

変動惑星圏シミュレーション

寺田直樹、加藤雄人、寺田香織（東北大）

藤原均（成蹊大）

荻野竜樹、梅田隆行（名大STEL）

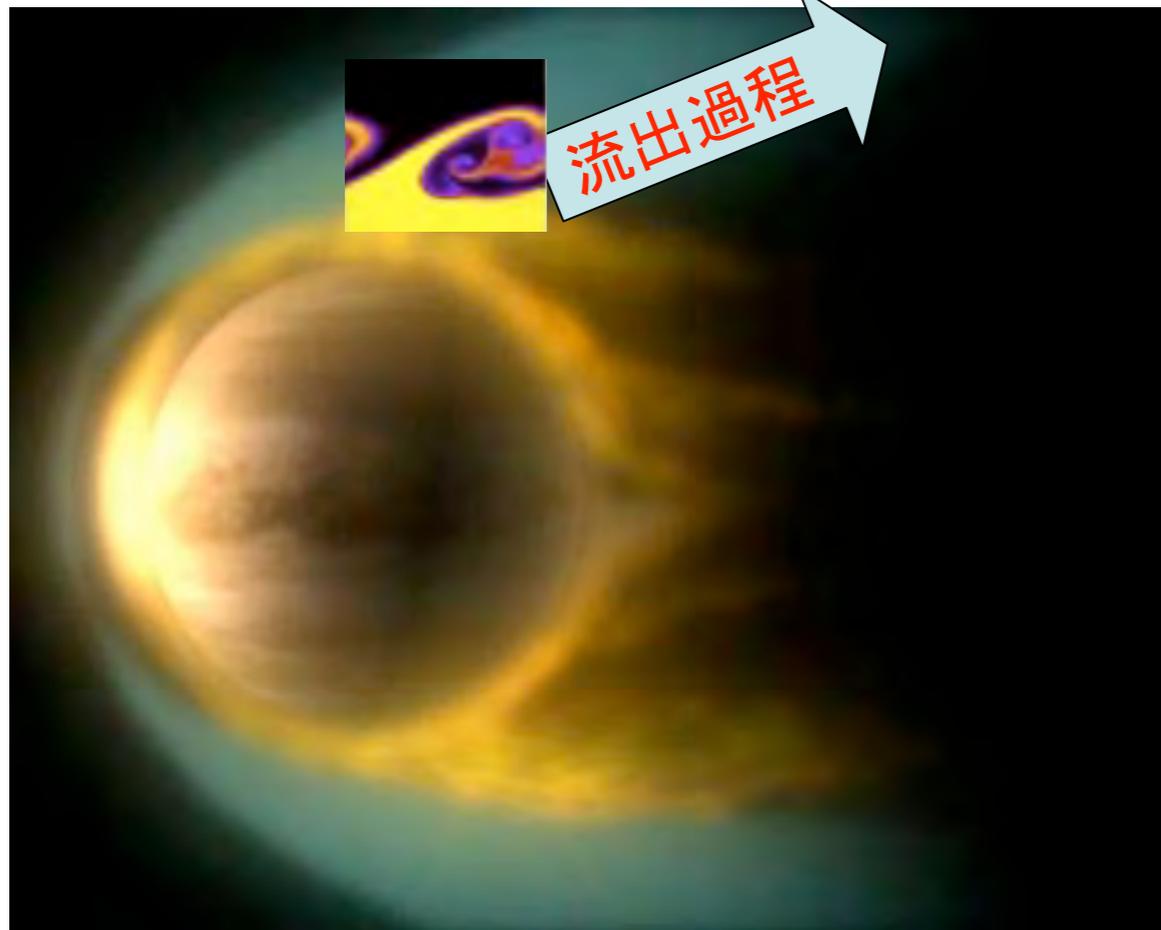
石井克哉、永井亨（名大情報基盤センター）

Outline

- 1.はじめに：惑星電磁圏におけるプラズマ加熱・加速
- 2.地球磁気圏：コーラス放射と放射線帯電子加速
- 3.電子流体・粒子混成コードによる計算機実験
- 4.まとめ

