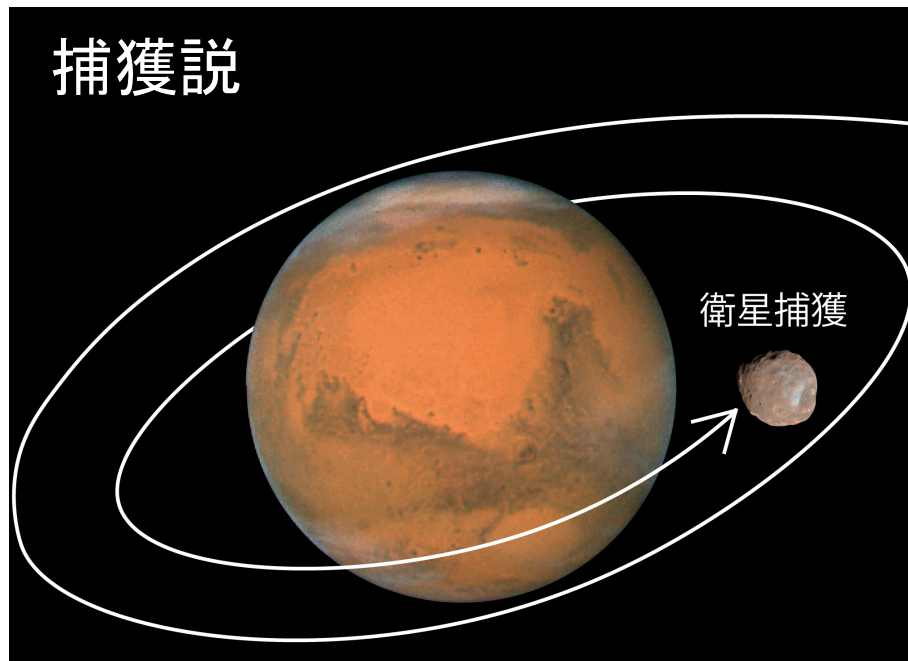
# 火星衛星の起源について

## 現状の理解とサイエンス

CPS月惑星  
探査研究会  
(2015.8.27)

玄田 英典 (地球生命研究所・東工大)  
火星衛星SR計画科学検討チーム・形成論 (全体要旨) 班

火星衛星SR計画の第一目的:火星衛星の起源に決着をつける



どっちの説が正しいかはっきりしていない

# なぜ火星衛星の起源が知りたいのか？

- ▶ 研究者として、未解決の問題を解決したい。
- ▶ 比較衛星学の展開 (cf. 比較惑星学)
  - 物的証拠による月形成との比較
    - 捕獲説が正しければ、なぜ地球に捕獲衛星がない？
    - 衝突説が正しければ、衛星形成過程の違いは？  
(ex. 円盤中での同位体組成・揮発性元素の振る舞い)
- ▶ 得難い貴重なサンプル
  - ✓ 捕獲説 → サンプルは極めて始原的 (D-type or TNO?)
  - ✓ 衝突説 → サンプルは、初期火星と衝突天体の混合物

探査機のリモセン、回収サンプルの詳細分析  
によって火星衛星の起源に決着をつける

# なぜサンプルを持って帰るのか？

## ▶ 惑星形成論への制約

- サンプル分析によって捕獲or形成年代、飛来源が特定
  - 揮発性元素の地球型惑星への供給時期・プロセスに制約
  - 惑星形成論に強い制約 (Grand Tack Model, Nice Modelなど)

## ▶ 全火星史解読 (エクストラ)

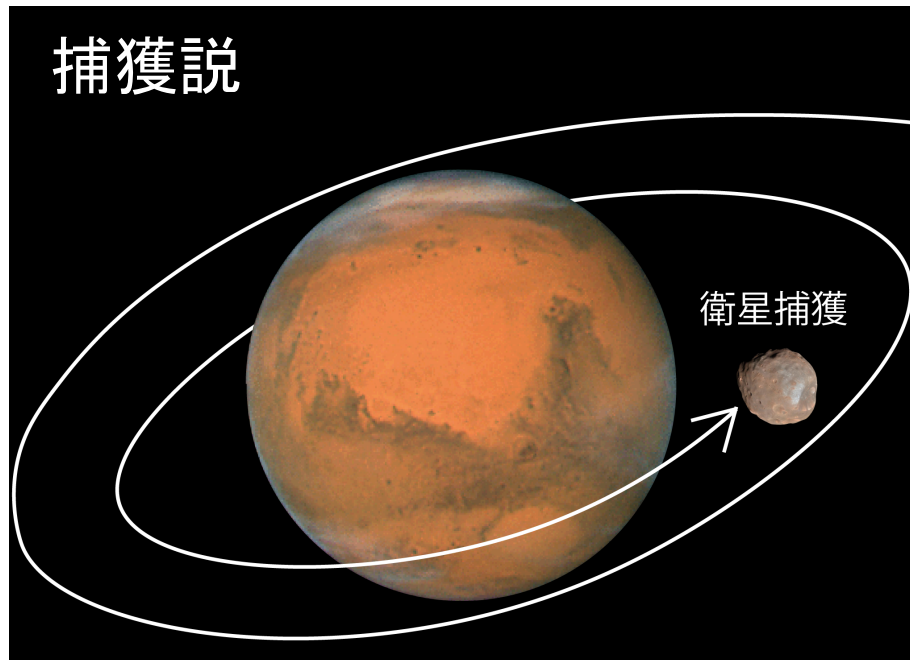
天体衝突によって、様々な時代の火星表層物質が、フォボス上に微量 (~300ppm) 降り積もっているらしい *Ramsley & Head 2013*

火星由来の砂つぶの年代測定 & 各種分析により火星史を解読

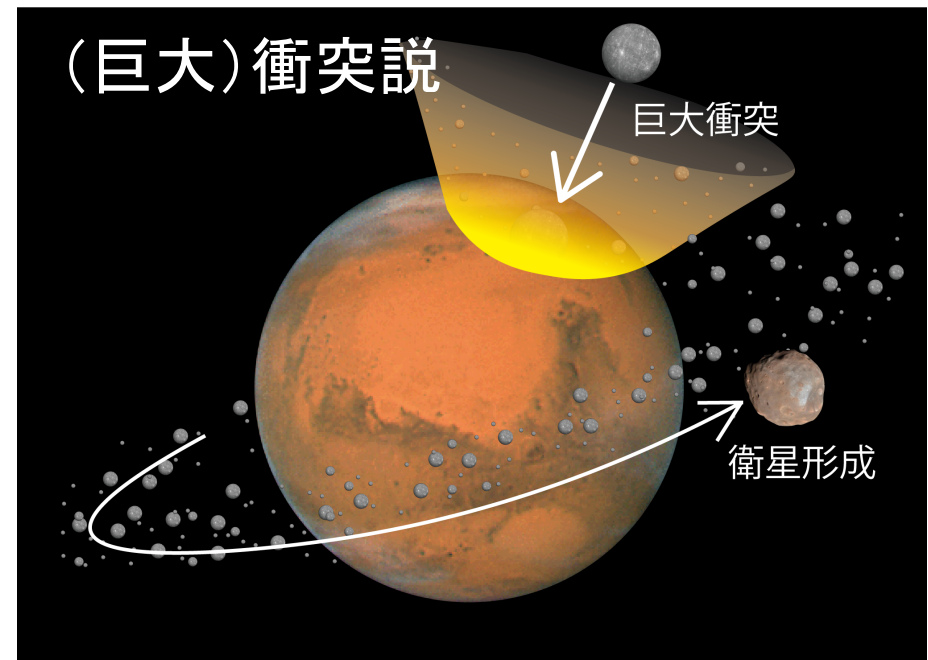
- D/H → 火星水量の変遷 (温暖 & 湿潤 → 寒冷 & ドライな気候の検証)
- 希ガス → 火星大気の起源 & 進化
- 残留磁化 → ダイナモの開始と停止 (火星の熱史・plate tectonics)
- 化学組成 → 地殻組成の歴史 (地球: 斜長岩? → 玄武岩 → 花崗岩)
- ジルコン → Hf, Sr, Rbなどから地殻形成・熱史

