

ERG衛星で行う波動-粒子相互作用直接計測 WPIA: Wave-Particle Interaction Analyzer

小嶋浩嗣¹, 加藤 雄人², 平原 聖文³, 高島 健⁴, 浅村 和史⁴,
笠原 慧⁴, 三好 由純⁵, 関 華奈子⁵

1. 京都大学生存圏研究所
2. 東北大学大学院理学研究科
3. 東京大学大学院理学研究科
4. JAXA宇宙科学研究所
5. 名古屋大学STE研究所

ERG搭載用S-WPIA

目的:

波動粒子相互作用の直接検証

主な観測対象:

コーラス放射の励起

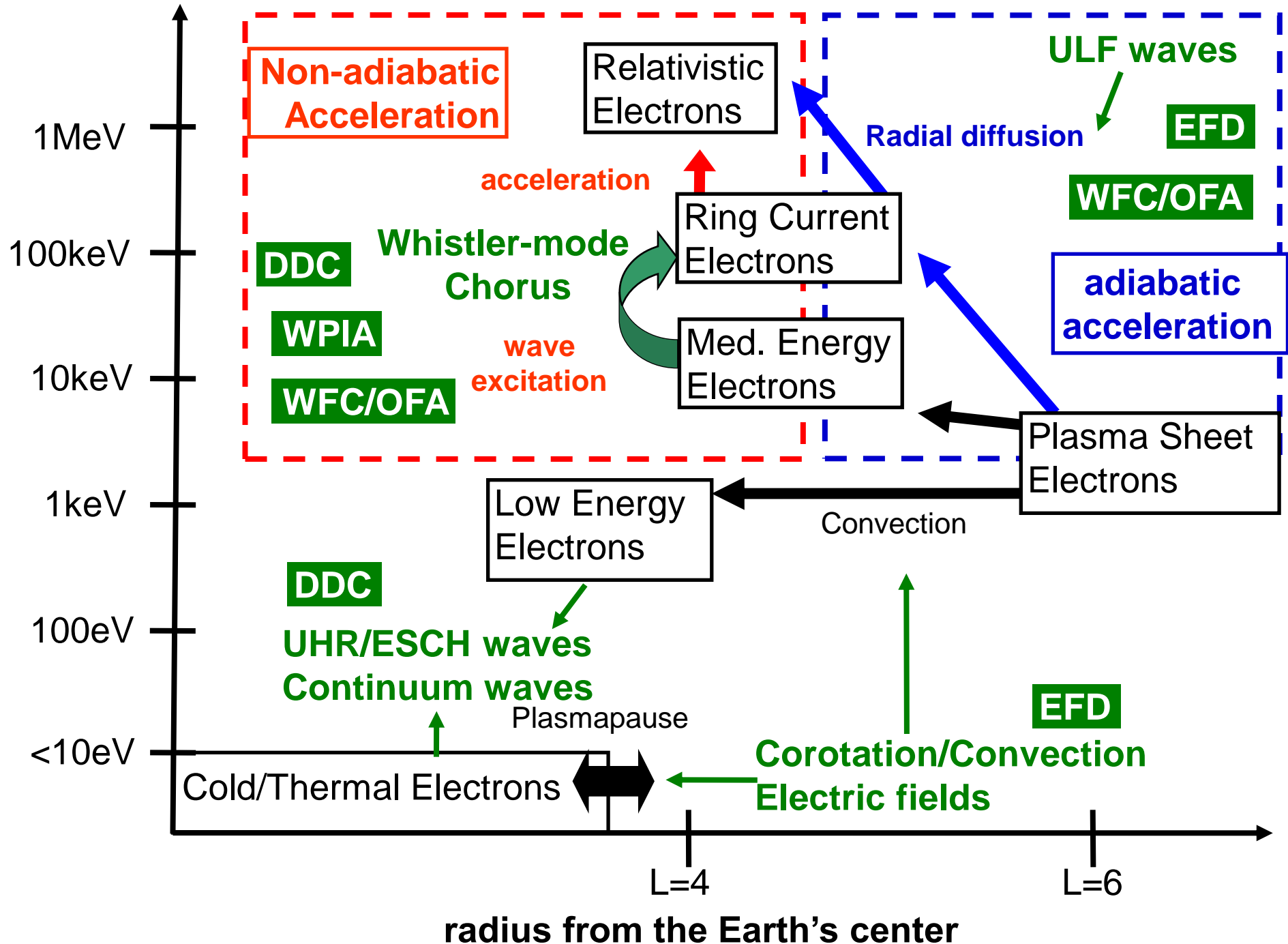
コーラスによる高エネルギー電子との相互作用

ERGによって達成される内部磁気圏赤道域での

- 広エネルギー帯域・高時間分解能での粒子観測
- プラズマ波動の『位相』を特に意識した波形観測

波動と粒子の位相関係を捕捉することにより得られる新しい観測物理量

Wave-particle interactions in the inner magnetosphere



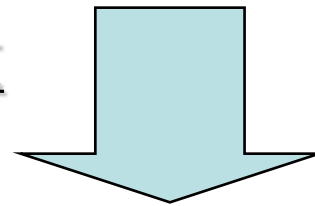
Wave-Particle Interaction Analyzerが、 もたらすブレイクスルー

Wave-Particle Interactionは、

波動と粒子の位相関係でエネルギー輸送方向が決定する。

$$C(t) = \frac{dK}{dt} = q\mathbf{E}(t) \cdot \mathbf{v}(t) \quad K = m_0 c^2 (\gamma - 1)$$

エネルギー輸送: エネルギー収支



| | | |
|----|---|----|
| 粒子 | → | 波動 |
| 波動 | → | 粒子 |

粒子と波動の位相関係を捕捉できる時間分解能が必要

波動: **GEOTAIL**における「波形観測」により「位相」情報の取り込みに成功
粒子: **SCOPE**では、電子ダイナミクス時間スケール分解能(時間積分)での
分布関数取得実現を目標

