

PhoENiX ミッションの科学目的

「太陽フレア粒子加速は超難問である」

柴田一成・日本天文学会第49代会長

岡 光夫(カリフォルニア大バークレー校)、深沢泰司(広島大)、
成影典之(国立天文台)、PhoENiX科学検討チーム

2021年1月6-7日
宇宙科学シンポジウム

目次

1. はじめに

- 太陽フレア粒子加速の問題とは？
- 「ようこう」「RHESSI」ミッション

2. 学界の現状

- 乱立する理論
- 電波観測が得たヒント

3. PhoENiXミッション

- 期待する成果
- これまでの検討と成果

太陽フレア粒子加速の問題とは？

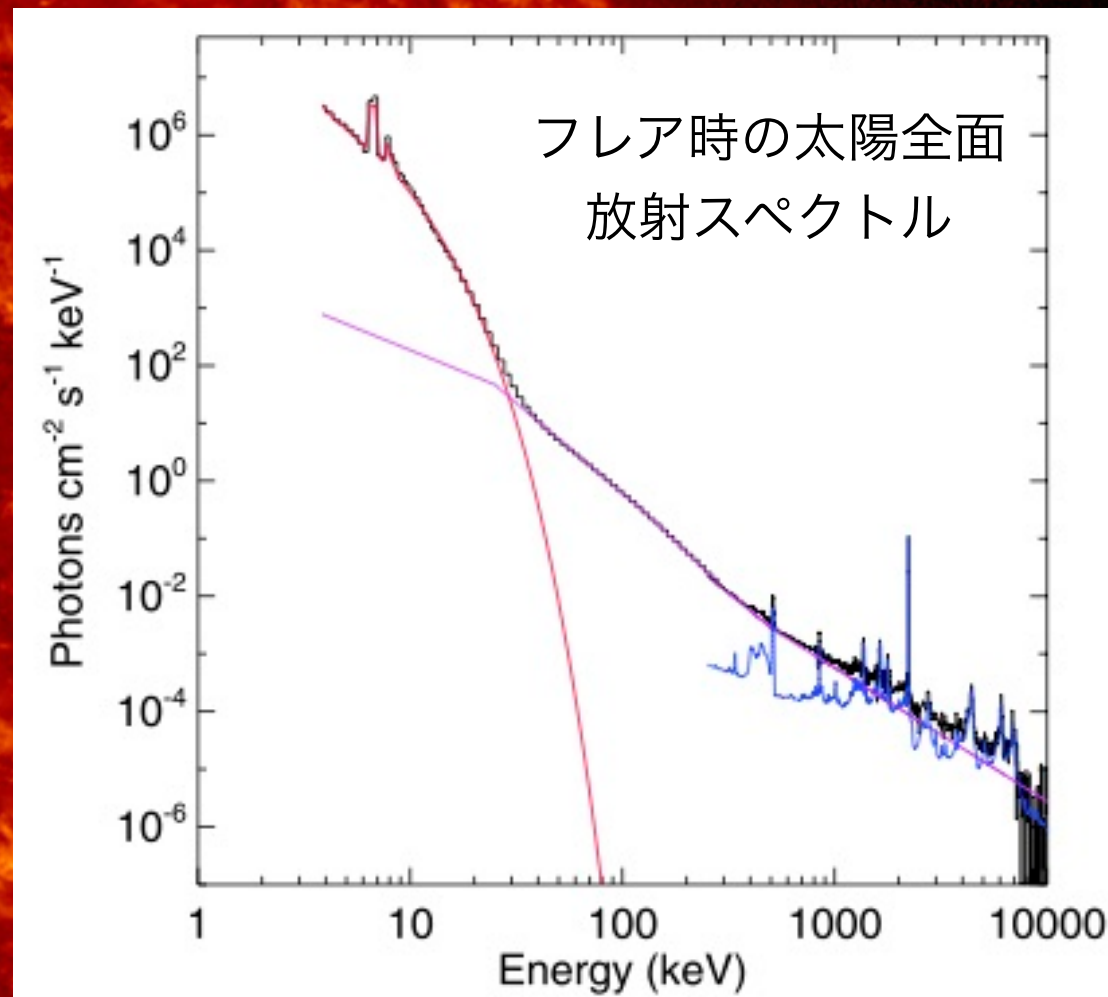
太陽フレア

(=爆発的エネルギー解放現象)
が発生すると高エネルギー粒子
(イオンと電子) が生成する。

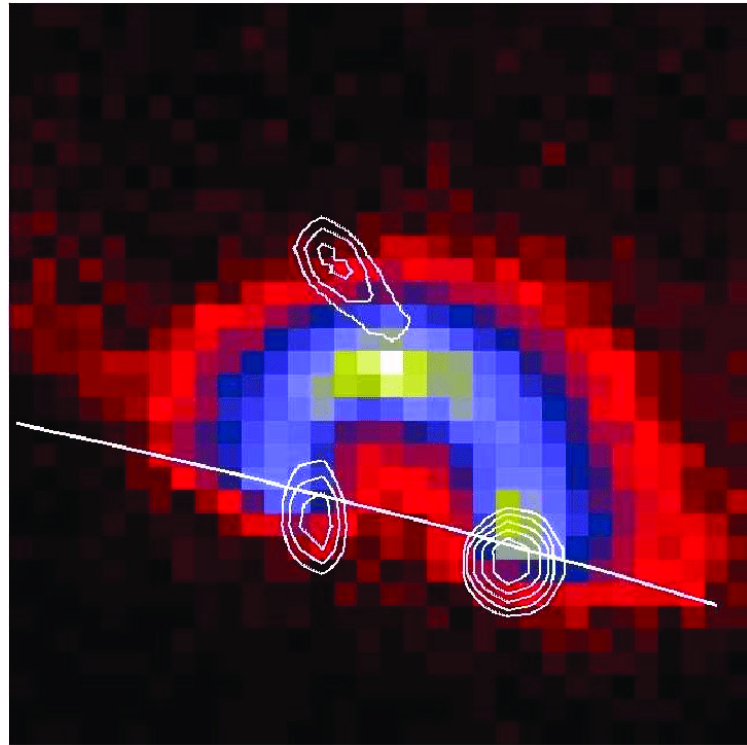
電子の非熱的成分だけで
解放される磁気エネルギーの
最大50%も担うとの試算も。

果たしてその加速機構は！？

どのようにエネルギーが
分配されるのか！？



1990年代「ようやく」衛星が大活躍



Masuda et al. 1994

リコネクション・パラダイムの確立

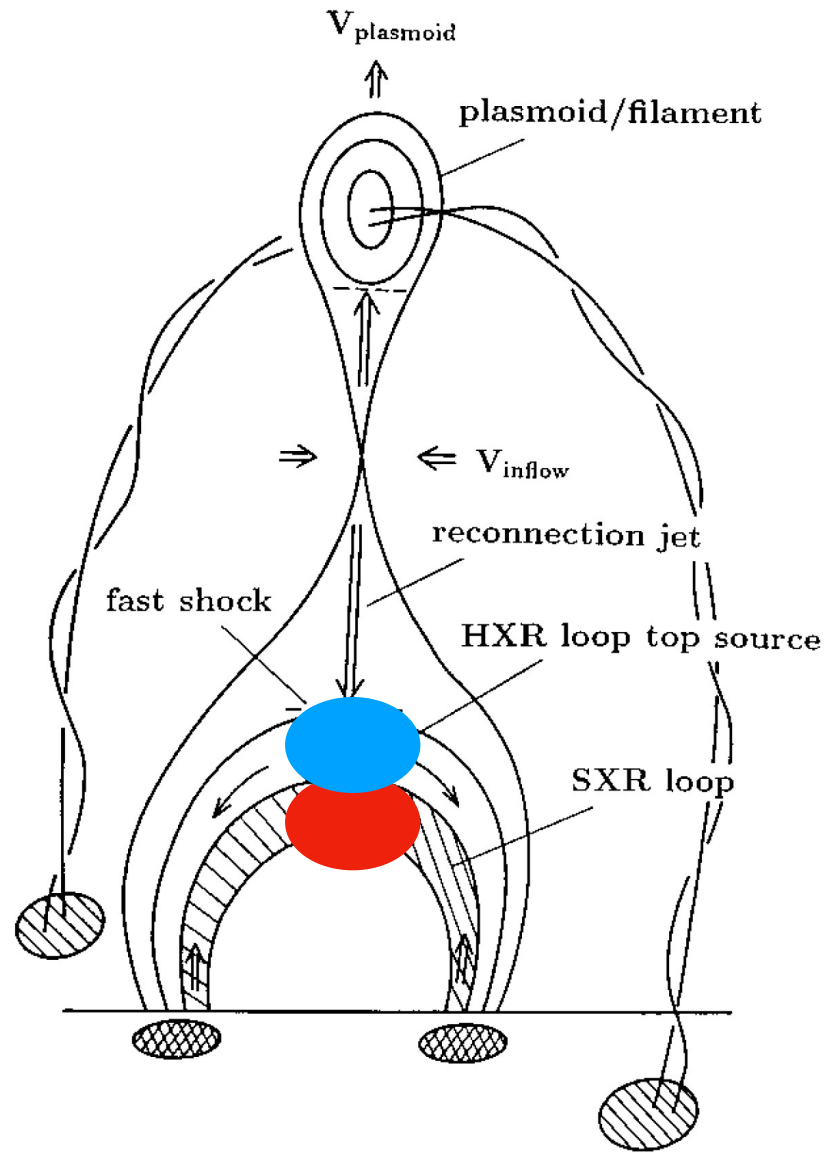
リコネクションが粒子加速を
解決してくれるだろうという期待

The above-the-looptop source (is) well fit by emission from an isothermal plasma whose temperature is about 100 MK, rather than by a non-thermal, single power-law spectrum.

