

非線形磁気流体波の 変調不安定性に関する理論的研究

○成行 泰裕（富山大・人間発達）

共同研究者：

羽田 亨（九大・総理工）

坪内 健（電通大）

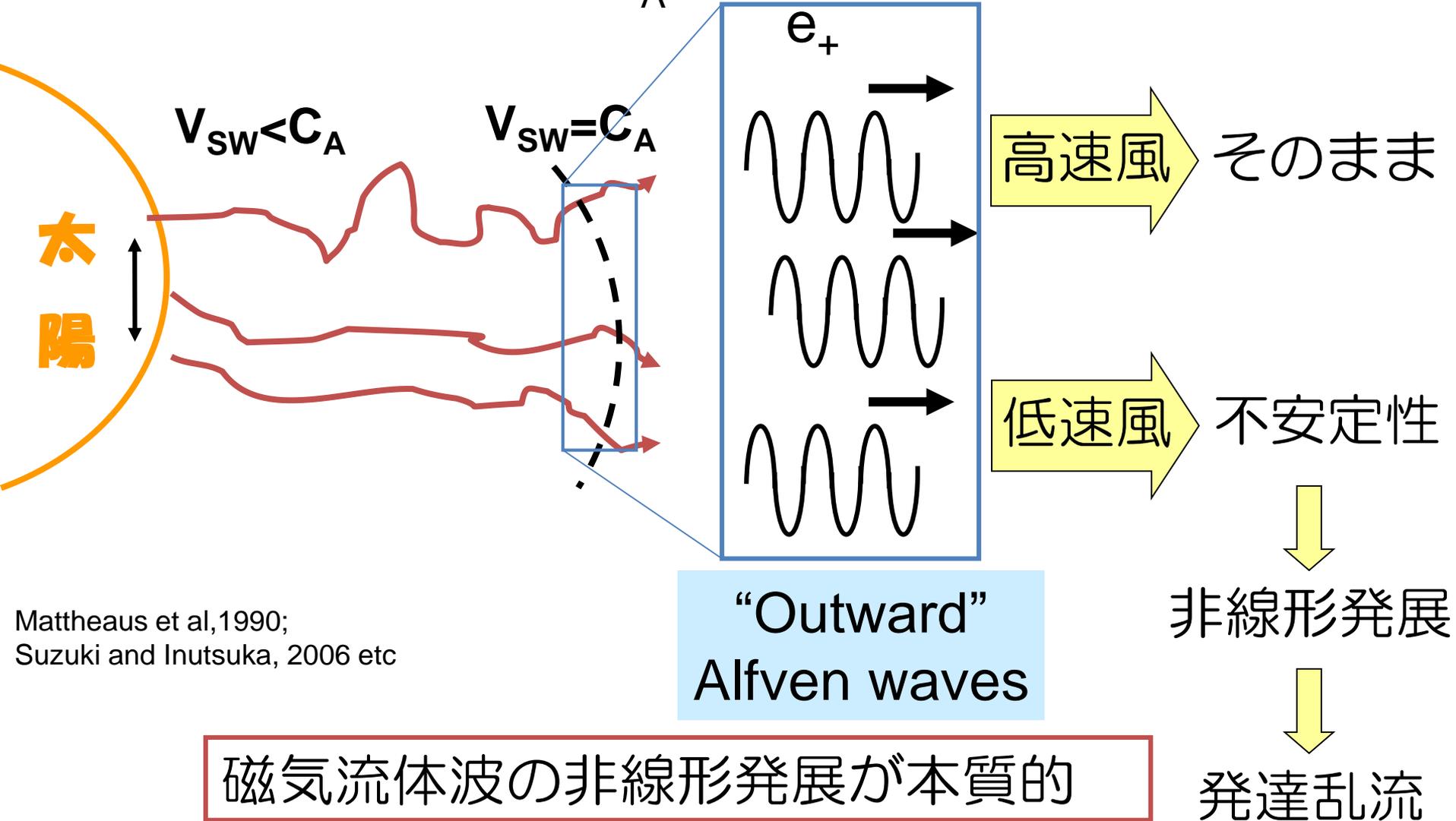
梅田 隆行（名大・ISEE）

齊藤 慎司（名大・理/ISEE）



惑星間空間発展

★ 磁気流体波の発展 (C_A : アルヴェン速度)



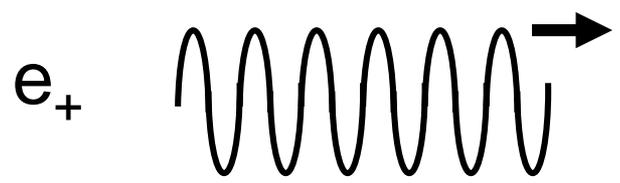
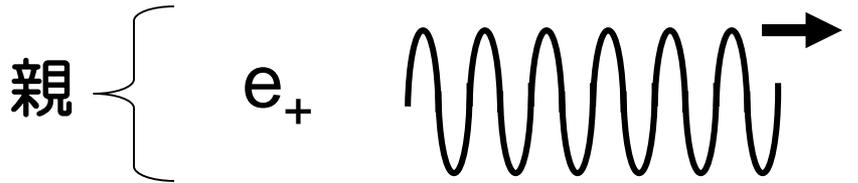
Mattheaus et al, 1990;
Suzuki and Inutsuka, 2006 etc

