電磁波とプラズマの相互作用による粒子加速

宇宙物理学研究室
長谷部英賢

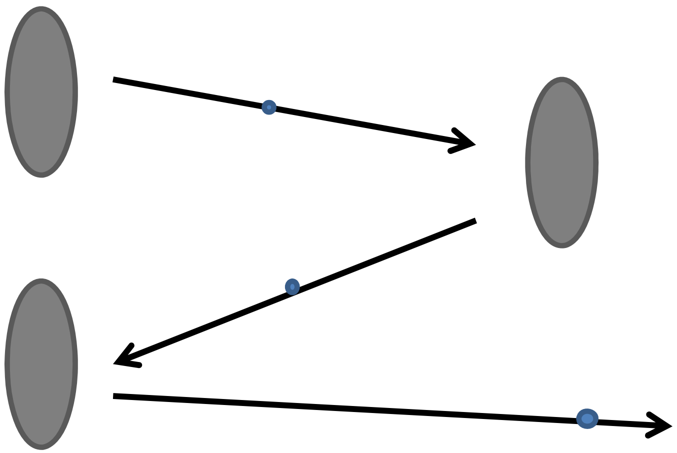
発表の流れ

1. 粒子の加速機構
2. 目的、方法
3. 基礎方程式、PICコードの計算法
4. シミュレーションモデル
5. プラズマ中の分散関係、伝播
6. プラズマ波の励起、粒子加速
7. まとめ

宇宙空間での粒子の加速機構

1次フェルミ加速

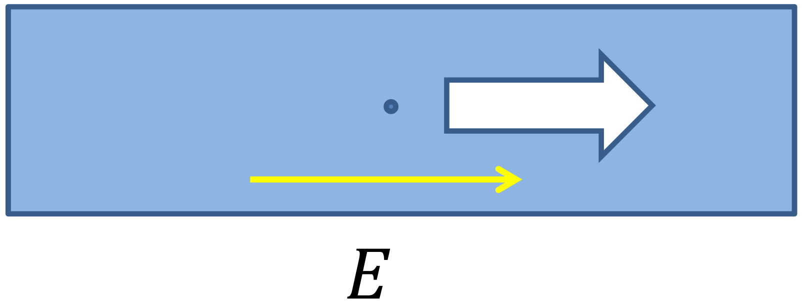
従来提案されてきた機構



衝撃波の間で反射をくり返すことで加速

航跡場加速

今回調べる機構



プラズマ中の電場によって加速

フェルミ加速よりも速く加速できる可能性がある

目的、方法

粒子コードを用いて航跡場加速による粒子の加速過程を調べる

- プラズマ中の電磁波の伝播、分散関係
- 電磁波によるプラズマ波（プラズマ中の電荷密度の振動）の励起
- プラズマ波による粒子加速

用いる粒子コードは高橋博之さんの作成されたものを使用させていただく

基礎方程式

Maxwell方程式

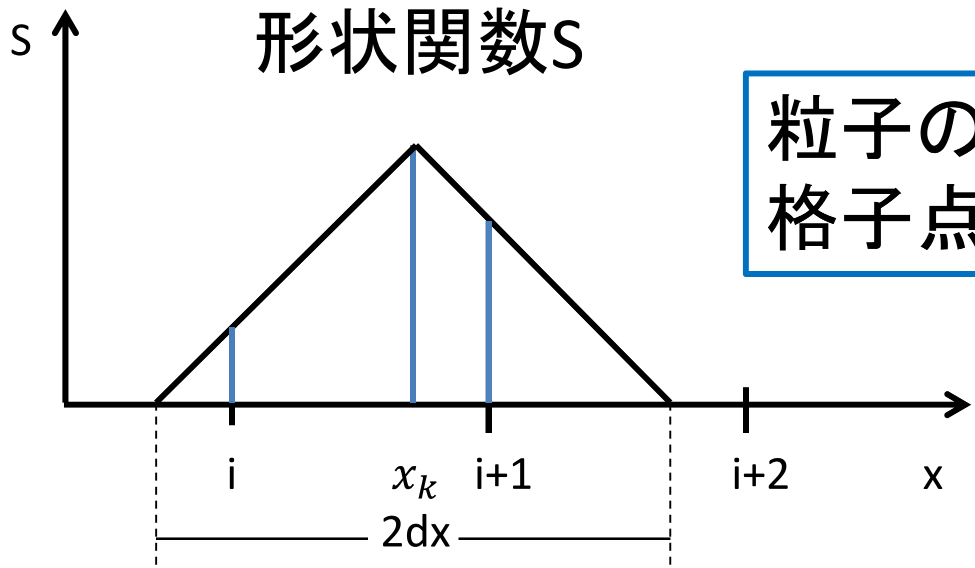
$$\boldsymbol{\nabla} \cdot \boldsymbol{E} = 4\pi\rho$$
$$\boldsymbol{\nabla} \cdot \boldsymbol{B} = 0$$
$$\boldsymbol{\nabla} \times \boldsymbol{E} = -\frac{1}{c}\frac{\partial \boldsymbol{B}}{\partial t}$$
$$\boldsymbol{\nabla} \times \boldsymbol{B} = \frac{4\pi}{c}\boldsymbol{j} + \frac{1}{c}\frac{\partial \boldsymbol{E}}{\partial t}$$

運動方程式

$$m\frac{d\boldsymbol{u}}{dt} = q\left(\boldsymbol{E} + \frac{1}{c\gamma}\boldsymbol{u} \times \boldsymbol{B}\right)$$
$$\boldsymbol{u} = \gamma\boldsymbol{v}$$
$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$
$$\boldsymbol{v} = \frac{d\boldsymbol{r}}{dt}$$