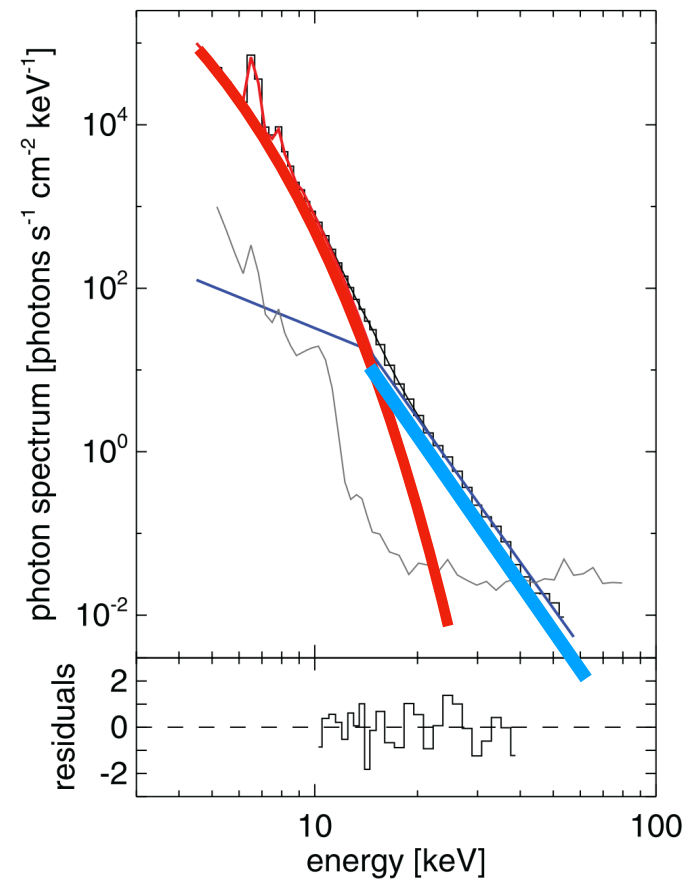
Masuda et al. 2000のアブストラクトから抜粋

マスダソースは熱的か非熱的か？
本当にコロナで粒子が加速されるのか？？

2000年代は米国の「RHESSI」が活躍

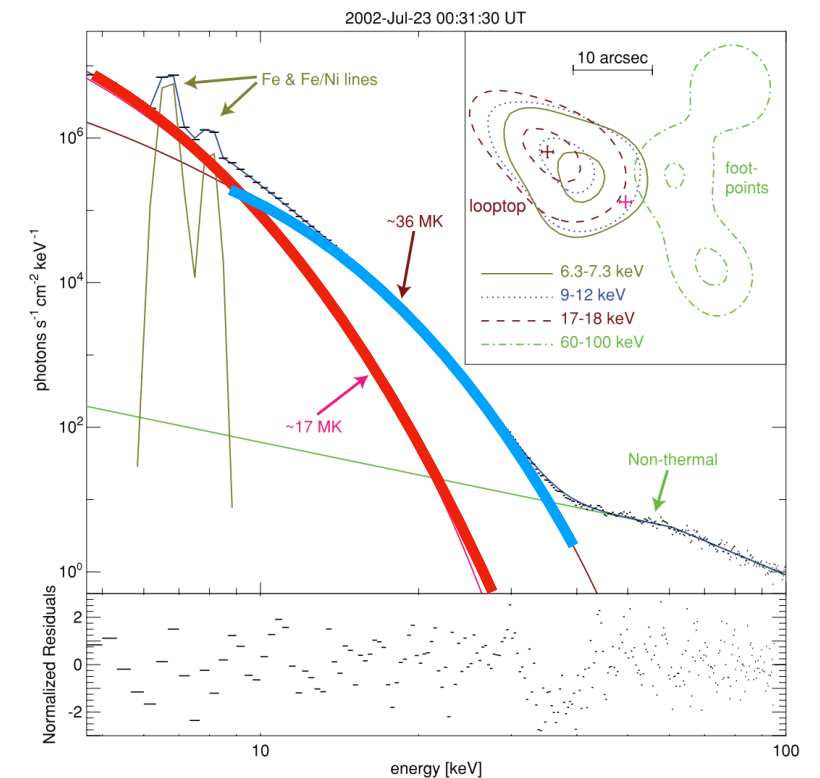


Shibata et al. 1995



非熱的？
(Bulk acceleration)

Krucker and Lin, 2008
Krucker et al. 2010
Krucker and Battaglia, 2014



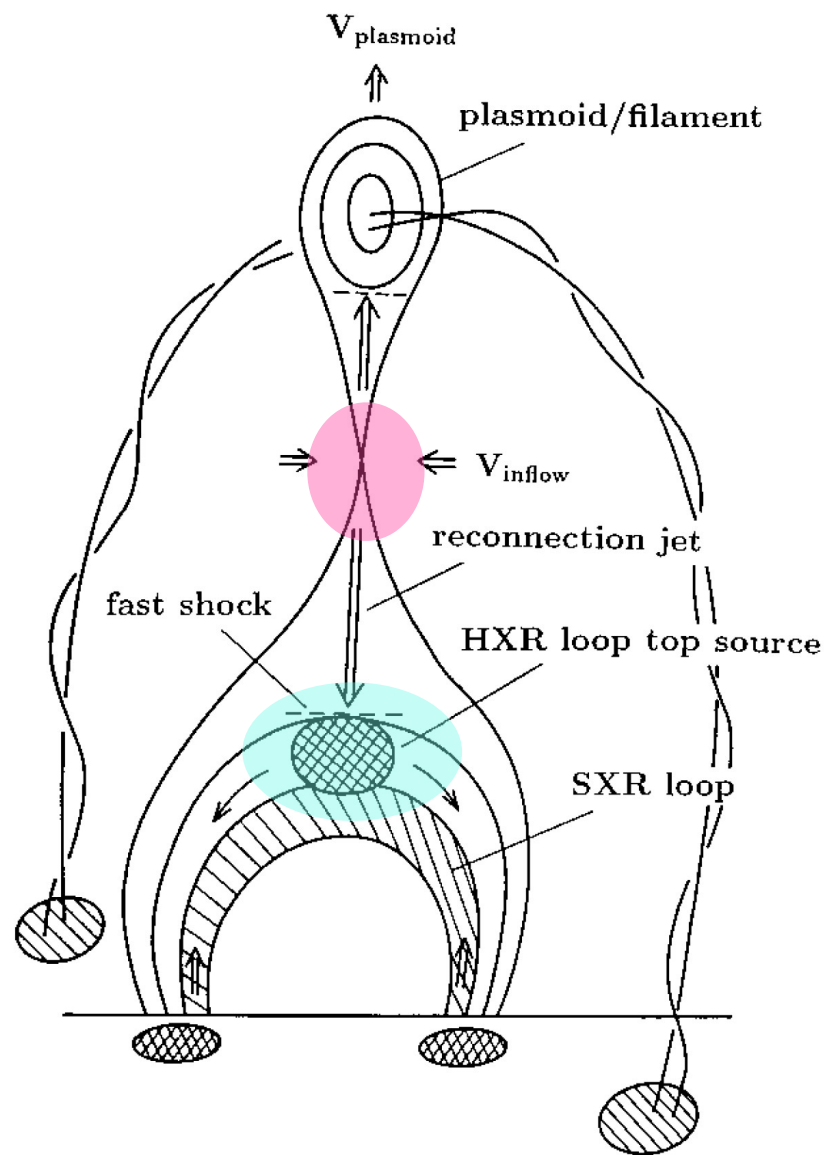
熱的？
(Superhot)