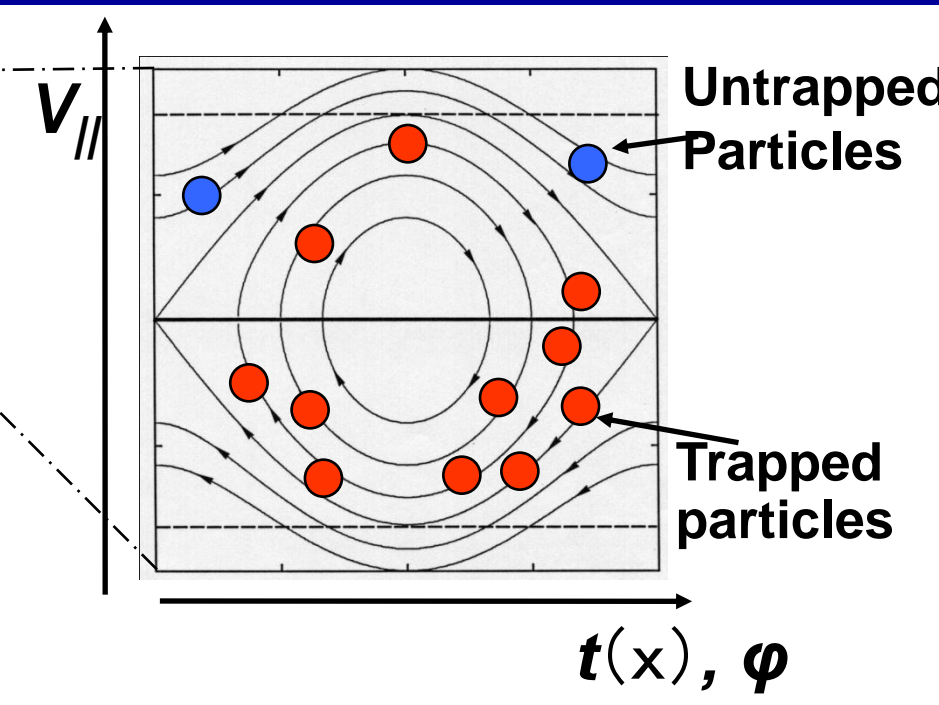
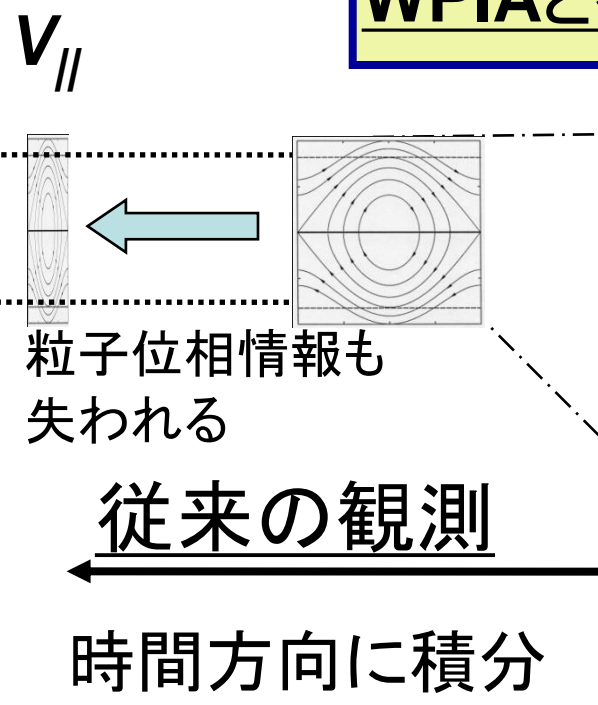
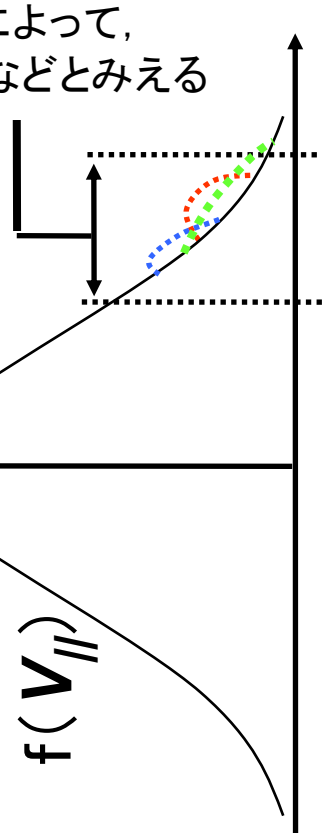
「波動と粒子の位相関係をとってから時間積分」という試み