PICコード

- x, v→各粒子について運動方程式
- E, B→各格子点でMaxwell方程式
- 粒子の物理量 $\rightleftarrows$ 格子点の物理量



粒子の情報を
格子点に分配する

x_k : 粒子位置
i : 格子番号

計算の流れ

運動方程式：速度の計算

$$m\frac{d\boldsymbol{u}}{dt} = q\left(\boldsymbol{E} + \frac{1}{c\gamma}\boldsymbol{u}\times\boldsymbol{B}\right), \boldsymbol{u} = \gamma\boldsymbol{v}$$

速度から位置の計算

$$\boldsymbol{v} = \frac{d\boldsymbol{r}}{dt}$$

位置、速度から電流密度の計算

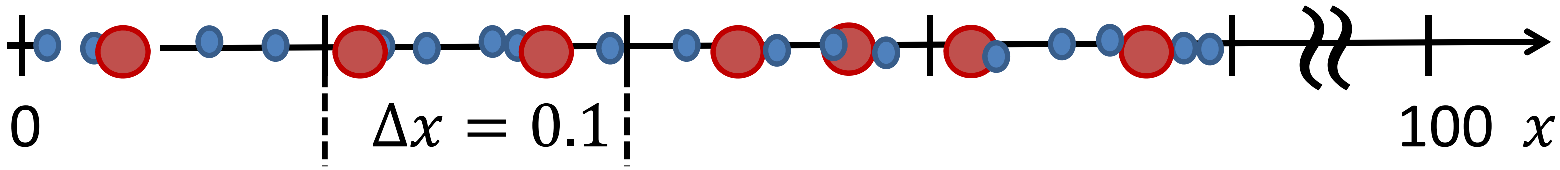
$$\boldsymbol{j} = nq\boldsymbol{v}$$

Maxwell方程式：電磁場の計算

$$\boldsymbol{\nabla}\times\boldsymbol{E} = -\frac{1}{c}\frac{\partial\boldsymbol{B}}{\partial t}, \boldsymbol{\nabla}\times\boldsymbol{B} = \frac{4\pi}{c}\boldsymbol{j} + \frac{1}{c}\frac{\partial\boldsymbol{E}}{\partial t}$$

シミュレーションモデル

空間1次元　　電子-陽子プラズマ



メッシュ数$n_x = 1000$

粒子数/メッシュ：$N_e = 200, N_p = 200$

周期境界条件

光速$c = 1$

（電磁場、速度等は3次元成分をもつ）

プラズマ中の電磁波の分散関係

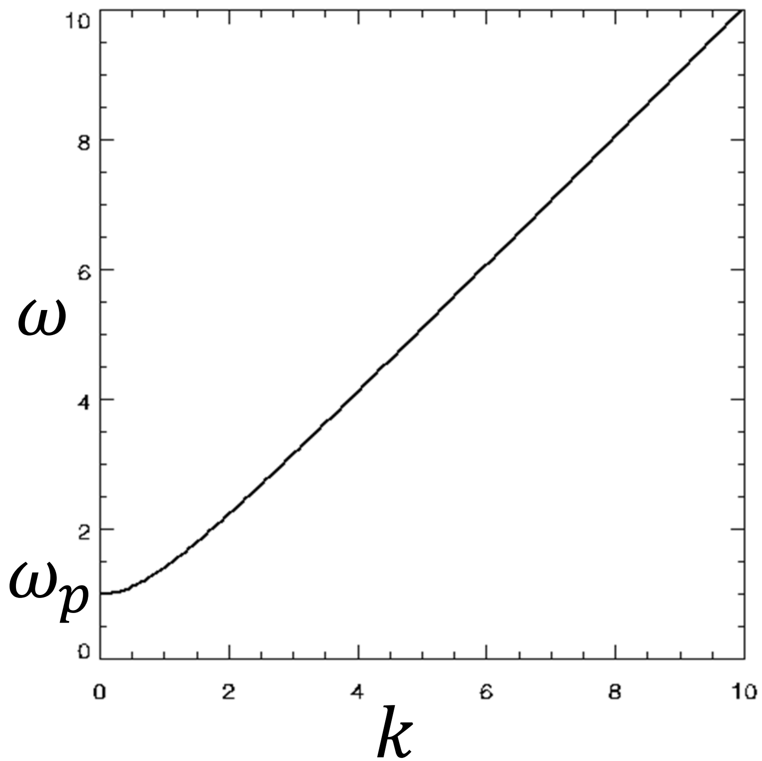
Maxwell方程式、電子の運動方程式から

$$\nabla \times (\nabla \times \boldsymbol{E}) = \left(\frac{4\pi n_e q^2}{m_e} - \frac{\partial^2}{\partial t^2}\right)\frac{\boldsymbol{E}}{c^2}$$