磁気流体波の不安定性

■ 磁気流体波のパラメトリック不安定 [Terasawa et al, 1986]

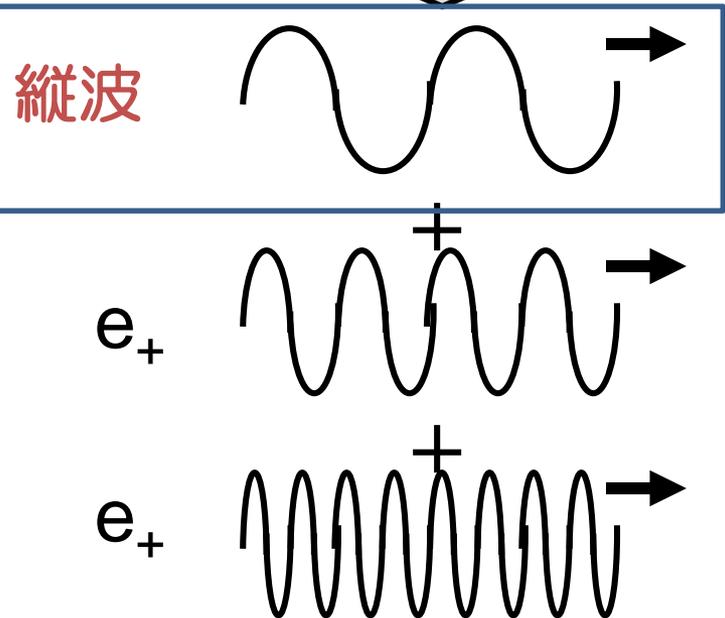
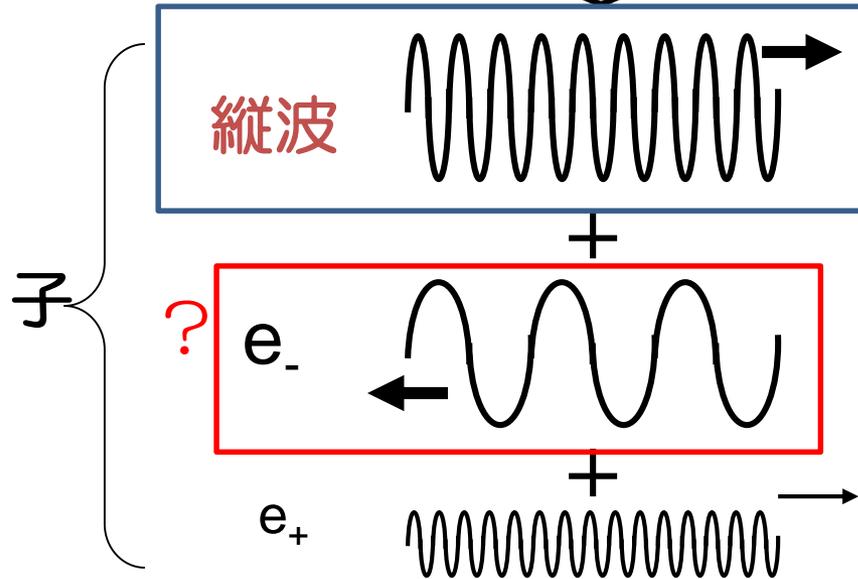
● 崩壊不安定型

● 変調不安定型



線形成長：大 





変調不安定性についての研究

★ 既存の理論・シミュレーション研究の改良 ⇒ D論, 大林賞 (SGEPSS)

■ [Nariyuki+Hada, JGR, 2007] **変調不安定性が支配的**
崩壊型+非線形ランダウ減衰+有限ラーマ半径効果

[Ichikawa+Taniuchi, 1973; Dythe, 1976; Yajima et al, 1978]

[Yajima et al, 1966; Passot+Sulem, 2004]

*ラングミュア波

■ [Nariyuki, Hada, Tsubouchi, POP, 2007; 2008; 2010]
非単色スペクトル+非線形ランダウ減衰

3学会合同(2007年)から物理学会参加

★ より深い理論の改良・一般化 (本研究)

① [Nariyuki, Hada, Tsubouchi, JGR, 2009]

崩壊型+非線形ランダウ減衰+ビーム成分

② [Nariyuki, POP, 2015]

プラズマの膨張効果を含む理論モデル

③ [Nariyuki, Umeda, Saito POP, 2013]

運動論的流体モデルの検討

①ビーム成分の影響(1)

★太陽風プロトンにはビーム成分が存在している：

■コア成分との密度比が0.05~0.25

■コア成分との速度差が1.5~2.5V_A

★多成分のパラメトリック不安定性(理論)：

$$L_+L_-D + L_+R_-B_{-cc} + L_+R_-bB_{-ccb} + L_-R_+B_+ + L_-R_+bB_{+b} + (B_{-cc}B_{+b} - B_{-ccb}B_+)(R_-R_+ - R_-bR_+)/D = 0$$

