

2017/1/26

第5回 衛星系研究会

東京工業大学

冥王星の進化

鎌田 俊一

北海道大学 創成研究機構

kamata@sci.hokudai.ac.jp



冥王星の進化

地球物理学的観点
【理論】

エネルギー

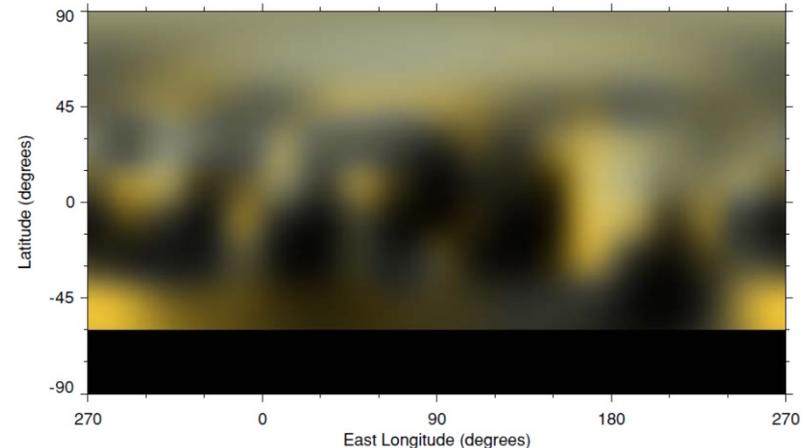
地質学・地形学的観点
【痕跡】

テクトニクス

New Horizons 以前

- 望遠鏡観測 [e.g., McKinnon et al., 1997]

- 半径、密度
- 軌道要素、表面温度
- 地域によって異なる色
- 窒素に富む大気
- 衛星たち



[Buie et al., 2010]

- より詳細なデータのある氷衛星との比較

- 氷衛星は多種多様
 - サイズ、密度、太陽からの距離、...
- 適切な参照先はどこか？
 - 進化を決める最も重要な要素は？

進化には熱エネルギーが必要

• 熱源

1. 集積

- 地球では重要

2. 放射壊変

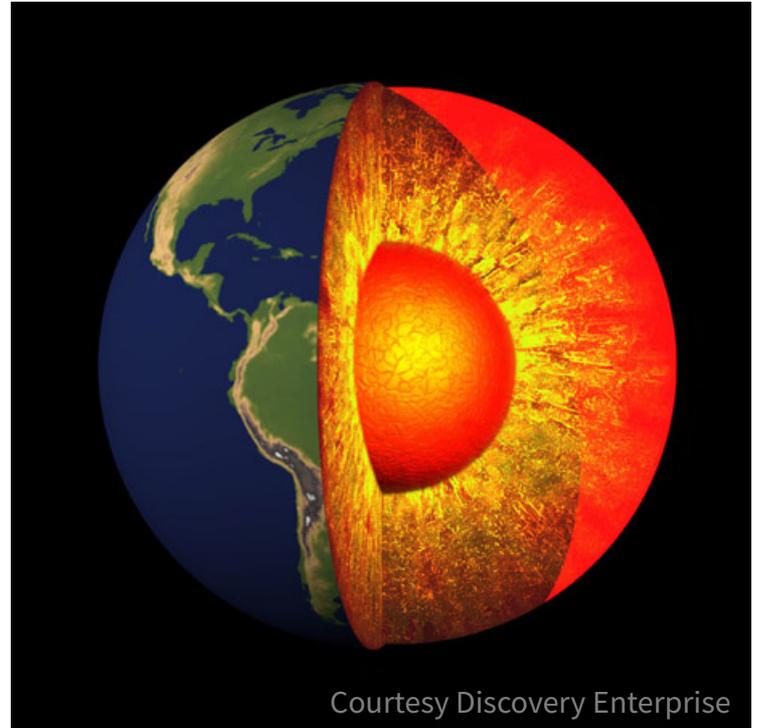
- 地球や月では重要

3. 潮汐

- イオやエウロパでは重要

4. 化学反応による発熱や分化に伴う重力エネルギーの解放

- 1-3に比べると「内部の長期進化」への影響は小



熱源 1：集積

- 重力解放エネルギー

$$\int_0^R \frac{GM(r)}{r} dm = \frac{3GM^2}{R}$$

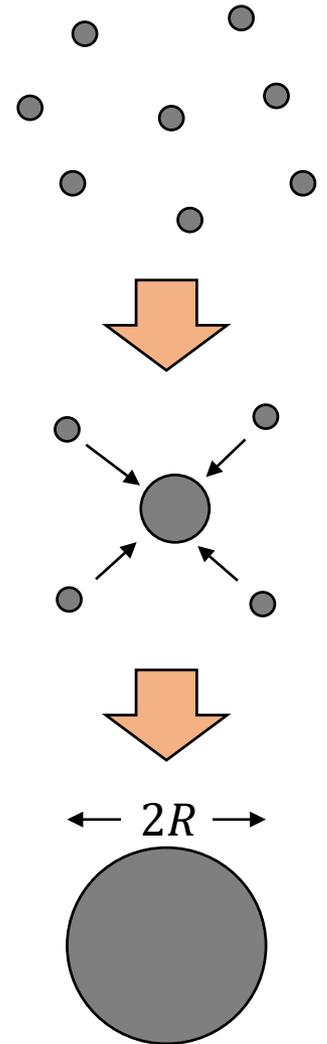
R ：天体の半径
 G ：万有引力定数
 $M(r)$ ：半径 r までの質量
 dm ：質量の増分

$$M(r) = \frac{4\pi r^3 \rho}{3}$$
$$dm = 4\pi r^2 \rho \cdot dr$$

※ 全てが熱になるわけではない（破壊など）

- ポイント：天体サイズが重要

- $M \propto R^3$



熱源 2 : 放射壊変

• 2タイプ

• 短寿命放射性核種

- ^{26}Al (\rightarrow ^{26}Mg ; 半減期 0.72 Myr)
- ^{60}Fe (\rightarrow ^{60}Ni ; 半減期 1.5 Myr)

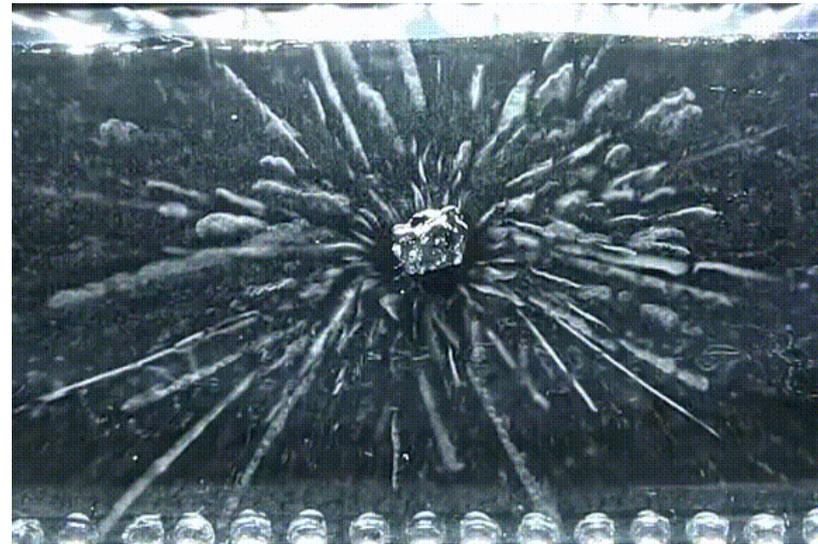
• 長寿命放射性核種

- ^{238}U (\rightarrow ^{206}Pb , ^4He ; 半減期 4.47 Gyr)
- ^{235}U (\rightarrow ^{207}Pb , ^4He ; 半減期 0.704 Gyr)
- ^{232}Th (\rightarrow ^{208}Pb , ^4He ; 半減期 14 Gyr)
- ^{40}K (\rightarrow ^{40}Ar , ^{40}Ca ; 半減期 1.25 Gyr)

• ポイント : 天体サイズが重要

- 正確には岩石部分の質量

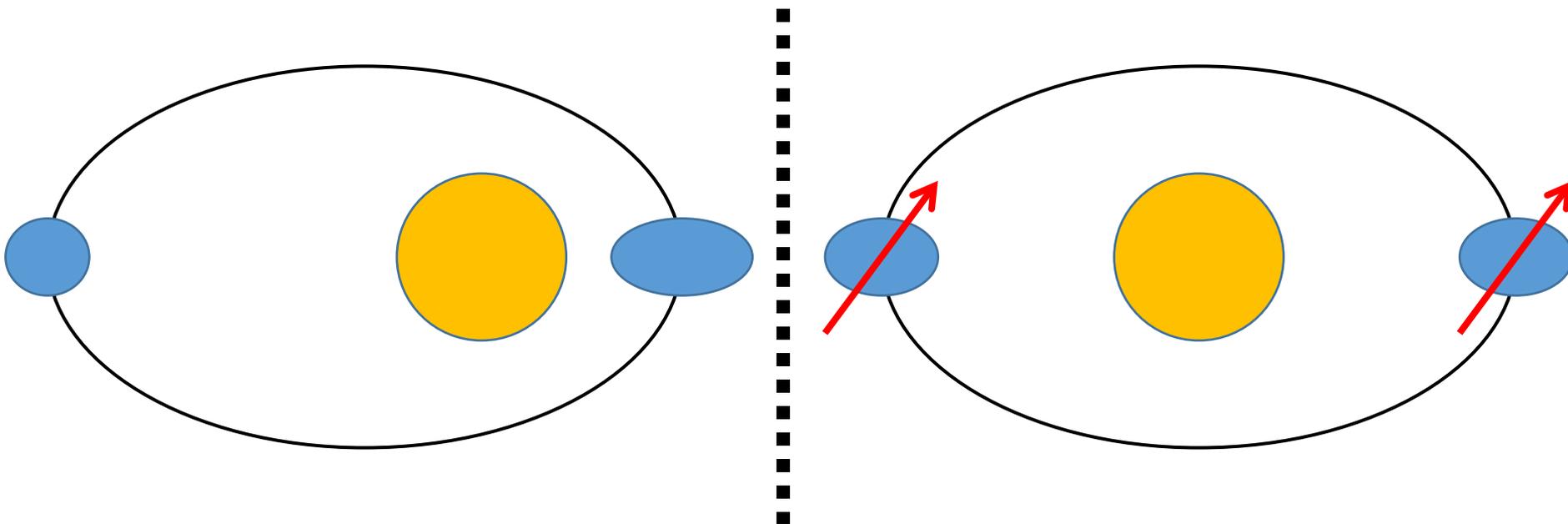
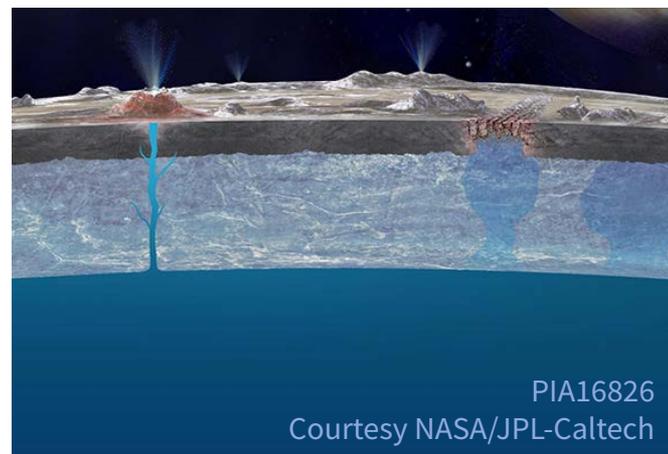
閃ウラン鉱 (UO_2) を入れた霧箱



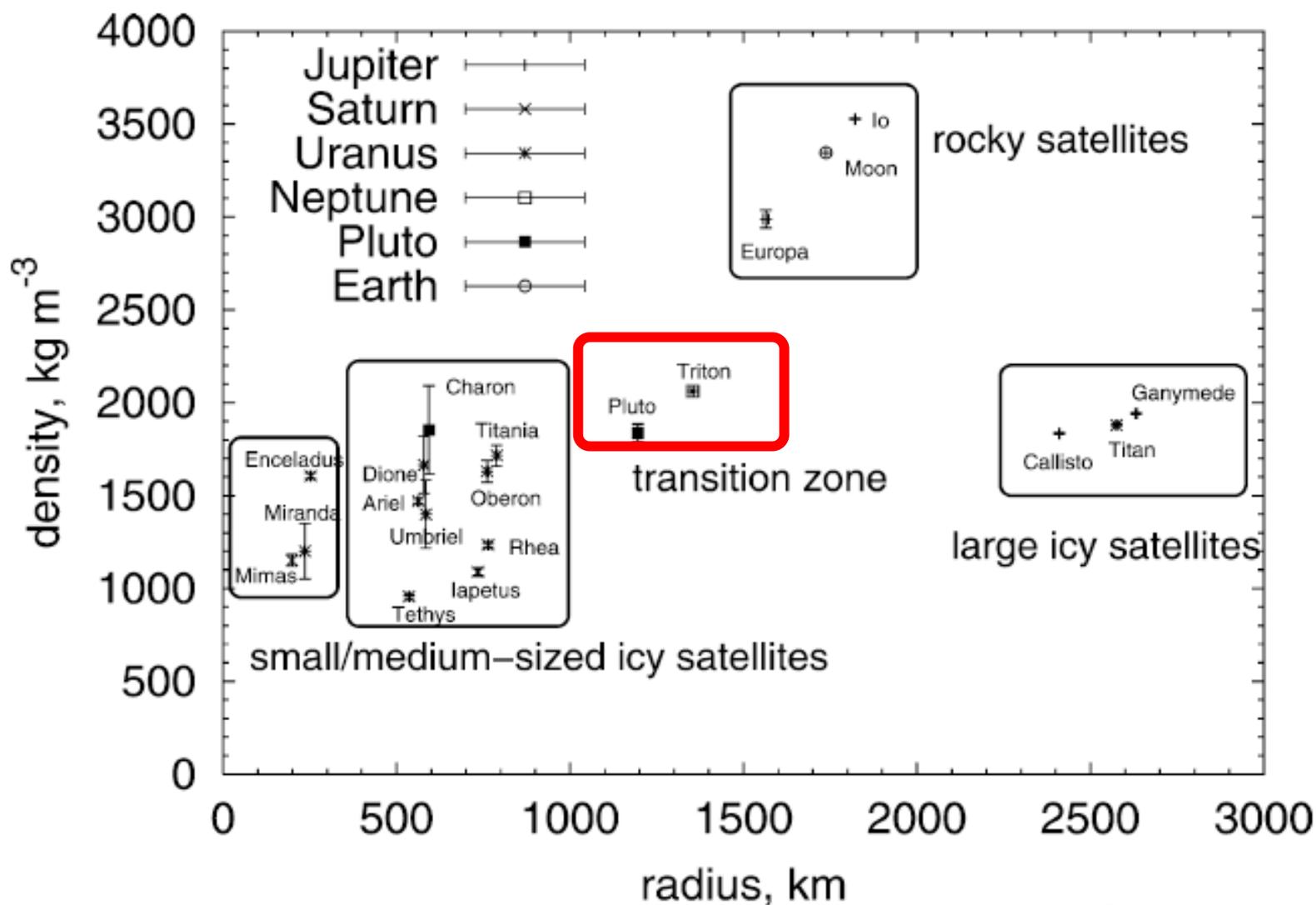
<https://www.youtube.com/watch?v=ZiscokCGOhs>