波動-粒子の位相関係を保存した形での時間積分の実現

WPIAと従来観測とのコンセプトの違い

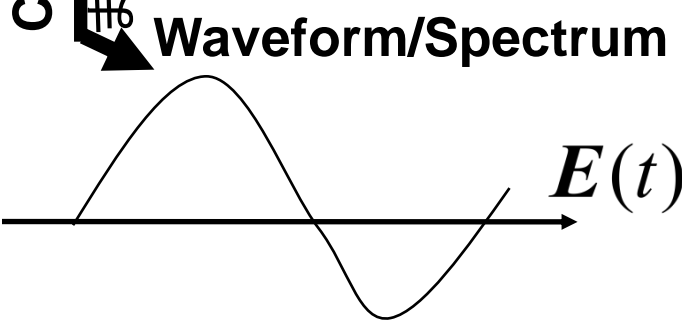
タイミングによって、
青、赤、緑などとみえる

Correlation study by own eyes
まったく違う時間分解能データをもちに



Correlationが、
あるような、ないような

従来の観測データでは、波動と粒子の位相関係が、
まったく失われた状態でデータ解析を行っていた。



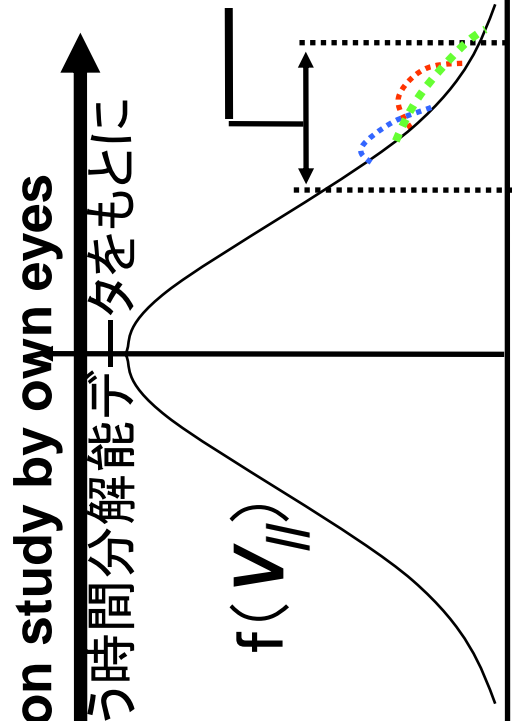
どのエネルギー粒子がどのプラズマモードとエネルギー授受をしているのか

WPIAと従来観測とのコンセプトの違い

Correlation study by own eyes

まったく違う時間分解能データをもちに

タイミングによって、青、赤、緑などとみえる

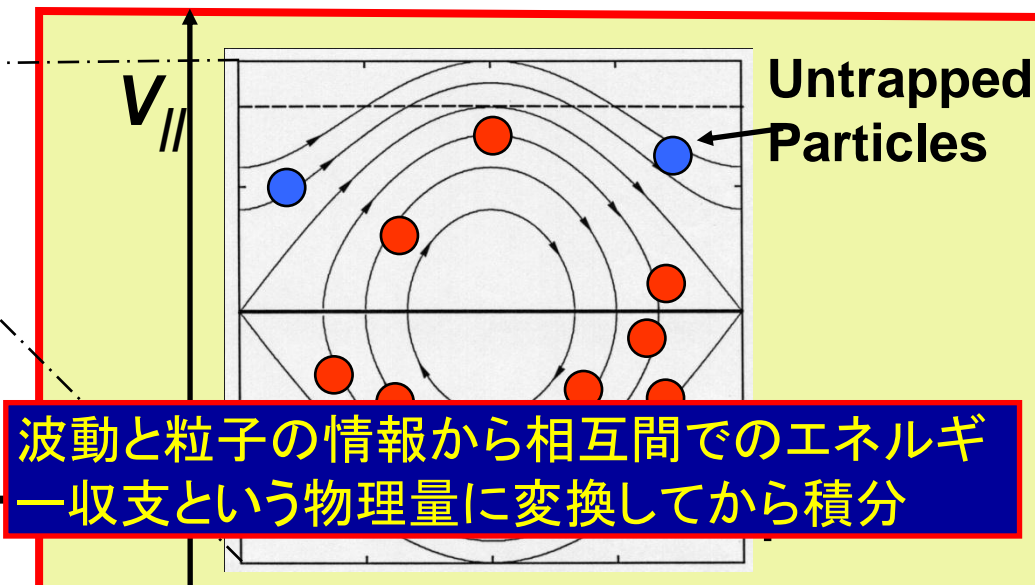


粒子位相情報も失われる

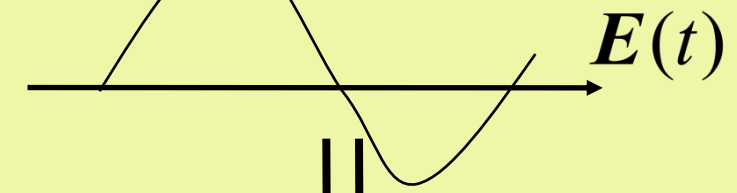
従来の観測

時間方向に積分

波動と粒子の情報から相互間でのエネルギー収支という物理量に変換してから積分



Waveform $\times t(x), \varphi$



$$C(t) = E(t) \cdot V(t)$$

WPIA

Correlation study by physical quantities

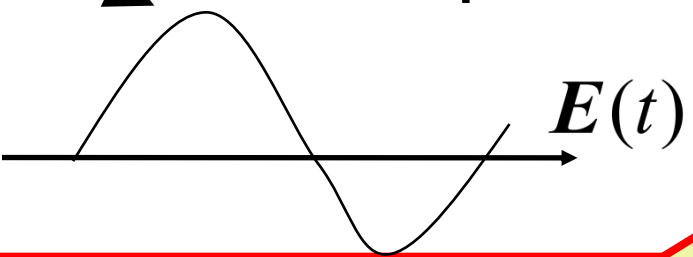
$$\sum_t C(t)$$

様々な方式で集積(エネルギー別, 周波数別, 位相差別, など)

