

神話通りの衛星形成シナリオ!?

天文学×人文学のいろいろ

藤井悠里 (京都大学 人間・環境学研究科)



巨大氷惑星



巨大ガス惑星

Giant impact? 捕獲?
→ JAXA MMX mission

岩石惑星



©JAXA

Giant impact

月



フォボス



ダイモス

©NASA

Selected Moons of the Solar System, with Earth for Scale

Planets

Earth Mars Jupiter Saturn Uranus Neptune Pluto



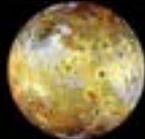
Moon

$0.01 M_{\text{Earth}}$

Phobos

Deimos

$\sim 10^{-8} M_{\text{Mars}}$



Io



Europa



Ganymede



Callisto

$\sim 10^{-4} M_{\text{Jupiter}}$

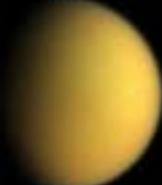
Mimas

Enceladus

Tethys

Dione

Rhea



Titan

Hyperion

Iapetus

Phoebe

$\sim 10^{-4} M_{\text{Saturn}}$

Puck

Miranda

Ariel

Umbriel

Titania

Oberon

$\sim 10^{-4} M_{\text{Uranus}}$

Proteus



Triton

Nereid

$\sim 10^{-4} M_{\text{Neptune}}$



Charon

$0.1 M_{\text{Pluto}}$

Moons

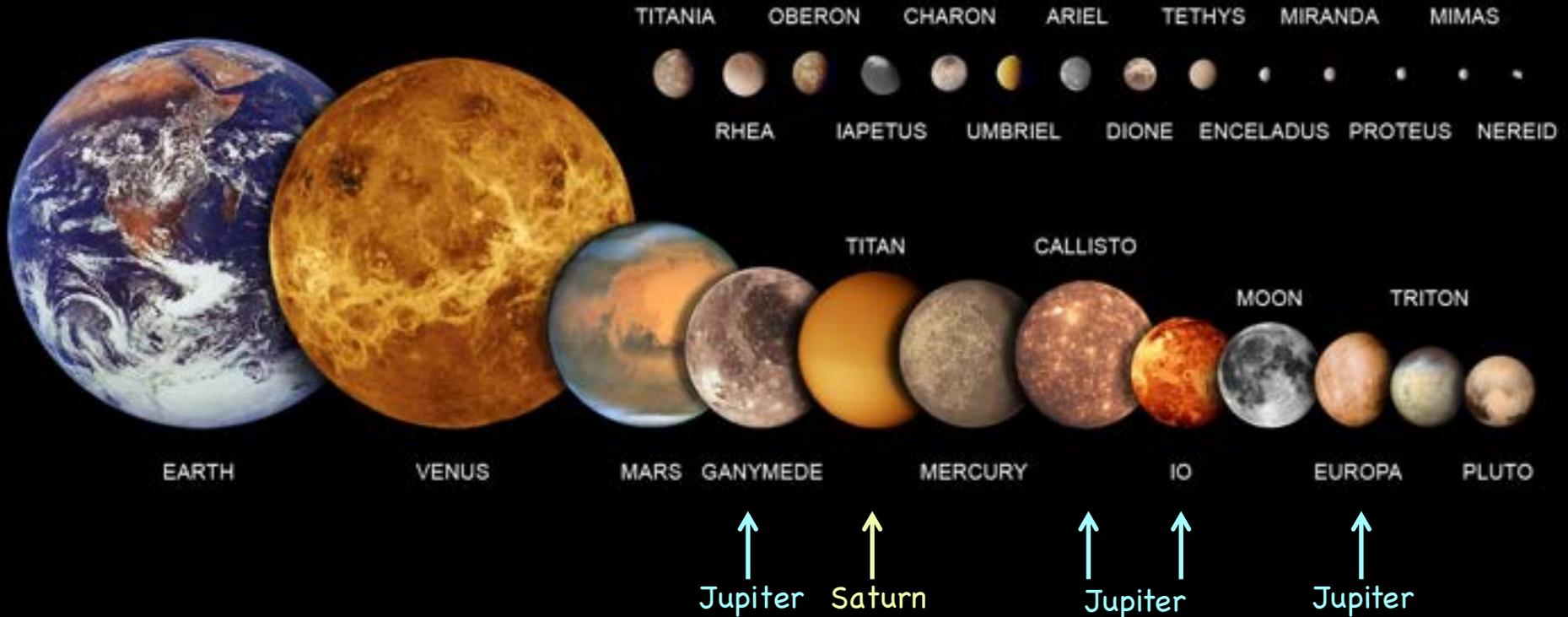
Scale: 1 pixel = 25 km



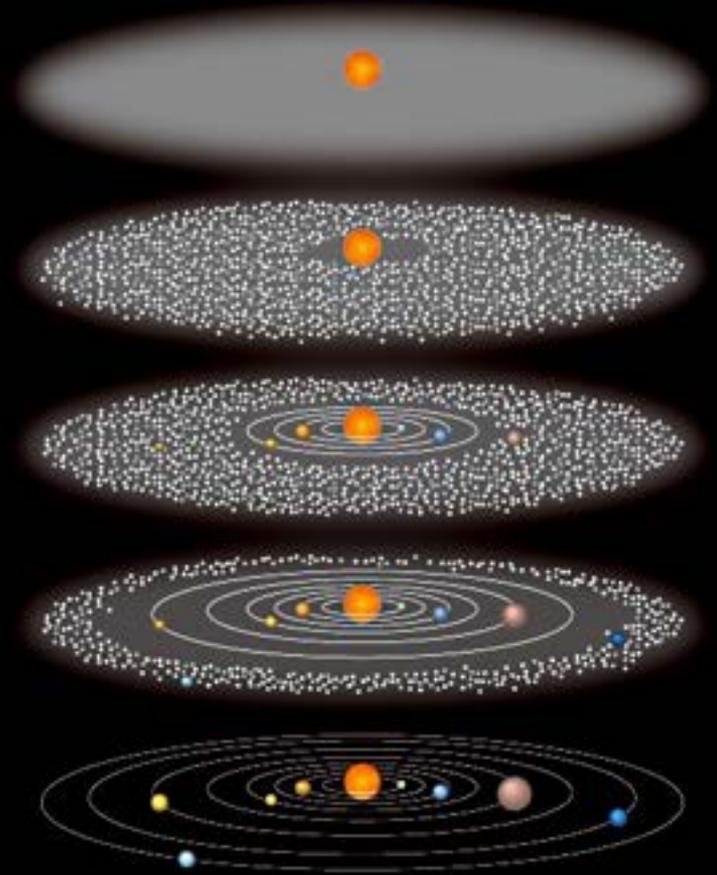
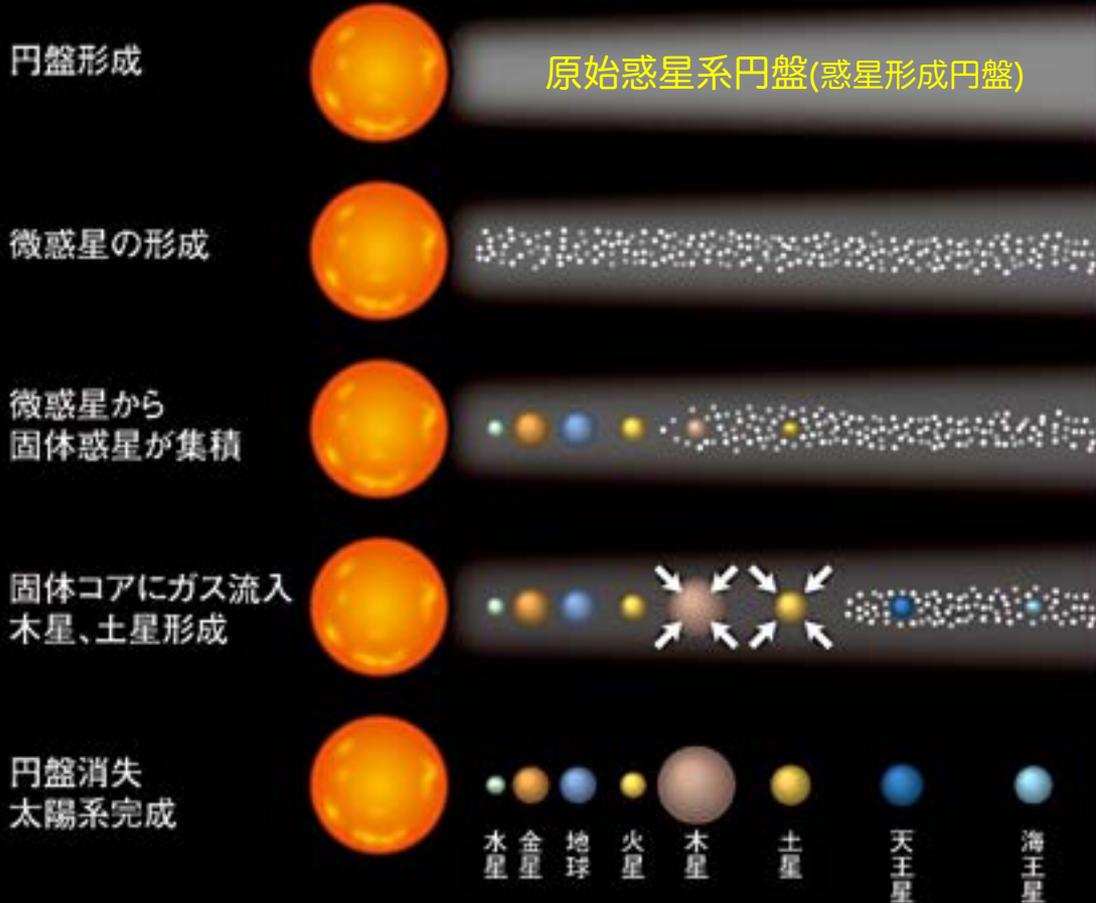
Earth



