

電子-陽電子-イオン 3成分系における 相対論的衝撃波からの電磁波放射

宇宙物理学研究室 4年

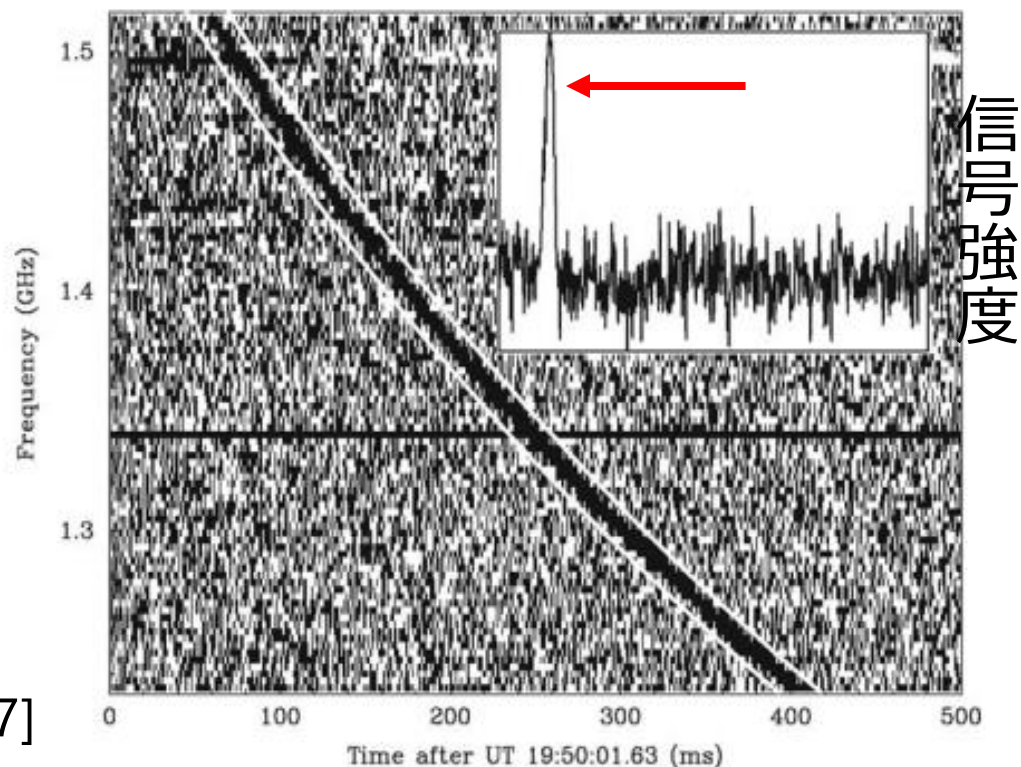
荒井翔吏

高速電波バースト(FRB)

- ミリ秒間だけ放射される非常に明るい電波 (~ GHz)
- 2007年に発見された新しい天体现象で、マグネター (強磁場パルサー) が起源の1つだと考えられている

数ミリ秒の間に
非常に明るい放射

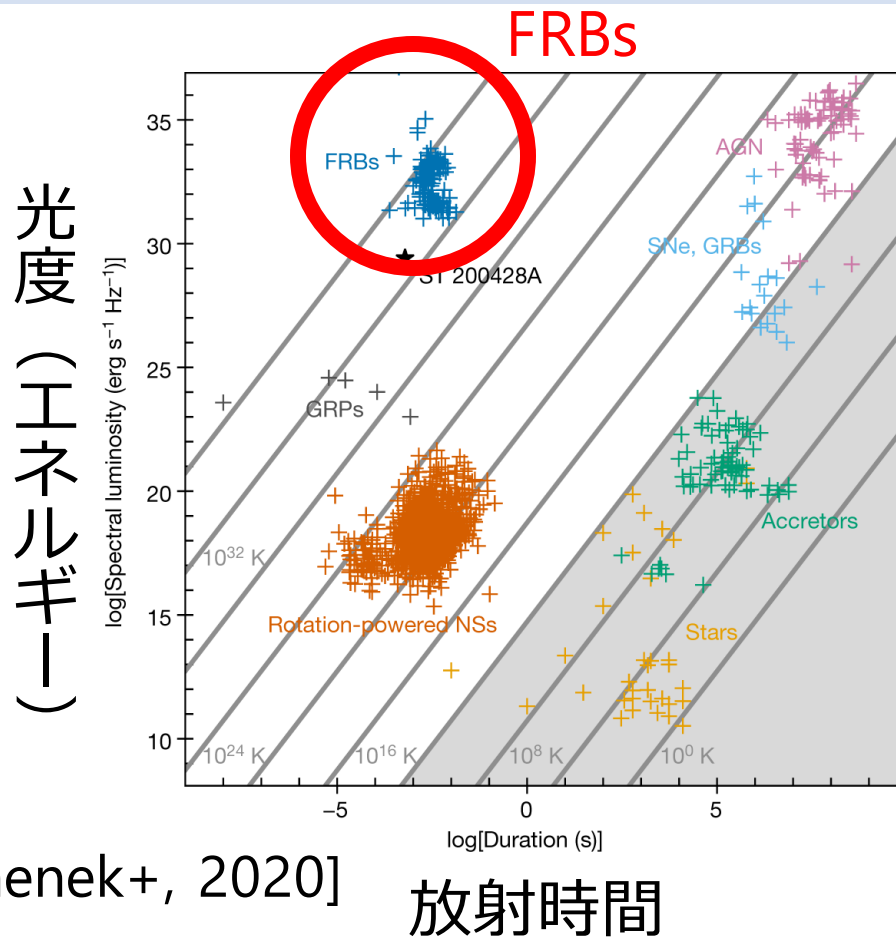
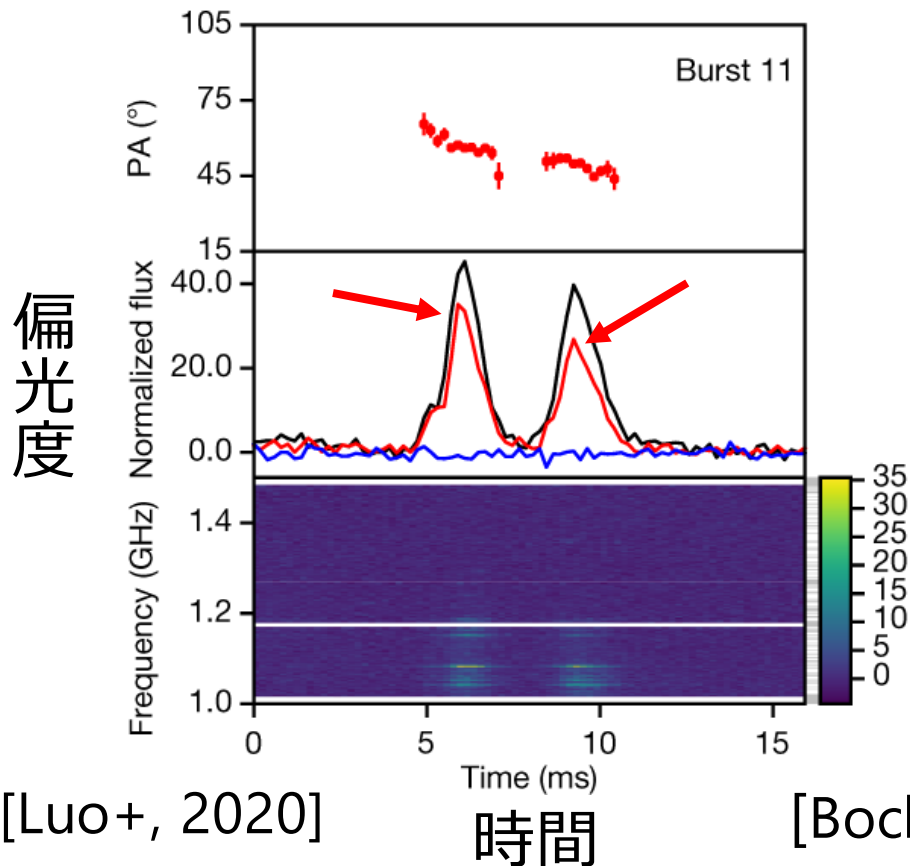
周波数



[Lorimer+, 2007]

到着時間 (ms)

