

天体プラズマにおける粒子加速機構

無衝突系粒子シミュレーション

星野真弘

理学系研究科・地惑惑星科学専攻

内容

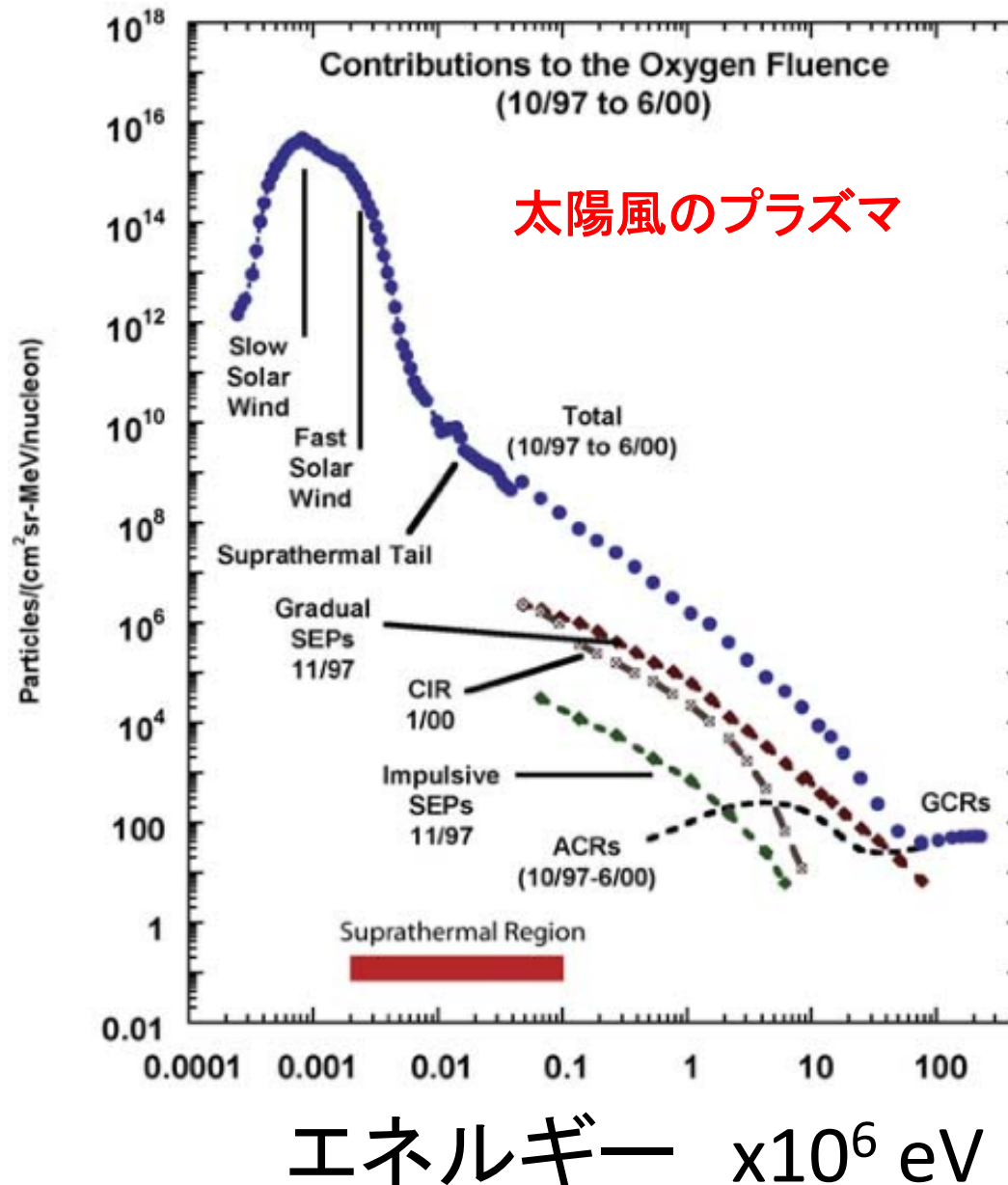
**** PIC (Particle-In-Cell) シミュレーション ****

- プラズマ輸送係数の研究(MHDでは現象論的に扱う粘性、電気抵抗、熱伝導に関わる物理)
- 非熱的プラズマ(局所的熱平衡ではない物理)
- 電子とイオンのエネルギー分配
- 、、、

- 宇宙での高エネルギー粒子の観測
- 数値チェレンコフ問題
- 無衝突系での磁気回転不安定(Magneto-Rotational Instability) と粒子加速

太陽風プラズマのエネルギー分布

粒子の数

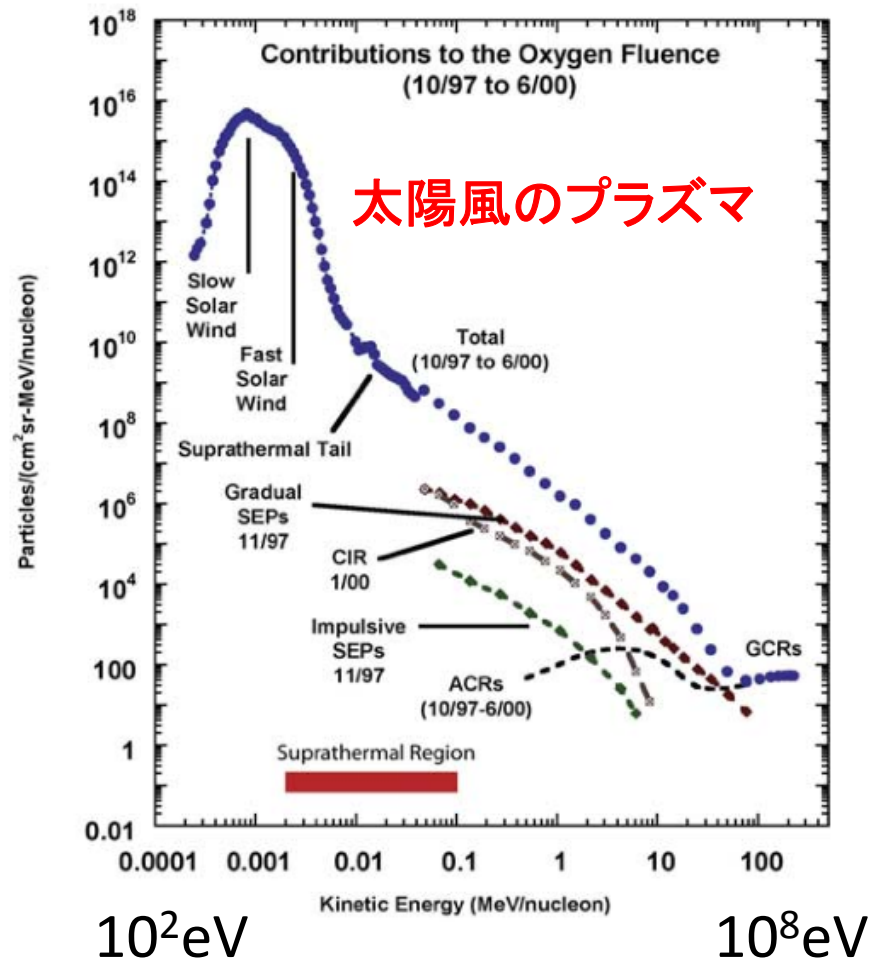


人工衛星を用いて
惑星間空間でプラズマ
のエネルギーを測定

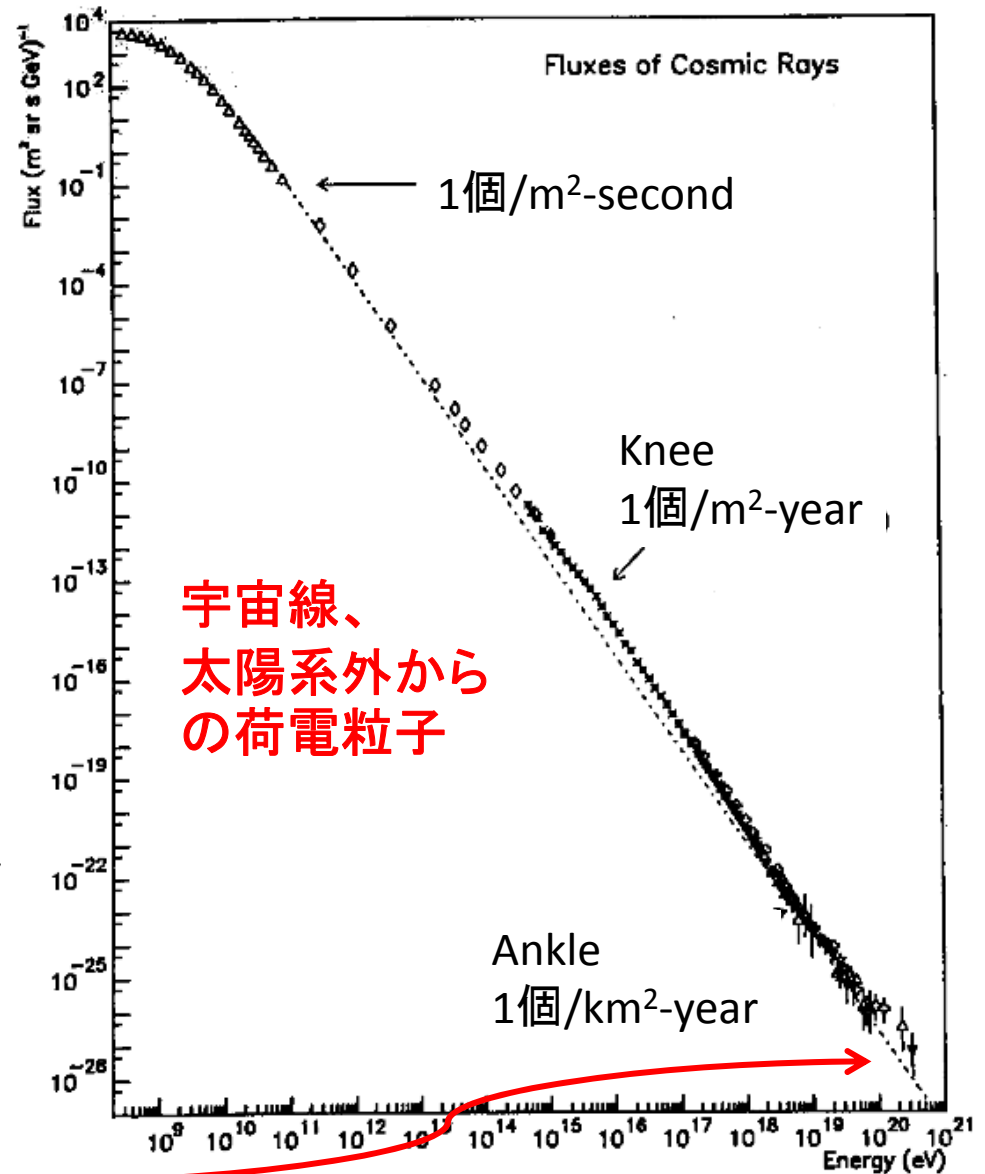
太陽風の速度
 $10^3 \text{ eV} \sim 300 \text{ km/s}$

