

ワイベル不安定性による宇宙 磁場の形成

藤田 裕 (大阪大学)

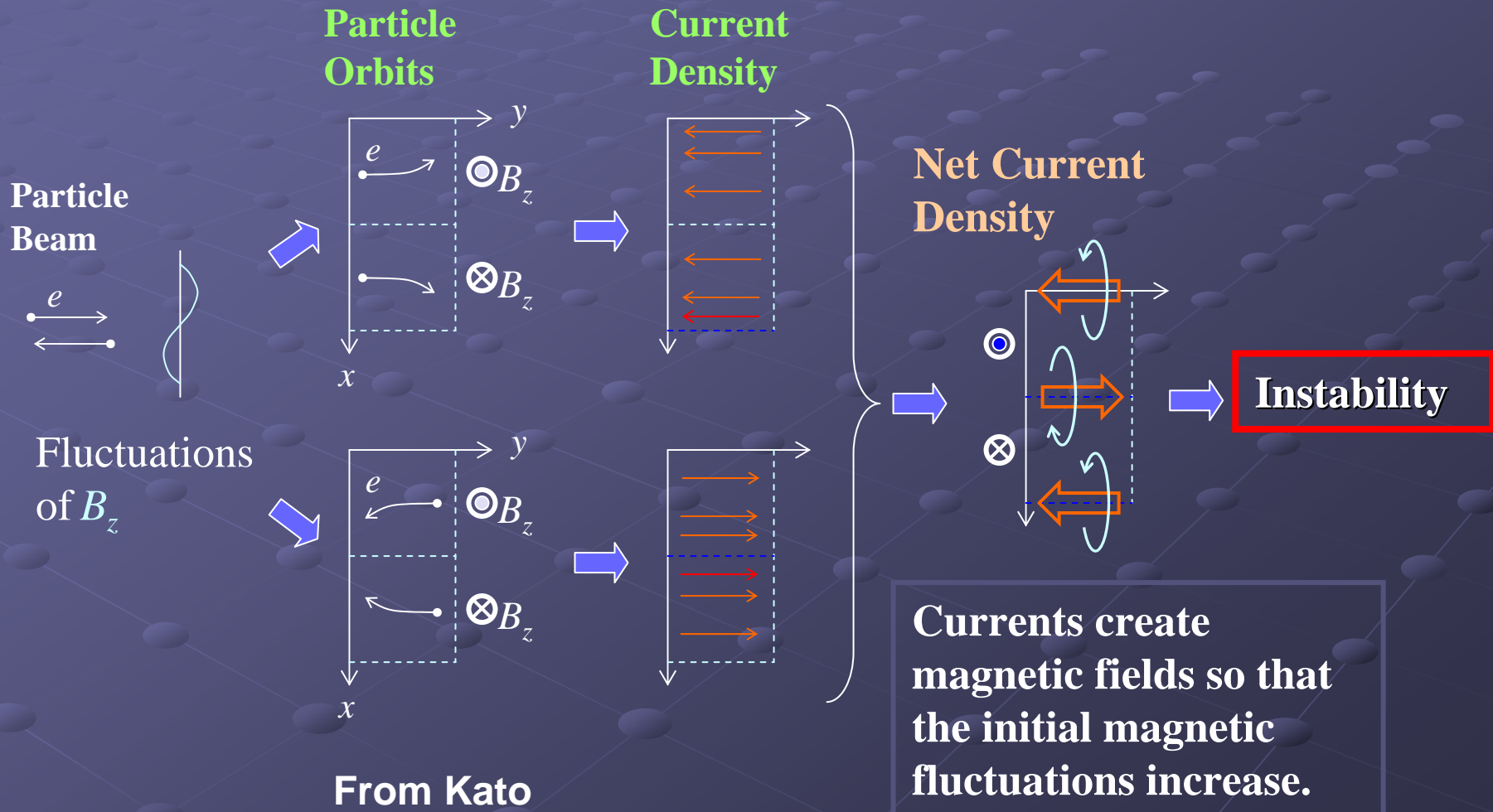
加藤 恒彦 (国立天文台)

岡部 信広 (東北大学)