Caspi and Lin, 2010
Caspi et al. 2014

熱的＋非熱的（＝カップ分布）？

Oka et al. 2013, 2015, 2018

ともかく、コロナ中で非熱的成分が生成されることが確定



Shibata et al. 1995

ではどうやってコロナで
Bulk Accelerationを実現する？

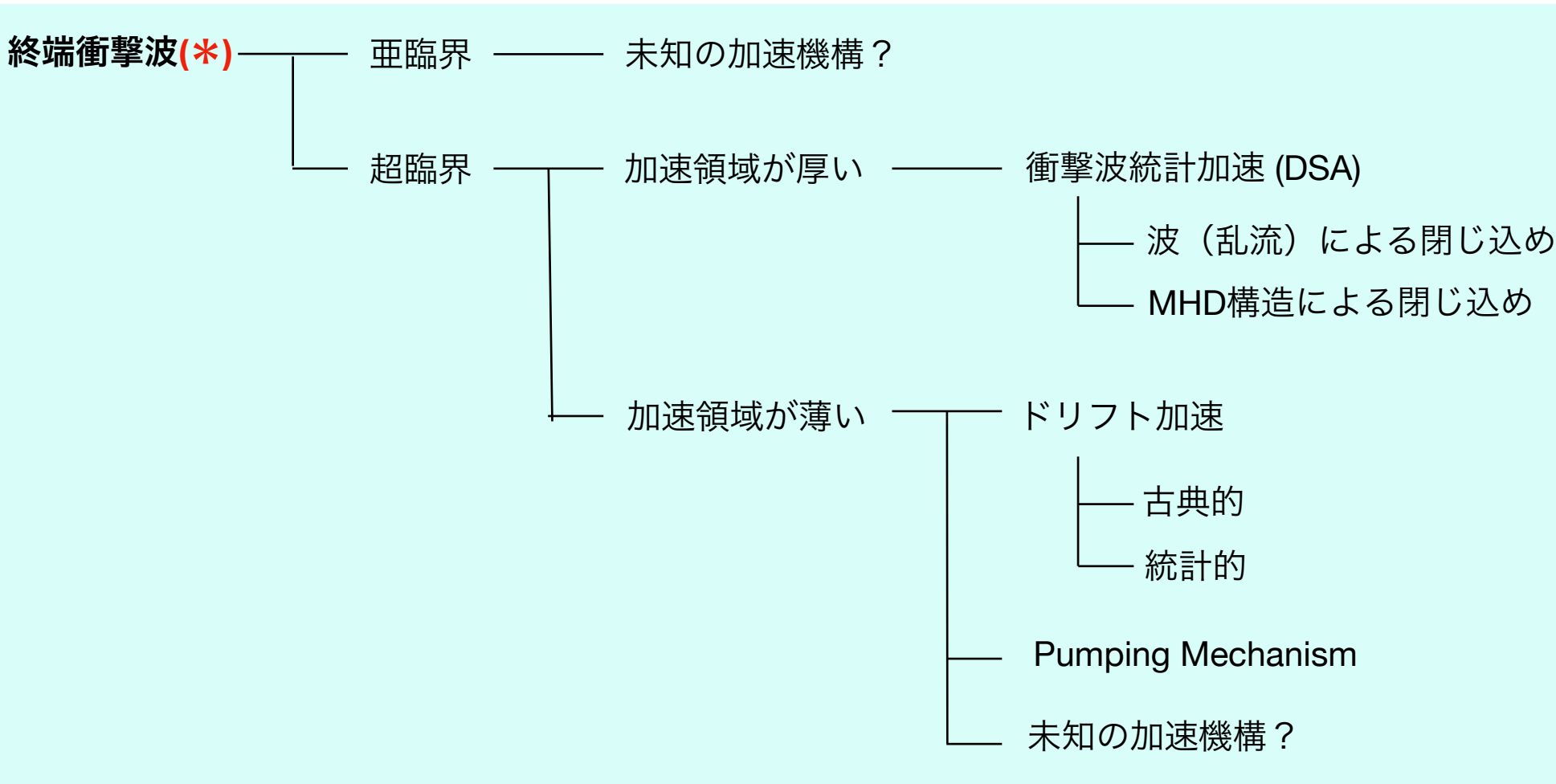
→理論が乱立している状態

- 磁気リコネクション
- 終端衝撃波

という2つの素過程を用いるものに大別される

太陽フレアにおける粒子加速機構の特定に向けたフローチャート

注：加速機構等は例として挙げているものであり、完全なリストではありません。



スローモード衝撃波

- 加熱による注入過程？
- 閉じ込めによる統計加速促進？

Collapsing Magnetic Field

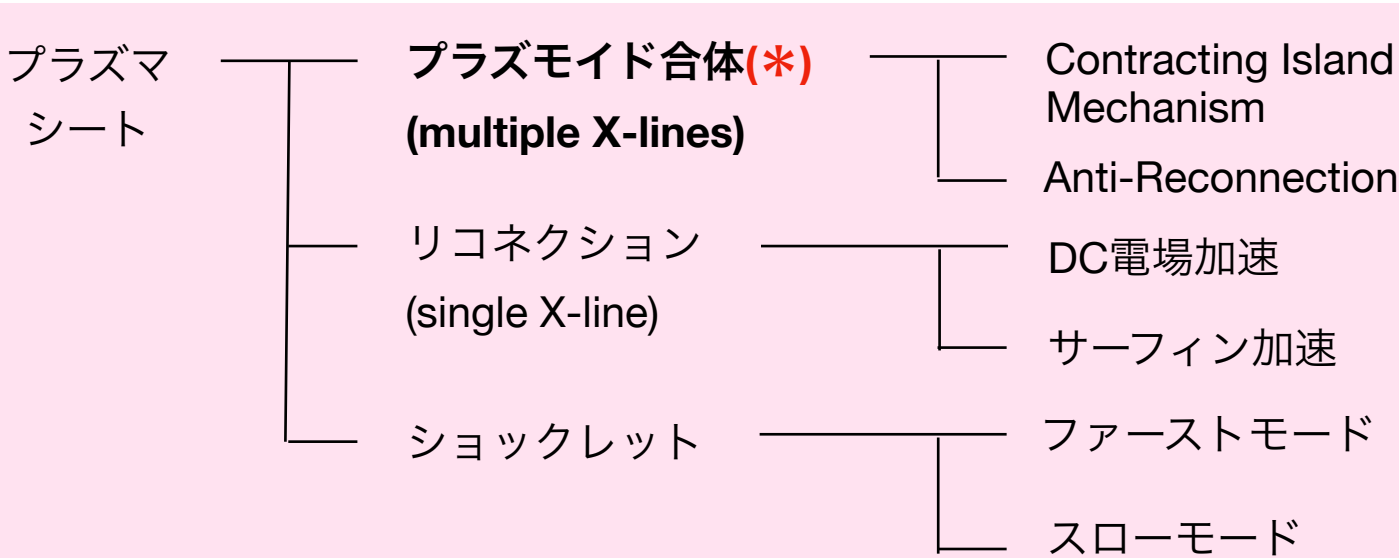
- ベータトロン加速で本加速をアシスト？

乱流

- ベキ型スペクトルの説明に必要。でもその実態は？
- アルヴェン波 vs ホイッスラー波
- サイクロtron共鳴 vs ランダウ共鳴 (トランジット・タイム・ダンピング)
- フラクタル・リコネクション

終端衝撃波へのプラズモイドの衝突 (*)

(*) ... 観測的にはまずこの3つを同定したい (内部構造の分解まで求めない)



注意事項

- ベキ指数と加速機構が1対1対応しているわけではない。
- 理論が必ずしも観測的特徴を予言しているわけではない。
- 様々な仮定がある (2次元、粒子間衝突ゼロ、など)
- よって追研究が必要。