# 火星衛星の2つの起源

本発表では、2つの起源の現状を整理する



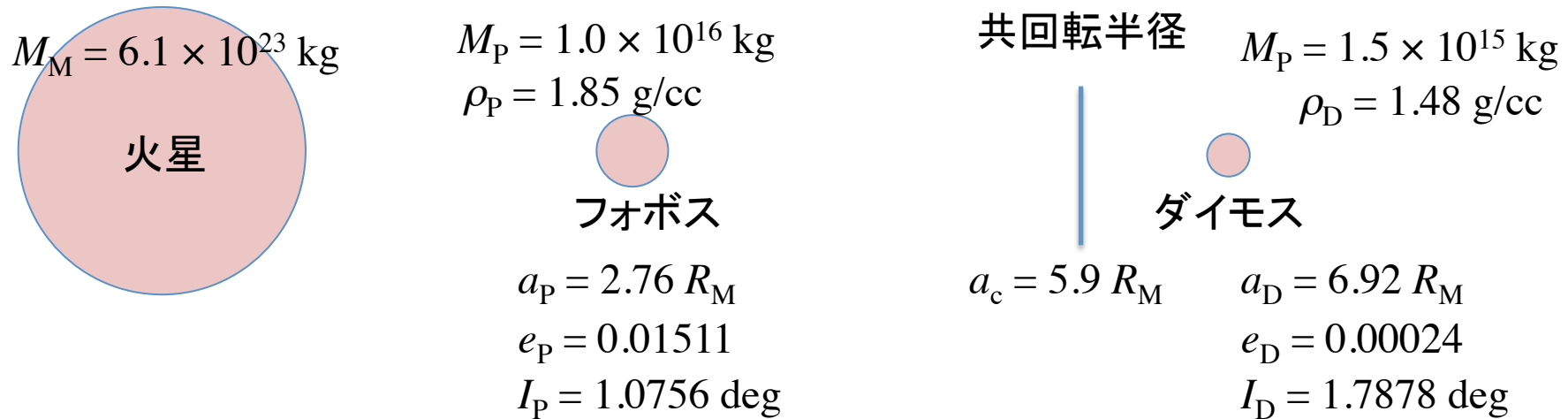
衛星発見(1877)直後に提唱



Singer (1966)によって提唱

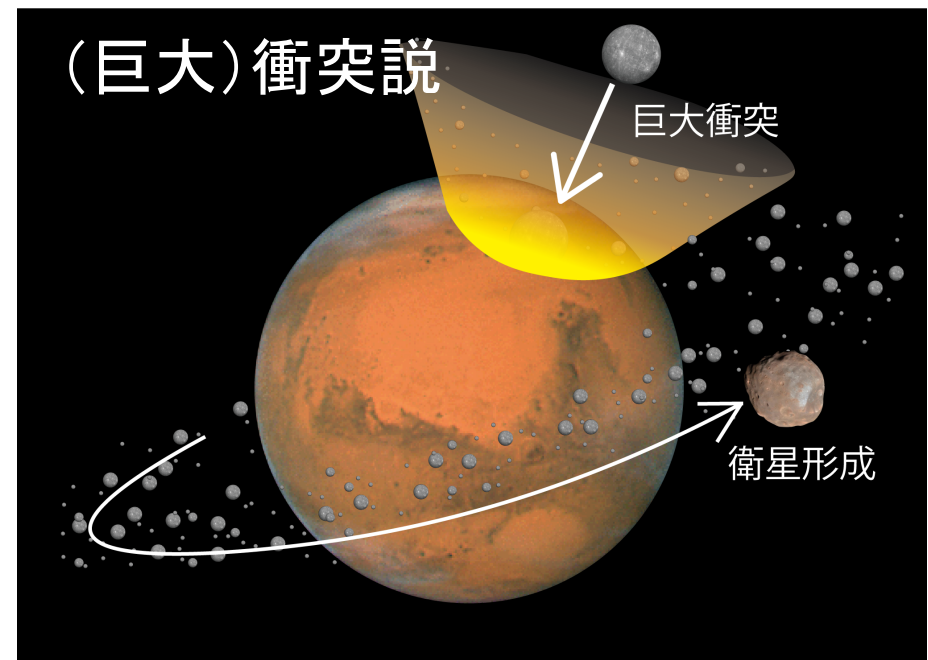
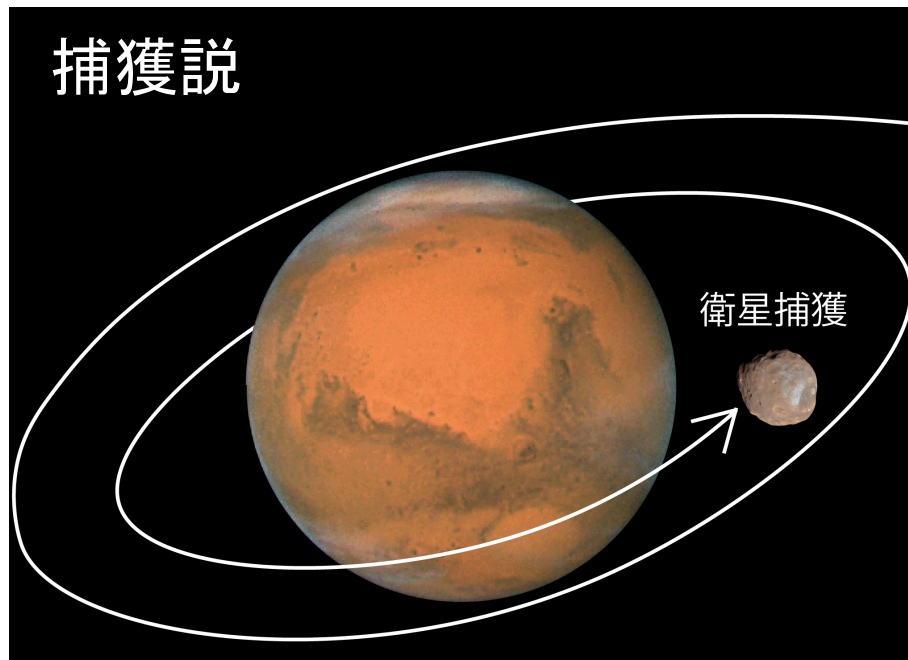
現段階では、どちらの説が正しいかはっきりしていない

# フォボスとダイモス



- ▶ 両衛星の平均密度は、典型的な岩石の密度 ( $\sim 2.5 \text{ g/cc}$ )より小さい  
→ 内部に氷か空隙が存在
- ▶ 両衛星の軌道は、ほぼ円軌道 & 火星赤道面
- ▶ フォボスは火星との潮汐相互作用で内側に移動しており、約1億年で火星に衝突 (Dobrovolskis 1982)。ダイモスは外側に移動but極めて遅い。
- ▶ 表面スペクトルはD-type小惑星に類似 (cf. Tagish Lake meteorite).

# 火星衛星の2つの起源



本発表では、2つの起源の現状を整理する

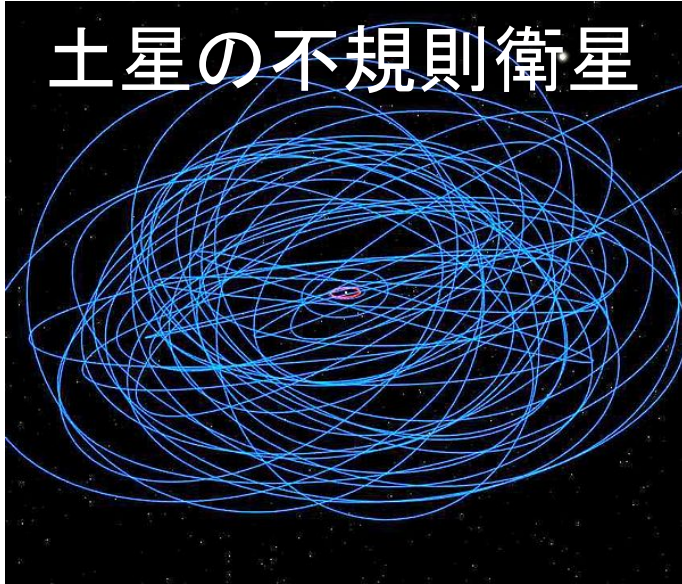
結論:

両説とも火星衛星を作ることには成功していない



# 捕獲説

## 土星の不規則衛星



- ▶ 100個以上の不規則衛星が木星型惑星の周りで発見
- ▶ 不規則衛星の軌道  
 $e = 0.1 \sim 0.6$  かつ  $I = 10 \sim 180$  deg.
- ▶ 多くの研究者は、不規則衛星は捕獲されたものと考えている

もし、火星衛星が捕獲衛星ならば、捕獲直後の軌道は高 $e$ かつ高 $I$ であったはず

## 衛星捕獲プロセス

- ✓ 潮汐による捕獲 (e.g., Goldreich 1963, Mignard 1981, Szeto 1983)
- ✓ 三体相互作用による捕獲 (e.g., Nesvorný et al. 2007, 2014, Agnor & Hamilton 2006, Philpott et al. 2010)
- ✓ ガス抵抗による捕獲 (e.g., Pollack et al. 1979, Čuk & Burns 2004)

# 捕獲説

## 捕獲後の衛星の $e$ と $I$ を下げる2つのメカニズム

### ▶ 火星一衛星間の潮汐相互作用 *e.g., Goldreich 1963, Szeto 1983*

フォボスの  $e$  は45億年間で現在の値まで下げられる。  
ダイモスの  $e$  は10倍以上時間が必要。両衛星  $I$  は下がらない

### ▶ 円盤ガスor原始火星大気によるガス抵抗 *e.g., Pollack et al. 1979, Cuk & Burns 2004*

$a$  と  $e$  に良く効く。衛星が火星に落下する前にガスが無くなる必要あり。不可能ではないが fine tuningが必要。  
 $I$  には効果なし(ただし、木星や土星のような周惑星系円盤があったなら効果あるが、周惑星系円盤はなさそう)

練習問題: 捕獲された衛星の $I$ がランダムな場合、 $I < 2$ 度となる確率 $P$ は?

