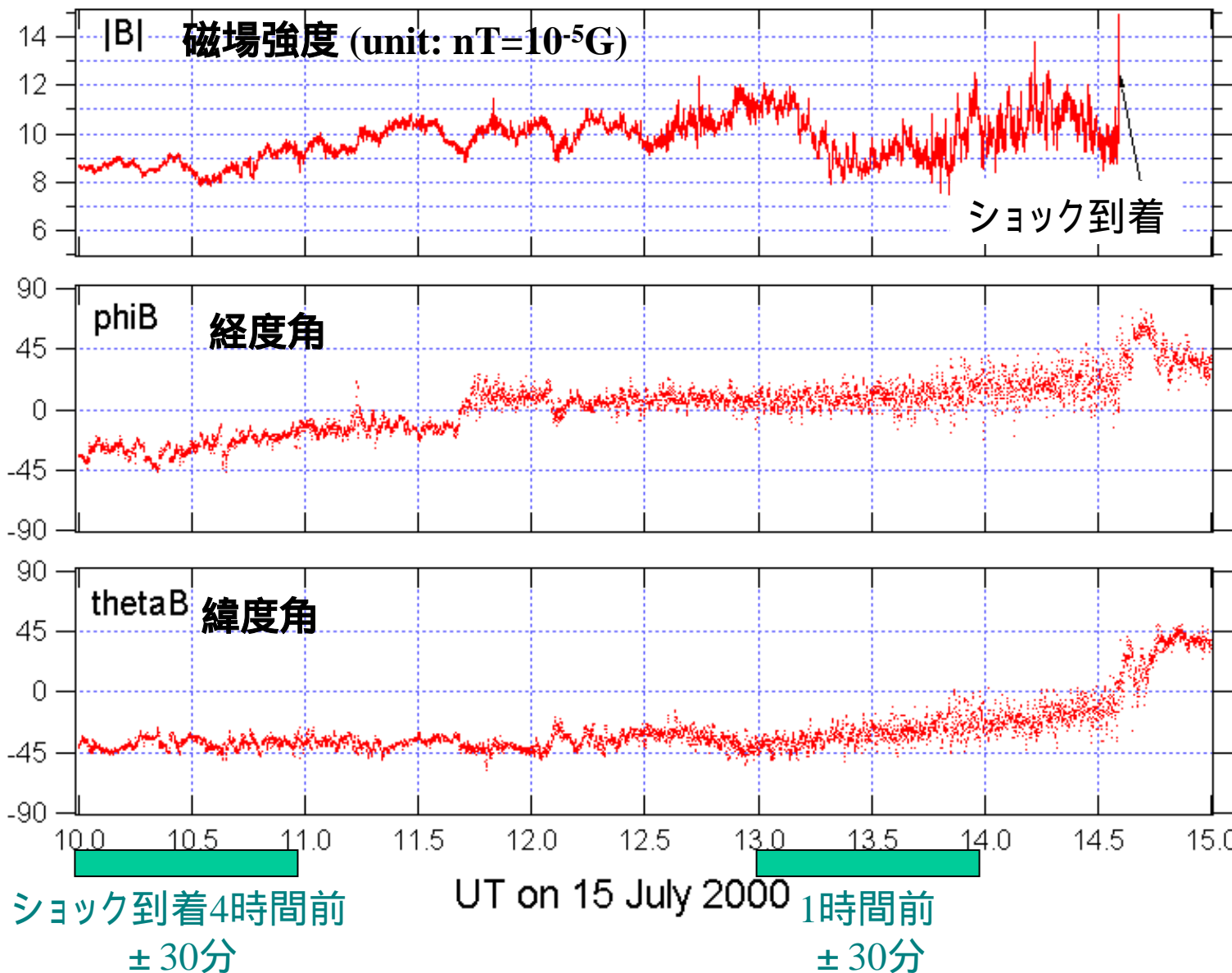


<~5x10² keV protonsと共鳴するアルフェン波の励起

Geotail/MGF (3 sec)



Lucek and Bellの議論: 磁場増幅

MNRAS 314, 65 (2000)

最初の議論.... McKenzie & Voelk (1982)

Non-linear amplification of a magnetic field driven by cosmic ray streaming

S. G. Lucek[★] and A. R. Bell[★]

ABSTRACT

One-, two- and three-dimensional numerical results of the non-linear interaction between cosmic rays and a magnetic field are presented. These show that cosmic ray streaming drives large-amplitude Alfvénic waves. The cosmic ray streaming energy is very efficiently transferred to the perturbed magnetic field of the Alfvén waves, and the non-linear time-scale of the growth of the waves is found to be very rapid, of the order of the gyro-period of the cosmic ray. Thus, a magnetic field of interstellar values, assumed in models of supernova remnant blast wave acceleration, would not be appropriate in the region of the shock. The increased magnetic field reduces the cosmic ray acceleration time and so increases the maximum cosmic ray energy, which may provide a simple and elegant resolution to the highest energy Galactic cosmic ray problem, where the cosmic rays themselves provide the fields necessary for their acceleration.