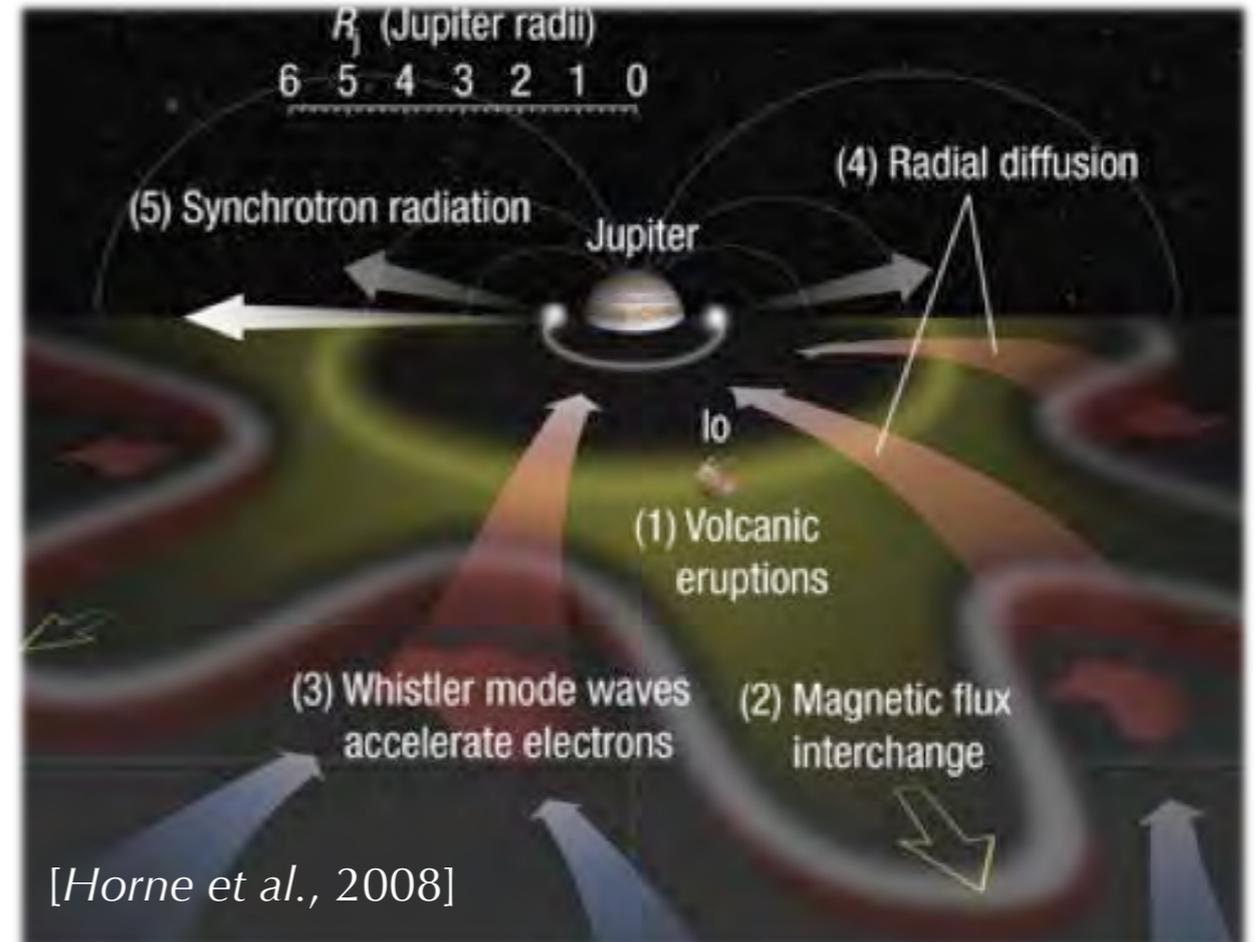
惑星電磁圏におけるプラズマ加熱・加速過程

宇宙空間への大気流出



火星・金星（非磁化惑星）

相対論的高エネルギー粒子の生成



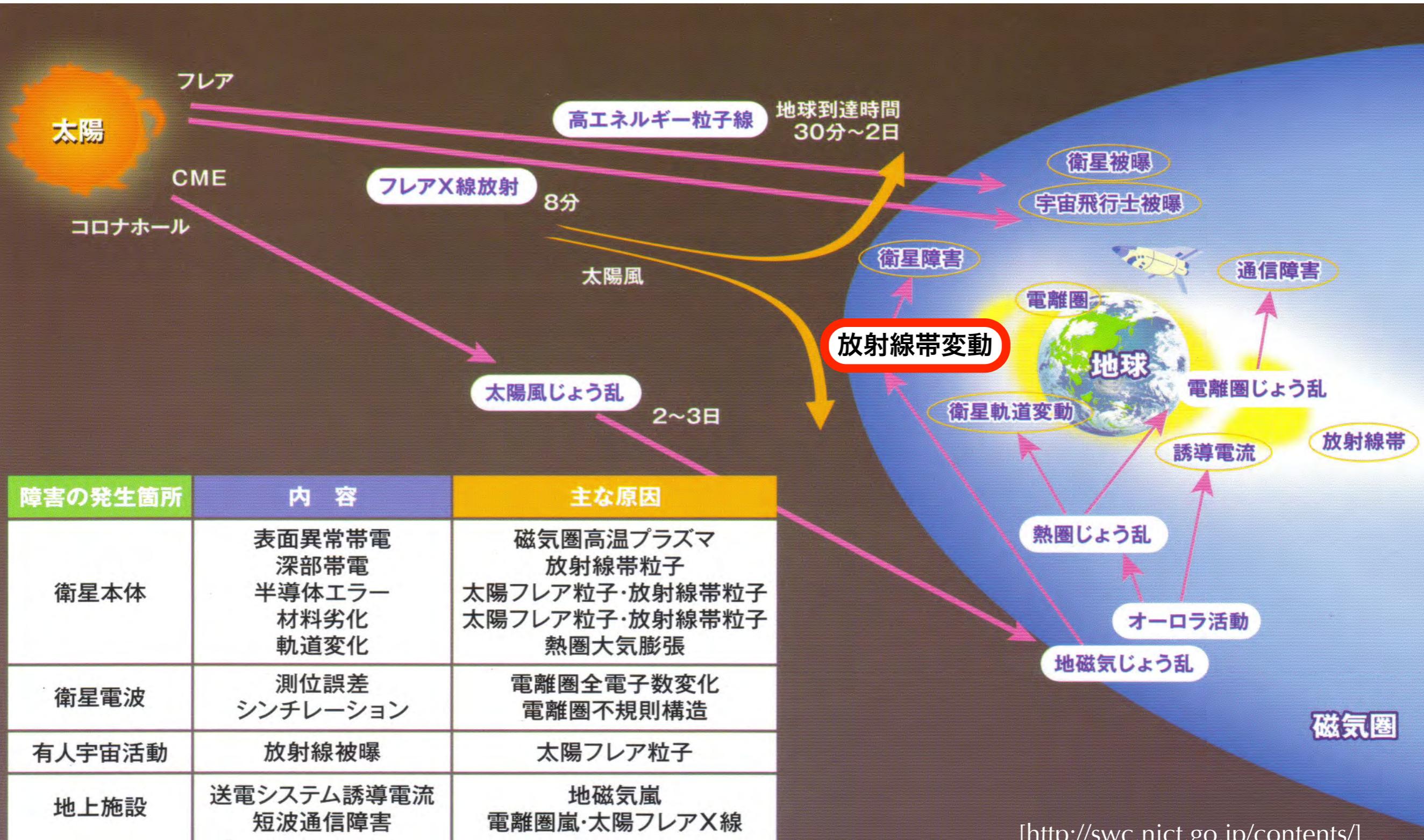
木星・土星（磁化惑星）

典型的な時間スケール

- 分～時 : 大気・プラズマ流出過程
- 分～年 : 境界条件（太陽や下層大気）の周期的変動、突発的変動
- μ 秒～秒 : 加熱・温度構造決定

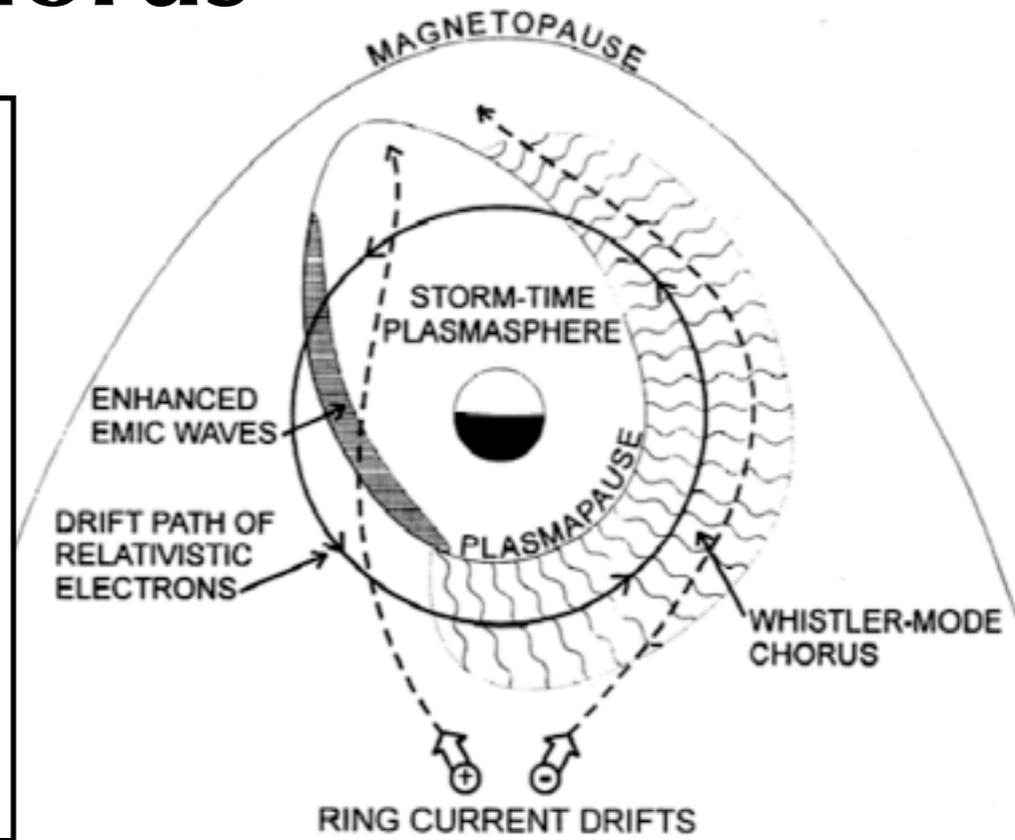
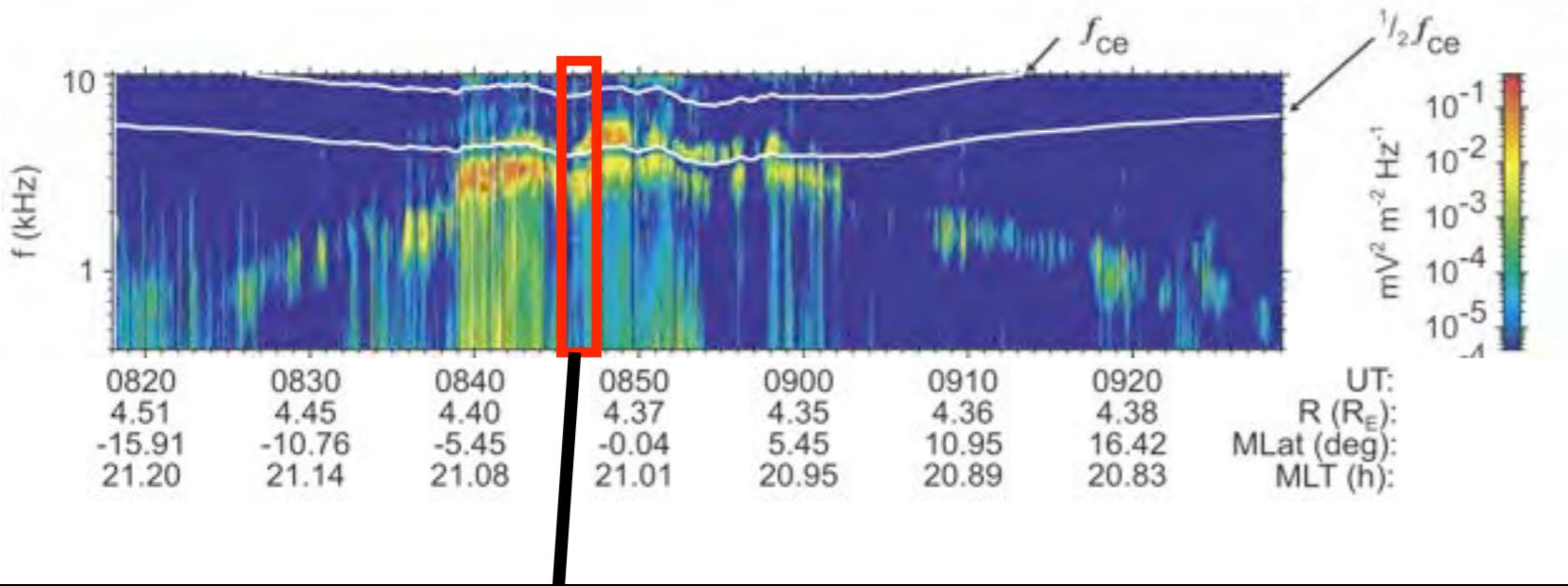
宇宙天気：ジオスペース変動現象