$P = 1 - \cos(I) = 0.0003 = 0.03\%$  ちなみに、二つの衛星が $I < 2$ 度となるのは $P^2 = 10^{-7}$ 。

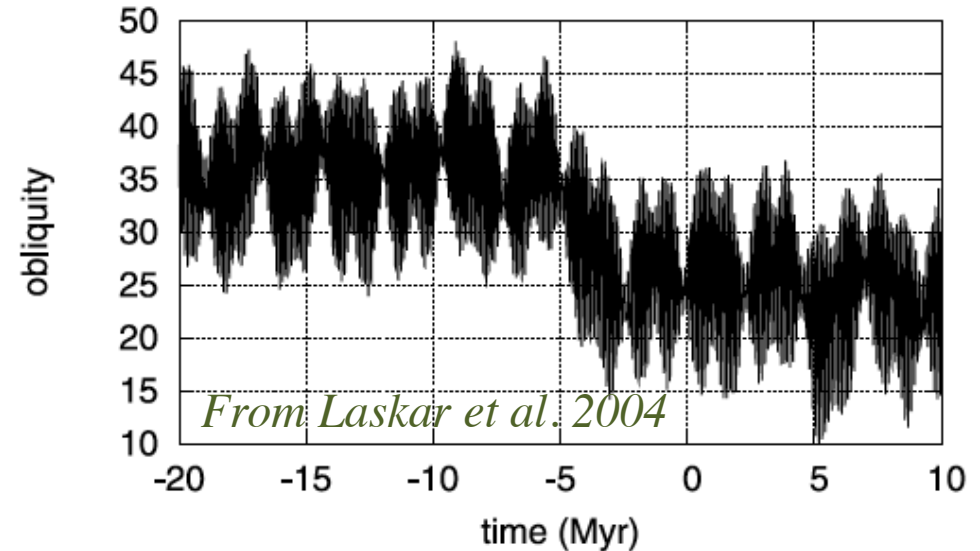
捕獲説で火星衛星を作ることには完全には成功していない



# 火星の自転軸の変化

火星の自転軸の傾きは  
自転軌道共鳴によって  
激しく変動

*e.g., Ward 1974, Laskar & Robutel 1993,  
Touma & Wisdom 1993, Laskar et al. 2004*

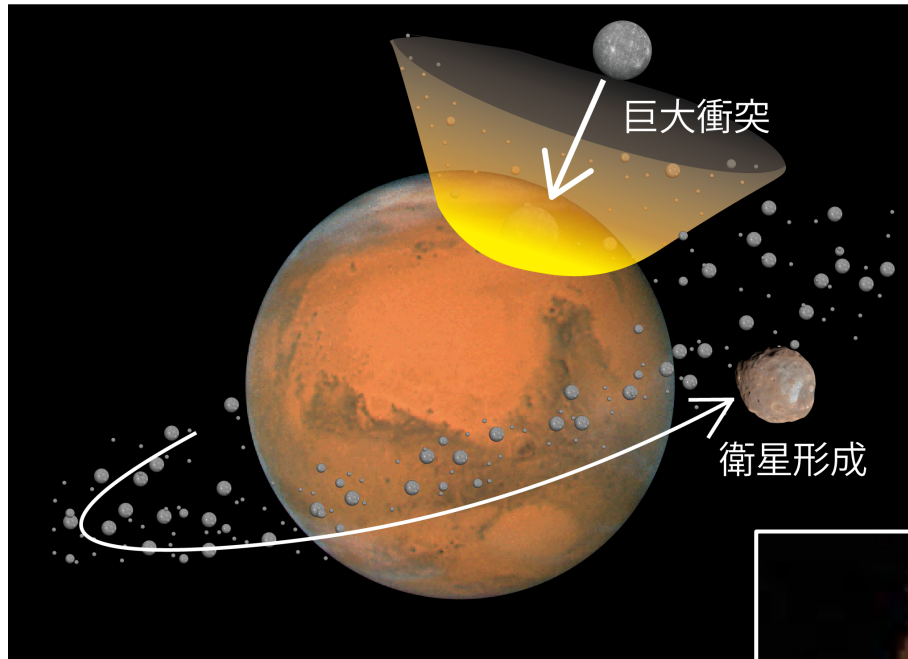


火星の自転軸の変動に対して、火星の衛星は、  
最初の軌道傾斜角を保ちながら追隨する

*Goldreich 1965, Gurfil et al. 2007*

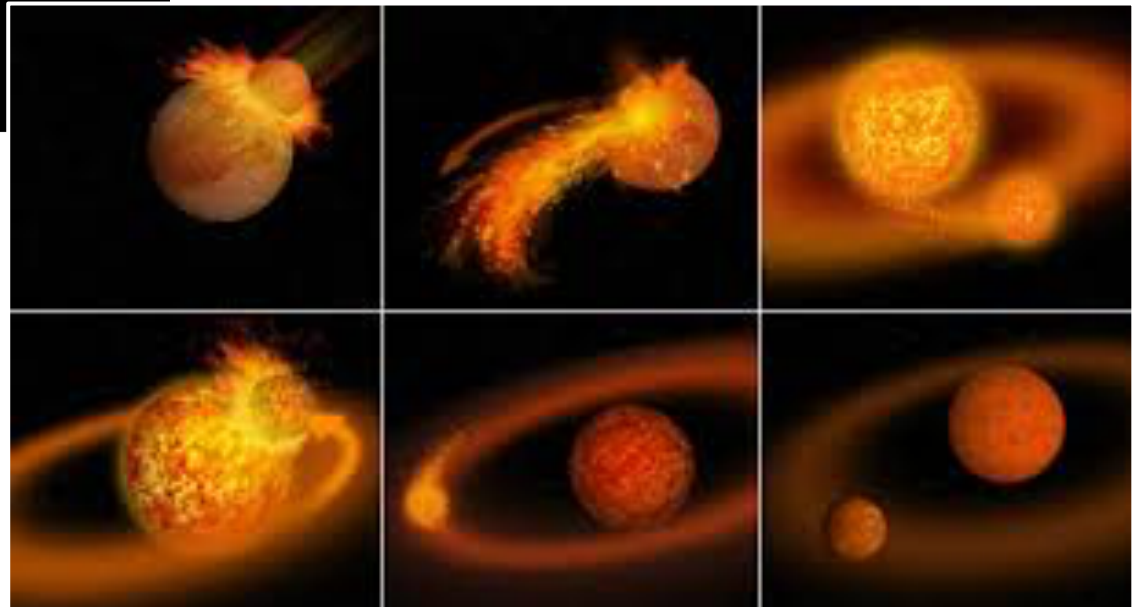
現在、火星衛星が火星の赤道面上にいるということは、  
捕獲時から赤道面上にいたことを強く示唆

# 衝突説



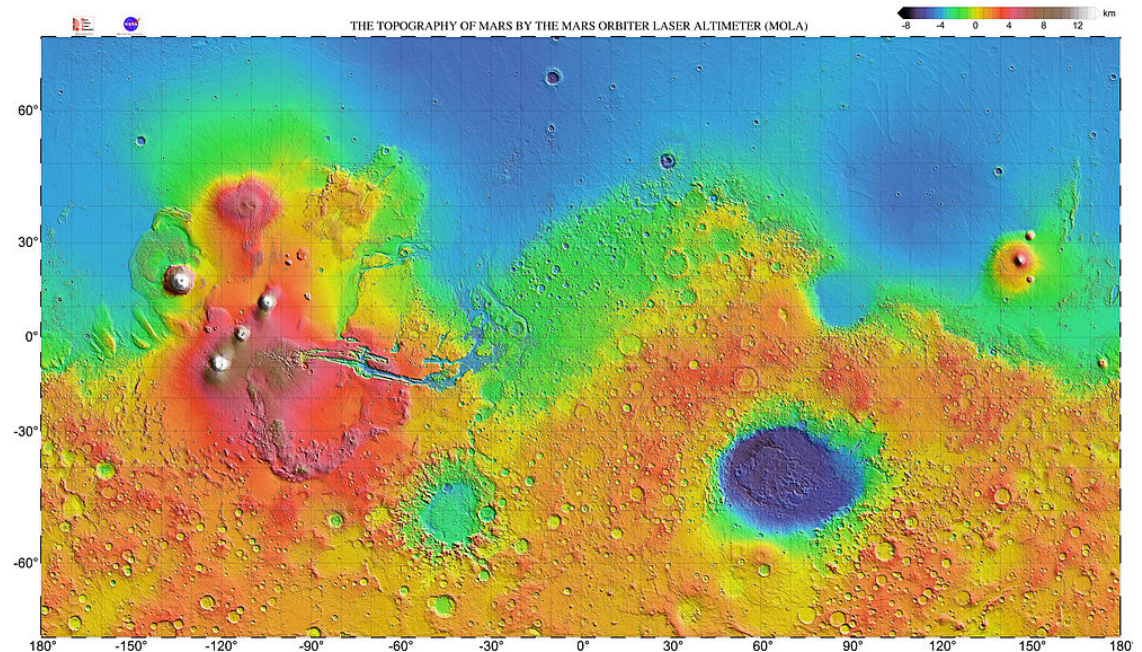
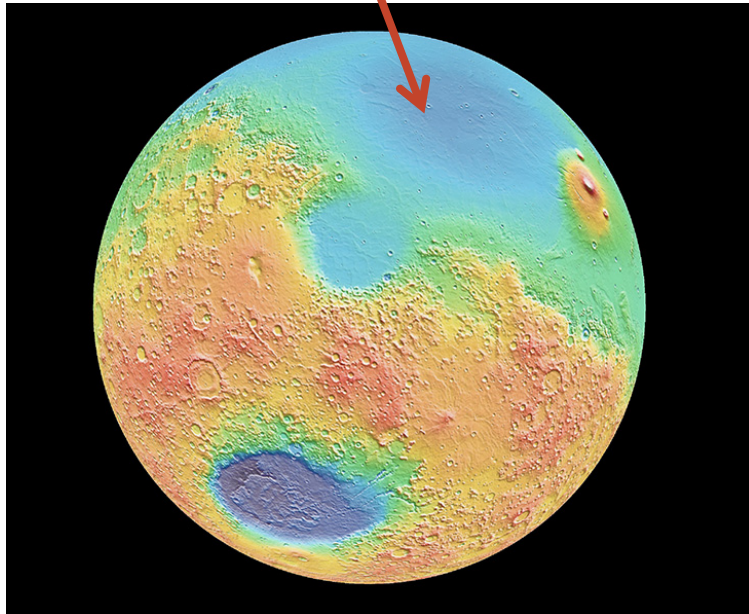
月を形成したと考えられている  
巨大天体衝突説