Contents

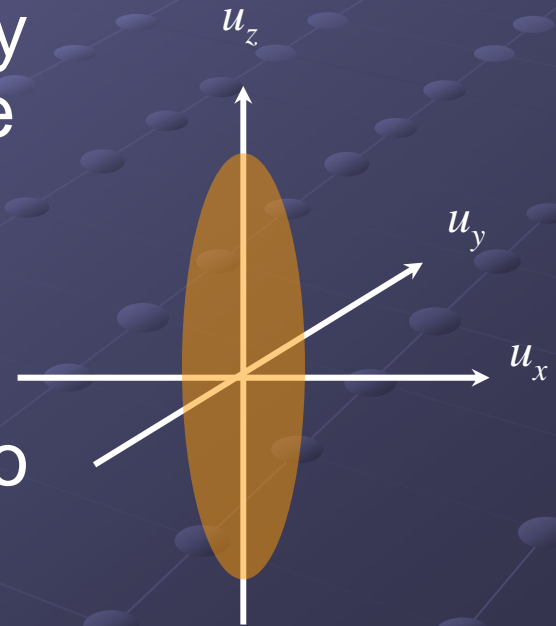
- Introduction
 - The Weibel instability
- The Weibel instability at shocks
 - The generation of magnetic fields in galaxies and clusters of galaxies
- The Weibel instability at temperature gradients
- Summary

Weibel Instability



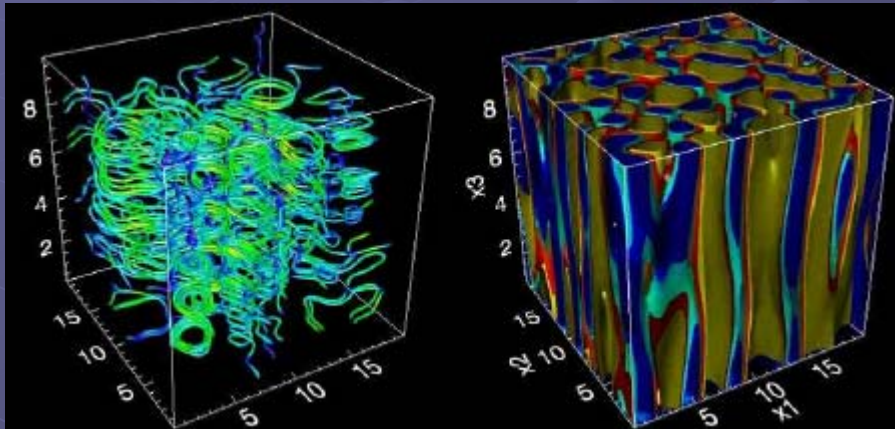
Weibel Instability

- The Weibel instability is driven in a collisionless plasma by the **anisotropy** of the particle velocity distribution function (PDF) of the plasma
 - Shocks
 - Strong temperature gradient
- Magnetic fields are generated so that the PDF becomes isotropic
 - Particle orbits are deflected by the magnetic fields
- **No seed is required**



Magnetic Field Generated by the Weibel Instability at Shocks

- Velocity anisotropy creates current filaments
 - The currents create magnetic fields



B

Currents

Medvedev (2005)

- The evolution can be described by that of currents (Kato 2005)

電流の合体

- 同じ向きの電流は電磁力によって合体する



- 電流と磁場は増加する
- やがて電流が作る磁場が電流自身の直進を妨害するようになる
 - 電流の上限値(Alfvén current: I_A) と磁場の最大値(B_{sat})
 - その後の進化についてよくわかっていない

The Generation of Magnetic Fields in Galaxies and Clusters of Galaxies

Standard Scenario of Galactic Magnetic Fields

Widrow (2002)

● Dynamo Theory

- Magnetic fields in spiral galaxies are amplified and maintained by a dynamo through the rotation of the galaxies

● However

- What about Elliptical Galaxies and Clusters?
 - Slow rotation
- **Relatively strong seed fields are required to explain the current galactic magnetic fields.**
 - Generally, seed fields are very weak (Ichiki et al. 2006)

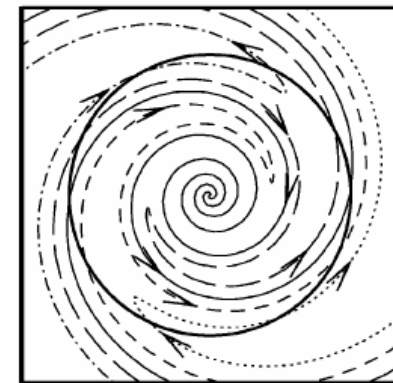
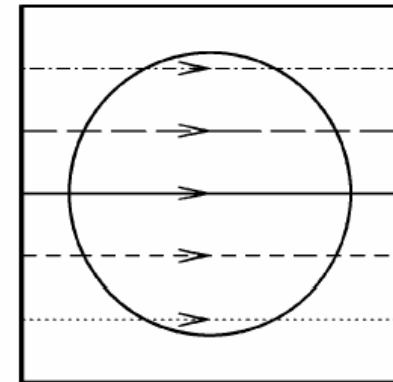