FRBの観測的性質

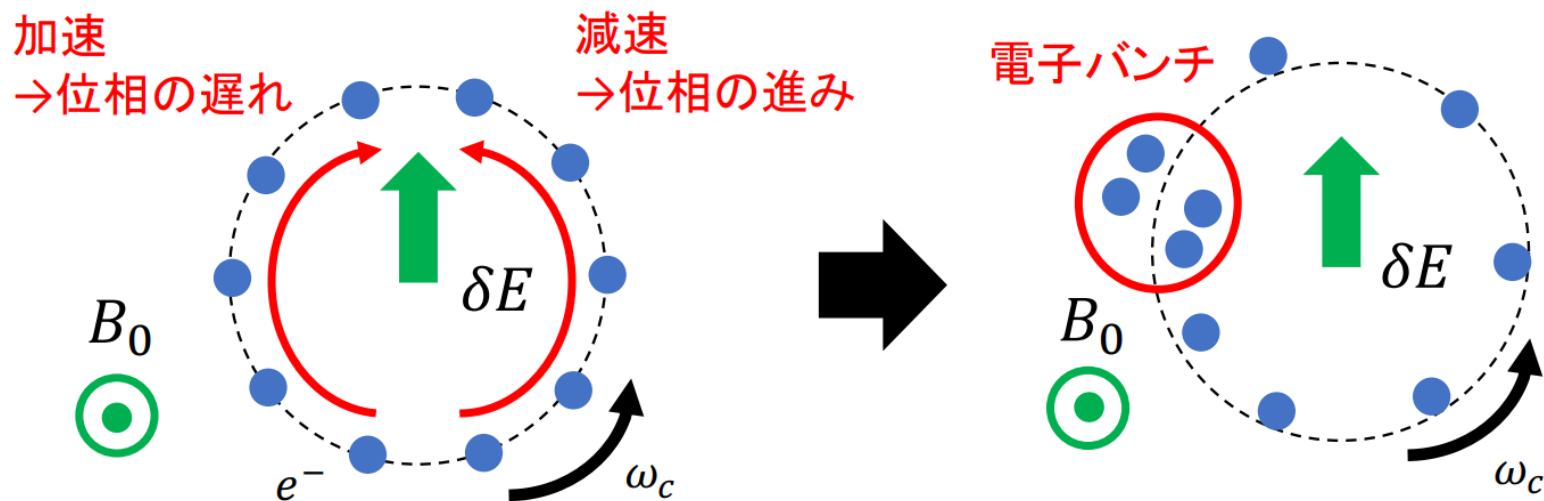


高い直線偏光度

高い輝度温度

→ コヒーレント放射

シンクロトロンメーザー不安定性(SMI)



出典：<https://www.icrr.u-tokyo.ac.jp/hea/conference201214/lwamoto.pdf>

プラズマ中でコヒーレント放射を励起するメカニズムの1つ

電子のサイクロトロン周波数：
$$\omega_c = \frac{eB}{\gamma mc}$$

➡ 振動電場による電子の加速(減速)で ω_c は大きく(小さく)なる

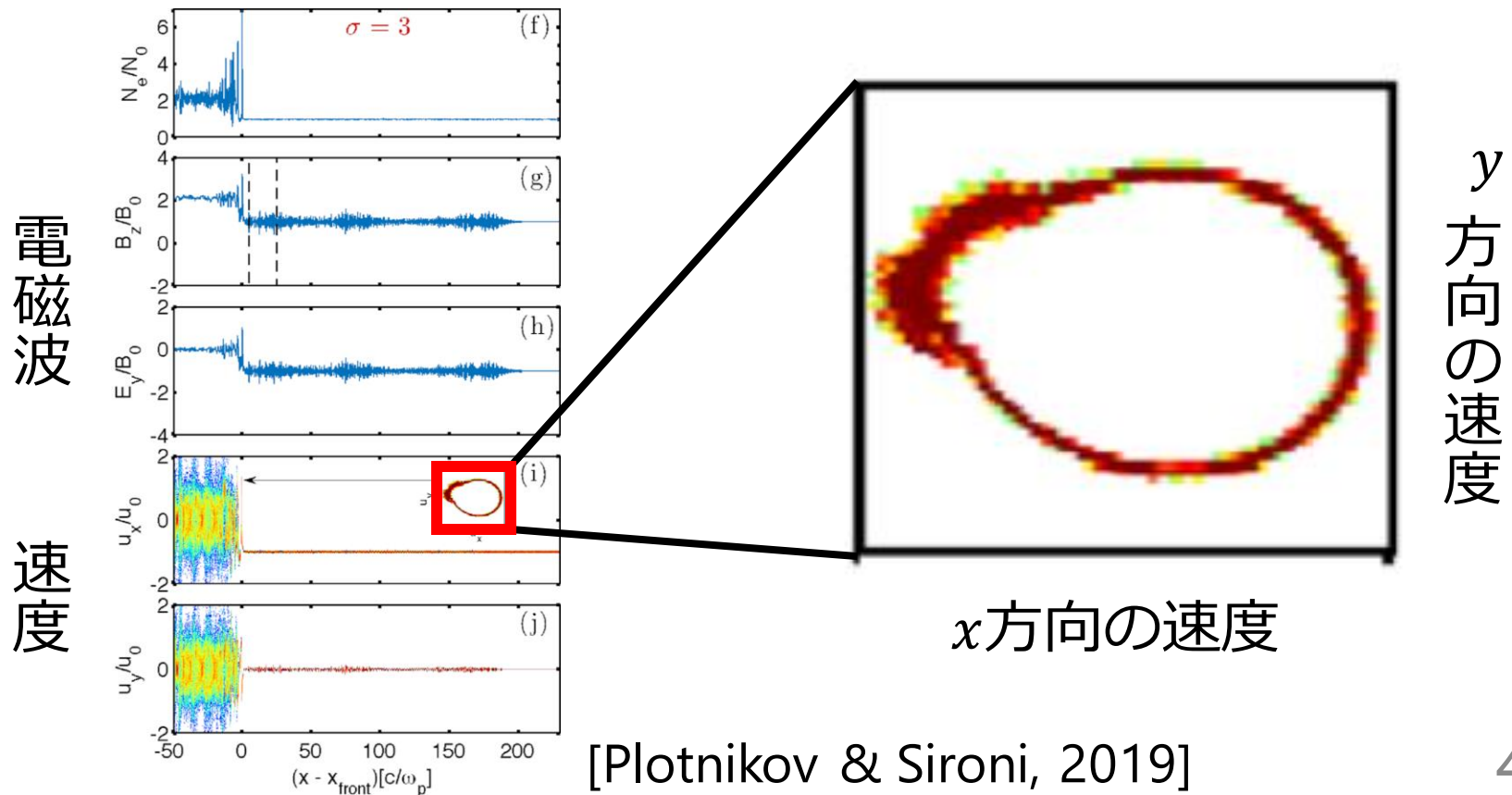
➡ 位相が進む(遅れる)

➡ 電子バンチの形成 ➡ コヒーレント放射

衝撃波面におけるSMIによる電磁波放射

相対論的衝撃波では、衝撃波で圧縮された磁場により
衝撃波面に**リング分布が自然と形成**される

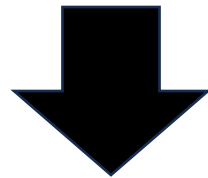
→SMIが発生し、**コヒーレントな電磁波が放射**される



相対論的衝撃波とFRB

- 衝撃波面におけるSMIによる
コヒーレント放射

- SMIは直線偏光したXモード波を放射



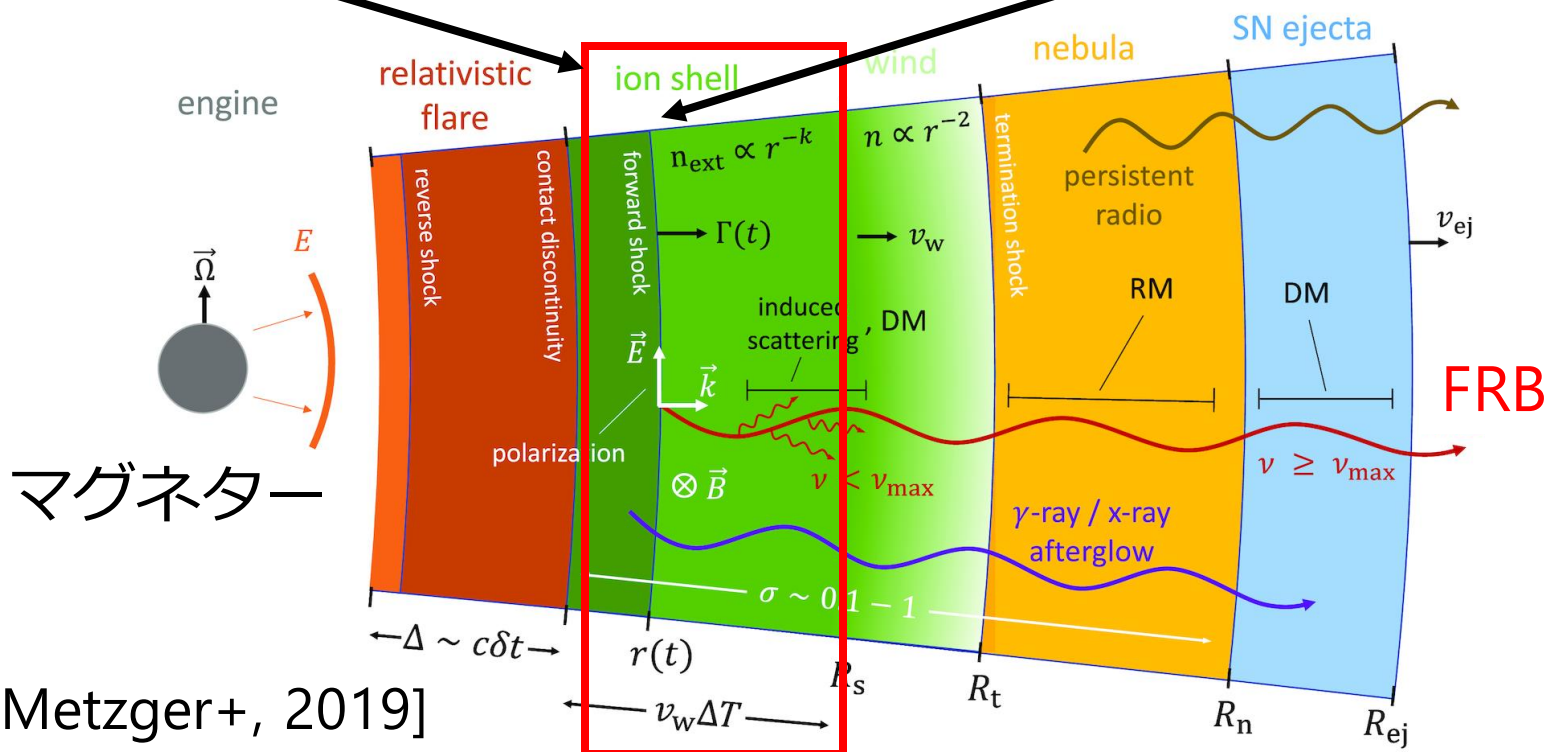
FRBの観測的性質を満たしつつ、自己矛盾なく
FRBの放射メカニズムを説明できる

