

14pK307-5 (招待講演)

トカマク放電のメジャーディスラプションにおける 相対論的逃走電子ビーム形成

Formation of Relativistic Runaway Electron Beam
During Major Disruptions of Tokamaks

松山 顕之

量子科学技術研究開発機構

matsuyama.akinobu@qst.go.jp

非熱的現象としての逃走電子ビーム発生

- 自然界では静電ポテンシャル、磁場、運動(回転)エネルギー、重力などマクロな蓄積エネルギーの開放に伴い、様々な非熱的現象が観測
- 本日の話:
 - 実験室プラズマ(=トカマク)の熱・磁気エネルギー開放(=メジャーディスラプション)における高エネルギー電子生成について

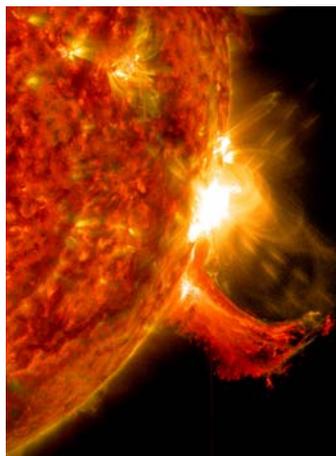
雷

Lightning¹⁾



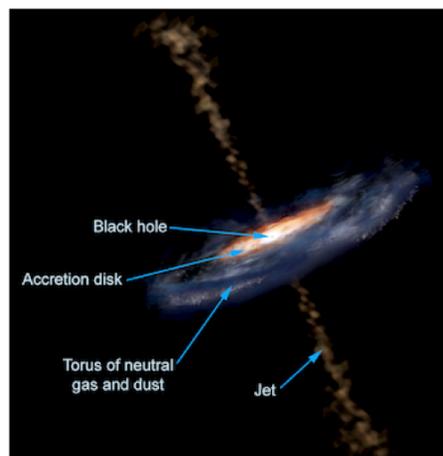
太陽フレア

solar flare²⁾



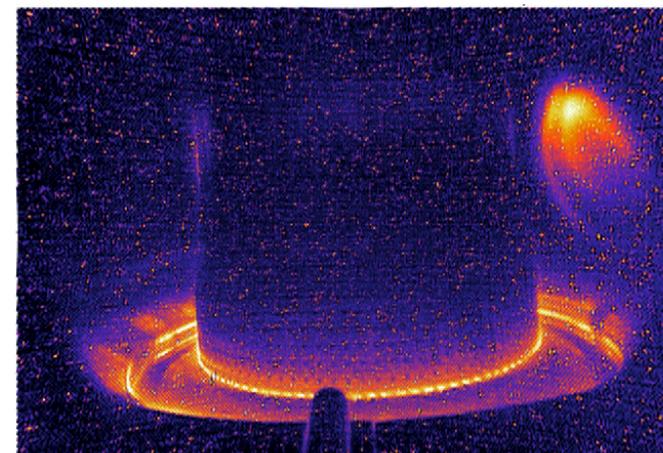
降着円盤ジェット

accretion jet³⁾



逃走電子

runaway electrons⁴⁾



1) https://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2006/13sep_electricice
2) <https://www.nasa.gov/content/goddard/nasa-releases-images-of-mid-level-solar-flare/>
3) https://imagine.gsfc.nasa.gov/science/objects/active_galaxies1.html
4) M. Hoppe+, Nucl. Fusion 58, 026032 (2018)

アウトライン

1. イントロダクション

- トカマク放電の(メジャー)ディスラプション
- 高エネルギー電子の観測(エネルギー、空間分布、電流値)

2. 問題の背景: なぜ重要視されるか?

- 核融合研究との関連

3. 現在までの理解

- 逃走電子のアバランチ機構

4. まとめと今後の課題

- 逃走電子の制御手法と理論・モデリングの課題

アウトライン

1. イントロダクション

- トカマク放電の(メジャー)ディスラプション
- 高エネルギー電子の観測(エネルギー、空間分布、電流値)

2. 問題の背景: なぜ重要視されるか?

- 核融合研究との関連

3. 現在までの理解

- 逃走電子のアバランチ機構

4. まとめと今後の課題

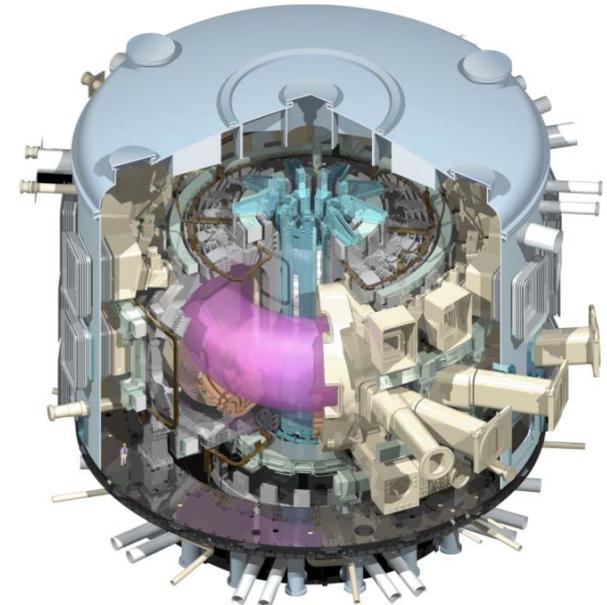
- 逃走電子の制御手法と理論・モデリングの課題

対象とする実験室プラズマ

- トカマク装置
 - 高温・高圧のプラズマをトロイダル電流が作るポロイダル磁場を使って閉じ込めて核融合反応を維持
 - “磁気面”を形成し、熱と磁場のエネルギーを閉じ込める
- ITER: 7極による国際共同プロジェクト
 - 重水素-三重水素反応によるエネルギー増倍10の燃焼プラズマの実現

$R=6.2\text{m}$
 $B=5.3\text{T}$
 $a=2\text{m}$
 $I_p=15\text{MA}$
 $T_e \sim T_i \sim 20\text{-}30\text{keV}$
 $n_e \sim 10^{20}/\text{m}^3$

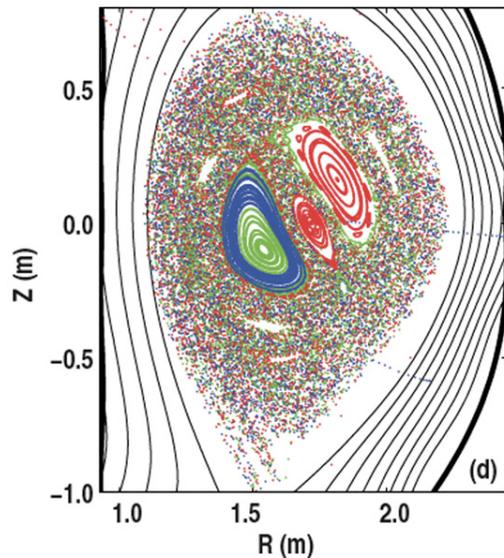
ITER
[仏カナダラッシュユ, 2025-]



メジャーディスラプション

- 圧力、密度、電流の運転限界付近では閉じ込めが劣化

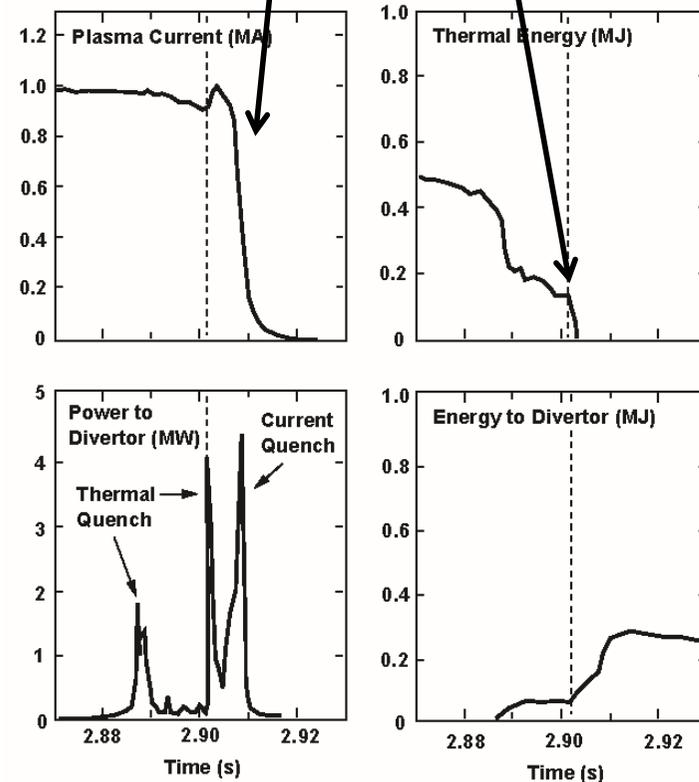
例) カオス的磁場: プラズマ中心と周辺をつなぐ磁力線の発生



NIMROD: Stochasticity during MGI [Izzo+, NF2011]

電流クエンチ (>10ms)

熱クエンチ (~1ms)