$10^9 \text{ eV} \sim m_p c^2$

$5 \times 10^5 \text{ eV} \sim m_e c^2$



太陽風のプラズマ



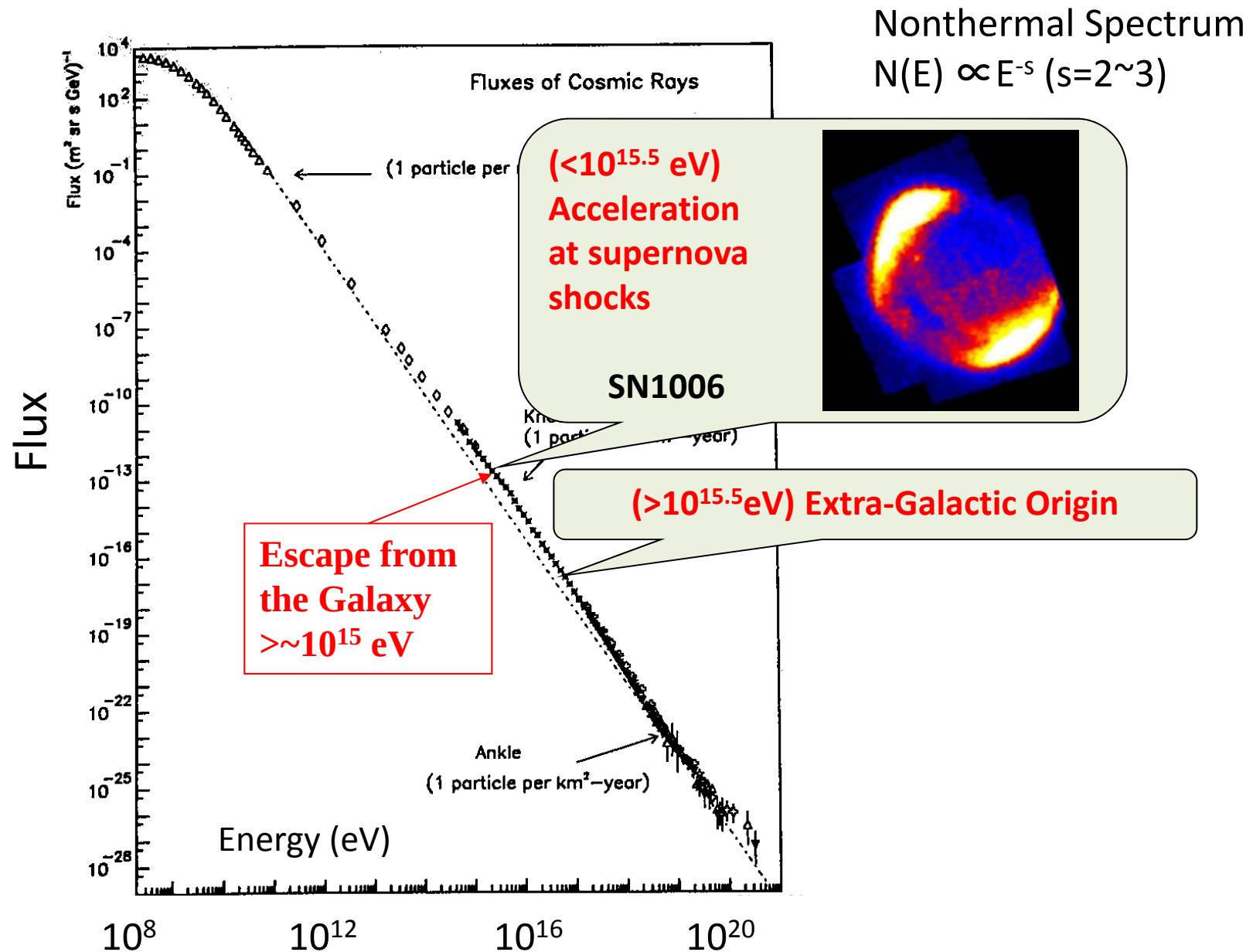
宇宙線、
太陽系外から
の荷電粒子

10²¹eV => 宇宙最高エネルギー

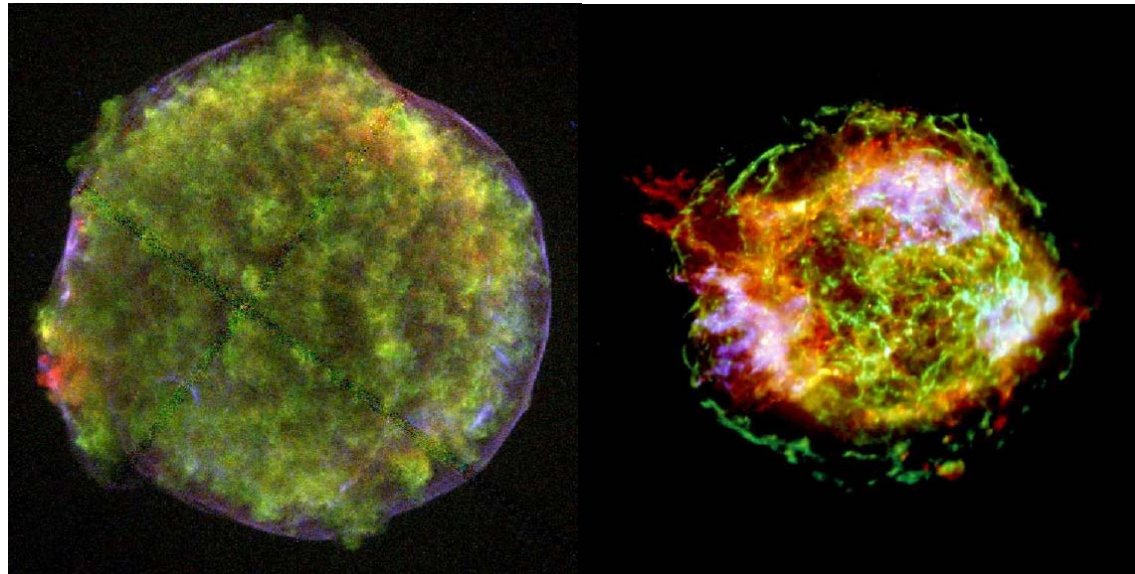
10⁹eV

10²¹eV

超新星爆発衝撃波の加速



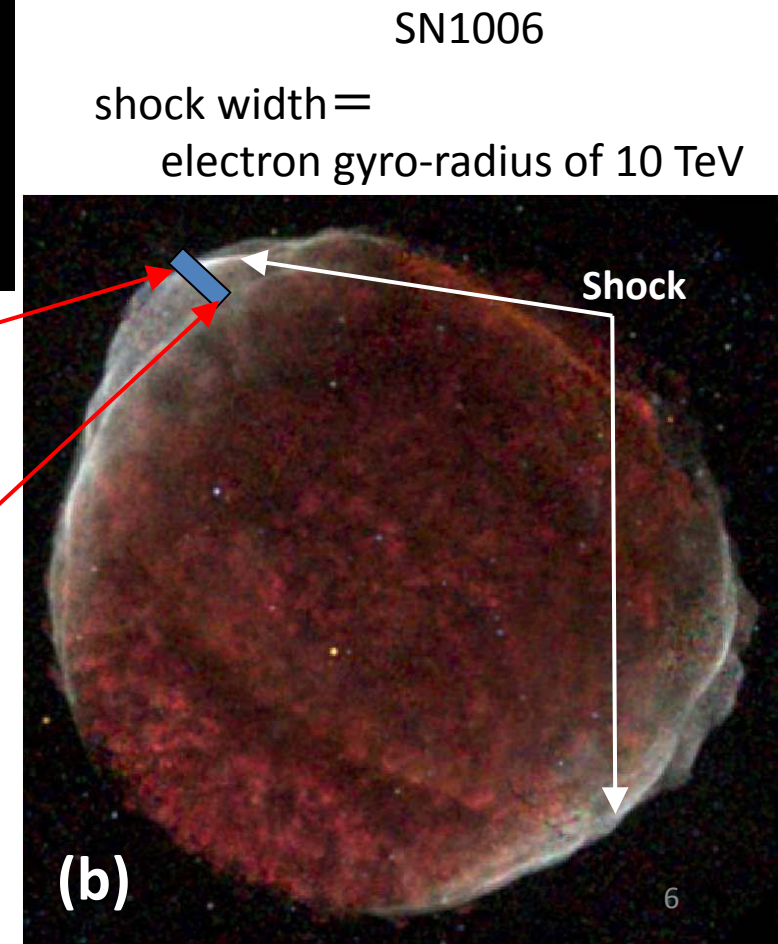
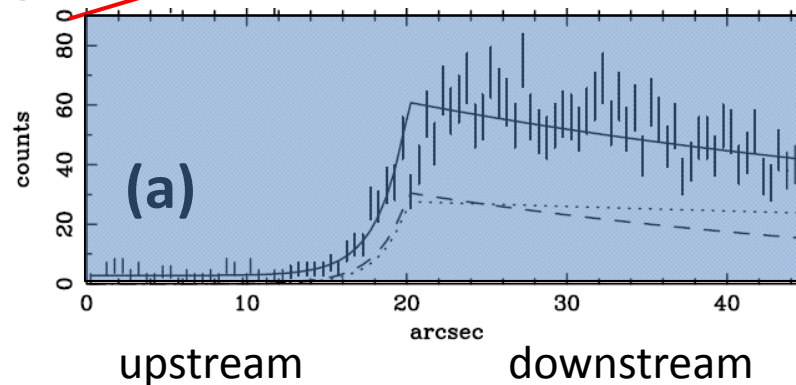
超新星爆発の衝撃波の観測



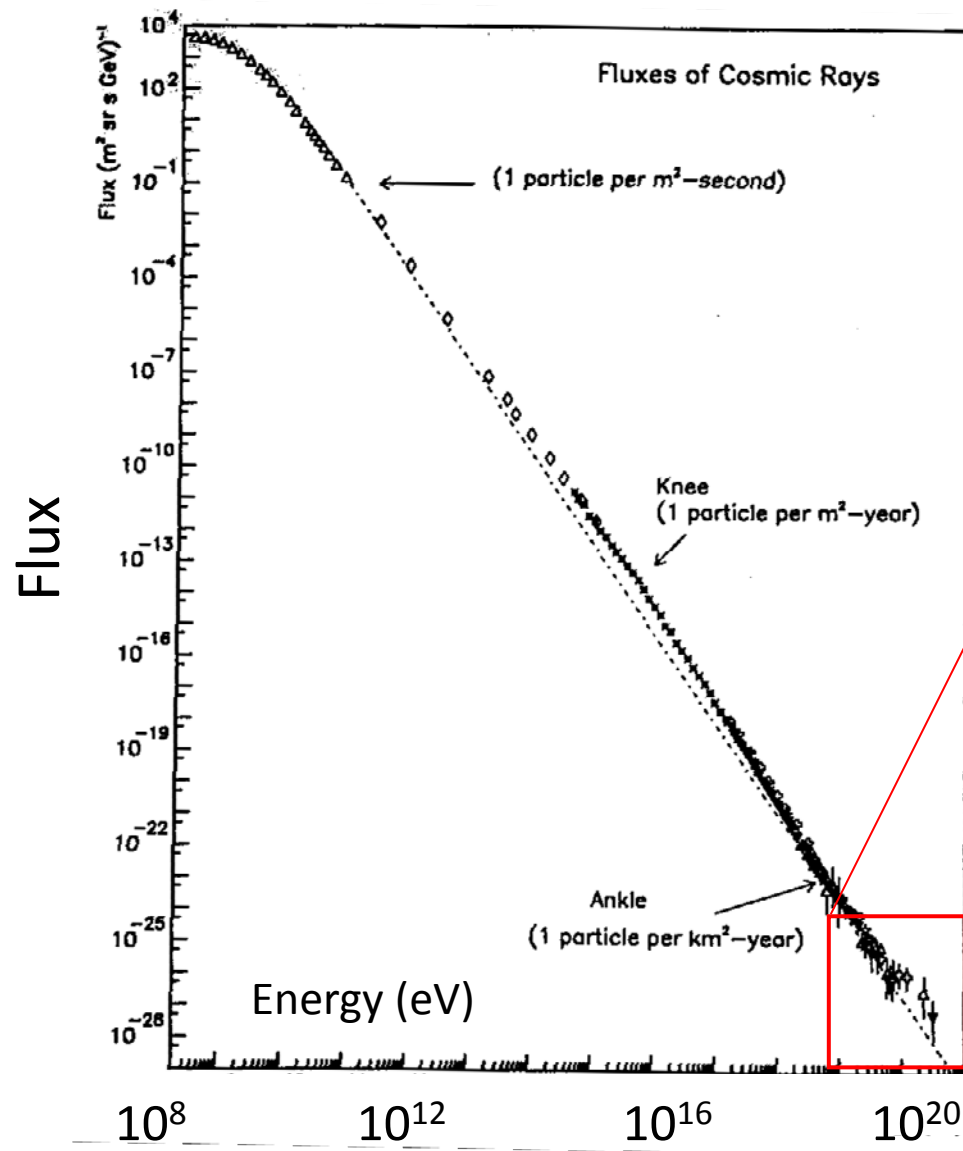
Tycho (1752)

Cas A (1680)

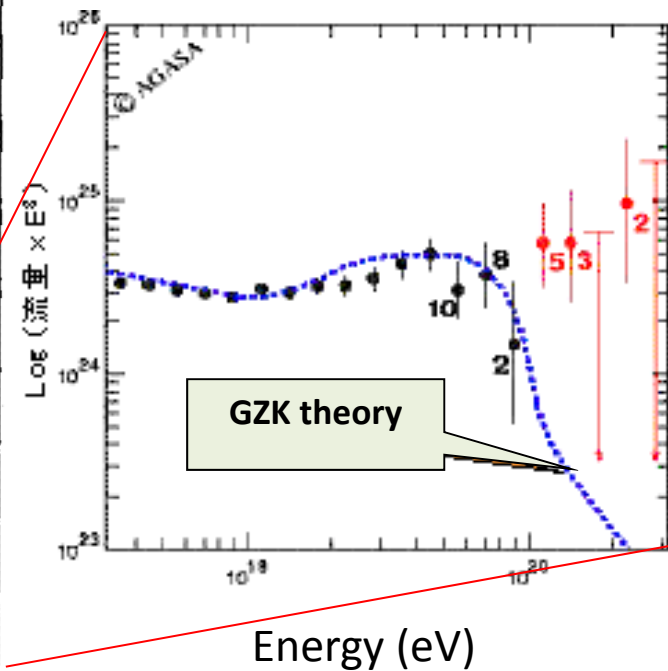
高エネルギー粒子の衝撃波
面からの拡散→Fermi加速



宇宙最高エネルギーの宇宙線 ($10^{20}\text{eV} = 16\text{J}$)



GZK Effect: extra-galactic cosmic ray cannot be observed due to the interaction of 3K cosmic background radiation



