

惑星磁気圏の高エネルギー粒子環境 ～空間構造・時間変動・比較惑星～

東北大学大学院理学研究科
惑星プラズマ・大気研究センター
土屋史紀

磁気圏内の高エネルギー粒子環境の理解は、宇宙空間における粒子加速過程の解明に加え、惑星大気や衛星表層環境への影響という観点でも興味深いテーマである。木星の場合、4つのガリレオ衛星(イオ、エウロパ、ガニメデ、およびカリスト)をはじめとする多数の衛星群は、木星磁気圏内で加速された高エネルギー荷電粒子とイオの火山性ガスを起源とする重イオンプラズマに晒されている。衛星周囲の高エネルギー粒子環境は、衛星表層の風化に加え衛星への物質、エネルギー供給にも密接に関わるテーマになる。

木星の高エネルギー粒子は、これまでに飛翔体直接探査と電波望遠鏡によるシンクロトロン放射観測から調査され、おおよその空間構造、エネルギー分布と時間変動の特徴が明らかになってきている。高エネルギー粒子の空間構造と時間変動を特徴づけるのは、磁気圏内における粒子の加速、損失、輸送のバランスである。近年の研究から、地球と木星の磁気圏では、(1)磁気圏の外側領域における荷電粒子の初期加熱、(2)磁場の強い磁気圏内側領域への輸送による断熱加速、(3)電磁波(プラズマ波動)との共鳴相互作用による加速、の3つが重要な過程と言えそうである。

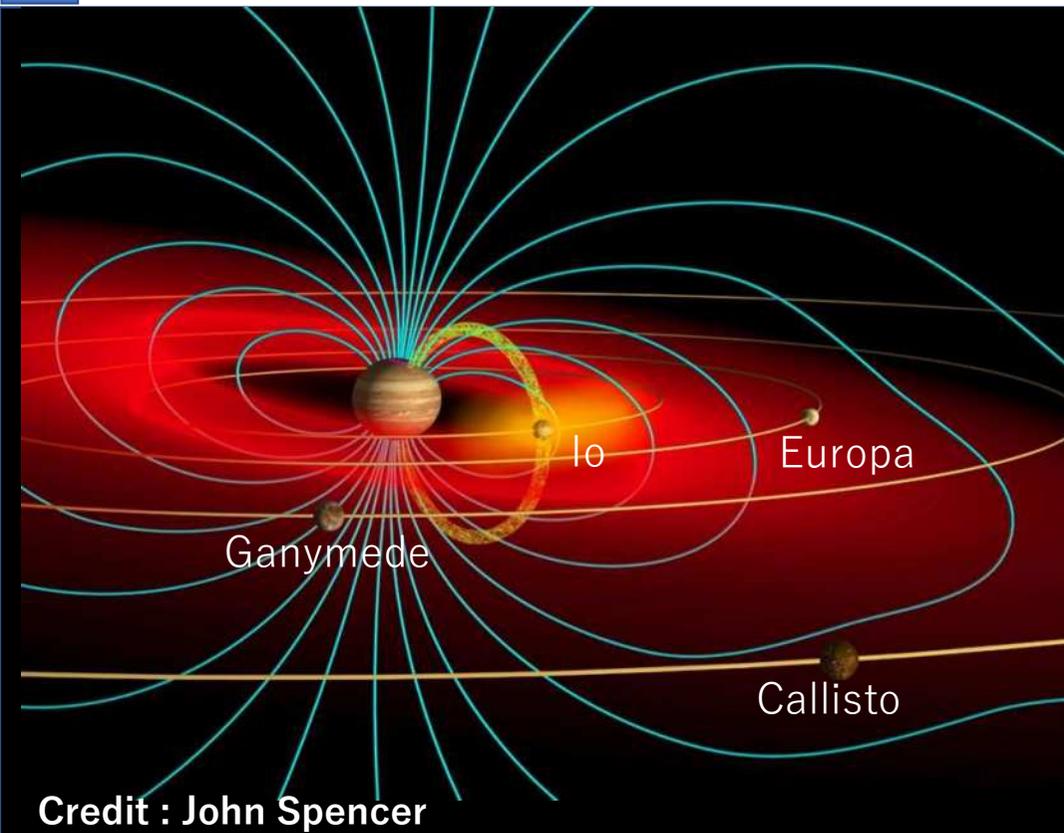
これら3つの現象を担う物理過程には惑星によって共通点と相違点があり、各惑星で発動している物理過程は何か、惑星により相違が生じる要因は何か、その要因が惑星の固有パラメータ(自転速度、磁場強度、中心星からの距離など)とどう結びついているかを明らかにするのが今後の課題である。一例として、放射線帯内で荷電粒子を内側へ輸送する動径拡散過程は、地球では磁気圏で発生した電磁場の擾乱が原因になるのに対し、木星では超高層大気運動がダイナモなって生じた電場が原因となっている。この違いは、惑星固有磁場の強さの違いが主な原因となっており、更に研究が進めば高エネルギー粒子の輸送過程を固有磁場の強さでスケールングすることが可能となるかもしれない。木星での荷電粒子の初期加熱源としては、米国 Juno 探査機の観測から、オーロラ領域での加速の重要性が指摘されている。近い将来行われる Clipper、JUICE による木星探査では、これらの探査機によるその場の荷電粒子と電磁場の観測に加えて、オーロラと放射線帯領域を紫外線や電波でリモートセンシングし、高エネルギー粒子の加速、輸送が生じる異なる領域を同時に把握することも重要になる。

惑星磁気圏の高エネルギー粒子環境 空間構造・時間変動・比較惑星

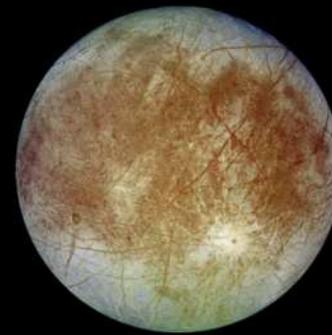
東北大・理・惑星プラズマ・大気研究センター
土屋史紀

1. 磁気圏の高エネルギー粒子：惑星大気・衛星への影響
2. 高エネルギー粒子（木星磁気圏の場合）
空間分布・時間変動・加速と輸送過程の現状理解
3. 衛星イオの位置づけ
4. 比較惑星的視点のコメント
5. まとめ・将来の観測

1. 磁気圏高エネルギー粒子環境



荷電粒子の加速・輸送・消失過程
惑星大気・衛星への影響



Europa



Ganymede

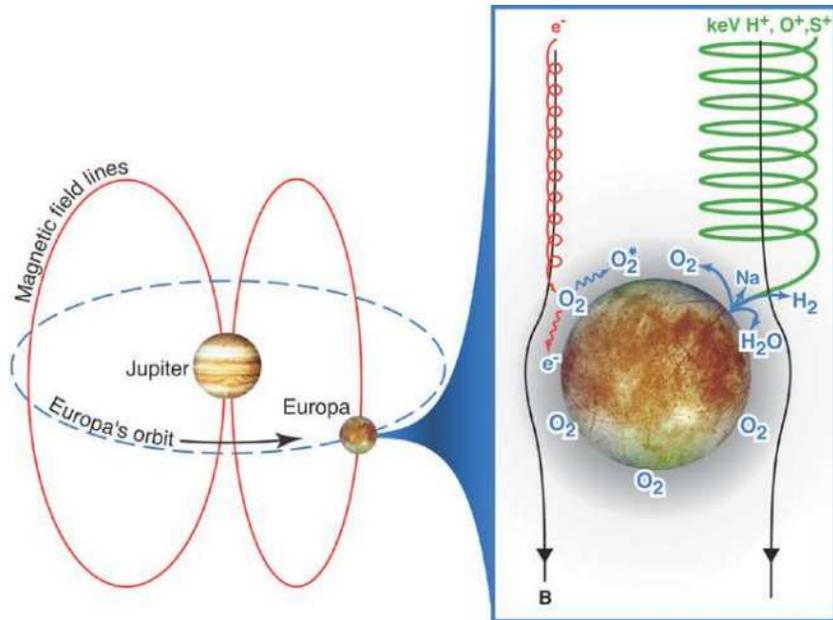


Callisto

惑星環境が恒星風の影響を受けるように、巨大惑星の衛星は磁気圏プラズマの影響を受けている（木星：イオ起源粒子・土星：エンセラダス起源粒子）

1. 高エネルギー粒子環境：衛星への影響

- 衛星表層への高エネルギー粒子（イオン・電子）の降下
 - 衛星大気、電離圏、外圏大気の形成、表層の風化（小天体セッション）
 - 生命存在可能環境と考えられる地下海への化学エネルギーの供給（海洋セッション）



Johnson et al. 2004

木星の衛星のプラズマ環境(Johnson et al. 2004)

Satellite	Global Average Energy Flux ($\text{keV (cm}^{-2} \text{ s)}^{-1}$)
Io	1×10^9
Europa	5×10^{10} 8×10^{10}
Ganymede	5×10^9 poles 2×10^8 equator
Callisto	2×10^8
UV	
<280 nm (>4.4 eV)	4.0×10^{10}
<207 nm (>6.0 eV)	7.6×10^8

(Dissociative threshold for ice: $\sim 6\text{eV}$)

