

Juno によるガリレオ衛星 flyby 観測レビュー

丹 秀也 (東京工業大学 地球生命研究所)

NASA の探査機 Juno は 2016 年以降、木星系の探査を行っている。Juno は木星そのものを探査するだけでなく、木星系のガリレオ衛星や衛星-木星間での物質・エネルギー的相互作用についても観測を行っており、近年ではその成果も報告されつつある。Juno の搭載機器は木星を主な観測対象としており、衛星については磁気圏・電離圏のデータが主となっている。一方で、ガリレオ衛星のひとつであるガニメデについては近接 flyby が 2021 年に行われ、その表面や内部についても新たな知見が得られている。

Juno によるガニメデ近接 flyby では、1000 km 程度の距離まで接近して観測が行われた。これにより磁気圏の非対称な空間構造が詳細に明らかとなり、希薄大気である電離圏におけるプラズマ成分の密度も初めて直接観測された。これらは今後、データ解析によって詳細に制約され、表面における物質科学的検討にも用いられることが期待される。また一部の表面領域についてはこれまでで最高の空間・波長分解能で光学スペクトルが取得された。ガニメデ表面の物質分布は最小でも 100 km スケールといったグローバルなスケールでしか明らかではなかったが、この Juno の観測により、大型のクレーター近傍といったローカルなスケールにおいて未知の成分の存在が初めて示唆された。さらには重力場データの更新もなされ、既存のデータと組み合わせることによりその見直しが 20 年ぶりに行われた。新たに見積もられた慣性モーメントの値や局所的な重力異常から、ガニメデ地下浅部から内部にかけての不均質性が示唆されている。これらに加えて赤外線やマイクロ波による表面・地下浅部観測が行われ、2023 年 2 月現在では未公表ではあるがその物理化学的性質がより一層明らかになると思われる。

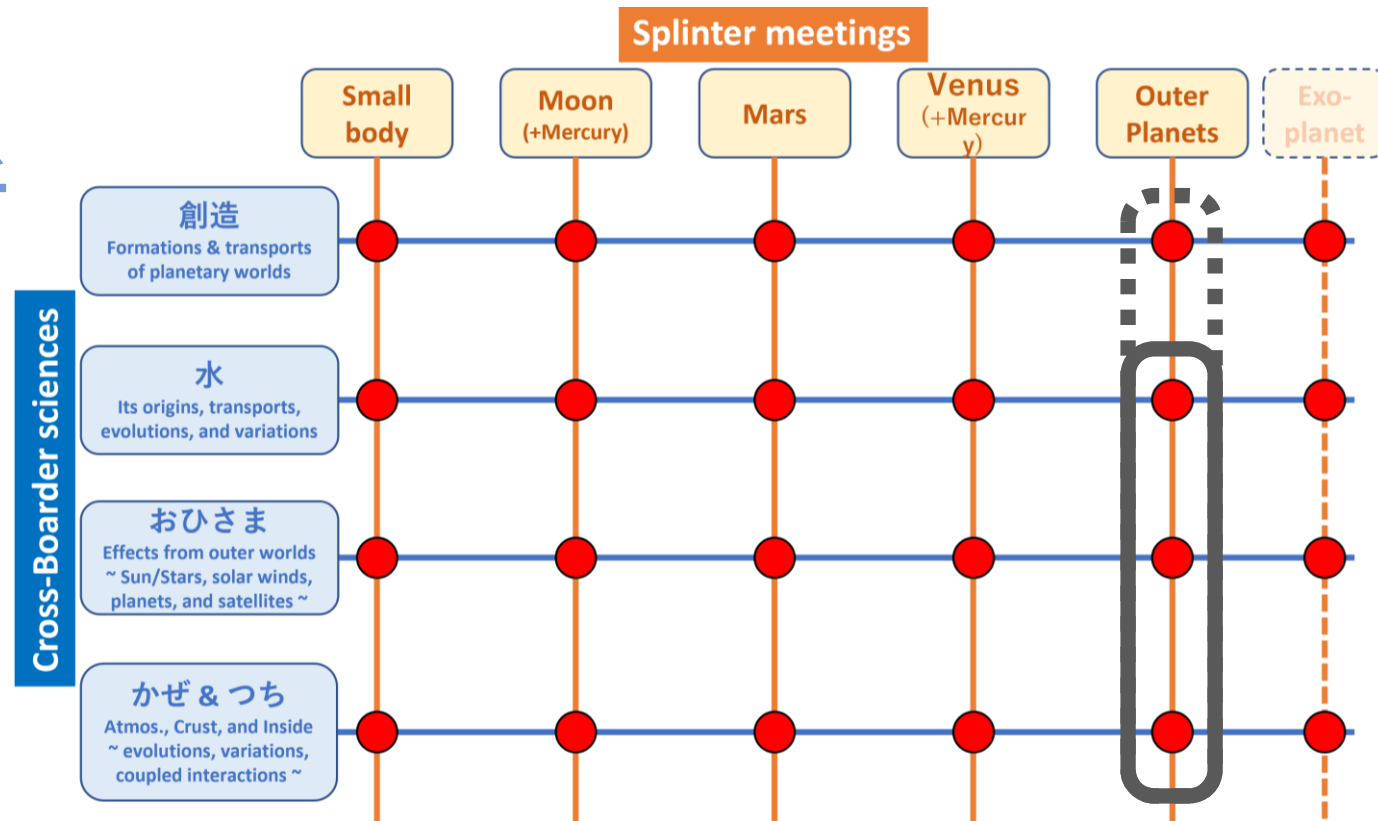
ガニメデだけでなく、Juno は近接 flyby を内側のガリレオ衛星であるエウロパについては既に 2022 年に実施済み、イオについては 2023 年以降に実施予定である。エウロパへの近接 flyby では、これまでで最高の空間解像度での光学観測や、電離圏と地下浅部の直接観測も初めて行われた。通過した領域内には地下と大規模な地質作用を示す領域も含まれており、今後公開されるデータが近年の地下構造に関する推測に新たな制約をもたらすことが期待される。イオについては遠方 flyby やトラスの観測もこれまでに複数回行われており、表面における火山などの地質活動や物質化学的性質に加え、木星との物質・エネルギー相互作用が明らかとなりつつある。またガニメデより外側のガリレオ衛星であるカリストについては近接 flyby の実施は無いものの、その軌道上での磁気粒子フラックスが観測され、これによる先行データの見直しも予想される。

Junoによるガリレオ衛星 flyby観測レビュー

丹 秀也

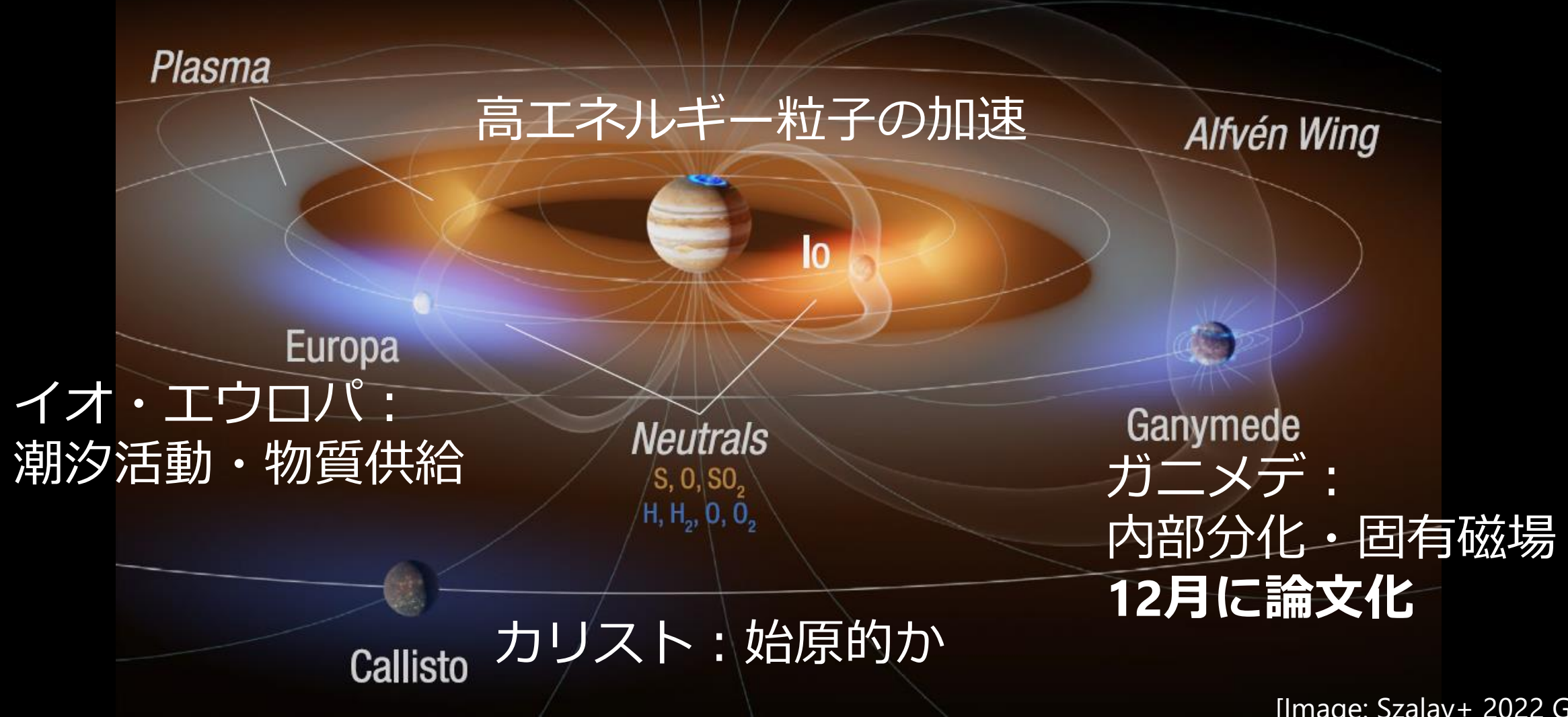
東京工業大学 地球生命研究所

shtan@elsi.jp



Junoによるガリレオ衛星観測：Galileo以来の近接flybyも

木星系：軌道・物質・エネルギーの共進化
ガリレオ衛星：内部海をもつ大型の氷衛星を含む



Junoによるガリレオ衛星に関する観測

これまでの観測状況 (2023年2月時点)

