

非定常プラズマ中の 重元素※輸送と放射過程

※重元素=水素より重い元素

川手 朋子 (核融合研・国立天文台併任)

共同研究者:

成影典之, 福嶋美津広, 松本琢磨(国立天文台),
大館暁, 後藤基志, 大石鉄太郎, 川本靖子, 鈴木康浩 (核融合研),
山口弘悦(ISAS/JAXA), 三石郁之, 今田晋亮(名古屋大),
磯部洋明(京都市芸大), 浅井歩(京都大), 高棹真介(大阪大)

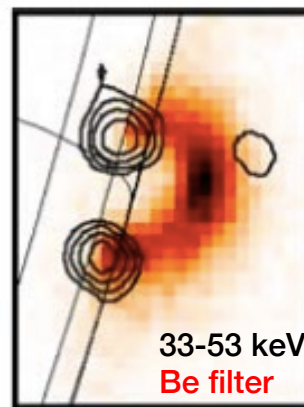
過去の連携研究

Fe XXVの分光観測によるLHDプラズマにおける

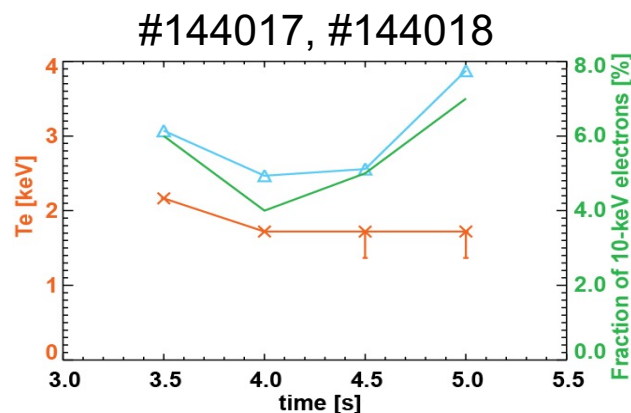
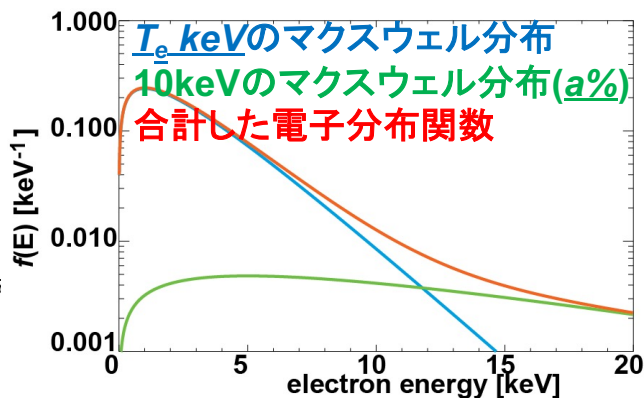
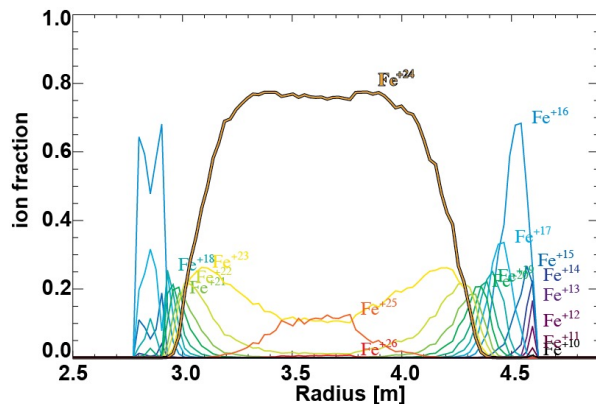
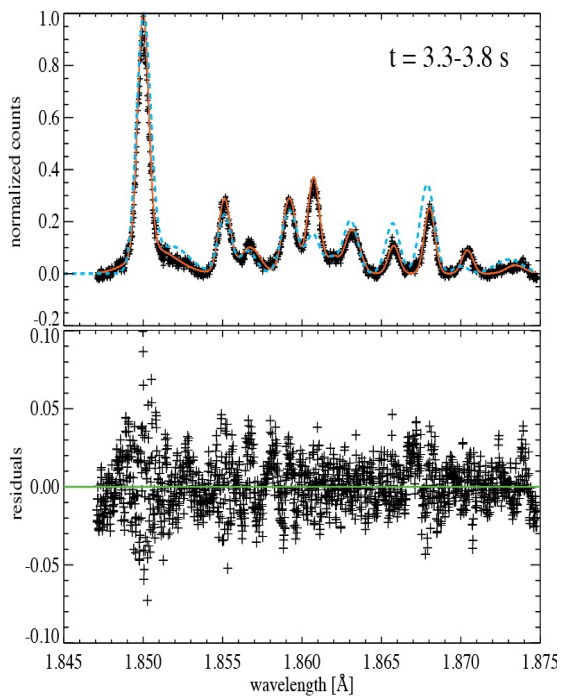
非熱的電子の検出可能性