高エネルギー粒子 \approx 太陽紫外線

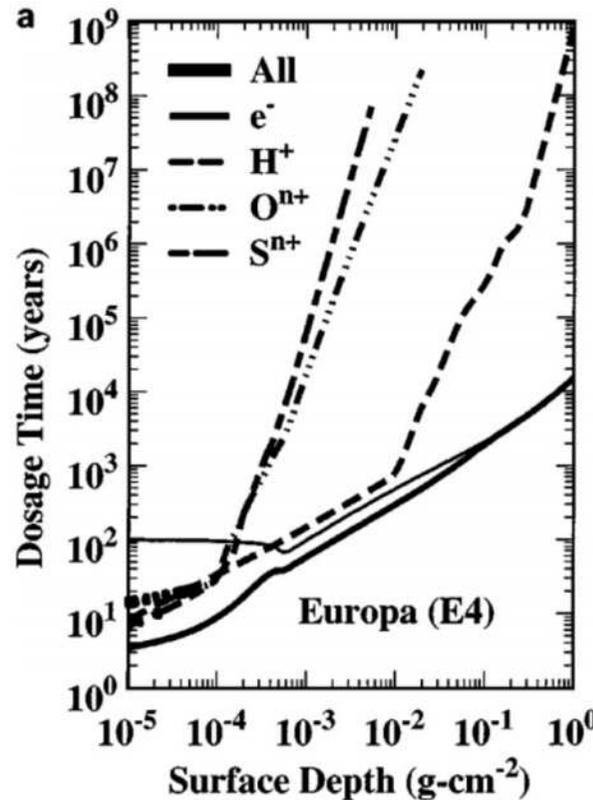
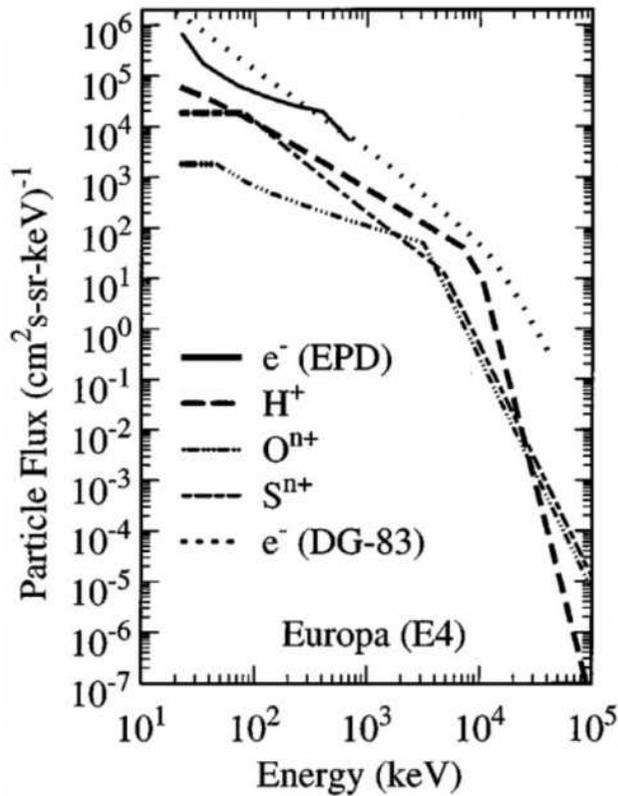
エウロパ表層への荷電粒子(主にイオ起源)の衝突

- 放射性分解: $\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{O}_2, \text{H}_2$
- 表層スパッタリング \rightarrow 大気・電離大気

高エネルギー粒子環境：衛星への影響

深さ vs. 時間スケール (粒子エネルギー vs. 粒子フラックス)

(Cooper+ 2001)



重イオン：表層スパッタリング
 プロトン・電子：表層下の変性

ガリレオ探査機による質量分析を行ったエネルギースペクトルの観測は機会が限定的
 時間変動の考慮が必要

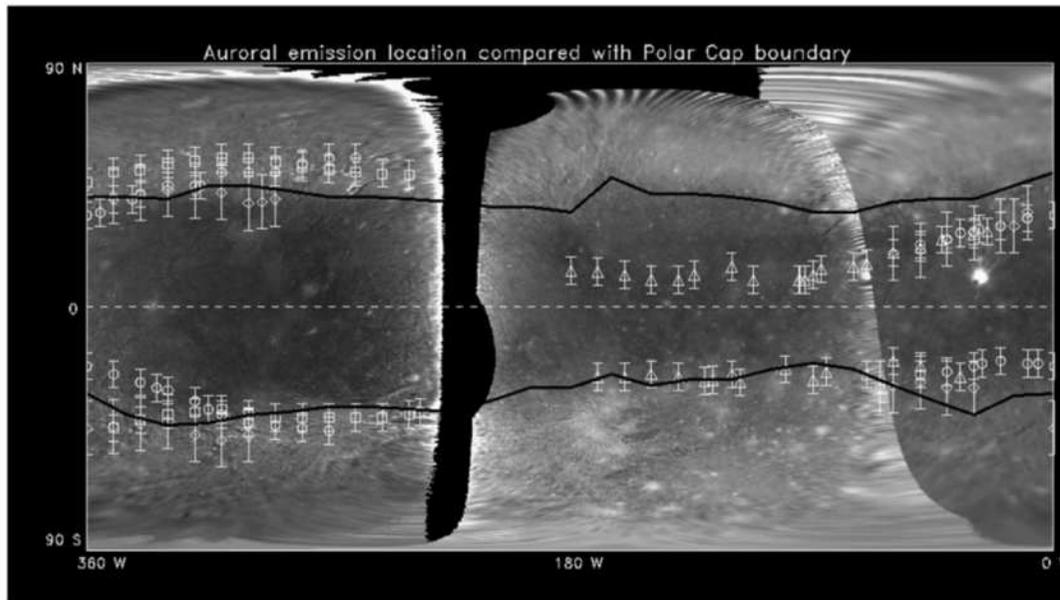
ガリレオ探査機EPDにより観測されたエウロパ付近の高エネルギー粒子のエネルギースペクトル

