部分電離プラズマ中の無衝突衝撃波

大平　豊 (青山学院大学)

内容

超新星残骸の周りの水素原子

電離過程を取り入れたプラズマ粒子
ハイブリッドシミュレーション

まとめ

Ref: Ohira, MNRAS (2014), Ohira, PRL (2013), Ohira, ApJ (2012)

超新星残骸の周りの水素原子

超新星残骸周りのガスの電離度は ~ 0.5

Ghavamian et al. ApJ 2000, 2002

超新星残骸は、銀河宇宙線の起源

タイプ Ia 型 or II型?

ISMの中 or スーパーバブルの中?

宇宙線のエネルギースペクトル

標準的な衝撃波加速理論は$dN/dE \propto E^{-2}$

銀河宇宙線や超新星残骸の観測は

$dN/dE \propto E^{-2.1}$-$E^{-2.4}$

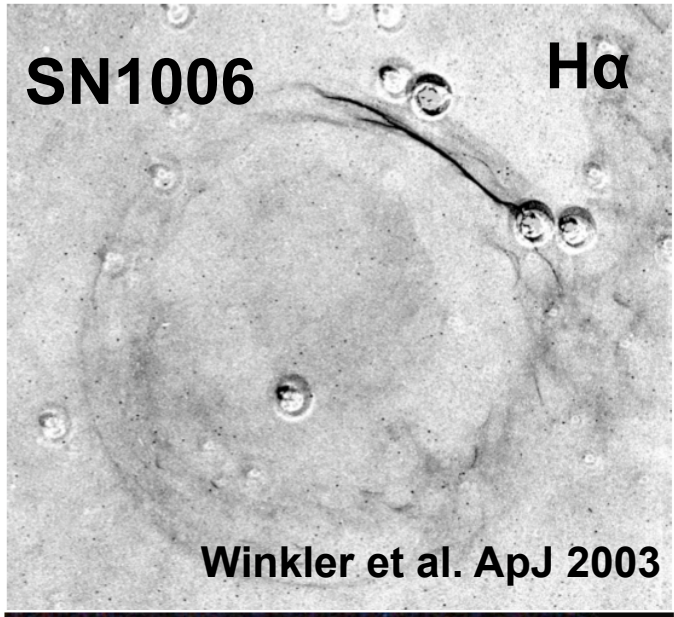
加速機構への注入問題

銀河宇宙線の観測からは、E_{CR}~$0.1E_{SN}$

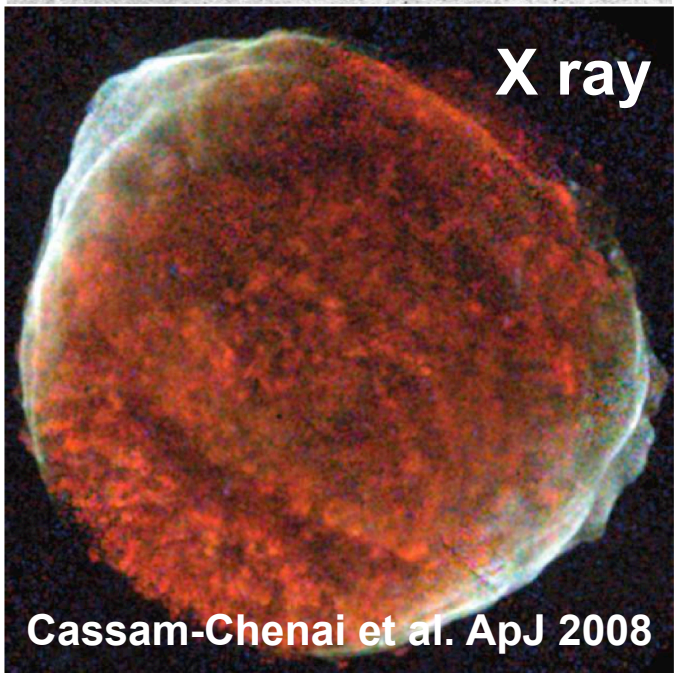
どのようにして加速過程に入るかは謎

無衝突衝撃波の構造

衝撃波の速度構造や磁場構造は謎



Winkler et al. ApJ 2003



Cassam-Chenai et al. ApJ 2008

ハイブリッドシミュレーション

イオン

$$\boxed{\frac{d\vec{x}_\mathrm{i}}{dt} = \vec{v}_\mathrm{i}}\,, \quad \boxed{m_\mathrm{i}\frac{d\vec{v}_\mathrm{i}}{\partial t} = e\left(\vec{E} + \frac{\vec{v}_\mathrm{i}}{c}\times\vec{B}\right)}$$

電子

$$0 = \frac{d}{dt}(m_\mathrm{e} n_\mathrm{e}\vec{u}_\mathrm{e}) = -en_\mathrm{e}\left(\vec{E} + \frac{\vec{u}_\mathrm{e}}{c}\times\vec{B}\right) - \vec{\nabla}p_\mathrm{e}$$

$$n_\mathrm{i} = n_\mathrm{e}$$

マクスウェル
方程式

$$0 = \frac{\partial\vec{E}}{\partial t} = c\vec{\nabla}\times\vec{B} - 4\pi e n_i(\vec{u}_\mathrm{i} - \vec{u}_\mathrm{e})$$

$$\rightarrow \vec{u}_\mathrm{e} = \vec{u}_\mathrm{i} - \frac{c}{4\pi e n_\mathrm{i}}\vec{\nabla}\times\vec{B}$$

$$\boxed{\frac{\partial\vec{B}}{\partial t} = c\vec{\nabla}\times\vec{E}}\,, \quad \boxed{\vec{E} = -\frac{\vec{u}_\mathrm{i}}{c}\times\vec{B} - \frac{\vec{B}\times(\vec{\nabla}\times\vec{B})}{4\pi e n_\mathrm{i}} - \frac{\vec{\nabla}p_\mathrm{e}}{e n_\mathrm{i}}}$$

u_i と n_i は粒子の x_i と v_i から 求める.

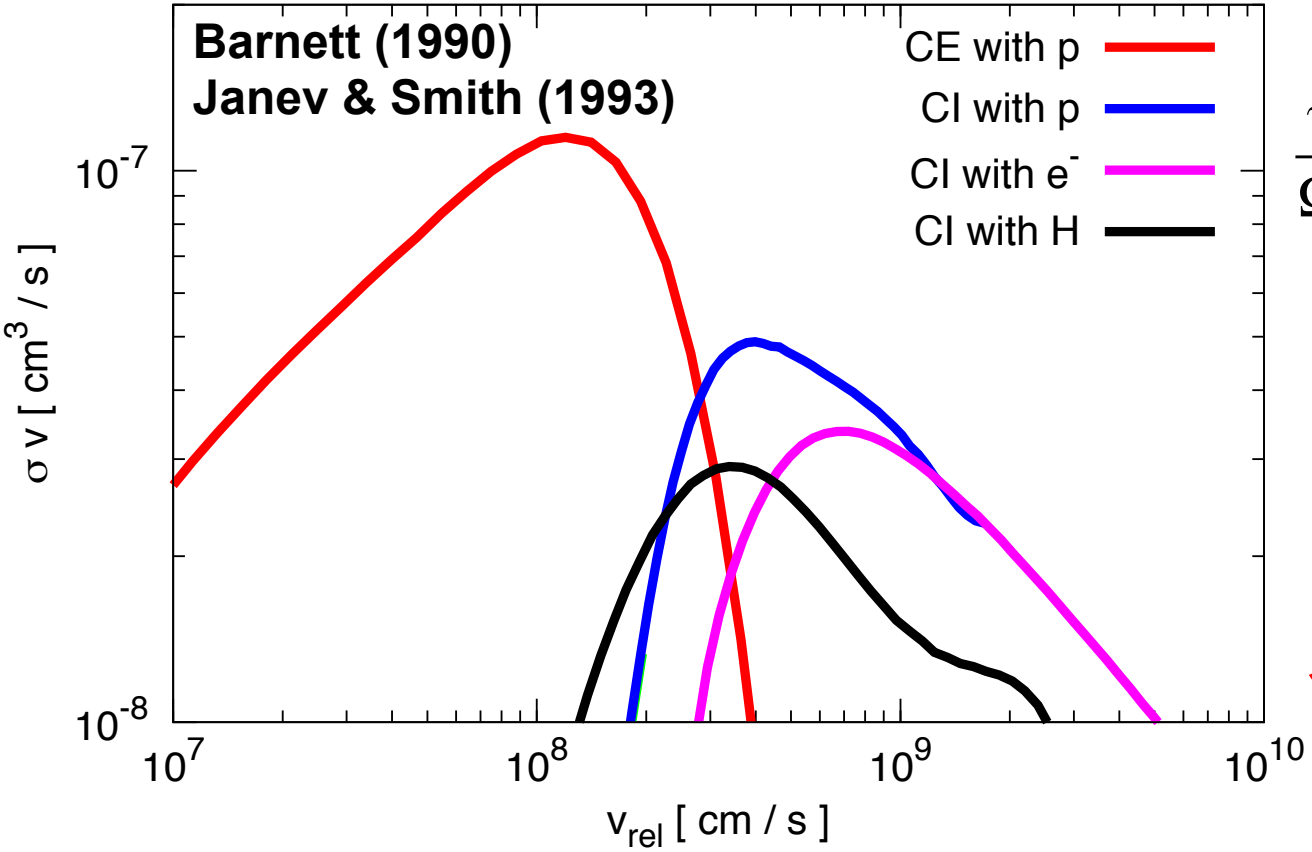
水素原子の電離過程 (H, p, e-)