$\boldsymbol{E} \propto e^{i(\boldsymbol{k}\cdot\boldsymbol{x} - \omega t)}$とすると

$$\boxed{\omega^2 = {\omega_p}^2 + c^2 k^2}$$

$\omega_p = \sqrt{\frac{4\pi n_e q^2}{m_e}}$プラズマ振動数



プラズマ中の電磁波の伝播

分散関係から

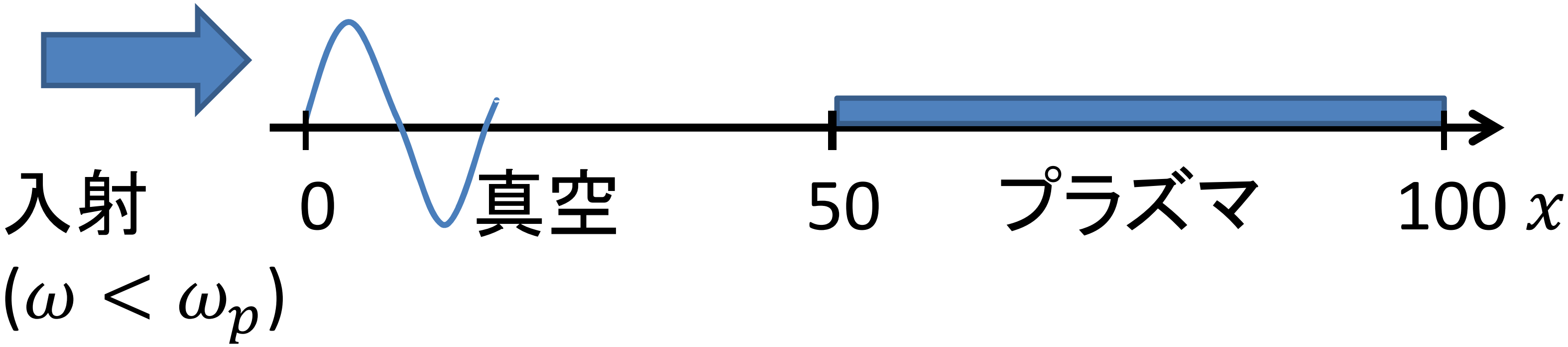
$$k = \frac{\sqrt{\omega^2 - {\omega_p}^2}}{c}$$