	イオ	エウロパ	ガニメデ	カリスト
軌道上の観測 (トーラス含む)	✓	✓	✓	✓
遠方flyby ($> \sim 10^4 - 10^5$ km)	✓	✓	✓	✓ unpublished
近接flyby ($< \sim 10^3$ km)	2023/12~ ~1500 km	✓ ~350 km unpublished	✓ ~1000 km	No

Junoによるガリレオ衛星に関する観測

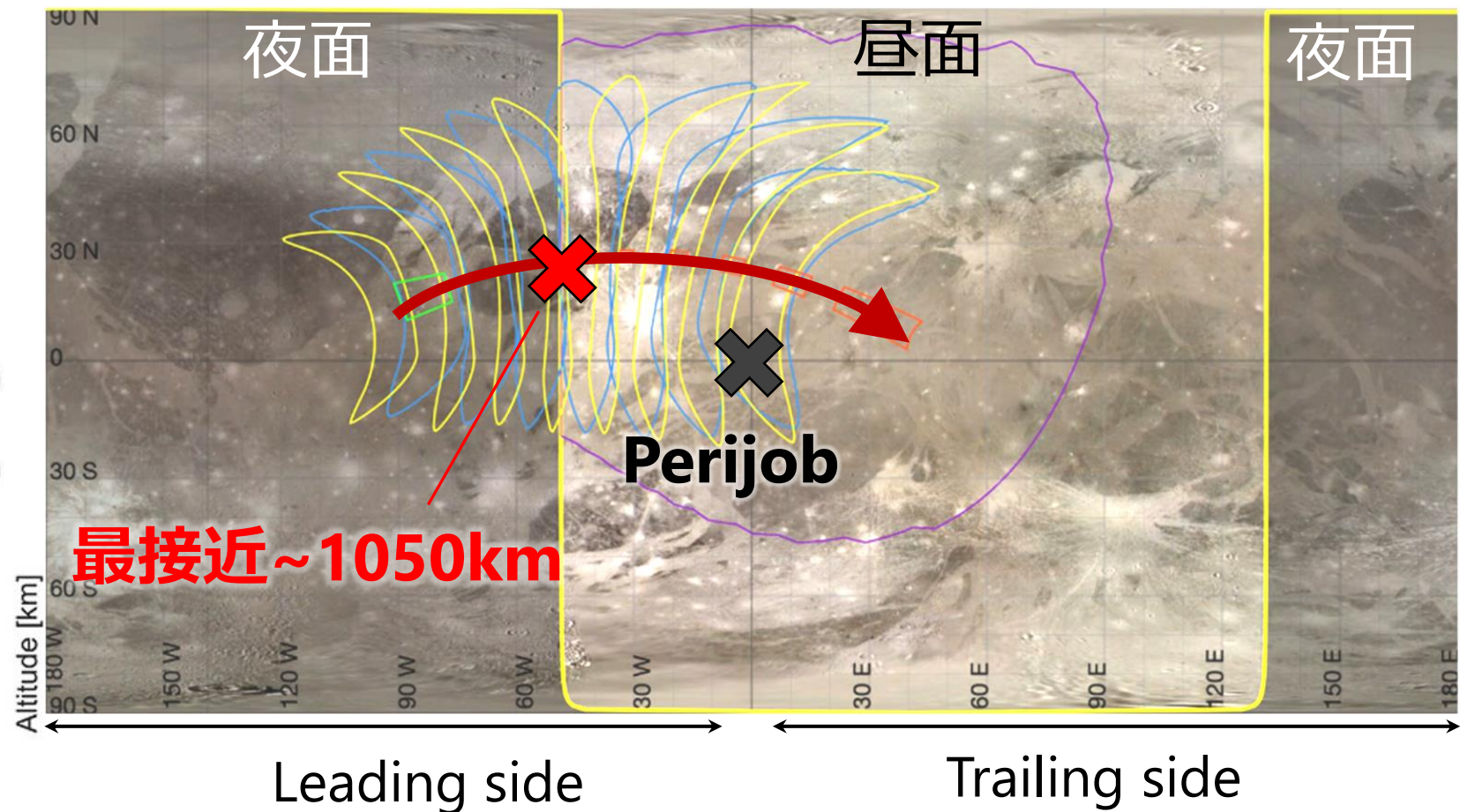
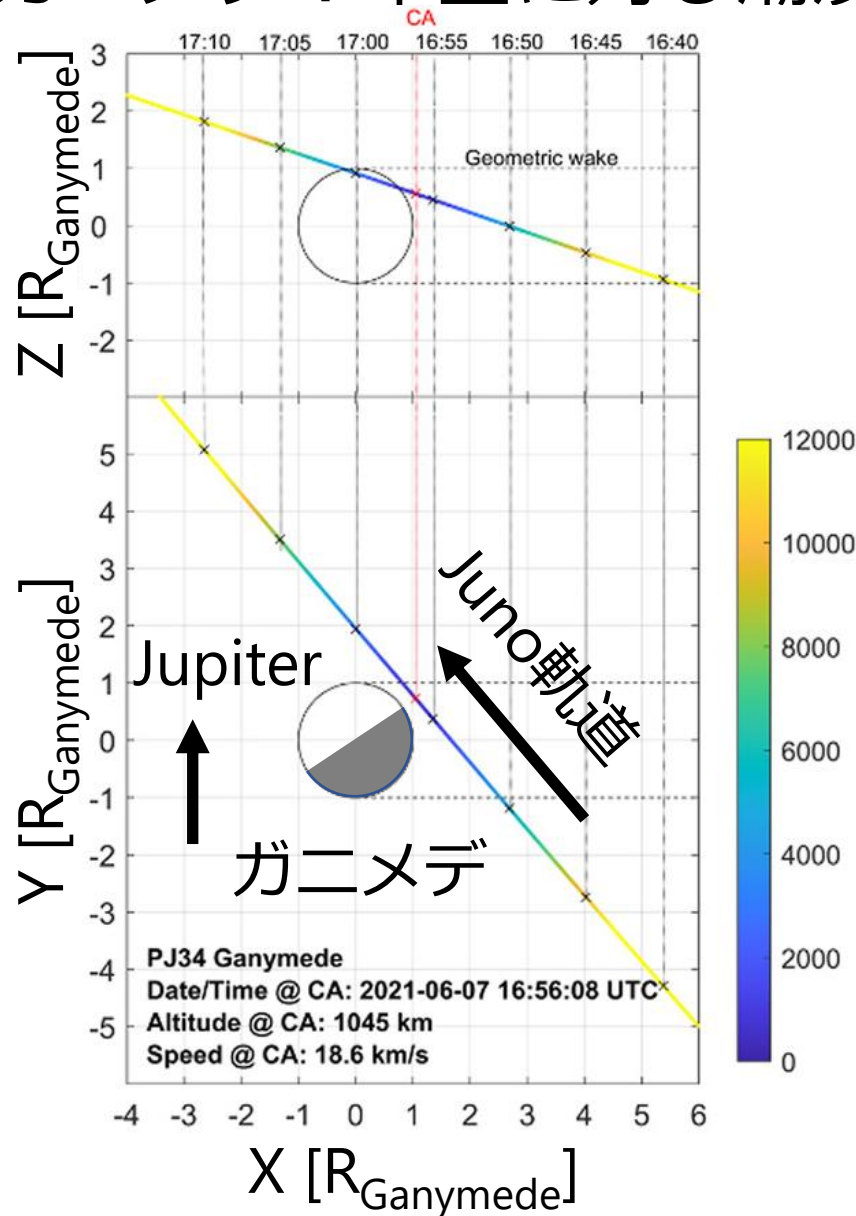
	衛星の場合の観測項目
磁気圏/トーラス	荷電粒子 (エネルギー, イオン種, 角度), 磁場構造
大気/電離圏	荷電粒子 (エネルギー, イオン種, 角度), オーロラ
表面	可視画像, スペクトル (70–200 nm, 2–5 μm) 遠方flyby: 半球レベル, 近接flyby: $\sim 1\text{--}10$ km/pix
内部	重力場・浅部構造 ($\sim 10\text{--}20$ km) (近接flybyの場合のみ)