2017-2018 年度LHD共同研究

川手(宇宙研)、後藤、村上、加藤(隆)(核融合研)、山本(中部大)、渡邊(国立天文台)



Masuda et al. (1994)



➤ 得られたこと

Feイオンの空間分布はどう考える？

という質問に答えるのが難しいこと

今後の展開 (イントロ)

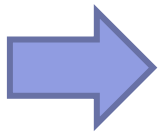
[核融合] 重元素の輸送を考えないといけない

- ✓ 視線積分された輝線を用いたプラズマ診断における解釈では、イオンの密度分布=「どこのプラズマの物理量をみているか」がクリティカル
- ✓ 定常解に対する輸送コードは多いが、局所的な冷却による不安定発達を考えるならば、**非定常**なプラズマに対し輸送を解き、エネルギー保存式に放射損失を組み込む操作が必要

[恒星大気] 非定常な重元素輸送をあまり考えていなかった

- ✓ 流体計算では大抵元素組成比を固定
- ✓ 太陽で複数元素の多流体性が観測的に明確に見える代表例はコロナ元素組成だが、現状モデルは定常仮定。一方エネルギー輸送はとても**非定常**

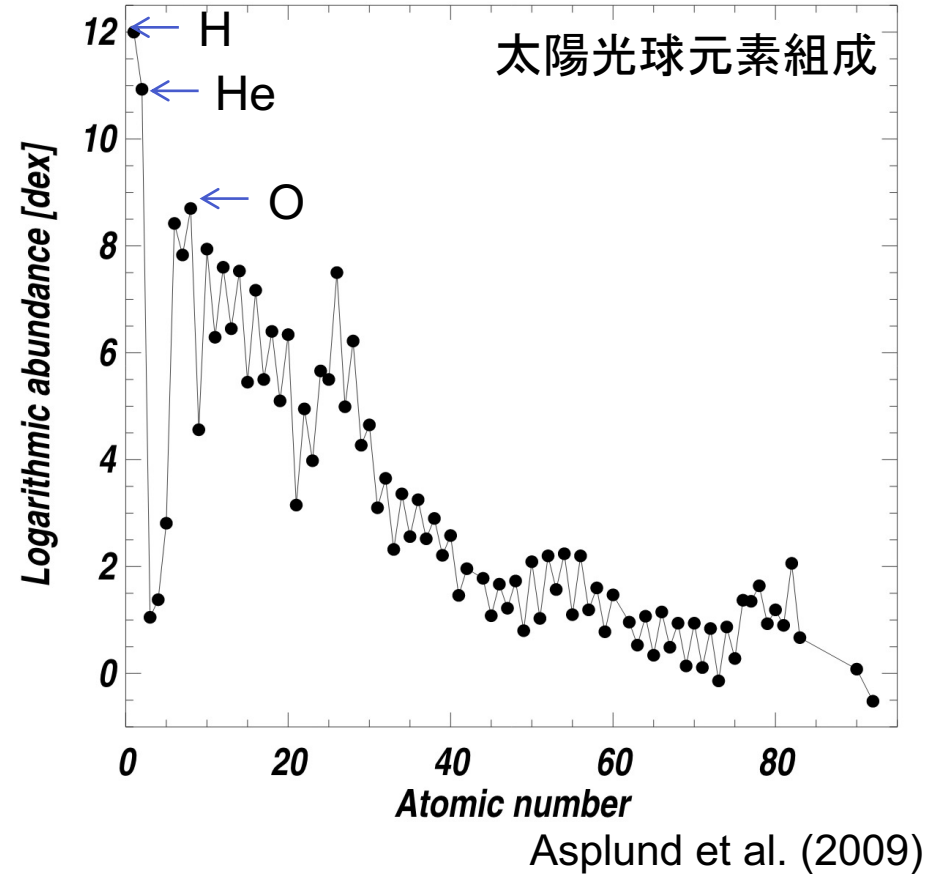
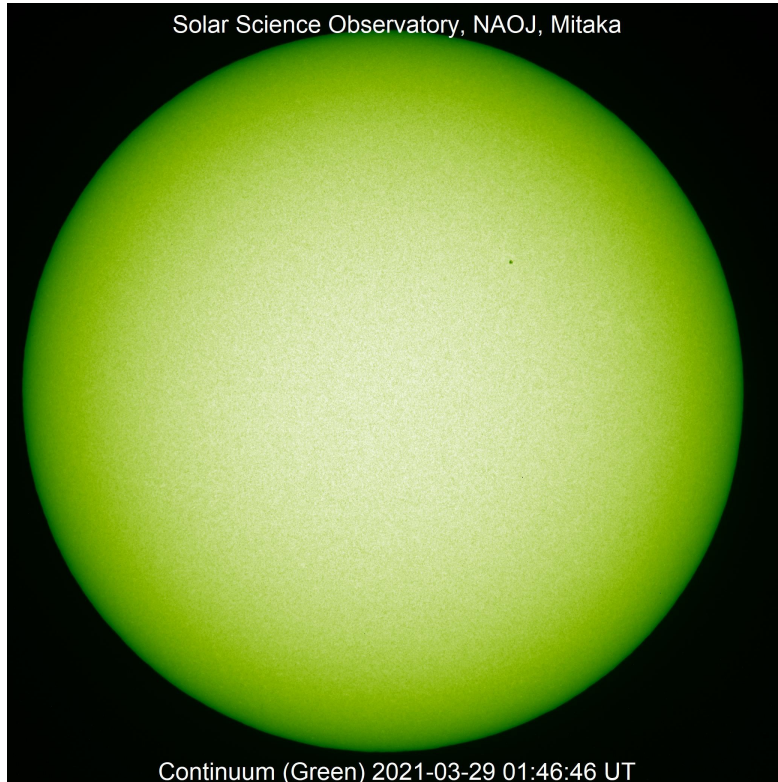
最終目的は異なる科学課題だが、
同じ手法で共通の素過程を理解できそう