Inner Structure of an Active Galaxy

活動銀河核

0.1 lightyears

Shock

Relativistic Jet

相対論的衝撃波

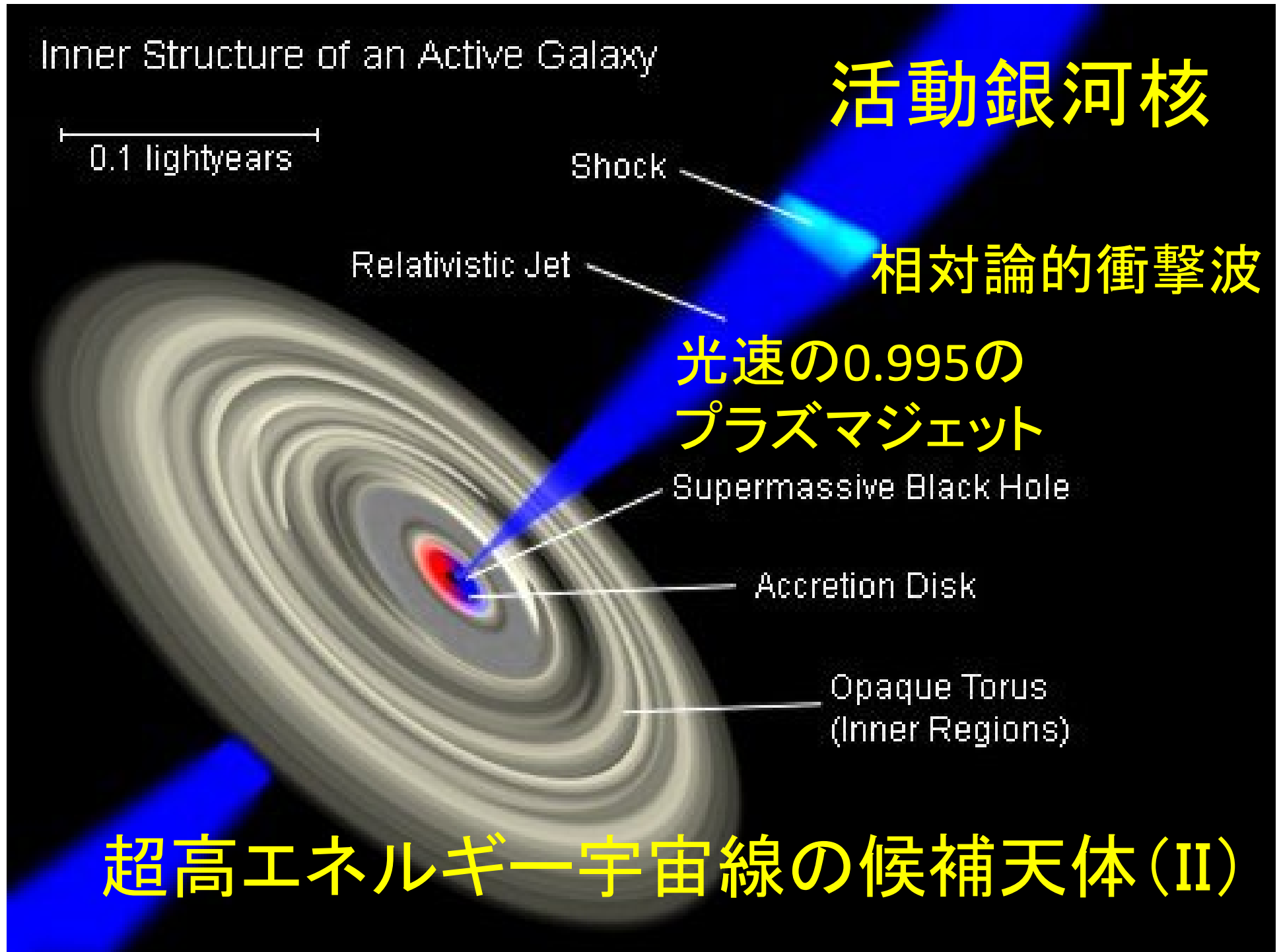
光速の0.995の
プラズマジェット

Supermassive Black Hole

Accretion Disk

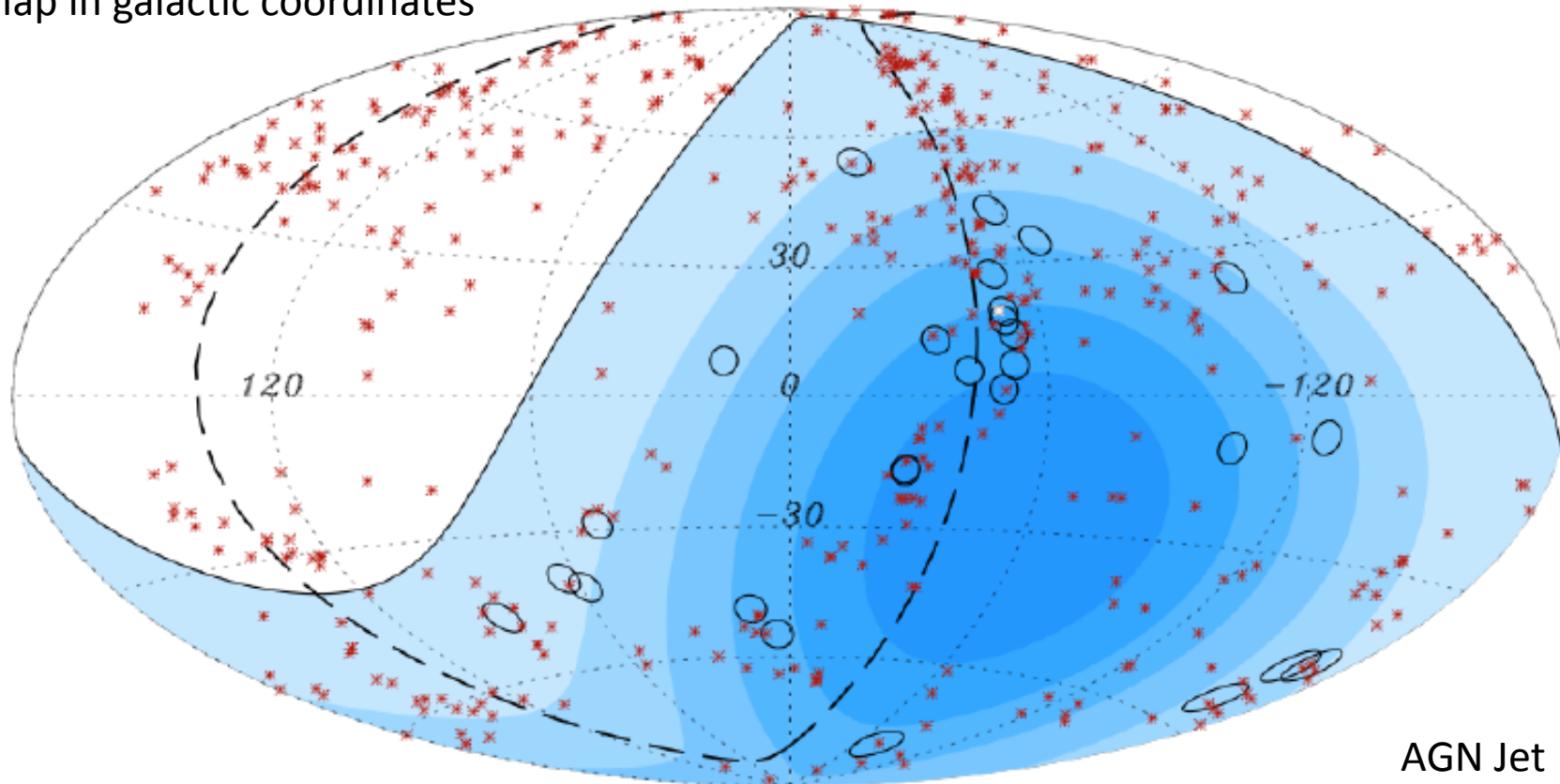
Opaque Torus
(Inner Regions)

超高エネルギー宇宙線の候補天体(II)

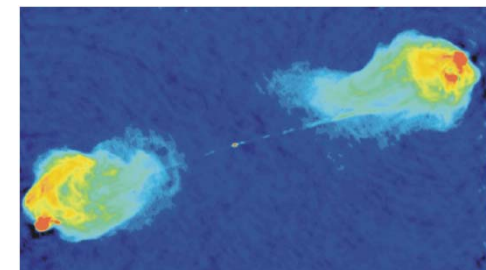


Auger Cosmic Ray Observation

sky map in galactic coordinates



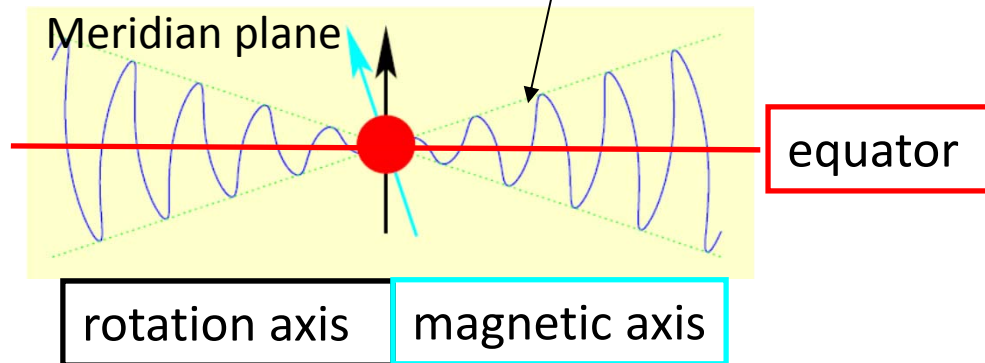
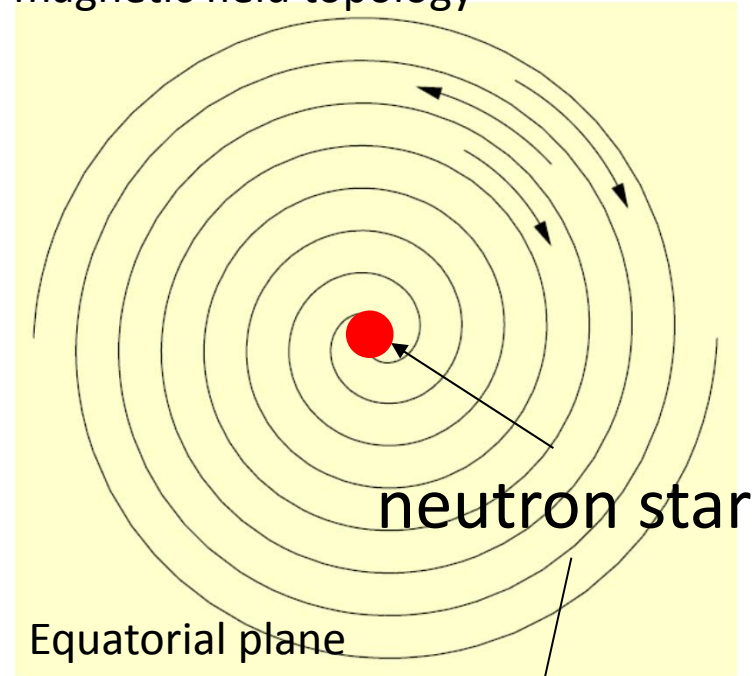
- Arrival Direction of $6 \times 10^{19} \text{ eV}$
- × Active Galactic Nuclei (AGN)



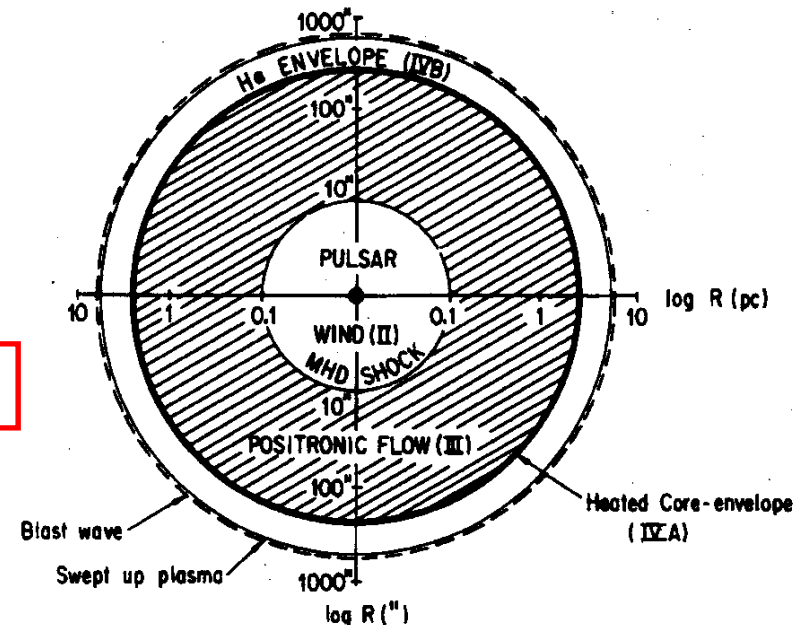
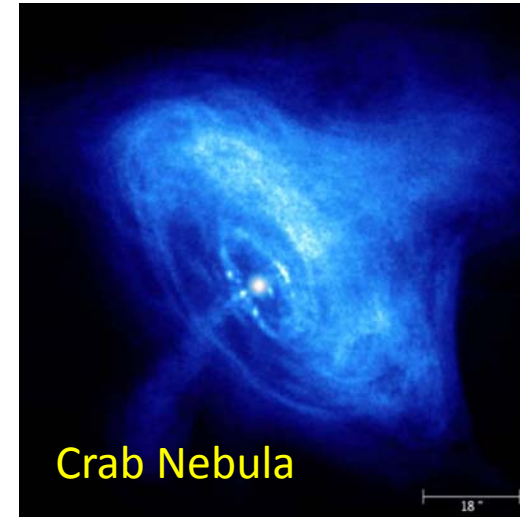
Science (2007)

Relativistic Shock/Magnetic Reconnection

magnetic field topology



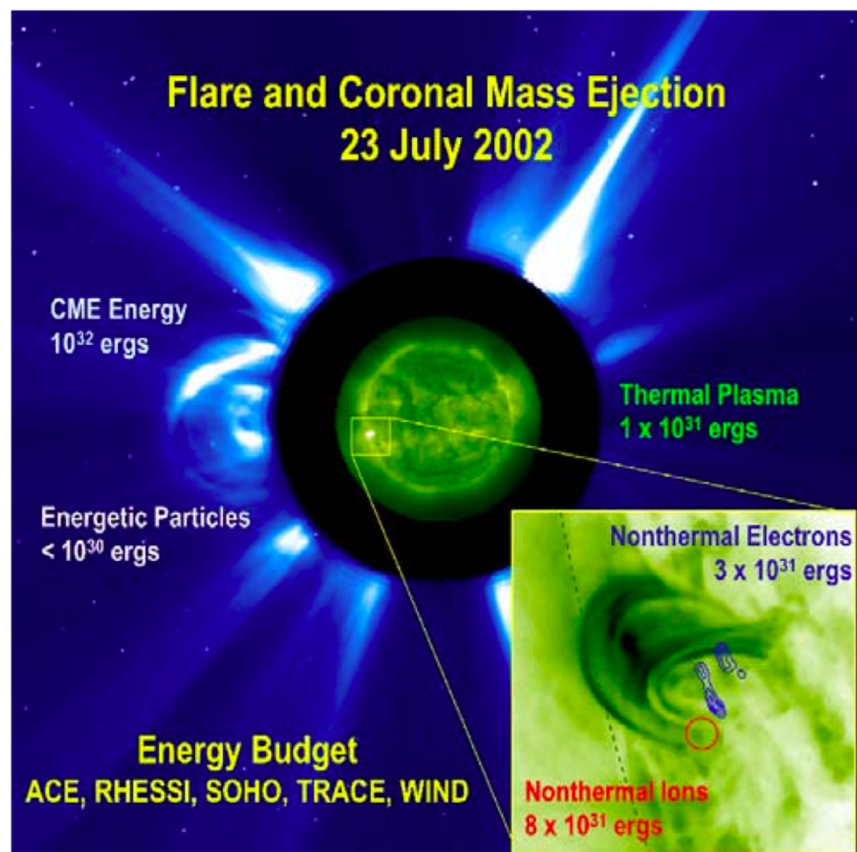
Kirk et al. PRL (2004)



Kennel & Coroniti, ApJ (1984)¹⁰

Energetic ions and electrons in solar flares

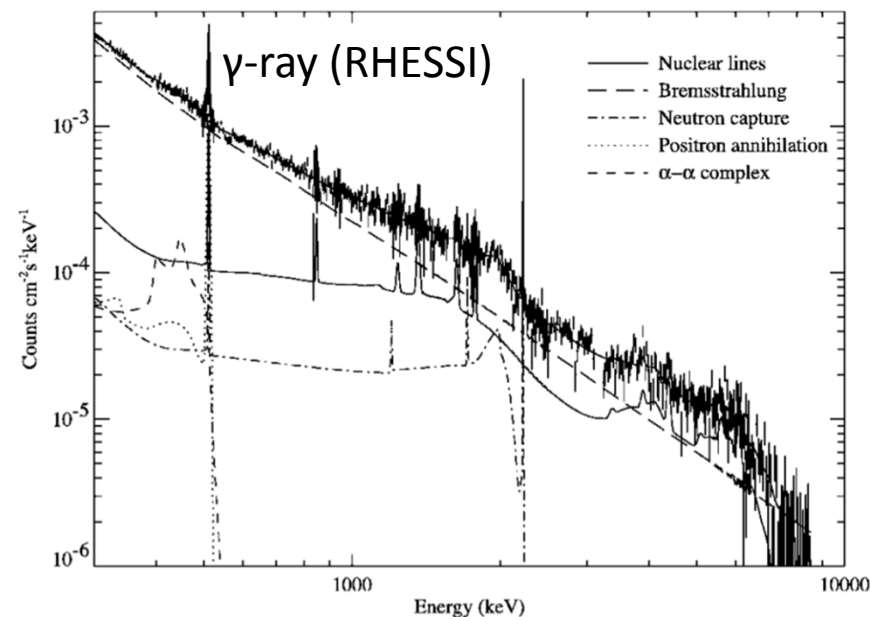
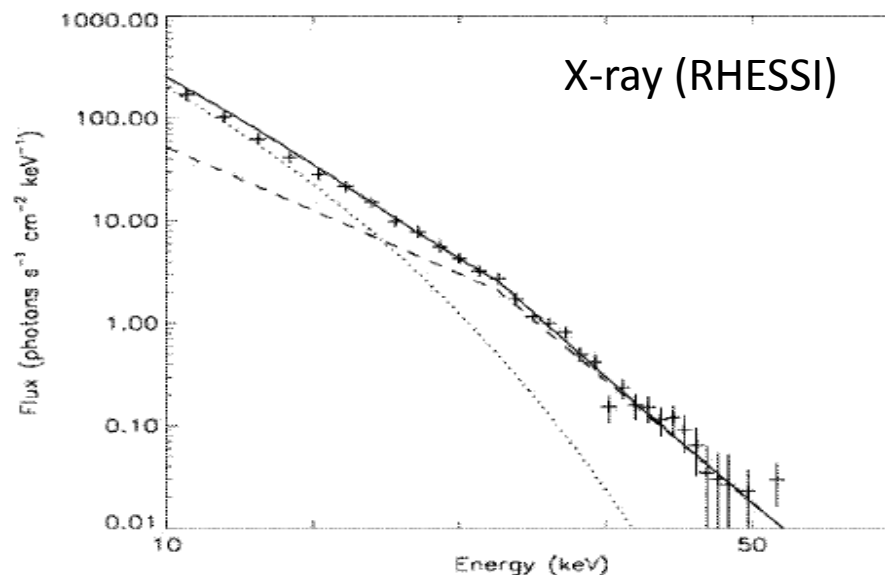
(GOES class X4.8)



