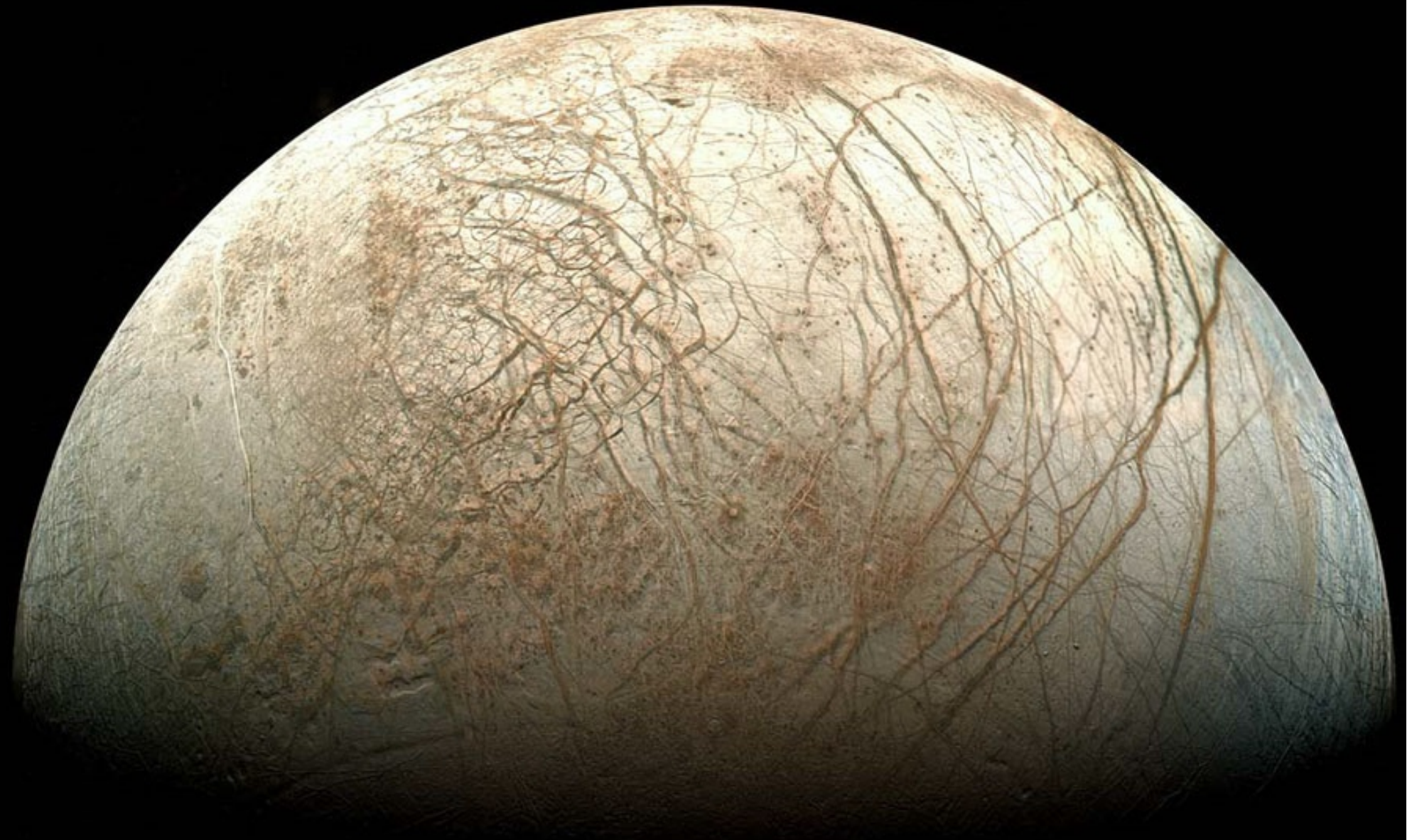
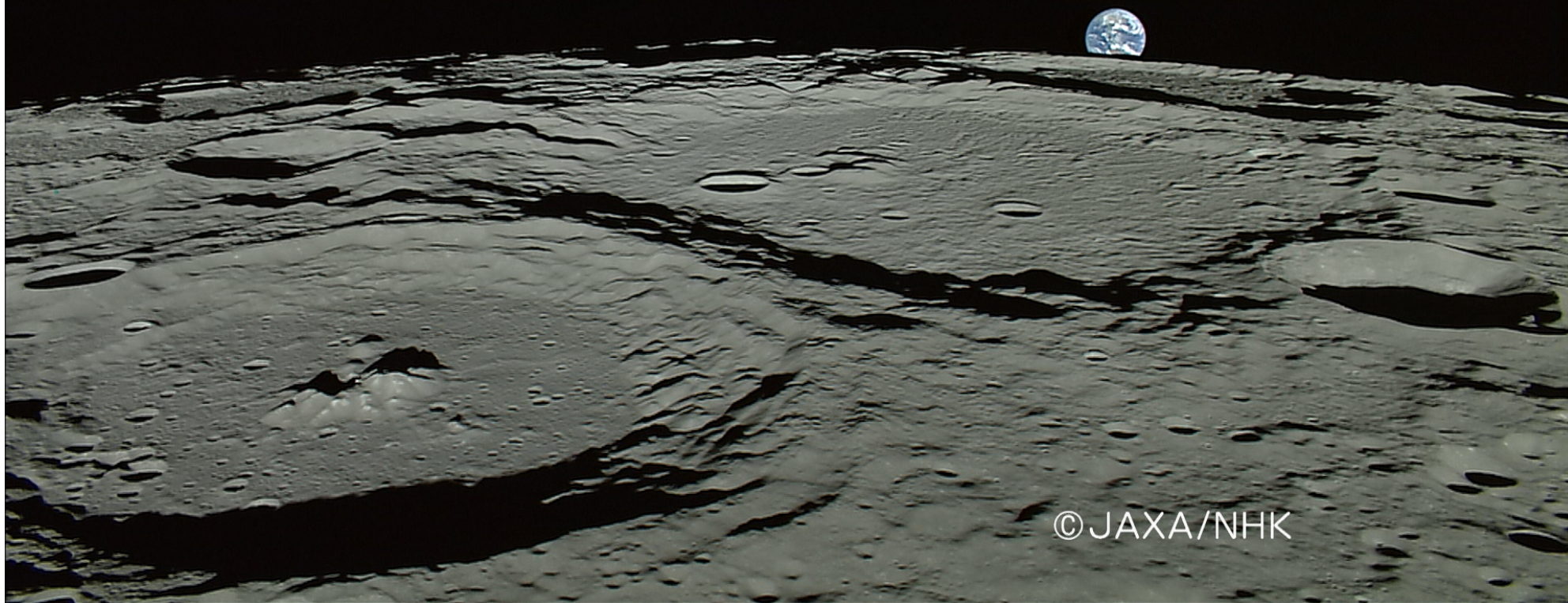


氷の月と水の海～氷の下に海を探る～



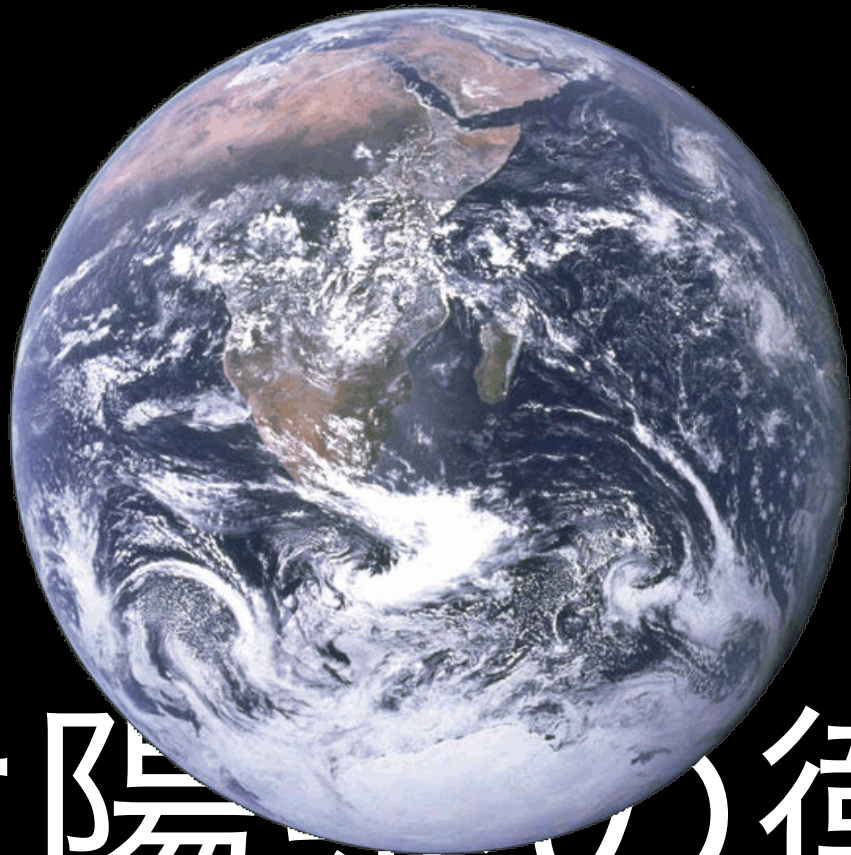


地球の月は 岩だらけ



©JAXA/NHK

氷の月？

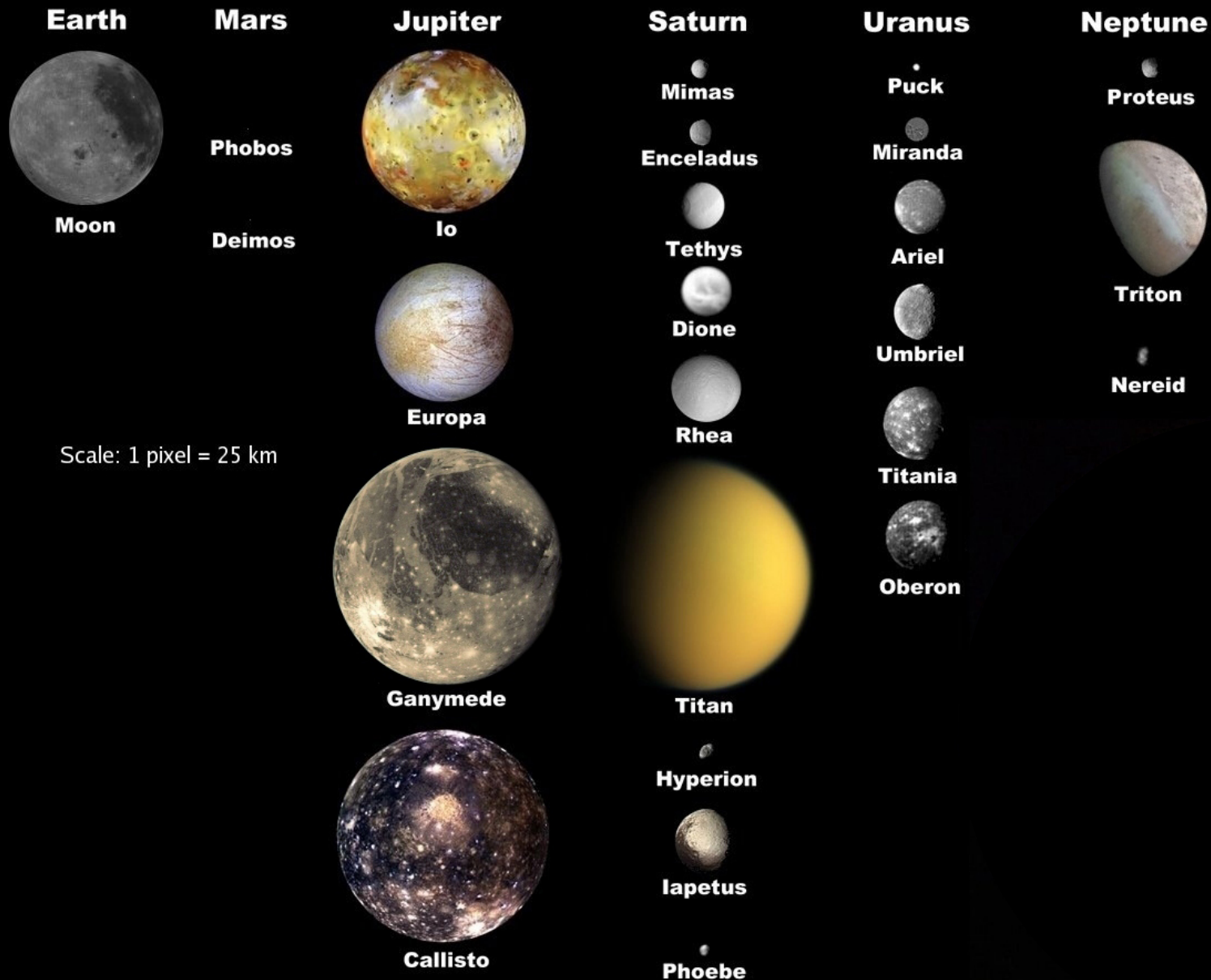


太陽系の衛星は地球の月だけではない

太陽系

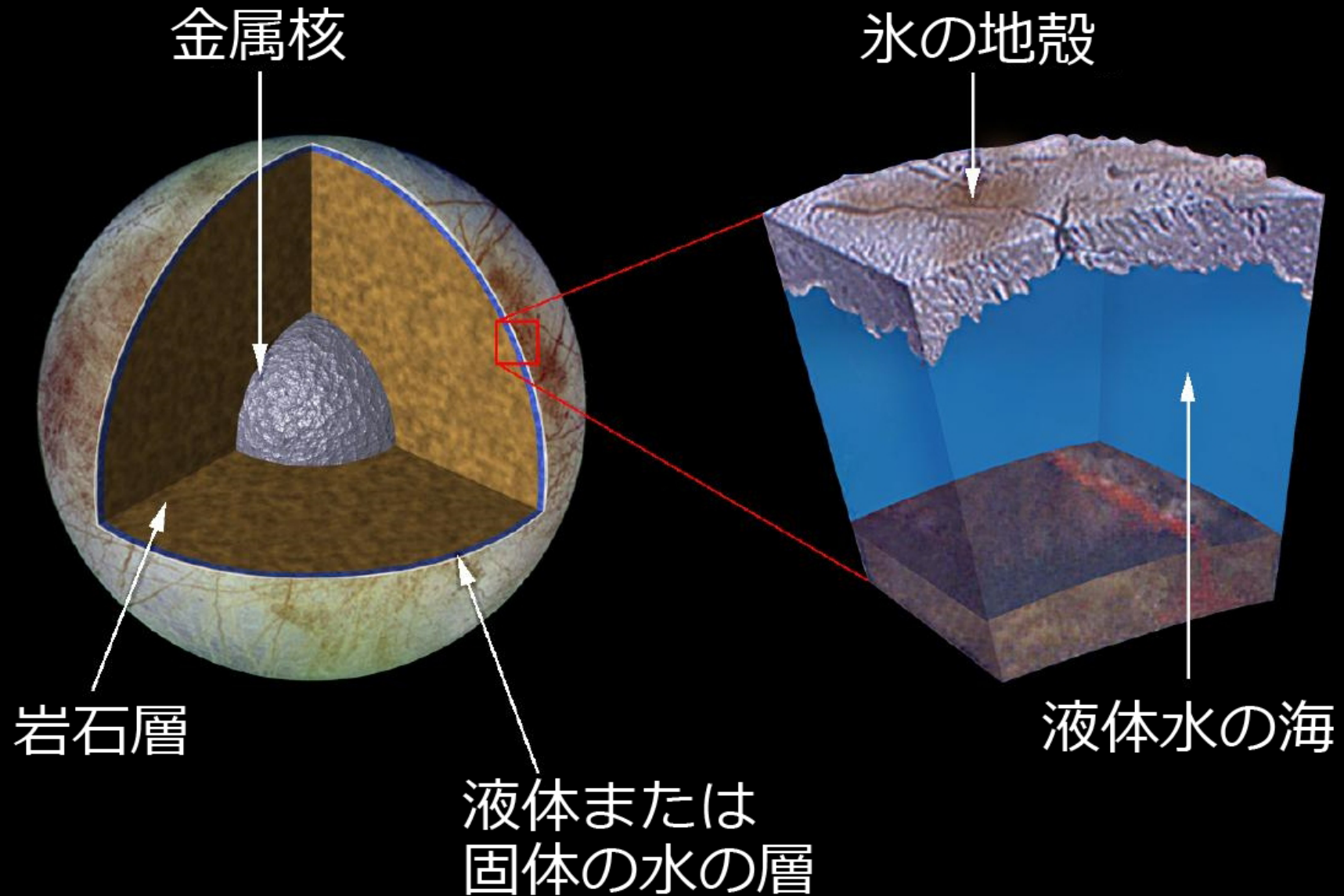


太陽系の（主な）衛星たち



氷の月と水の海

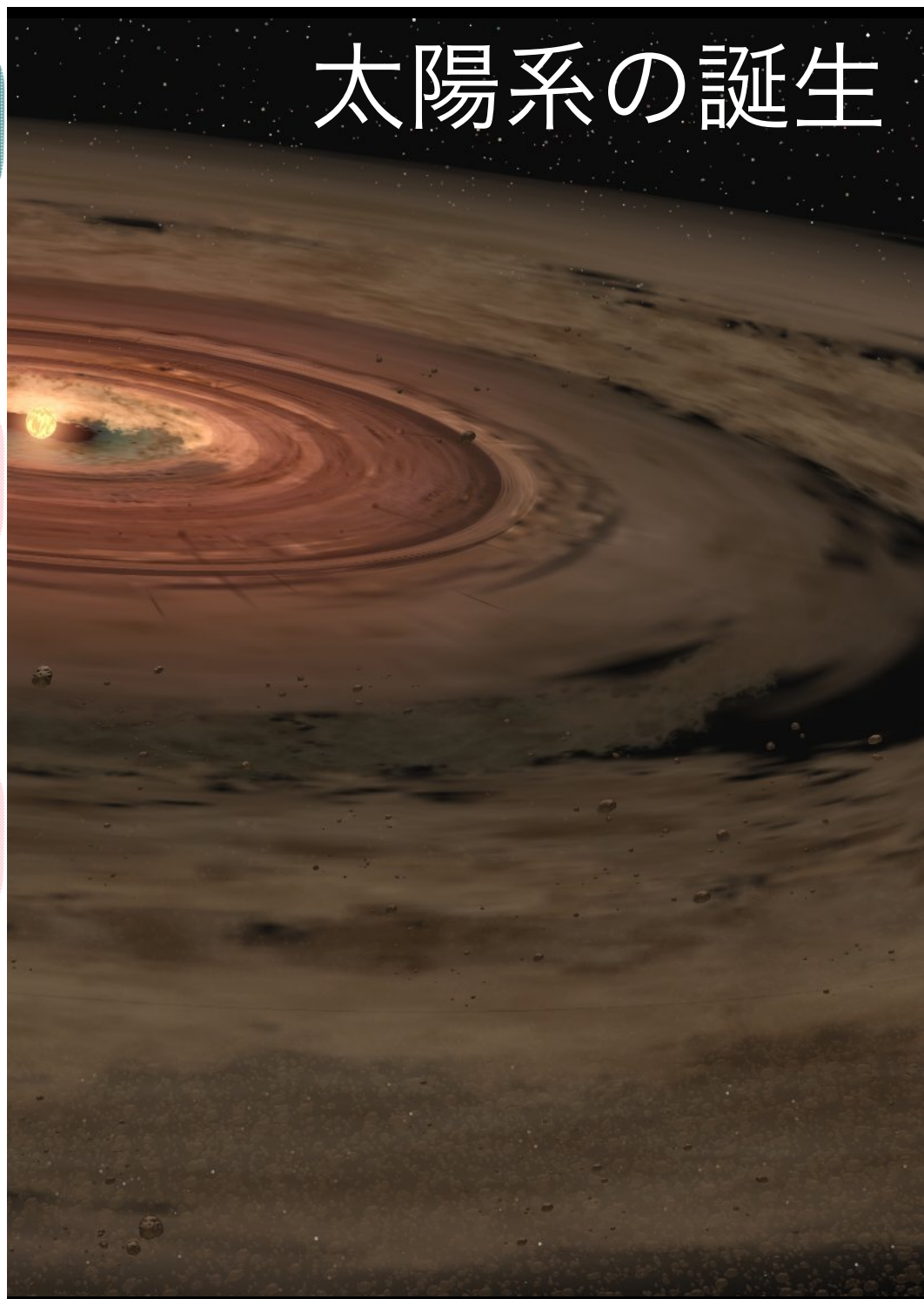
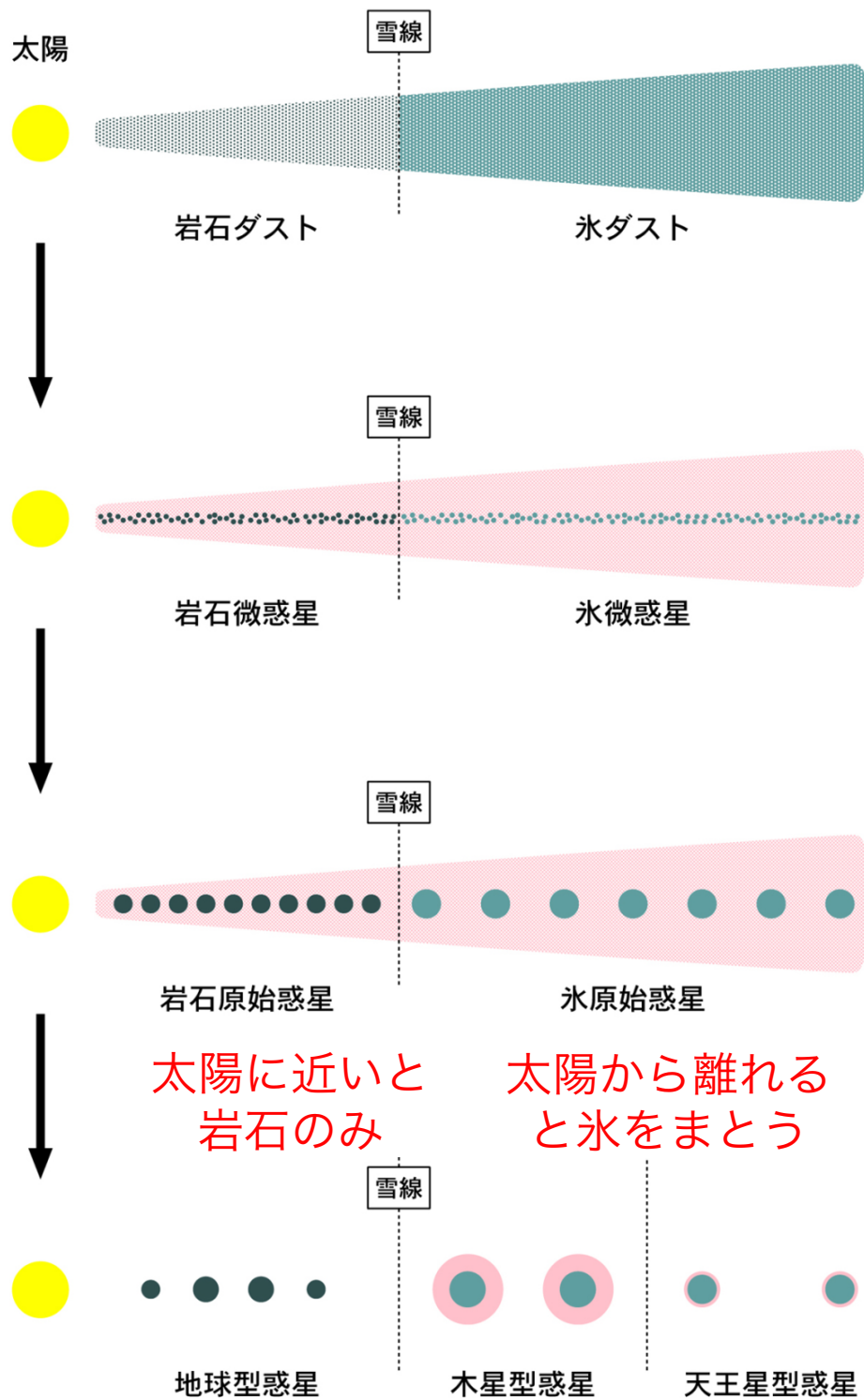
氷の月と水の海～氷の下に海を探る～