今回は近接flybyデータ公表済みのガニメデを主に多く取り上げる

ガニメデへの近接flyby (2021/06/07)

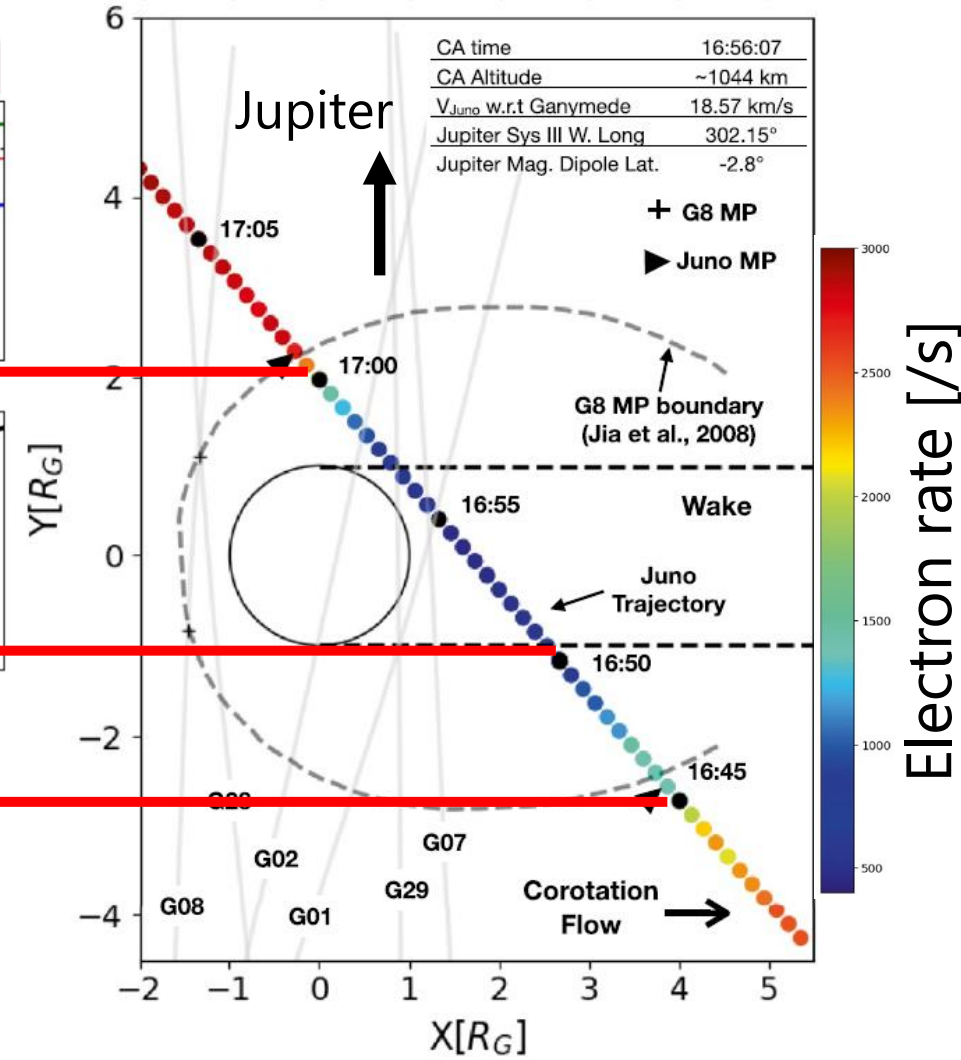
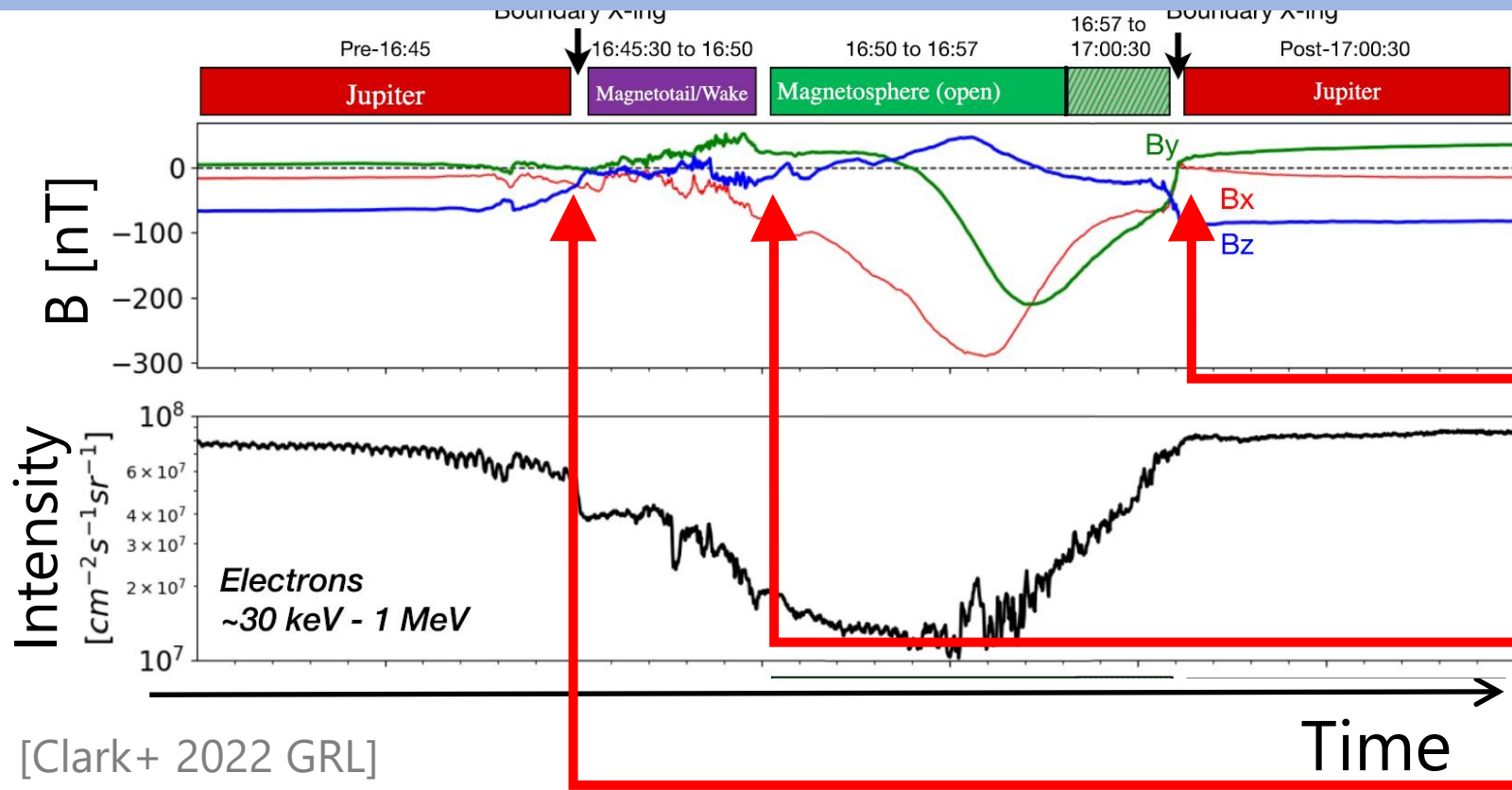
ガニメデ：木星に対し潮汐固定

[Review的論文 Hansen+ 2022 GRL]



