

宇宙空間でプラズマ波動を介した 粒子加速を直接捉えた

～日本製観測装置による世界初の観測成果～

北村 成寿

東京大学大学院理学系研究科 特別研究員

北原 理弘

東北大学大学院理学研究科 学術研究員

小路 真史

名古屋大学宇宙地球環境研究所 特任助教

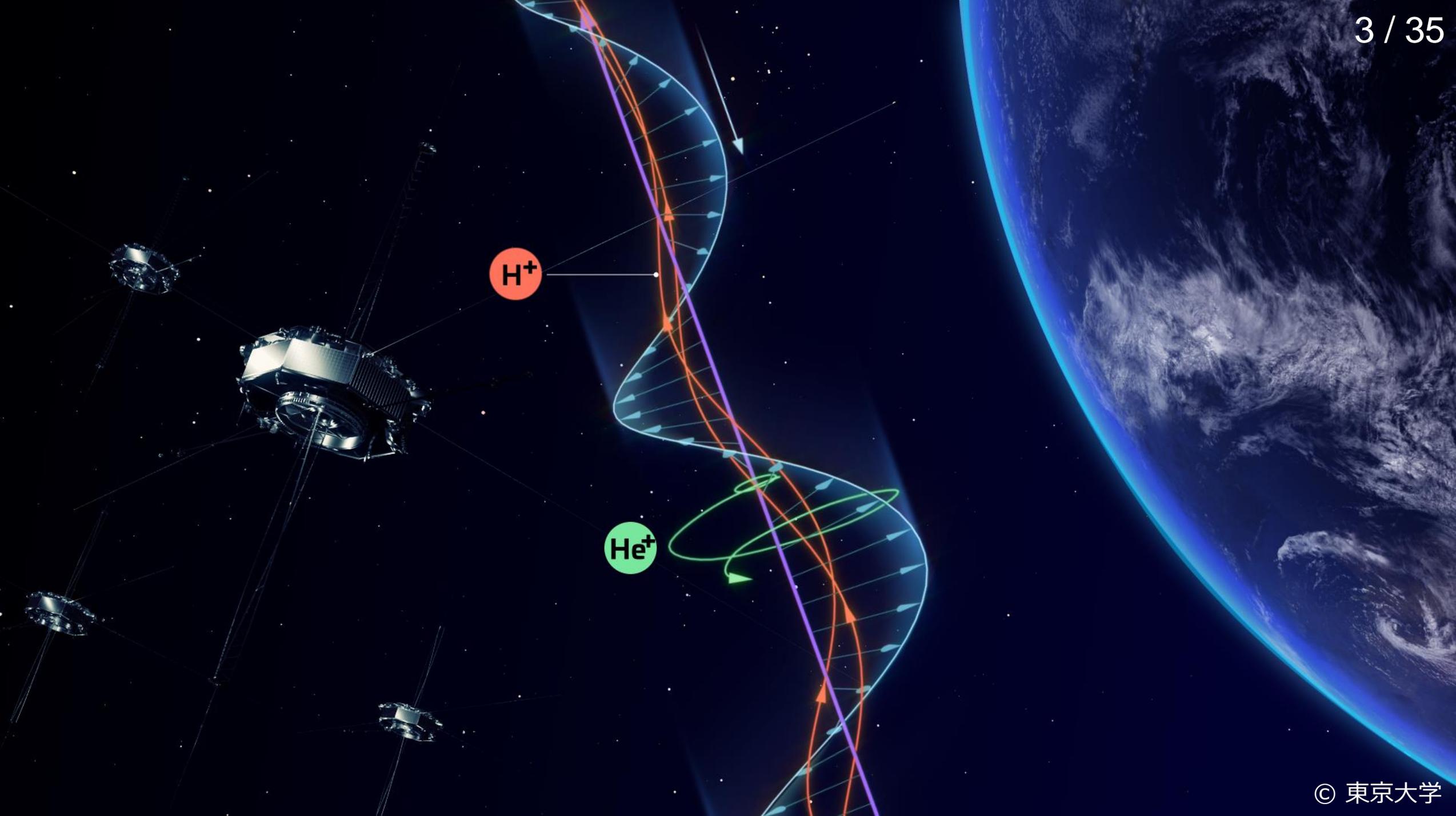
概要

米国MMS衛星に搭載された低エネルギーイオン計測器による観測データの解析を行い、水素イオンから電磁波へ、そして電磁波からヘリウムイオンへとエネルギーが輸送されていることを直接的に示すことに成功した。

本研究は米国科学誌 Scienceに2018年9月7日に掲載された。

本研究の新規性

- ◆ 水素イオン → 電磁波 → ヘリウムイオンというエネルギー輸送の一連の流れを直接観測した
 - ✓ 粒子によって電磁波が励起していることを直接観測によって示したのは世界2例目
 - ✓ 電磁波によって粒子が加速していることを直接観測によって示したのは世界初
- ◆ エネルギー輸送の観測から波動粒子相互作用の種類を同定した



概要

本研究の特徴

- ◆ 日本製の観測装置のデータを主に使用した
- ◆ 日本の研究グループが提案した新しい発想の解析手法を用いた

本研究のインパクト

- ◆ 観測・解析手法の応用によって以下の物理過程の解明につながる
 - ✓ 特殊なオーロラの発生過程（プロトンオーロラ、脈動オーロラなど）
 - ✓ 高エネルギー粒子の加速過程
 - ✓ 極域大気流出における波動粒子相互作用の寄与
- ◆ 現在 および 将来衛星ミッションへの貢献
 - ✓ ジオスペース探査衛星「あらせ」 （運用中）
 - ✓ 木星氷衛星探査 JUICE （計画中）
 - ✓ 電磁気圏将来探査ミッション （提案準備中）

本発表の流れ

1 : 研究背景

- ✓ 磁気圏プラズマ
- ✓ 電磁イオンサイクロトロン波動 (EMIC波動)
- ✓ 波動粒子相互作用の研究の重要性と課題

2 : 研究手法

- ✓ 波動粒子相互作用直接解析手法 (WPPIA手法)
- ✓ 米国MMSミッションとFPI-DIS観測器

3 : 観測結果

4 : 結論

5 : 本研究の意義、今後の展望

本発表の流れ

1 : 研究背景

- ✓ 磁気圏プラズマ
- ✓ 電磁イオンサイクロトロン波動 (EMIC波動)
- ✓ 波動粒子相互作用の研究の重要性と課題

2 : 研究手法

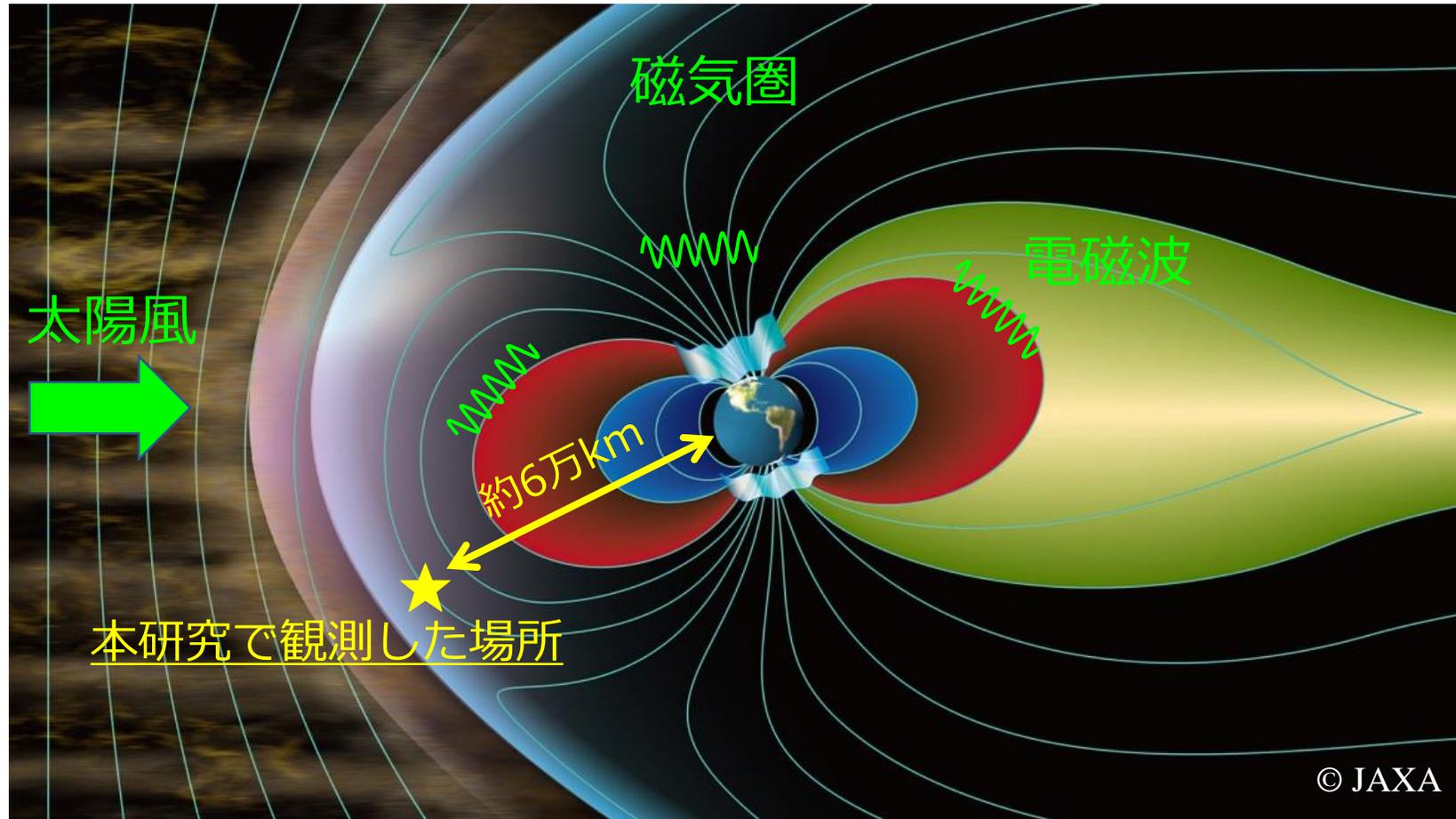
- ✓ 波動粒子相互作用直接解析手法 (WPPIA手法)
- ✓ 米国MMSミッションとFPI-DIS観測器

3 : 観測結果

4 : 結論

5 : 本研究の意義、今後の展望

磁気圏プラズマ

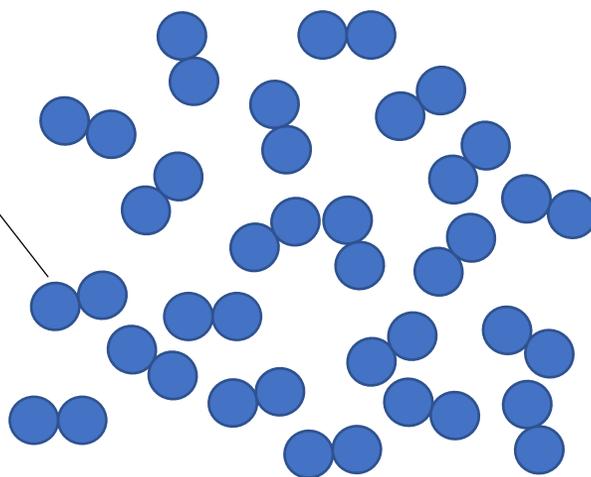


- 地球は固有磁場をもち、地球半径の10倍以上の広がりを持つ磁気圏を形成
- 地球磁気圏は衛星を送り込んで直接かつ詳細に観測できる宇宙空間
- 磁気圏は希薄なプラズマが存在、また自然発生する電磁波も存在