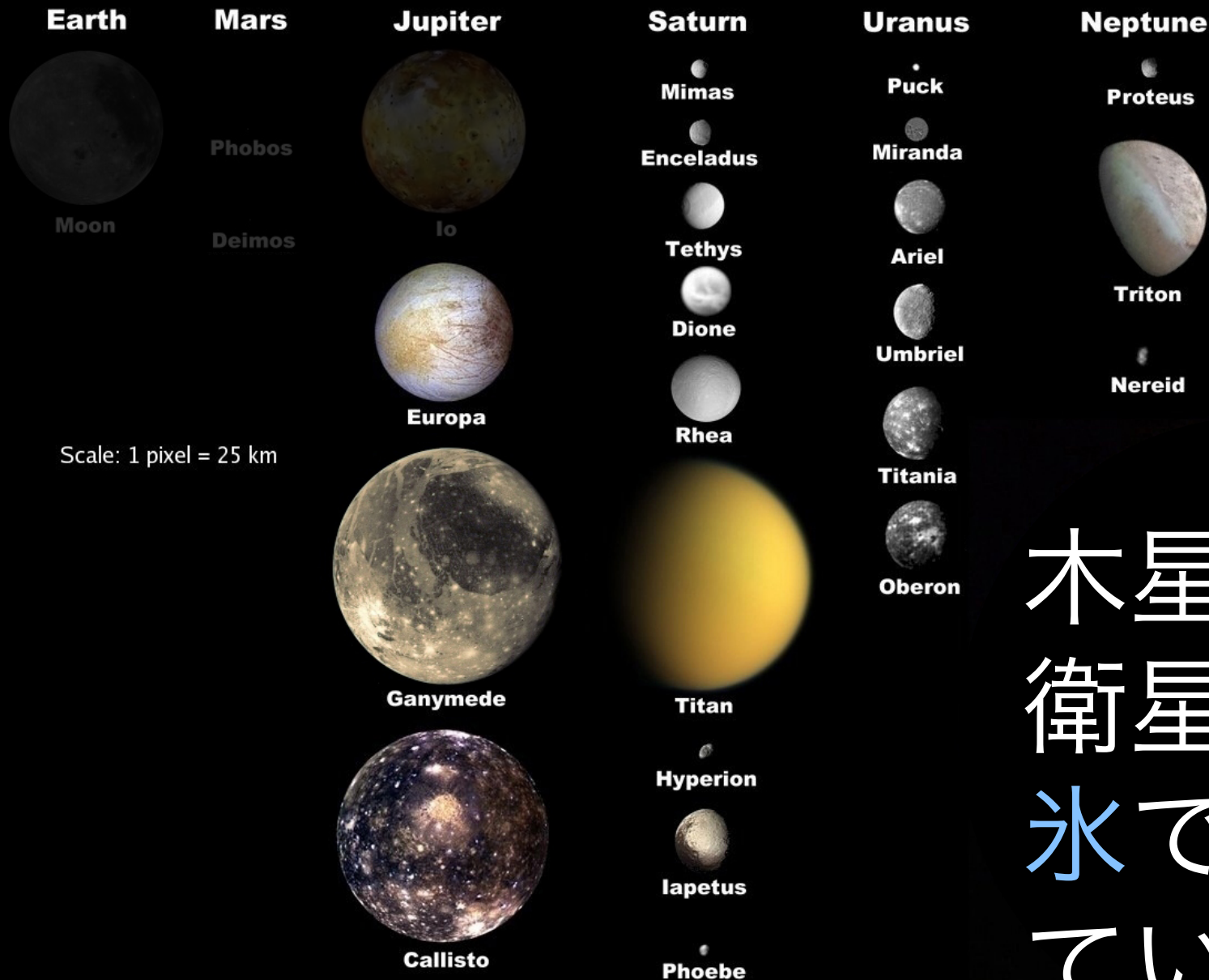
氷の月？

水か？ある？

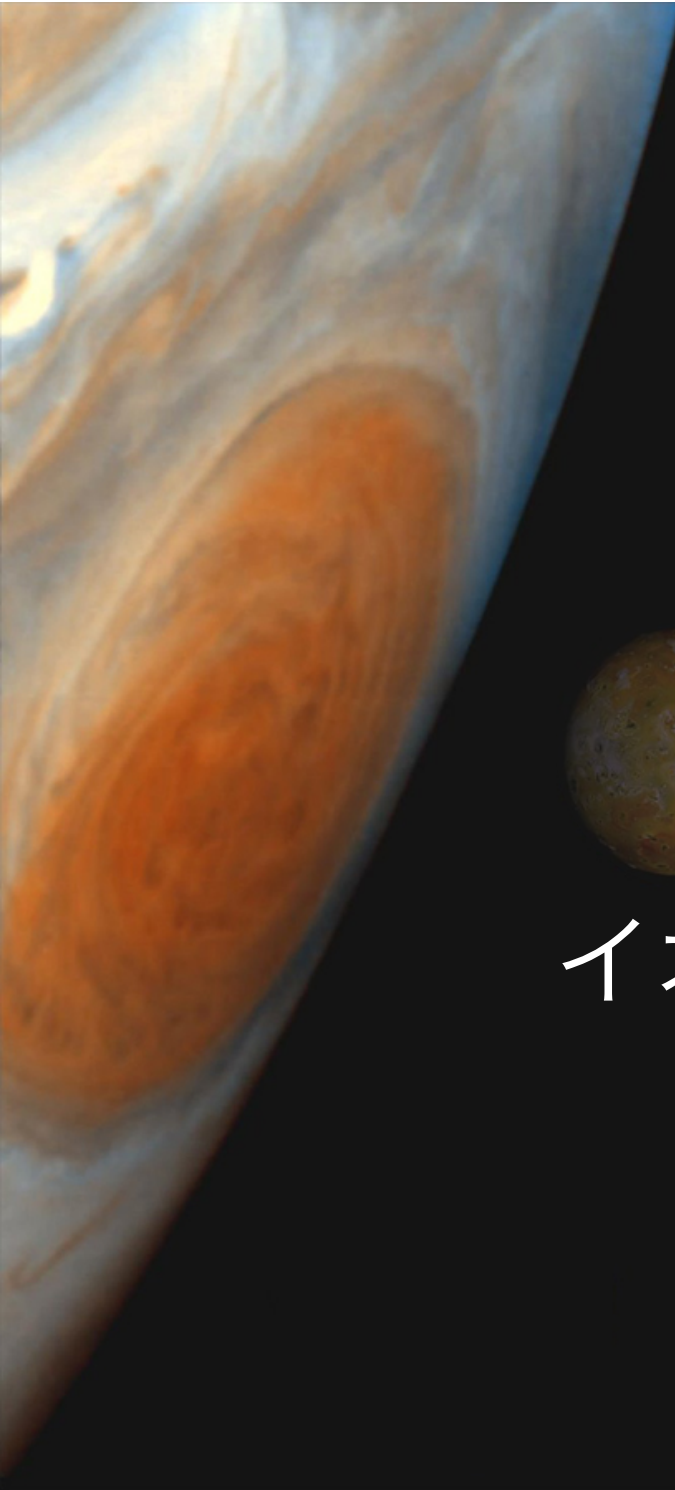
ポイントは
太陽からの距離



太陽系の（主な）衛星たち

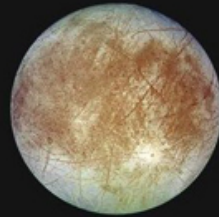


木星以遠の
衛星は水の
氷で覆われ
ている

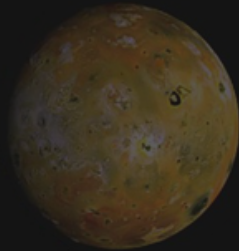


木星の四大衛星 (ガリレオ衛星)

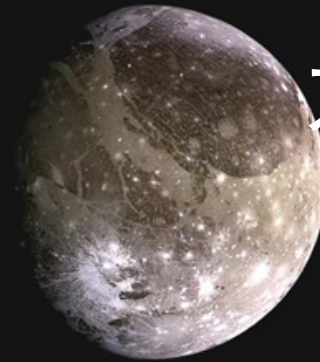
エウロパ



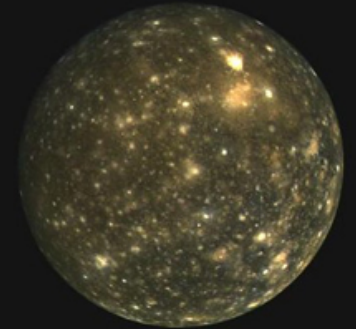
ガニメデ



イオ



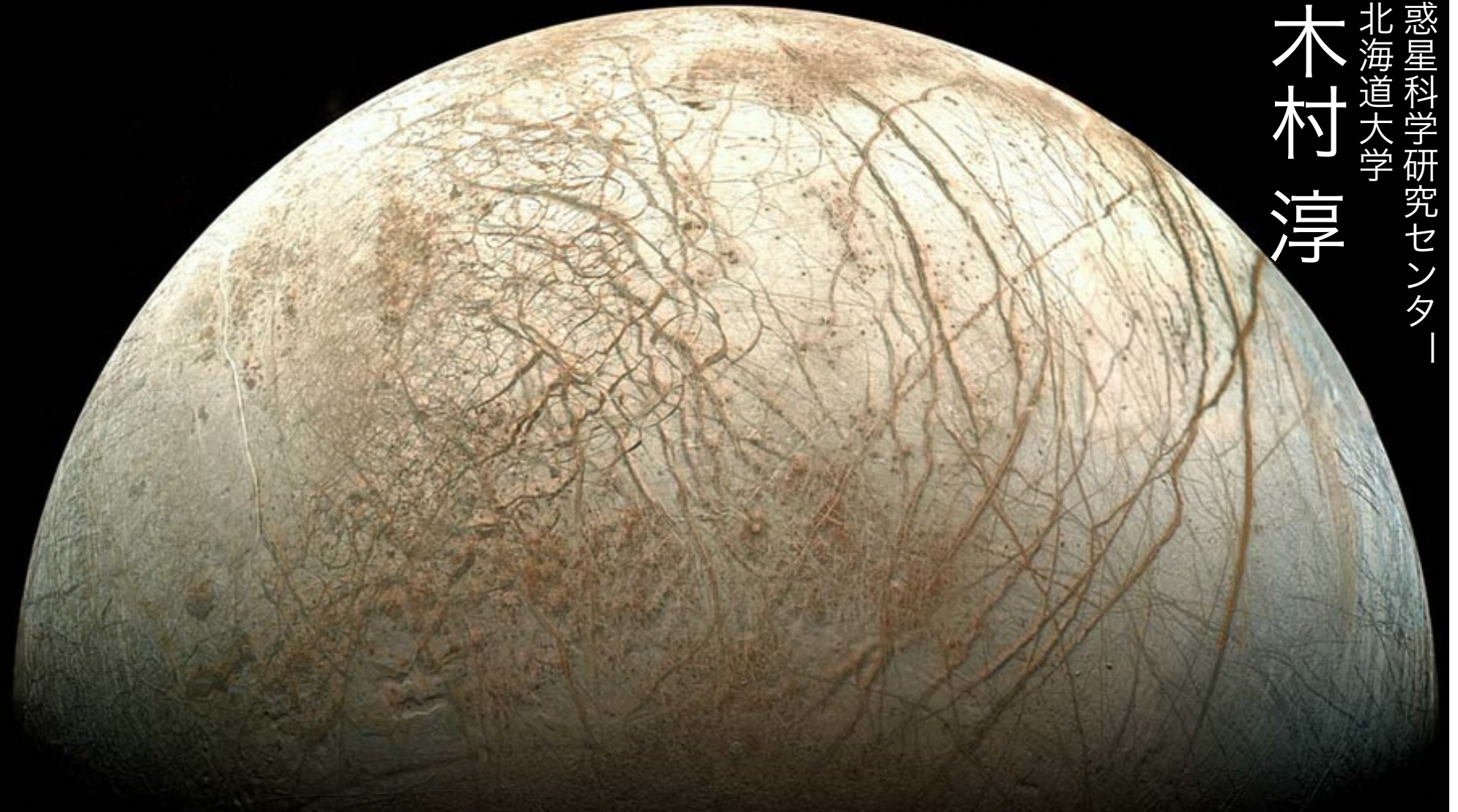
カリスト



氷を持つ月

氷の月と水の海～氷の下に海を探る～

惑星科学研究センター
北海道大学
木村 淳



エウロパ (Europa)

惑星科学研究センター 木村 淳

- 埼玉県春日部市生まれ → 栃木県栃木市へ
小中時代：夏休みの自由研究は「天気の観察」だった
- 栃木県立栃木高校を卒業，駿台予備校へ
- 北海道大学に不合格，茨城大学へ（学部・大学院修士課程）
- 博士課程進学のため東京大学大学院（地球惑星科学専攻）へ
標準期間（3年間）では博士号がとれず，4年半かかって修了
- 3～6年前：東大地震研究所研究員
JAXA研究員（SELENE/かぐやプロジェクト）
- 3年前から：惑星科学研究センター研究員に（北大在籍）

得意科目：国語・社会・家庭科，苦手科目：数学，理科，英語

氷の月と水の海

～氷の下に海を探る

～
(地球のように) 表面に海はな

大気がない

→寒い

→凍ってしまおう

(少なくとも) 表面

(少なくとも) 表面
氷の月と水の海

～氷の下に海を探る

部にはどのくらいの氷（水）が
表面近くだけ？ or 中心まで全部が氷？

↓
ポイントは「平均密度」

天体の大きさ, 重さ, 密度

天体が何でできているか、は
ついて、ある程度の予想が

	質量 (10^{20} kg)	半径 (km)	平均密度 (kg/m^3)
イオ	893.2	1822	3528
エウロパ	480.0	1565	3014
ガニメデ	1481.7	2634	1942
カリスト	1075.9	2410	1834



地球	59736	6371	5515
----	-------	------	------

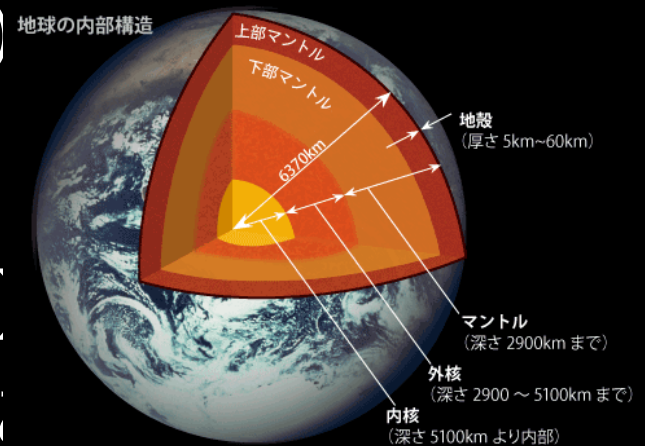
平均密度から分かること

• 衛星を作る3つの主成分とその密度

- H₂O (密度 1000)
- 岩石 (密度 3000~4000)
- 金属 (鉄) (密度 6000~8000)

• 地球の平均密度5515の意味

- 表面には岩石 (密度3000~4000)
- 内部にはもっと高密度の物質が



• エウロパの平均密度3014の意味

- 表面にはH₂O (密度1000)
- H₂Oの量はそんなに多くなさそう。内部は岩石が多

エウロパの平均密度3014 kg/m³の意味

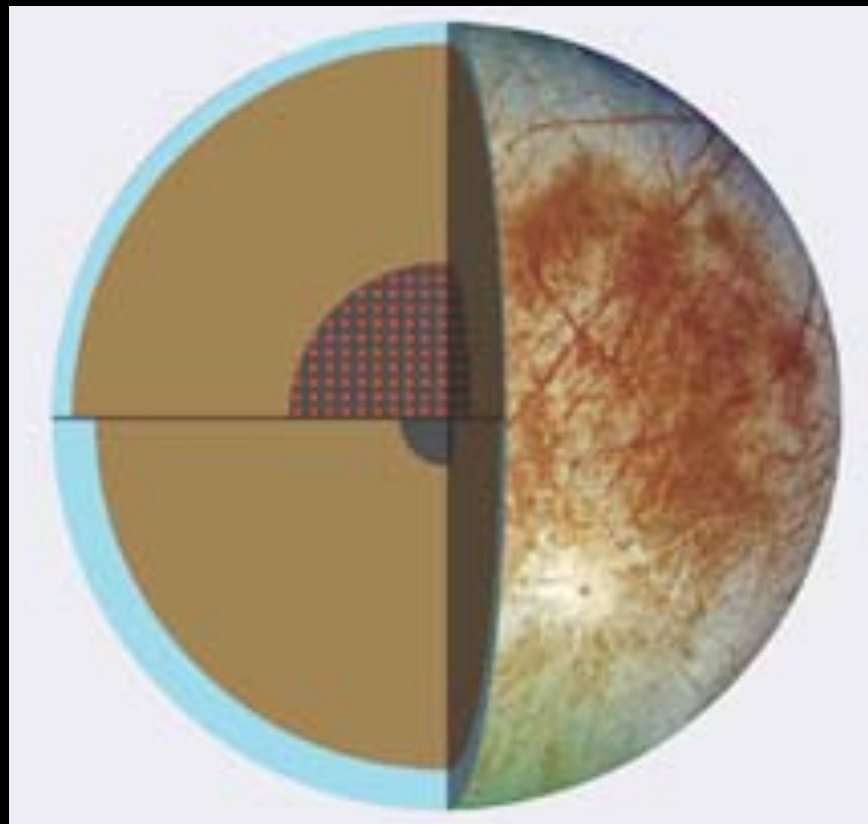
- 表面にはH₂O (密度1000)
- H₂Oの量はそんなに多くなさそう. 内部は岩石が多

