

地球放射線帯 (Van Allen Radiation Belts)

名古屋大学太陽地球環境研究所
三好由純



OUTLINE

1. はじめに

放射線帯の構造

2. 放射線帯の粒子加速

断熱外部供給・非断熱内部加速

エネルギー階層結合

3. 放射線帯はいつ増えるのか？

- 放射線帯電子は、

どのような太陽風構造がやってくると増えるのか？

- 太陽活動度変動

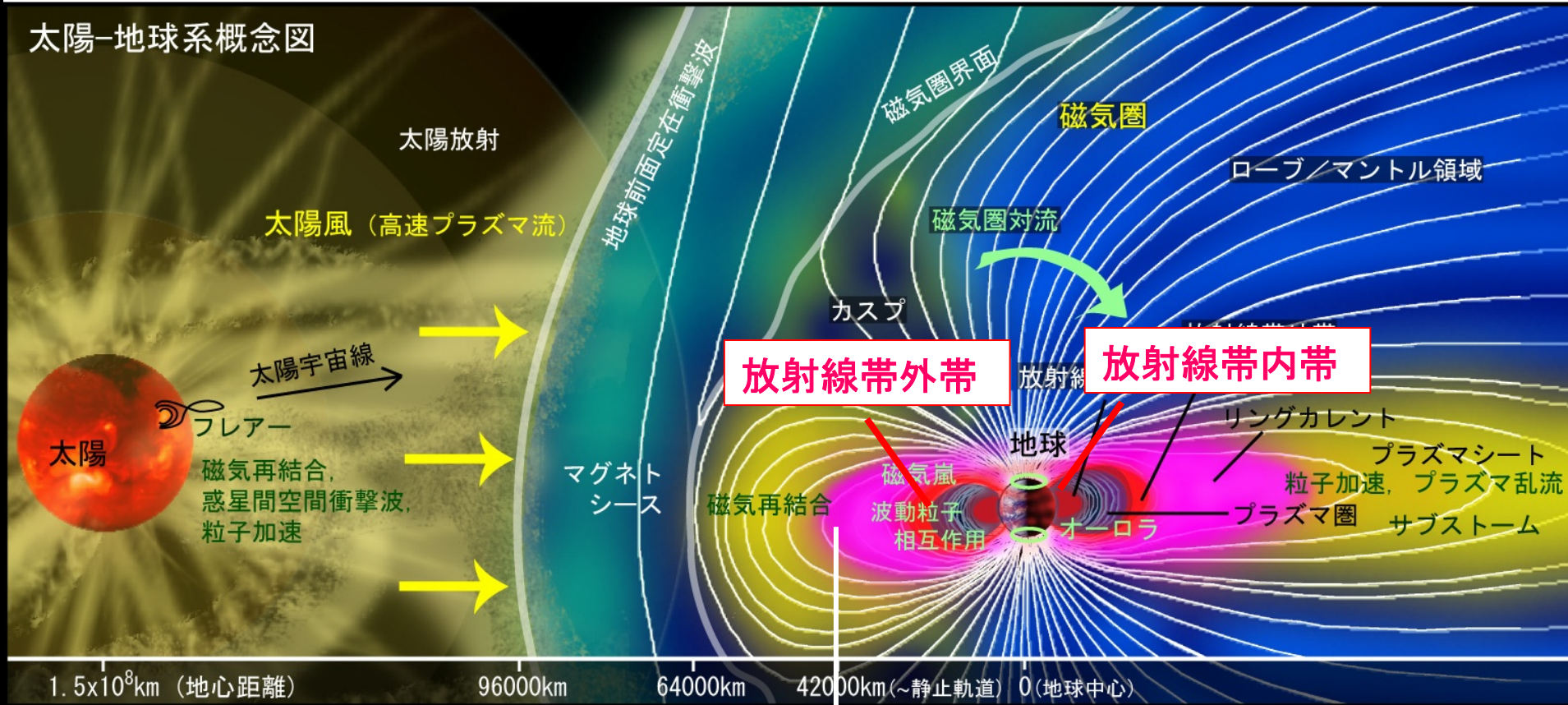
4. むすび

1. はじめに

放射線帯は、どこにある？

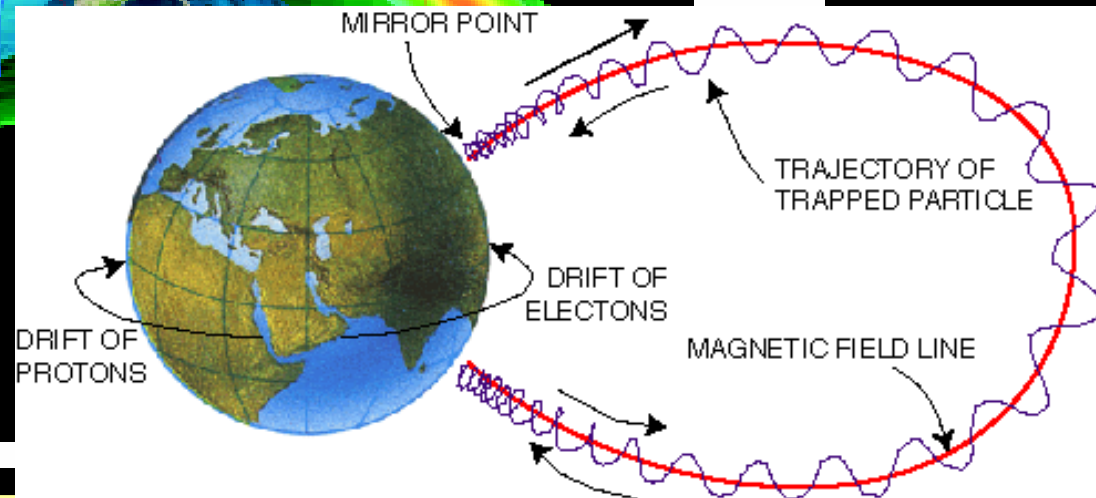
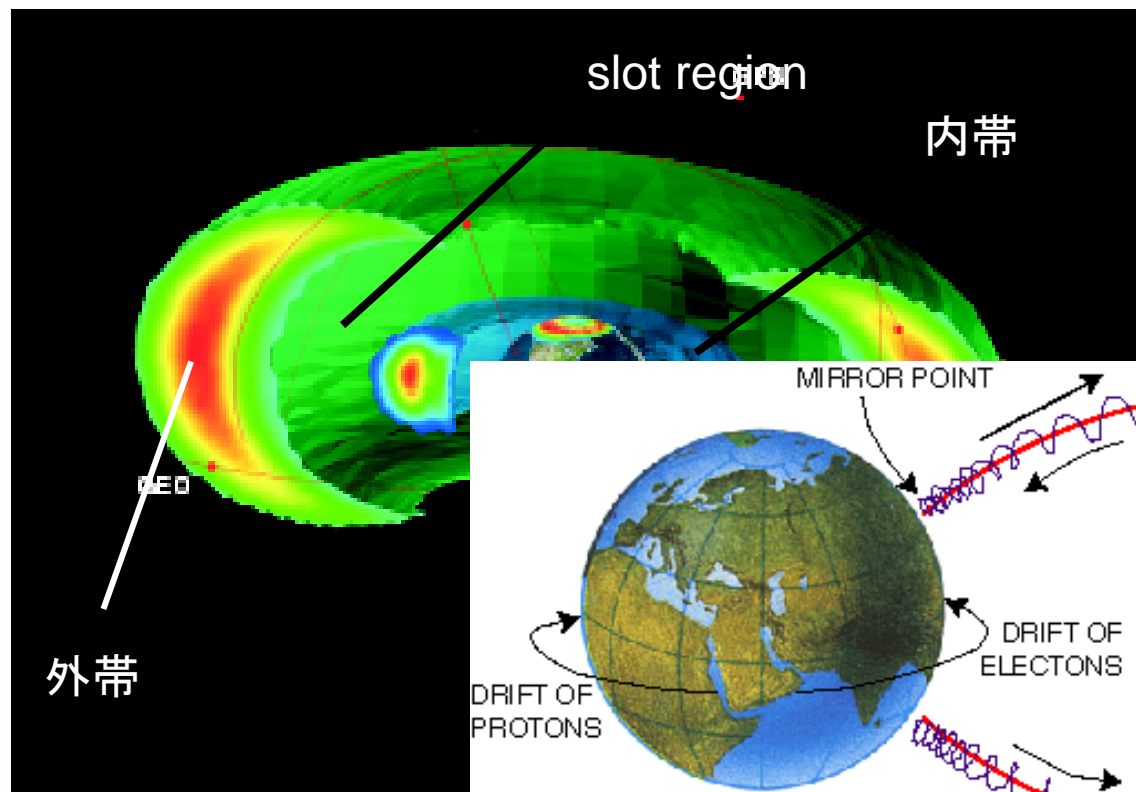
地球に近い場所で、ジオスペースで最もエネルギーの高い粒子(>MeV)が存在。

太陽-地球系概念図



静止軌道

「関、新しい地球学」



- 6桁以上に及ぶ広いエネルギー範囲に粒子が存在
(ジオスペースで、一番高いエネルギーの粒子)
- 太陽風起源、電離圏起源の粒子が混在 (multi-ions)
- 磁場ドリフトが卓越。MHDでは記述できない領域