磁気圏プラズマ

地球大気の場合

窒素, 酸素などの分子

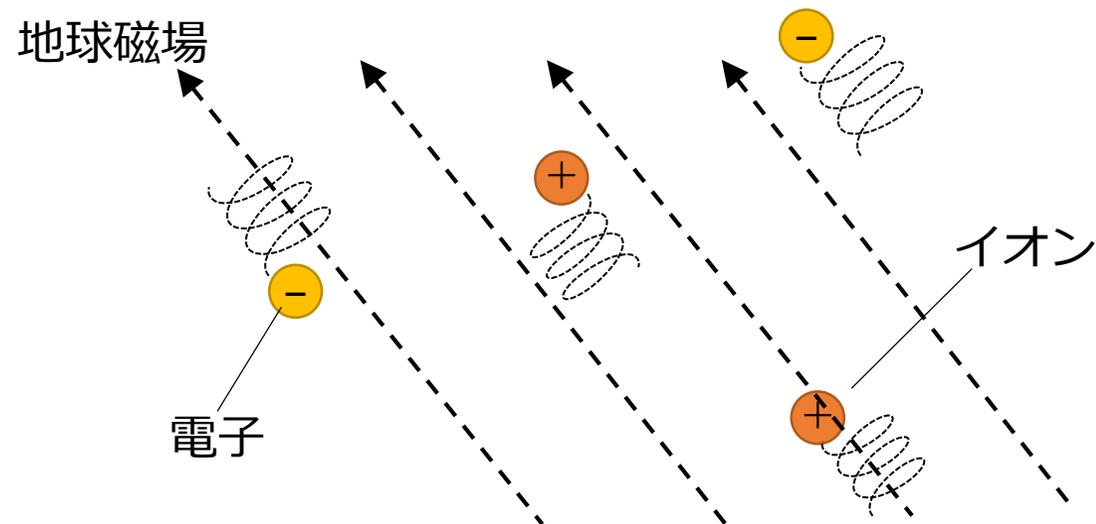


磁気圏プラズマの場合

地球磁場

電子

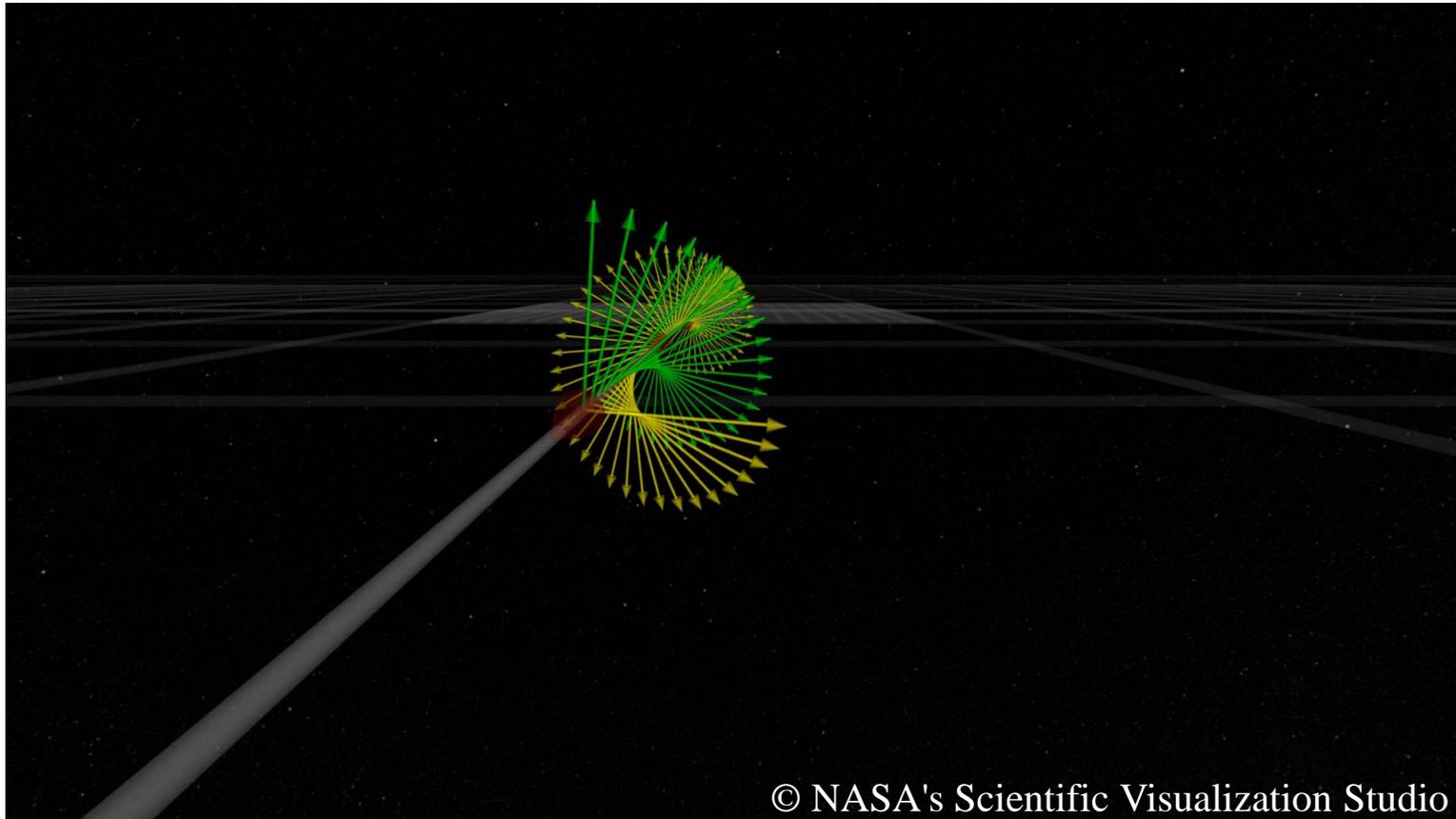
イオン



粒子の数密度	約 3×10^{19} 個/cm ³	約1 個/cm ³ (※今回の研究対象の領域の場合)
粒子の状態	中性分子 (電気を帯びていない)	プラズマ (陽イオンと電子に電離している)
	衝突	無衝突
粒子の運動	ランダムウォーク (自由な方向へ運動する)	サイクロトロン運動 (磁場を中心に旋回する性質)

電磁イオンサイクロトロン波動（EMIC波動）

- 磁気圏において自然発生する電磁波
- 地球磁場に対して左回りに回転（左旋偏波）
- 地球磁場に沿って伝搬

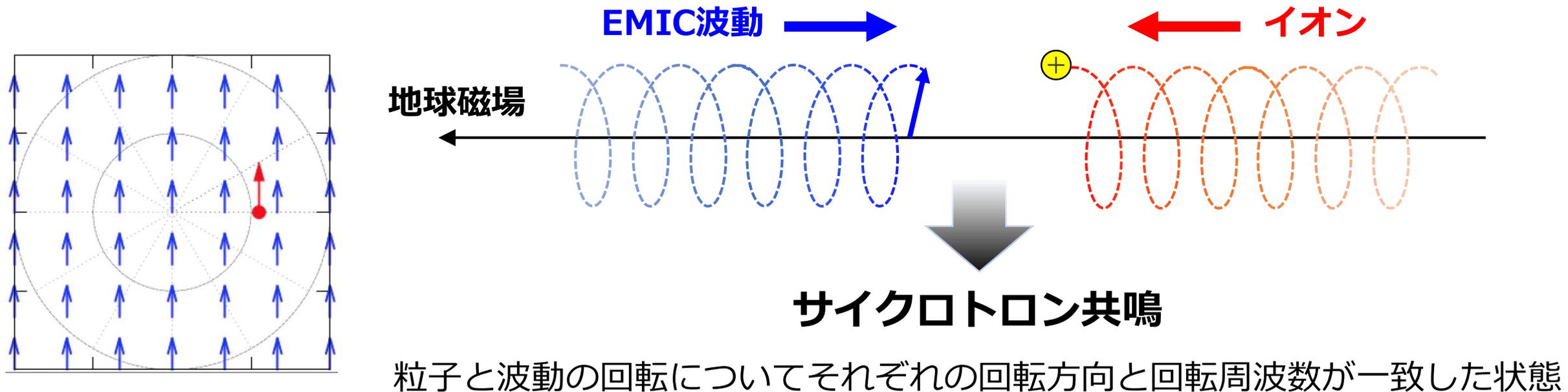


© NASA's Scientific Visualization Studio

EMIC波動の電磁場成分の伝搬の様子

波動粒子相互作用

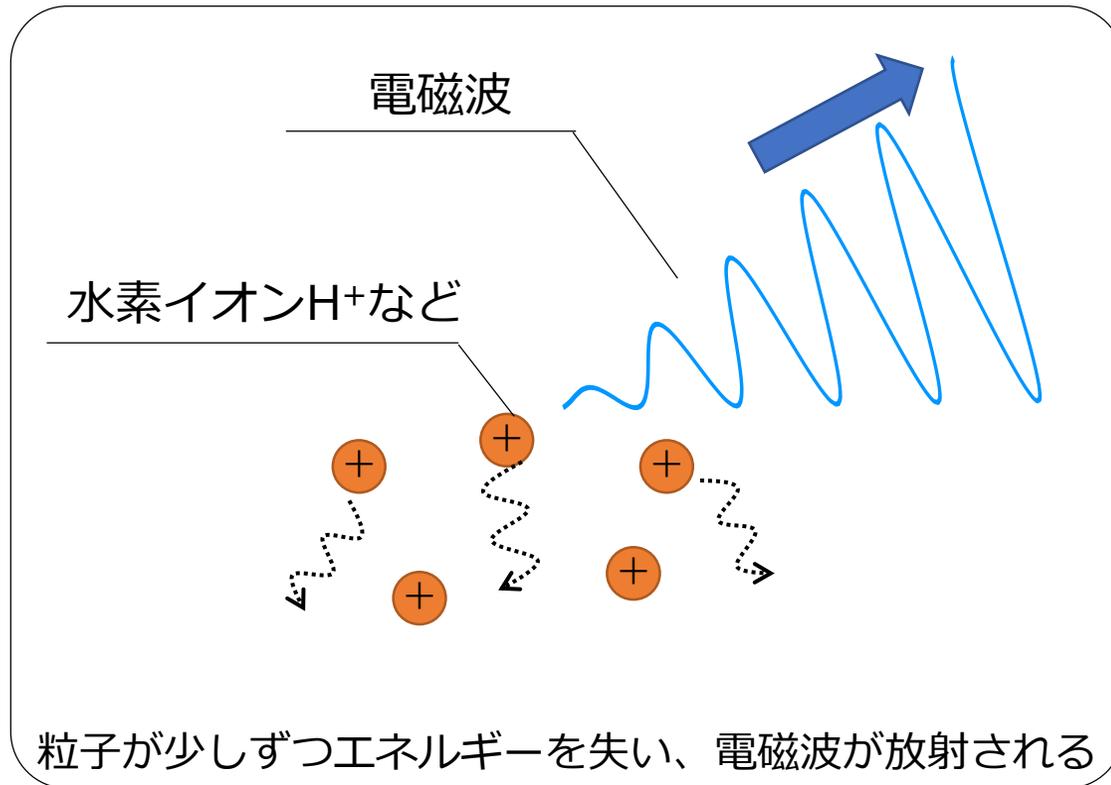
本研究で着目する対象	EMIC波動	水素イオン(H ⁺) ヘリウムイオン(He ⁺)
実態	宇宙空間で自然発生する電磁波	正の電気を帯びた粒子
回転の方向	左回りの偏波	左回りサイクロトロン運動
特性周波数 (回転の速さ)	およそ0.1から数Hz程度	0.1から数Hz程度



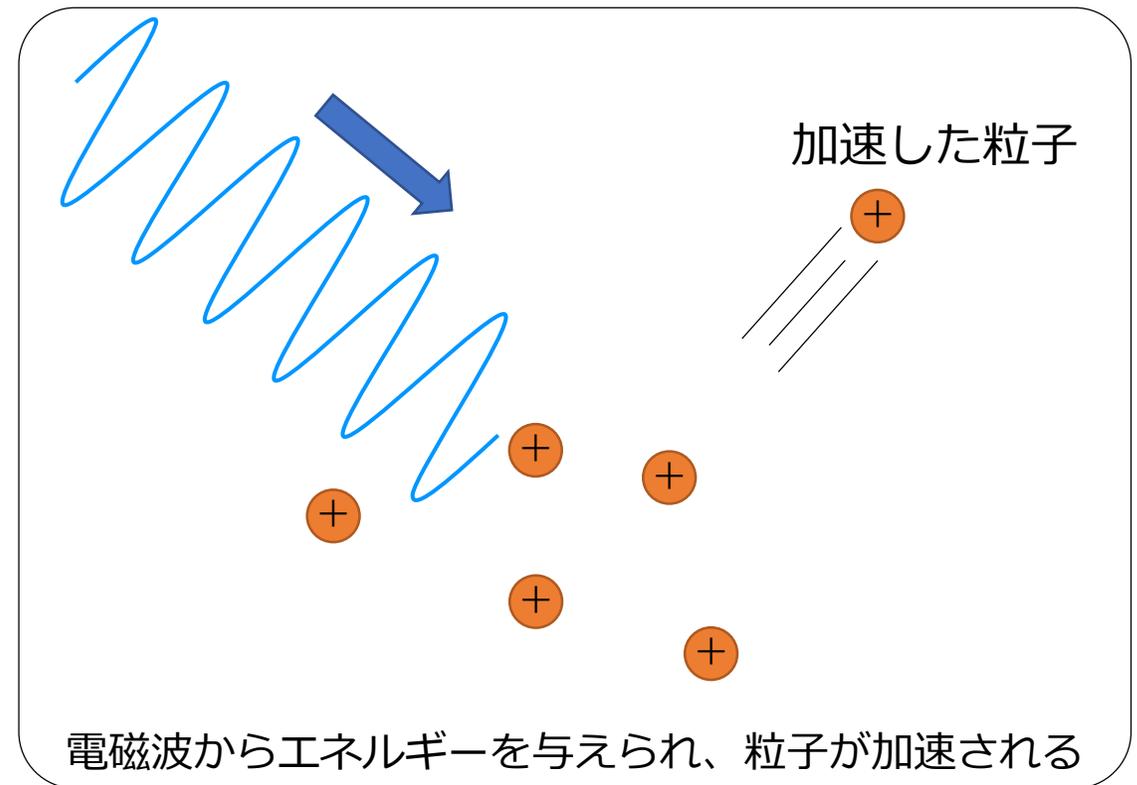
波動粒子相互作用

サイクロトロン共鳴によって、下記の2種類のどちらかの相互作用が生じる。

① 波動の励起 (= 粒子の減速)



② 粒子の加速 (= 波動の減衰)