ドーズの時間スケールと深さ (エウロパ)
 Dosage time : 100 eV/16 amuの蓄積時間

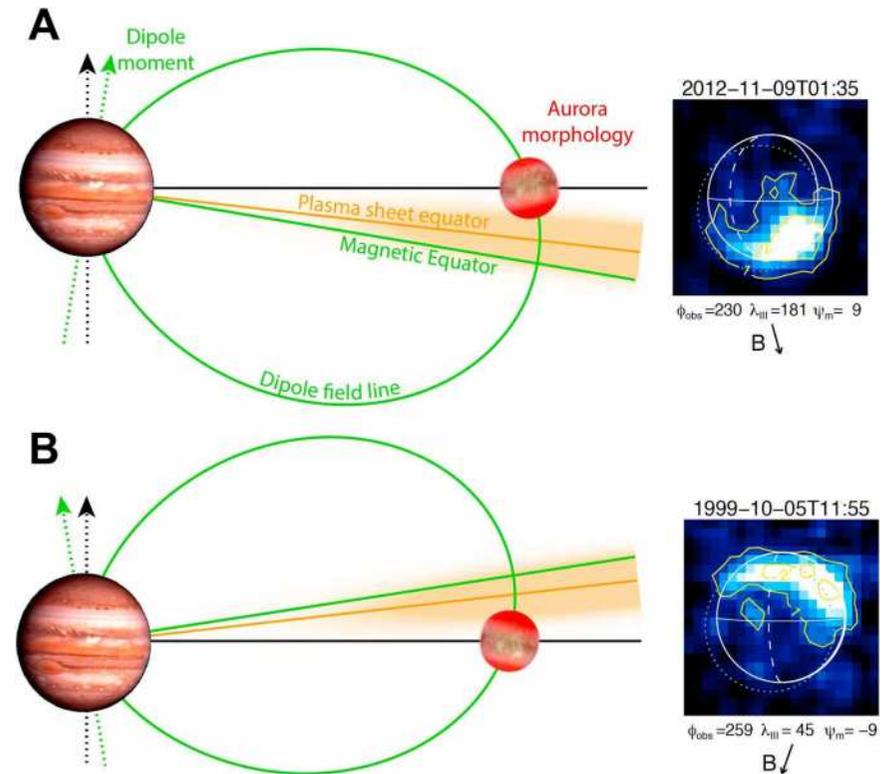
1. 高エネルギー粒子環境：衛星への影響

- ガニメデ表層の風化
- ガニメデの固有磁場により磁気圏の荷電粒子に晒されない低緯度領域と、木星の磁場とつながる高緯度域の表層風化の相違

- エウロパ、ガニメデ、カリスト： O_2 希薄大気
- 磁気圏イオンによる表層スパッタリング
- 非一様なスパッタリング領域と大気の構造



Khurana et al. 2007

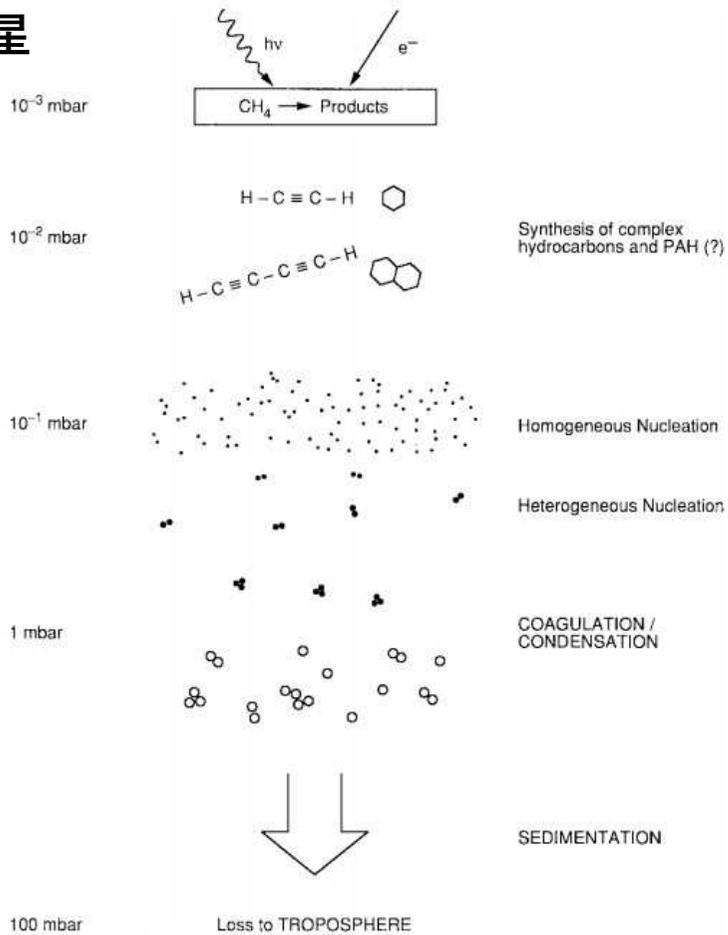


Roth et al. 2016

1. 高エネルギー粒子環境：惑星大気への影響

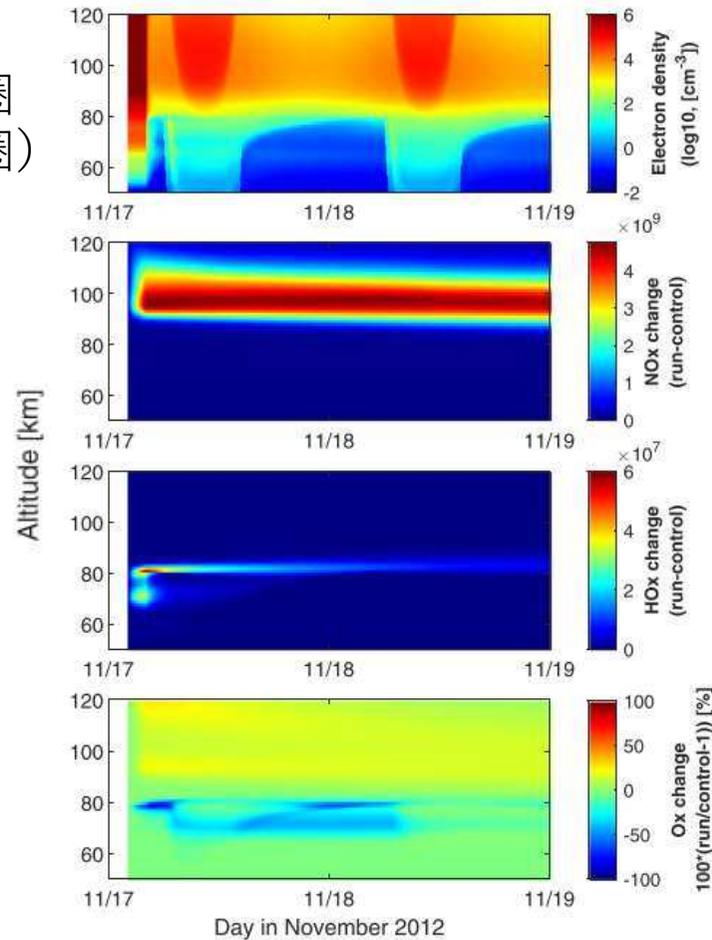
(大気セッション)

木星



地球

(下部熱圏・中間圏)



火星：晝場 (Poster)

タイタン：洪 (大気セッション)

Models for Polar Haze Formation in Jupiter's Stratosphere (Friedson et al. 2002)

Observations of Electron Precipitation During Pulsating Aurora and Its Chemical Impact (Tesema et al. 2020)

2. 高エネルギー粒子観測

• 探査機（直接探査）

- **Pioneer 10,11** (1973, 1974, flyby)
- Voyager 1,2 (1979, flyby)
- Ulysses, Cassini (1992, 2002, flyby)
- **Galileo** (1995-2003, Probe+Orbiter)
- **Juno** (2016-, Orbiter)

• リモートセンシング

- 地上電波観測
（シンクロトロン放射・オーロラ電波）
- オーロラ光学観測
（紫外・赤外）
- X線（沼澤（ポスター））

- 広大な観測領域（磁気圏）
- 激しい時間変動（スペクトルも広い）
- 複数のプラズマ源（太陽風・惑星大気・衛星）
- 複数の加速・消失過程
（物質同定のみでは分離できない）

現状

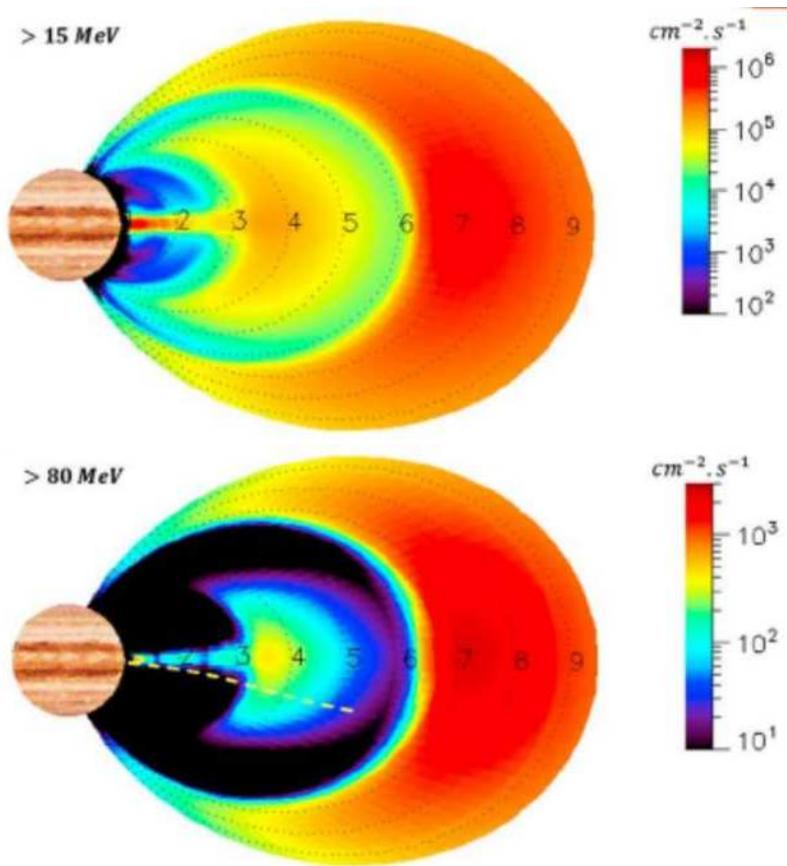
単独の探査機で広い領域をサーベイ
→ 高エネルギー粒子分布の平均描像
様々な時間変動現象
→ 加速現象の同定

将来

探査機とリモセンの組み合わせ
異なるキー領域の同時観測

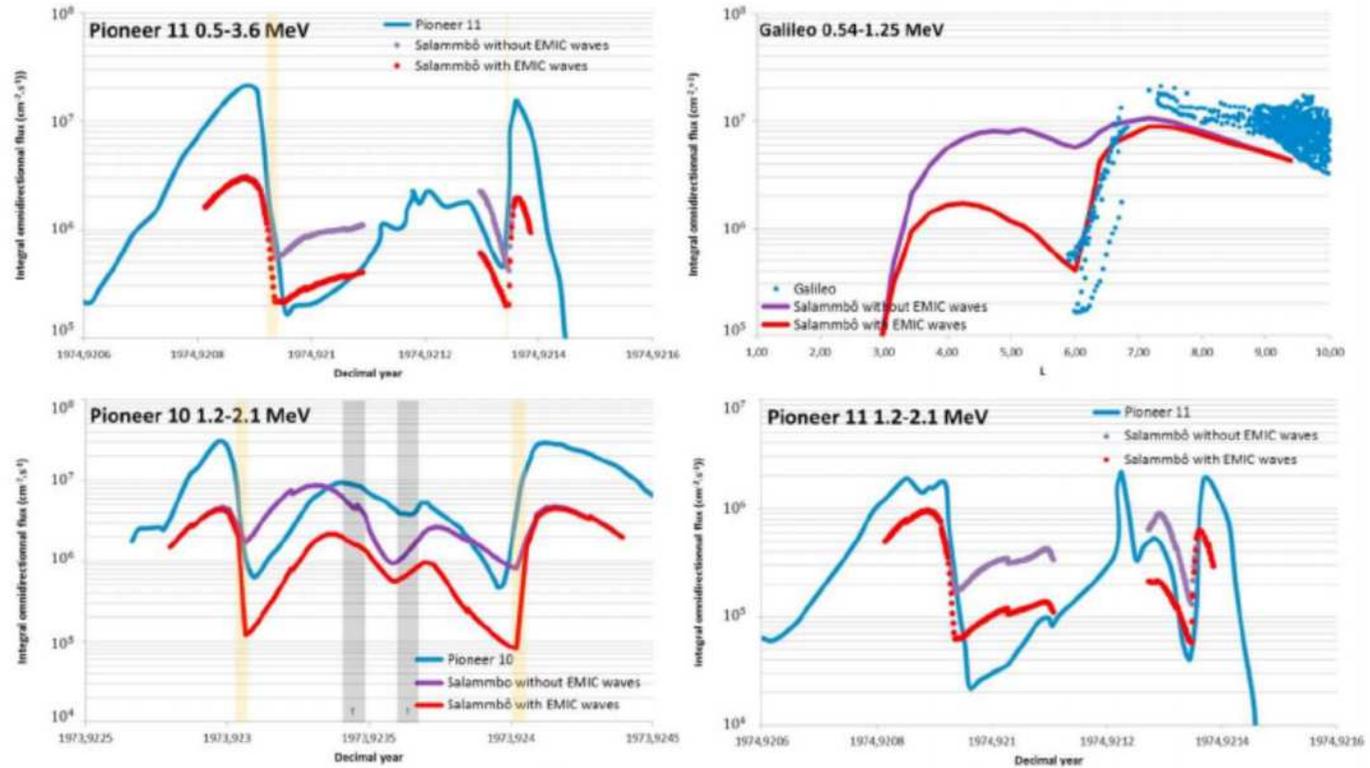
高エネルギーイオン：空間分布

物理モデル(radial diffusion)



Proton radiation belt
(Neron et al. 2018)