なぜ3成分系で考えるか

- マグネターフレアモデルでは、**電子-イオン系**を考える
- パルサーは**電子-陽電子プラズマ**に満ちた磁気圏を形成し、パルサー風として放出

➡ 3成分系で考えるべき

衝撃波面



目的

これまでの相対論的無衝突衝撃波による電磁波放射の解析は、電子-陽電子系や電子-イオン系といった**2成分プラズマ**が主流だった。



電子-陽電子-イオンの3成分系を考え、**陽電子の数密度比**と、プラズマの運動エネルギーとポインティングフラックスの比（背景磁場強度）である「 **σ パラメータ**」を様々に変えて、放射される電磁波がパラメータによってどのように変わるのかを調べたい。

PICシミュレーション

相対論的運動方程式

$$\frac{d\mathbf{u}_p}{dt} = \frac{q}{m} \left(\mathbf{E} + \frac{\mathbf{u}_p}{c\gamma_p} \times \mathbf{B} \right)$$

電流密度

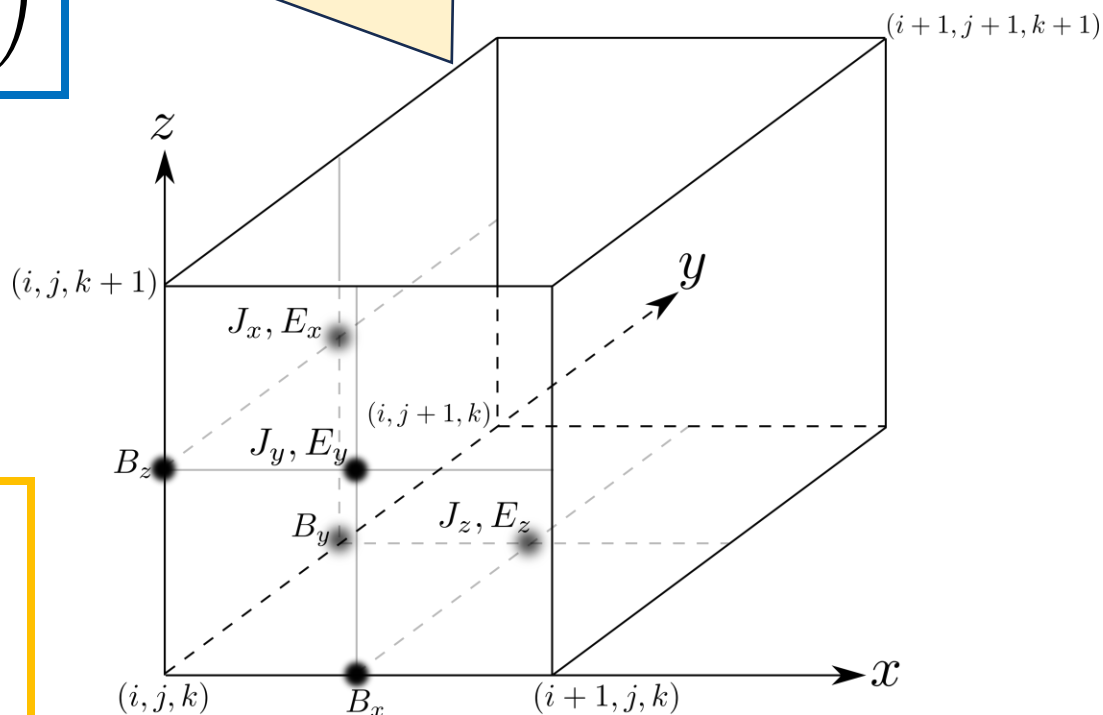
$$\mathbf{J} = \sum_p q_p \frac{\mathbf{u}_p}{\gamma_p}$$

Maxwell方程式(cgs系)

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \frac{4\pi}{c} \mathbf{J} + \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$$

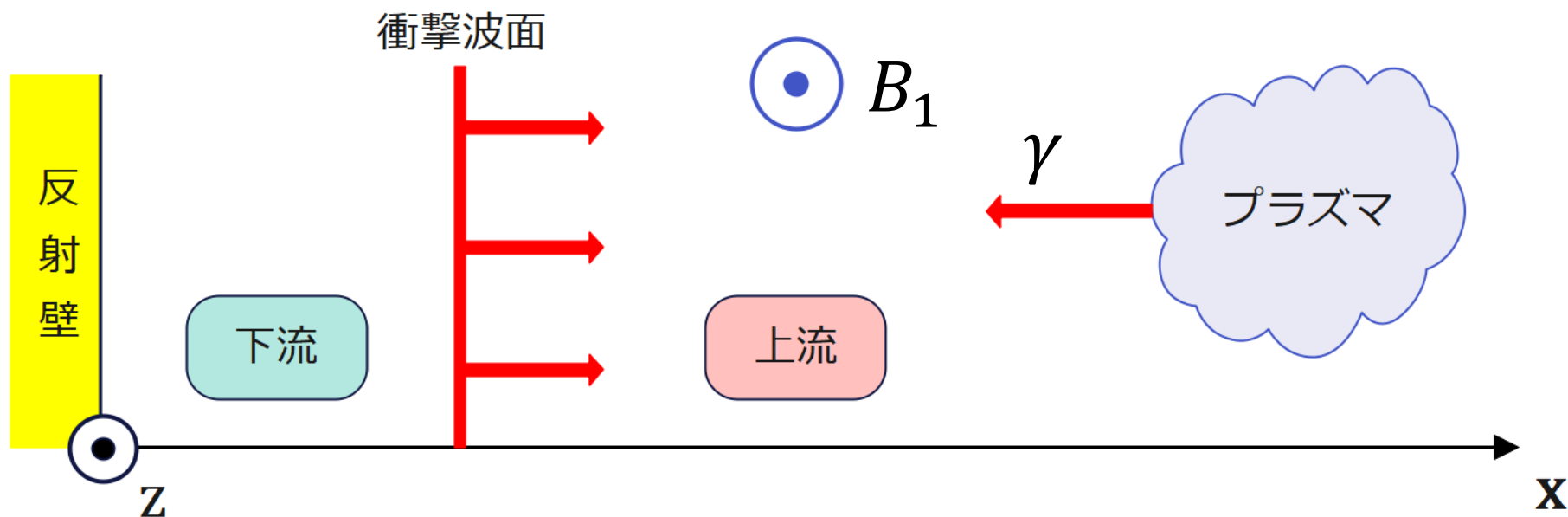
粒子は空間内を自由に移動
電磁波は空間グリッド上に定義



出典：https://www.astro.phys.s.chiba-u.ac.jp/pcans/_images/yee.png

1次元無衝突衝撃波の計算

+ x 方向から $-x$ 方向に向けて相対論的速度でプラズマを入射させ、衝撃波面の法線が背景磁場と垂直になるような衝撃波を考えた



シミュレーションセットアップ

計算手法：公開コード“pCANS”を用いた1次元
PICシミュレーション

全パラメータ共通

$\Delta x = 1.0$ (セル幅), $c = 1.0$ (光速)