$\omega < \omega_p$ならばkは純虚数

電磁波は指数関数的に減衰

プラズマに入り込めない

電磁波の減衰シミュレーション



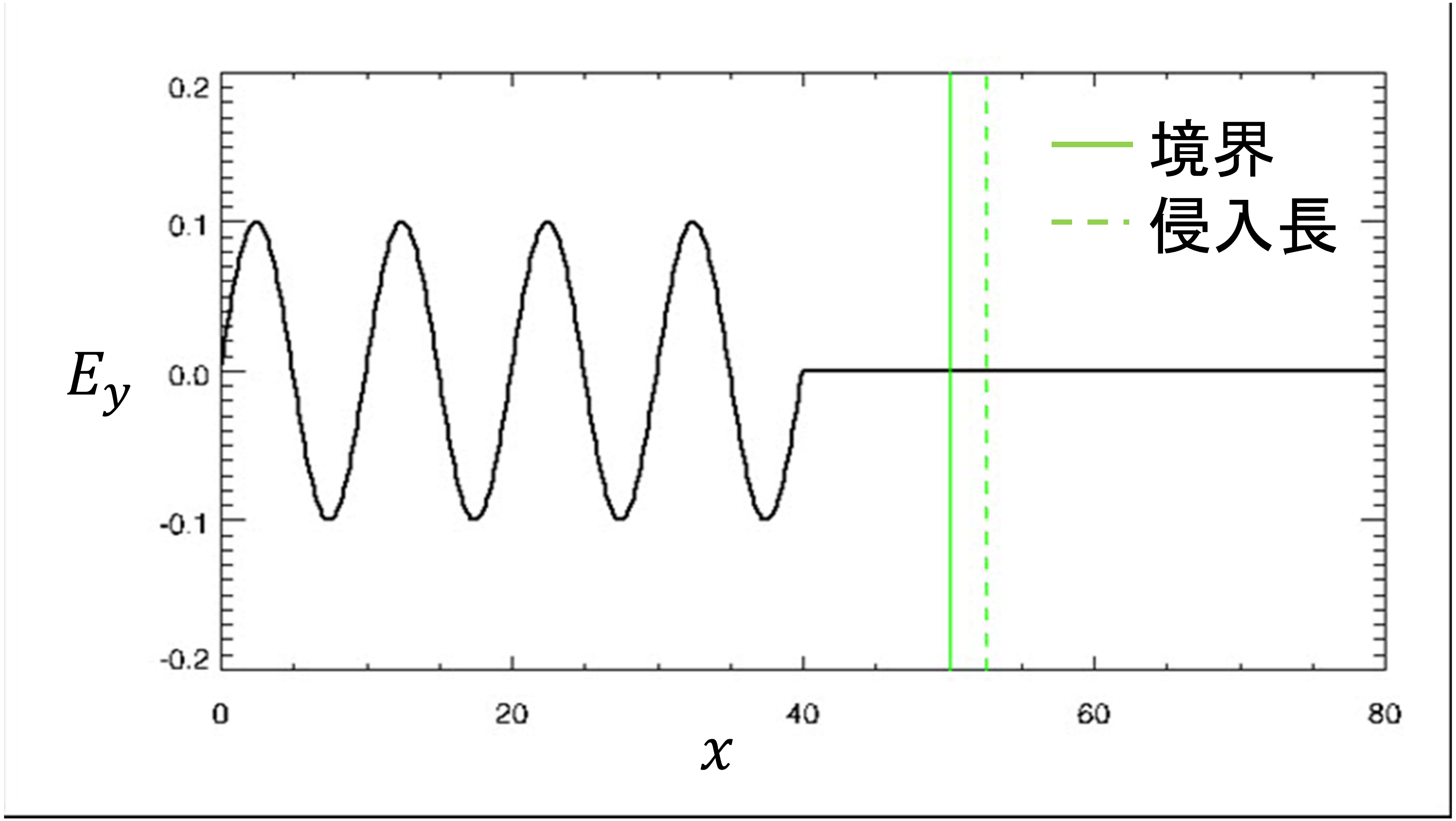
入射波

$\omega = 0.6$

$\omega_p = 1$

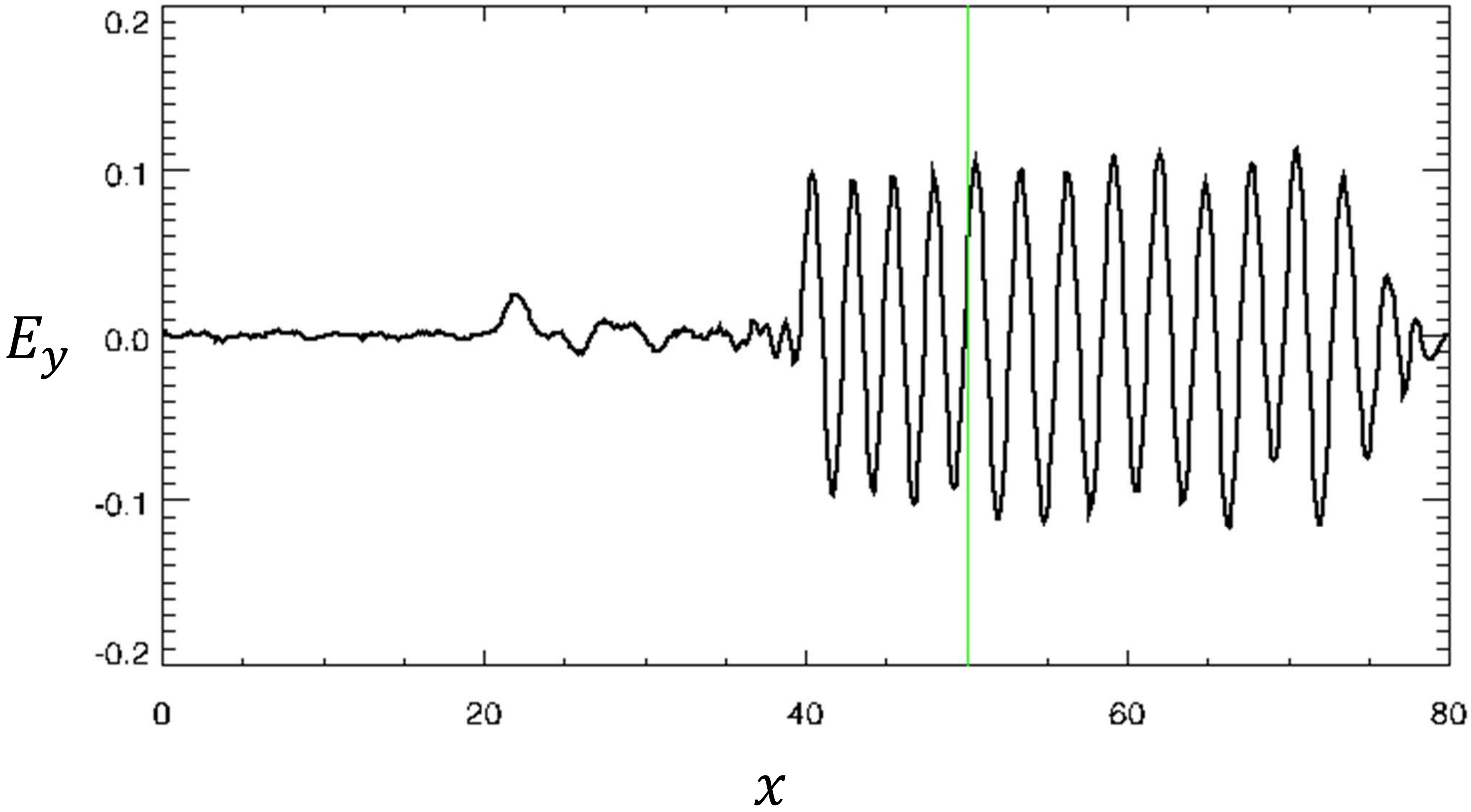
$|E_y| = |B_z| = 0.1$