非線形項

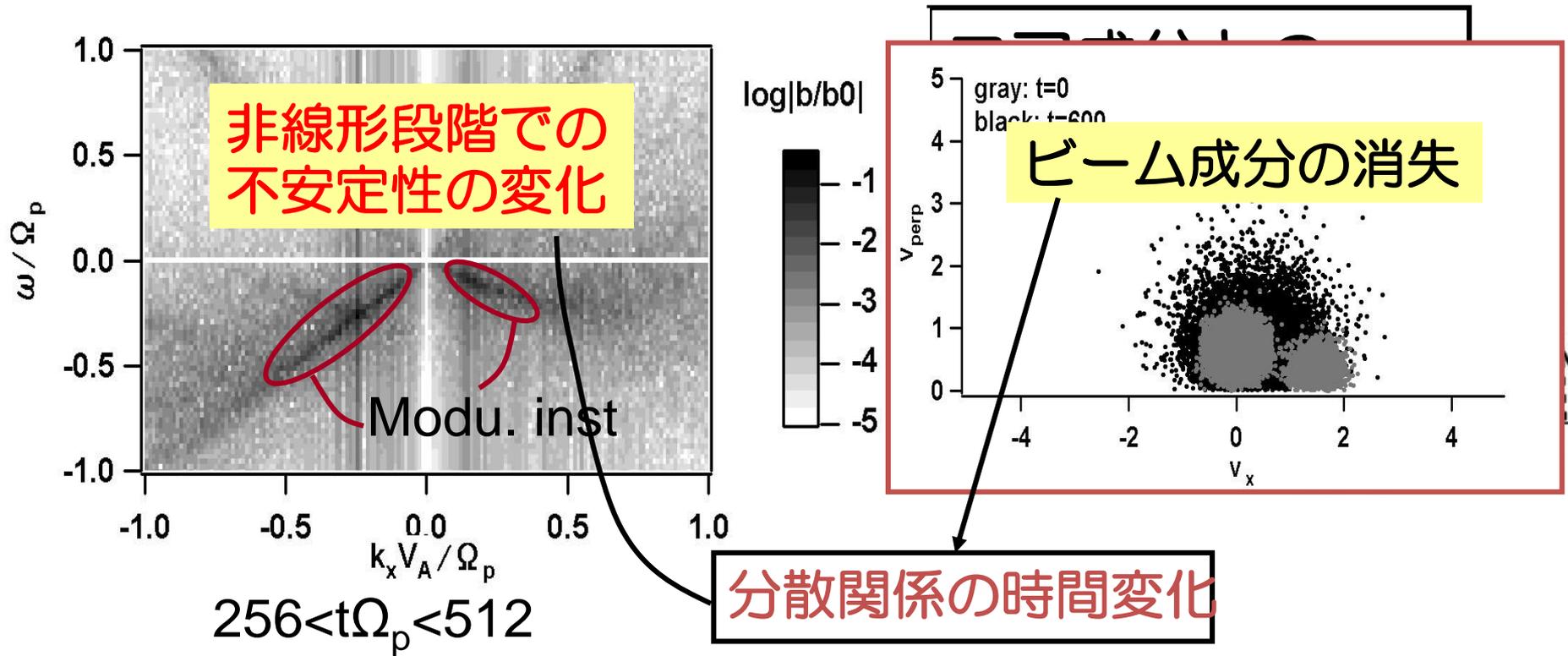
■流体：Hollweg et al[1993], Gomberoff et al[2002]

■流体+運動論：Kauffmann+Arandeda[2008]<-α粒子

Nariyuki et al[2009]<-ビーム成分

①ビーム成分の影響(2)

★ 1次元イオンハイブリッド計算 (ビームは安定)



Citation: Y. Nariyuki, T. Hada, and K. Tsubouchi, Parametric instabilities of circularly polarized Alfvén waves in plasmas with beam protons, JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, 114, A07102 (2009); doi:10.1029/2009JA014178, 2009

