

磁気圏プラズマを通して見る
20年後の宇宙・惑星探査

笠原 慧

宇宙プラズマ研究系
ISAS/JAXA

Outline

- 磁気圏プラズマ研究とは
- 研究の「いま」と「20年後」
- 20年間の過ごし方
- 纏め

Outline

- 磁気圏プラズマ研究とは
- 研究の「いま」と「20年後」
- 20年間の過ごし方
- 纏め



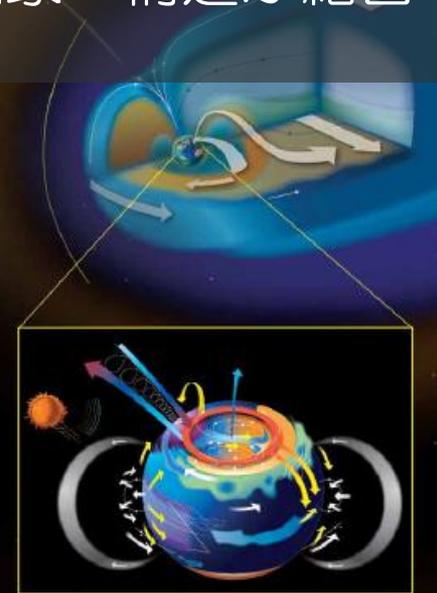
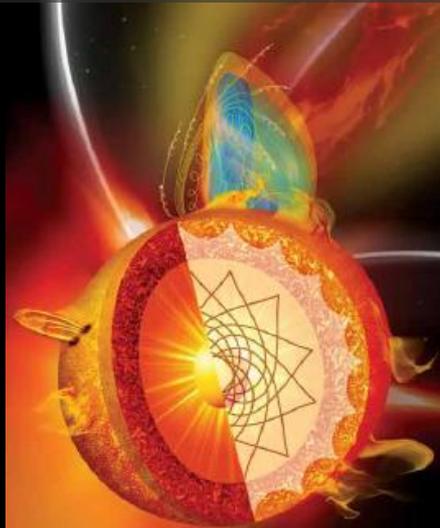
20年くらい前の磁気圏プラズマ研究

- あけぼの(1989), GEOTAIL(1992) 打上げ
- 磁気圏プラズマ分野は大きく発展
- これらの衛星で探求してきた事は？



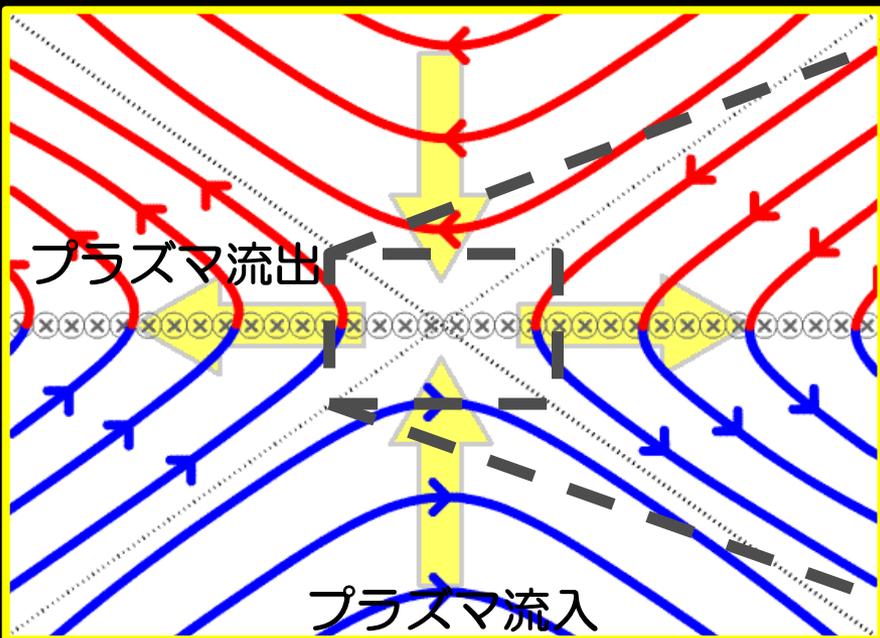
磁気圏プラズマ研究の主軸

- プラズマ物理の「実験室」としての磁気圏
 - 衝撃波, 磁気リコネクション, プラズマ境界層
 - プラズマ輸送, 加熱, 非熱的加速 → 遠天体・地上実験室プラズマと相補的な研究
- 惑星・生命を取り巻く世界（システム）としての太陽, 磁気圏
 - 恒星（太陽） --- 惑星磁気圏 --- 大気が連結
 - 幅広い時空スケール・エネルギーレンジの現象・構造が結合