侵入長: $\dfrac{c}{\sqrt{{\omega_p}^2 - \omega^2}}$

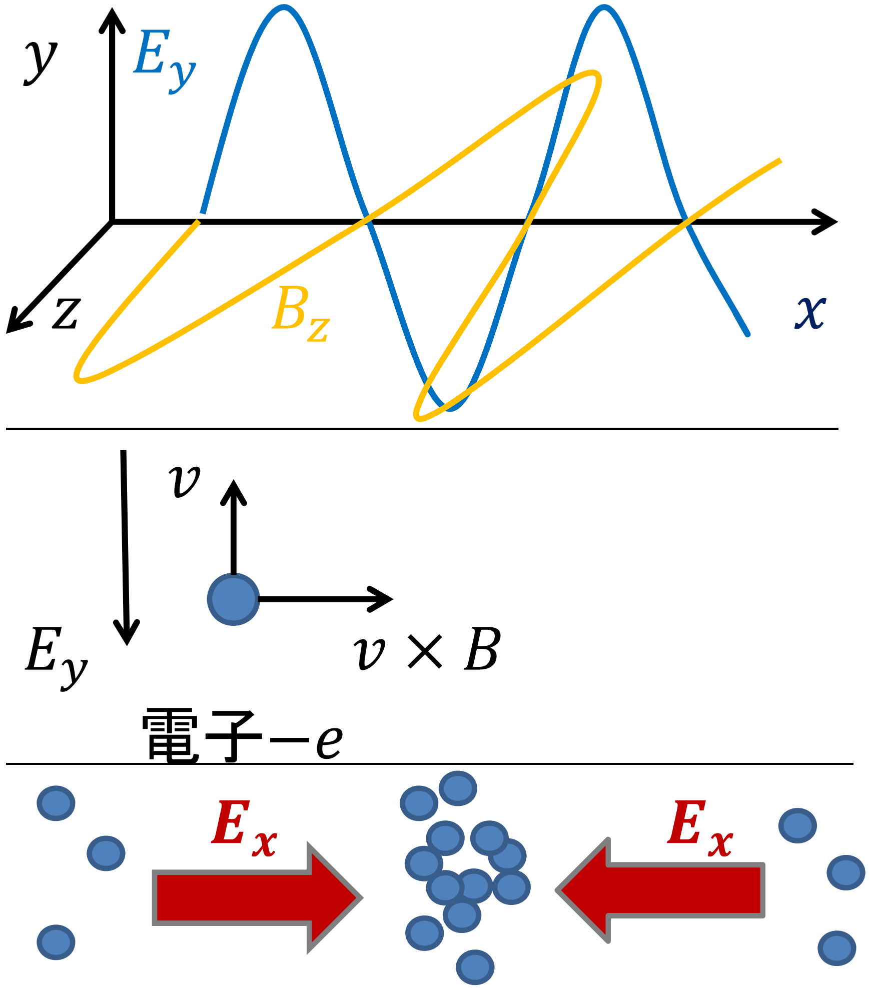


境界
侵入長
E_y
x
0.2
0.1
0.0
-0.1
-0.2
0
20
40
60
80

$\omega = 2\omega_p$とした場合



プラズマ波の励起



E_y, B_zをもつ電磁波をプラズマに入射

➡ ローレンツ力：x方向

電子がx方向に動かされ粗密が発生

➡ 粗から密へ電場

