

惑星系観測の観点からの SKAへの期待

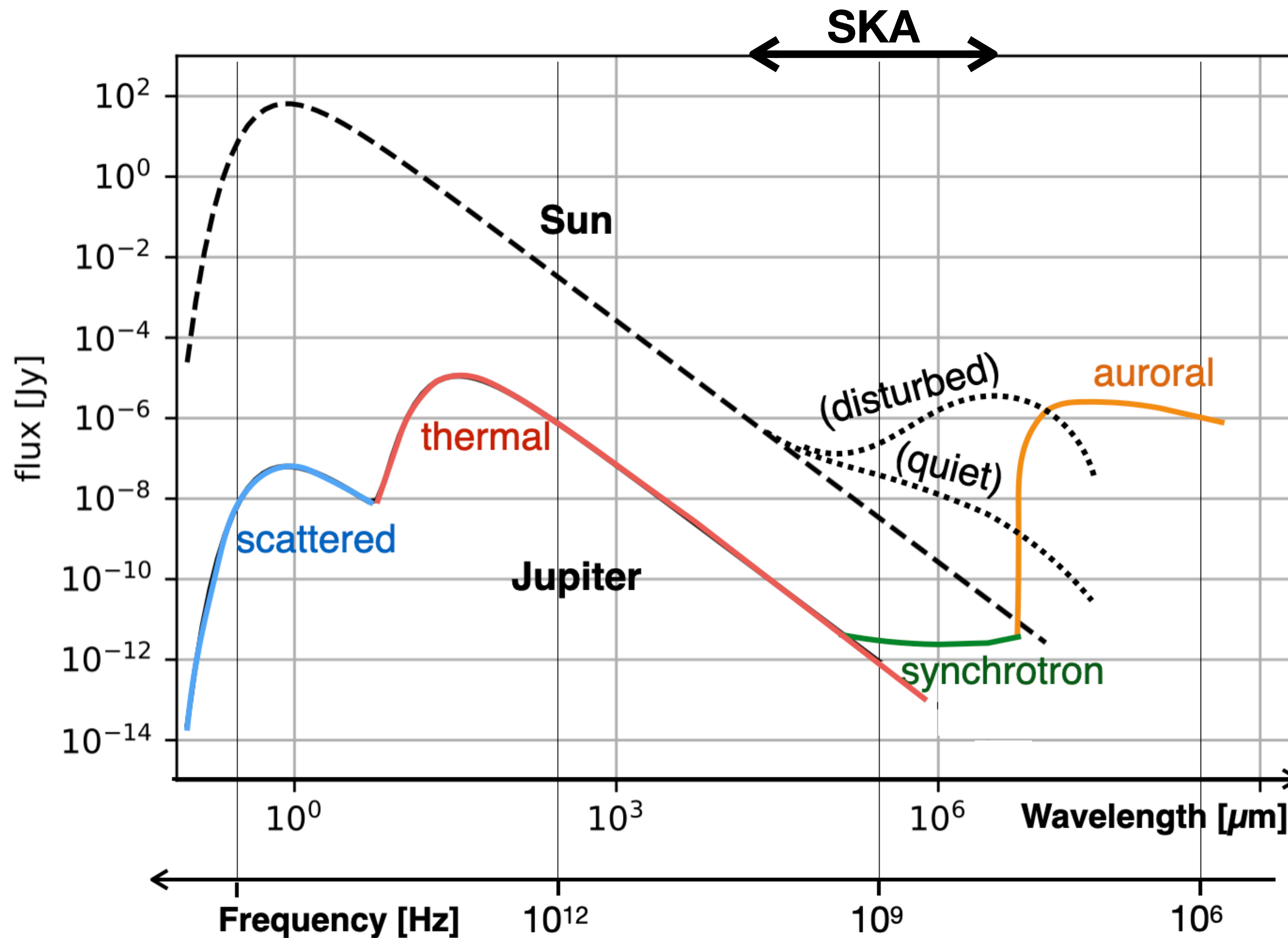
SKA-JP 惑星班

藤井友香 (国立天文台), 高橋慶太郎 (熊本大), 木村智樹 (東北大), 北元 (JAXA/ISAS), 土屋史紀 (東北大), 佐川英夫 (京都産業大学), 岩井一正 (名古屋大学), 中川広務 (東北大学), 前澤裕之 (大阪府立大学), 廣田朋也 (国立天文台), 三澤浩昭 (東北大), 笠羽康正 (東北大), 潮平雄太 (熊本大), 赤木晋 (熊本大), 寺田由佳 (NTU)