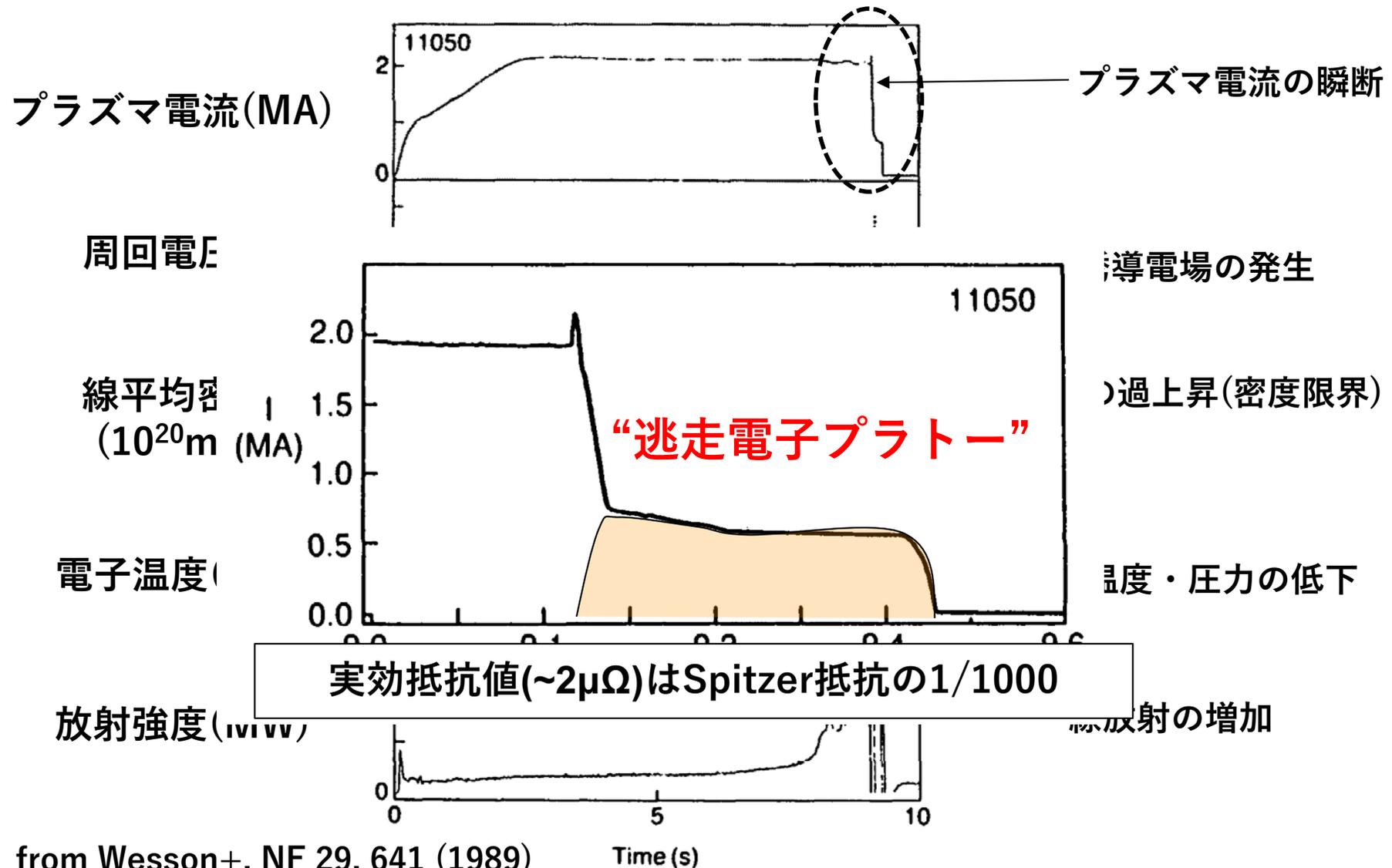


→ 温度の急激な低下と電流の遮断
(メジャーディスラプション)

ASDEX-U装置におけるディスラプション [from IPB NF1999]

ディスラプションにおける高エネルギー電子の観測

- JET装置(EU)の密度限界型のメジャーディスラプションの観測
 - 低温($\sim 10\text{eV}$)・高密度($\sim 10^{20}/\text{m}^3$)のトカマク放電での電流クエンチ後に残存する電子テール



大型トカマクのポロイダル磁束による電子加速

- 強いトロイダル磁場(~数Tesla)により加速領域に閉じ込められた電子がポロイダル磁束が作る誘導起電力によりMeVオーダーまで加速

エネルギー分布

(硬X線からの再構成)

[JET装置(EU), Plyusnin, FEC2012]

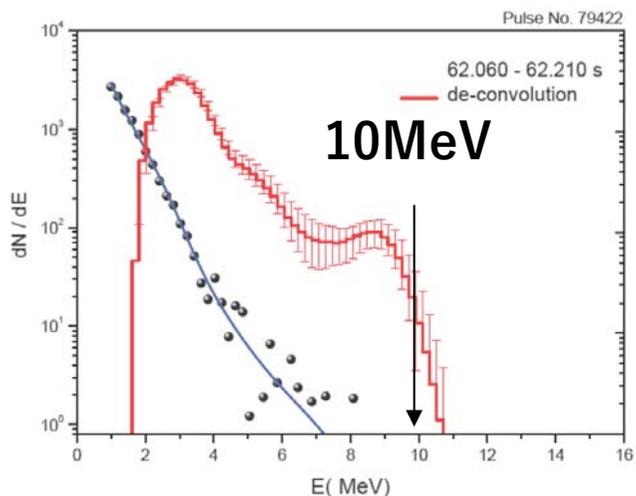
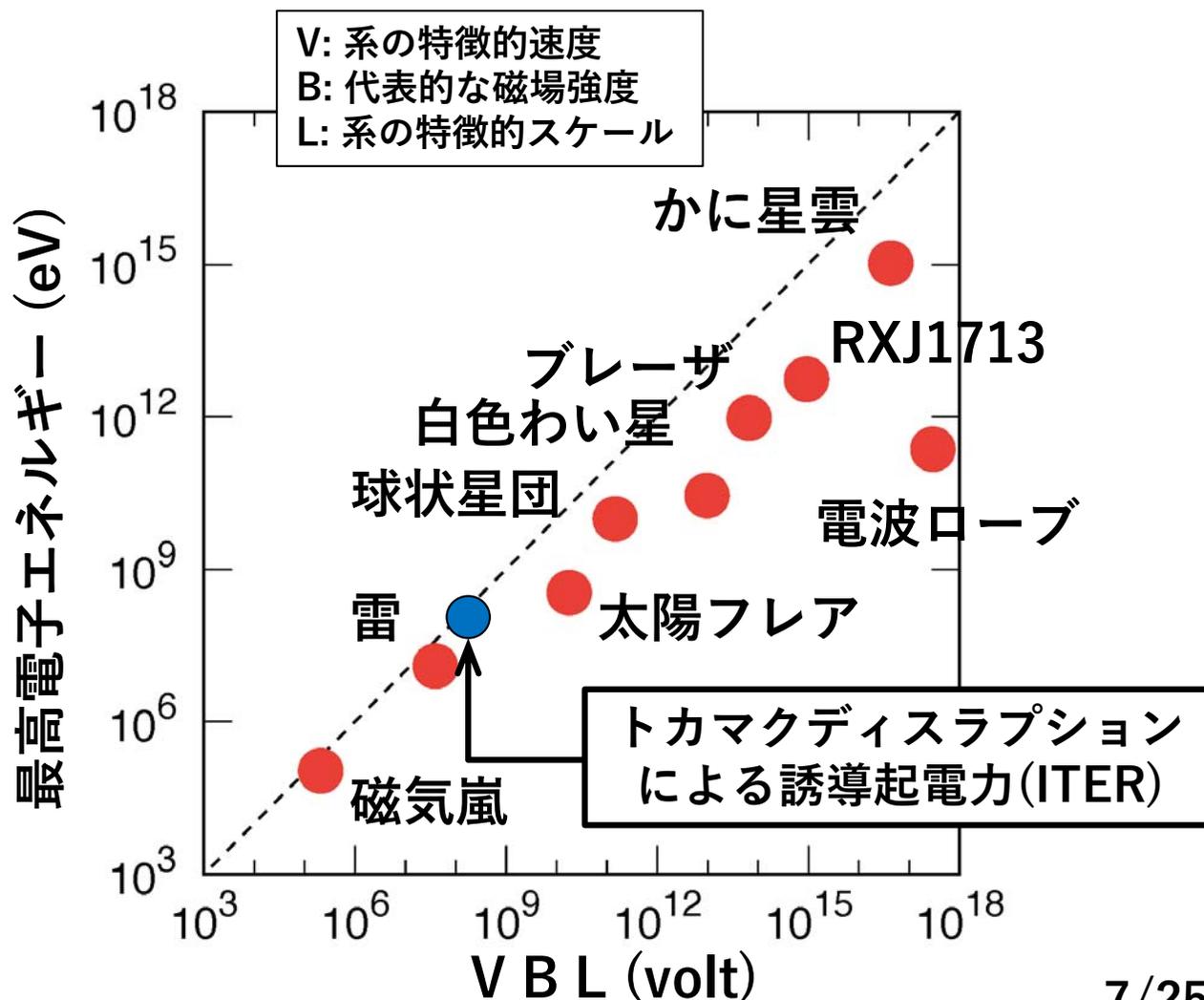


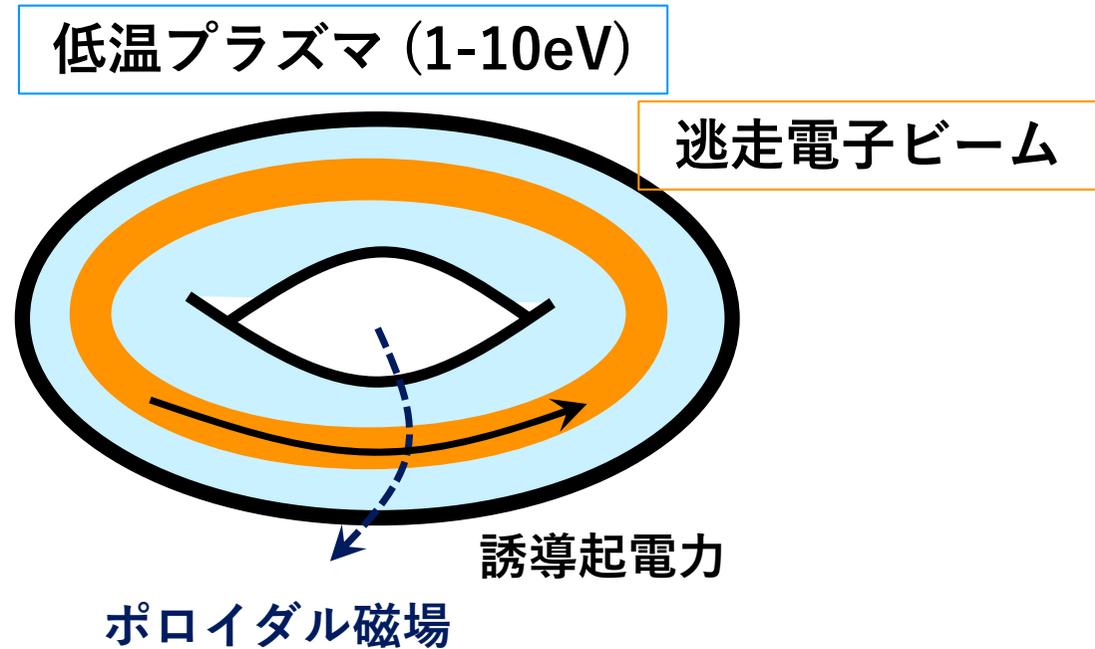
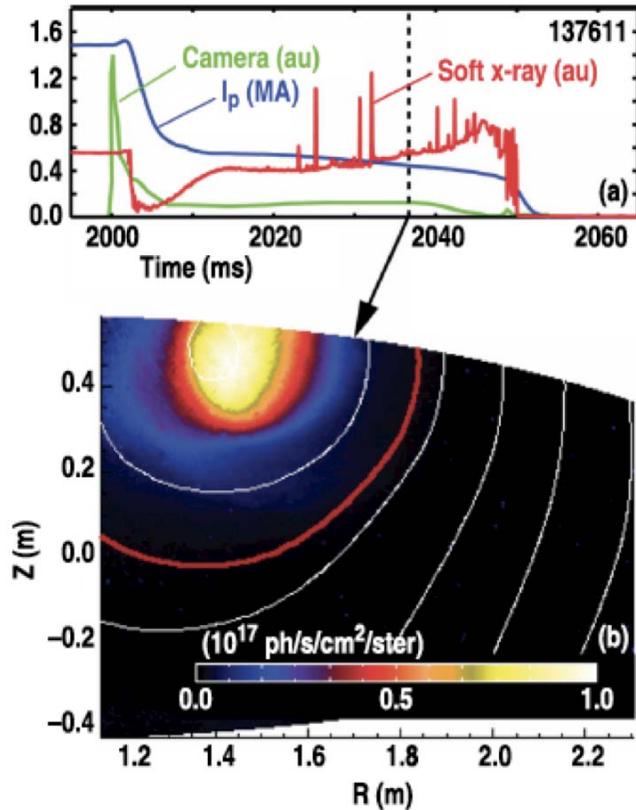
Figure 4: Recorded HXR spectrum (raw data, black circles) in MGI disruption #79422 and reconstructed spectrum of RE obtained using de-convolution procedure (red).