熱源 3 : 潮汐

- 2 × 2タイプ
 - 散逸場所 : 固体 or (内部) 海
 - 軌道要素 : 離心率 or 傾斜角
- **ポイント : 軌道要素が重要**



冥王星と大きさの近い氷衛星

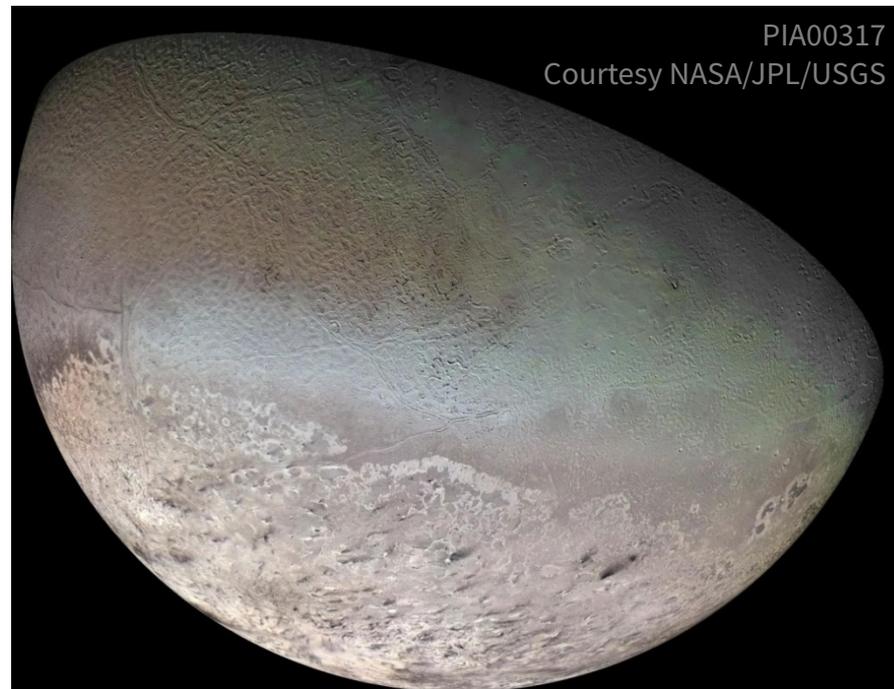


海王星の氷衛星、トリトン

[Stern et al., 2015; Nimmo & Spencer, 2015]

	冥王星	トリトン
半径 (km)	1187	1353
平均密度 (km)	1860	2061
平均表面温度 (K)	37	38
公転周期 (days)	6.387	5.877
離心率	0.00005	0.000016
軌道傾斜角	0°	156.87°

↑
軌道要素はカロンの値



- トリトンの公転は逆行
 - カイパーベルト天体 (KBO) の捕獲？ [e.g., McKinnon, 1984]

トリトンは極めて活動的

- **クレーターが非常に少ない**

- <~50 Myr [Schenk & Zahnle, 2007]

- **テクトニックな構造**

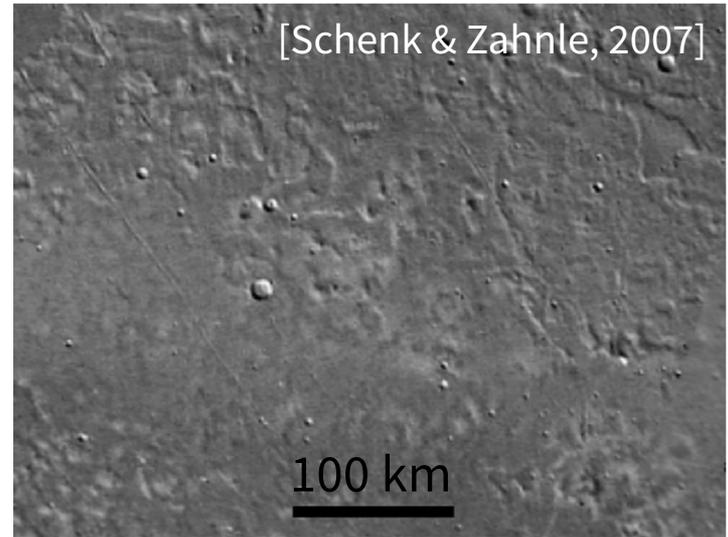
- 断層や尾根 [e.g., Croft, 1993]

- **氷火山活動 (?)**

- 滑らかな平原 [e.g., Croft et al., 1995]

- **間欠泉**

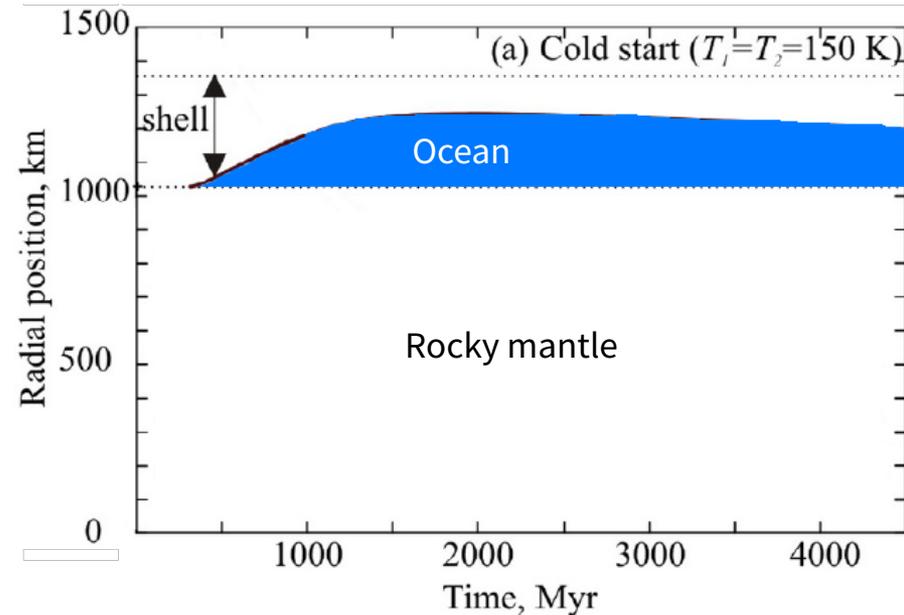
- 熱源は日射? [e.g., Soderblom et al., 1990]



トリトンの熱進化 (1/2)

- 初期温度構造に依らない
 - このサイズの天体では、集積熱・短寿命の放射壊変熱は小さい
- 集積熱 + 放射壊変熱では分厚いリソスフェアが維持される
 - 若いテクトニクスは追加熱源を意味する

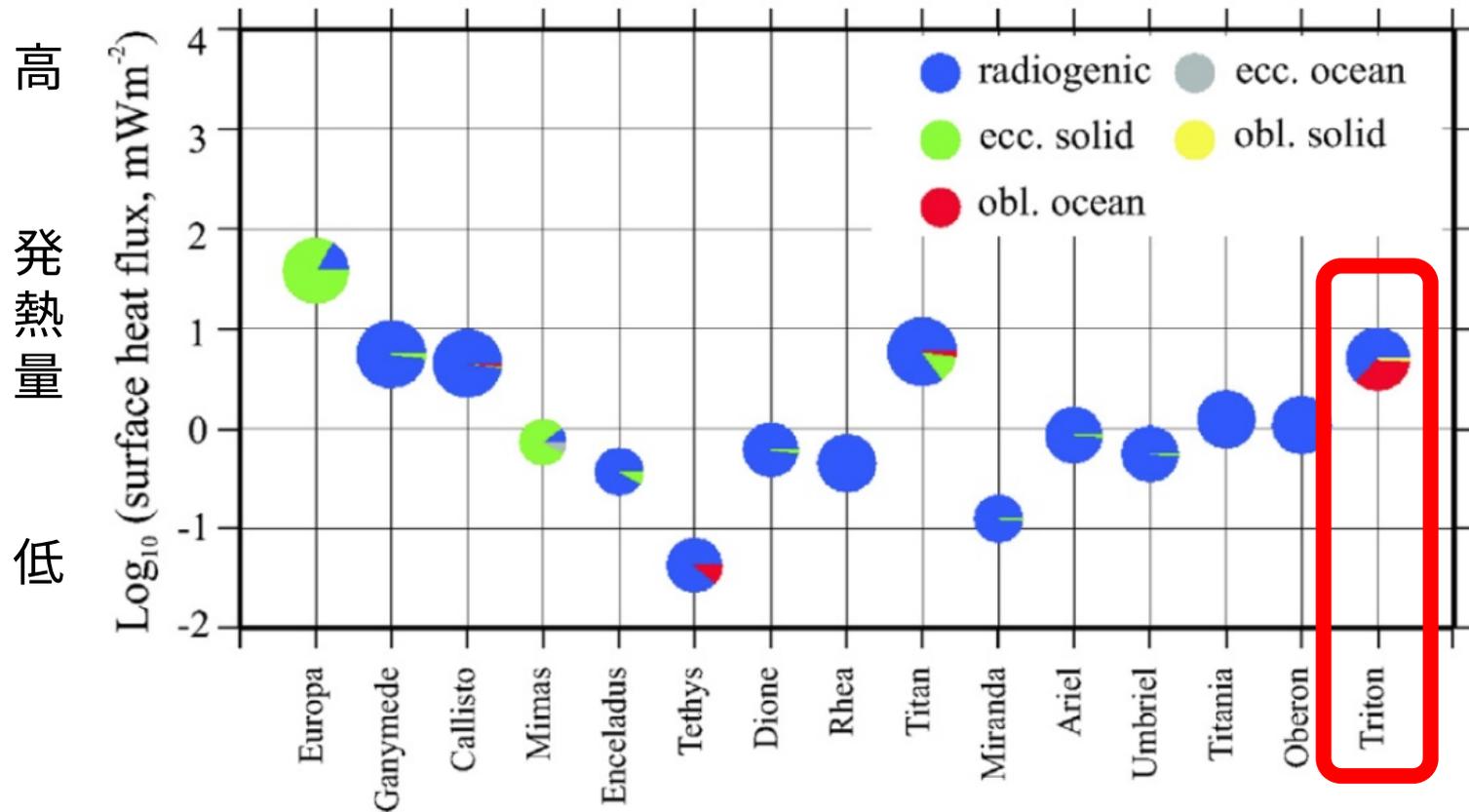
潮汐加熱を無視した熱進化計算例



[Adapted from Nimmo & Spencer, 2015]

トリトンの熱進化 (2/2)

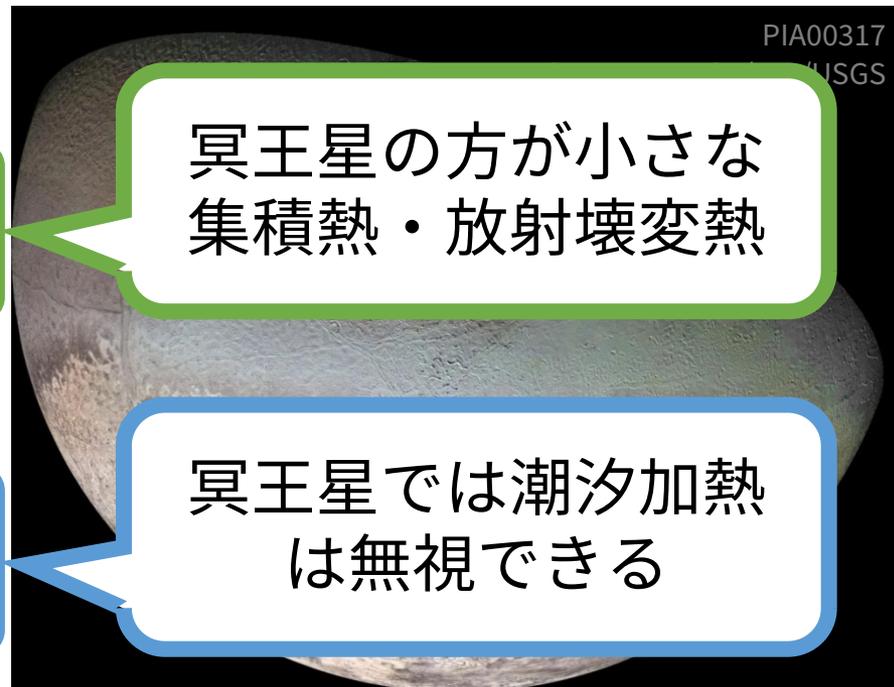
- 大きな軌道傾斜角 (156.87°)
 - 放射壊変とコンパラな量の発熱が内部海で起きる
[Chen et al., 2014]



海王星の氷衛星、トリトン

[Stern et al., 2015; Nimmo & Spencer, 2015]

	冥王星	トリトン
半径 (km)	1187	1353
平均密度 (km)	1860	2061
平均表面温度 (K)	37	38
公転周期 (days)	6.387	5.877
離心率	0.00005	0.000016
軌道傾斜角	0°	156.87°



↑ 軌道傾斜角はトリトンの倍

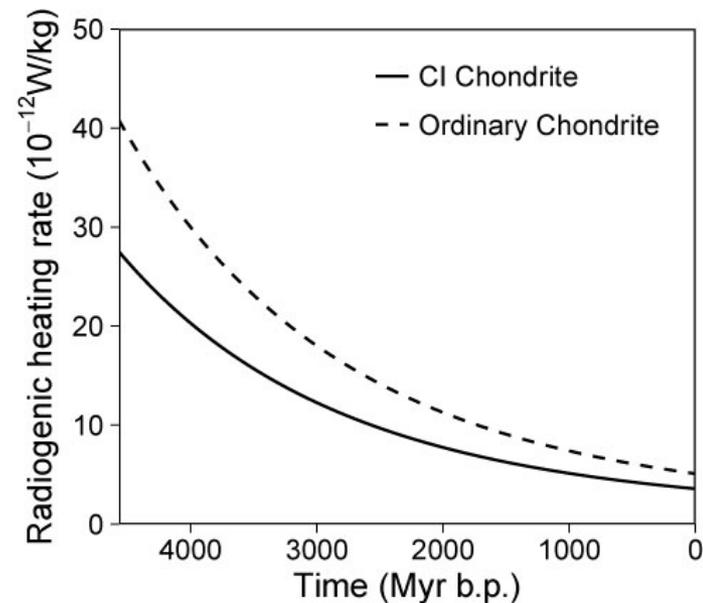
• 冥王星はトリトンのような若い表面は持たない、“死んだ”準惑星？

放射壊変による発熱量

- CIコンドライトの元素組成を仮定
 - 太陽系の平均組成
 - 普通コンドライトの値を使う人も
[e.g., Castillo-Rogez et al., 2007; Robuchon et al., 2010]

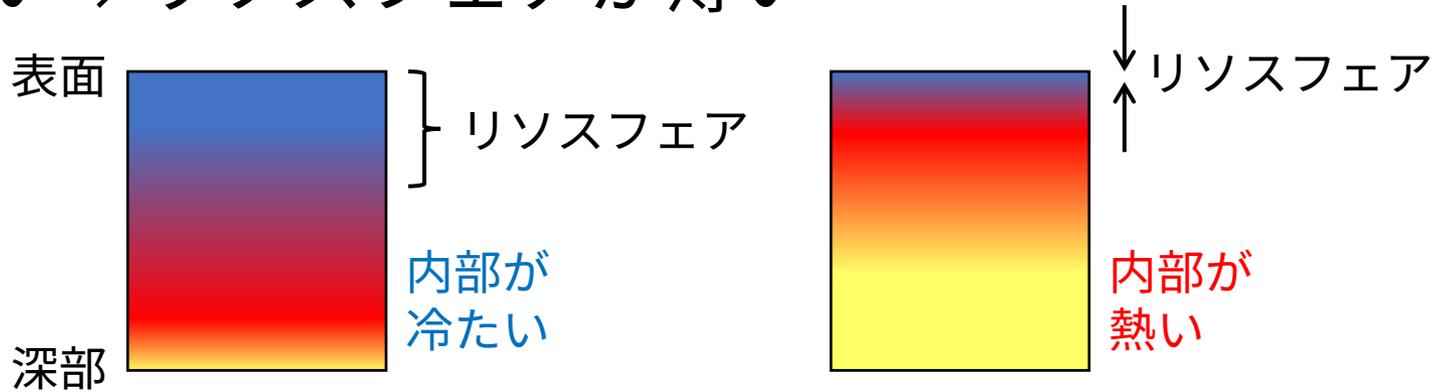
- **実はよく分からない**

- コアの質量には大きな不確定性
 - 氷地殻の空隙率
 - 岩石コアの水和の有無
- これが分かると、太陽系外縁の固体物質の理解も深まる



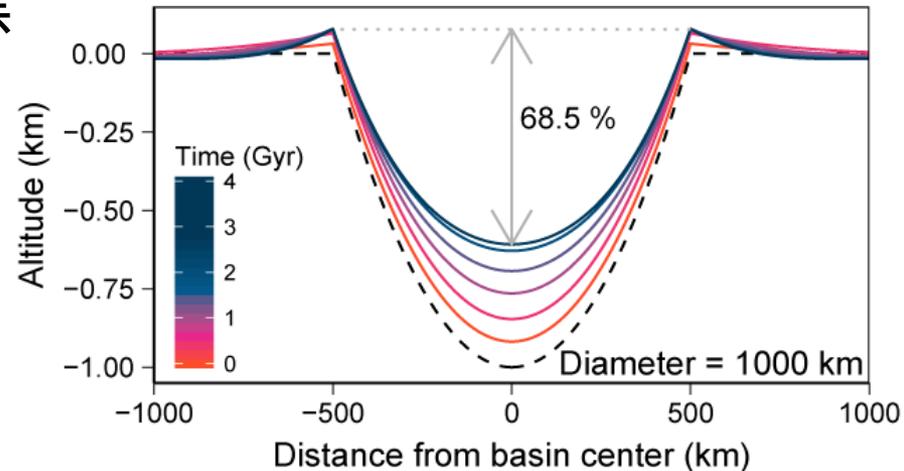
内部の温度構造

- 内部が熱い → リソスフェアが薄い



- リソスフェア厚を知る指標
 - 大きなクレーターの緩和

ただし緩和前の深さに
大きな不確定性...