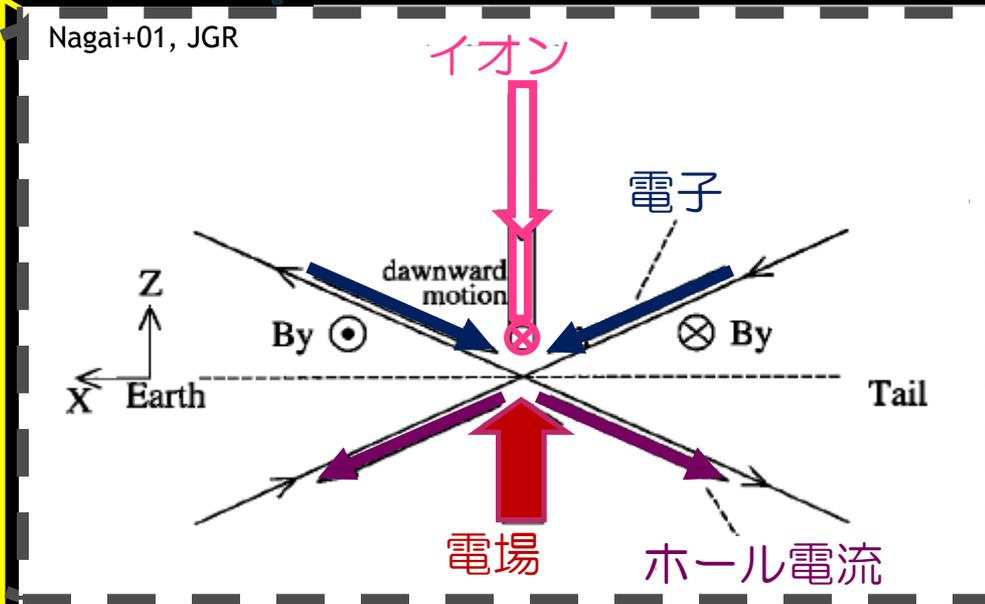


プラズマ研究の例：プラズマ素過程

- **磁気リコネクション**：磁力線のつなぎかえ現象
 - 太陽・遠天体や実験室プラズマでも重要な物理プロセス
- **GEOTAIL**による「高時間分解能・高空間解像度」プラズマ観測
 - →マクロスケール（電子・イオンの単一流体）からミクロスケール（イオンと電子の運動が分離）へ



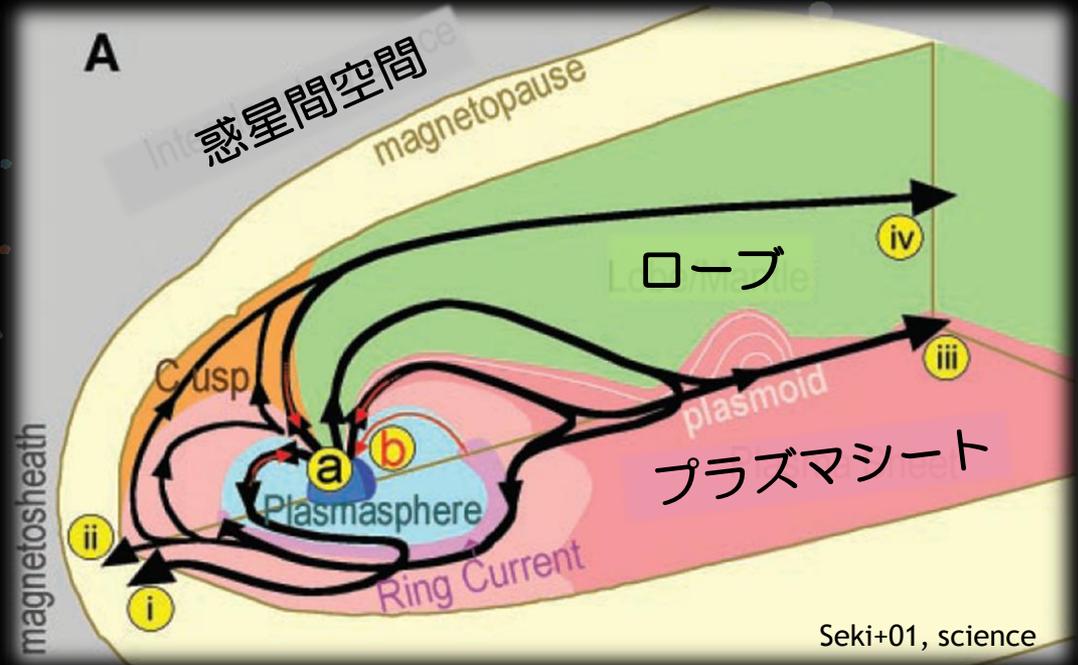
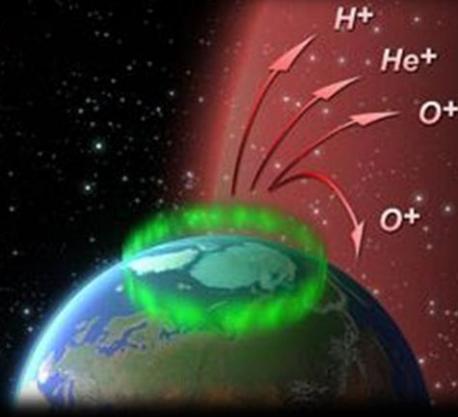
GEOTAIL以前
マクロスケール（流体的運動）の観測