粒子加速現象のスケーリング[Makishima (1999)]



逃走電子プラトーの特徴 = MAオーダーの電流値

軟X線イメージング
[DIII-D装置(米), Yu+, PoP2013]



マイノリティの加速ではなく、エネルギー開放に伴い、
電子ビームと低温プラズマが共存する新しい平衡状態を形成

アウトライン

1. イントロダクション

- トカマク放電の(メジャー)ディスラプション
- 高エネルギー電子の観測(エネルギー、空間分布、電流値)

2. 問題の背景: なぜ重要視されるか?

- 核融合研究との関連

3. 現在までの理解

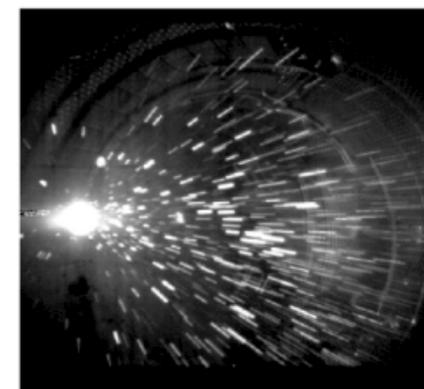
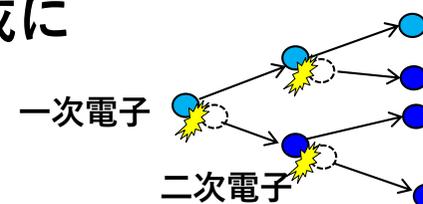
- 逃走電子のアバランチ機構

4. まとめと今後の課題

- 逃走電子の制御手法と理論・モデリングの課題

問題の背景: なぜ逃走電子が重要視されるか

- ITERの運転に備えて装置への負荷や故障の原因となるoff-normal eventsの理解が不可欠
 - ITERの逃走電子発生の子測 [Rosenbluth & Putvinski, NF1997]
 - 1次電子と熱電子の近接衝突による2次電子生成による雪崩的増倍(アバランチ)を考慮
 - ITERではアバランチ機構により容易に5MA-10MAのビーム電流が発生することが予言
 - 発生した逃走電子ビームの炉壁への衝突の懸念



逃走電子による
スパークの観測例

[Saint-Laurent, FST2013]

逃走電子は将来装置(ITER)のshow-stopper?
→ 20年前から現在まで続く研究の動機づけ

アウトライン

1. イントロダクション

- トカマク放電の(メジャー)ディスラプション
- 高エネルギー電子の観測(エネルギー、空間分布、電流値)

2. 問題の背景: なぜ重要視されるか?

- 核融合研究との関連

3. 現在までの理解

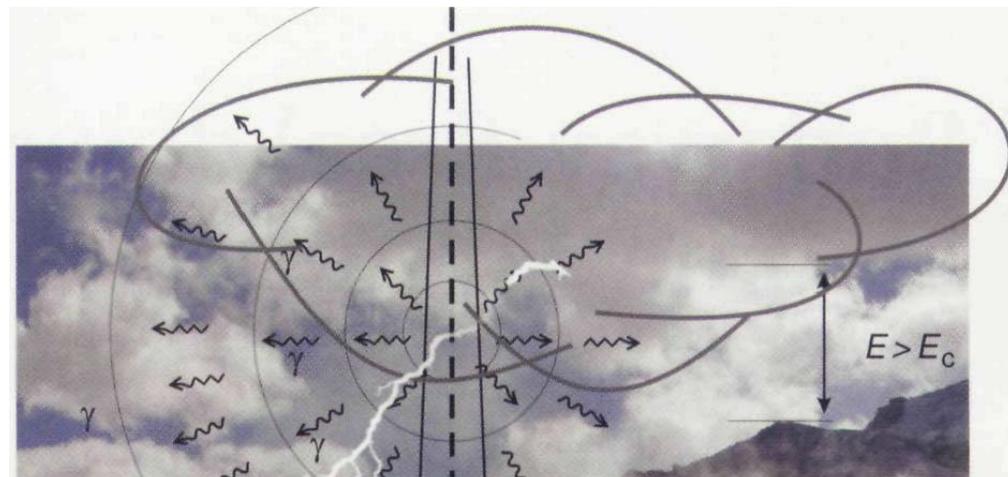
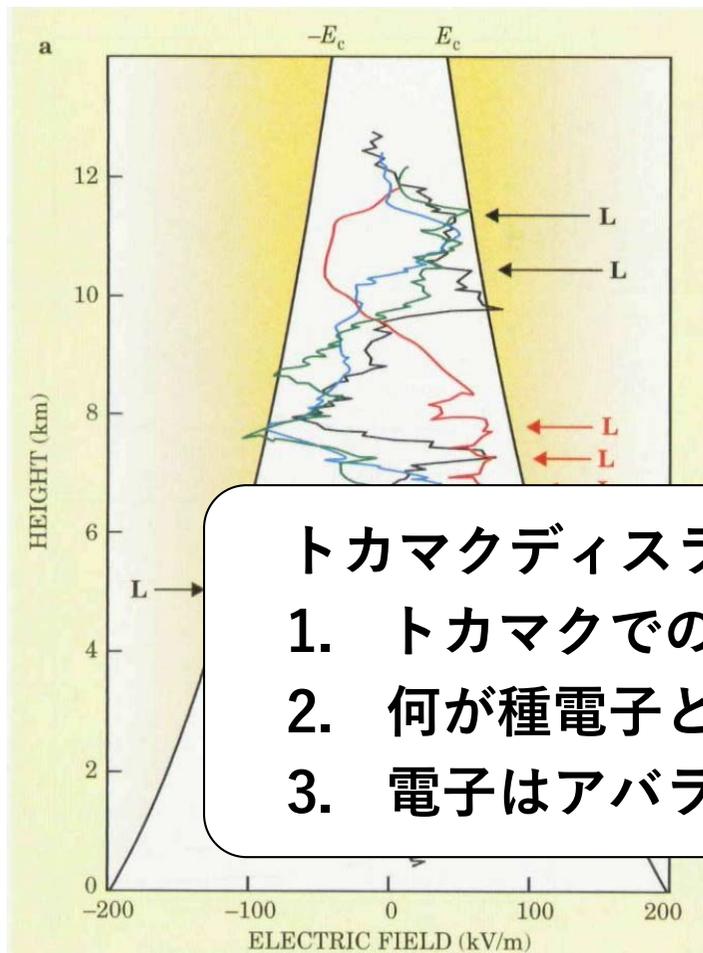
- 逃走電子のアバランチ機構

4. まとめと今後の課題

- 逃走電子の制御手法と理論・モデリングの課題

アバランチ機構 (雷放電と同様のメカニズム)

- 大気中では宇宙線に由来する高エネルギー電子束(種電子)が遍在
- 高エネルギー電子と束縛電子の衝突 → 2次高エネルギー電子(アバランチ)
 - Breakdown電圧より低い電圧での放電が説明(Gurevich+,PLA1992)
 - 電場のスケール長 \gg アバランチ増幅の特性長($l_a \sim 50\text{m}$)



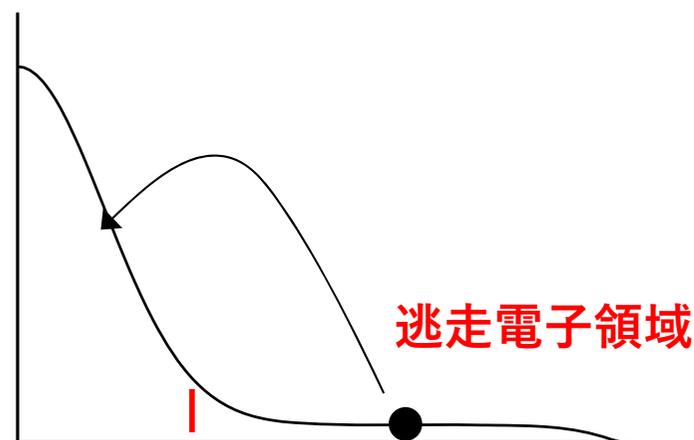
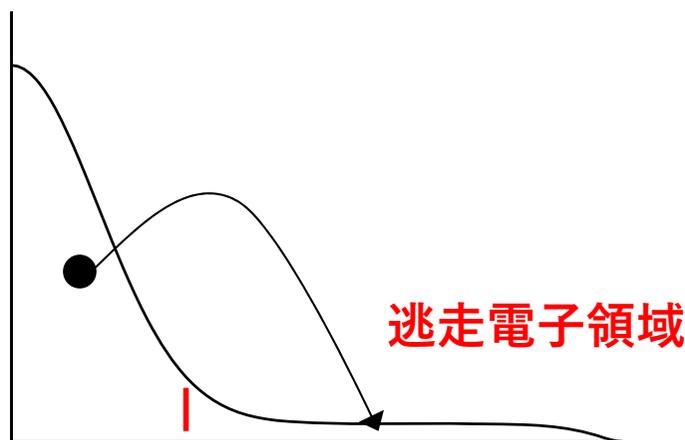
トカマクディスラプションでの問い:

1. トカマクでのアバランチの成長率(特性時間)は?
2. 何が種電子となるか?
3. 電子はアバランチに十分な飛程(閉じ込め時間)があるか?