➡ 特殊なオーロラ粒子の降り込みの原因、高エネルギー粒子の加速過程

本発表の流れ

1 : 研究背景

- ✓ 磁気圏プラズマ
- ✓ 電磁イオンサイクロトロン波動 (EMIC波動)
- ✓ 波動粒子相互作用の研究の重要性と課題

2 : 研究手法

- ✓ 波動粒子相互作用直接解析手法 (WPPIA手法)
- ✓ 米国MMSミッションとFPI-DIS観測器

3 : 観測結果

4 : 結論

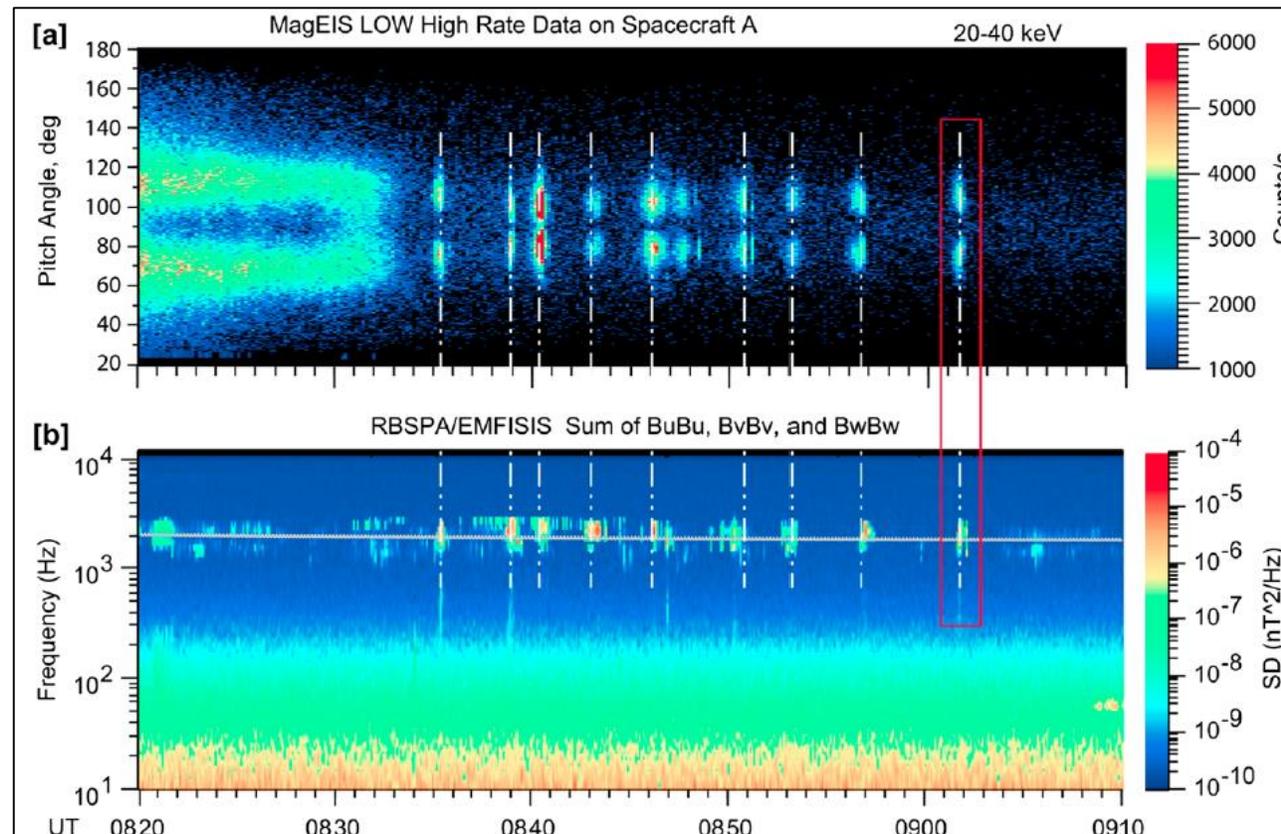
5 : 本研究の意義、今後の展望

従来の波動粒子相互作用の研究手法

波動観測と粒子観測それぞれのデータを、地上で比較したり、理論との整合性を検討してきた

➡ 現象を同時に観測しただけなのか、その場で波動粒子相互作用があったのかは判別がつかない

粒子観測データ



波動観測データ

Fennell et al. [2014]

米国RBSP衛星の観測データの解析例

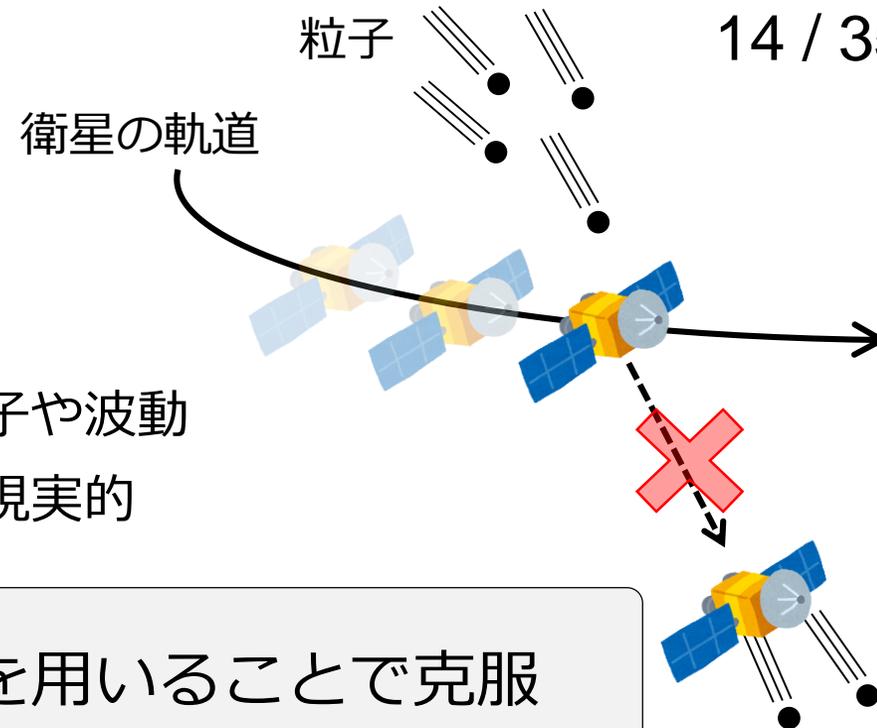
衛星観測の問題点

① 物理現象の追跡観測ができない

到来する粒子や波動を観測することは可能だが、個々の粒子や波動を追跡してエネルギー変化や振幅変化を観測することは非現実的

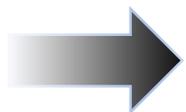


WPIA手法という今までにない発想の手法を用いることで克服



② 波動の周期より十分に細かい時間スケールでの粒子計測ができなかった

技術的問題や衛星設計仕様などの兼ね合いから高時間分解能の粒子観測が難しかった



MMS衛星搭載の高時間分解能な粒子計測データを利用し克服

WPIA手法（波動粒子相互作用直接解析手法）

日本の研究グループが提案した今までにない発想の解析手法

- Fukuhara et al. [2009] 手法の提案
 - Shoji et al. [2017] 衛星データに適用
 - 「宇宙プラズマから電波が発生する瞬間を特定」
- 過去のプレスリリース情報：

http://www.nagoya-u.ac.jp/about-nu/public-relations/researchinfo/upload_images/20170915_isee_1.pdf