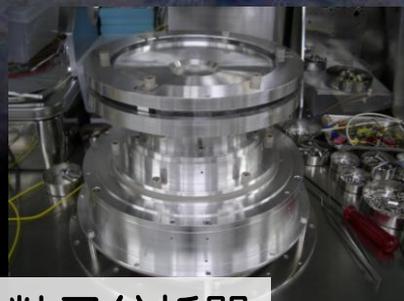
GEOTAIL観測
ミクロスケール（荷電粒子の運動）

プラズマ研究の例：磁気圏の物理

- プラズマの大規模輸送
- 極域（あけぼの）や遠尾部ローブ領域（GEOTAIL）における地球起源酸素イオンの発見，定量
 - →地球磁気圏システムにおける物質輸送の新しい像



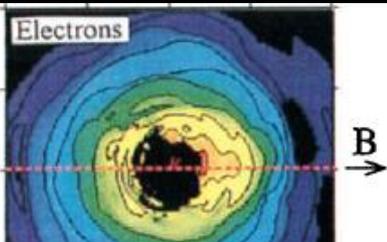
磁気圏プラズマ研究の進め方



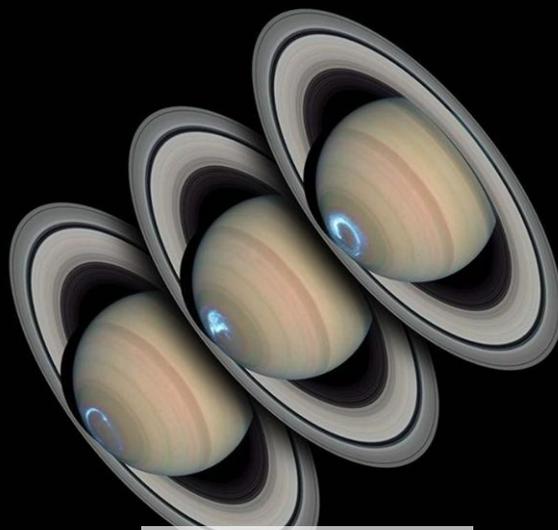
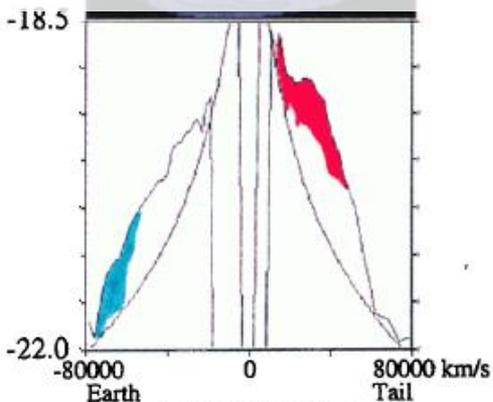
粒子分析器

