

衝撃波遷移領域における電子加速機構の 上流速度依存性についての研究

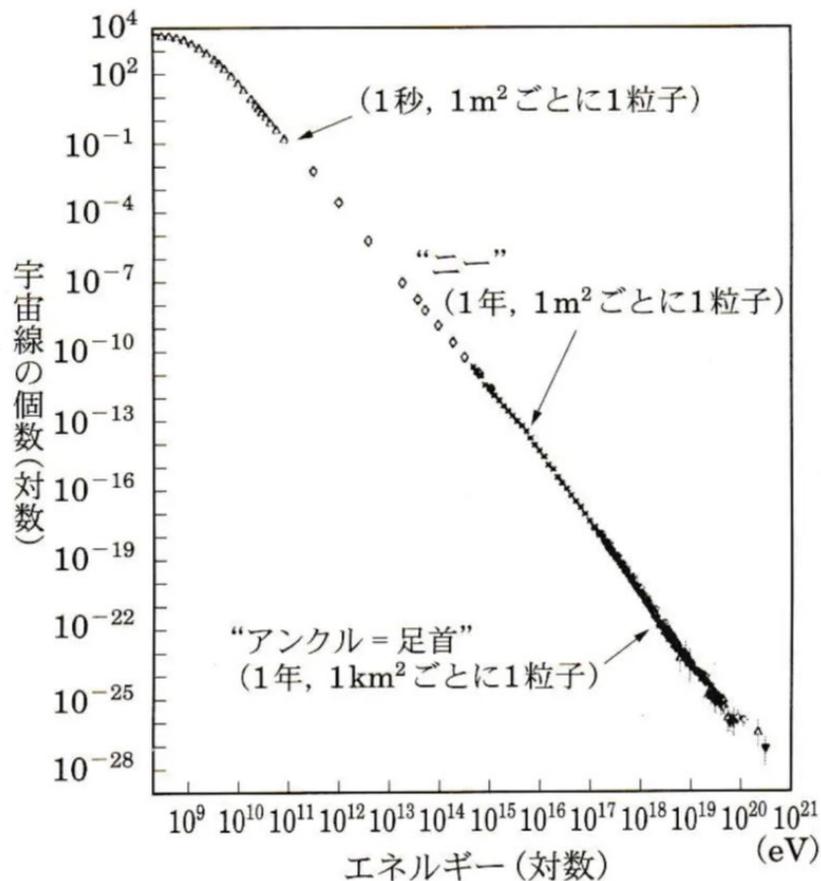
千葉大学理学部物理学科

宇宙物理学教室 4年

永井健也

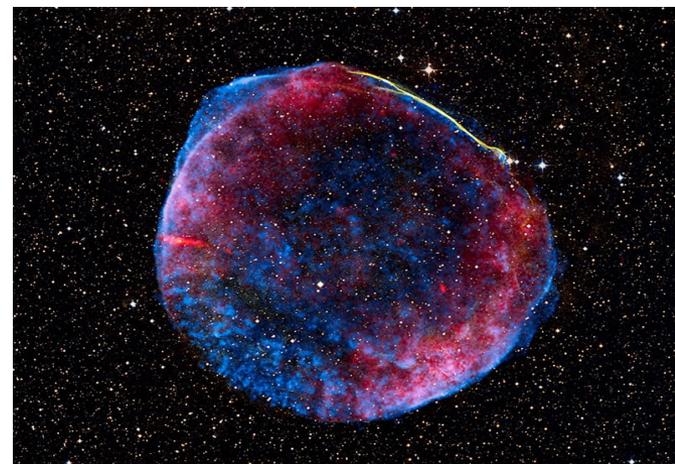
イントロダクション (1/2)

宇宙線とは・・・宇宙空間を飛び回る光速近くにまで加速された高エネルギーの粒子



宇宙線のエネルギースペクトル
(出典：天文学辞典 (日本天文学会))

超新星残骸SN1006 などの観測から衝撃波により宇宙線は 10^{12} eV程度にまで加速されていることが分かっている。
観測された衝撃波速度は数千 km/s程度 (光速の数%程度)。

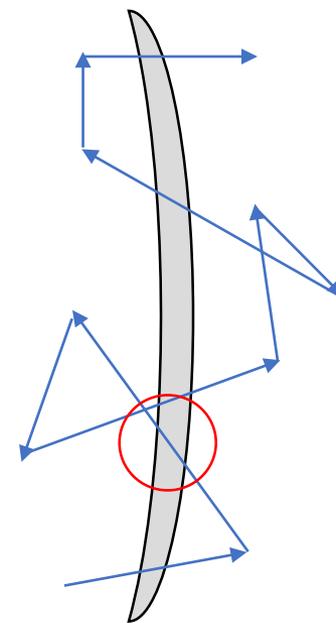


超新星残骸SN1006
Image Credit : NASA, ESA, Zolt Levay (STScI)

イントロダクション (2/2)