放射線帯粒子ダイナミクス の究明

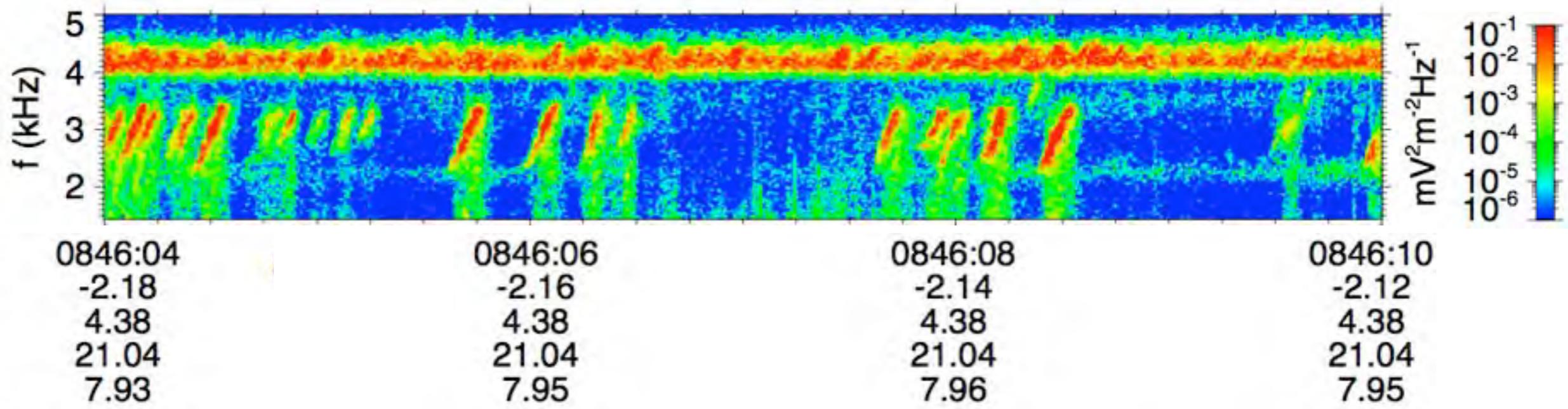


Whistler-mode chorus

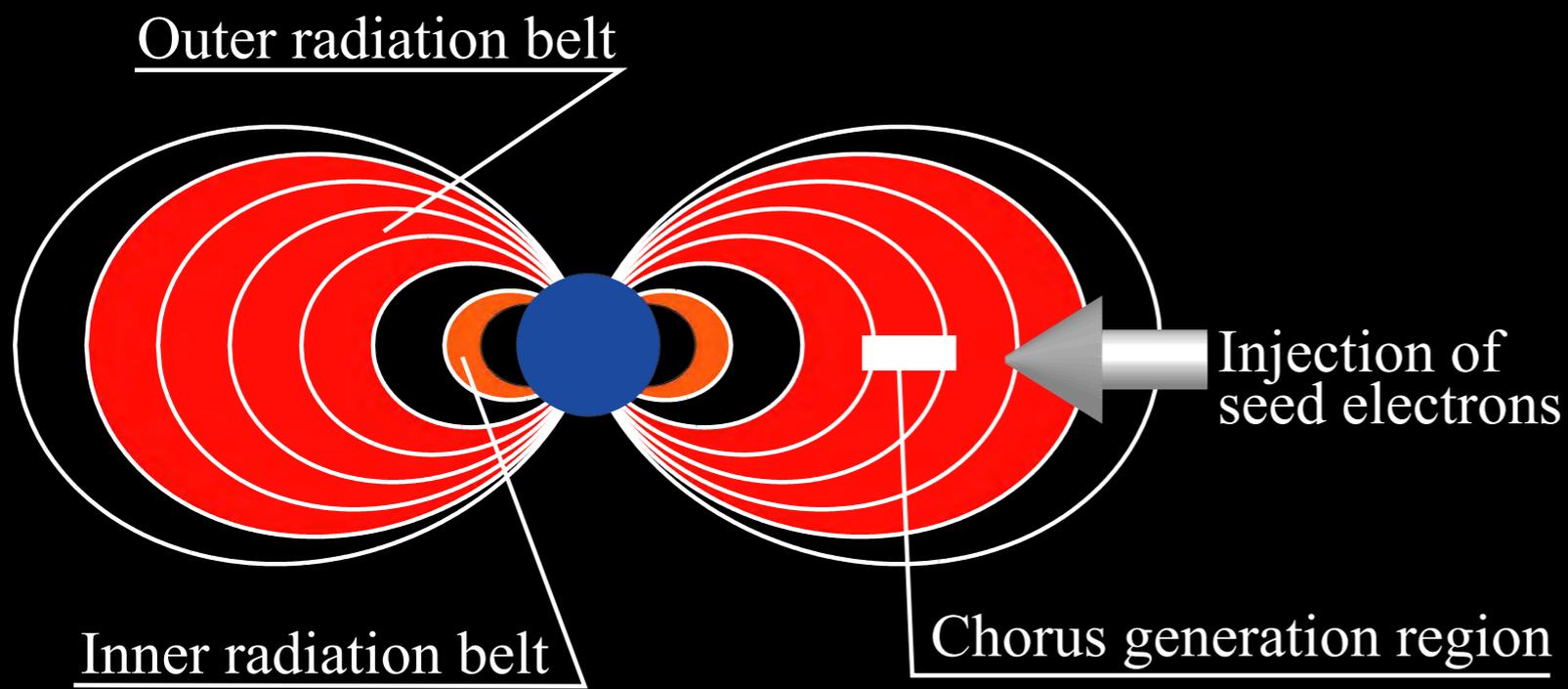
CLUSTER



[Summers et al., 1998]

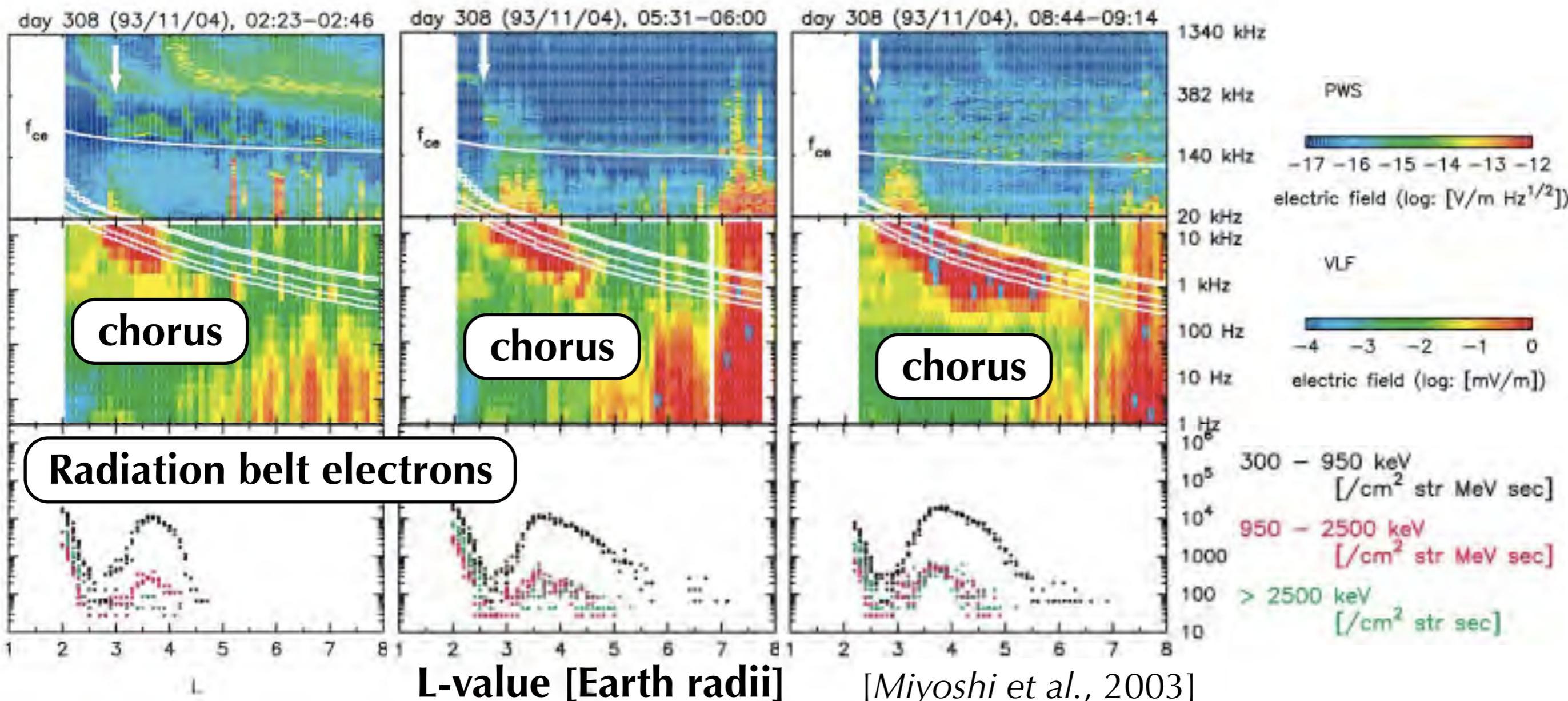


[Santolik et al., 2008]



放射線帯

コーラス放射により
 相対論的電子が生成？



地球周辺で“鍵”となる宇宙プラズマの物理素過程

太陽風乱流

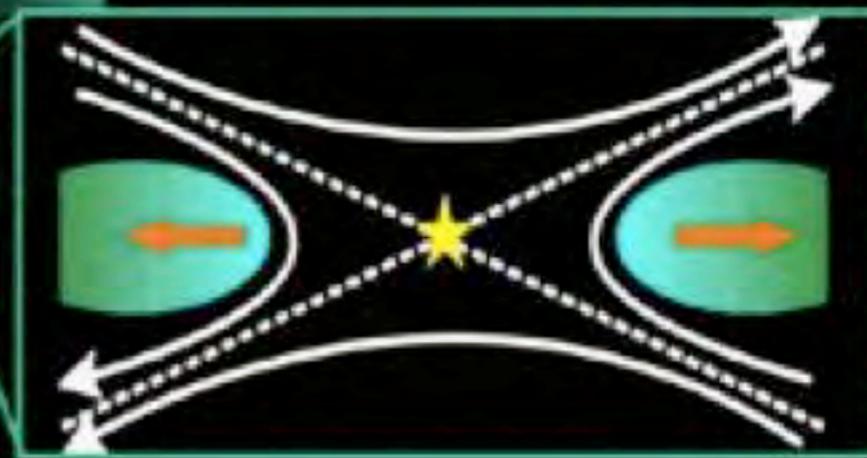
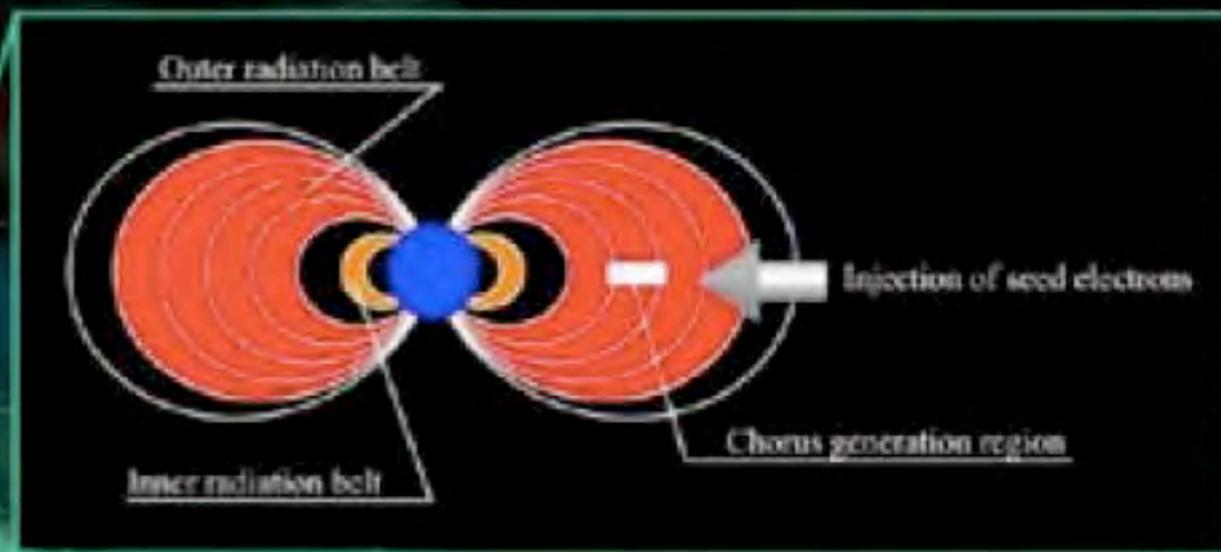
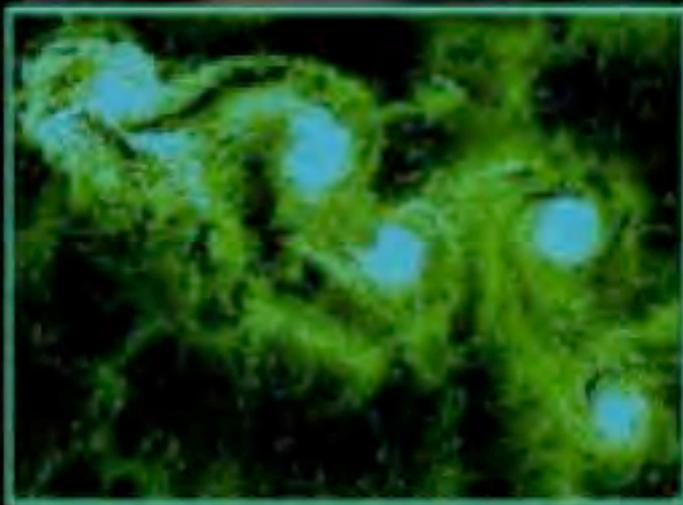
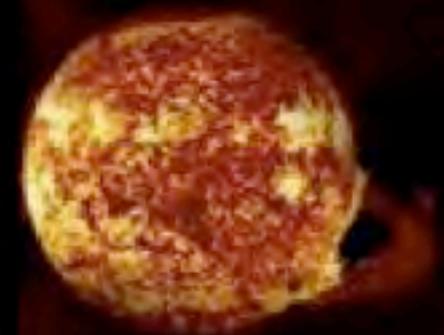
衝撃波