[Kamata & Nimmo, 2014]

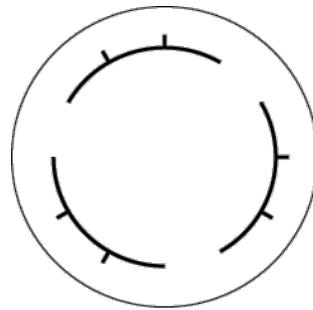
巨大クレーター一周りの断層

- 緩和とともに表面の応力が変化
 - 断層の形成

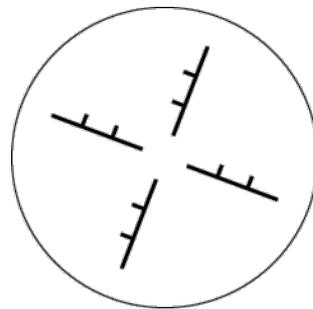
- 断層の方向はリソスフェア厚で決まる*

- 薄い = 同心円
- 厚い = 放射状

- 初期の深さには関係ない

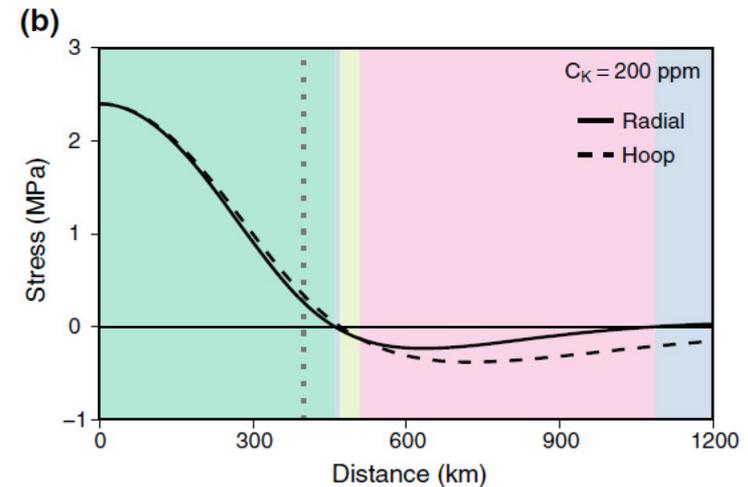
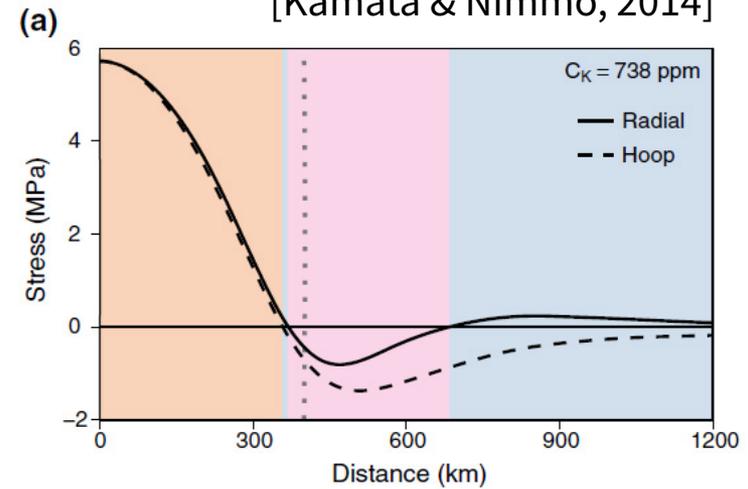


内部が熱い



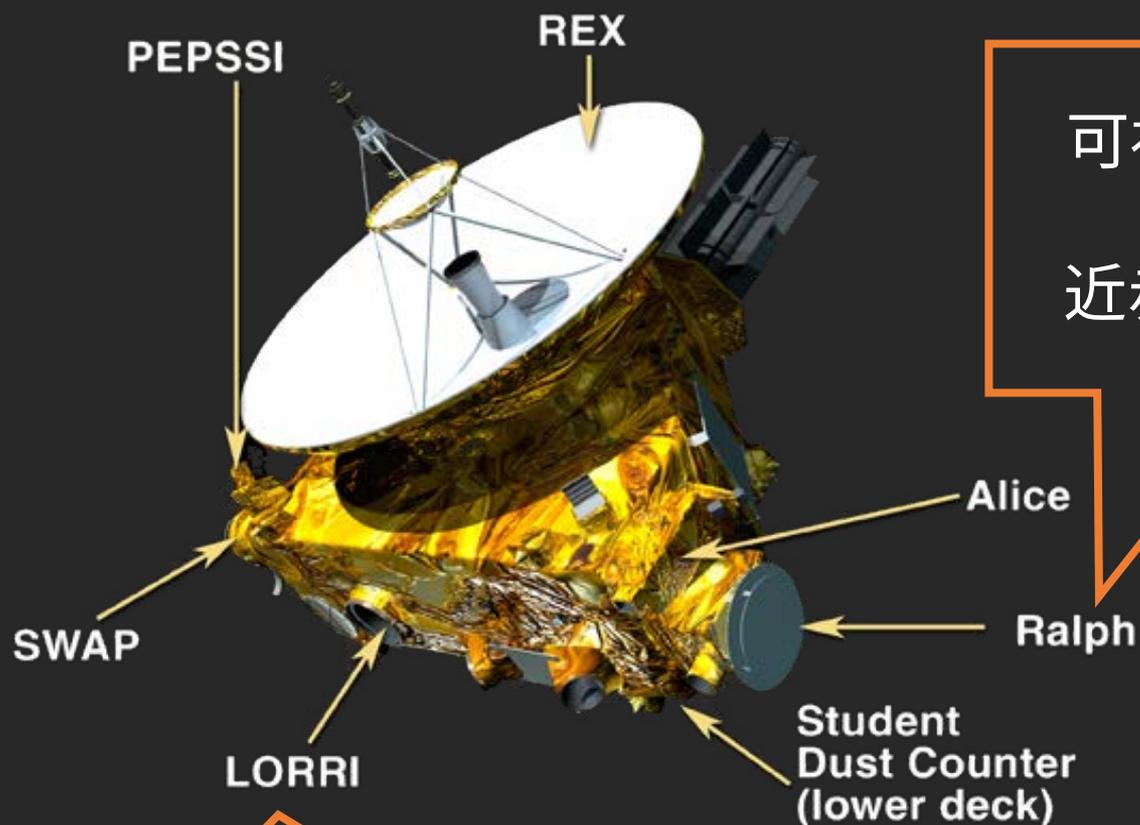
内部が冷たい

[Kamata & Nimmo, 2014]



*より正確には、リソスフェア厚と盆地サイズの比

New Horizons



可視光CCDカメラ
+
近赤外撮像分光器

高解像度パングロカメラ

打上:

Jan. 19, 2006, 19:00 UTC

最接近日時:

Jul. 14, 2015, 11:49:57 UTC

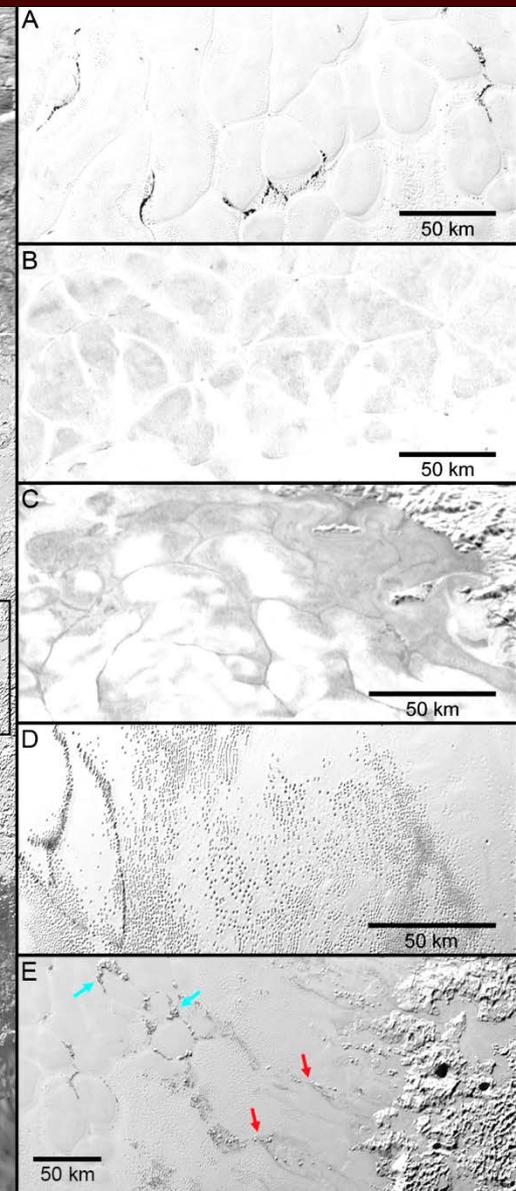
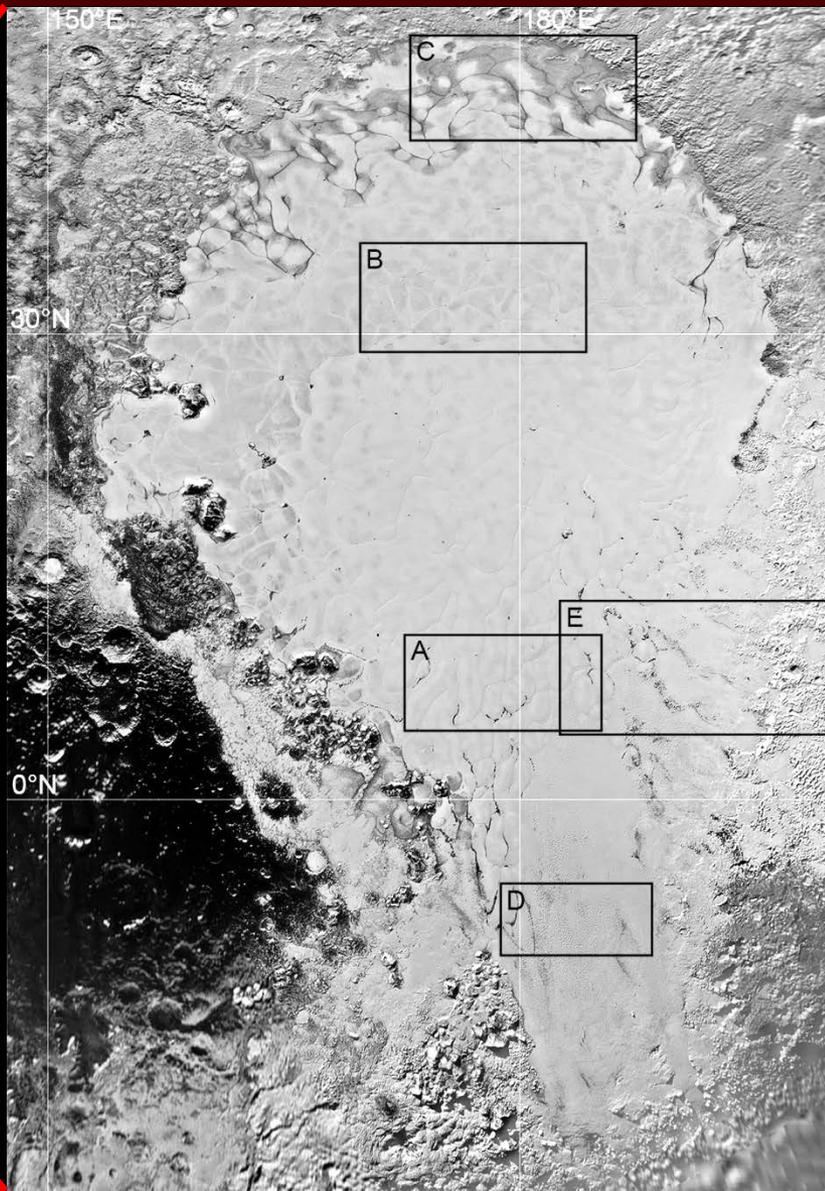
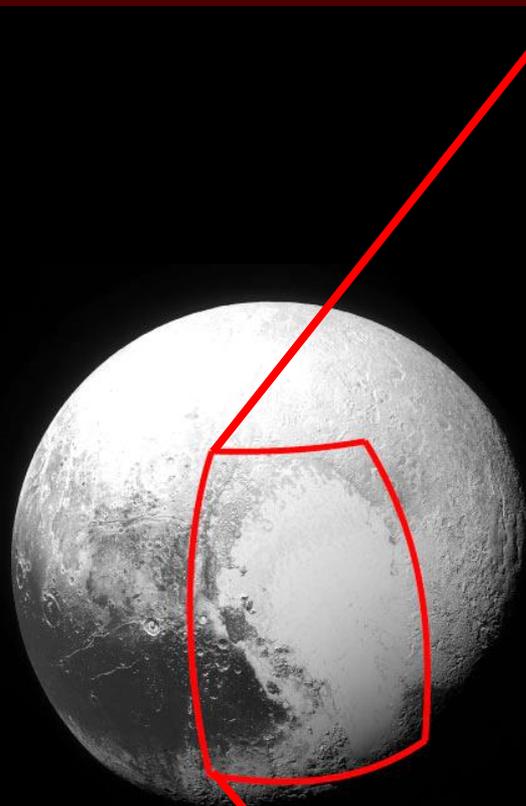
最接近距離:

12,500 km



白いハート
断層

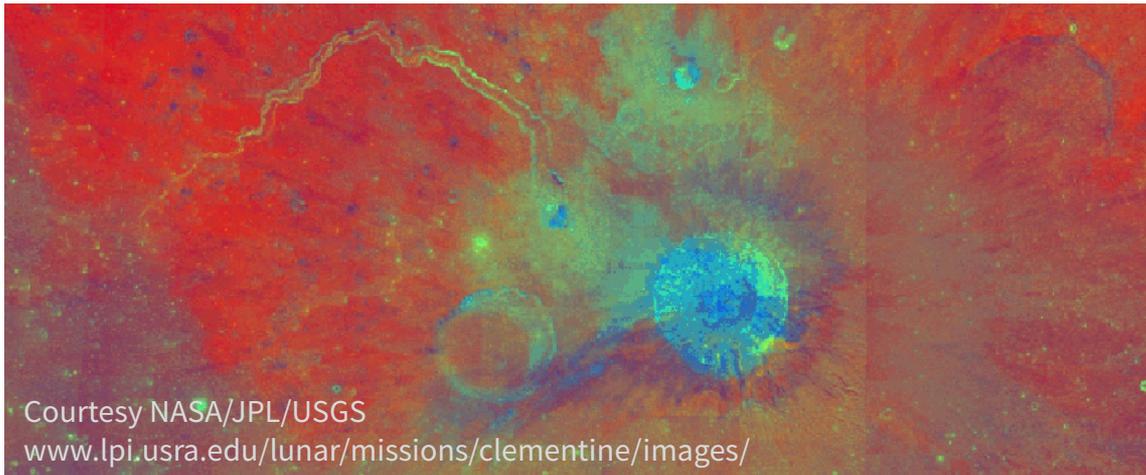
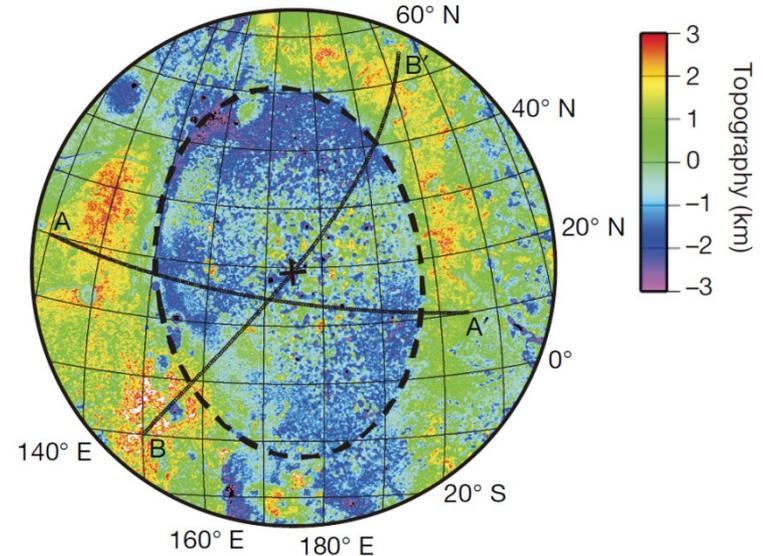
白いハートの西側