アバランチ増幅率の計算法

- アバランチ機構: 相対論的電子と熱電子の近接衝突[Møller断面積]が原因

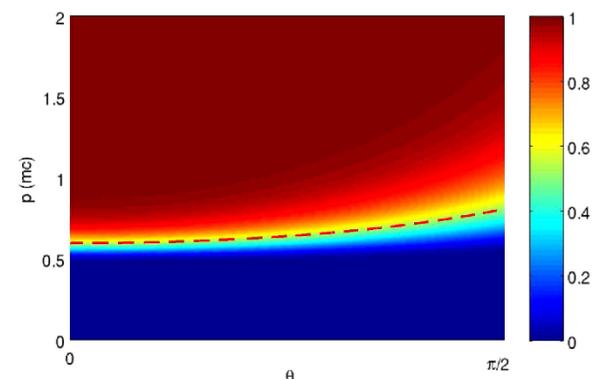
増幅率 = 2体衝突後、熱電子が逃走電子になる確率 - 1次電子が熱電子になる確率



- 増幅率を計算する数理モデルの導出

与えられた運動量の粒子が逃走電子になる確率は
Fokker-Planck方程式の随伴方程式から評価

[Liu+, PoP1996]

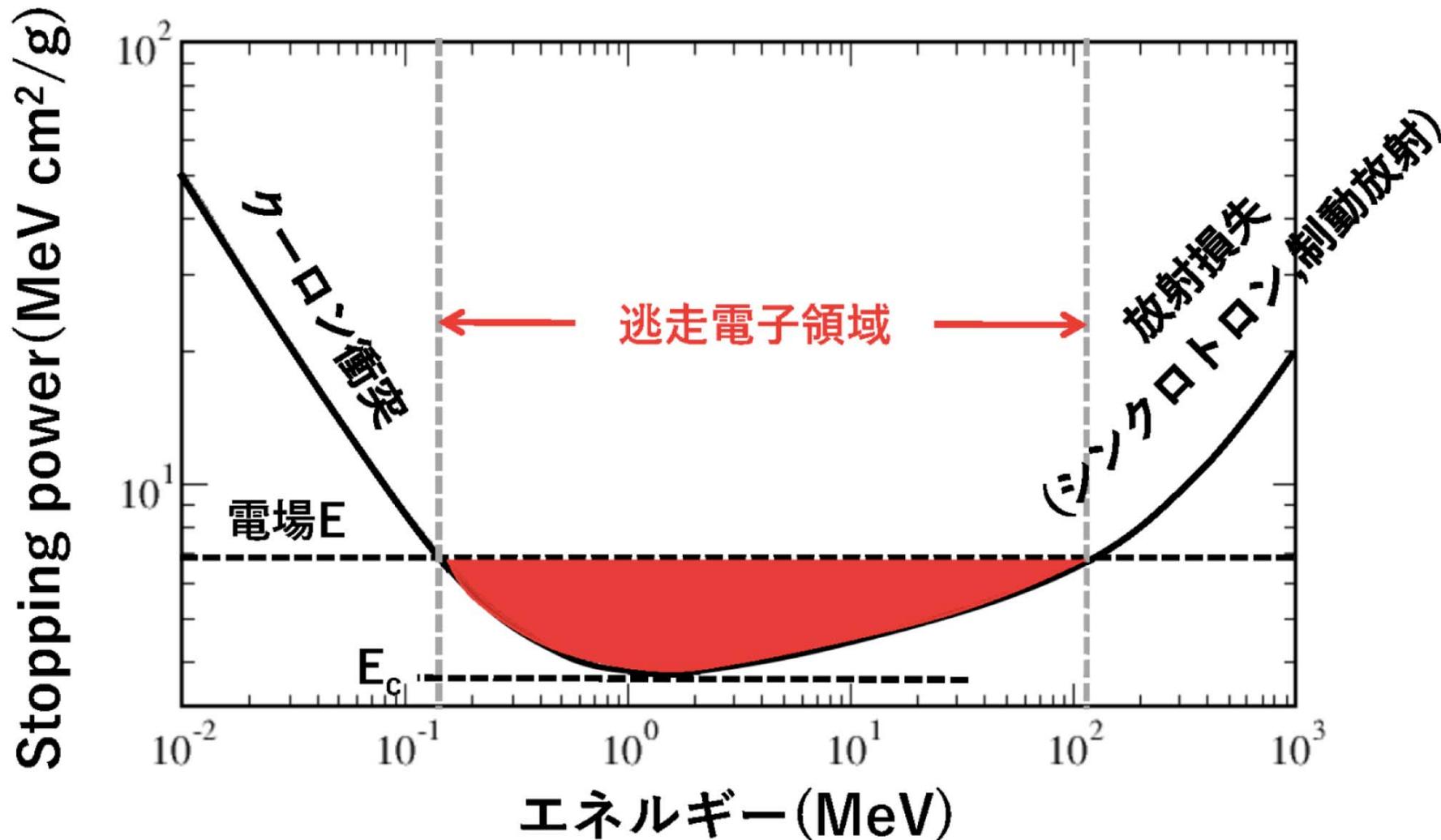


➔ アバランチのモデルは任意の電場、任意の粒子種、任意の逃走電子分布に拡張

[Matsuyama & Yagi, PFR2017]

アバランチは閾値電場 E_c 程度の弱い電場で逃走電子を発生

- 水素プラズマの阻止能



摩擦力に打ち勝つ強い電場がなくても、効率よく高エネルギー電子を生成できる

Question 1: トカマクでのアバランチ成長率は?

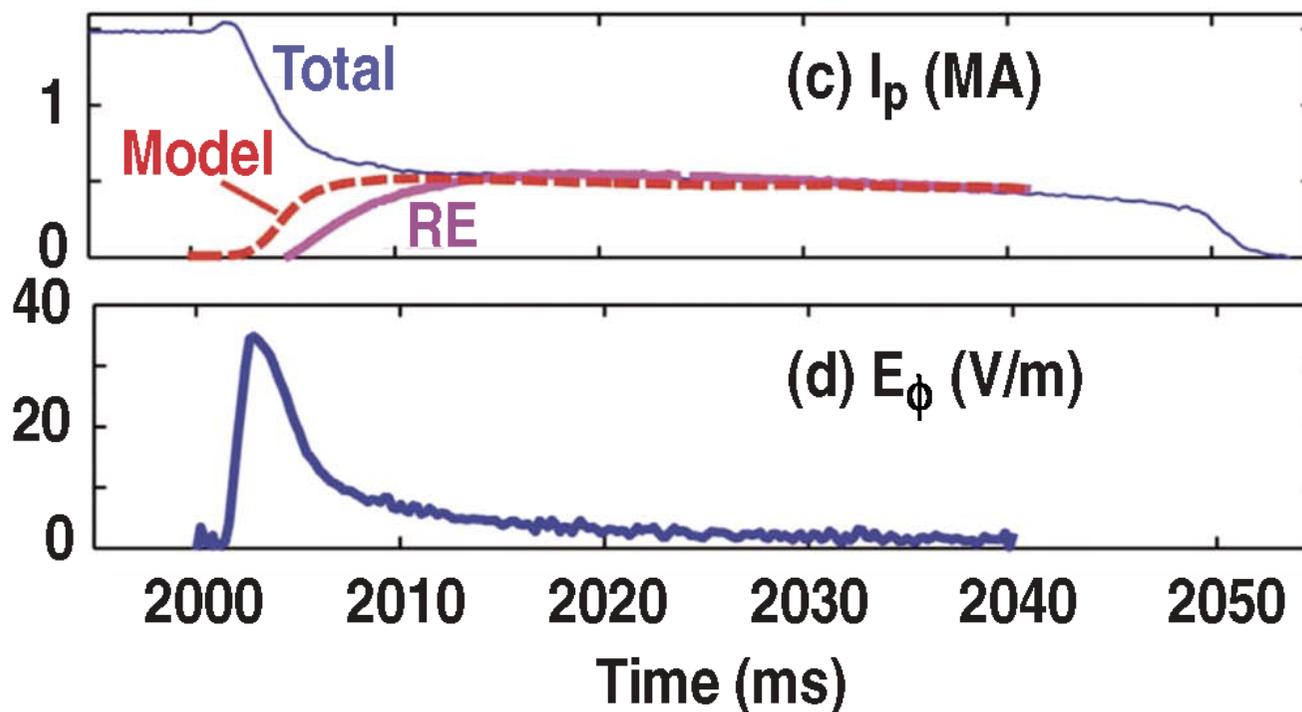
逃走電子をe倍にするために必要な磁束(物性値)はITERをはじめとする大型トカマクの磁束に比べ十分小さい

$$\psi_0 \simeq \mu_0 R_0 I_p \simeq 117 \text{ V} \cdot \text{s} \gg \psi_{e\text{-fold}} \simeq \psi_A a(Z) \ln \Lambda \simeq 5.6 \text{ V} \cdot \text{s}$$