H₂Oと岩石 (&金属) の比率

10~20 %のH ₂ O
70~80 %の岩石

(もしかしたら)

10~20 %の金属

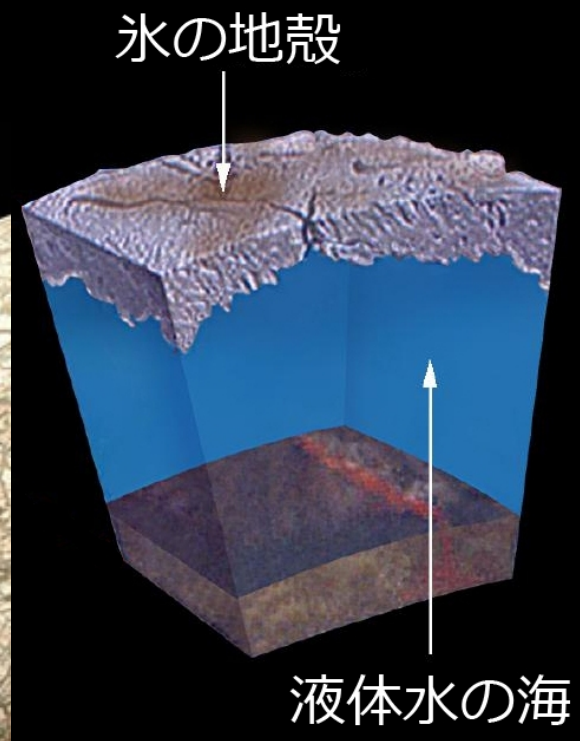


他の木星衛星はどうか？

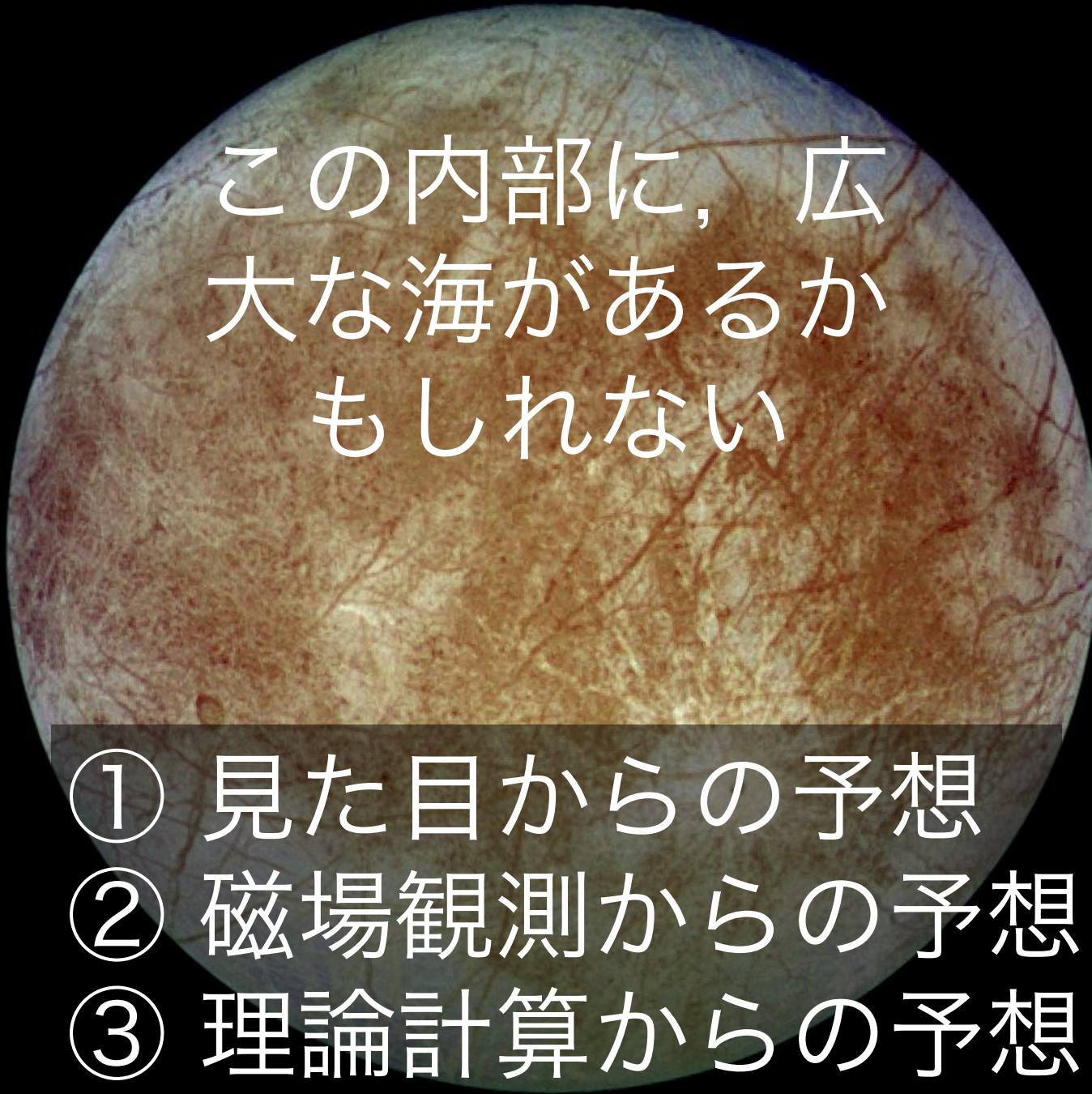
	質量 (10^{20} kg)	半径 (km)	平均密度 (kg/m^3)
イオ	893.2	1822	3528
エウロパ	480.0	1565	3014
ガニメデ	1481.7	2634	1942
カリスト	1075.9	2410	1834

ガニメデ・カリストが持つ H_2O は、全体の約50%

「発見」された
わけではない！




表層が氷で覆われた「氷衛星」エウロパ。
内部には液体の水の海があると予想されている。
どのようにして「予想」されたのか？



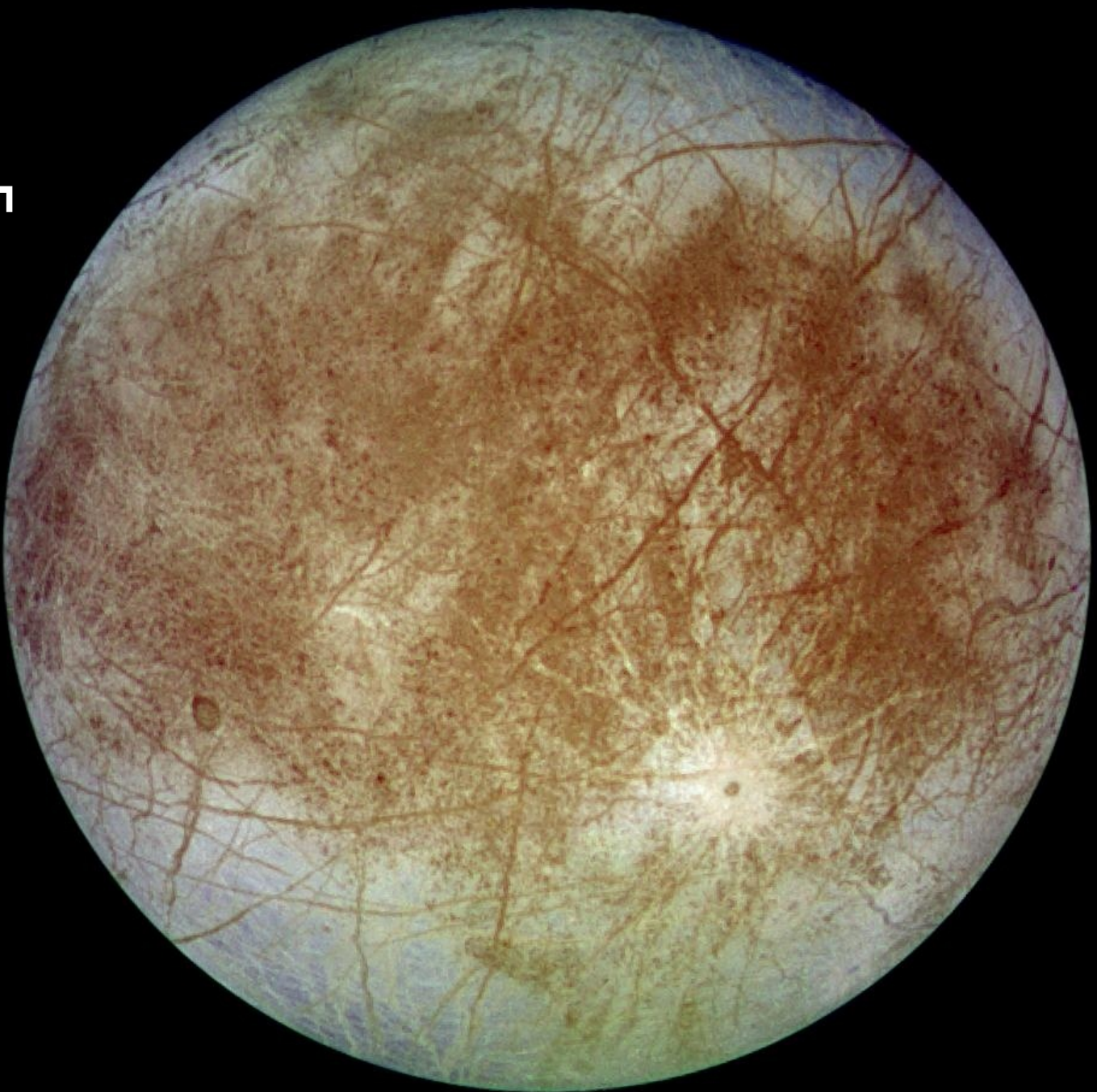
この内部に、広
大な海があるか
もしれない

- ① 見た目からの予想
- ② 磁場観測からの予想
- ③ 理論計算からの予想

A spherical object with a cracked, textured surface, possibly a planet or moon, with a horizontal band across the middle. The surface is light brown and tan with numerous fine, reddish-brown cracks and larger, irregular brown patches. The object is set against a black background.