Key words: acceleration of particles – magnetic fields – waves – cosmic rays.

他に、Bell and Lucek, MNRAS 321, 433 (2001): 上の論文のつづき
Drury et al., AA in press, aph/0309820: 応用(beyond knee?)

Hillas' argument on the maximum attainable energy

(also by Makishima, 1999)

$$E_{\text{max}} = Ze\beta B L$$

E_{max} : the maximum energy attainable through the acceleration process

Z : Charge number

β : plasma velocity (u/c)

B : magnetic field strength

L : system size

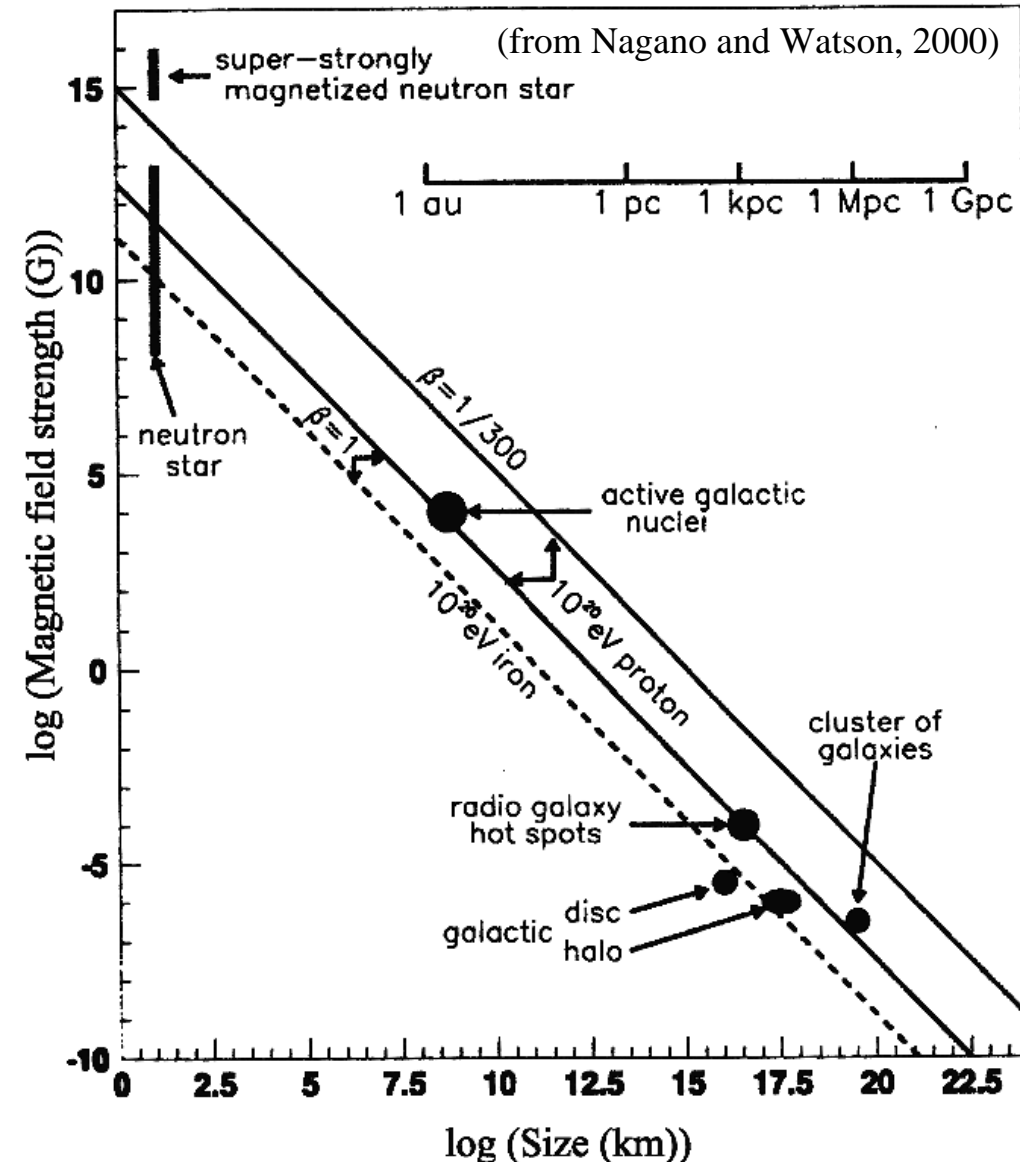
• Shock acceleration

• Trapping condition:

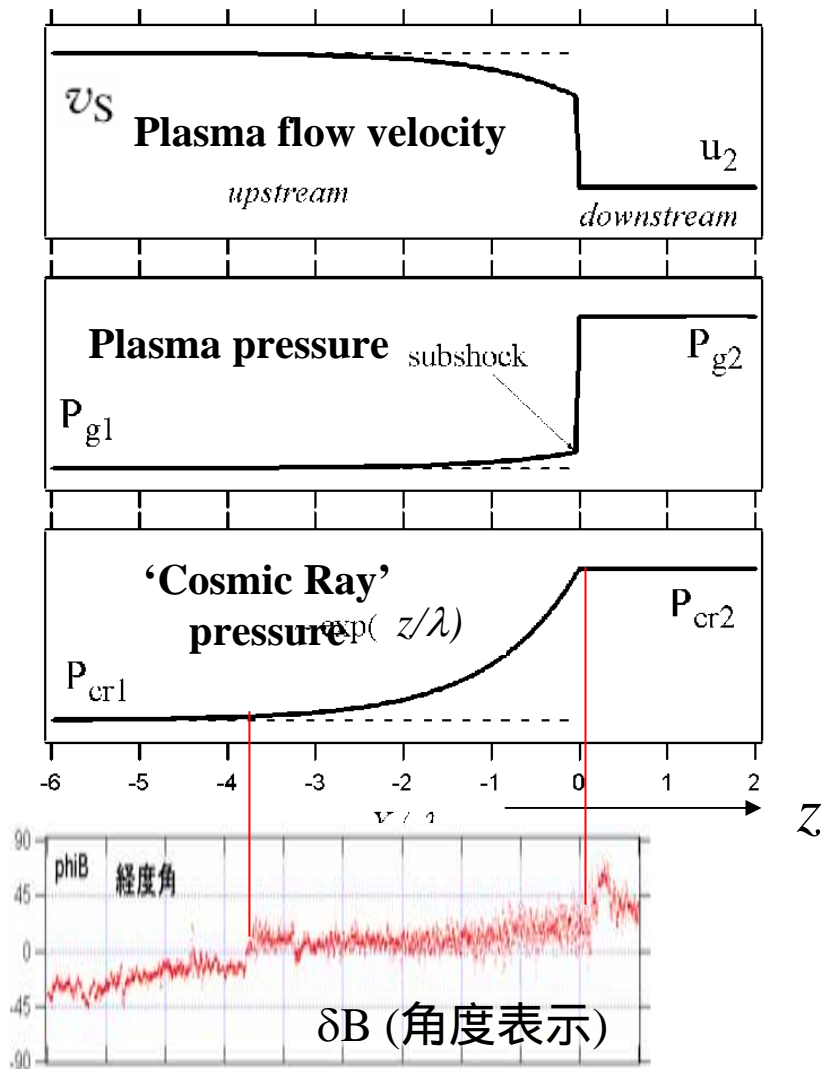
$$(\rho_g \leq L)$$

• Reconnection

Bを増幅して E_{max} を高める可能性



Lucek and Bellの議論: 磁場増幅



P_{CR} 増大とともに波のエネルギー U_A も増大

$$v_S \frac{\partial U_A}{\partial z} = [\text{波のエネルギー源}]$$

CR粒子がする仕事

CR粒子はプラズマに対し相対速度 $\sim -v_A$ で上流(-z方向、*i.e.* 圧力勾配方向) に向かって流れ出る。従ってプラズマに対し、
 $(-v_A)(-P_{CR}/z) = v_A P_{CR}/z$ だけの仕事をする。