磁気嵐時の放射線帯の研究の重要性

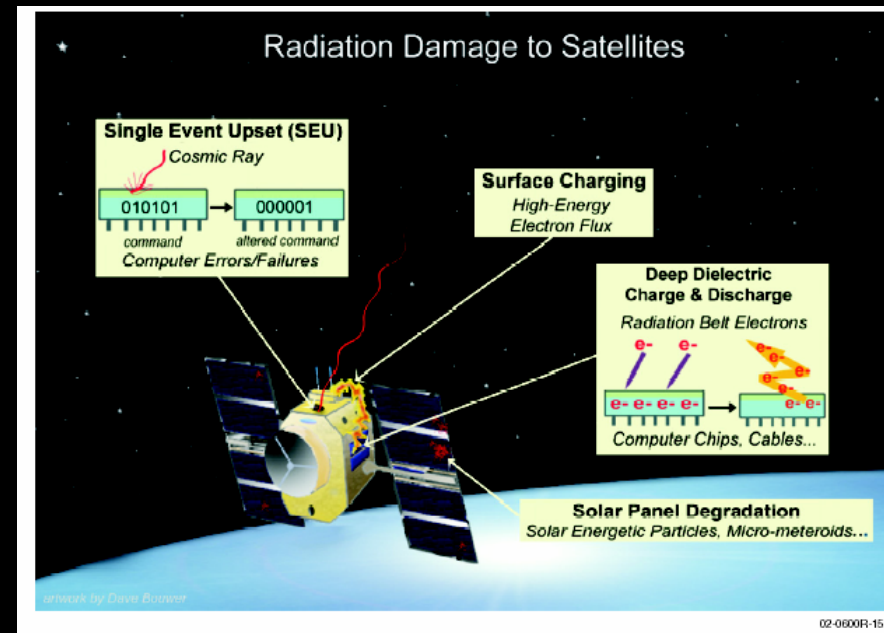
1990年代後半以降、再び注目を集める

- 静止軌道領域から内部磁気圏への観測領域の拡大

CRRES、SAMPEX、Akebono、Polarによる観測

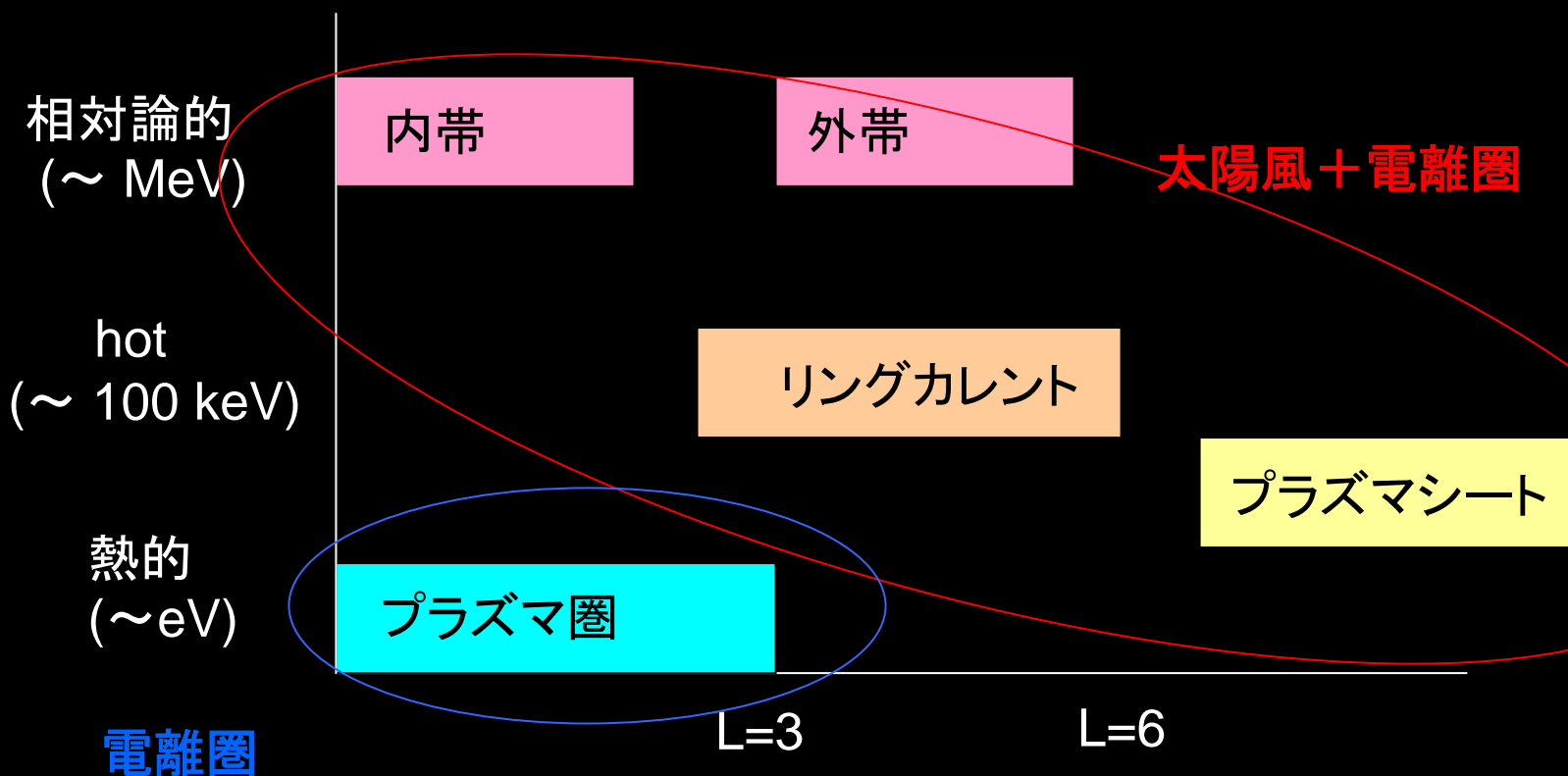
- 高エネルギー粒子による衛星障害

宇宙天気研究の重要項目



内部磁気圏のエネルギー階層構造

- 内部磁気圏の粒子:
- * プラズマ圏プラズマ(電離圏起源)
 - * プラズマシート・リングカレント
 - * 放射線帯



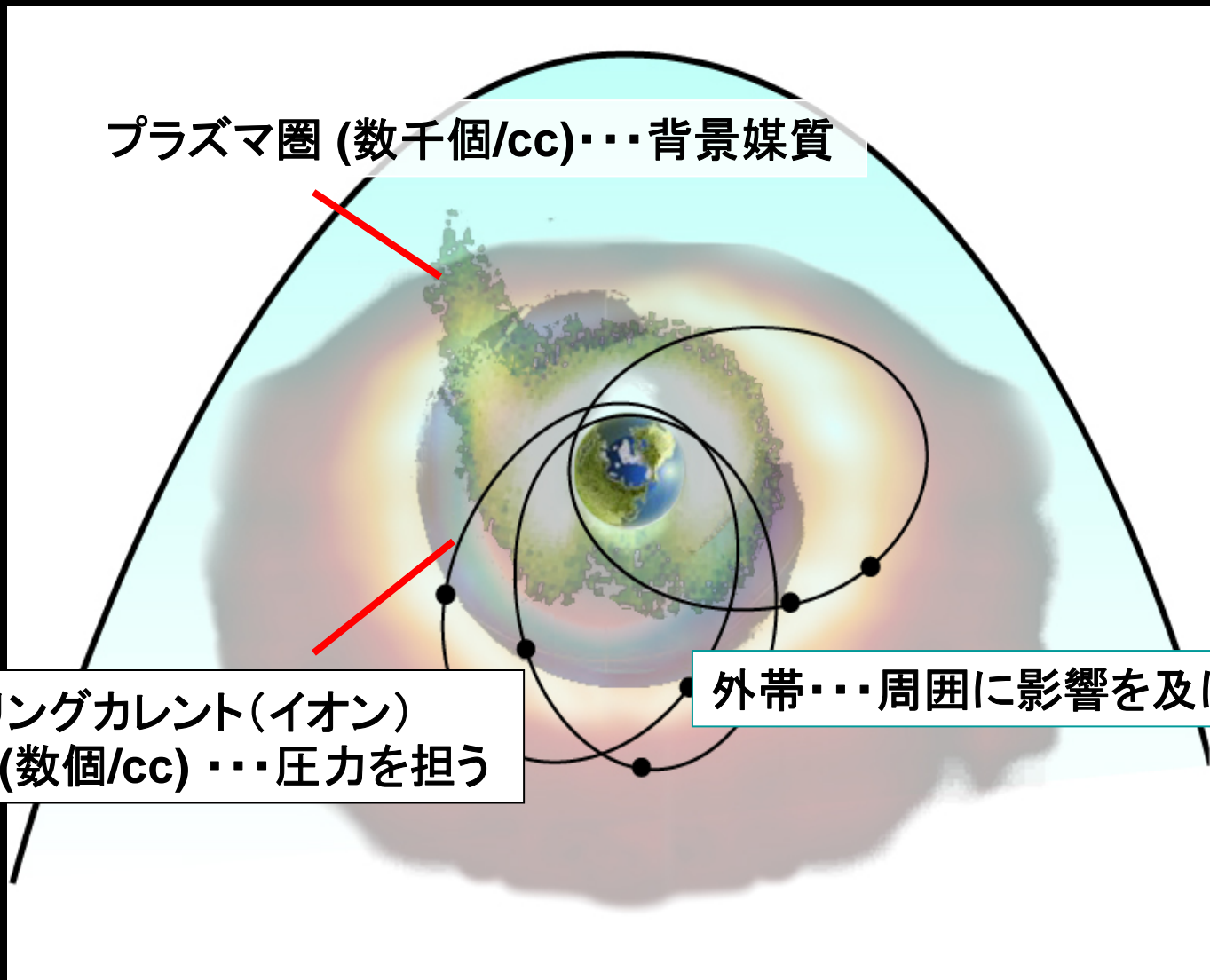
6桁以上のエネルギーにわたる階層構造をなしている

内部磁気圏を上から見ると

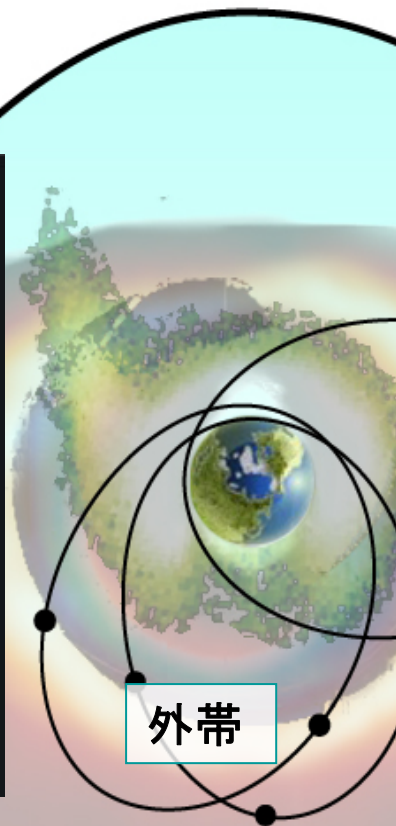
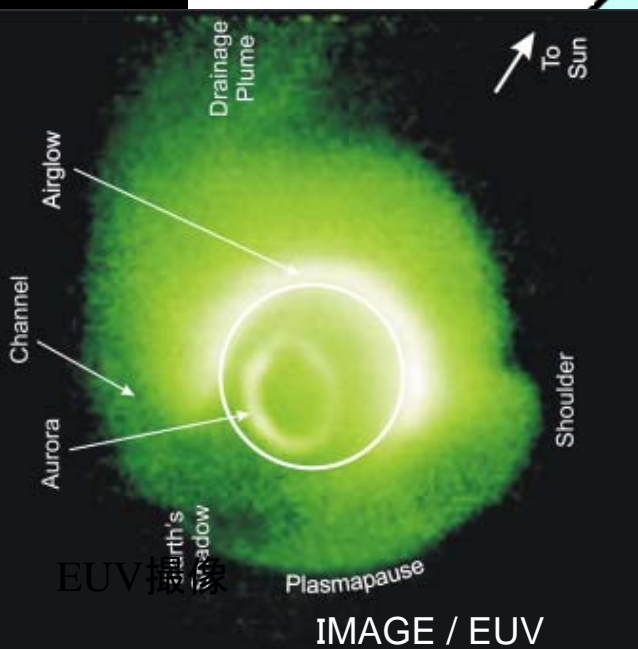
プラズマ圏 (数千個/cc)・・・背景媒質

リングカレント(イオン)
(数個/cc)・・・圧力を担う

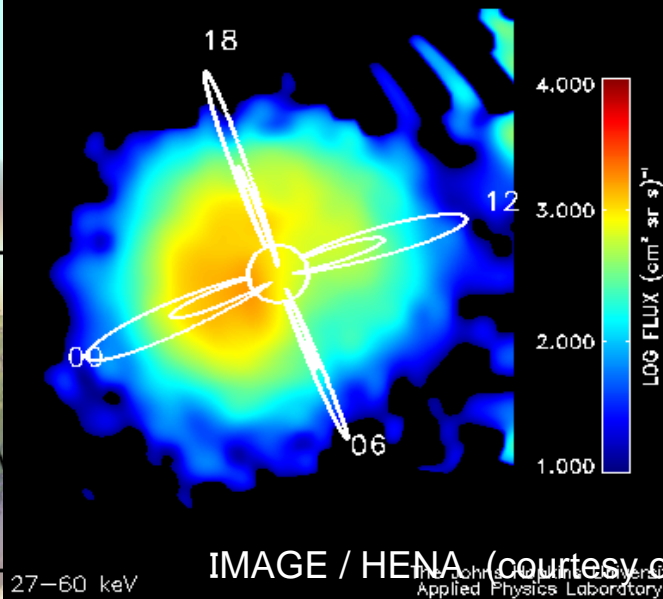
外帯・・・周囲に影響を及ぼさない



プラズマ圏



22 Oct 2001 (DOY 295) 11:57:59 - 12:07:59

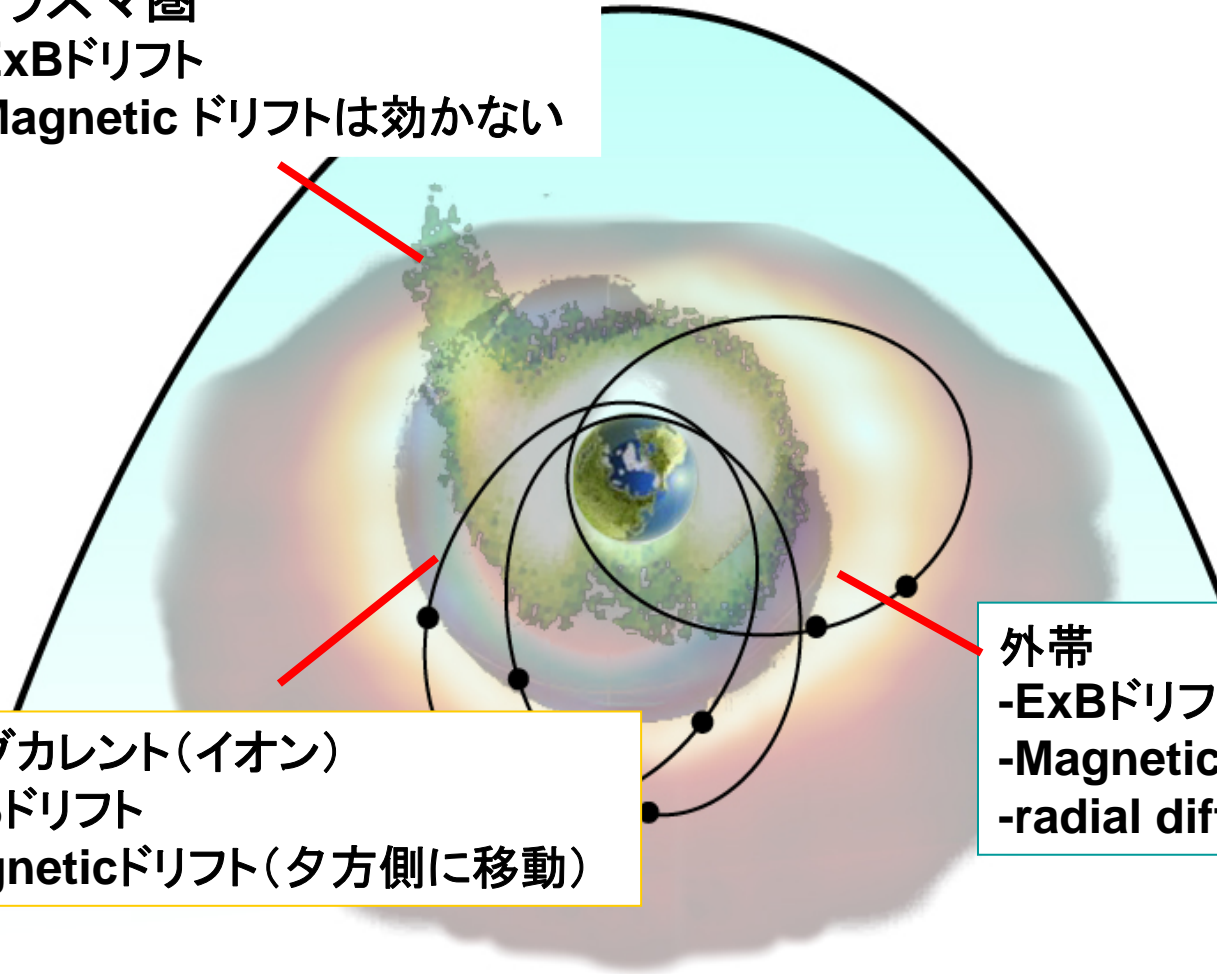


リングカレント

プラズマ圏

-ExBドリフト

-Magneticドリフトは効かない



リングカレント(イオン)

-ExBドリフト

-Magneticドリフト(夕方側に移動)