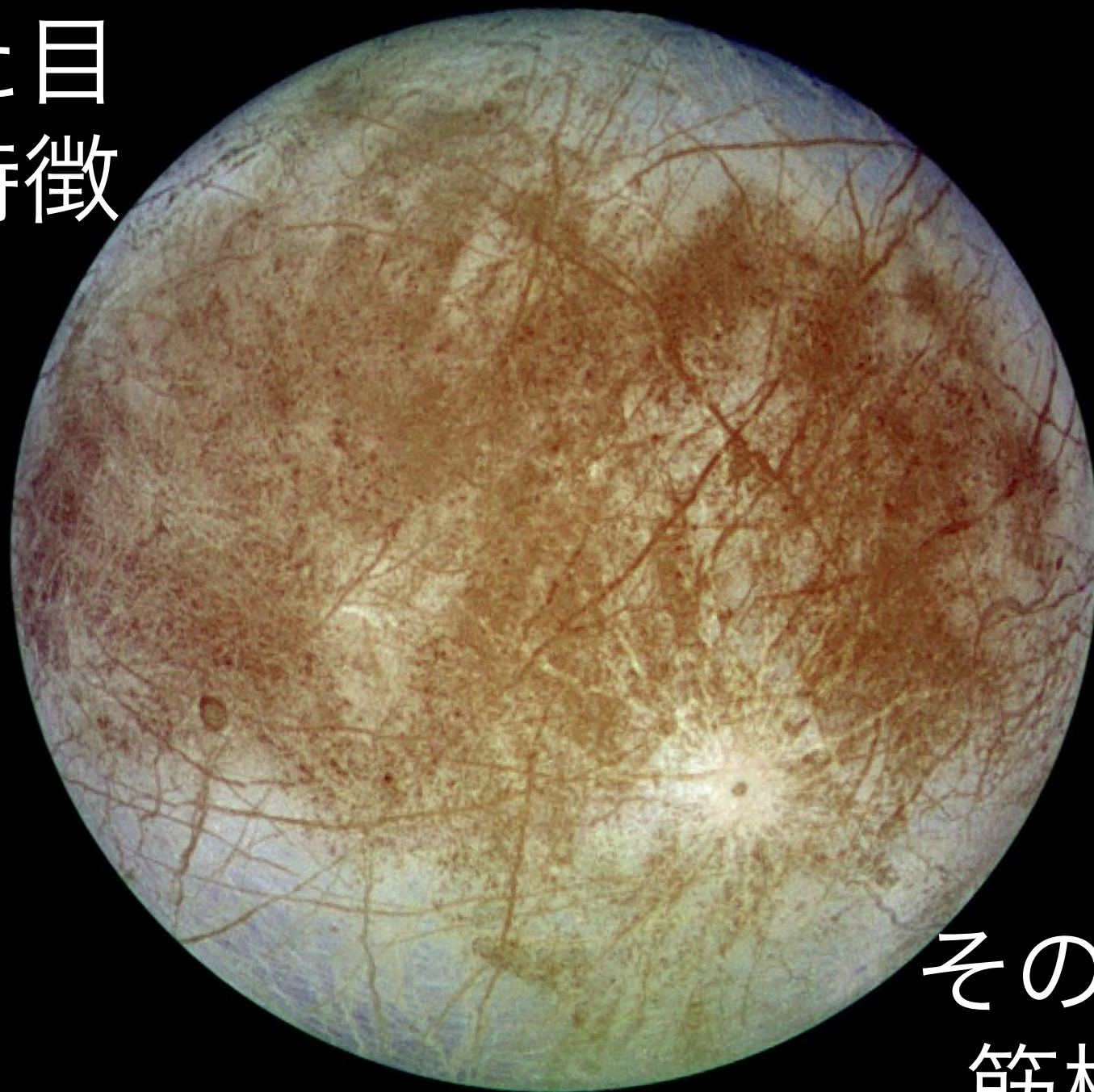
① 見た目からの予想

見た目の特徴



「筋」のような模様
「ミ」のような模様

見た目
の特徴



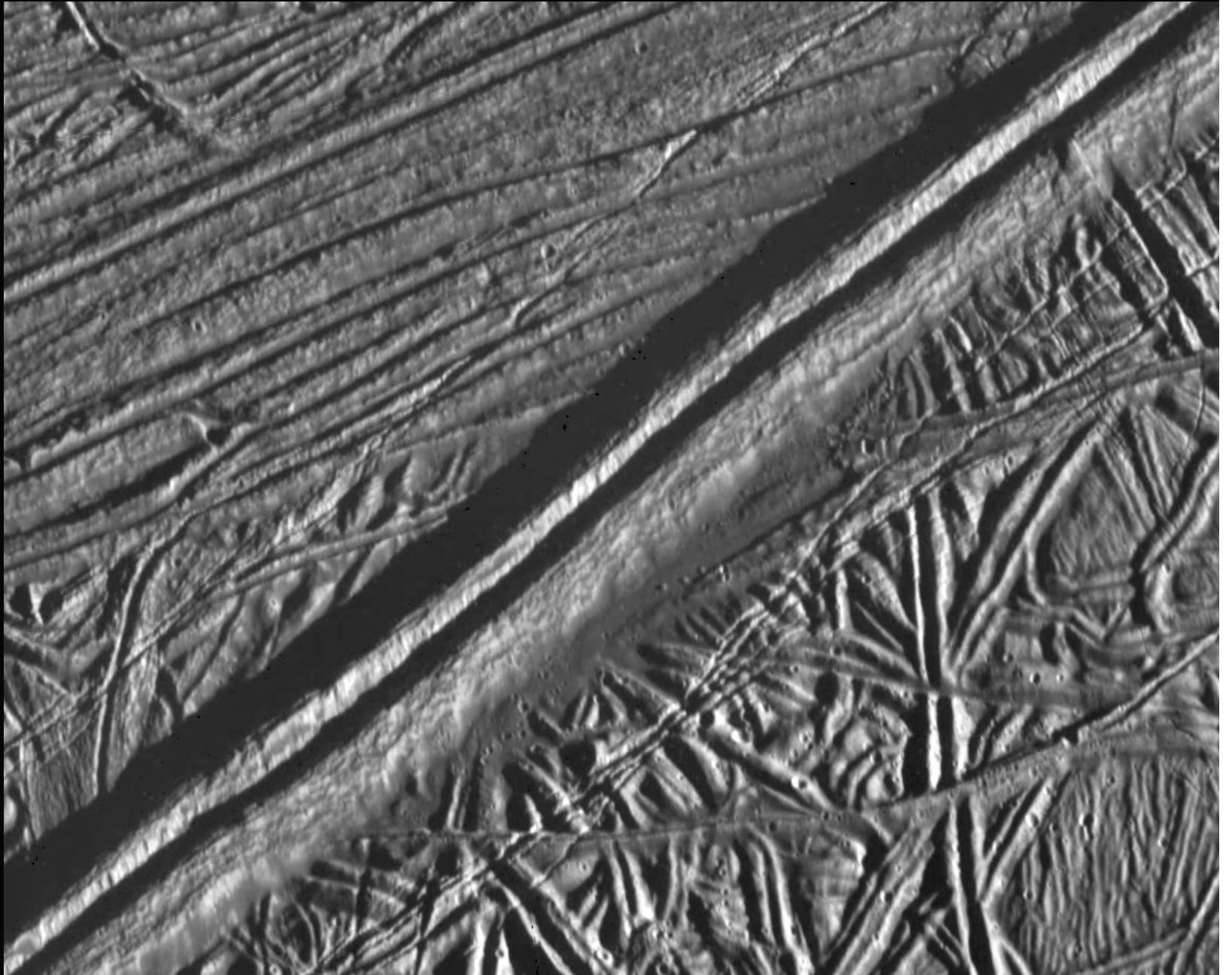
その1.
筋模様

筋模様



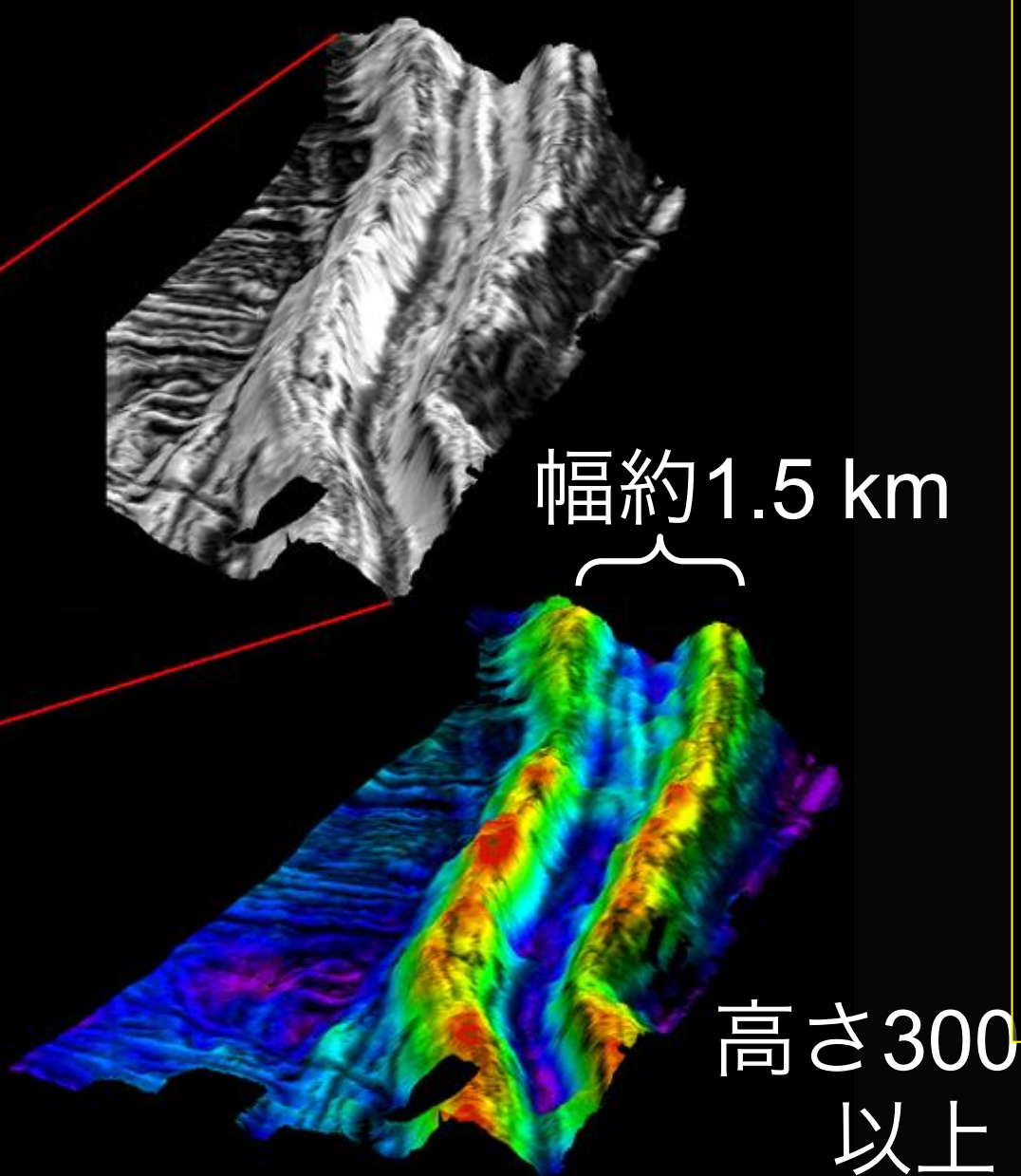
筋模様

大小の筋（うねうね）が
縦横無尽に折り重なって
いる



筋模様

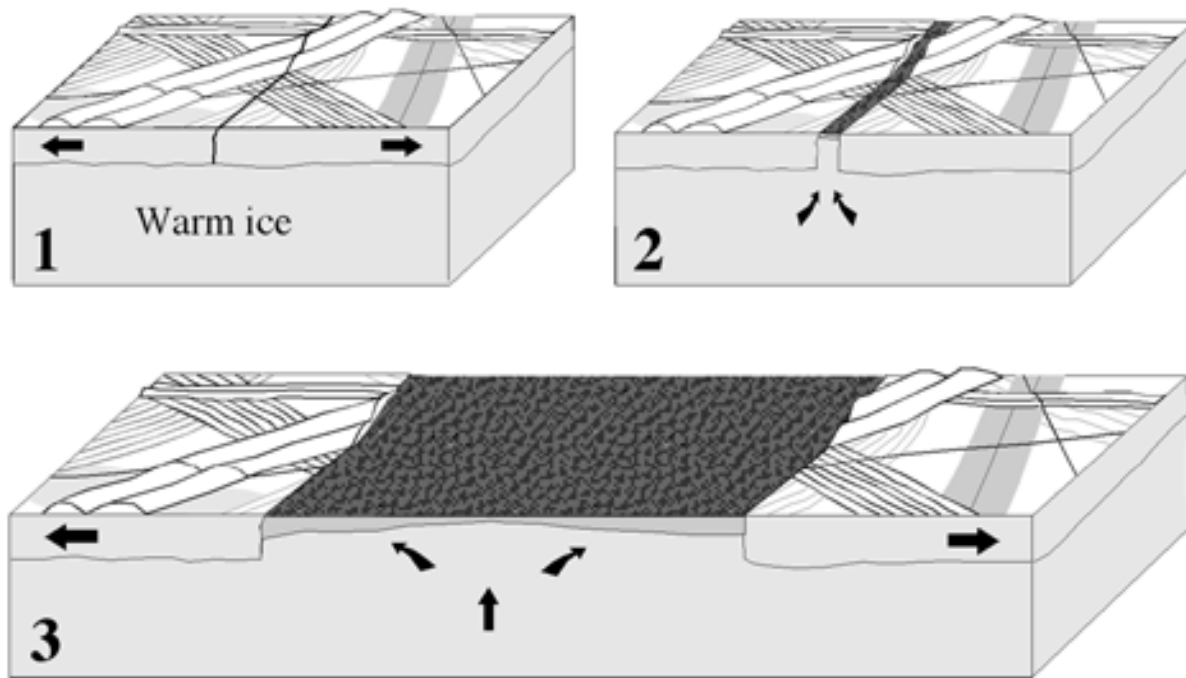
長大な山脈状の地形



じつやって出来た?

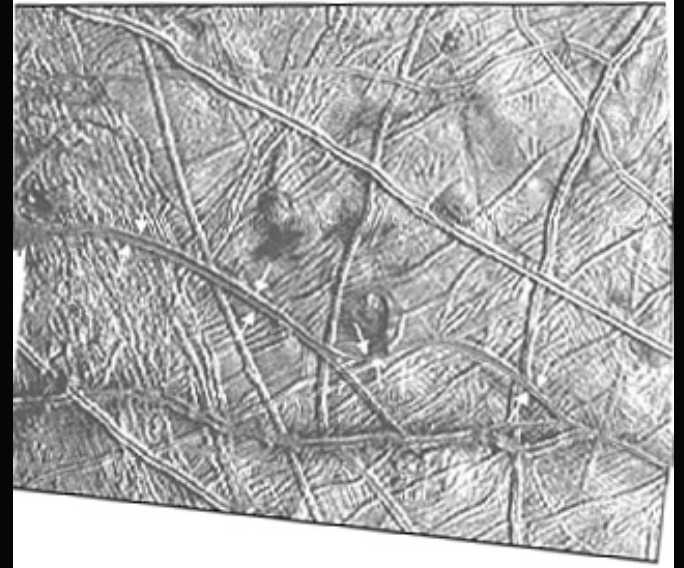
筋模様

"Fast"-spreading band

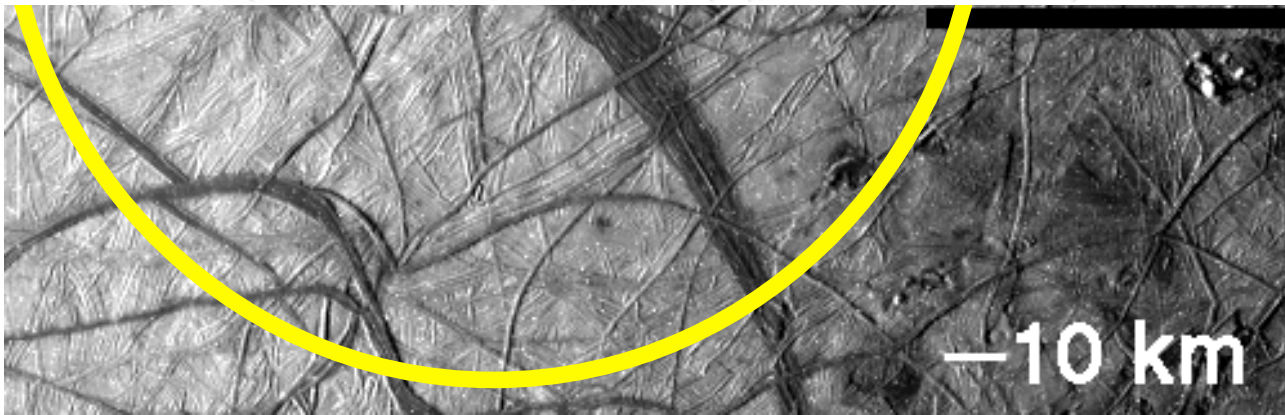


(from Prockter *et al.*, 2002, *JGR*, 107(E5), 10.1029/2000JE001458)

50 km



—10 km





そもそも疑問

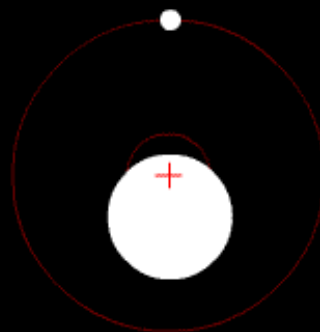
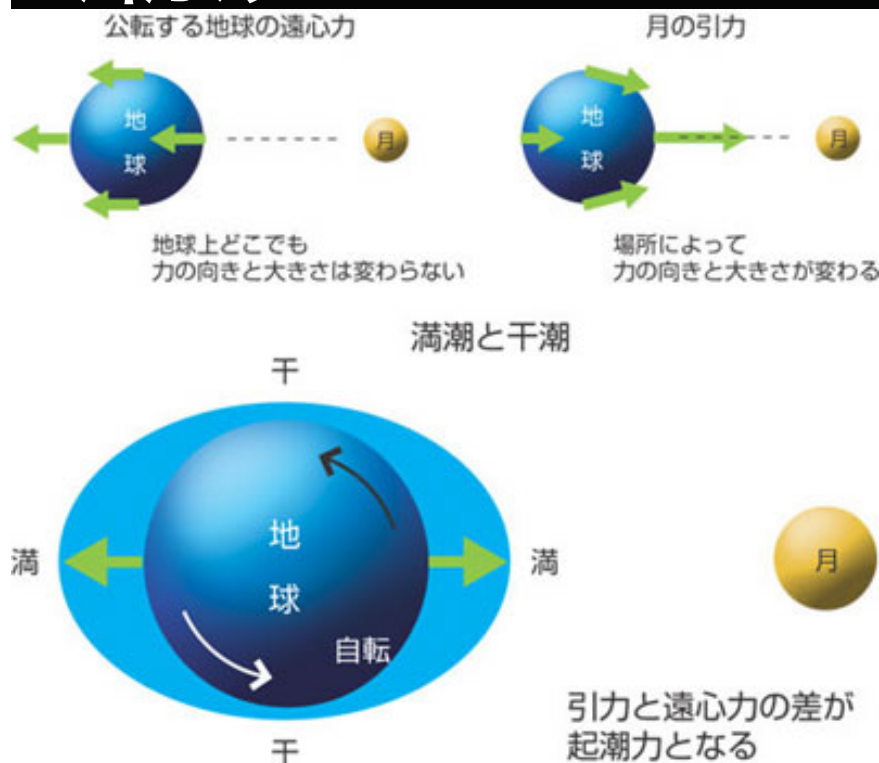
表面を割ったり亀裂を作っ
たりする
原因は??



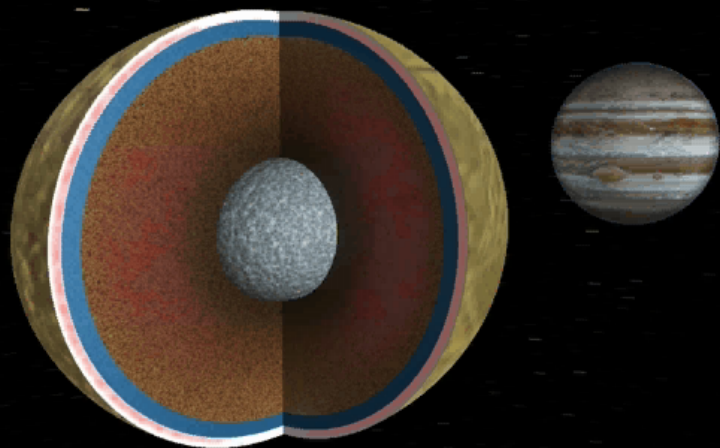
ポイントとは
潮汐

潮汐

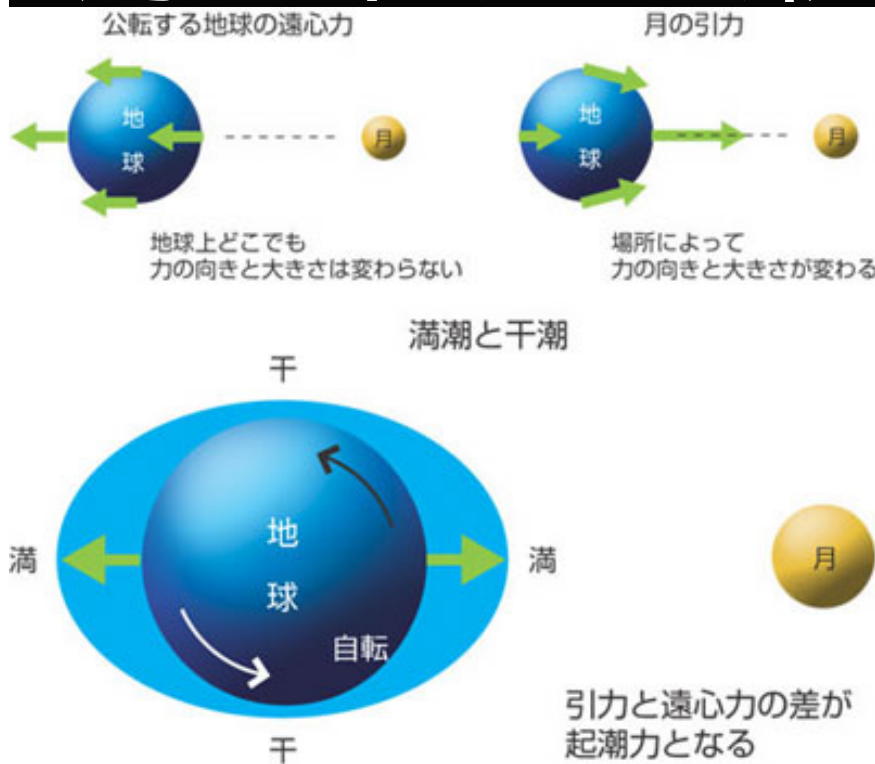
遠心力 + 重力 = 潮汐力



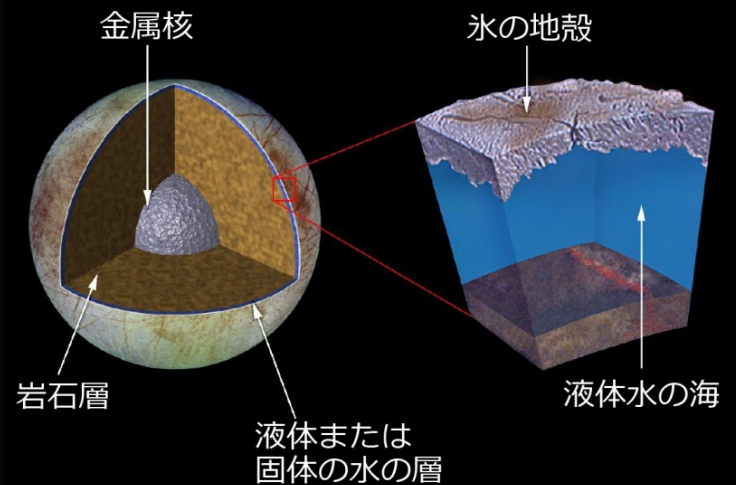
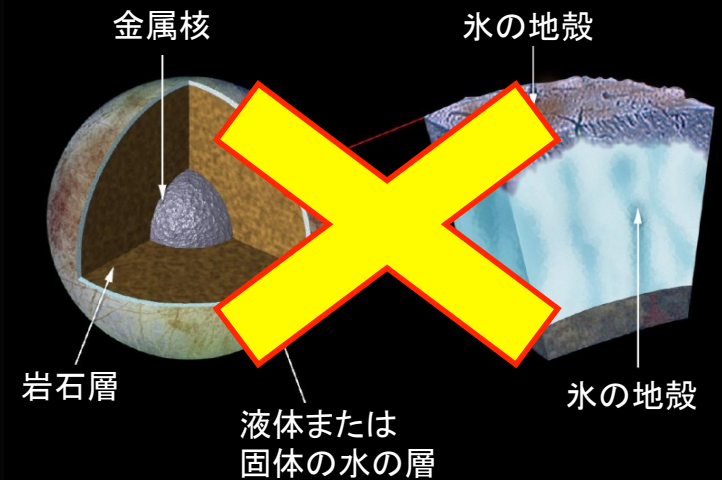
- 木星から受ける強い潮汐力によって衛星が変形。特に氷地殻や海が大きく変形する。
- 表面の破壊や、摩擦による発熱が起こる。