加速シナリオが説明すべき諸問題

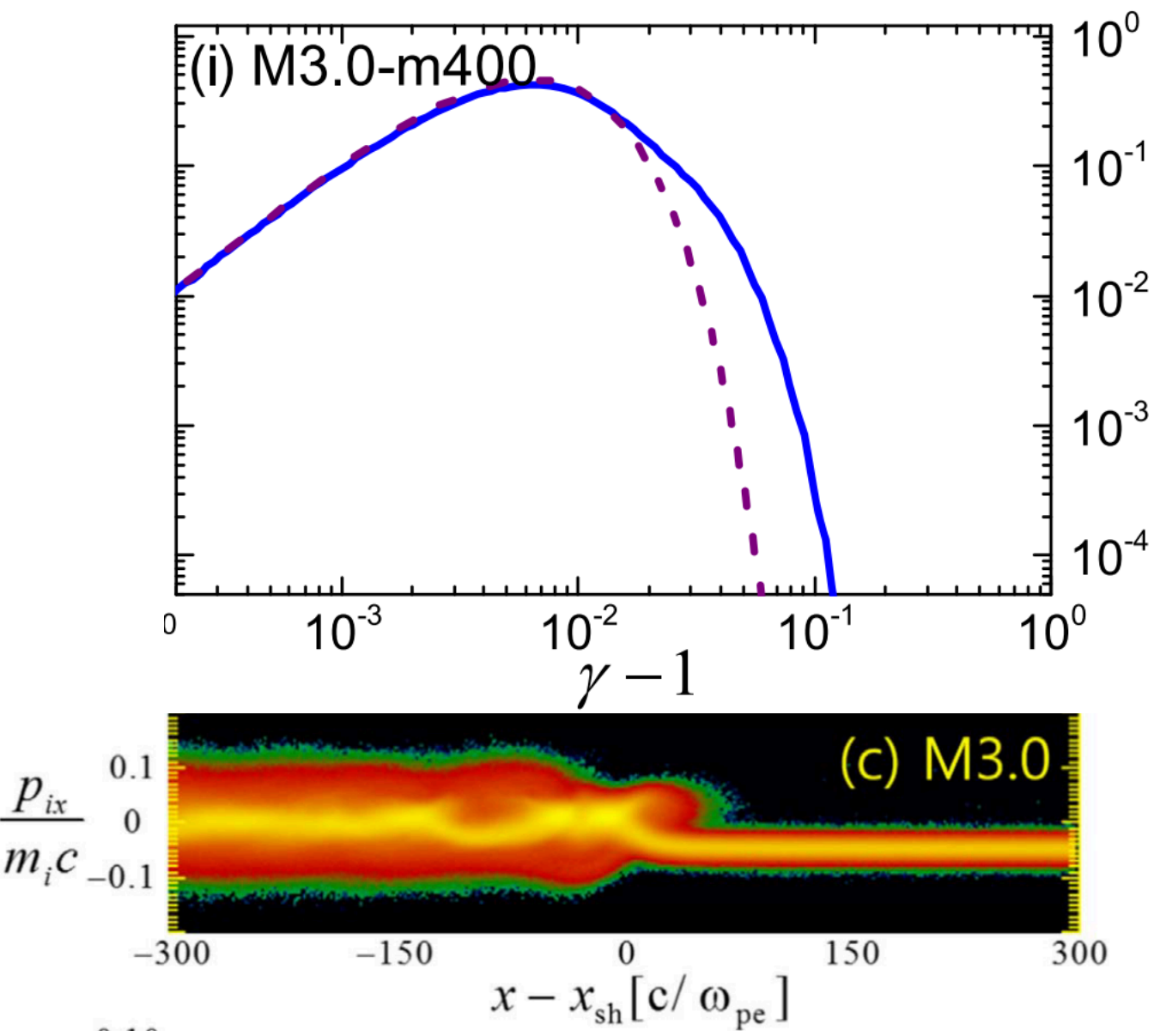
- タイミング・タイムスケール
- 個数問題
- エネルギー分配

終端衝撃波を使った理論の例

ループトップは低マッハ数、高ベータ (>1) の環境

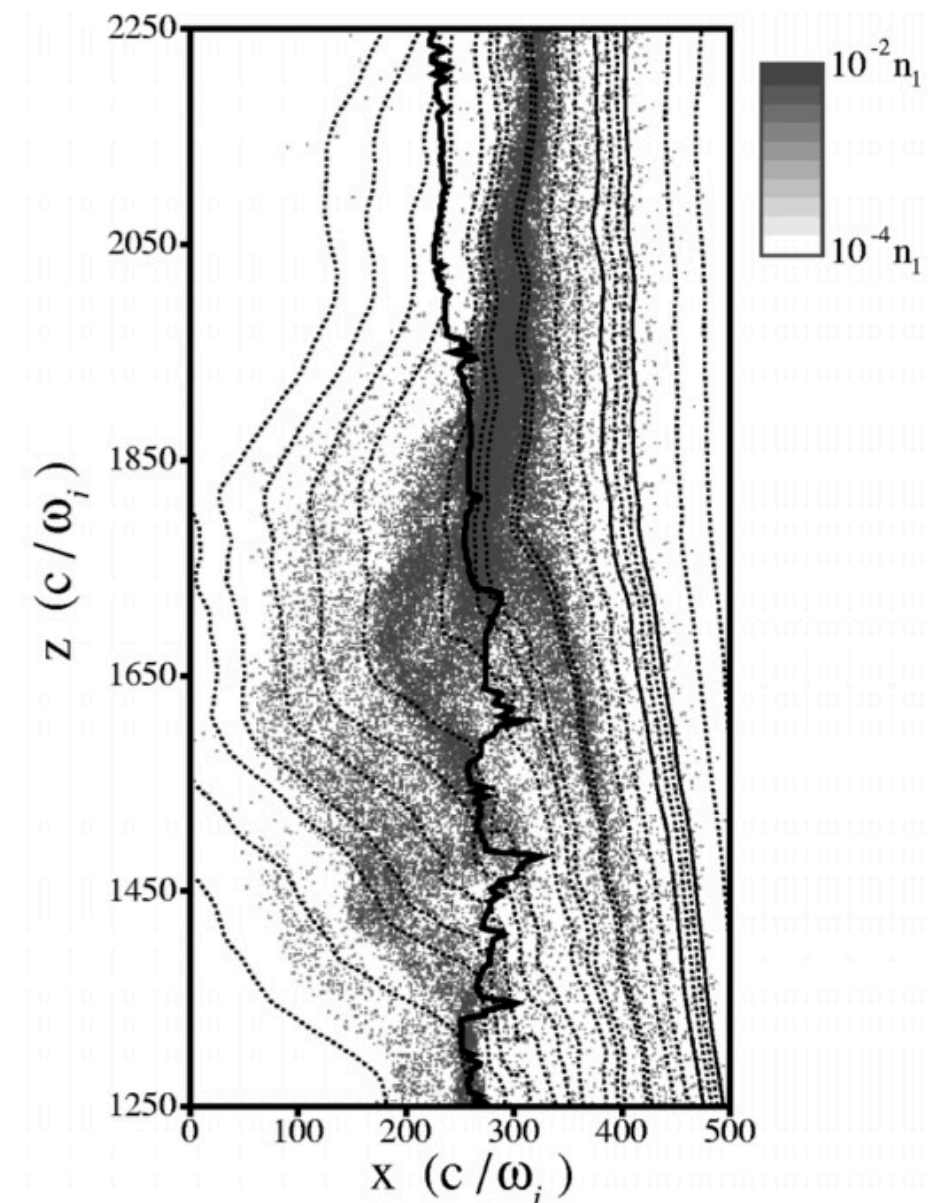
同様の環境（銀河団に伴う衝撃波）の研究

Kang et al. 2019



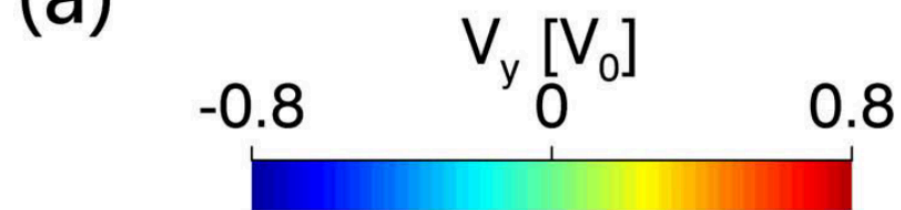
上流の強い乱流がある場合の衝撃波

Giacalone et al 2005a, 2005b, Guo et al. 2012



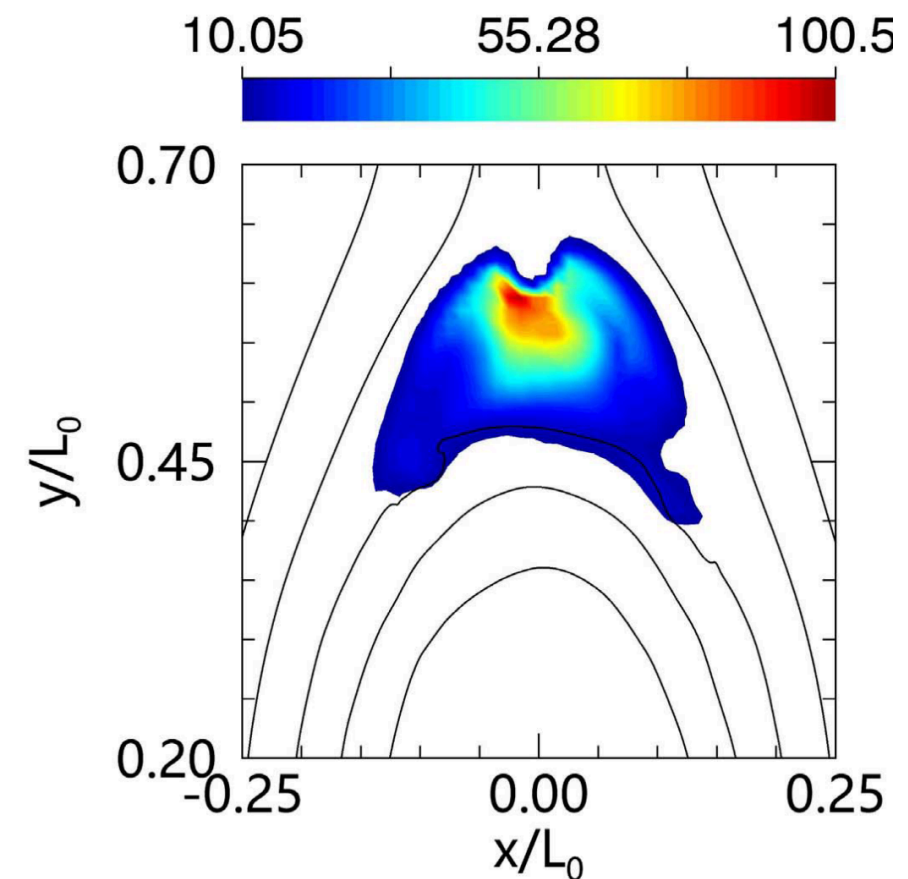
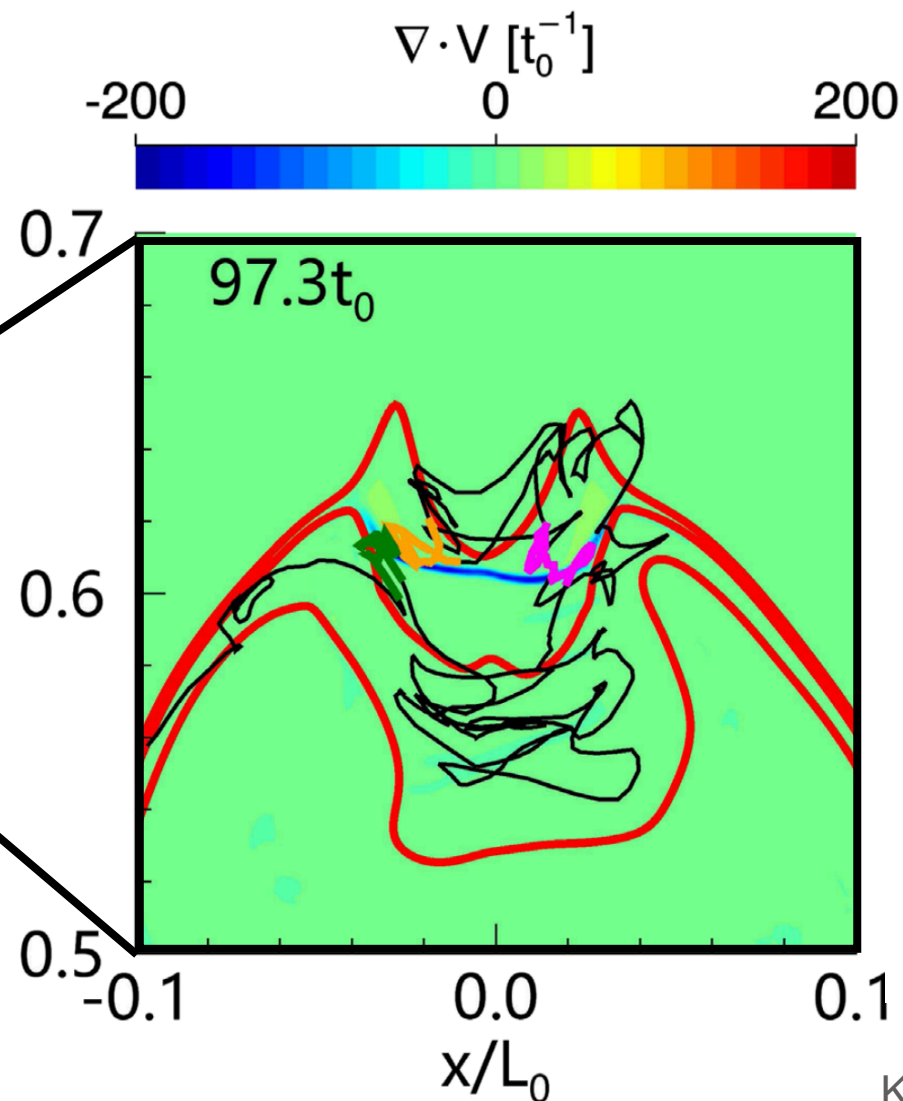
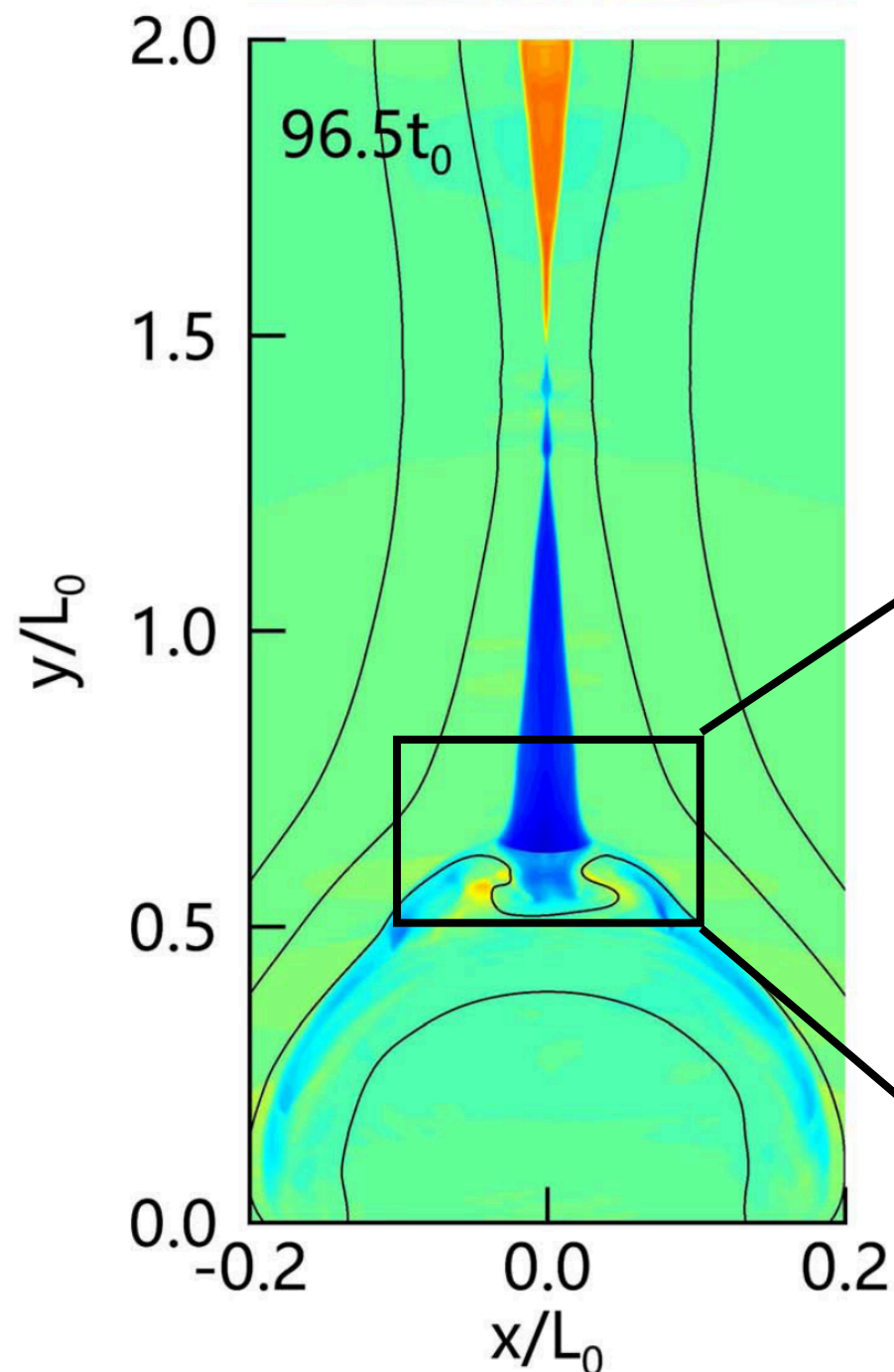
ループトップの「くぼみ」を利用した衝撃波統計加速

(a)