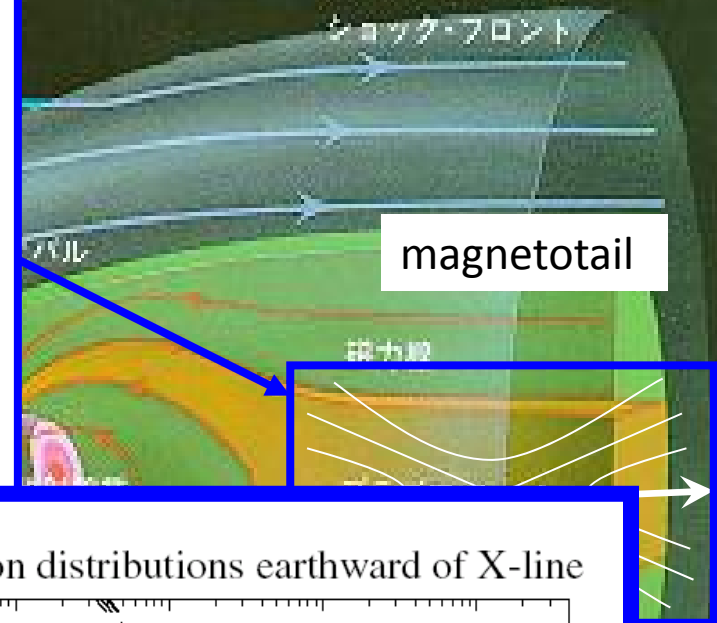
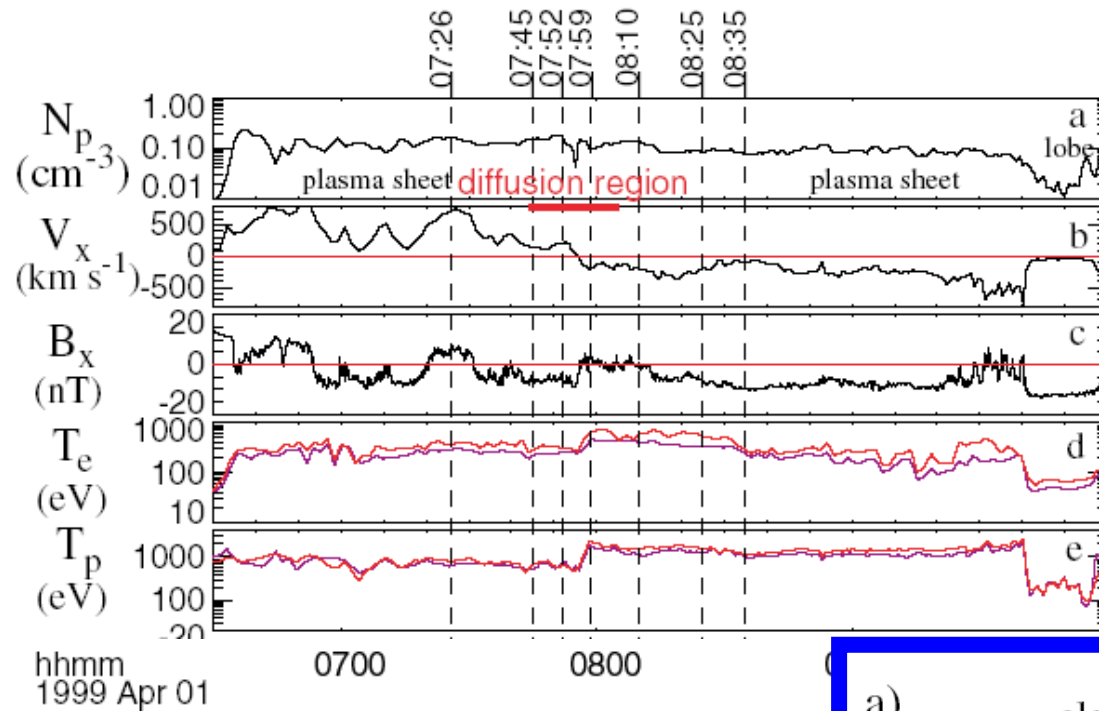
[Emslie et al., 2004]

electrons up to tens of MeV,
ions up to tens of GeV

[Lin et al., 2003]

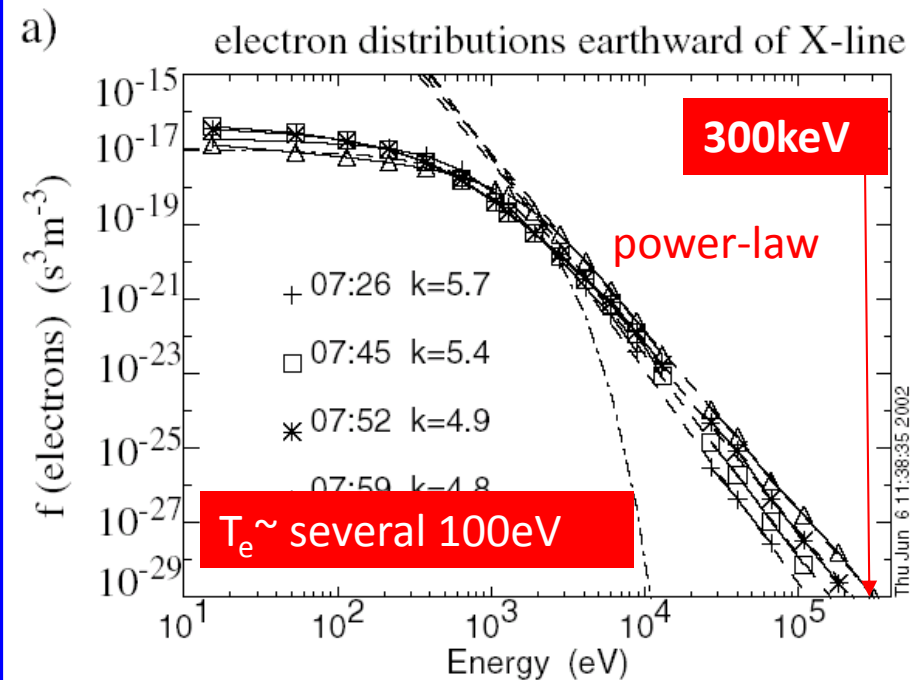


Wind Observation



Reconnection signatures

- flow reversal (V_x)
- weak magnetic field (B_x)
- hot electron & ion plasmas (T_e, T_i)



宇宙での高エネルギー粒子

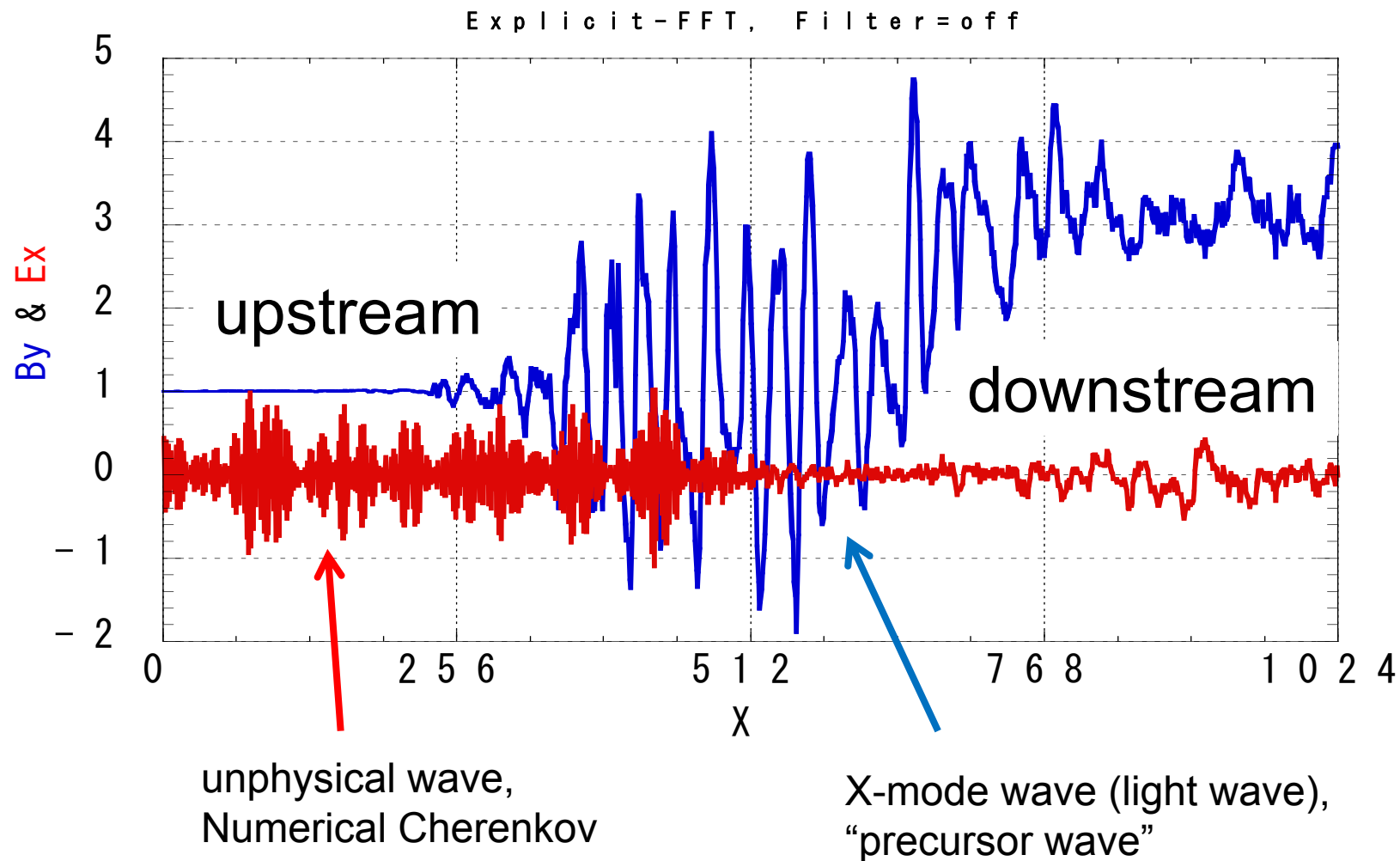
- 遠くの宇宙での粒子加速
 - 超新星爆発にともなる非相対論衝撃波
 - 宇宙ジェットでの相対論的衝撃波
 - パルサー星雲での相対論的衝撃波
 - (何となく運動エネルギー変換と思われる)
- 太陽系での粒子加速
 - 太陽フレアでの磁気リコネクション
 - 地球磁気圏/オーロラサブストームでの磁気リコネクション
 - (何となく磁場エネルギーの変換と思っている)

Relativistic Simulations and Numerical Cherenkov

M. Hoshino

Acknowledgements:
T. N. Kato and K. Nagata

2D Relativistic Shock Simulation



Simulation Parameters

- $NX*NY=1024*32$
- $NP(initial)=NX*NY*16$
- $\sigma=0.1$, $\gamma=10$, $m_i=m_e$
- $v_{th}/c = 0.02$, $L_{gyro}/\Delta x = 50$
- $c\Delta t/\Delta x = 0.2$
- time step = 4000
- CPU time @SX6 = 5min*4CUP (3.7 Gflops)
- Memory Size = 1.2 GB,

数値ノイズ（格子振動）の原因は？

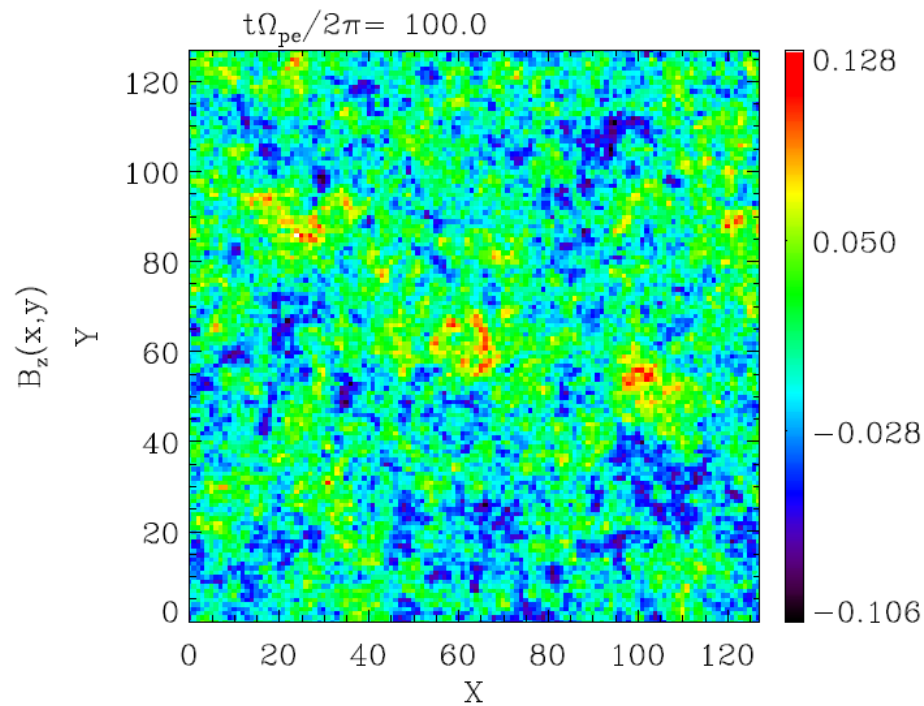
- ・空間の差分からくるのか？
- ・フーリエ空間ではどうか？
- ・1次元コードでは現れないのに、2次元/3次元コードではあらわれるのか？
- ・相対論的な流れ場があるときだけか？
- ・プラズマ温度が高い時は現れないのか？

Simulation Parameters

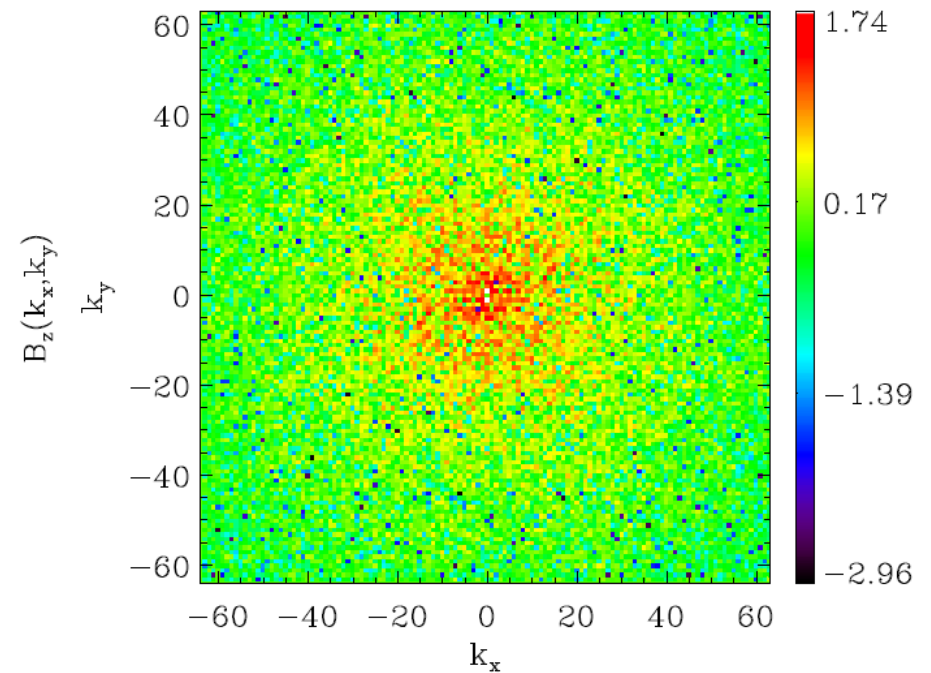
- $NX*NY=128*128$
- $NP(initial)=NX*NY*16$
- $\gamma=100-0.57$, $m_i=m_e$
- $v_{th}/c = 0.1$, $Debye/\Delta x = 1$
- $c\Delta t/\Delta x = 0.9$
- time step = 2000
- CPU time @Xeon = 40sec*6core
- FFT codes/ Finite Difference code
 - 2種類のFFT code
 - (a) Maxwell方程式の厳密解に基づくもの
 - (b) 空間微分だけをフーリエで置き換えたもの