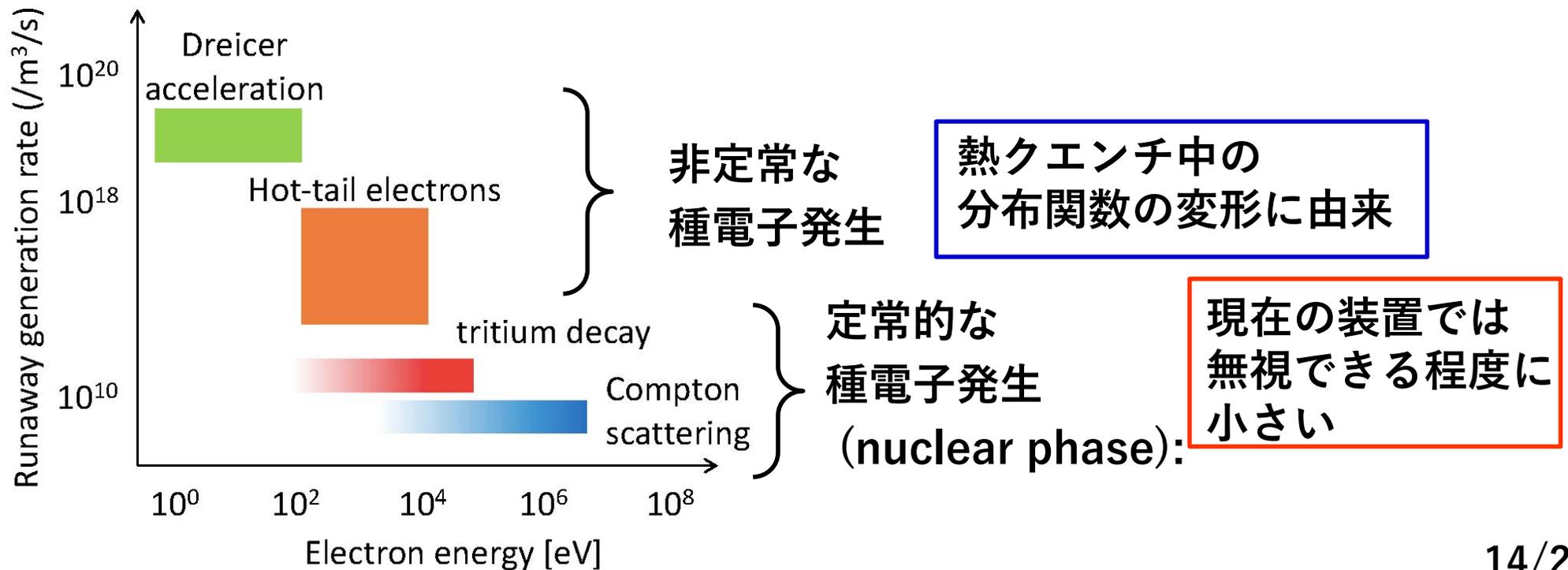
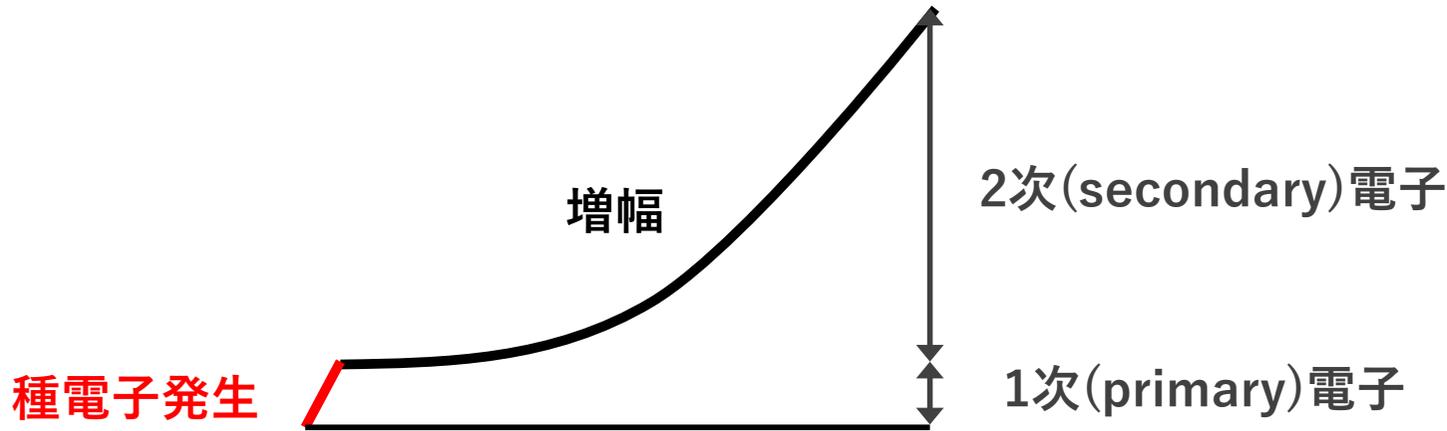
アバランチは大型トカマクにおける逃走電子の支配的な発生機構

DIII-D装置におけるモデルと実験の比較

(種電子量は8kAと仮定) [Hollmann, PoP2010]



Question 2: アバランチを引き起こす種電子は何か?

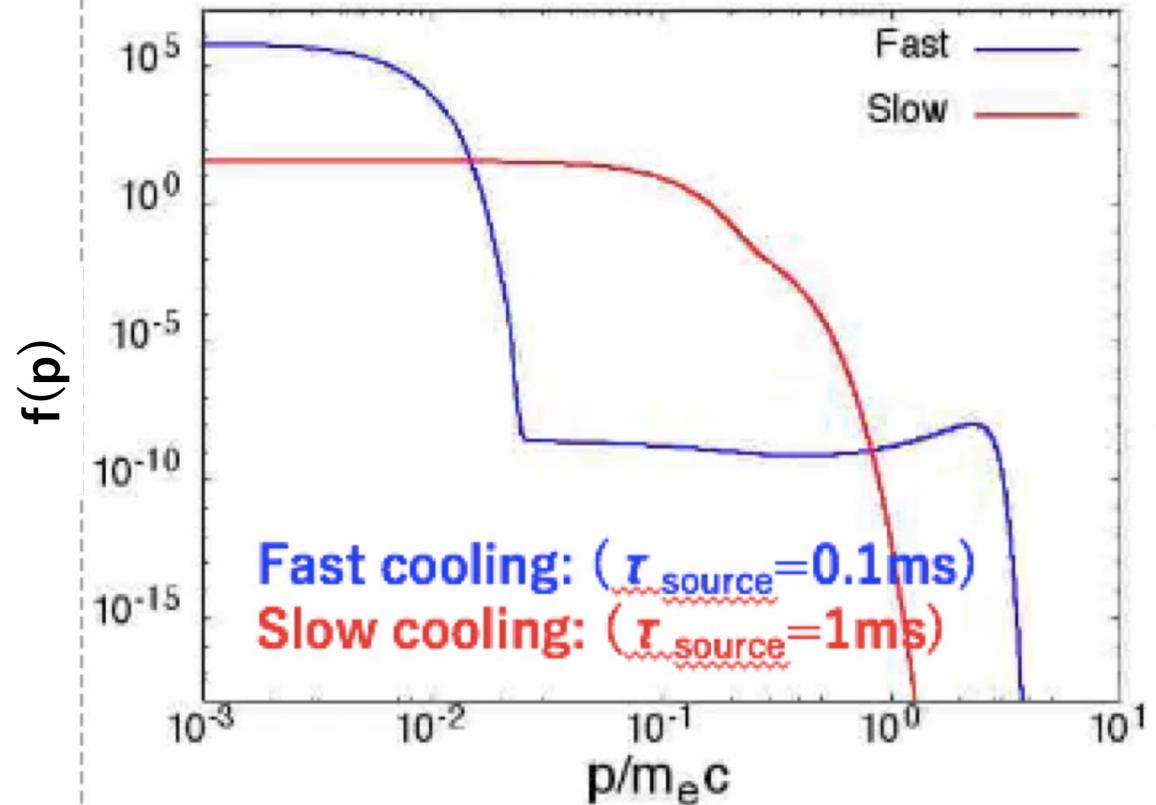
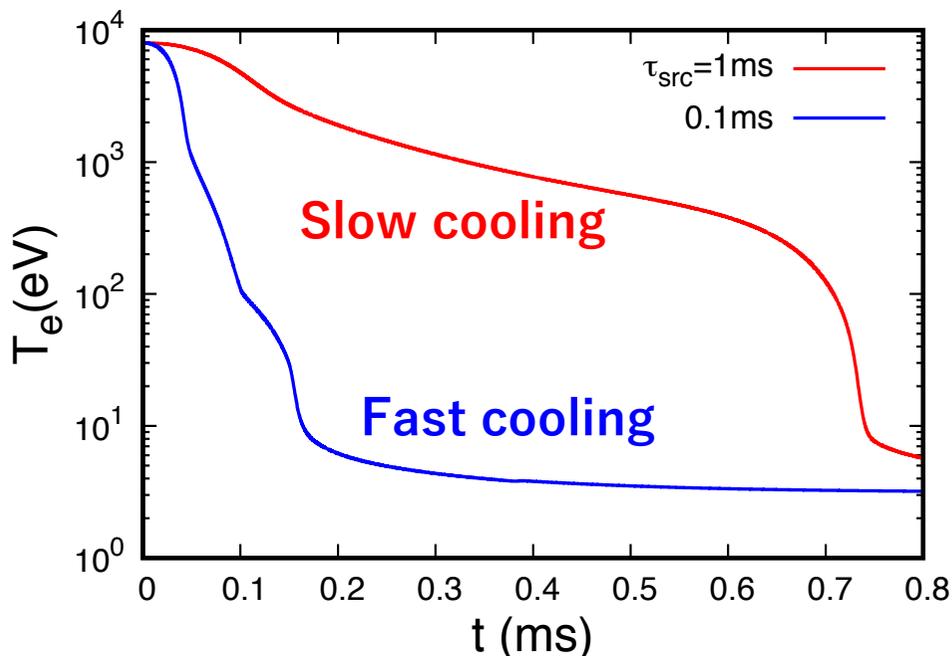


支配的なメカニズム: 放射冷却によるホットテール効果

アルゴン入射によるホットテール生成の
Fokker-Planckシミュレーション

[Matsuyama & Yagi, PFR2017]

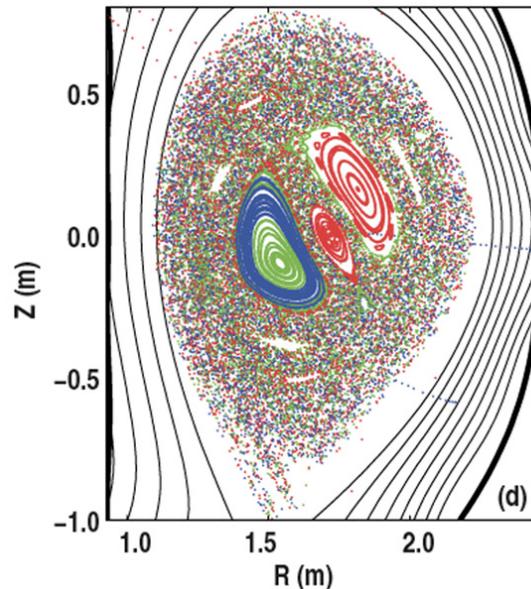
$$T_e = T_H = 8 \text{ keV}, n_H = 10^{20} / \text{m}^3, Z_{\text{eff}} = 1$$
$$\Delta n_{\text{Ar}} = 1 \times 10^{20} / \text{m}^3, j = 0.75 \text{ MA/m}^2$$