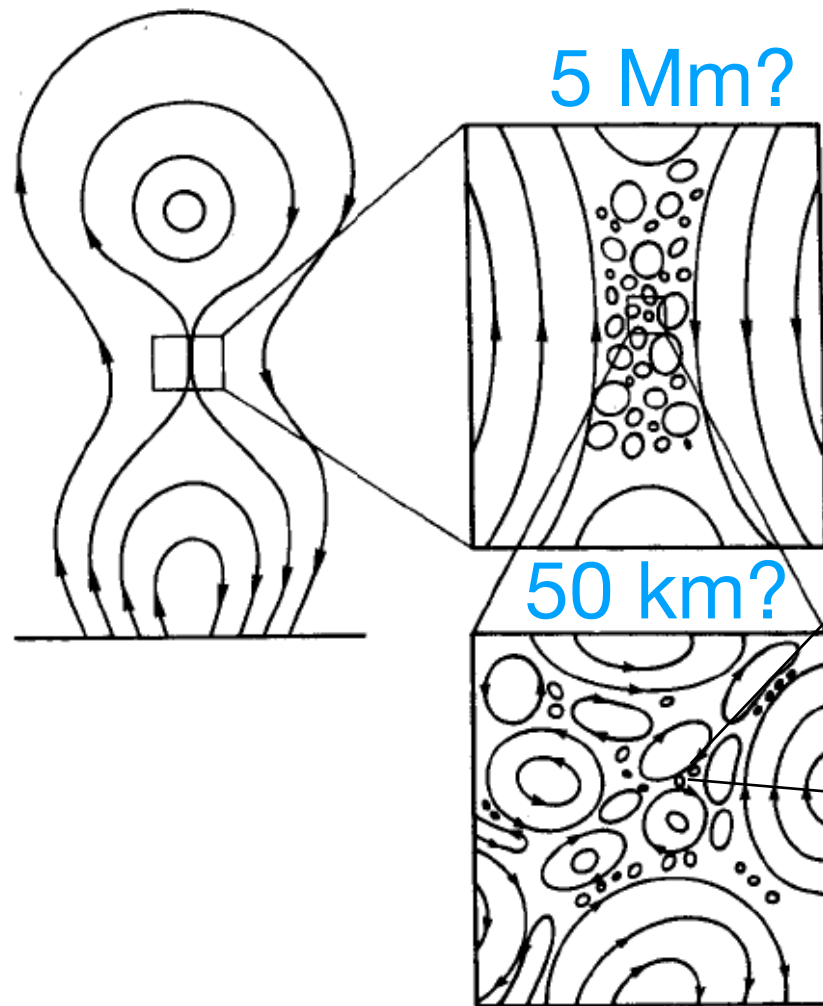


$$\frac{\partial f}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\kappa_{ij} \frac{\partial f}{\partial x_j} \right] - U_i \frac{\partial f}{\partial x_i} + \frac{p}{3} \frac{\partial U_i}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial p} + Q,$$

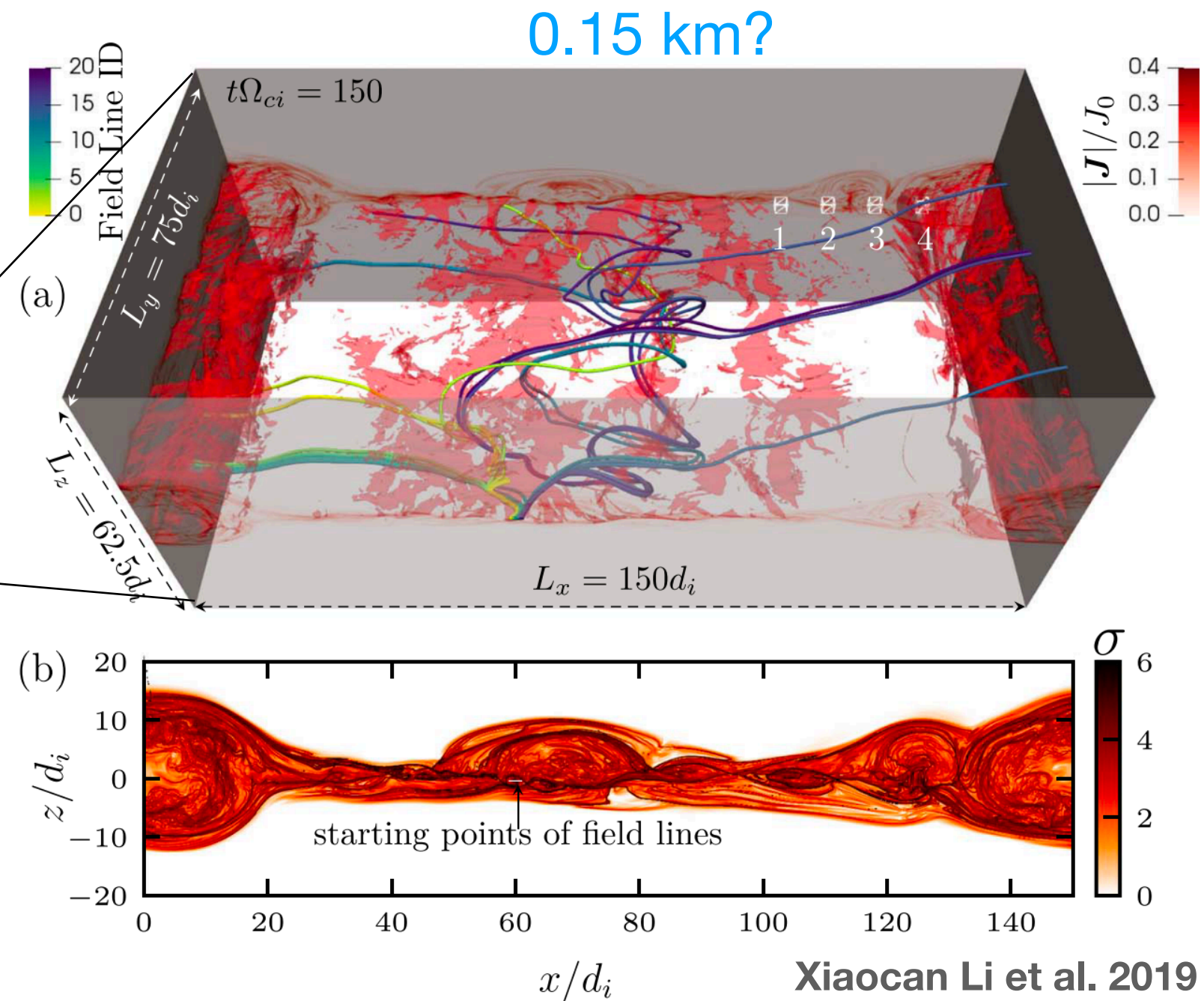
粒子の軌道を追跡して
マスダ・ソースを再現！



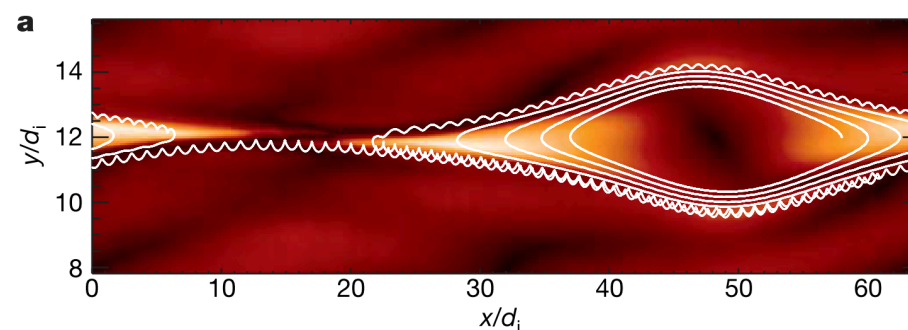
リコネクションとプラズモイド、そして乱流！



Tajima and Shibata 1997
See also Galeev et al. 1986



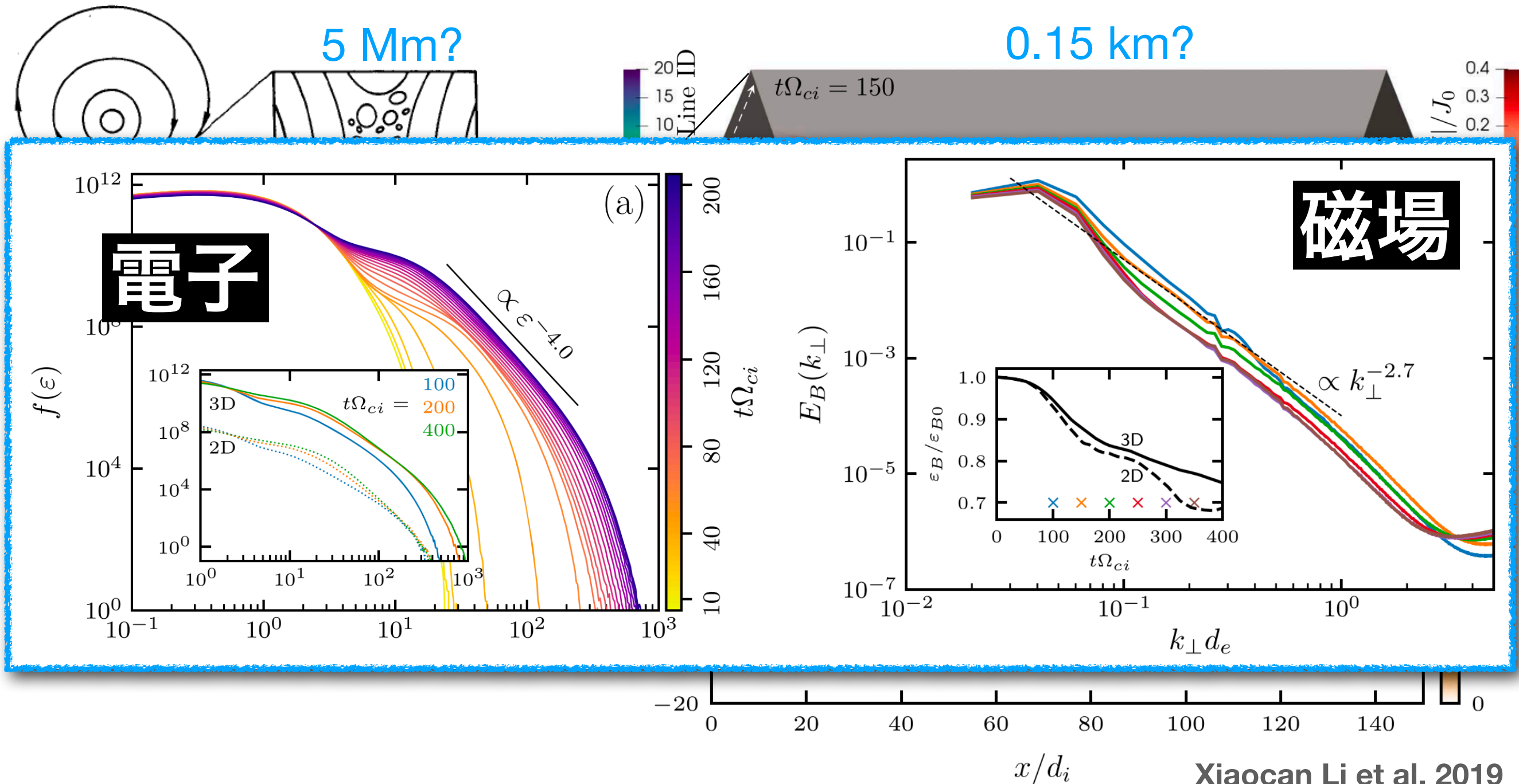
X点 (電場加速) は
重要ではなかった！
(サイズが小さすぎる)