- 衝撃波粒子加速では衝撃波面を何度も往復することで加速される「**フェルミ加速**」という標準モデルが存在する。しかしこの加速に必要なエネルギーまでの電子の初期加速のメカニズムが分かっていない（**電子注入問題**）。
- 現在考えられているメカニズムの一つとして、電子の「**サーフィン加速**」がある。

フェルミ加速



衝撃波面

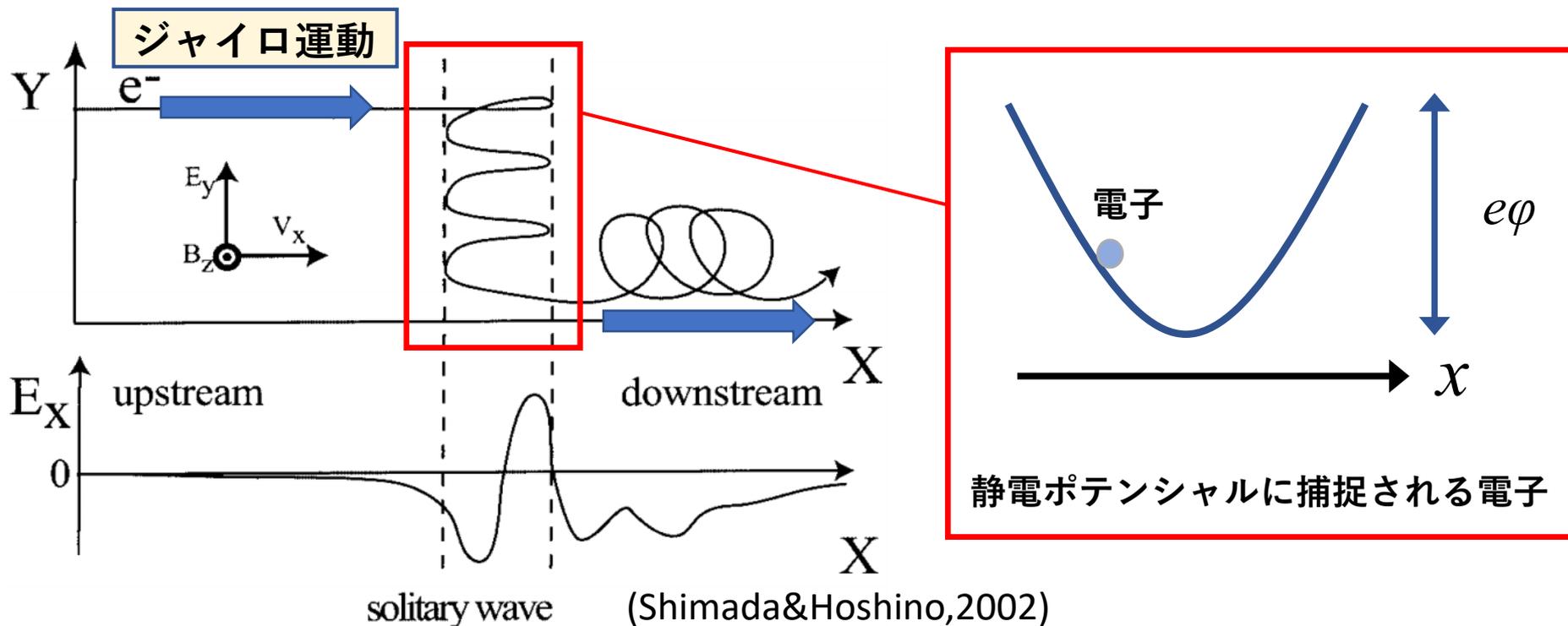
ここに至るまでの過程
が知りたい

電子のサーフィン加速

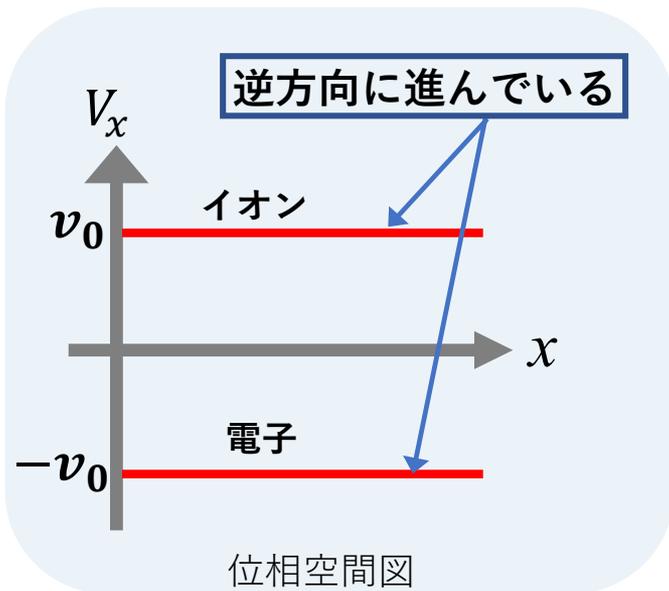
衝撃波面前方において、反射イオンと上流の電子による相互作用により

振幅の大きな電場が励起

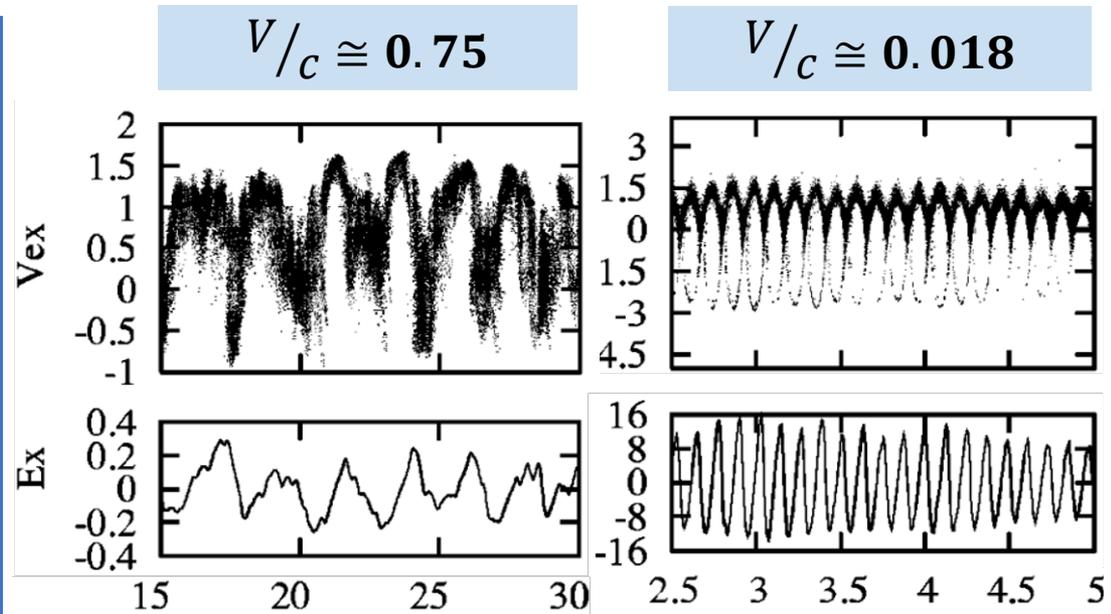
 電子が捕捉され対流電場 E_y により**y方向に加速**される



2流体不安定性(Buneman不安定性)



イオン-電子間の相対速度が
電子の熱速度よりも大きい場
合に生じる**静電的**な不安定性