境界層混合

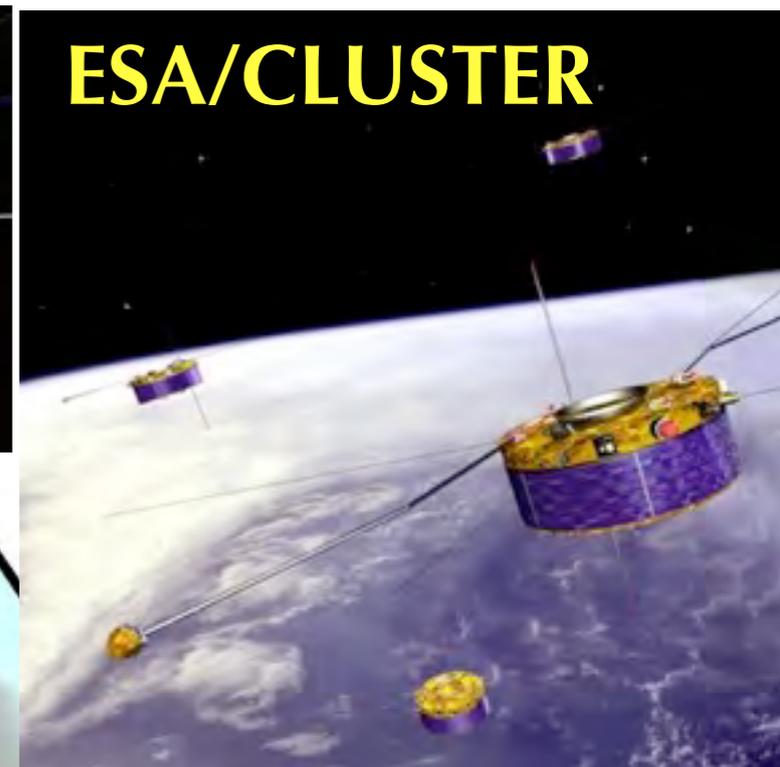
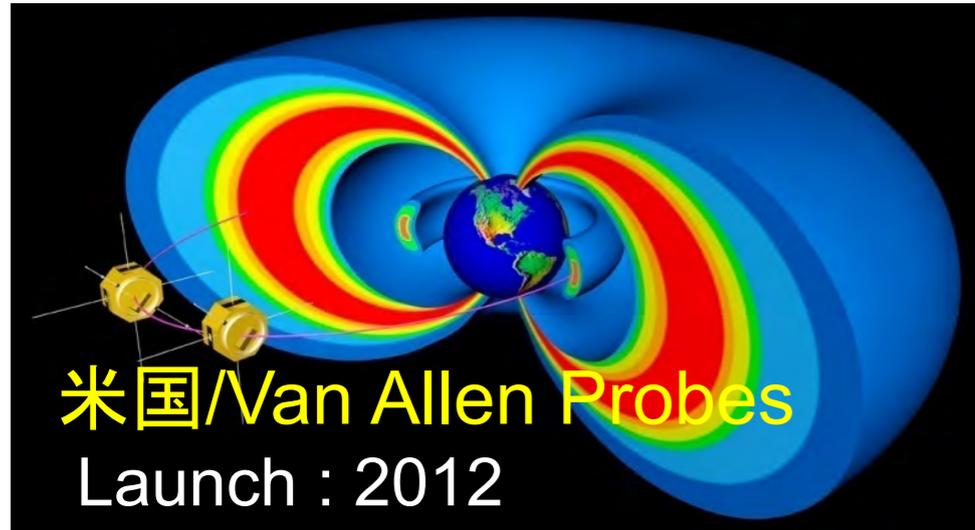
波動-粒子相互作用

磁気リコネクション

スケール間結合



地球磁気圏・放射線帯の国際共同探査



プラズマ粒子コード

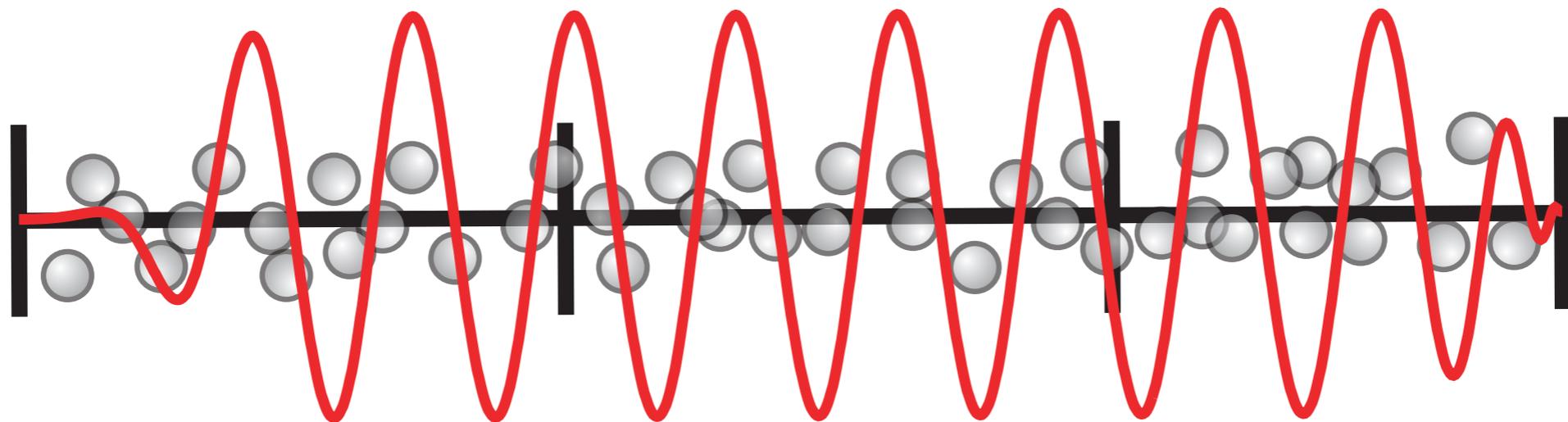
$$\frac{d\mathbf{v}}{dt} = \frac{q}{m}(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B})$$

$$\frac{d\mathbf{x}}{dt} = \mathbf{v}$$

$$\mathbf{J} = \sum_i q\mathbf{v}$$

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = -\nabla \times \mathbf{E}$$

$$\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = \frac{1}{\mu_0 \epsilon_0} \nabla \times \mathbf{B} - \frac{1}{\epsilon_0} \mathbf{J}$$



シミュレーション空間中でのプラズマ粒子の運動と、
電磁場の時空間発展を交互に解き進める

電子流体・粒子混成（ハイブリッド）コード

低温・高密度の電子を流体（伝搬媒質）

高温・低密度の電子を粒子（波動のエネルギー源）

$$\frac{\partial \mathbf{v}_f}{\partial t} = -(\mathbf{v}_f \cdot \nabla) \mathbf{v}_f + \frac{q_f}{m_f} (\mathbf{E} + \mathbf{v}_f \times \mathbf{B})$$

$$\frac{d(m_p \mathbf{v}_p)}{dt} = q_p (\mathbf{E} + \mathbf{v}_p \times \mathbf{B})$$

$$\mathbf{J} = q_f n_f \mathbf{v}_f + \sum_p q_p \mathbf{v}_p$$

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = -\nabla \times \mathbf{E}$$

$$\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = \frac{1}{\mu_0 \epsilon_0} \nabla \times \mathbf{B} - \frac{1}{\epsilon_0} \mathbf{J}$$

Simulation model & initial settings

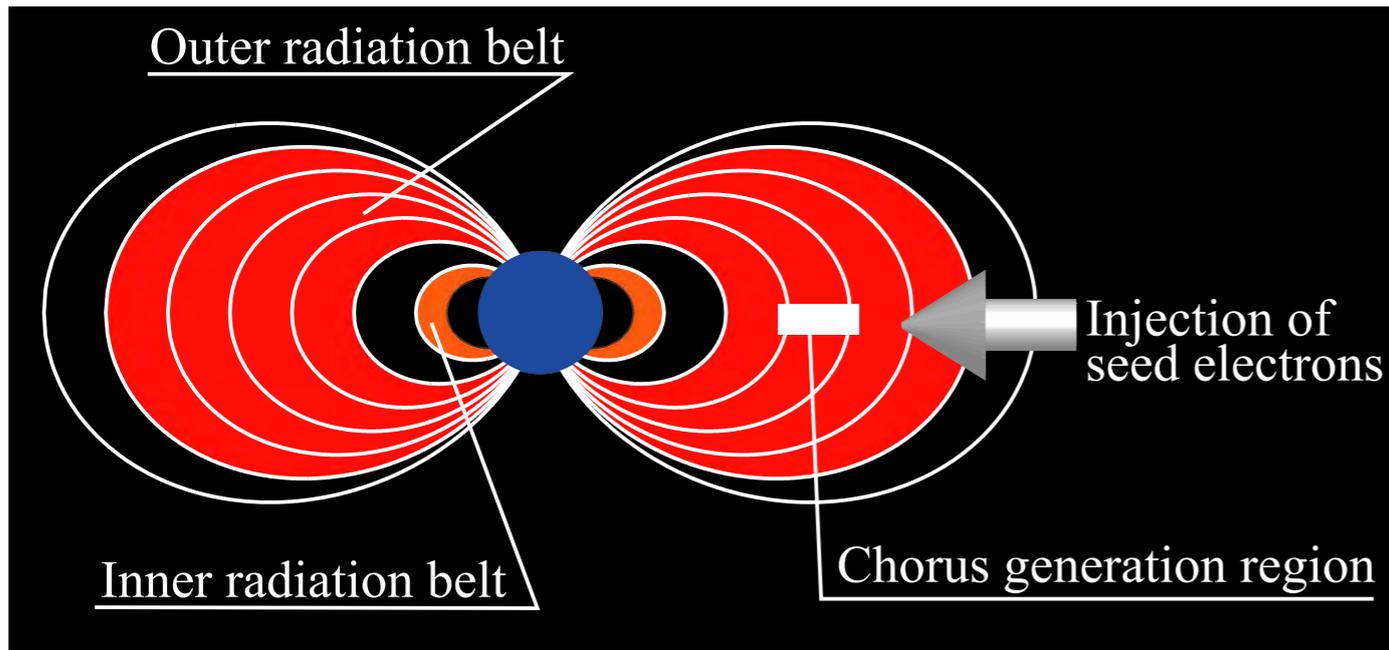
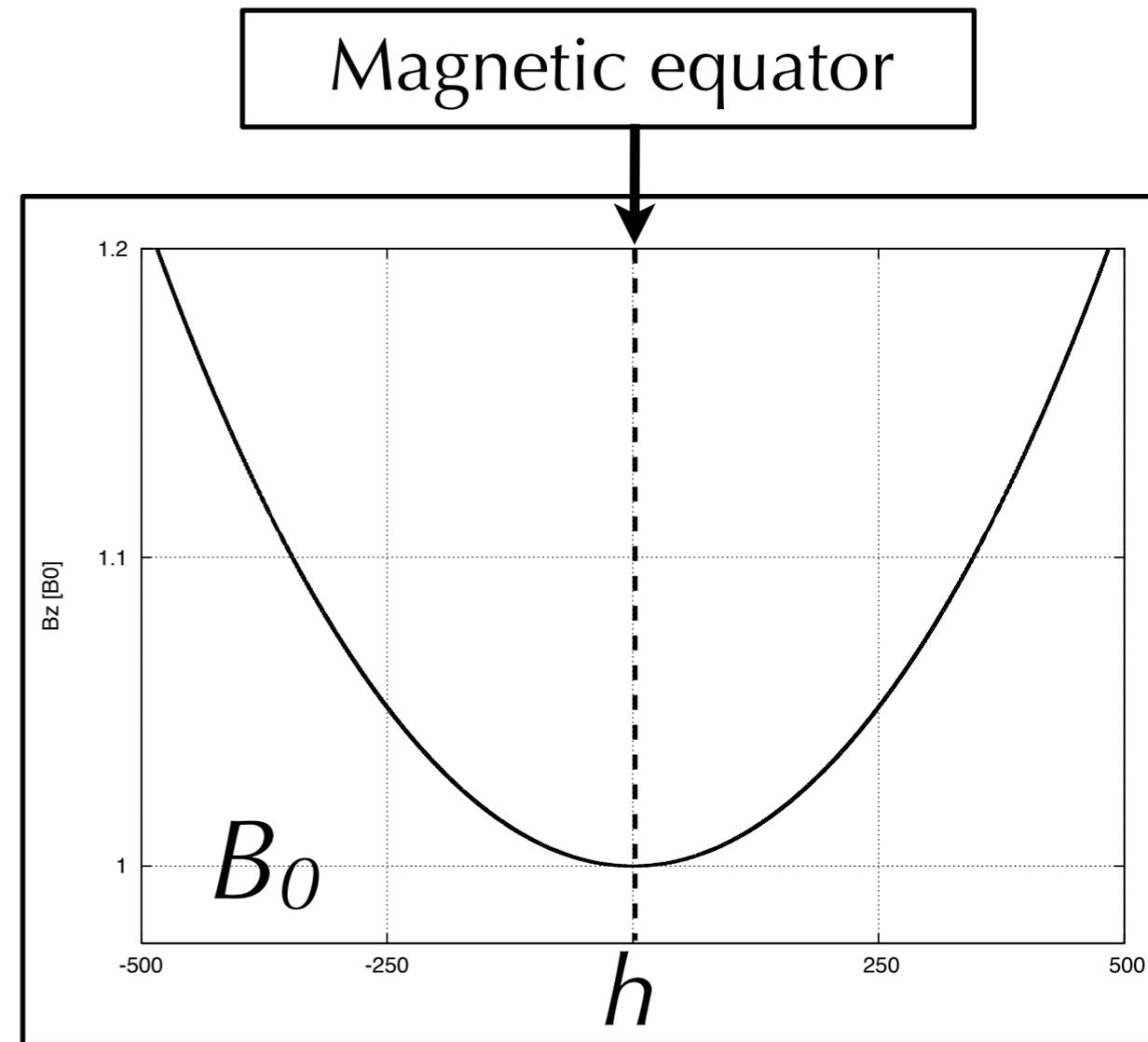