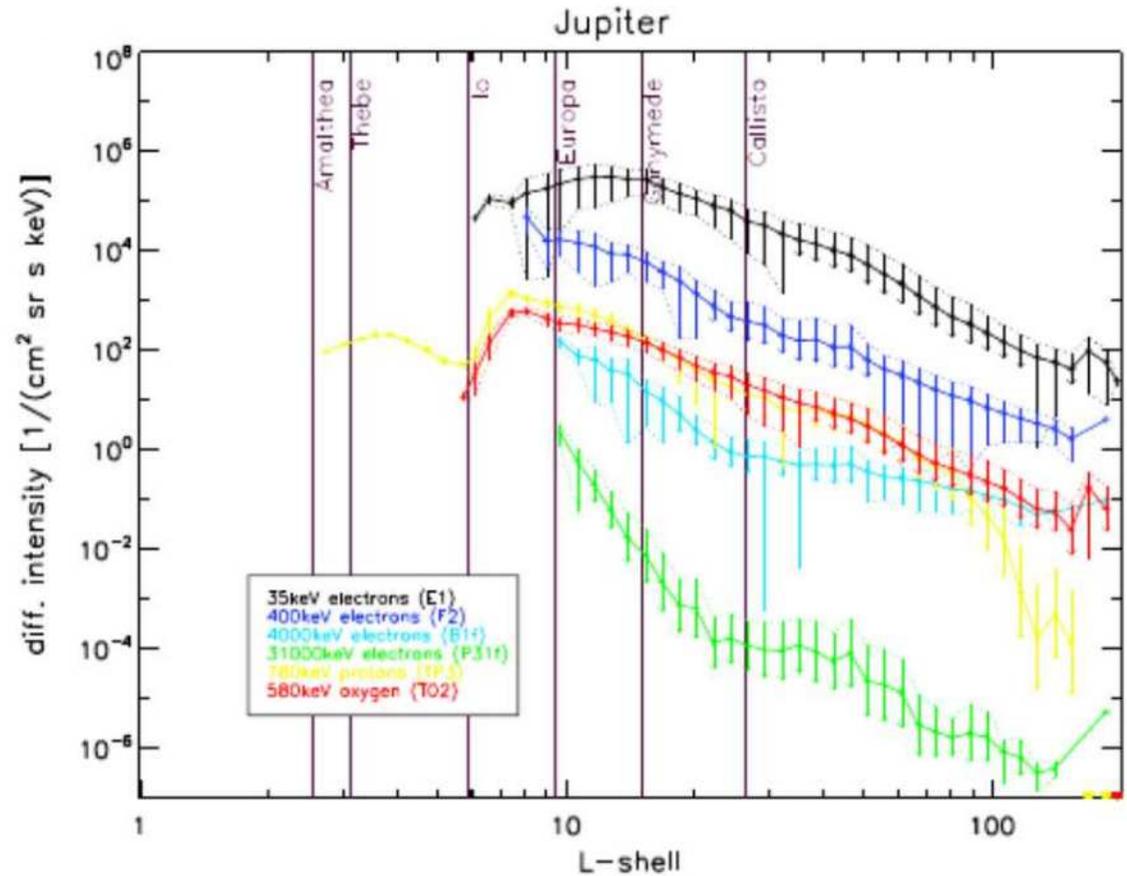
探査機による直接計測
(Pioneer 10, 11, Galileo probe)



- 惑星の固有磁場(ダイポール磁場)に捕捉された放射線帯
- 衛星による吸収：重要なLoss過程の1つ

高エネルギー電子・イオン：空間分布

- 高エネルギー粒子がダイポール磁場領域を超えて、磁気圏の広範囲に分布



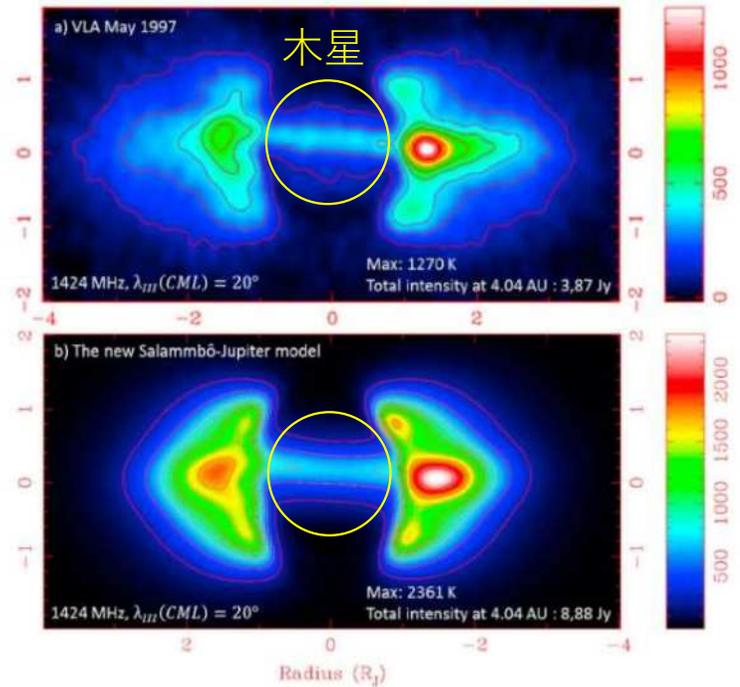
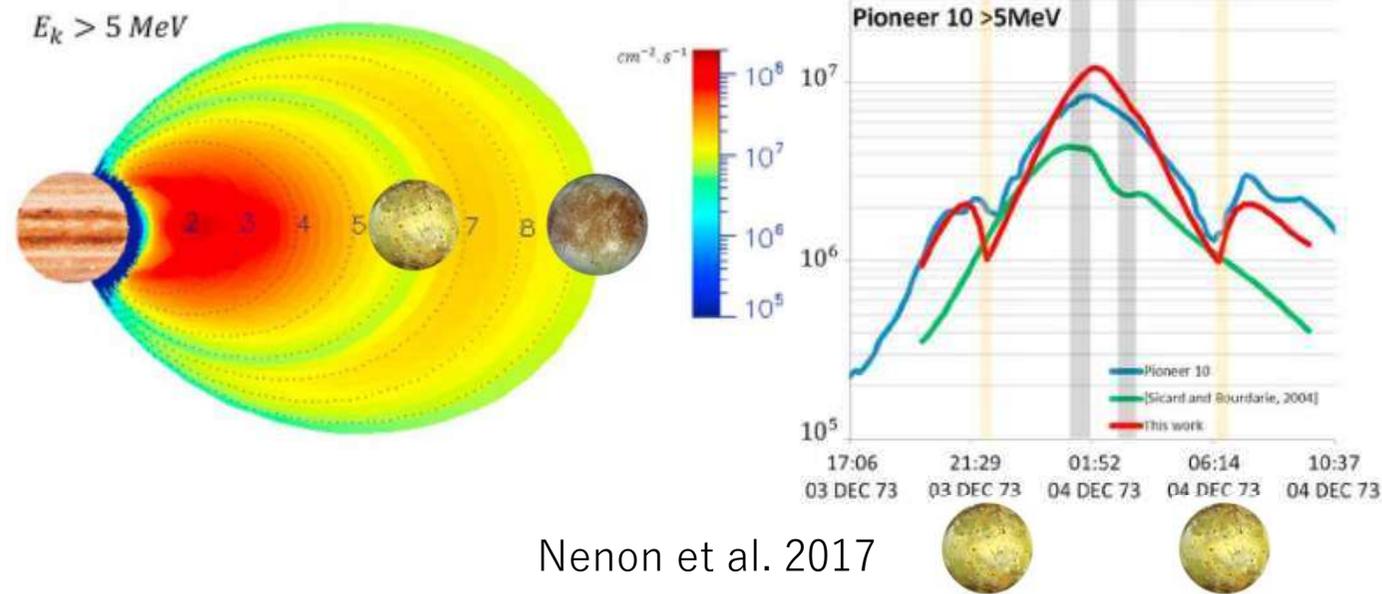
木星磁気圏の高エネルギー粒子分布
(Kollmann et al. 2018)

2. 高エネルギー電子：空間分布

物理モデル(radial diffusion)

探査機による直接計測
(Pioneer 10, 11, Galileo probe)