スプートニク平原：地形

- 巨大な盆地
 - 直径 ~ 1000 km
 - おそらく衝突盆地
- 盆地の内部
 - 天然の掘削孔と見なせる場合もある

[Nimmo et al., 2016]



Courtesy NASA/JPL/USGS
www.lpi.usra.edu/lunar/missions/clementine/images/

アリタルコス (月)

R: 750/415 nm

G: 750/1000 nm

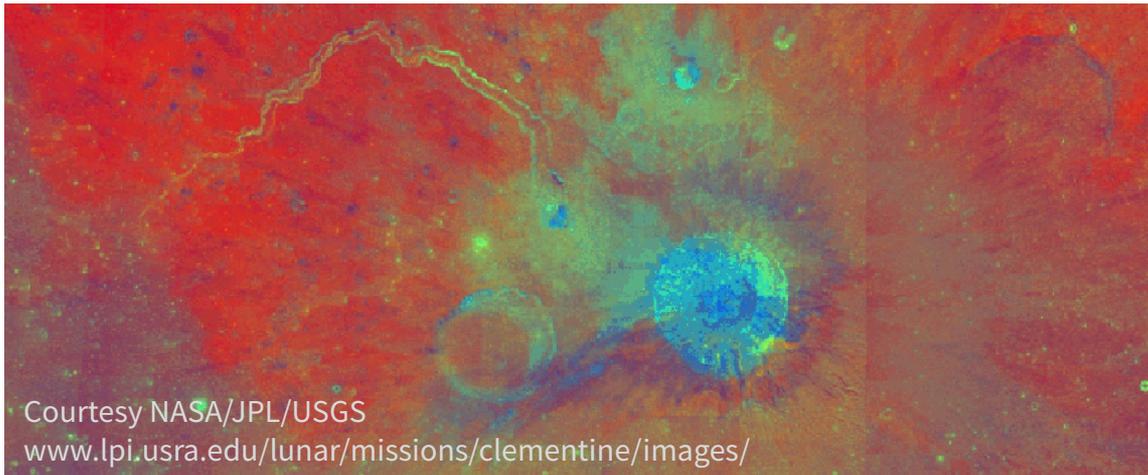
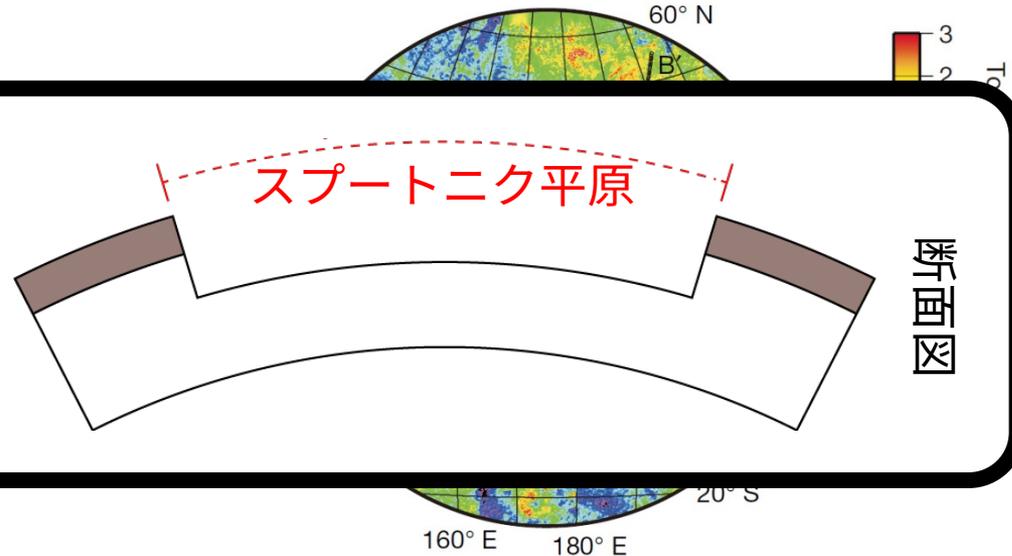
B: 415/750 nm

スプートニク平原：地形

- 巨大な盆地

[Nimmo et al., 2016]

地下の白い物質が
露出している？



アリタルコス (月)

R: 750/415 nm

G: 750/1000 nm

B: 415/750 nm

Courtesy NASA/JPL/USGS
www.lpi.usra.edu/lunar/missions/clementine/images/

スプートニク平原：スペクトル

- 揮発性物質で覆われている

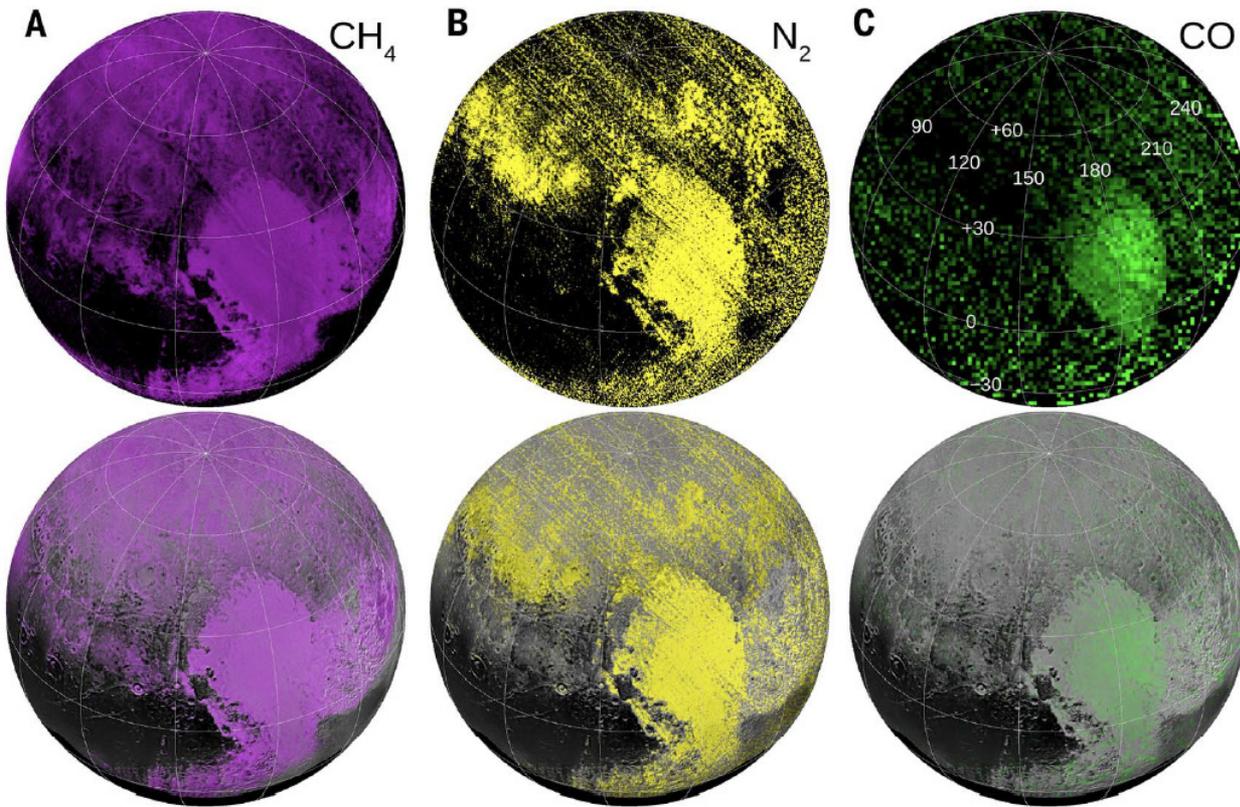


Fig. 1. LEISA maps of Pluto's volatile ices CH₄, N₂, and CO. For each species, the top panel shows the LEISA map, with brighter colors corresponding to greater absorption; the bottom panel shows the same data overlaid on a base map made from LORRI images reprojected to the geometry of the LEISA observation. **(A)** The CH₄ absorption map shows the equivalent width of the 1.3- to 1.4- μ m band complex. **(B)** The N₂ absorption map is a ratio of the average over the band center (2.14 to 2.16 μ m) to that of adjacent wavelengths (2.12 to 2.14 μ m and 2.16 to 2.18 μ m). **(C)** The CO absorption map is a ratio of the average over the band center (1.56 to 1.58 μ m) to that of adjacent wavelengths (1.55 to 1.56 μ m and 1.58 to 1.59 μ m). Latitude and longitude grids at 30° intervals [shown in (C)] apply to all maps.

スプートニク平原：スペクトル

- 水氷は少ない

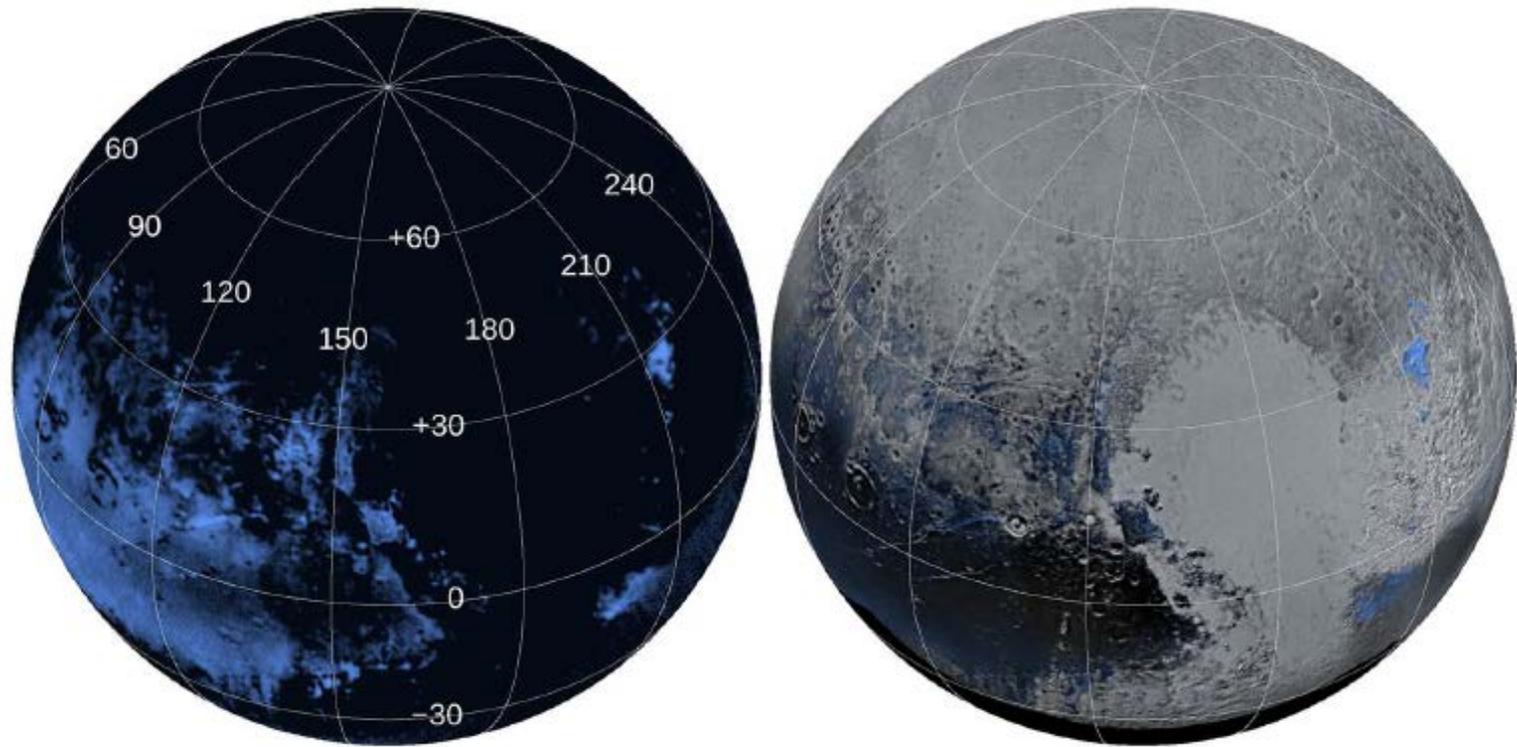
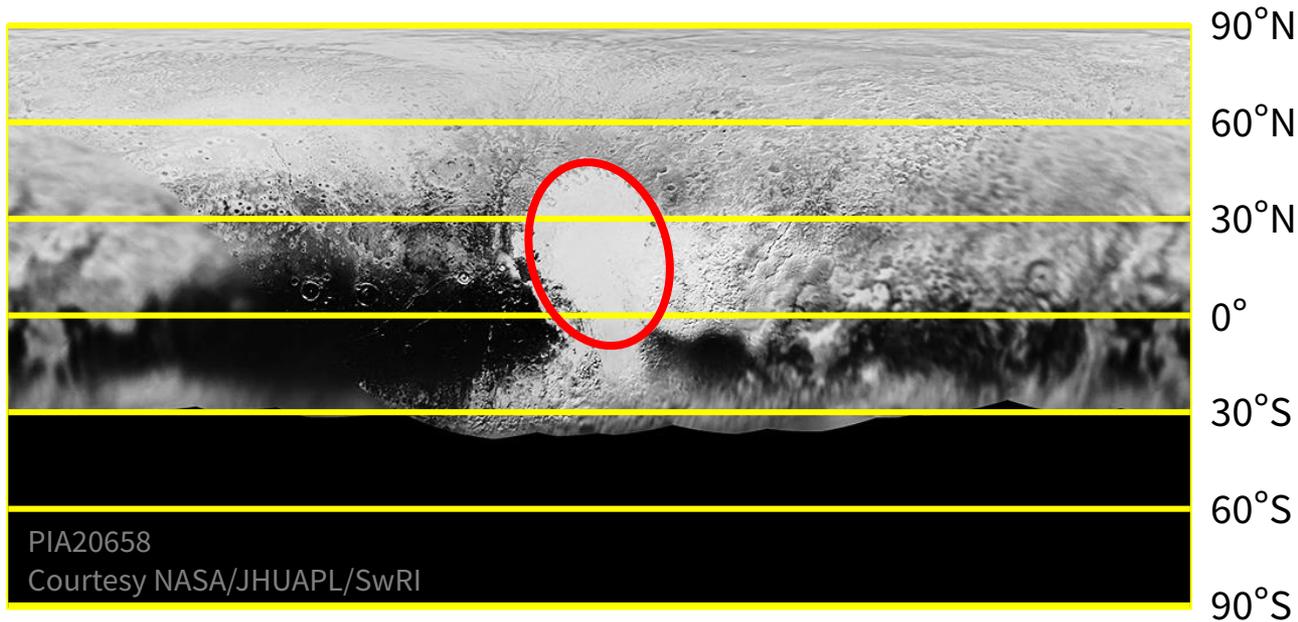
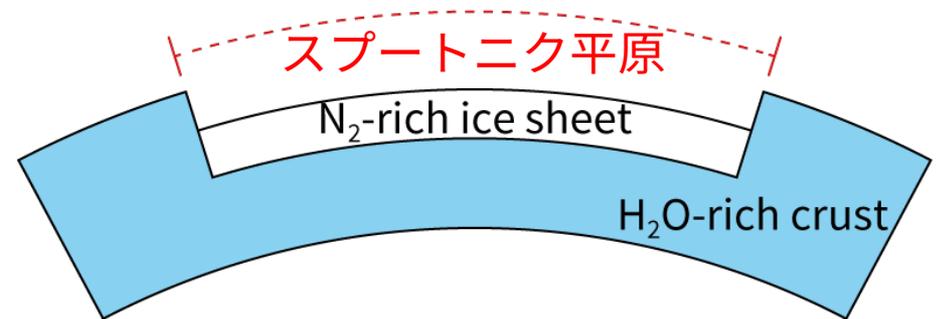


Fig. 2. LEISA map of Pluto's nonvolatile H₂O ice. Left: Map showing the correlation coefficient between each LEISA spectrum and a template Charon-like H₂O ice spectrum [e.g., (47, 49)], highlighting where H₂O absorption is least contaminated by other spectral features. Right: LEISA map superposed on the re-projected LORRI base map.