粒子の分布の偏りによって生じる電流と波動電場を用いて以下の物理量を算出する方法

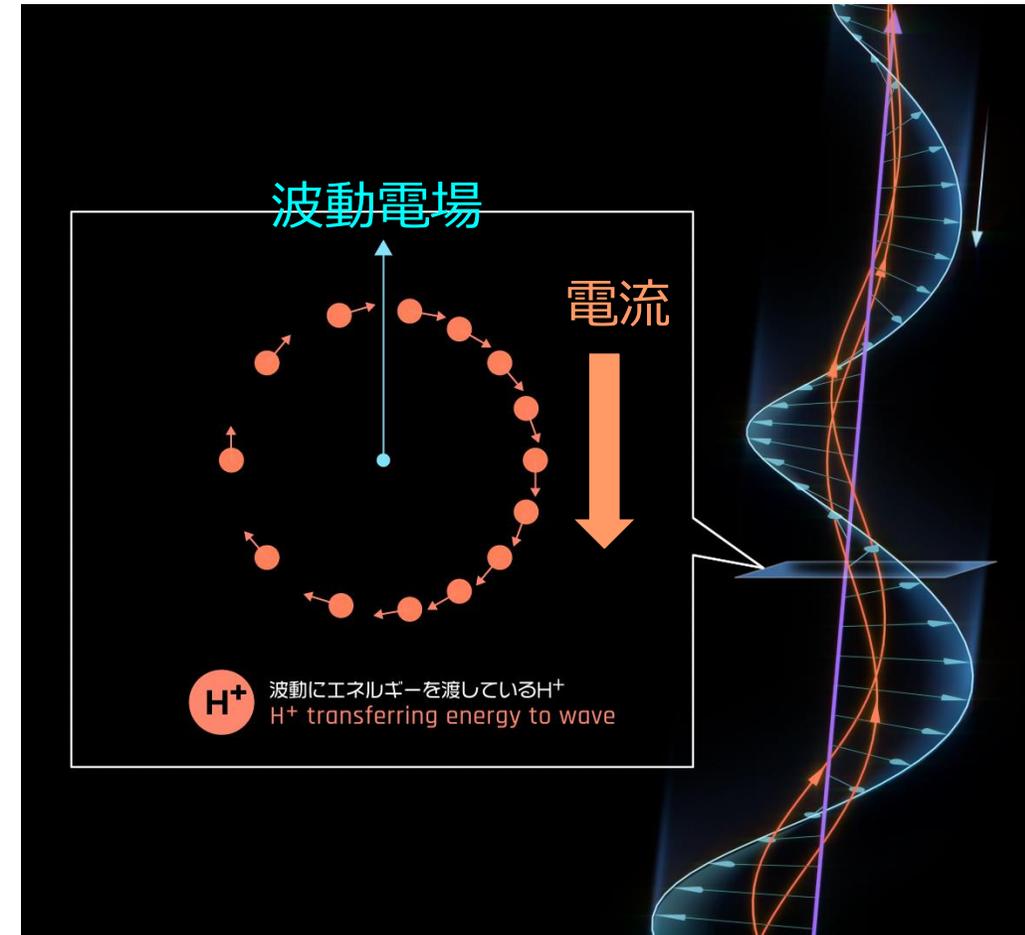
エネルギー輸送率（体積あたりのワット数）

$$W = \mathbf{j}_i \cdot \mathbf{E}_w$$

粒子の分布の偏りによって生じる電流

波動の電場成分

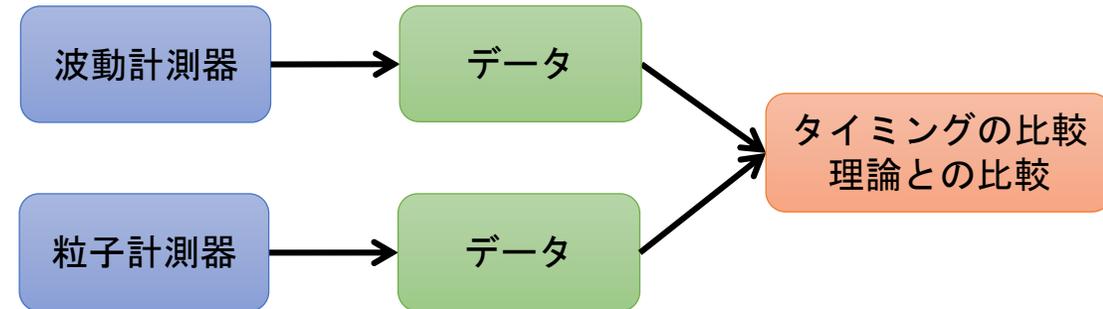
（ジュール熱 = 電流 × 電圧 に対応する）



研究手法の比較

✓ 従来の研究方法

- 波動観測（アンテナやコイルによる電磁波の検知）
- 粒子観測（粒子計測器による粒子の検出）
- それぞれのデータの比較、理論との整合性の検討



現象を同時に観測しただけか、その場で波動粒子相互作用があったのかは判別がつかない（**状況証拠**）

✓ WPIA手法

- 粒子観測は、波動の振動よりも細かい時間スケールで計測
- 粒子の分布から電流を計算
- 電流と波動電場を用いてエネルギー輸送率（すなわちジュール熱）を算出



その場所の観測データで、粒子と波動の間でエネルギー輸送が起きているか判別できる（**直接証拠**）

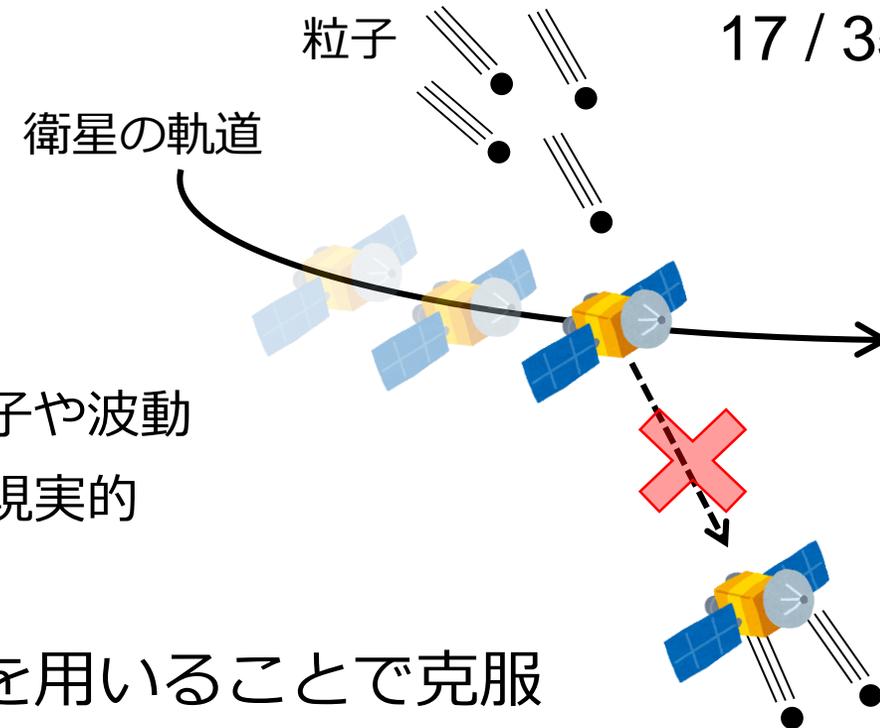
衛星観測の問題点

① 物理現象の追跡観測ができない

到来する粒子や波動を観測することは可能だが、個々の粒子や波動を追跡してエネルギー変化や振幅変化を観測することは非現実的



WPIA手法という今までにない発想の手法を用いることで克服



② 波動の周期より十分に細かい時間スケールでの粒子計測ができなかった

技術的問題や衛星設計仕様などの兼ね合いから高時間分解能の粒子観測が難しかった



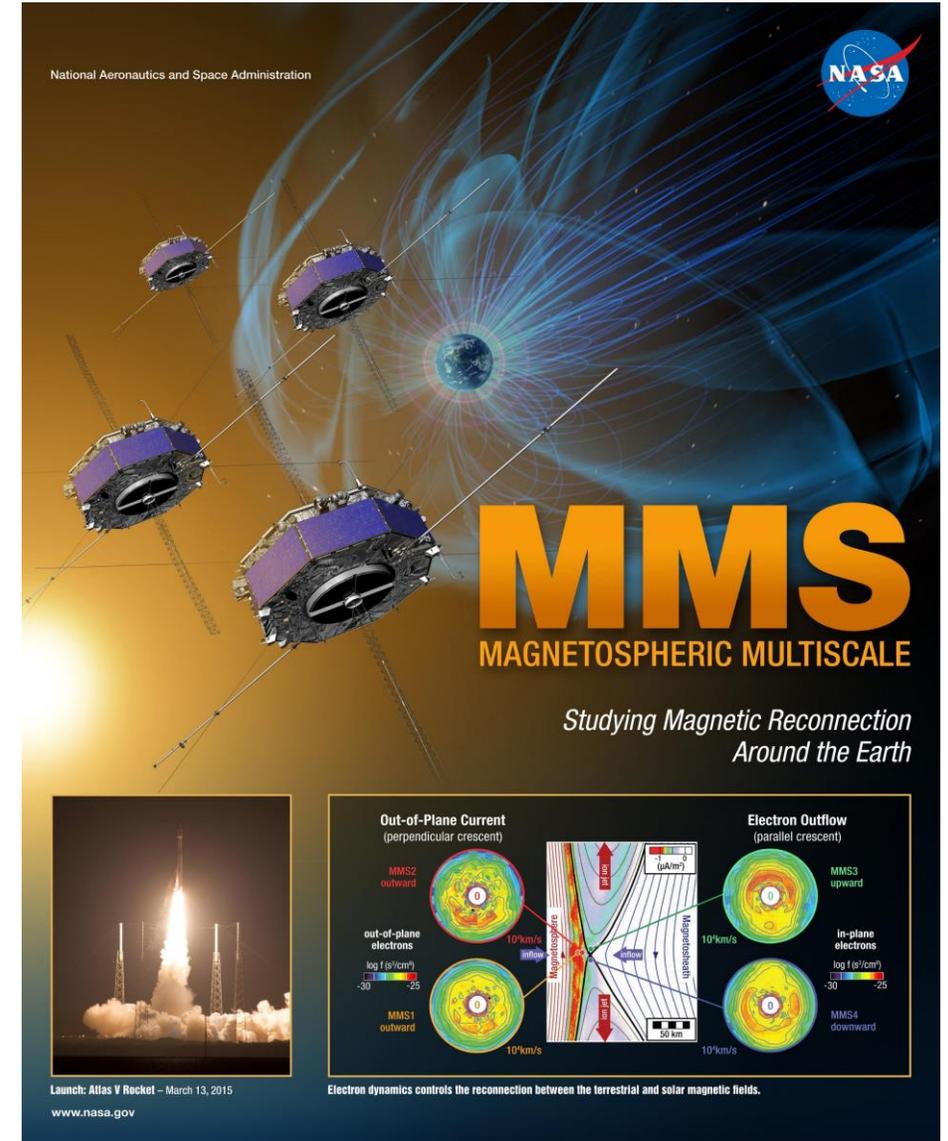
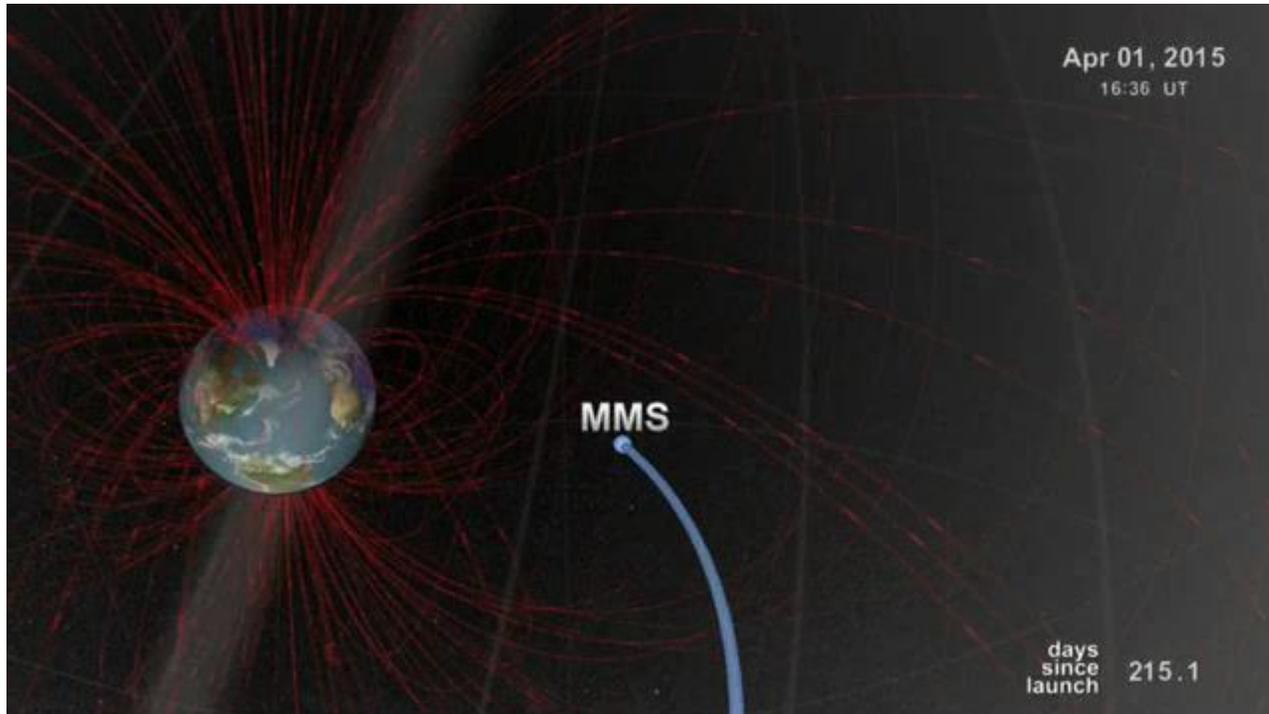
MMS衛星搭載の高時間分解能な粒子計測データを利用し克服

米国Magnetospheric Multiscale (MMS)ミッション

2015年3月13日打ち上げ
同型の4機からなる磁気圏編隊観測衛星

目的: 「磁気リコネクション」の発生メカニズムの理解

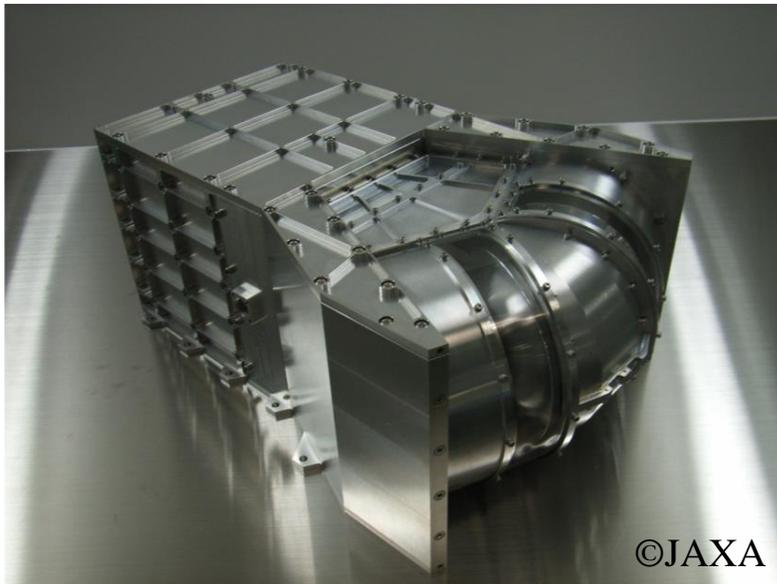
※この本来の目的は本研究の対象の波動粒子相互作用とは異なる



デュアル - イオンエネルギー分析器

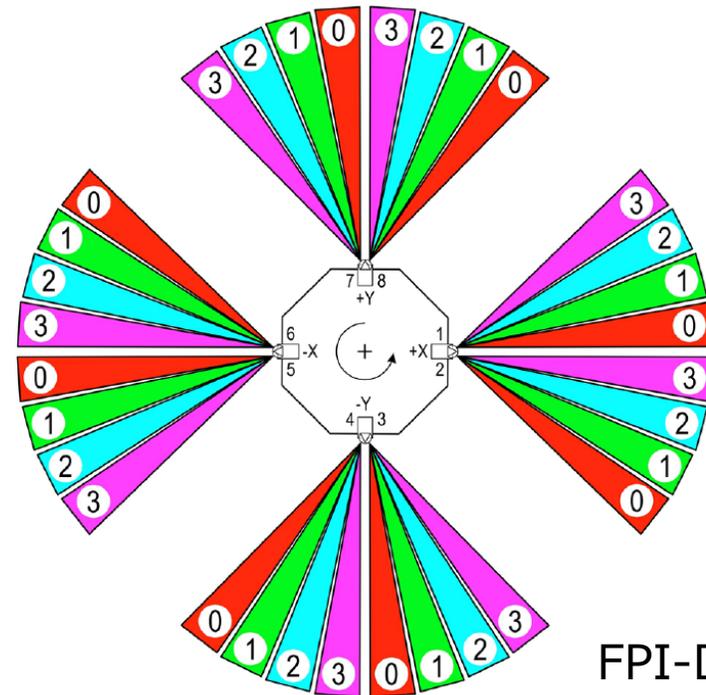
Fast Plasma Investigation – Dual Ion Spectrometer (FPI-DIS)

- 全天から来る0.01-30キロ電子ボルトの運動エネルギーを持つイオンを計測可能
 イオンのエネルギーと到来方向を0.15秒ごとに観測 (過去の衛星の20倍以上の時間分解能)
 → WPIA手法に必要な、波動の周期より十分に高い時間分解能(約100倍)を達成



©JAXA

FPI-DIS(1衛星あたり4台, 合計16台搭載)



FPI-DISの配置と視野
 [Pollock et al., 2016]

設計、製作、単体試験等を、JAXA宇宙科学研究所
 (齋藤、横田(製作当時))、明星電気が担当

本発表の流れ

1 : 研究背景

- ✓ 磁気圏プラズマ
- ✓ 電磁イオンサイクロトロン波動 (EMIC波動)
- ✓ 波動粒子相互作用の研究の重要性と課題

2 : 研究手法

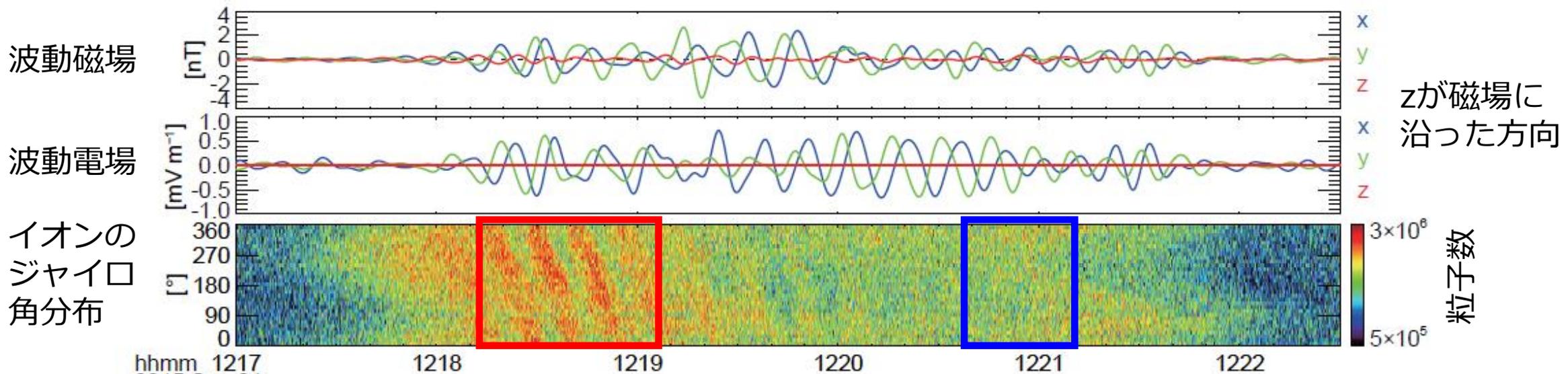
- ✓ 波動粒子相互作用直接解析手法 (WPPIA手法)
- ✓ 米国MMSミッションとFPI-DIS観測器