「集光型撮像分光計測と電離・輸送・放射コードによる
非定常プラズマ中の重元素輸送過程の理解」

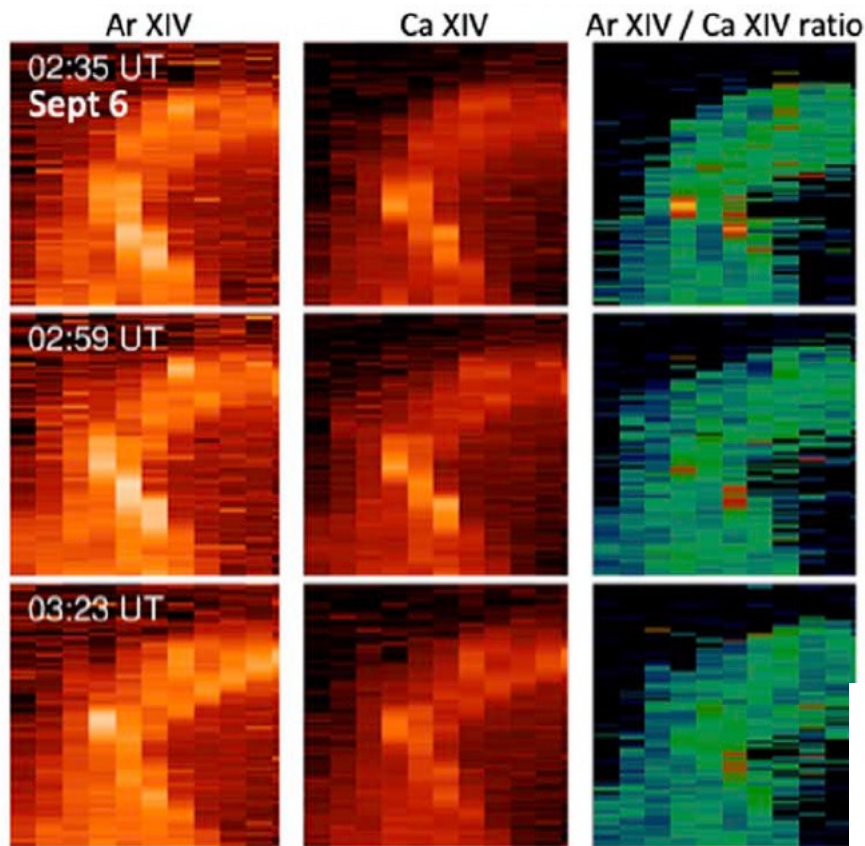
2021年度NINS若手機構内連携研究 川手(核融合研) et al.