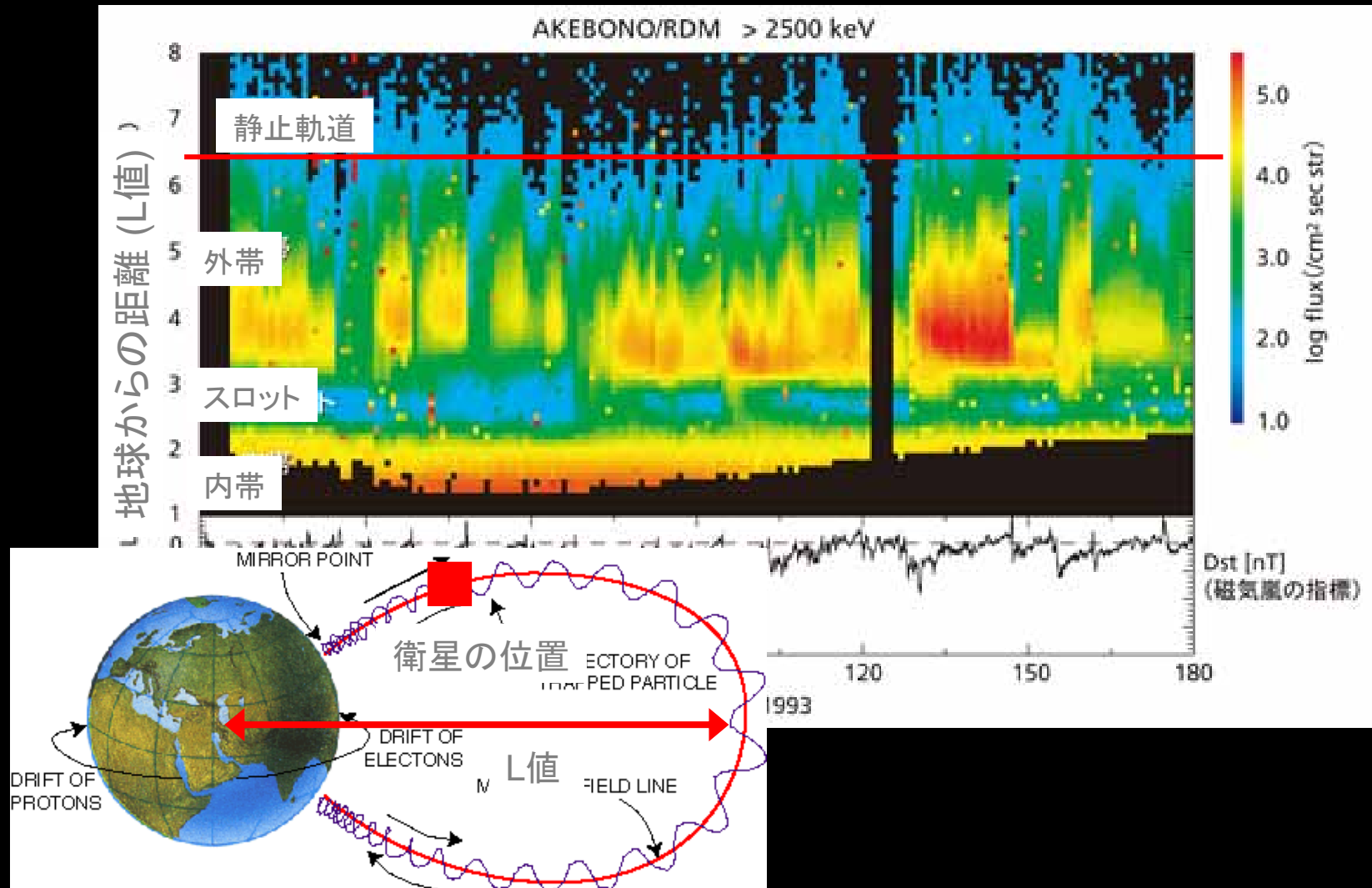
外帯

-ExBドリフトは効かない

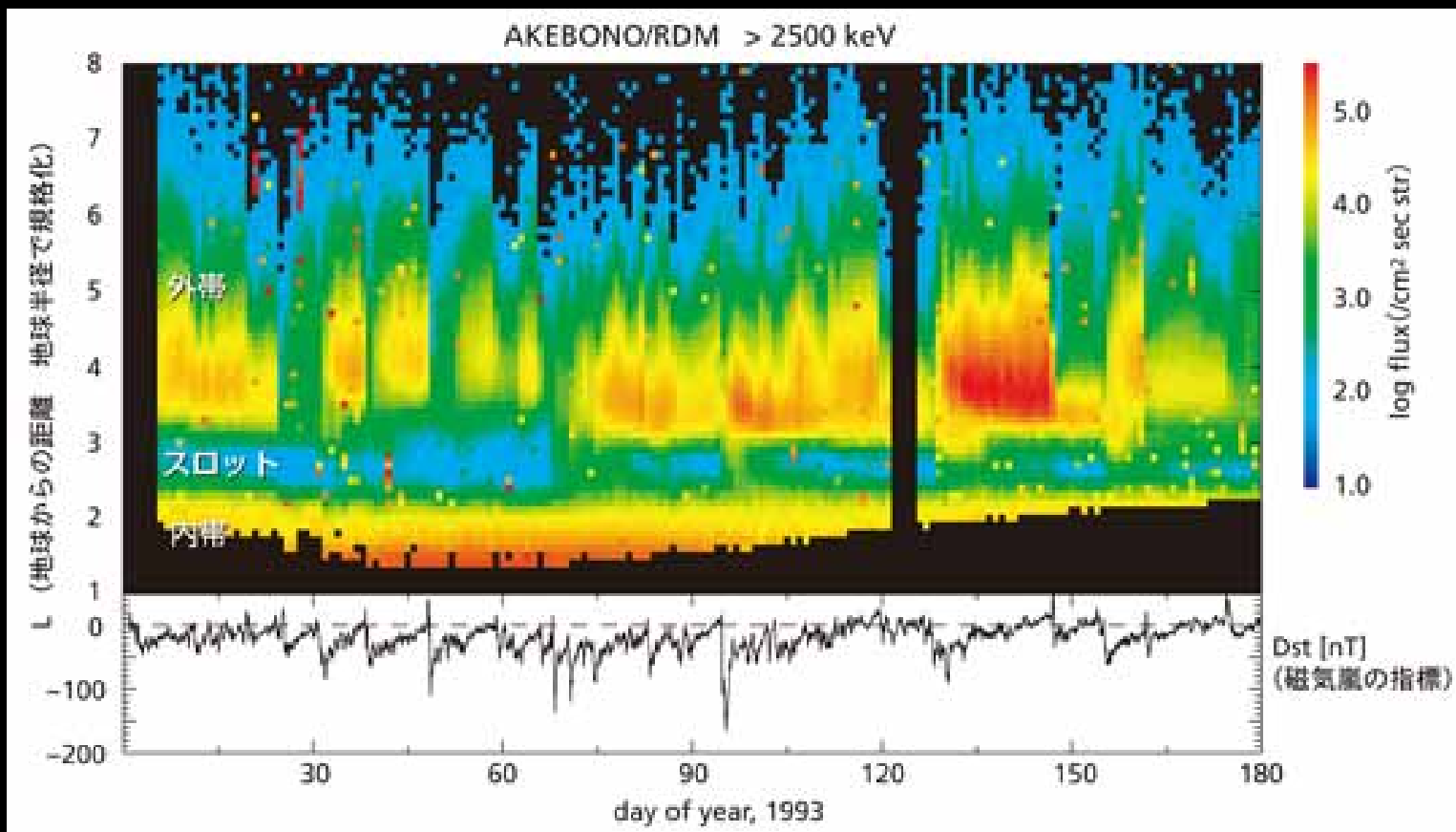
-Magneticドリフト(周回)

-radial diffusion

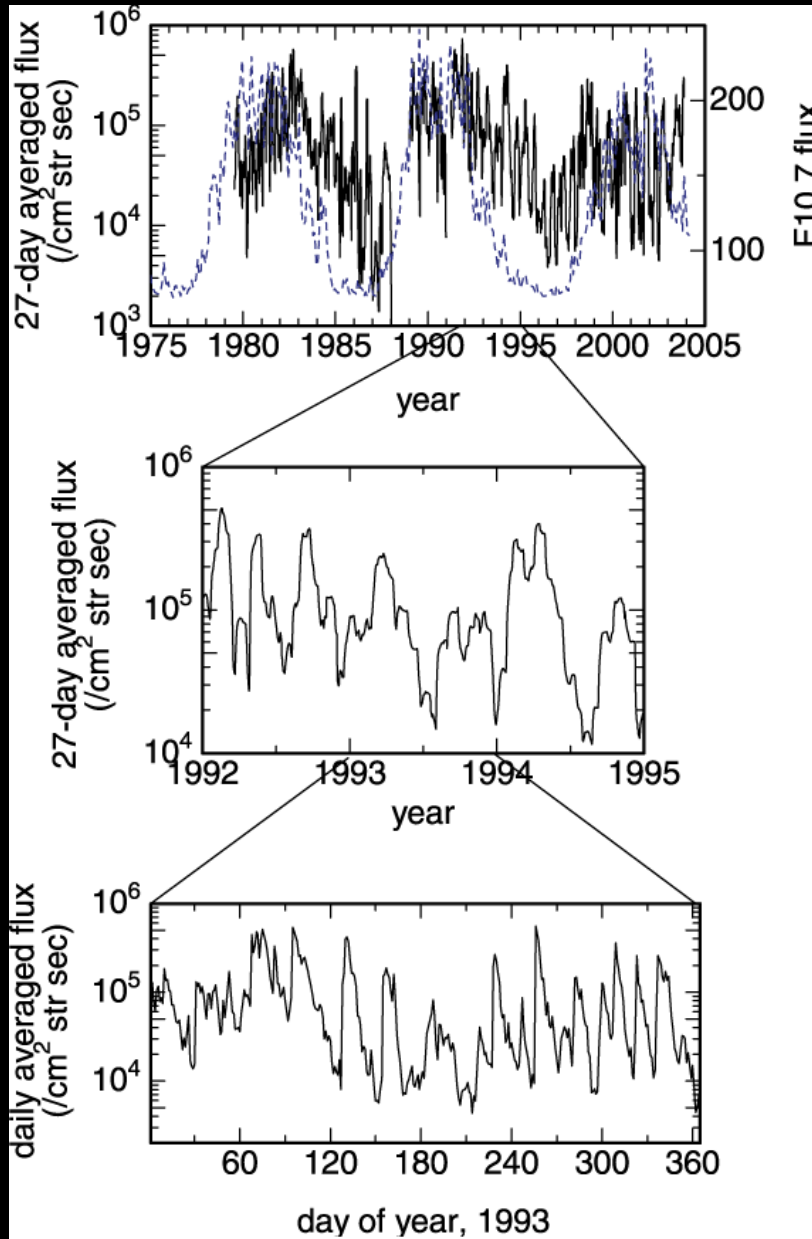
時間変化・・・「あけぼの」衛星による観測 (>2500 keV電子)



時間変化・・・「あけぼの」衛星による観測 (>2500 keV電子)



放射線帯変動の時間スケール

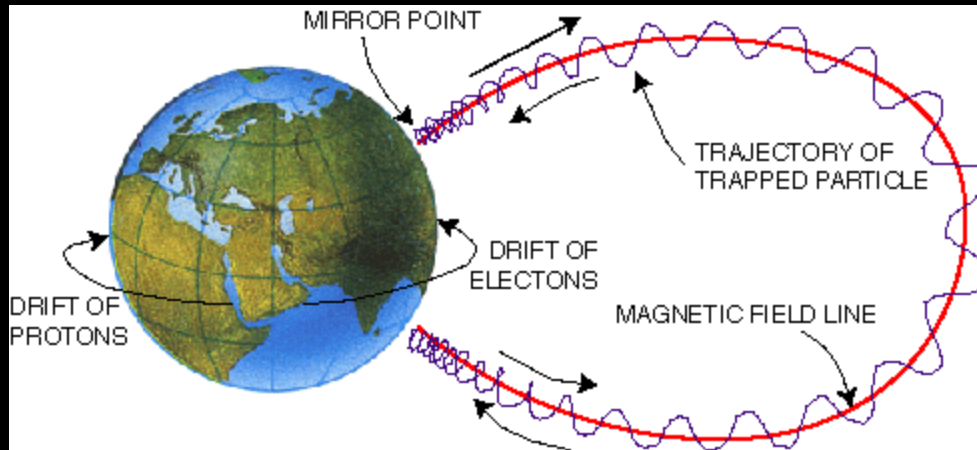


太陽活動周期

半年周期

27日周期

運動の記述 – 3つの異なる時間スケール



$$f(x, y, z, v_x, v_y, v_z)$$



$$f(\mu, J, L, \phi_1, \phi_2, \phi_3)$$

断熱不変量が破れる
 → 非断熱的運動(輸送・加速・消失)がはじまる

↓ ジャイロ、バウンスの位相を無視
 ボルツマン方程式として扱う

$$\frac{\partial f}{\partial t} + v \cdot \nabla f + \frac{q}{m} (E + v \times B) f = source - loss$$

$$f(\mu, J, L, \phi_3) = f(E, \alpha, L, MLT)$$



$$\frac{\partial f}{\partial t} = L^2 \frac{\partial}{\partial L} \left(\frac{D_{LL}}{L^2} \frac{\partial f}{\partial L} \right) - loss$$

$$f(\mu, J, L)$$

ドリフトの位相を無視,
 μ, J の保存を仮定
 Fokker-Plankとして扱う

放射線帯の物理過程

Radial diffusionにともなう時間変動の記述： Fokker-Planck方程式が使われる 位相空間中で、constant μ 粒子について、

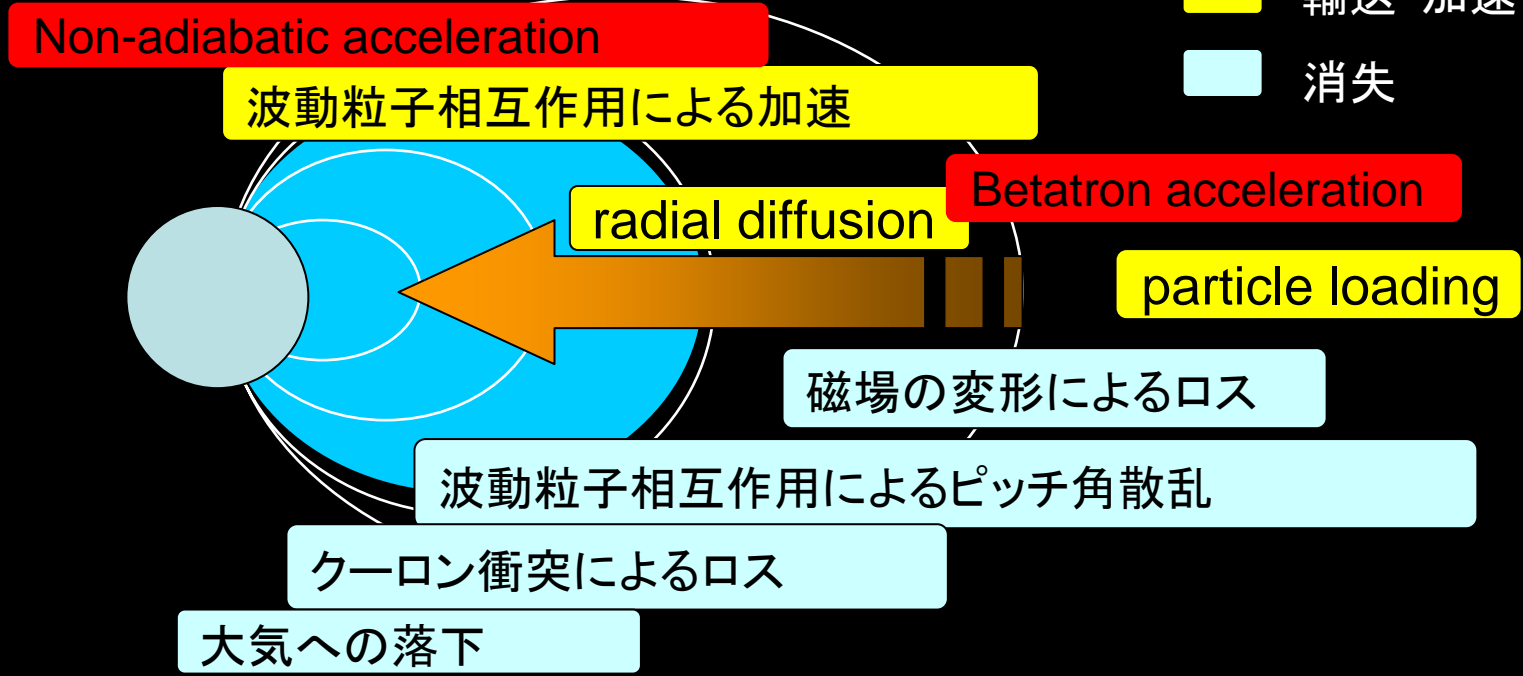
$$\frac{\partial f}{\partial t} = L^2 \frac{\partial}{\partial L} \left(\frac{D_{LL}}{L^2} \frac{\partial f}{\partial L} \right) + \text{Source} - \sum_i \frac{f}{\tau_i}$$

輸送

内部加速

ロス

輸送・加速
消失



2. 放射線帯粒子の輸送・加速メカニズム

放射線帯粒子の加速機構

放射線帯外帯電子の磁気モーメント: 1000 MeV/G以上

・・太陽風のphase space densityでは不十分

2つの考え方:

- ・外部供給 (classical theory)