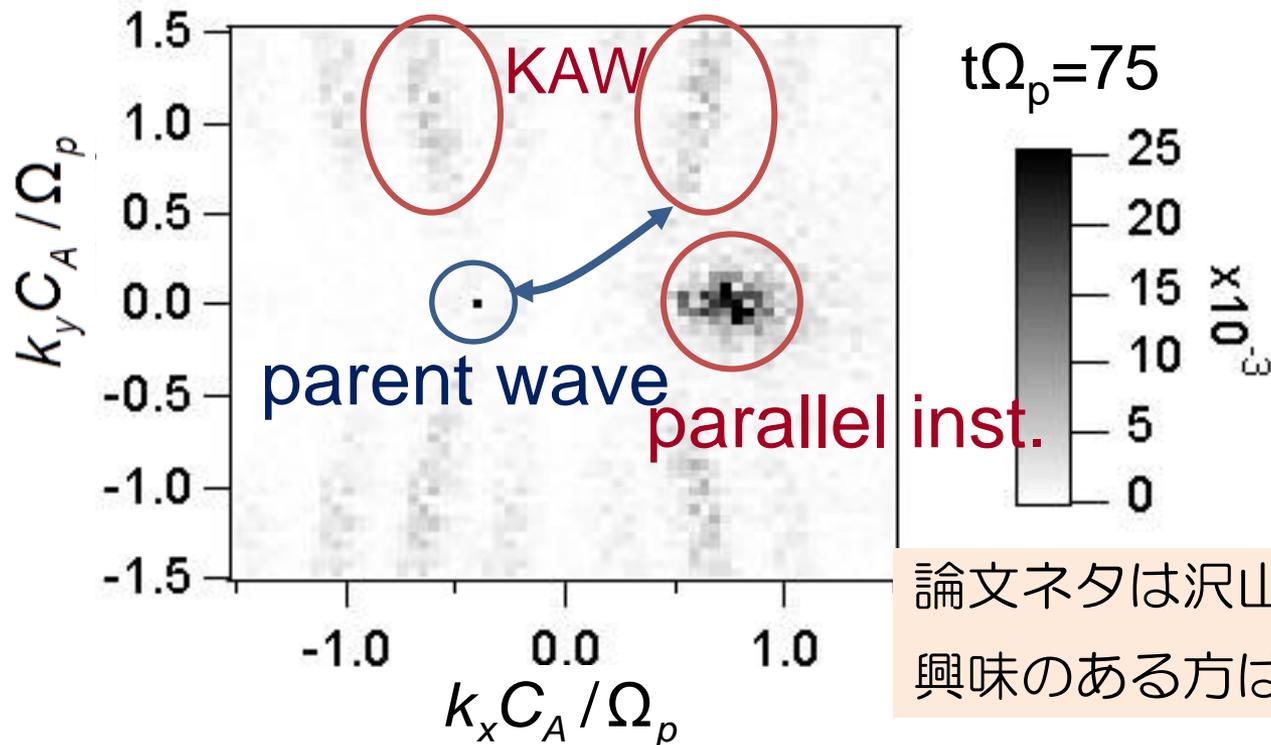
①ビーム成分の影響：その後

★ ビーム成分は運動論アルヴェン波(KAW)を励起し得る

■ KAWと低周波磁気流体波の非線形相互作用

[Nariyuki et al, POP, 2012; ApJ, 2014]

(2次元ハイブリッド計算)



Citation: Y. Nariyuki, T. Hada, and K. Tsubouchi, Nonlinear dissipation of circularly polarized Alfvén waves due to the beam induced obliquely propagating waves, Phys. Plasmas 19, 082317 (2012); doi: 10.1063/1.4748296

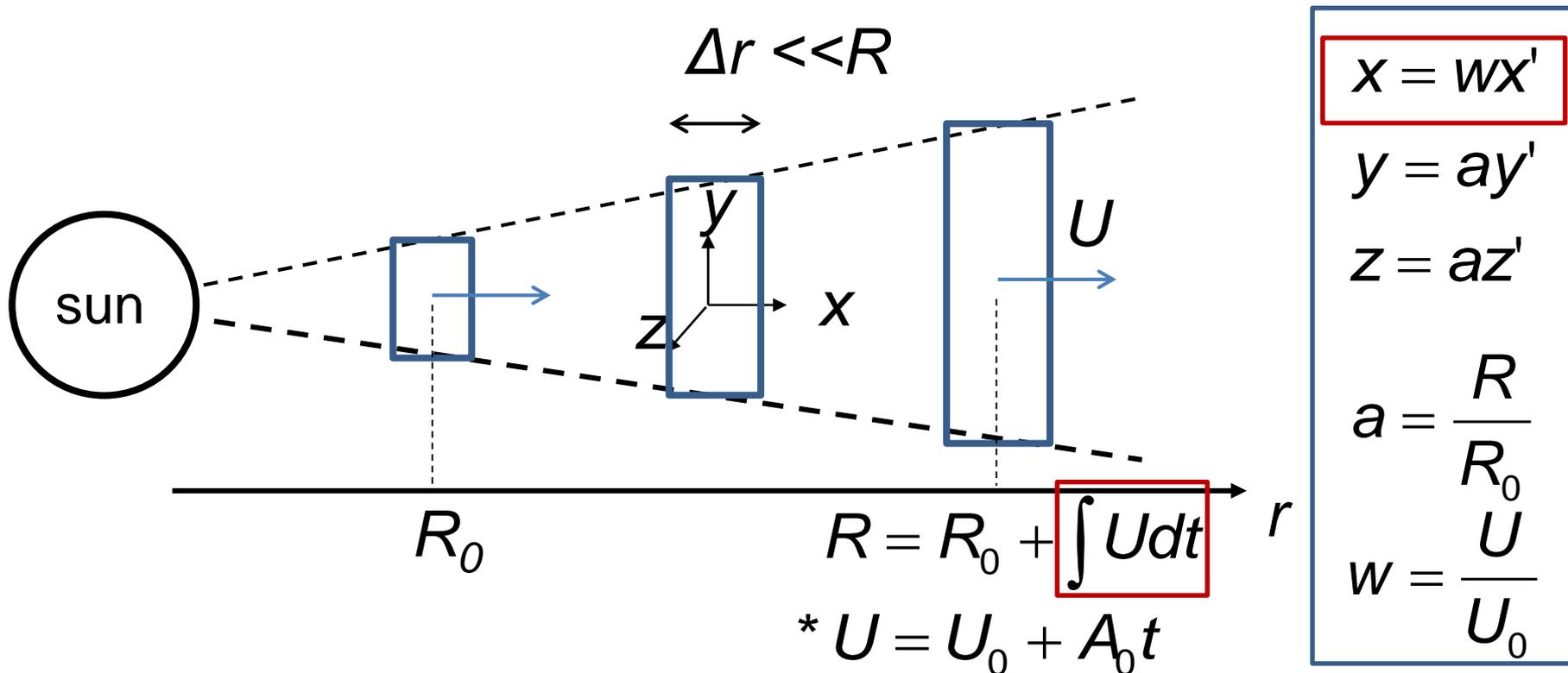
②膨張の効果(1)