恒星の元素組成は何が决定着しているか？



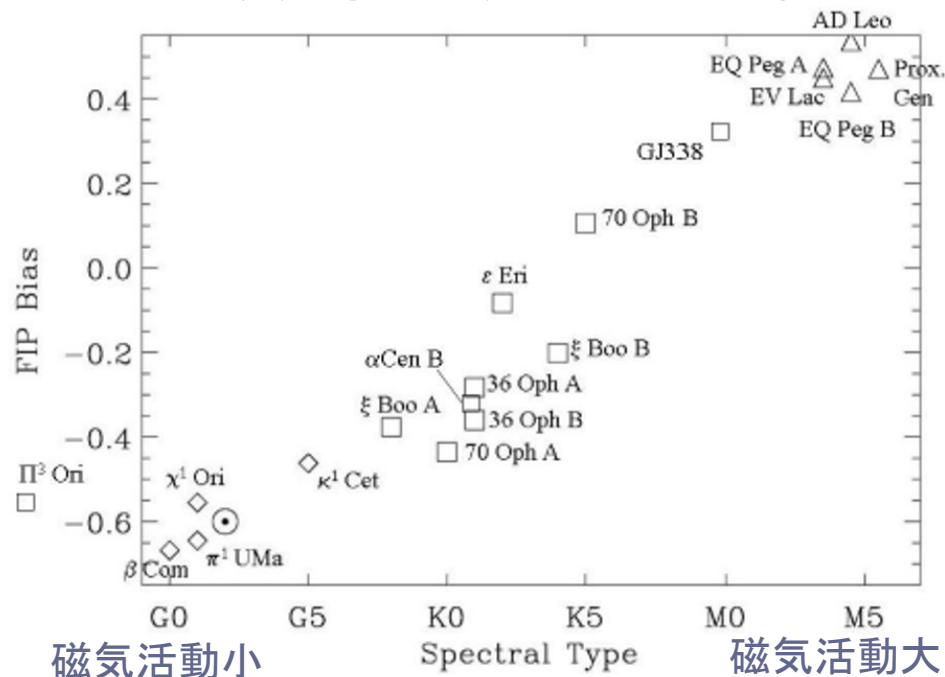
- 恒星形成時の星間物質
- 中心核における核融合反応による恒星の進化

外層大気のエネルギー組成は多様かつダイナミック



Baker et al. (2020)

第一イオン化エネルギーが大きい
元素の、光球に対するコロナの相対組成

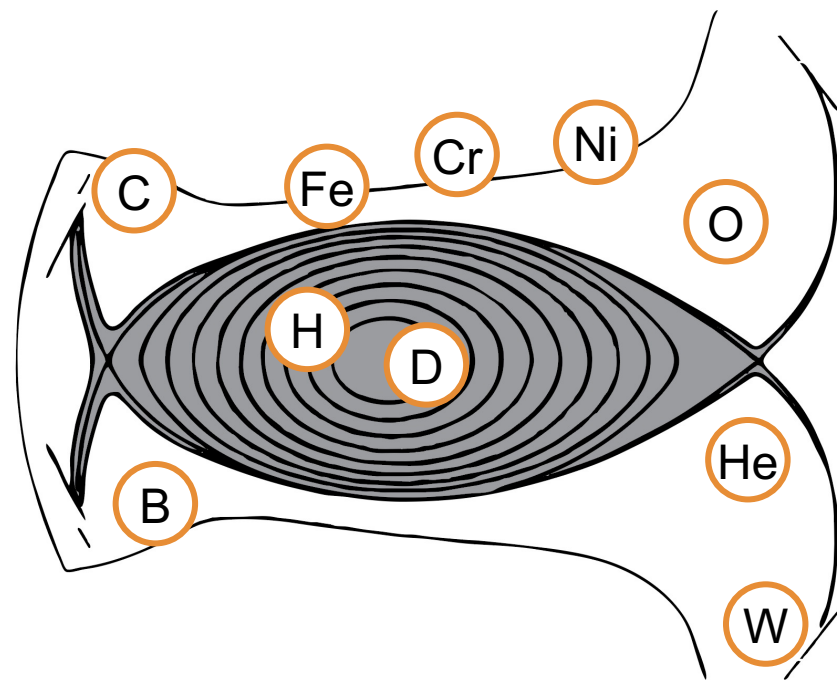
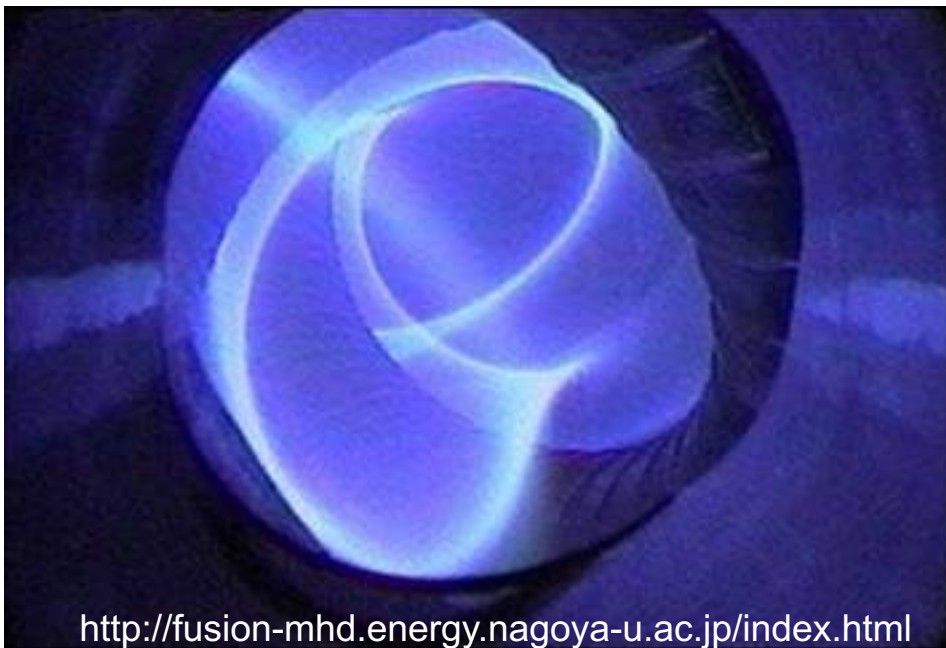