Charge exchange with proton $H + p \rightarrow p + H$

Collisional ionization with proton $H + p \rightarrow p + e^- + p$

Collisional ionization with electron $H + e^- \rightarrow p + e^- + e^-$

Collisional ionization with hydrogen atom $H + H \rightarrow p + e^- + H$



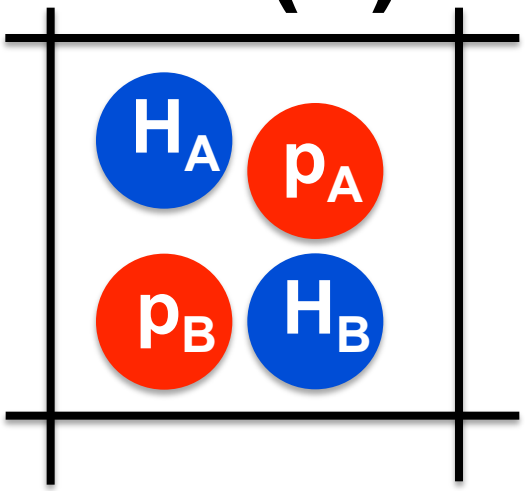
(Heの反応は追加予定)

$$\frac{\nu_{ce}}{\Omega_{cp}} \approx 10^{-5} \times \left(\frac{\sigma v}{10^{-7}\,\mathrm{cm}^3/\mathrm{s}}\right) \times \left(\frac{n}{1\,\mathrm{cm}^{-3}}\right)\left(\frac{B}{3\mu\mathrm{G}}\right)^{-1}$$

人工的に

$$\frac{\nu_{ce}}{\Omega_{cp}} \approx 10^{-2}$$

ハイブリッドコード内での電離 (1)



水素についての電離の計算(H_Aについて)

①同じセルにいる粒子を特定する

H_B, p_A, p_B, e^-_A, e^-_B

電子は、陽子と同じ数とする

②H_Aとの相対速度を計算する

電子Maxwell 分布とする

$\langle v_{e-} \rangle = \langle v_p \rangle$, $T_e = 0.01T_{sh}$を仮定

$|v_{HA} - v_{HB}|$, $|v_{HA} - v_{pA}|$, $|v_{HA} - v_{pB}|$, $v_{rel,HAe-} = ((4/\pi)v_{th,e-}^2 + v_{HA}^2)^{1/2}$

③散乱断面積 σ_{CE}, $\sigma_{CI,p}$, $\sigma_{CI,H}$ and σ_{CIe-}から、反応確率を求める

$P_{CI,HAHB}$, $P_{CI,HApA}$, $P_{CE,HApA}$, … , $P_{CI,HAe-}$

④乱数により、どの粒子と、どの反応でH_A水素が電離するか、または電離しないかを決める. 電荷交換反応の場合、反応した陽子が水素原子になる

シミュレーションパラメター

$L_x \times L_y \sim 2 - 6 \times 10^4\ c/\omega_{pp} \times 400\ c/\omega_{pp}$

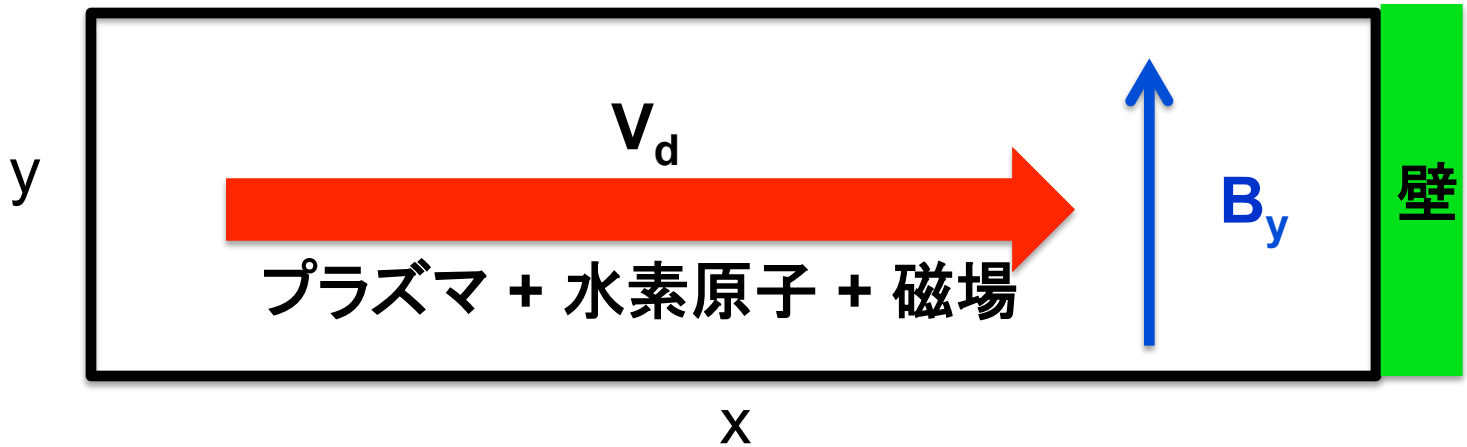
$\Delta x = \Delta y = 0.5 - 1\ c/\omega_{pp}$, $\Delta t = 0.004 - 0.0125\ \Omega_{cp}^{-1} \sim 10^{-4}\ \nu^{-1}$