観測

- 人工衛星による直接観測・撮像観測
- 地上カメラ・望遠鏡による撮像観測
- 地上計測器 (e.g., 磁力計) によるリモート観測



電子の速度分布関数



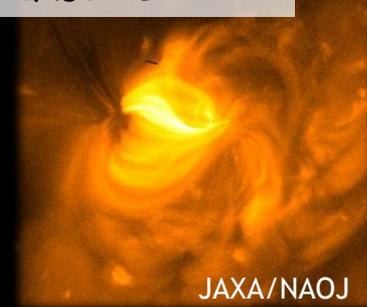
土星オーロラ

水星大気散逸



Kameda+08, ASR

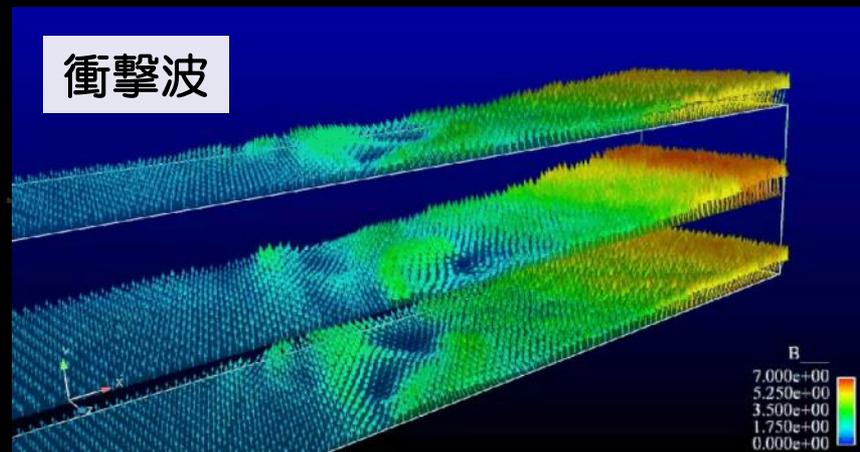
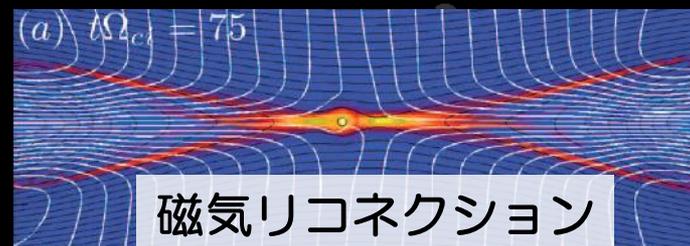
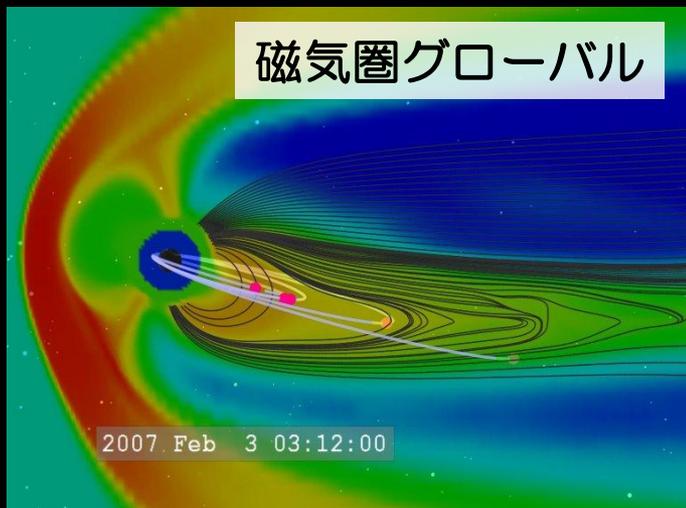
太陽プラズマ



JAXA/NAOJ

磁気圏プラズマ研究の進め方-II

- 理論・シミュレーション
 - バリエーションは広い
 - 電磁流体グローバルシミュレーション
 - 現象を切り取ったローカルシミュレーション（衝撃波, リコネクション, プラズマ境界層, ...)
 - 階層間・領域間結合シミュレーション



磁気圏プラズマ研究の進め方

- 観測
 - 人工衛星による直接観測・撮像観測
 - 地上カメラ・望遠鏡による撮像観測
 - 地上計測器（e.g., 磁力計）によるリモート観測
- 理論・シミュレーション
 - 電磁流体グローバルシミュレーション
 - 現象を切り取ったローカルシミュレーション（衝撃波, リコネクション, ...）
 - 階層間・領域間結合シミュレーション
- 20年後もこれらの研究手法は存在するだろう
 - 観測結果のみから帰納的に全ての真実を暴く事は恐らく不可能
 - 人間はそれほど賢くない
 - 一方観測からのインプットのない理論・シミュレーション研究も不可能
 - 新しい刺激がなければ進展もない

Outline

- 磁気圏プラズマ研究とは
- 研究の「いま」と「20年後」
 - シミュレーションの「いま」と「20年後」
 - 観測の「いま」と「20年後」
- 20年間の過ごし方
- 纏め



シミュレーション研究の「いま」

Development

Understanding

- コンピュータの性能による制限のなかで様々な近似を用いた計算が行われている
 - 1次元, 2次元, (3次元)
 - 流体近似, 二流体近似, 流体-粒子, (フル粒子)
 - 低イオン電子質量比, 低光速, 非現実的境界条件
- 同じ現象でも研究グループによって異なる結果が提出される
 - 物理的に本質的な議論が難しい
- 衆目一致の結果がひっくり返る事も...
 - 様々な近似や制限を現状では必要悪として黙認