(Shimada&Hshino,2004)

2流体不安定性
周期境界条件

の簡単な条件での計算から

光速に対する上流の速度の比 V/c

によって電子加速構造の違いが見られた

目的

- V/c の大きさの違いによる電場や位相空間の構造を衝撃波系でも確認したい。
- 衝撃波粒子加速の多次元計算では計算量の都合により $V/c \cong 0.3$ という 現実の衝撃波速度よりはるかに速い速度で計算している。
より 現実に近い衝撃波速度で計算したときに、
電子加速構造はどう変わるのか調べたい。

Particle-in-cell 法

計算手法：公開コード pCANS を用いた PIC シミュレーション

運動方程式

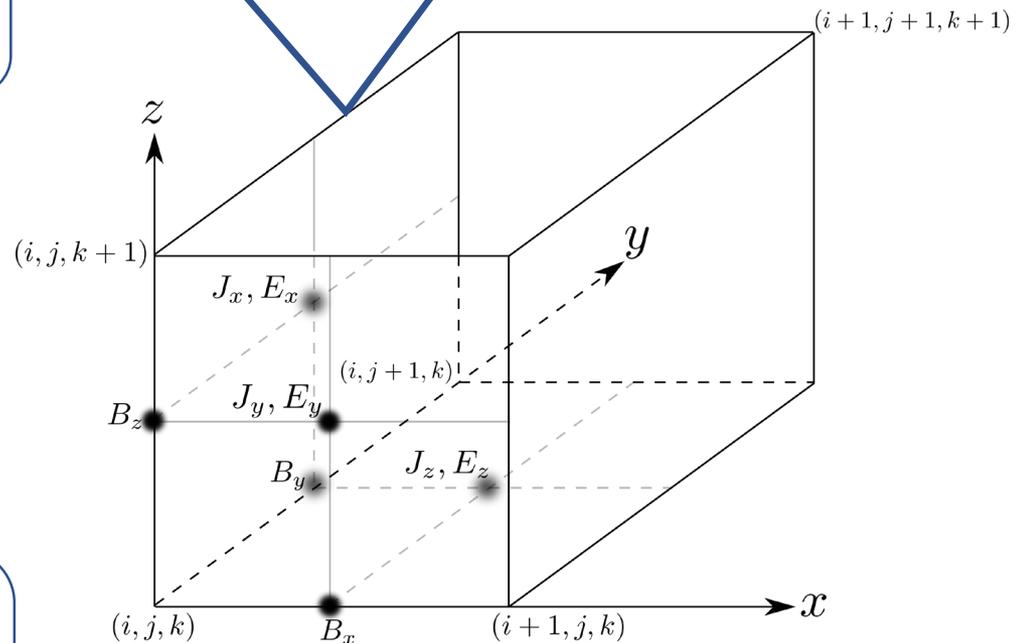
$$\frac{d\mathbf{u}_p}{dt} = \frac{q}{m} \left(\mathbf{E} + \frac{\mathbf{u}_p}{c\gamma_p} \times \mathbf{B} \right)$$