海の有無と潮汐の、だいじな関係



• 海があると、潮汐力による変形量が大きくなる。



• 潮汐によるエウロパ表面の変形量

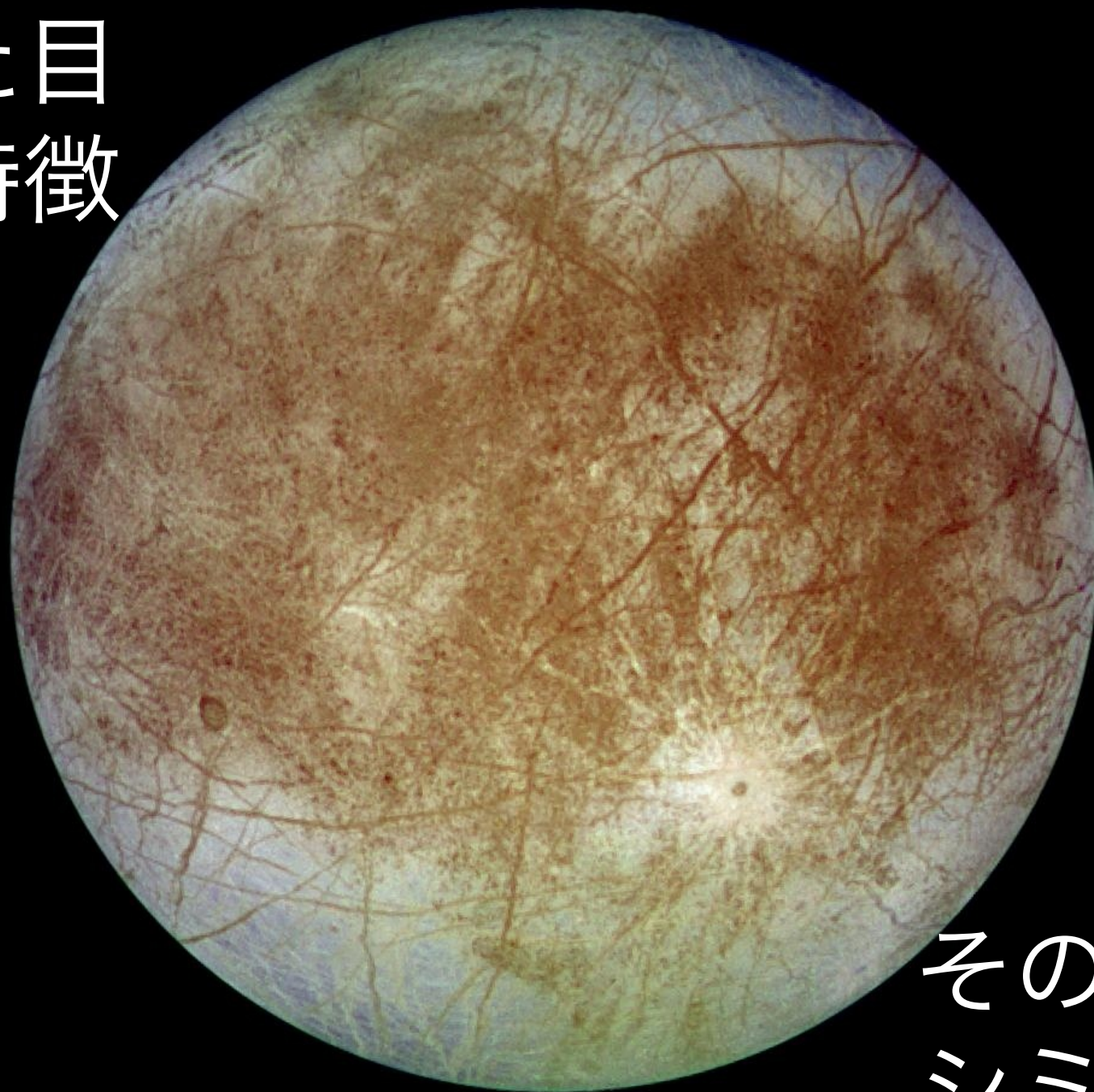
– 海がない場合・・・約3 m

– 海がある場合・・・約30 m

• 表面に亀裂を作るためには、

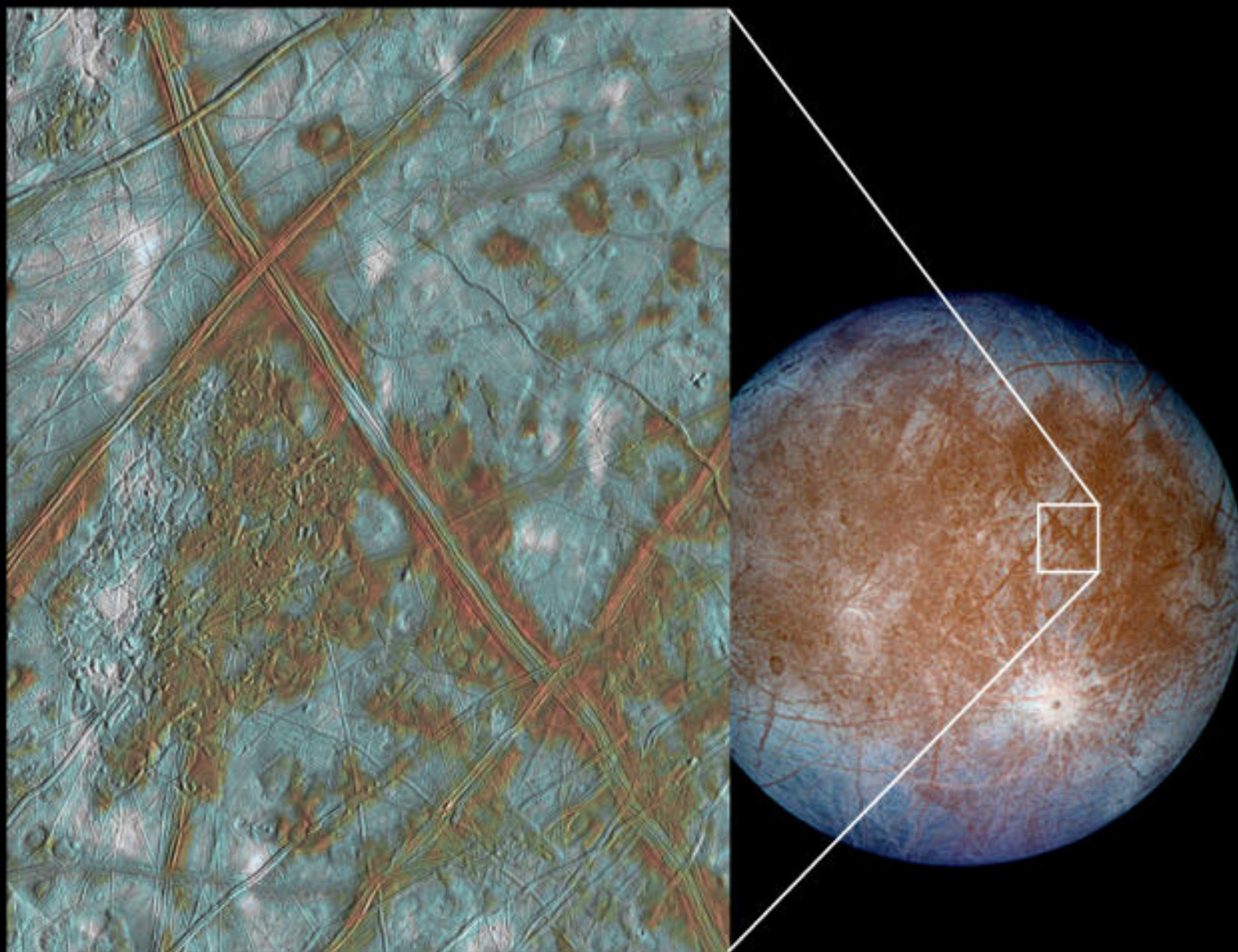
海の存在が必要

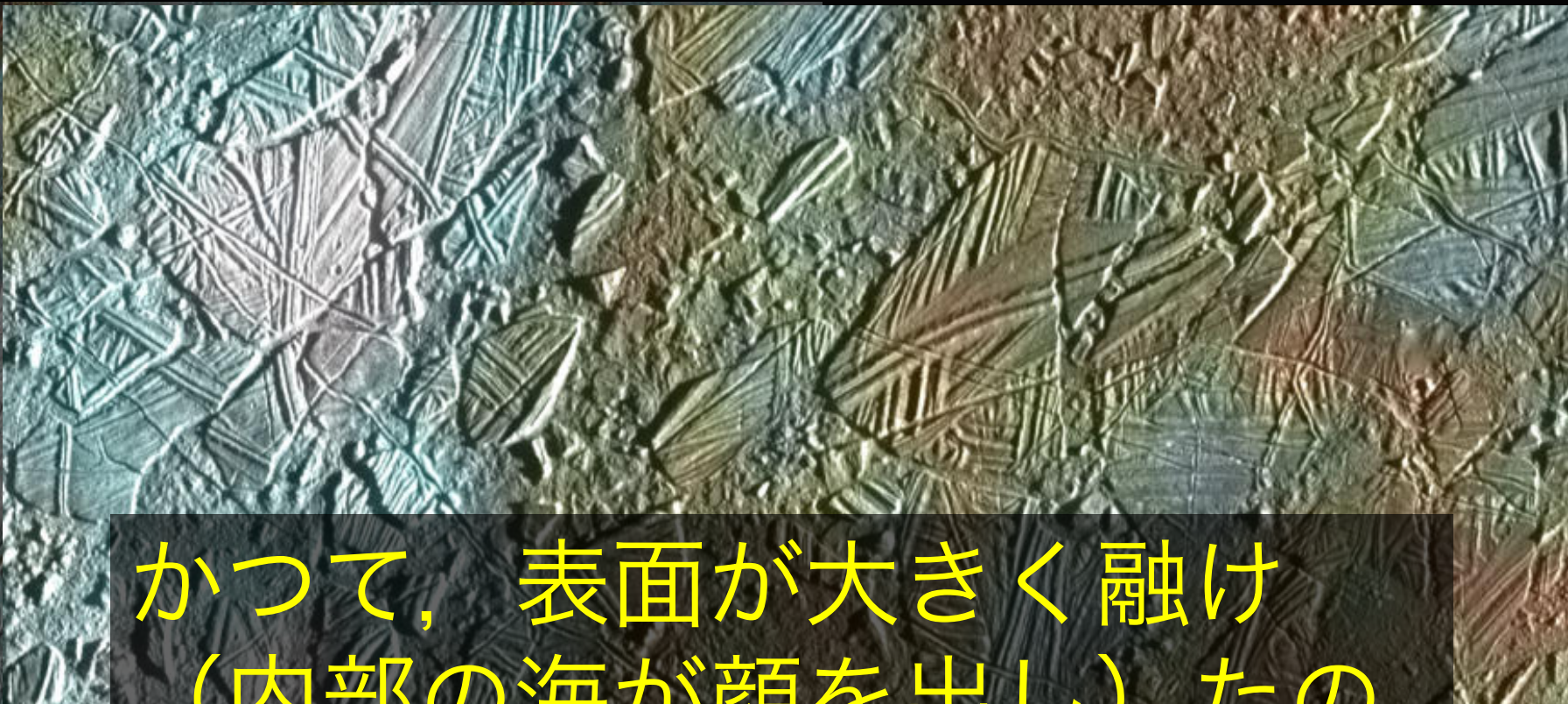
見た目
の特徴



その2.
シミ模様

シニ模様



A microscopic view of ice crystals, showing a complex, interconnected network of thin, needle-like structures. The crystals are colored in shades of blue, green, and brown, suggesting different orientations or impurities. The overall appearance is highly textured and fibrous.

かつて、表面が大きく融け
(内部の海が顔を出し) たの
ではないか？

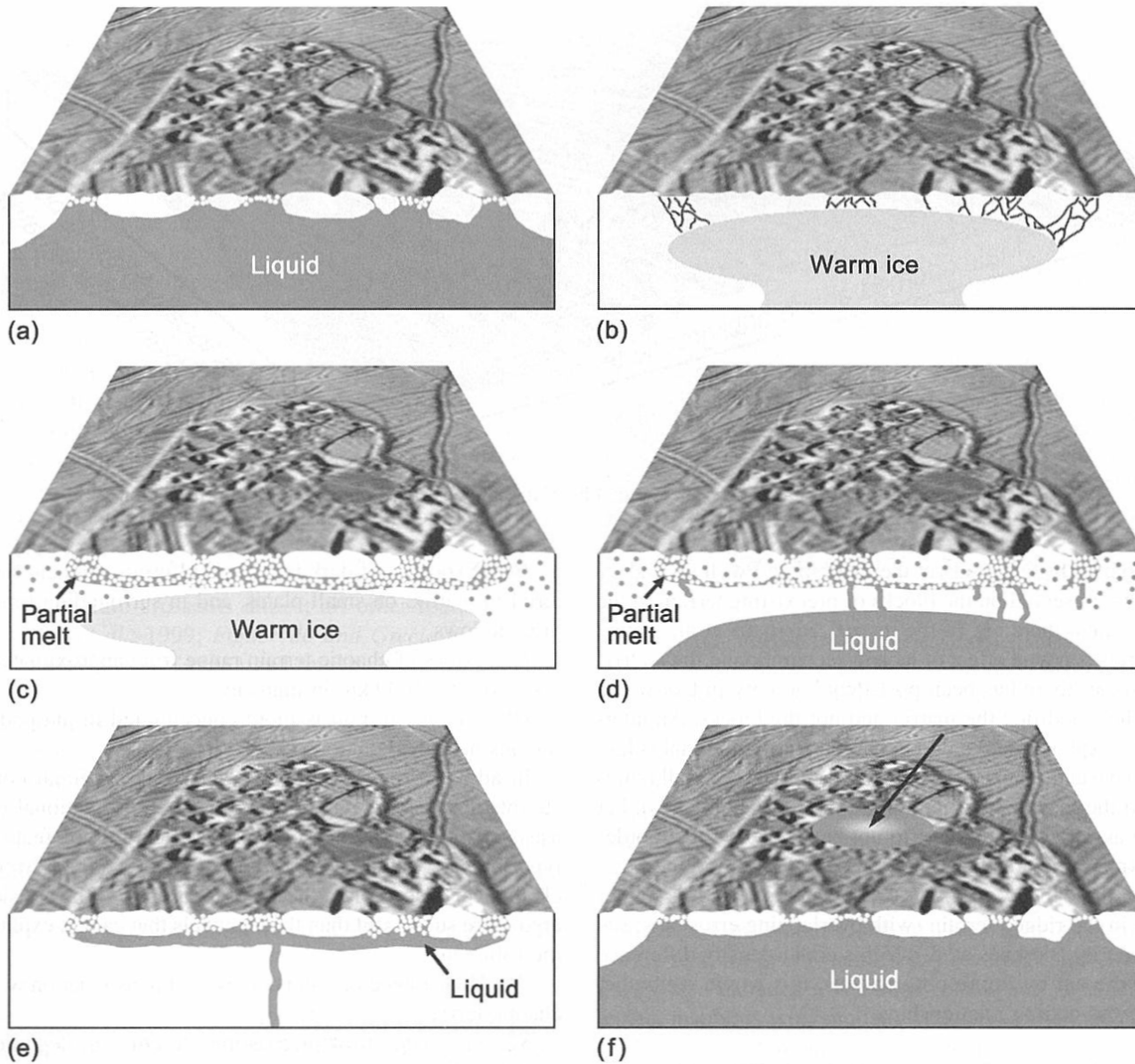
A red rectangular box highlights a specific region of the microscopic ice crystal image, focusing on a cluster of crystals with a distinct, somewhat circular or fan-like structure.

何かに似てないか…？

A photograph of sea ice, showing a vast expanse of broken ice floes. The floes are irregular in shape and size, with some appearing as large, flat sheets and others as smaller, more fragmented pieces. The ice is a pale blue color, and the background shows a dark, calm sea under a clear sky.

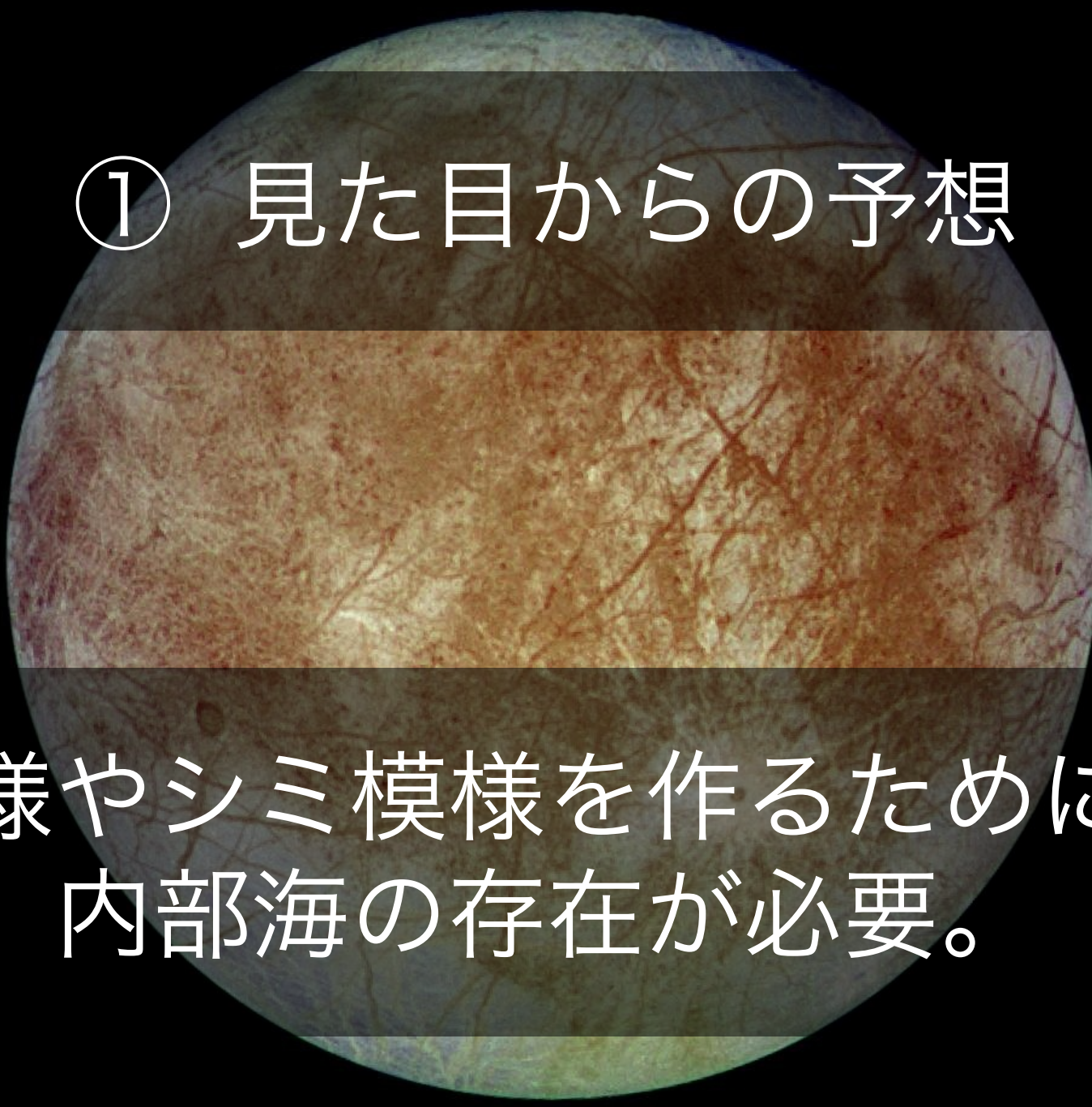
流氷！！

シミ模様の原因仮説



• (仮説ごとに細かな違いはあるが) **液体水**あるいは**暖かい氷**が上がってきて、表面が大きく崩れた。

• **表面下の浅い所に海**がある、あるいは、**海の熱**を受けて**上がった暖かい氷**があること
Collins et al., JGRE, 200



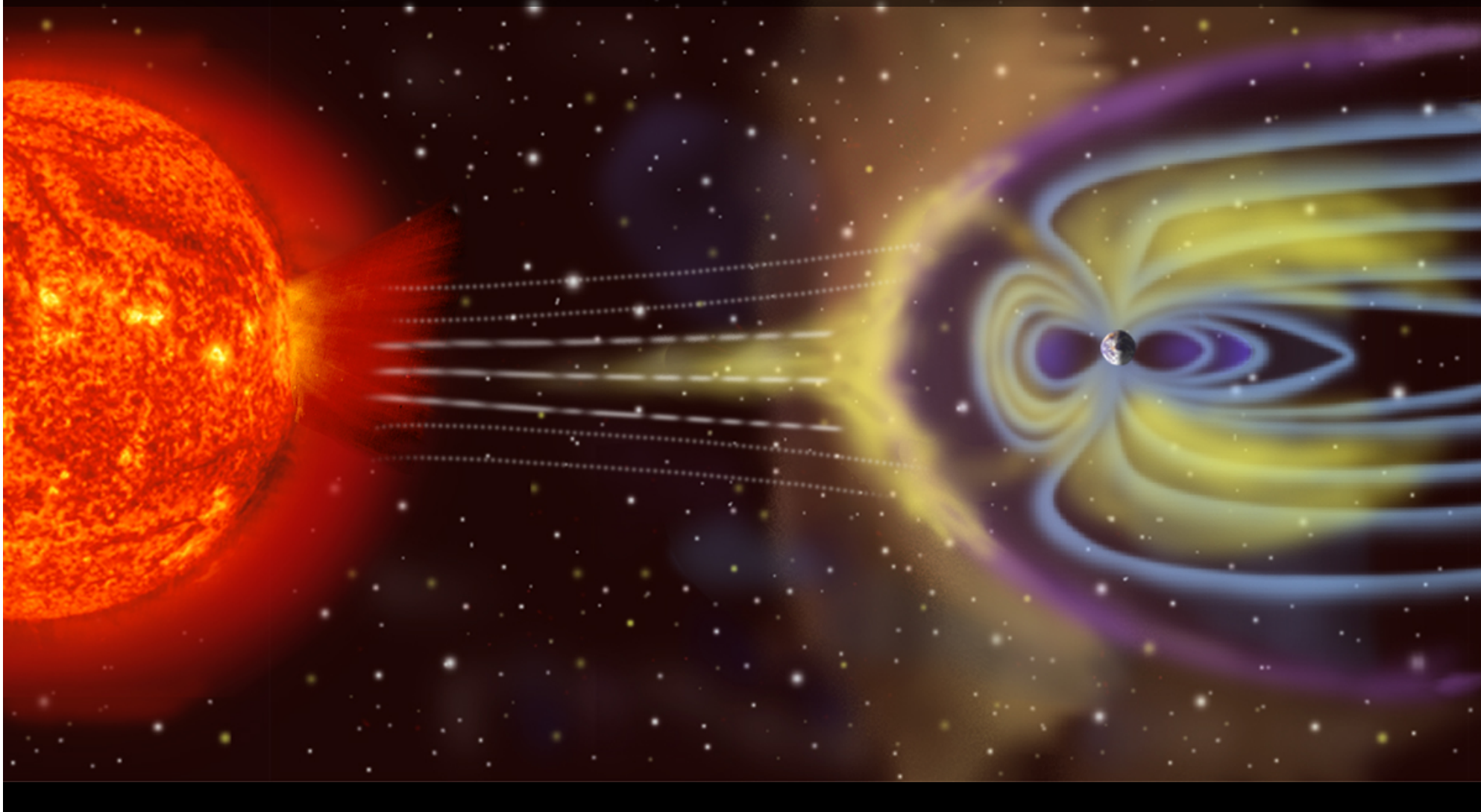
① 見た目からの予想

筋模様やシミ模様を作るためには、
内部海の存在が必要。



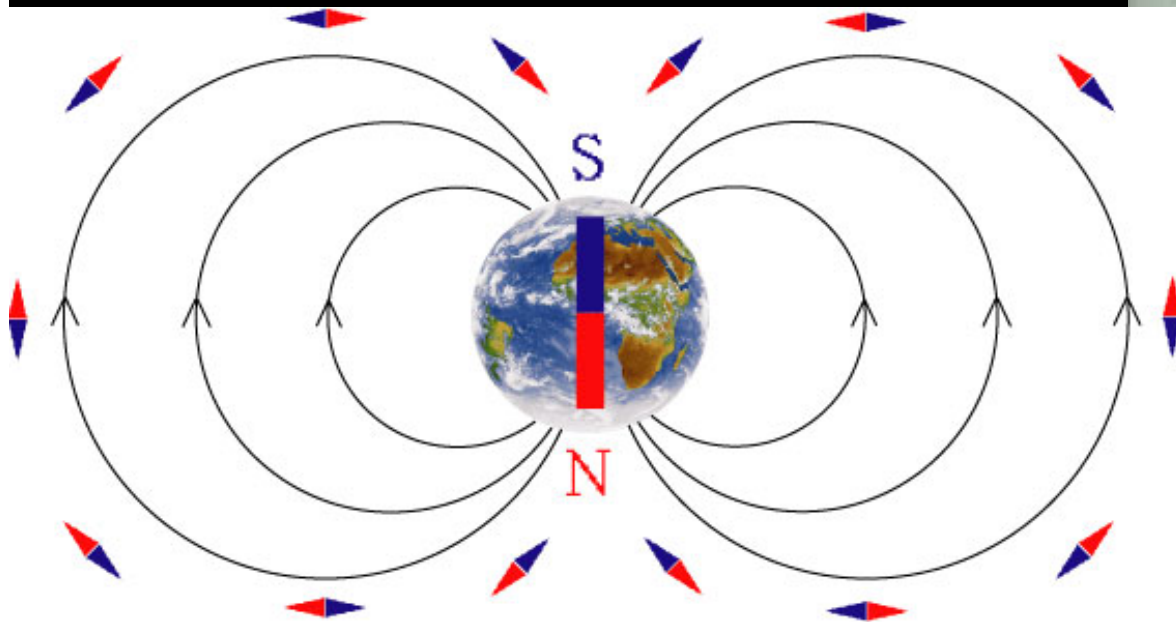
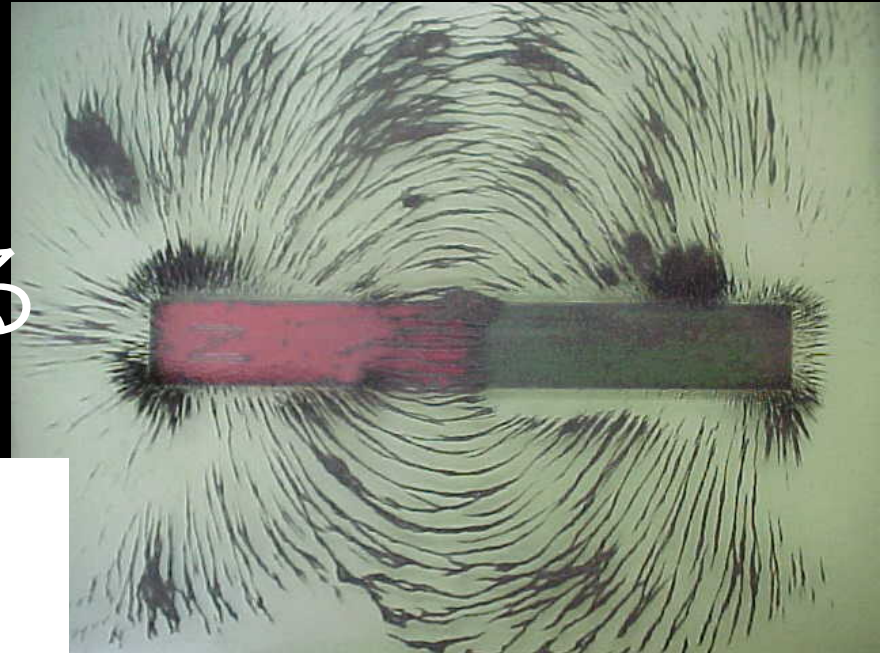
② 磁場観測からの予想