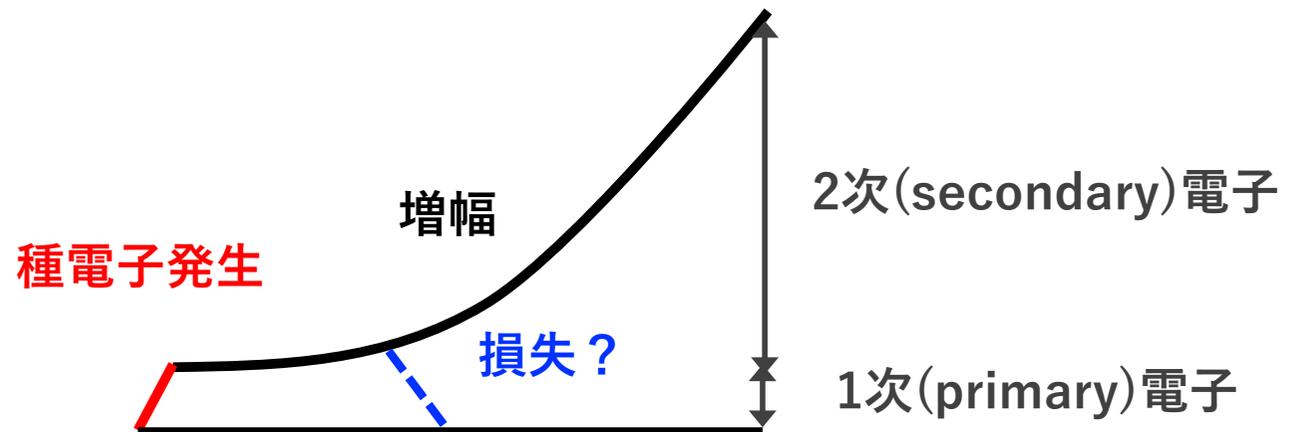
熱クエンチ中の線放射が強く、電子衝突時間より早くプラズマが冷却されると非マクスウェル的な変形により、種電子が生成

Question 3: 種電子は十分長く閉じ込められるか?

- トカマク装置では擾乱磁場がなければ系の対称性により、高速電子は加速領域に長時間閉じ込められる
 - ラーマ半径は十分小さい ($\rho \ll a$)
 - 静電ポテンシャルは十分弱い ($\phi \sim T_e/e$)
- ディスラプション時には強い磁場揺らぎにより磁気面が破壊されることで熱クエンチを発生 [Rechester & Rosenbluth PRL1978]



[Izzo+, NF2011]



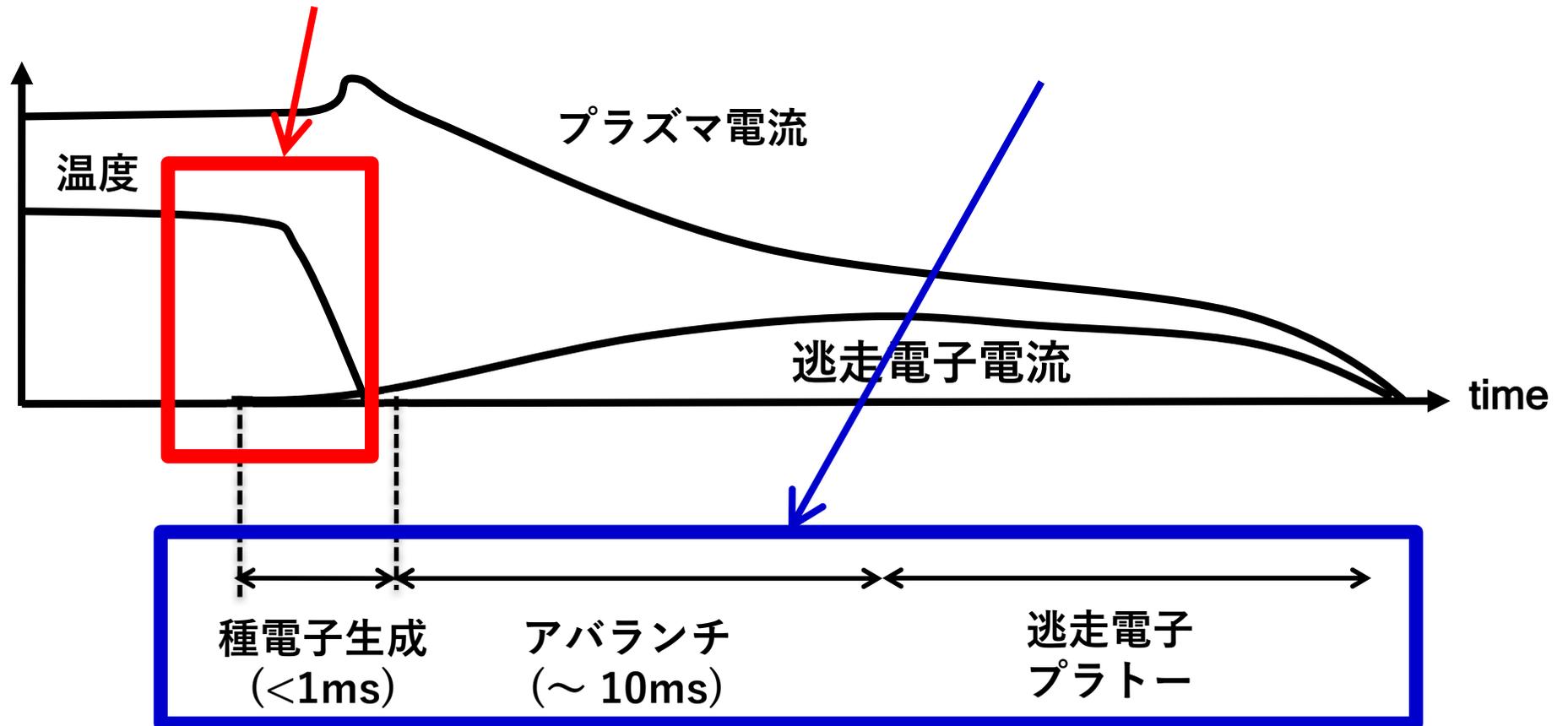
熱クエンチ時に種電子は発生しても、磁場揺らぎ中においてアバランチの特性時間より長く逃走電子が閉じ込められるかは明らかでない

解析の難しさ: 熱クエンチと電流クエンチのスケール分離

- 逃走電子プラトーの形成過程(模式図)

従来のMHDシミュレーションの
対象とするスケール

逃走電子のアバランチの
解析に必要なスケール



本研究の着想: 熱クエンチから電流クエンチまでを分離せず1つのシミュレーションとして追跡し、逃走電子の発生を扱えないか?

Reduced modelling based on “*runaway fluid model*”

EXTREM code

[Matsuyama+, IAEA-FEC2018]

簡約化MHDモデル(非圧縮モデル)に
逃走電子ビームを流体として扱う
モデルを組み合わせる

- 電離・再結合・線輻射の断面積
- Spitzer resistivity
- ホットテール生成やアバランチ生成のモデルを統合

Runaway fluid model

$$\frac{\partial n_{RE}}{\partial t} + \left(v_{RE} \mathbf{b} + \frac{\mathbf{E} \times \mathbf{B}}{B^2} \right) \cdot \nabla n_{RE} = S_{seed}(E_{\parallel}) + S_{avl}(E_{\parallel})$$

$$S_{seed}(E_{\parallel}) = S_{hot-tail}(E_{\parallel}) + S_{beta}(E_{\parallel}) + S_{Compton}(E_{\parallel})$$

Visco-resistive MHD model for tearing mode

$$\frac{\partial U}{\partial t} = -\mathbf{u} \cdot \nabla U + \mathbf{B} \cdot \nabla J + \nu \nabla_{\perp}^2 U$$

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} = \mathbf{B} \cdot \nabla \phi + \eta(T_e)(J - J_{RE})$$

$$E_{\parallel} = \eta(T_e)(J - J_{RE})$$

Electron/ion energy equation

$$\frac{3}{2} \frac{Dp_e}{Dt} = \frac{3}{2} \nabla_{\perp} \cdot (n_e^{\text{eq}} \chi_{\perp} \nabla_{\perp} T_e) + \frac{3}{2} \mathbf{b} \cdot \nabla (n_e^{\text{eq}} \chi_{\parallel} \mathbf{b} \cdot \nabla T_e) + P_{OH} + P_{rad} + P_{ion} + P_{ex}^{e-i}$$

$$\frac{3}{2} \frac{Dp_i}{Dt} = \frac{3}{2} \nabla_{\perp} \cdot (n_i^{\text{eq}} \chi_{\perp} \nabla_{\perp} T_e) + P_{ex}^{i-e}$$