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

Maxwell方程式

$$\begin{aligned} \nabla \times \mathbf{E} &= -\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \\ \nabla \times \mathbf{B} &= \frac{4\pi}{c} \mathbf{j} + \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \end{aligned}$$

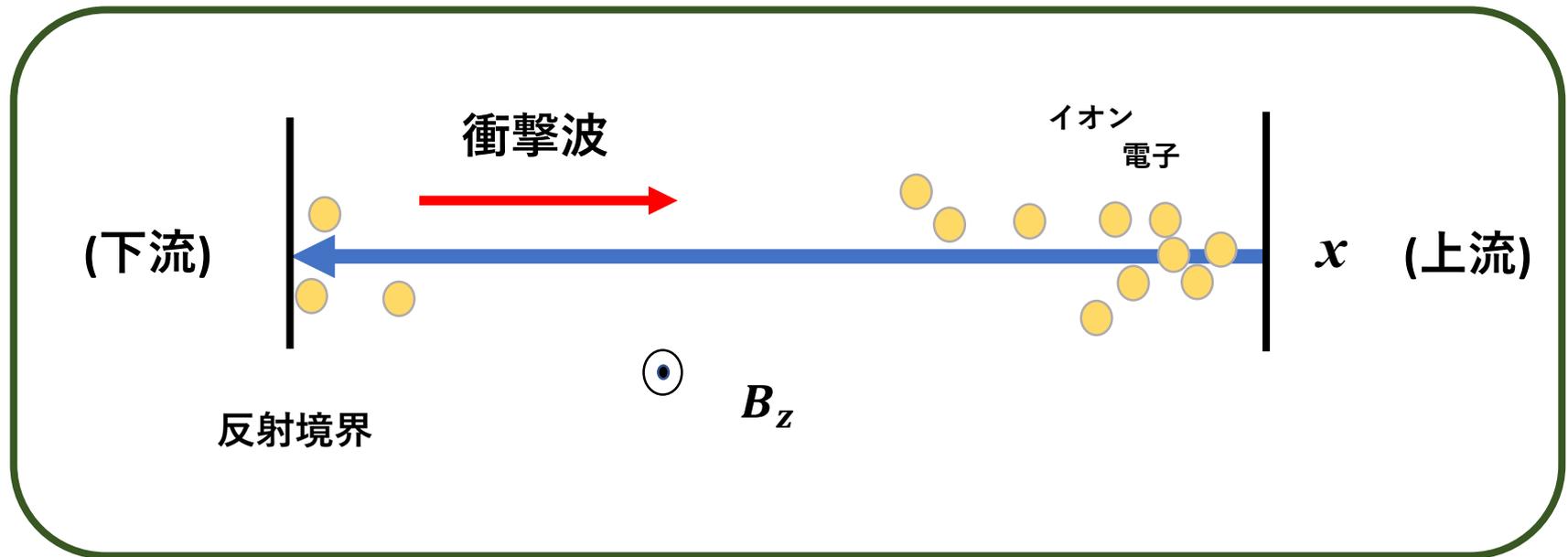
電磁場を空間のグリッド上に定義