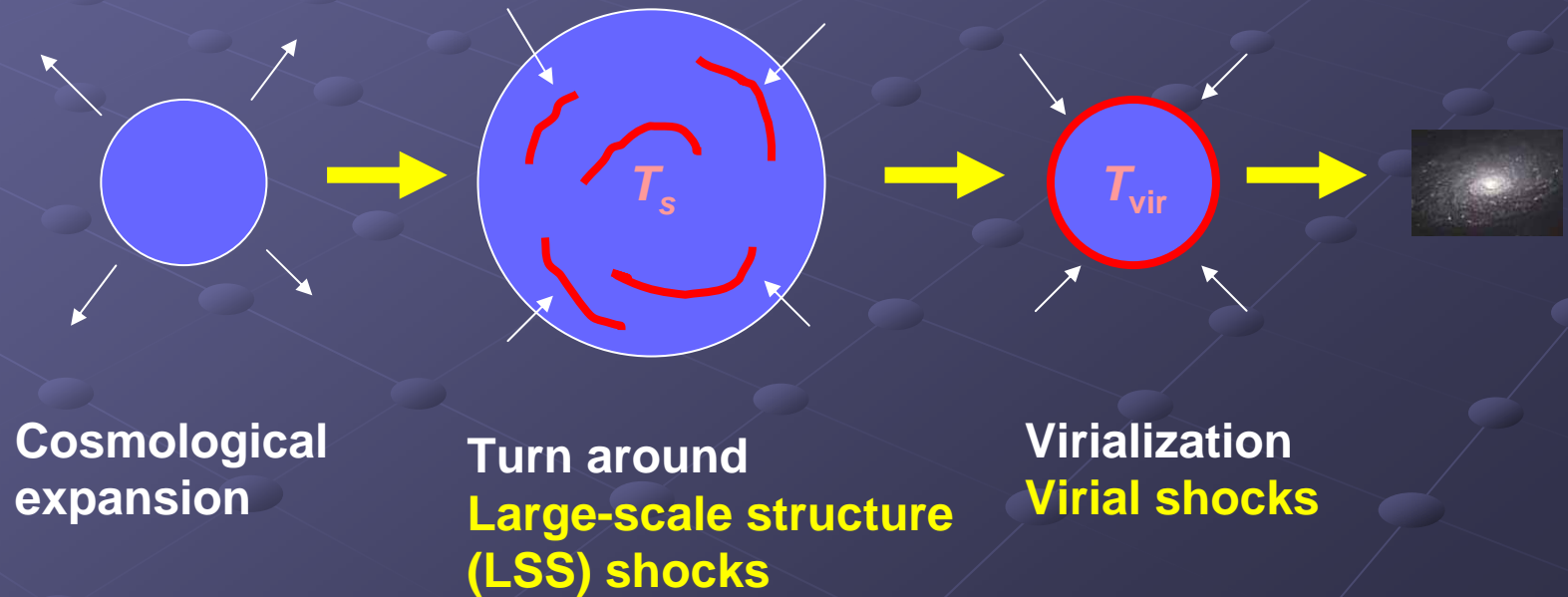
FIG. 8. Distortion of magnetic-field lines under the action of differential rotation. The upper panel shows the initial homogeneous magnetic-field configuration. The different line types are for visualization purposes. The lower panel shows the same field lines after they have been distorted by differential rotation.

New Idea

- 我々は銀河、銀河団形成時にできる衝撃波中で、プラズマ不安定性の一種である「ワイベル不安定」で一気に強い磁場ができるかどうか検討した
 - Schlickeiser & Shukla (2003)
 - $z=0$ での大規模構造形成衝撃波
 - 電子によるワイベル不安定
 - 我々は $z \geq 1$ での陽子によるワイベル不安定性を調べた
 - 陽子のほうが強い磁場ができる