Fig: Schematic illustration of radiation belts

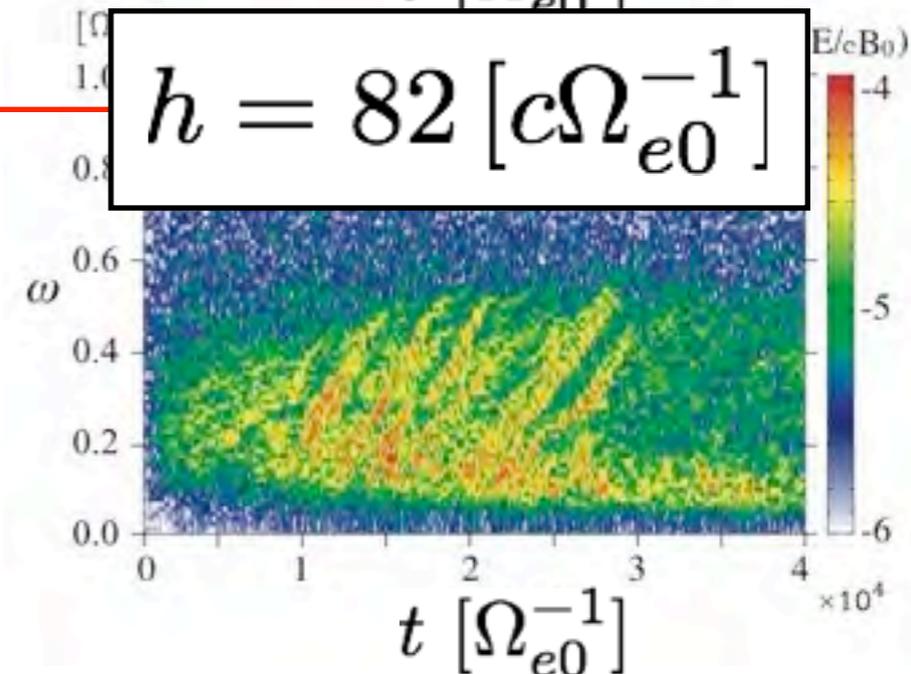
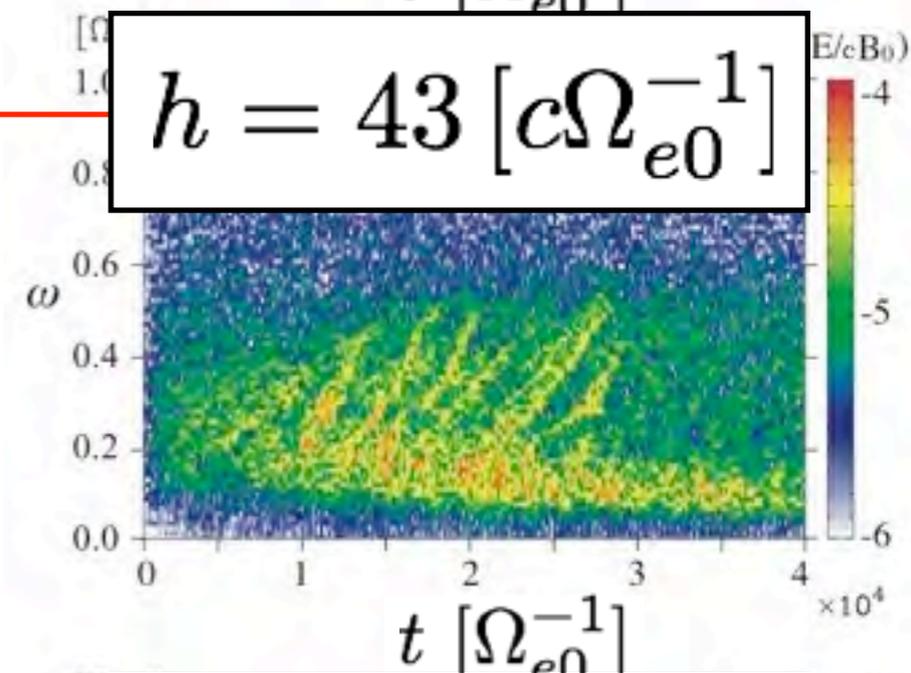
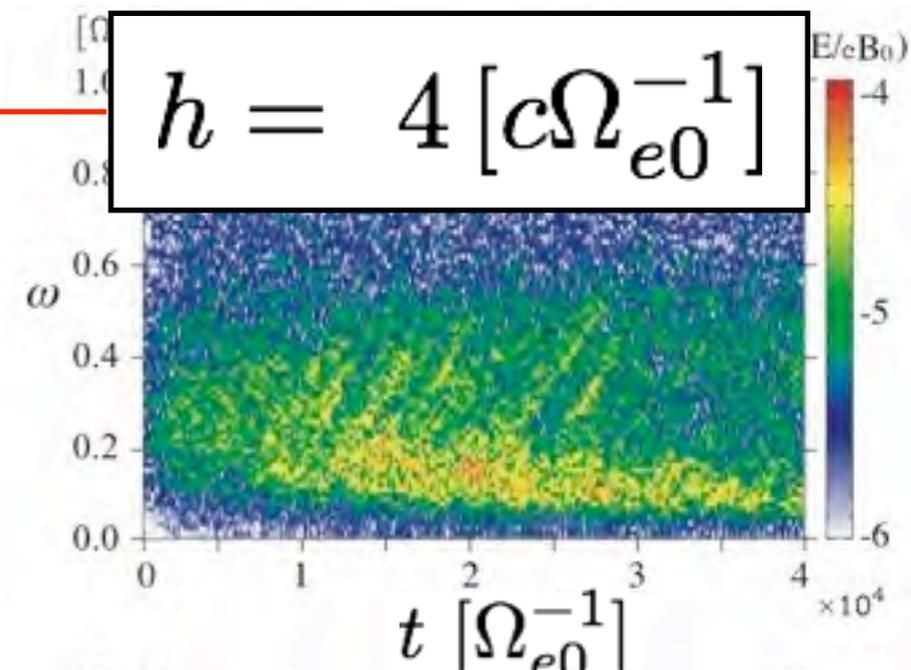
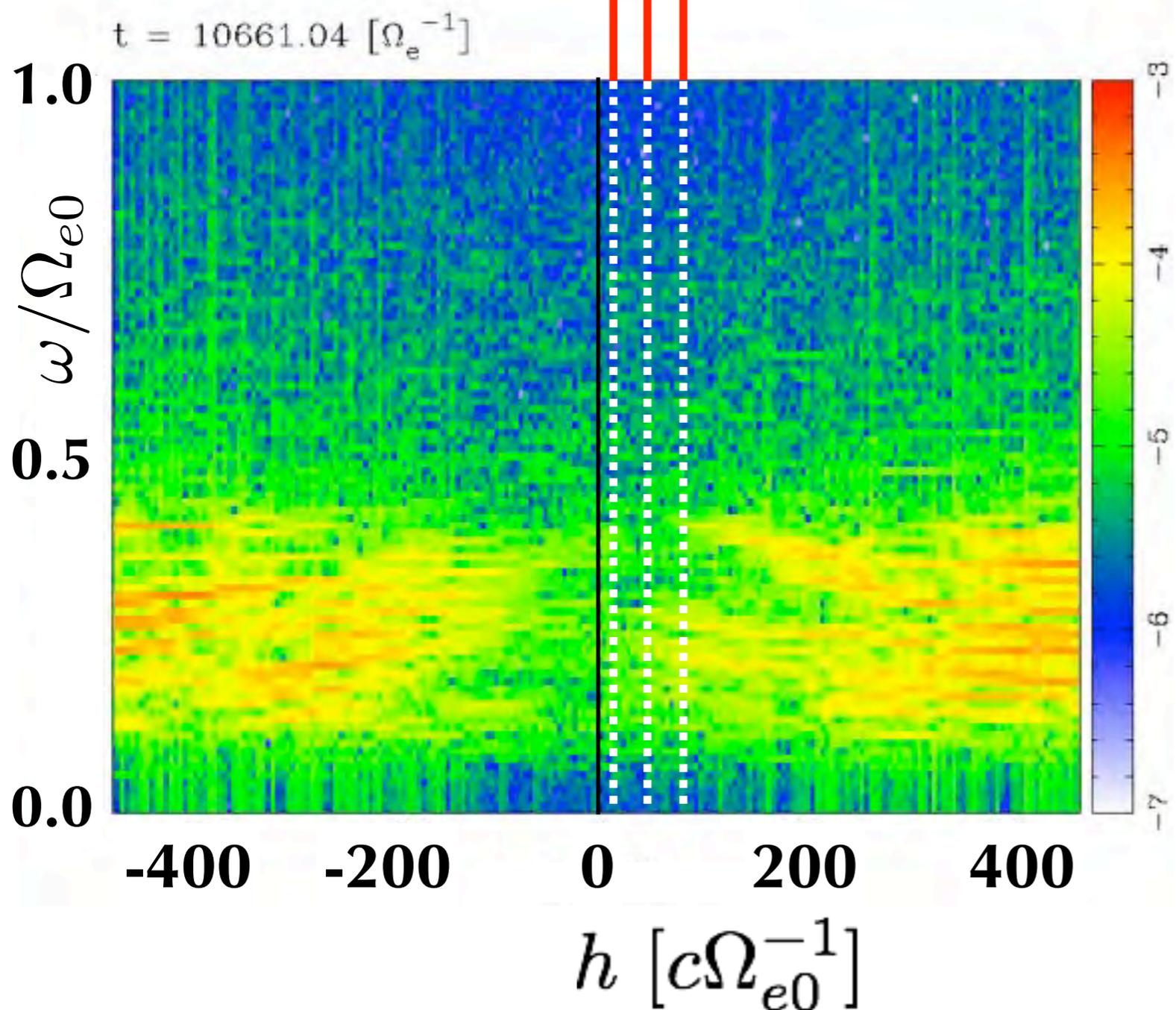
- Electron Hybrid code
- 1D, field aligned system
- Loss-cone velocity distribution with a temperature anisotropy
- neglecting electrostatic waves