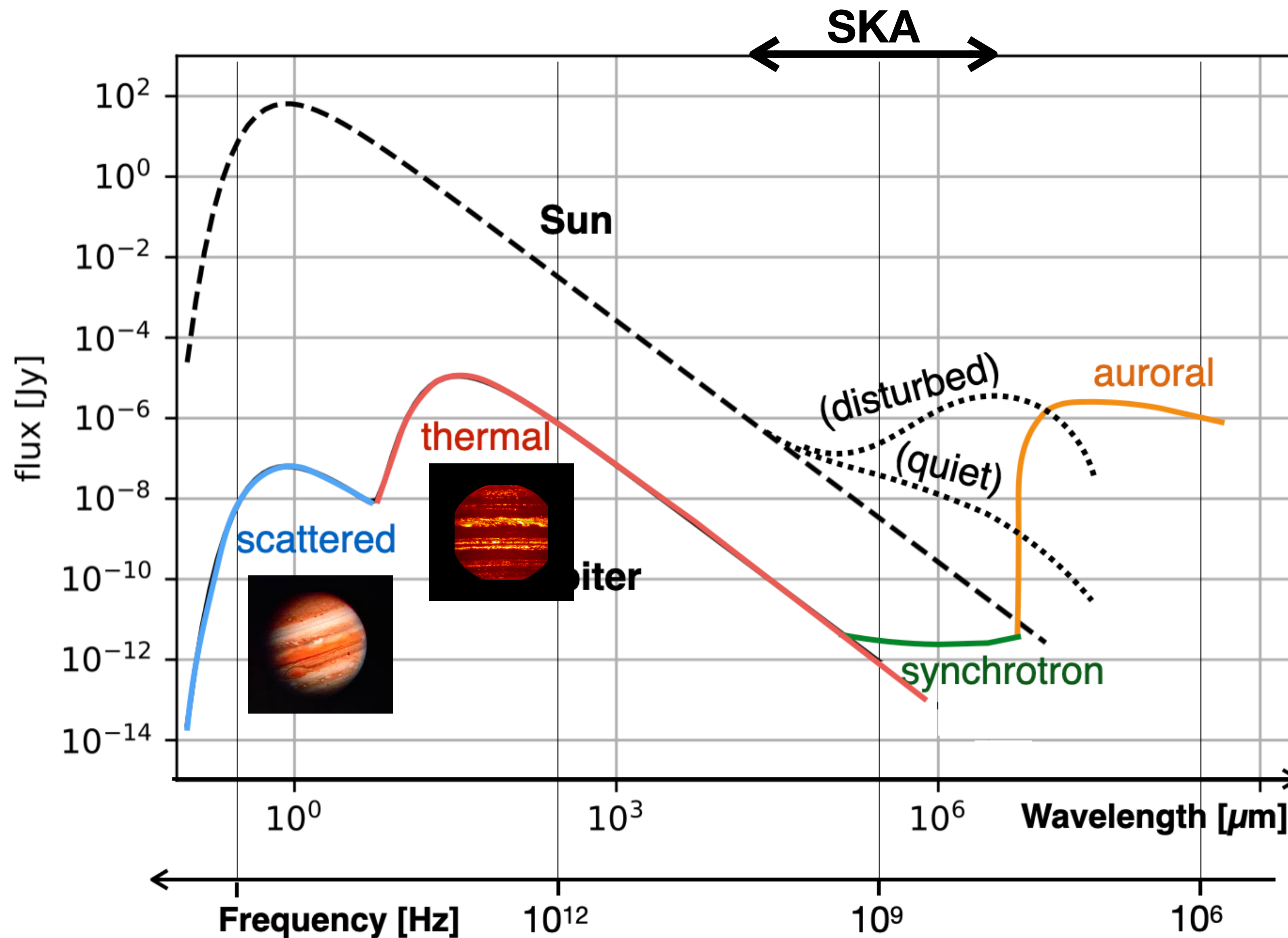
一推しサイエンス

非熱的放射で見る惑星系：恒星-惑星-衛星のカップリング

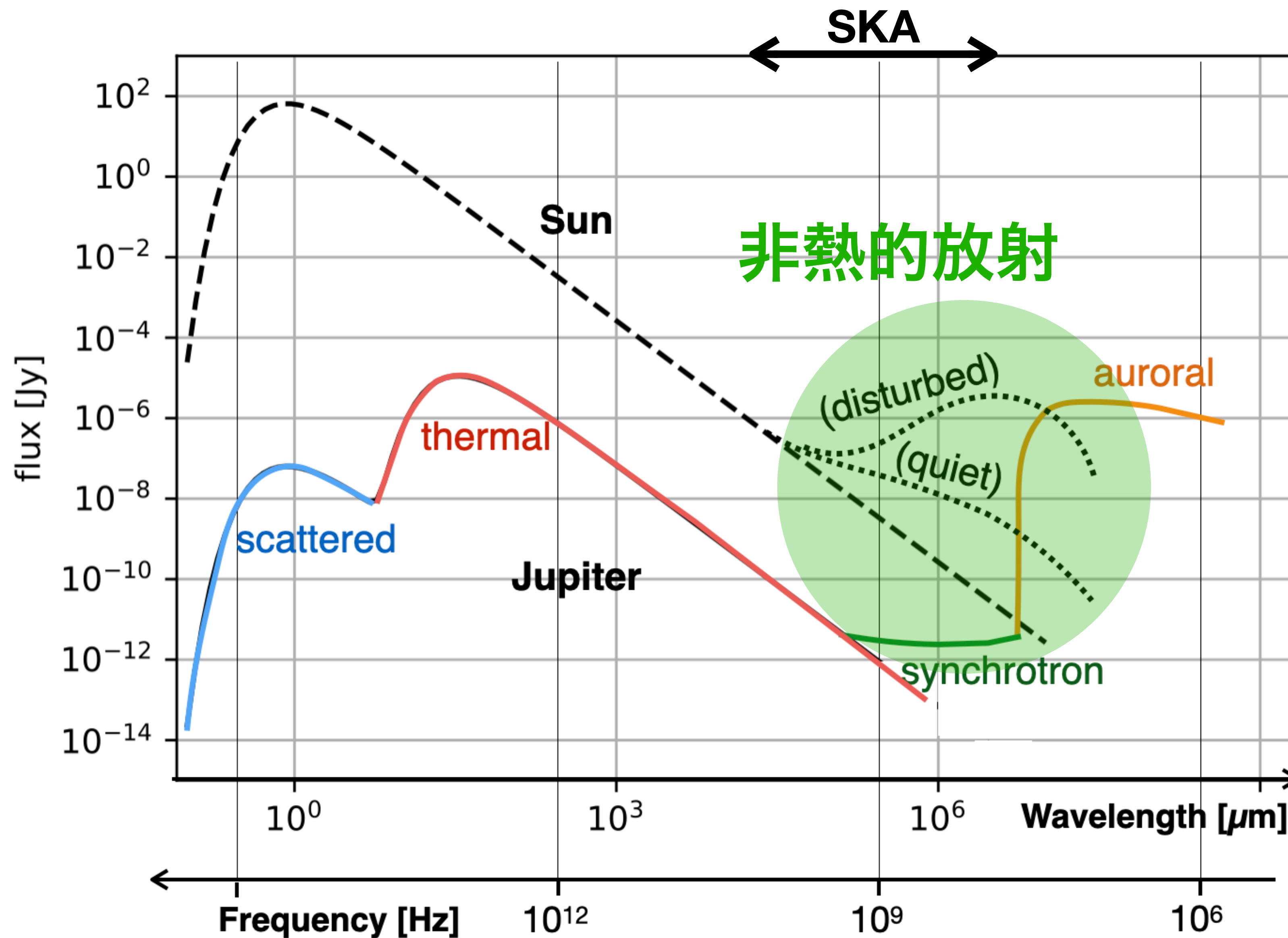
低周波電波で見る惑星系



低周波電波で見る惑星系

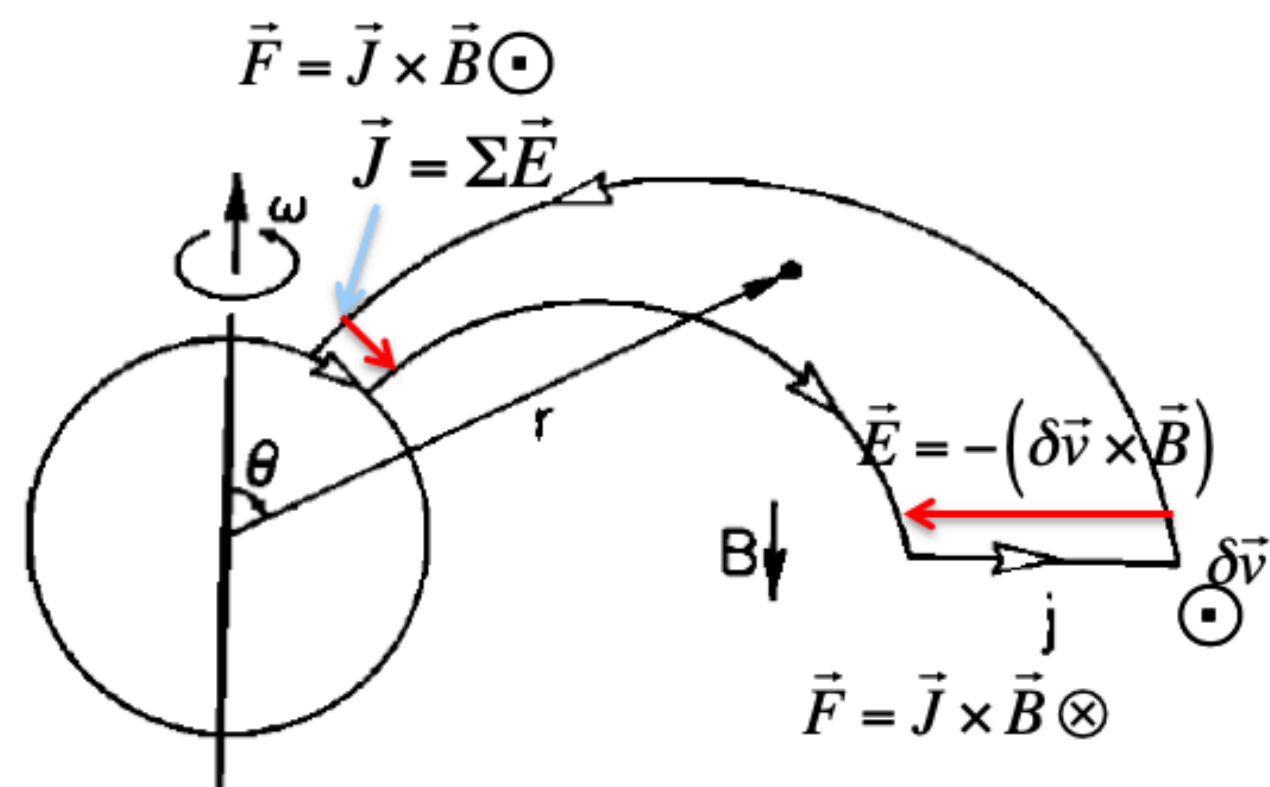


低周波電波で見る惑星系



惑星（木星）の電波放射機構：オーロラ電波放射

Hill電流系の概念図 Hill (1979)



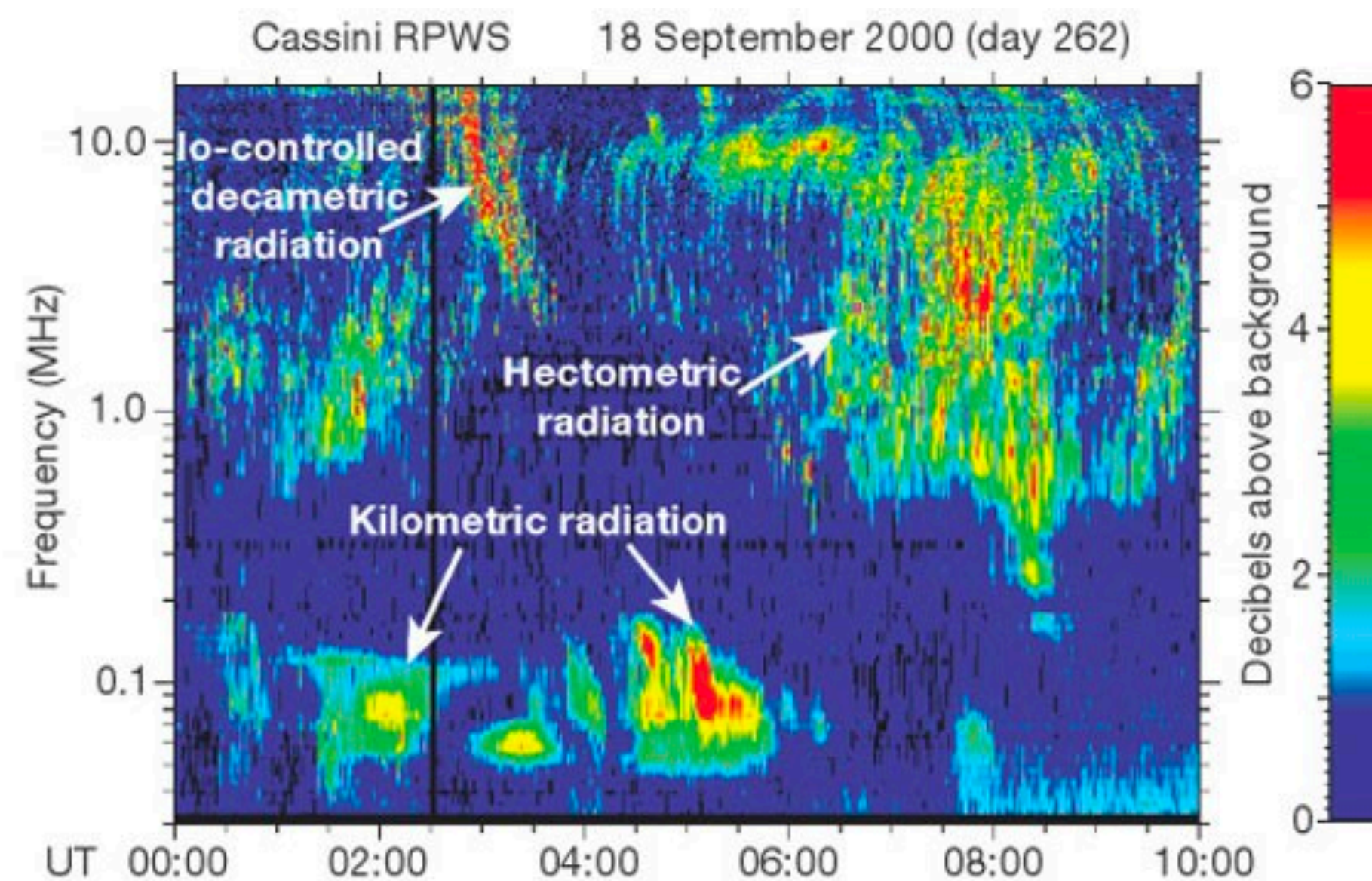
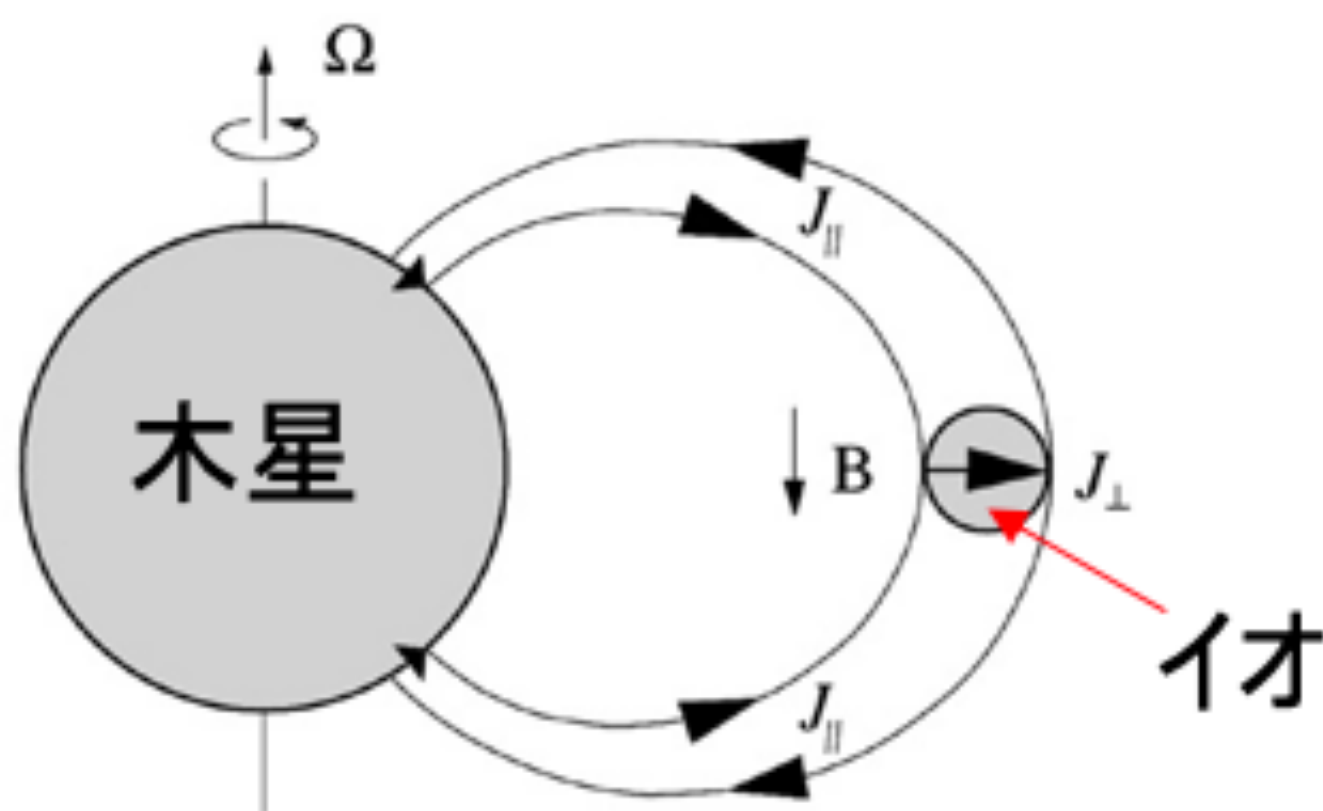
木星電離圏⇔磁気圏⇔衛星からのプラズマ（または衛星の電離圏）とのカップリングによる電流系の形成