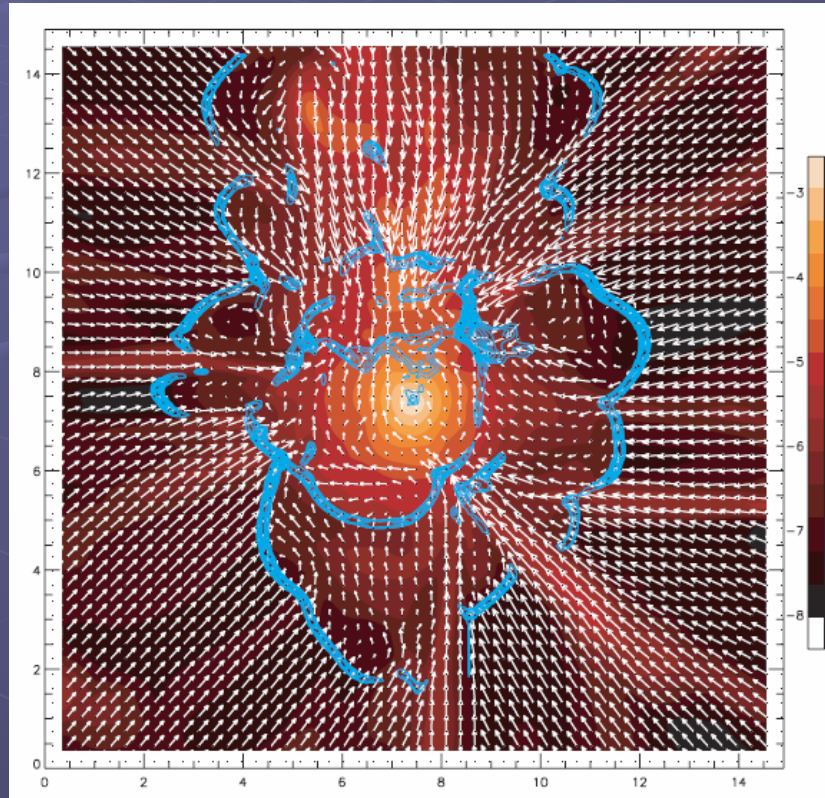
Galactic Shocks

- Shocks should be created at the time of galaxy formation



LSS shocks

(Cen & Ostriker 1999, Kang et al. 2005)



Numerical simulations done by Miniati (2003)

Shock Mach Number

Temperature of the shocked gas

● LSS shocks

$$v = H(z)R_p$$

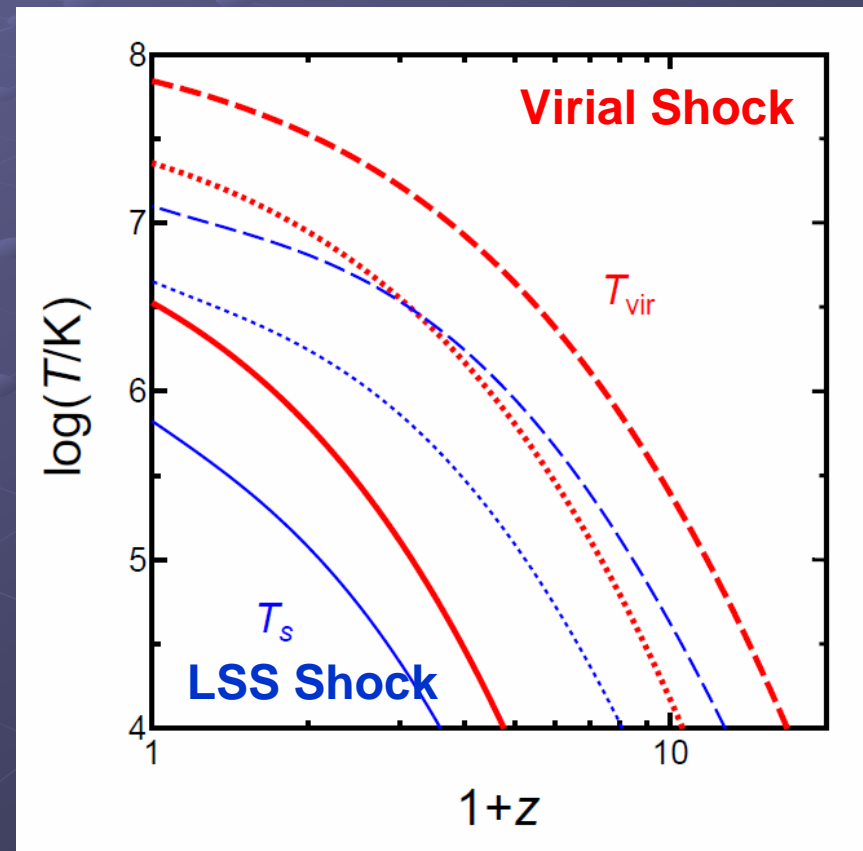
(Furlanetto & Loeb 2004)