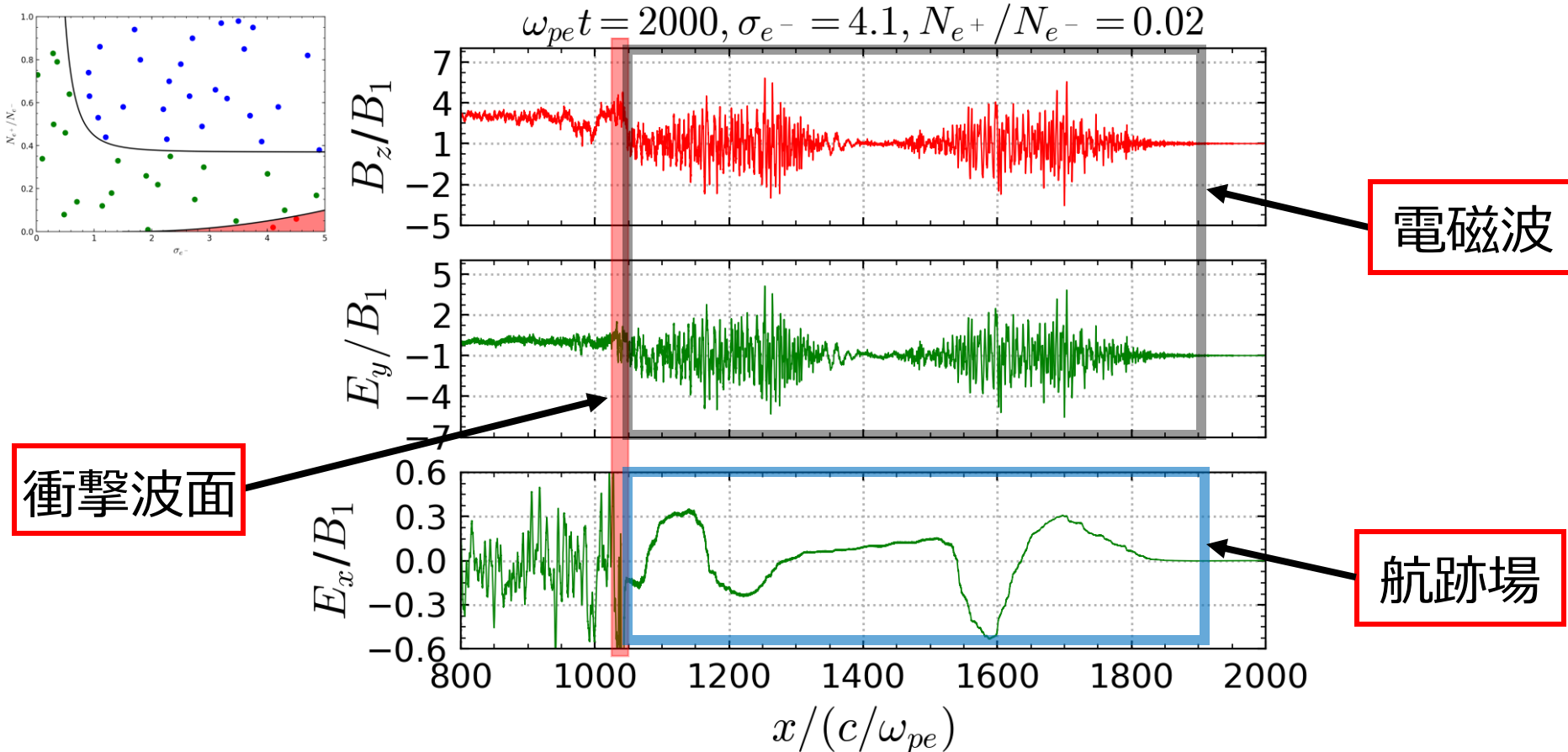
$\gamma = 40$ (入射プラズマのローレンツ因子)

$N_1 = 100$ (セルあたりの電子数)

$v_{te} = 0$ (熱速度) \rightarrow cold plasma

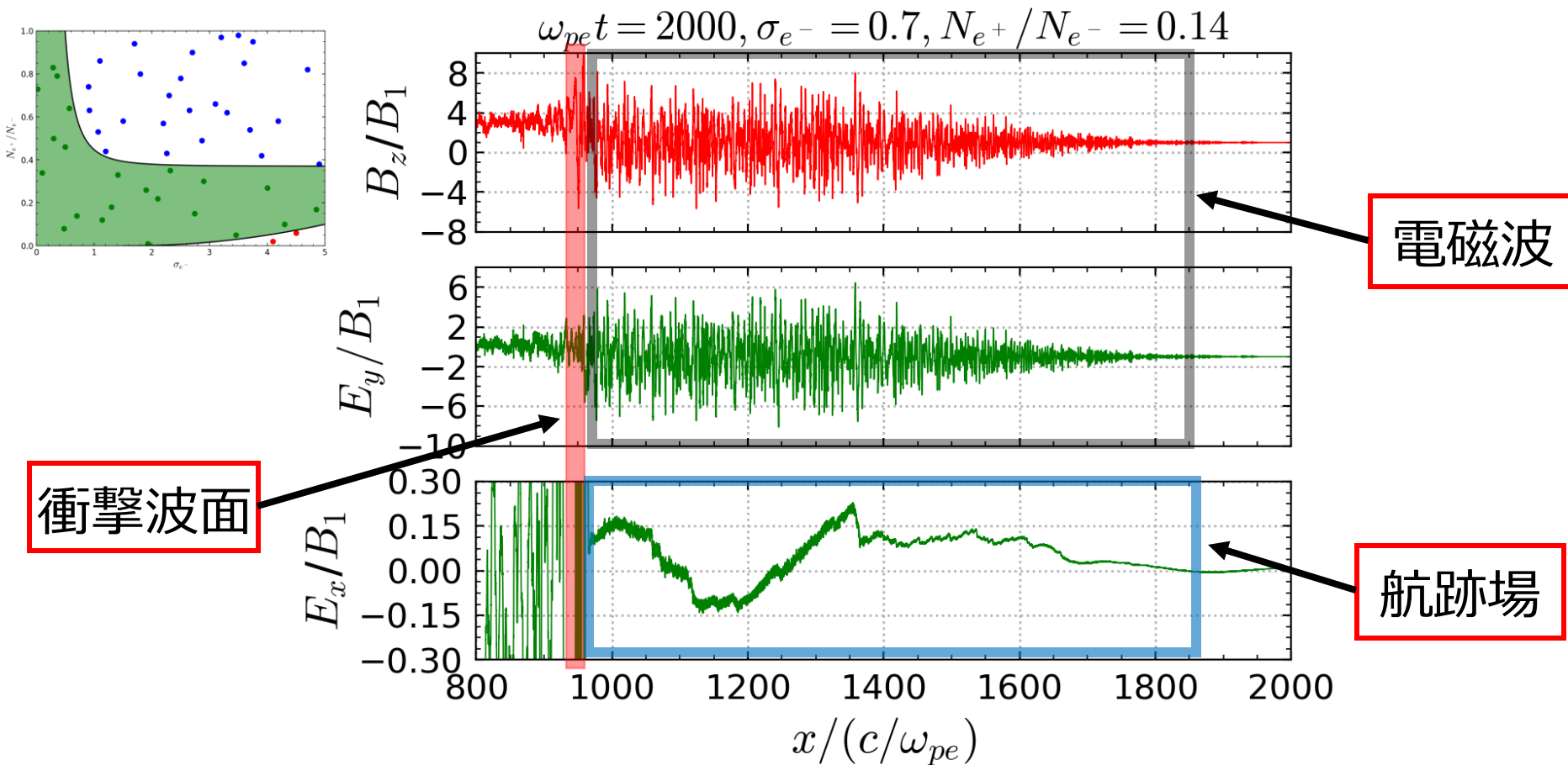
電子の σ パラメータと陽電子の数密度比 N_{e^+}/N_{e^-} は、**ラテン超方格法**を用いてパラメータを50個選んだ。