=> プラズマ加速・木星電離圏へのオーロラ粒子の降下

=> Cyclotron Maser Instability e.g., Wu & Lee (1979), Kimura+ (2011a, 2011b)

=> おおよそその場のサイクロトロン周波数で電波放射

イオ-木星電流系の概念図 Thomas+ (2004)



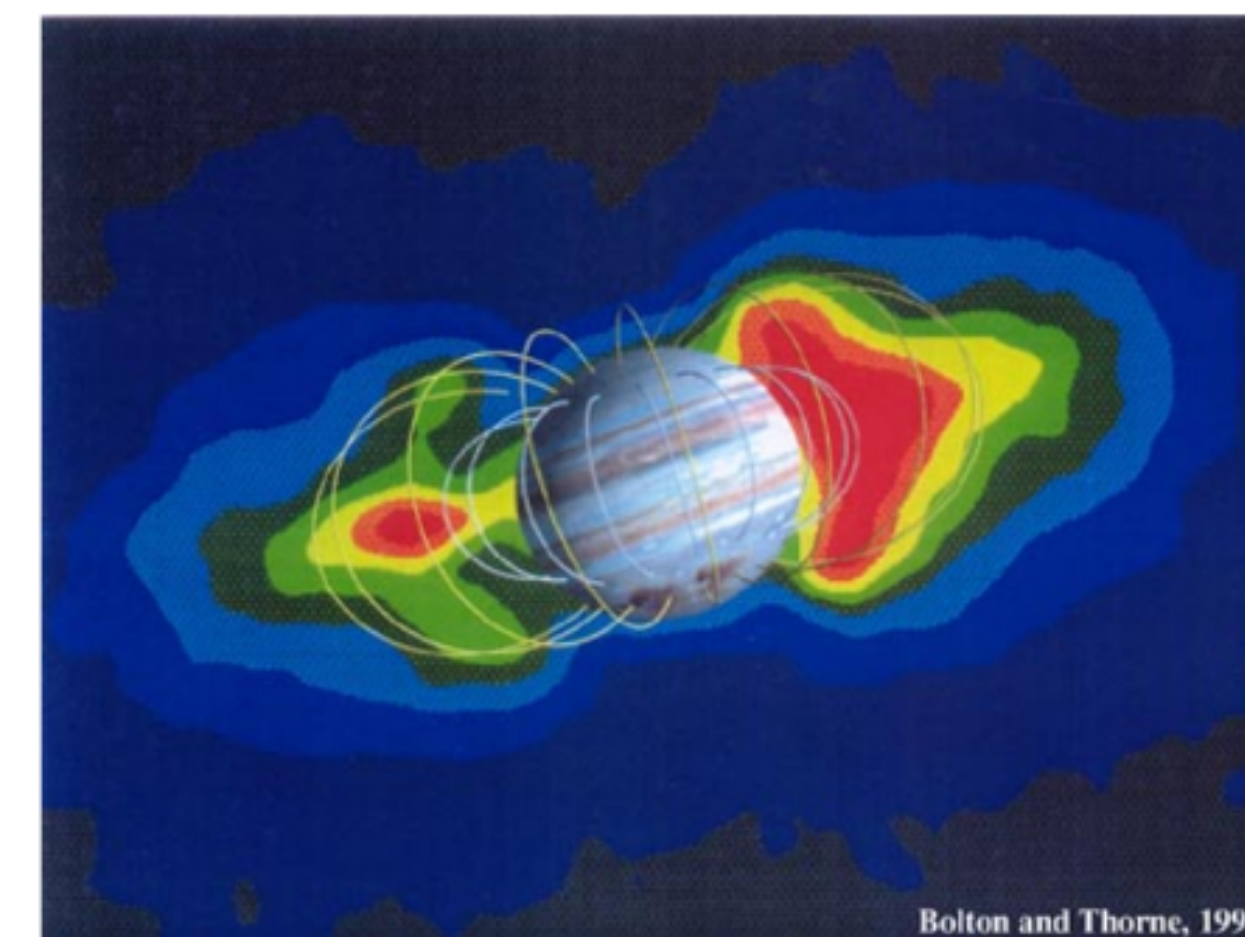
- ✓ 強い異方性
- ✓ 惑星の自転や衛星の公転に応じた時間変化
- ✓ 円偏光