$$\begin{aligned} \Pi_e &= 4\Omega_{e0} & v_{th,\parallel} &= 0.225c \\ N_p &= 5 \times 10^{-4} N_f & v_{th,\perp} &= 0.6c \end{aligned}$$

計算機実験による コーラス放射発生過程の再現

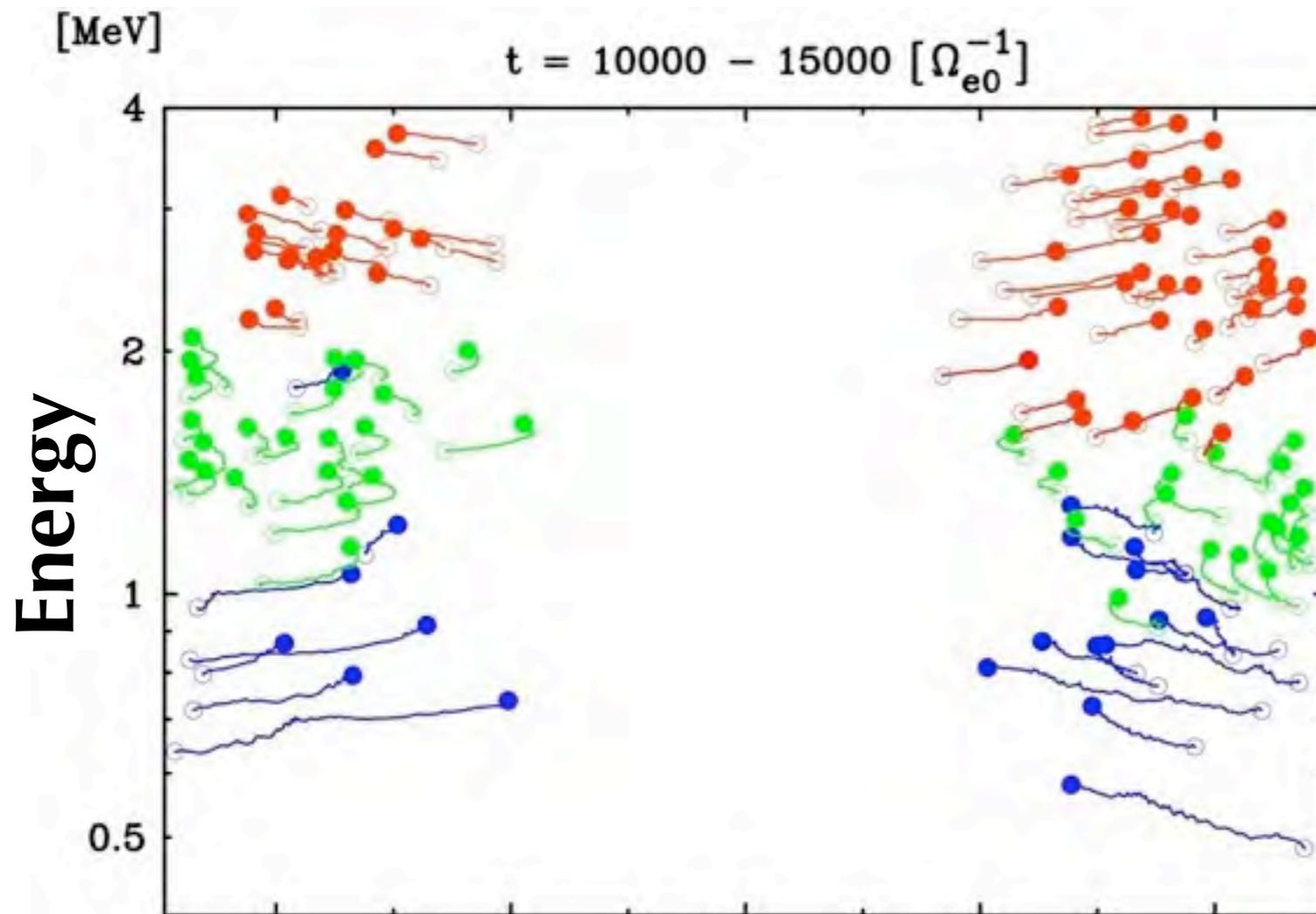
[Katoh and Omura, GRL 2007; Omura et al., JGR 2008, 2009]