では20年後のコンピュータパフォーマンスは？



シミュレーションの「20年後」



- より現実的なパラメータ, 3次元
 - → 近似による混乱のないシミュレーションの実現
- 「フラッグシップ」から「研究室レベル」への技術移転
 - 観測データ解析を中心に行う研究者が気軽に観測⇔シミュレーション比較
 - → 全体としてのシミュレーション研究はより活性化

Outline

- 磁気圏プラズマ研究とは
- 研究の「いま」と「20年後」
 - シミュレーションの「いま」と「20年後」
 - 観測の「いま」と「20年後」
- 20年間の過ごし方
- 纏め



観測の「いま」

プラズマ素過程
太陽・地球磁気圏

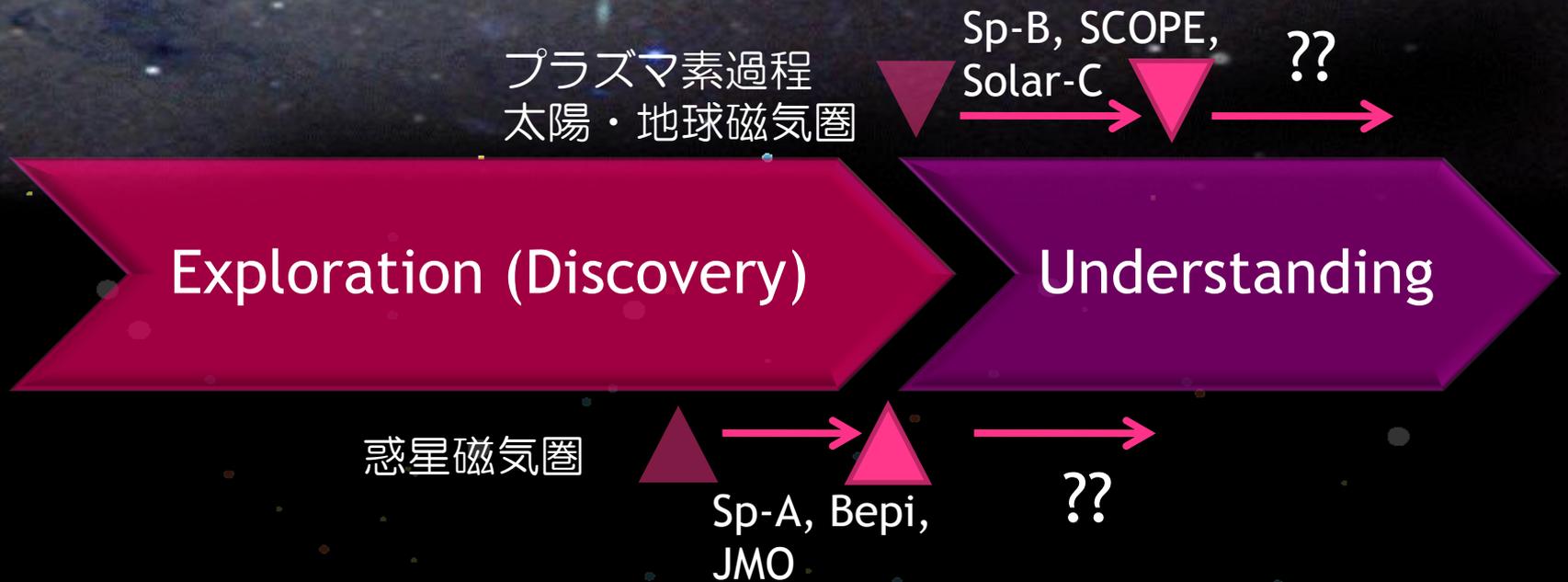
Exploration (Discovery)

Understanding

惑星磁気圏

- プラズマ素過程の研究，太陽物理，地球磁気圏ダイナミクスの研究は“Exploration” → “Understanding”のフェーズに移行しつつある
 - SPRINT-B，SCOPE，Solar-C
 - 放射線帯，衝撃波，磁気リコネクション，プラズマ境界層，コロナ/彩層加熱，磁場の起源...
 - 高時間/空間分解能，同時多点観測
- 惑星磁気圏は“Exploration”の段階
 - BepiColombo，SPRINT-A，そしてJMO
 - 水星磁気圏，火星・金星大気散逸，木星磁気圏ダイナミクス
 - 観測自体が新しいものが多い