※ 地球型：太陽風駆動型

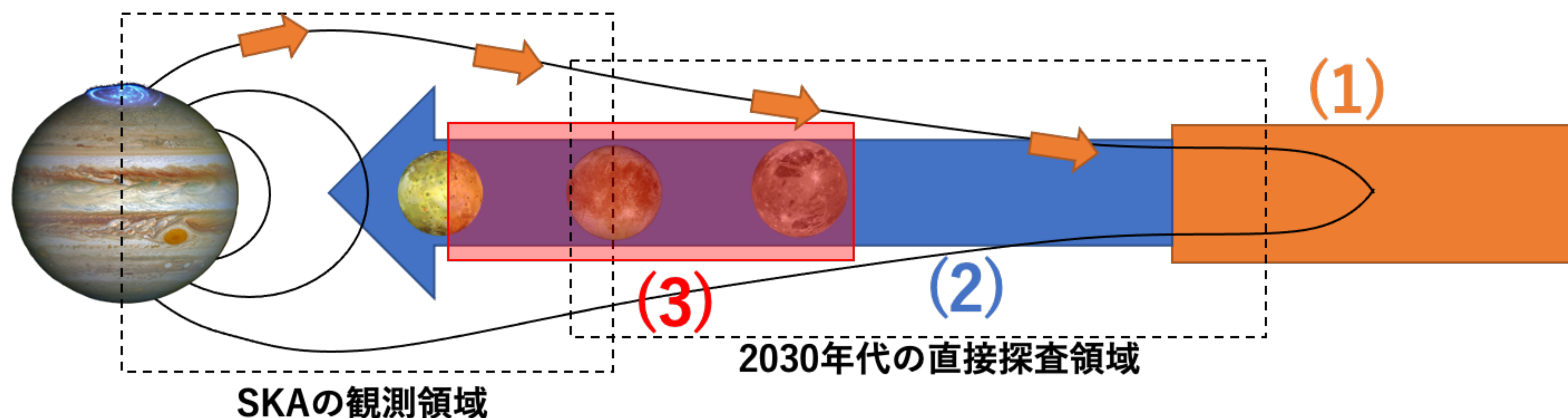
惑星の電波放射機構：シンクロトロン放射

加速過程

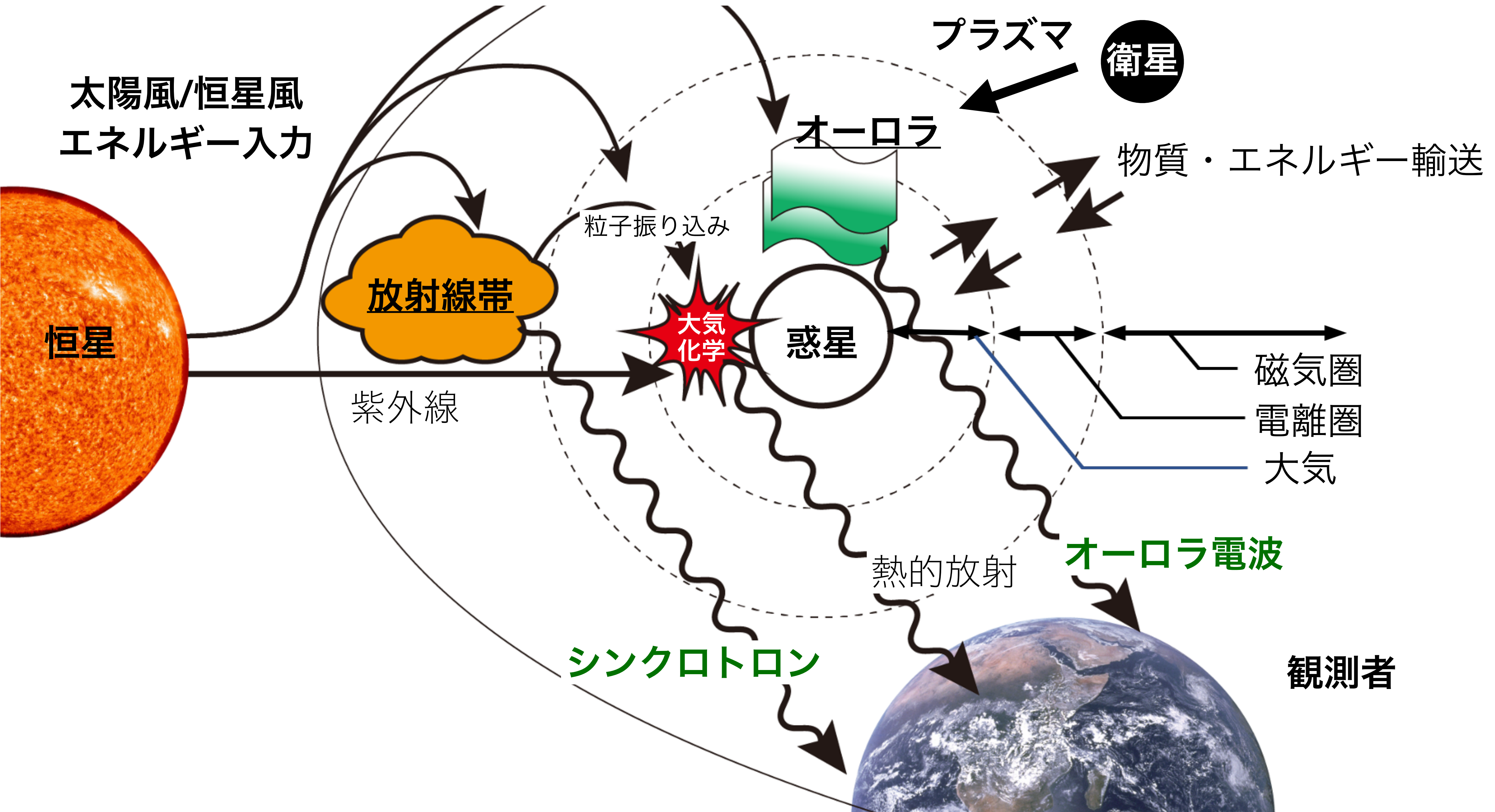
- (1) 外部磁気圏における「Pre-heating」：オーロラに伴う粒子加速と関係
- (2) 外側から内側への輸送によるベータトロン加速（断熱過程： $\mu=W/B$ ）
- (3) 磁気圏内部での加速（非断熱過程）



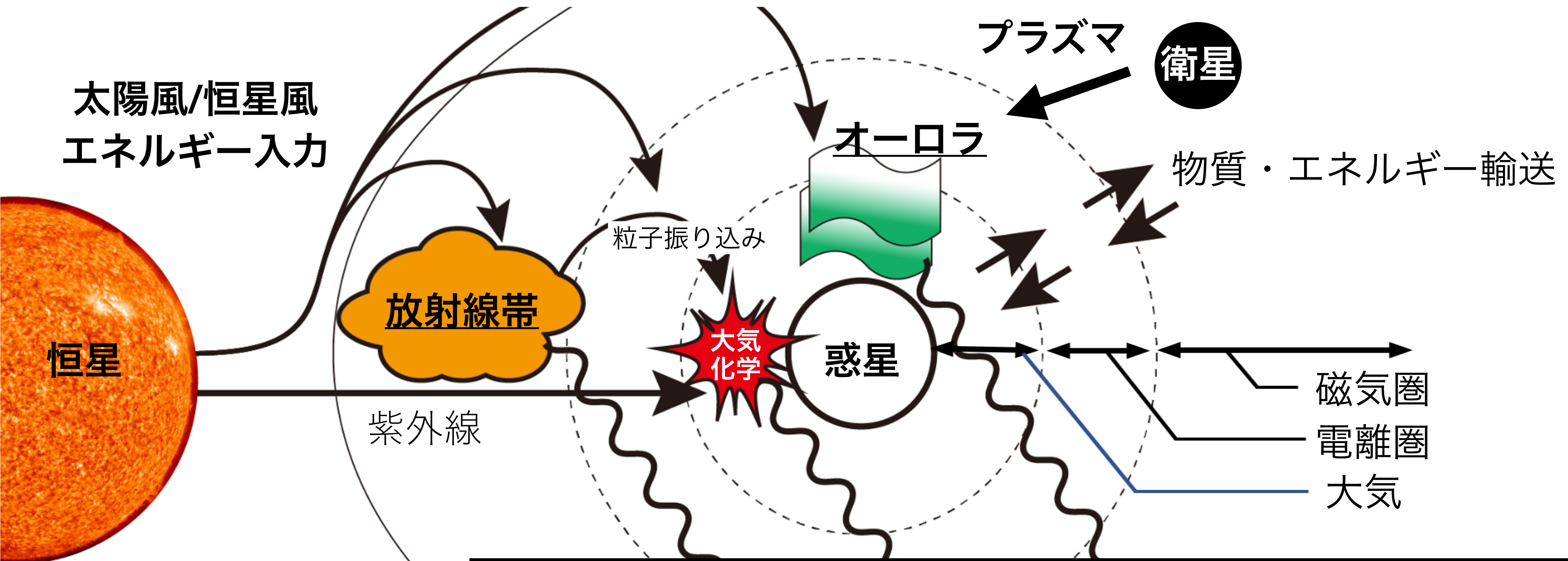
放射線帯の高エネルギー電子より放射されるシンクロトロン放射（VLA）



なぜ非熱的放射を見たいのか



なぜ非熱的放射を見たいのか



- ✓ 非熱的放射は惑星磁気圏における粒子加速に起因
- ✓ 惑星磁気圏で恒星風—磁気圏—衛星はカップルしており、物質・エネルギー輸送で下層大気にも影響

一推しサイエンス

非熱的放射で見る惑星系：恒星-惑星-衛星のカップリング

惑星磁気圏では、恒星風や衛星からのプラズマとの相互作用により、シンクロトロン放射・オーロラ電波放射といった非熱的な電波放射を生じており、大気圏とも相互に影響している。

“惑星圏”の外部と内部を繋ぐこれらのプロセスの詳細を、SKAによる恒星風や惑星電波放射の高感度観測で探る。

太陽系内惑星でプロセスの詳細を探るとともに、太陽系外惑星からもこれらの非熱的電波放射を検出することで広い惑星パラメータスペースの中での多様性・普遍性を探る。

SKAで迫る問題（太陽系内惑星の視点から）

■ 木星オーロラ粒子の加速機構の同定

オーロラ粒子の加速機構：Alfven波 v.s. 静電場加速

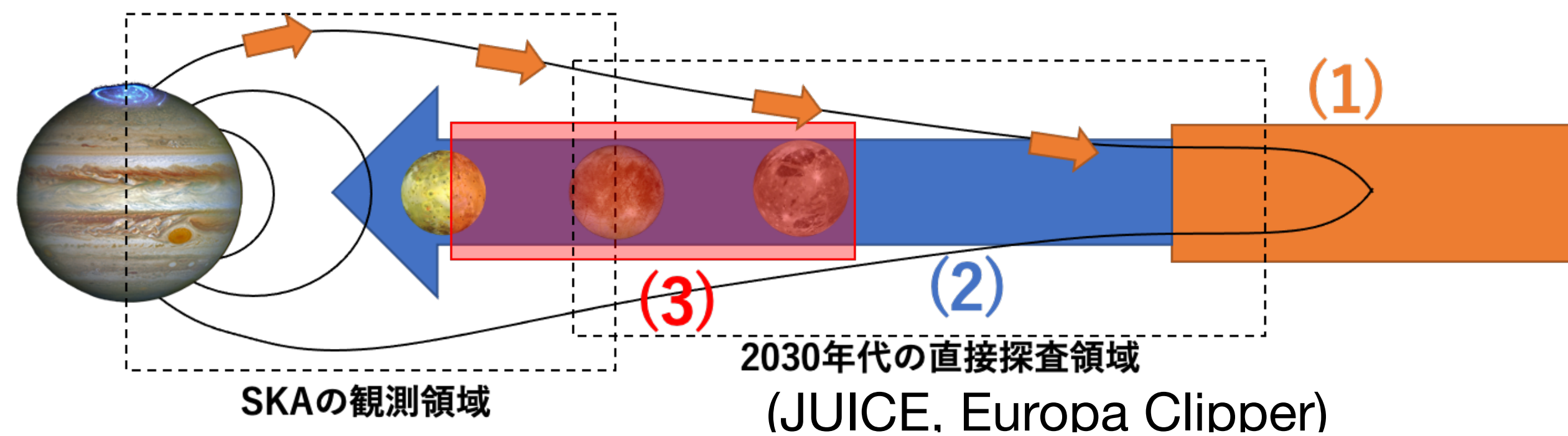
巨大惑星系だと静電場加速だと思われていたが、最近のJUNOのその場観測によって、Alfven波による加速の方がむしろ優勢であることが分かってきた

➡ SKA-2でだと大局的な時空間構造を分解 → 波状の構造まで見られるか

※ただし、SKAの観測周波数は50 MHz（木星のオーロラ電波のほとんどは < 30 MHz）で、SKAでは局所的な強磁場上のオーロラ電波のみ検出可能

SKAで迫る問題 (太陽系内惑星の視点から)

■ 木星の放射帯の電子の加速機構の全貌解明



(1) Pre-heating

(2) ベータトロン加速

(3) 磁気圏内部での加速 (非断熱過程)