出典：<http://www.astro.phys.s.chiba-u.ac.jp/pcans/algorithm.html#shape-factor>

1次元無衝突垂直衝撃波の計算

pCANSを利用して粒子同士の衝突がなく衝撃波面の法線が背景磁場と垂直であるような垂直衝撃波を考える



計算量とパラメタ

m_i/m_e	θ_{Bn}	M_A	β_e	β_i
25	90°	15	0.5	0.5

典型的な時間スケールであるイオンジャイロ周期で規格化し

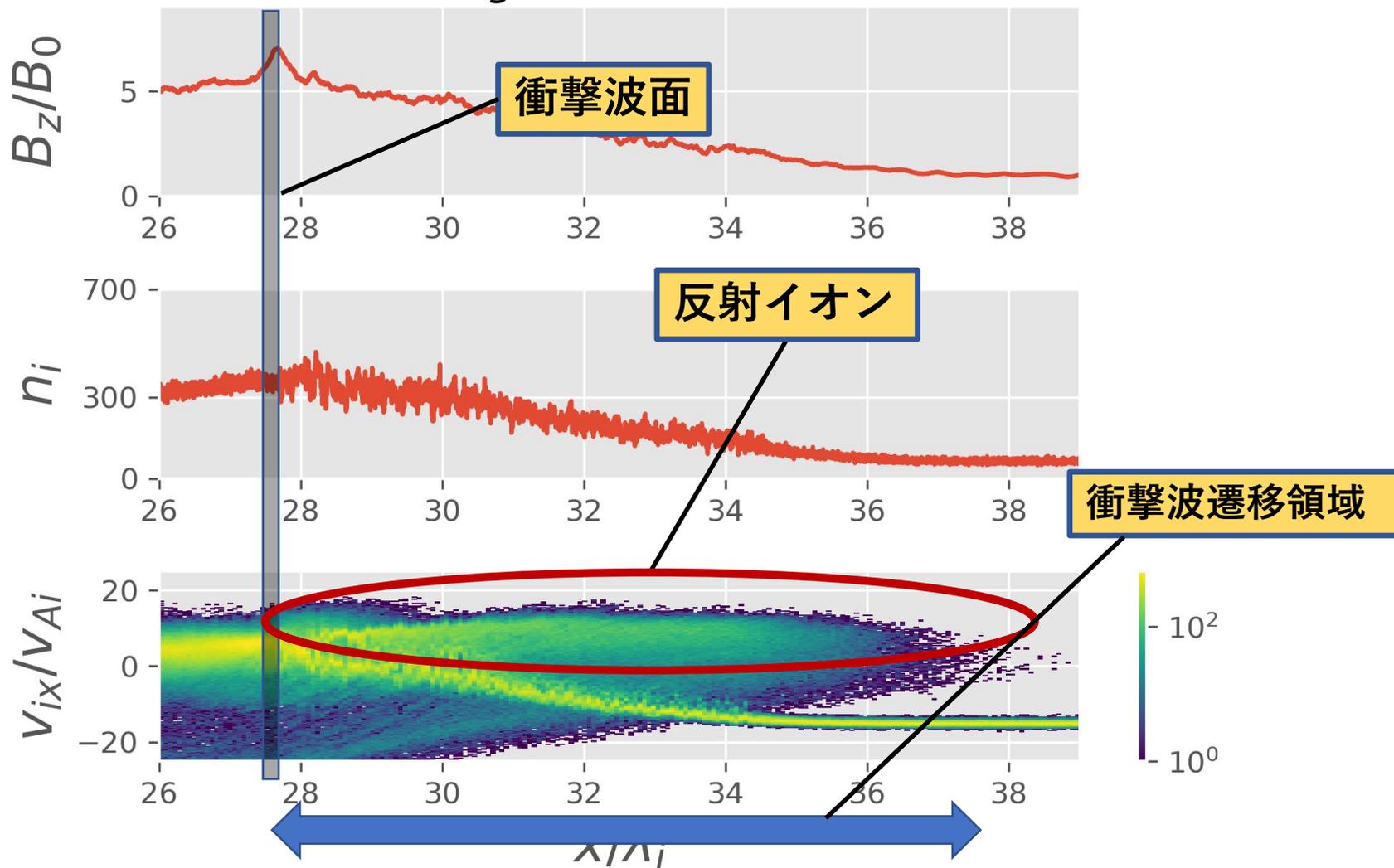
$\Omega_{gi}t = 8$ まで計算すると、

V/c	0.6	0.3	0.15	0.075	0.05
グリッド数 (n_x)	2048	4096	8192	16384	24576
ステップ数 (n_t)	2万	8万	32万	128万	288万