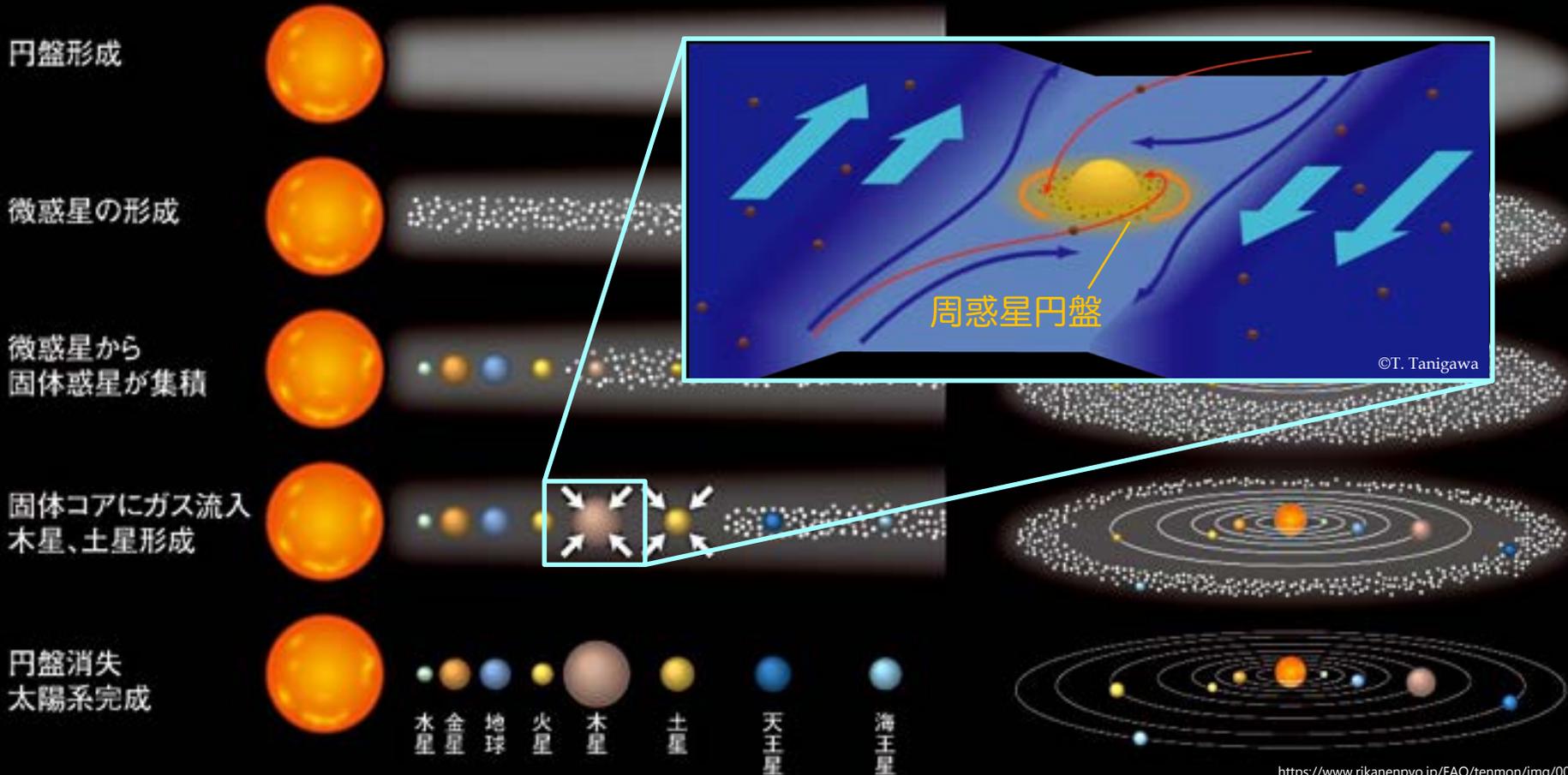
Rocky Bodies in Solar System

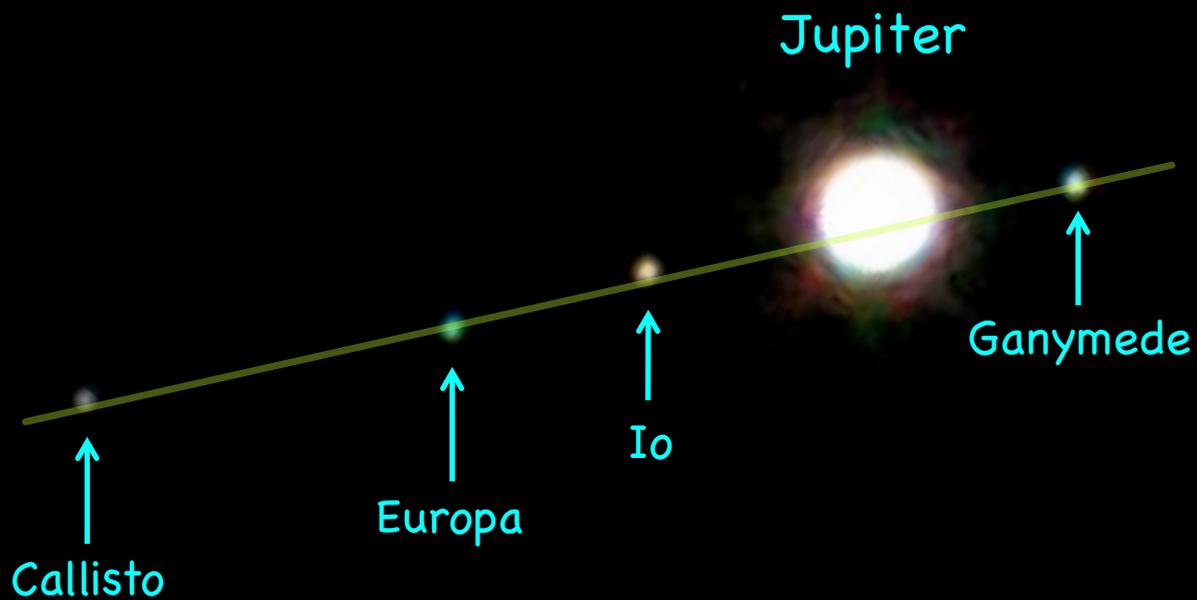


太陽系の形成過程

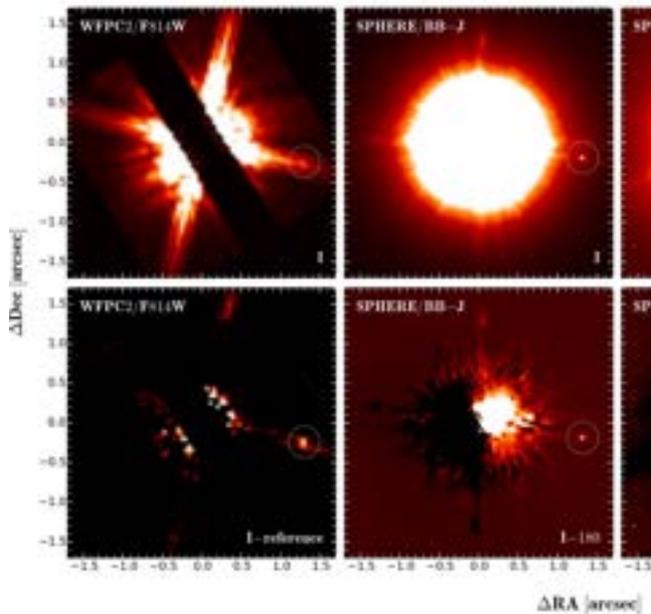


衛星系の形成現場

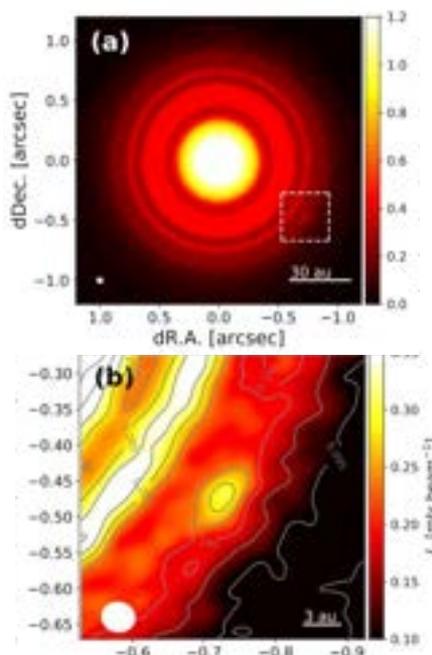




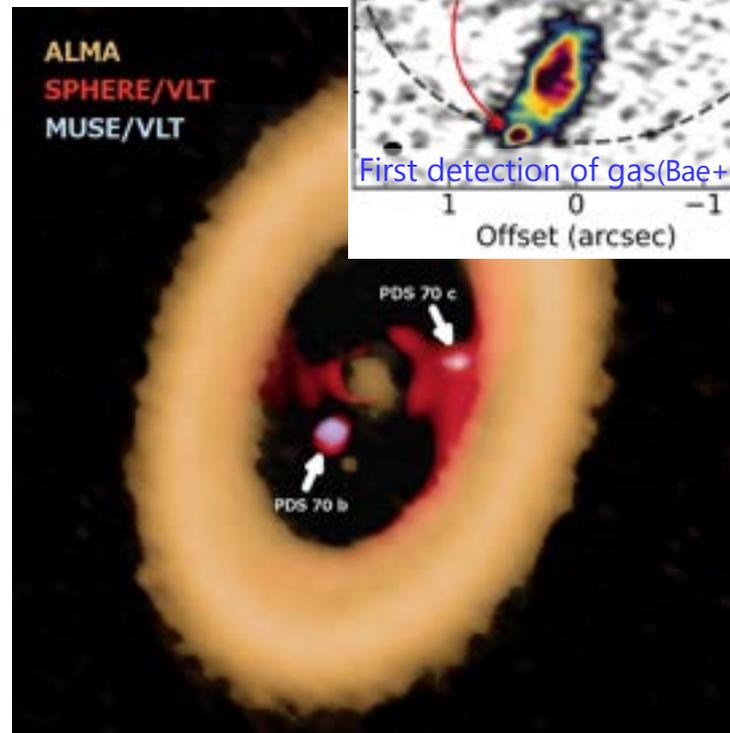
周惑星円盤の観測例



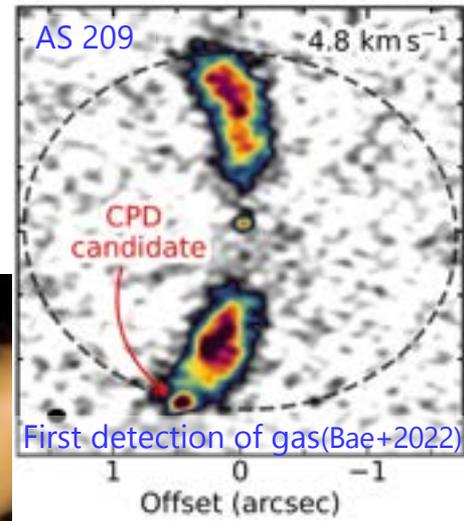
Candidate of a CPD @210 au around CS Cha
(Ginski+ 2018)



Candidate of a CPD @52au around TW Hya
(Tsukagoshi+ 2019)

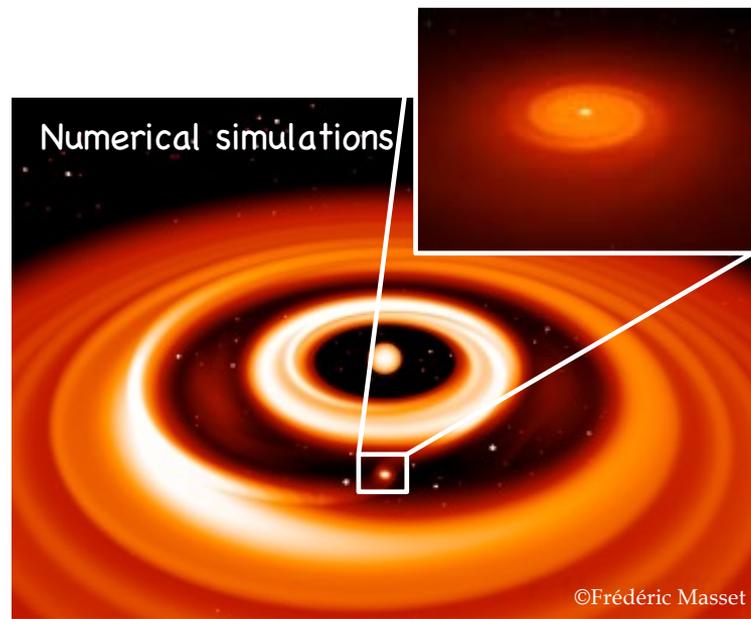
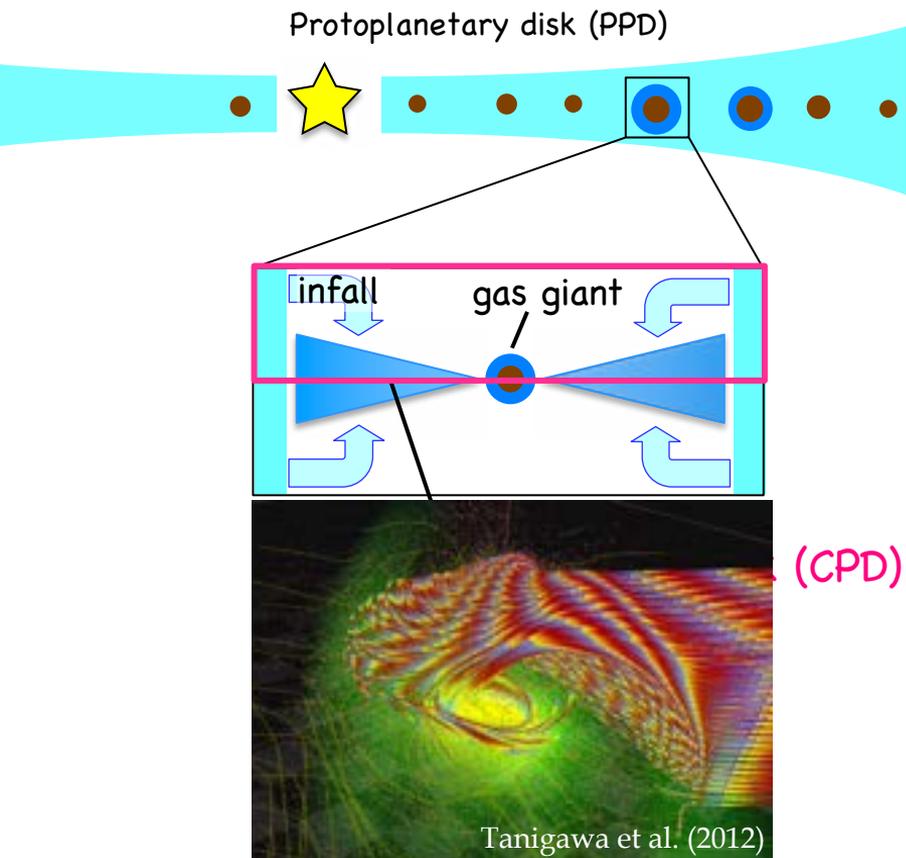


Detection of CPDs @23 & 35 au around PDS70
(Isella+ 2019)