★膨張箱モデル[Grappin et al, PRL, 1993]

■ 太陽風速度で移動する直交座標系

★加速膨張箱[Tenerani et al, JGR, 2013; ApJ, 2017; Nariyuki, POP, 2015]

■ 太陽風は惑星間空間でも徐々に加速 [Kojima et al, JGR, 2004]



②膨張の効果(2)

★加速膨張箱モデルからDNLS方程式の導出

[Mio et al, 1976; Mjolhus, 1976]

■ At the order of $\varepsilon^{3/2}$

$$u_1 = \frac{b_1}{\sqrt{\rho_0}} a' w^{\frac{1}{2}}$$

the Walen relation

■ At the order of ε^2

$$\rho_1 = \frac{|b_1|^2}{2(C_A^2 - C_S^2)}$$

static approximation

■ At the order of $\varepsilon^{5/2}$

膨張効果

$$\frac{\partial b_1}{\partial \tau} + \frac{C_{AR}}{4(1-\beta_f)b_{XR}^2 w} \frac{\partial |b_1|^2 b_1}{\partial \xi} + \frac{iC_{AR}^2}{2b_{XR} w^2} \frac{\partial^2 b_1}{\partial \xi^2} = - \left(\frac{3 \dot{a}'}{2 a'} + \frac{3 \dot{w}}{4 w} \right) b_1$$

where $\beta_f = \frac{C_{SR}^2}{C_{AR}^2} \propto a'^{-2(\gamma-2)} w^{-\gamma}$.

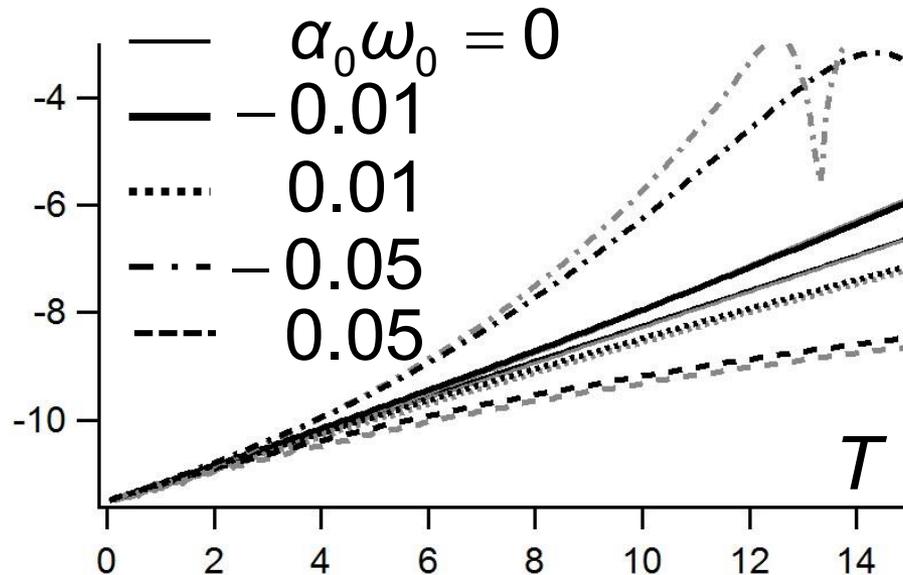
②膨張の効果(3)

★ 膨張が変調不安定性に与える影響

■ 親波の周波数を考慮する必要がある：

$$\frac{\partial \phi_b}{\partial T} = \frac{b_{*0}^2}{W^2} k + \frac{k^2}{W}, \quad b_{*0} : \text{初期振幅}$$

■ 子波の振幅の時間発展($k=-1.0308$):