Numerical Experiment (1)

Thermal Run, $V_b=0$



実空間

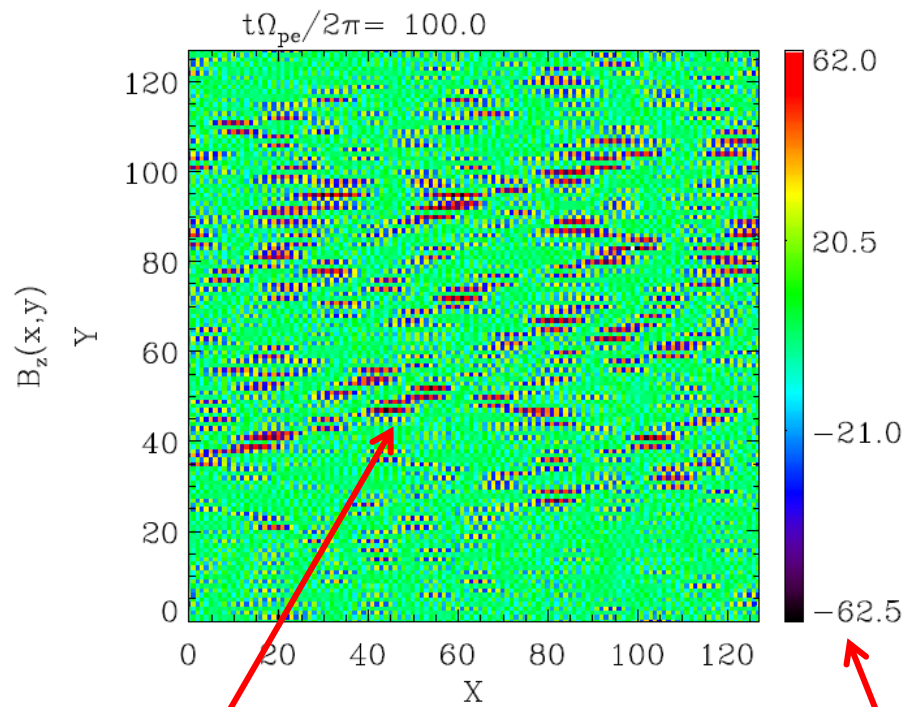


フーリエ空間

Numerical Experiment (2)

$$V_b=0.99995, U_b=100$$

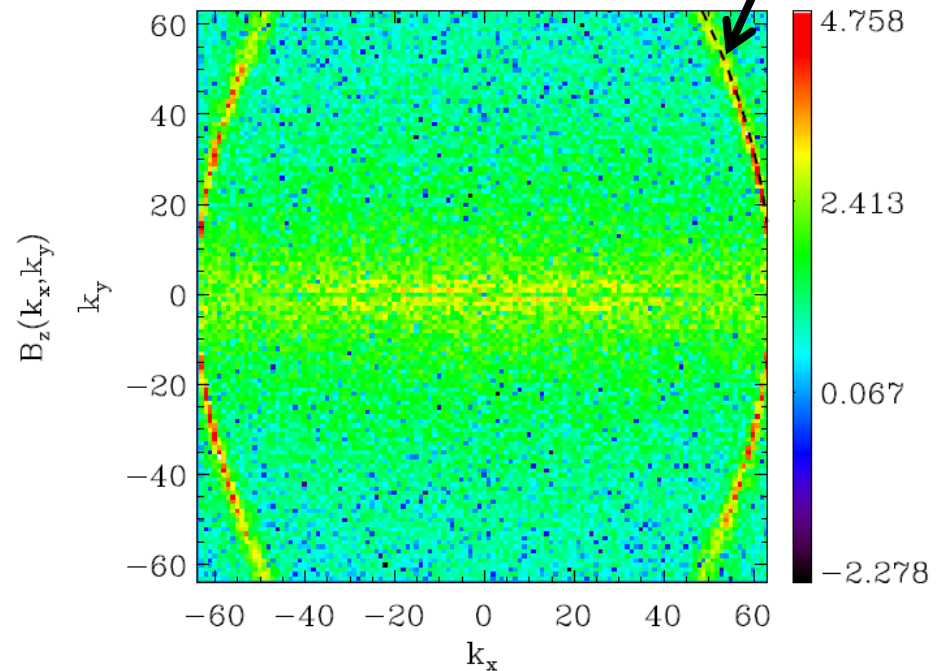
$$v_b^2(2\pi/\Delta - k_x)^2 = c^2(k_x^2 + k_y^2)$$



grid oscillation

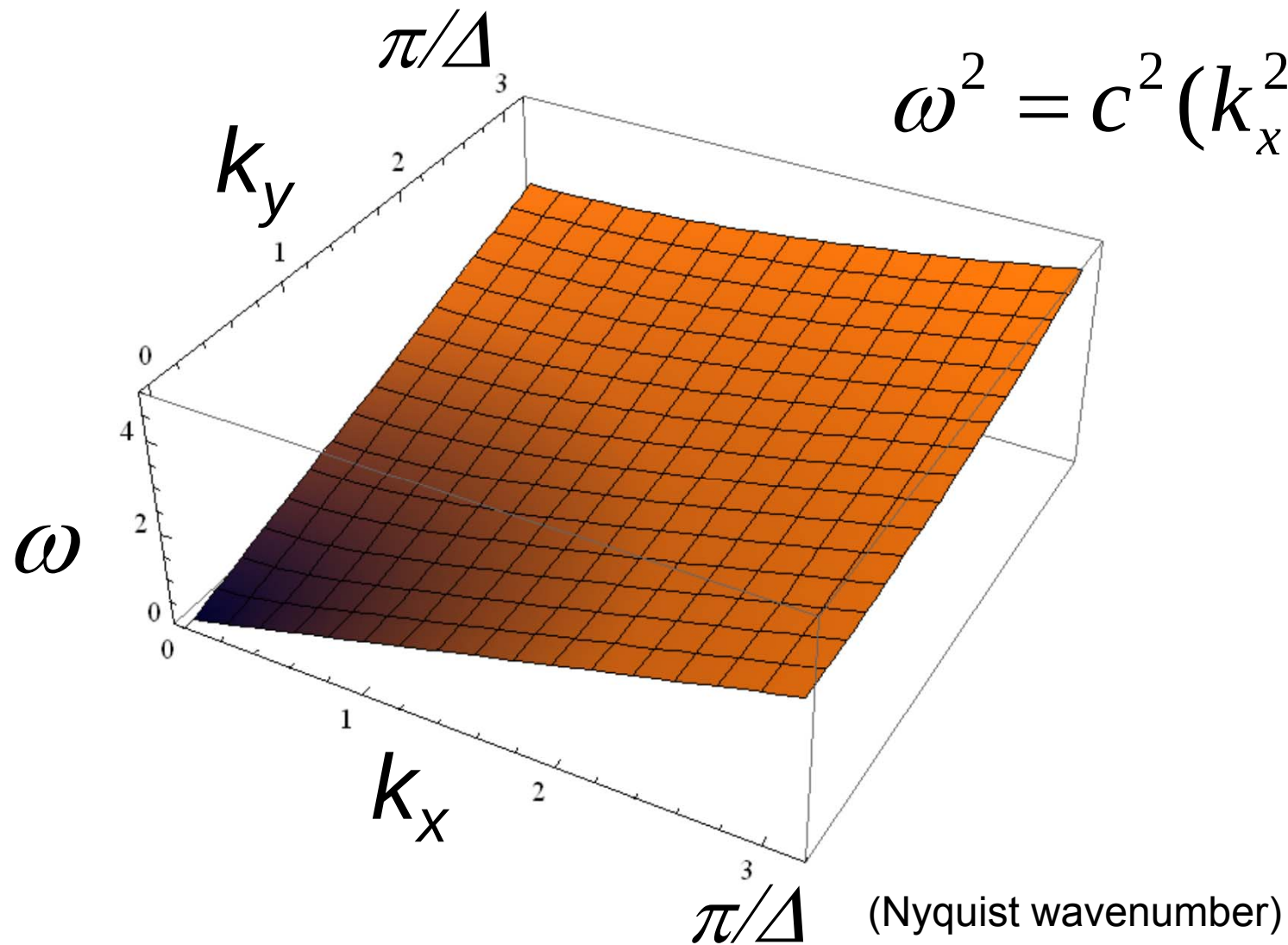
実空間

large amplitude!!

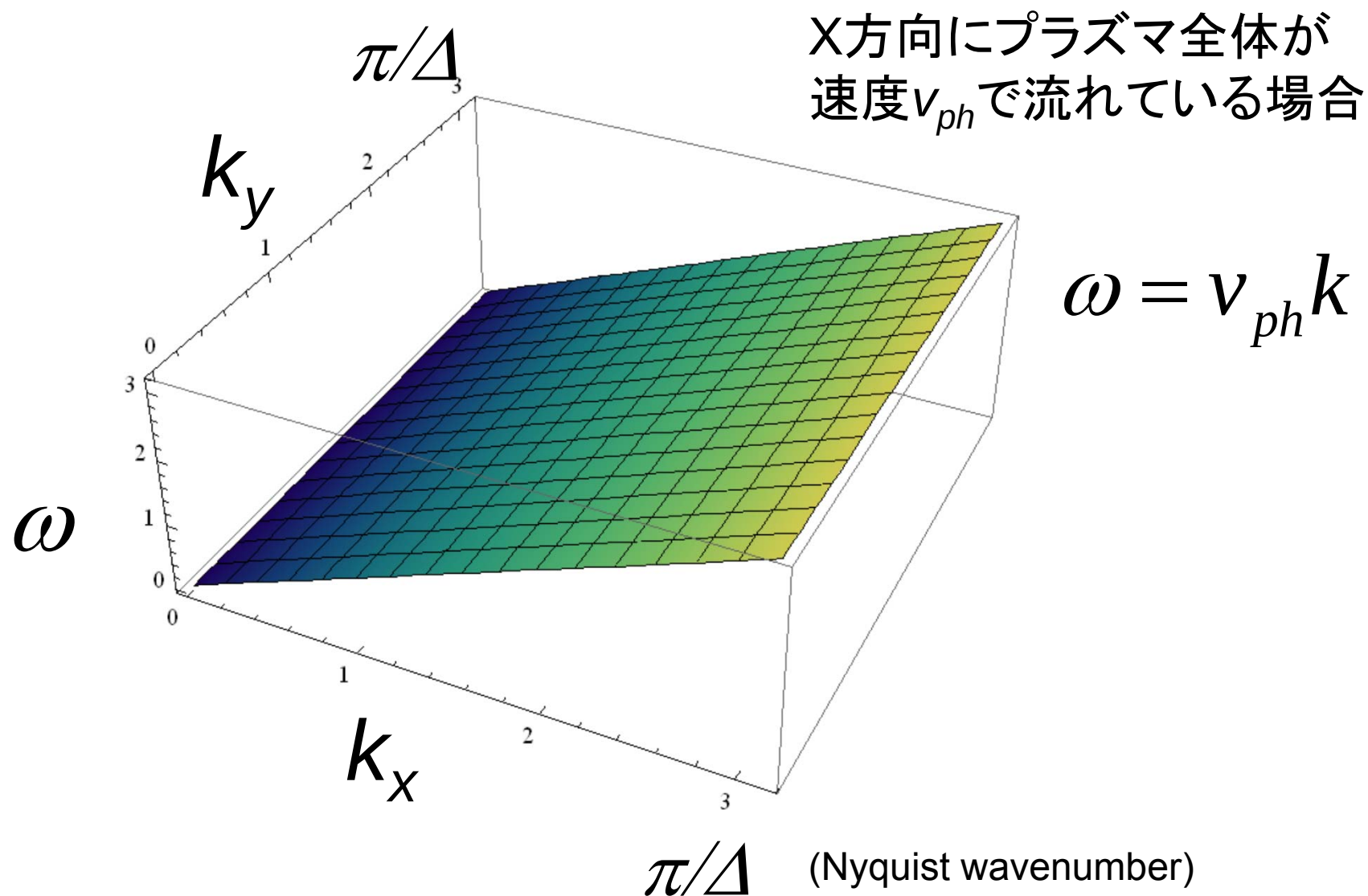


フーリエ空間

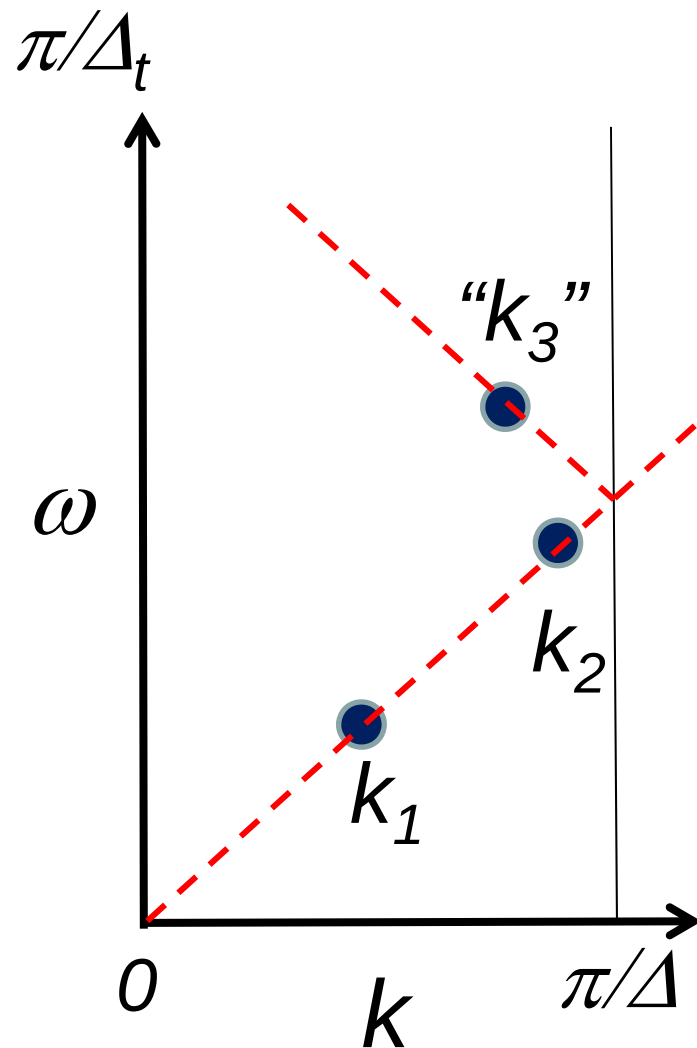
ω -k diagram for “light wave”



ω -k diagram for “entropy wave”



“aliasing”