同じようなことが火星で  
起これば、衛星が作れる？



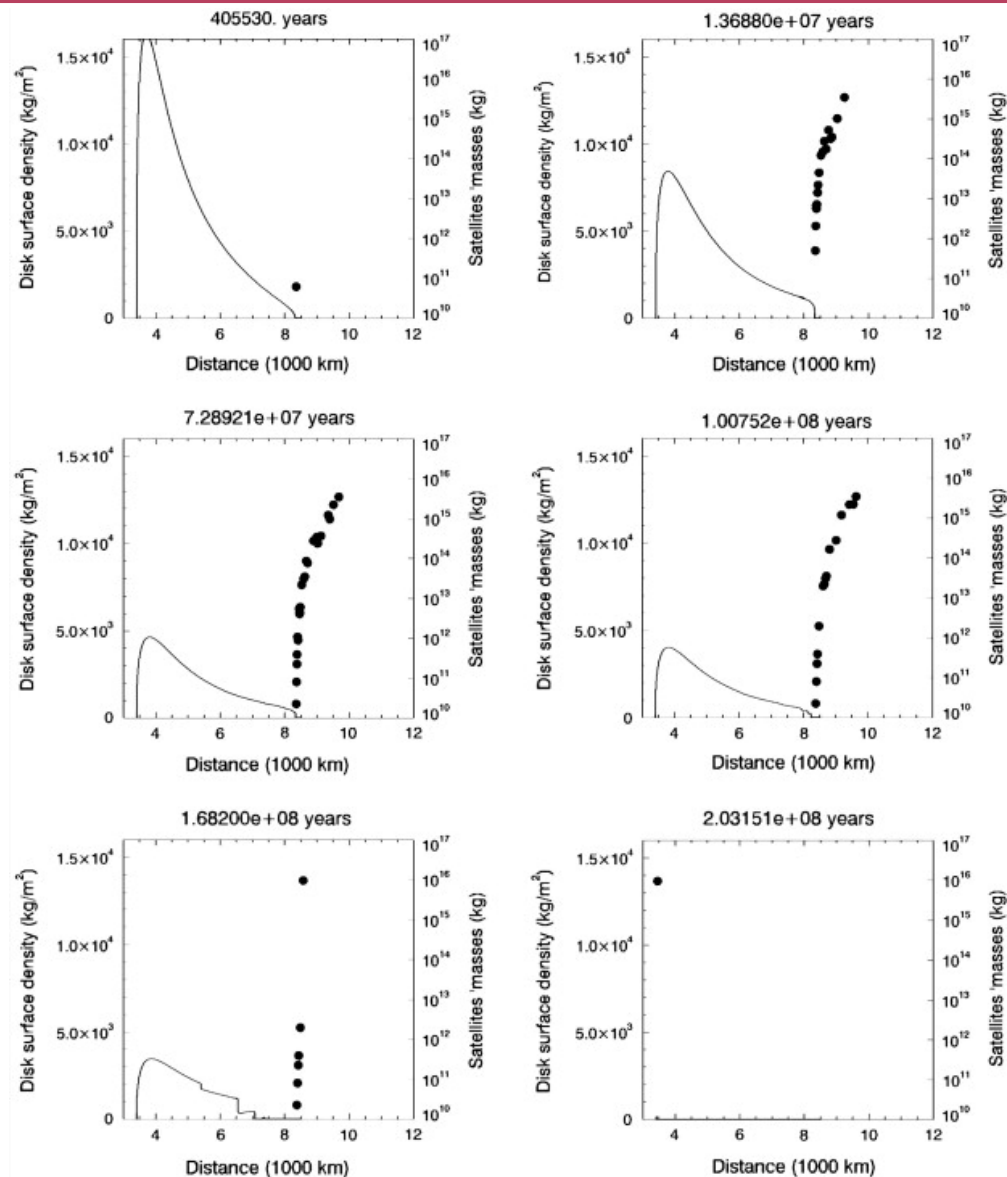
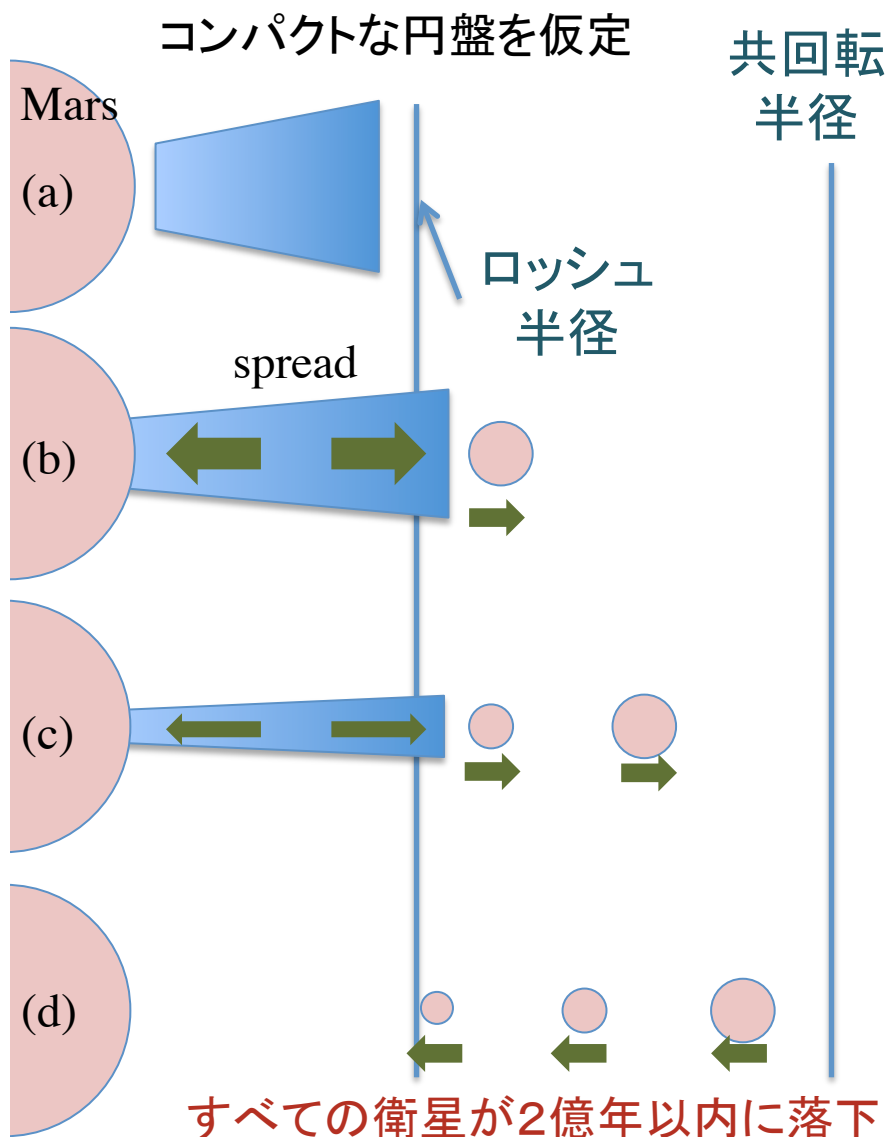
# 衝突説

- ✓ フォボス・ダイモスは極めて小さい → 小さなimpactorで十分
- ✓ 形成される衛星は円軌道で、赤道面にできる(かもしれない)
- ✓ そのような衝突が火星上にクレータとして残っていてもよい
- ✓ **Borealis basin** (最大のクレータ?) を作った衝突天体の質量は火星質量の2%程度 (Craddock 2011)