3 : 観測結果

4 : 結論

5 : 本研究の意義、今後の展望

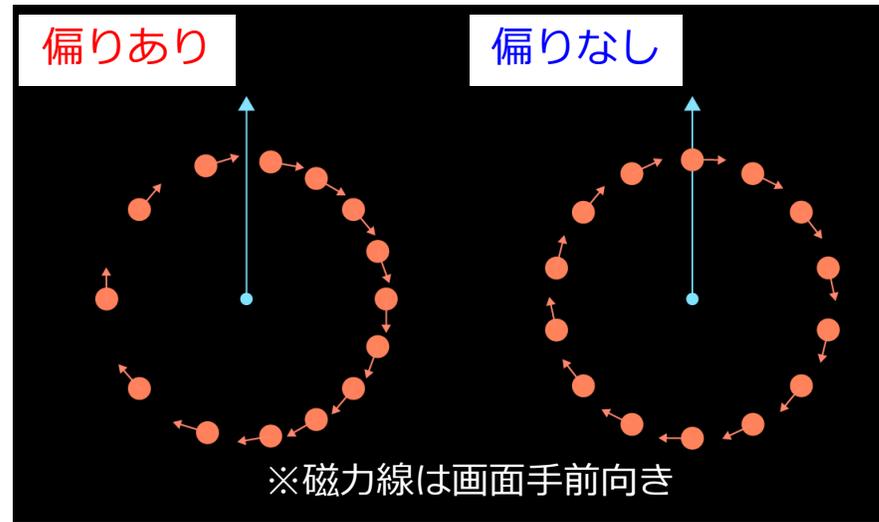
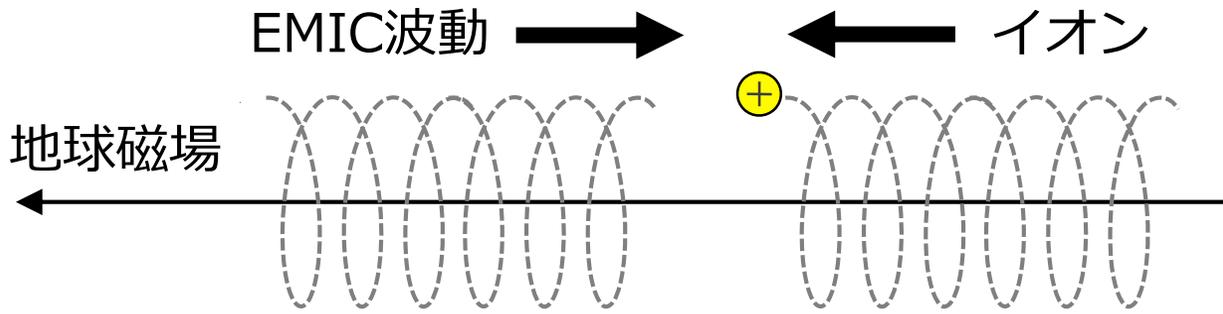
結果 (水素イオンH⁺に関連する観測)



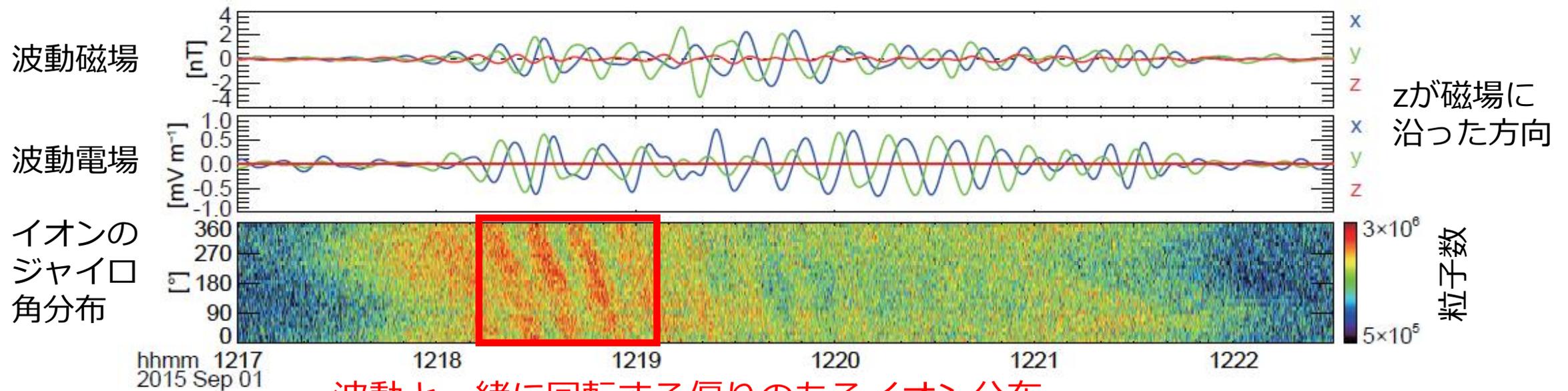
波動と一緒に回転する
偏りのあるイオン分布

偏りのないイオン分布

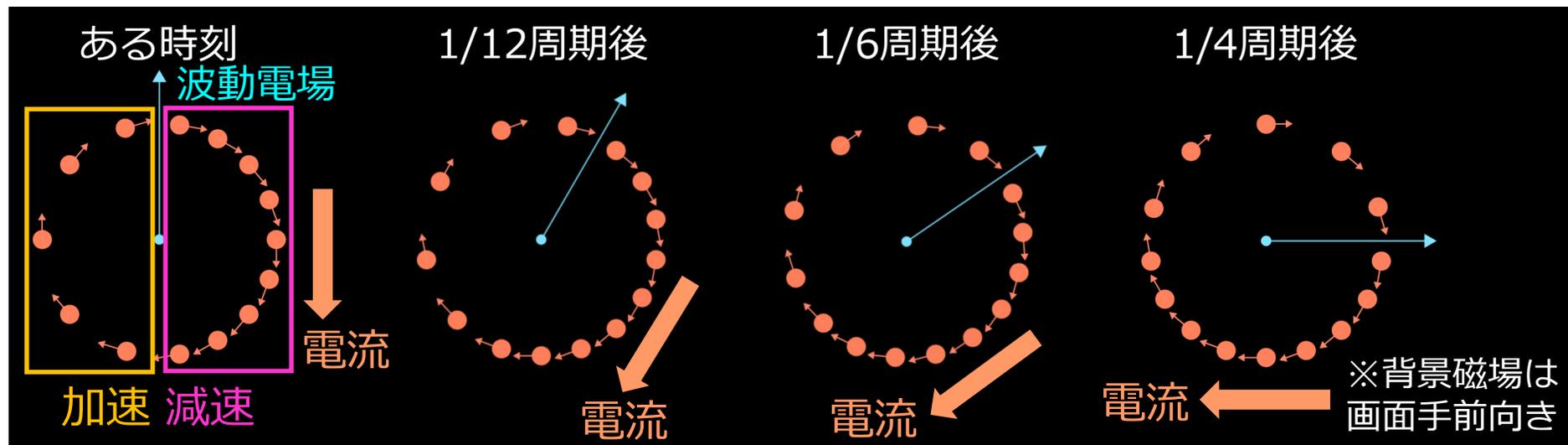
サイクロトロン共鳴条件に近いイオンを抽出



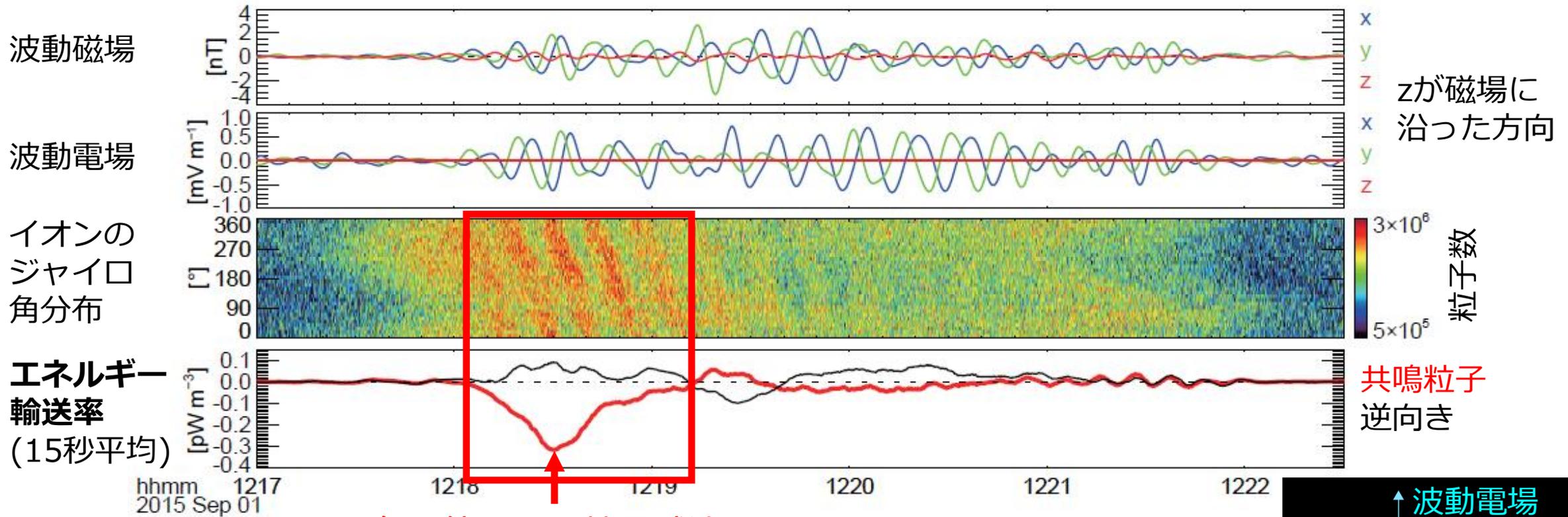
結果 (水素イオン H^+ に関連する観測)



波動と一緒に回転する偏りのあるイオン分布

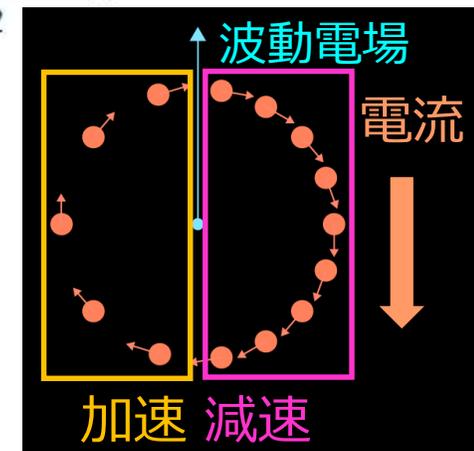


結果 (水素イオン H^+ に関連する観測)

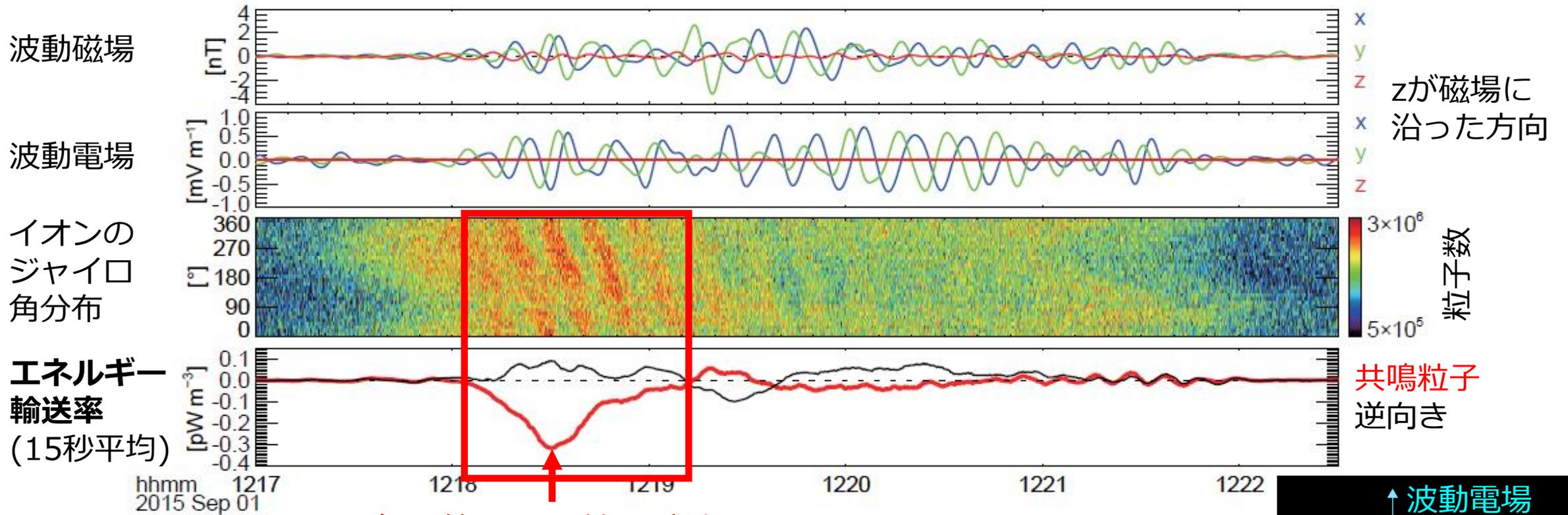


負の値なので粒子減速
(= エネルギーが水素イオン H^+ からEMIC波動へ)