シンクロトロン放射(100MHz-数10GHz)
(電波望遠鏡・干渉計)
電波強度 $\propto N \times W^2 \times B^2$

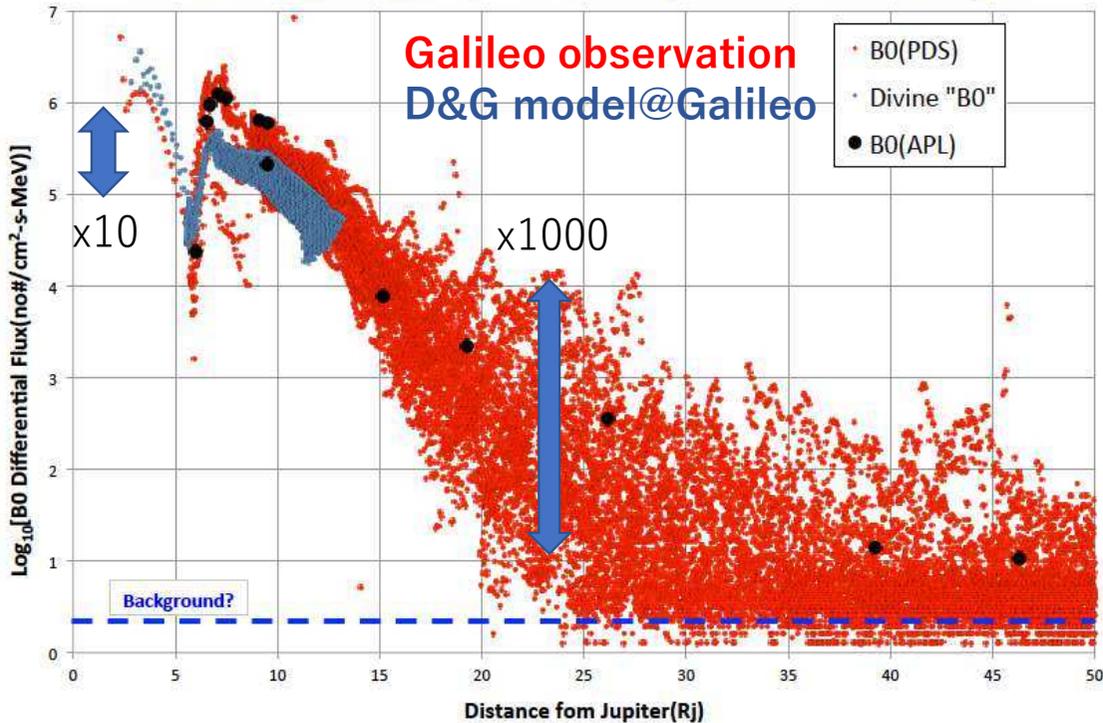


- 惑星の固有磁場(ダイポール磁場)領域に捕捉された放射線帯
- 衛星による吸収：重要なLoss過程の1つ

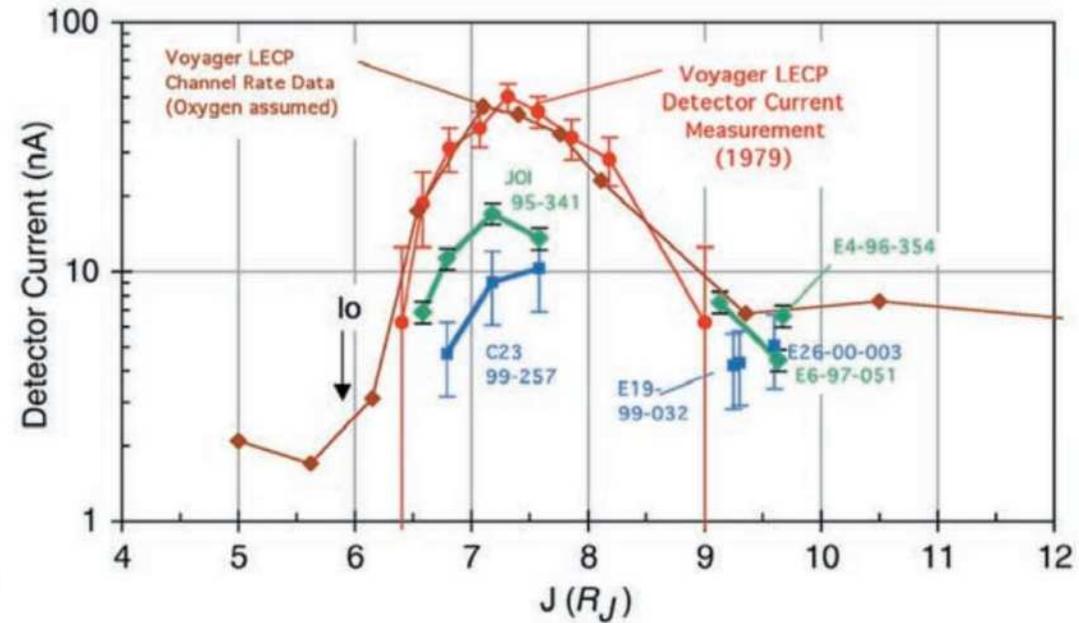
高エネルギーイオン：時間変動

探査機による直接計測 (Galileo orbiter)

EPD B0 Proton Channel (3.2-10.1 MeV) vs Distance from Jupiter



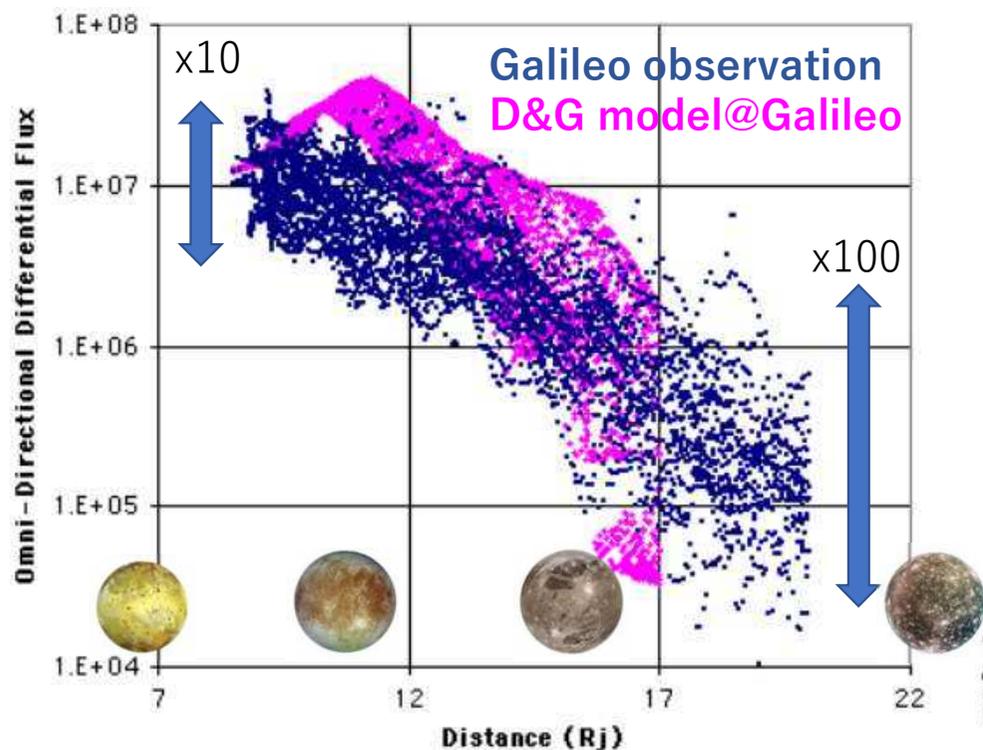
- 空間非一様 + 時間変動
- x10@エウロパ軌道
- x100@ガニメデ
- x1,000@カリスト軌道



Voyager vs. Galileo measurements
(Mauk et al. 2004)

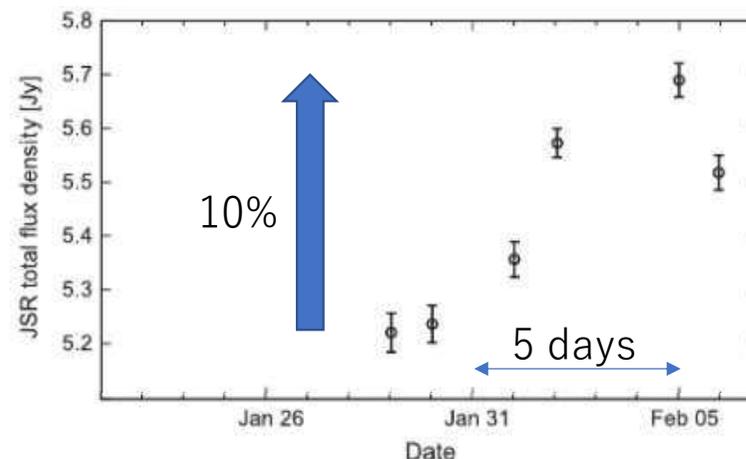
2. 高エネルギー電子：時間変動

探査機による直接計測 (Galileo orbiter)

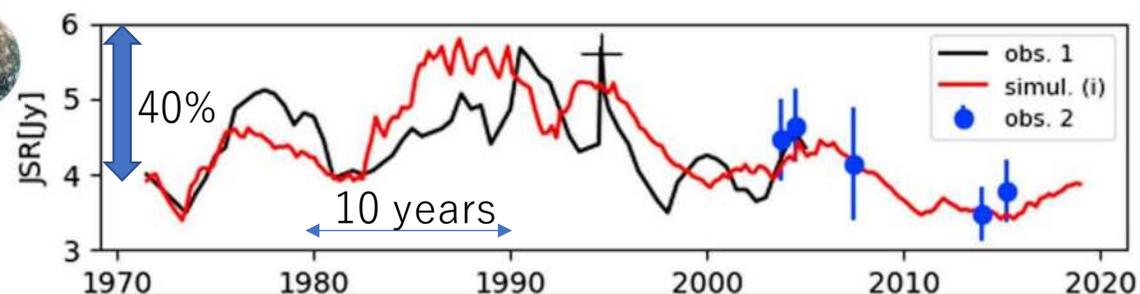


- 空間非一様 + 時間変動 (Garrett et al. 2012)
 x10@エウロパ軌道
 x100@ガニメデ・カリスト軌道

シンクロトロン放射(100MHz-数10GHz) (電波望遠鏡)



Short-term variation GMRT 610MHz (Kita et al. 2013)



Long-term variation (Observation + simulation)
(Han et al. 2018)

2. 高エネルギー電子の加速・輸送・消失過程

高エネルギー粒子の分布や時間変動：加速・輸送・損失過程のバランスで決まる

▲ 輸送過程 (Kollmann et al. 2018)

・ 動径拡散 (断熱加速)

- 擾乱源：木星熱圏風 (<6R_J)
- 交換型不安定 (>6R_J) (山口：ポスター)

★ 加速過程 (非断熱加速)

・ Pre-heating (>15R_J)