➤ 太陽コロナ: 時間的・空間的に変化

➤ 恒星コロナ: 磁気活動度で変化

核融合プラズマの元素組成

6



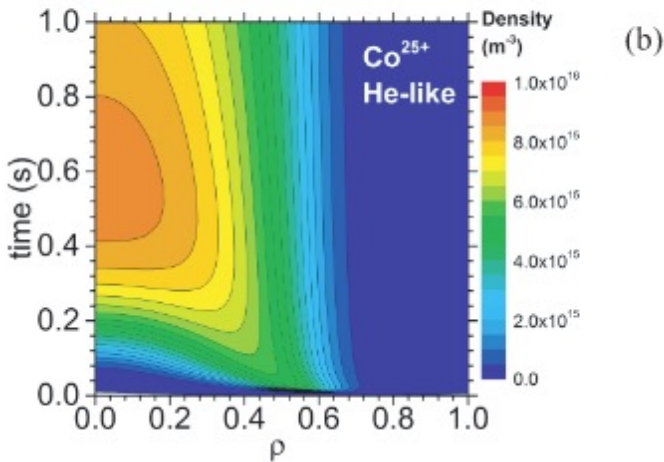
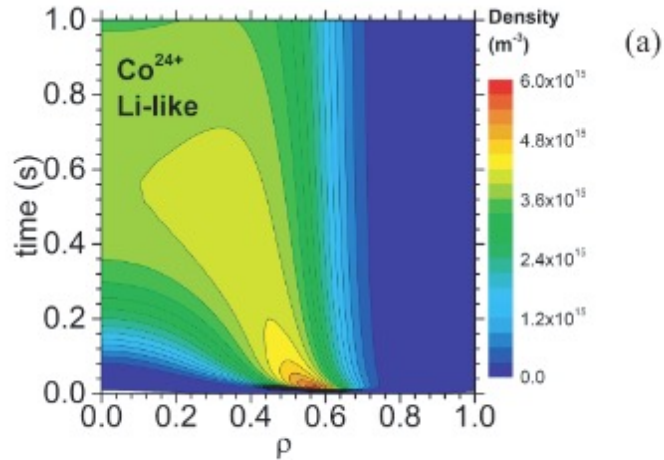
- 燃料元素(H)のみではない
- 各時刻・場所における冷却・輸送条件に寄与するため、重元素量を動的に制御したい

過去の連携/今後の展開(背景/手法/まとめ)

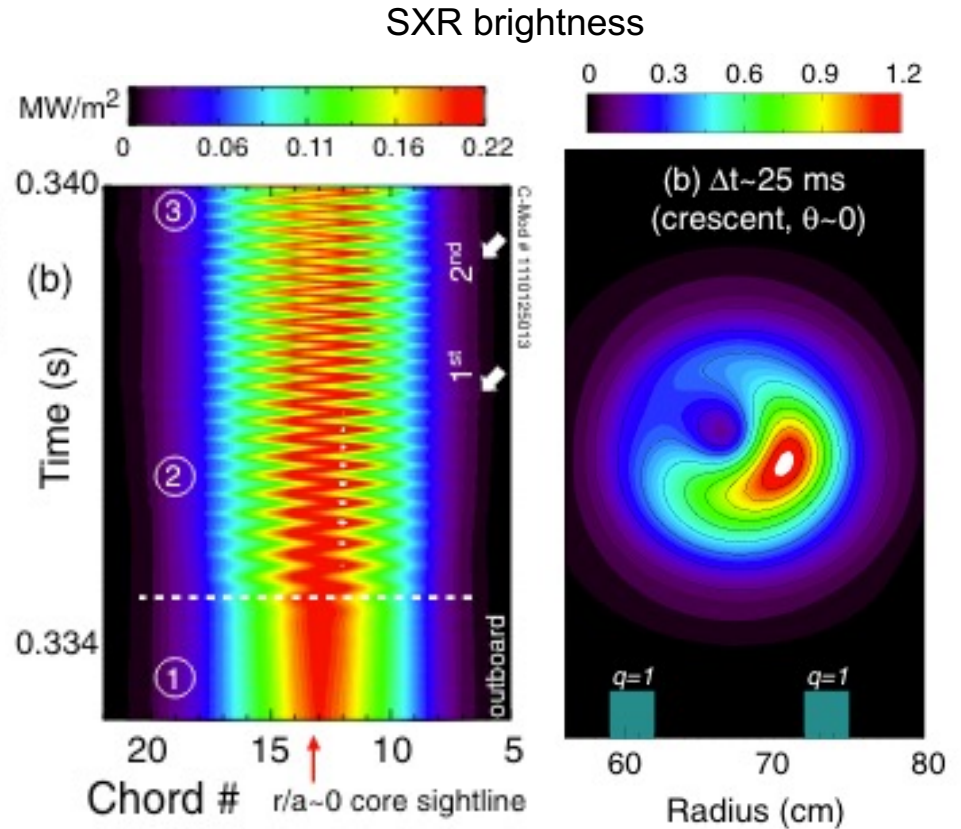
31 Mar 2021

Astro-Fusion meeting

ダイナミックかつ時に放射損失が不安定駆動



Sudo et al. (2013)