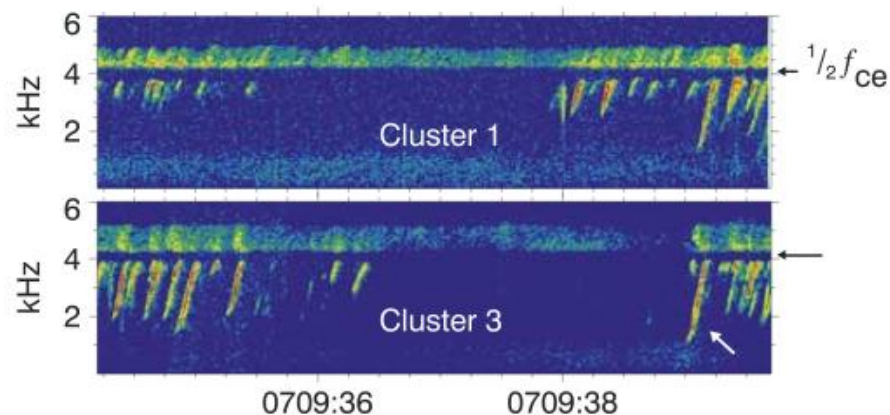
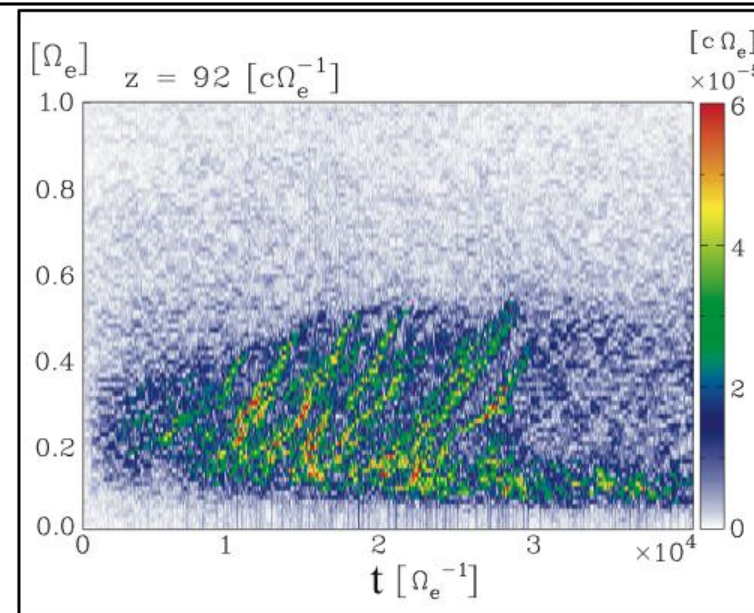
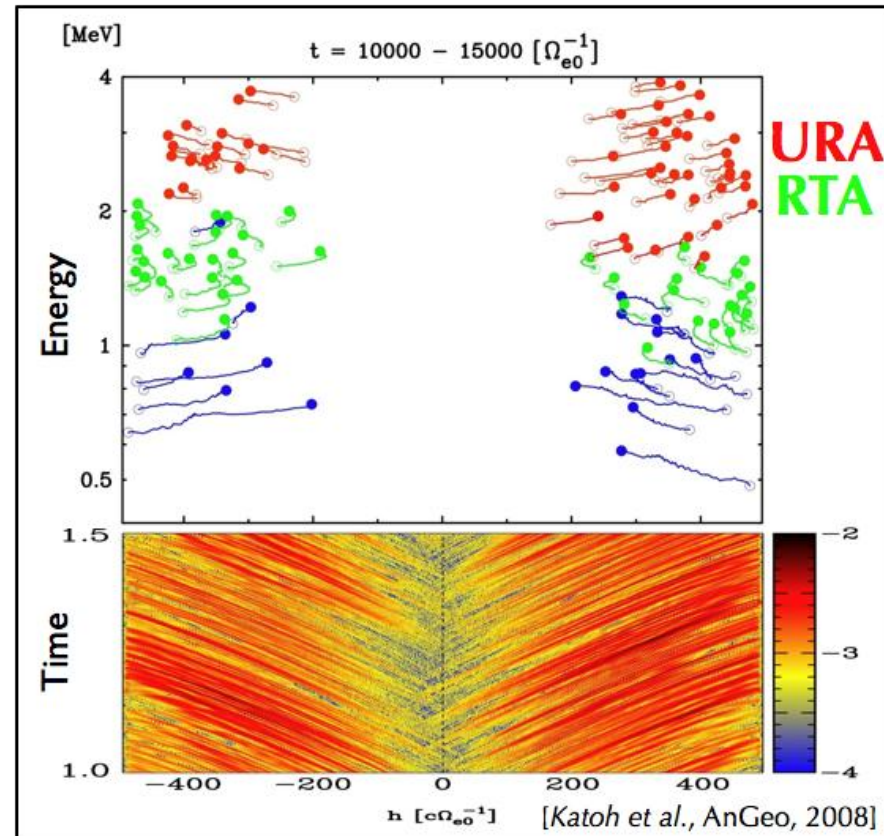
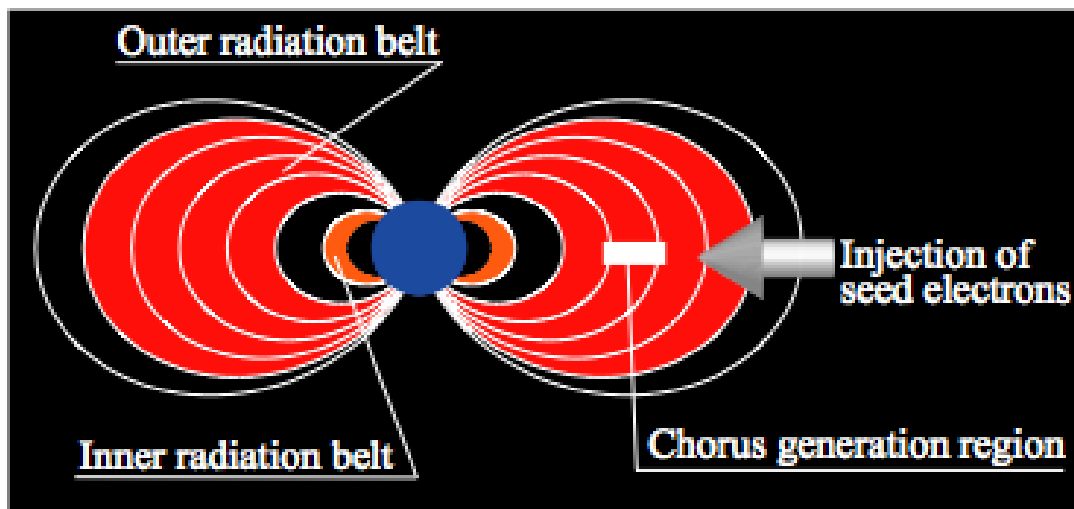
どのエネルギー粒子がどのプラズマモードとエネルギー授受をしているのか

Correlationが、あるような、ないような

Waveform/Spectrum



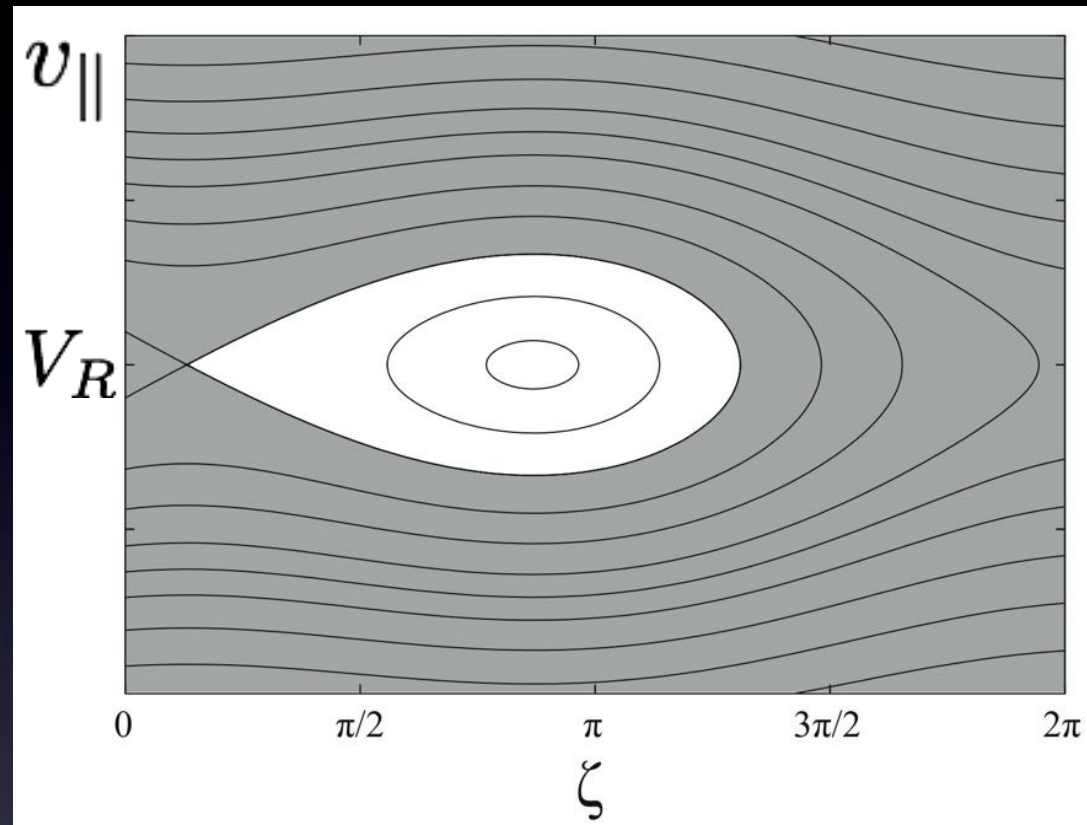
Self-consistent particle simulation reproduced whistler-mode wave-particle interactions in the inner magnetosphere