Drake et al. 2006; 2013

Dahlin et al. 2014, 2017

リコネクションとプラズモイド、そして乱流！



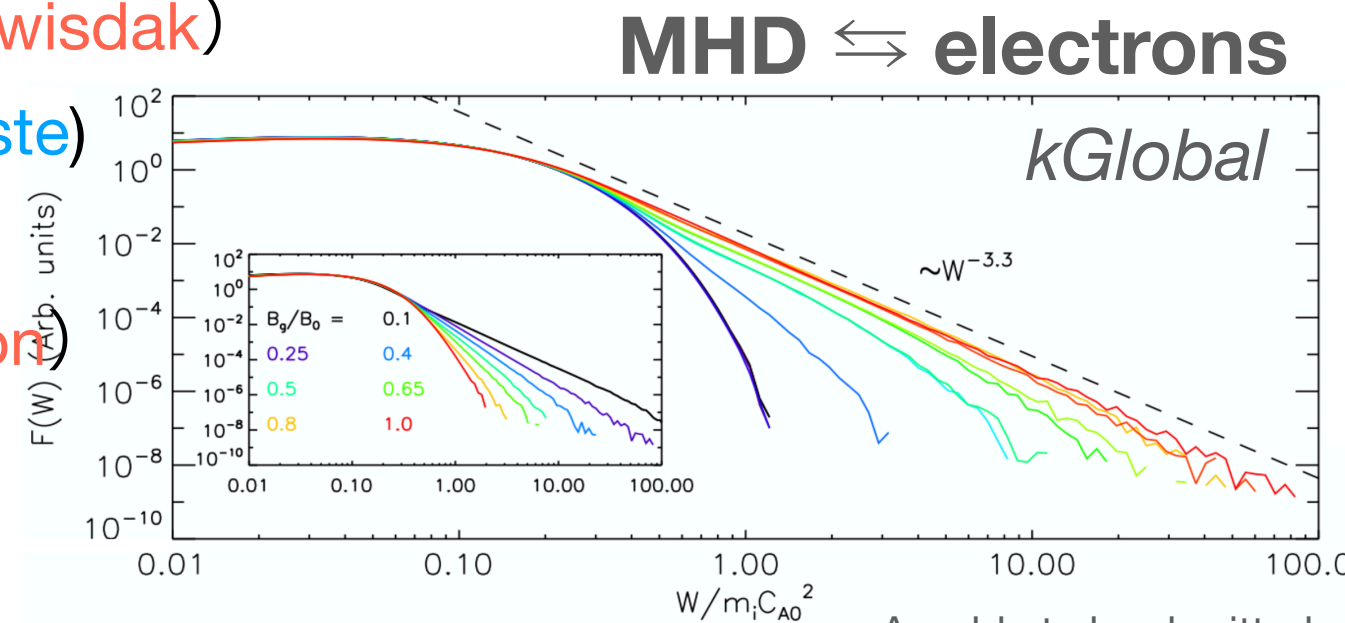
セルフコンシステントに（PICで）はっきりとしたベキを作った！

今、粒子加速研究を牽引している基幹プロジェクト



- NASA/NSFが企画・採択した「DRIVEサイエンス・センター」の1つ
- Phase I（2年、9件採択）で結果を出せばPhase II（3年、1–2件採択予定）
- **PI: Jim Drake, PM: Christina Cohen**, Advisory Board, Leadership Council

1. リコネクション班 (Leads: Glesener, Swisdak)
2. オンセット班 (Leads: Antiochos, Christe)
3. 電子加速班 (Leads: Chen, Guo)
4. イオン加速班 (Leads: Cohen, Daughton)
5. 粒子輸送班 (Leads: Gary, Oka)
6. 加熱班 (Leads: Klimchuk, Phan)



- 研究分担者20人、総勢30–40人くらいが各班に分かれて研究

See also Drake et al. 2019

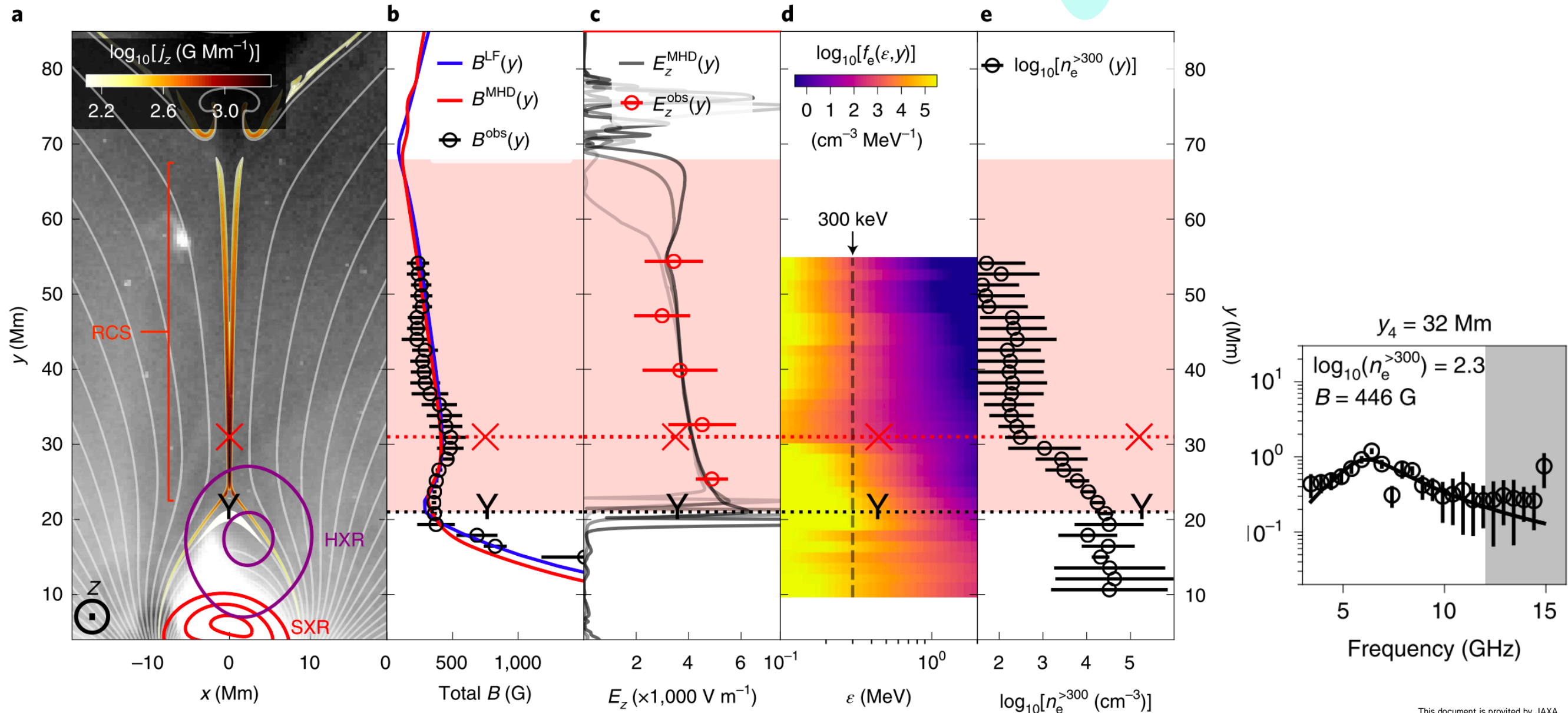
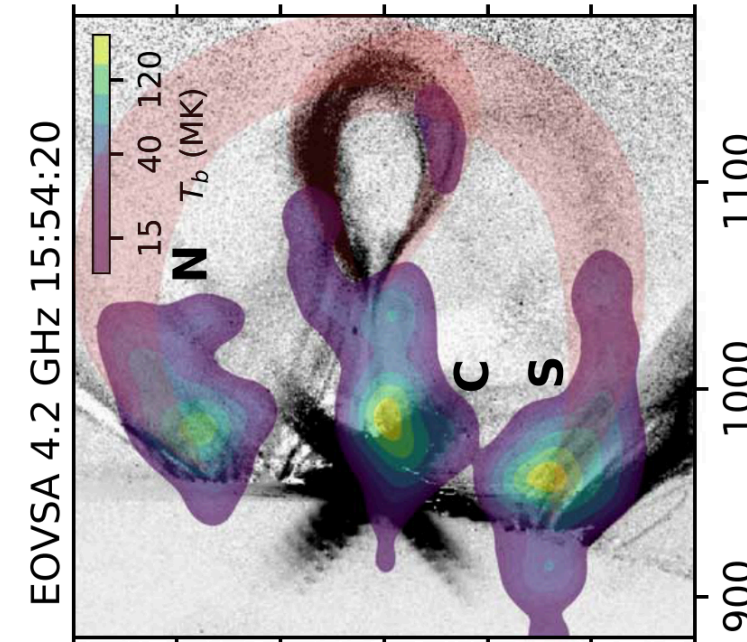
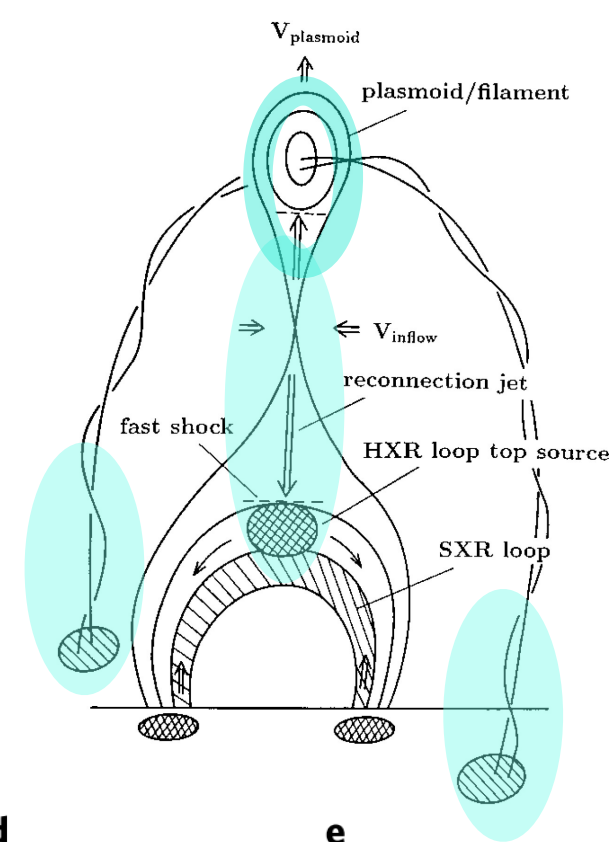
分野間連携が大きな特徴

米国の電波観測

VLA, EOVSa が活躍中！

Gary et al. 2018; Chen et al. 2020a, 2020b

See also **VLA** observations by Chen et al. 2015, 2018, 2019



EOVSA補完計画



後継のFASR計画は予算がついていないが . . .