$$v_S \frac{\partial U_A}{\partial z} = v_A \frac{\partial P_{CR}}{\partial z}$$

従って、

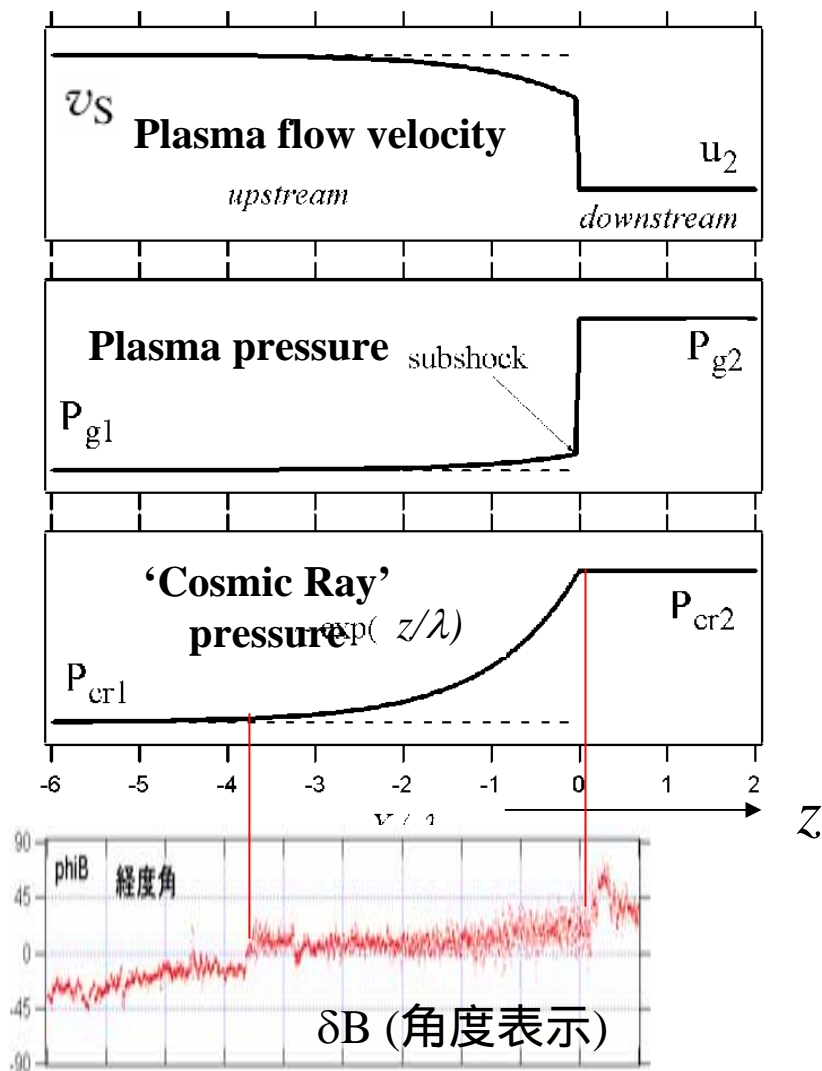
$$U_A = \frac{v_A}{v_S} P_{CR}$$

$$U_A = \delta B^2 / 2\mu_0, \quad v_A = B / \sqrt{\mu_0 \rho} \text{ より}$$

$$\frac{\delta B^2}{B^2} = 2 \frac{v_S}{v_A} \frac{P_{CR}}{\rho v_S^2}$$

アルフェンマッハ数 ($> \sim 100$) $O(1)$ の量

Lucek and Bellの議論: 磁場増幅



P_{CR} 増大とともに波のエネルギー U_A も増大

$$v_S \frac{\partial U_A}{\partial z} = [\text{波のエネルギー源}]$$

CR粒子がする仕事

CR粒子はプラズマに対し相対速度 $\sim -v_A$ で上流(-z方向、*i.e.* 圧力勾配方向) に向かって流れ出る。従ってプラズマに対し、
 $(-v_A)(-P_{CR}/z) = v_A P_{CR}/z$ だけの仕事をする。

$$v_S \frac{\partial U_A}{\partial z} = v_A \frac{\partial P_{CR}}{\partial z}$$

従って、

$$U_A = \frac{v_A}{v_S} P_{CR}$$

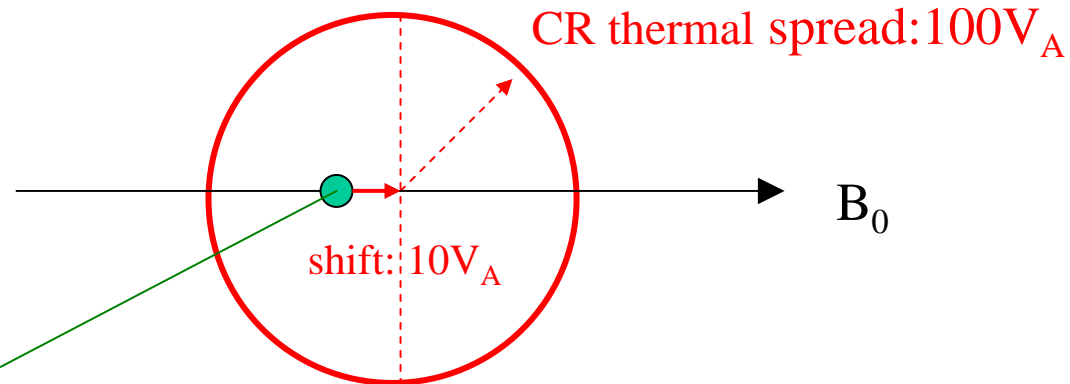
$$U_A = \delta B^2 / 2\mu_0, \quad v_A = B / \sqrt{\mu_0 \rho} \text{ より}$$