● 灰線: 数値計算

● 黒線: $f(T) = 10^{-5} e^{-\delta \Gamma_0 T}$,

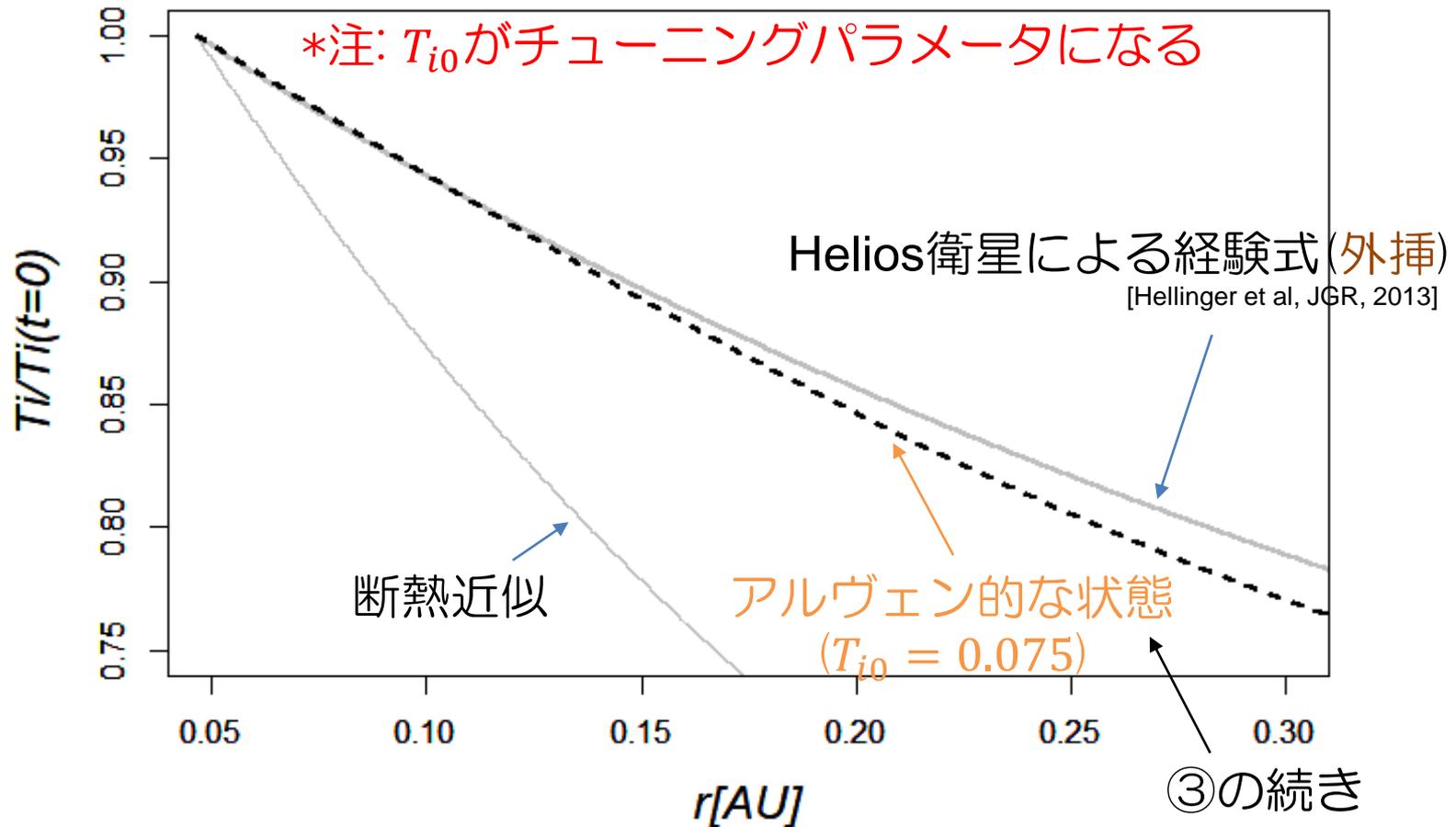
$$\delta = \frac{\dot{\phi}_b}{\dot{\phi}_b(T=0)},$$

Γ_0 : 成長率(非膨張)

②膨張の効果：その後

★ 太陽風温度のモデル [Nariyuki, POP, 2018]

■ 磁気流体波の不安定性は解いていない



③運動論モデル(1)

★ 非線形アルヴェン波の振幅変調モデル

[Mjolhus+Wyller, 1986;1988; Spangler, 1989; Passot+Sulem, 2003]

■ 逡減摂動法でguiding-centerやLandau流体から導出

* ラングミュア波と同様の方法 [Ichikawa+Taniuchi, 1973; Dythe, 1976]

■ Hammet+Perkins(1990)型の静電場closureでも

同じ形の式は導出できる [Medvedev+Diamond, 1996]

⇒ 係数がguiding-centerなどと一致しないのは

低次の打ち切り(3モーメント)が原因?

[Medvedev+Diamond, 1996]

⇒ 中間のアプローチ(逡減摂動法+静電場近似)

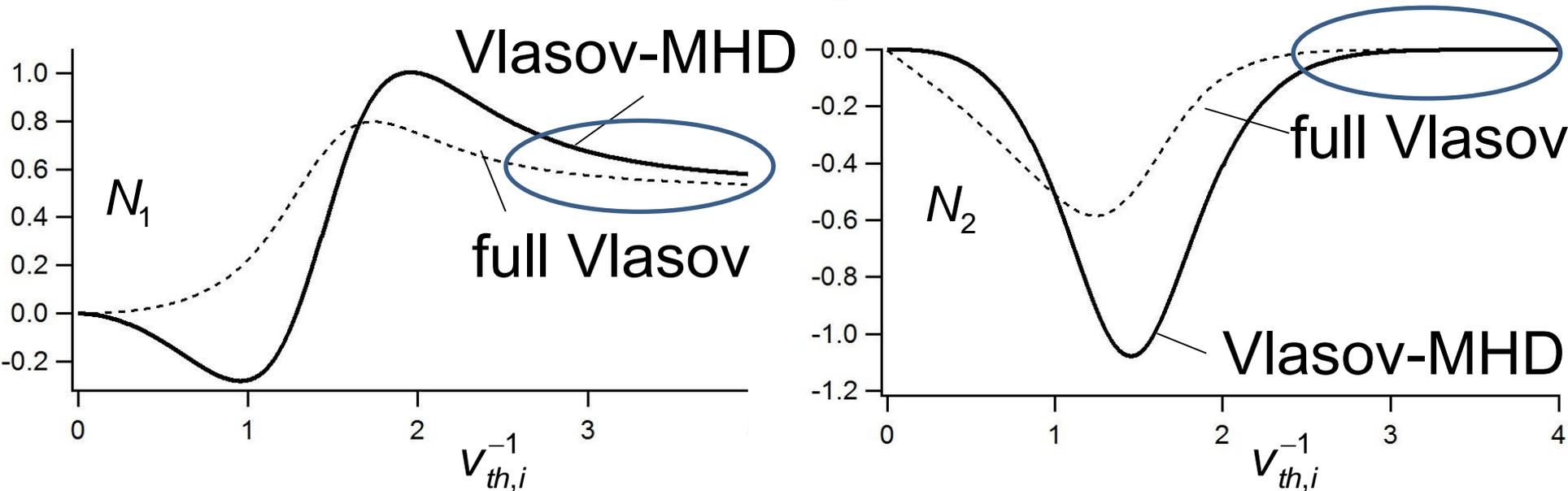
(Vlasov-MHD)