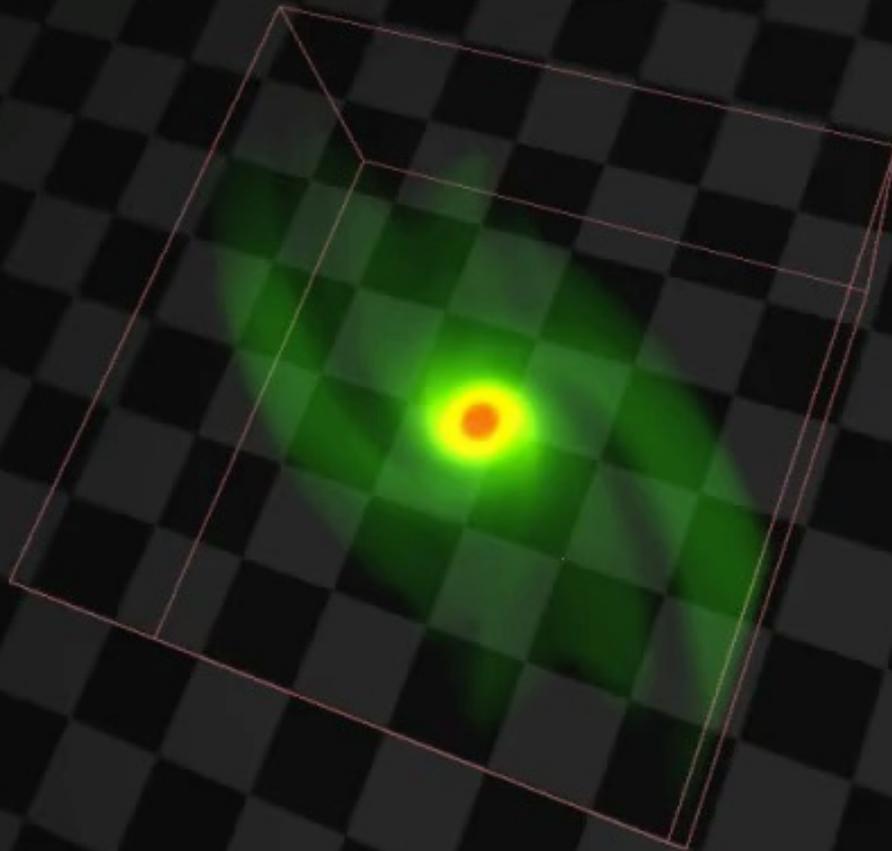
First detection of gas(Bae+2022)

観測の困難さからシミュレーションが先行



e.g. Machida+ (2006, 2008, 2010)
Klahr & Klay (2006), Ayliffe & Bate (2009)
Tanigawa+ (2012), Gressel+ (2013)
Szulagyi+ (2016), Szulagyi (2017)

ガス惑星近傍へのガスの降着



Tanigawa et al. (2012)
Visualized by T. Takeda

Satellite Formation Models

- Minimum mass sub-nebula models
 - hold whole material to form moons

e.g. Lunine & Stevenson (1982), Lissauer & Stewart (1993)

- Solid enhanced minimum mass model
 - gas component reduced, laminar

Mosqueira & Estrada (2003ab), Estrada & Mosqueira (2006)