$$\frac{\delta B^2}{B^2} = 2 \frac{v_S}{v_A} \frac{P_{CR}}{\rho v_S^2} \gg 1!$$

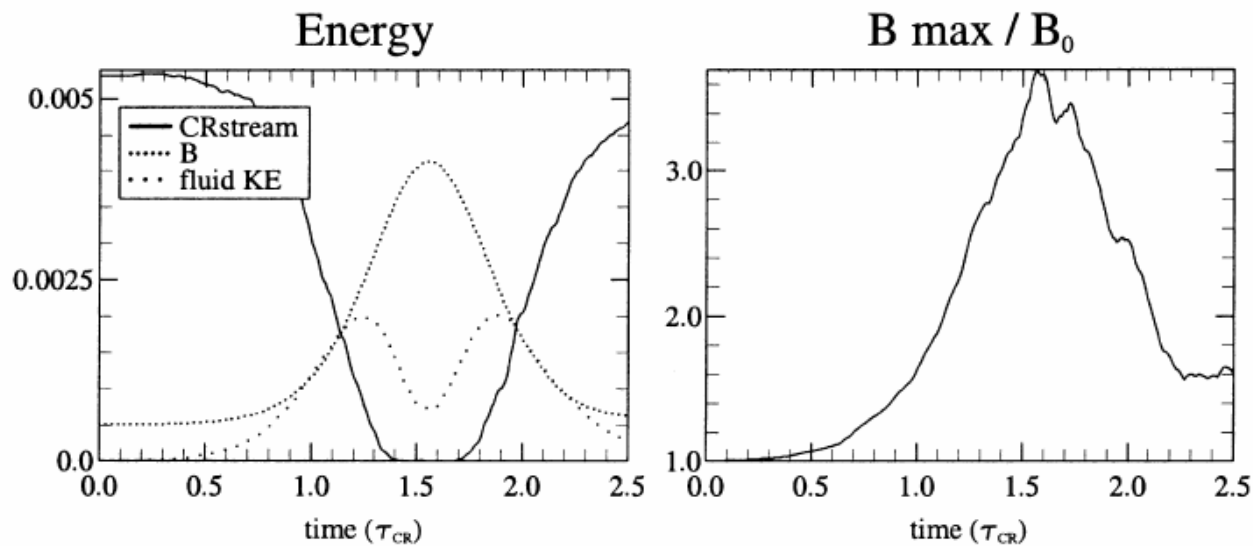
アルフェンマッハ数 ($> \sim 100$) $O(1)$ の量

Lucek and Bellの議論: 磁場増幅

Simulation model



background cold plasma
(center of mass)

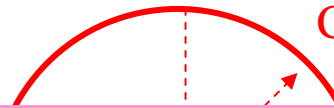


$$\frac{\delta B^2}{B^2} \sim 10$$

を実現!

Lucek and Bellの議論: 磁場増幅

Simulation model



CR thermal spread: $100V_A$

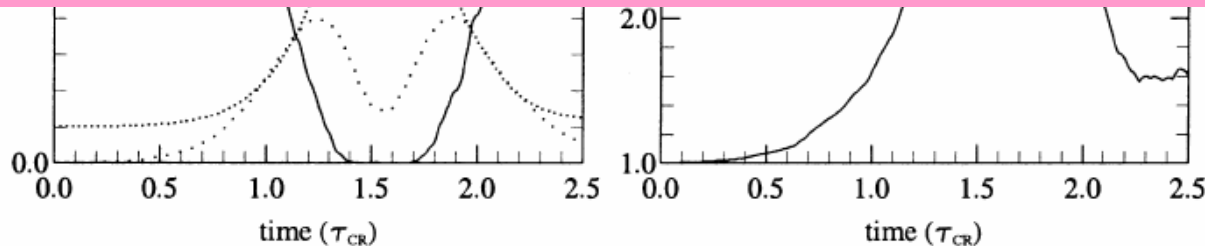
Plasma屋の目から見ると,,,,,
simulation codeがnon-standard

(hybrid system: MHD fluid + CR particles)

普通のハイブリッドコード(電子を流体、イオンを粒子)で
計算して同じ結果が得られるか?

不安定モードは一体何か?

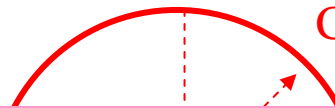
可能性: 共鳴型不安定モード? (ビームサイクロトロンモード R)
非共鳴型不安定モード? (firehoseモード R)
共鳴型不安定モード2? (ロスコーンモード L)



を実現!

Lucek and Bellの議論: 磁場増幅

Simulation model



CR thermal spread: $100V_A$

Plasma屋の目から見ると,,,,,

simulation codeがnon-standard

(hybrid system: MHD fluid + CR particles)

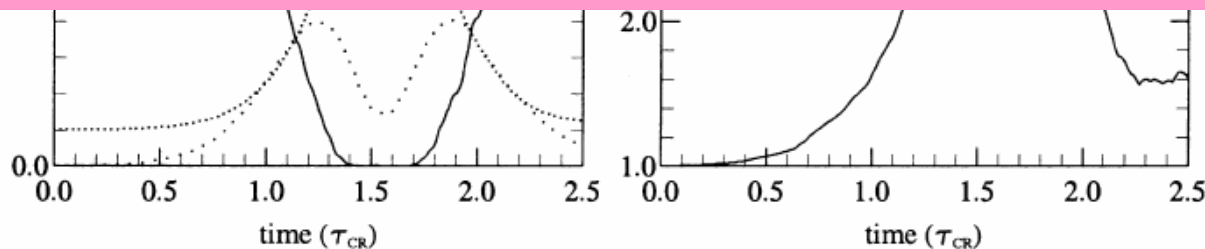
普通のハイブリッドコード(電子を流体、イオンを粒子)で
計算して同じ結果が得られるか? **Yes**

不安定モードは一体何か?