- Infall gas is cold
- Mach number $\gg 1$

● Virial shocks

$$v = \sqrt{GM / r_{\text{vir}}}$$

- $T_{\text{vir}} / T_s \sim 8$
- Mach number $\gtrsim 4$



Magnetic Fields Generated by the Weibel Instability

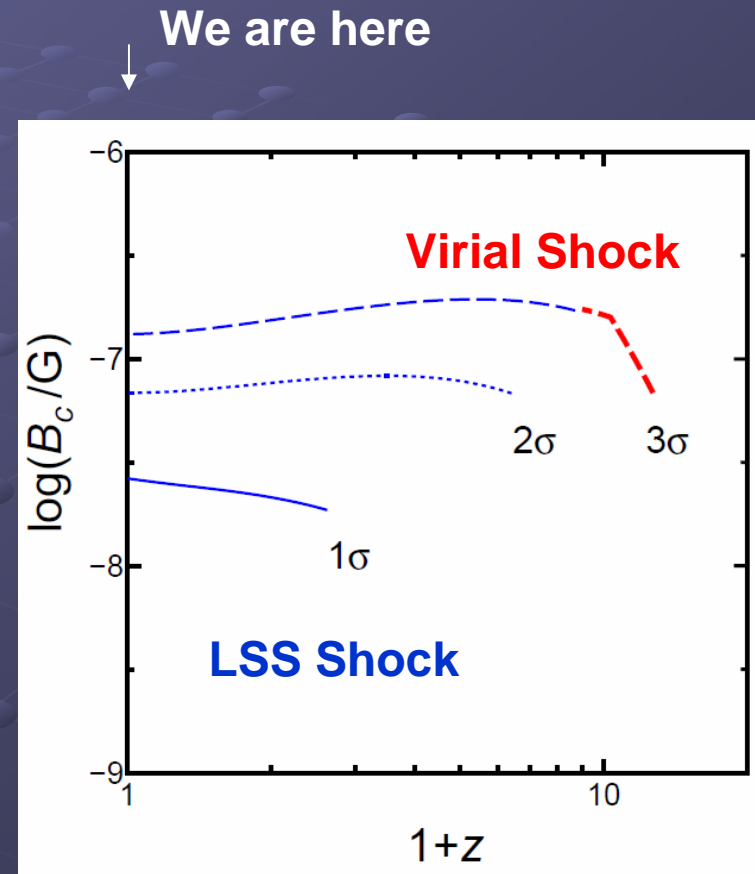
- If the Mach number is ≥ 2
 - Anisotropy of the particle velocity distribution function (PDF) is large enough

$$B_{\text{sat}} \approx \chi_P v \sqrt{2\pi n_p m_p}$$

- v : shock velocity, n_p : proton density, m_p : proton mass (Kato2005)
- Correction factor, $\chi_P \sim 0.5$
 - From simulations (Kato 2005)
- We **assume** that the final magnetic field is $B_f \sim 0.1 B_{\text{sat}}$ (Silva et al. 2003)

Magnetic Fields Generated by the Weibel Instability

- Magnetic field strength
 - $B \sim 10^{-7} - 10^{-8} \text{G}$
 - Comparable to the current value
 - Strong amplification is not required
- Almost no evolution
 - In contrast with the dynamo theory
- Strong magnetic fields in the early Universe
 - May affect the formation of early generation of stars and proto-galaxies



電流の生き残り問題

● Alfvén current, $I_A (=m c^2 v / e)$

- 電流自身が作る磁場で許される最大電流
 - これ以上大きくなると磁場が電流粒子の直進を妨害する

● 電流が作る磁場

- $B \sim 2I_A / (r c)$
 - I_A は一定値
- 電流(フィラメント)の半径 r が大きくなると、磁場は弱くなってしまふ
 - $r \sim 10^{10}$ cm (ワイベルでできた磁場)
 - $r \sim 10^{21}$ cm (銀河スケール)
 - 弱くなるタイムスケールは天体の進化のタイムスケールよりはるかに短いと考えられる
 - ダイナモが効き出すまでもたない？