Chorus emissions: observation
[Santolik et al., 2004]

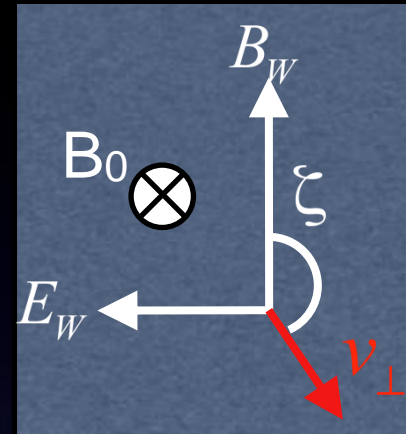
Reproduced chorus emissions
[Kato and Omura, 2007; Omura et al., 2008, 2009]

Phase bunchingとresonant currents



dipole磁場中での
wave trapping

共鳴電子の
phase bunching



$$S = -\frac{1}{\omega_t^2 \delta^2} \left\{ \gamma \left(1 - \frac{V_R}{V_g} \right)^2 \frac{\partial \omega}{\partial t} + \left[\frac{k \gamma v_{\perp}^2}{2 \Omega_e} - \left(1 + \frac{\delta^2}{2} \frac{\Omega_e - \gamma \omega}{\Omega_e - \omega} \right) V_R \right] \frac{\partial \Omega_e}{\partial h} \right\}$$

[Omura et al., in press]

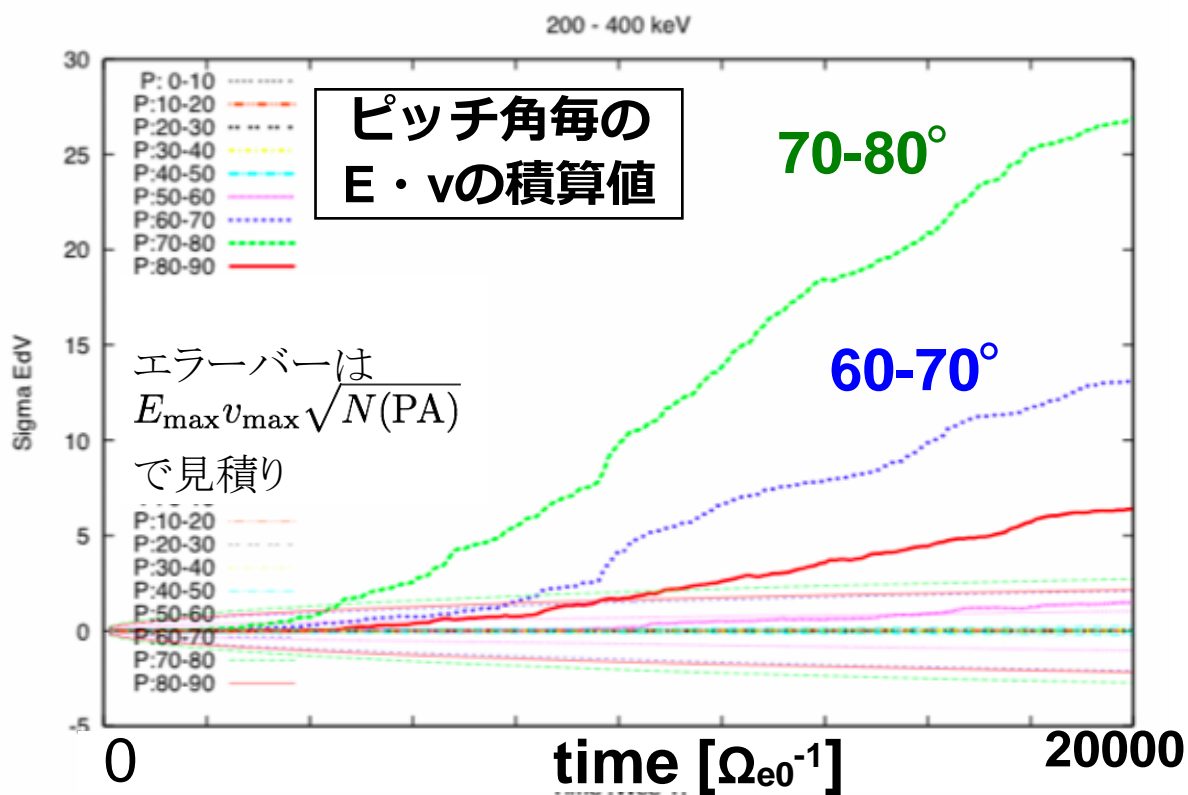
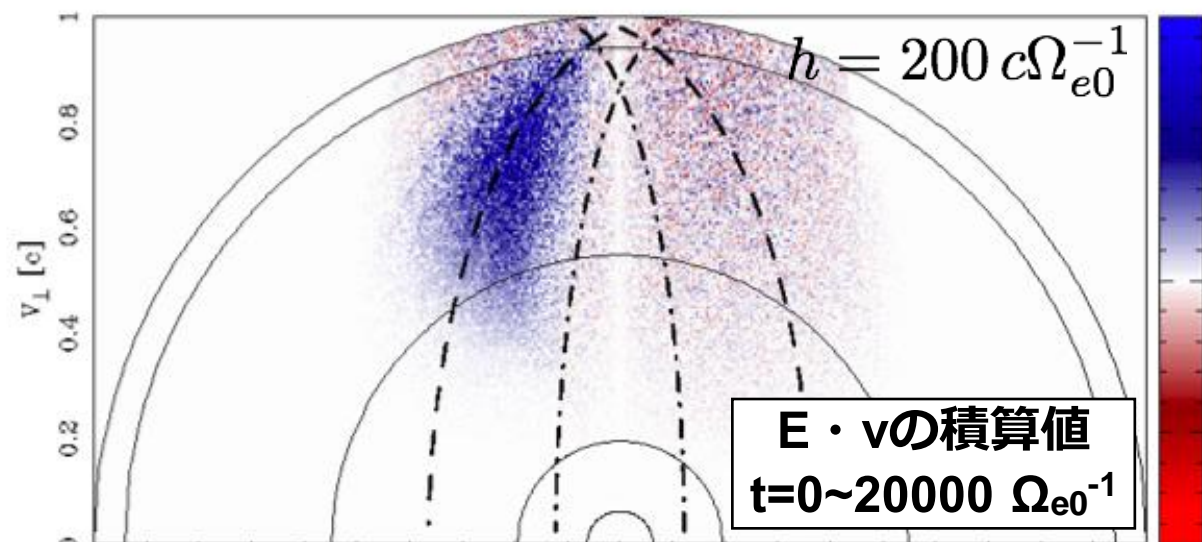
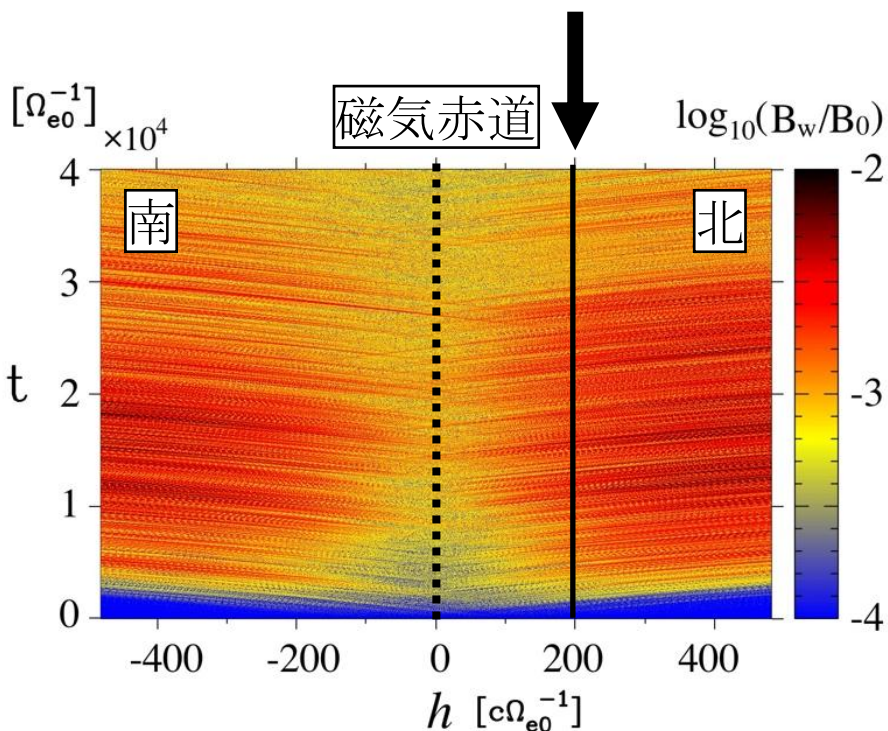
$0 < \zeta < \pi \longrightarrow \mathbf{E} \cdot \mathbf{v} < 0$: 波動 \longrightarrow 粒子