可能性: 共鳴型不安定モード? (ビームサイクロトロンモード R)

非共鳴型不安定モード? (firehoseモード R)

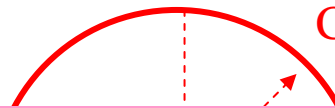
共鳴型不安定モード2? (ロスコーンモード L)



を実現!

Lucek and Bellの議論: 磁場増幅

Simulation model



CR thermal spread: $100V_A$

Plasma屋の目から見ると,,,,,
simulation codeがnon-standard

(hybrid system: MHD fluid + CR particles)

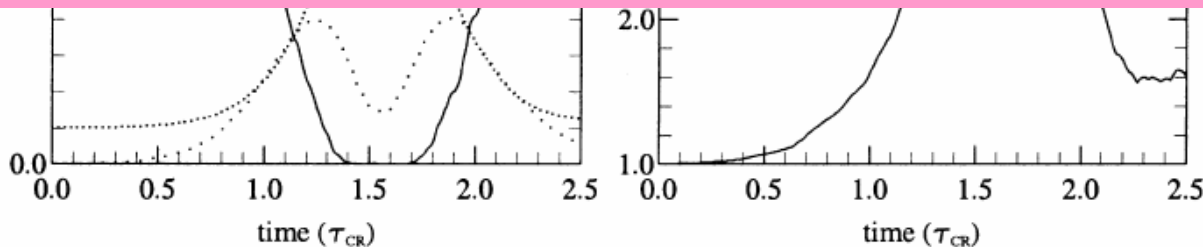
普通のハイブリッドコード(電子を流体、イオンを粒子)で
計算して同じ結果が得られるか? **Yes**

不安定モードは一体何か?

可能性: 共鳴型不安定モード? (ビームサイクロトロンモード R)

非共鳴型不安定モード? (firehoseモード R)

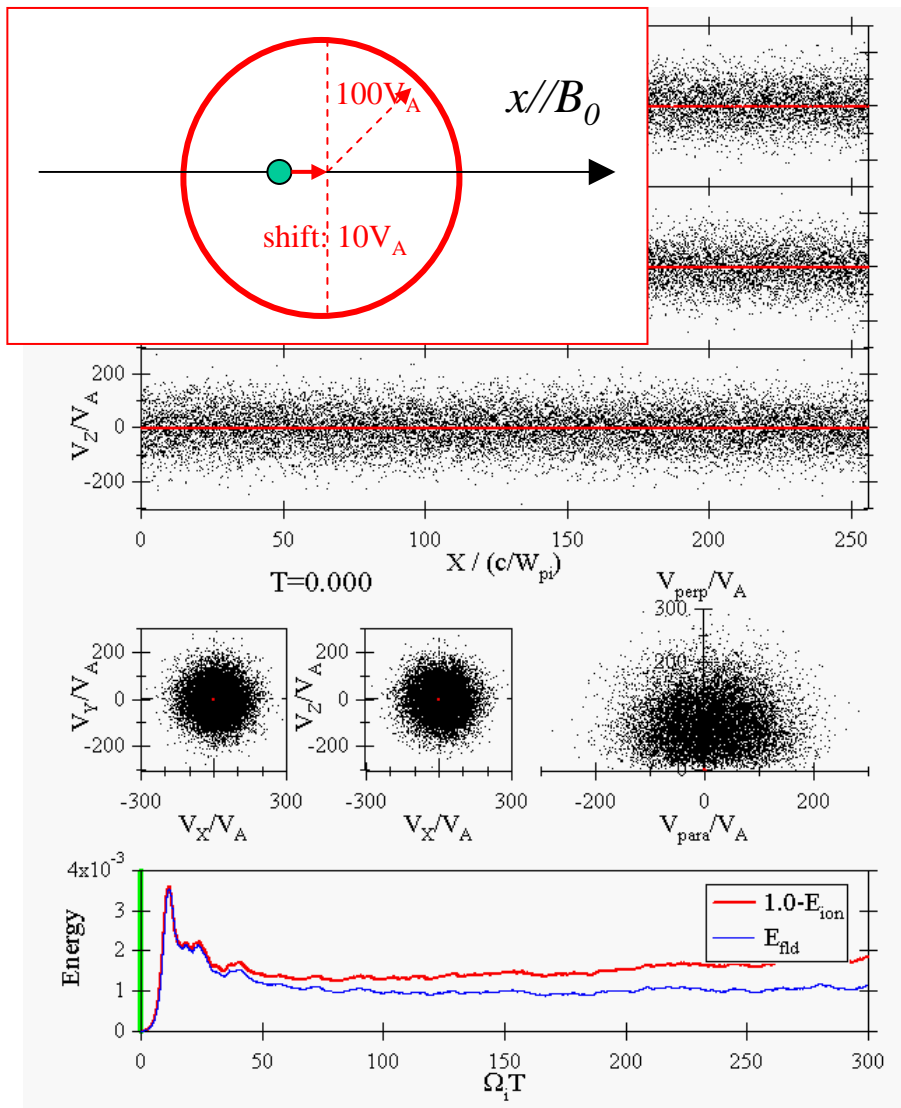
共鳴型不安定モード2? (ロスコーンモード L)