公転前面から接近し、木星側を通過
表面・磁気構造を軌道に沿って調査

ガニメデに関する新しい知見：磁気・電離圏



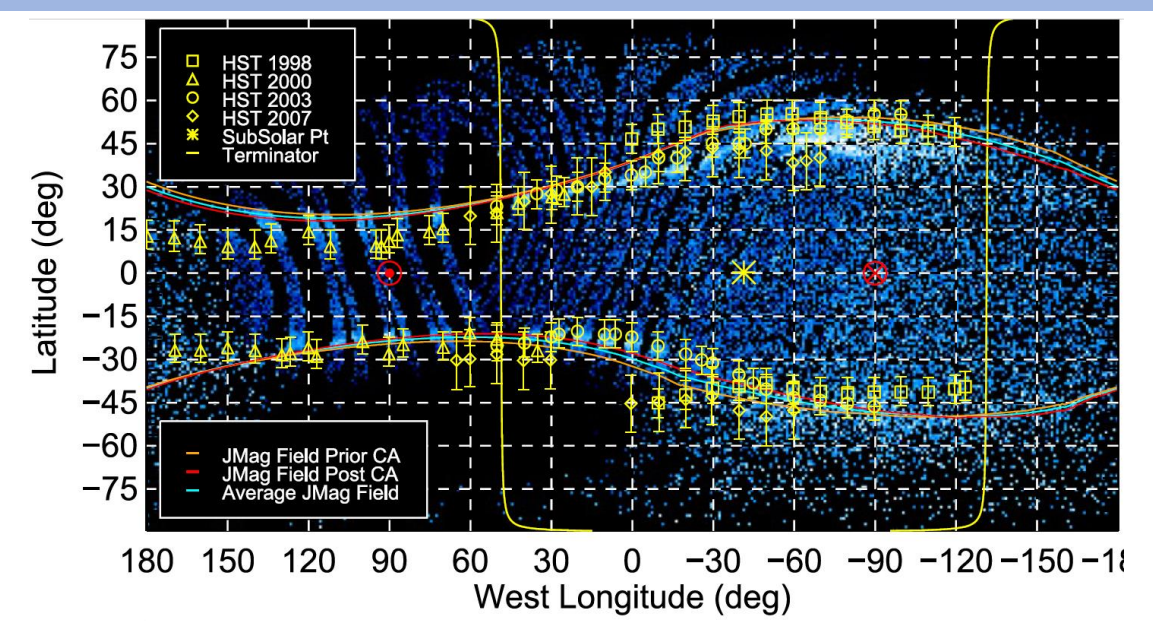
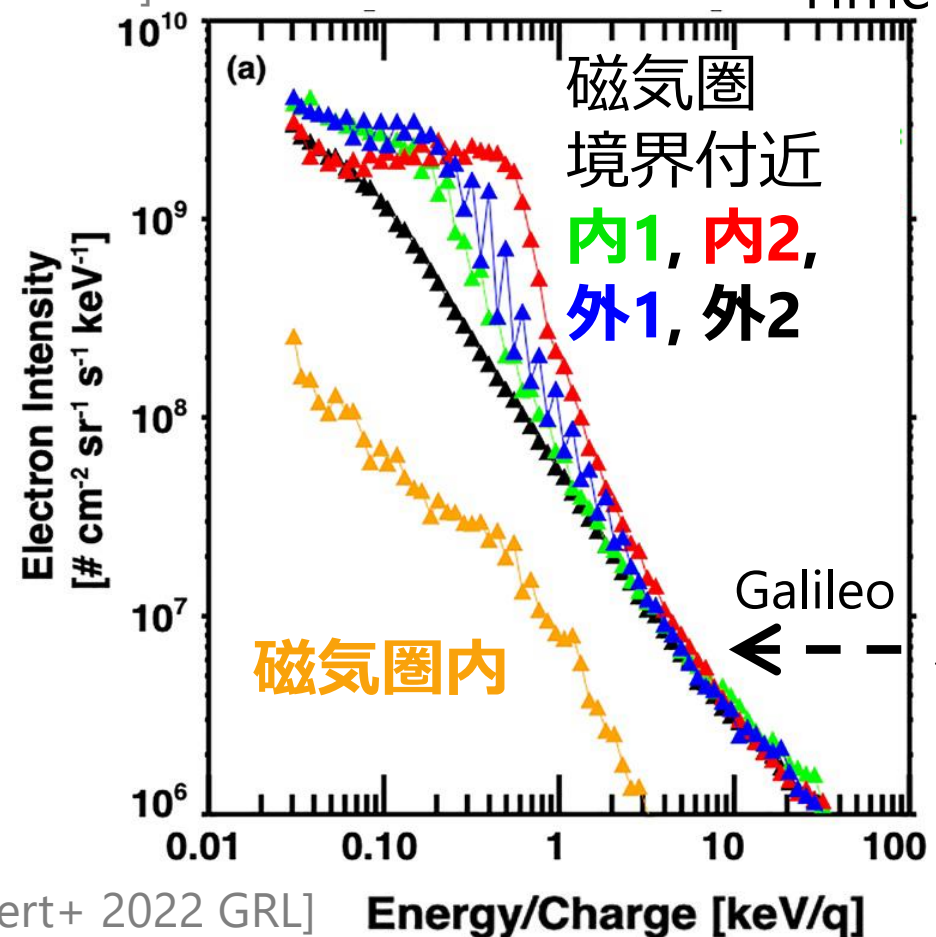
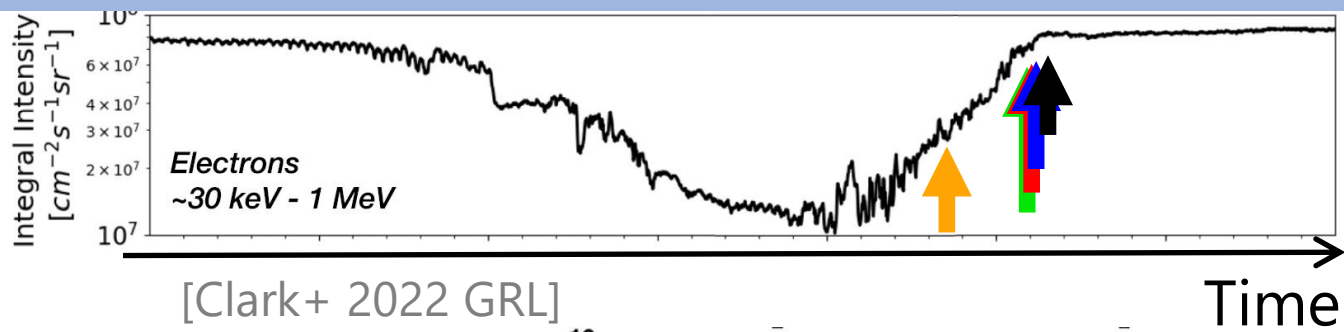
磁気圏構造中の通過に伴い

磁場・電子フラックス変化 [Clark+ 2022 GRL]

非対称の磁力線構造が定量的に (北極が傾いていること自体は以前から明らか)

[e.g., Cooper+ 2001]

ガニメデに関する新しい知見：磁気・電離圏



オーロラの空間分布の詳細制約
→ 磁力線の表面との接続分布

[Greathouse+ 2022 GRL]

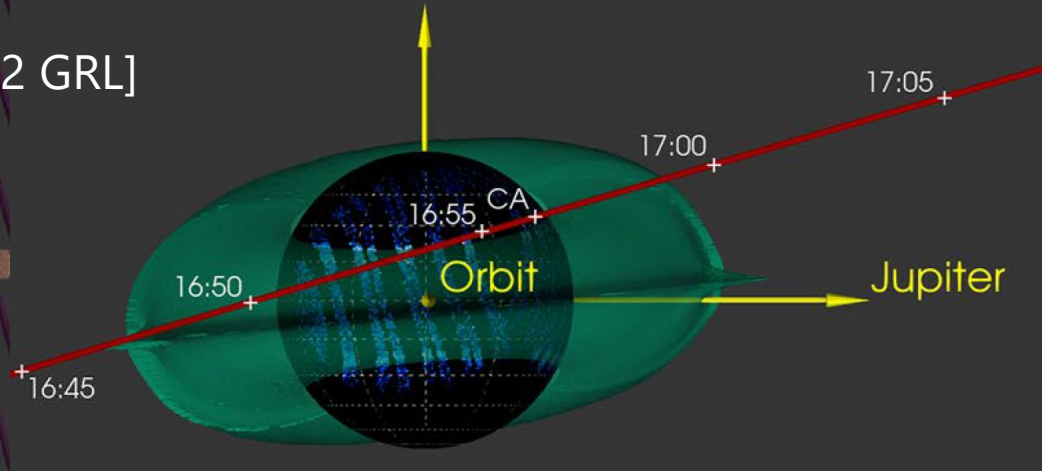
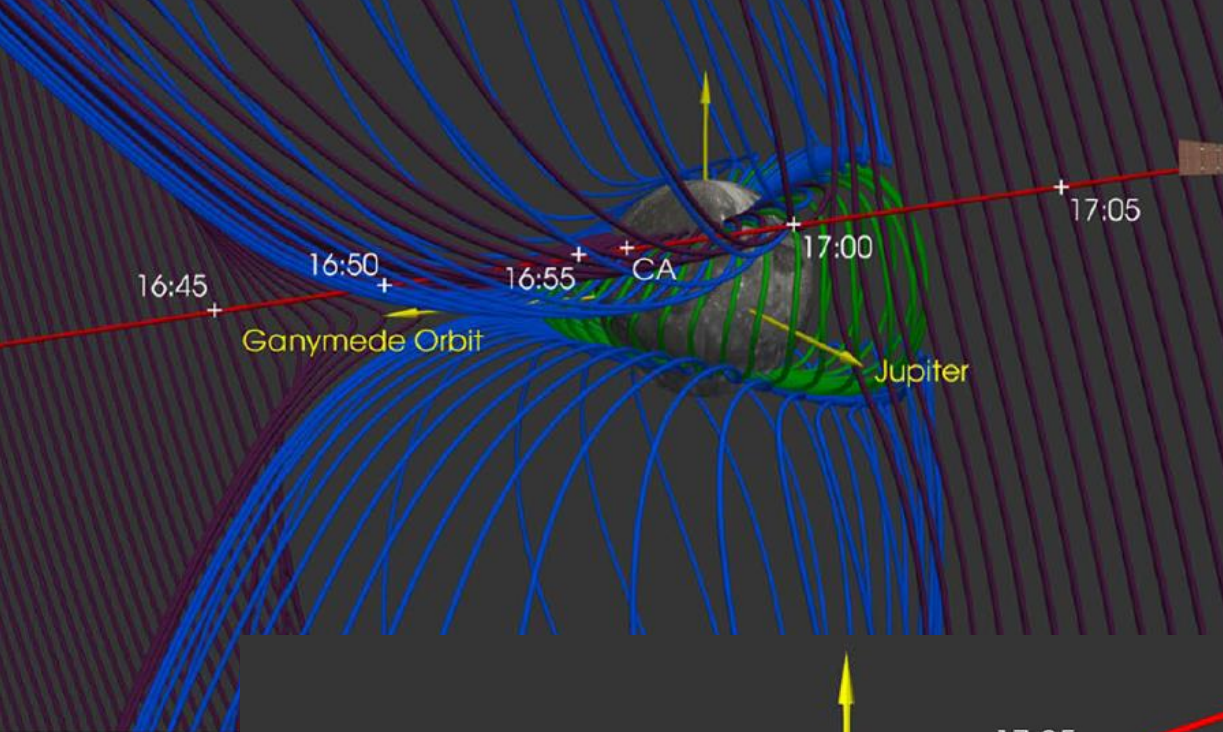
磁気圏中の電子フラックス変化
これまでより低エネルギー帯で観測