- Gas-starved disk model
 - actively supplied viscously evolving disk

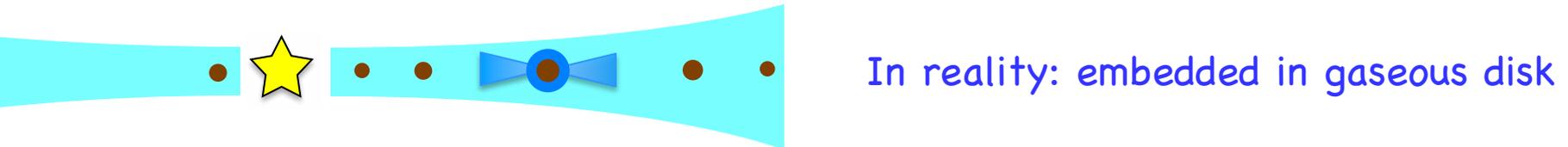
Canup & Ward (2002, 2006), Sasaki+ (2010), Ogihara+ (2012)

Satellite Formation Models

- Minimum mass sub-nebula models
- Solid enhanced minimum mass model

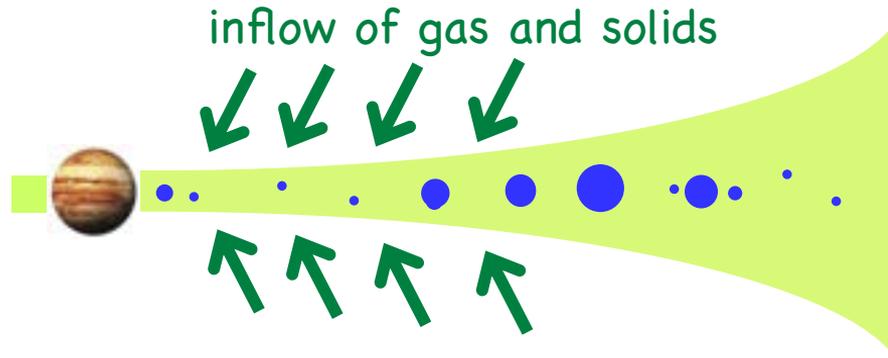


- Gas-starved disk model



Moon Formation in Gas-starved Disk

Canup & Ward (2002, 2006)



interaction between
disk and moons

Proto-satellites fall onto Jupiter

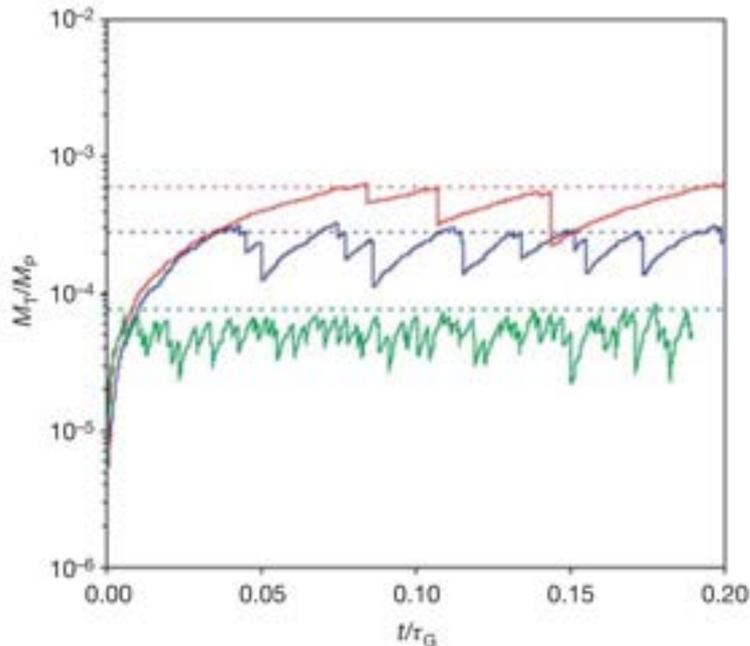
Moon Formation in Gas-starved Disk

Canup & Ward (2002, 2006)

“Survivors” became Galilean moons



$M_{\text{moons, total}} \sim 10^{-4} M_{\text{planet}}$ can be explained



衛星が落下しないためには

- 周惑星円盤がタイミングよく散逸する

Canup & Ward (2002, 2006)

- 円盤内縁と惑星の間に隙間がある

Sasaki+ (2010), Ogihara & Ida (2012), Shibaie+ (2017, 2019),
Batygin (2018), Batygin & Morbidelli (2020), Fujii+ (submitted)

- 円盤の構造で衛星移動が止まる

Fujii+ (2017), Arakawa & Shibaie (2019), Fujii & Ogihara (2020)

*ひとつ止められると、他の衛星も止められることが多い

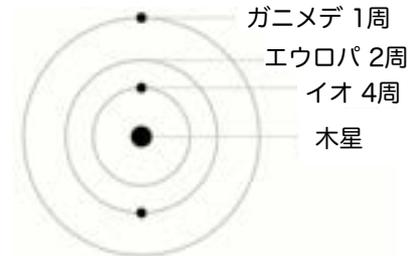
移動が十分ゆっくりな場合は後続の衛星を共鳴軌道に捕獲

Ogihara & Kobayashi (2013)

→ ガリレオ衛星の形成には有利, タイタンの形成には不都合

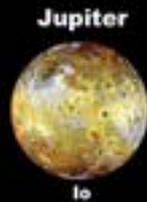


(Batygin 2018)

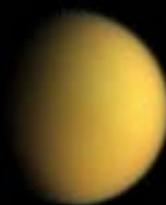


4:2:1 = ラプラス共鳴

Selected Moons of the Solar System, with Earth for Scale



Saturn



Hyperion



Uranus



Neptune



Pluto



土星の衛星全部の
質量の95%以上！

なぜ土星には巨大衛星がひとつ
しかないのかは長年の謎だった

N体シミュレーションでは複数
orゼロという結果になりがち
(Canup & Ward 2006, Ogiwara & Ida 2012)

Saturn
February 24, 2009 14:25 UT
HST WFPC2



1673W R
F555W V
1410W B

25,000 miles
40,200 kilometers



Earth

軌道を大きく変える要素

Type I migration (惑星/衛星移動)

- 円盤と天体との相互作用によって天体の軌道が変化
- 系外惑星のホットジュピターの軌道を説明 (移動が内向きになる事が多い)

衛星が惑星に落下してしまう

軌道移動のタイムスケール (e.g., Paardekooper et al. 2011)

$$t_a = \frac{1}{\beta} \left(\frac{M_s}{M_p} \right)^{-1} \left(\frac{\Sigma r^2}{M_p} \right)^{-1} \left(\frac{c_s}{v_K} \right)^2 \Omega^{-1}$$

β : 移動の向きを決める係数

面密度や温度構造の
半径依存性で決まる

$\beta > 0$: 外向き

$\beta < 0$: 内向き

$$\Sigma \propto r^{-p}$$

$$T \propto r^{-q}$$

移動の向きや速さを知りたい

→ 円盤の構造を決める

※過去の多くのモデルでは単一ベキを仮定

M_p : 中心惑星の質量

M_s : 衛星の質量

Σ : 面密度

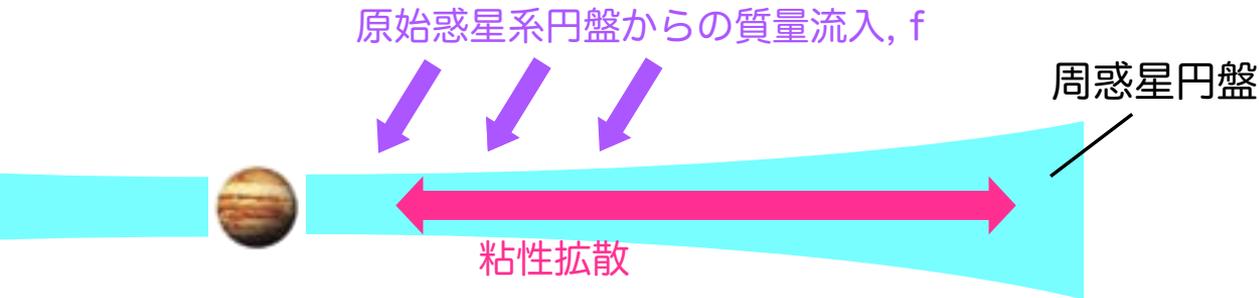
r : 円盤半径

c_s : 音速

v_K : ケプラー速度

Ω : ケプラー角速度

円盤モデルの構築：面密度進化



流入項ありの円盤の拡散方程式

$$\frac{\partial \Sigma}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(3r^{\frac{1}{2}} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^{\frac{1}{2}} \nu \Sigma \right) \right) + \underline{f}$$

$$f \propto r^{-1} \quad (\text{Based on Tanigawa et al. 2012})$$

$\nu = \alpha c_s H$: 粘性係数

α : 粘性パラメータ

c_s : 音速

H : スケールハイト



Tanigawa+2012 (Visualization: T. Takeda)

流入がなくなる \Rightarrow 円盤が散逸する \Rightarrow 衛星移動(Type I migration)が終わる

温度構造の計算

- 円盤の粘性係数 ν が温度に依存する
- 衛星の移動は温度分布のベキに強く依存する

※赤道面で加熱されると仮定
(cf. Mori & Shibaie)

$$\frac{\partial T_c}{\partial t} = \frac{2(Q_+ - Q_-)}{c_p \Sigma} - v_r \frac{\partial T_c}{\partial r}$$

(Cannizzo 1993; Armitage+ 2001)