- ✓ 偏りのあるイオン分布の観測はShoji et al. [2017] についで2例目
- ✓ 今回は波動1周期(約15秒)以下で検出
(\ll 40周期程度の時間スケール[Shoji et al., 2017])

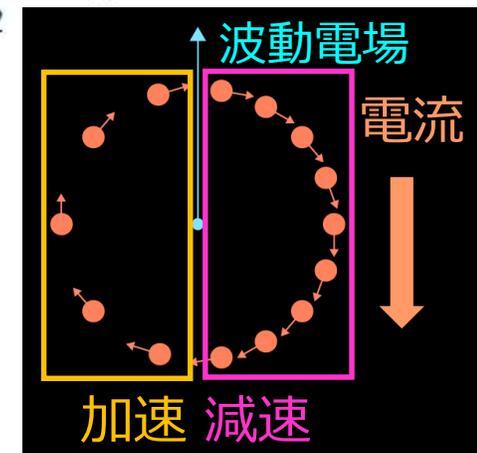


結果 (水素イオン H^+ に関連する観測)

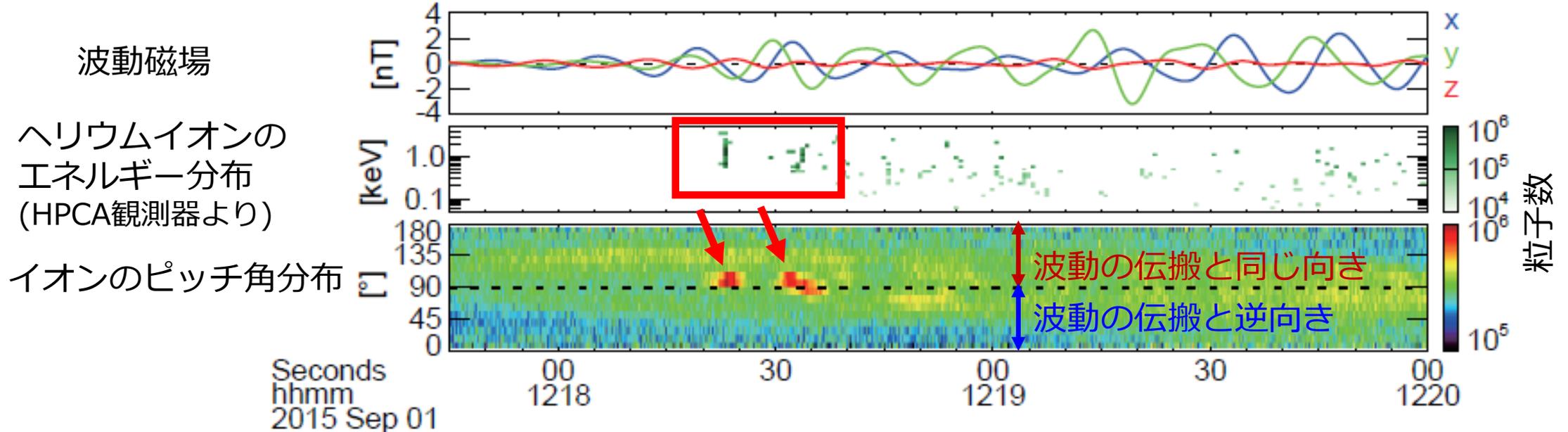


負の値なので粒子減速
 (= エネルギーが水素イオン H^+ からEMIC波動へ)

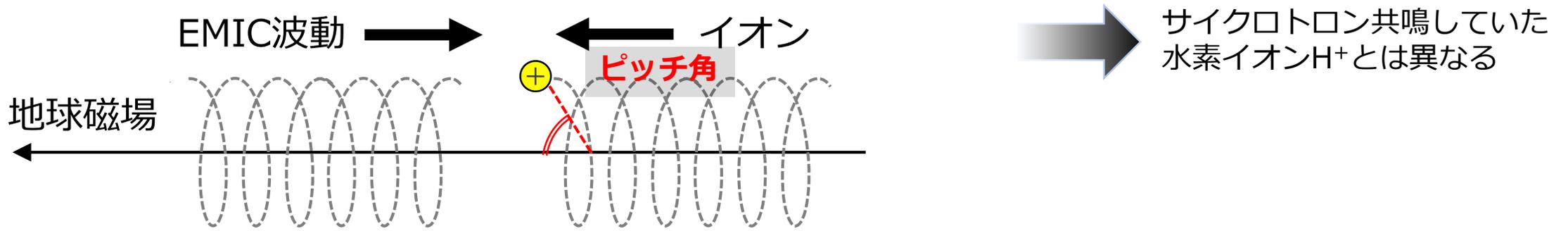
- ✓ 共鳴付近の水素イオン H^+ について波動の1周期程度(約15秒)の時間分解能でイオンと波動の間の**負のエネルギー輸送率**を検出に成功
- ✓ 共鳴と逆向きの水素イオン H^+ とのエネルギー輸送は小さい
 →サイクロトロン共鳴が重要であると直接観測から実証



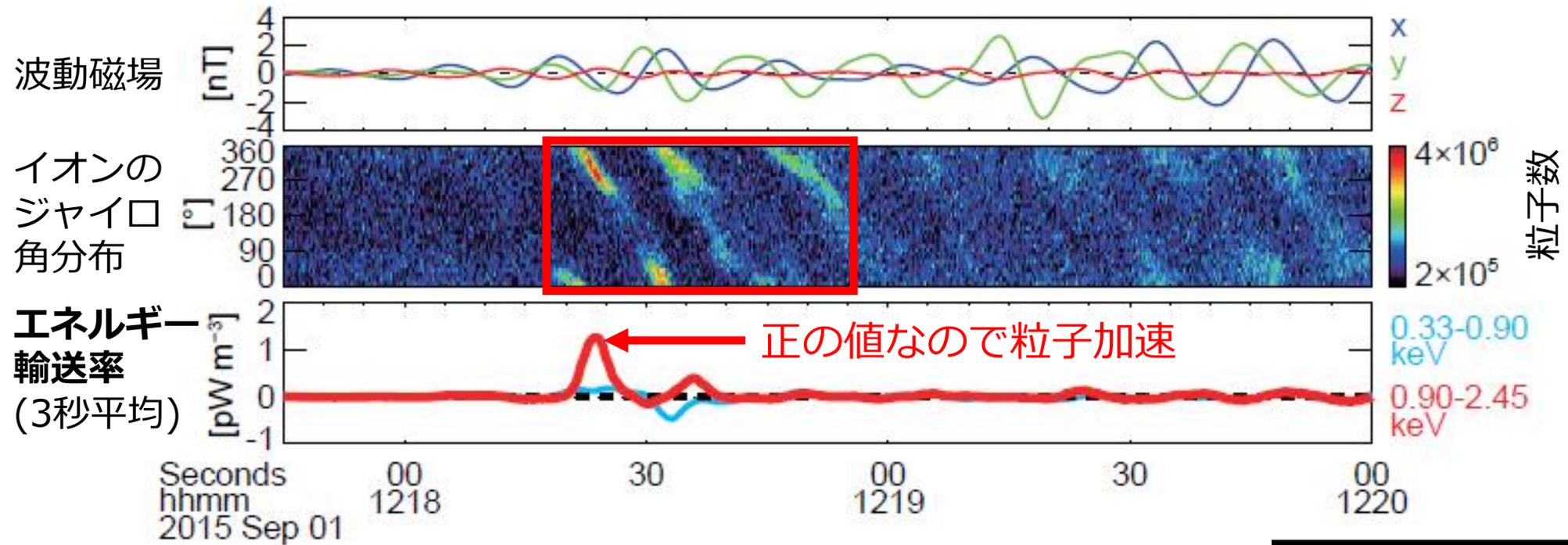
結果 (ヘリウムイオンHe⁺に関連する観測)



- ✓ EMIC波動に伴って、2キロ電子ボルト程度のヘリウムイオンHe⁺を観測
- ✓ 共鳴は波動の伝播と逆向きで起きると期待されるが、ヘリウムイオンHe⁺に対応するイオン集団は波動の伝搬と同じ向きに局在して存在 **(=共鳴はしていない)**

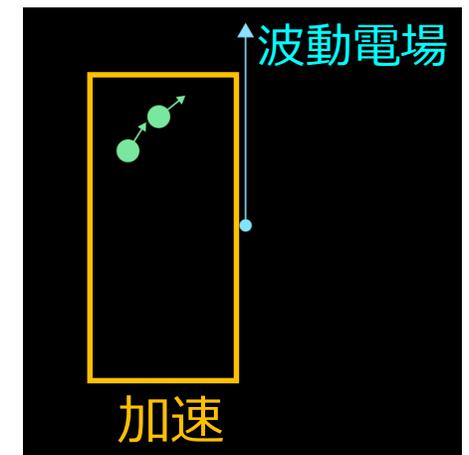


結果 (ヘリウムイオン He^+ に関連する観測)



- ✓ 回転する偏りが極めて大きいイオン分布を観測
- ✓ **正のエネルギー輸送率**(=粒子加速)の直接計測に成功 (世界初)