[Ebert+ 2022 GRL]

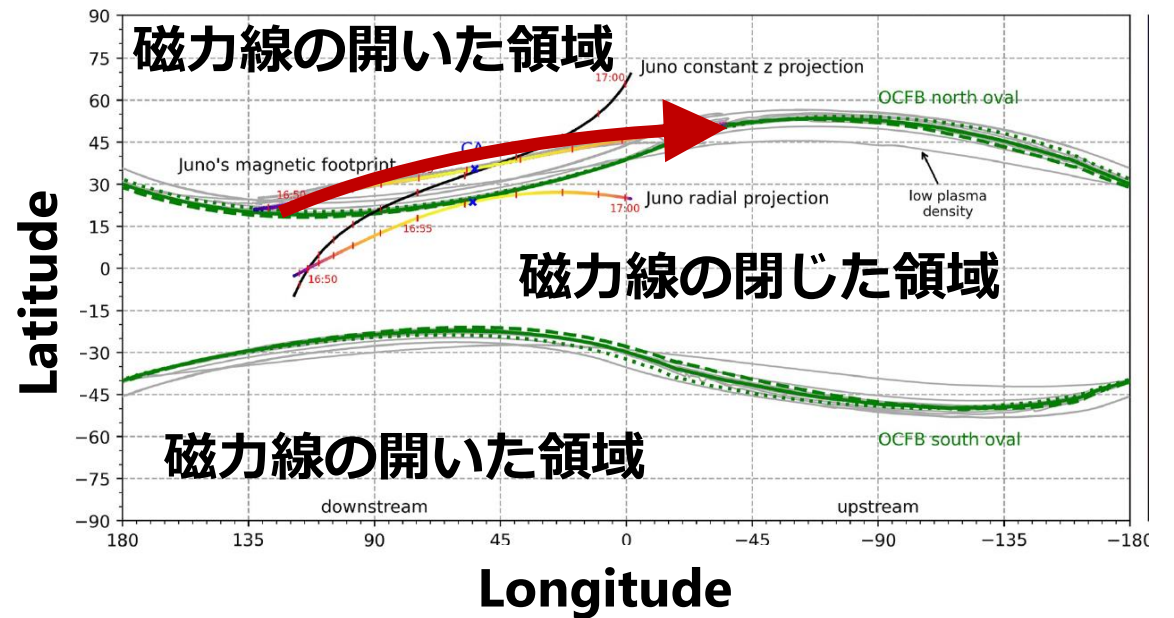
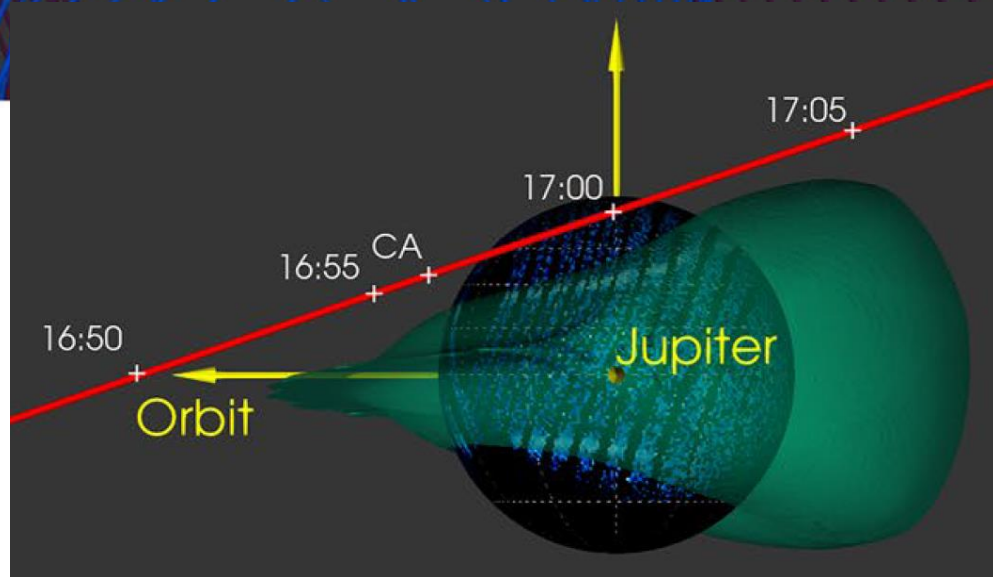
[Ebert+ 2022 GRL]

ガニメデに関する新しい知見：磁気・電離圏

観測と統合的なモデル構築 [Duling+ 2022 GRL]