$\pi < \zeta < 2\pi \longrightarrow \mathbf{E} \cdot \mathbf{v} > 0$: 粒子 \longrightarrow 波動

シミュレーション結果を用いた疑似WPIA計測

$h = 200 c\Omega_{e0}^{-1}$ での電界3成分と
通過する個々の電子の速度3
成分を用いて $\mathbf{E} \cdot \mathbf{v}$ を積算

$$\Sigma C(t) = \Sigma [q\mathbf{E}(t) \cdot \mathbf{v}(t)]$$



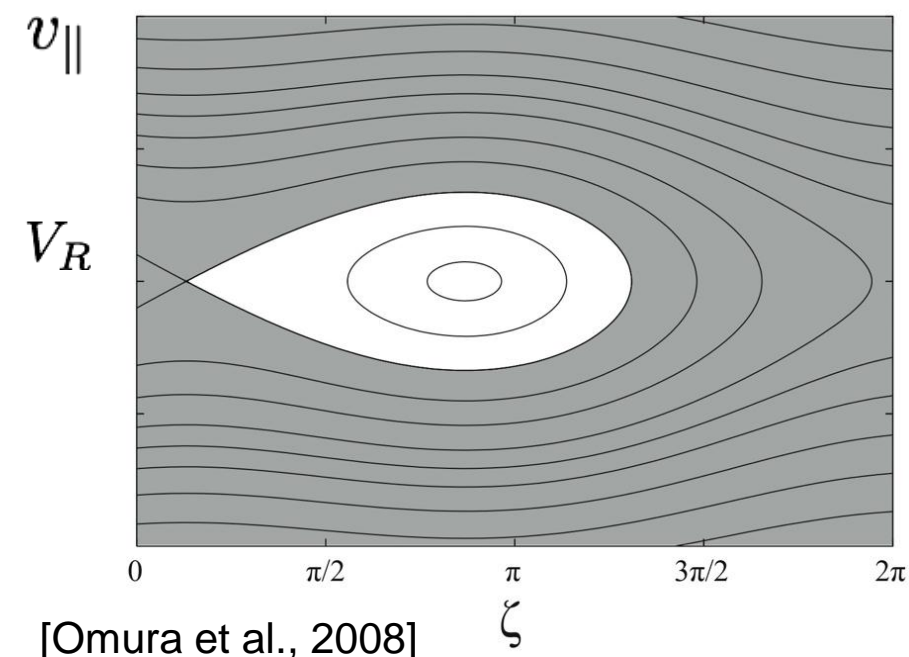
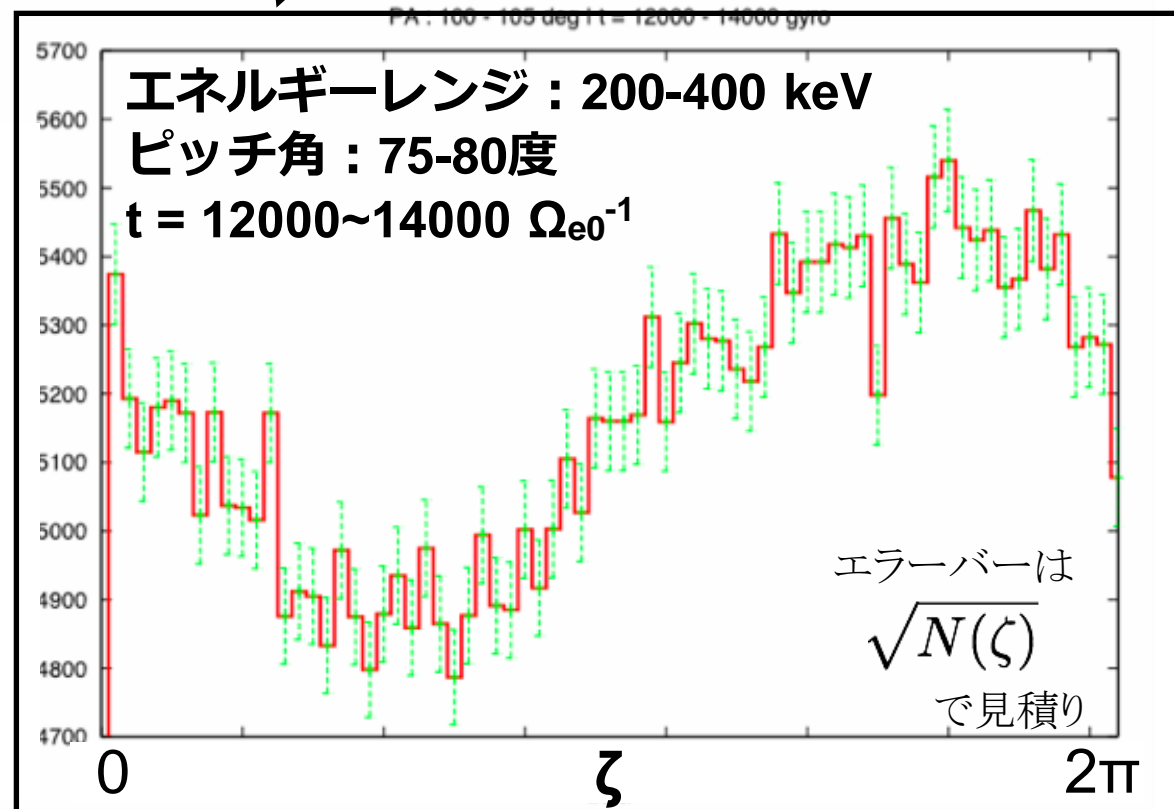
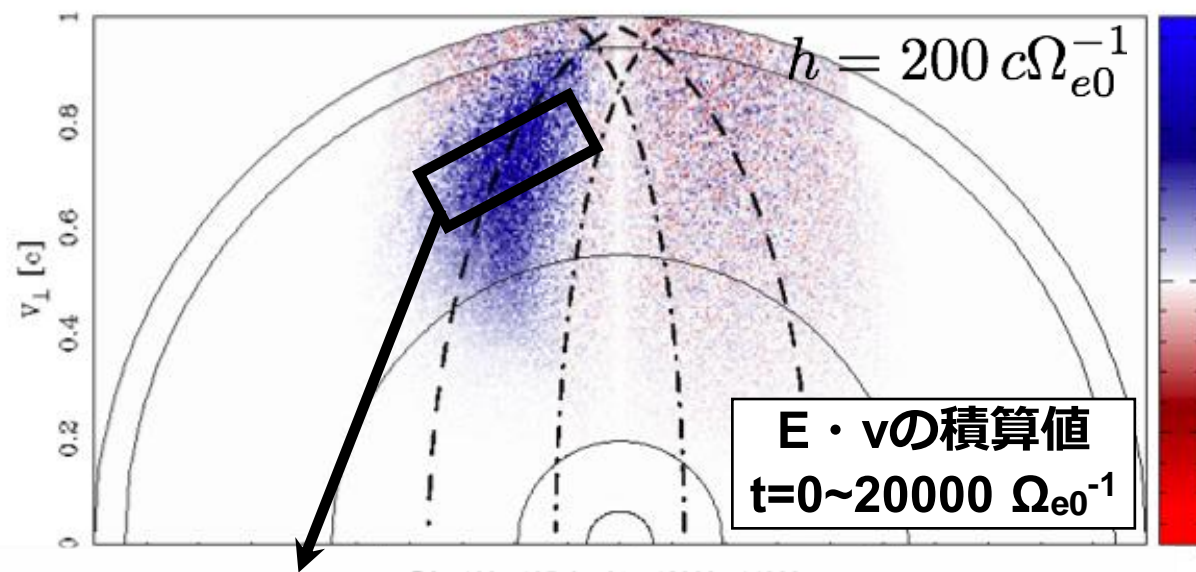
シミュレーション結果を用いた疑似WPIA計測