(1) : Junoで発見されたPre-heatingが放射線帯の形成に寄与している？

➡ SKAによる広い領域でのシンクロトロン空間分布と、その場観測による pre-heating 領域の観測との同時観測により検証

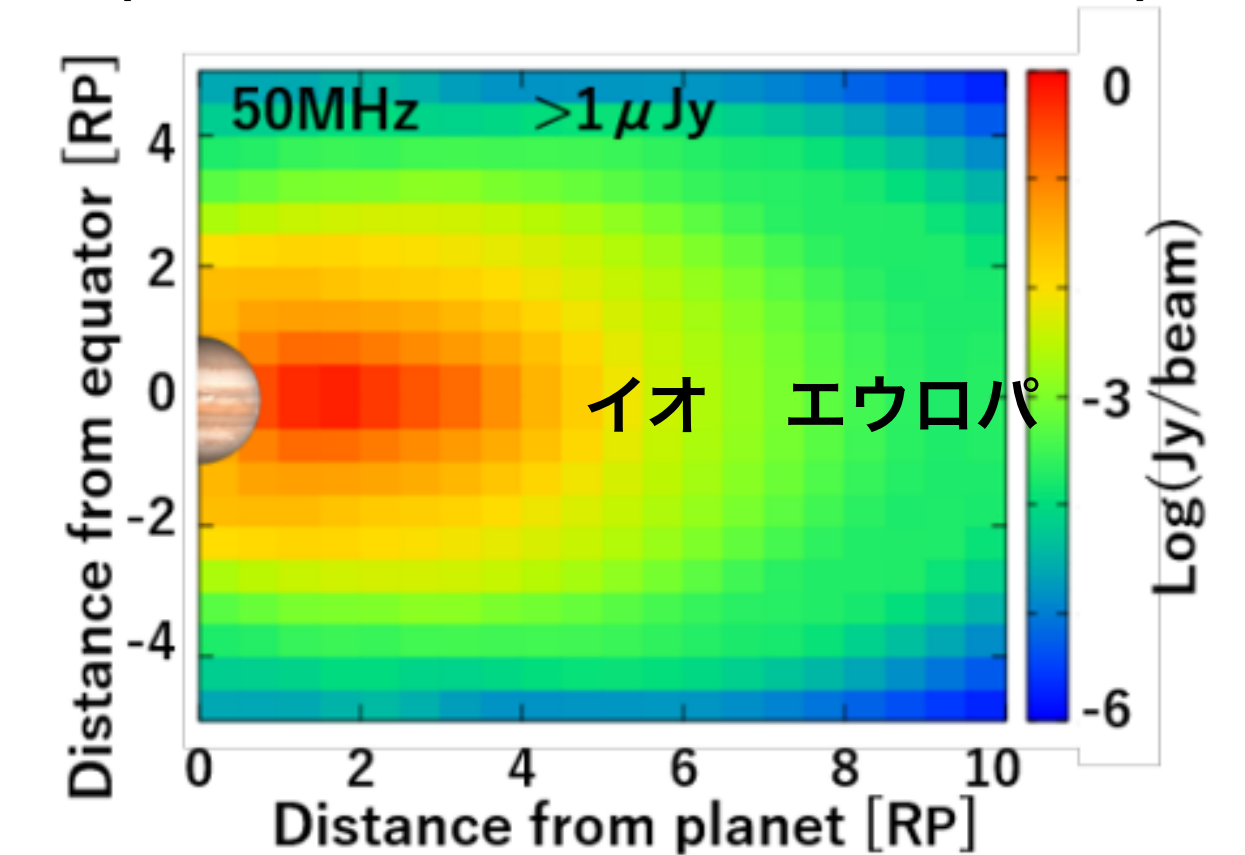
(2) : 粒子を内側へ輸送するのに必要な電磁場の変動メカニズムは？

➡ シンクロトロン放射の動径方向の空間分布の時間変化が起こるタイミングを観測し、原因を探る (例：太陽風が強くなる時)

(3) : この加速過程は実際木星でどのくらい強く働いているのか？

➡ この領域のシンクロトロン放射のスペクトルを調べる

↓ SKAによるシンクロトロン放射の観測の見積もり (SKA-JPサイエンスブックより)