温度勾配でのワイベル 不安定

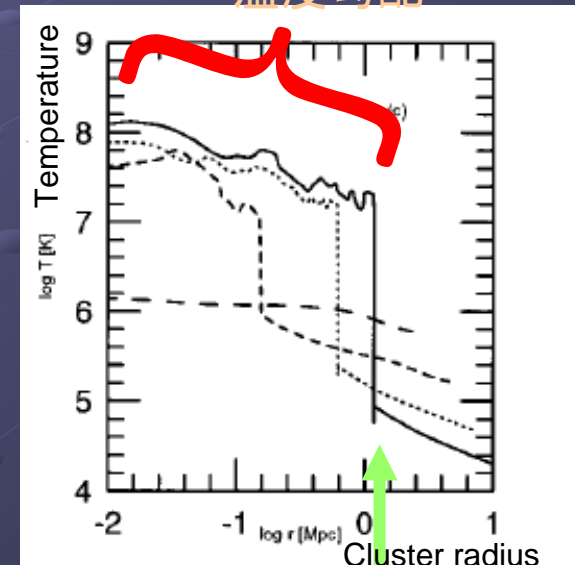
温度勾配でのワイベル不安定

- 衝撃波でのワイベル不安定でできた磁場は時間と共に減少する可能性

- 衝撃波の下流
- 何らかのミクロな物理によって減少がとめられる可能性もあるが、よく分からない

- しかし、そういった知られていないミクロな物理がなくても天体スケールの温度勾配によって磁場が維持される可能性がある

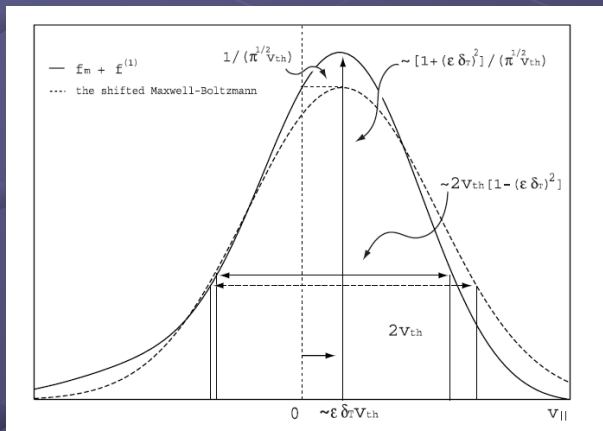
Cluster temperature profile 温度勾配



Takizawa
& Mineshige (1998)

温度勾配での速度分布関数

- 温度勾配があるところでは、温度勾配の方向への粒子の流れがある
 - 非等方な速度分布関数
 - ワイベル不安定性が発達 (Okabe & Hattori 2003)
 - 解析的な単純化したモデル。進化の初期のみ。クーロン衝突が効くと仮定している
 - **確認のための数値計算が必要**



温度勾配方向の速度分布関数の例
実線：温度勾配があるとき
破線：温度勾配がないときのもの
(を比較のためずらした)

Okabe & Hattori (2003)

2次元数値計算

- 電子、陽電子**無衝突**プラズマ

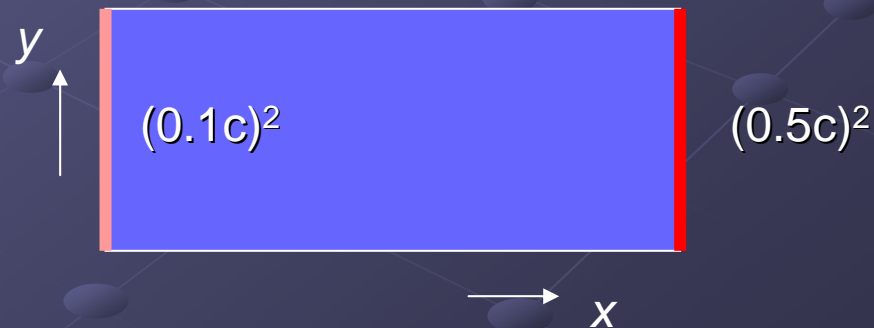
- クーロン衝突は起きない

- 初期条件

- 右端の温度(粒子の速度分散)が $(0.5c)^2$ 、左端が $(0.1c)^2$
- 温度が x に linear に変化。等圧になるように粒子分布を決定
 - 左側の方が密度が高い

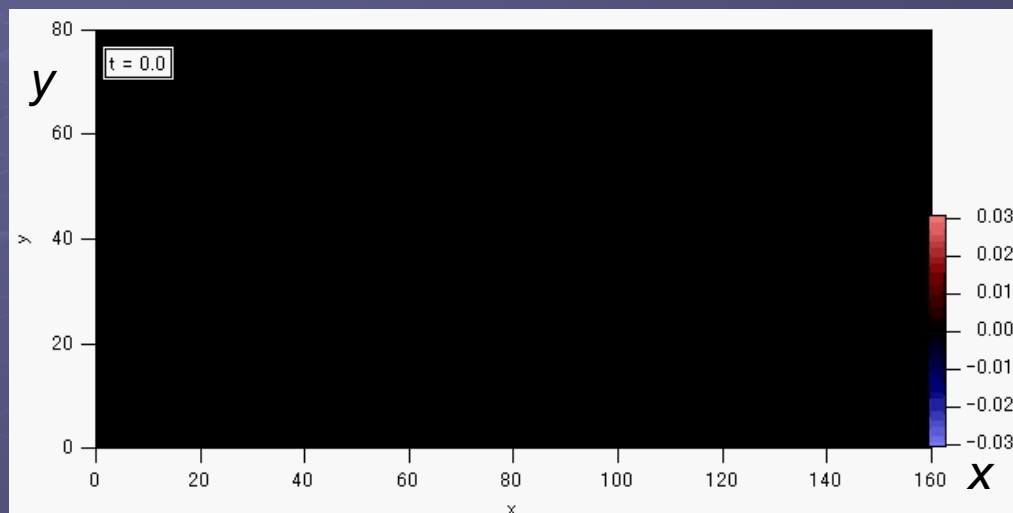
- 境界条件

- y 方向: 周期境界条件
- x 方向: 温度壁
 - 反射する粒子に $(0.5c)^2$ 、 $(0.1c)^2$ の温度を与える(マクスウェル分布)