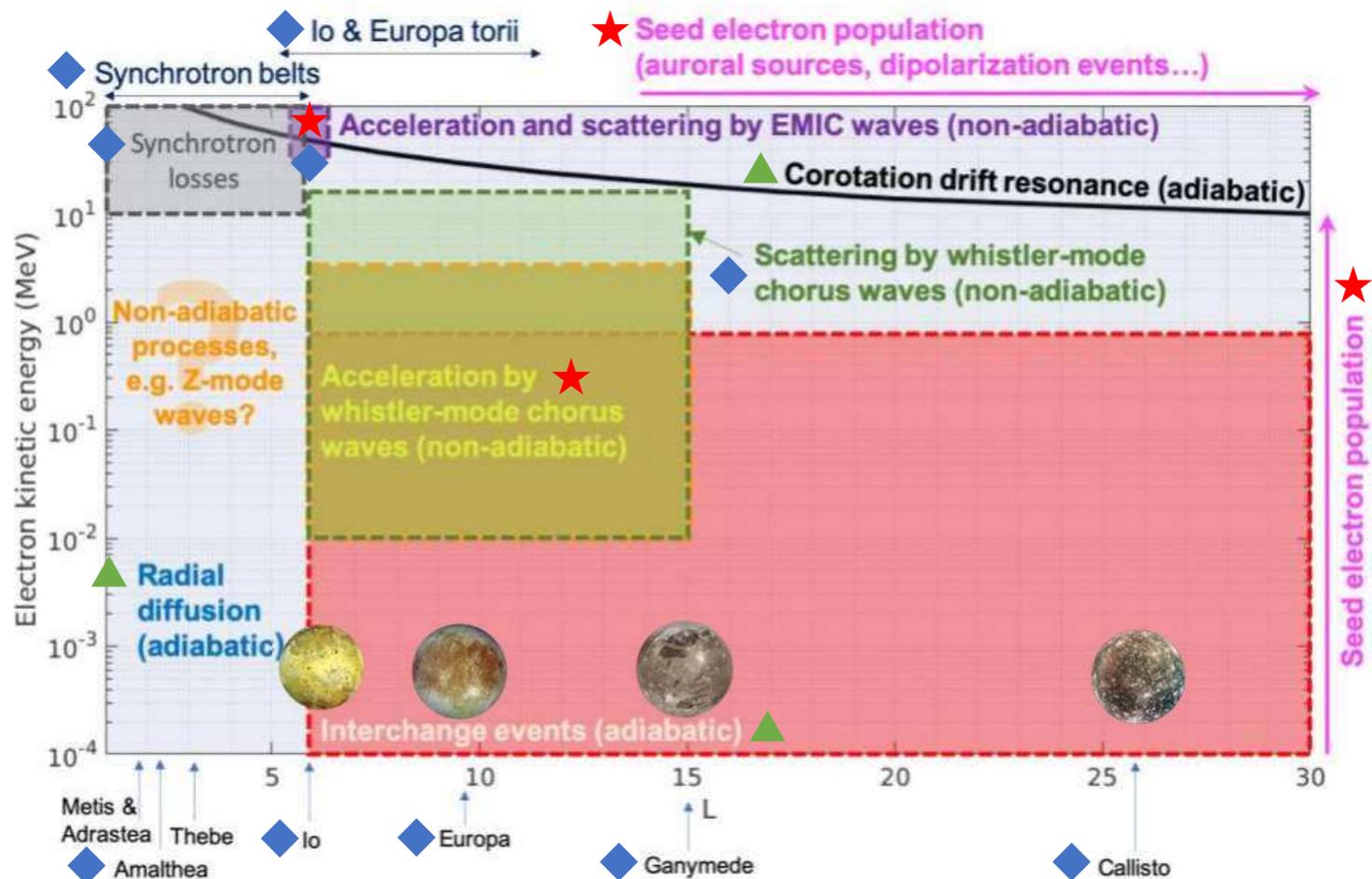
- オーロラ加速 (Juno)?
- リコネクション?

・ プラズマ波動による加速 (6-15R_J)