電磁波構造：タイプ1



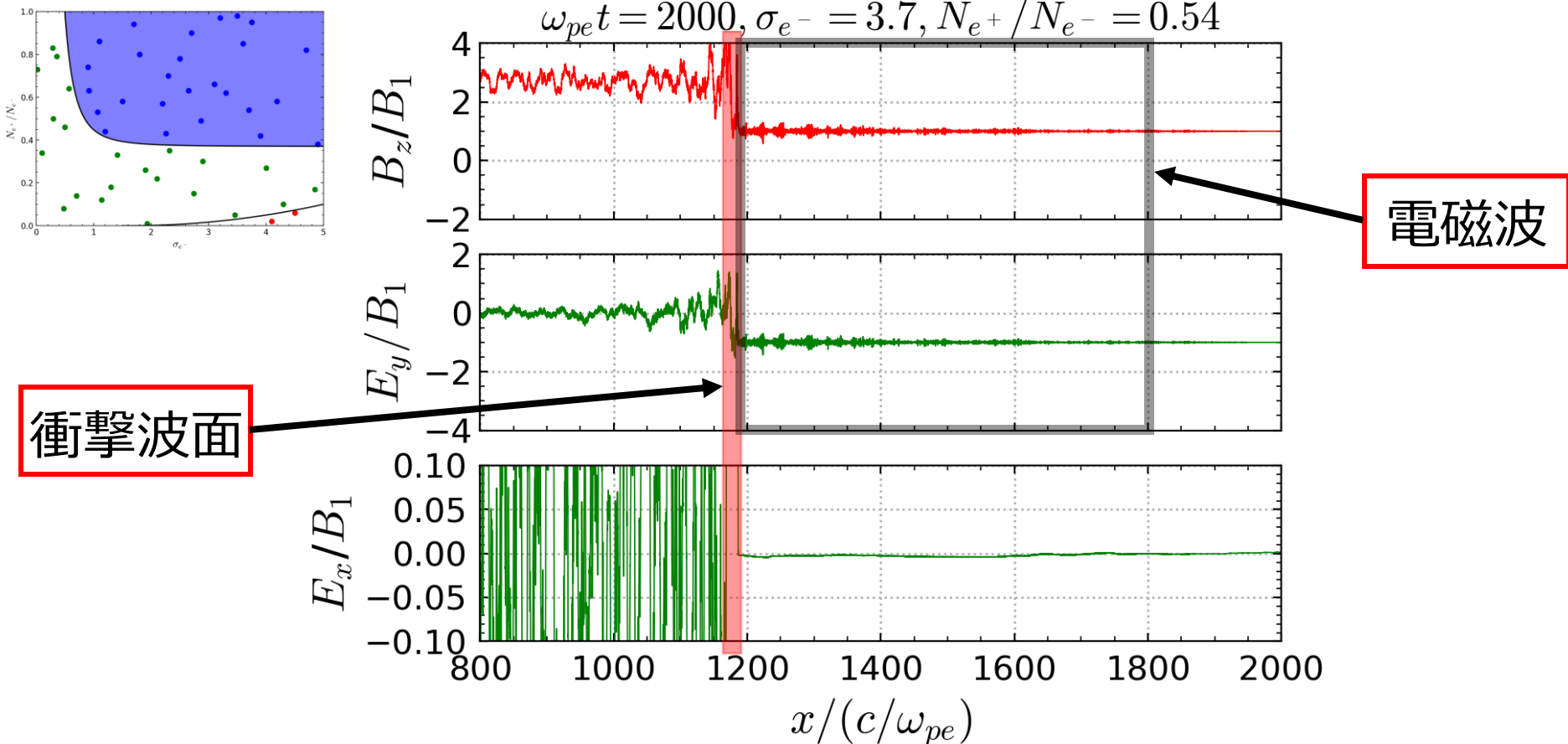
- σ パラメータが大きく、陽電子の数密度比が小さいタイプ
- 波束が発生

電磁波構造：タイプ2



- σ パラメータが小さいか陽電子の数密度比が小さいタイプ
- 波束は発生せず、放射が長時間続く

電磁波構造：タイプ3



- σ パラメータがある程度大きく陽電子の数密度比が大きいタイプ
- 他のタイプと比べて放射強度が小さい

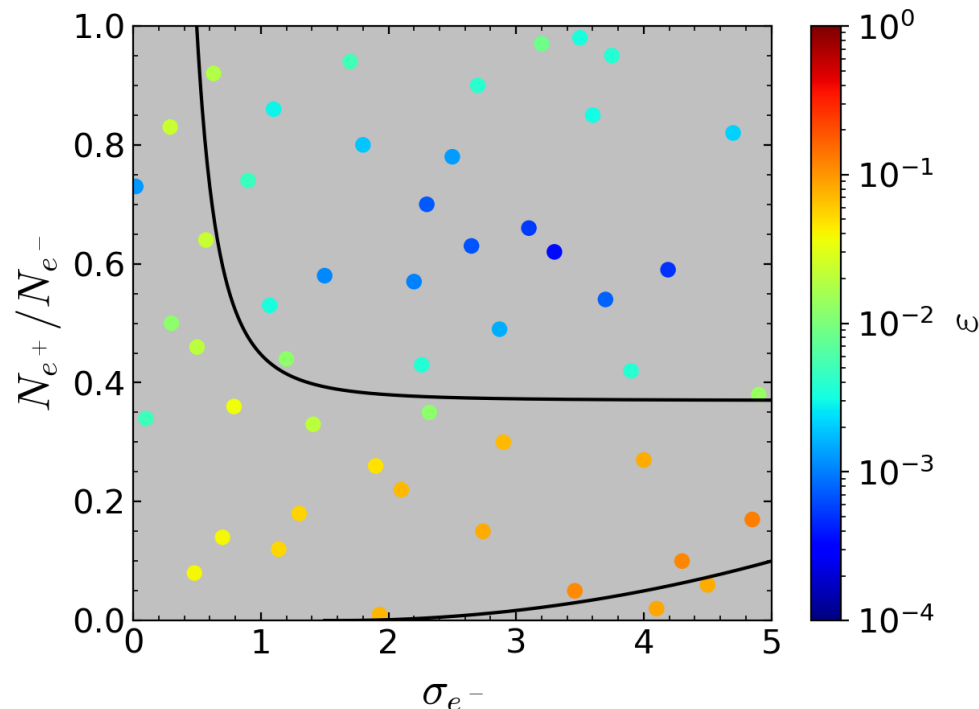
電磁波の放射効率

放射効率の式：

$$\varepsilon = \frac{(B - B_1)^2}{4\pi\gamma\{(N_{e^-} + N_{e^+})m_e + N_i m_i\}c^2}$$

電磁波のエネルギー

上流プラズマの運動エネルギー

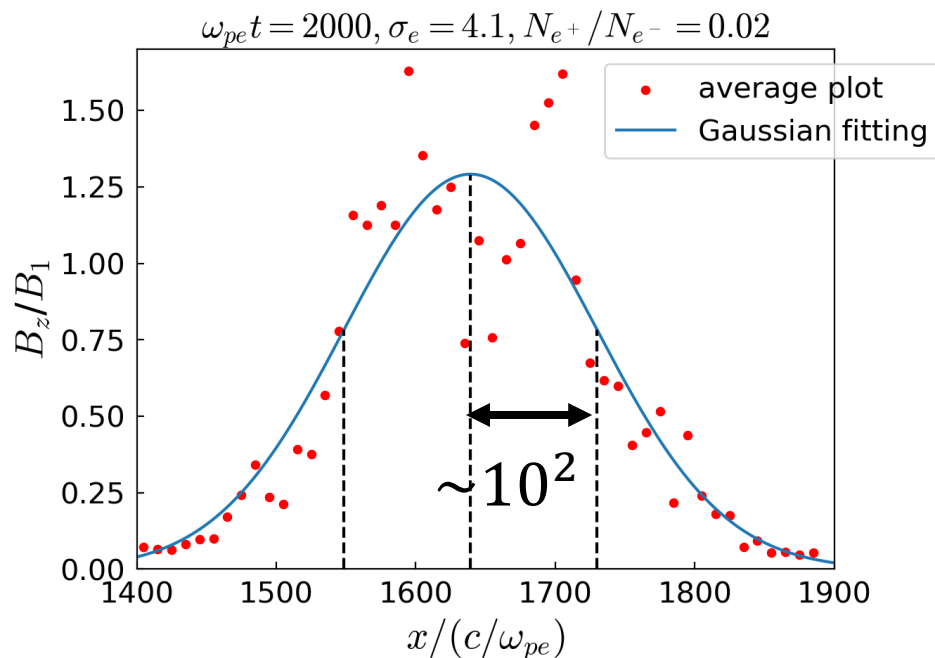
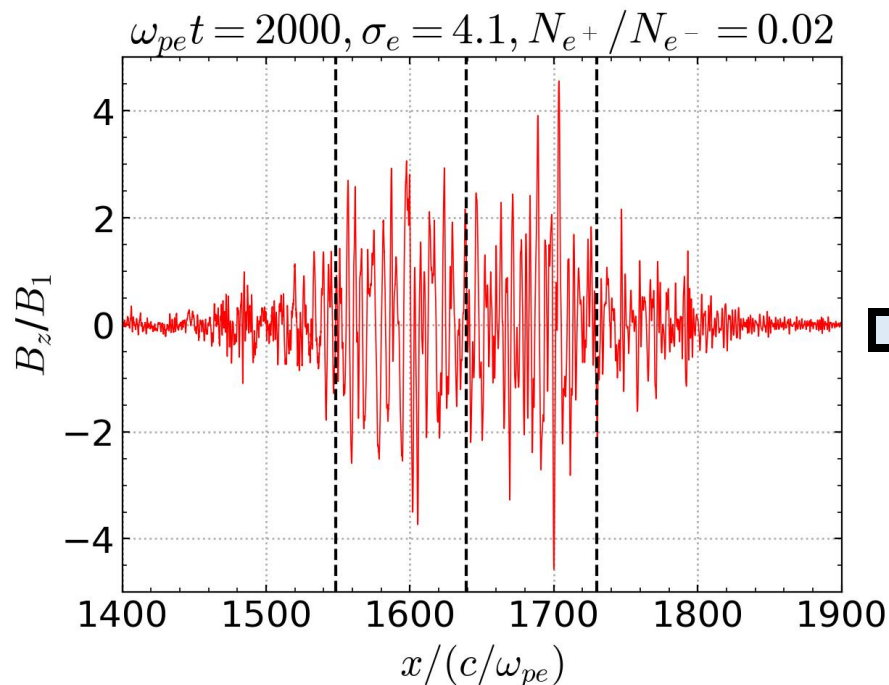