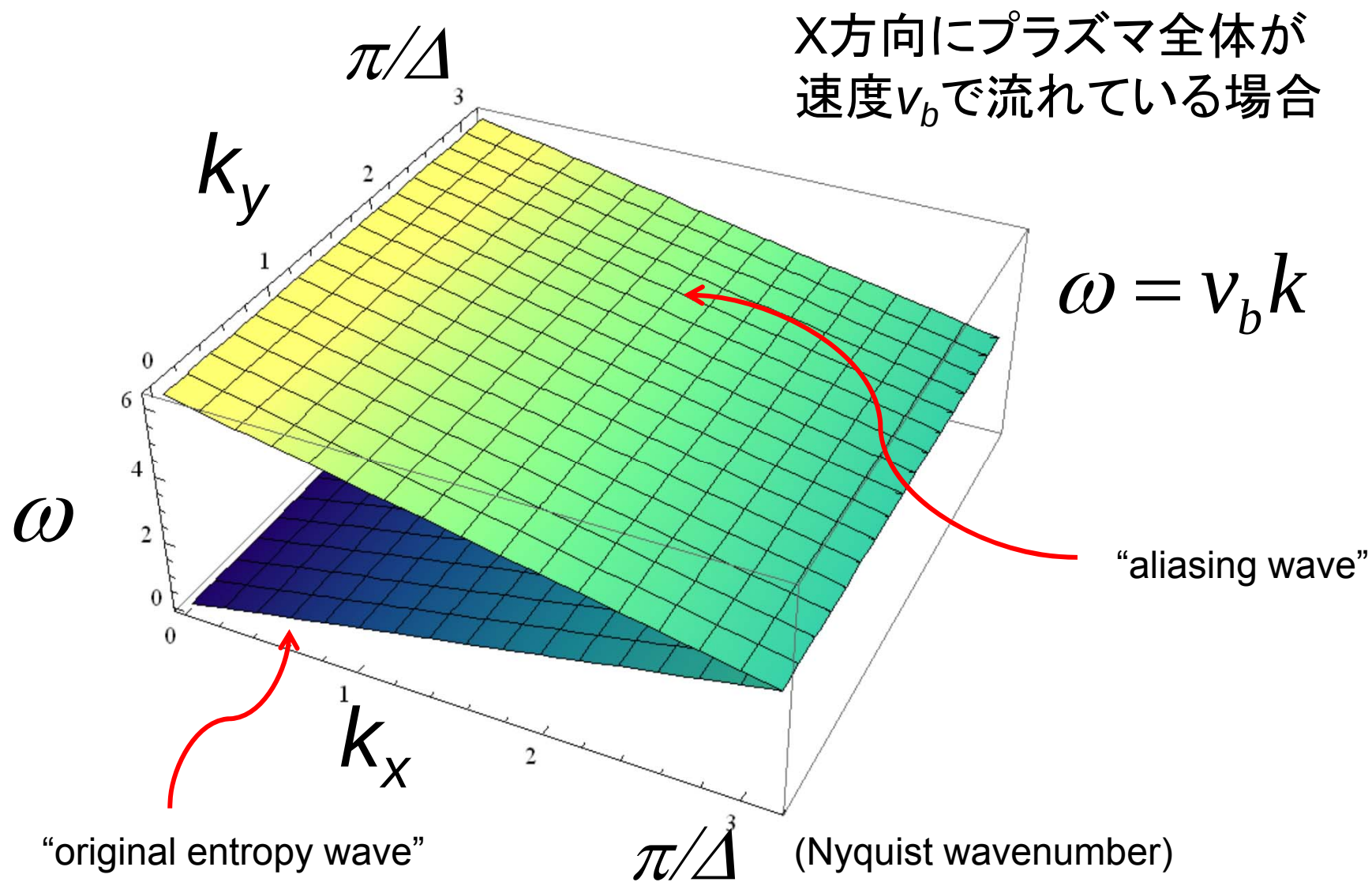
$$k_3 = k_1 + k_2$$

three wave coupling :

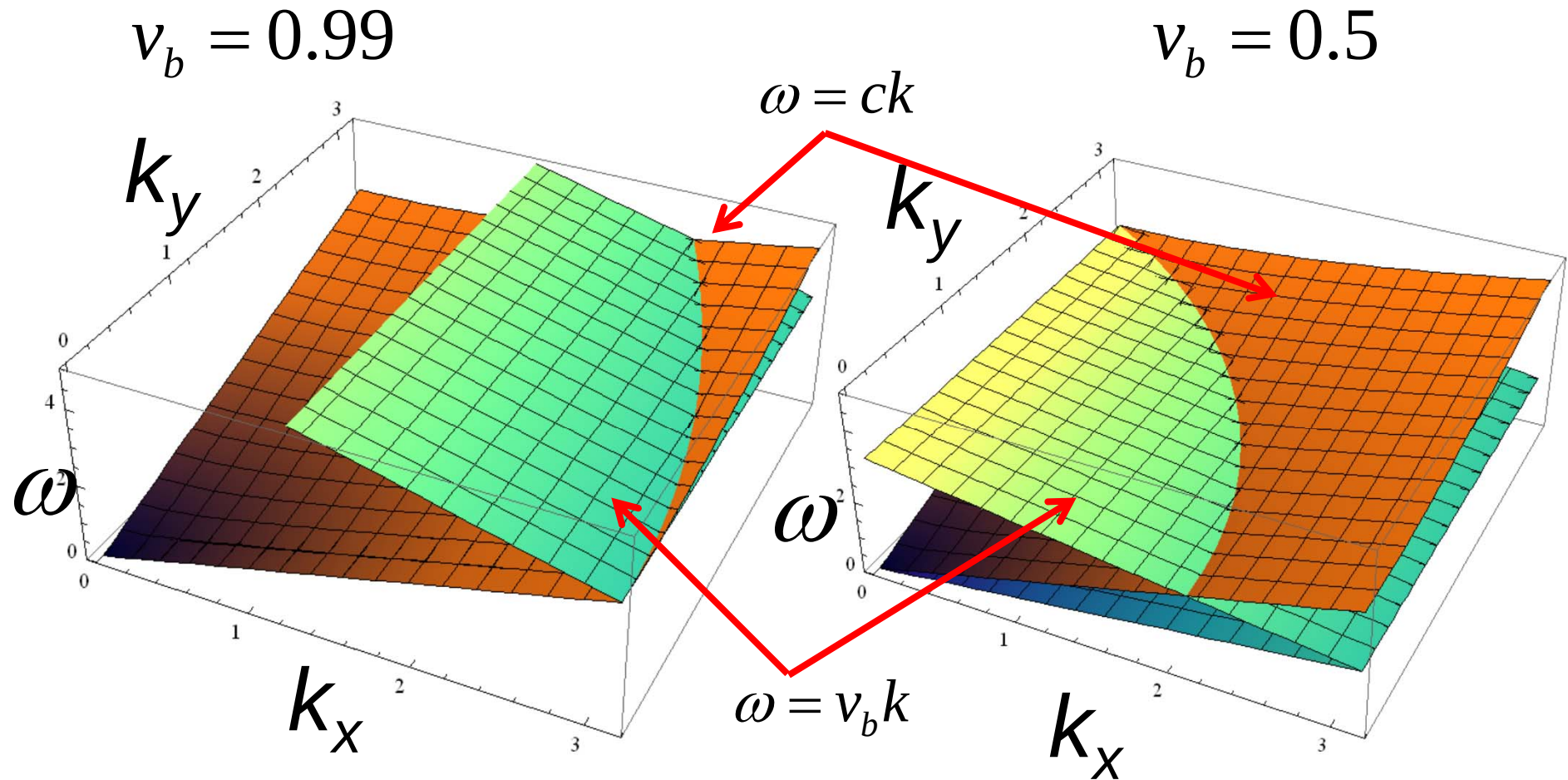
$$k_3 = k_1 + k_2,$$

$$\text{if } k_3 > \frac{\pi}{\Delta}, \text{ then } k_3 \Rightarrow 2\frac{\pi}{\Delta} - k_3$$

“entropy wave” + “aliasing wave”



resonance of “light” and “entropy” waves

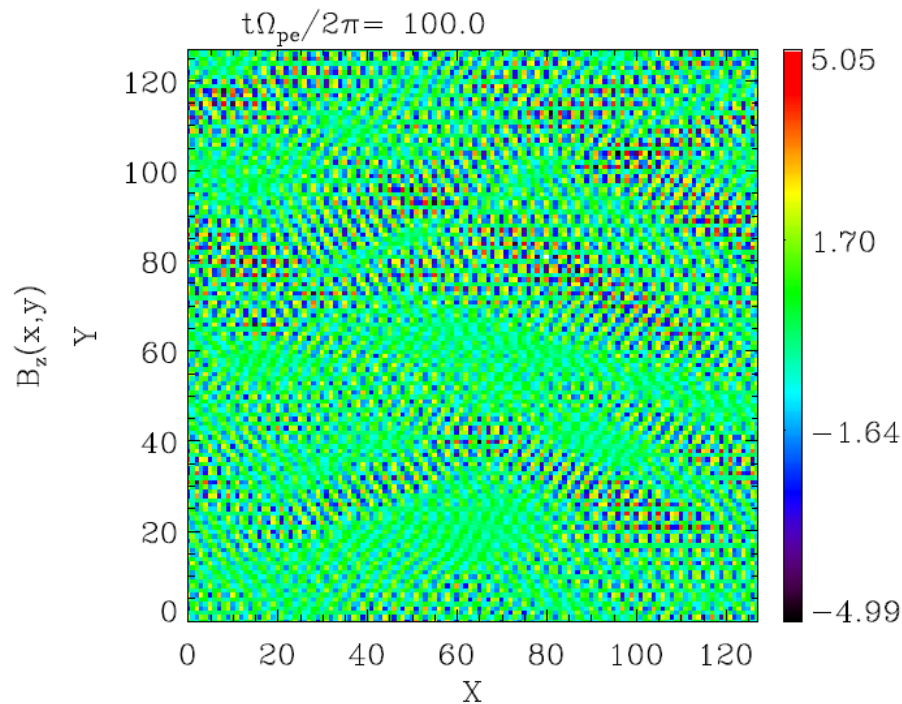


cross section : $v_b^2 \left(2\pi / \Delta - k_x \right)^2 = c^2 \left(k_x^2 + k_y^2 \right)$

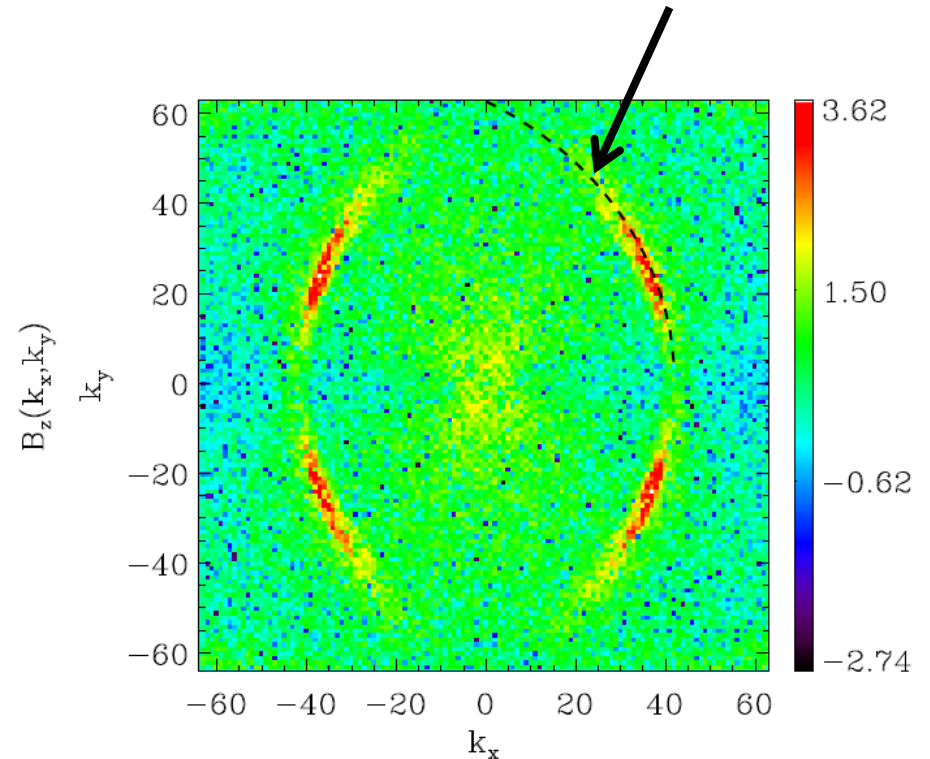
Numerical Experiment (3)

$$V_b=0.5$$

$$v_b^2(2\pi/\Delta - k_x)^2 = c^2(k_x^2 + k_y^2)$$



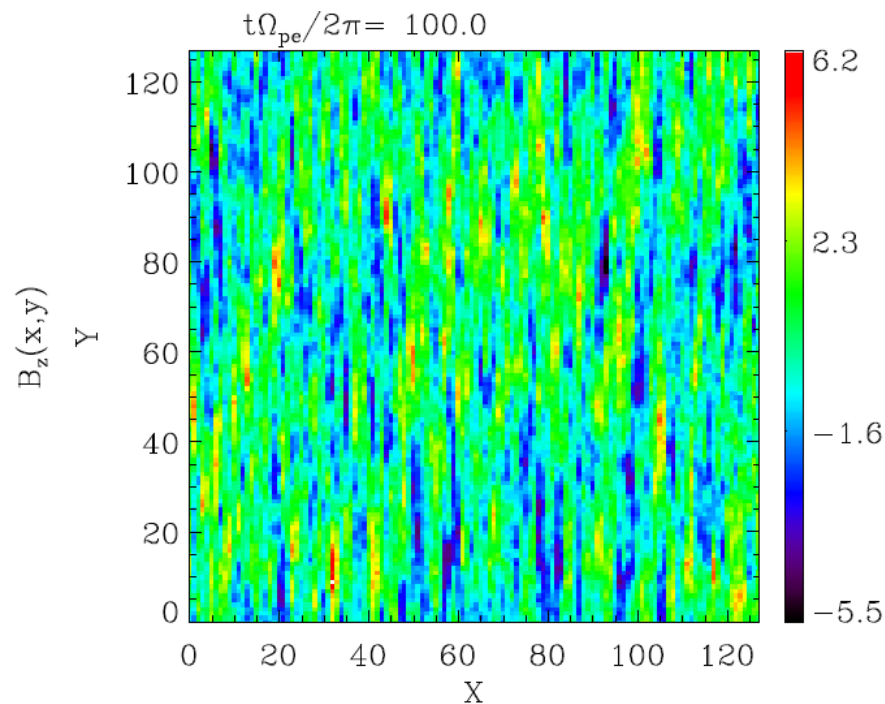
実空間



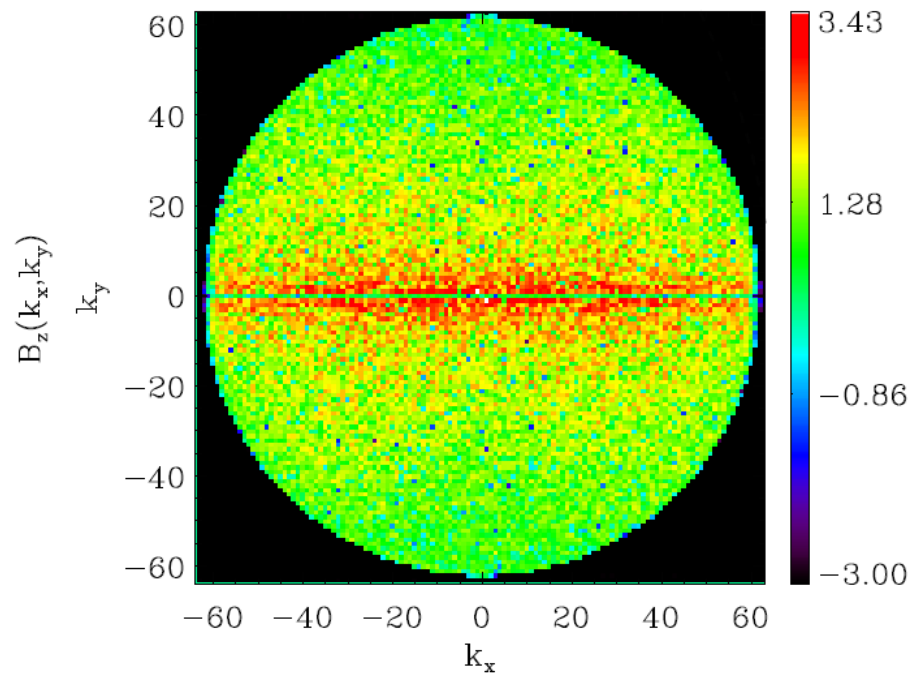
フーリエ空間

Numerical Experiment (4)