# 軽い円盤からの衛星形成

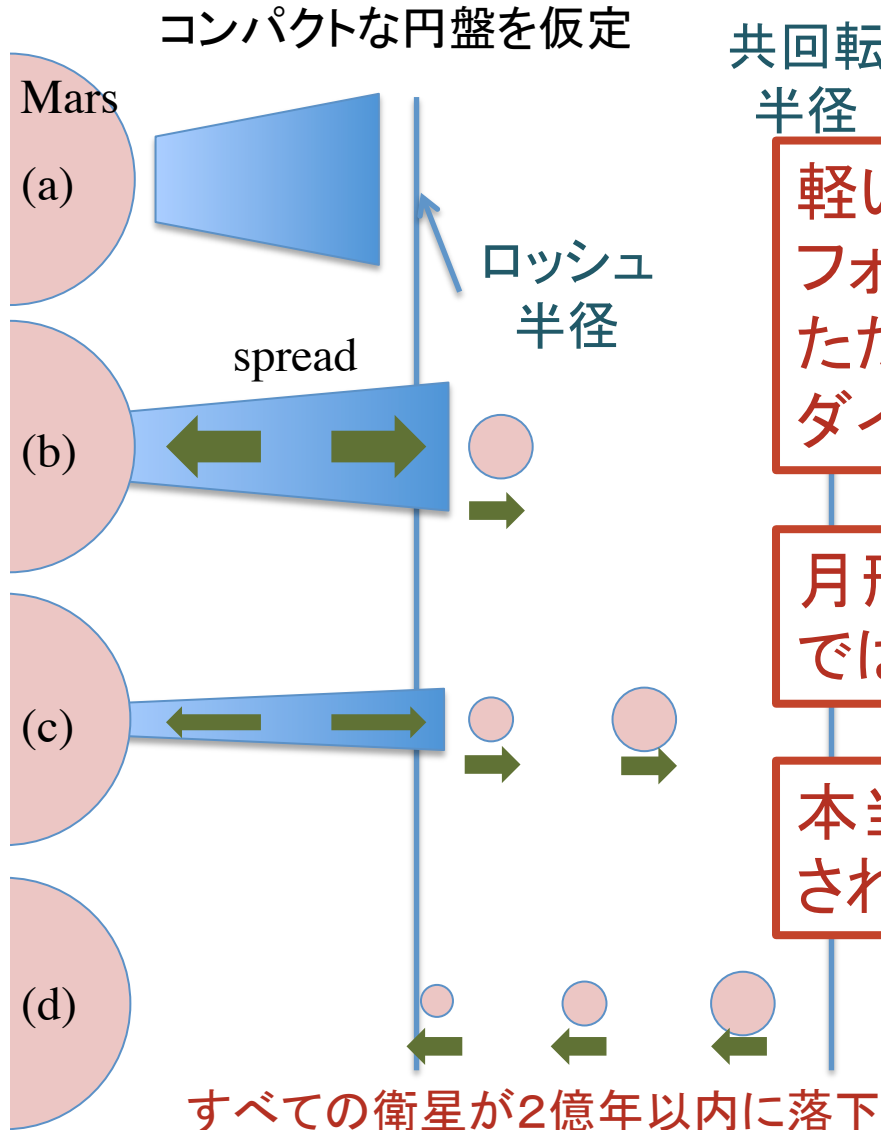
Rosenblatt and Charnoz (2012)





# 軽い円盤からの衛星形成

Rosenblatt and Charnoz (2012)