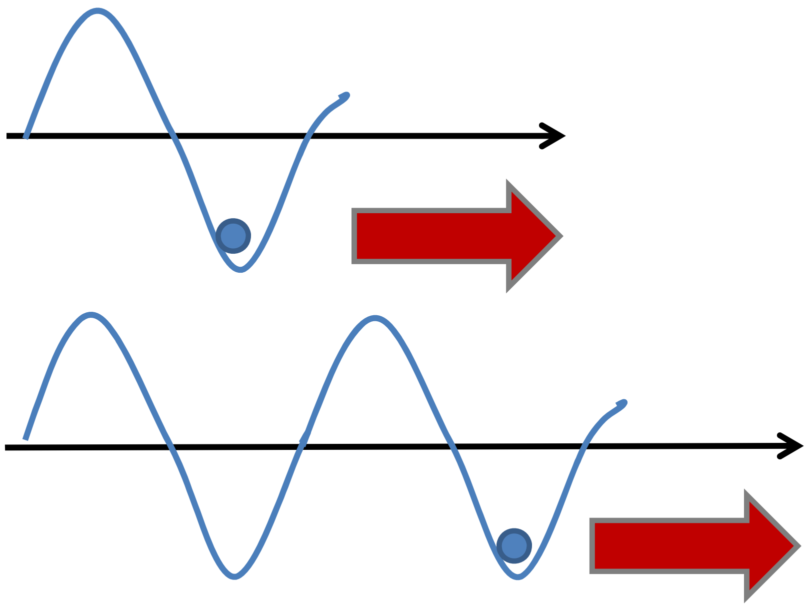
➡ 電場によって電子が動き新たな粗密が発生

<u>くり返され波動となる</u>

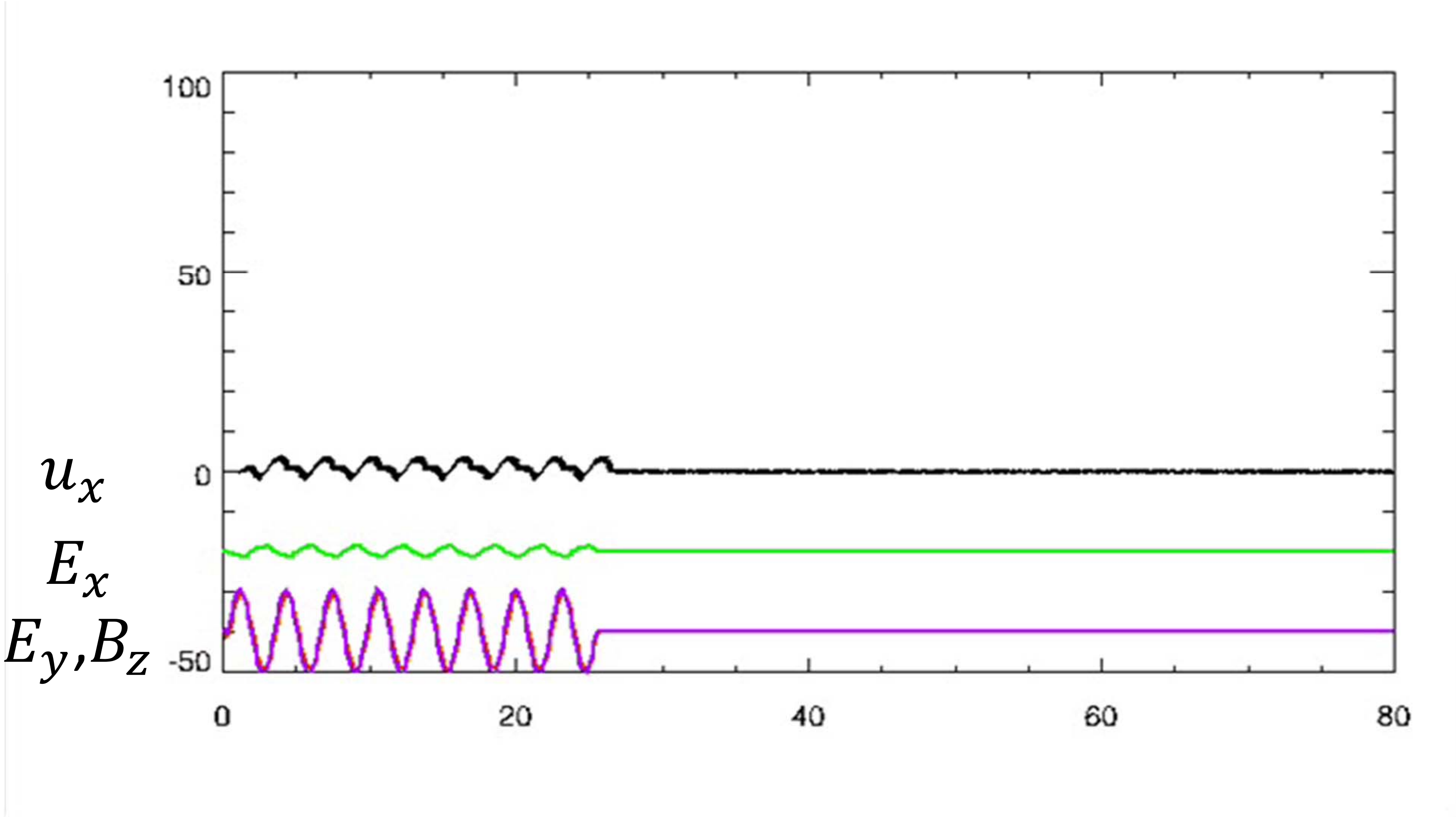
プラズマ波による粒子加速

プラズマ波の位相速度＝入射波の群速度≈ c

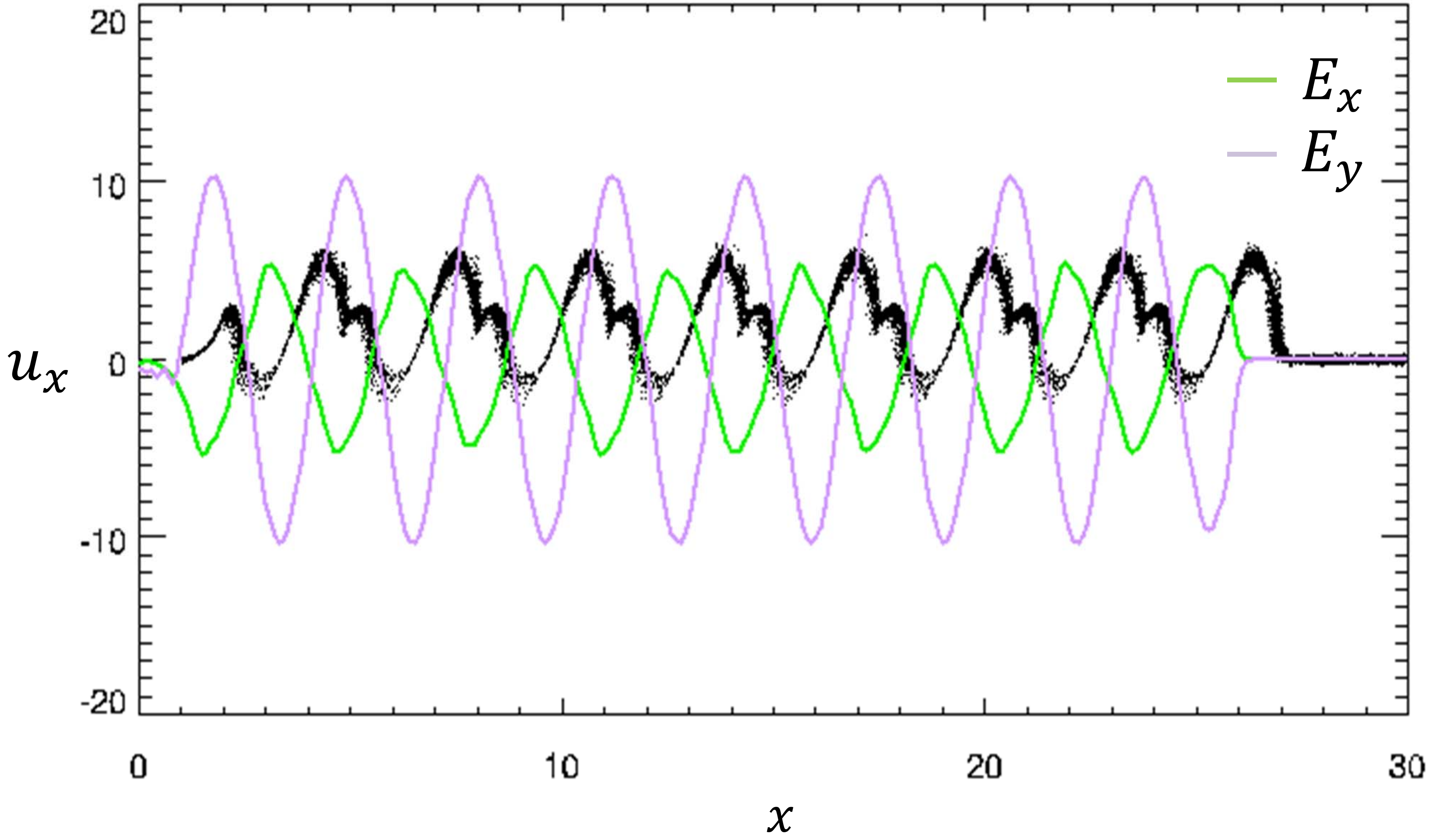
光速に近い粒子と共に進み加速し続ける



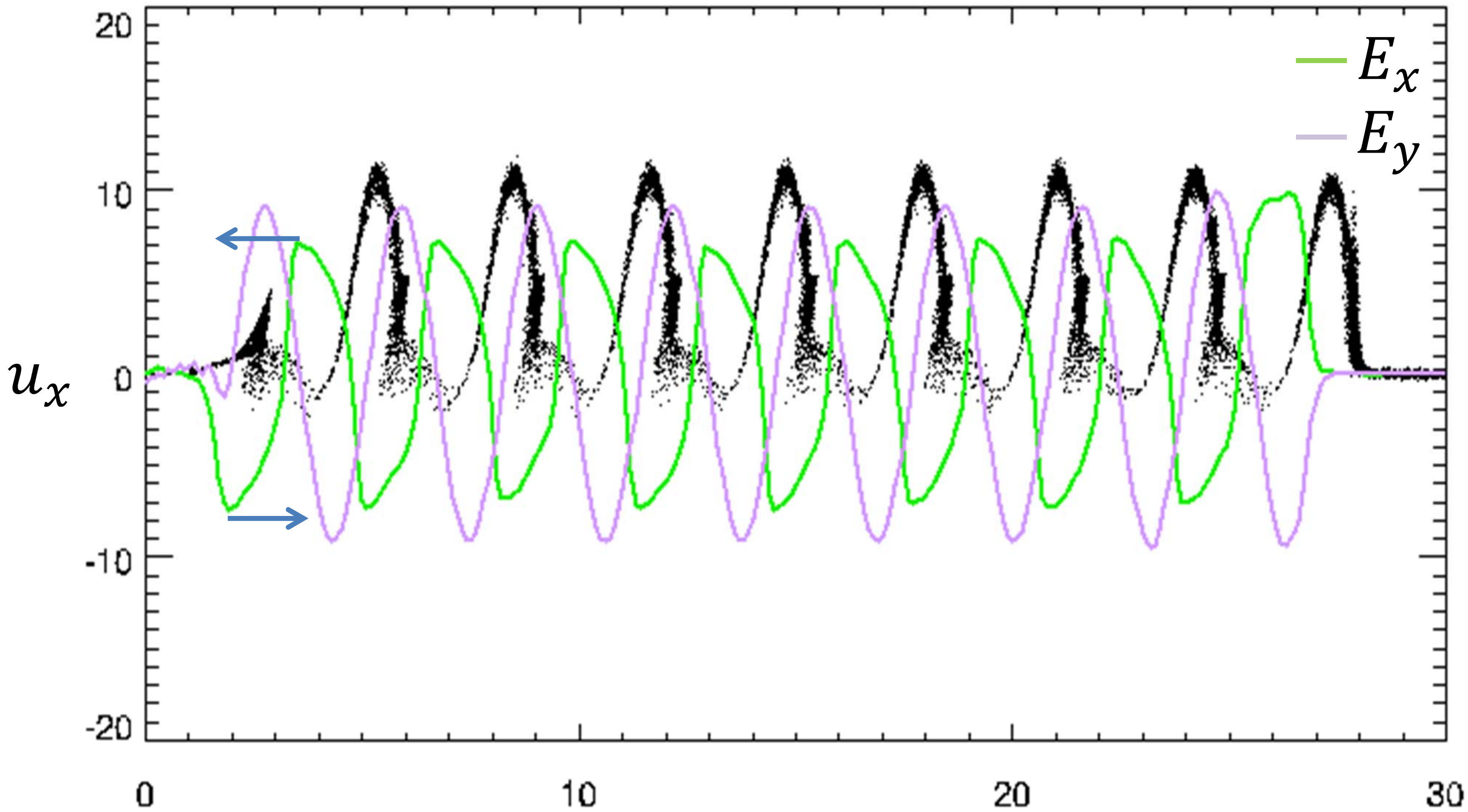