磁場のはなし



磁場のはなし

地球は磁場を持っている



木星も持っている

エウロパは木星磁場の中を公転する

木星の自転軸

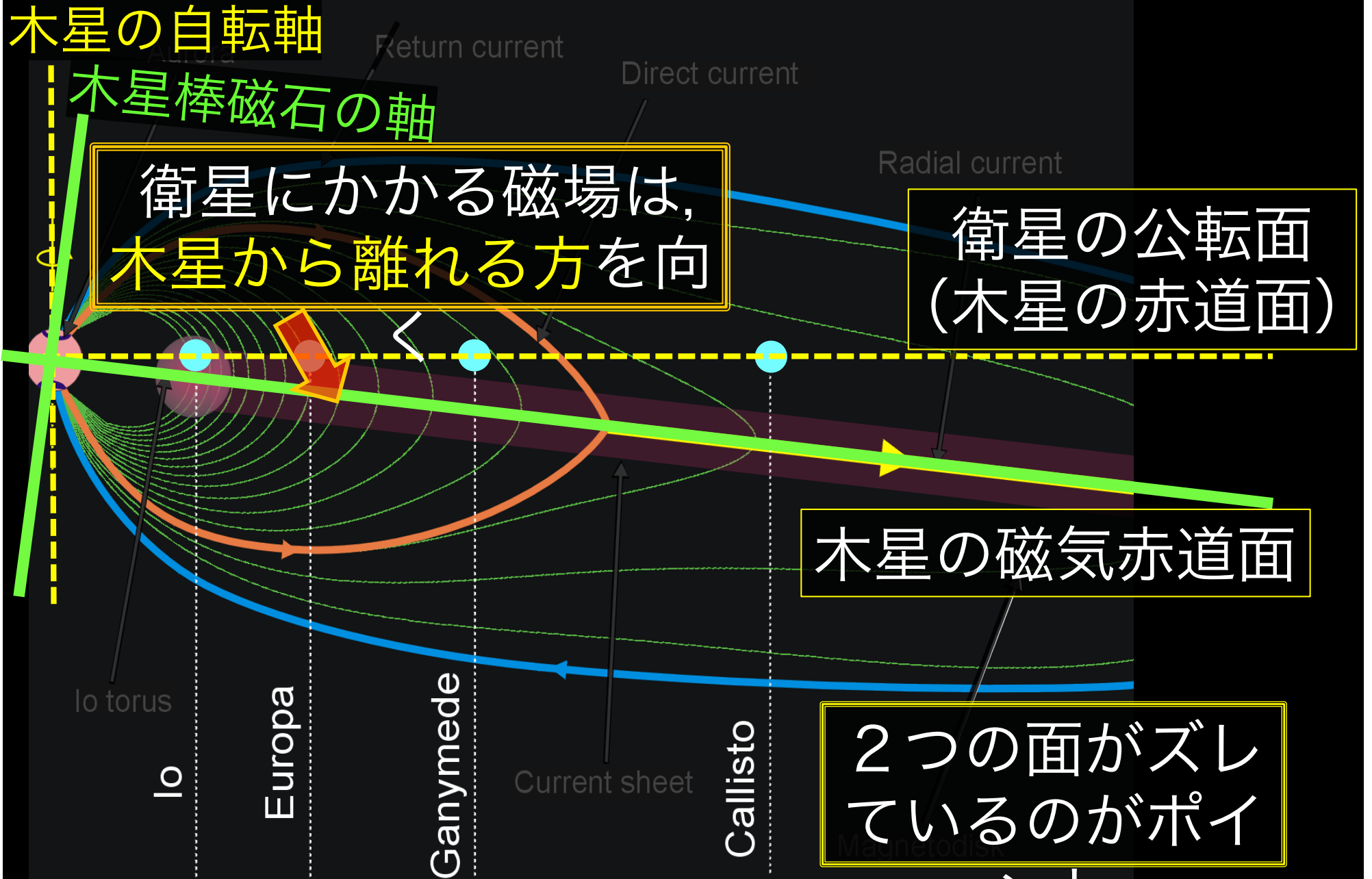
木星棒磁石の軸

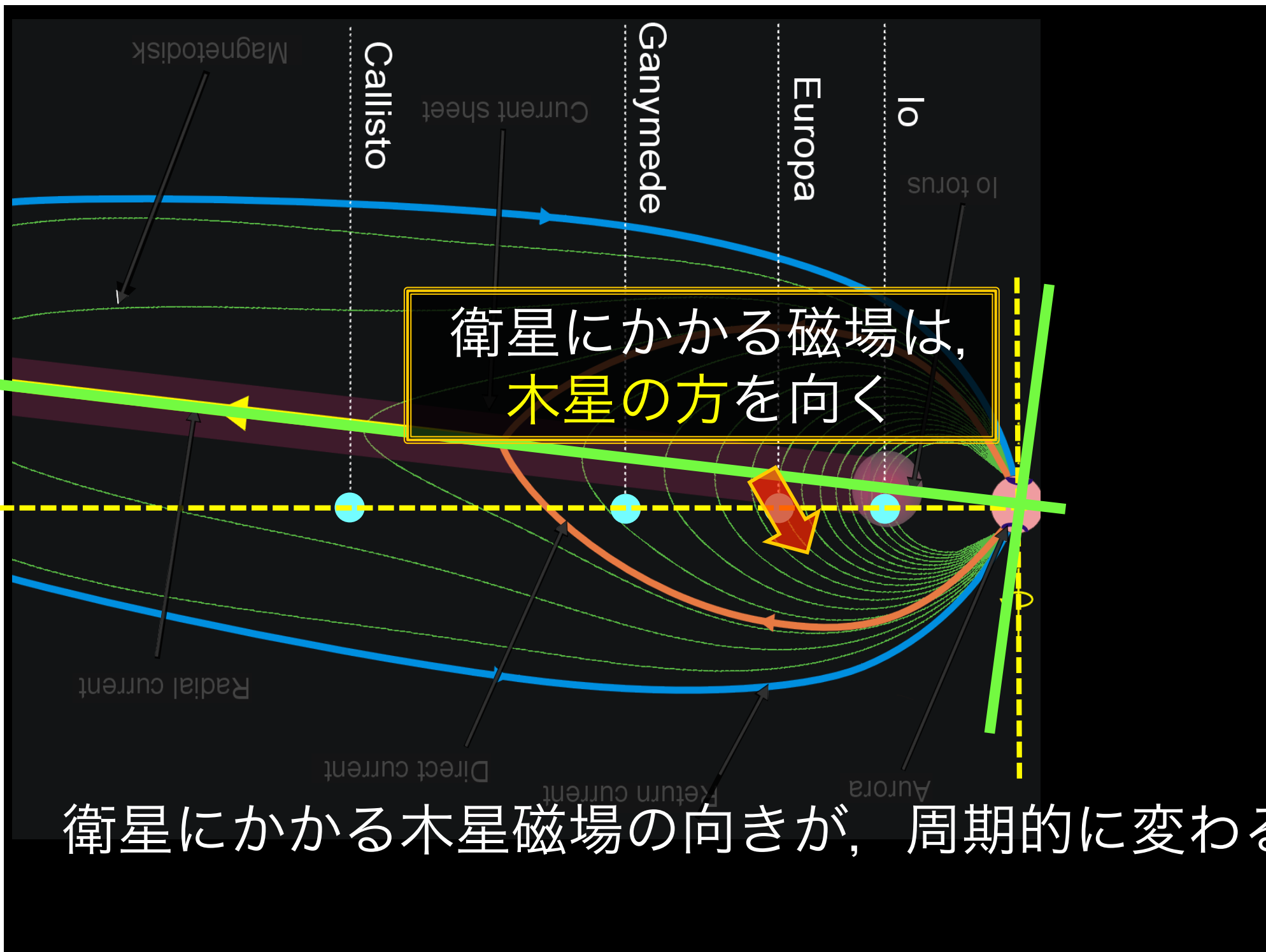
衛星にかかる磁場は、
木星から離れる方を向

衛星の公転面
(木星の赤道面)

木星の磁気赤道面

2つの面がズレ
ているのがポイント

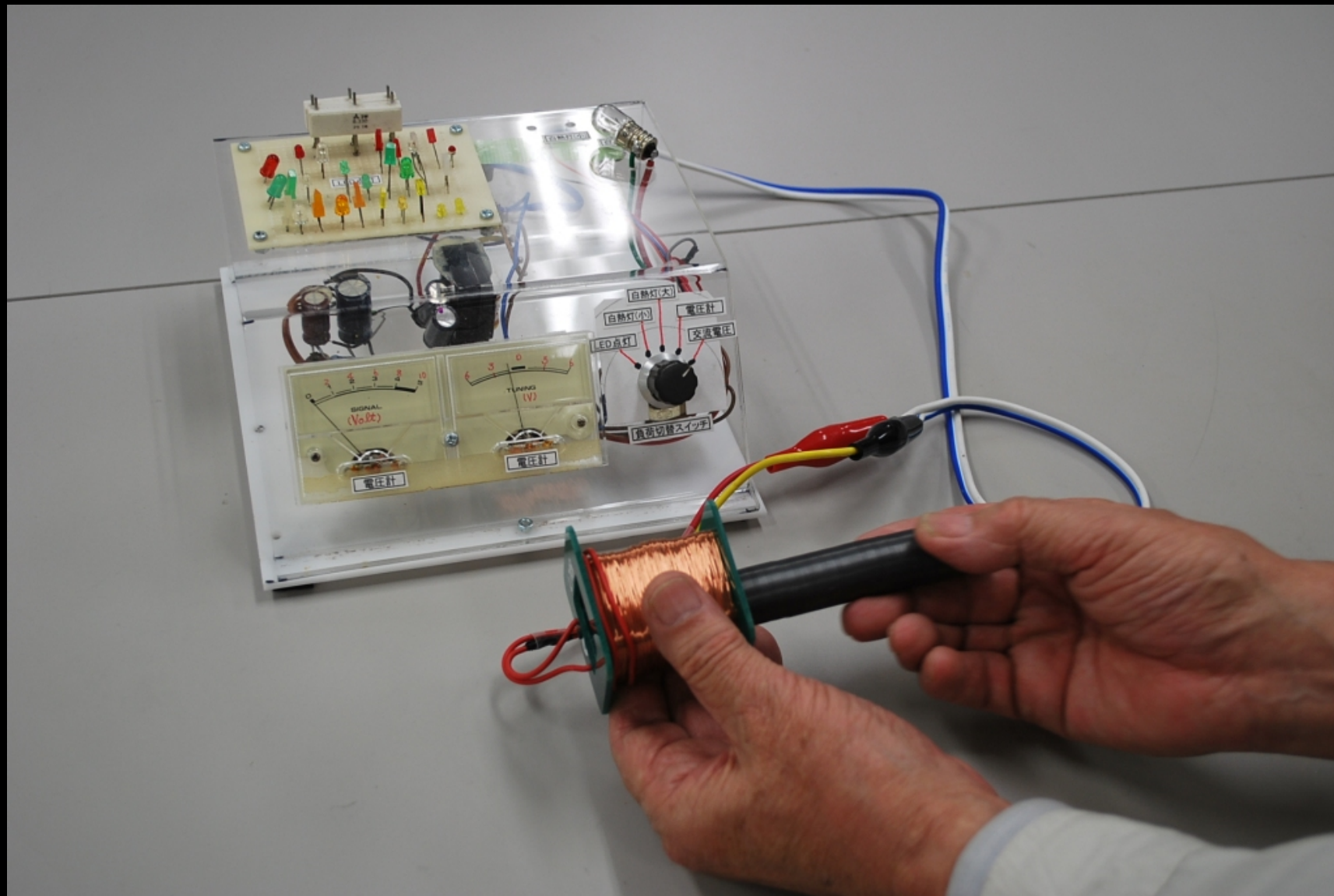




衛星にかかる磁場は、
木星の方を向く

衛星にかかる木星磁場の向きが、周期的に変わる

ポイント：電磁誘導

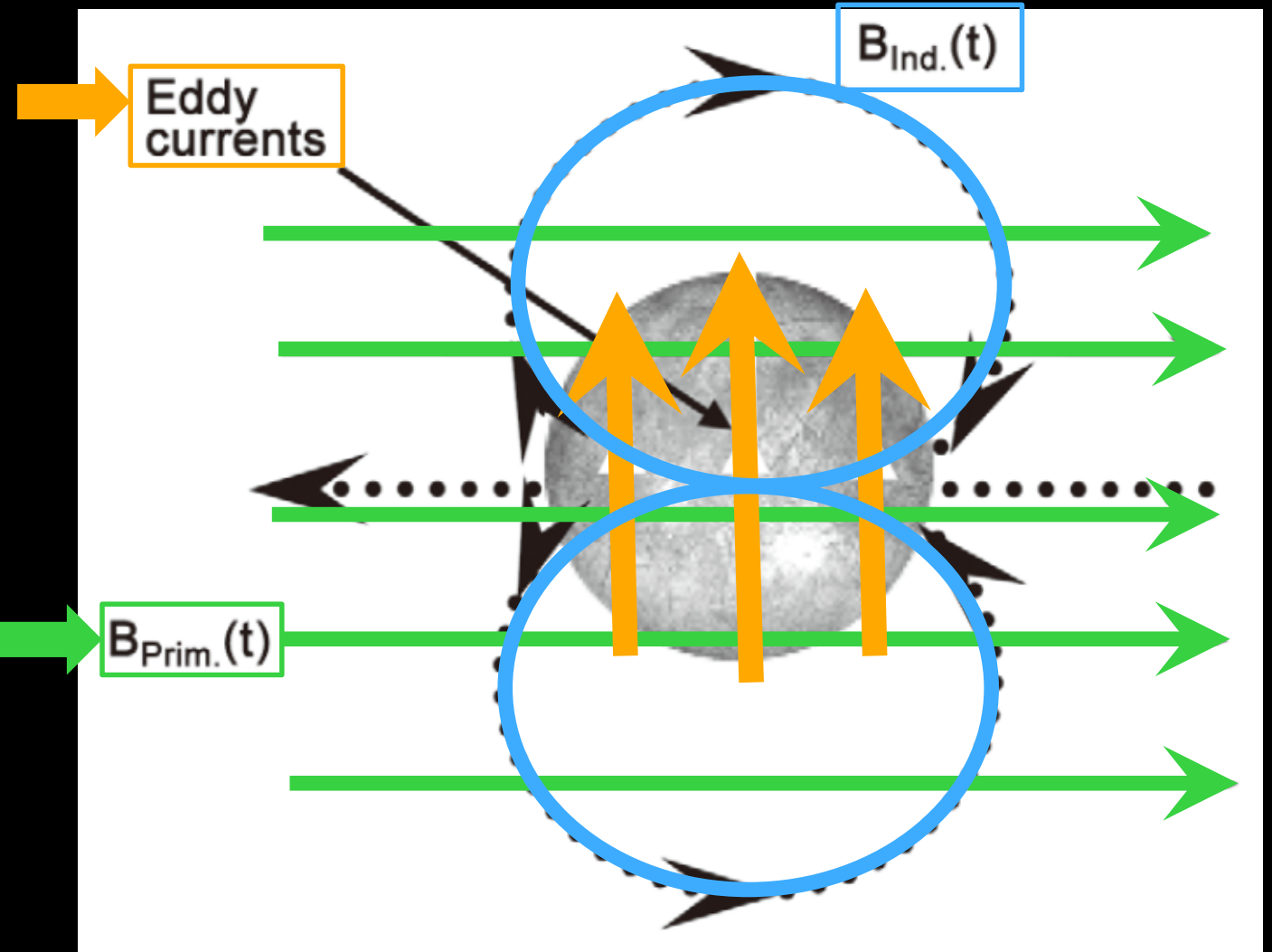


電磁誘導（誘導磁場）の発生

3. エウロパ内部で生じた電流が、二次的な磁場を作る

2. 電磁誘導によって、エウロパ内部で電流が発生

1. 木星磁場の強さと向きが周期的に変化



氷の下に海？

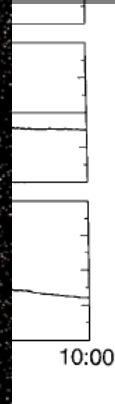
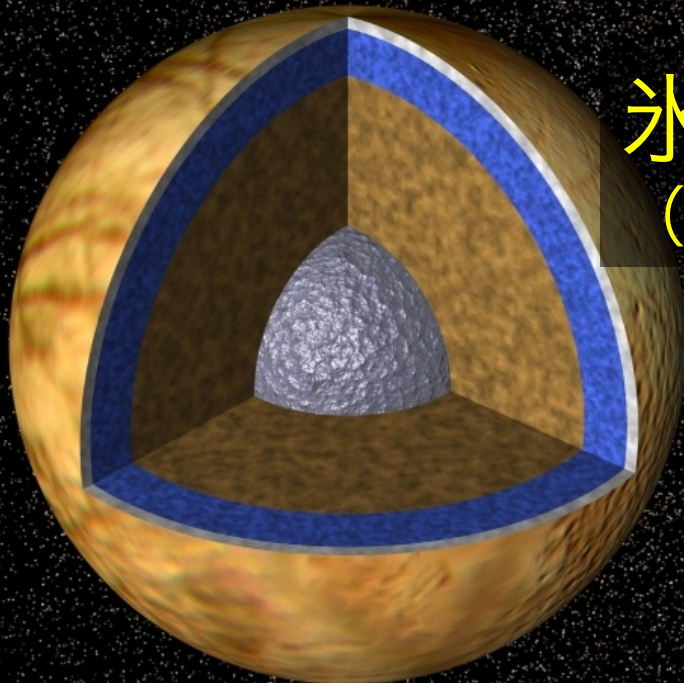
1. エウロパにかかる木星磁場の強さと向きが周期的に変化
2. エウロパ内部で電流が発生
3. その電流によって二次的な磁場が発生

探査機ガリレオは、この「二次的な磁場」をとらえた

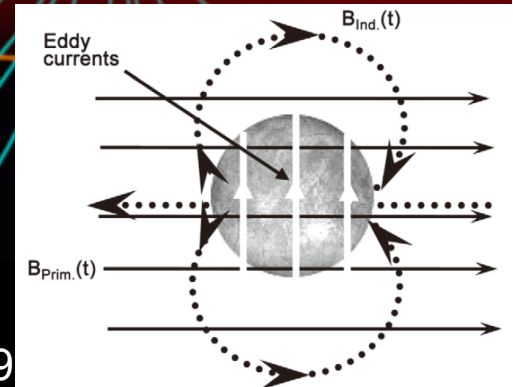
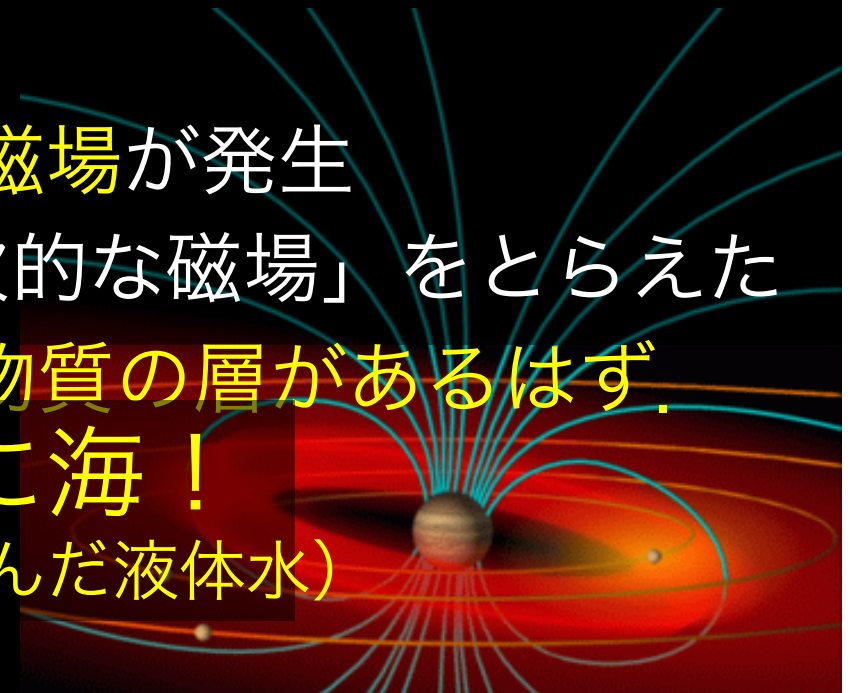
す物質の層があるはず。