タイプ2領域： σ_{e^-} が大きく N_{e^+}/N_{e^-} が小さいほど放射効率が上がる傾向がある。

タイプ3領域：放射効率は他のタイプに比べて小さい。

$N_{e^+}/N_{e^-} = 0.6$ 付近で電磁波の放射効率が急激に落ちる領域が存在する。

波束の解析



タイプ1で生じた波束について、その絶対値をガウス分布でフィッティング

➡ 標準偏差が $s/(c/\omega_{pe}) \sim 10^2$

この幅をもとに、波束とFRBの放射時間(~ 1 ms)との整合性を考察する

波束の放射時間とFRB

下流静止系において、波束の放射時間 t' は

$$t' = \frac{2s}{c} \sim \frac{2 \times 10^2}{\omega_{pe}}$$

衝撃波の速度を v ($\sim c$) として、

$$\eta = \sqrt{\frac{c-v}{c+v}} \sim \frac{1}{2\gamma}$$

とする。上流静止系（観測者がいる系）での放射時間 t は

$$t = \eta t' \sim \frac{10^2}{\gamma \omega_{pe}} \sim 1 \text{ ms} \sqrt{\frac{1 \text{ cm}^{-3}}{\gamma^2 n_0}} \quad \Rightarrow \quad \gamma^2 n_0 \sim 1 \text{ cm}^{-3}$$

➡ マグネターフレアモデルから予測される値と**合わない**

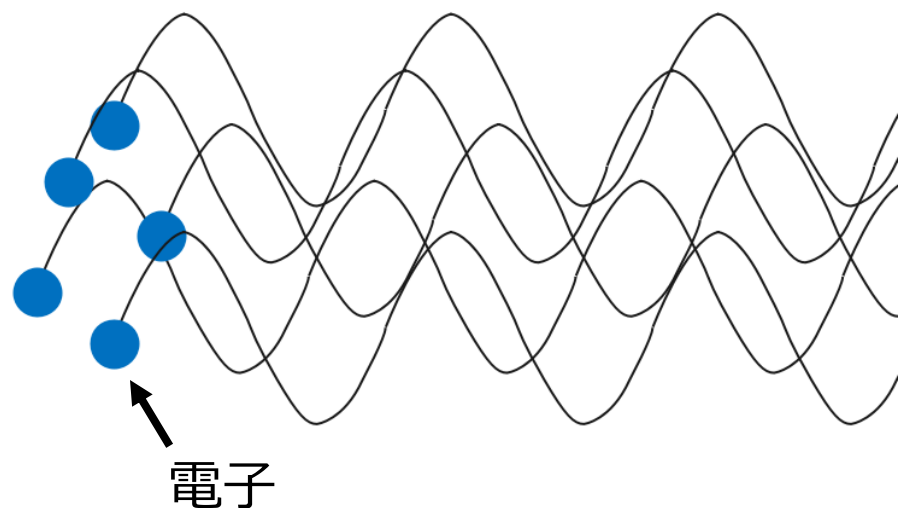
(e.g., $\gamma^2 n_0 \sim 10^{13} \text{ cm}^{-3}$, Iwamoto et al., 2024)

まとめと今後の課題

- 陽電子の数密度比と σ パラメータを様々に変えると、以下のことが分かった。
 - 電磁波構造は**3つ**に分けられる
 - σ_{e^-} が大きく N_{e^+}/N_{e^-} が小さいほど放射効率が**上がる**領域と、 $N_{e^+}/N_{e^-} = 0.6$ 付近で放射効率が**下がる**領域が存在
- タイプ1で得られた波束について、FRBの放射時間との整合性を確認したところ、**モデルから予測される値を再現できなかった。**
- ◆ 今後は、**2次元に拡張**して次元を上げたことによる放射効率の影響を調べたり、**粒子加速**についての詳細な解析を行ったりしていきたい。

補足：コヒーレント放射

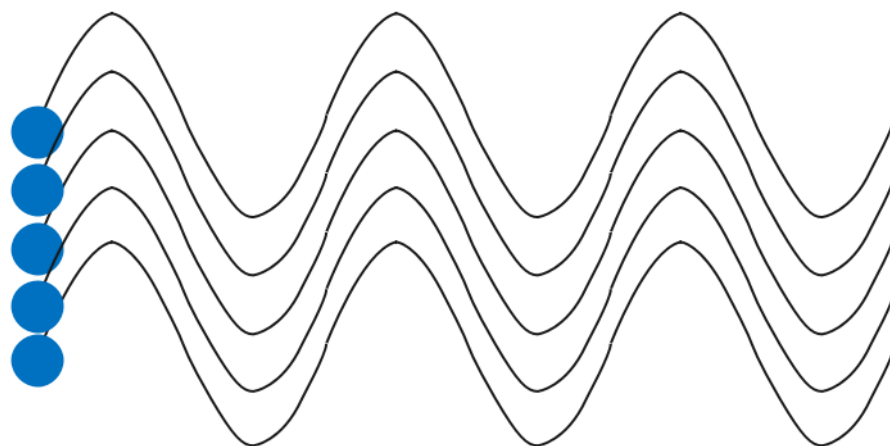
インコヒーレント放射



電子の位相が揃っていない放射

放射強度 $\propto N$ (電子数)