--- plasma sheetで、大きな磁気モーメントの電子を生成。

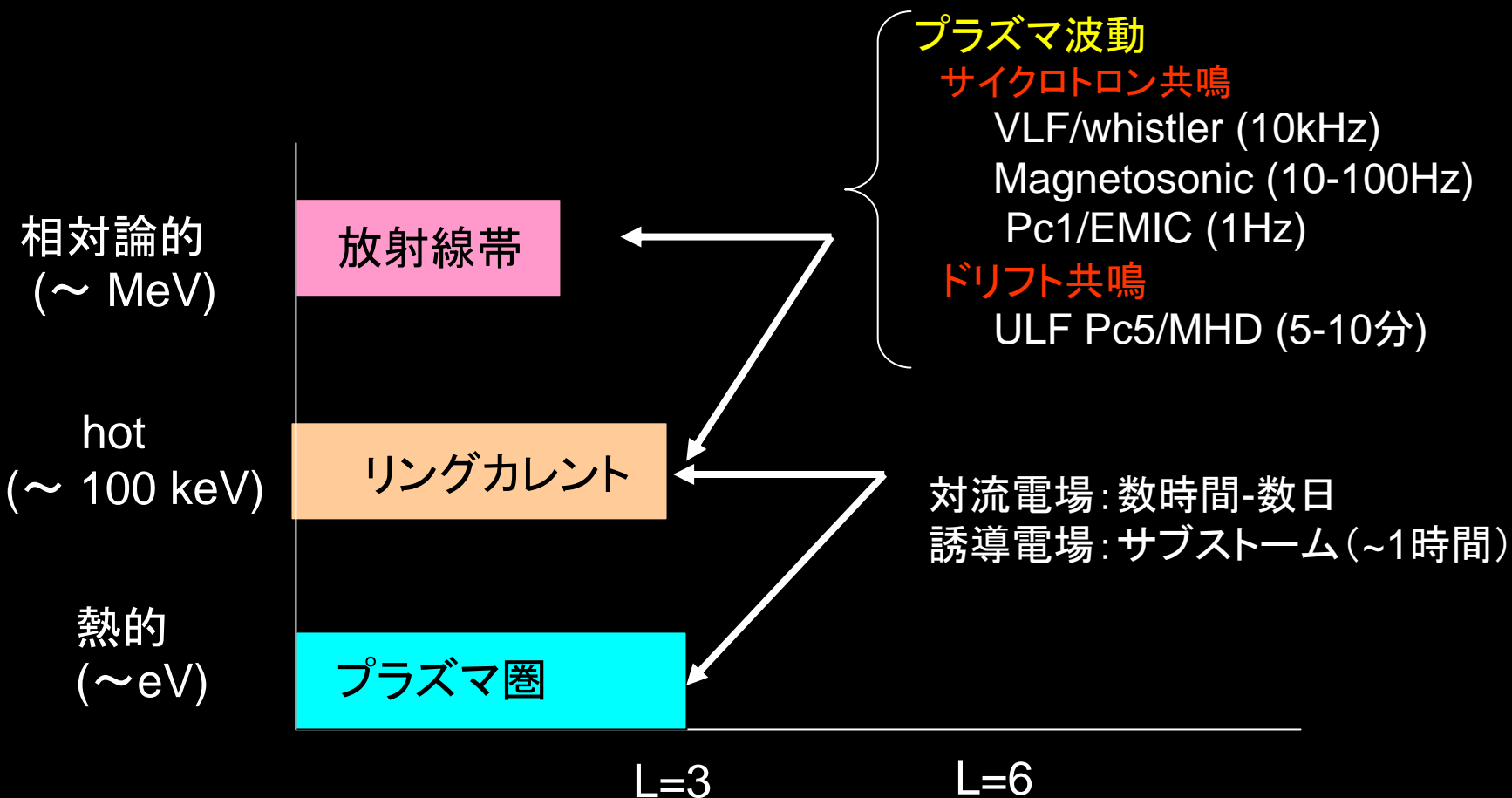
断熱的に内部磁気圏に輸送(radial diffusion)、相対論的エネルギーに。

- ・内部加速 (1990年代後半に提案)

--- plasma sheetの典型的なエネルギーの電子を内部磁気圏に輸送。

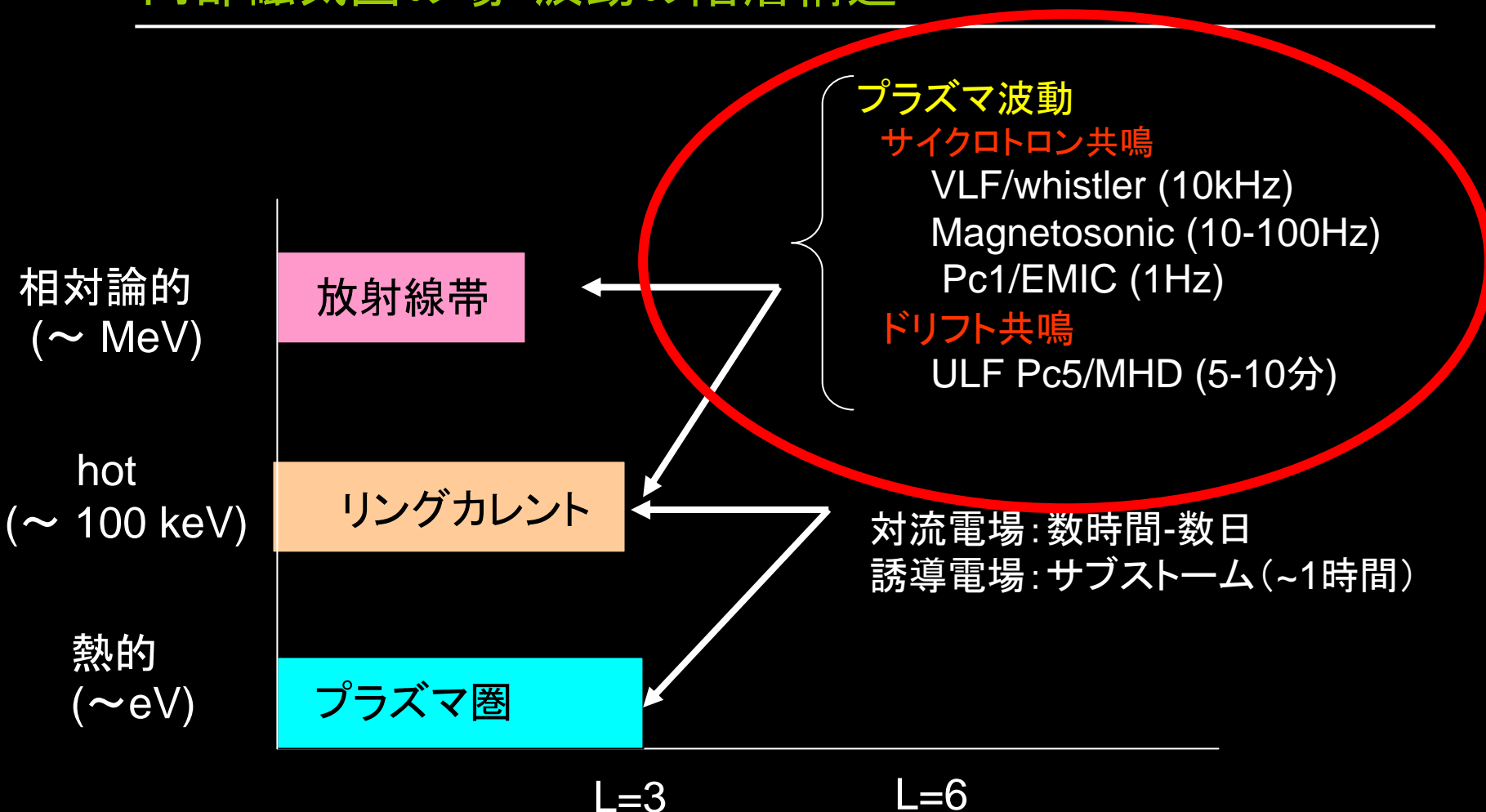
内部磁気圏で、非断熱的に相対論的電子を作る

内部磁気圏の場・波動の階層構造



変動のスケールが8桁以上の周波数帯におよんでいる

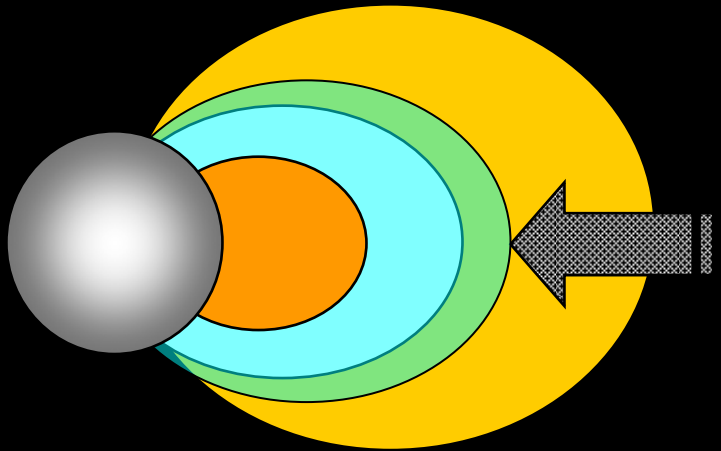
内部磁気圏の場・波動の階層構造



プラズマ波動による輸送・加速が 放射線帯変動の主役

外部供給のコンセプト

放射線帯の起源は、plasma sheetからradial diffusionで内部磁気圏にentryし、adiabaticに加速された電子



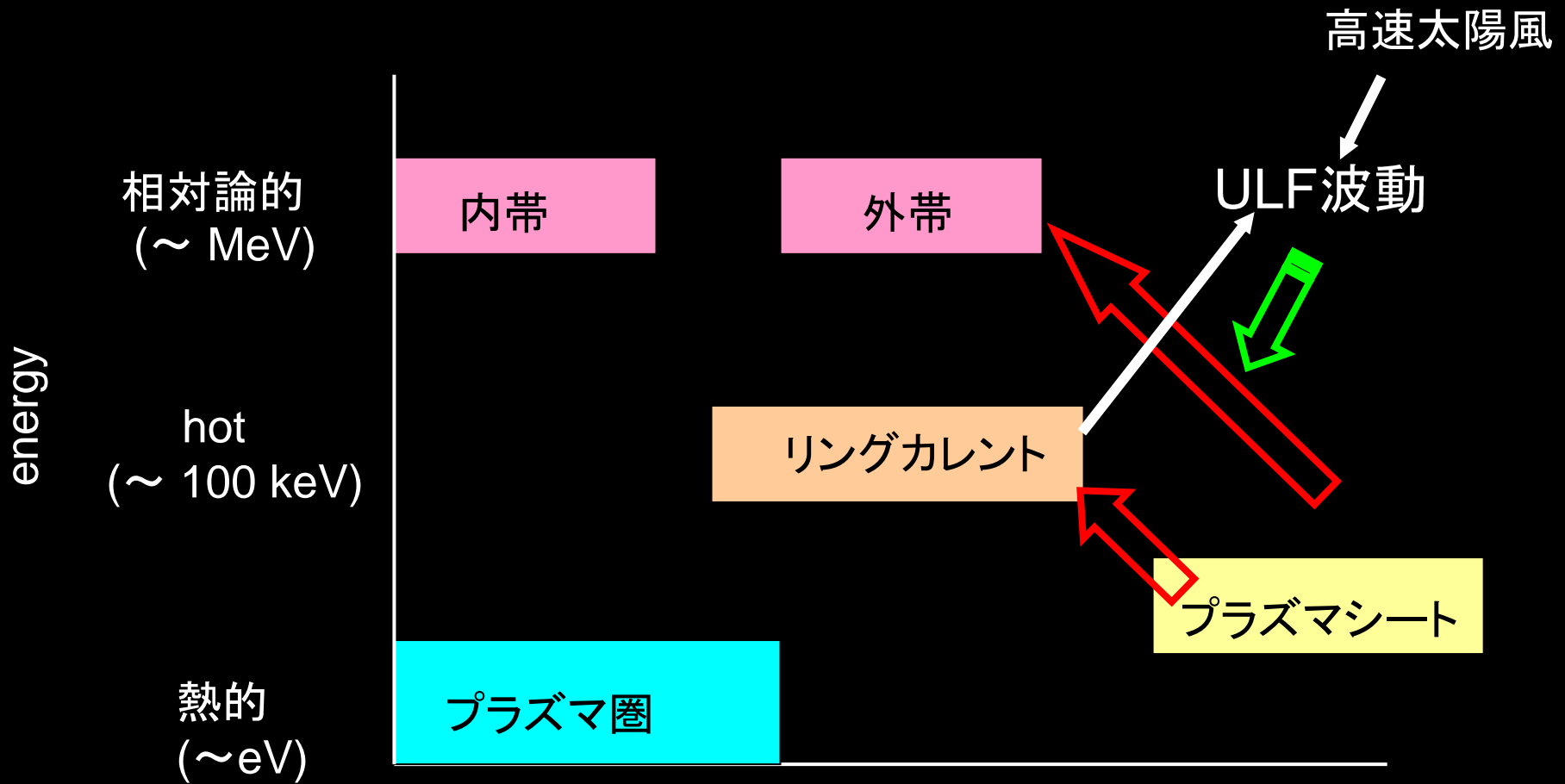
diffusion / betatron acceleration

radial diffusion model

$$\frac{\partial f}{\partial t} = L^2 \frac{\partial}{\partial L} \left(\frac{D_{LL}}{L^2} \frac{\partial f}{\partial L} \right) - \Sigma \frac{f}{\tau}$$

高 μ 電子が生成される場所 : plasma sheet

提案されているプロセス (断熱加速)

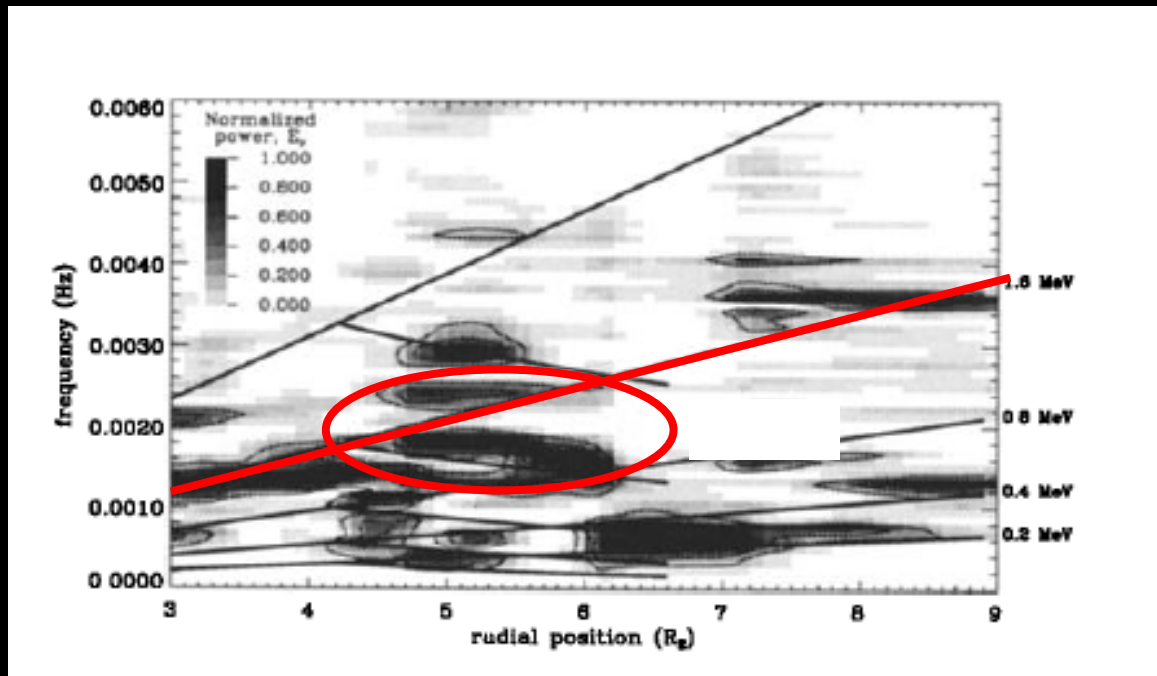


提案されているプロセス (断熱加速)