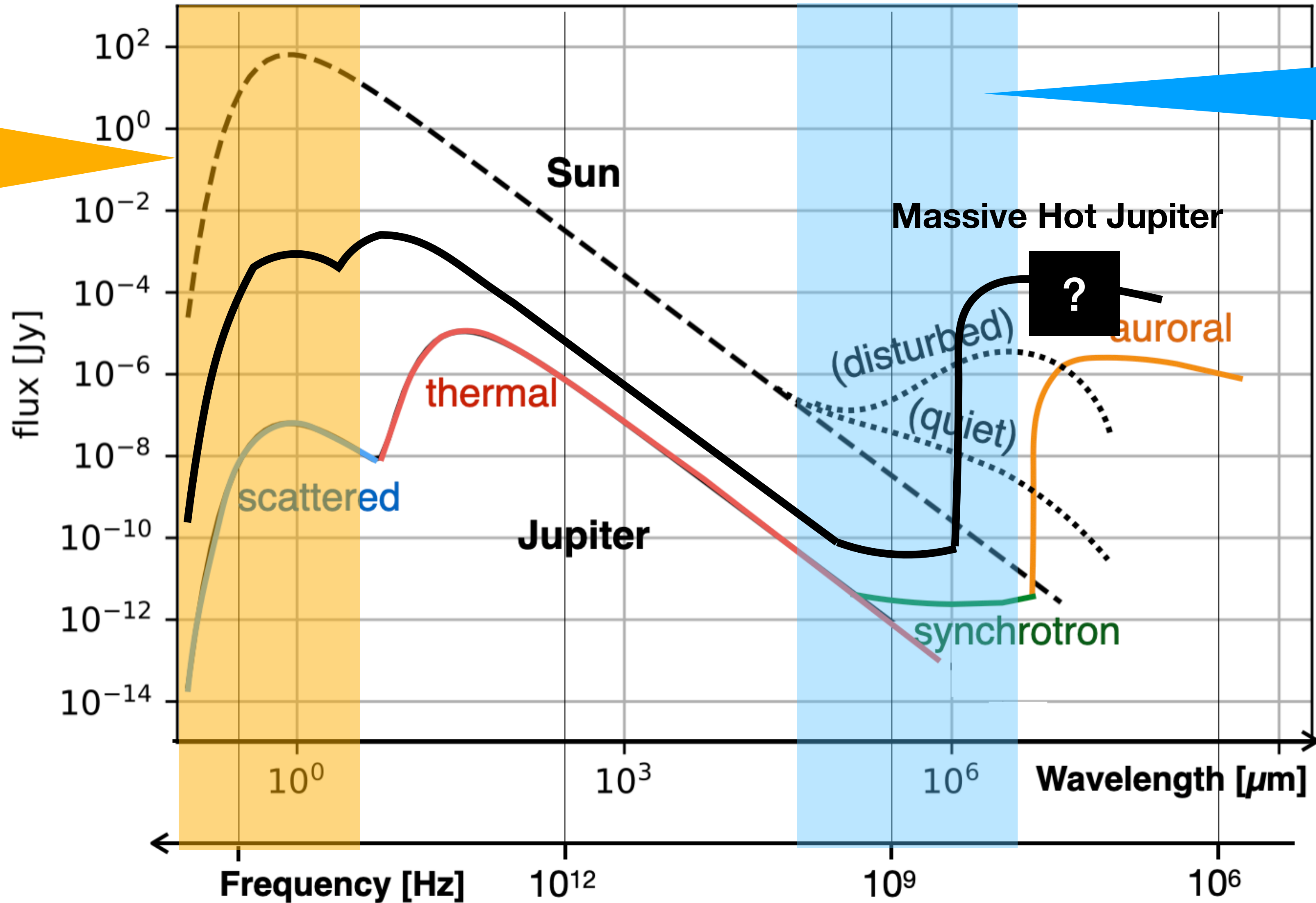
■ 土星の放射帯？

系外惑星への展開：惑星からのオーロラ電波

現在
行われている
観測の
ほとんど

(紫外透過光)
上層大気
(可視-赤外)
下層大気

主星光が
大きなノイズ源



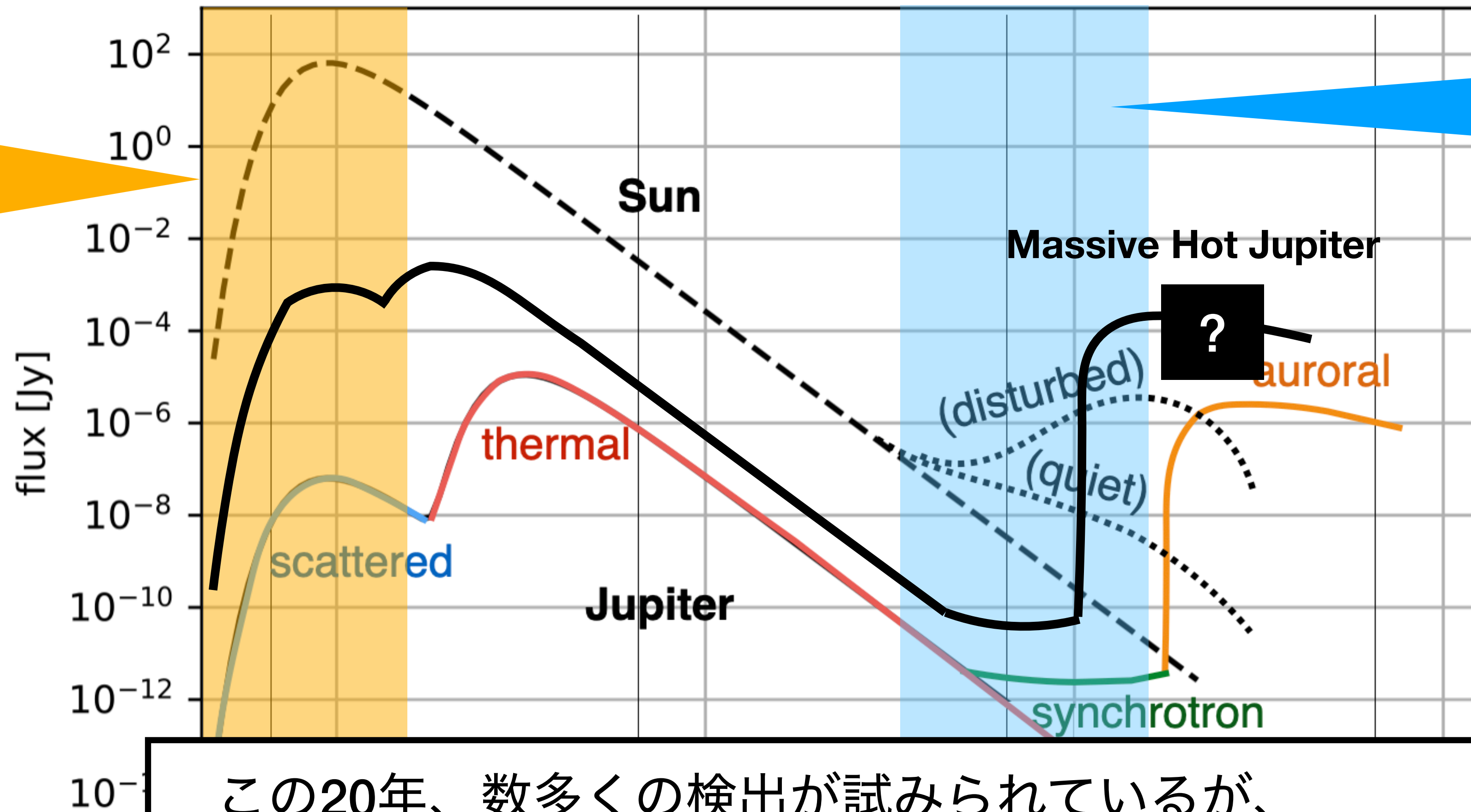
SKA

磁場
磁気圏プラズマ

系外惑星への展開：惑星からのオーロラ電波

現在
行われている
観測の
ほとんど

(紫外透過光)
上層大気
(可視-赤外)
下層大気
主星光が
大きなノイズ源



SKA

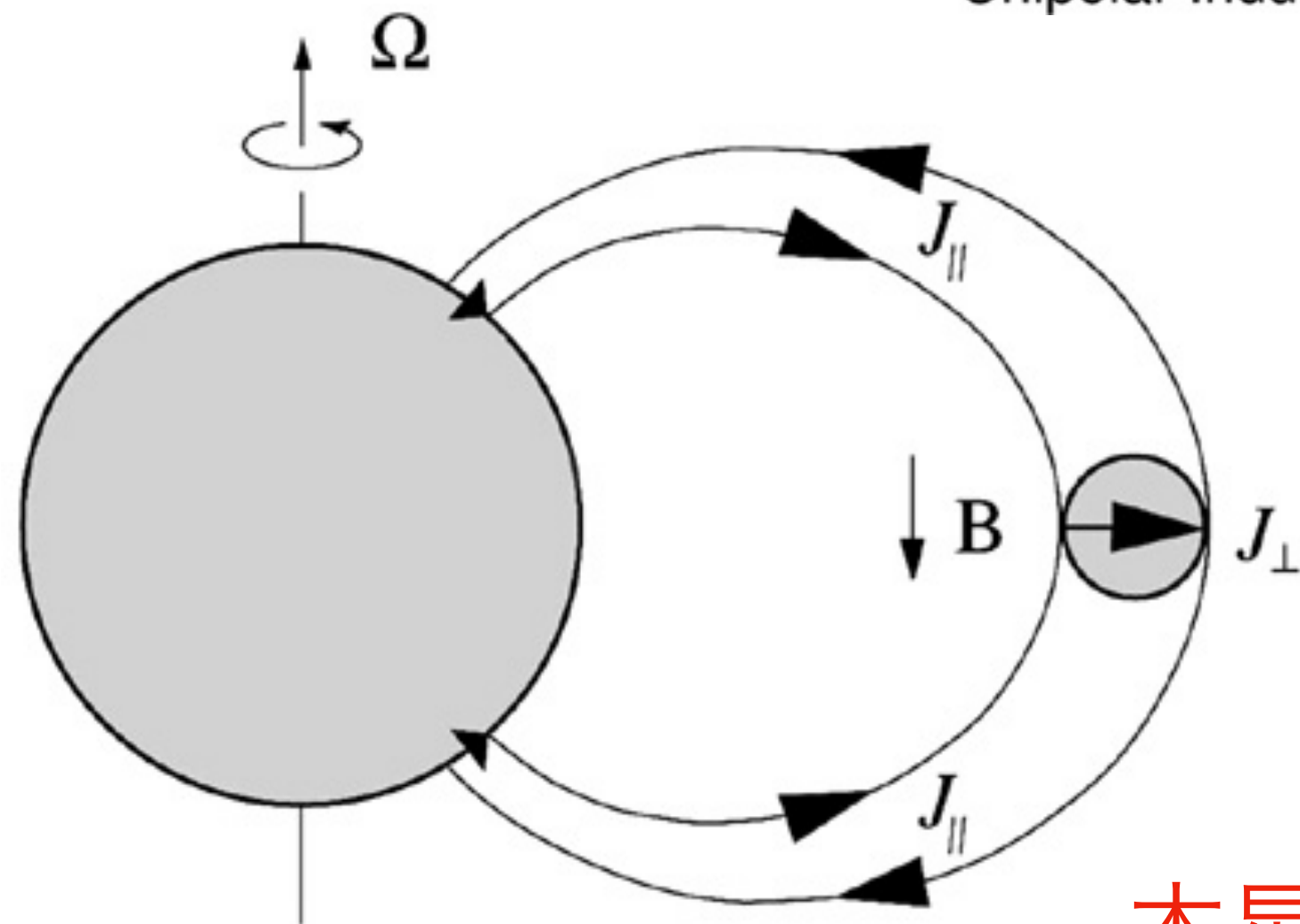
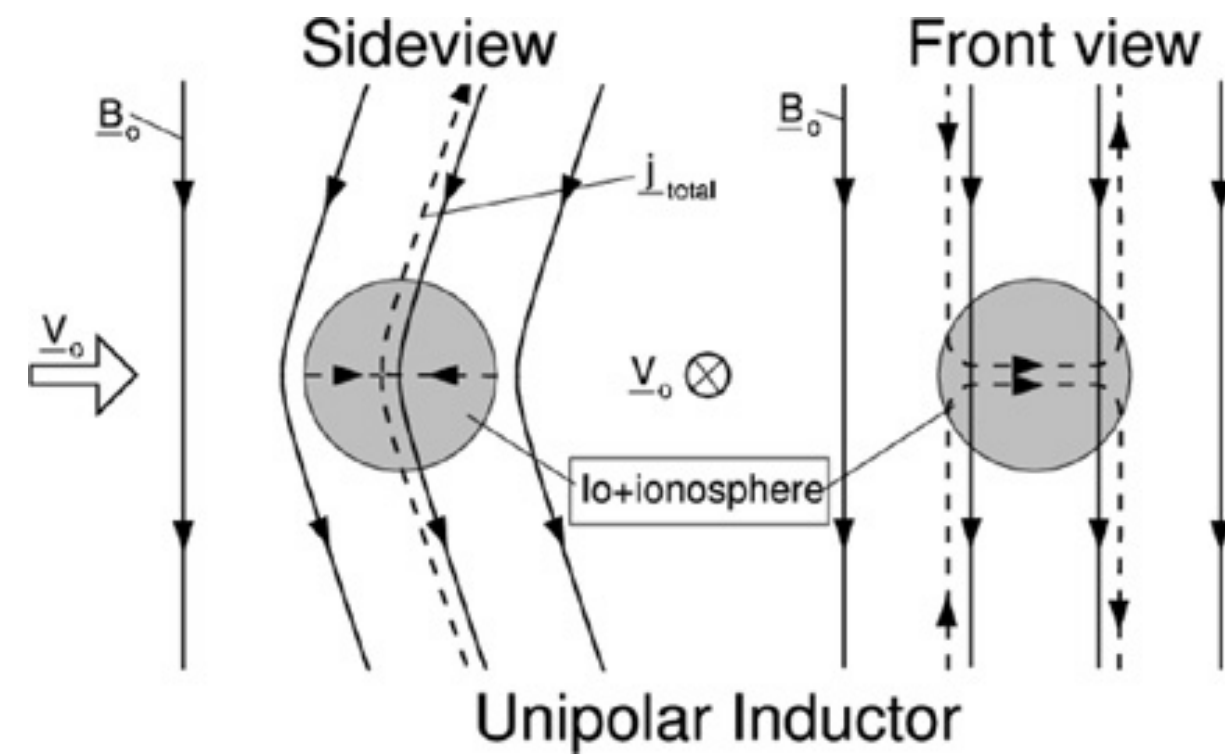
磁場
磁気圏プラズマ

この20年、数多くの検出が試みられているが、
「系外惑星から」のオーロラ電波のロバストな検出はない
Upper limit: $\sim 0.1 \text{ mJy} @ 500 \text{ MHz}$, $\sim 1 \text{ mJy} @ 150 \text{ MHz}$ => 感度向上が必要

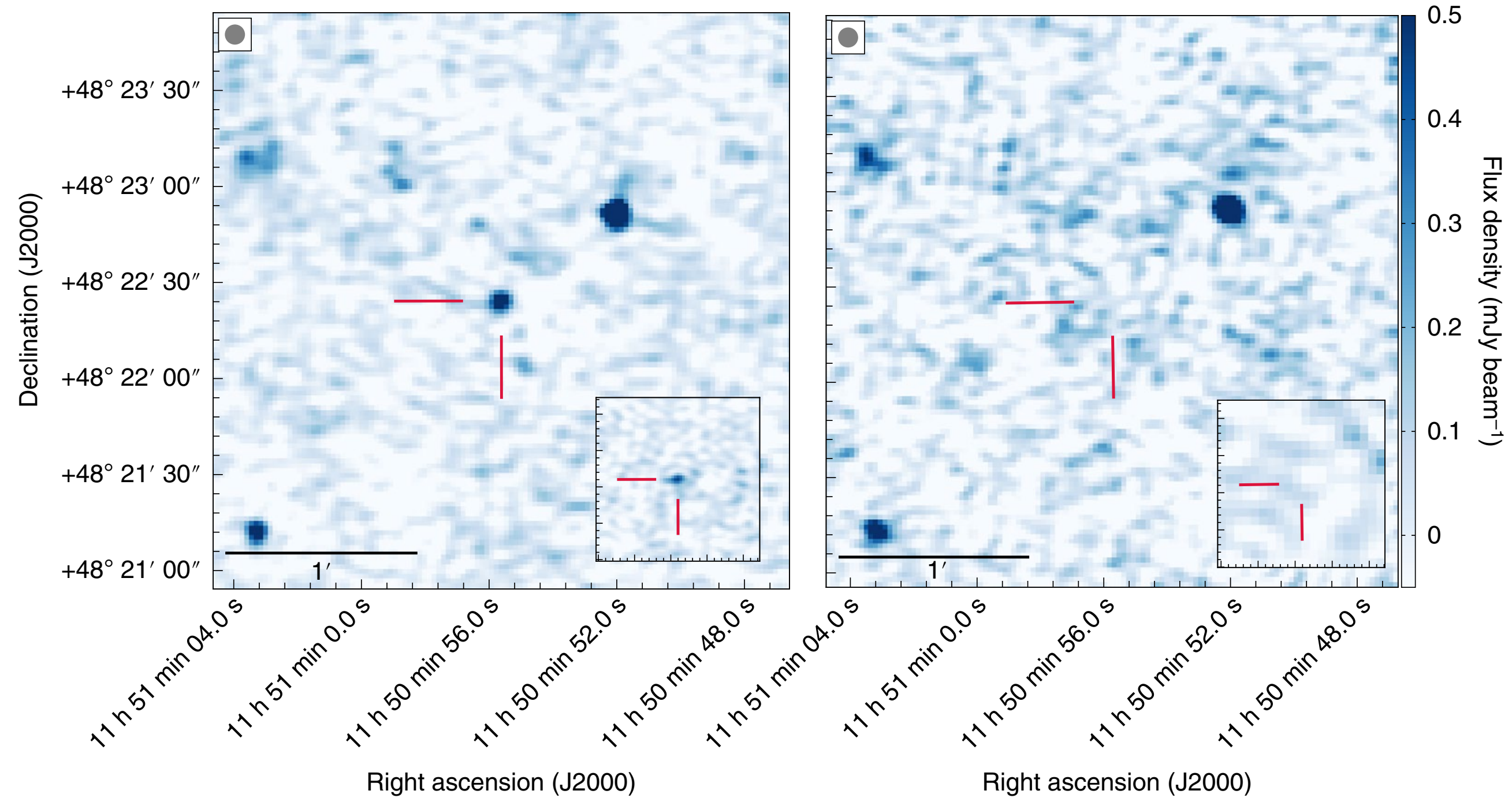
系外惑星への展開：惑星による主星からのオーロラ電波？

Vedantham+ (2020)

inactiveなM型星GJ 1151で時間変化する円偏光電波の検出
→木星-イオのスケールアップバージョン？



木星-イオ
主星-close-in exoplanets



理論モデル: e.g. Turnpenney+ (2018)