16個の水素原子 と 16個の陽子 / 1セル

$\beta_p = \beta_H = 0.5$, $n_p = n_H$, $B_0 \,//\, e_y$

$V_d = 10 - 30\ V_A$, $V_d = 1 - 2 \times 10^3$ km/s

２次元のシミュレーション平面

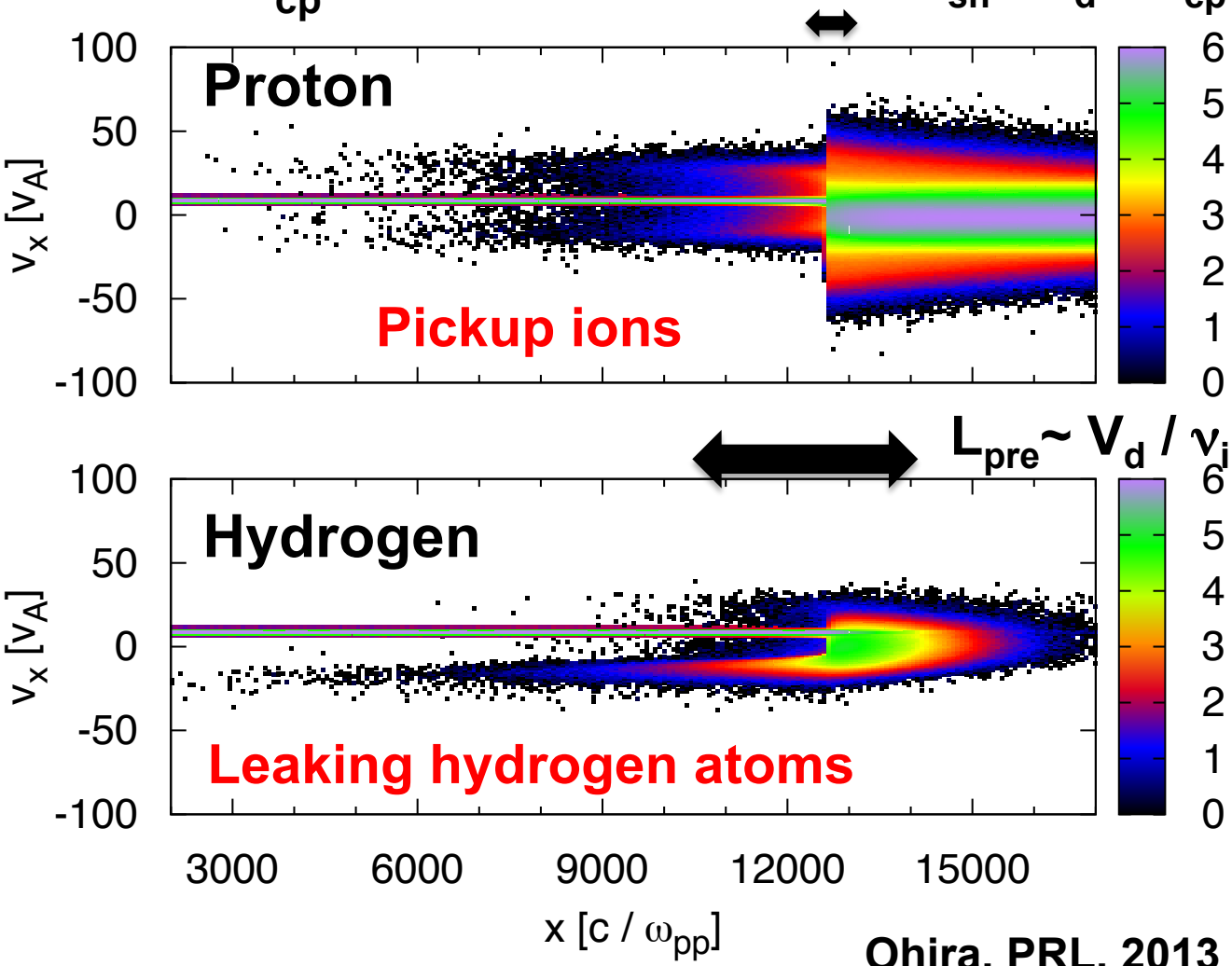


位相空間図 (M_A=10 , V_d=2000km/s)

下流の高温水素原子が上流へしみ出す。上流で電離してピックアップイオンになる。

$t = 2000\Omega_{cp}^{-1}$

$L_{sh} \sim V_d / \Omega_{cp} \sim M_A\, c/\omega_{pp}$



$L_{pre} \sim V_d / \nu_i \sim (\Omega_{cp}/\nu_i)\, M_A\, c/\omega_{pp}$

$V_{sh} \sim 13.6 V_A$
$\sim$ 2700 km/s
in the upstream frame

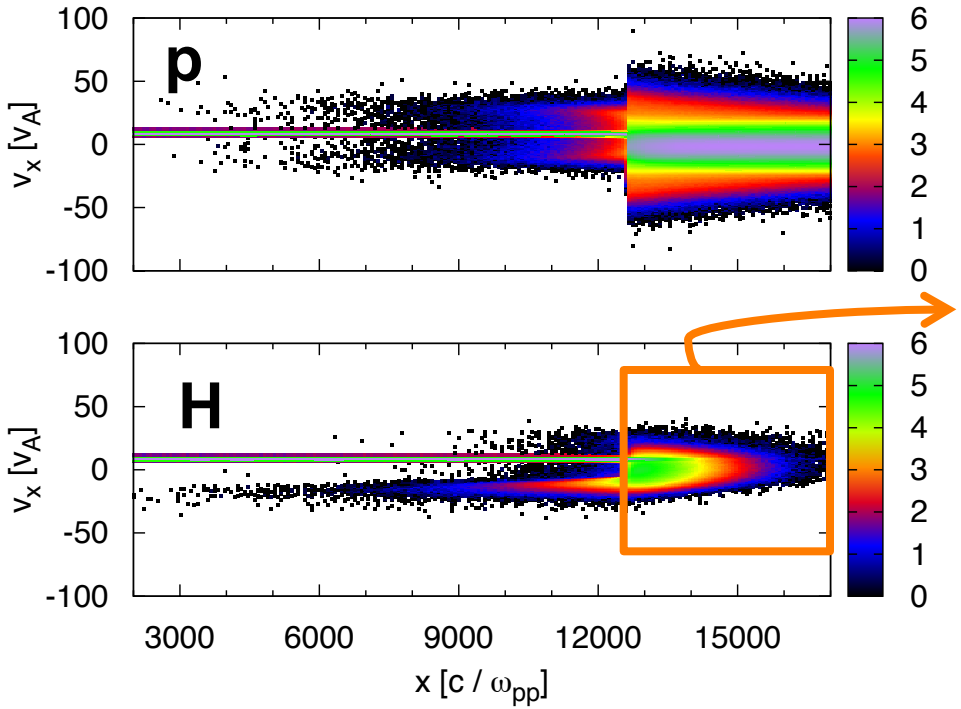
$n_{leak}/n_H \sim 0.07$
at the shock front

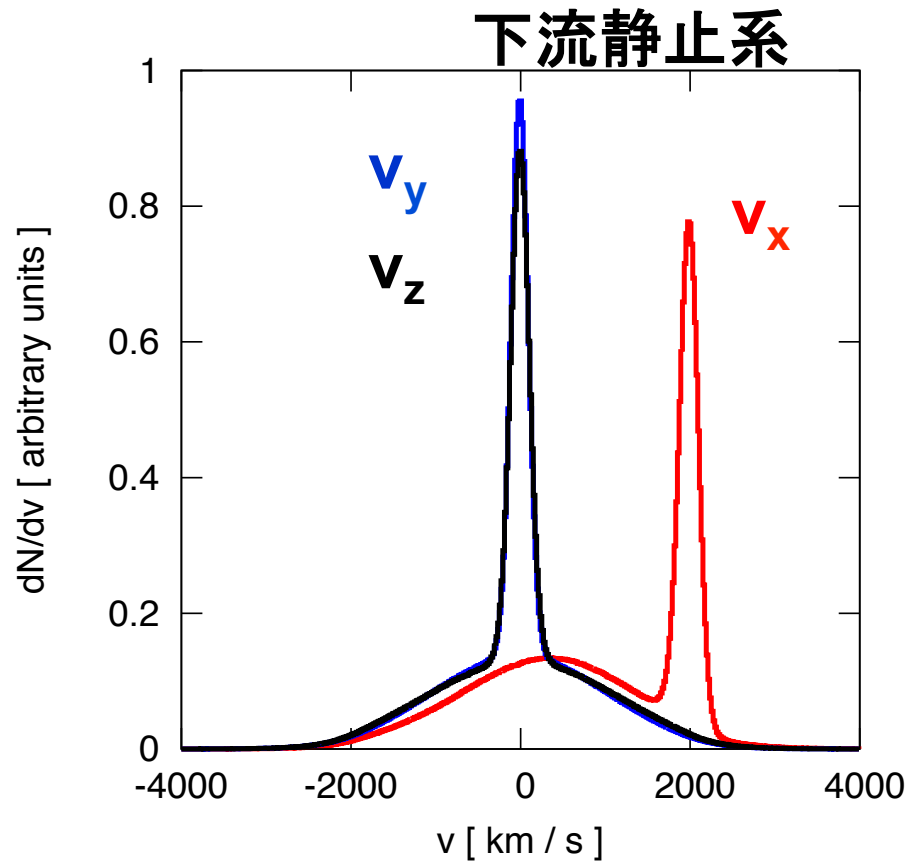
$u_{leak}/V_{sh} \sim 0.23$
in the shock rest frame