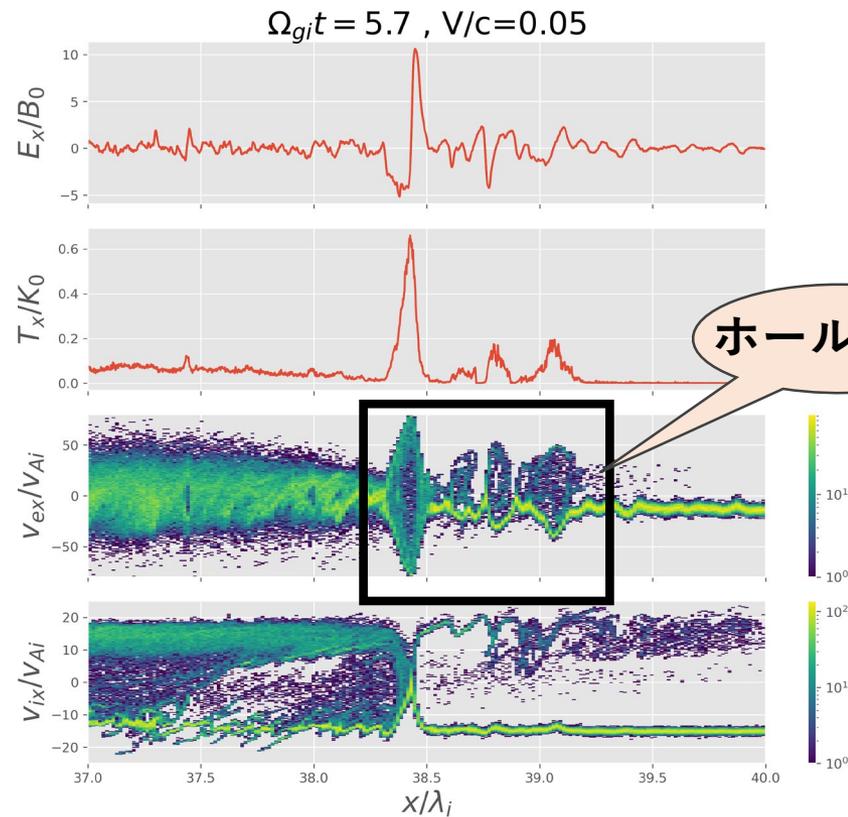
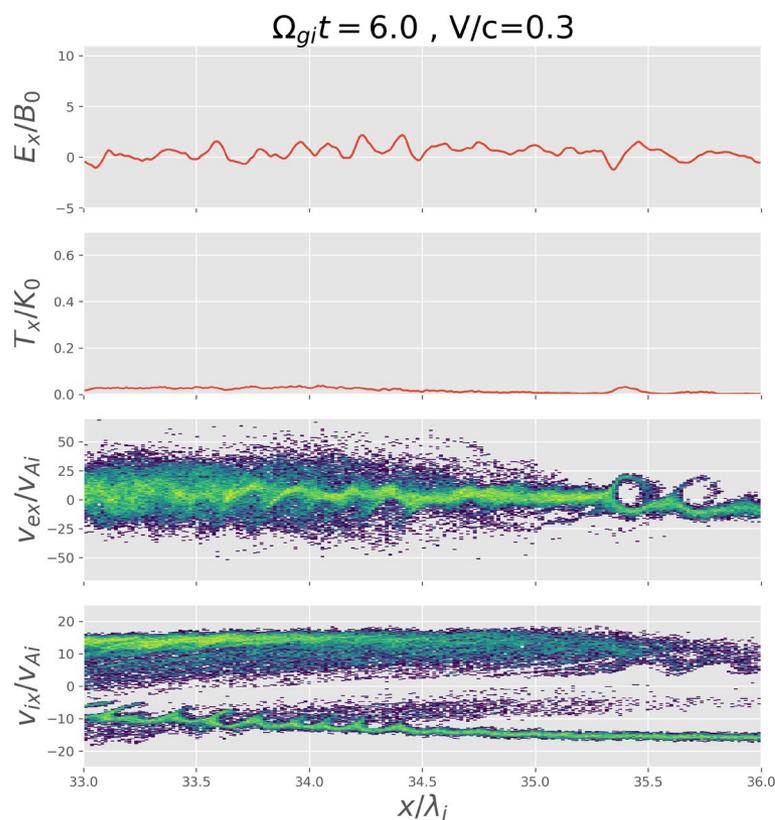
計算時間は約8日