KSCへのアンテナ設置をNASAが急遽承認

- **FASRのプロトタイプ（低周波側） 0.4 — 2 GHz**
- **EOVSA（現在稼働中） 1 - 18 GHz**
- **FASRのプロトタイプ（高周波側） 18 — 40 GHz**

→3年後に稼働予定

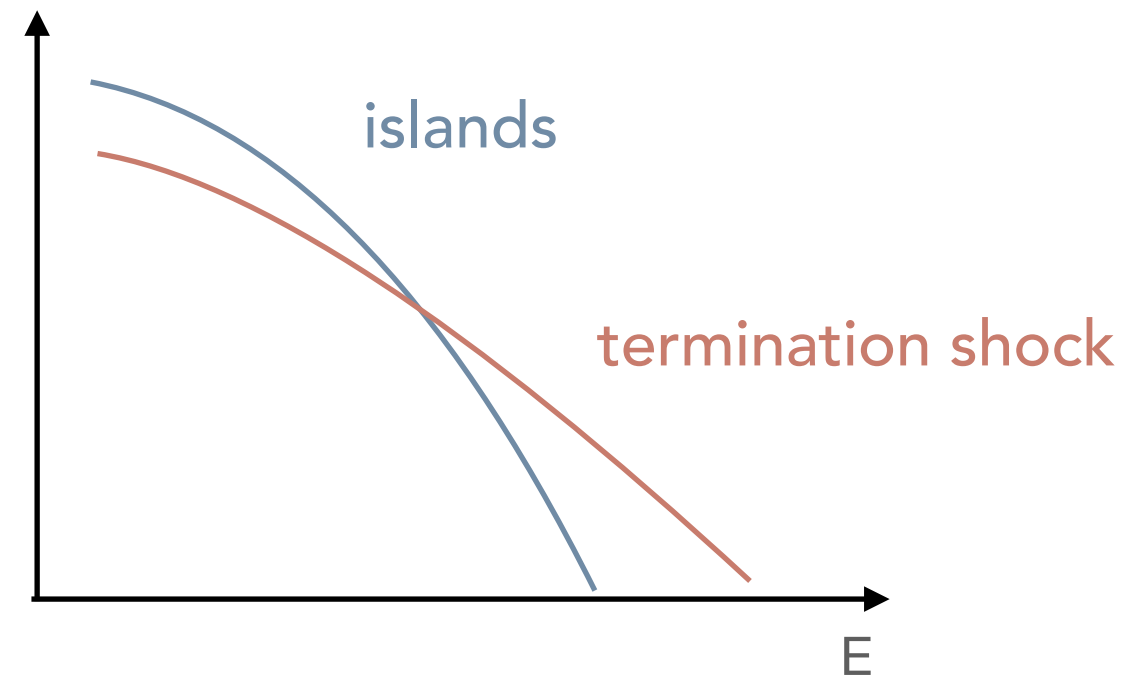
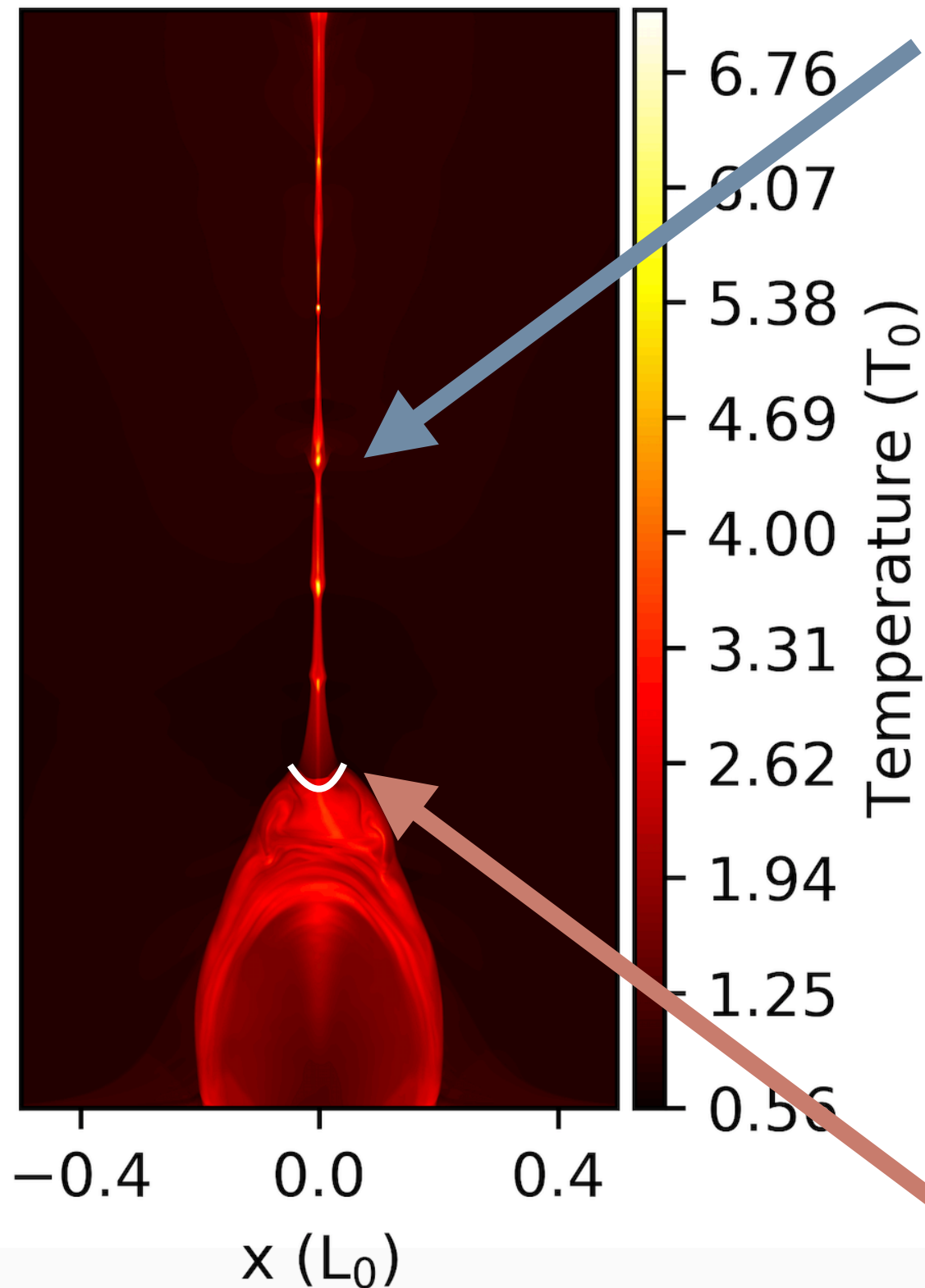
太陽周期のピークに
間に合う！

ブレークスルーはPhoENiXによるX線・ γ 線観測に期待

プラズモイド
合体

SDO Takasao et al. 2012, 2016

IRIS Kumar et al. 2019



終端衝撃波

VLA

Chen et al. 2018, 2019

PhoENiXのこれまでの活動と成果

- 科学的議論の深化

- 科学検討会合（月1～2回）
- WG主催研究会（年2回）

- 数値モデリングに着手

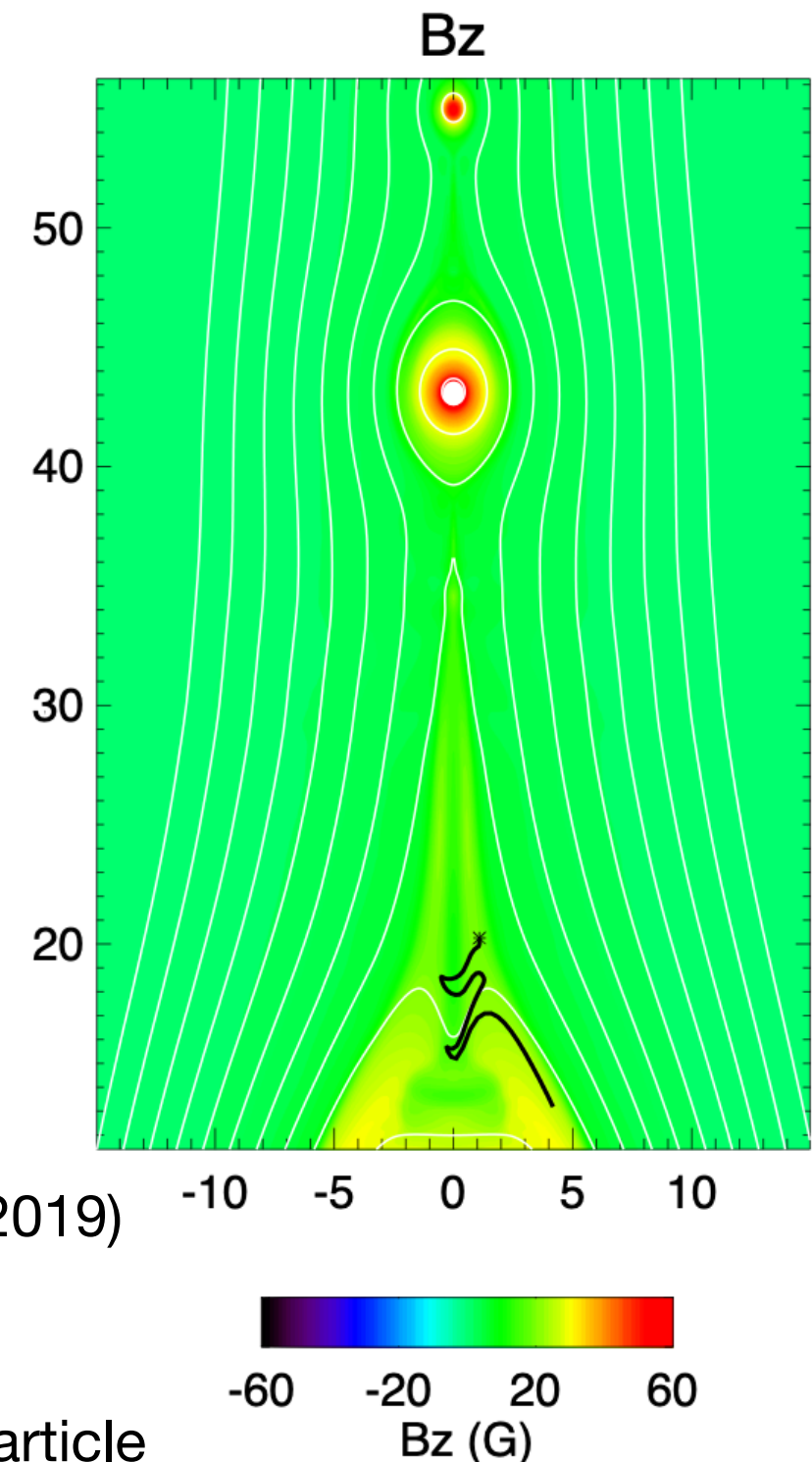
- 右図は金子氏（名古屋大学）によるMHD+粒子の計算

- 国際共同研究の体制構築

- 日米共同観測ロケット実験 FOXSI
- 米国のSoIFERプロジェクトへの参加

- 学会・論文発表等（一部の例）

- 成影; 高エネルギー宇宙物理学連絡会タウンミーティング (2019)
- 成影; 日本天文学会2020年秋季年会 (2020)
- Oka et al.; mini-conference "Magnetic Reconnection and Particle Acceleration in Solar Flares", Los Alamos, USA (2019)
- Oka et al., Space Science Reviews, 214:82 (2018)