$U_b=100$, Filter (短波長の波動をカット)



実空間

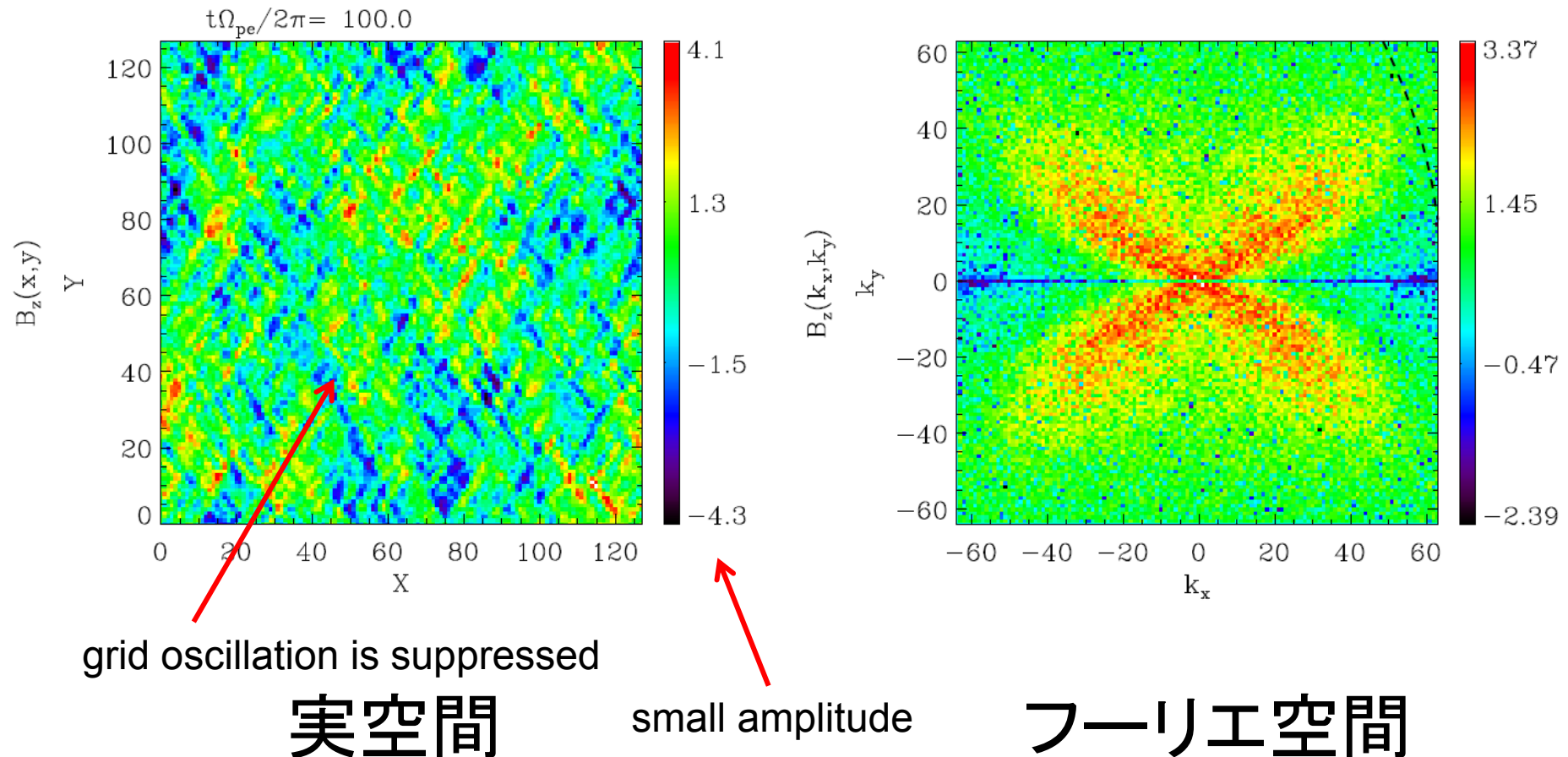


フーリエ空間

Numerical Experiment (5)

(cf. シミュレーション天文学 p.200)

$U_b=100$, *Semi-Implicit-FFT* with $\alpha=0.6$



Semi-Implicit Scheme

自由空間波($\omega=kc$)に対して陰的解法、プラズマ効果は陽的解法

$$\begin{aligned}\frac{\mathbf{E}^{n+1} - \mathbf{E}^n}{c\Delta t} &= \text{rot} \left(\frac{\alpha \mathbf{B}^{n+1} + (1 - \alpha) \mathbf{B}^n}{2} \right) - \frac{4\pi}{c} \mathbf{J}^{n+\frac{1}{2}}, \\ \frac{\mathbf{B}^{n+1} - \mathbf{B}^n}{c\Delta t} &= -\text{rot} \left(\frac{\alpha \mathbf{E}^{n+1} + (1 - \alpha) \mathbf{E}^n}{2} \right).\end{aligned}$$

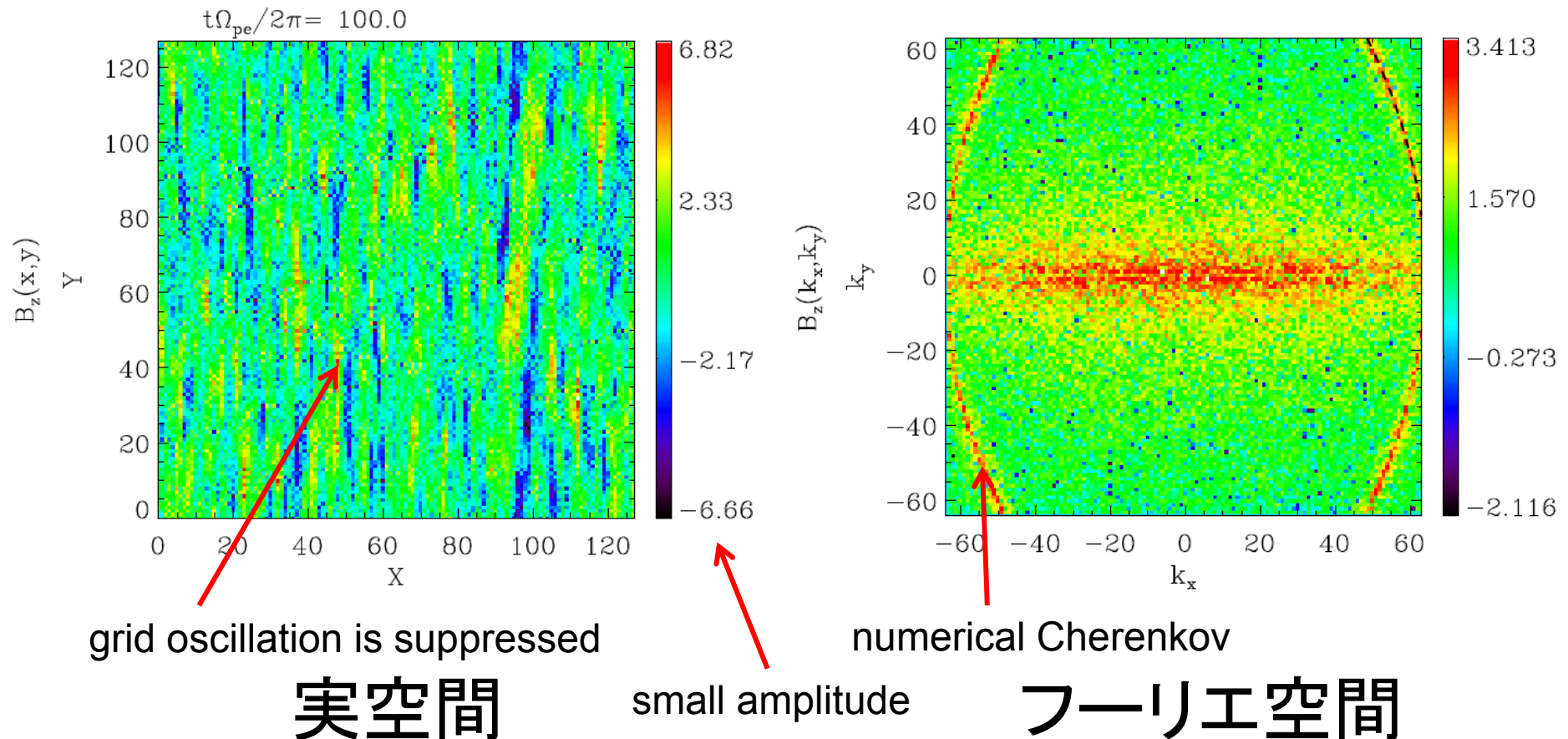
$\alpha=1/2$ 時間に対して中央差分、 $1/2 < \alpha < 1$ 後退差分

(note: 通常は $\alpha = 0.501 \sim 0.505$ がお勧め)

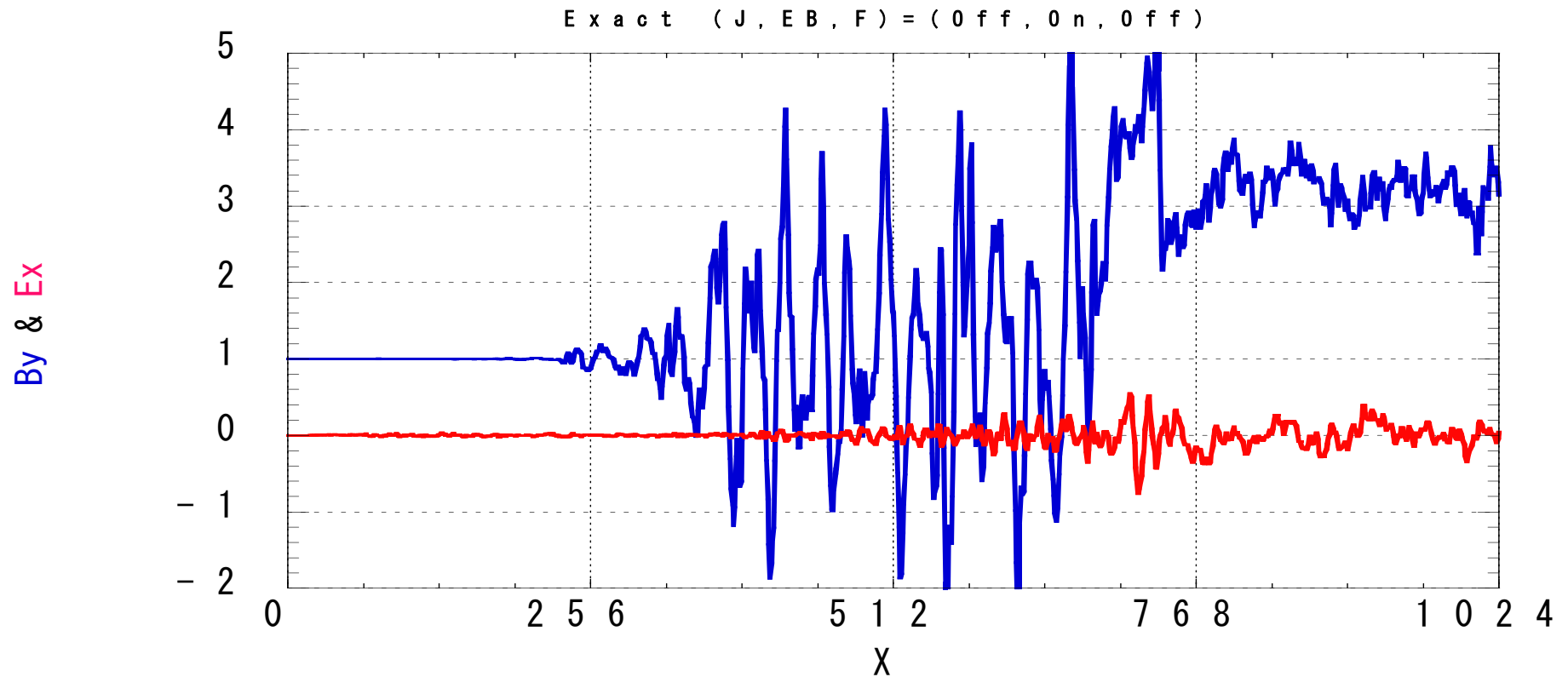
(cf. シミュレーション天文学 p.200)

Numerical Experiment (6)

$U_b=100$, Relativistic hot plasma $T/mc^2=10$



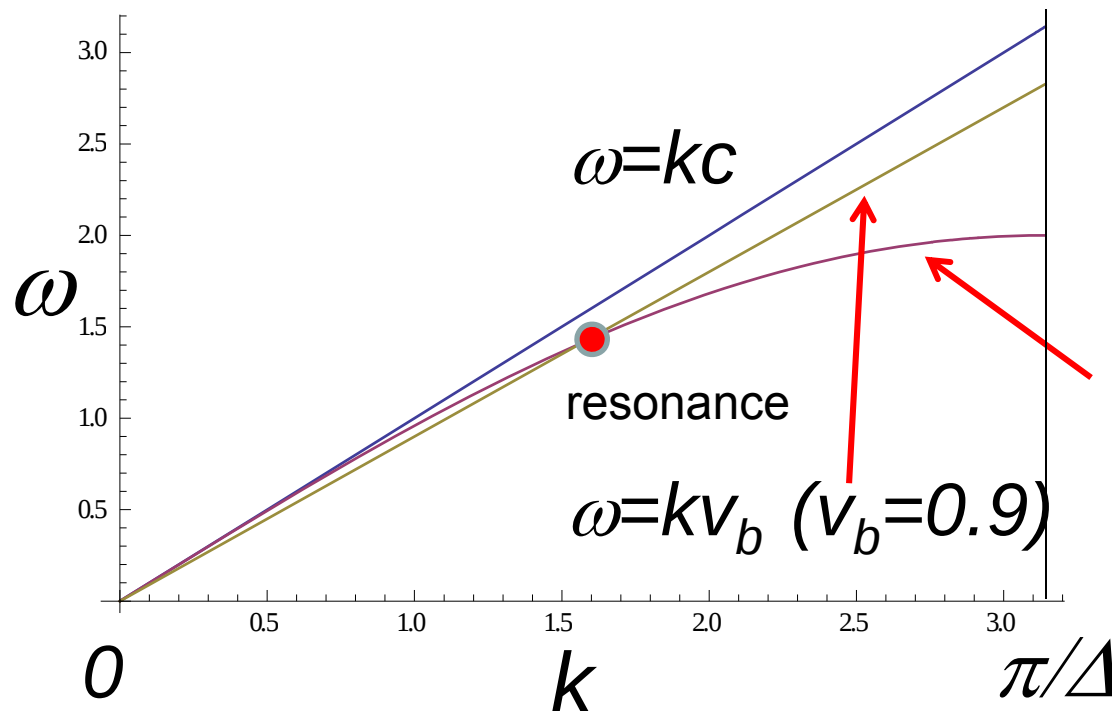
FFT + 短波長フィルター



finite difference scheme

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \begin{pmatrix} E \\ B \end{pmatrix} + \nabla \times \nabla \times \begin{pmatrix} E \\ B \end{pmatrix} = 0$$

$$-\nabla \times \nabla \times \Rightarrow \frac{\partial^2}{\partial x^2} B_j \approx \frac{1}{\Delta^2} (B_{j+1} - 2B_j + B_{j-1})$$