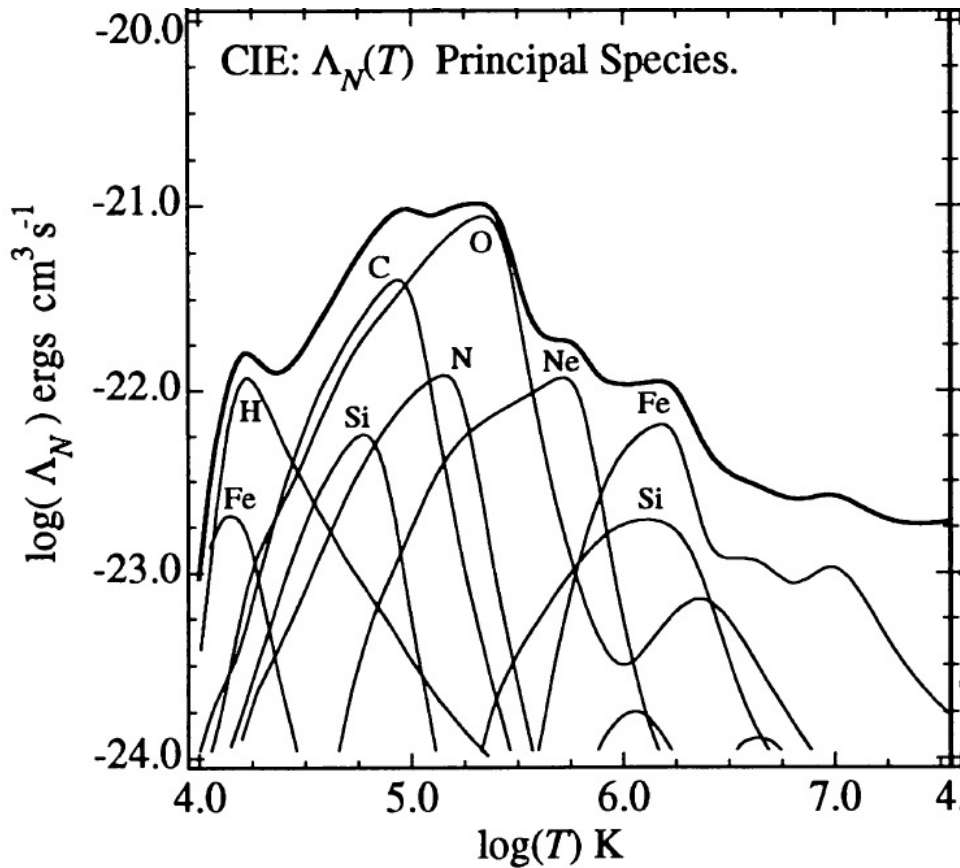
Delgado-Aparicio et al. (2013)

➤ 局所的に入射した重元素の輸送

➤ 局所的な放射損失によるMHD不安定

元素組成変化による大規模構造への影響

元素ごとの放射冷却量(宇宙組成比)



Sutherland & Dopita (1993)

恒星大気:

- 外層大気形成過程
- 惑星への紫外線放射量

核融合プラズマ:

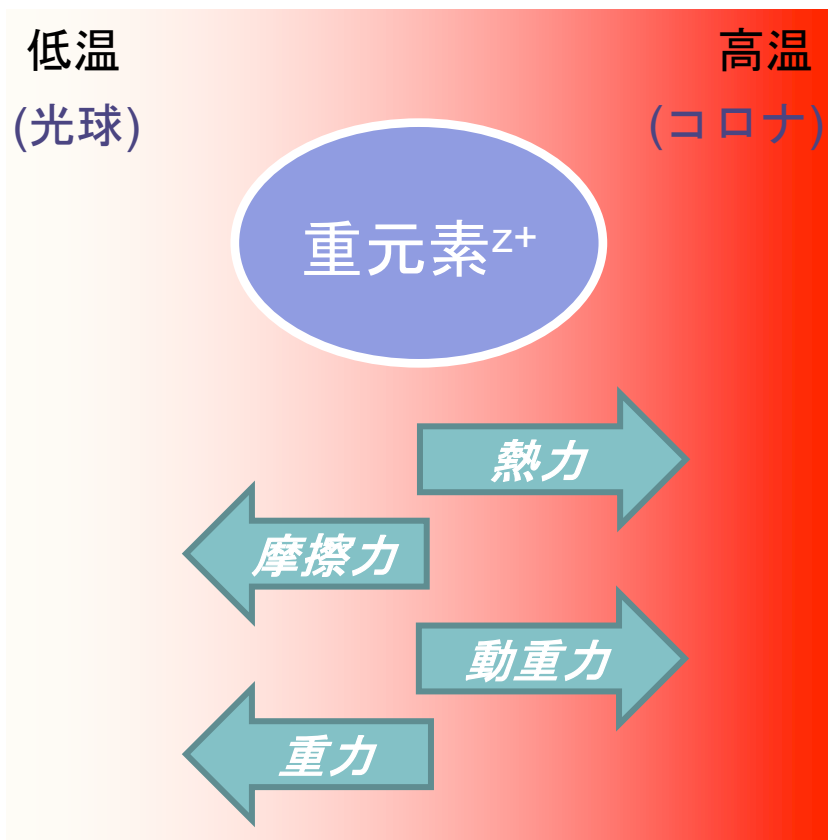
- プラズマ閉じ込めの障害や放射崩壊
- 周辺部における冷却の促進

理解すべきこと

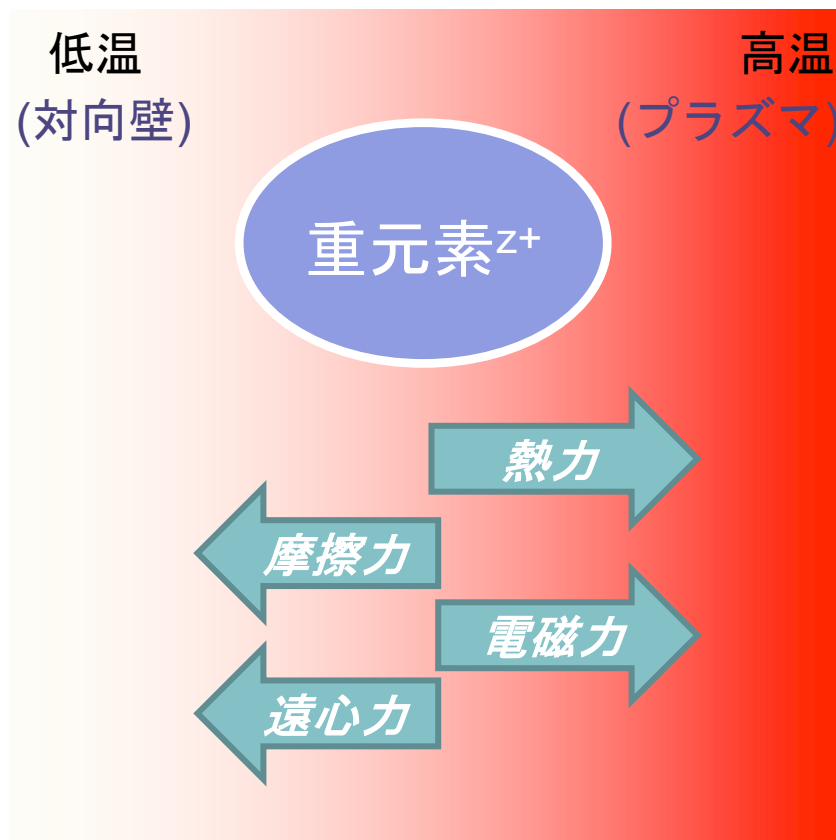
多流体系である元素ごとの
粒子フラックスとその起源

粒子フラックスを決めるもの

恒星大気

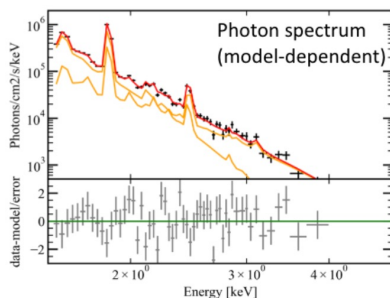
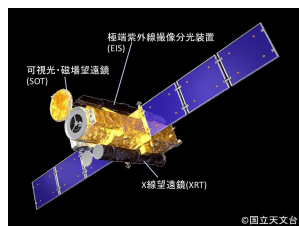


閉じ込めプラズマ周辺部

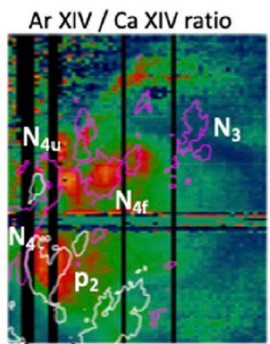


それぞれの重元素でどの力が支配的か、
各時間・空間点でわかれば良い

重イオンの粒子フラックス(相対比)を磁場・温度・密度構造毎に導出



長澤(2021)