衝撃波の構造

$$\Omega_{gi}t = 5.0 \quad (v/c = 0.05)$$



電子位相空間で見られる構造

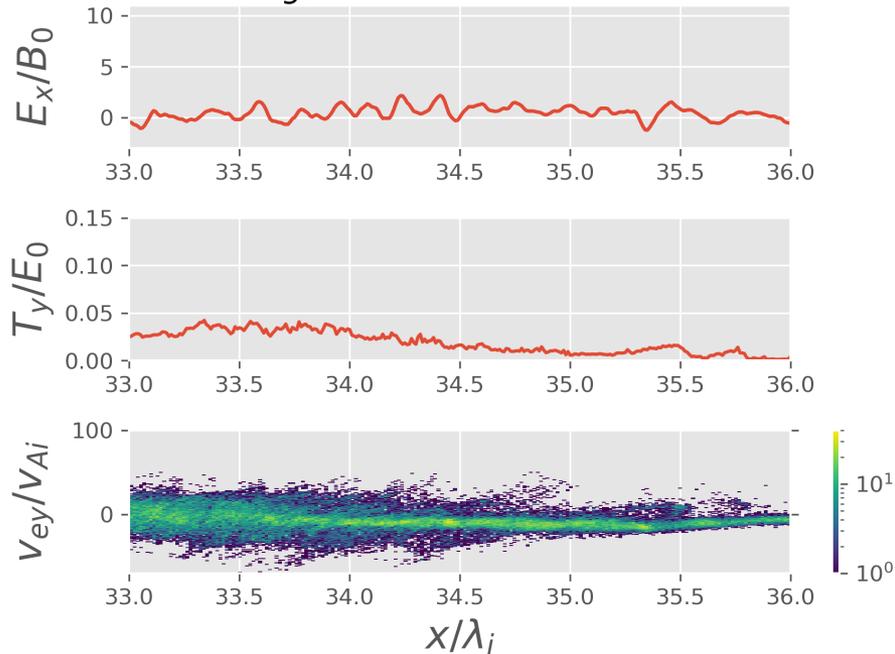


V/c を小さくすると電子の位相空間上に電子スケールの多く
のホール構造が見られ、振幅の大きなコヒーレントな電場も
確認できる

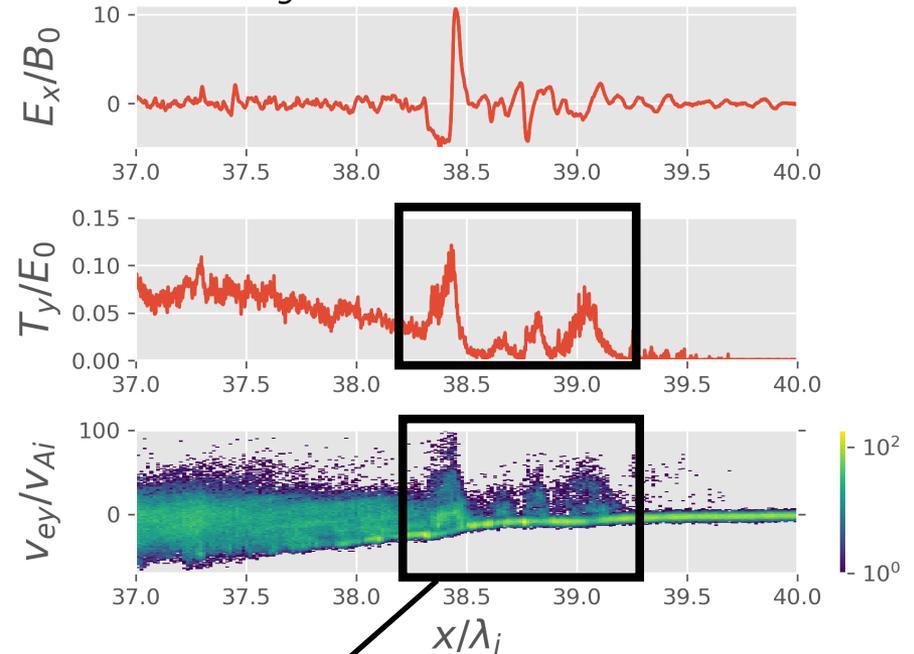
➡ ここで電子が加速・加熱

電子の温度、速度の y 方向成分

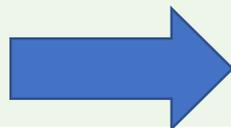
$\Omega_{gi}t = 6.0, V/c = 0.3$



$\Omega_{gi}t = 5.7, V/c = 0.05$



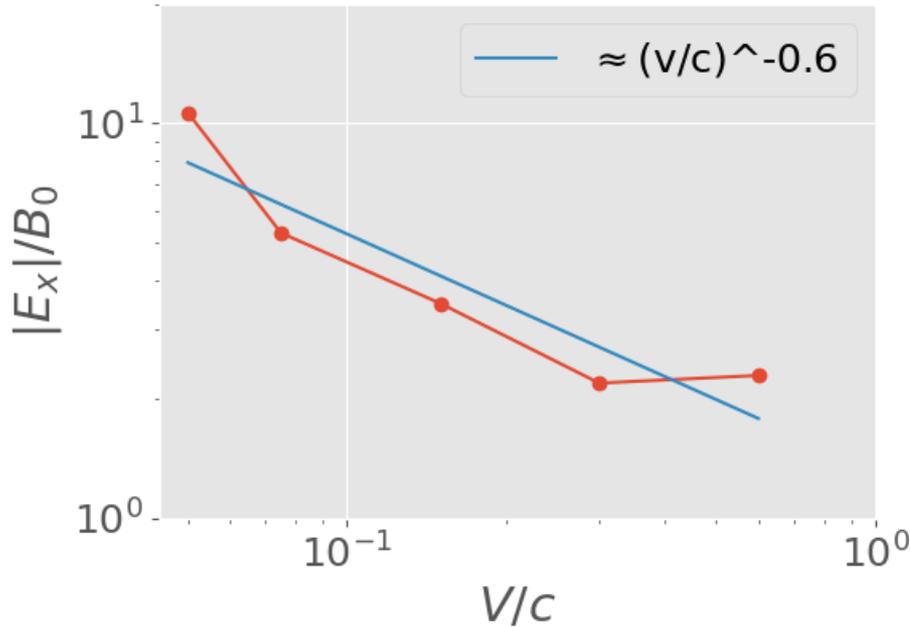
y 方向に電子温度、速度が上がっている



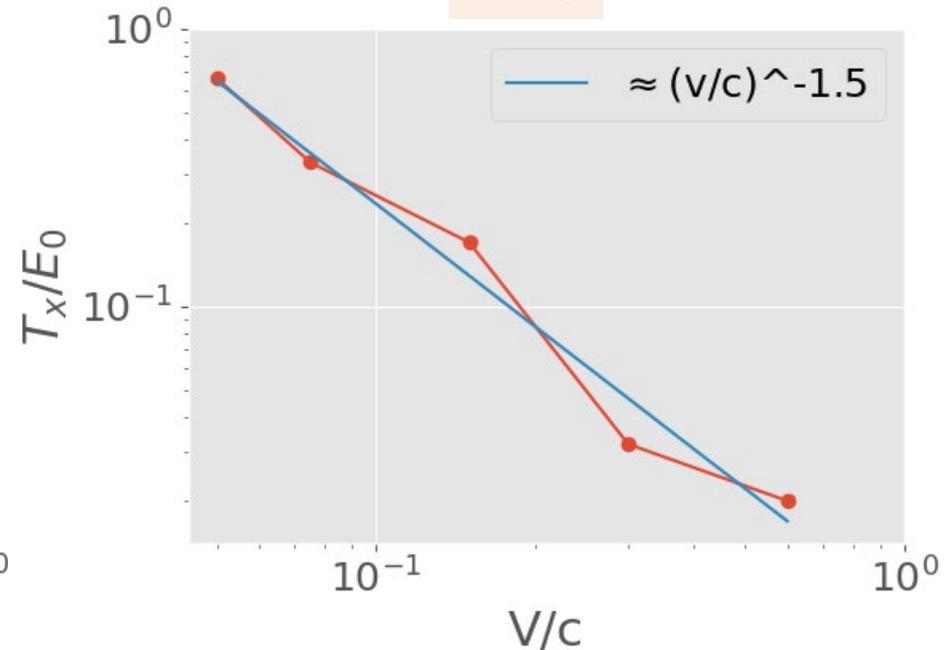