$(nu)_{leak}/(nu)_{up} \sim 0.016$
in the shock rest frame

Ohira, PRL, 2013

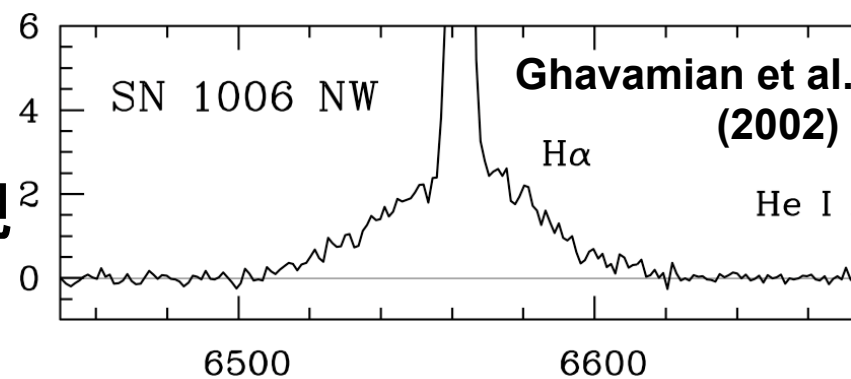
水素原子の速度分布



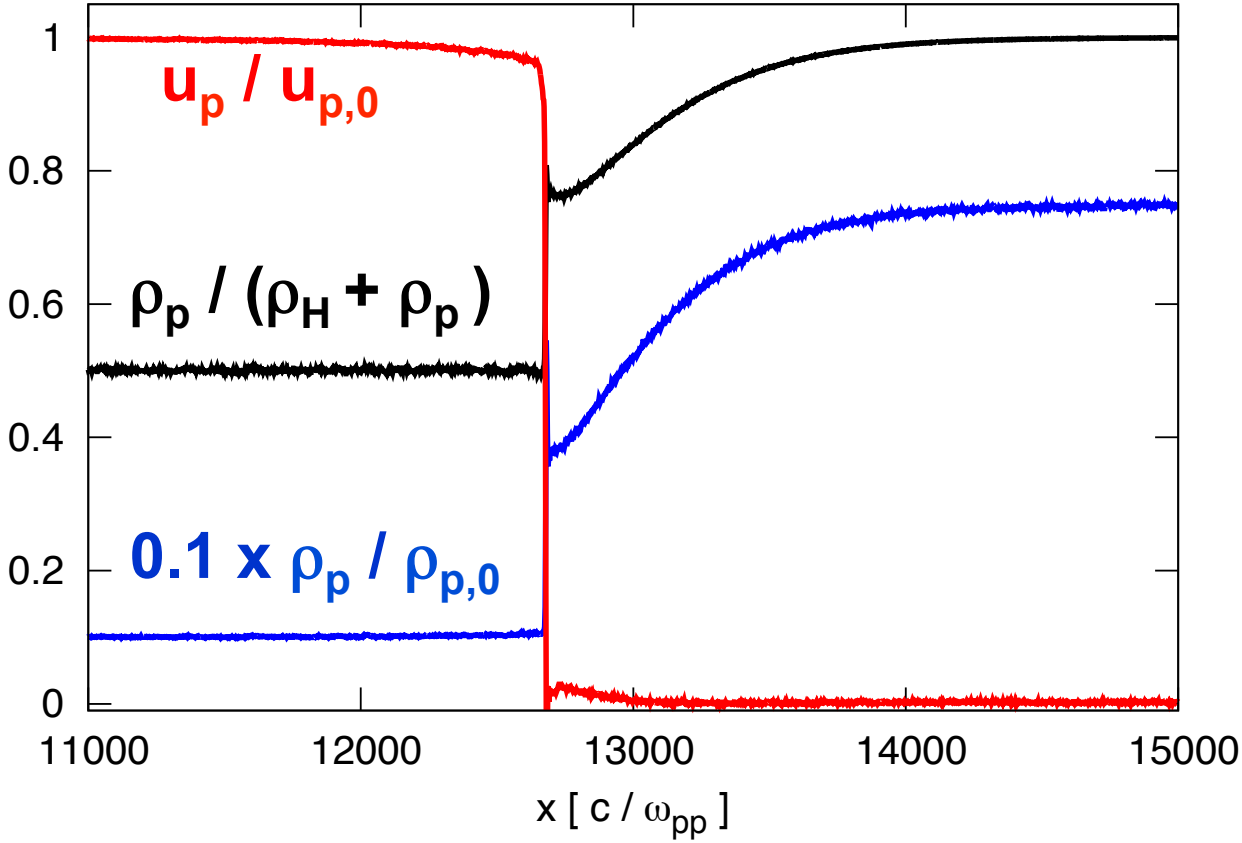


幅の狭い成分と広い成分が存在

観測されているHα 輝線の構造を再現



衝撃波構造



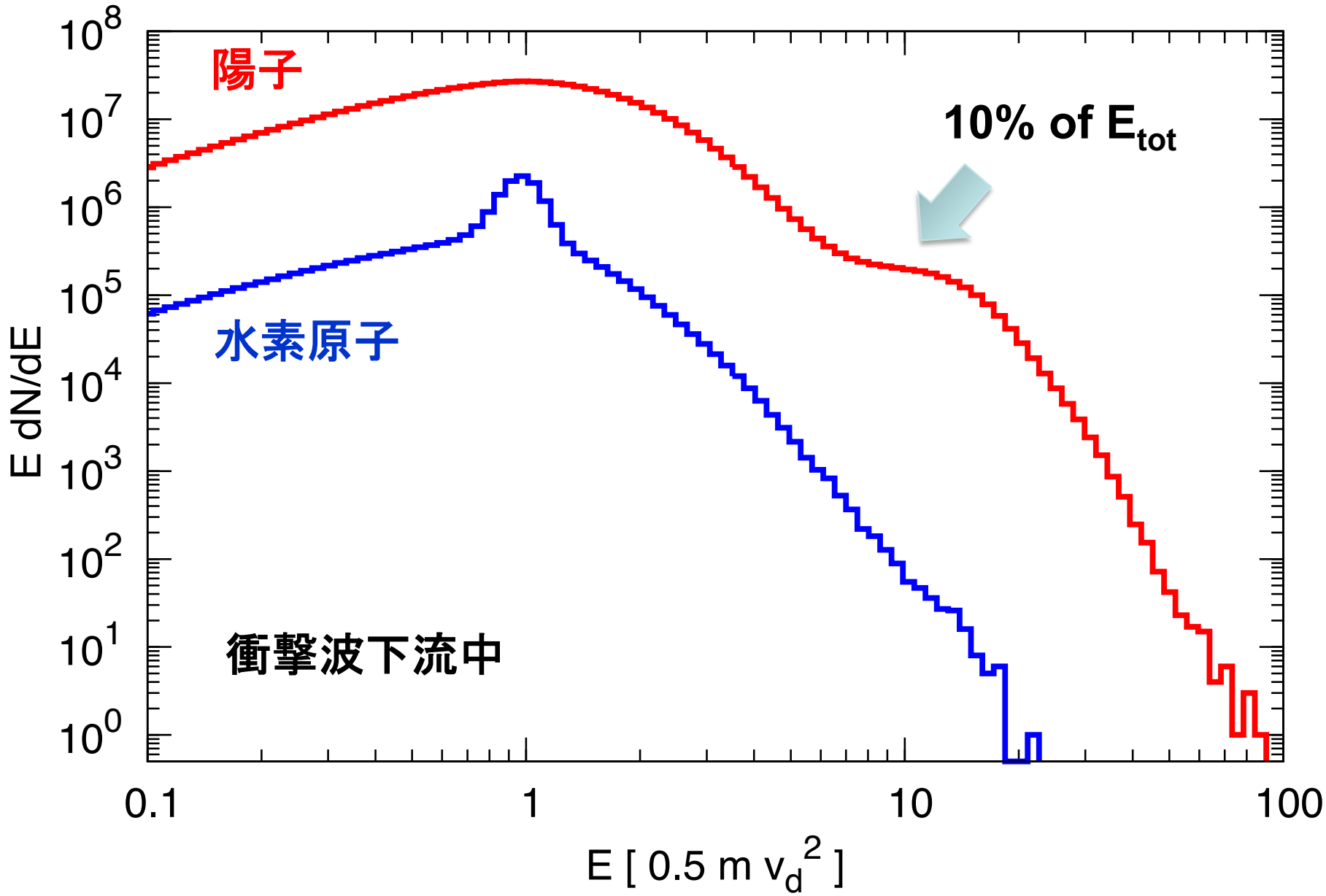
$r_{sub} = 3.47$
$< r_{tot}$

$L_{pre} \sim 10^{15\text{-}16}$ cm $n_{1/cc}^{-1}$

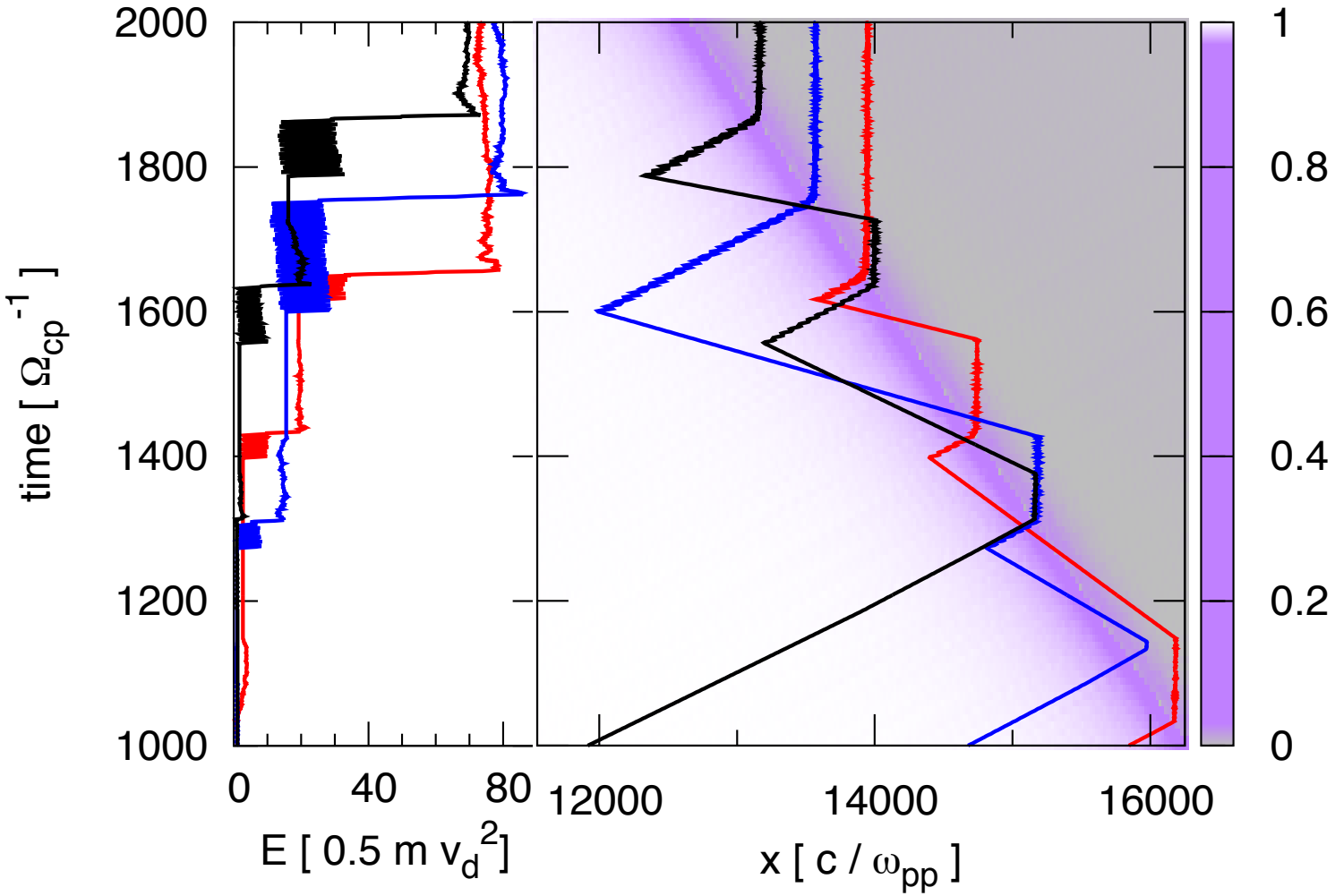
$L_{diff,Bohm} \sim 10^{15}$ cm $u_{sh,3000km/s}^{-1}\ B_{100\mu G}^{-1}\ E_{TeV}$