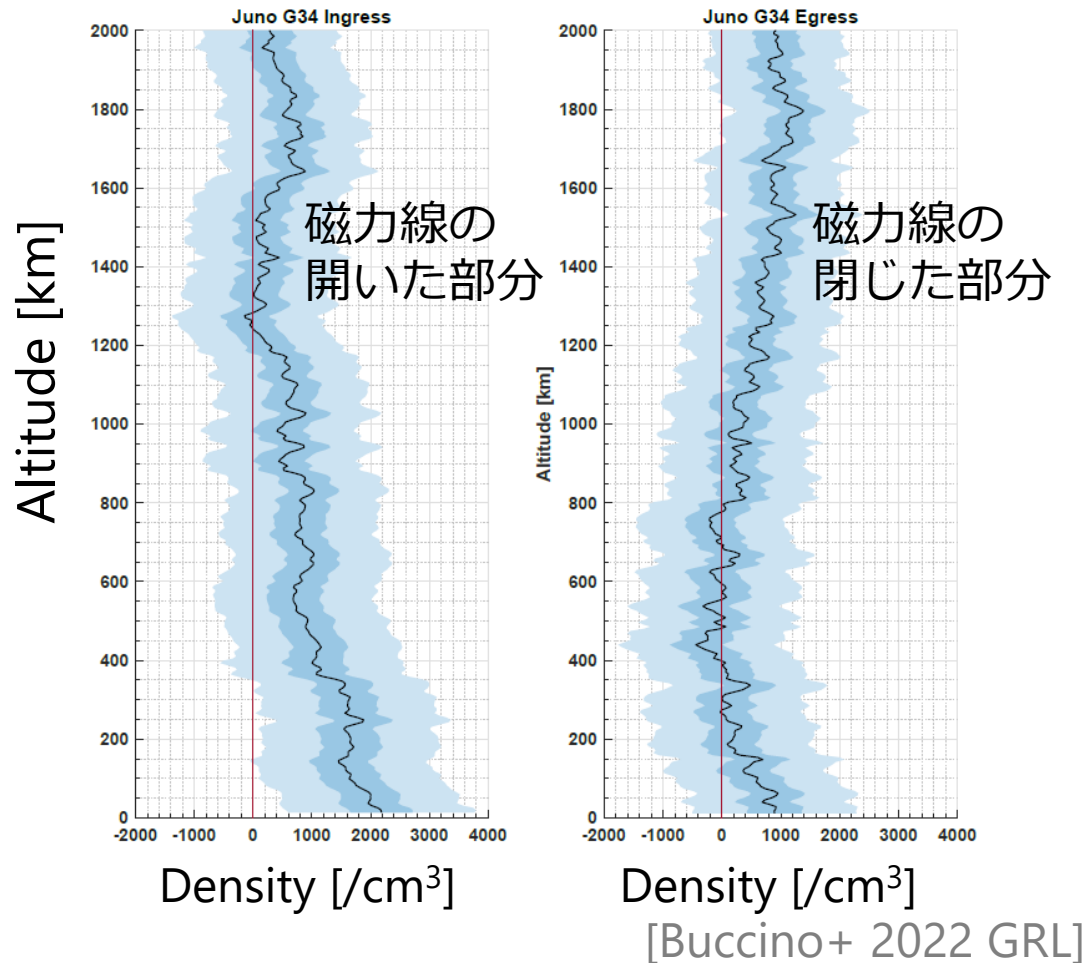
水平/高度方向に非対称の磁場構造制約
表面との対応もより詳細に



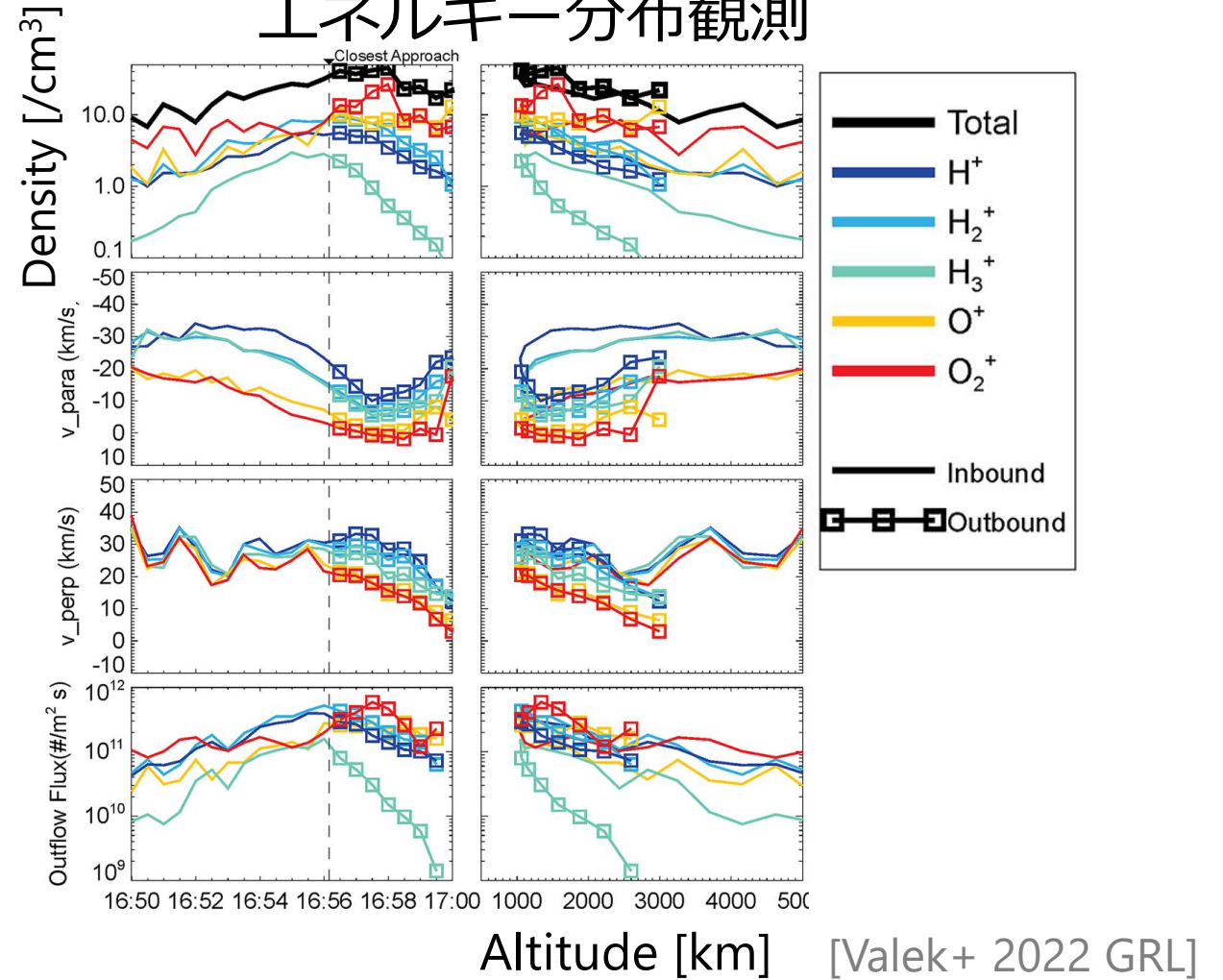
ガニメデに関する新しい知見：磁気・電離圏

電離圏の初の直接探査 [e.g., Buccino+ 2022 GRL; Valek+ 2022 GRL; Allegrini 2022+ GRL]

地球との電波掩蔽による
電子密度の高度分布観測

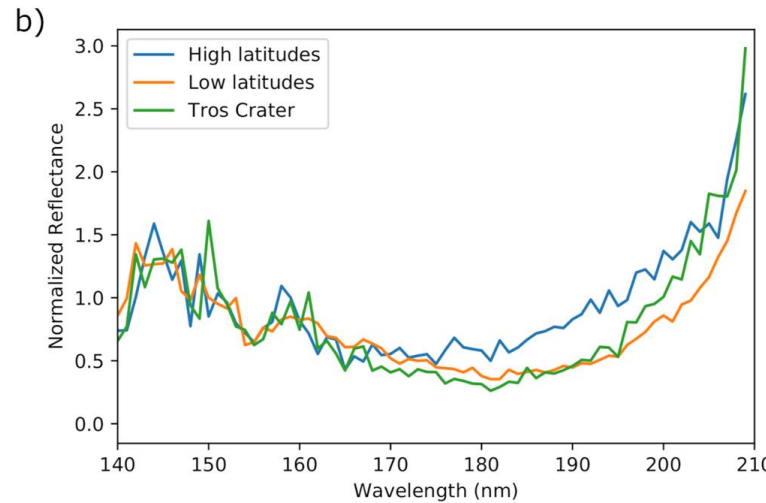
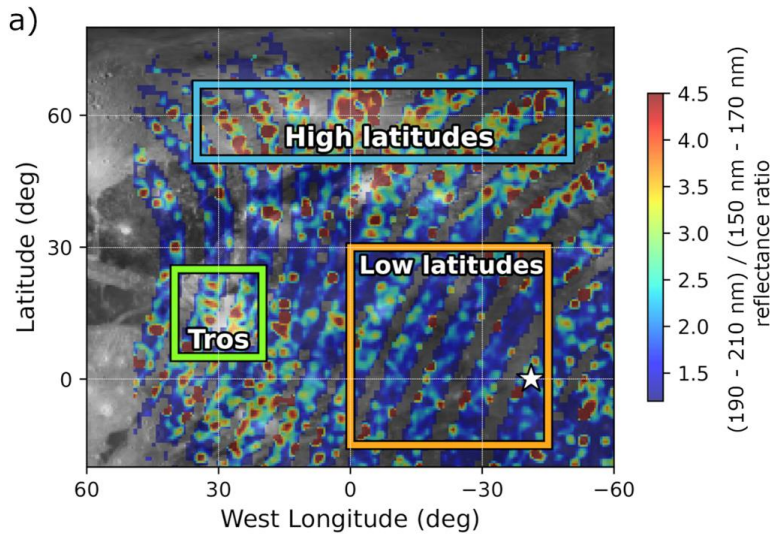


イオン (H, O種) の密度・
エネルギー分布観測



ガニメデに関する新しい知見：表面物性

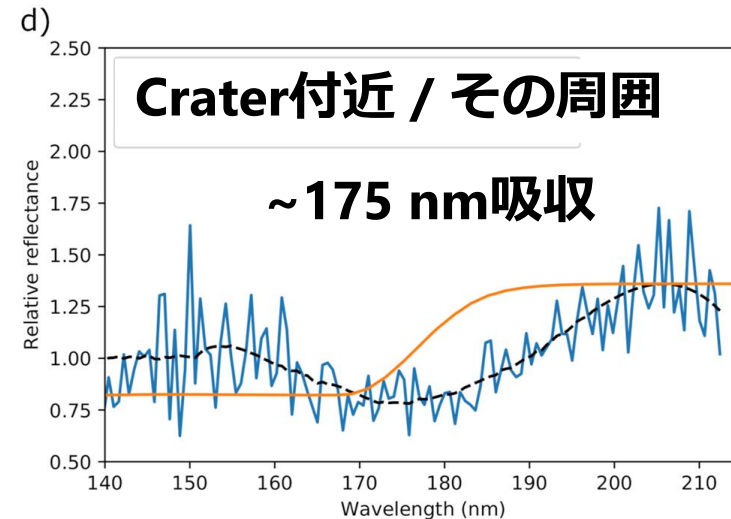
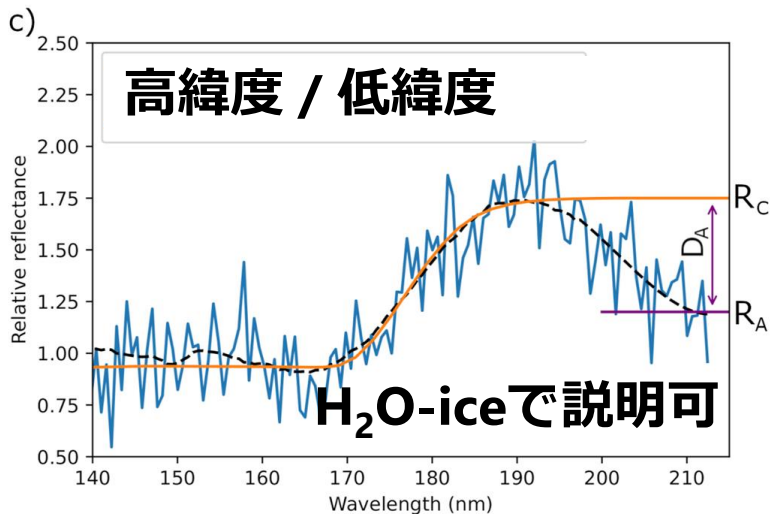
近木点付近でのUV反射スペクトル（波長・空間分解能の更新） [Molynuex+ 2022 GRL]



低緯度 (~10°N) のクレーター付近： H_2O 以外の物質 (NH_3 ?)
高緯度には O_3 分布?