SKAで迫りたい問題 (太陽系外惑星の視点から)

■ SKAのオーロラ電波観測で多様な系外惑星の磁場強度の直接的な測定

→ 惑星磁場のスケーリング、オーロラ電波のスケーリング、衛星の存在への制限

系外惑星の磁場強度は、現在一部の天体で間接的な方法でしか見積もられていない。衛星の検出は困難。
オーロラ電波はより直接的な磁場測定の方法。

既存の望遠鏡では、系外惑星オーロラ電波のロバストな検出はない

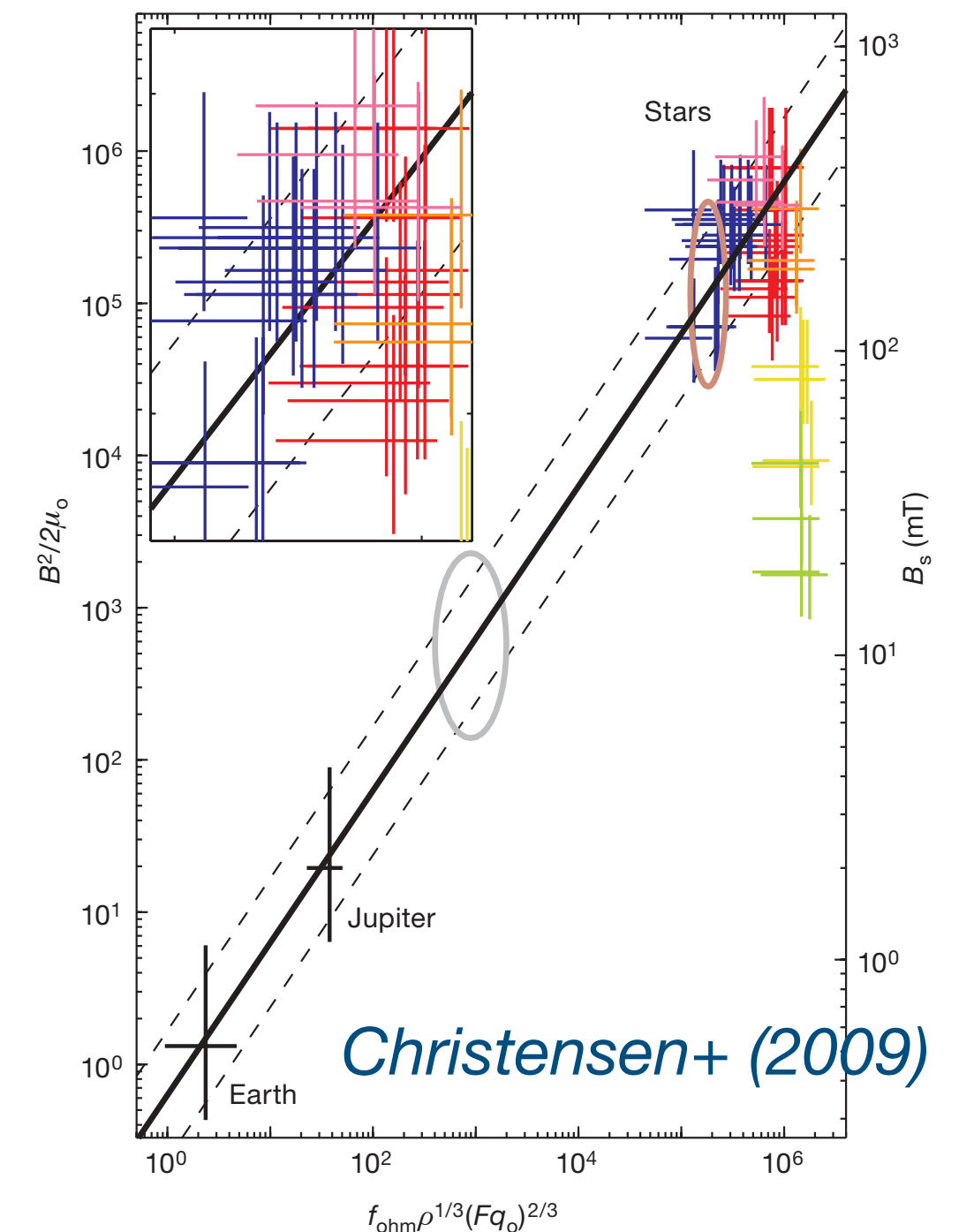
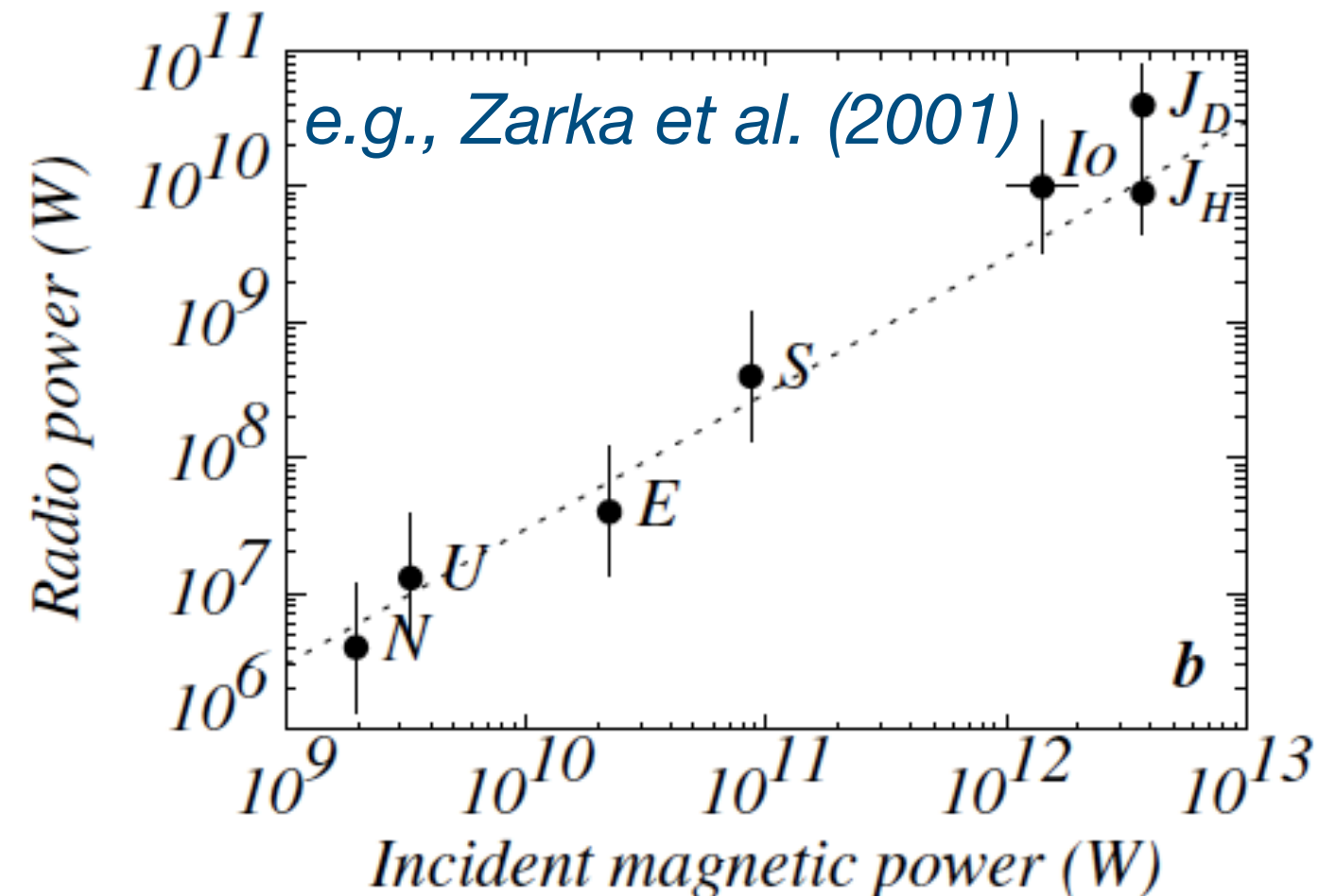
惑星磁場強度スケーリング？

➔ SKAによる高感度観測で系外惑星オーロラ電波を検出・サーベイ

- 磁場強度は内部の構造に関連
e.g., [Hori \(2021\)](#)

- オーロラ電波の観測で惑星の自転
など他の情報も得られる
(系外惑星の多角的なキャラクターゼーション)