「氷」で覆われた盆地！

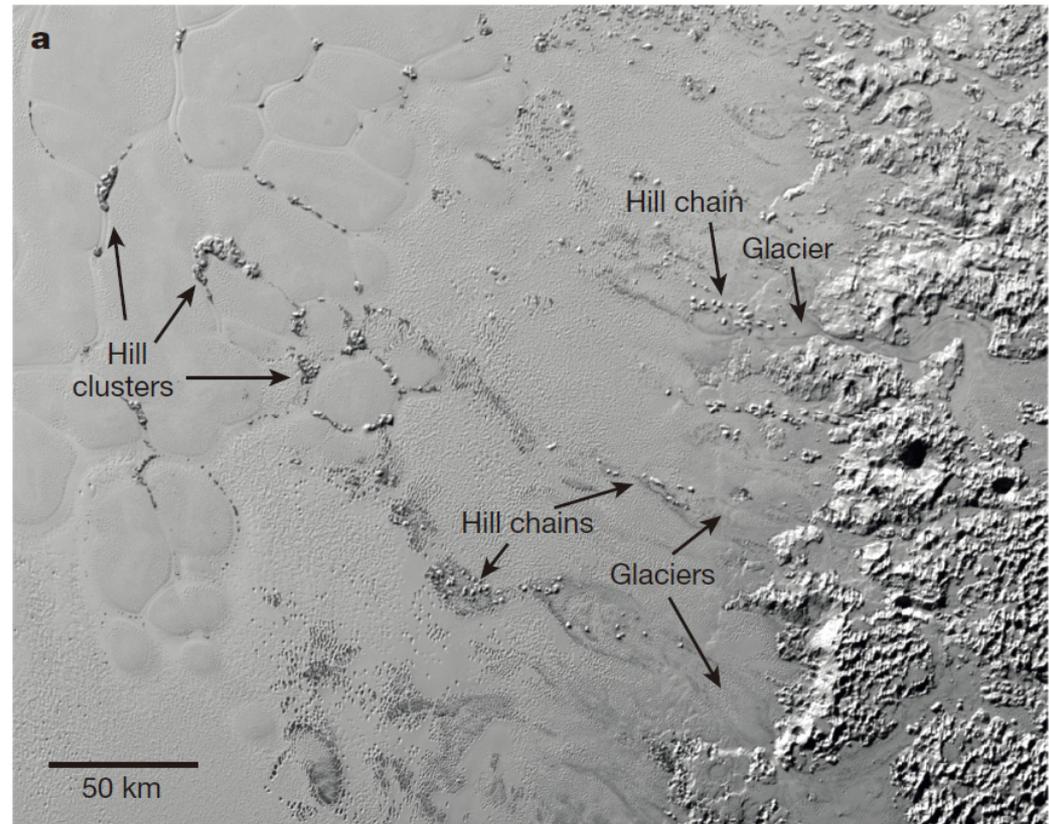
• 疑問

1. どのようにして揮発性物質が集まったのか？
2. なぜ極ではなく、赤道付近にあるのか？



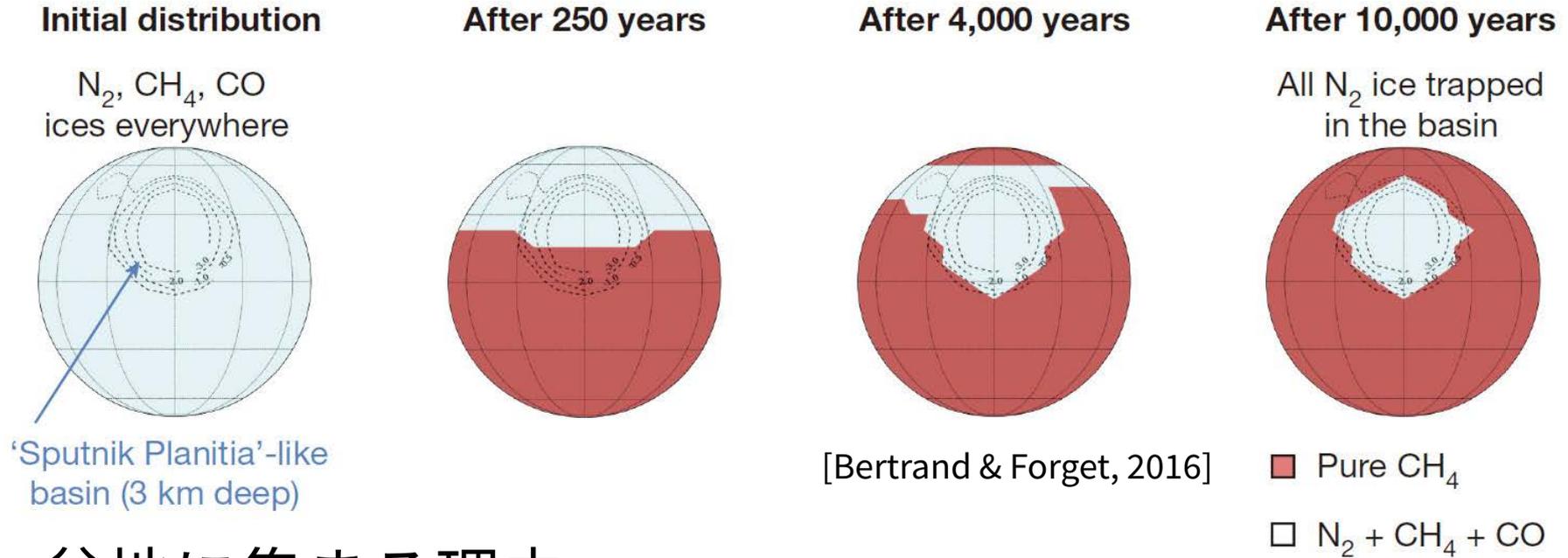
成因その1：氷河の流動

- 盆地に集まる理由
 - 低地だから
- 平原の縁
 - 暗い“丘”が明るい物質に押し流されているように見える
[e.g., Moore et al., 2016]
- 局所的な現象
 - 十分な量の揮発性物質を集められるのか??



[McKinnon et al., 2016]

成因その2：大気の凝結



• 盆地に集まる理由

- 大気圧が高く、凝結温度も高いから [Bertrand & Forget, 2016]
- 対流圏がなく、低地ほど低温から [Gladstone et al., 2016]

• 盆地に集まるタイムスケール

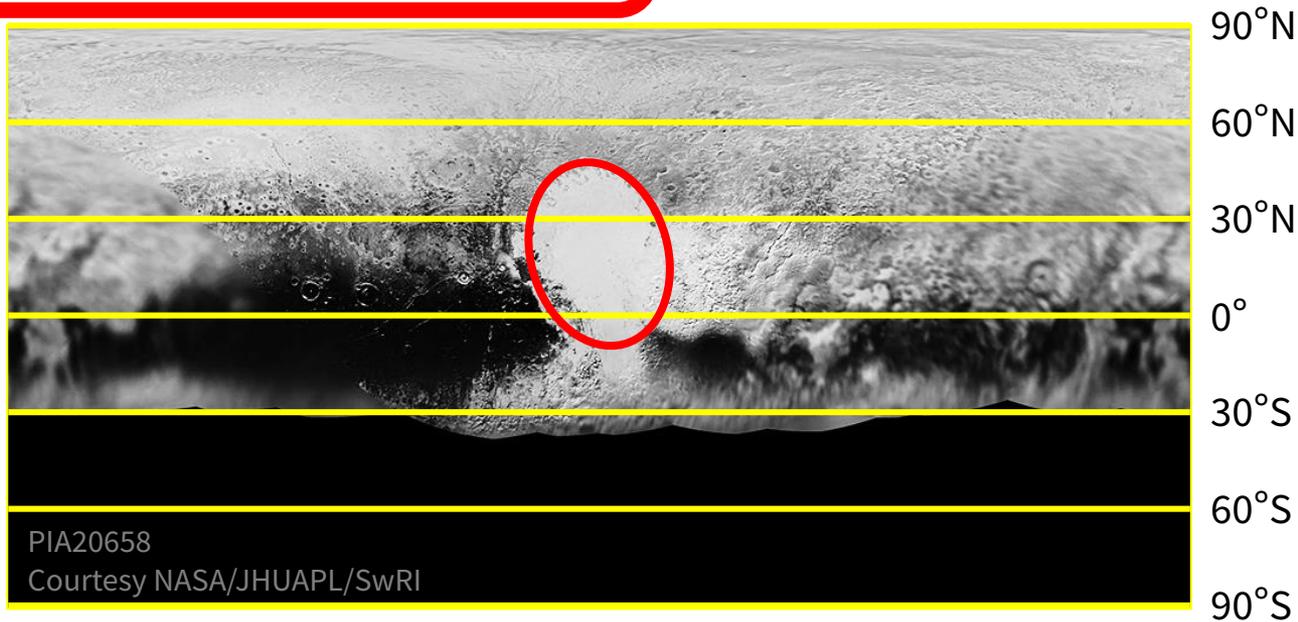
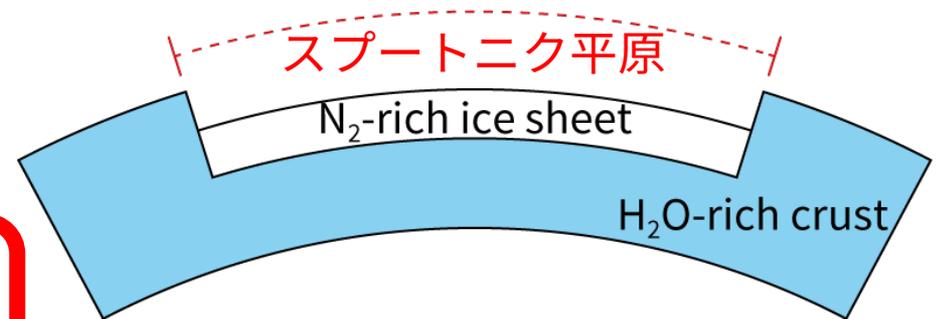
- 極めて短い可能性 (~10 kyr)

「氷」で覆われた盆地！

• 疑問

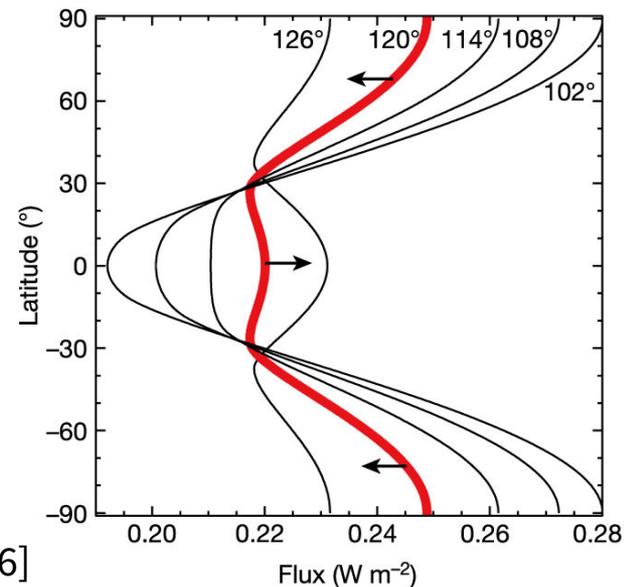
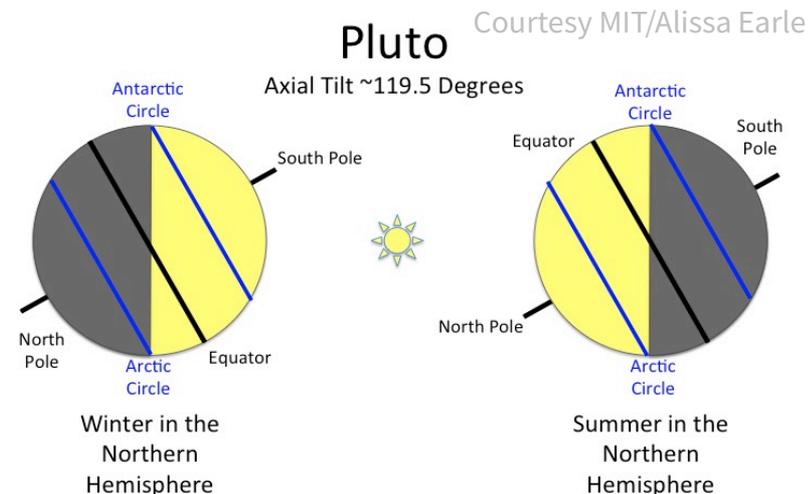
1. どのようにして揮発性物質が集まったのか？

2. なぜ極ではなく、赤道付近にあるのか？



極より寒いから？

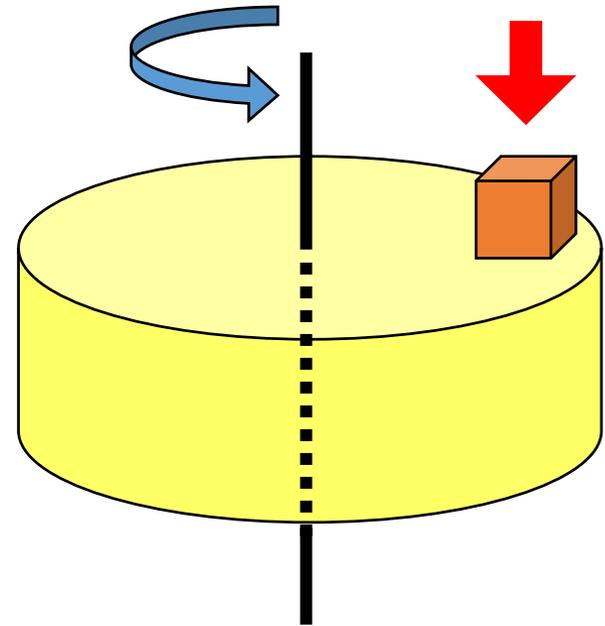
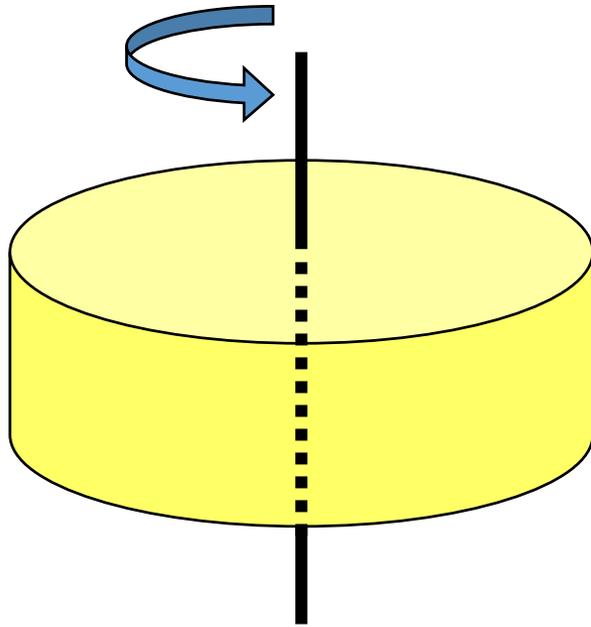
- 緯度 $\sim 30^\circ$ で日射量は最小
 - 軌道面に対して $\sim 120^\circ$
- 極端な主張もある
 - クレーターがなくてもよい、ice albedo feedbackが重要 [Hamilton et al., 2016]
- 主要因である可能性は低い
 - 平原の維持に貢献はする
 - 氷が堆積するに従って極運動が起こり、緯度・経度は相対的に動く



[Adapted from Hamilton et al., 2016]