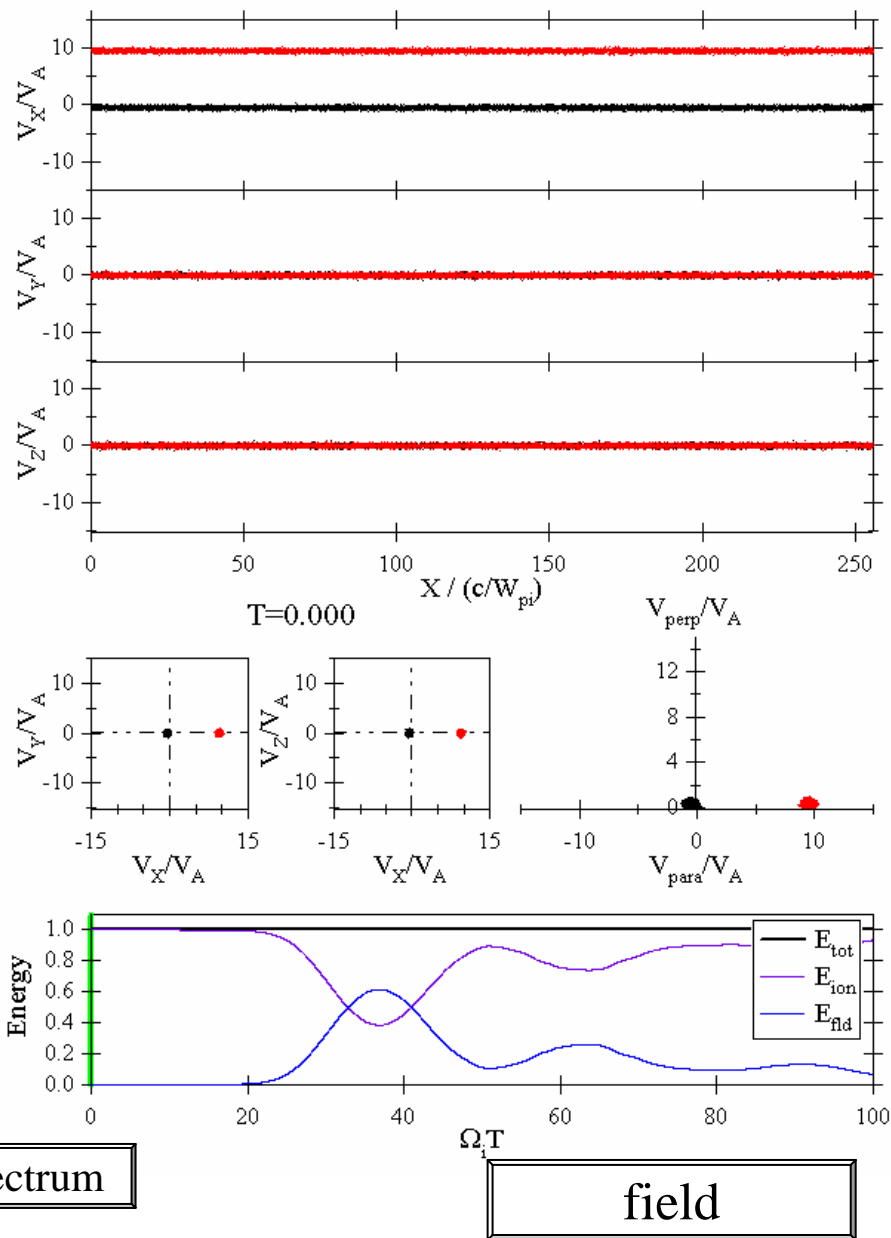
を実現!