➡ 負のエネルギー輸送率を持っていた水素イオンとは逆



本発表の流れ

1 : 研究背景

- ✓ 磁気圏プラズマ
- ✓ 電磁イオンサイクロトロン波動 (EMIC波動)
- ✓ 波動粒子相互作用の研究の重要性と課題

2 : 研究手法

- ✓ 波動粒子相互作用直接解析手法 (WPPIA手法)
- ✓ 米国MMSミッションとFPI-DIS観測器

3 : 観測結果

4 : 結論

5 : 本研究の意義、今後の展望

背景磁場
Background magnetic field

電磁イオンサイクロトロン波動
Electromagnetic ion cyclotron (EMIC) wave

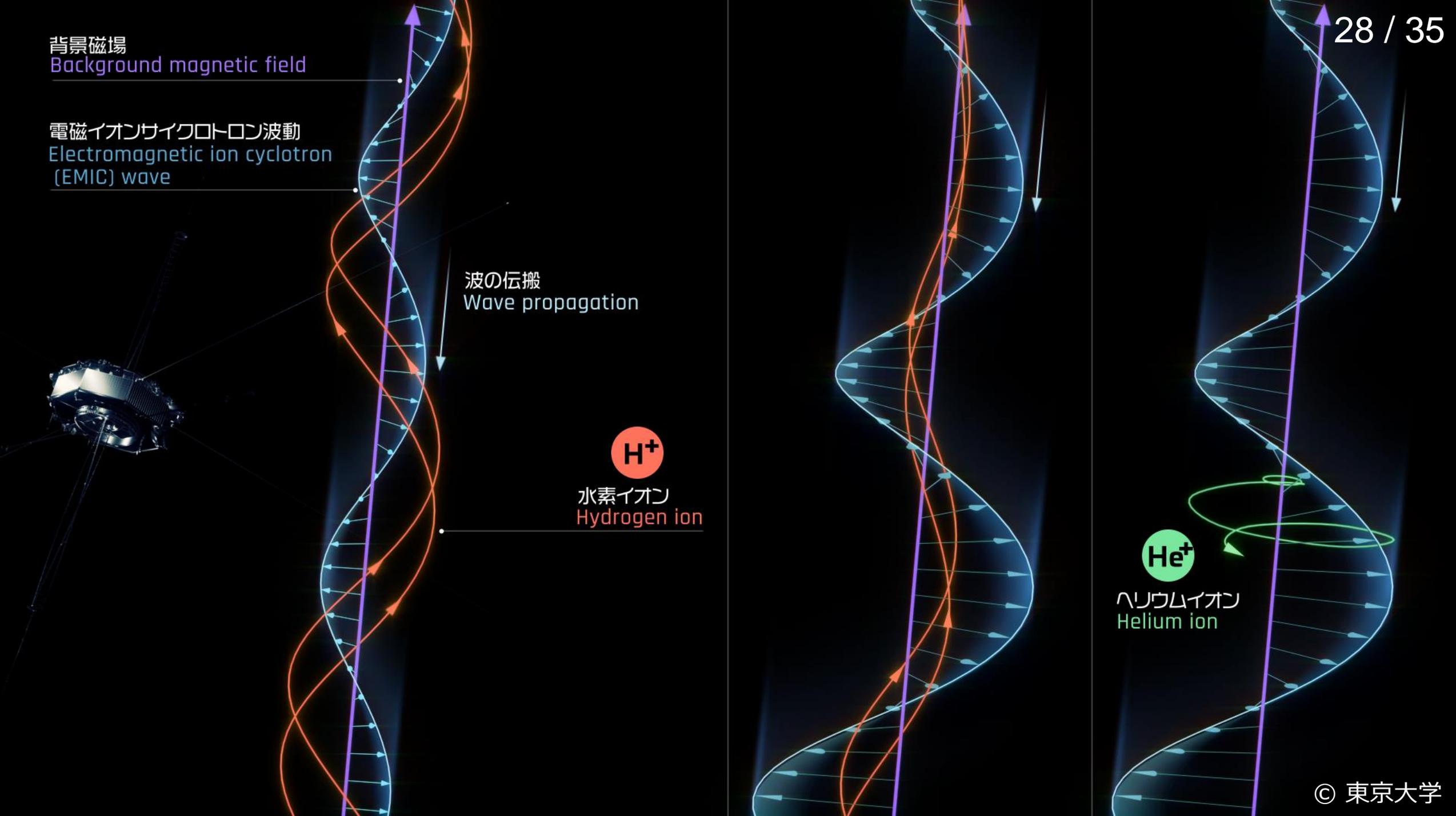
波の伝搬
Wave propagation

H^+

水素イオン
Hydrogen ion

He^+

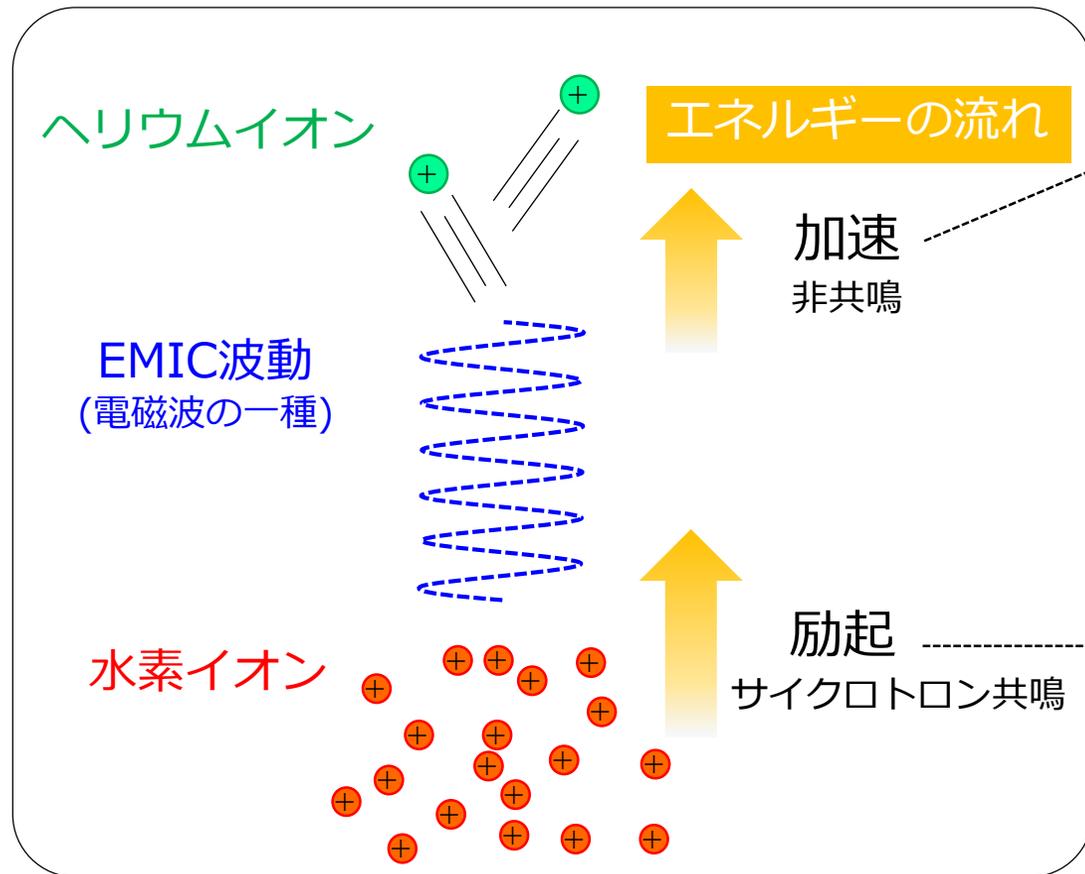
ヘリウムイオン
Helium ion



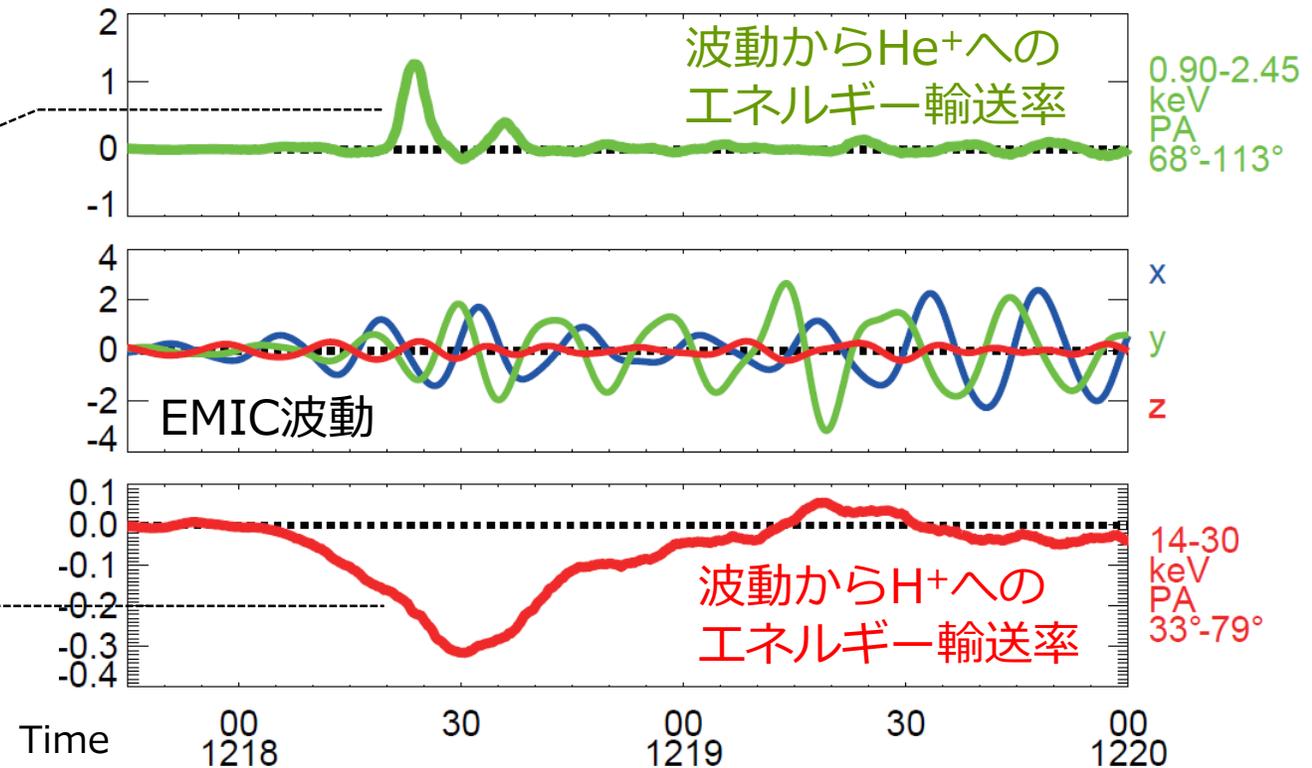
結論

MMS衛星の観測データを解析し、宇宙空間で水素イオン(H^+)とヘリウムイオン(He^+)という異なるプラズマ粒子群が直接衝突せずに電磁イオンサイクロトロン(EMIC)波動を介してエネルギーをやりとりしている一連の過程を捉えた

概念図



MMS衛星の観測データ



本発表の流れ

1 : 研究背景

- ✓ 磁気圏プラズマ
- ✓ 電磁イオンサイクロトロン波動 (EMIC波動)
- ✓ 波動粒子相互作用の研究の重要性と課題

2 : 研究手法

- ✓ 波動粒子相互作用直接解析手法 (WPPIA手法)
- ✓ 米国MMSミッションとFPI-DIS観測器

3 : 観測結果

4 : 結論

5 : 本研究の特徴、今後の展望

本研究のポイント

地球磁気圏は衛星を送り込んで直接かつ詳細に観測できる宇宙空間

本研究の新規性

- ◆ 水素イオン → 電磁波 → ヘリウムイオンというエネルギー輸送の一連の流れを直接観測した
 - ✓ 粒子によって電磁波が成長していることを直接観測によって示したのは世界2例目
 - ✓ 電磁波によって粒子が加速していることを直接観測によって示したのは世界初
- ◆ エネルギー輸送の観測から波動粒子相互作用の種類を同定した

本研究の特徴

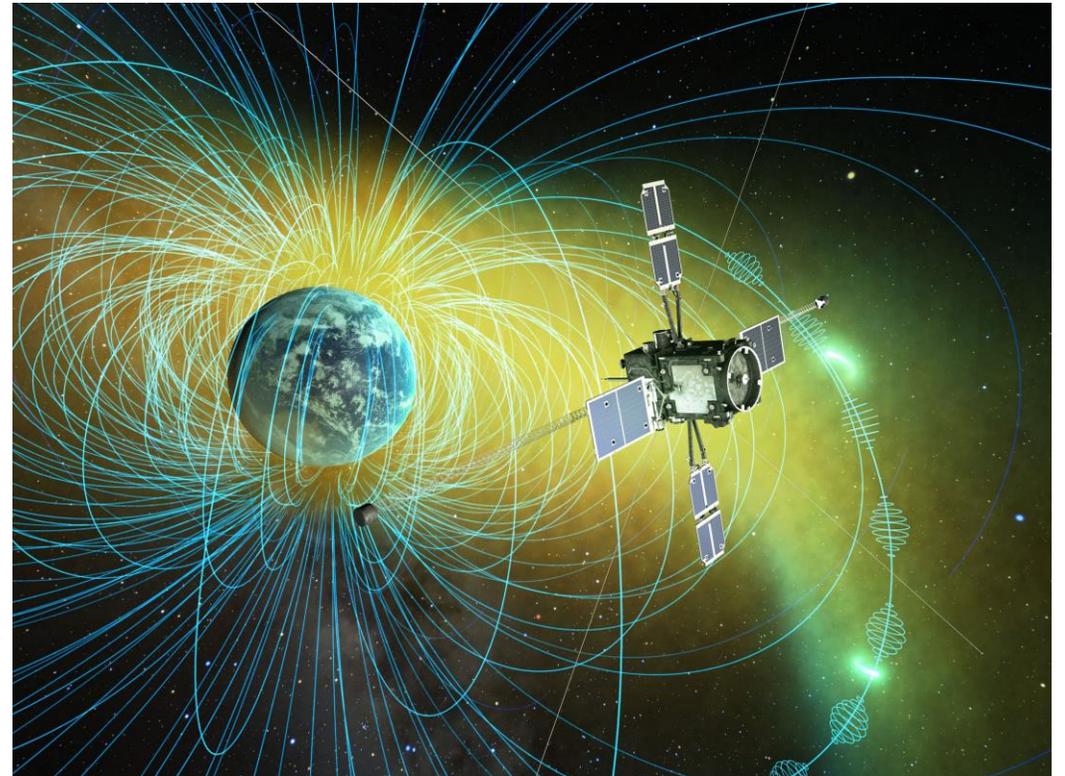
- ◆ 日本製の観測装置のデータを主に使用した
- ◆ 日本の研究グループが提案した新しい発想の解析手法を用いた

今後の展望

今回実証された解析手法・研究結果は様々な宇宙空間における波動粒子相互作用研究に応用可能であり、将来の宇宙探査ミッションにおいて日本がこの研究分野をリードしてゆく基盤となる

ジオスペース探査衛星「あらせ」

- ✓ プロトンオーロラの降り込み過程
- ✓ コーラス放射（電磁波）の発生過程
- ✓ 脈動オーロラの降り込み過程
- ✓ 放射線帯高エネルギー粒子の加速・消失過程