T_c : midplane temperature

T_e : effective temperature

C_p : specific heat

v_r : radial velocity

κ : opacity (Bell & Lin 1994)

粘性加熱

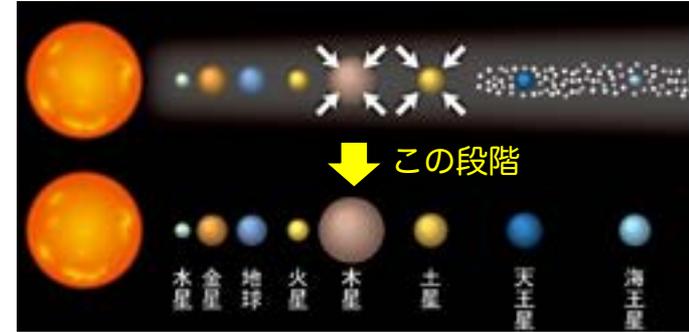
$$Q_+ = \frac{9}{8} \nu \Sigma \Omega^2$$

放射冷却

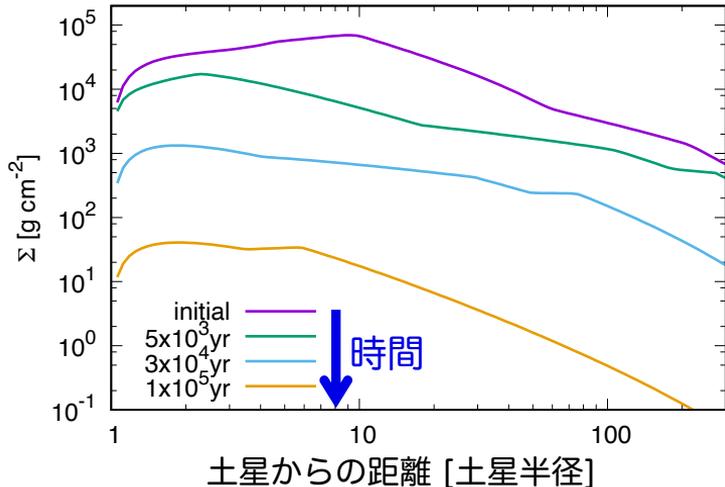
$$Q_- = \frac{16\sigma}{3\Sigma\kappa} T_c^4$$

周惑星円盤の時間変化 (散逸過程)

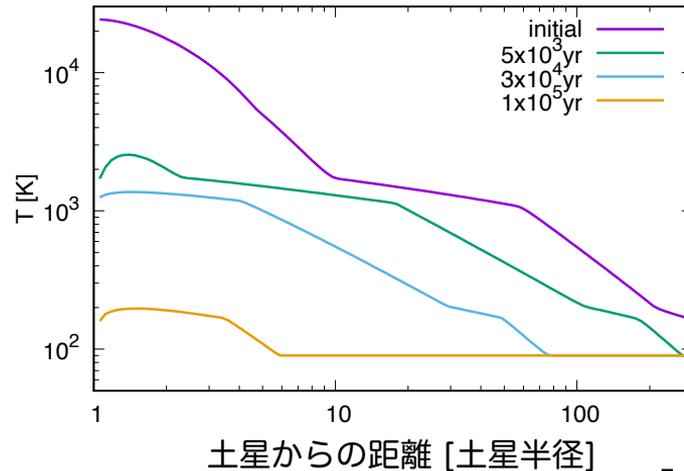
原始惑星系円盤(惑星形成円盤)からの流入がなくなつてからの周惑星円盤(衛星形成円盤)の時間変化を計算した (10万年くらい)