$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} B_j \approx \frac{1}{\Delta^2} (B_{j+1} - 2B_j + B_{j-1})$$

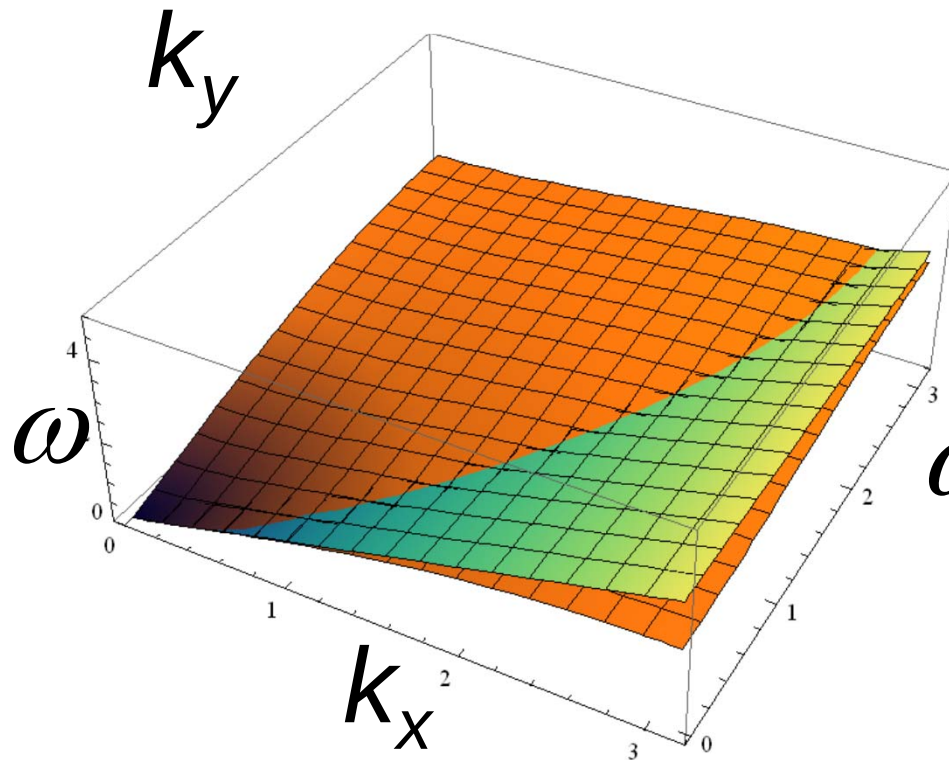
$$B_j \propto \exp(ik\Delta - i\omega t)$$

$$\omega = ck \frac{\sin(k\Delta/2)}{(k\Delta/2)}$$

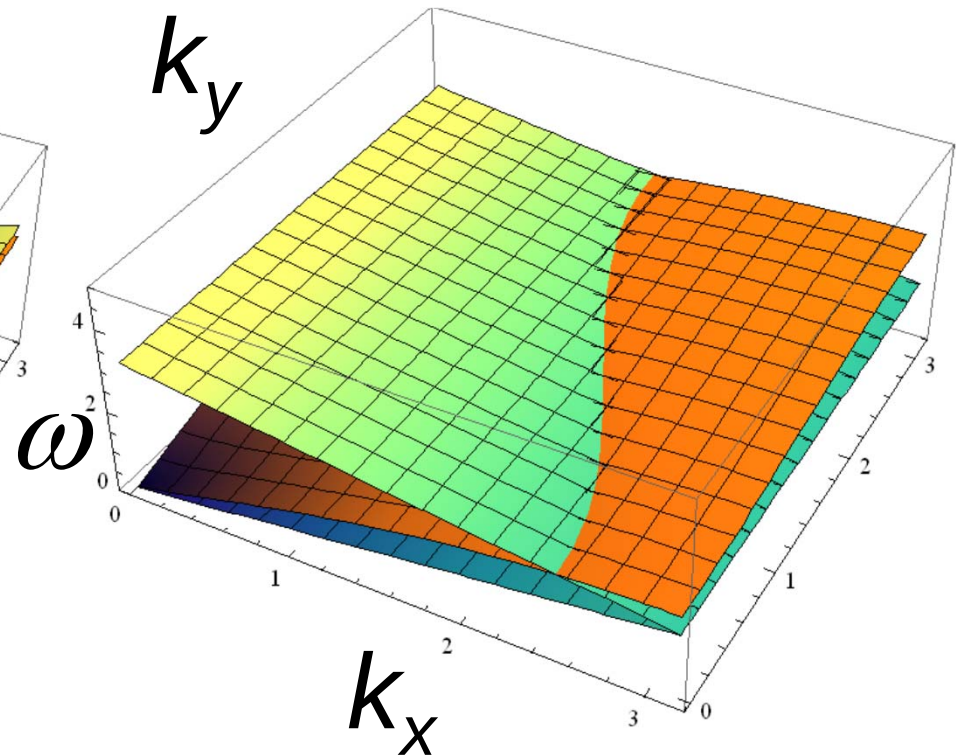
“numerical dispersion”

resonance of “light” and “entropy” waves (finite difference scheme)

$$v_b = 0.99$$



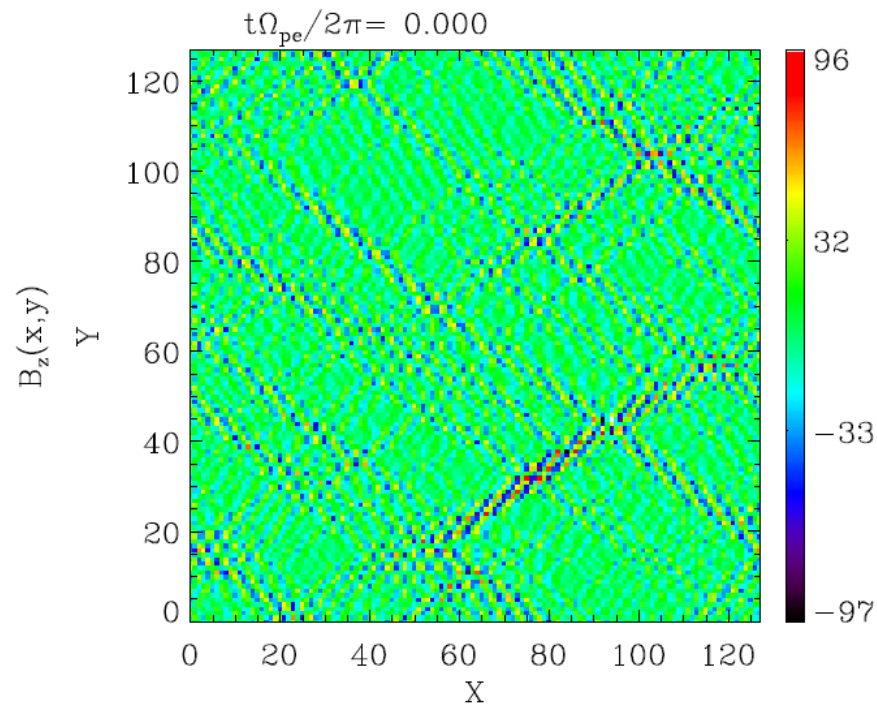
$$v_b = 0.5$$



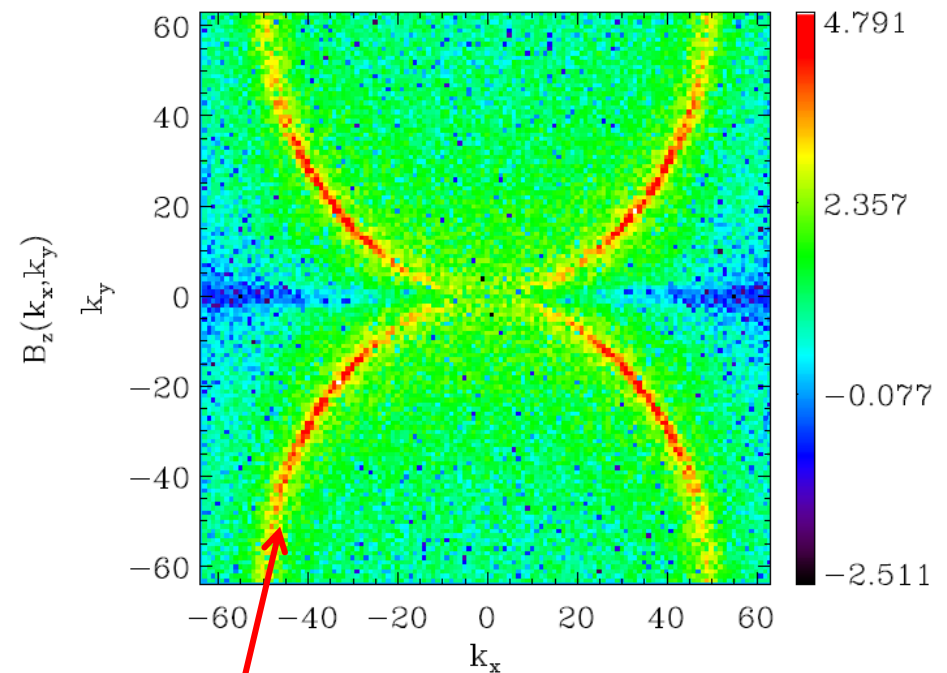
“direct” resonance by
numerical dispersion effect

Numerical Experiment (7)

$U_b=100$, finite-difference scheme



実空間

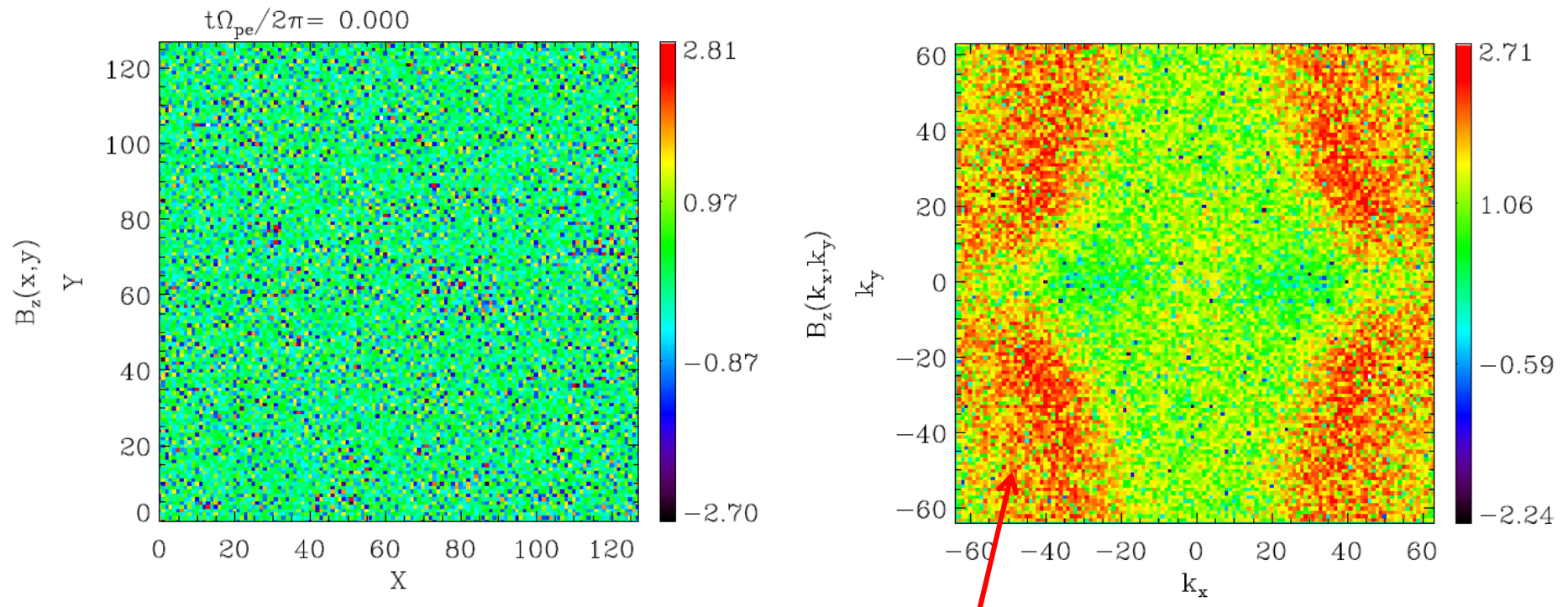


numerical Cherenkov

フーリエ空間

Numerical Experiment (8)

$V_b=0.5$, *finite-difference scheme*



numerical Cherenkov

実空間

フーリエ空間

Origin of Numerical Cherenkov

resonance between “physical wave (light wave)” and “entropy wave (density fluctuation wave)” with aliasing effect

対策：(1) 短波長の波動をFilter で落とす.
(2) FFT code を使う.

FFT scheme

$$\frac{1}{c} \frac{\partial E(k)}{\partial t} = ik \times B(k) - \frac{4\pi}{c} J(k),$$

$$\frac{1}{c} \frac{\partial B(k)}{\partial t} = -ik \times E(k),$$

$$k \cdot B(k) = 0, \quad k \cdot E(k) = 4\pi\rho(k).$$

$$\vec{E}^{n+1} = \cos(kc\Delta_t) \vec{E}_{\perp}^n + \frac{\sin(kc\Delta_t)}{k} \left(i\vec{k} \times \vec{B}^n - \frac{4\pi}{c} \vec{J}_{\perp}^{n+1/2} \right) - 4\pi i \frac{\vec{k}}{k^2} \rho^{n+1},$$

$$\vec{B}^{n+1} = \cos(kc\Delta_t) \vec{B}_{\perp}^n - i \frac{\sin(kc\Delta_t)}{k} \vec{k} \times \vec{E}^n + i \frac{1 - \cos(kc\Delta_t)}{k^2} \vec{k} \times \left(\frac{4\pi}{c} \vec{J}_{\perp}^{n+1/2} \right).$$

(cf. Birdsall & Langdon, p.365)