電子のサーフィン加速

衝撃波遷移領域における、電場振幅と電子温度のまとめ

電場振幅

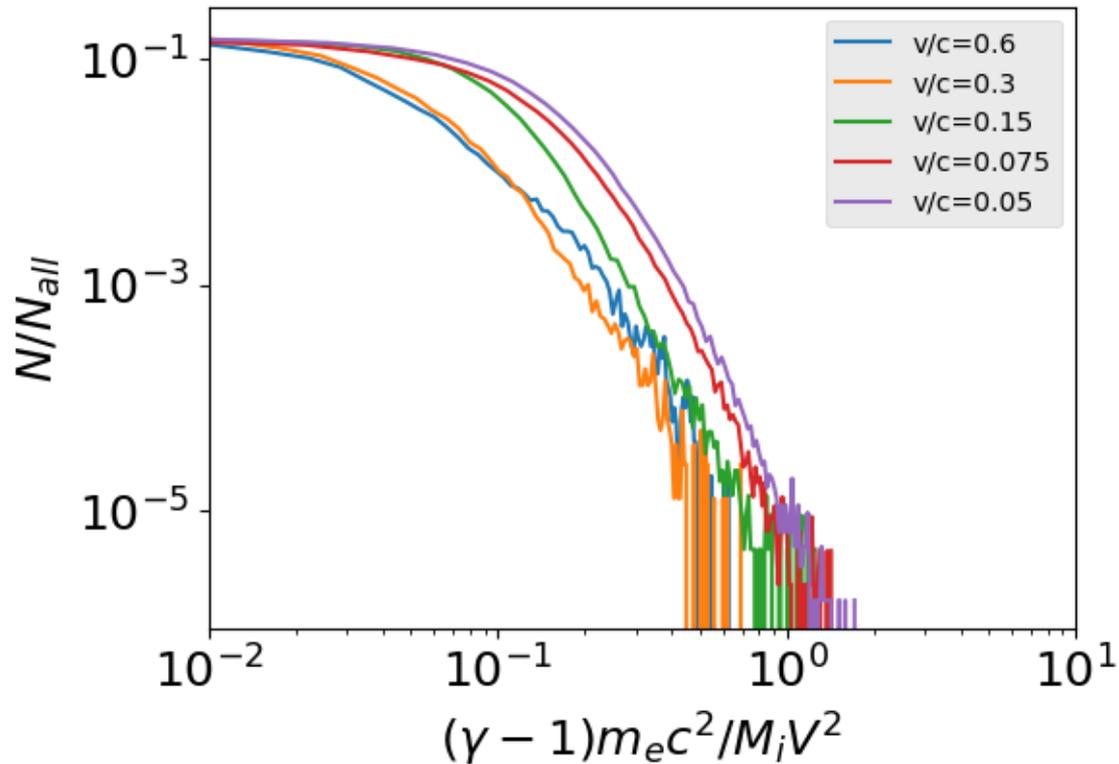


温度

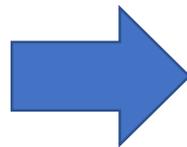


より現実的な衝撃波速度になるにつれ共に大きくなっている

衝撃波遷移領域における電子のエネルギースペクトル



v/c が小さいほど
エネルギーの高い
電子が増えている



上流の運動エネルギーがより
効率的に電子の加熱・加速に
充てられている

まとめと展望

- v/c をより 現実的な値に近づけると 電子の位相空間でのホール構造がより 多くなり、さらにコヒーレントな電場の振幅も 大きくなり、その結果、より 効率的に電子の加速・加熱 が起こることが分かった
- 今後は2次元に拡張し、さらにマッハ数や電子イオン質量比をより現実的に大きくしたときにこの傾向が見られるか確認したい