この速度場中で衝撃波加速が起きると、E^{-2}よりソフトなスペクトルになる

エネルギースペクトル


陽子
水素原子
10% of E_{tot}
衝撃波下流中
E dN/dE
10^0
10^1
10^2
10^3
10^4
10^5
10^6
10^7
10^8
0.1
1
10
100
E [0.5 m v_d^2]

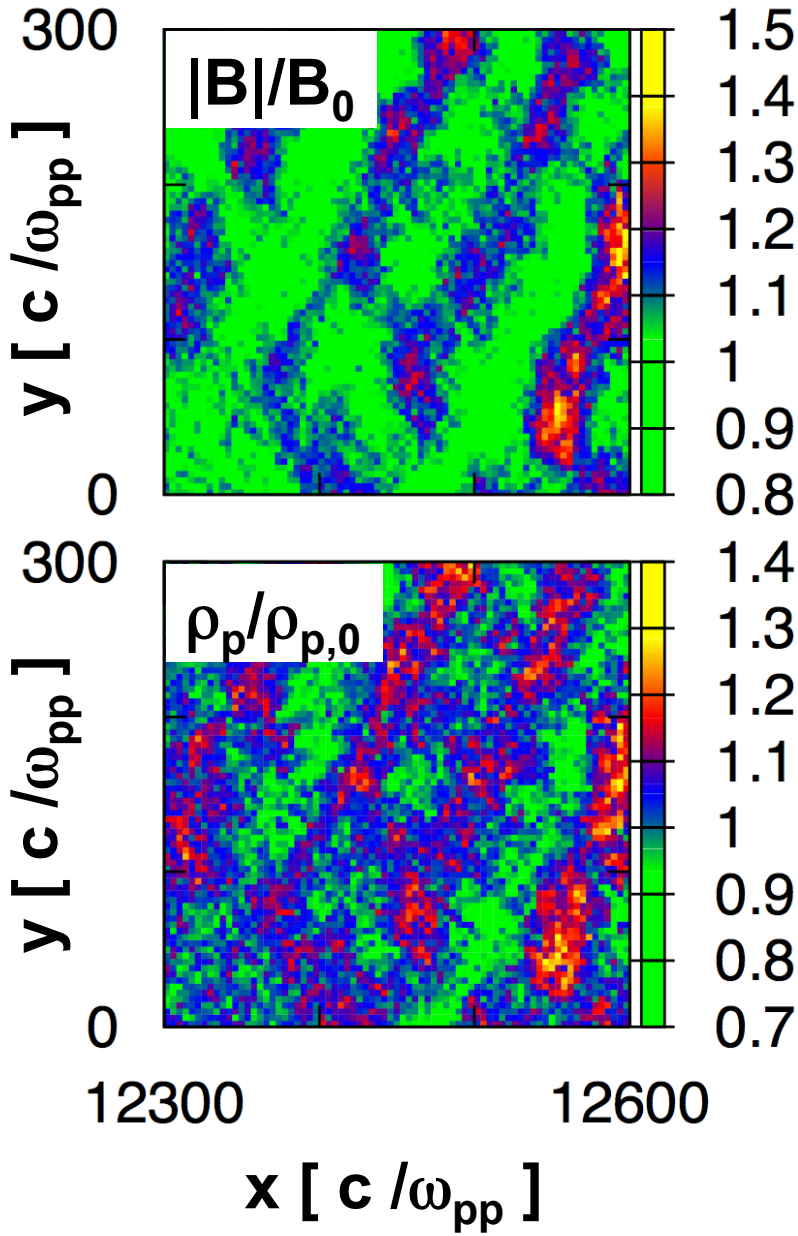
加速された粒子の軌跡



下流からしみ出した水素原子は、上流でのピックアップと、
二回目の衝撃波加熱により、初期の10倍にまで加速される。

水素原子は、衝撃波加速の注入に重要！

磁場と密度 （上流領域）



|B| と ρ_p は相関 → Fast mode

$\delta B / B_0 \sim 0.5$

(Drury & Falle, 1986
Chalov 1988)