面密度



温度

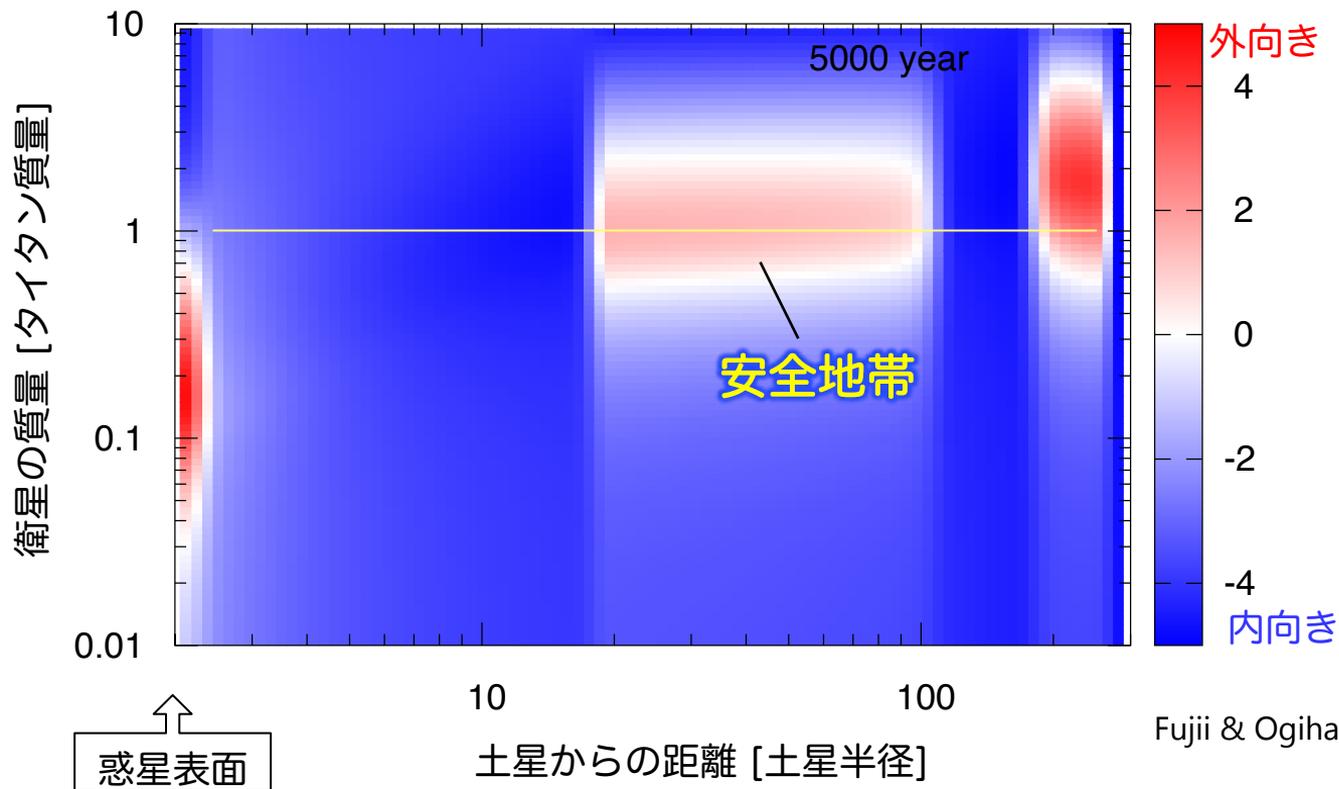


密度や温度の半径依存性によって衛星軌道が変化

→ 生まれた衛星が土星に飲み込まれてしまう

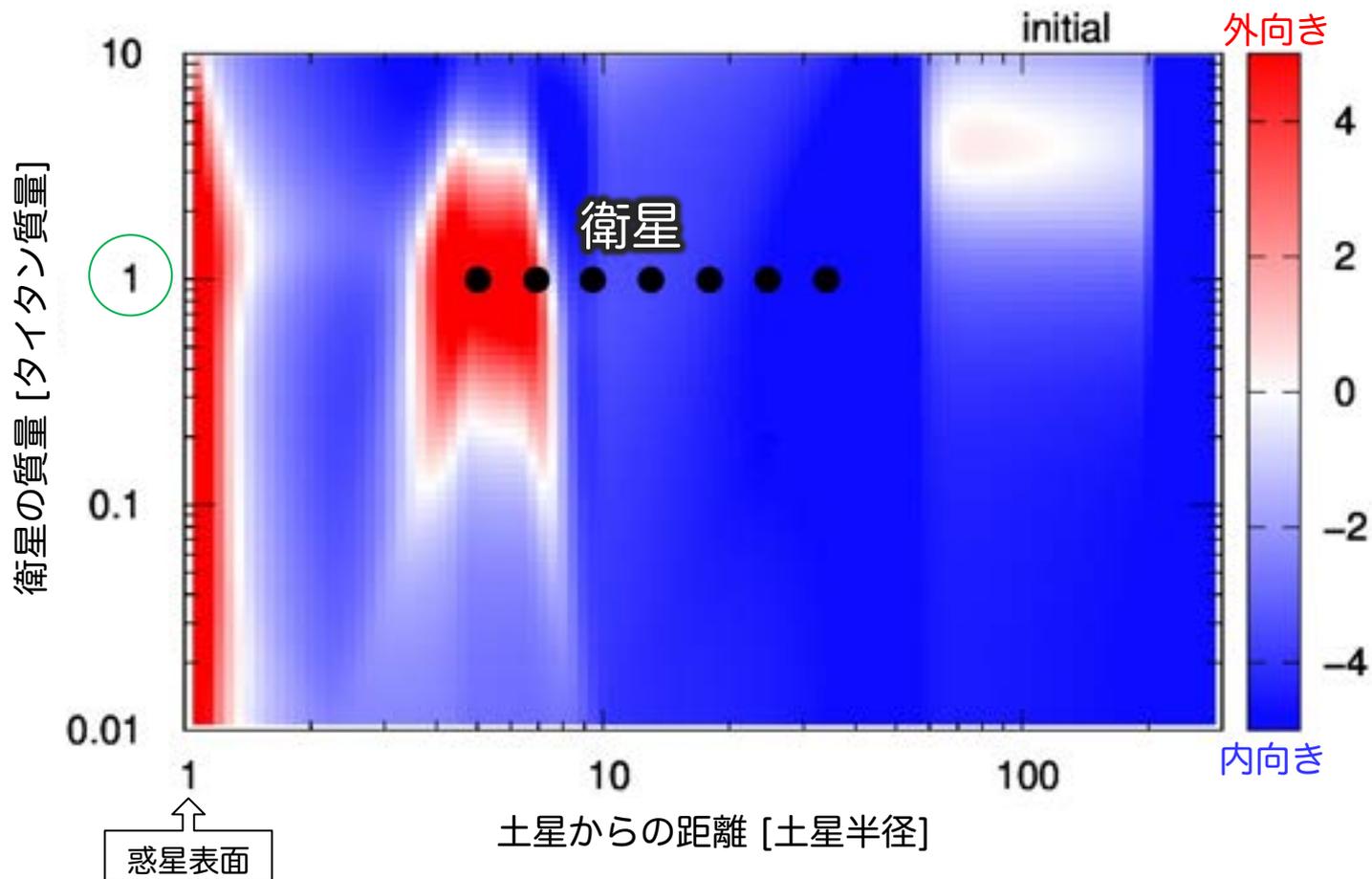
あるスナップショットの瞬間の

衛星が移動する向き

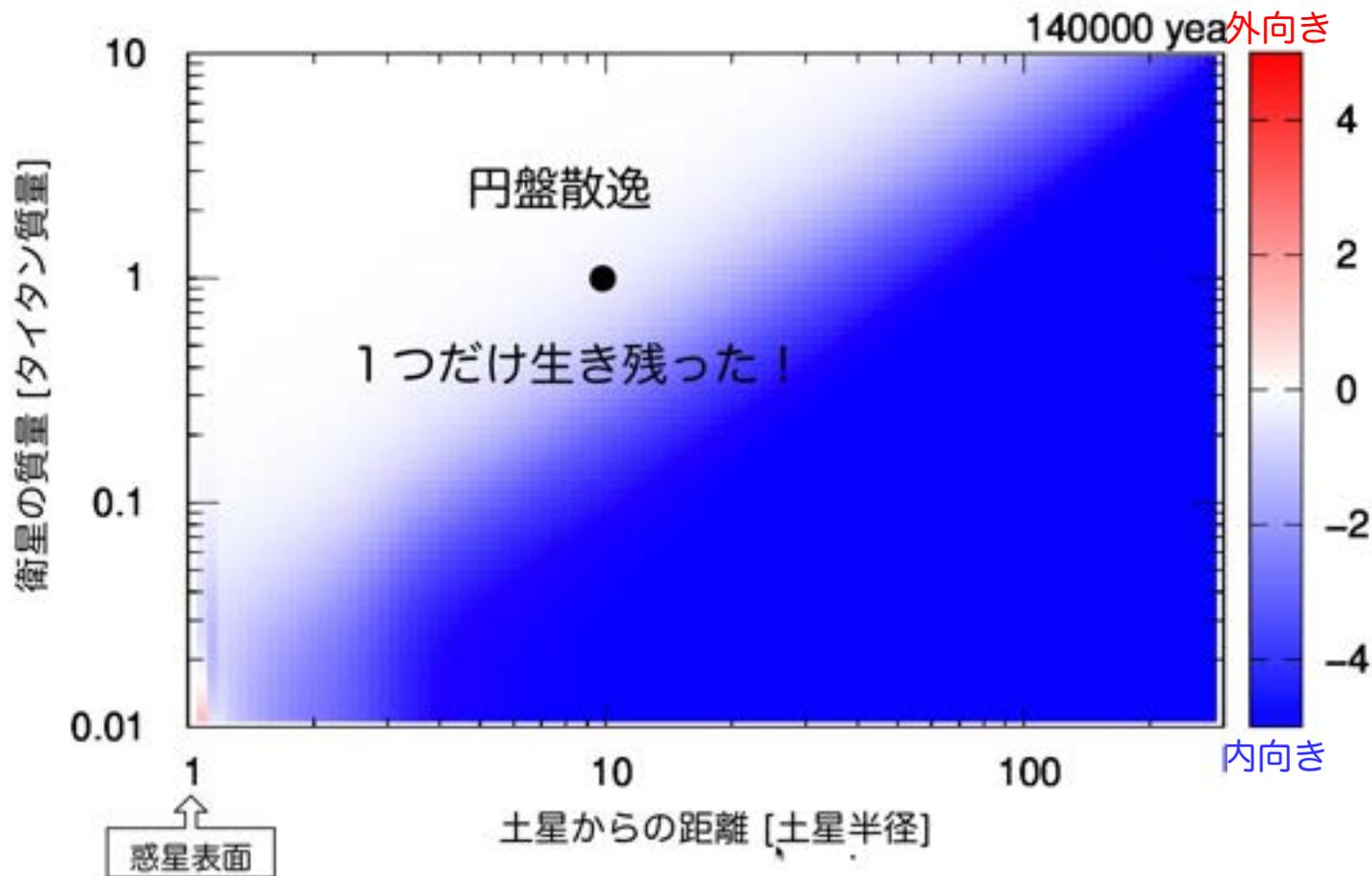


Fujii & Ogihara (2020)

シミュレーション結果の動画

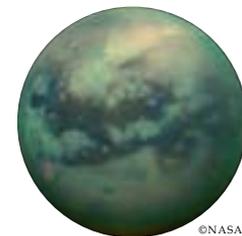
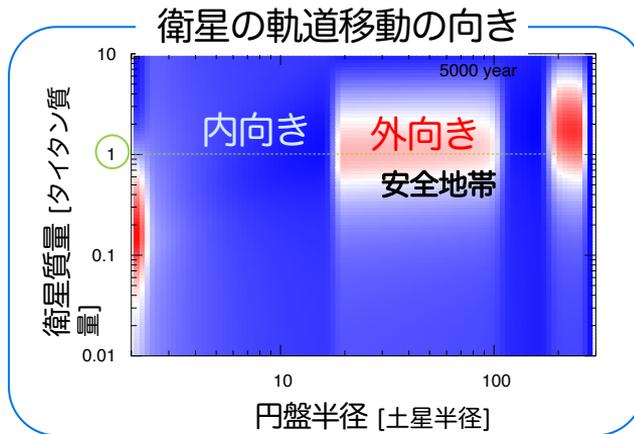
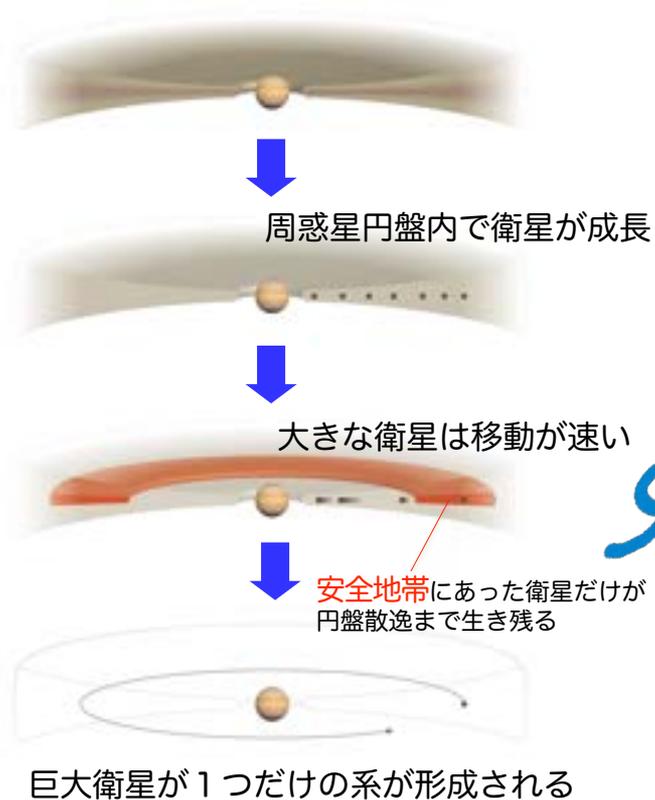


シミュレーション結果の動画

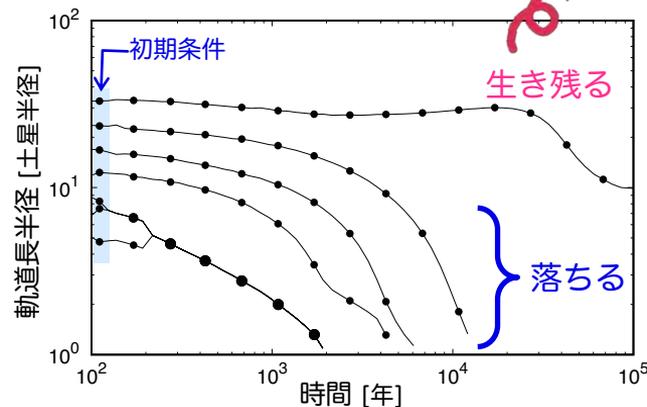


タイタン形成シナリオ

Fujii & Ogihara (2020)