コヒーレント放射

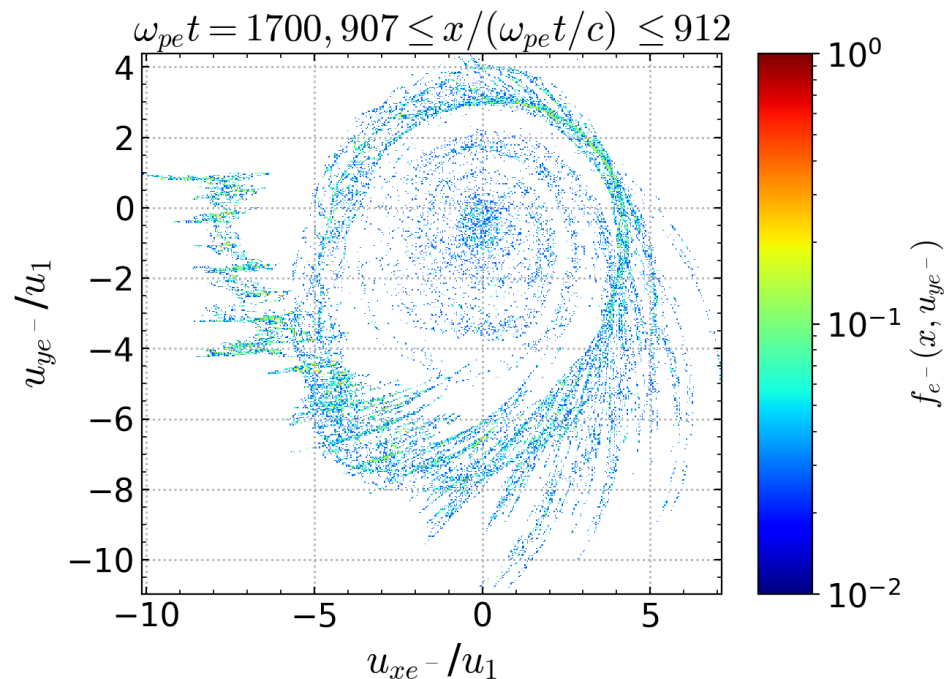
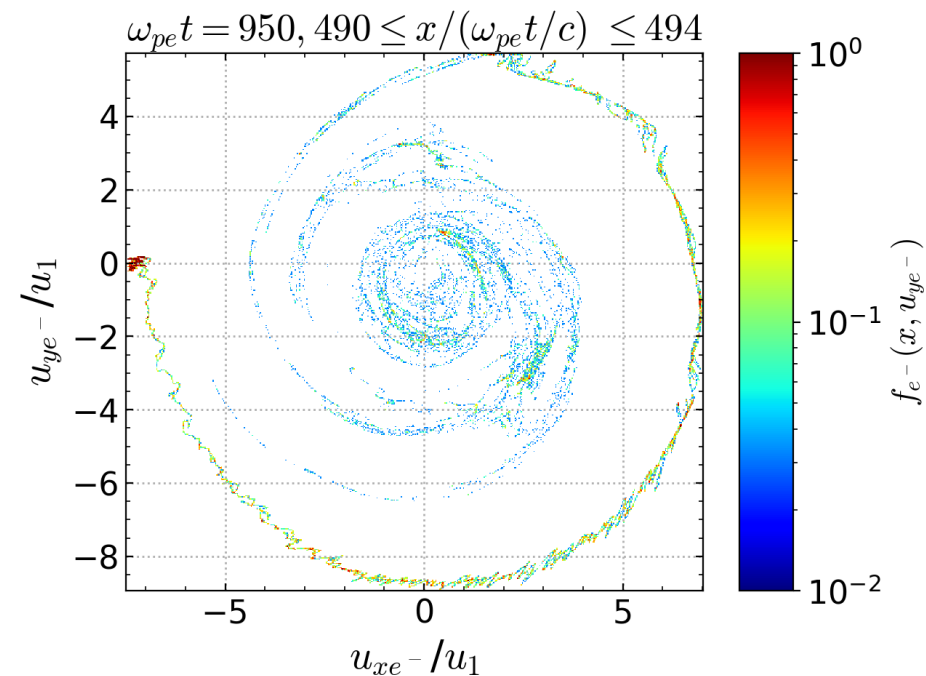
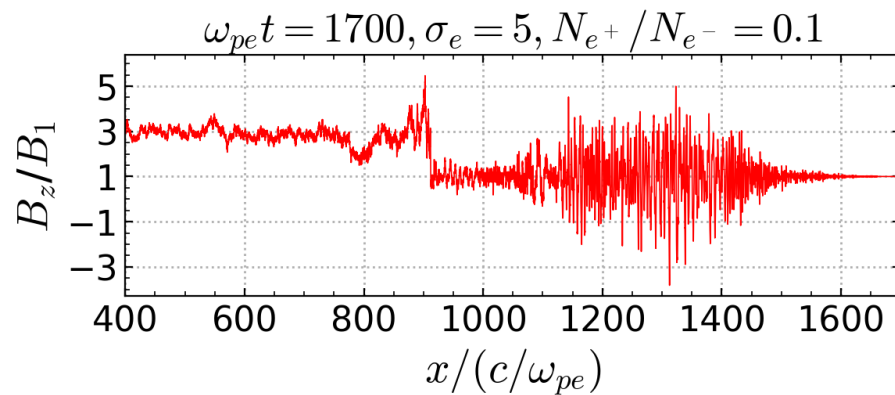
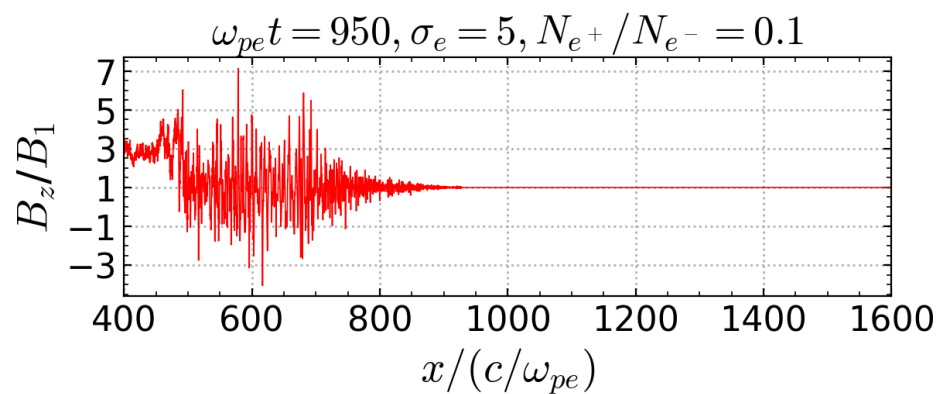