高解像可視画像：
ローカルな地形情報の更新も

[Becker+ 2022 GRL; Ravine+ 2022 GRL]



他、遠方 flyby での赤外観測

[Mura+ 2010 JGR]

H_2O ice 中にトラップ CO_2
高緯度ほど H_2O -ice rich
(先行観測と整合的)

[Molynuex+ 2022 GRL]

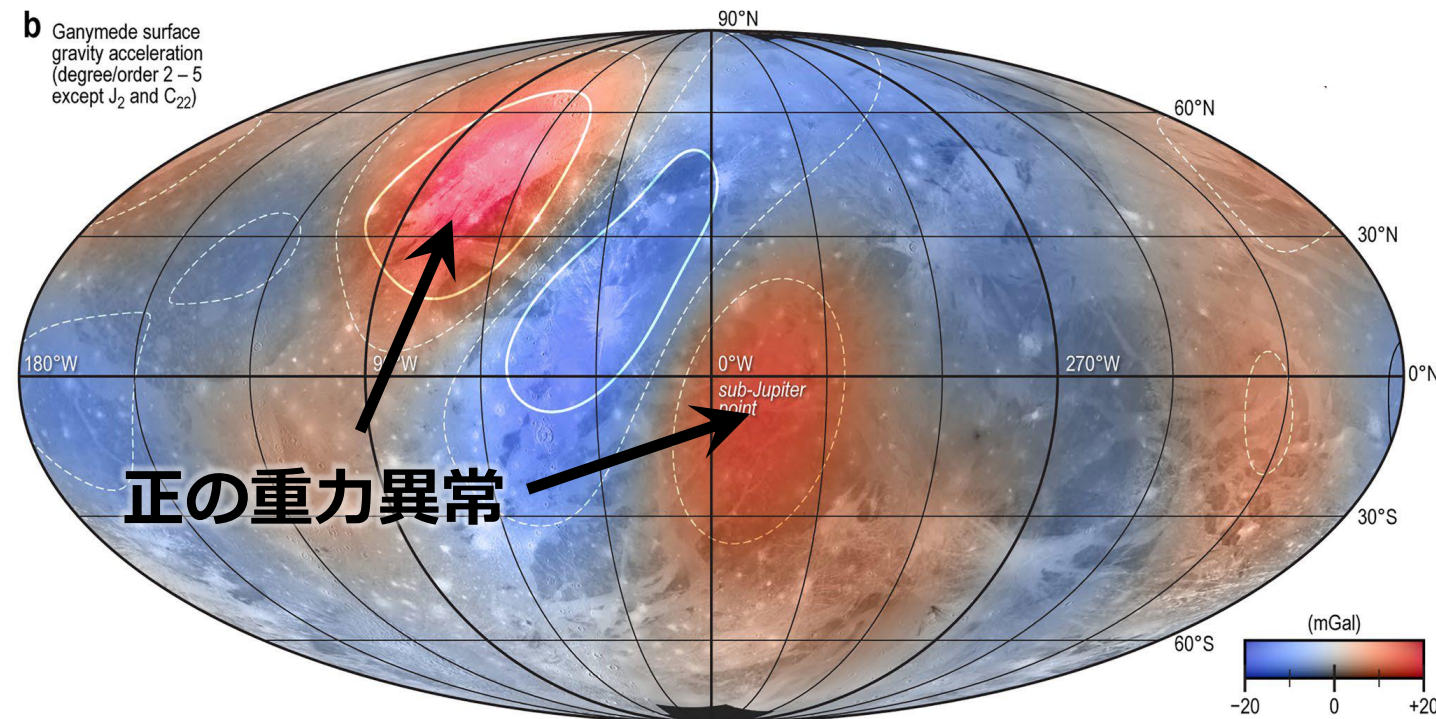
ガニメデに関する新しい知見：内部構造

- ・慣性モーメント

Galileoデータ：0.3105 [Anderson+ 1996]

Junoデータ合算：0.3159–0.3161 [Gomez-Casajus+ 2022 GRL]

- ・同サイズのタイタンと比較しても大きな重力異常，
表面をならす効果の欠如由来か（扁平度・木星方向への変形を除き評価）



正の重力異常

地下浅部(~10 km)の
マイクロ波観測も
→ 表面輝度では説明できない
反射率の空間分布
(地下のfractureの不均質性?)

[Brown+ 2022, AGU. non-published]

[Gomez-Casajus+ 2022 GRL]

エウロパに関する新しい知見

遠方flyby ($> 10^5$ km)のみpublished

- ・ 赤外観測 [Filacchione+ 2019 Icarus; Mishra+ 2021 Icarus]

低空間分解・大幅な更新は得られず (H₂O iceの粒径推定・不純物の可能性指摘)

他、以下の間接的情報が現状publish済み

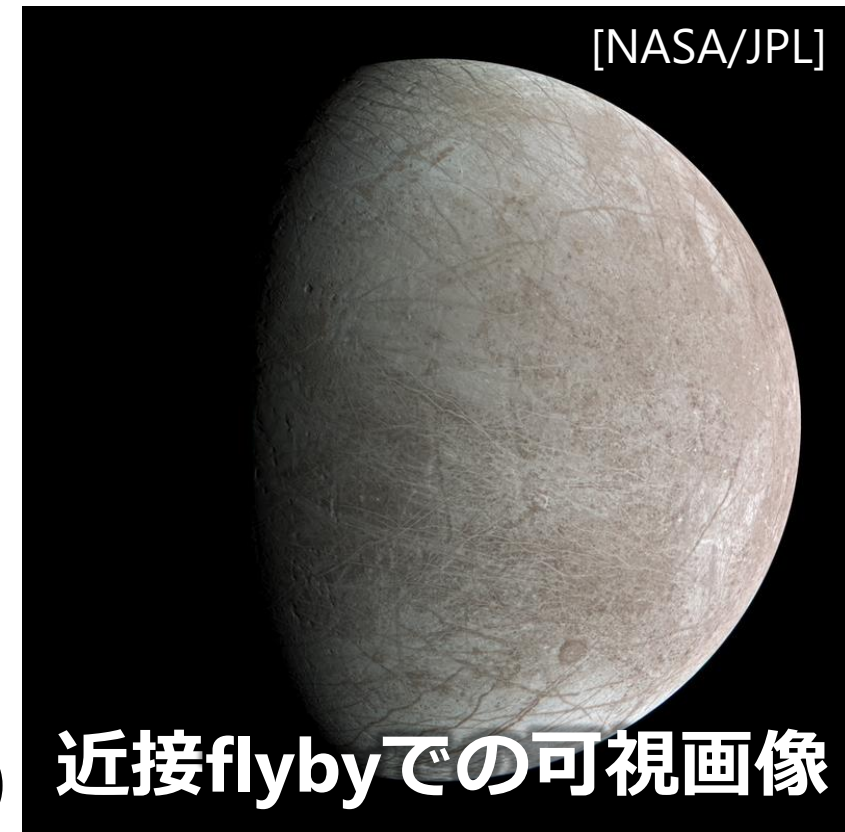
- ・ エウロパのトラスから木星へ伸びるtailでの電子エネルギー分布観測 [Allegniri+ 2022 GRL]
- ・ エウロパ由来と思われる中性H₂の環状cloud観測 (予測はされていた) [Szalay+ 2022 GRL]

近接flyby(2022/09/29, ~350 km): unpublished

これまでで最高解像度の可視画像 (~1 km/pix)

電離圏・地下浅部の初の直接観測

内部海と大規模作用の領域も含む (chaos terrain)