[Nariyuki et al, POP, 2013]

● もし静電場近似で押し通せれば、色々応用可能

③運動論モデル(2)

★ 準定常近似: $\delta n = N_1 |b|^2 + N_2 H(|b|^2)$



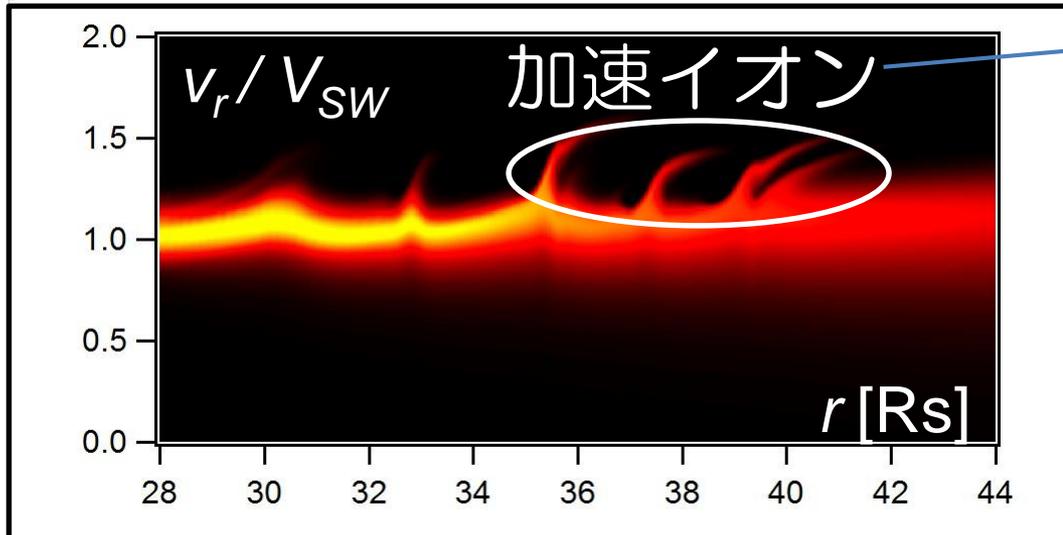
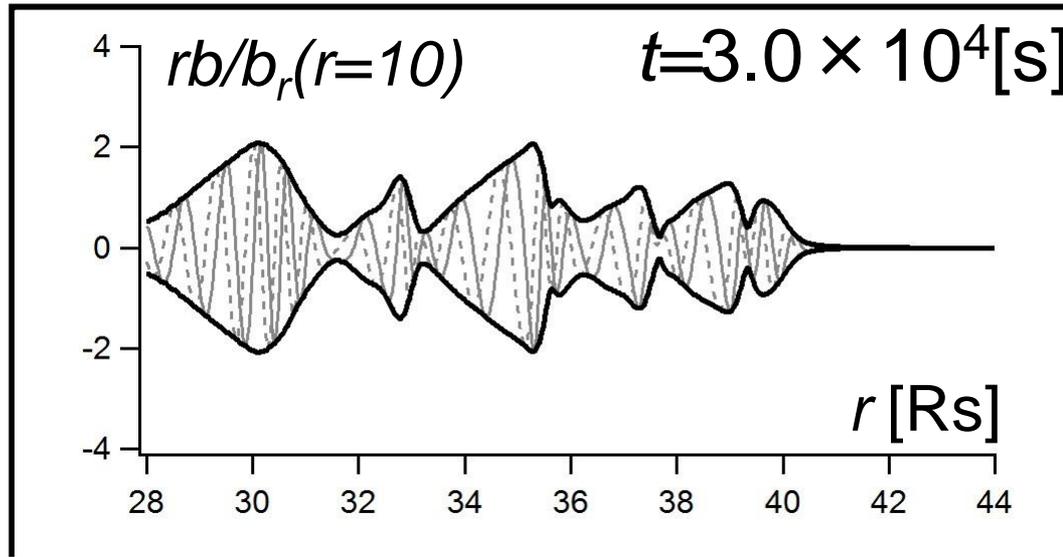
■ 残念ながら Hammet+Perkins型に近かった

⇒ Landau closureにおける高次モーメントの無視よりも
非線形トランジットタイム減衰を落した影響が大きい。

③運動論モデル：その後(1)