氷の下に海！

(塩分を含んだ液体水)



Kivelson+, Science, 19

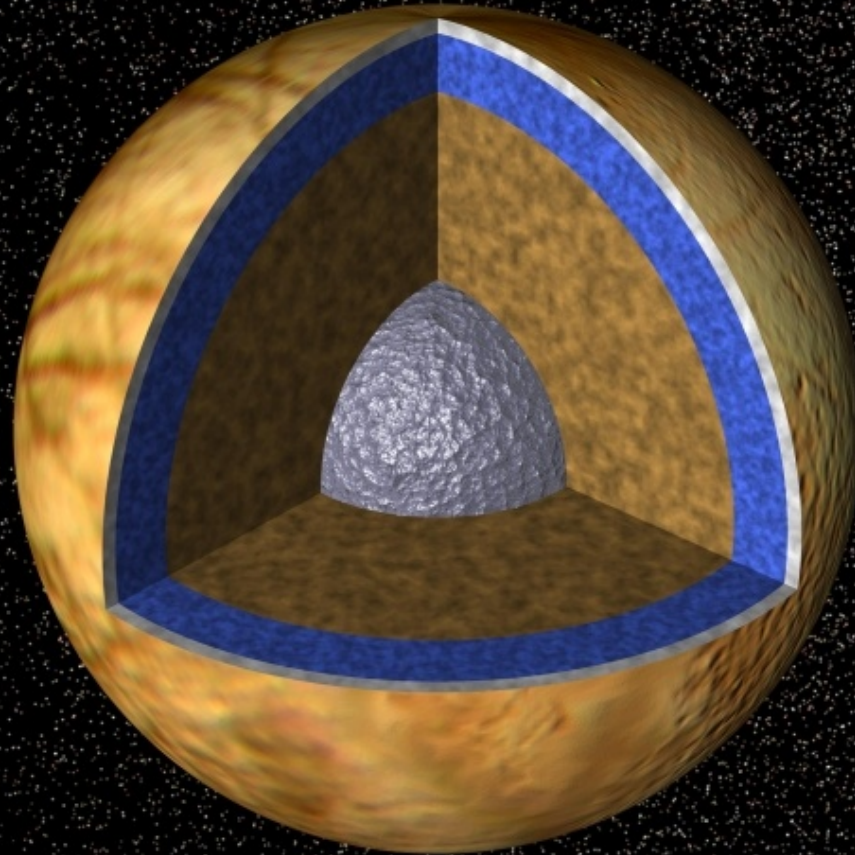


A spherical model of the moon Europa, showing its characteristic cracked and icy surface. The surface is depicted with a network of brownish, branching cracks over a light blue and white background. The sphere is centered against a black background.

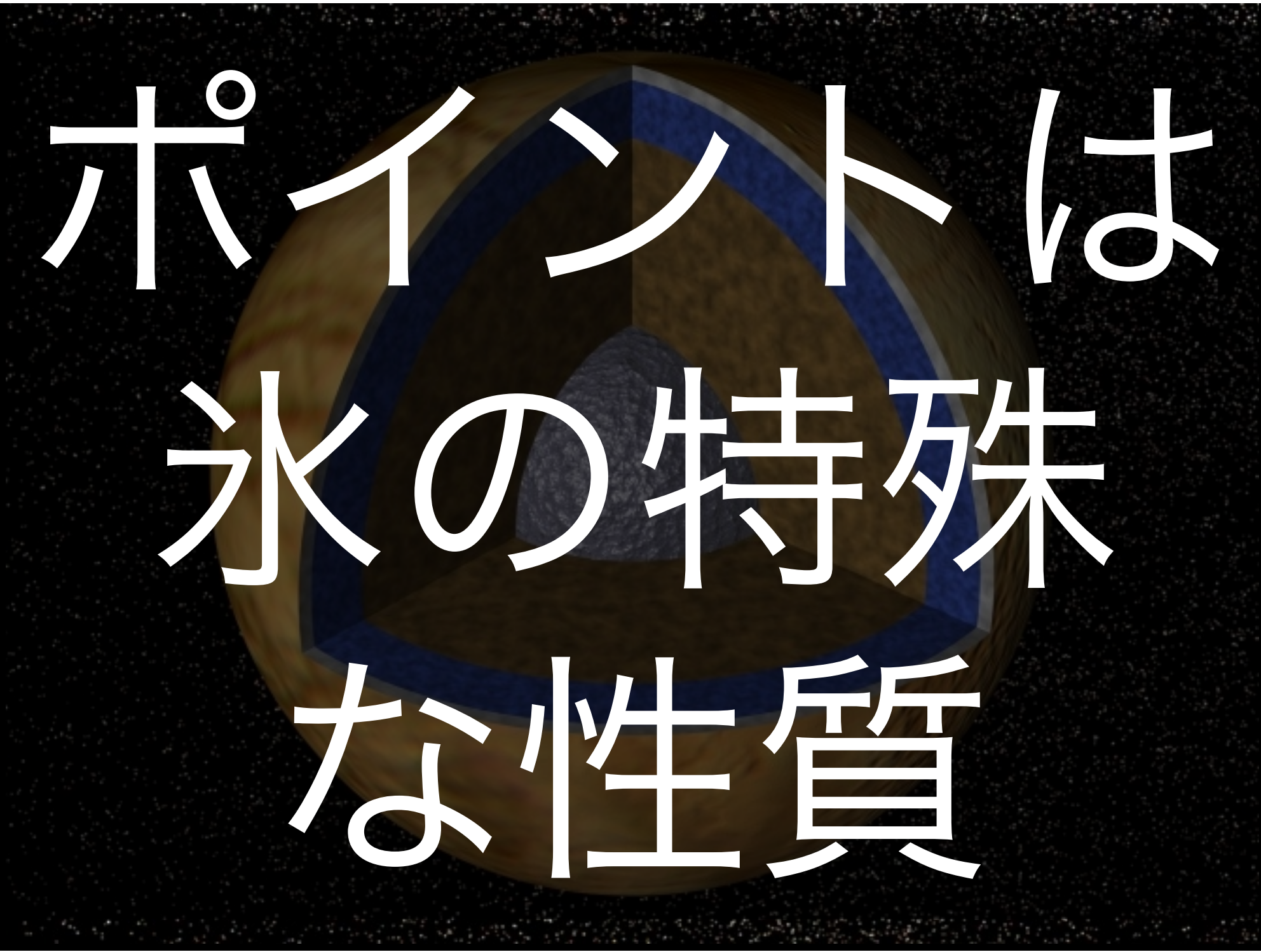
③ 理論計算からの予想

エウロパ内部の温度を計算

氷の下に海がある
→氷の層が内部で融けている



氷を融かしておけるような温度状態にある。
大気もないし、太陽から遠い・・・可能なのか？



ポイントとは
氷の特殊
な性質



氷は、圧力を
かけると融け
やすくなる

(岩石は、圧力を
かけると融けにく
くなる)

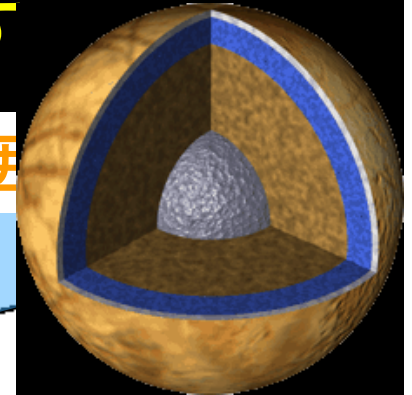
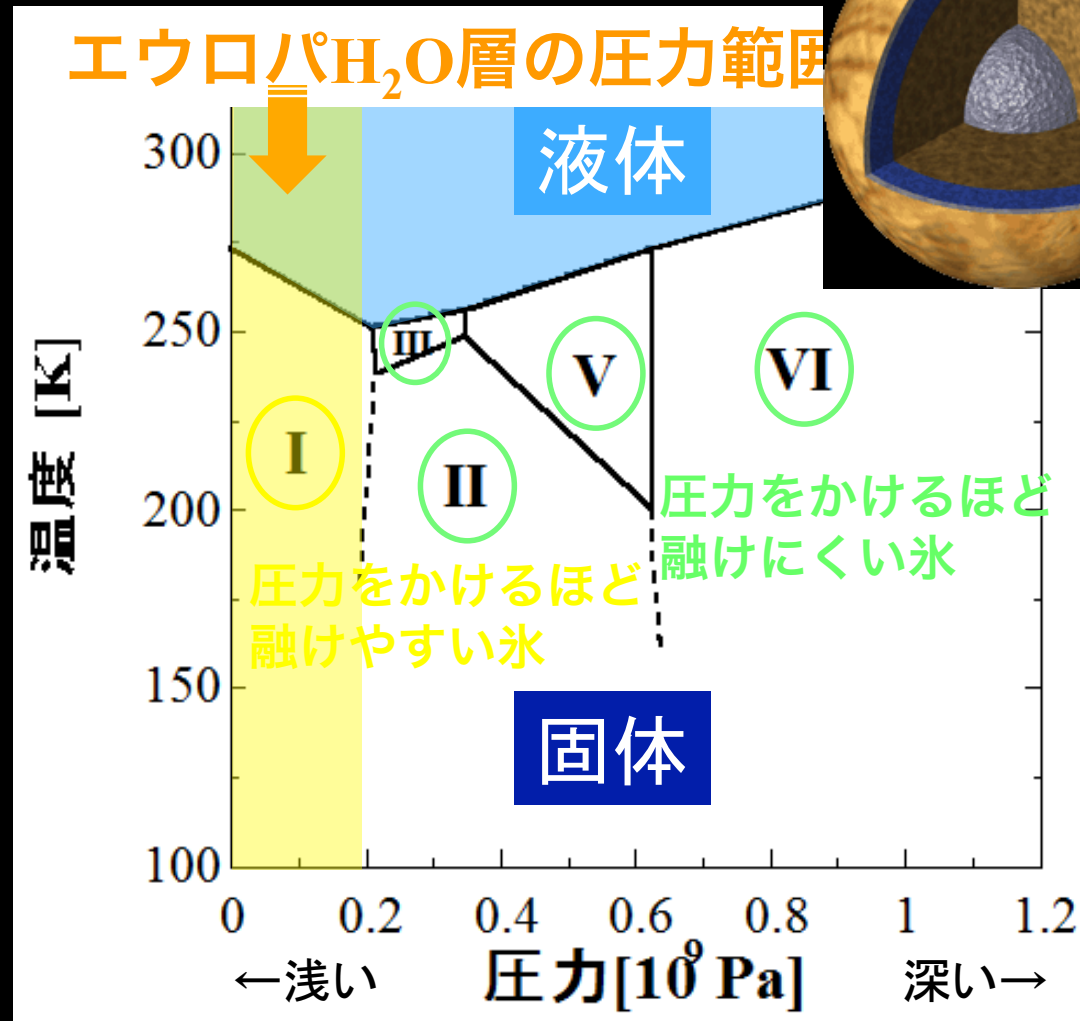


圧力をかけると融けやすい？

(圧力をかけた氷＝深いところにある氷)

氷Iは高圧（深い）ほど低融点（融けやすい）！

- H₂Oの氷には色々な相がある
(高圧では、分子は密な結晶構造をとる)。
- 冷凍庫で作る氷は「氷I相」。
- 天体内部は高圧：氷
I → III → V → VI
- エウロパ内部には氷I相だけが存在。

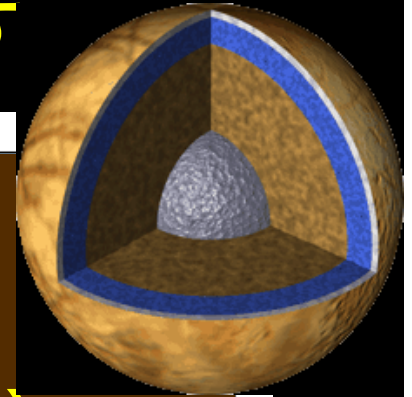
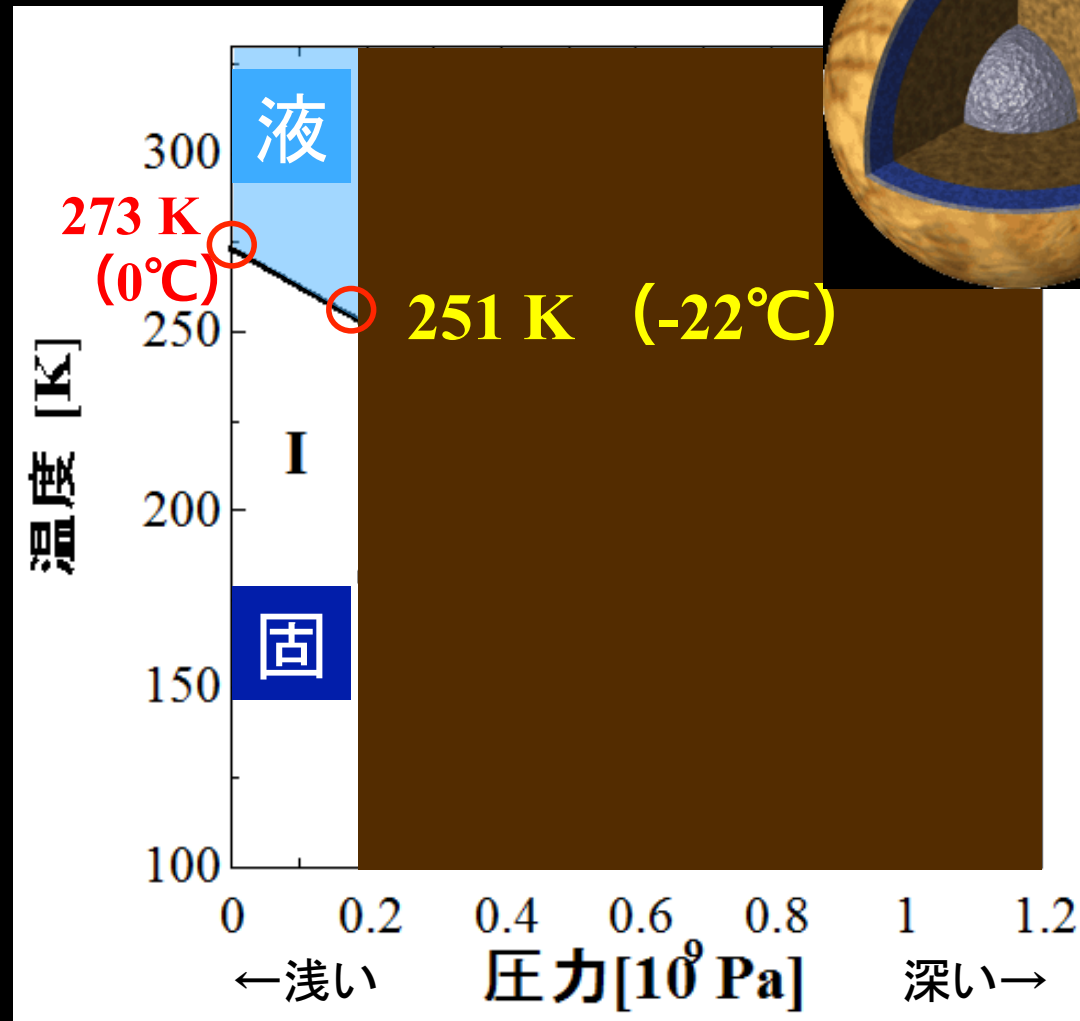


圧力をかけると融けやすい？

(圧力をかけた氷＝深いところにある氷)

氷Iは高圧（深い）ほど低融点（融けやす

- エウロパ内部には氷I相だけが存在。
• 251~273 K 以上の温度なら、融けられる（海でいられる）。
- 内部の温度を予想（計算）してみる。



天体内部の温度を計算する

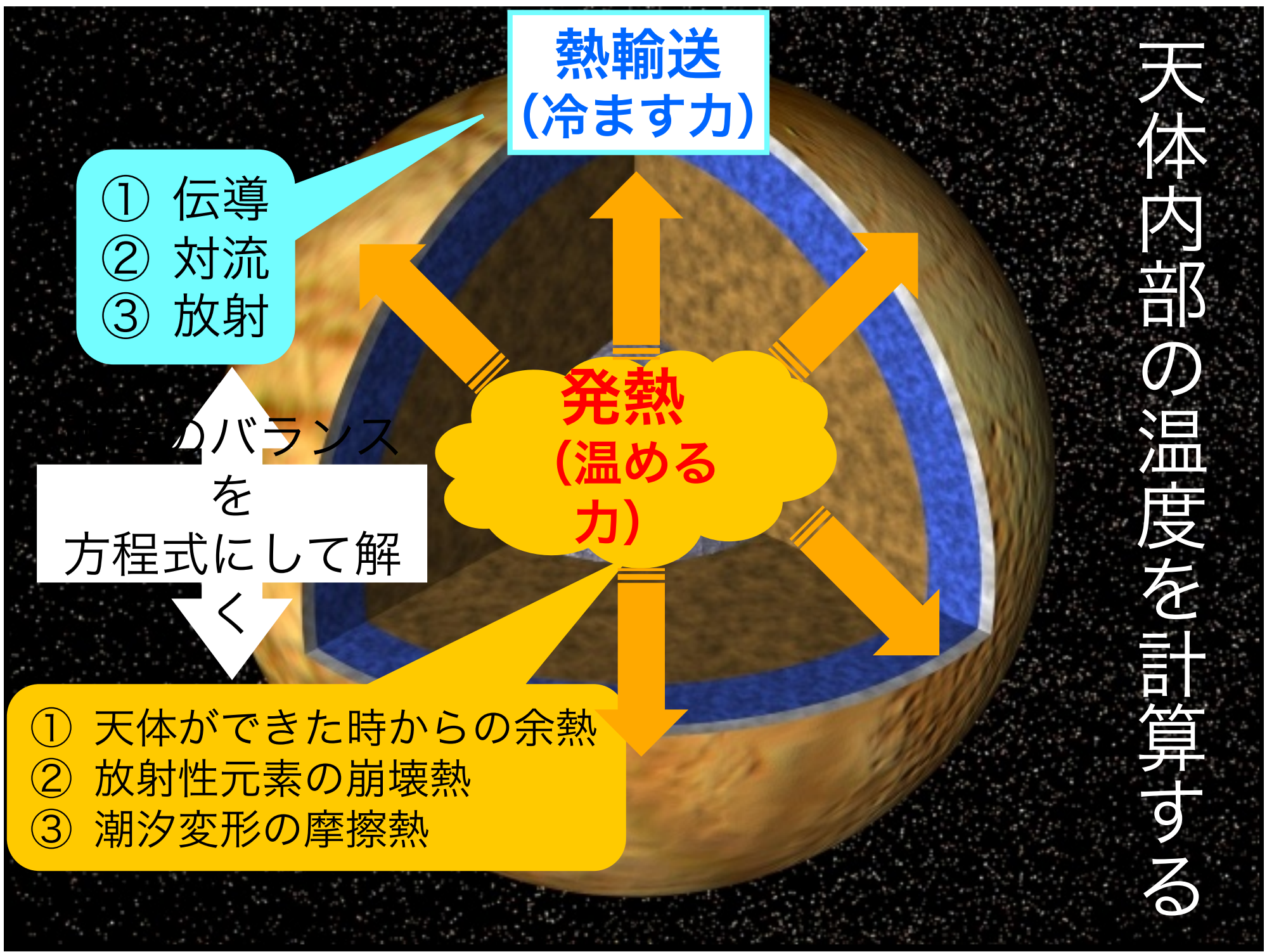
熱輸送
(冷ます力)

- ① 伝導
- ② 対流
- ③ 放射

発熱
(温める力)

のバランス
を
方程式にして解
く

- ① 天体ができた時からの余熱
- ② 放射性元素の崩壊熱
- ③ 潮汐変形の摩擦熱



天体内部の温度を計算する

発熱（温める力）と熱輸送（冷ます力）のバランスを方程式にして、温度の時間変化を計算する

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot \mathbf{F} + \rho Q$$

熱輸送 熱源

ρ : 密度 (kg/m^3)