オーロラ電波強度スケーリング？



SKAで迫りたい問題（太陽系外惑星の視点から）

■ SKAのオーロラ電波観測で多様な系外惑星の磁場強度の直接的な測定

→ 惑星磁場のスケーリング、オーロラ電波のスケーリング、衛星の存在への制限

系外惑星の磁場強度は、現在一部の天体で間接的な方法でしか見積もられていない。衛星の検出は困難。
オーロラ電波はより直接的な磁場測定の方法。

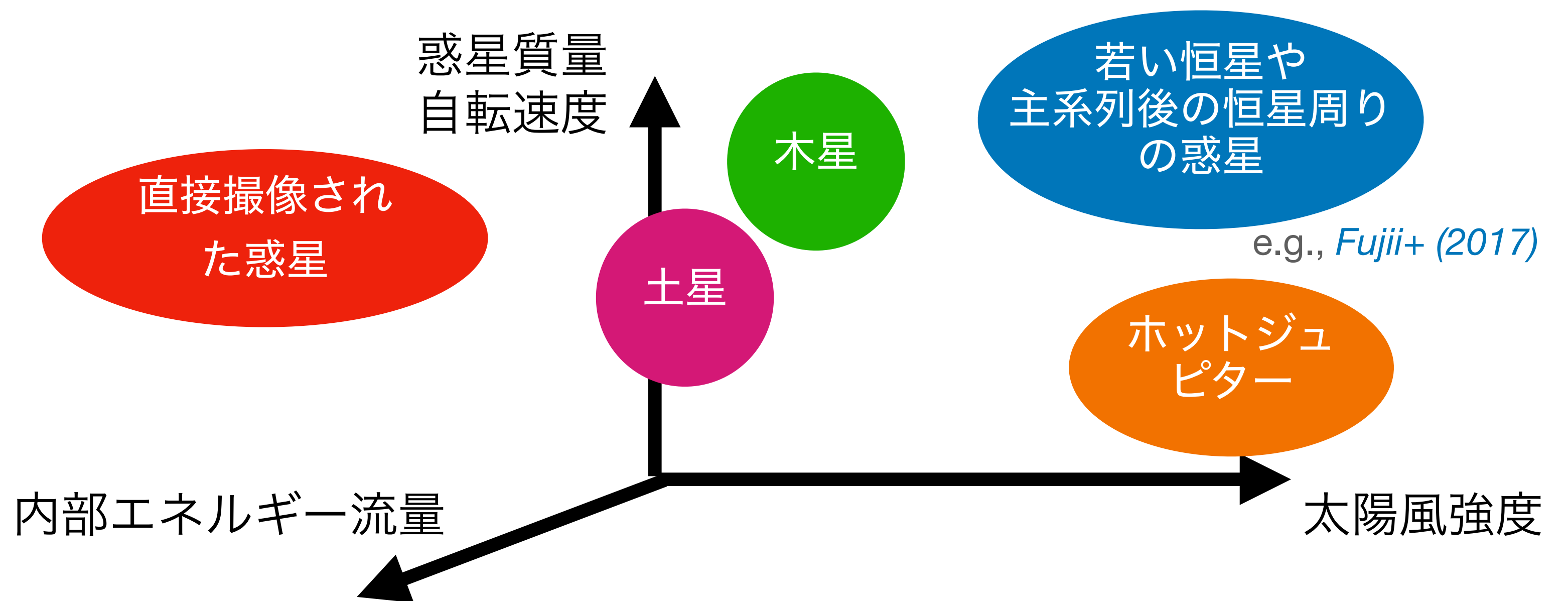
既存の望遠鏡では、系外惑星オーロラ電波のロバストな検出はない

→ SKAによる高感度観測で系外惑星オーロラ電波を検出・サーベイ

- 磁場強度は内部の構造に関連
e.g., *Hori (2021)*

- オーロラ電波の観測で惑星の自転
など他の情報も得られる
(系外惑星の多角的なキャラクター
リゼーション)

惑星磁場の統一的な理解へ



SKAによる観測とその他の観測との相補性

- 太陽系内惑星

例) シンクロトロンの場合

- ✓ 外側のpreheatingの領域をJUICE、Europa Clipperなどでその場観測しつつ、SKAで大局的な構造を観測し、リンクを探る
 - 注) 木星シンクロトロン放射域の放射線量は高過ぎてその場の粒子観測はむしろやりにくいSKA観測+その場観測 ~ 双眼鏡+顕微鏡
- ✓ 恒星風のインプットをモニターしつつ惑星の応答を見る

- 太陽系外惑星

- ✓ +トランジット観測 (e.g., PLATO) : オーロラ電波と観測幾何の関係
- ✓ +直接撮像—若い惑星、自転速度の検証・赤道傾斜角の推定
- ✓ +マイクロレンズ観測 : 銀河中心の惑星系の観測、主星キャラクタリゼーション

Shiohira et al., (2020)

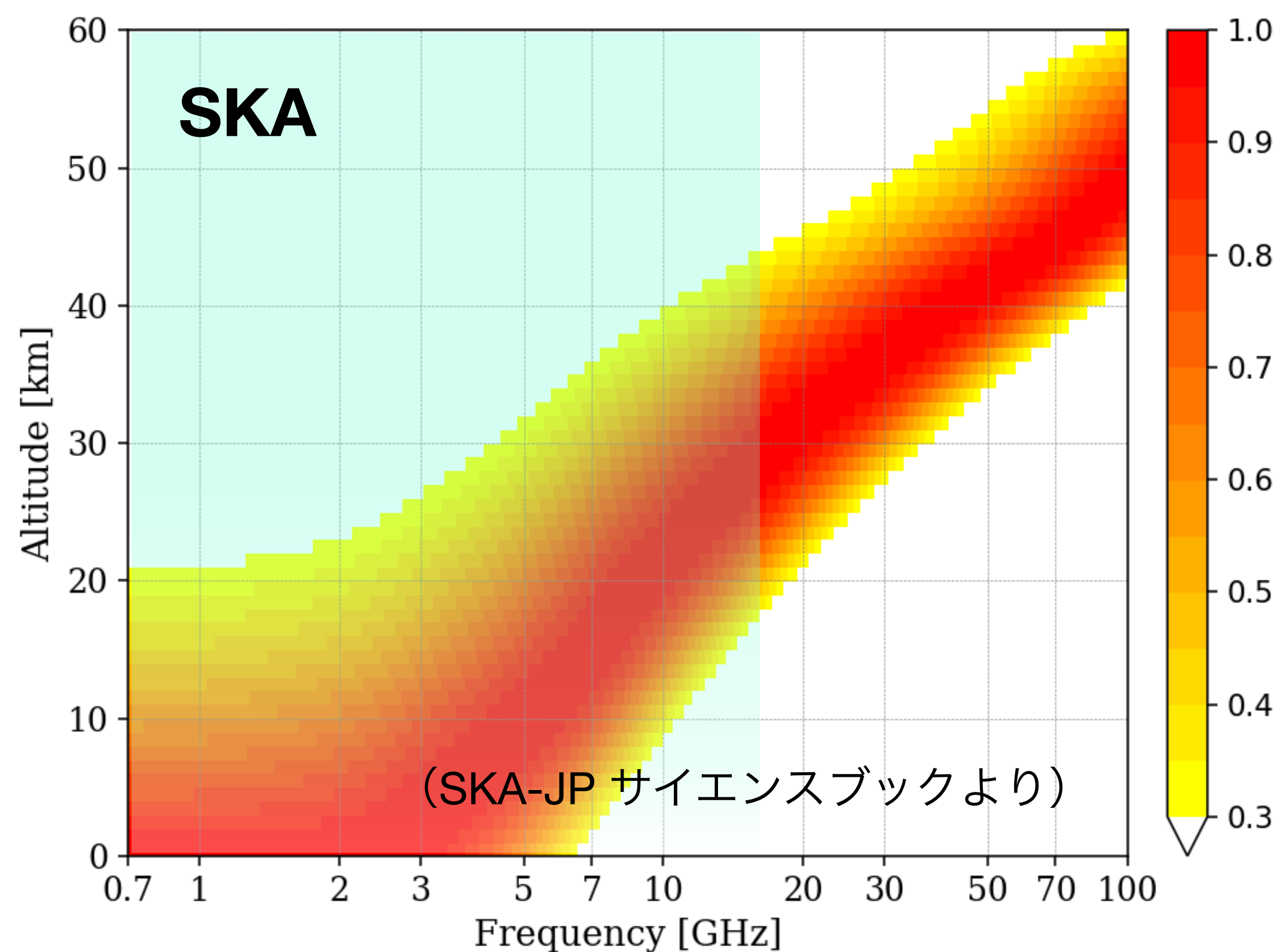
日本のカラー・アプローチ

- 太陽系内惑星の磁気圏観測の実績
 - 惑星の非熱的放射で40年の歴史、日本独自の望遠鏡 (e.g., HISAKI) による知見の蓄積
e.g. Tsuchiya+ (2010, 2011), Kimura+ (2008a, 2008b, 2010, 2011a, 2011b), Kita+ (2014, 2015, 2019)
- 関連コミュニティの近さ、横断のしやすさ
 - SKA-JP惑星班自体、太陽-系内惑星-系外惑星と様々な専門・興味の人が集まっている
 - トランジット観測・視線速度観測などとの連携 太陽・恒星電波とも議論しやすい
 - ✓ 系外惑星系からの電波放射の解釈 (主星起源 v.s. 惑星起源)
- ここまでにあげたような太陽系内惑星のサイエンスは、国際WGではあまり議論が進んでいない (ようだ) → 日本から推していきたい
- SKAによる検出可能性の検討、既存の望遠鏡による系外惑星の観測などを始めている

その他のサイエンス

太陽系内惑星の大気の高層からの熱放射

金星を電波観測した際に大気のどの高度からの熱放射が主に観測されるか(寄与関数の重み)を示した図



金星大気の高層、"スーパーローテーション"

スーパーローテーションの維持機構を解明には、
大気中を伝播する波（波動）による角運動量の鉛直輸送を定量的に理解することが重要

★ SKA (SKA-MID band 5b/5c) では金星大気の高層25 km以下を時間的・空間的に分解して観測可能

大気波動が金星の下層大気をどのように伝播しているのかを初観測 → 大気構造の理解

★ 金星の地面付近を探索する探索ミッション → SKAの観測とシナジー

まとめ

一押しサイエンス

非熱的放射で見る惑星系：恒星-惑星-衛星のカップリング

惑星磁気圏では、恒星風や衛星からのプラズマとの相互作用により、シンクロトロン放射・オーロラ電波放射といった非熱的な電波放射を生じており、大気圏とも相互に影響している。

“惑星圏”の外部と内部を繋ぐこれらのプロセスの詳細を、SKAによる恒星風や惑星電波放射の高感度観測で探る。

太陽系内惑星でプロセスの詳細を探るとともに、太陽系外惑星からもこれらの非熱的電波放射を検出することで広い惑星パラメータスペースの中での多様性・普遍性を探る。