観測の「20年後」：太陽系の理解

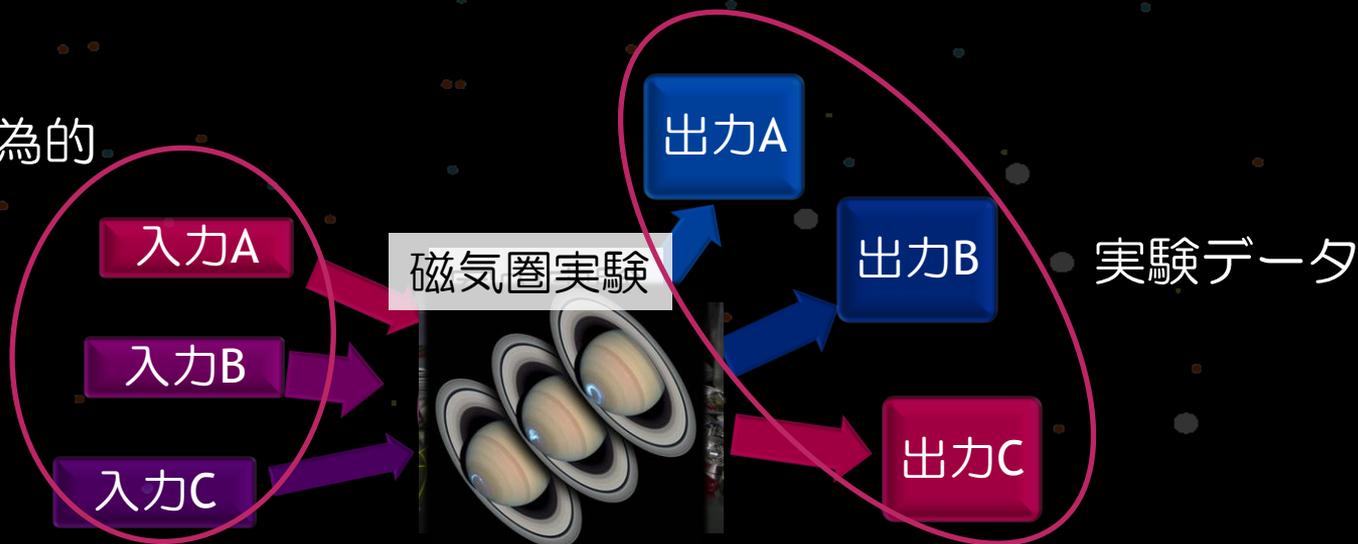


- プラズマ素過程・太陽物理・地球磁気圏ダイナミクスの“Understanding”が進む→次の段階の謎へ
- 惑星大気・磁気圏ダイナミクス研究も“Exploration”→“Understanding”のフェーズに移行
- 今の観測の延長（高時間/空間分解能，同時多点観測）で我々は“Understanding”を深める事ができるか？

磁気圏はプラズマ実験室たりうるか

- 「実験室としての磁気圏」？
- 「実験室」とは？
 - 実験データの解析，及びシミュレーションによる予想/再現
 - 様々な人為的入力に対する出力を見る
- 事が起こるのを待つ現在のパッシブ観測では不十分
 - アクティブな実験をしてこそ“Understanding”は深まる
(e.g., 磁気リコネクション促進/抑止, 放射線帯消失・形成, 人工オーロラ嵐発生, ...)