- 第1, 2断熱普遍量は保存。第3断熱普遍量を破って、radial方向に輸送。
- 1970年代に基本描像が確立。磁気圏の電磁場の擾乱で輸送が起こる。1990年代後半に、ULFと呼ばれる磁気圏MHD波動も、ドリフト共鳴で、輸送を引き起こすことができることが理論的に発見。

$$\omega = m\omega_d$$

MHD波動の
周波数



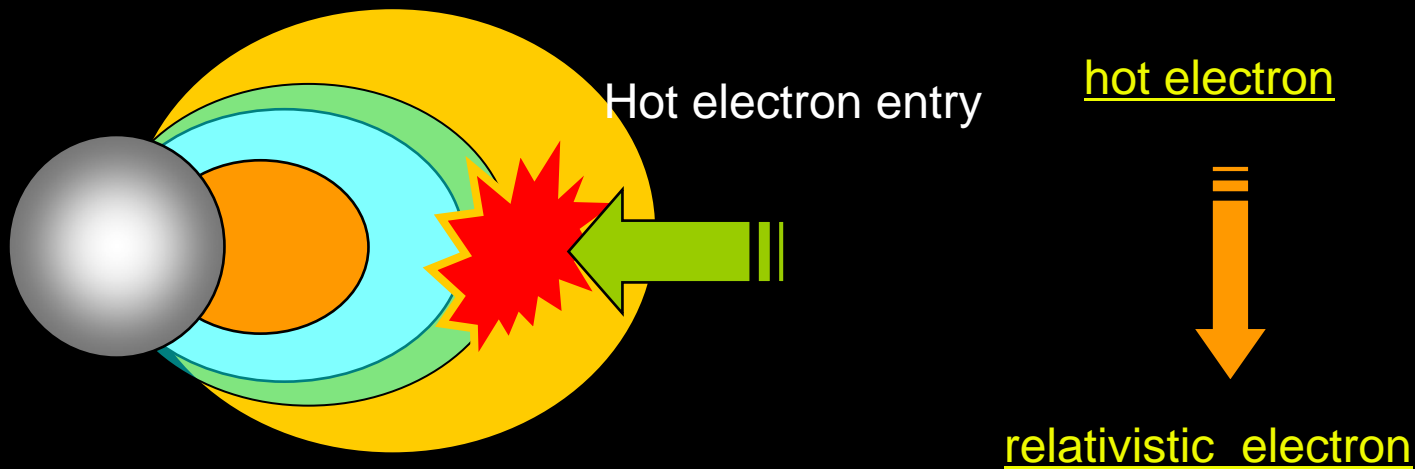
1.5MeVのドリフト周期

地球からの距離

Elikington et al. [1999]

内部加速のコンセプト

放射線帯の起源は、plasma sheetからconvection/injectionで
内部磁気圏に注入された hot electronがnon-adiabaticに加速された電子



高 μ 電子が生成される場所 : **放射線帯領域**

$$\frac{\partial f}{\partial t} = L^2 \frac{\partial}{\partial L} \left(\frac{D_{LL}}{L^2} \frac{\partial f}{\partial L} \right) + \text{Source} - \sum_i \frac{f}{\tau_i}$$

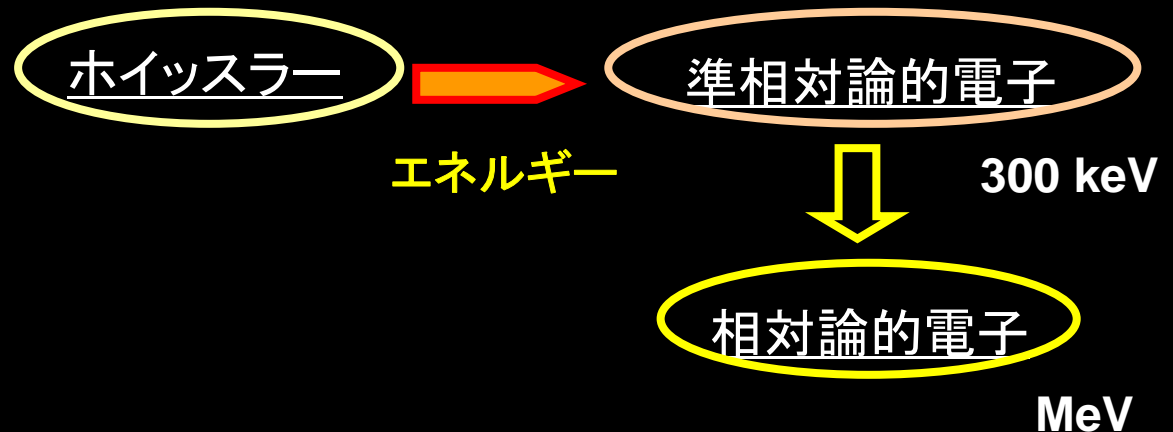
提案されているプロセス (非断熱加速)

非断熱加速のドライバー

-ホイスラーモード波動によって、第一断熱普遍量(磁気モーメント)を破って加速する。

磁気音波波動によって、第一断熱普遍量(磁気モーメント)を破って加速する。

$$\omega - kv = n\Omega / \gamma$$



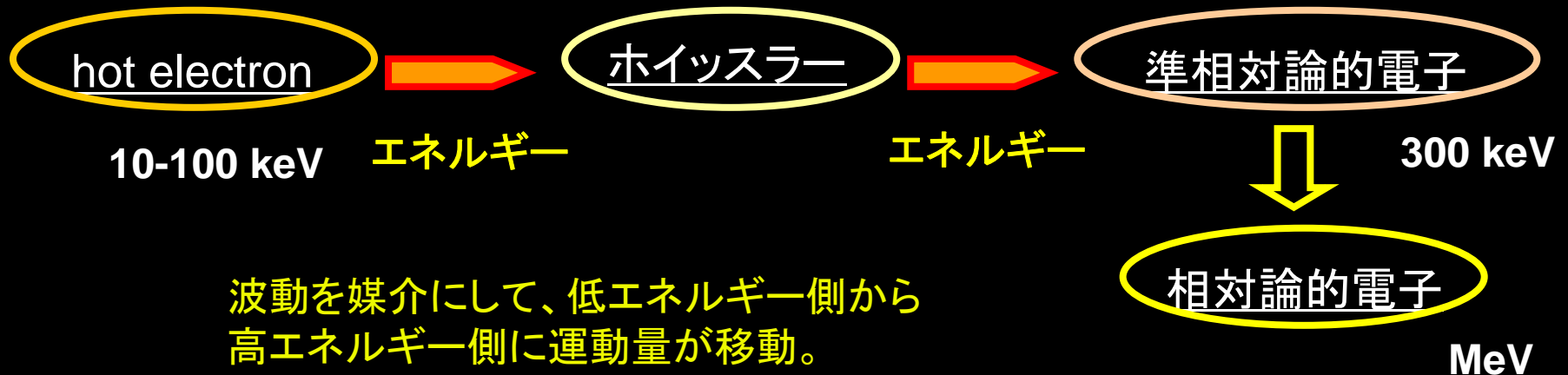
提案されているプロセス (非断熱加速)

非断熱加速のドライバー

-ホイスラーモード波動によって、第一断熱普遍量(磁気モーメント)を破って加速する。

磁気音波波動によって、第一断熱普遍量(磁気モーメント)を破って加速する。

$$\omega - kv = n\Omega / \gamma$$

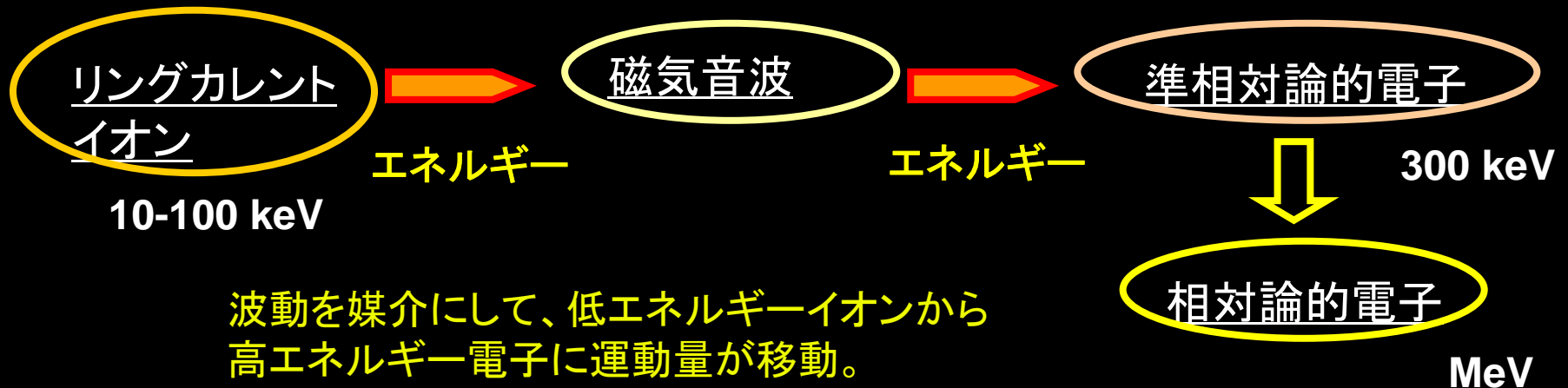


提案されているプロセス (非断熱加速)

非断熱加速のドライバー

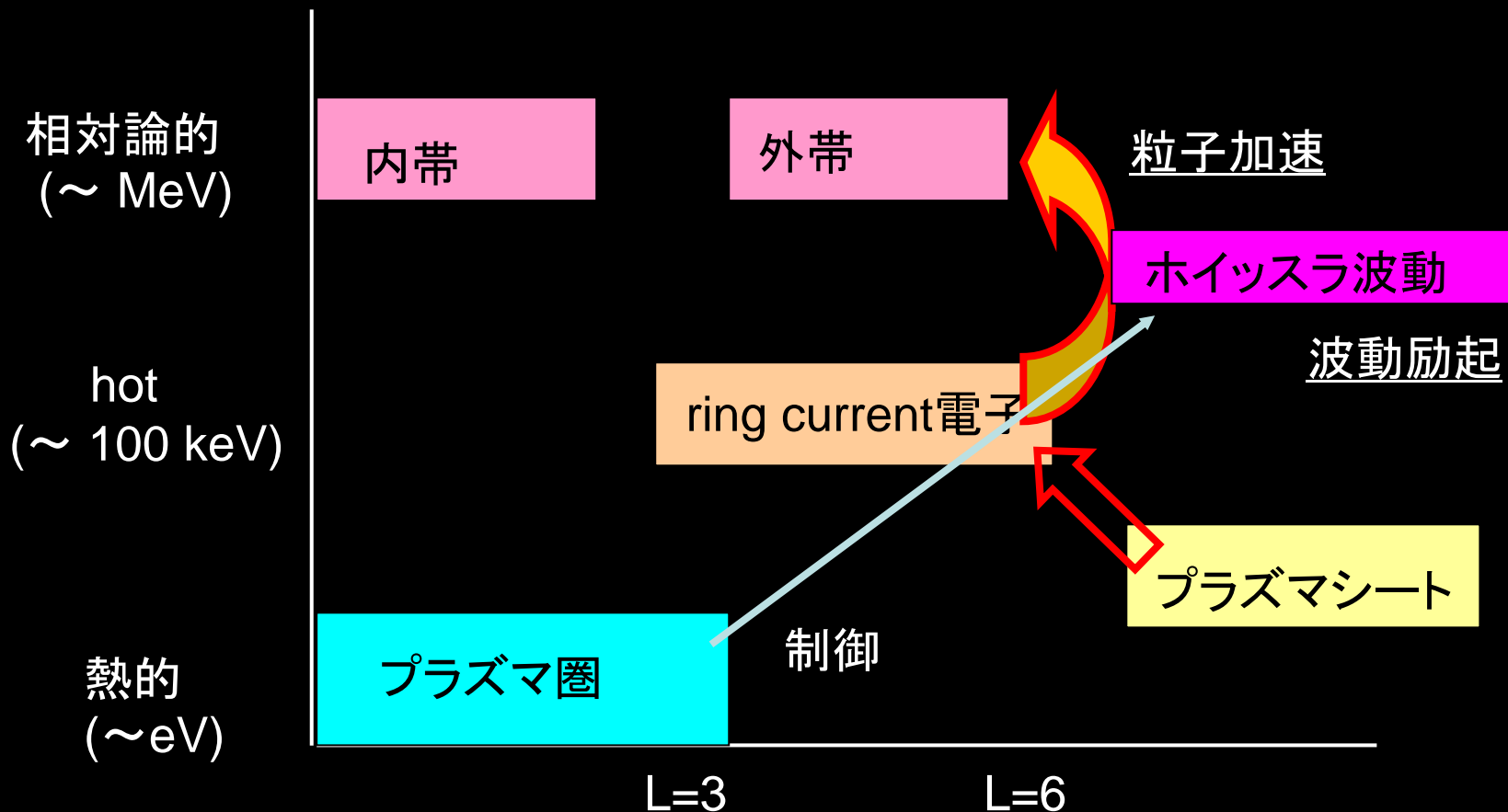
- ホイスラーモード波動によって、第一断熱普遍量(磁気モーメント)を破って加速する。
- 磁気音波波動によって、第一断熱普遍量(磁気モーメント)を破って加速する。