◆ 消失過程

- プラズマ波動による散乱 (6-15R_J)
- シンクロトロン損失
- 衛星・リングによる吸収

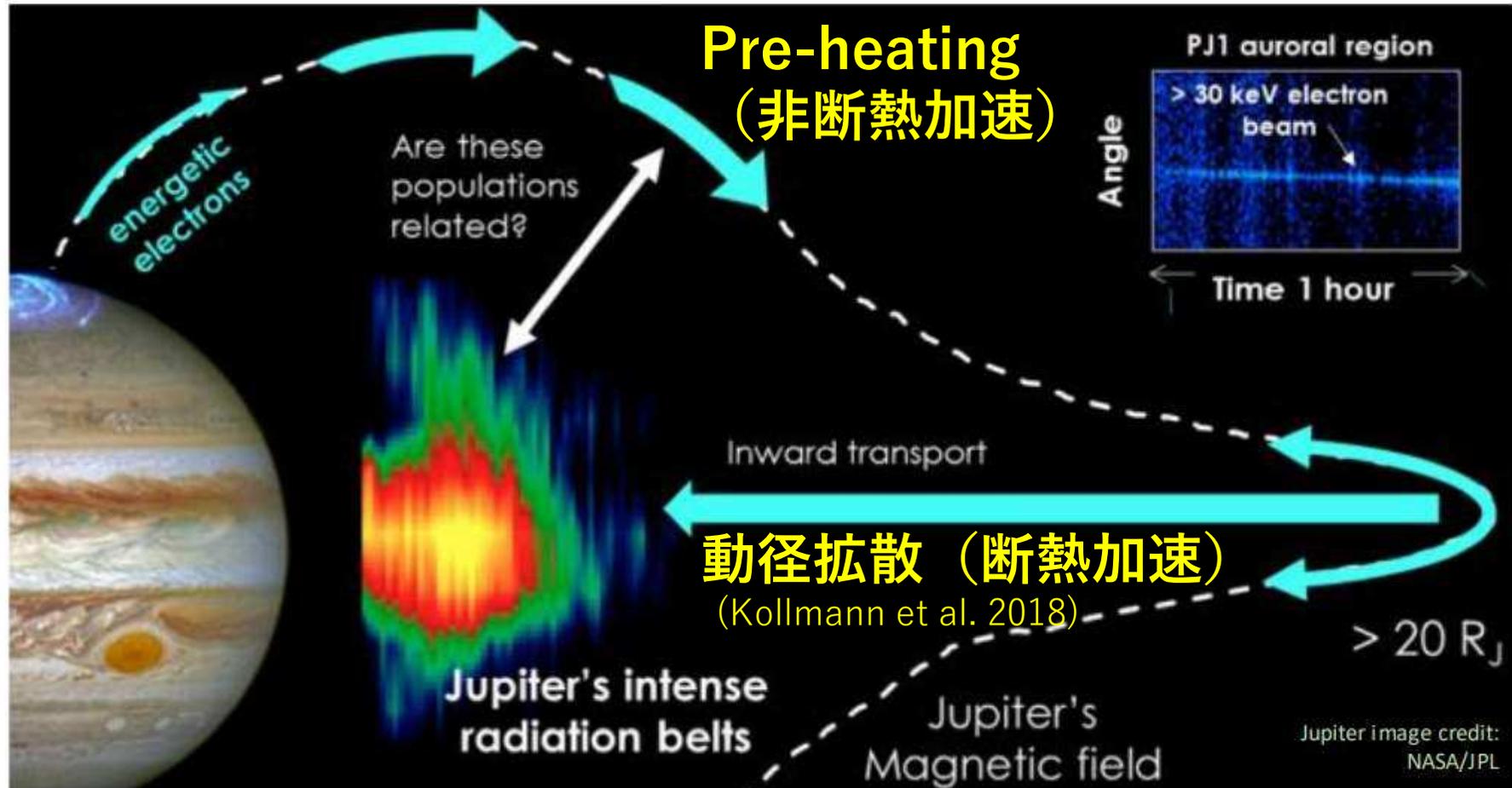
断熱過程
$$\mu = \frac{W}{B}$$



Roussos, 2019

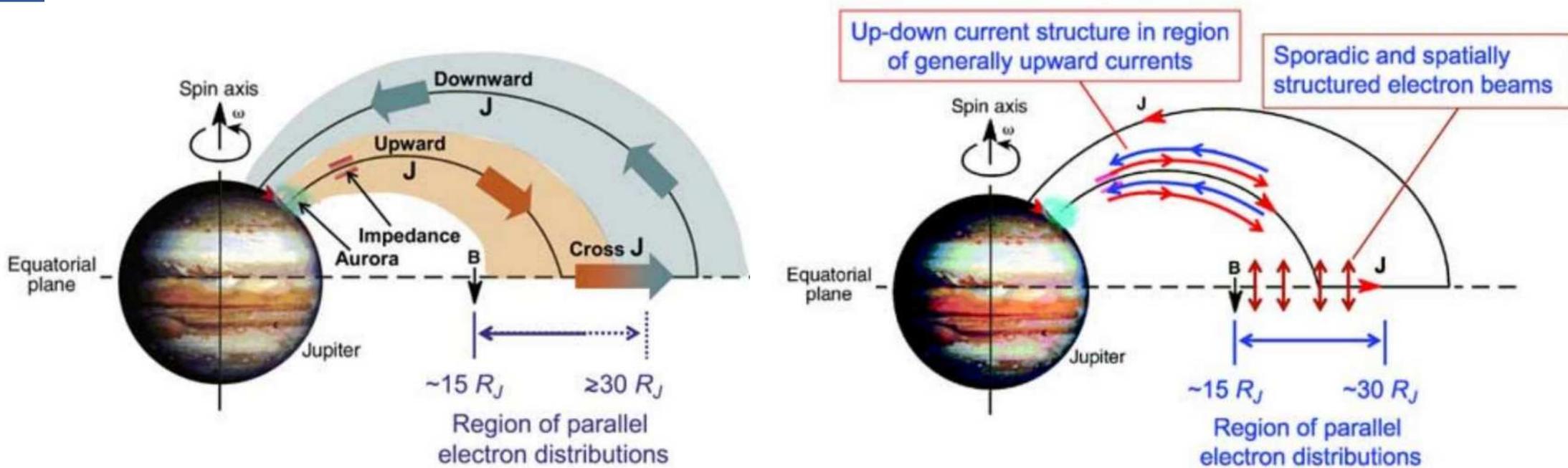
結構、地球磁気圏の枠組みに似ている

2. 木星磁気圏の高エネルギー粒子加速



Roussos, 2019

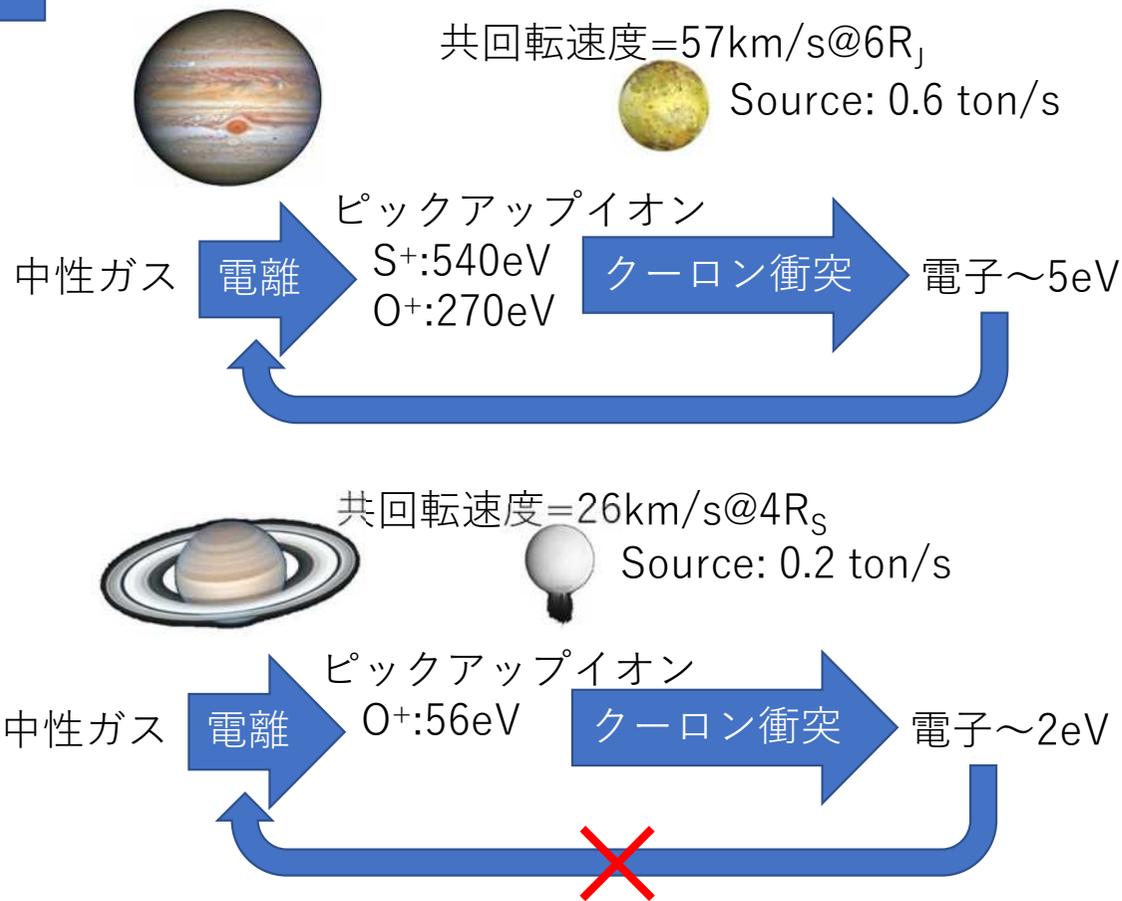
3. 木星オーロラのエネルギー源とイオ



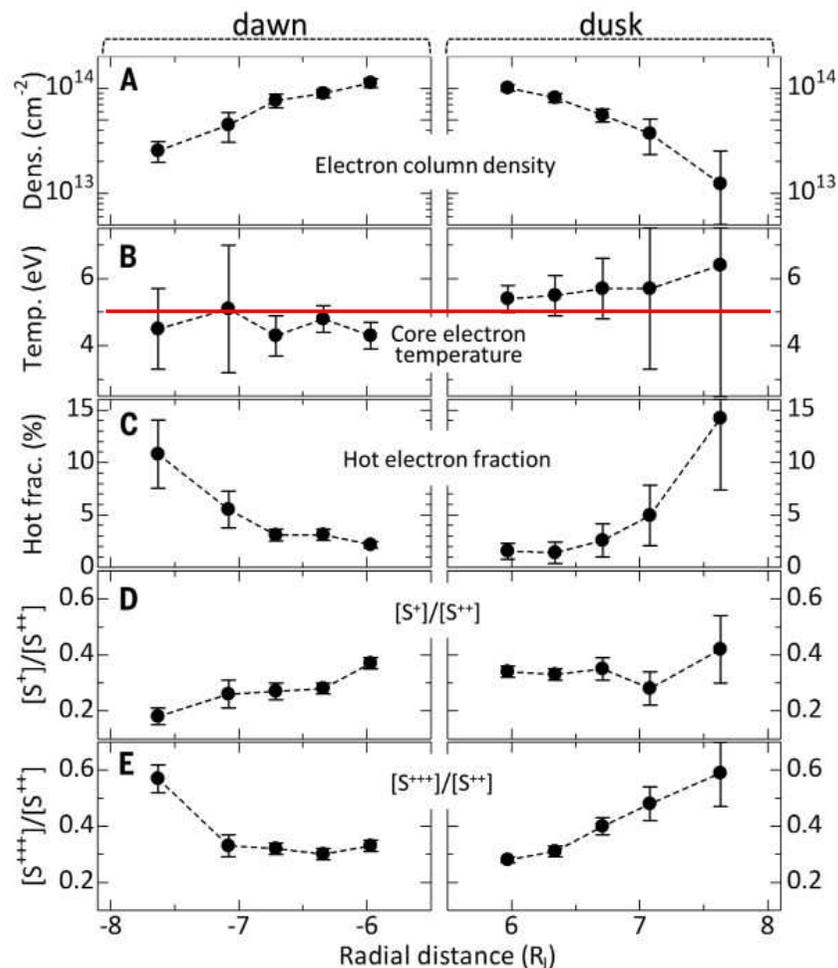
磁気圏－電離圏結合電流系（Hill電流系）

- ・ 磁気圏側の $J \times B$ 力でプラズマを共回転方向に加速（自转角運動量をプラズマに輸送）
- ・ 上向き電流領域でオーロラ発光
- ・ イオ起源プラズマの外向き輸送 → 角速度の減少（角運動量保存）
- ・ イオ起源のプラズマが磁気圏に定常的に供給され、外向きに輸送されることが、オーロラの発電と密接に関係

3. 木星オーロラのエネルギー源とイオ



木星：電子加熱と電子衝突電離の正のフィードバック
 衛星位置の共回転速度（衛星の位置と惑星の自転速度）
 がフィードバックをコントロール



「ひさき」が観測した木星磁気圏内の
 プラズマパラメータ (Yoshioka et al. 2014)

4. 比較惑星視点：輸送過程（動径拡散）

- 荷電粒子：惑星の周りをドリフト運動

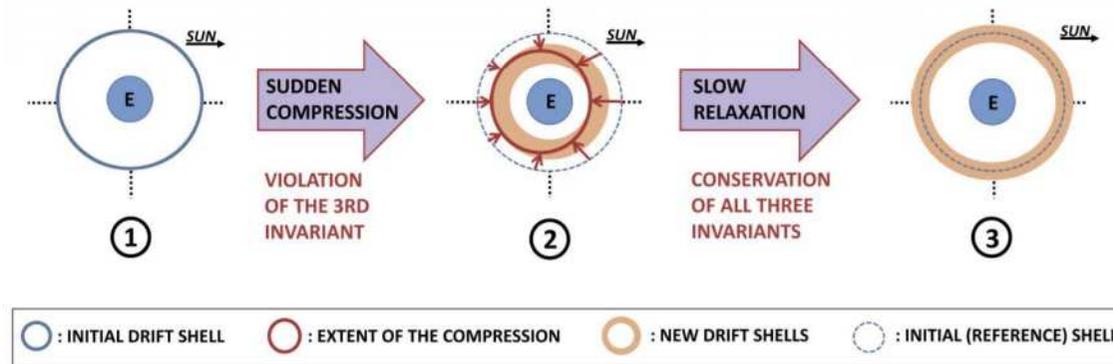
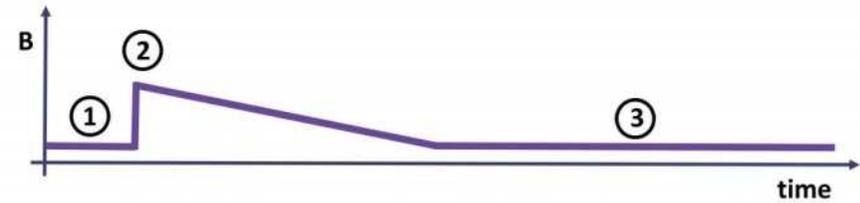
$$v_{drift} = r\omega_{drift} = \frac{WB \times \nabla B}{qB^3} + \frac{E \times B}{B^2}$$

- 動径拡散：電磁場変動によるドリフト軌道の散乱

ドリフト共鳴 $\omega_{wave} = m\omega_{drift}$

木星 $v_{drift} \sim \frac{E \times B}{B^2} \sim r\Omega_J$

地球 $v_{drift} \sim \frac{WB \times \nabla B}{qB^3}$



Lejosne & Kollmann (2020)

木星では放射線帯の内側でも
 拡散係数があまり下がらない
 →損失を受ける前に内側に輸送
 断熱過程で加速

地球と木星の磁場強度の違い
 によりの拡散の駆動源が選択

	高エネルギー粒子 ドリフト周期	動径拡散の擾乱源	動径拡散係数 ($L=r/r_p$)
地球	～数10分	太陽風・磁気圏内の擾乱 (外因性)	$\propto L^6$ or L^{10}
木星	～10時間 (自転周期)	熱圏風の擾乱 (内因性)	$\propto L^3$