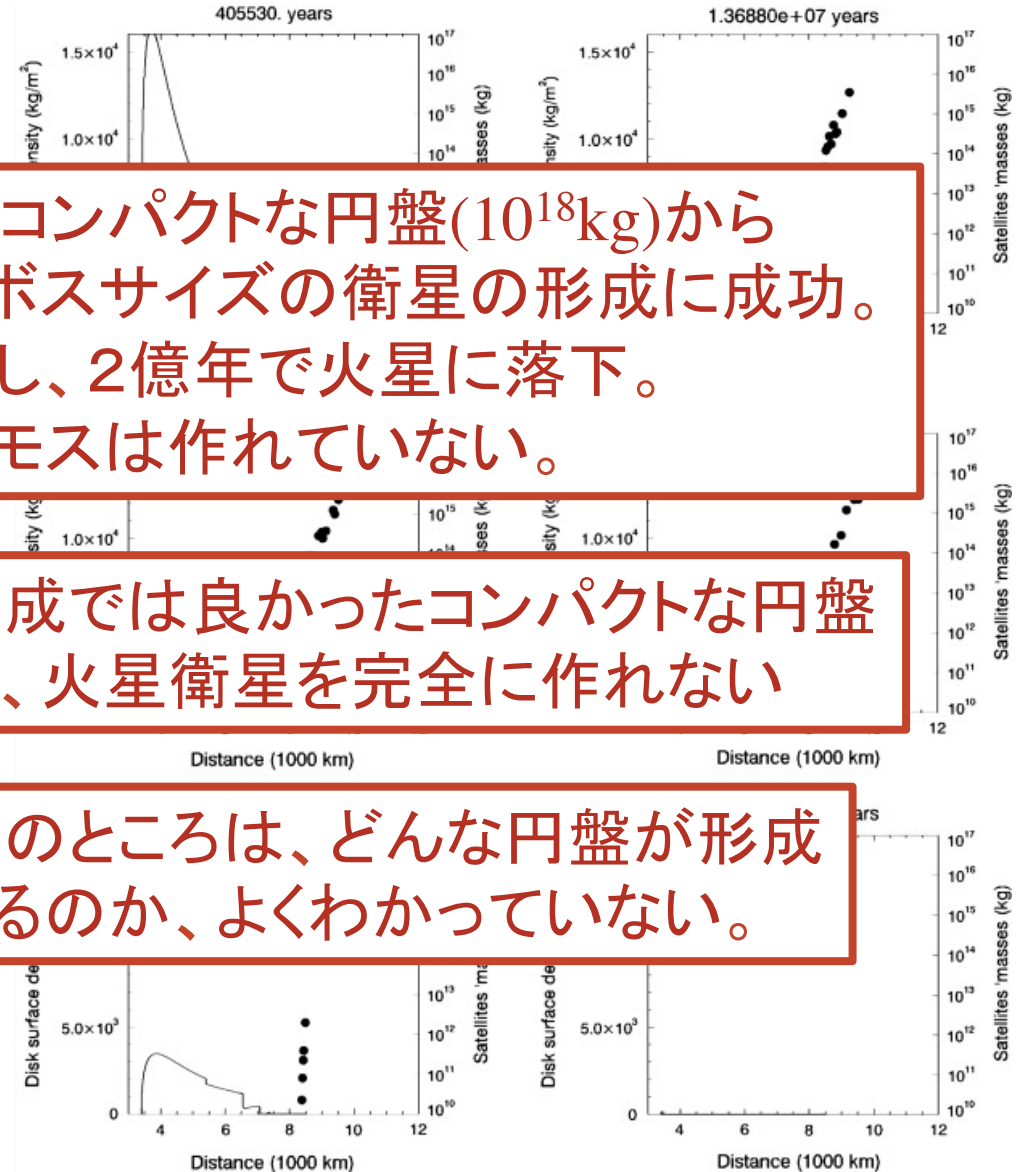


共回転  
半径

軽いコンパクトな円盤( $10^{18}$ kg)から  
フォボスサイズの衛星の形成に成功。  
ただし、2億年で火星に落下。  
ダイモスは作れていない。

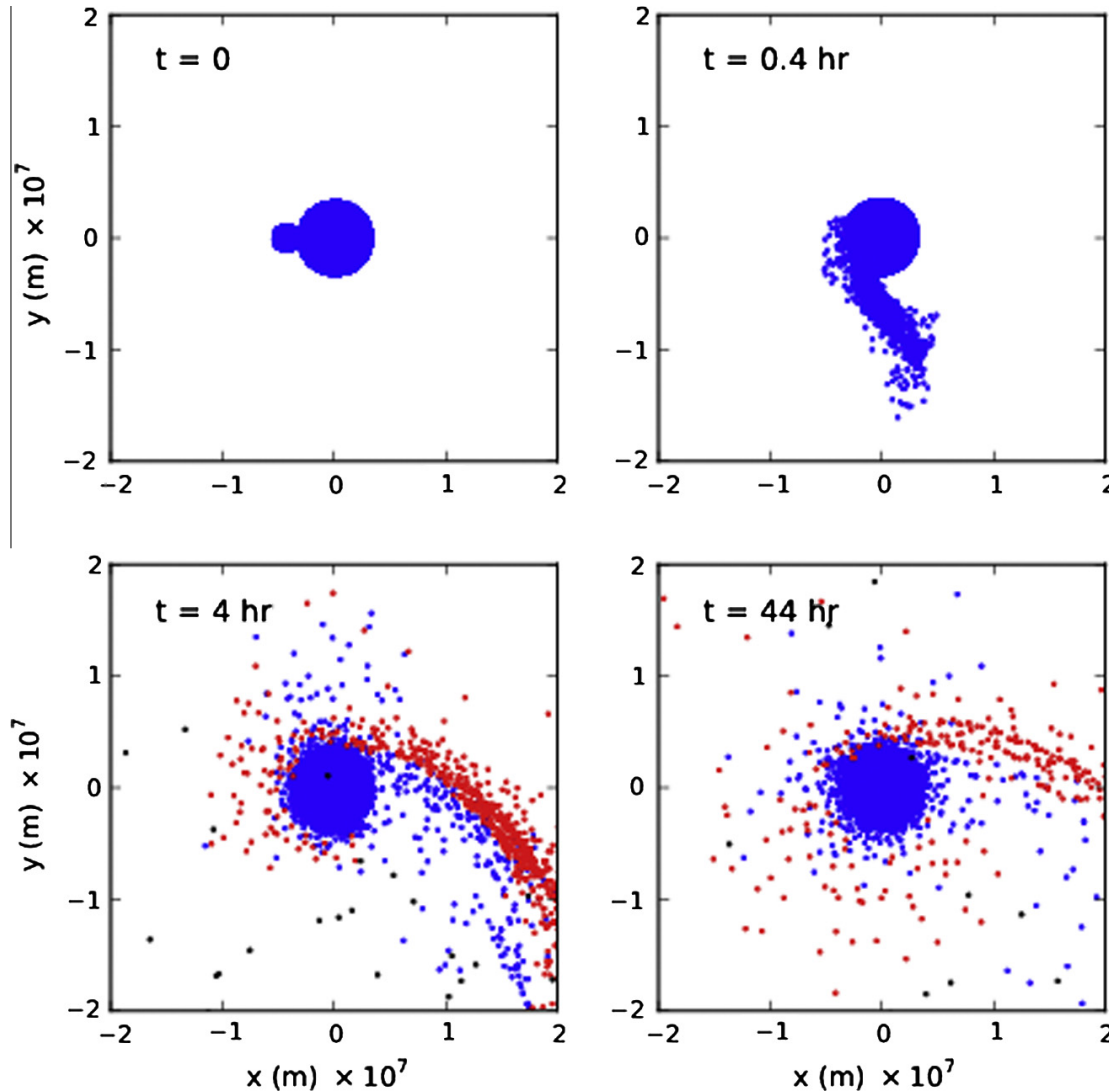
月形成では良かったコンパクトな円盤  
では、火星衛星を完全に作れない

本当のところは、どんな円盤が形成  
されるのか、よくわかっていない。



# 火星への巨大衝突

Citron, Genda & Ida (2015) Icarus



SPH法による衝突計算  
Smoothed Particle Hydrodynamics

Lucy 1977, Gingold & Monaghan  
1977, Miyama et al. 1984

$$M_{\text{imp}} = 2.6\% M_{\text{Mars}}$$

$$v_{\text{imp}} = 1.4 v_{\text{esc}}$$

$$\theta = 45 \text{ deg}$$

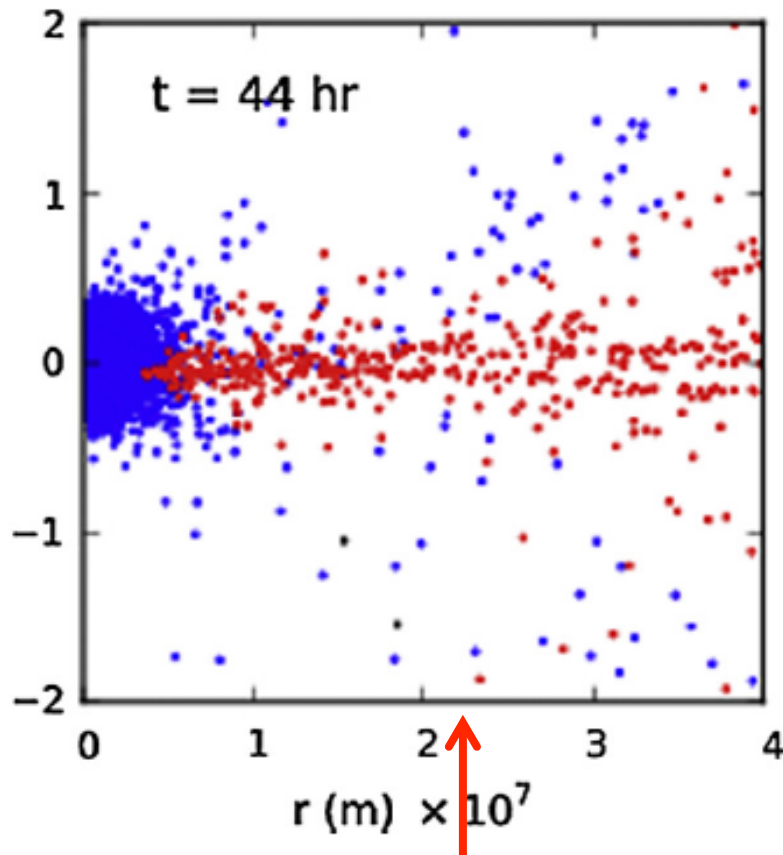
粒子数: 30万個

{ 青 : Mars  
赤 : disk  
黒 : escape



# 火星への巨大衝突

Citron, Genda & Ida (2015) Icarus



ダイモスの軌道！

- ✓ 衝突によって、広がった円盤が形成。円盤は高温1000-2000K
- ✓ ただし、総円盤質量はフォボスの1000倍、かつ1粒子の質量がフォボスよりも大きな計算
- ✓ もっと小さなimpactorでよい（1億粒子とか必要）

衝突説で火星衛星を作ることには成功していない

# 火星衛星の起源：現状のまとめ

## ▶ 捕獲説の問題点：

- ✓ 両衛星の  $e$  と  $a$  を下げるのにガス抵抗が必要、かつガス散逸のfine-tuningも必要
- ✓  $I$  については確率的に厳しい
  - 低  $I$  での捕獲可能性の検討(樋口、末次、大槻、井田)

## ▶ 衝突説の問題点：

- ✓ コンパクトな円盤からはダイモスが作れない
  - より詳細な計算が必要(Brasser、玄田、井田)
- ✓ より小さなimpactorでの計算が必要
  - 超高解像度の数値計算が必要(Reinhardt、玄田、田中)

---

火星衛星SR計画でどうやって起源に決着をつけるのか？

- 1) 探査機のリモセン
- 2) 回収サンプルの詳細分析

# 探査機のリモセン

内部に氷？ Yes → 捕獲説

No → (おそらく)衝突説

ドリルして内部氷の存在を確かめることは無理。  
幾つかのリモセン計測手法を用いて総合的に判断。

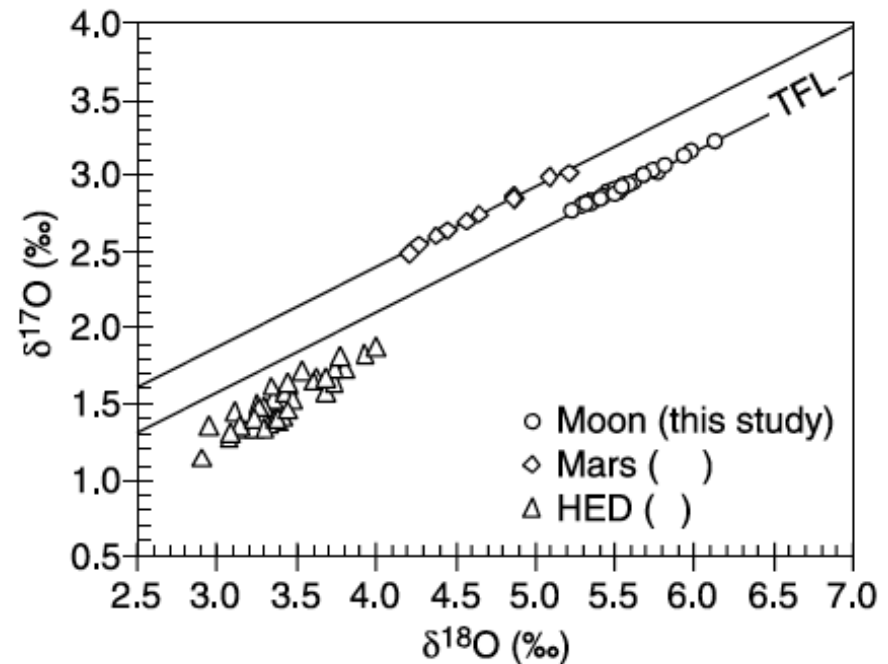
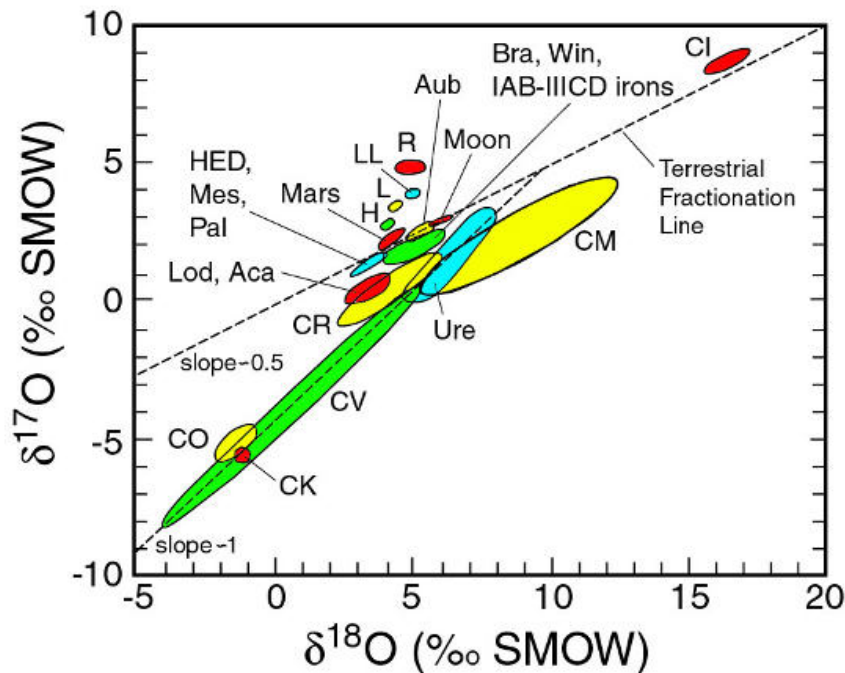
- ▶ Radar sounder (~ 10 m: measure of permittivity)
- ▶ Muon tomography (~ 1 km : density distribution)
- ▶ Gravity field and libration (whole density distribution)
- ▶ Gamma ray and neutron detector (~ 1 m: composition, H)
- ▶ Neutral and ion detector (to detect vaporizing ice)

# 回収サンプルの分析

- ▶ 酸素同位体組成を用いる ( $^{16}\text{O}$ ,  $^{17}\text{O}$  and  $^{18}\text{O}$ )

$$\delta^n\text{O} = ([^n\text{O}/^{16}\text{O}]_{\text{sample}} / [^n\text{O}/^{16}\text{O}]_{\text{SMOW}} - 1) \times 1000\text{‰}$$