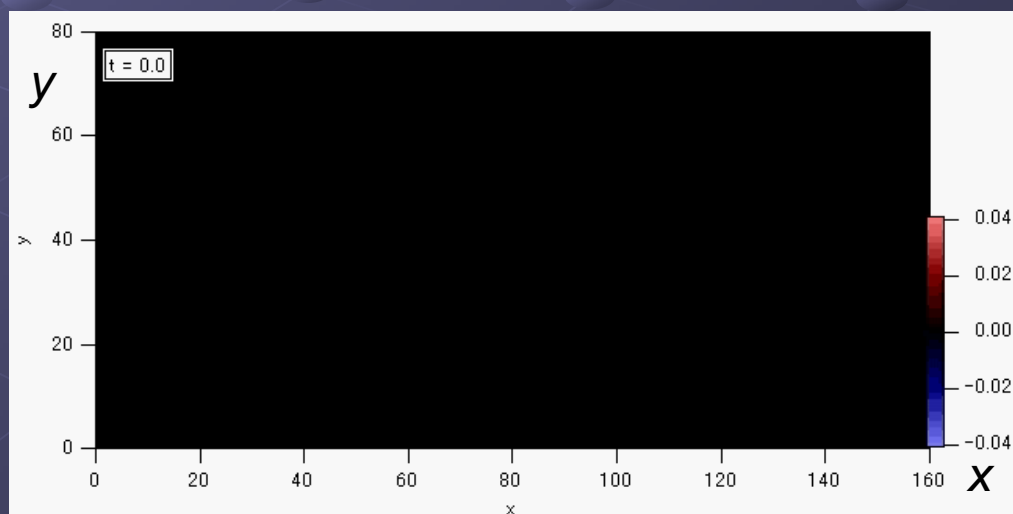


計算結果

● z 方向の電流密度



● y 方向の磁場



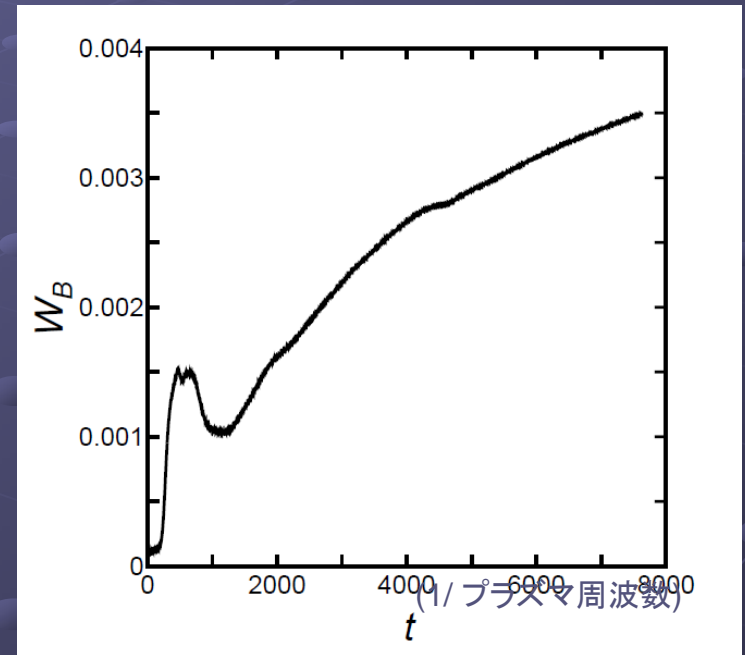
Wall

Wall

磁場のエネルギーの変化

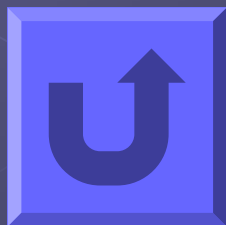
- 最初ワイベル不安定性が急発達
 - 無衝突なので粒子は全体として右へ移動
 - 早い粒子ほどより右へ
 - それらの粒子と一緒に動く系から見ると x 方向の速度分散は小さい
 - 非等方な速度分散
- シート電流ができる
 - 磁場のピーク
- プラズマの混合が進み一度減少
- シートが丸くなり小さくなることで、再び磁場が強くなる