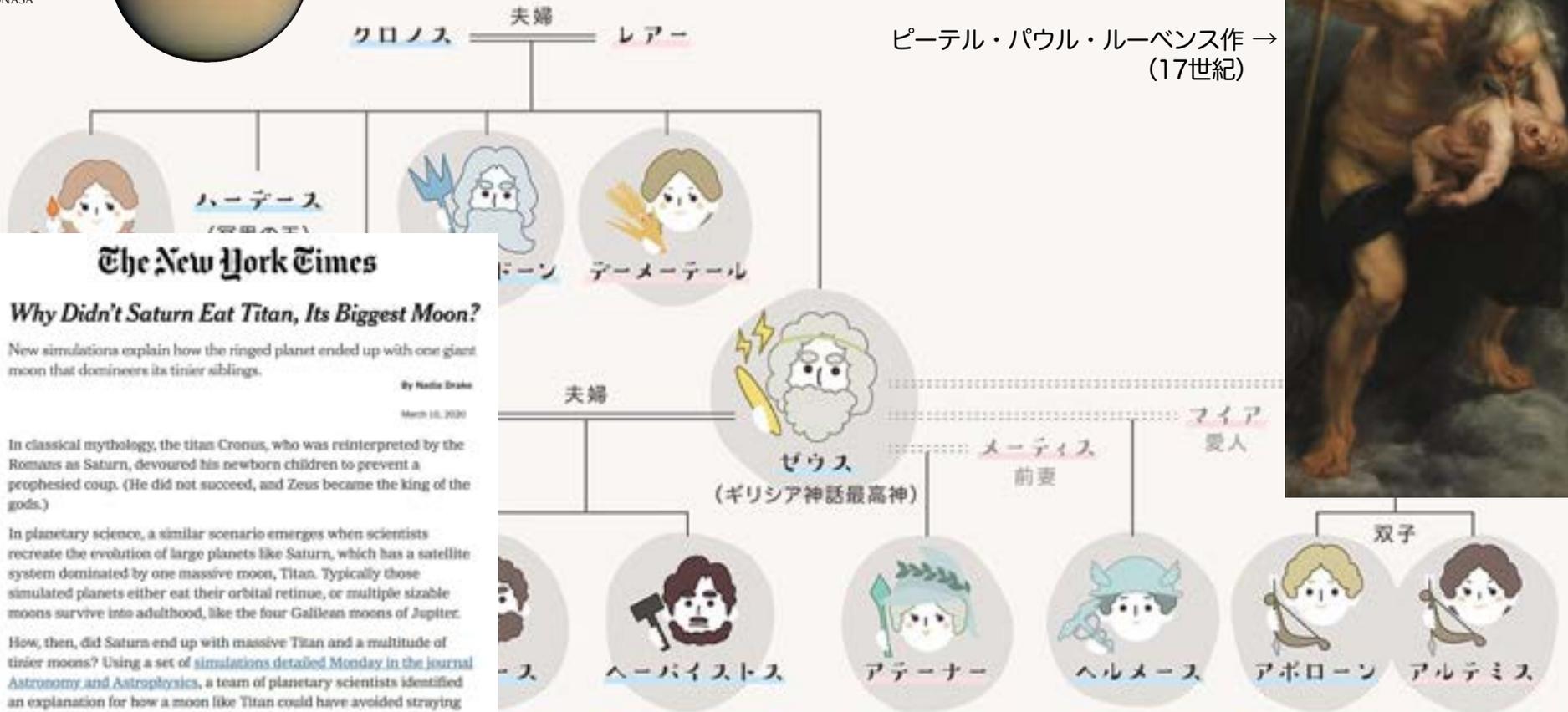
タイタン





◆ オリュンポス十二神 ◆

ピーテル・パウル・ルーベンス作 →
(17世紀)



The New York Times

Why Didn't Saturn Eat Titan, Its Biggest Moon?

New simulations explain how the ringed planet ended up with one giant moon that dominates its tinier siblings.

By Nadia Drake
March 16, 2020

In classical mythology, the titan Cronus, who was reinterpreted by the Romans as Saturn, devoured his newborn children to prevent a prophesied coup. (He did not succeed, and Zeus became the king of the gods.)

In planetary science, a similar scenario emerges when scientists recreate the evolution of large planets like Saturn, which has a satellite system dominated by one massive moon, Titan. Typically those simulated planets either eat their orbital retinue, or multiple sizable moons survive into adulthood, like the four Galilean moons of Jupiter.

How, then, did Saturn end up with massive Titan and a multitude of tinier moons? Using a set of [simulations detailed Monday in the journal Astronomy and Astrophysics](#), a team of planetary scientists identified an explanation for how a moon like Titan could have avoided straying too close to its murderous parent.

天文学 × 历史学

古天文学



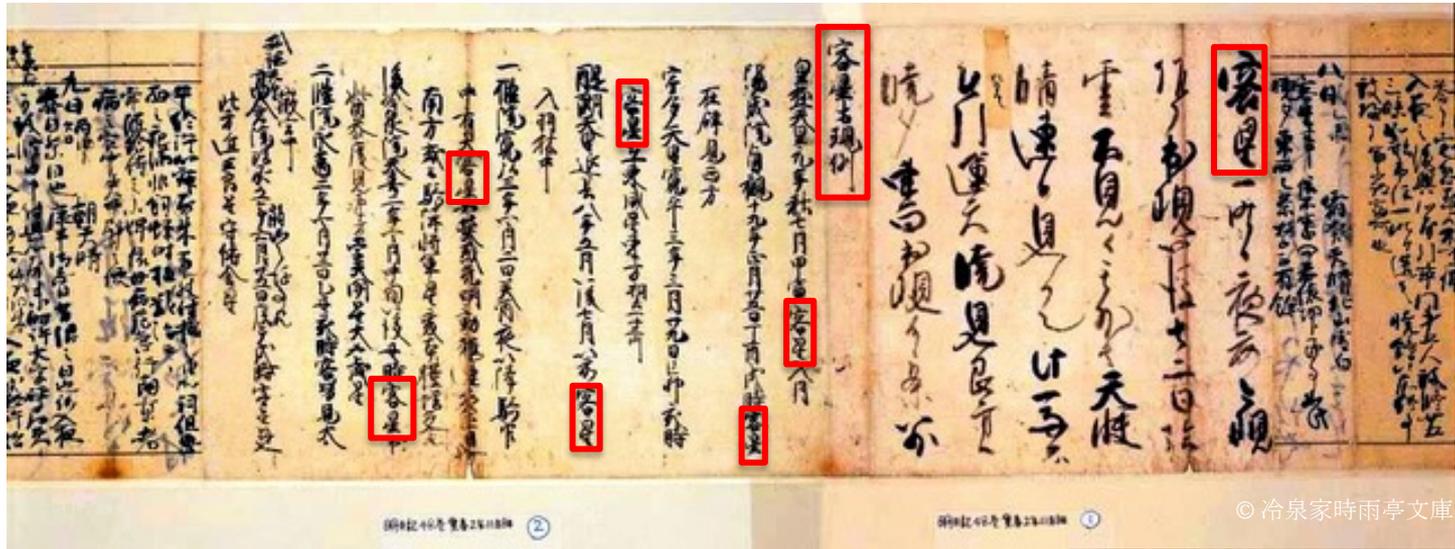
Astronomical phenomena



之并斬其從弟緒司馬
太元十六年十一月癸
時太子常有篤疾
太元十七年九月丁丑
三星合是謂鶩位絕行
太元十八年正月乙酉
乃盜也一曰有亂臣若
內殿兆庶宣言夫人張
加顯戮但默責而已又
太元十八年二月有客星

Historical literature

1054年 客星現る



明月記 by 藤原定家 (1162-1241)



当時の爆発の超新星爆発
の残骸は今でも見える

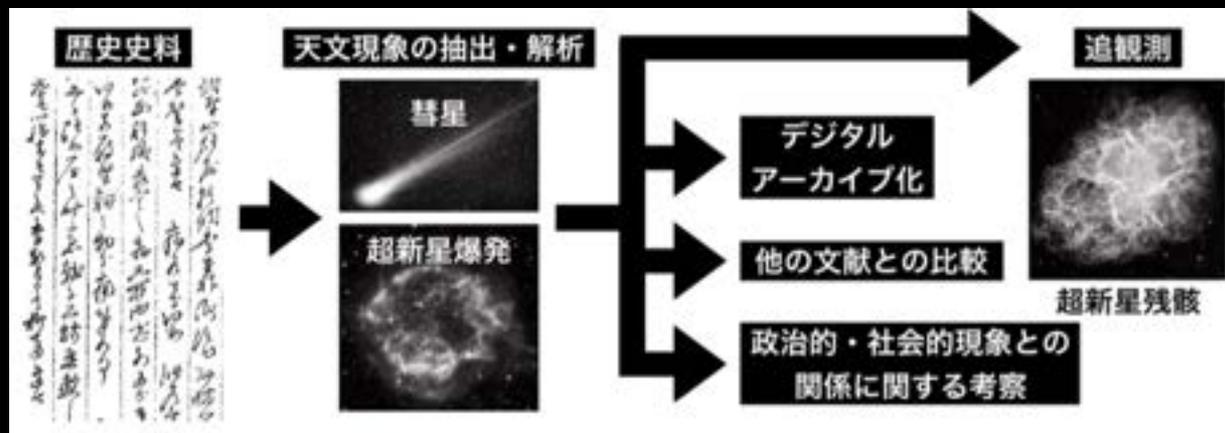


天文学者が観測できるのは現在の空のみ

歴史史料には過去の観測データが多く埋もれている

今の地球では知り得ない過去の天文・気象現象を引き出したい

1. >100年以上のタイムスケールの変動現象
2. >100年以上前の天文現象



歴史史料を読む歴史学者と天文現象を解釈できる天文学者の垣根を超えた協力が必須！

チームメンバー (2022年8月 現在)