$$\omega - kv = n\Omega / \gamma$$



エネルギー階層結合による粒子加速

低エネルギー電子 → 高エネルギー電子

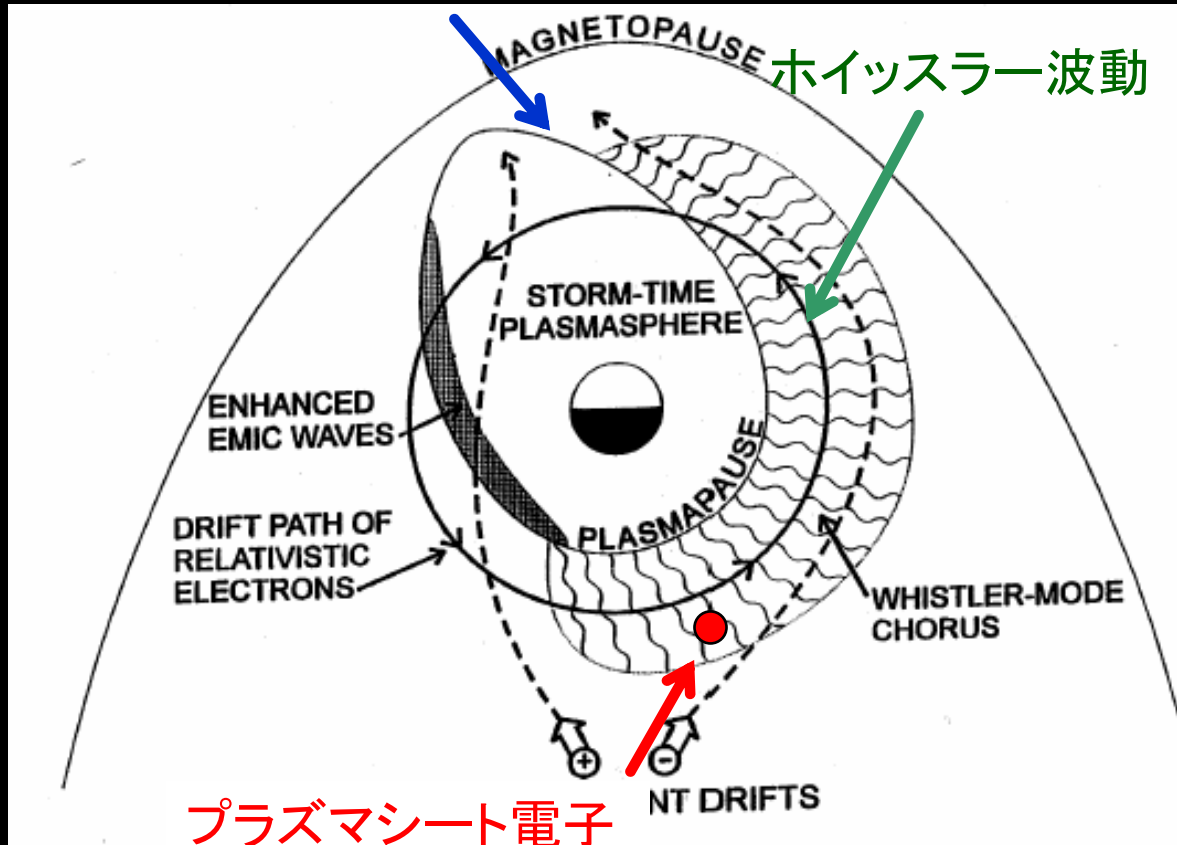


- 異なるエネルギー、異なる領域のプラズマが影響・・・エネルギー階層構造が本質
- プラズマ波動が、大規模な粒子の空間構造に影響を及ぼす

外帯再形成について提案されているシナリオ

ホイッスラー波動を介した非断熱加速過程による粒子加速

プラズマ圏境界



プラズマシート粒子注入

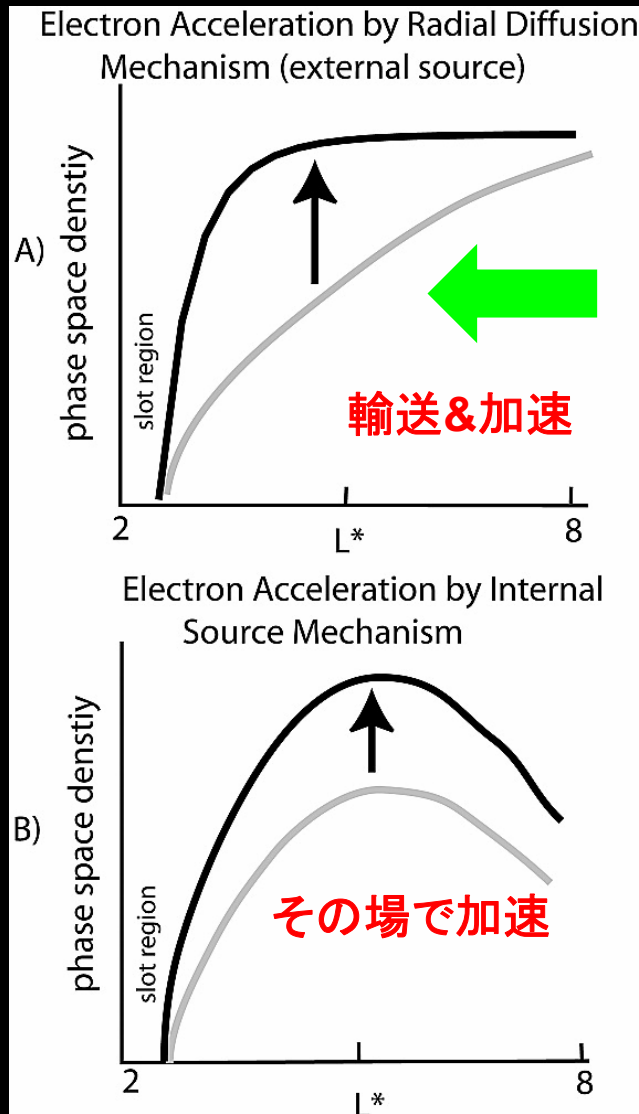
↓
ホイッスラー波動励起

↓
波動による加速

↓
高エネルギー粒子形成

観測による断熱加速と非断熱加速の切り分け

phase space densityのradial profile



$$\frac{\partial f}{\partial t} = L^2 \frac{\partial}{\partial L} \left(\frac{D_{LL}}{L^2} \frac{\partial f}{\partial L} \right) - loss$$

sourceがないので、peakはできない

$$\frac{\partial f}{\partial t} = L^2 \frac{\partial}{\partial L} \left(\frac{D_{LL}}{L^2} \frac{\partial f}{\partial L} \right) + Source - loss$$

sourceがあるので、peakができる

位相空間密度(PSD)の観測

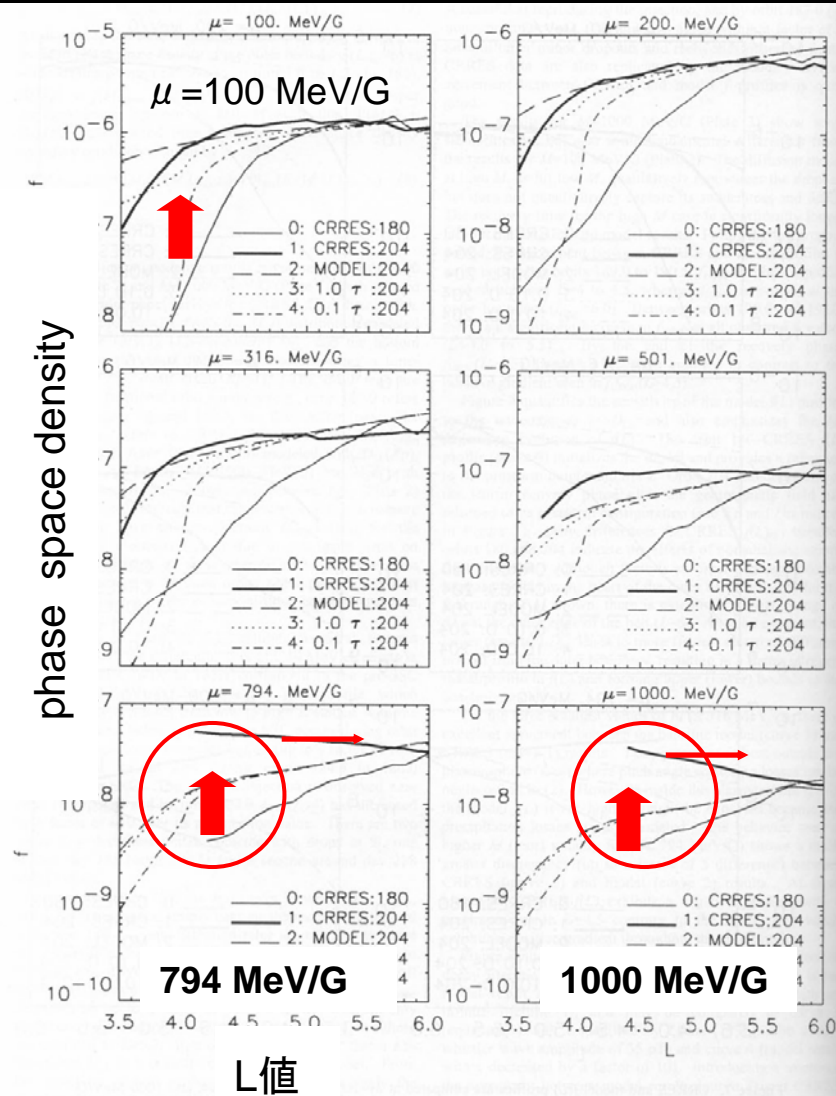


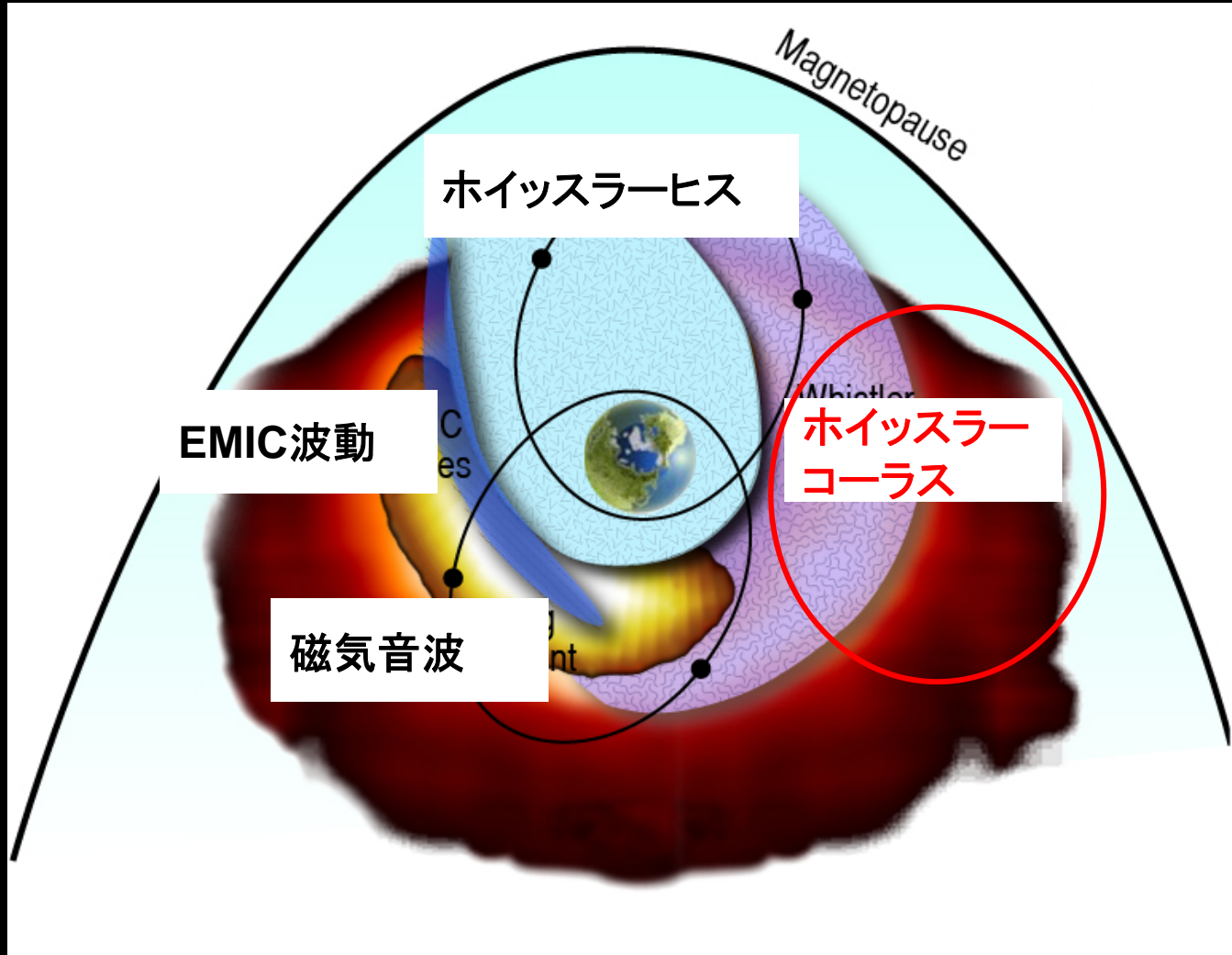
Figure 8. CRRES $f(L)$ profiles for orbit 180 (curve 0) and 204 (curve 1) are compared to orbit 204 baseline model $f(L)$ profile (curve 2) and model $f(L)$ profiles including pitch angle scattering lifetimes scaled by 1.0 (curve 3) and by 0.1 (curve 4).

- 磁気嵐前に比べて、PSDが増加
- 大きな μ のPSDが、L=4付近でピークを持つ

Brautigam and Albert [2000]