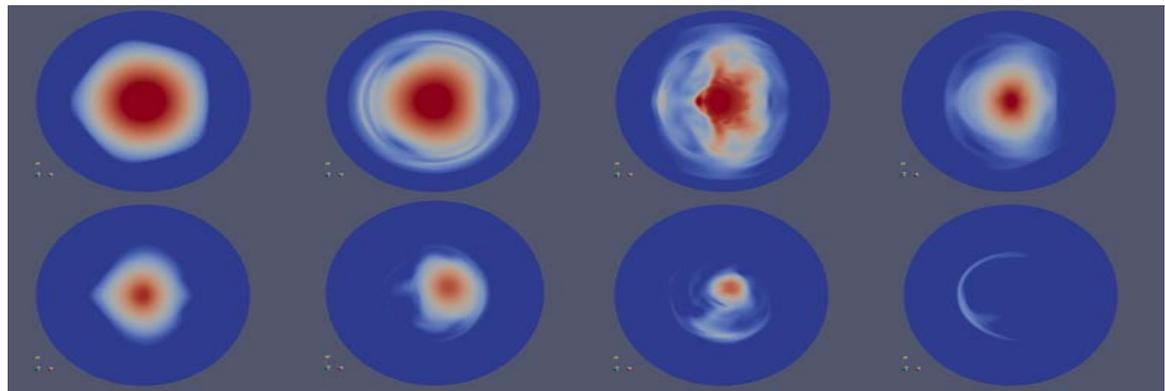
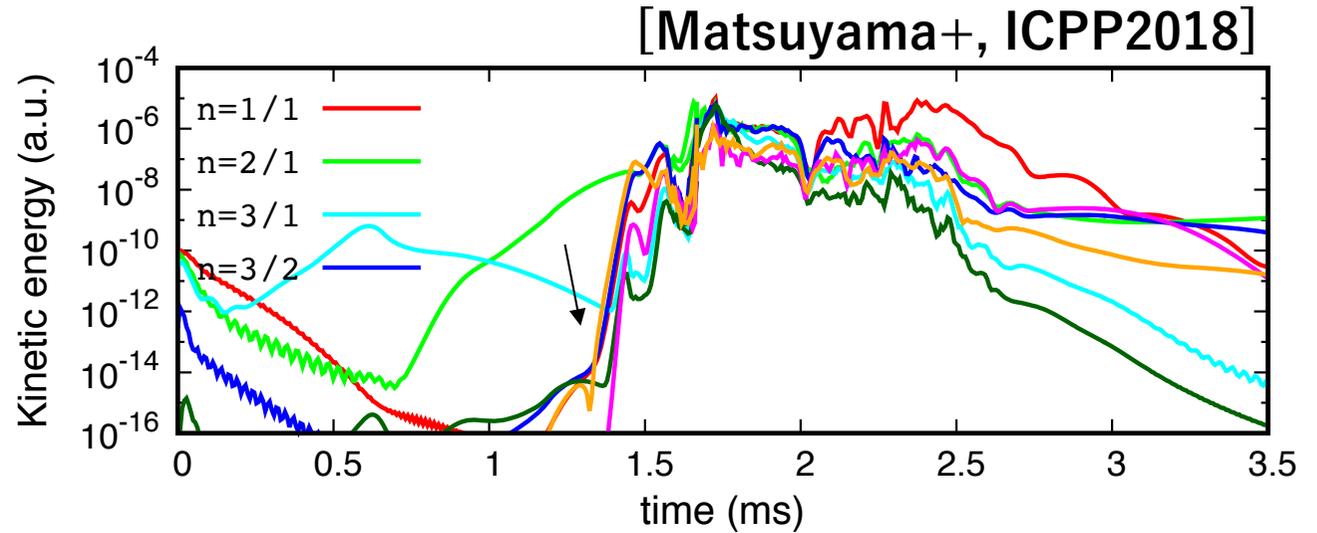
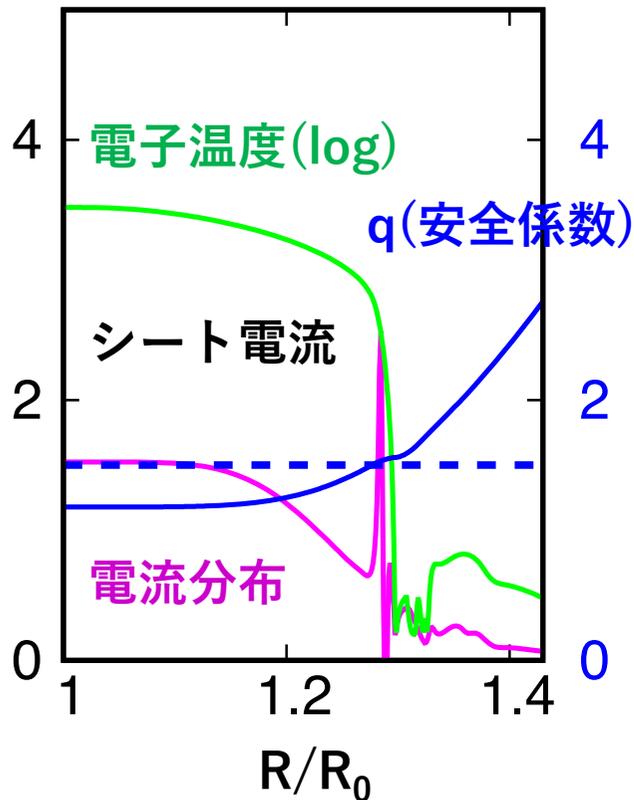
Rate equation for ionization and recombination

$$\frac{\partial n_Z^{j+}}{\partial t} = S_Z^{(j-1)+} n_e n_Z^{(j-1)+} - (S_Z^{j+} + A_Z^{j+}) n_e n_Z^{j+} + A_Z^{(j+1)+} n_e n_Z^{(j+1)+} + \delta_{j,0} D_Z$$

熱クエンチのシミュレーション

不純物流入時の熱クエンチ: 熱的不安定性とMHDの結合

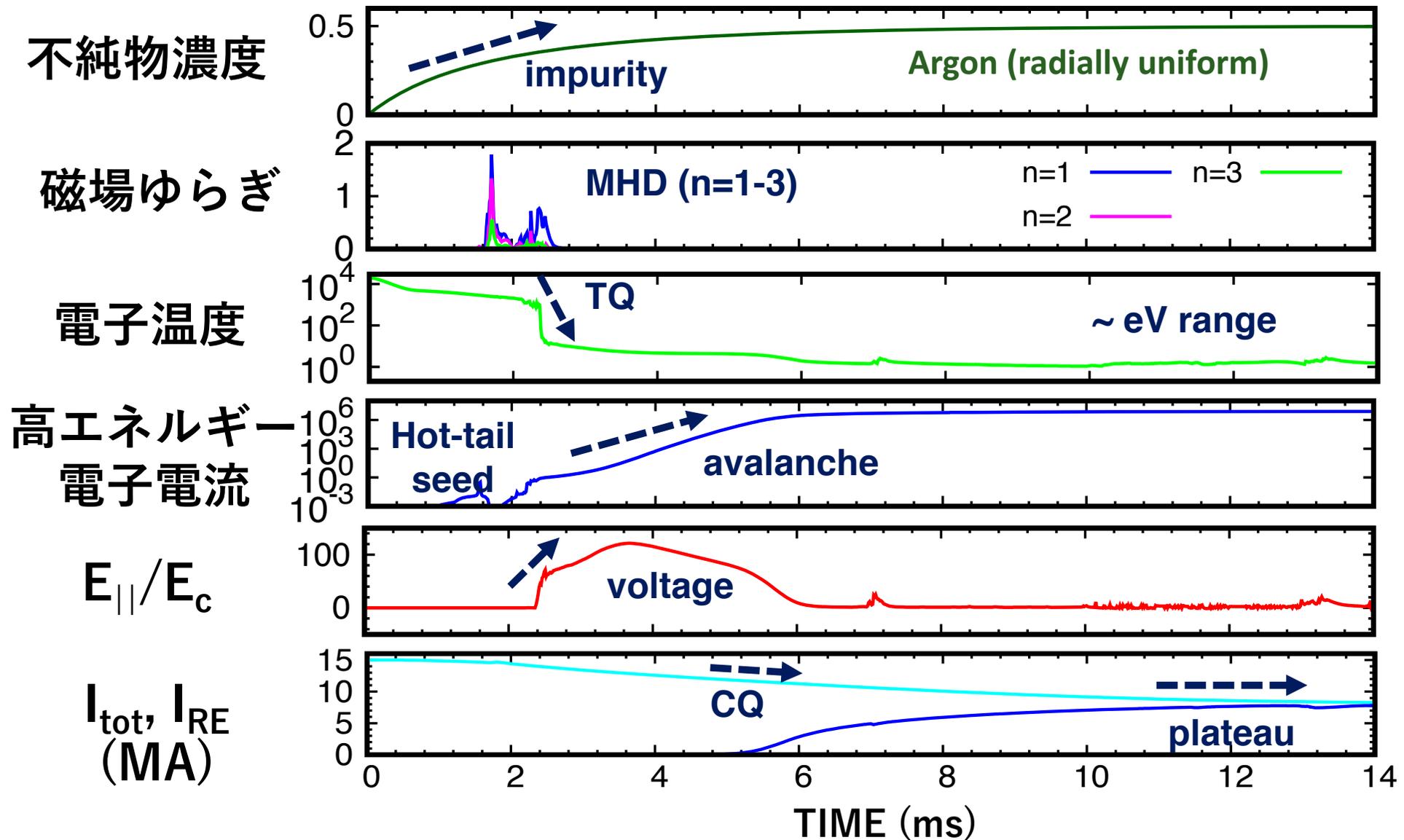
熱的不安定性による周辺部の急冷によって界面に生じるシート電流(shark-fin)がプラズマ中に伝搬し、複数のテアリングモードを励起。磁場構造を大域的に破壊。



簡約化モデルによりディスラプション現象全体を追跡可能に

[Matsuyama+, IAEA-FEC2016, 2018]

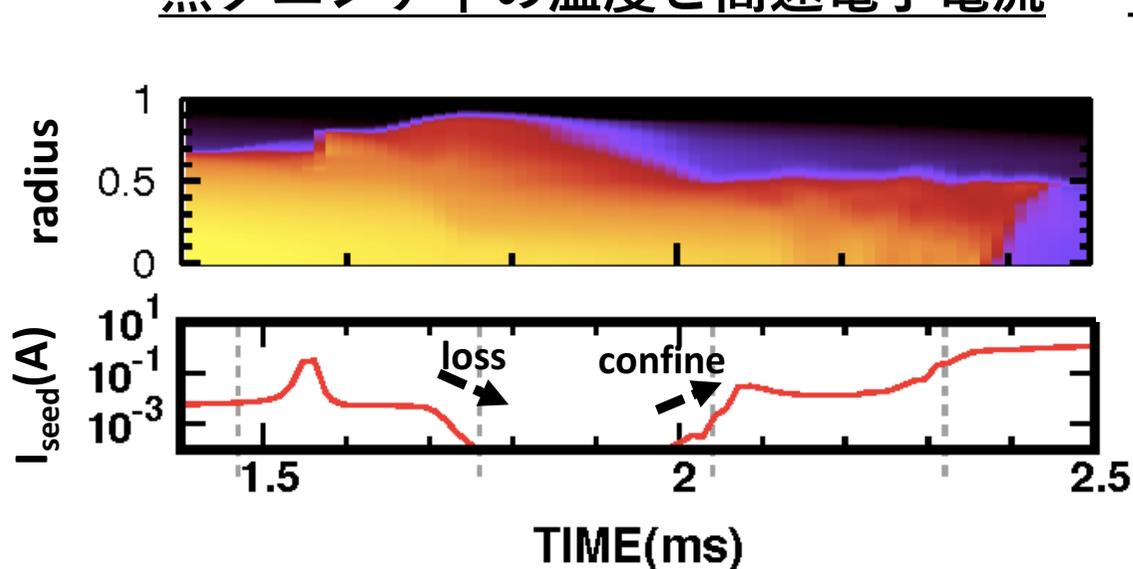
$$T_e(0) = 20 \text{ keV}, n_{D-T}(0) = 1.2 \times 10^{20}/\text{m}^3, \\ j(0) = 1.52 \text{ MA}/\text{m}^2, \Delta n_{Ar} = 1.2 \times 10^{20}/\text{m}^3, \Delta t = 3 \text{ ms}, V = 1000 \text{ m}^3$$