電界 E と電子の速度ベクトル v との位相差から、速度位相空間での分布の偏りを測定



理論の予測する、特定の位相での共鳴電子のphase bunchingを検出

”波動励起の素過程を実証”



ERG用S-WPIAのコンセプト

- Flexible
- Minimum resource

有利な点

ERGでのWPIA観測は **ターゲットが明確**

- 領域: L=3~6、磁気赤道 (MLAT: $\pm 10^\circ$ 以内)
- 周波数: 0.2~0.5 fce (fce=10kHzとして、2~5kHz)
- エネルギーレンジ: 10~200 keV (コーラス励起過程)
500keV~MeV (電子加速過程)

SoftwareによるFlexibleなシステム

ストアしたデータに対して、様々な相関処理を行う

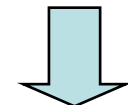
但し、リアルタイム性は削る

- 観測の空き時間などを使って処理
- 地上に一部のデータをダウンロードして処理・検証

WPIAの処理の流れ

波形

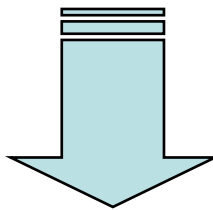
$E_x, E_y, B_x, B_y, B_z \Rightarrow \text{FFT} \Rightarrow \text{校正}$



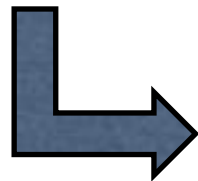
スペクトル
抽出

IFFT

座標
変換



高周波受信器から
オンボードで密度情報



$$C(t) = E(t) \cdot V(t)$$

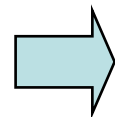


$$\sum_t C(t)$$

▲ 周波数毎に計
算する場合は
戻る

粒子

V, φ, t

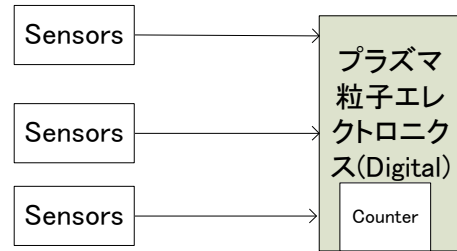


座標
変換

ここを「どうやって集約するか」が、
コツであり、工夫をこらすことができ
ところで、重要。しかし、処理系負荷と
しては、非常に軽い部分。

S-WPIA周辺系統ダイアグラム

プラズマ粒子観測器(MEP-e/HEP-e)



粒子速度/
到来角度/
タイミング情報

SpaceWire



SpaceWire

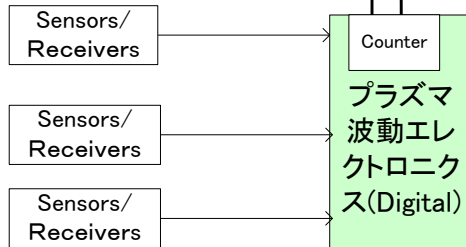
システムより
Timing pulse (10usec精度)

専用線による
Timing配信

専用線による
Timing配信

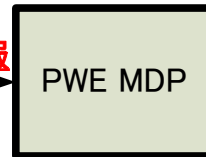
プラズマ波動観測器(PWE-WFC)