そして宇宙へ！

パルサー・フレア

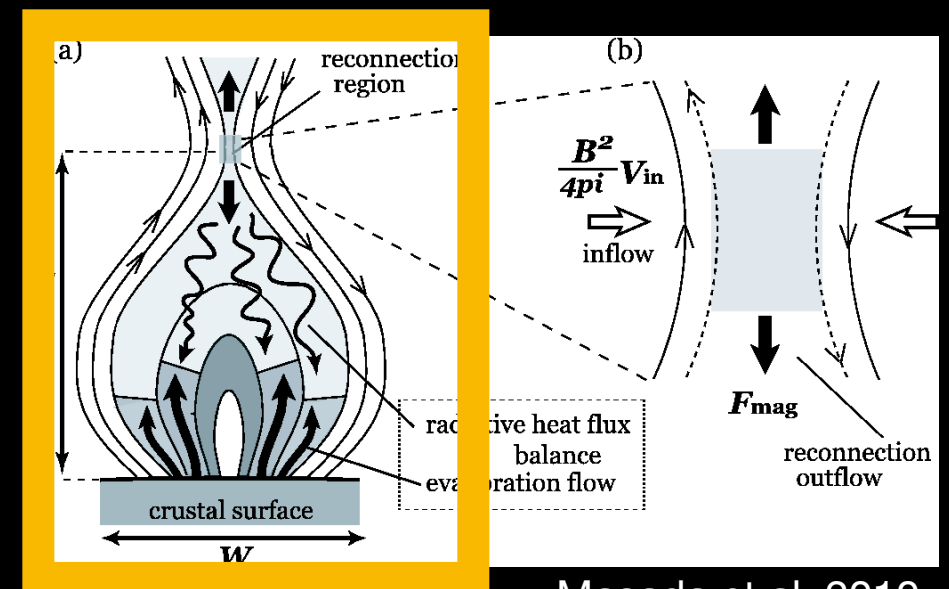
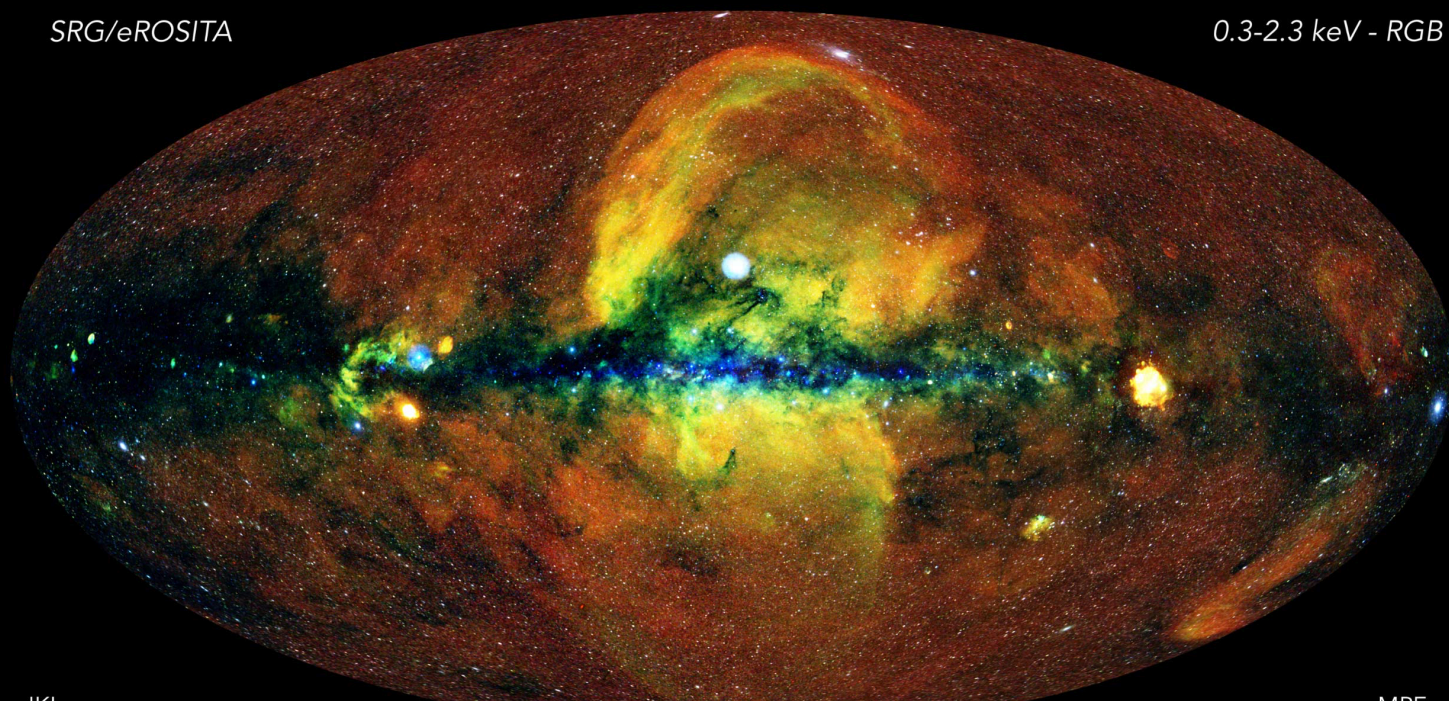
マグネター・フレア

恒星スーパー・フレア

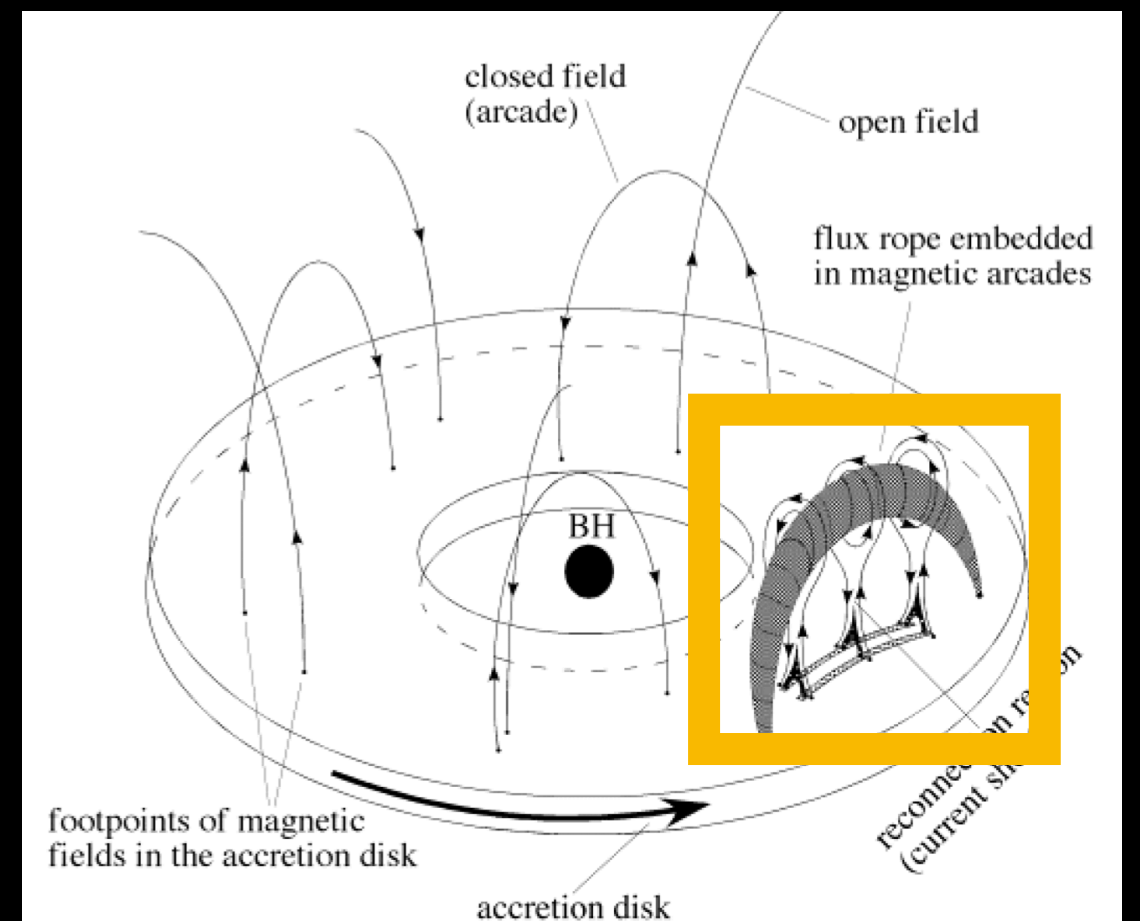
ブラックホール降着円盤

SRG/eROSITA

0.3-2.3 keV - RGB



Masada et al. 2010



Yuan H. et al. 2009

宇宙におけるフレア粒子加速の統一理論！？

ただし、これらに直接寄与することはPhoENiXの科学目標ではないのでご注意を。PhoENiXはあくまで太陽観測ミッションです。

まとめ

「超難問」の太陽フレア粒子加速

Yohkoh

RHESSI

NoRH

EOVSA

VLA, ALMA

Solar Orbiter, Parker Solar Probe

SoI FER

FI ERCE

PhoENiX

- 現在の注目は**電波観測**
- キーワードは**分野間連携**
(SoI FERでもPhoENiXでも)

まだまだ続く新展開！！！！