宇宙物理学・天文学 (+計算科学)



佐野 栄俊
(岐阜大)



市川 幸平
(東北大)



藤井 悠里
(京大)



成子 篤
(京大)



津村 耕司
(東京都市大)



* 呂 沢宇
(東北大)



早川 尚志
(名大)



村田 光司
(つくば大)



* 小島 敦
(名大)

歴史学・人文学 (+海洋学)



程 永超
(東北大)



川本 悠紀子
(名大)



小坂 俊介
(愛知教育大)

* 呂・小島氏は大学院生

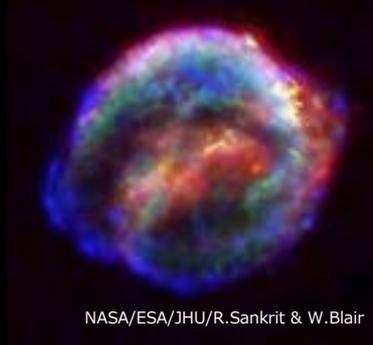
Our ambition: to date supernova explosions

Example of supernova remnants

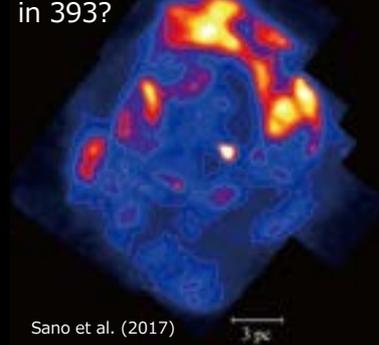
Tycho's supernova in 1572



Kepler's supernova in 1604



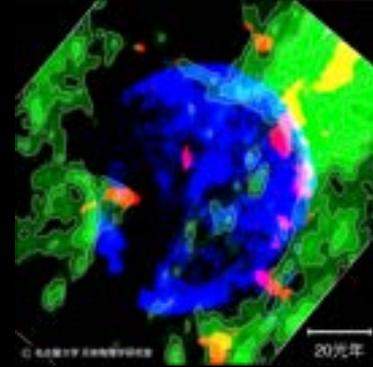
RX J1713
in 393?



Cassiopeia A in 17th?



Vela Jr. in 2400-5100 years ago?



Tackle dating of
unknown explosions!

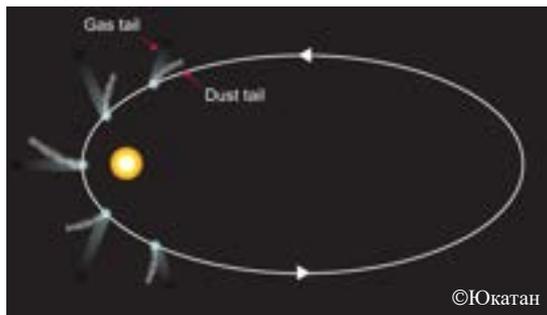
Obtain more physical
properties (e.g. light curves)

1. 歴史学から天文学への貢献

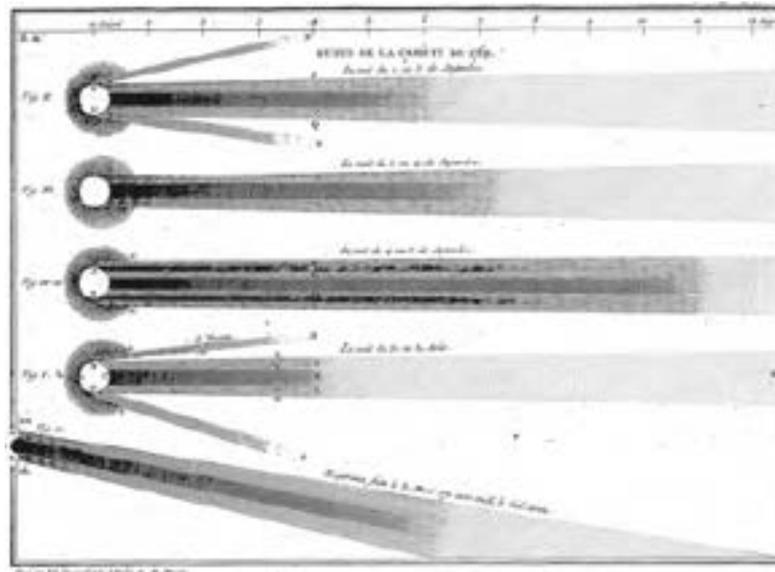
古い時代の太陽風強度の推定は可能か？

彗星のプラズマテイルが手がかりに

1769年の記録が最古と報告されていた



Hale-Bopp彗星 (C/1995 O1)
のプラズマ・ダストテイル



C/1769 P1のCometary diagrams
(Messier and Le Gouaz 1775)

1769年以前の3つの事例を探索・検討

1. ベルギーでの1577年大彗星の記録と図 (⇒)
2. 中国史書にある837年ハレー彗星の尾の記録
3. シリア年代記の760年のハレー彗星の記述と図



1577年の彗星のスケッチ Gemma (1578)

ステラナビを用いた軌道計算との比較から各々の記録の信頼性を検証

⇒ 肉眼でのプラズマテイル観測の可能性+過去の太陽活動の活発さを示唆

2. 天文学から歴史学への貢献

過去の天文現象の記録から 歴史上の事件の年代を特定できる？

天文現象…文字が残る最古の時代から記録：

日食・月食、彗星、流星 etc.

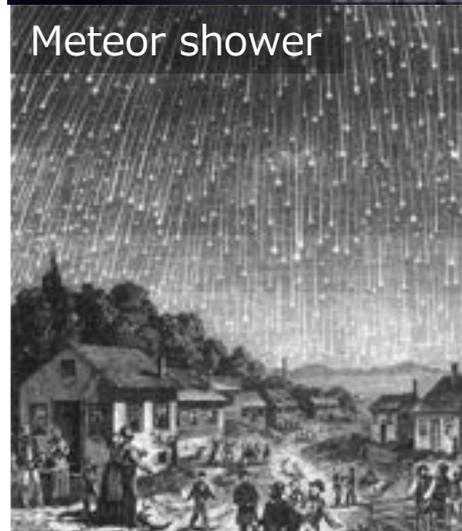
歴史上の事件と結びつけて解釈

支配者の死、新たな時代の到来、
飢饉や地震の前触れetc.

⇒ 記録された天文現象の年代決定

=

関連付けられた歴史的出来事の年代決定



Engraving by Adolf Vollmy (1889)

ケーススタディ：ある皇妃の死亡年

700年前のとあるヨーロッパの歴史書

「（最近起こった）日食が、皇帝の妃の死の前触れだった。また彼女が亡くなる6ヶ月前に、北の空に彗星が現れた。それは髭付きで3ヶ月続き…」

彗星が現れたのはいつ？

2つの候補A, B

先行研究では当時の政治情勢を根拠にAに同定
(w/o 彗星の分析)



皇妃の図像付きの封鉛

Nesbitt & Morrison (2009)

2つの彗星候補の天文学的検討

(画像は無関係のイメージです)



候補A: 彗星ではなく流星

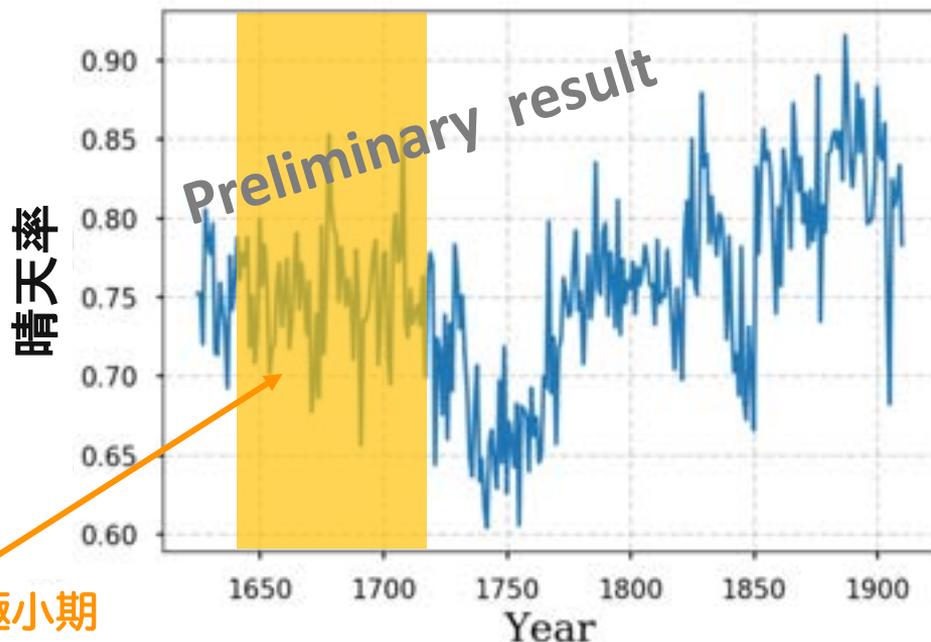


候補B: 歴史書の記述によく一致
(方向や期間など)

これまで歴史学者に受け入れられてきた
皇妃の死亡年代+関連する出来事の年代を修正

3. 歴史学から気象学への貢献

承政院日記を用いた280年分の晴天率の変化



承政院日記 (1623-1894)
ほぼ毎日記録が残っている

- 晴天率が低いと予想されていたマウンダー極小期に晴天率の変化は見えない
- 逆に、1750年前後に50年ほどの晴天率減少の時期があり、その後は晴天率は上昇傾向