計算機実験により

再現された

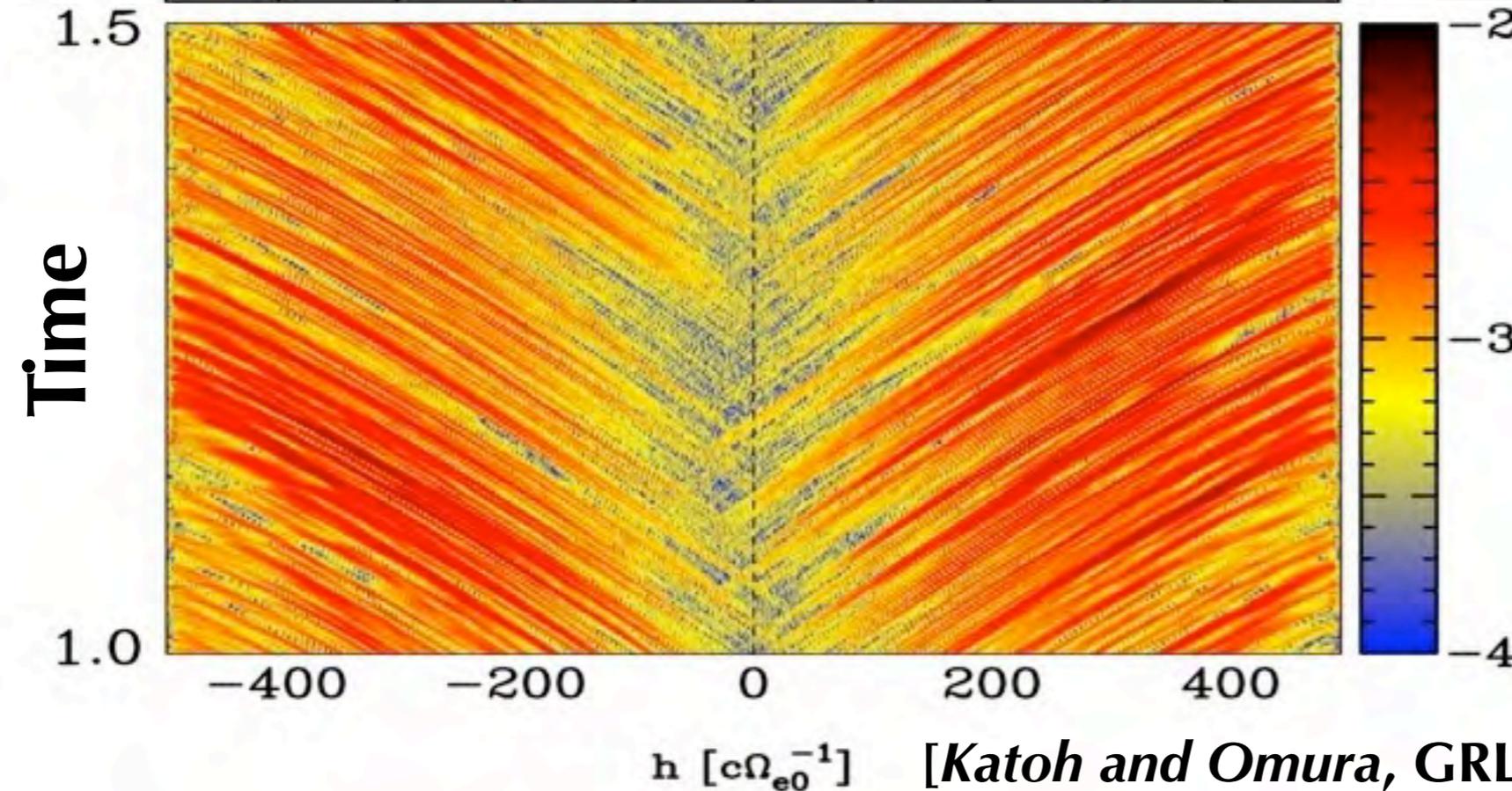
放射線帯電子加速過程



高エネルギー電子を捕捉

高効率に加速することで

相対論的電子を生み出す

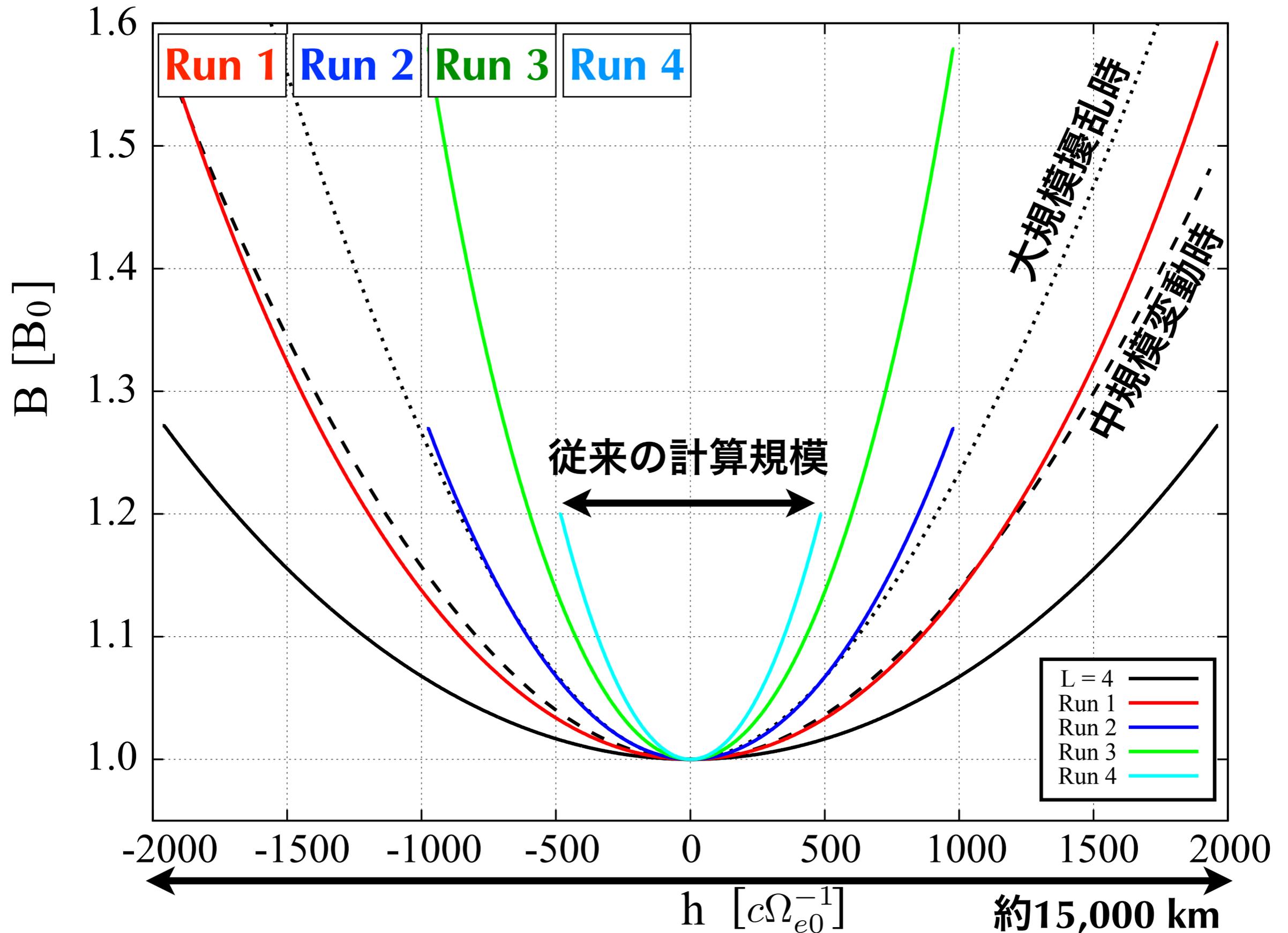


磁気赤道での
コーラス放射の発生

[Katoh and Omura, GRL 2007; Katoh et al., AnGeo 2008]

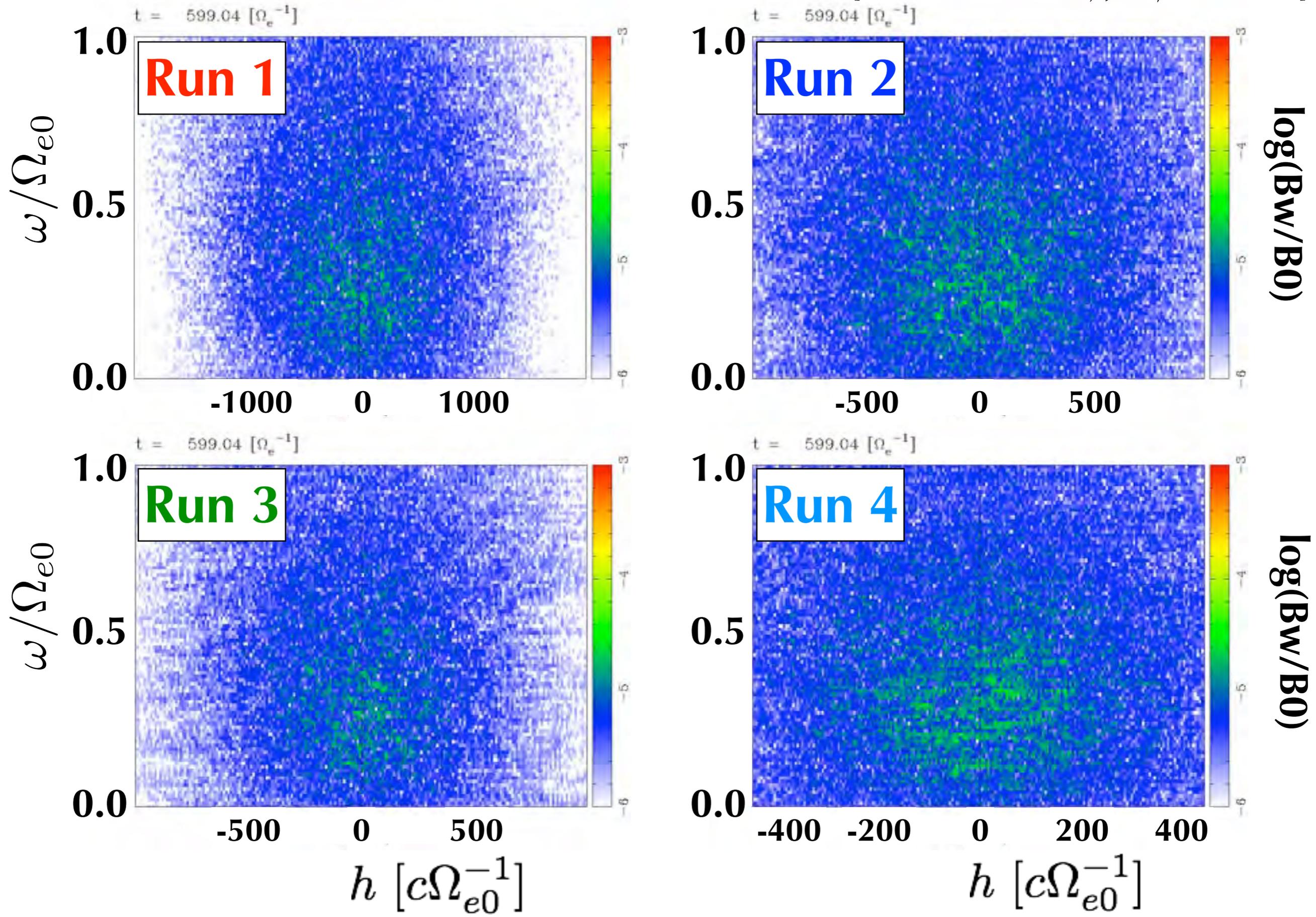
成果 1 : コーラス放射再現実験 : 磁気圏空間スケール依存性

[Katoh and Omura, JGR, submitted]