Baker et al. (2020)



- ✓ 明るい光学系
- ✓ 高速読み出し検出器
- ✓ 空間・波長の同時取得
- ✓ 電離度分布の推定
- ✓ $T_e \sim 100\text{eV} - 5\text{keV}$

輸送計算用モジュール開発・MHD計算

MHD計算

バルクプラズマの物理量導出

モジュール

重元素の感じる場の導出
輸送(移流・拡散)と電離度計算
輝線強度と放射損失量計算

装置開発・実験



- FOXSI-4(2023-2024打ち上げ)用に開発中の高精度ミラーによるWolter-I型光学系
- CsIシンチレーター(0.5-8keV)+PMTによる高速読み出し

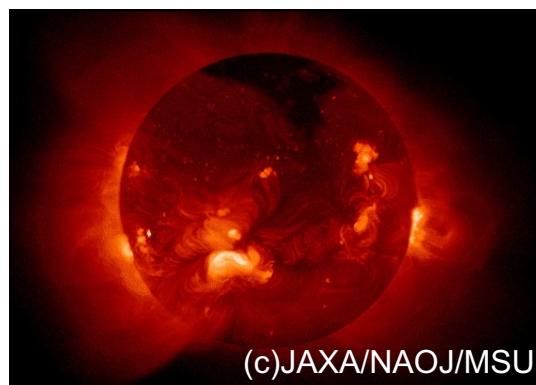
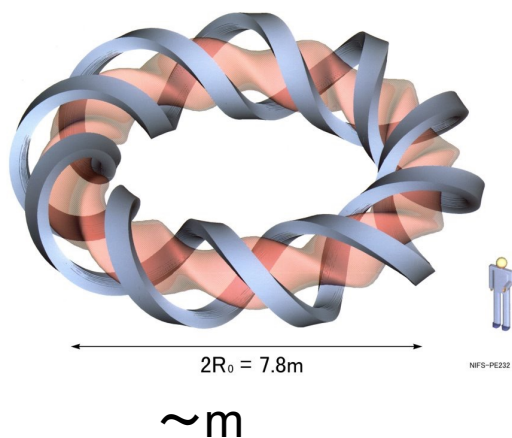
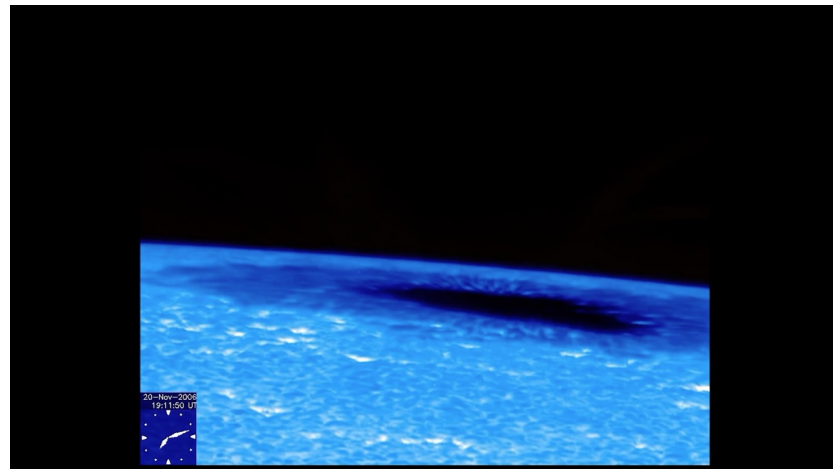
観測: プラズマ中の重元素フラックスを
電子温度・密度・磁場条件毎に導出
数値計算: プラズマ条件ごとに重元素に働く力の
バランスと重元素フラックスの関係を導出

恒星大気中の重元素に働く力の
バランスの違いによる
コロナの元素組成の
起源の理解

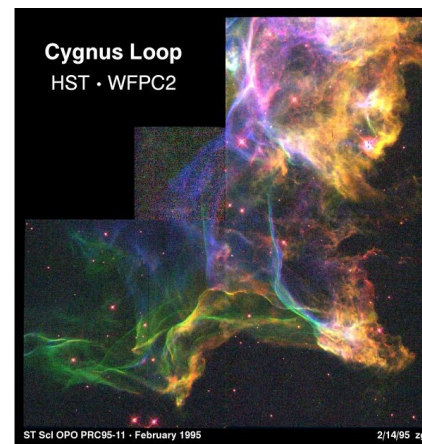
閉じ込めプラズマ中の不純物
に働く力のバランスの違い
によるプラズマ中の
不純物量の理解

プラズマ中に少量存在する重元素の輸送条件の差
による大規模構造形成の理解

- 部分電離(p^{++} 中性水素)プラズマへの拡張
- 衝突輻射非平衡下の放射過程と非平衡プラズマ診断
- 「大規模構造」



~ 10^9 m



~ 10^{18} m