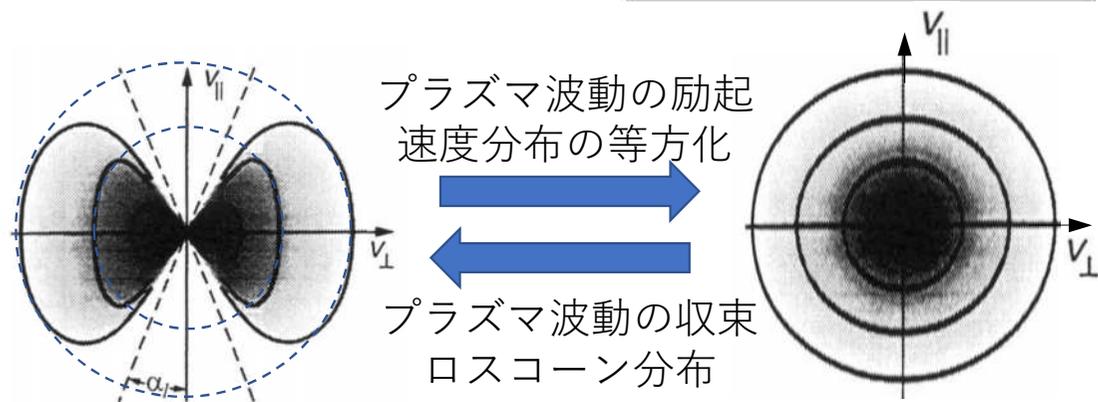
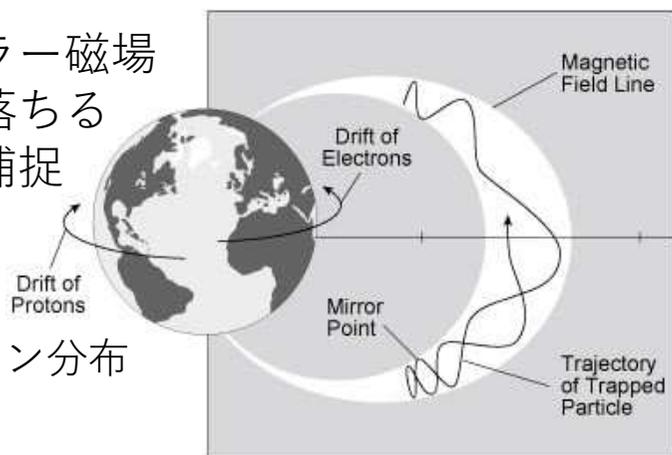
4. 比較惑星視点：高エネルギー粒子捕捉量の上限

惑星ダイポール磁場：ミラー磁場

- ・ピッチ角：小→大気に落ちる
- ・ピッチ角：大→磁場に捕捉



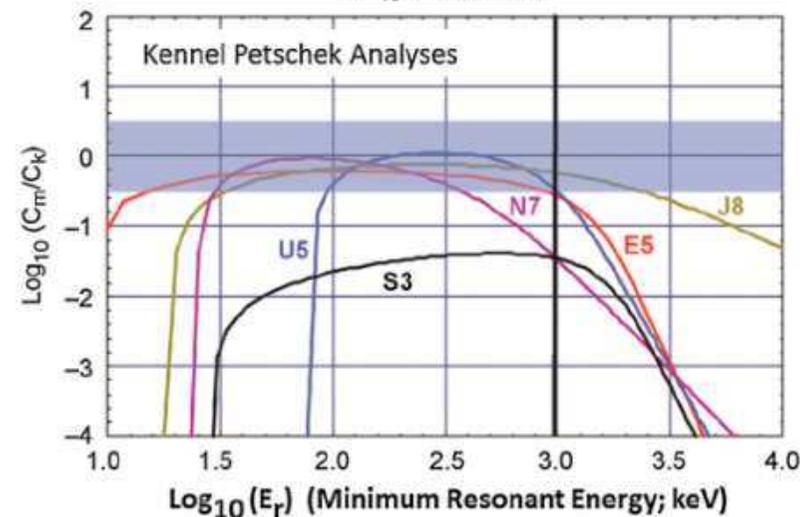
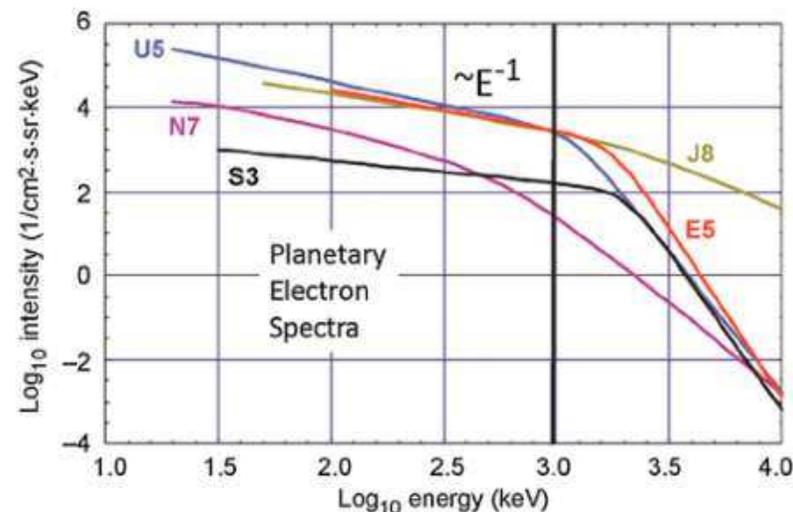
粒子の速度分布：ロスコーン分布
(不安定な速度分布)



自律的に捕捉された電子が大気に落ち、捕捉量を制限
(Kennel & Petschek 1966)

太陽系内惑星磁気圏の電子分布に適用：Mauk & Fok 2010

太陽系内惑星磁気圏のイオン分布に適用：Mauk 2014

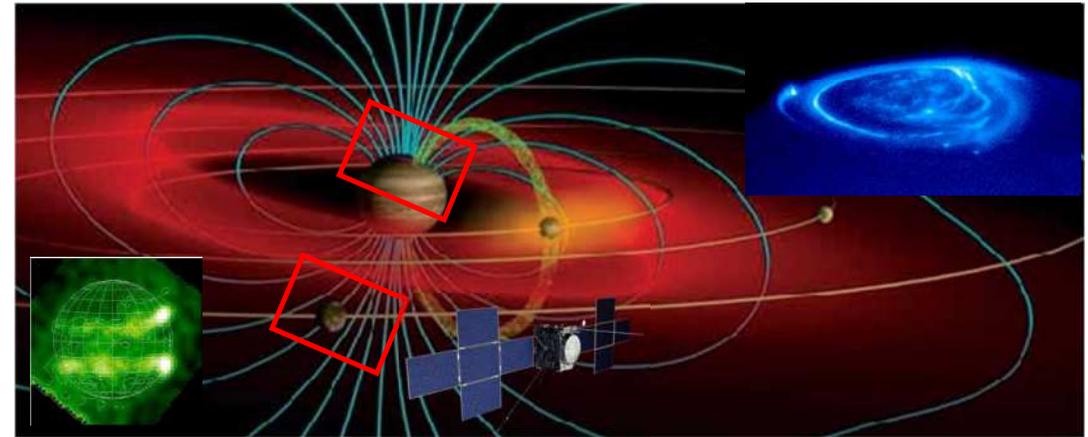


Mauk & Fok 2010

5. まとめ

- 木星磁気圏の高エネルギー粒子
 - 空間分布：平均描像
- 加速過程
 - 動径拡散による断熱加速
 - >15RJでのPre heating：オーロラ？
 - 6-15RJでの加速：プラズマ波動
- 木星のオーロラ加速
 - イオの役割
 - プラズマ源の衛星位置が制御
- 比較惑星視点
 - 動径拡散：惑星の磁場強度により拡散を駆動する擾乱源が変わる
 - 捕捉粒子数の上限

2030年代の観測：磁気圏－衛星相互作用 その場観測＋リモセンのシナジー

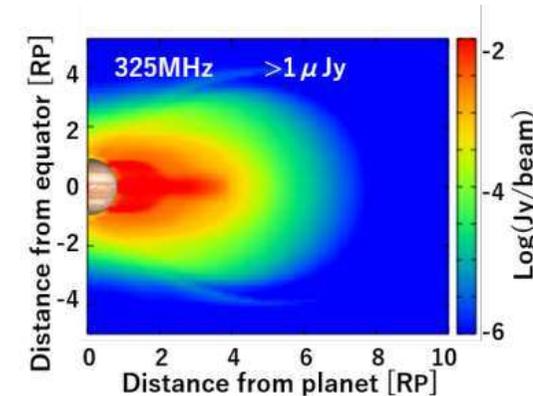
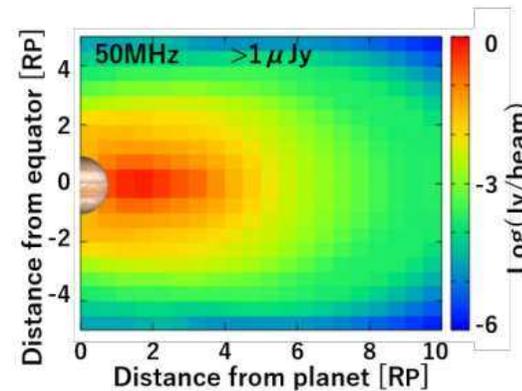


LAPYUTA紫外分光器＋JUICE：氷衛星

LAPYUTA紫外イメージャ：木星オーロラ

赤外望遠鏡：木星オーロラ・下層大気への影響

電波望遠鏡：放射線帯・オーロラ電波



SKA(Square Kilometre Array)による木星シンクロトロン放射観測
(SKAサイエンスブック)