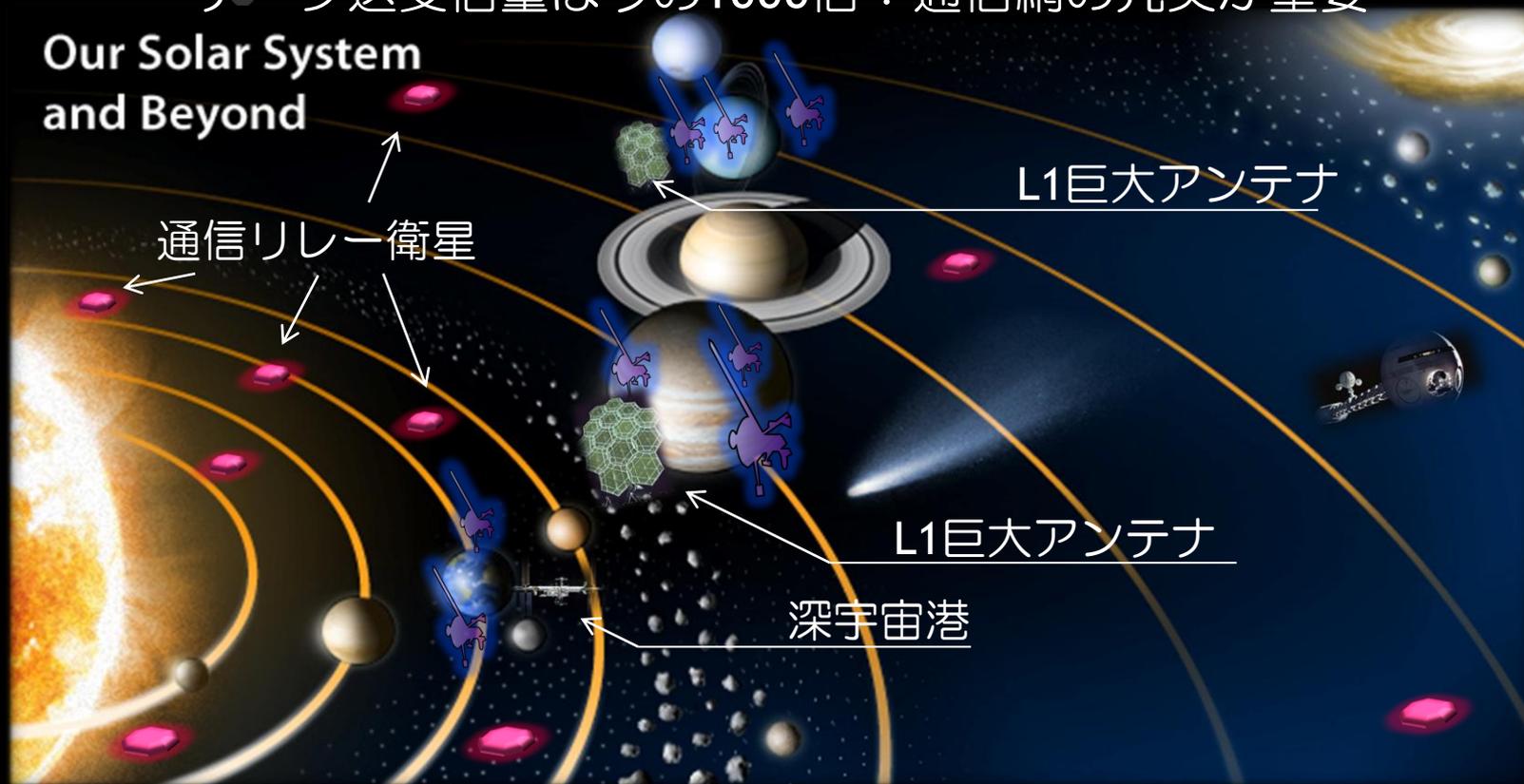
人為的



太陽系「実験室」の施設整備

- 広範な実験のためには観測機会・データ取得量を増やす事が重要
 - アウトプットを見て次のインプットを決める, の繰り返し「実験」
- 輸送・通信技術の発達を期待:
 - 惑星探査機打上げは2-3年に1度くらい(小型衛星シリーズ惑星探査版), ターゲットを絞り集中的な実験を
 - データ送受信量は今の1000倍: 通信網の充実が重要

Our Solar System
and Beyond



シミュレーション・実験を駆使して物理的理解を深める
一方で
未踏の地の“Exploration”もしたい



観測の「20年後」：フロンティア

- **外惑星の衛星**の探査本格化は20年後
 - 内部構造の解剖
 - 衛星固有磁場の有無を決める要因は何か？
 - 衛星から惑星磁気圏へのプラズマ流出
 - 惑星磁気圏高エネルギー粒子による衛星大気・表層進化への影響

観測の「20年後」：その先？

太陽系天体を調べつくせば満足できるか？

• 系外惑星その場探査？

- 未だ見ぬ惑星システム，異なる境界条件でのプラズマ素過程が待っているが...「その場」探査可能か？
- 例えば α ケンタウリに惑星が発見されているとして0.1cで飛行しても到着は44年後
- 通信レートも今の100万倍は必要
- 現実的なミッションになるには想像を超える技術革新が必要→20年後には「想像の範囲内」に
- その日を夢見つつまずは望遠鏡・天文衛星観測から磁気圏プロセスを議論

Outline

- 磁気圏プラズマ研究とは
- 研究の「いま」と「20年後」
- 20年間の過ごし方
- 纏め



20年後に向けて

惑星磁気圏システムの理解→系外惑星研究へも展開

- どういう特徴の惑星・衛星が強い磁場を持つのか？
- 惑星・衛星からの大気散逸量を決める要因は何か？
- 惑星・衛星の放射線環境を決める要因は何か？
- 恒星のダイナモ、恒星風の性質は？