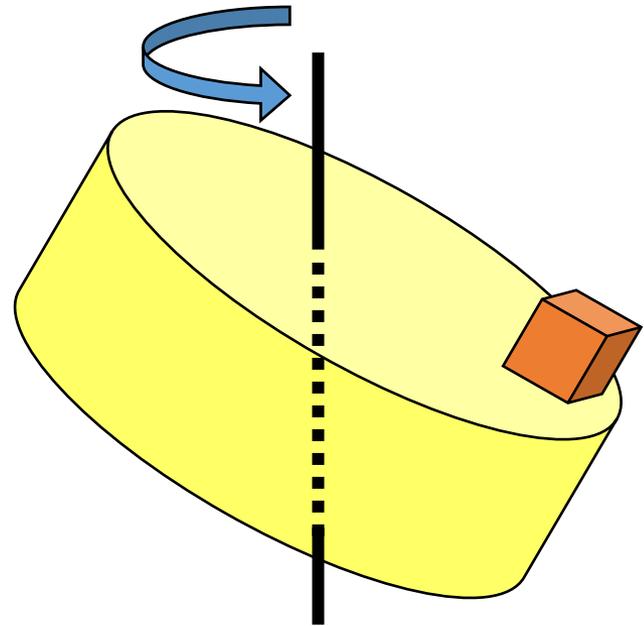
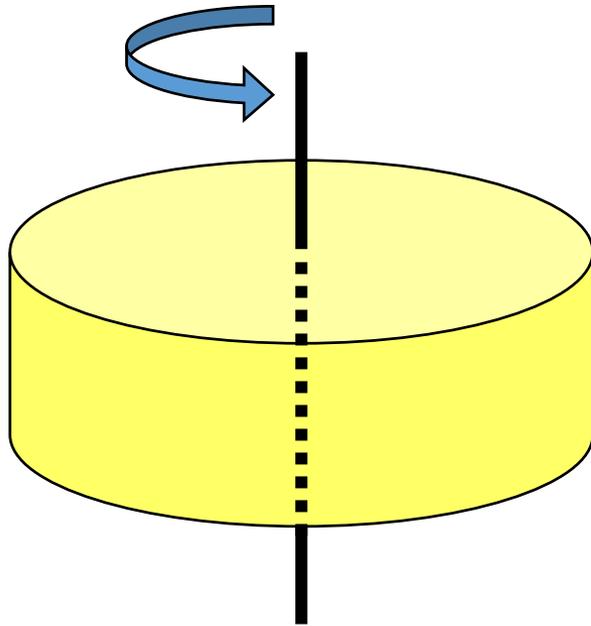
回転状態の進化

- スプートニク平原へ「氷」が集まっていく
 - 不安定な回転 = 回転エネルギーが最小でない
 - 回転が安定するような変化がおきる



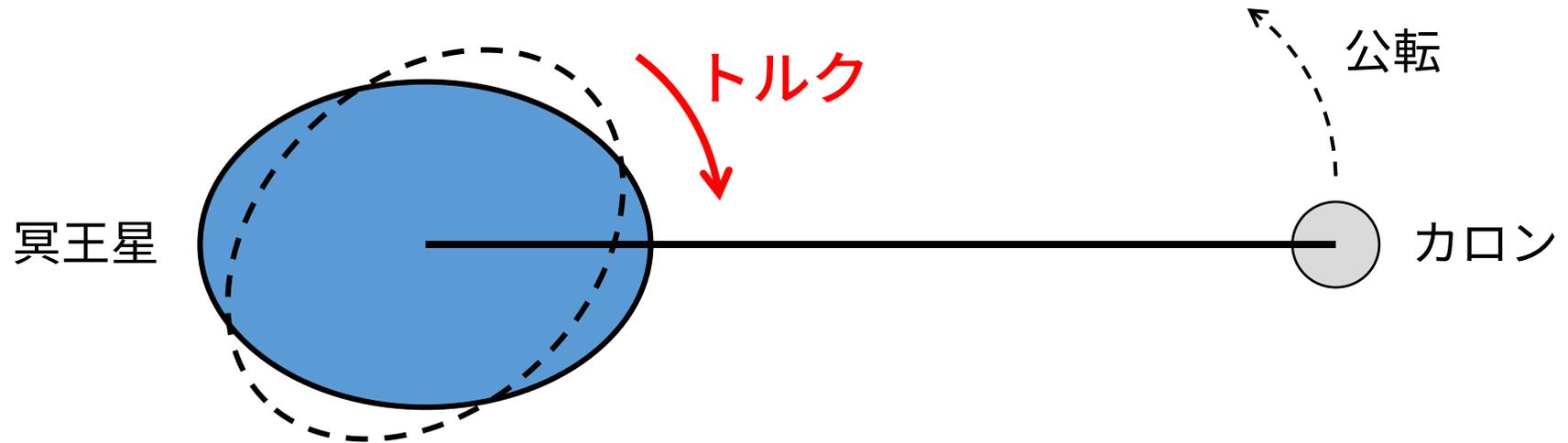
回転状態の進化

- スプートニク平原へ「氷」が集まっていく
 - 不安定な回転 = 回転エネルギーが最小でない
 - 回転が安定するような変化がおきる



回転状態の進化

- 潮汐トルクによって安定化
 - 慣性主軸 = 自転軸
 - 長軸方向 = カロン方向



- 新しい軸の求め方：慣性モーメントテンソルの対角化
[e.g., Matsuyama et al., 2014]

回転状態の進化

• 演

$$I_{ij} = \left[\left(1 + k_2^L \right) MR^2 C_{2,0}^{SP*} \left(\frac{1}{3} \delta_{ij} - \hat{e}_i^{SP} \hat{e}_j^{SP} \right) \right] + \left[\left(k_2^{T'} - k_2^T \right) \frac{\Omega^2 R^5}{3G} \left(\hat{e}_i^{R'} \hat{e}_j^{R'} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \right) \right]$$
$$+ \left[\left(k_2^{T'} - k_2^T \right) \left(\frac{M_C}{M + M_C} \right) \frac{\Omega^2 R^5}{G} \left(\frac{1}{3} \delta_{ij} - \hat{e}_i^{T'} \hat{e}_j^{T'} \right) \right]$$

I_{ij} : 慣性モーメントテンソル

M : 冥王星の質量

M_C : カロンの質量

R : 冥王星の半径

G : 万有引力定数

Ω : 回転角速度

$C_{2,0}^{SP*}$: 平原を北極においたときの
次数2の非正規重力場係数

k_2^L : 次数2の荷重ラブ数

k_2^T : 次数2の潮汐ラブ数

$k_2^{T'}$: 流体極限の次数2の潮汐ラブ数

e_i^{SP} : 平原中心方向の単位ベクトル

$e_i^{R'}$: 初期の単位回転軸ベクトル

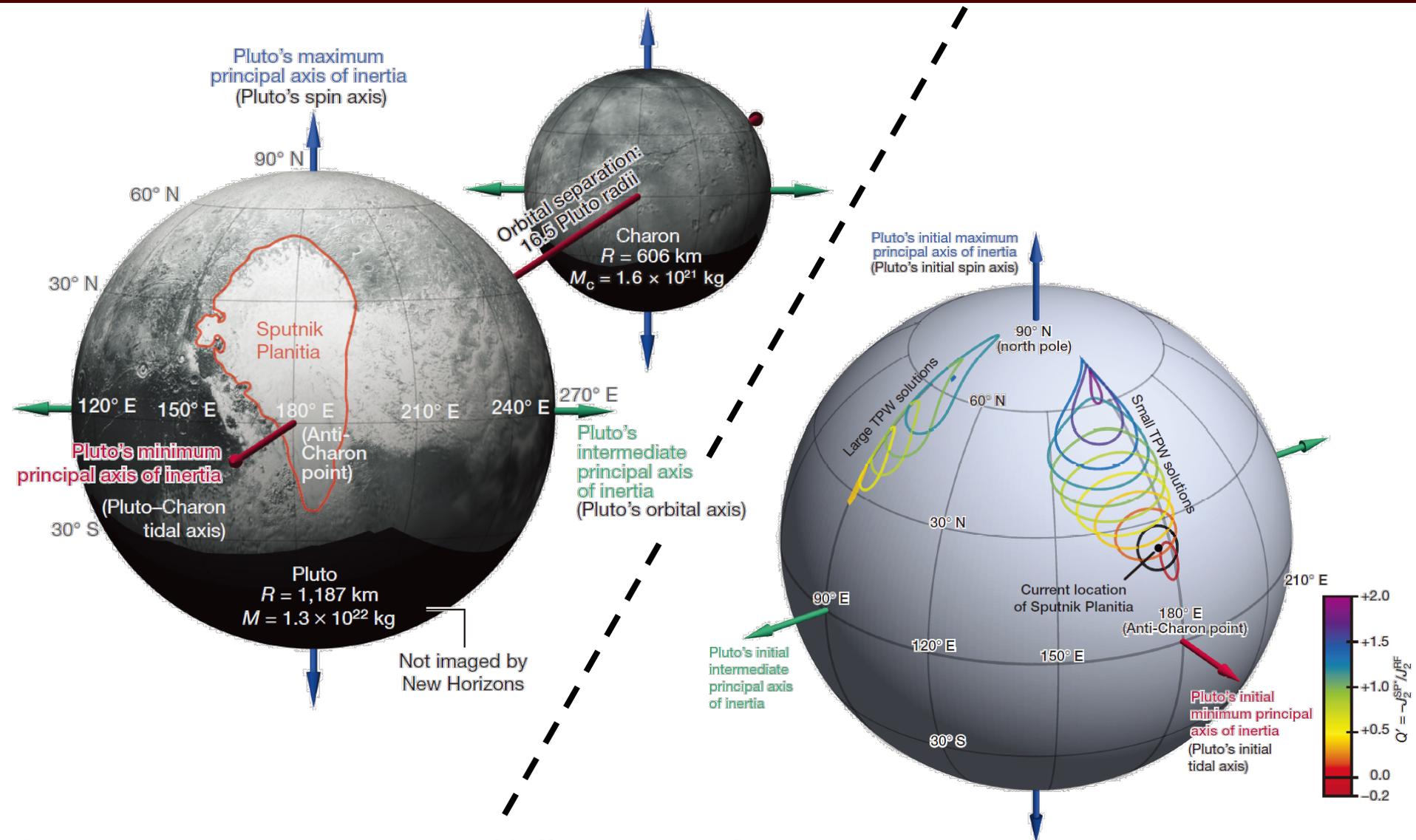
$e_i^{T'}$: 初期の単位潮汐軸ベクトル

δ_{ij} : クロネッカーのデルタ

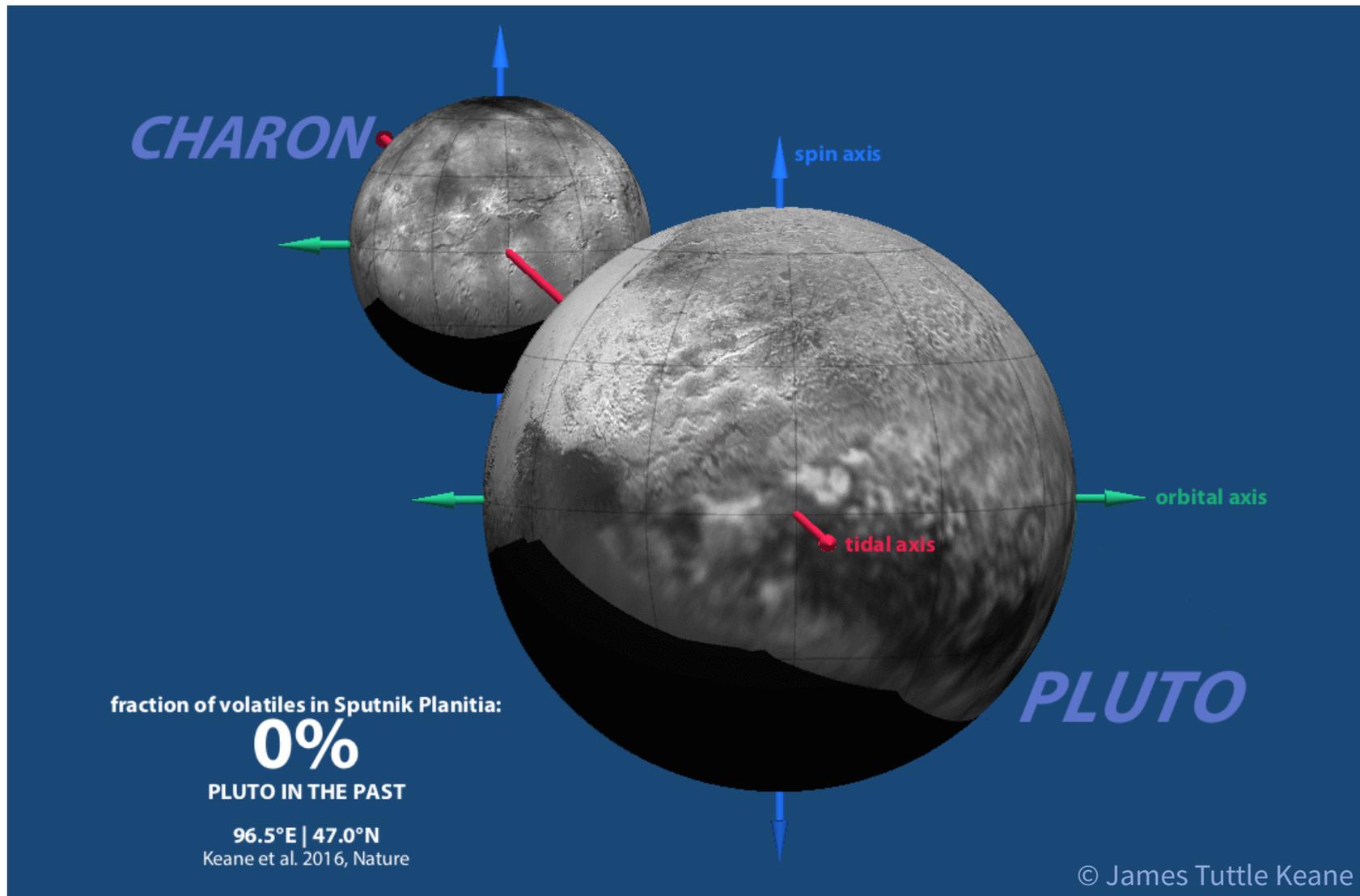
• 新しい軸の求め方：慣性モーメントテンソルの対角化

[e.g., Matsuyama et al., 2014]