電界2成分
磁界3成分



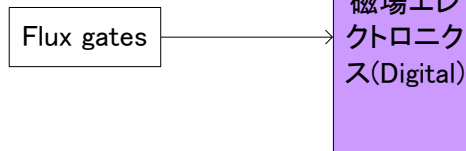
観測波形
タイミング情報

SpaceWire



SpaceWire

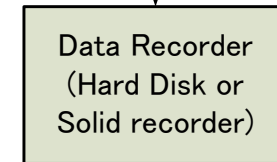
DC磁場観測器(MGF)



SpaceWire



外部磁場強度/
外部磁場角度



S-WPIA
MDP

Strategy

初めての物理量の計測

$$C(t) = \frac{dK}{dt} = q\mathbf{E}(t) \cdot \mathbf{v}(t)$$

機上処理ばかりでなく、その処理妥当性の検証と
手法の改良も含め、全データを地上に伝送するモードも用意

機上

- 数種類のAnalyzer softwareをあらかじめ、機上で準備
- スペクトルによるOverview dataをもちいて、
WPIAを適応させる時間帯(~分オーダー)を地上で抽出
- 地上からのコマンドに従い、機上ソフトウェアによる処理を実行
- 処理結果を地上へ伝送

地上

- スペクトルによるOverview dataから、時間帯を抽出(~分オーダー)
- 該当する波形、粒子全データを地上へ伝送
- 地上解析にて、機上でのWPIA処理の妥当性を検証
- 更に、改良型ソフトウェア処理による地上におけるWPIA解析も実行

S-WPIAをERGで実現するにあつての開発・検討項目

- ・E・Vを計算する上でのアルゴリズムの物理的な検討
(粒子計測・サイエンスチームとの 連携)
 - 実際にChorusが励起され、また、粒子加速が起こっている計算機実験データの利用
 - 粒子観測器の視野角など特性を考慮した上で、計算機実験データからE・Vを計算
 - より高いS/Nで物理的な意義の高いデータ計算手法を提案

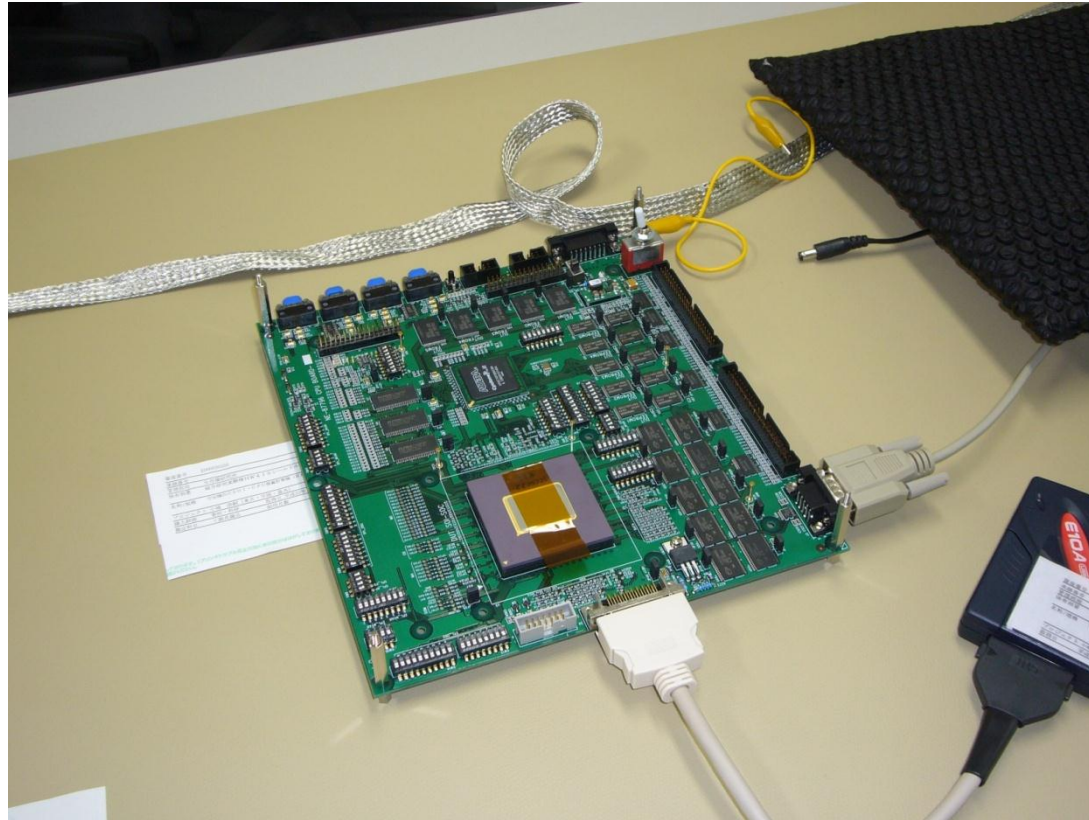
オンボードで処理する際の最適なアルゴリズム候補を決定

- ・WPIAの中でもっとも処理の重いCalibration部分の処理に関する検討
 - ERGで使用する予定のMDPに近いブレッドボードを用いた処理系プログラムの開発
 - 波動、粒子データを実際に取り込みながら(メモリアクセス)処理系を動作させた場合の処理時間の評価

Mission strategyの確立。計測頻度・タイミング等を決定

東北大に導入したS-WPIA開発用ERG MDP相当ボード

CPU(MHI製), 64MBytes SDRAM, 4MBytes SRAM, SpW I/F x 4, Serial I/F



平成23年度は、このボードとSpW I/Fをとる波動用FPGAと、その入力となるプラズマ波動受信器(波形捕捉タイプ Analogue ASIC)を開発する予定。

まとめ: ERGミッション用S-WPIA

波動と粒子データを高時間精度で解析し、波動一粒子相互間でのエネルギー収支に変換してから積分

従来の「波動」のみ、「粒子」のみの独立観測では得られなかった、新しい観測物理量の取得

メインターゲットは「Chorus emission励起」と、「Chorusによる電子加速」

観測ターゲットや領域がはっきりしているので、リアルタイム処理よりは、オンボードCPUによる柔軟的な解析実行を行えるシステムとして開発 (Mass、Power budgetへのインパクトも最小限に)

機上で複数のアルゴリズムによる処理プログラムを用意

オンボード処理に加えて、データを一部地上にダウンロードしてWPIA処理をするモードも考慮

基礎過程は同じである為、WPIAの計測手法は異なる物理現象に対しても有効(低周波モードに関しては地上でWPIA手法の利用が可能)