Drury instability?
拡散する粒子が必要。
でも、Pickup ionは磁化している。

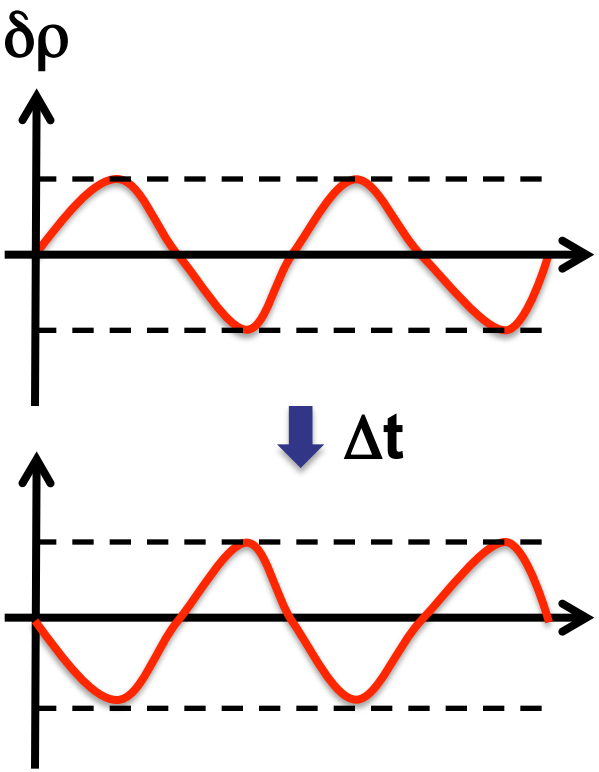
$P_\perp / P_\parallel > 1$ は、slow mode
と Alfven mode を励起する。

新しい不安定性

Ohira, MNRAS, 2014

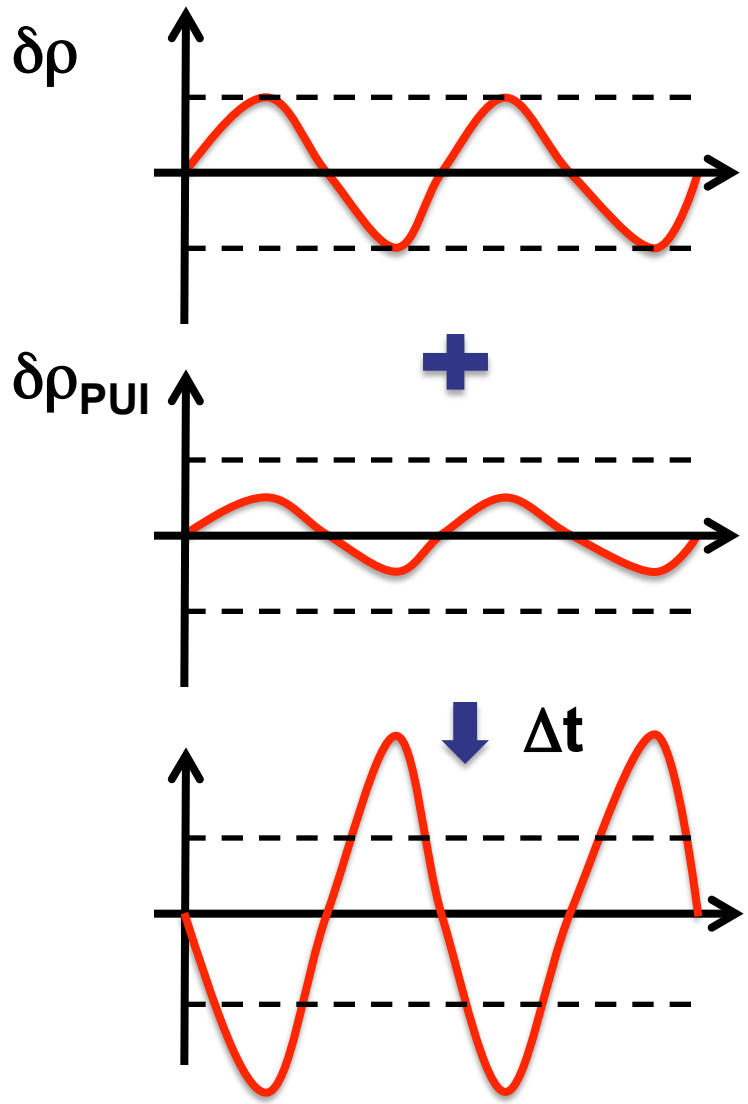
音波不安定性の物理機構

安定な音波



安定

電離による Pickup ions の注入がある場合



水素原子は高密度領域で、より電離される。

+

$T_{PUI} >> T_{up}$

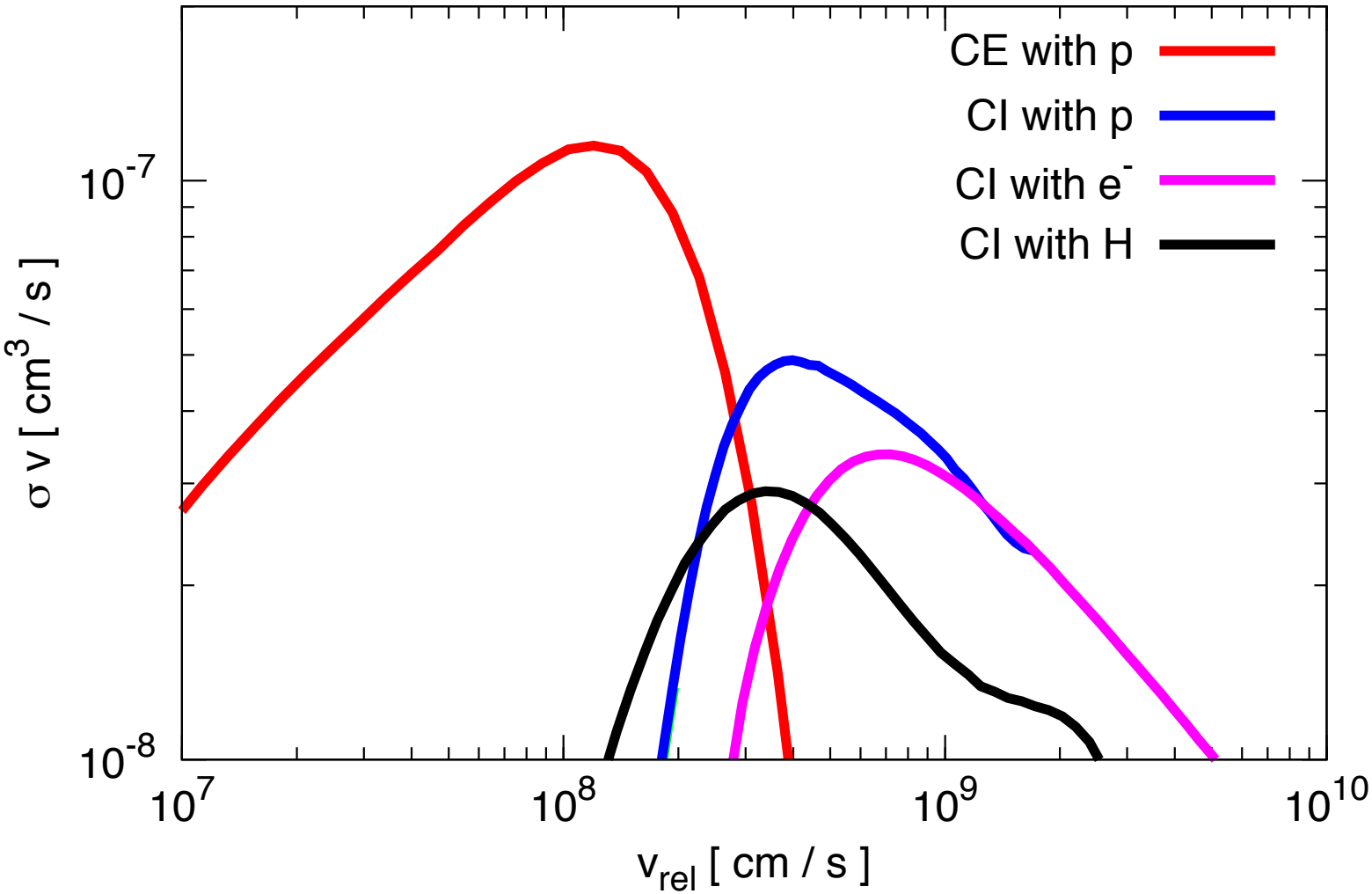
$(\delta p_{PUI}/\delta\rho_{PUI} >> \delta p/\delta\rho)$