真の極移動

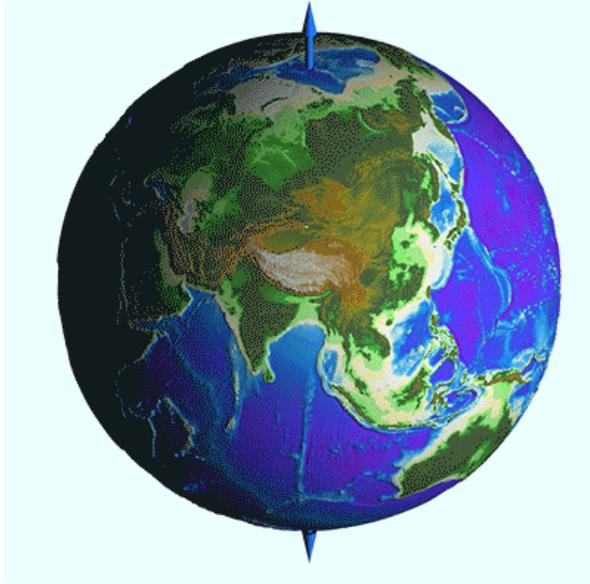


真の極移動

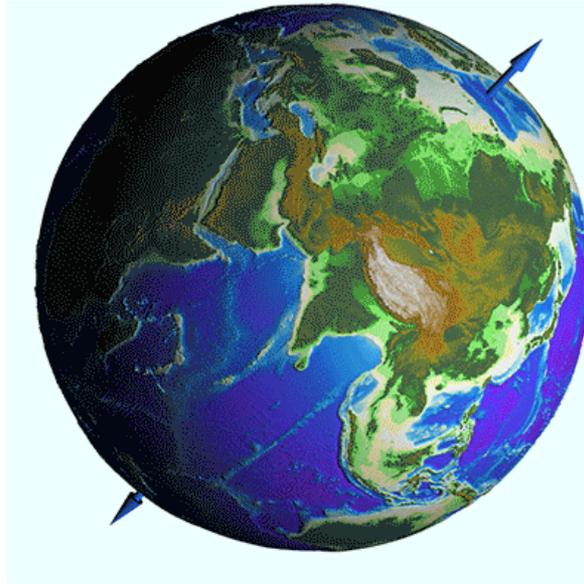


注意：自転軸の変化

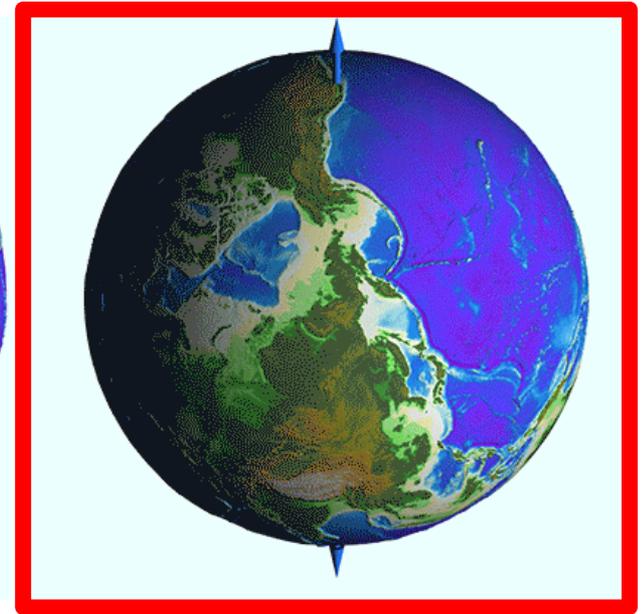
現在の地球の自転



自転軸の変化



真の極移動



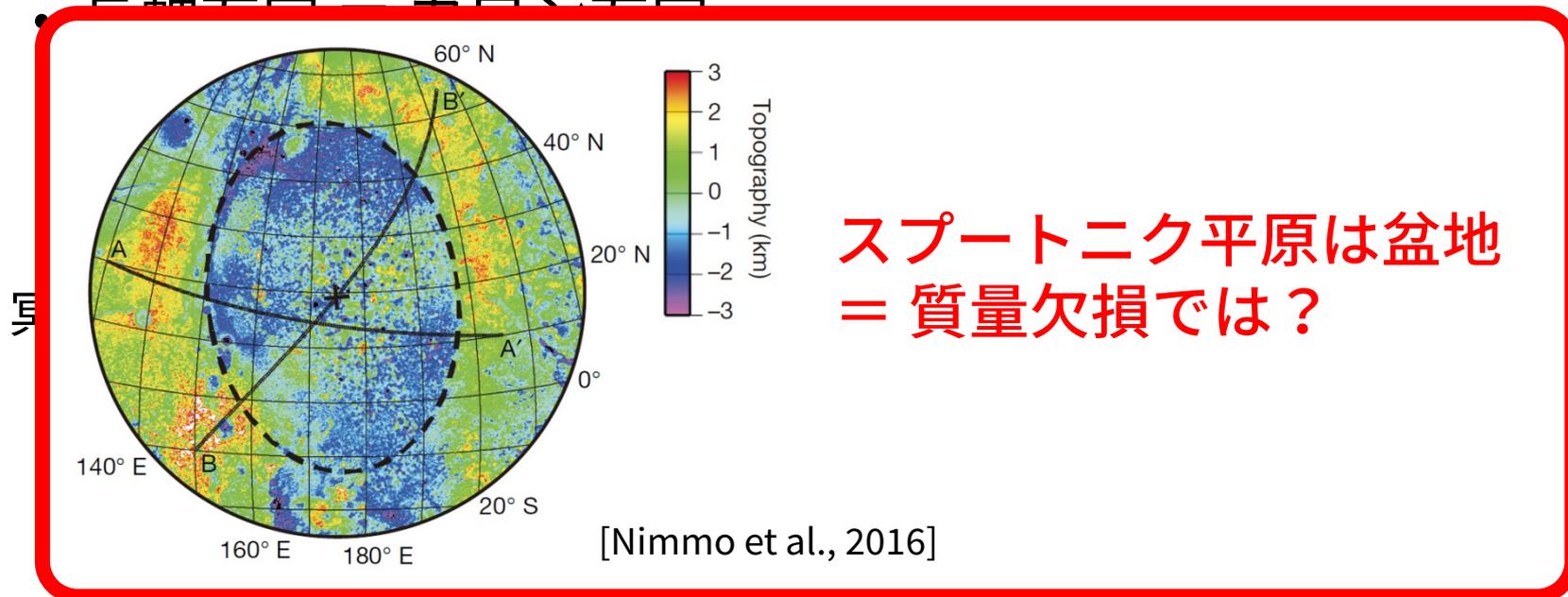
※ 見かけの極移動＝プレートテクトニクス！

回転状態の進化

- 潮汐トルクによって安定化

- 慣性主軸 = 自転軸

- 長軸方向 = 赤道方向

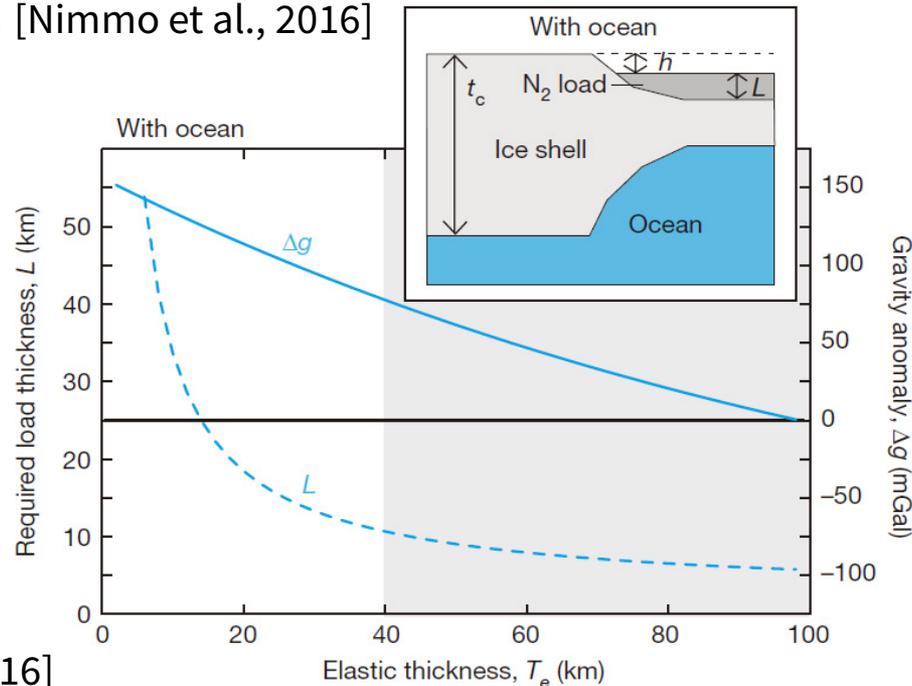


- 新しい軸の求め方：慣性モーメントテンソルの対角化
[e.g., Matsuyama et al., 2014]

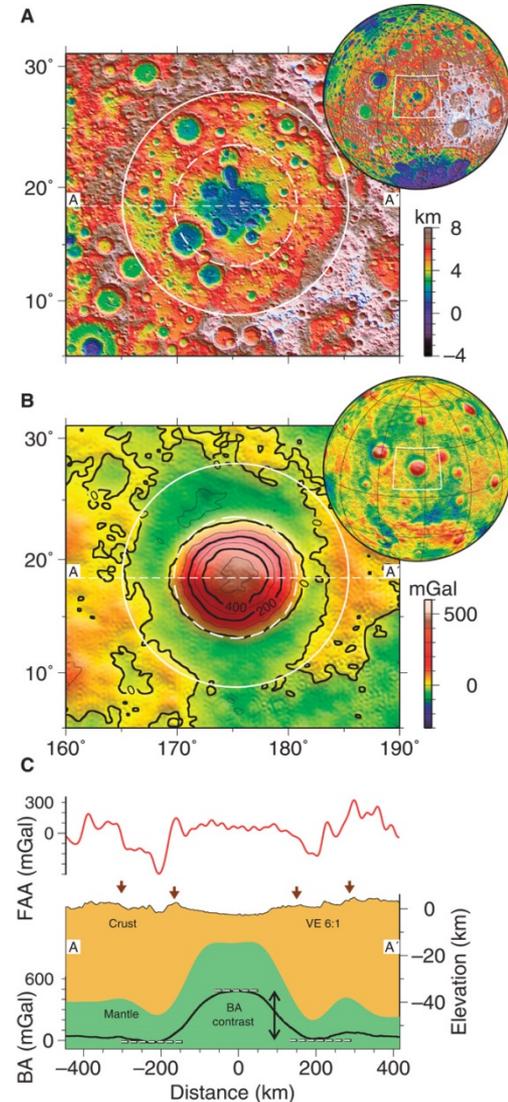
内部海が今もある

- 重力も負である必要はない
 - cf. 月のマスコン・・・マントル隆起
- 冥王星における重たい地下物質

• 内部海 [Nimmo et al., 2016]

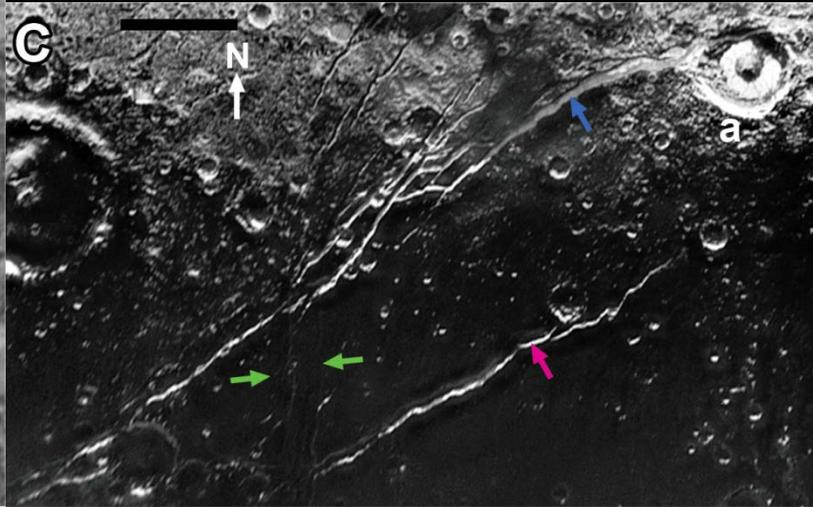
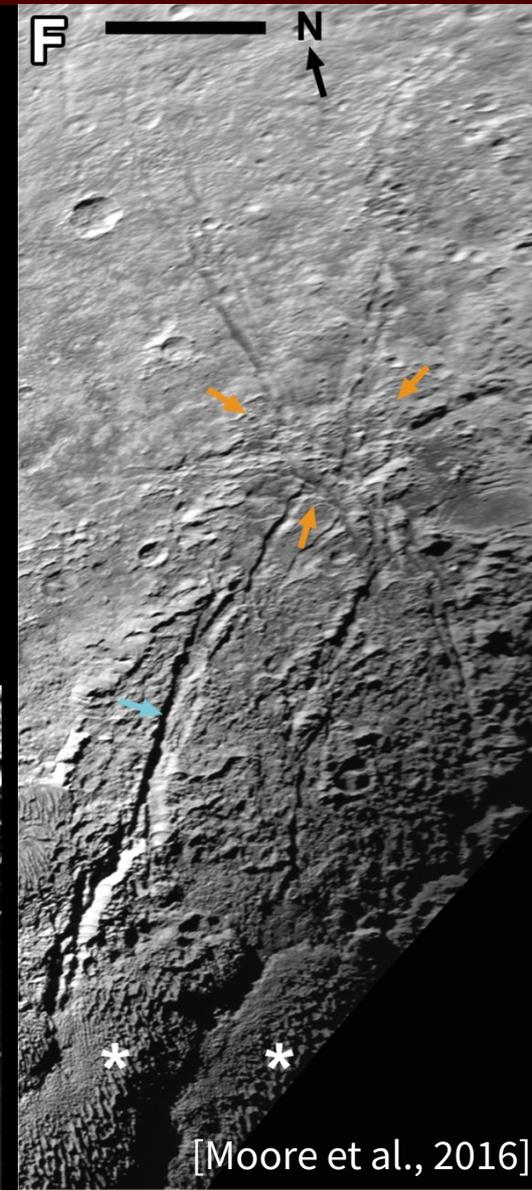
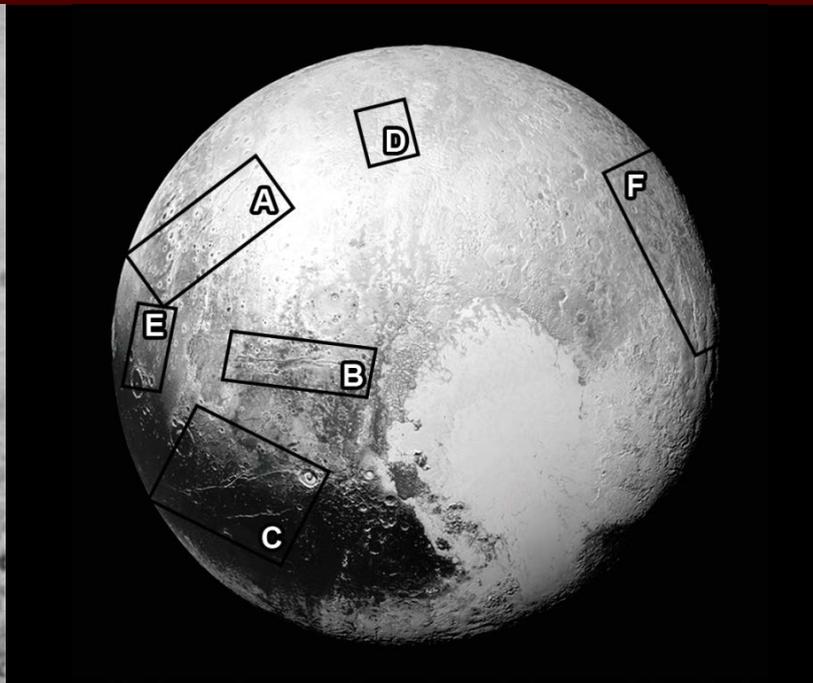
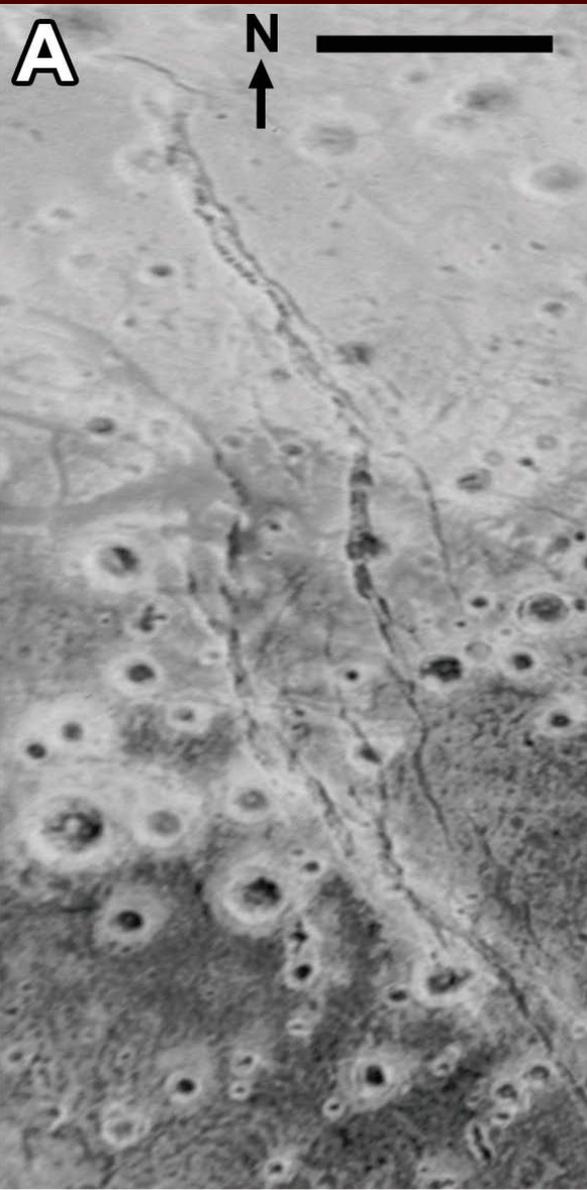


[Nimmo et al., 2016]



[Neumann et al., 2015]