Wiechert et al. 2001



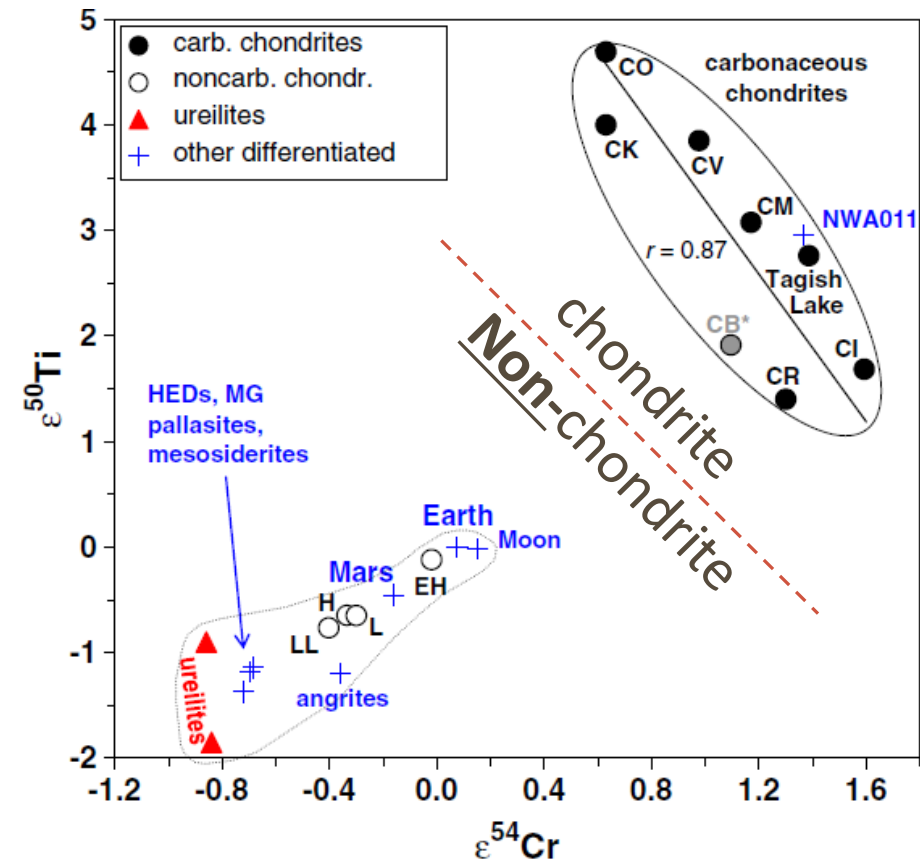
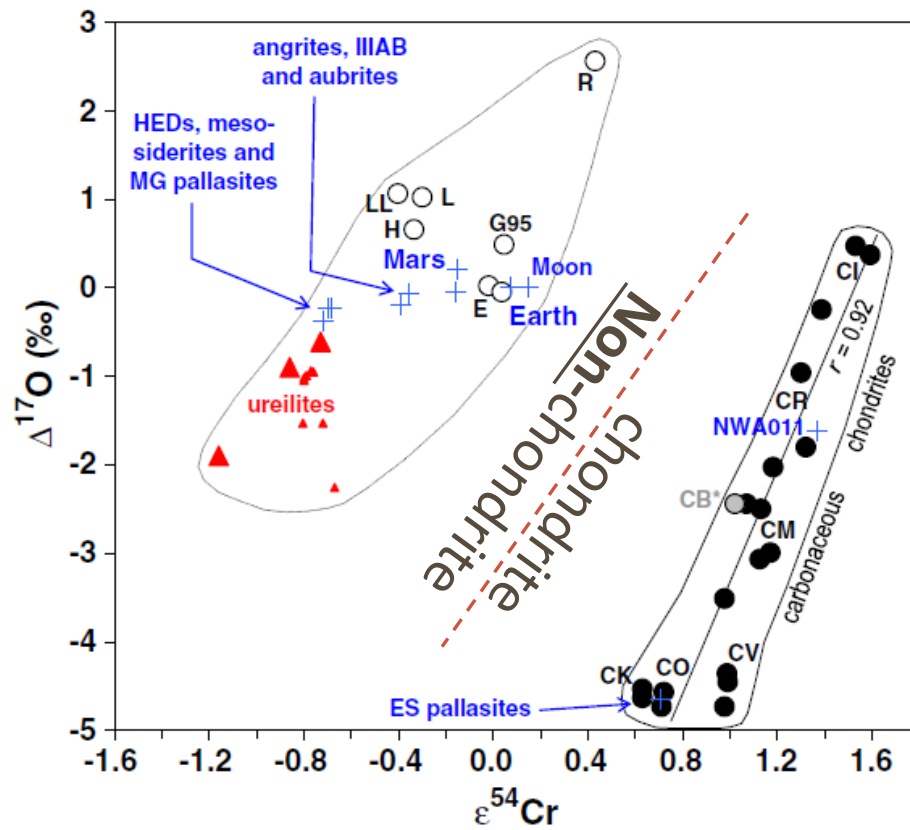
惑星と隕石で異なる酸素同位体組成を持つ

- ✓ 捕獲説 → 隕石(コンドライト)組成
- ✓ 衝突説 → 火星と隕石の混合組成

# 回収サンプルの分析

## ▶ そのほかの指標

Warren 2001



# まとめ

- ▶ 火星衛星の起源を明らかにすることによって、その先のサイエンスが開ける  
比較衛星学、惑星形成論への制約、  
超始原天体のサイエンス、全火星史解読、など
- ▶ 現状では、捕獲説・衝突説ともに火星衛星を完全に作ることは成功していない  
原因：これまであまり注目されてこなかった  
解決策：理論家のがんばり

## Special thanks to:

関根康人、樋口有理可、Ramon Brassler、白井寛裕、木村淳、黒川宏之、末次竜、兵頭龍樹、大槻圭史、小南淳子、中田亮一、中本泰史、井田茂、橘省吾、小宮剛、火星衛星SR計画科学検討チーム



**補足資料**

# フォボスの潮汐軌道進化計算

*Szeto 1983*

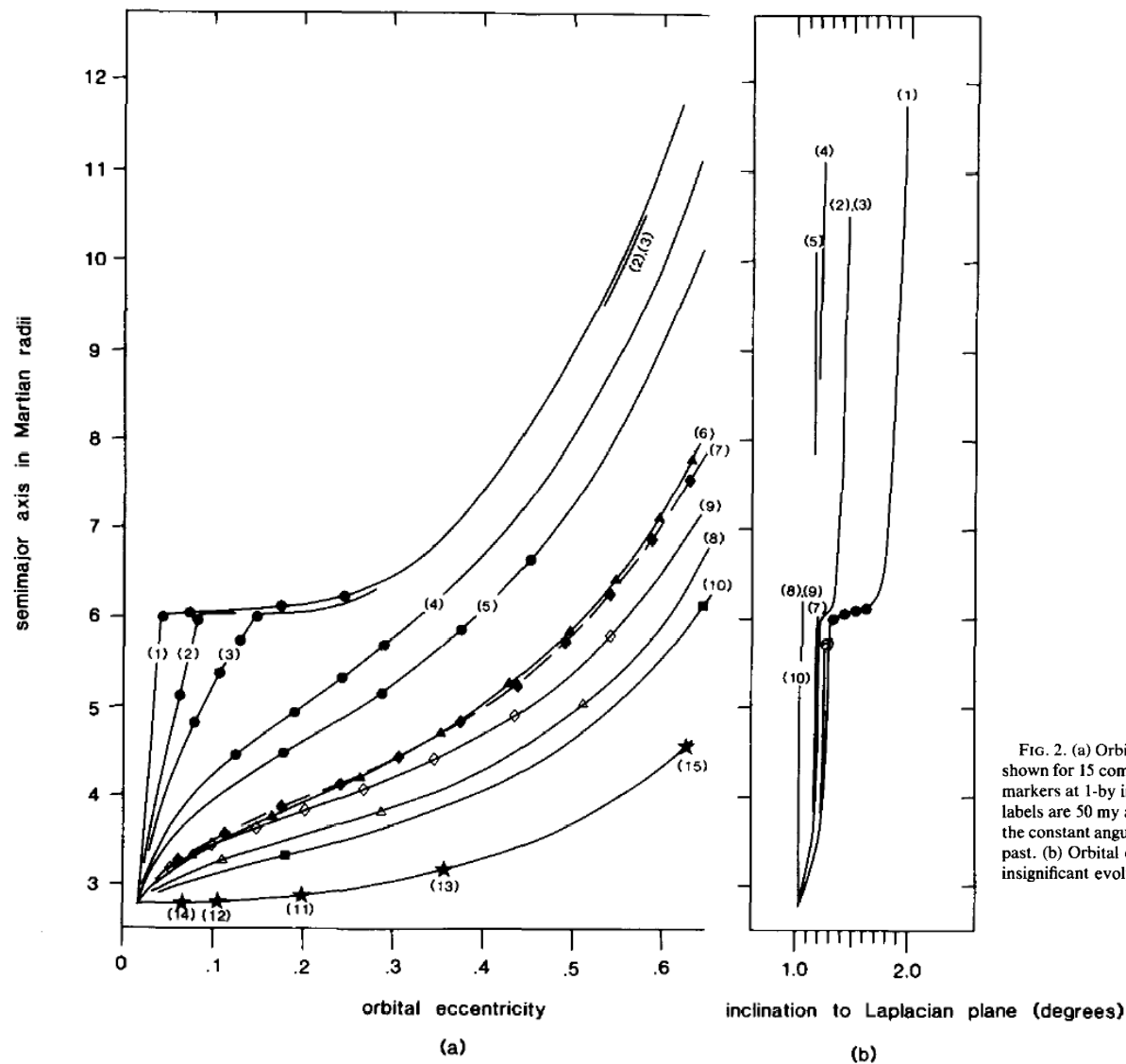


FIG. 2. (a) Orbital history of Phobos in  $(a, e)$  space. Evolution of the orbit of Phobos in  $(a, e)$  space is shown for 15 combinations of  $Q$  laws detailed in Table III and Fig. 1. Dots on curves (1) to (5) are time markers at 1-by intervals.  $\blacktriangle$ ,  $\blacklozenge$ ,  $\triangle$ ,  $\diamond$ ,  $\blacksquare$  are labels for curves (6), (7), (8), (9), and (10). Consecutive labels are 50 my apart. Only one marker is shown for each of (11)–(15), as these curves coincide with the constant angular momentum curve.  $\star$  next to each label denotes the orbit of Phobos at 60 my in the past. (b) Orbital evolution of Phobos in  $(a, i)$  space. The orbital inclination of Phobos has undergone insignificant evolution in comparison with orbit size. (11)–(15) exhibit no evolution in inclination.