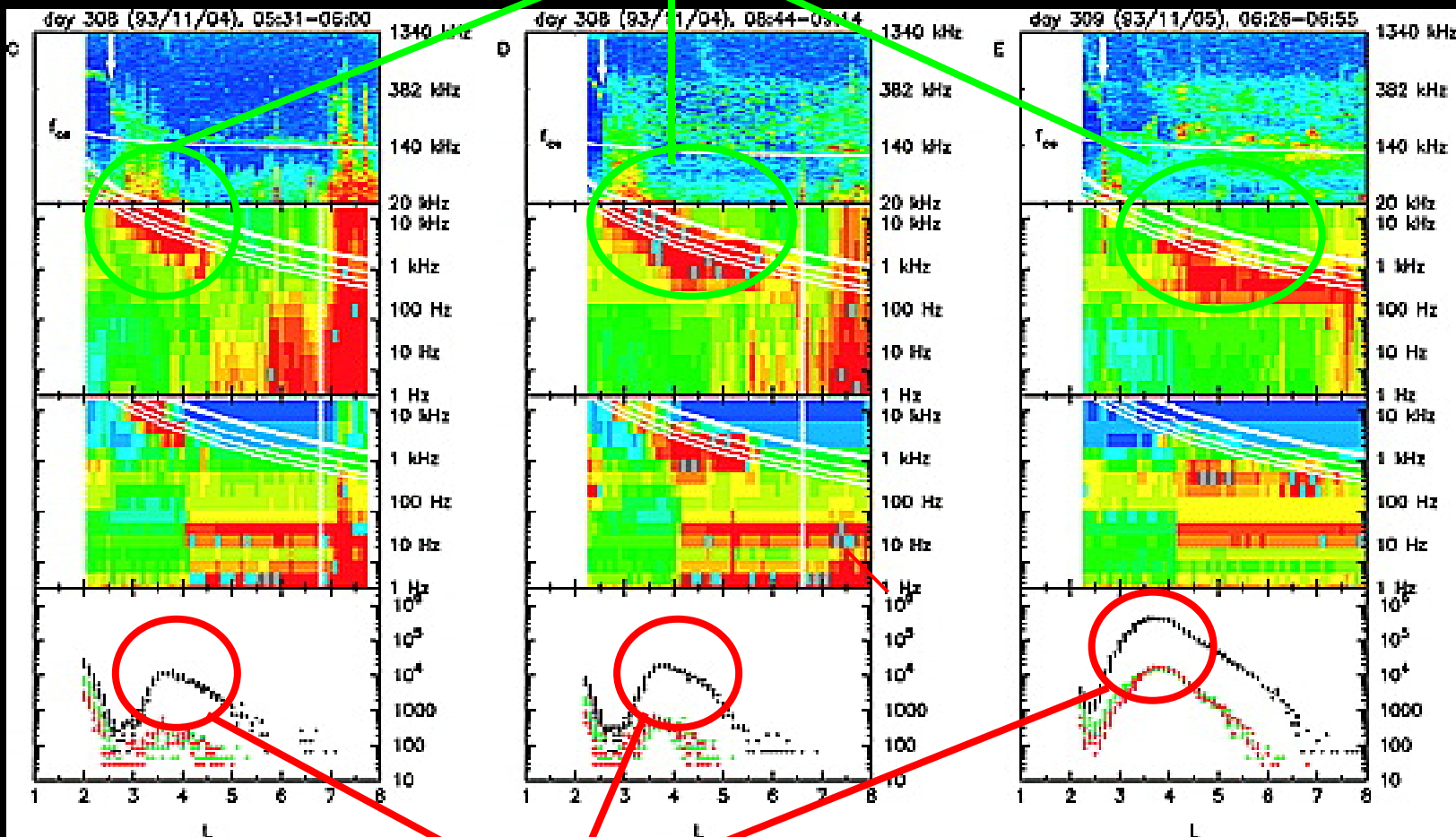
磁気嵐中の内部磁気圏ホイッスラー

内部磁気圏のプラズマ波動



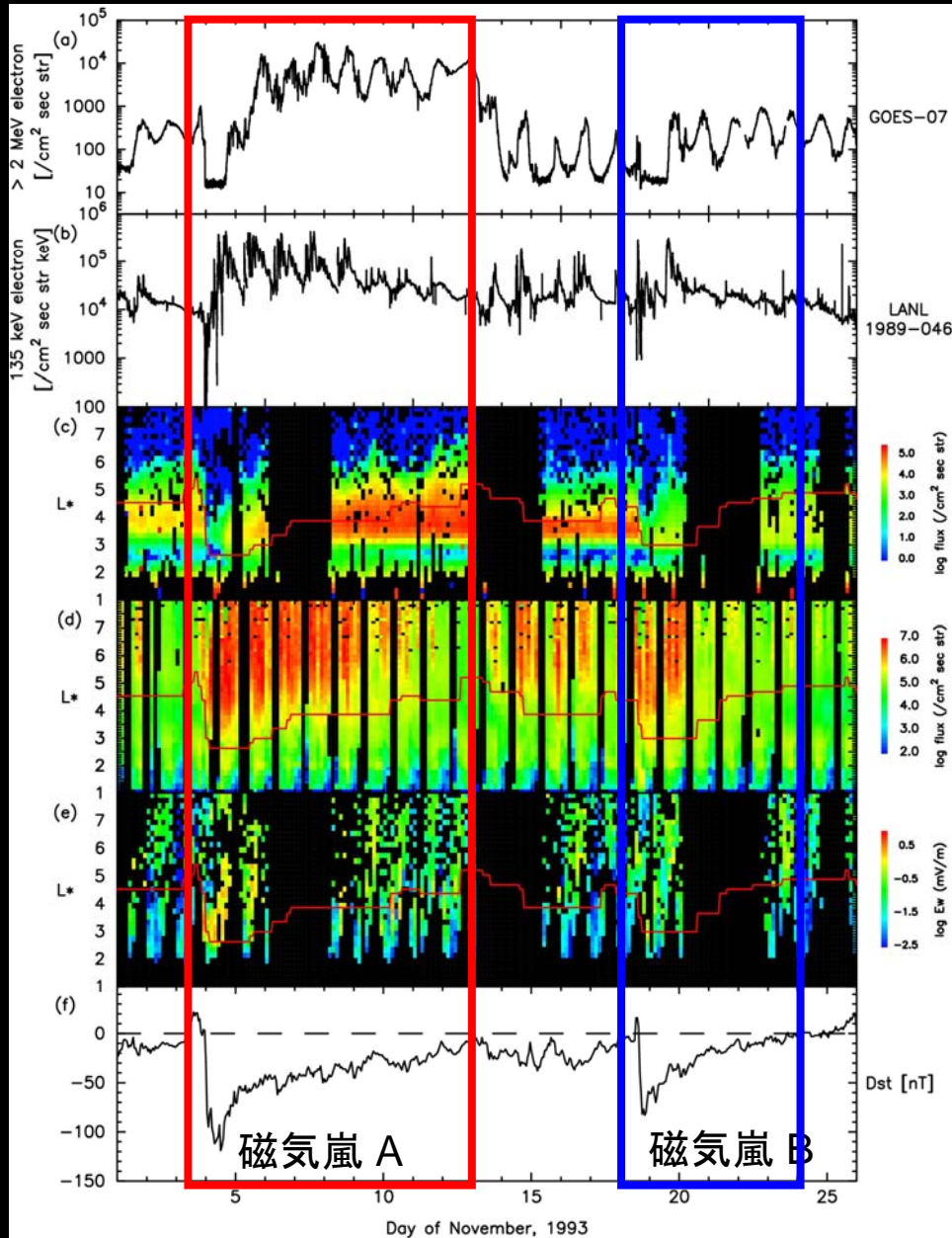
磁気嵐中の内部磁気圏のプラズマ波動

ホイッスラー波動



外帯MeV電子の増加

外帯が増加する磁気嵐と増加しない磁気嵐



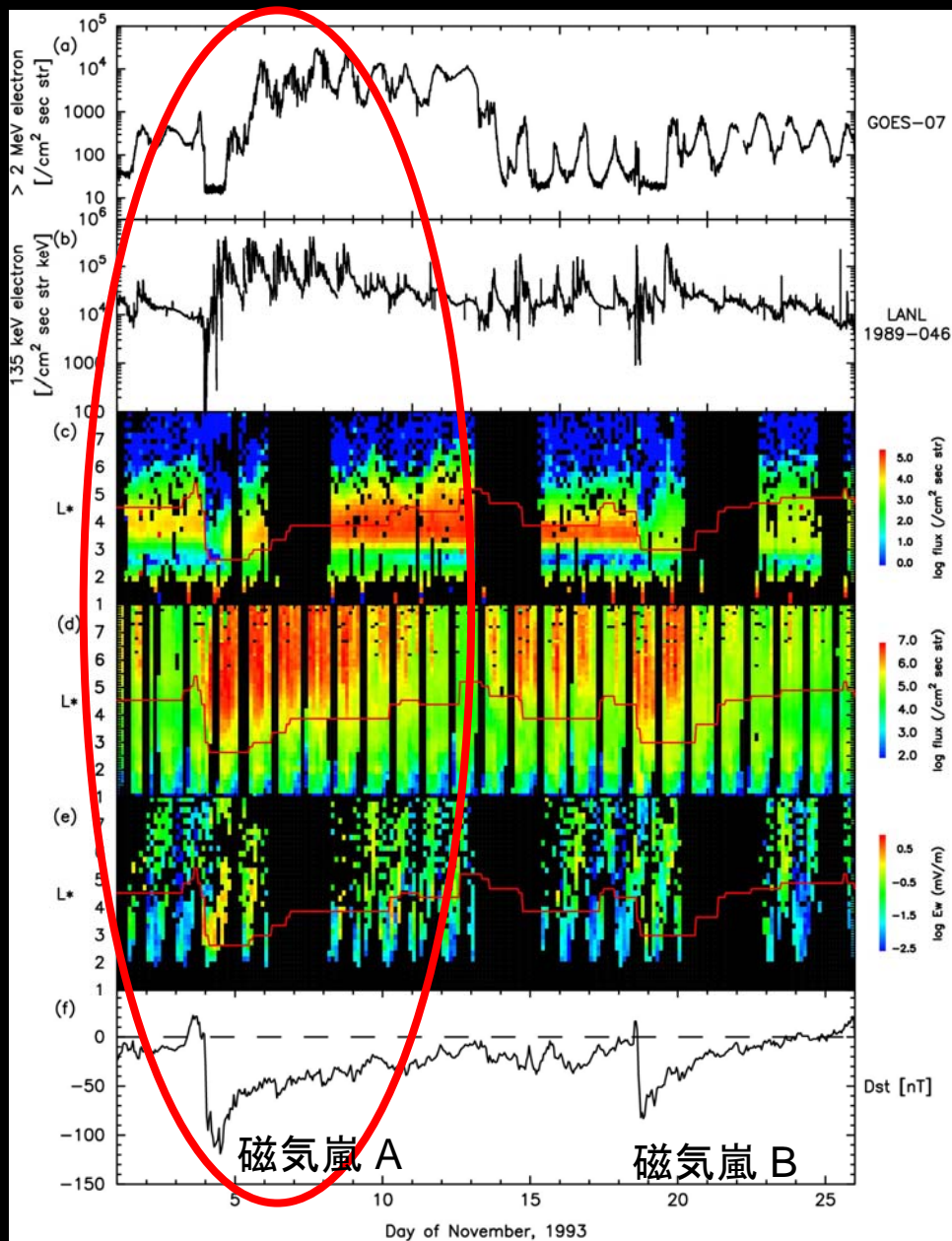
2MeV電子
@L=6.6

100keV電子
@L=6.6

2.5MeV電子

30-100 keV電子

ホイッスラー波動



2MeV電子
@L=6.6

100keV電子
@L=6.6

2.5MeV電子

30-100 keV電子

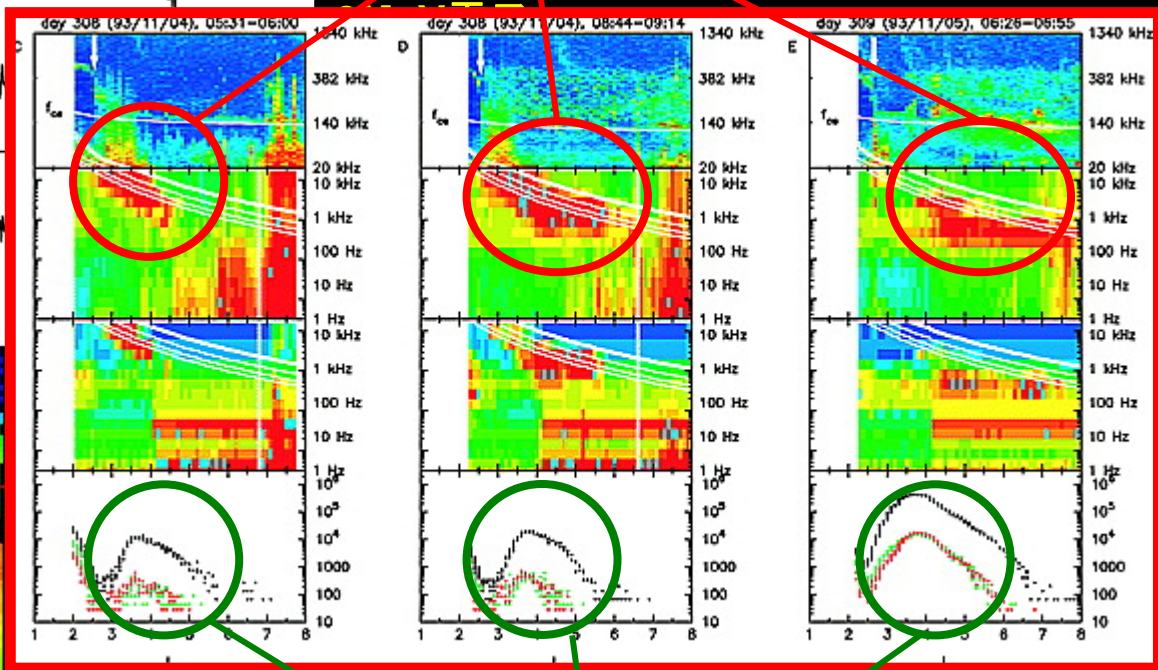
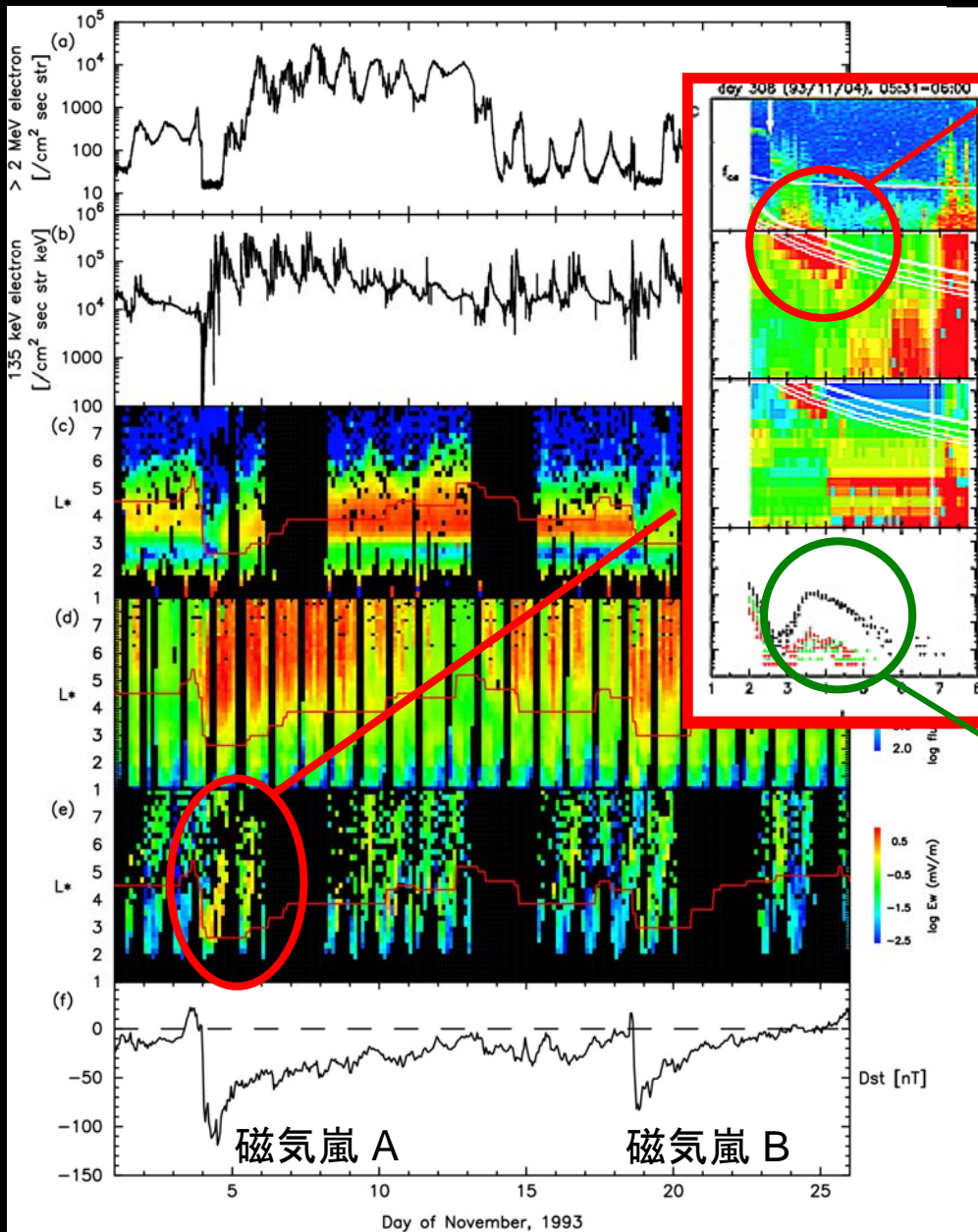
ホイッスラー波動