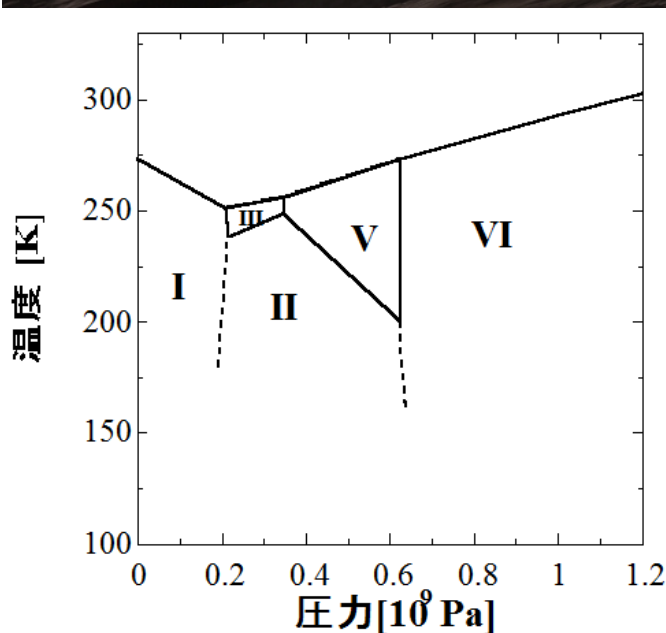
C : 比熱 (J/kg K)

T : 温度 (K)

t : 時間 (s)

F : 熱流量 (W/m^2)

Q : 発熱量 (W/kg)



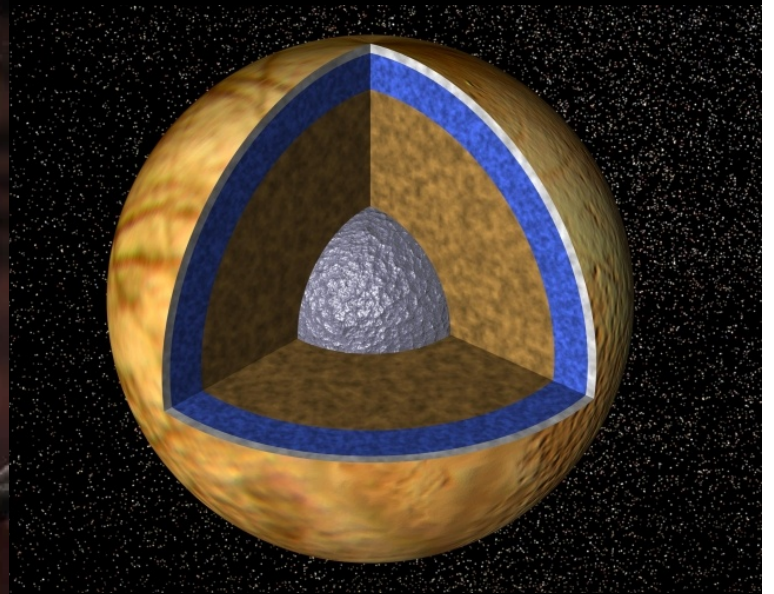
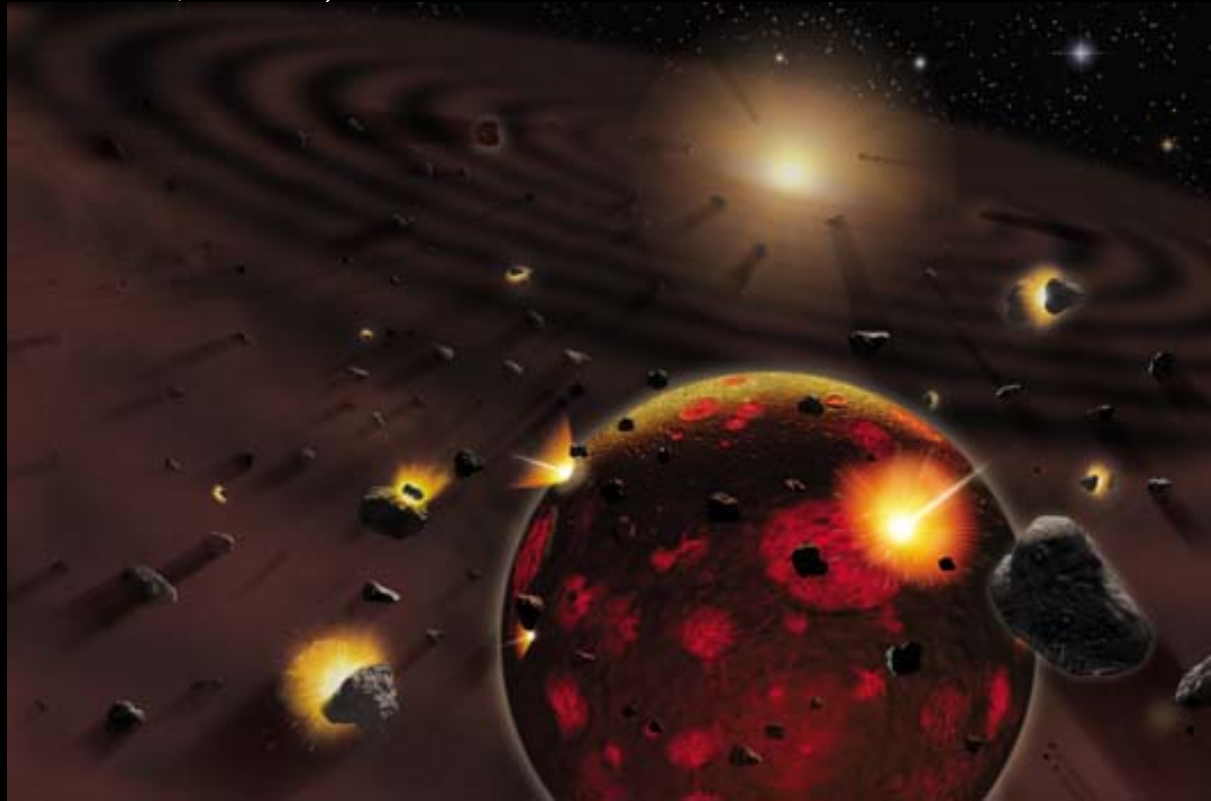
天体内部の温度を計算して、 H_2O の相図と照らし合わせる。

温度 < 融点 → その領域は固体
氷

温度 > 融点 → その領域は液体

今のエウロパに、海はあるのか？

出来たばかり（約46億年前）のエウロパは熱くて、 H_2O 層のほぼすべては液体だったと仮定す

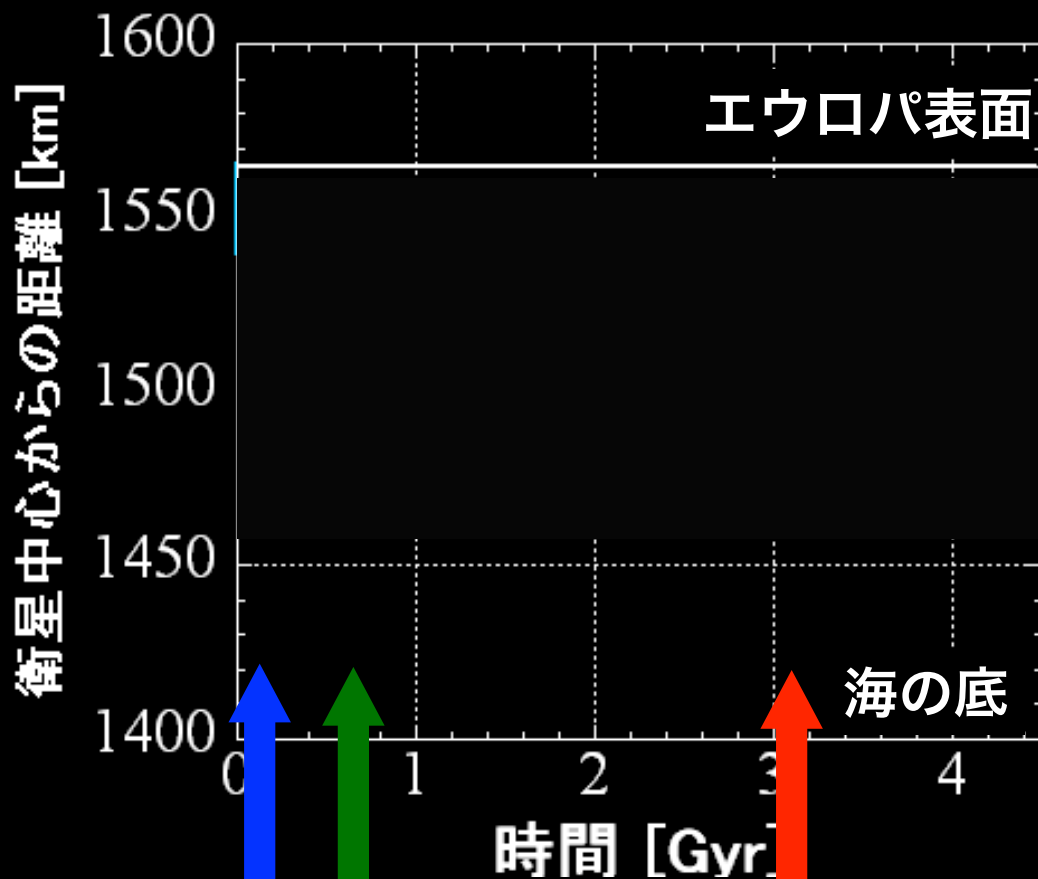


基本的に、惑星・衛星は小天体が衝突・集積して出来た。

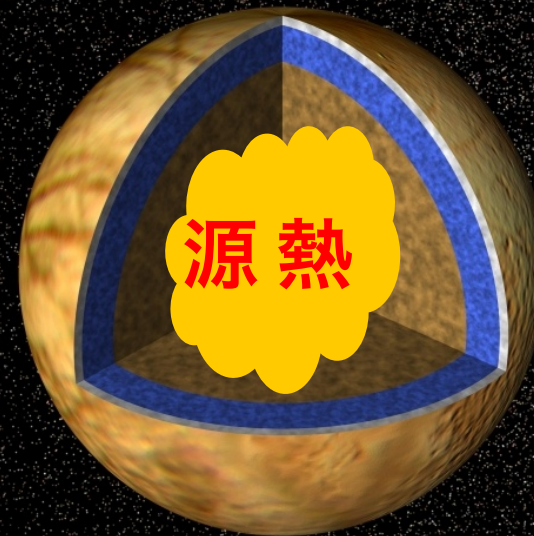
→初めは衝突のエネルギーによって暖かかったと考え

最初に出来たエウロパの海 は今も存在し続けるのか？

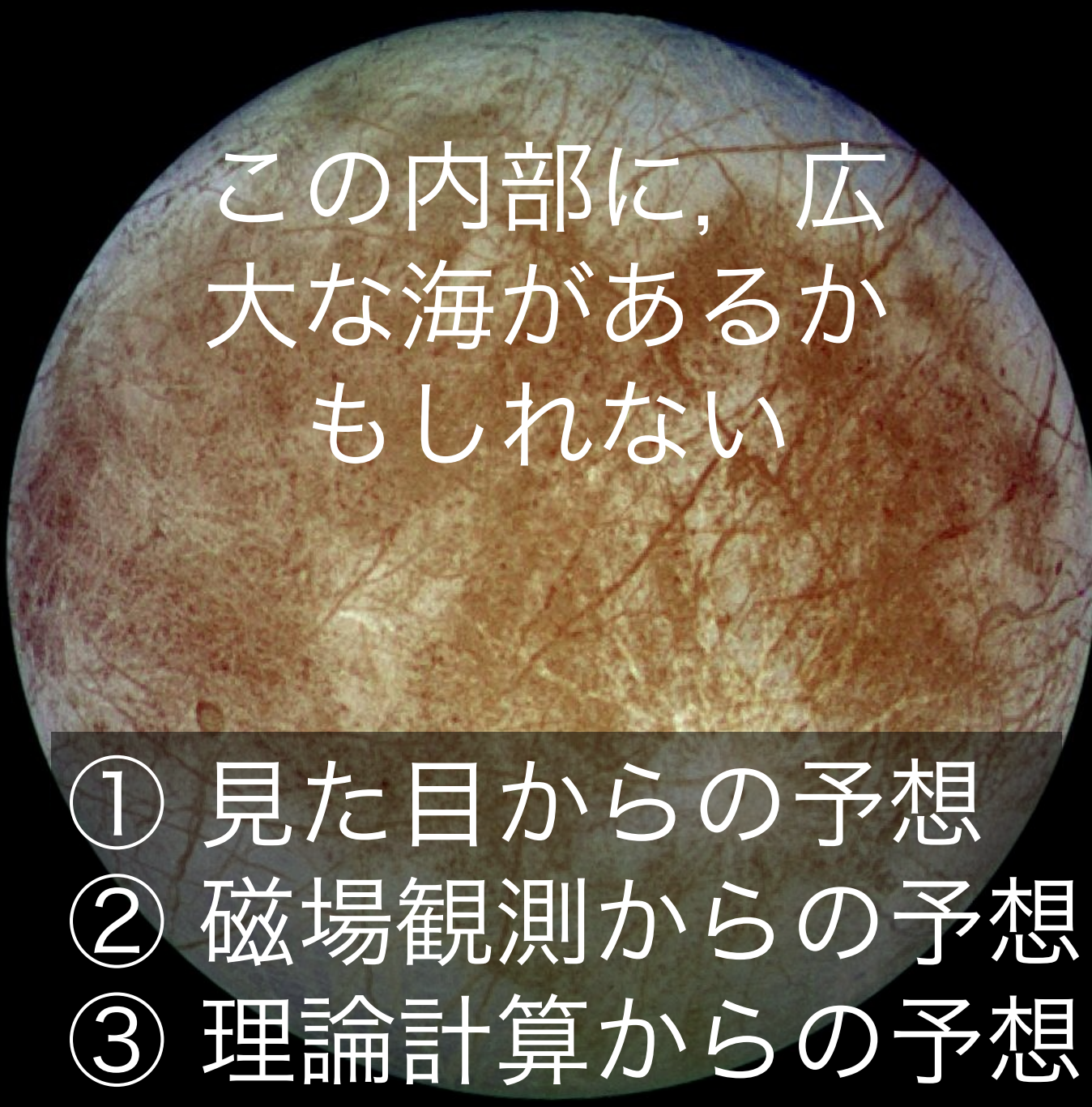
水地殻・液体層境界面の位置変化



表面は低温（約100 K）なので、
最初は急激に海が凍っていく。



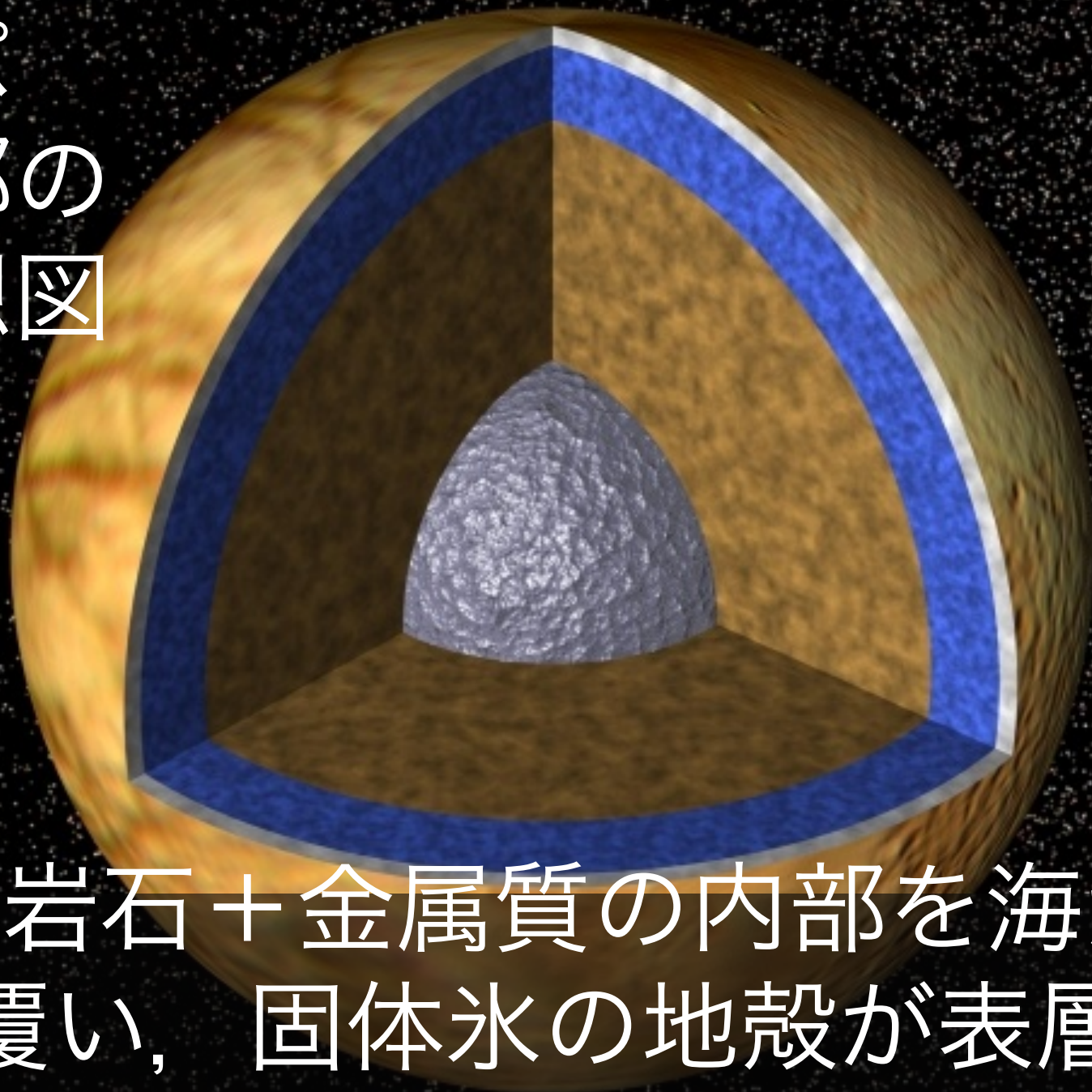
見た目や磁場観測から予想される内部海の存在は、内部温度の計算から考えても有り得そう
だ！



この内部に、広
大な海があるか
もしれない

- ① 見た目からの予想
- ② 磁場観測からの予想
- ③ 理論計算からの予想

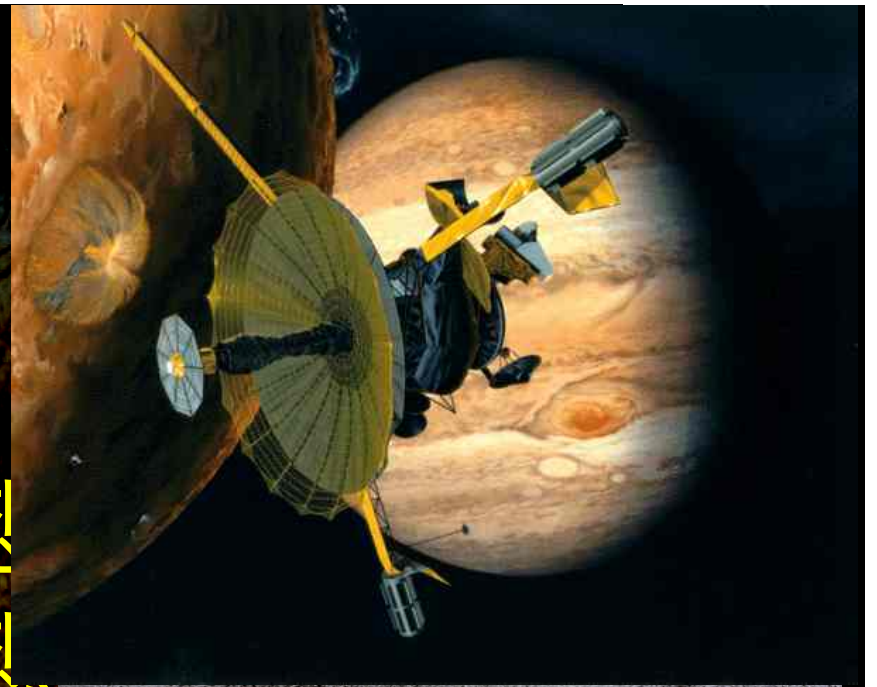
エウロ
パ
内部の
予想図



岩石 + 金属質の内部を海が
覆い， 固体氷の地殻が表層を
取り巻く

この内部に、広大な海があるか

- ① 見た目からの予想
② 磁場観測からの予想
③ 理論計算からの予想



天体の調査・・・人を送りこむのはとても難
まずは無人探査機による「外から」の調査

- ・ 調査結果に基づく予想・確認
- ・ 理論研究に基づく予想・説明

→ どの天体に対しても同じアプローチ

まとめ

- ✓ 太陽系には多くの衛星があり，そのほとんどは氷に覆われている（地球の月とは違う）
- ✓ 木星の衛星エウロパでは，氷の地殻の下に液体の水の層（内部海）があると予想されている（発見されたわけではない）
- ✓ その予想は
 - 見た目（地形の成因）
 - 磁場観測