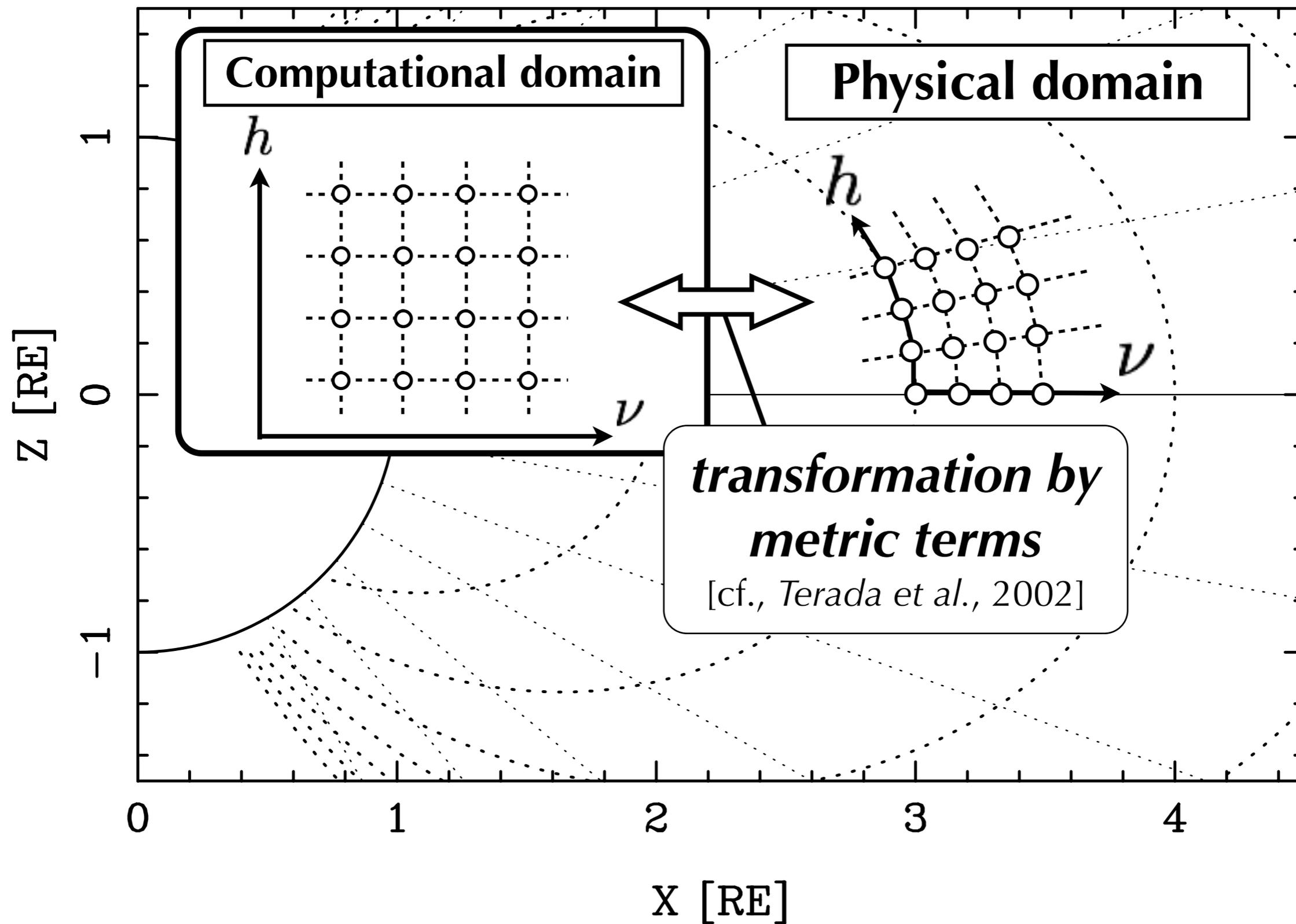


異なる磁場構造・同一のプラズマ環境での計算機実験

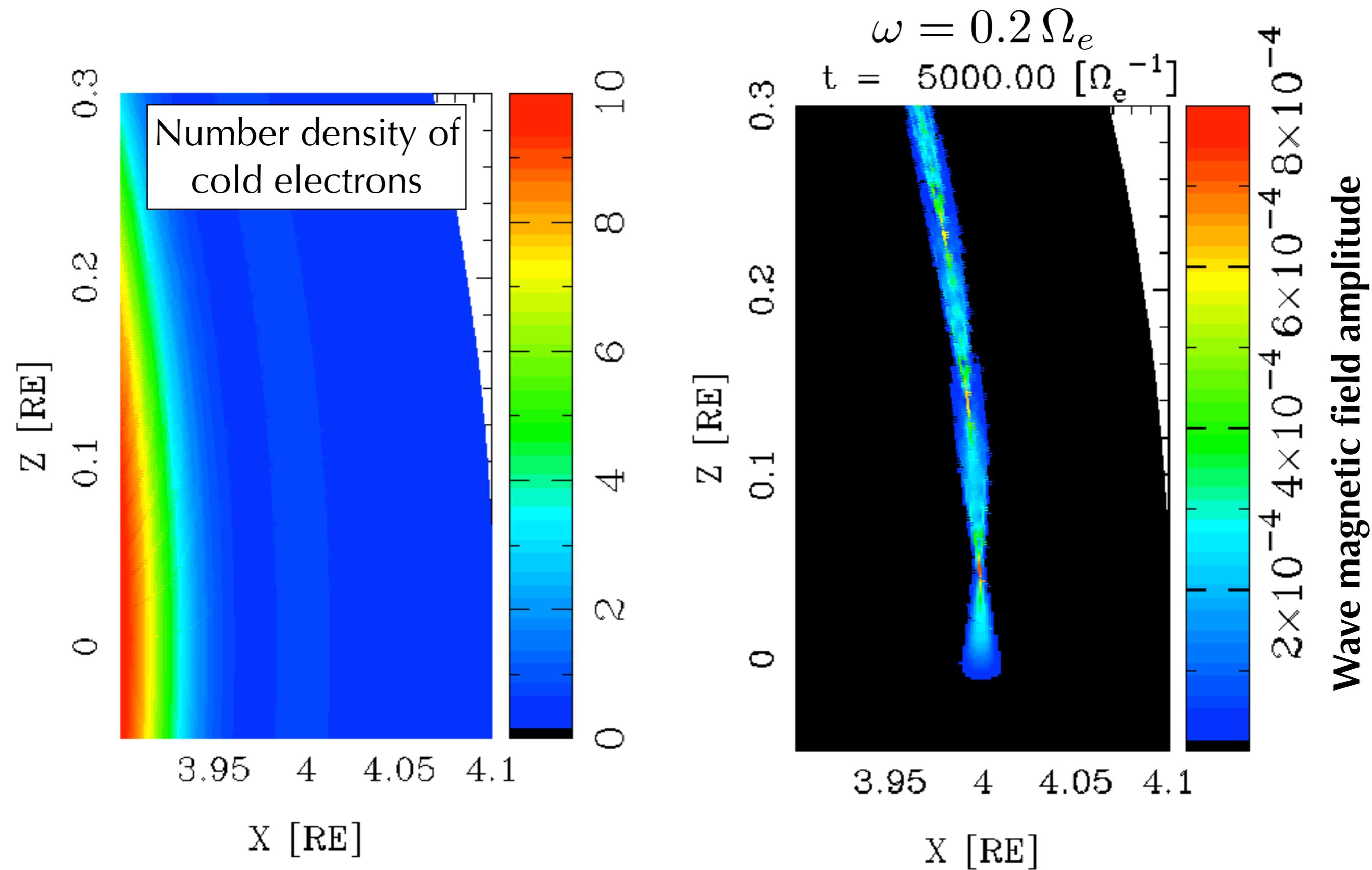
[Katoh and Omura, JGR, submitted]



成果 3 : 空間 2 次元コードによるコーラス放射伝搬過程の再現

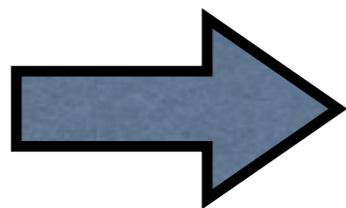


成果3：空間2次元コードによるコーラス放射伝搬過程の再現



今後の研究課題

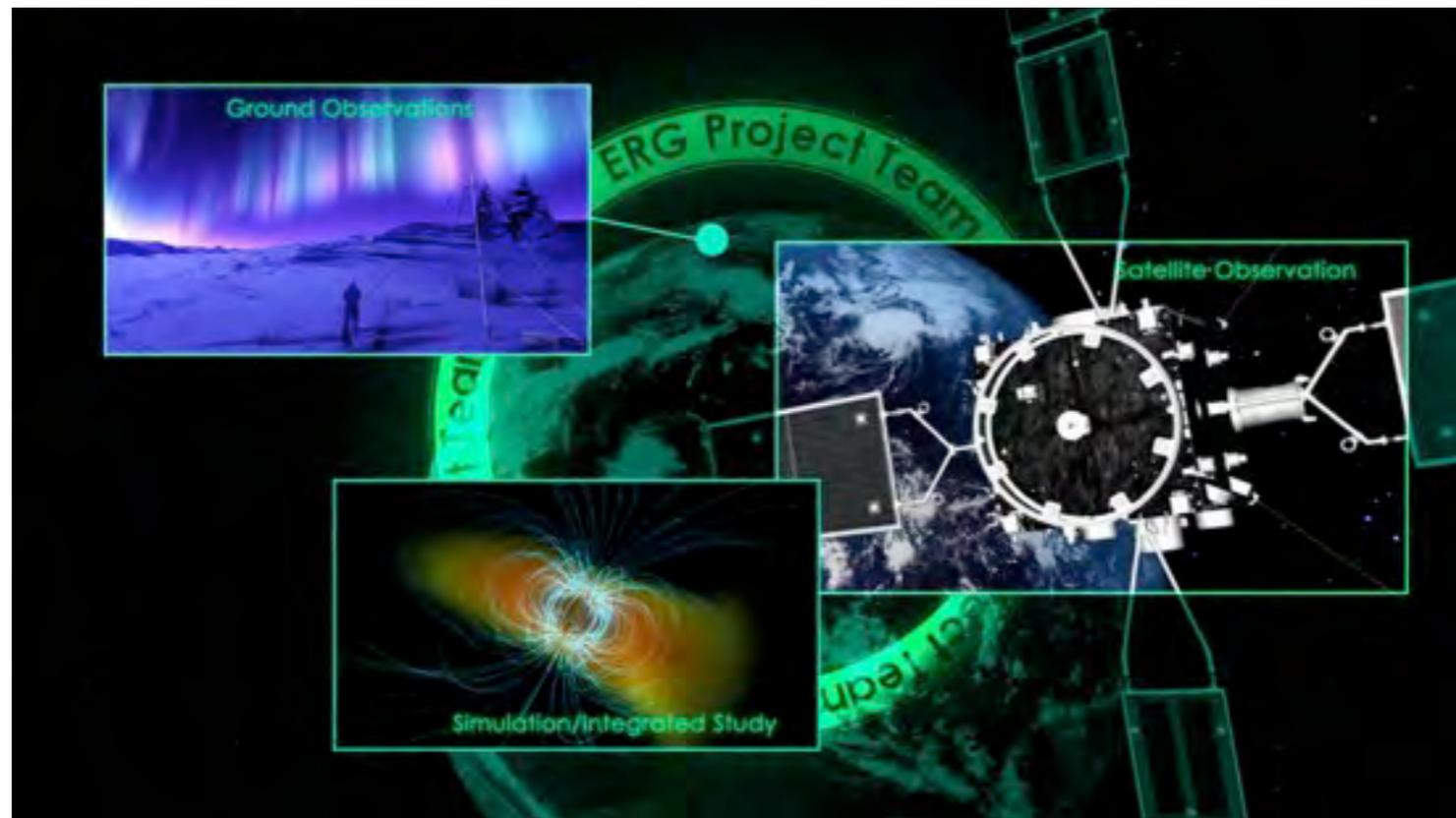
- コーラス放射再現実験の中での相対論的電子加速過程の評価
- 地球放射線帯の実環境下での計算機実験
- 空間多次元シミュレーションコードの開発



実環境計算、多次元コード計算には
大規模計算機資源が不可欠

まとめ

- 惑星電磁圏でのプラズマ加速・加熱過程の研究において、計算機実験は重要な役割を果たしている
- 大規模計算機資源を活用した理論・シミュレーション研究と、地球磁気圏・放射線帯をターゲットとする科学衛星ミッションによる国際共同観測および地上観測網による成果との共同研究により、磁化天体で普遍的な粒子加速過程の解明が期待される**



References

- ★ Horne R. B. et al., *Nature Phys.*, **4**, 301, doi:10.1038/nphys897, 2008.
- ★ Katoh, Y. and Y. Omura, *GRL*, **34**, L03102, doi:10.1029/2006GL028594, 2007.
- ★ Katoh, Y. and Y. Omura, *JGR*, **116**, A07201, doi:10.1029/2011JA016496, 2011.
- ★ Katoh, Y. et al., *Ann. Geophys.*, **26**, 3451, 2008.
- ★ Li, W. et al., *GRL*, **39**, L18106, doi:10.1029/2012GL053206, 2012.
- ★ Omura, Y. et al., *JGR*, **113**, A04223, doi:10.1029/2007JA012622, 2008.
- ★ Omura, Y. et al., *JGR*, **114**, A07217, doi:10.1029/2009JA014206, 2009.
- ★ Santolik, O. et al., *Ann. Geophys.*, **26**, 1665-1670, 2008.
- ★ Summers, D. et al., *JGR*, **103**, A9, 20487, 1998.
- ★ Tsyganenko, N. A., *Planet. Space Sci.*, **37**, 1, 5, 1989.
- ★ SGEPPSS 「地球電磁気学・地球惑星圏科学の現状と将来」, 2013.