↓

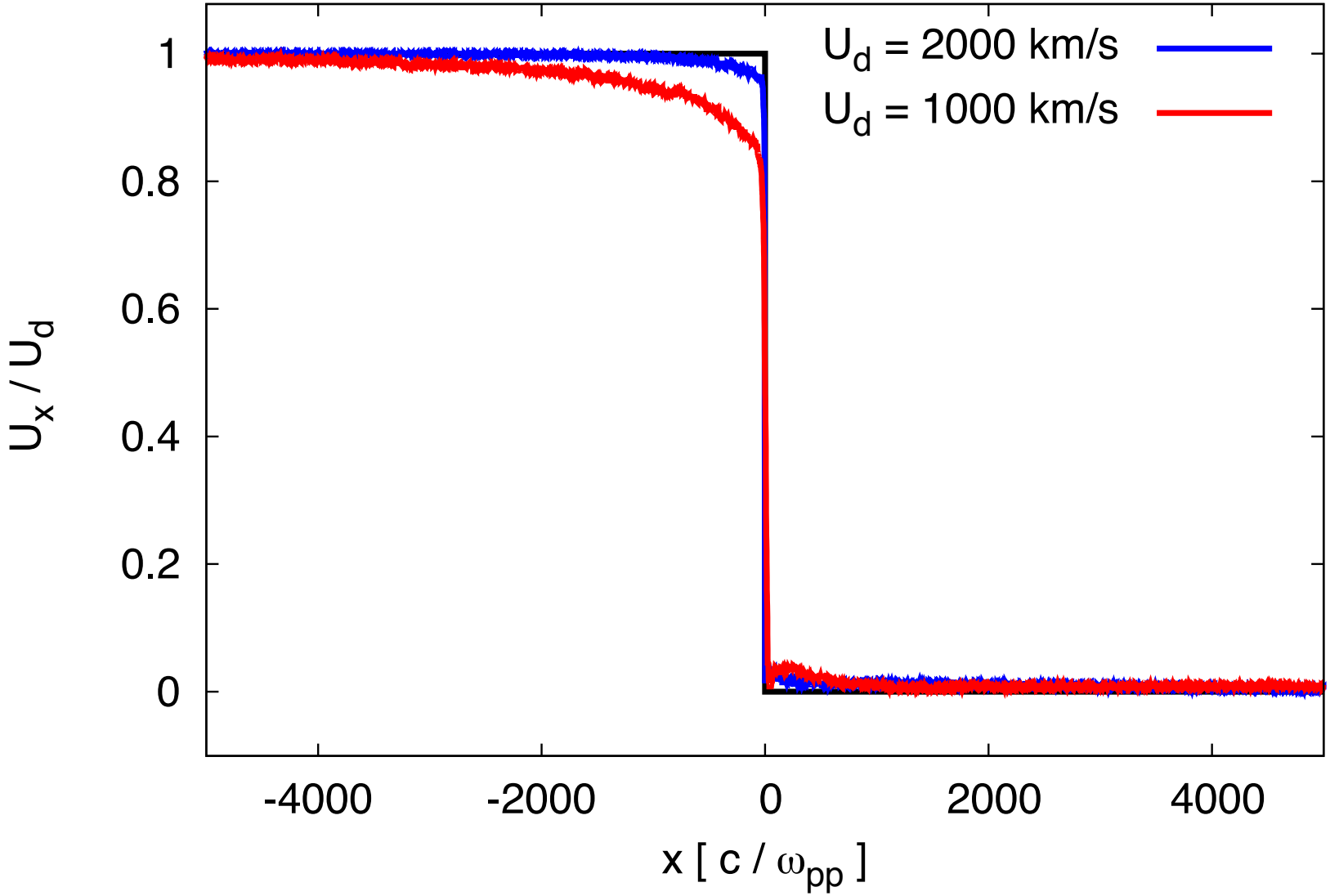
不安定!