線形不安定性解析

OkaによるLucek & Bellの結果の追試
 黒(CR)、赤(プラズマ)



参照例 (ビーム成分の温度が低い)
 Sorry! 左の図と色が逆: 赤(CR)、黒(プラズマ)



field

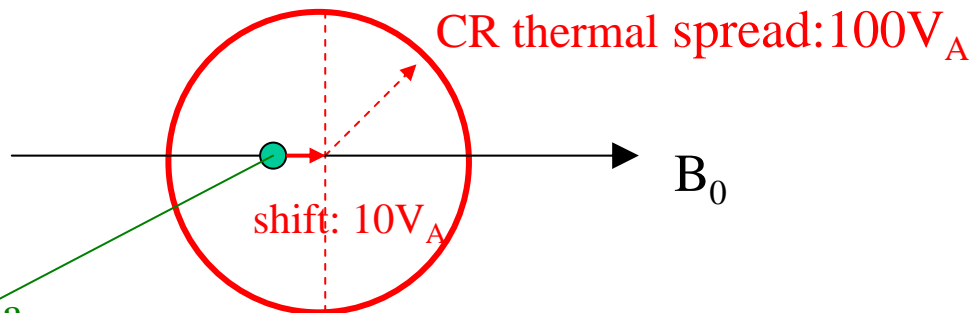
growth rate

power spectrum

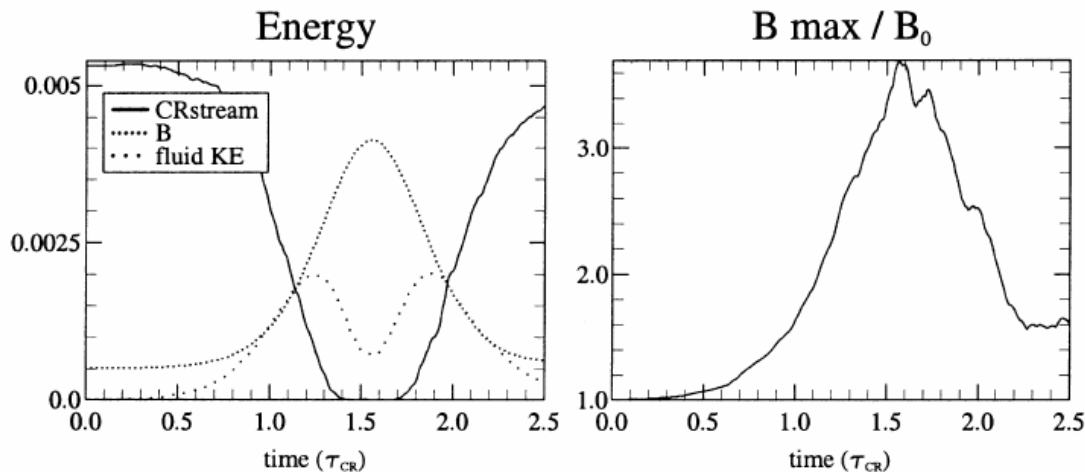
field

Lucek and Bellの議論: 磁場増幅

Simulation model



background cold plasma
(center of mass)



$$\frac{\delta B^2}{B^2} \sim 10$$

を実現!

追試はOK。しかし、 $(\delta B/B)^2 \gg 10$ まで成長できるかは未確認。
(数値コード上の問題があり、現在のところここでstop。)

Lucek and Bellの議論: 磁場増幅

本当に先程の議論が証明されたのか?



準線形理論による $(\delta B/B)^2$ の推定

(Winske and Leroy, 1985):

$$(\delta B/B)^2 \sim (n_{\text{beam}}/n_0)(V_{\text{beam}}/V_A)^2$$

と区別できていない。

というより、準線形理論の前提

$(\delta B/B)^2 < 1$ を越えた範囲(~ 10)まで、その結論、

$$(\delta B/B)^2 \sim (n_{\text{beam}}/n_0)(V_{\text{beam}}/V_A)^2$$

が使えることを示した、というべき。
(シミュレーションは衝撃波の形成をきちんと取り入れた訳ではない...)

P_{CR}/z は入っていない!!

$$v_S \frac{\partial U_A}{\partial z} = [\text{波のエネルギー源}]$$

CR粒子がする仕事

CR粒子はプラズマに対し相対速度 $\sim -v_A$ で上流(-z方向、*i.e.* 圧力勾配方向) に向かって流れ出る。従ってプラズマに対し、
 $(-v_A)(-P_{\text{CR}}/z) = v_A P_{\text{CR}}/z$ だけの仕事をする。

$$v_S \frac{\partial U_A}{\partial z} = v_A \frac{\partial P_{\text{CR}}}{\partial z}$$

従って、

$$U_A = \frac{v_A}{v_S} P_{\text{CR}}$$

$$U_A = \delta B^2 / 2\mu_0, \quad v_A = B / \sqrt{\mu_0 \rho} \text{ より}$$

$$\frac{\delta B^2}{B^2} = 2 \frac{v_S P_{\text{CR}}}{v_A \rho v_S^2} \gg 1!$$

アルフェンマッハ数 ($> \sim 100$) $O(1)$ の量