提供: ERGサイエンスセンター

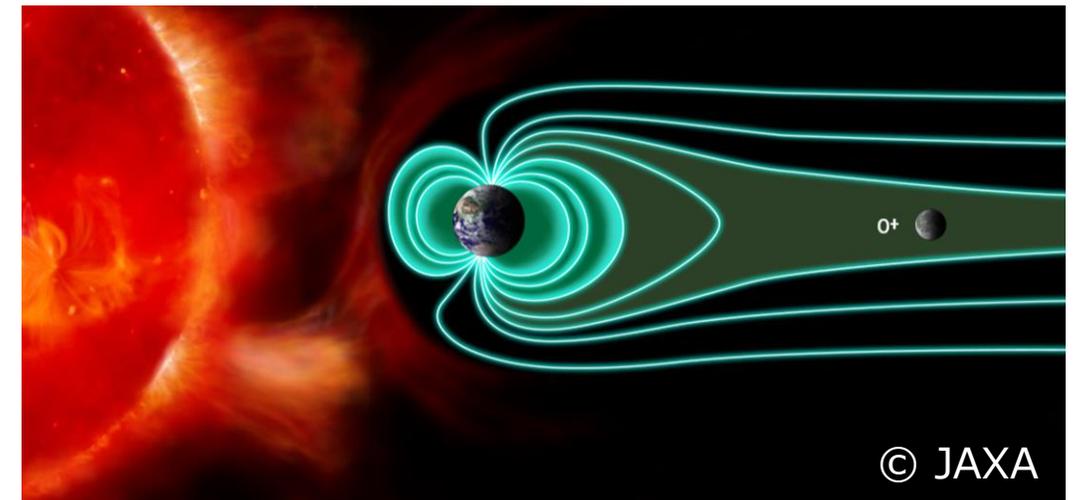
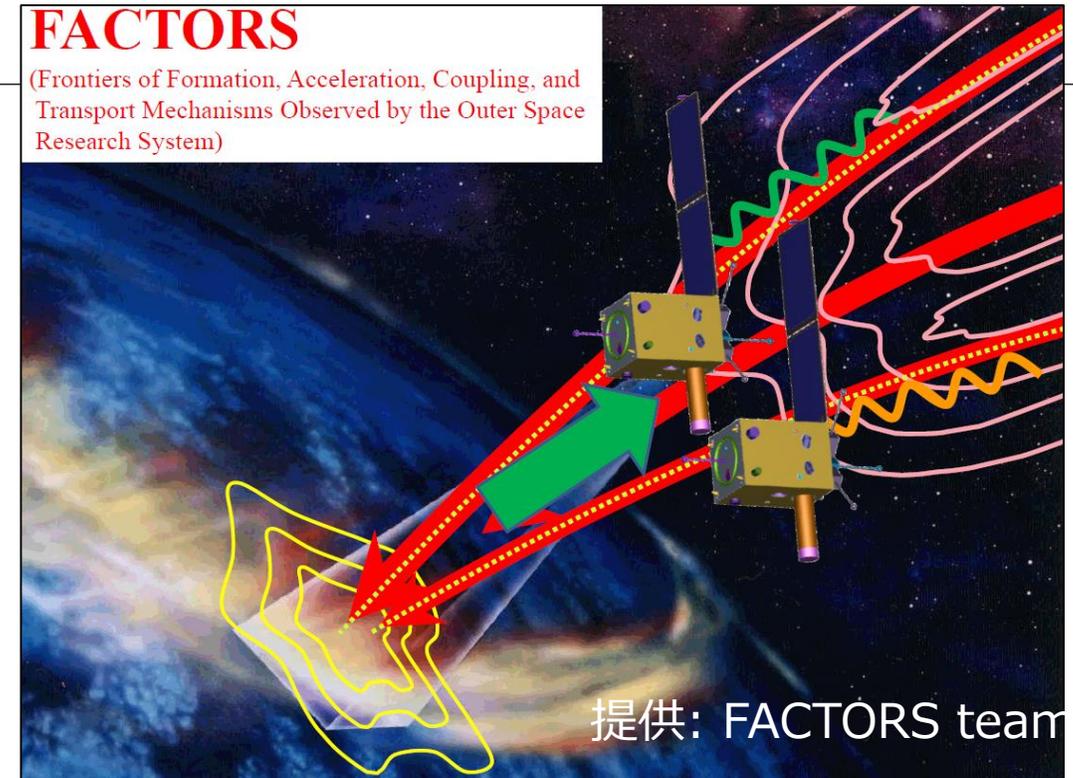
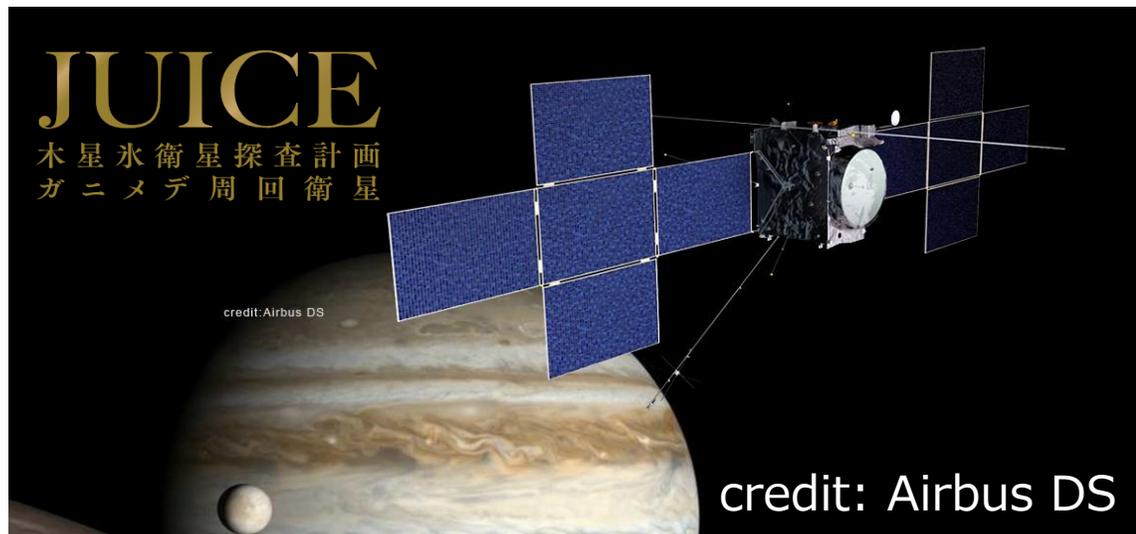
今後の展望

木星氷衛星探査計画 JUICE (計画中)

- ✓ 木星磁気圏におけるイオン加熱・加速
- ✓ ガニメデ衛星極域におけるイオン加熱・加速

電磁気圏将来探査ミッション FACTORS (提案準備中)

- ✓ 地球極域からの大気流出
(流出した酸素イオンは月にまでも達する)



題目：

Direct Measurements of Two-Way Wave-Particle Energy Transfer in a Collisionless Space Plasma

著者：

北村 成寿(東京大学、投稿時はJAXA宇宙科学研究所), 北原 理弘(東北大学),
小路 真史, 三好 由純(名古屋大学), 長谷川 洋(JAXA宇宙科学研究所),
中村 紗都子(京都大学), 加藤 雄人(東北大学), 齋藤 義文(JAXA宇宙科学研究所),
横田 勝一郎(大阪大学), D. J. Gershman(NASAゴダード宇宙飛行センター),
A. F. Vinas(NASAゴダード宇宙飛行センター、アメリカン大学),
B. L. Giles, T. E. Moore, W. R. Paterson(NASAゴダード宇宙飛行センター),
C. J. Pollock(デナリサイエンティフィック),
C. T. Russell, R. J. Strangeway(カリフォルニア大学ロサンゼルス校),
S. A. Fuselier(サウスウェスト研究所、テキサス大学サンアントニオ校),
J. L. Burch(サウスウェスト研究所)

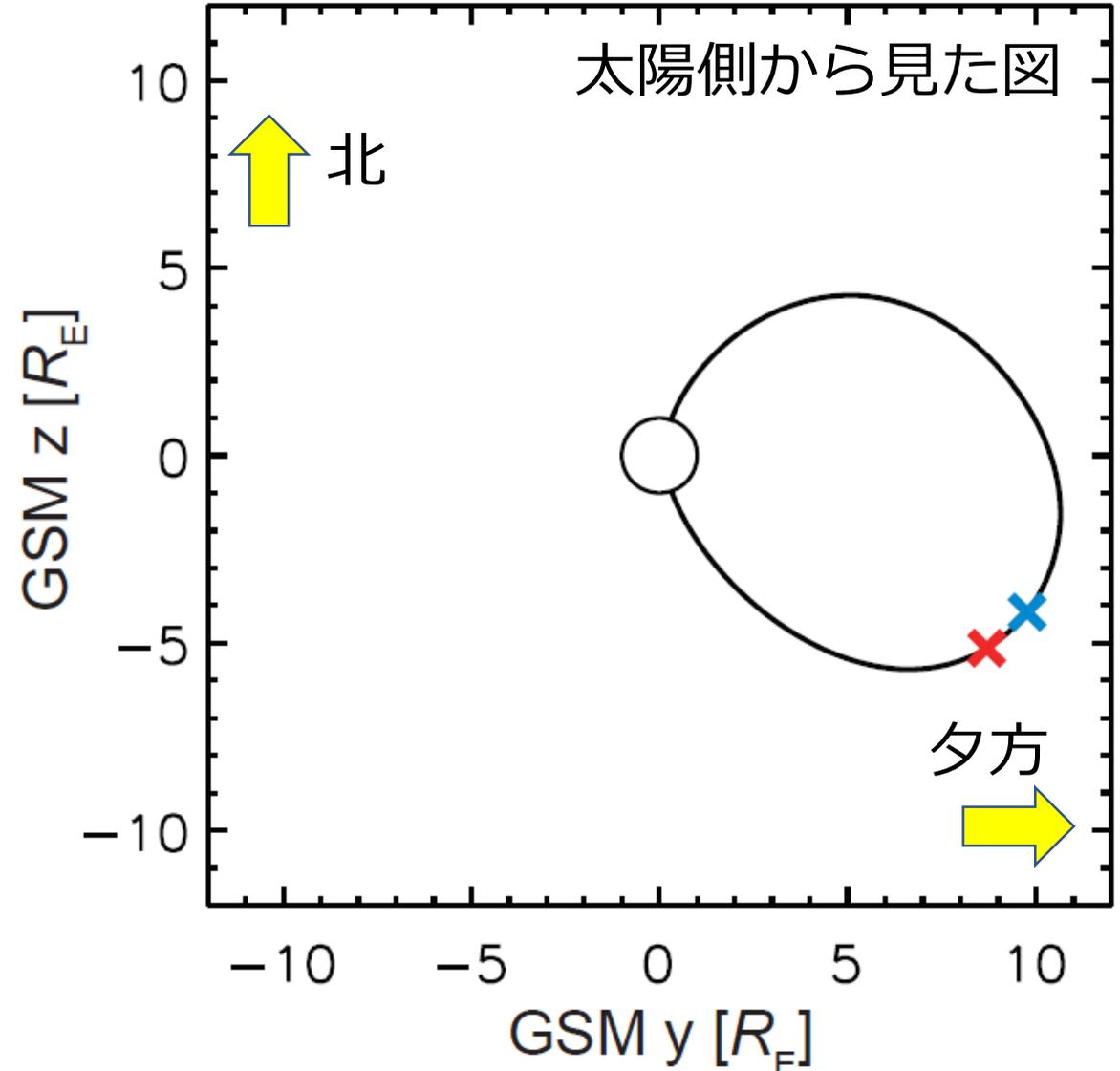
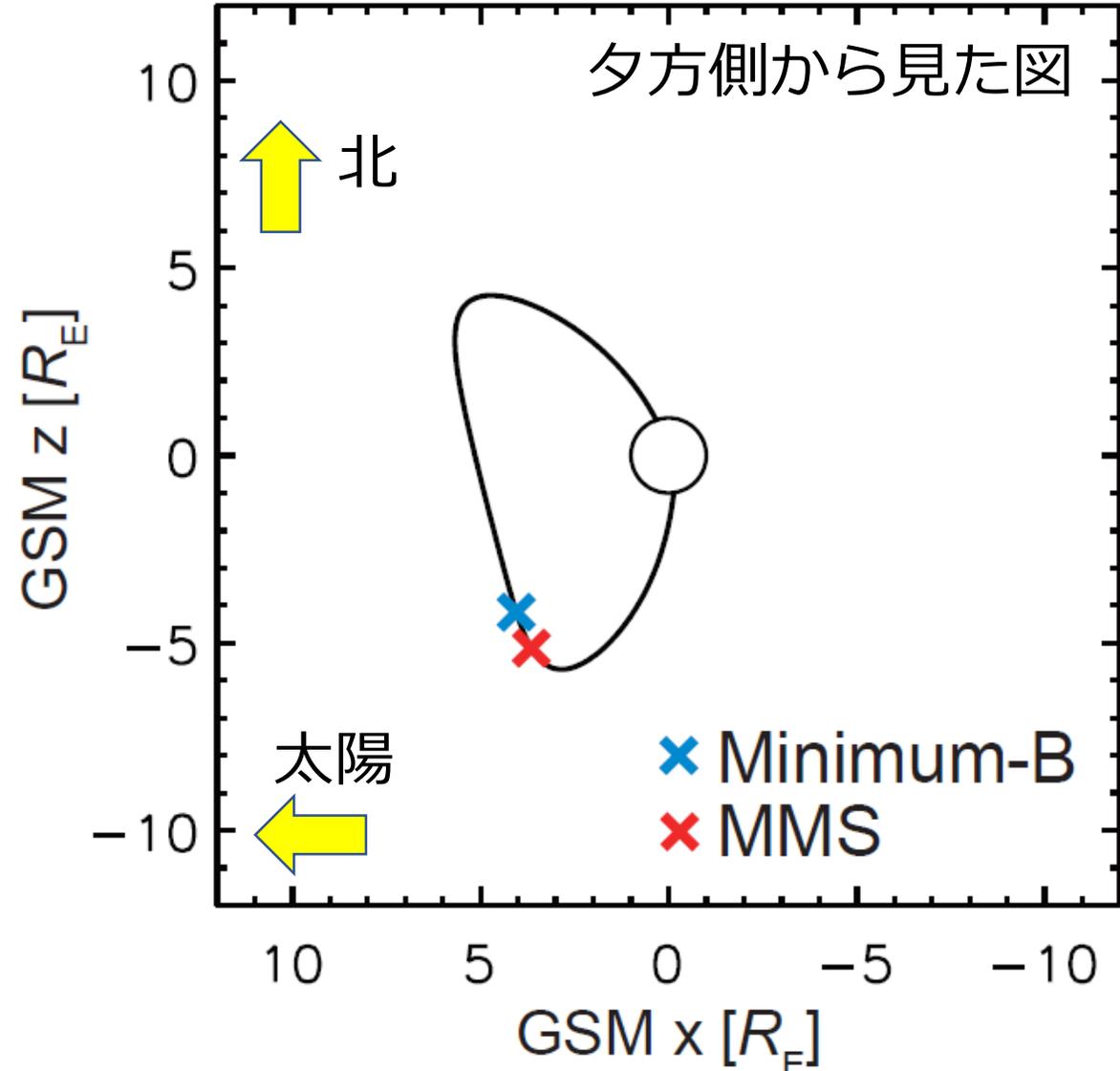
掲載誌：

米国科学誌 Scienceに2018年9月7日掲載 (DOI: 10.1126/science.aap8730)



本成果の一部はJSPS科研費(17H06140, 15H05747, 15H05815, 17K14402, 16H06286, 15H03730)の助成を受けたものです。

観測位置(2015年9月1日 世界時12:18)



磁場モデルに基づくEMIC波動が生成されると期待される磁場強度の極小に近い
※衛星間距離は160 km(≪地球半径(R_E)6371 km)なのでこのスケールでは4衛星はほぼ重なっている