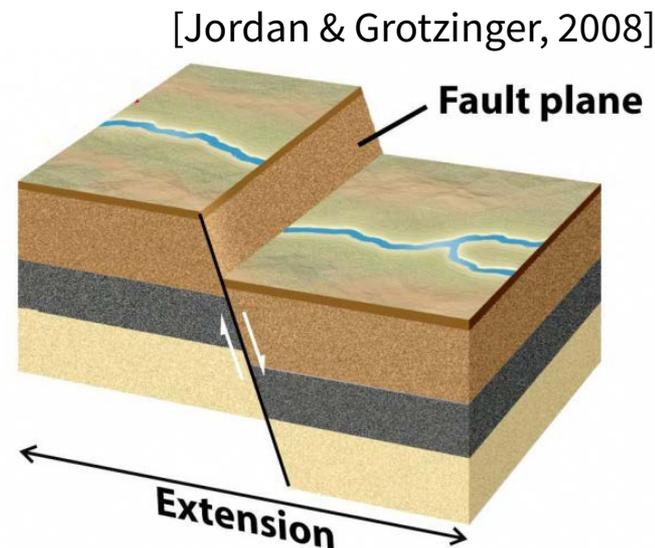
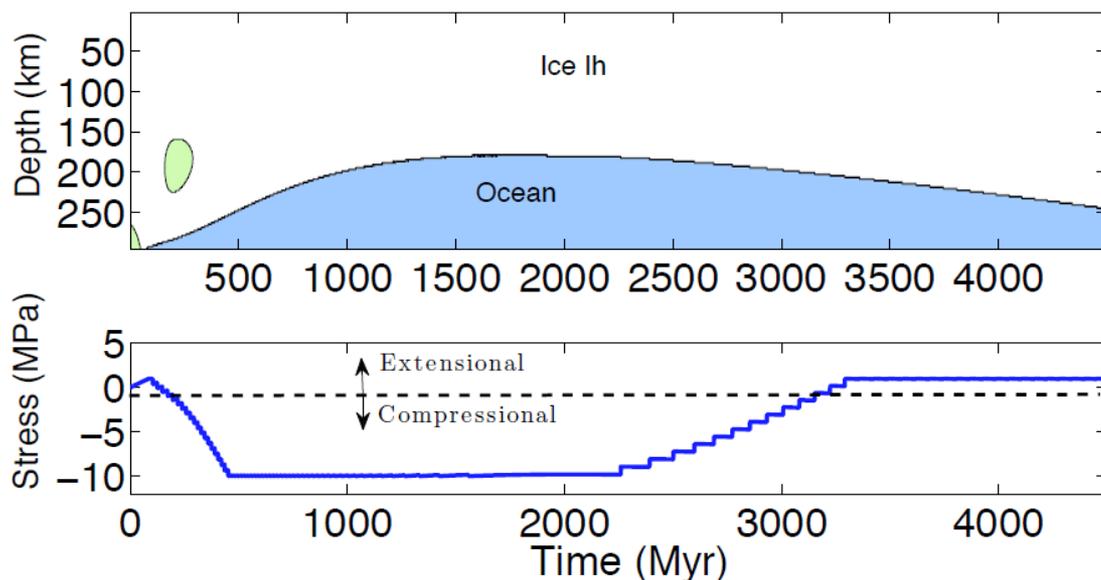
断層：冥王星のテクトニクス



至る所に正断層

- 水平方向に伸張する力
- 全球的に見られる（地域・年代）
→ 内部海の凍結が継続中

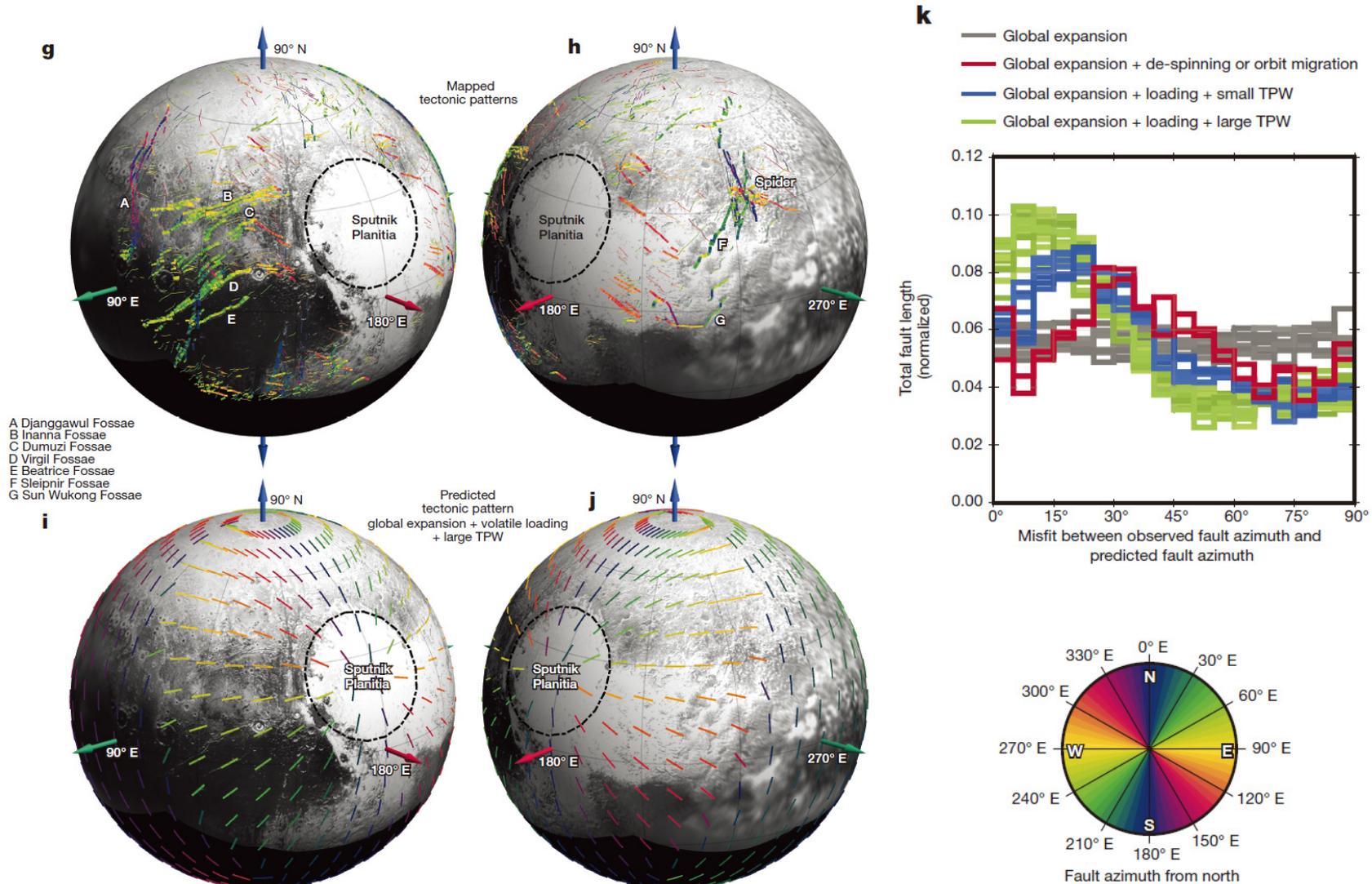
[Stern et al., 2015; Moore et al., 2016]



冥王星の熱進化モデル

[Adapted from Hammond et al., 2016]

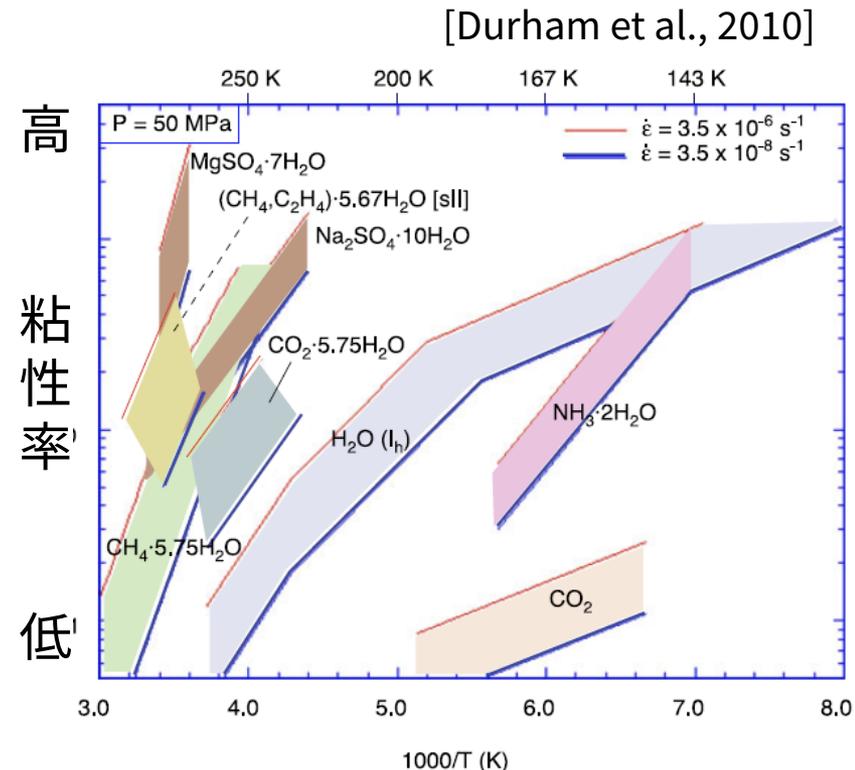
断層構造：凍結と真の極移動



[Keane, Matsuyama, Kamata, & Steckloff, *Nature*, 2016]

内部海は凍りつかないのか

- 内部に熱を保持できるか否かは氷地殻次第
 - 低粘性率 → 対流しやす → 冷めやす → 凍りつく
 - 高粘性率 → 対流しにく → 冷めにく → 凍りつかない
- 氷地殻下端でも高い粘性率
 - $> \sim 10^{16}$ Pa S [Robuchon & Nimmo, 2011]
 - Saltyな内部海 and/or クラスレートな氷地殻？
- 次の講演 by 木村さんに期待

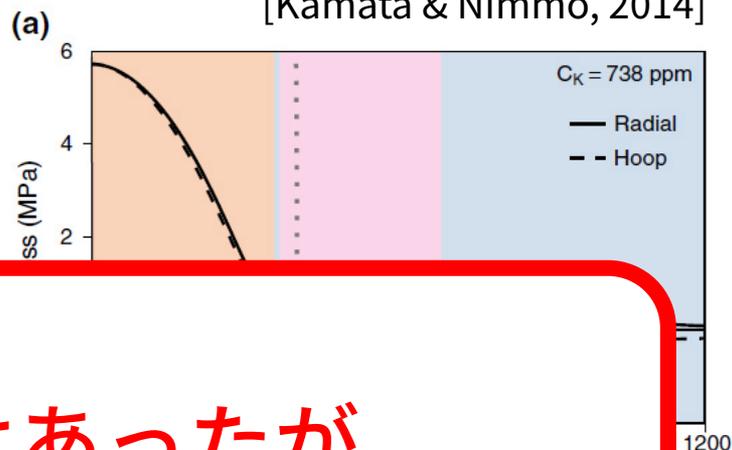


巨大クレーター一周りの断層

- 緩和とともに表面の応力が変化
 - 断層の形成



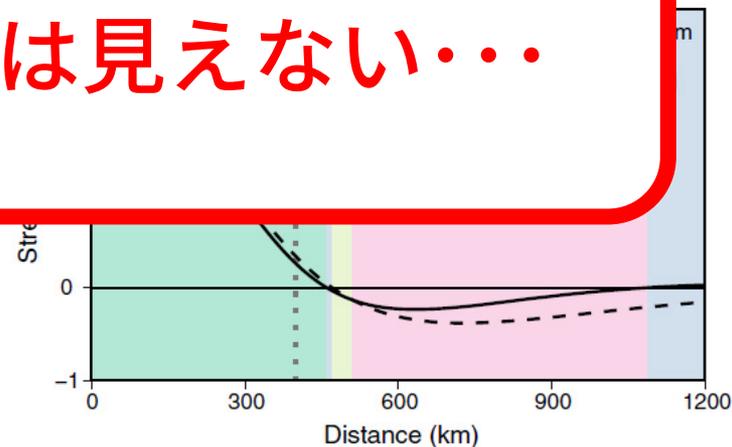
[Kamata & Nimmo, 2014]



大きなクレーターはあったが
内部は氷で覆われて断層は見えない...

- 初期の氷には関係ない

内部が冷たい



*より正確には、リソスフェア厚と盆地サイズの比

Radial normal Strike-slip Concentric thrust
Concentric normal Radial thrust

まとめ

- 海王星の氷衛星トリトンとの比較からは、冥王星は比較的早くに死んだ準惑星だと思われていた
 - 熱源に乏しいため
- *New Horizons* の画像からは、冥王星が複雑な進化過程を経たことが分かってきた
 - 衝突盆地への大気の凝結と「真の極移動」
 - 現在もある内部海は凍り付いている最中
 - それらの痕跡は断層の分布として見ることができる
 - 氷地殻が熱を逃がしにくいことから、内部の組成に関する知見が得られるのではないか



Backup slides

Occultation measurements

- No troposphere

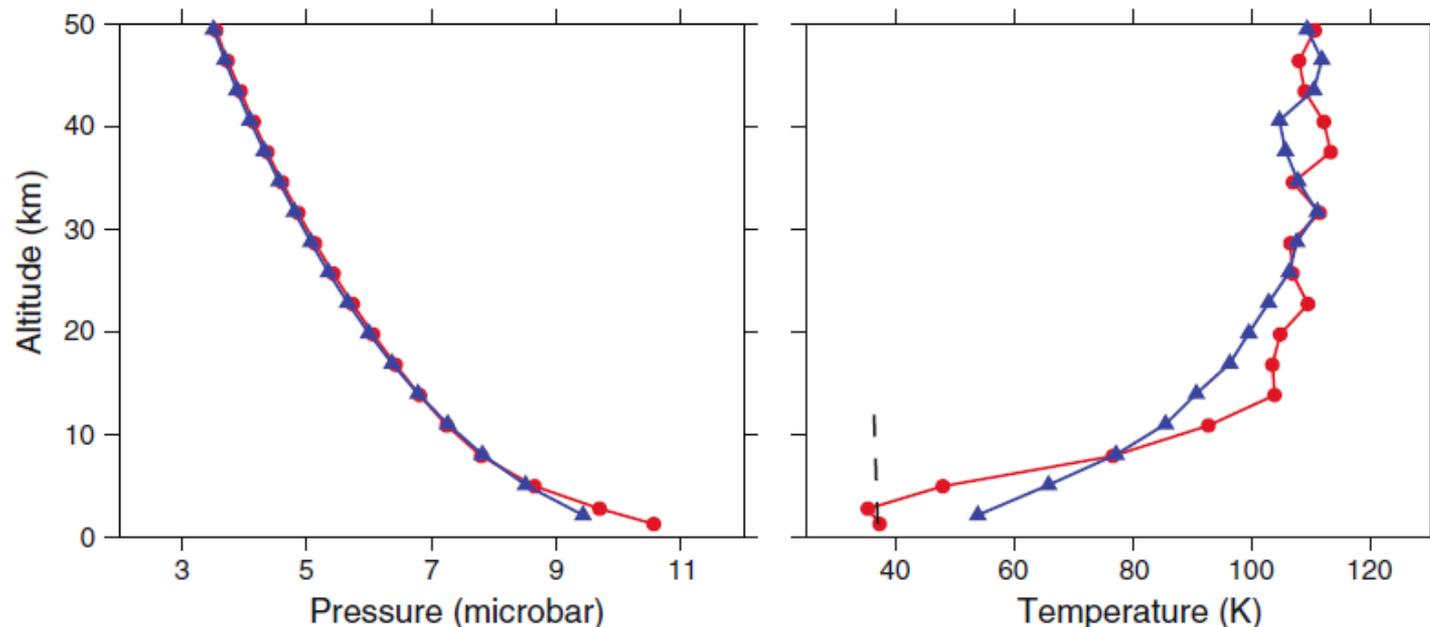


Fig. 1. Pressure and temperature in Pluto's lower atmosphere. (Left) Pressure. (Right) Temperature. These profiles were retrieved from radio occultation data recorded by the REX instrument onboard New Horizons. Diffraction effects were removed from the data (53), which greatly improves the accuracy of the results, and the conventional "Abel-transform" retrieval algorithm (2, 54, 55) was applied to the diffraction-corrected phase measurements. Each graph shows results at both entry (red line with circles) and exit (blue line with triangles), situated on opposite sides of Pluto. The profiles are most accurate at the surface, where the uncertainties in pressure and temperature are $\sim 1 \mu\text{bar}$ and 3 K, respectively. Temperature fluctuations at altitudes of >20 km are caused by noise; no gravity waves were detected at the sensitivity of these measurements. The dashed line indicates the saturation temperature of N_2 (29).