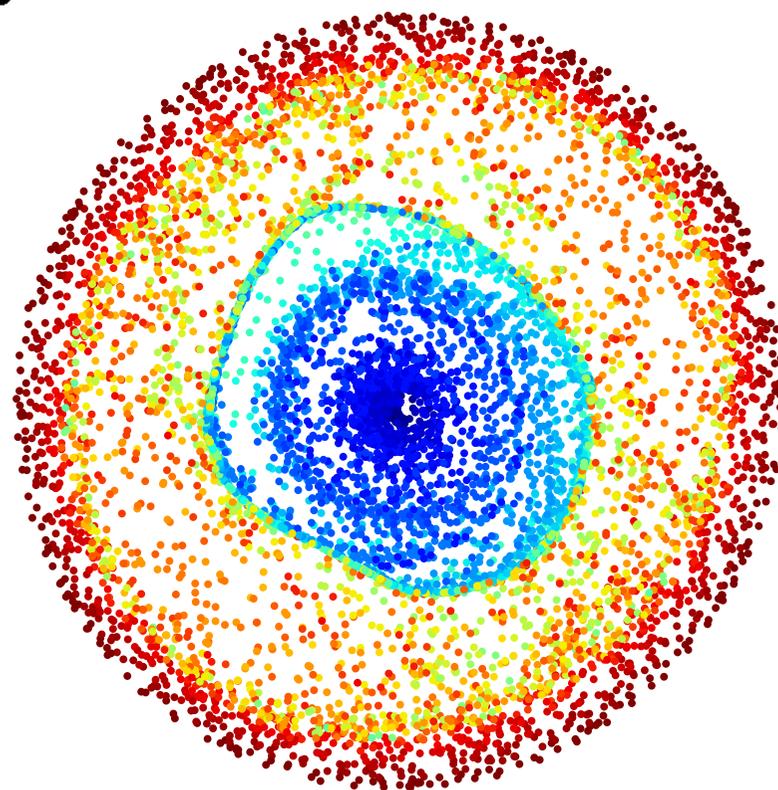
簡約化モデルが熱クエンチ中の逃走電子閉じ込め過程を明らかに

[Matsuyama+, IAEA-FEC2016, 2018]

熱クエンチ中の温度と高速電子電流



熱クエンチ中の磁場構造変化 (movie)



- 熱クエンチ前半: コアと周辺をつなぐ磁力線の発生
- 熱クエンチ後半: 磁気面が周辺から再形成、逃走電子を閉じ込め、アバランチへ移行

JT-60U実験: 磁場揺動消失後に硬X線が増加
[Yoshino+, PPCF1997]

熱クエンチ中の磁気面の再形成によりアバランチがトリガーされる

アバランチ現象の理解(まとめ)

大型トカマク(ITER)ではアバランチを介することで磁気エネルギーを熱電子から高エネルギー電子へ高効率で移行させ、大電流ビームの平衡を形成する

	ディスラプション時の 逃走電子のアバランチ	雷放電における アバランチ
アバランチの特性	大型トカマクでは $\psi_0 \gg \psi_{e\text{-fold}}$ なる 条件を満たす	アバランチの特性長 ~ 50 m
種電子	ホットテール電子が支配的 (トリチウムからの β 電子, γ 線のコンプトン散乱)	宇宙線由来
電子の飛程	磁気面再形成過程に種電子が 閉じ込められる	システムサイズ \gg アバランチの特性長

アウトライン

1. イントロダクション

- トカマク放電の(メジャー)ディスラプション
- 高エネルギー電子の観測(エネルギー、空間分布、電流値)

2. 問題の背景: なぜ重要視されるか?

- 核融合研究との関連

3. 現在までの理解

- 逃走電子のアバランチ機構

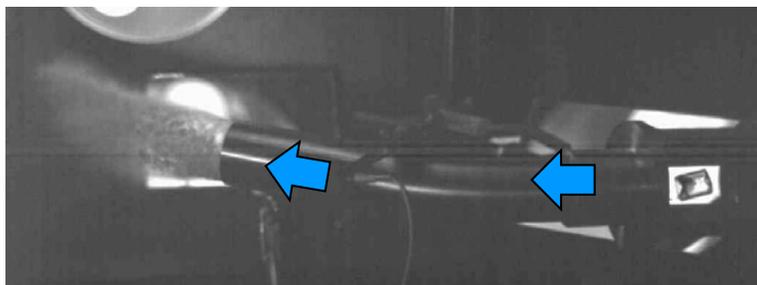
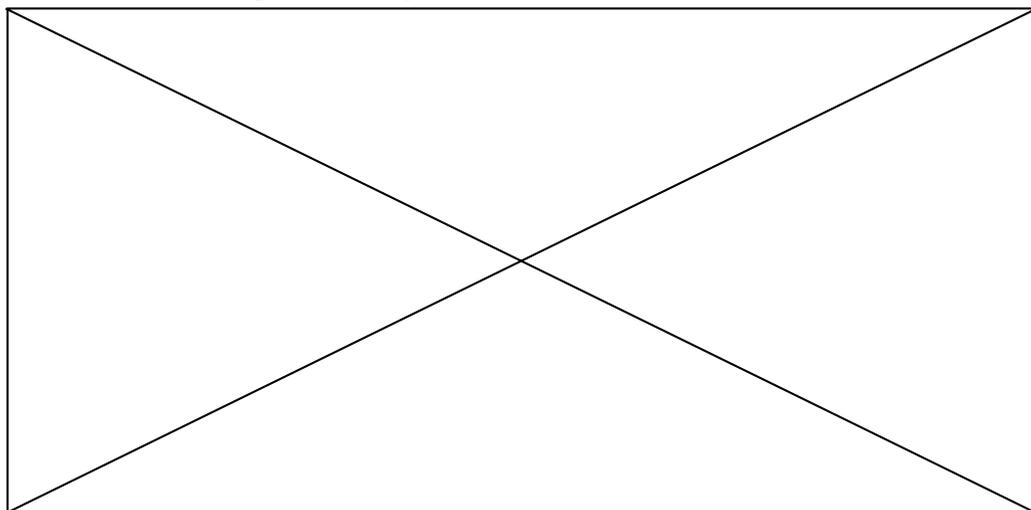
4. まとめと今後の課題

- 逃走電子の制御手法と理論・モデリングの課題

逃走電子の制御手法の開発

- ITER: 実験・理論研究の知見を反映した制御技術の模索
 - 大量の重水素(3×10^{24} atoms)を入射する技術の開発
(プラズマ抵抗を上げずに閾値電場だけを上げることができるか)

粉碎ペレット入射
(Shattered pellet injection)



- 逃走電子の発生回避のための理論シミュレーションの課題

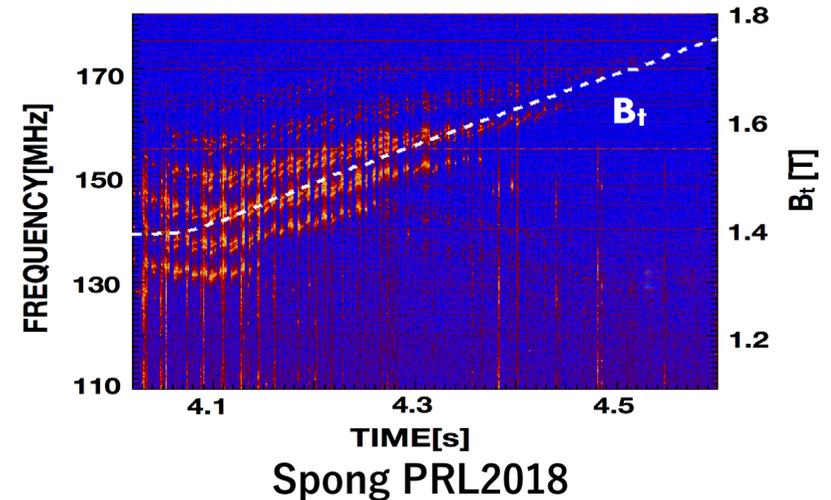
- 少ない逃走電子量を扱うため、より高精度のモデルが必要
- これまで無視してきた効果を取り込んだ解析
 - ✓ 乱流輸送(逃走電子、不純物)
 - ✓ 波と粒子の相互作用、など

高周波モードの影響

- 逃走電子が励起する高周波数モードの観測

- Whistler mode ~ 150 MHz [Spong+, PRL2018]
- Alfvén mode ~ 数MHz [Lvovskiy+, PPCF2018]

磁場ランプアップ時のモードの周波数変化の観測



モードによる速度空間中の散乱が逃走電子の閾値電場やエネルギースペクトルに影響 [Liu+, PRL2018]



低周波数(輸送) ~ MHD ~ 高周波数モードまでを含んだマルチスケールモデルへの挑戦が必要

まとめ

- トカマク放電におけるディスラプション後の逃走電子ビームの発生
 - 問題の背景 ~ 現在までの理解 ~ 最近の話題
 - 核融合研究の観点: ITER運転に備えたoff-normal eventの理解
 - 物理的観点: マイノリティの加速ではなくビーム平衡への磁気エネルギーの移行
 - 高周波モードの影響を含め、未説明・未着手の課題
- 本講演の内容
 - アバランチ機構が顕著となるための3つの条件を議論
 - ディスラプション・逃走電子統合シミュレーションの成果