系外惑星
その場探査へ？

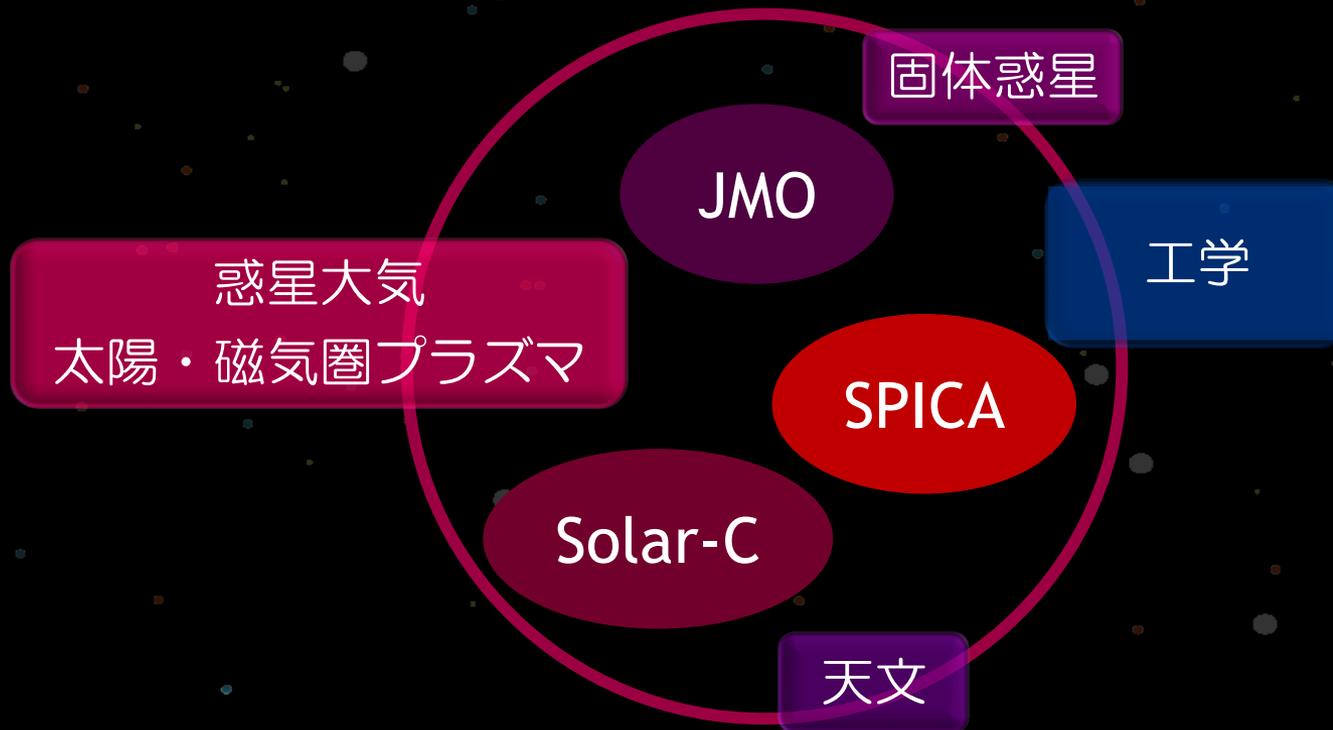


外惑星衛星探査：固体惑星分野との協力

- どんな戦略でどんな順に観測を展開するのかロードマップを創る
- 2030年代に向けた試金石として2020年代には1,2回の探査が必要

分野横断的研究

- 固体惑星---太陽・惑星プラズマ・大気---天文
- これらの分野間協力は木星ミッションJMOで築きつつある体制
 - →木星ミッションを木星ミッションのみで終わらせてはいけない
- 惑星ミッション以外も同じ：例えばSPICAやSOLAR-Cのサイエンス検討でも分野横断的交流があるとよい



Outline

- 磁気圏プラズマ研究とは
- 研究の「いま」と「20年後」
- 20年間の過ごし方
- 纏め

2030年代の展望 纏め

Development
Exploration (Discovery)

Understanding

- 太陽系磁気圏プラズマは“Understanding”の時代
 - リアルなシミュレーションと観測の比較
 - アクティブ実験
- フロンティア(“Exploration”)は外惑星の衛星, そして系外惑星
 - 分野横断的協力が研究を進めるカギ
 - 現在検討中のミッションを進めながらその先を一緒に見つめる事が大事
- いずれも輸送・通信技術の飛躍的発展が必須
 - 探査機を惑星へ頻繁に(~1回/2-3年)送れる事
 - データ送受信量は今の1000倍以上に
 - 飛行速度0.1cくらい達成してほしい(次の20年で系外惑星その場探査にこぎつけるため)