Ohira, MNRAS, 2014

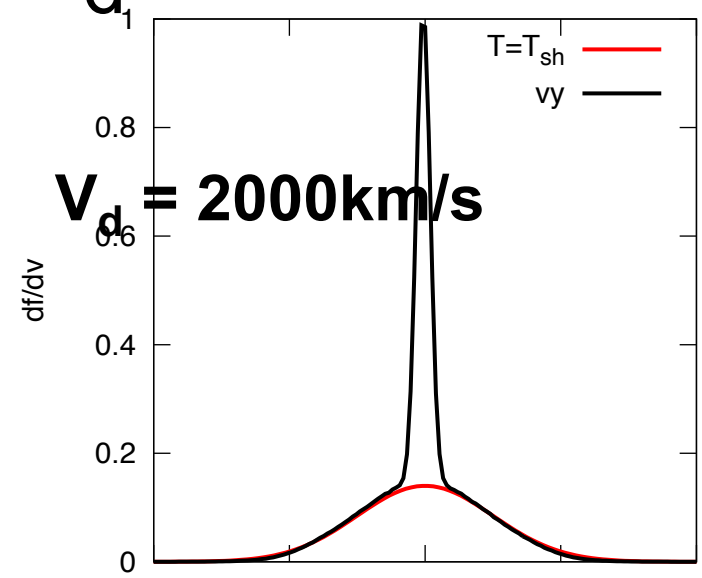
V_d = 1000 km/s と 2000 km/s の比較



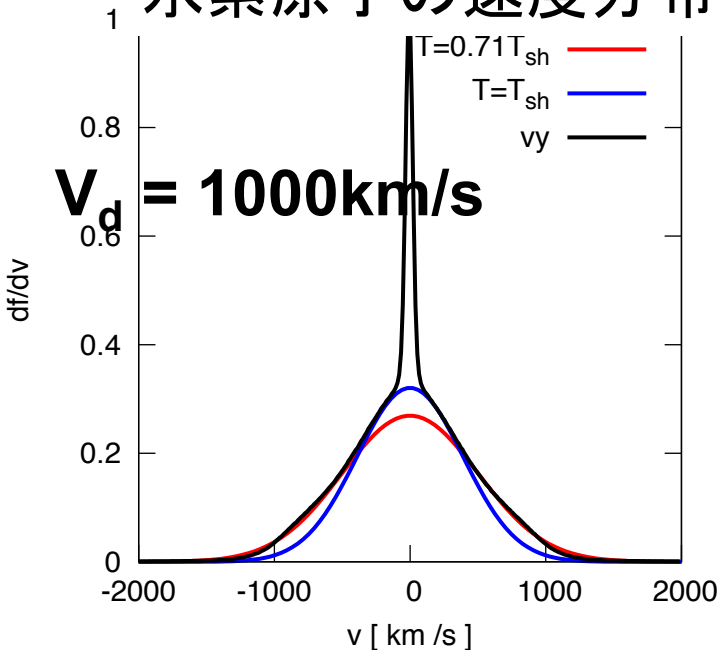
V_d = 1000 km/s と 2000 km/s の比較



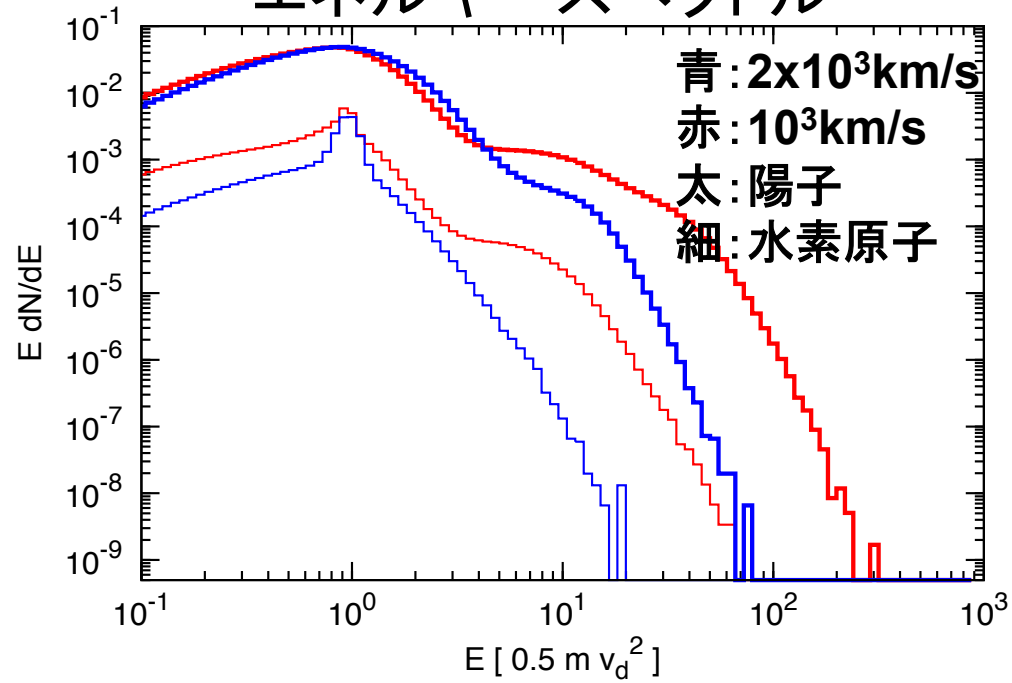
V_d = 1000 km/s と 2000 km/s の比較

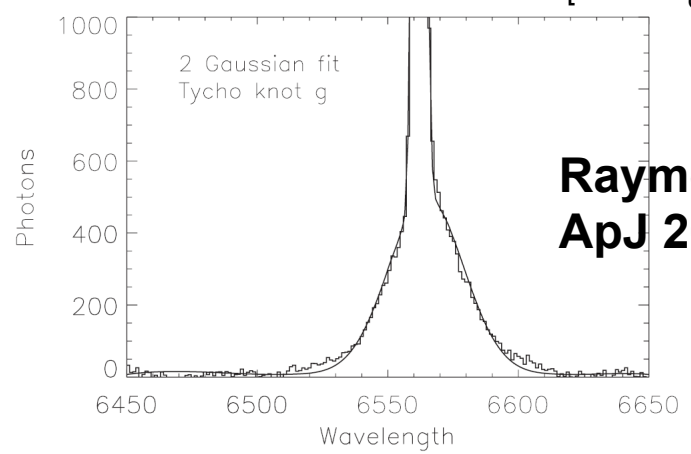


水素原子の速度分布



エネルギースペクトル

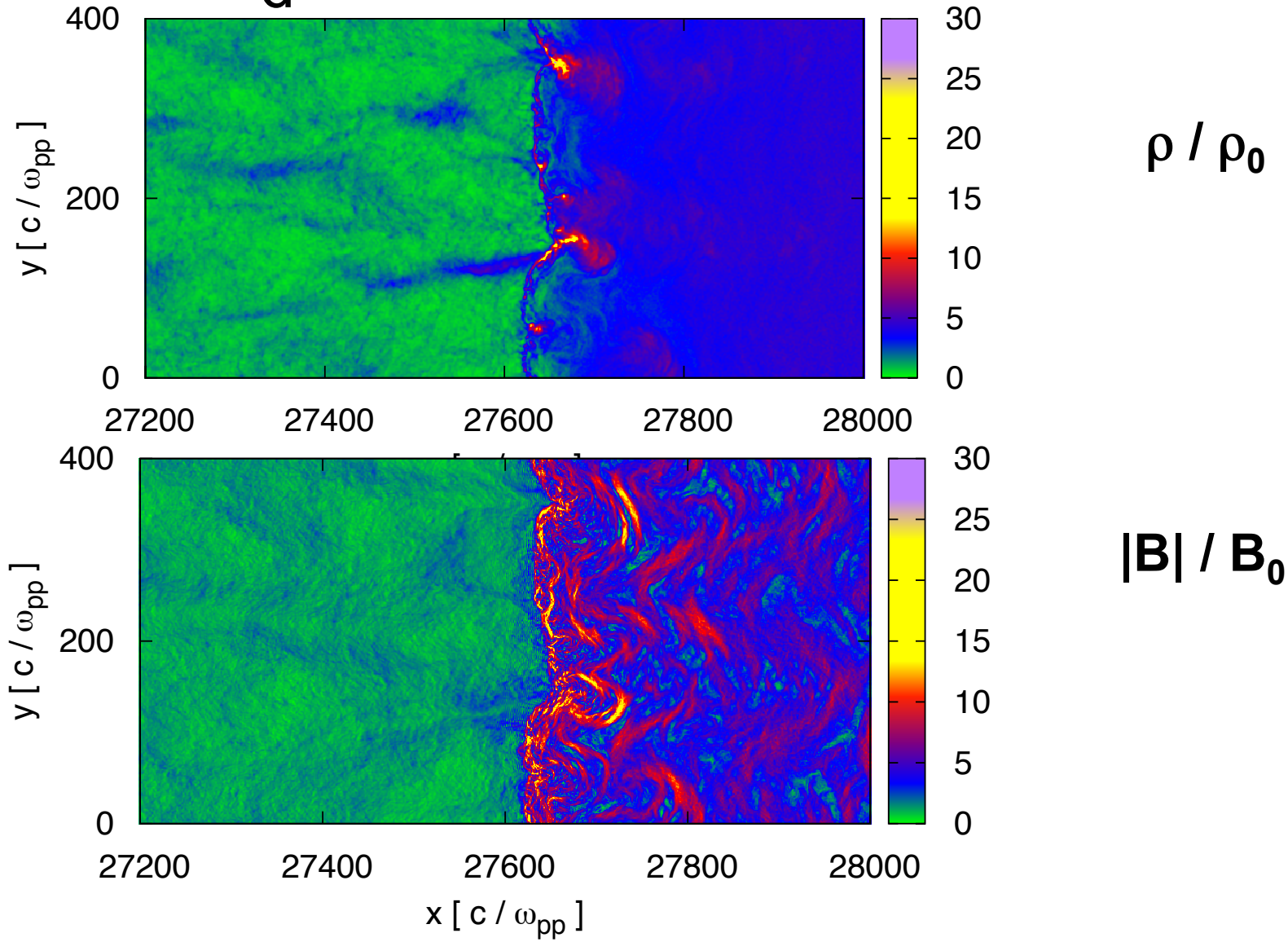




Raymond et al., ApJ 2010

Figure 4. Observed Hα profile of a section of knot "g" in Tycho's SNR (histogram) with best two-Gaussian fit. The fit is poor near 6520 Å and 6600 Å.

$M_A = 10 \rightarrow 20$ and $V_d = 2\times10^3 km/s \rightarrow 10^3 km/s$



まとめ

SNRの周りの星間ガスは必ずしも完全電離状態ではない。

部分電離プラズマ中を伝搬する無衝突垂直衝撃の
ハイブリッドシミュレーションを世界で初めて行った。

下流の高温水素原子が衝撃波上流へしみ出す。

上流へしみ出した水素原子は、上流で電離してPickup ionになる。

Pickup ionは、衝撃波構造を変える。

Pickup ion は上流でプラズマ不安定性を励起する。

不安定性によってできた$\delta\rho$が、衝撃波下流で磁場を増幅する

しみ出した水素原子は加速される。

今後の予定 : 3D and M_A = 100