# ダイモスの潮汐軌道進化計算

*Szeto 1983*

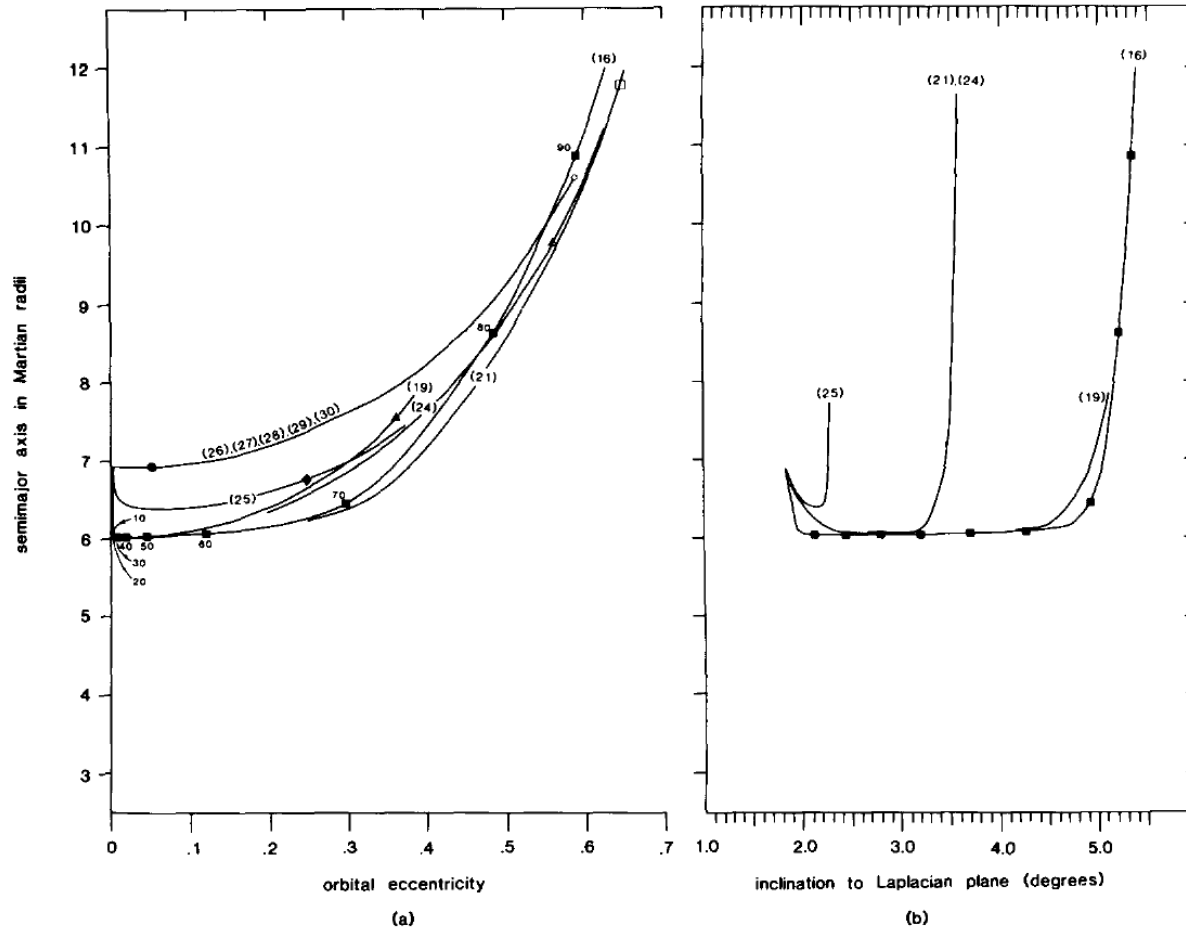
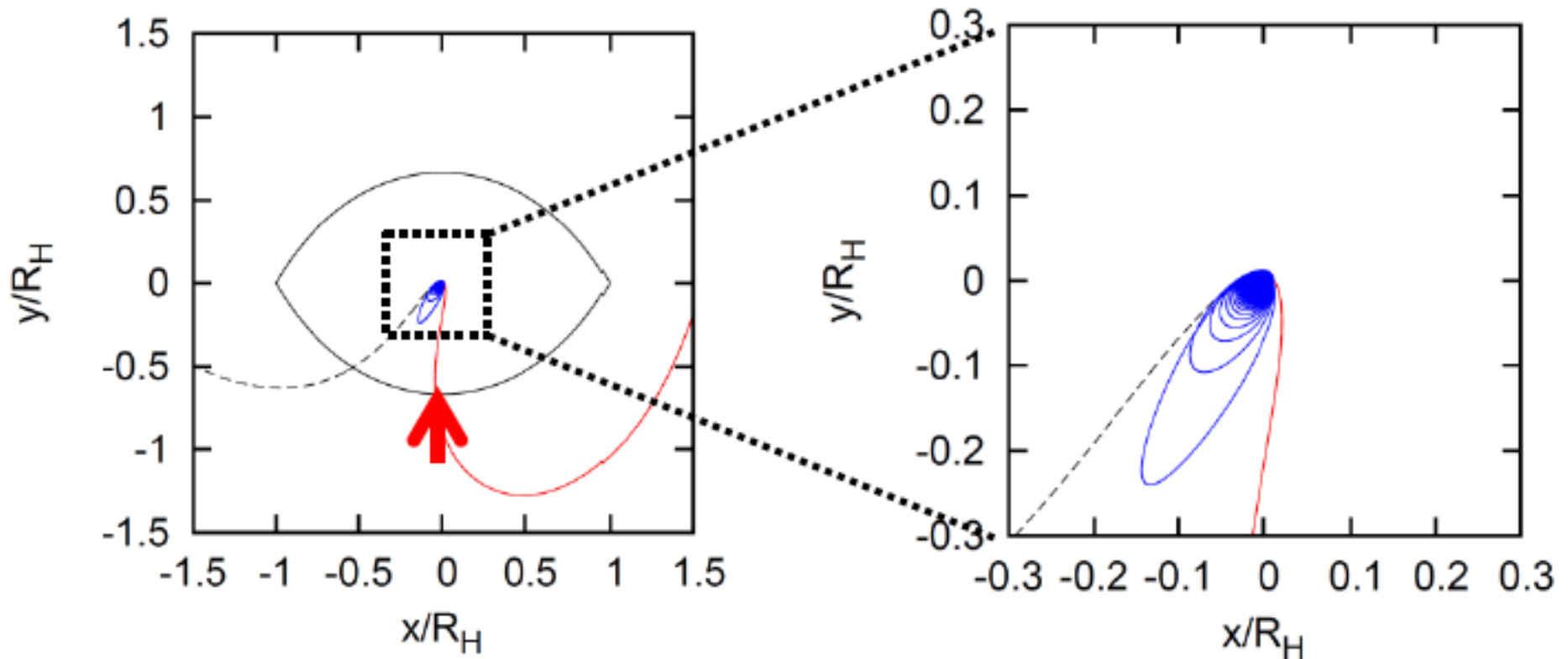


FIG. 3. (a) Orbital history of Deimos in  $(a, e)$  space. Curves (16)–(30) use the same  $Q$  laws as (1)–(15), respectively. ■'s on curve (16) mark the evolution of Deimos in billion years past. Curves (26)–(30) coincide with the constant momentum curve, but they carry different time scales. ● and ○ correspond to the following times: (26) 180 by, 310 by (● and ○, respectively); (27) 380 by, 620 by; (28) 360 by, 570 by; (29) 3300 by, 4200 by; (30) 680 by, 990 by. The remaining curves are marked only at one time each. They are: ▲—(19) 1000 by; □—(21) 60 by; △—(24) 700 by; ◆—(25) 500 by. (b) Orbital history of Deimos in  $(a, i)$  space. Evolution is shown for selected  $Q$  laws. Runs (26)–(30) exhibit no evolution. Ones that are not shown here lie somewhere between curves (16) and (25). The time markers are 10 by apart.

# 円盤ガス抵抗による軌道進化



末次(神戸大)@衛星系研究会