電子の位相が揃った放射

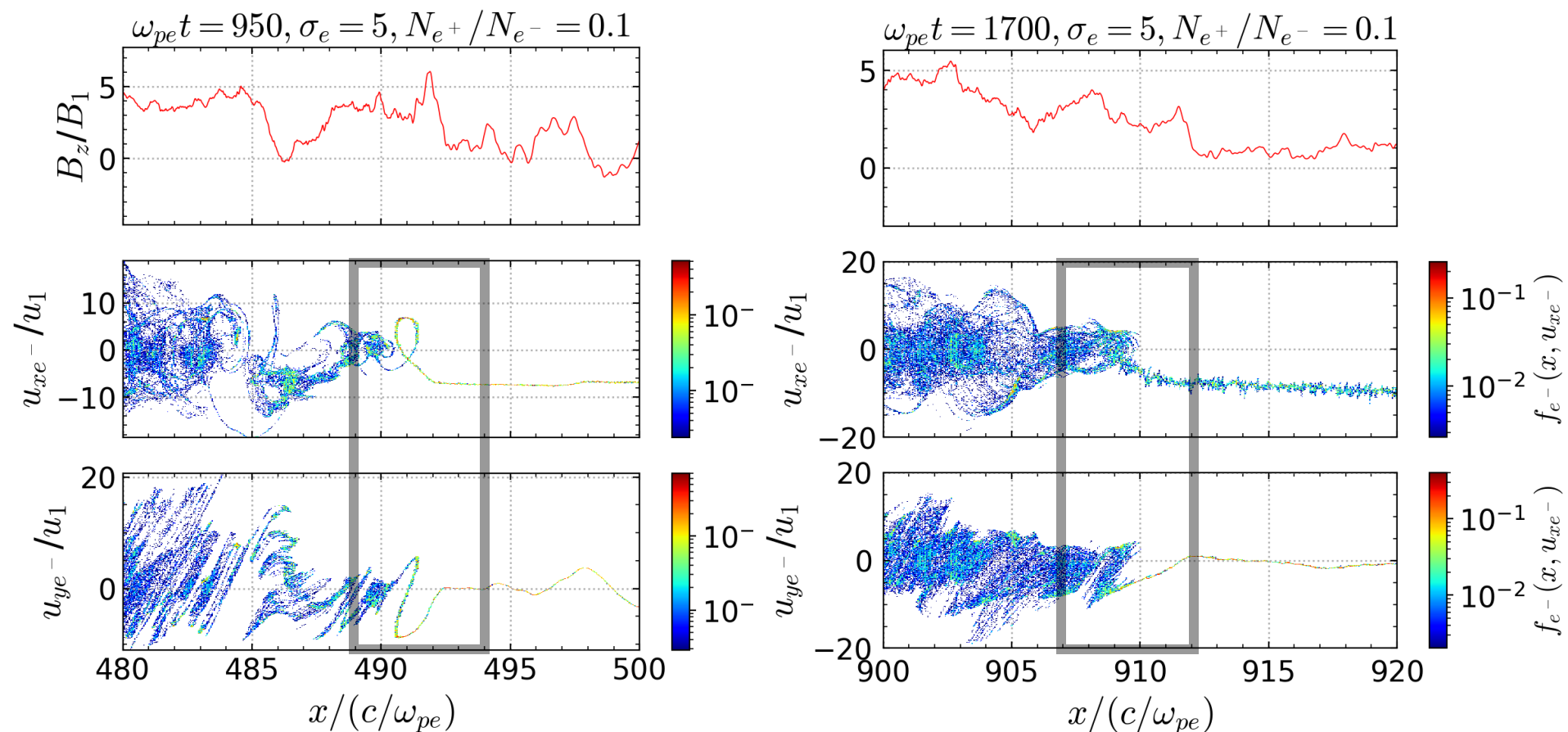
放射強度 $\propto N^2$

➡ 輝度温度の高い放射

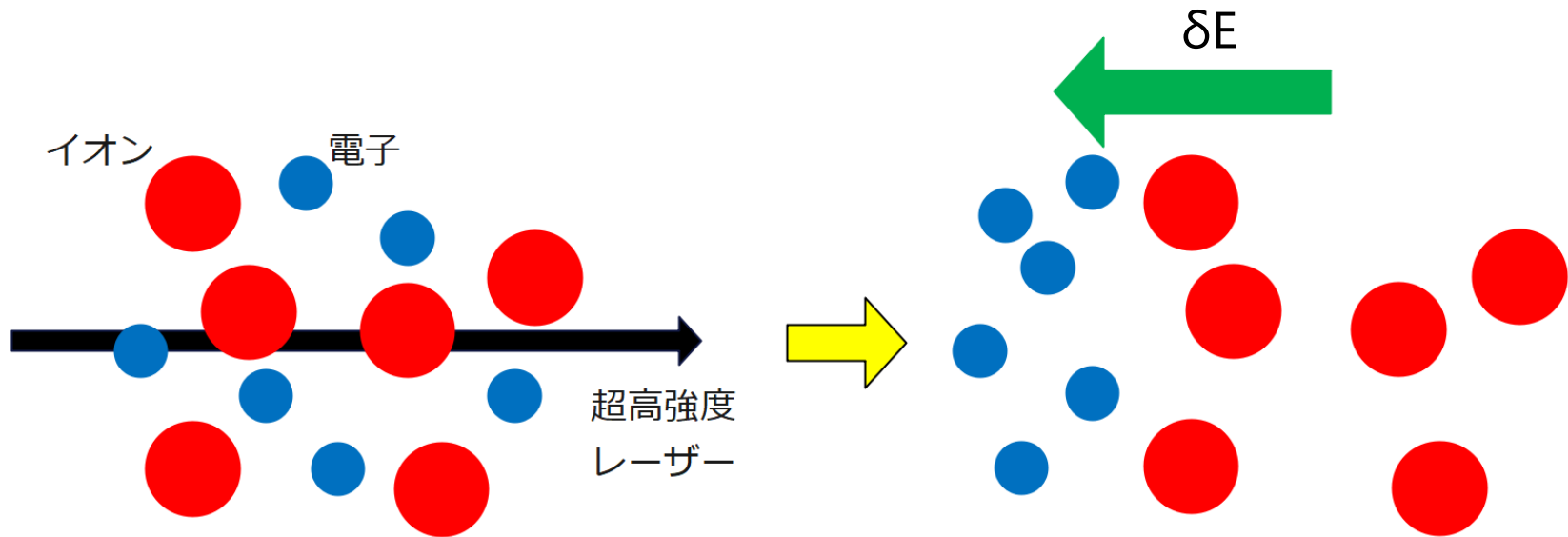
補足：SMIによる電磁波放射と波束



補足：SMIによる電磁波放射と波束



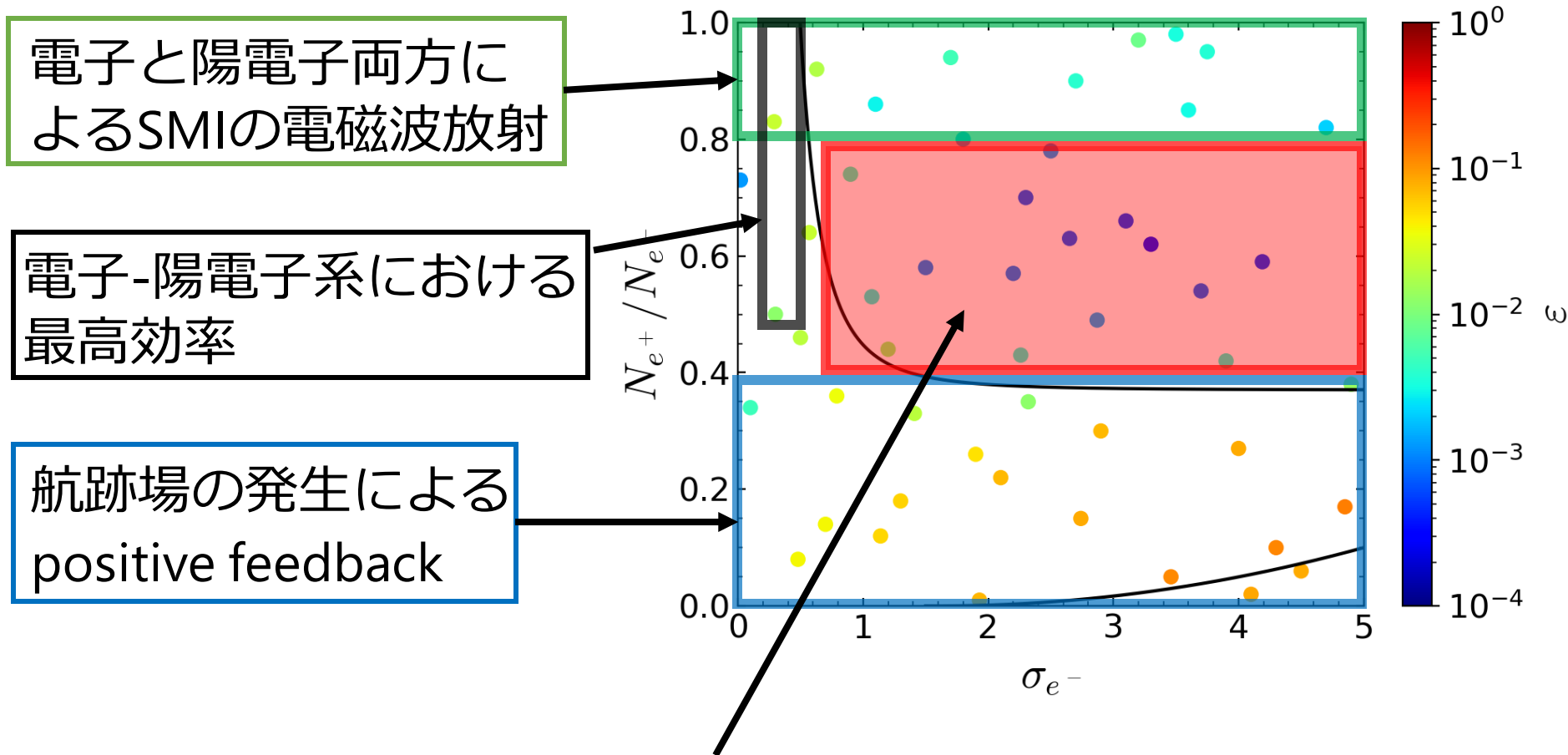
補足：航跡場



超高強度レーザーがプラズマ中を通過

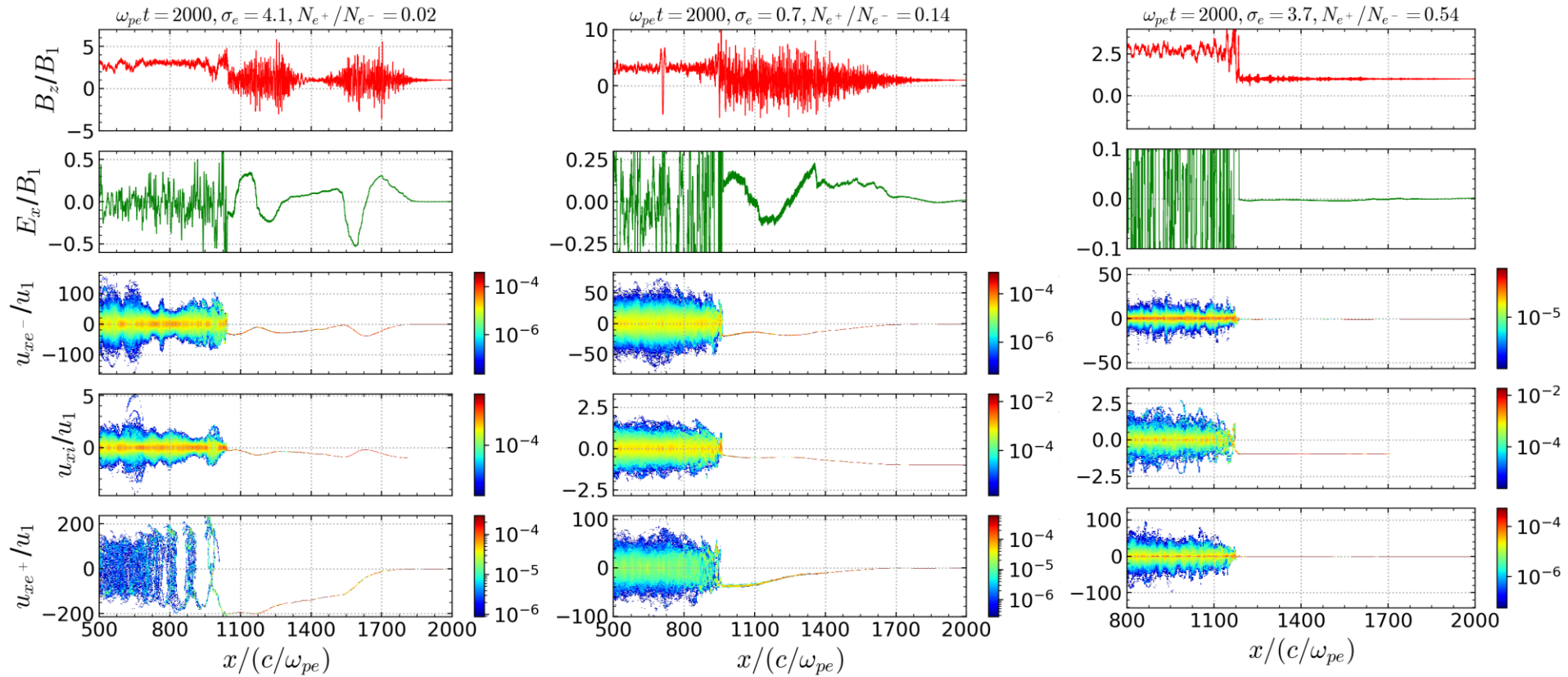
- ポンデロモータービカにより**電荷密度ゆらぎが発生**
- 光速に近い位相速度を持った**縦波電場(航跡場)が発生**
- **粒子が加速**

補足：電磁波の放射効率



放射効率を上げるようなメカニズムが存在しない
➡ 放射効率が上がらない

補足：粒子加速



- 航跡場が発生すると粒子が加速
- 陽電子数の比が小さい（イオンが多い）方が航跡場が大きくなり、より粒子も加速される