入射波振幅：10　粒子の位相空間分布



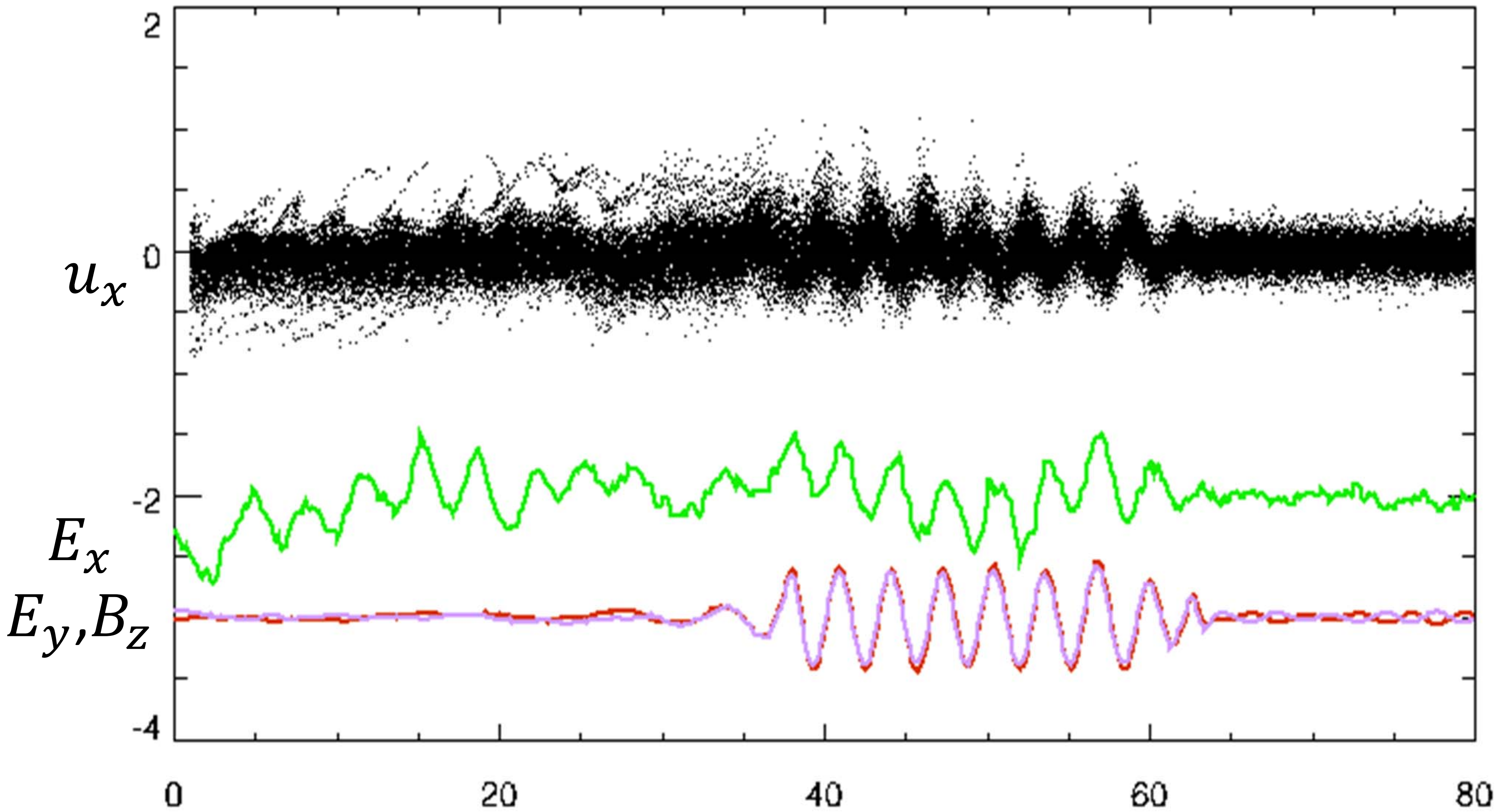
$t = 1$　E_xによる加速が見える



$t = 2$　ローレンツ力により波形が歪む

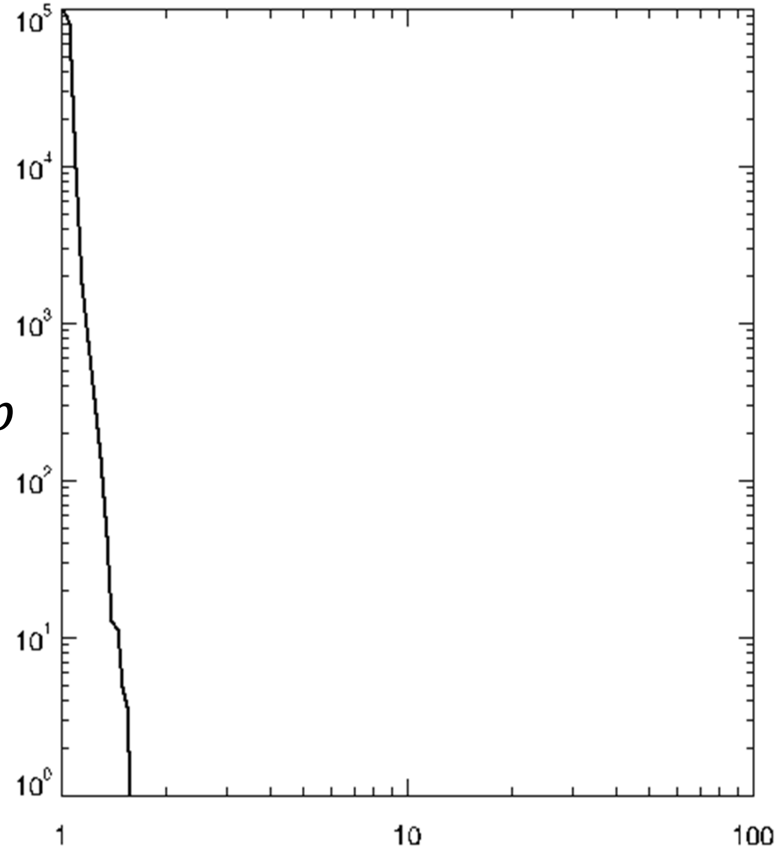


入射波振幅0.5

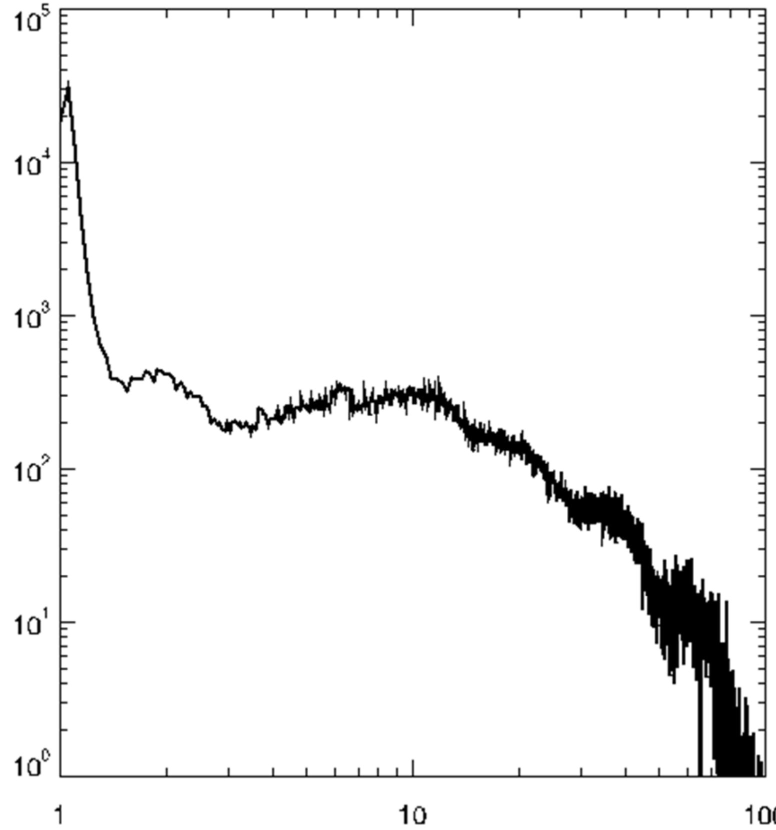


エネルギースペクトル

入射波振幅0.5



入射波振幅10



N_p

$E_p\ [mc^2]$

まとめ

- 振幅はE_yよりもE_xのほうが小さかったが

加速はy方向よりもx方向のほうが大きかった

入射波による加速ではなく

プラズマ波による加速

- 加速域はごく短い（プラズマ波の波長程度）

加速域自体が粒子と共に進む

- 入射波の振幅が大きければ加速も大きい

現実にそのような電場は起こせるのか？

衝撃波から出るメーザーが放射され大きな縦電場を
起こすという説がある