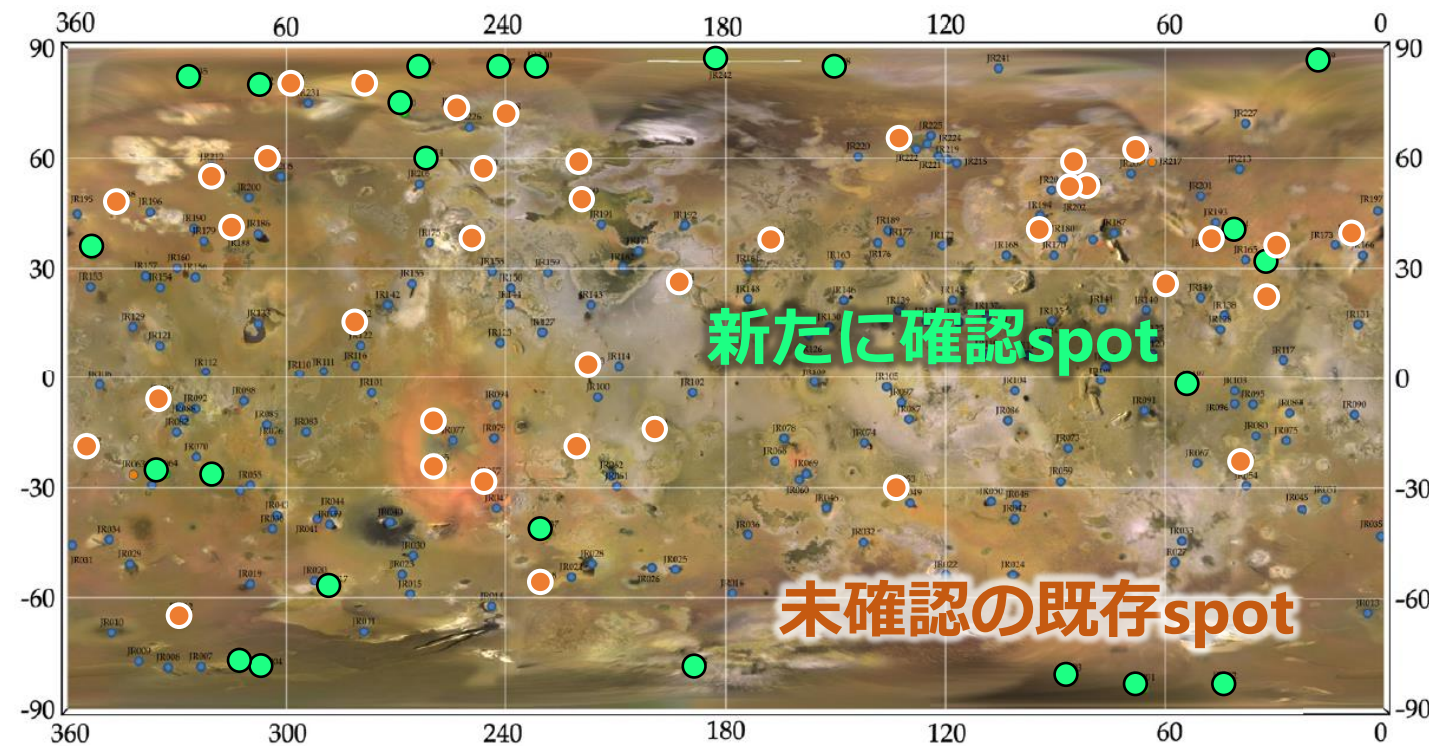
イオに関する新しい知見

イオトーラス由来のtailの木星高緯度近傍での電波/UV/プラズマ観測が主

[e.g., Hue+ 2019 JGR; Elliott+ 2021 JGR; Martos+ 2020 JGR; Phipps+ 2021 JGR]

表面の赤外観測 [Mura+ 2020 Icarus; Tosi+ 2020 JGR; Review的にZambon+ 2023 GRL]

- 火山/hot spot分布
極域に複数の新規spot発見
既存のspotの未確認も
→火山活動の経時変化か
- 反射スペクトル
SO₂ (同位体組成も),
Cl-S化合物 (ClSO₂, Cl₂SO₂)
tholin, nitrileらしき吸収
ピーク?

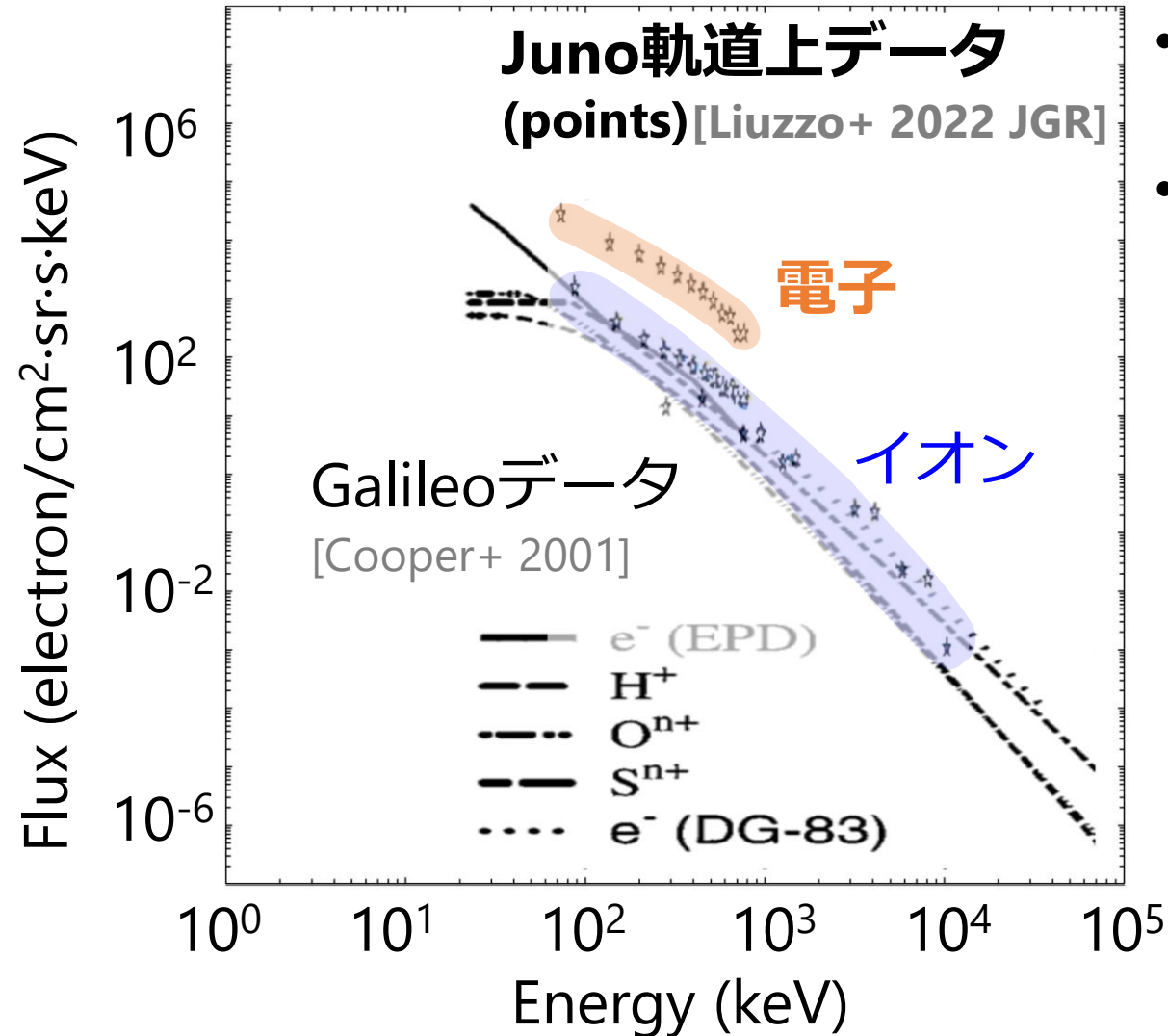


[Zambon+ 2023 GRL]

カリストに関する新しい知見

近接flybyは予定も含め無し
軌道上の電子・イオンデータは取得

[e.g., Kim+ 2020 JGR; Liuzzo+ 2022 JGR]



- 電子は先行データより 1 桁程度高い?
(同様の傾向はガニメデでも [Paranicas+ 2021])
- 他イオン種は先行と同程度か

低エネルギー帯 (<10 keV),
他のイオン種 (e.g., S⁺~S³⁺, Na⁺)
データも今後の解析で使用可能か

[e.g., Kim+ 2020 JGR]

衛星大気で赤外により一時的にCO₂検出?

[Mura+ 2022 AGU. unpublished]

現状、衛星本体は先行観測の方が豊富

[e.g., HSTによるHコロナ検出; Roth+ 2017 JGR]

まとめ・今後ありうる動き

ガニメデ

近接flyby [Review的論文 Hansen+ 2022 GRL]

磁気圏：境界・表面との接続部の定量的制約

[Clark+ 2022 GRL; Greathouse+ 2022 GRL; Ebert+ 2022 GRL; Duling+ 2022 GRL; 他GRL複数]

電離圏：初の直接観測 [e.g., Buccino+ 2022 GRL; Valek+ 2022 GRL]

表面：地形情報 [Becker+ 2022 GRL; Ravine+ 2022 GRL], 不純物 (NH₃?) [Molynuex+ 2022 GRL]

内部：慣性モーメントの下方修正 [Gomez-Casajus+ 2022 GRL]

三衛星は間接・遠方flyby

エウロパ：トーラス観測 [e.g., Szalay+ 2022 GRL], 近接flybyデータ公開予定

イオ： トーラス, 木星へのtail観測、 火山/hot spot更新
[e.g., Elliott+ 2021 JGR; Phipps+ 2021 JGR] [e.g., Tosi+ 2020 JGR; Zambon+ 2023 GRL]
(2024年以降には近接flybyデータ更新予定)

カリスト：現状では先行データ優勢, 軌道上データ更新 [e.g., Liuzzo+ 2022 JGR]