★ 太陽近傍(低 β)：1次元球座標Vlasov-MHD

[Nariyuki et al, NPG, 2014]



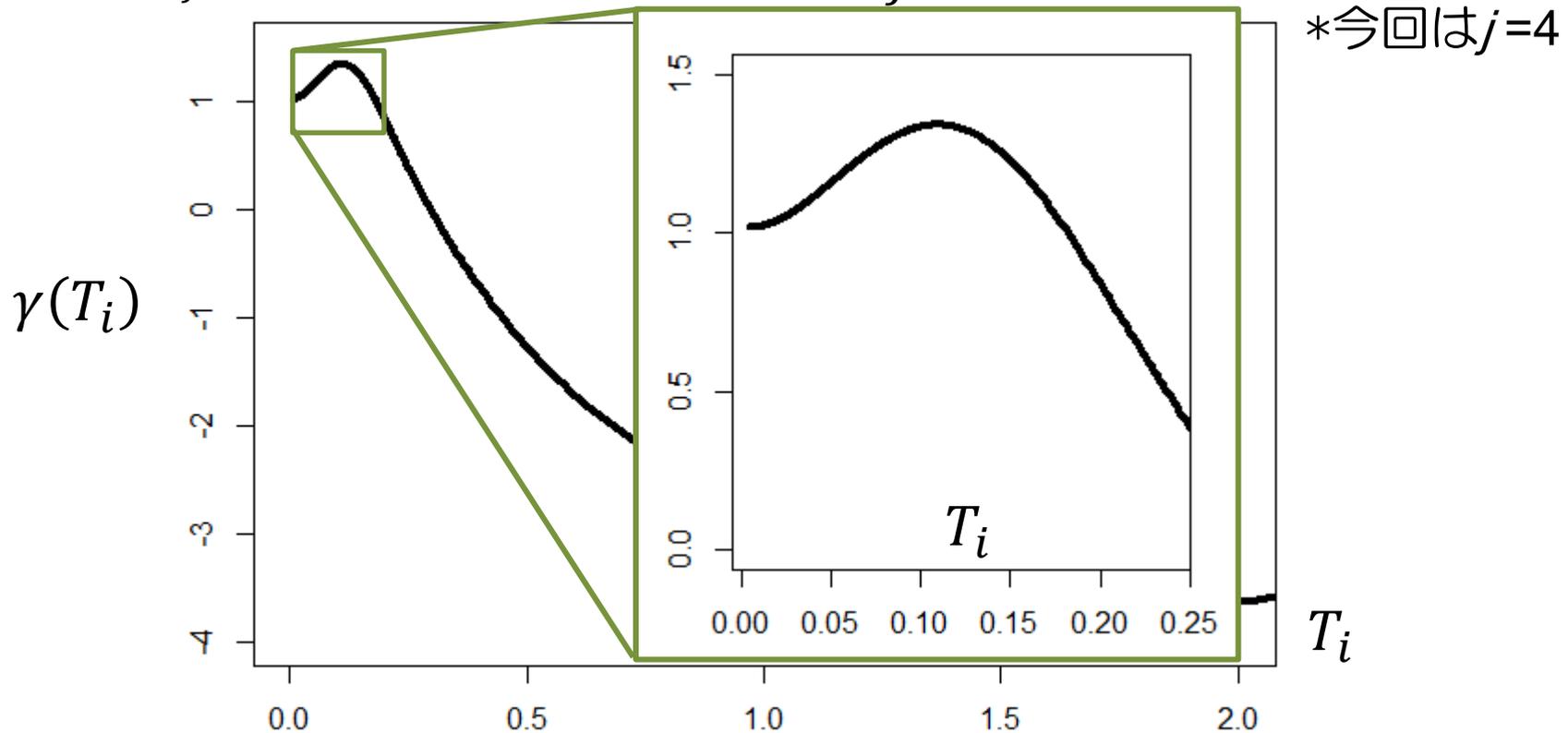
Citation:
Y. Nariyuki, T. Umeda,
T. K. Suzuki, and T.
Hada, Ion acceleration
by parallel
propagating nonlinear
Alfvén wave packets
in a radially expanding
plasma, Nonlin.
Processes Geophys.,
21, 339–346 (2014).
doi:10.5194/npg-21-
339-2014

③運動論モデル：その後(2)

★ 非線形トランジット減衰を含む簡便な表式 [Nariyuki, PTEP, 2016]

★ 有限温度における近似式の導出 [Nariyuki, POP, 2018]

- ① 流体モデルの比熱比を多項式近似： $\gamma(T_i) = 1 + \sum_{j=0}^{\infty} a_j T_i^j$
- ② $N_1 = N_{fluid}$ を条件にして係数 a_j を数値的に求める。



まとめ・展望

★ 現状の太陽風乱流関係の研究：

■ 本講演で触れたテーマ

＋粒子拡散・統計モデル[e.g., H30秋学会]

＋衛星データ解析(SGS乱流モデル) [H30年会]

＋現象論[H29年会]＋3次元流体計算

⇒今後の課題：

各テーマのコンパイル・新しい枠組みの探索

■ 世界的には打ち上げ前後の衛星が控えた注目分野

★ 「プラズマ乱流」としての枠組みの整備

■ 複数の対象に精通する必要がある

● 次回3学会合同：来年か再来年？