総エネルギー中の
磁場のエネルギーの割合



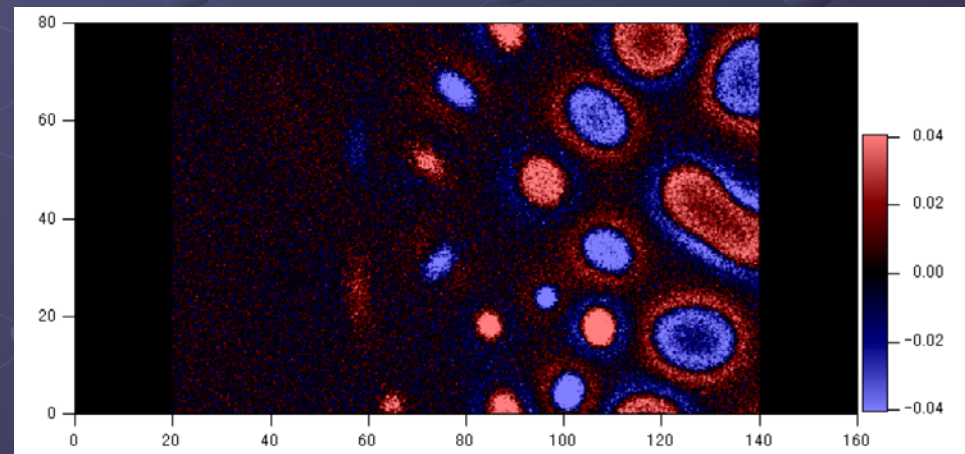
フィラメントの最終状態

- シートは丸くなりフィラメントになる
 - 磁場が強くなるのでフィラメントの周囲に起電力が発生
 - 帰還電流(逆方向の電流)が発生
- 帰還電流は磁場を遮蔽する
 - フィラメント間に電磁力が働かない
 - フィラメントの合体が起きない
 - **定常状態**



y ↑

$t=5000$ での z 方向の電流密度



x ($c/$ プラズマ周波数) →

衝撃波でのワイベルとの違い

● 衝撃波

- 速度分散は温度**勾配方向**(衝撃波面の法線方向、1次元)に大きい
- 最初からフィラメント。合体とともに太くなる。**シートはできない**
- 帰還電流ができない
 - 帰還電流が発生すべき領域がフィラメントに飲み込まれる
- フィラメントの合体が続き、磁場がすぐ弱くなる可能性
 - 衝撃波後方で、衝撃波から離れるとすぐ弱くなる

● 温度勾配

- 速度分散は温度勾配**垂直方向**(2次元)に大きい
- **最初シートができ**、それが縮まり、丸くなってフィラメント
- 帰還電流ができる
- フィラメントの合体が起きなくなる。**磁場は弱くならない**
 - 温度勾配がある限り(天体の進化のタイムスケール)磁場は持続する可能性

Okabe & Hattori (2003) との違い

● Okabe & Hattori (2003)

- プラズマ粒子はクーロン衝突を起こす
 - 速度分布関数は衝突に依存

● 今回の研究

- プラズマ粒子のクーロン衝突は無視している
 - 無衝突プラズマ

● 無衝突プラズマでも磁場ができる

- クーロン衝突は本質ではない

天体現象に応用するには

- 温度勾配は多くの天体にある
 - 銀河、銀河団、超新星残骸、ガンマ線バースト....
- それらの温度勾配は今回の計算よりかなり小さい
 - そのまま応用できるか？
- 磁場のスケールは天体スケールよりはるかに小さい
 - ラーモア半径程度
 - スケールを大きくするメカニズムが必要
- 地上で応用したほうがいいかも

まとめ

- まず衝撃波でのワイベル不安定性を調べた
- 無衝突プラズマ中に磁場が発生した
 - フィラメント状の電流
 - 電流の周囲に磁場
- 銀河、銀河団形成時の衝撃波で発生した場合
 - ~ 0.1 から $0.01 \mu\text{G}$ の磁場ができる
 - 強い増幅は必要ない
- 長期的な進化についてはまだ定説がない

まとめ

- 温度勾配でのワイベル不安定性も調べた
- 衝撃波のワイベル不安定性と異なる進化
 - まずシート電流ができる
 - シート電流が丸まり、フィラメントになる
 - フィラメントの周囲に帰還電流ができる
- 帰還電流がフィラメントの合体を妨げる
 - 衝撃波でのワイベル不安定性と異なる
 - 磁場が長期間保存する
- 天体現象への応用はさらに考察が必要