- ・プラズマシートから
30-100 keV電子の
連続注入

- ・ホイッスラーの励起

放射線帯の増大

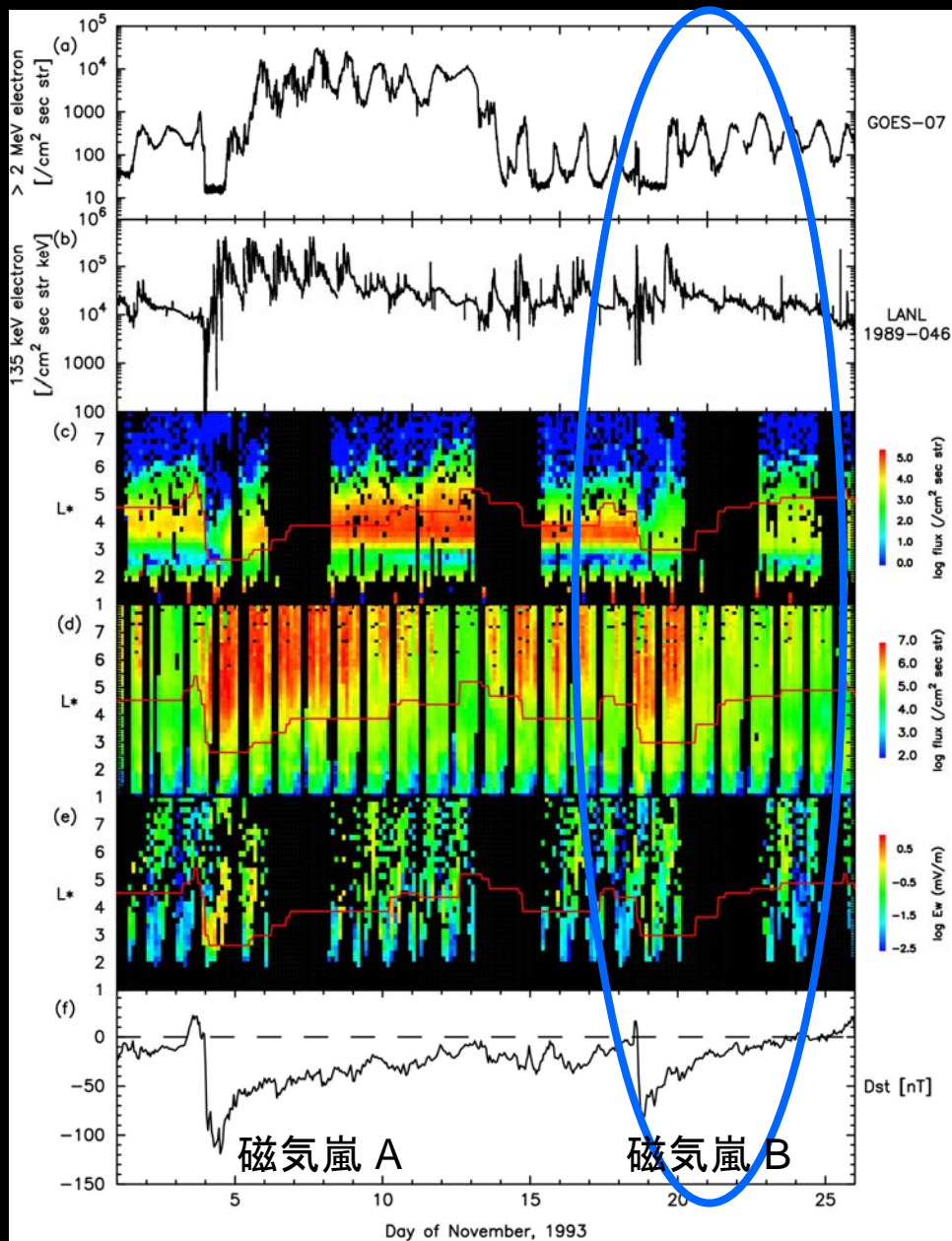
plasmopauseの外にコーラス波動



ホイッスラー波動

放射線帯外帯の再形成

Miyoshi et al. [2007]



2MeV電子
@L=6.6

100keV電子
@L=6.6

2.5MeV電子

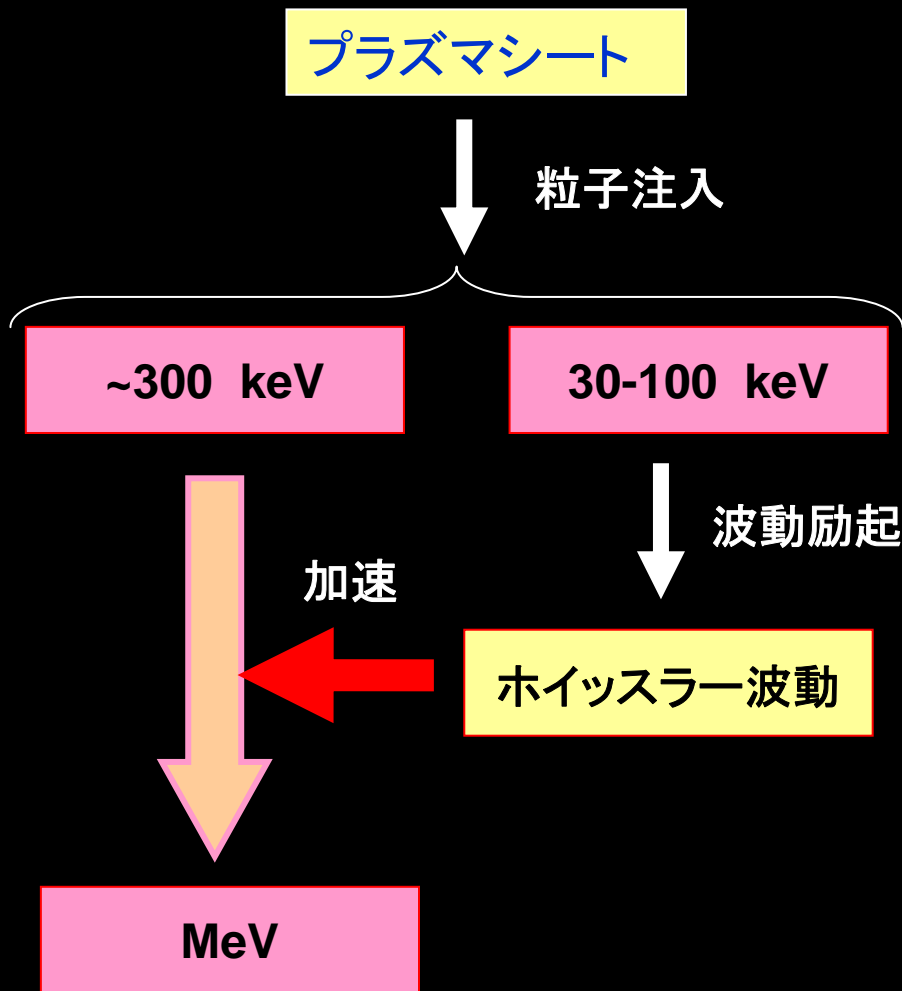
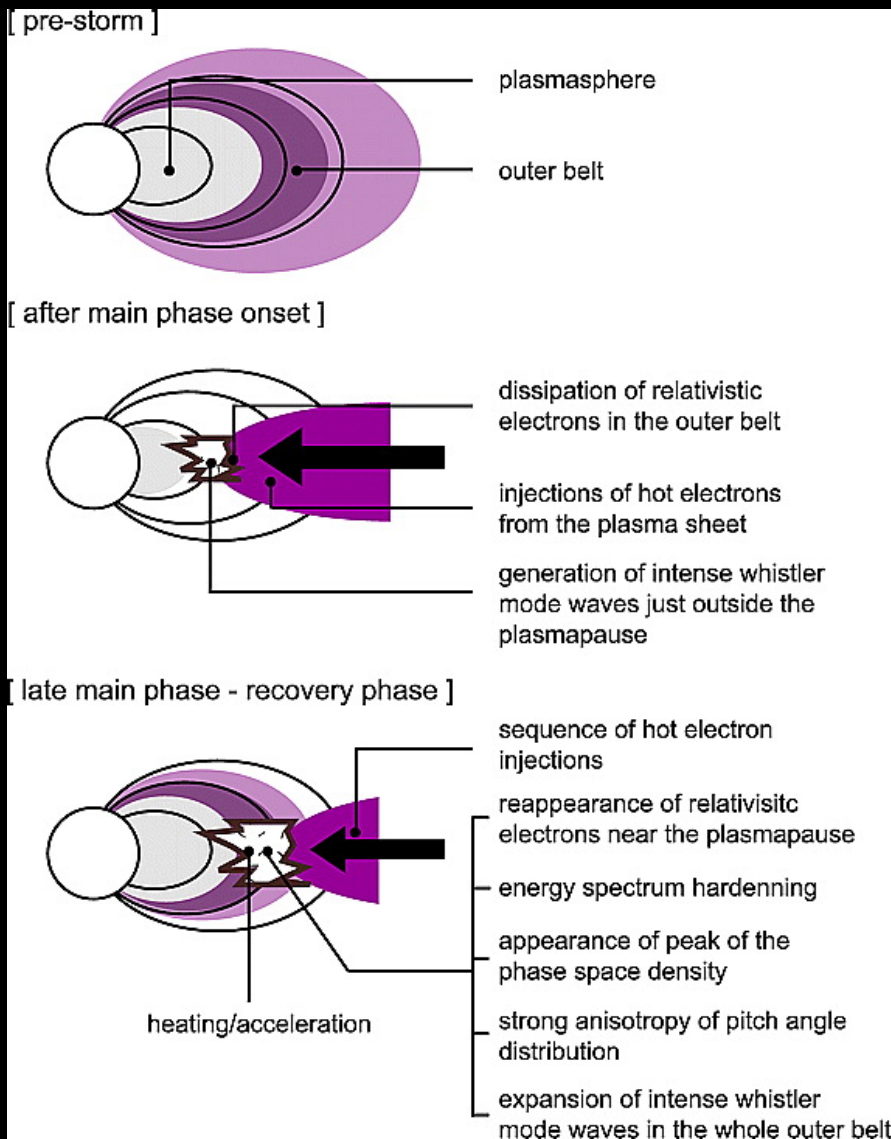
30-100 keV電子

ホイッスラー波動

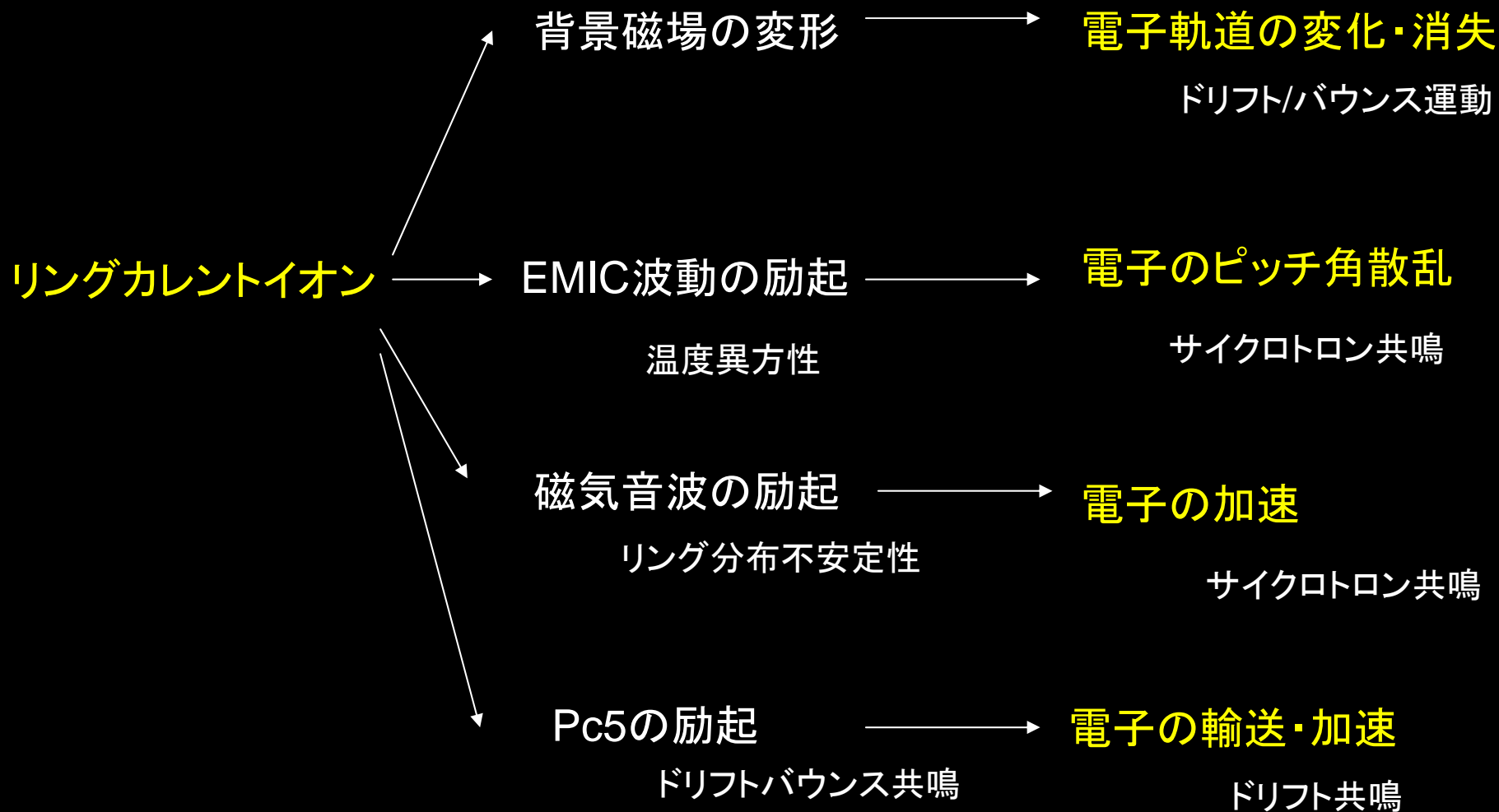
- ・プラズマシートからの粒子注入がない
- ・ホイッスラー波動は励起しない

放射線帯は増大しない

波動粒子相互作用による相対論的電子の非断熱加速



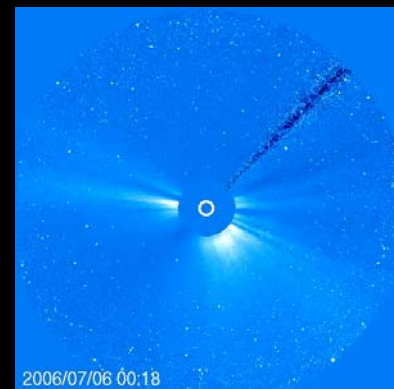
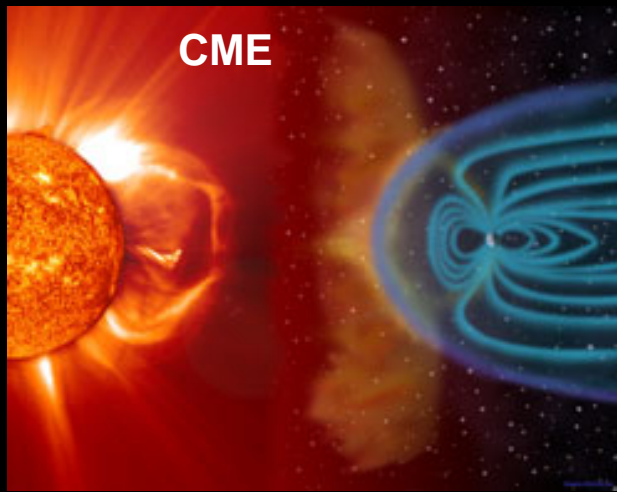
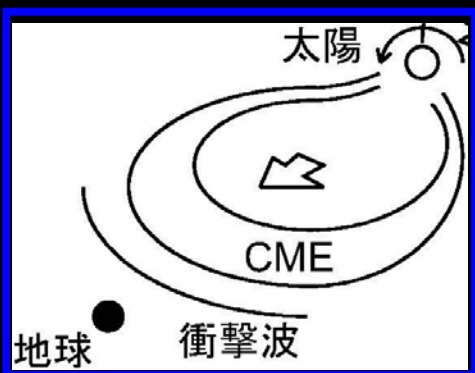
リングカレントイオンが放射線帯電子に与える影響



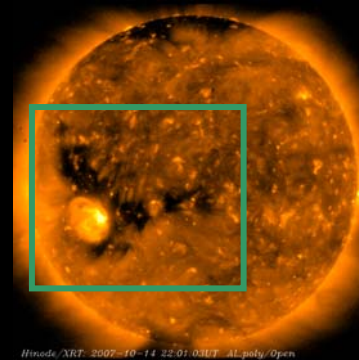
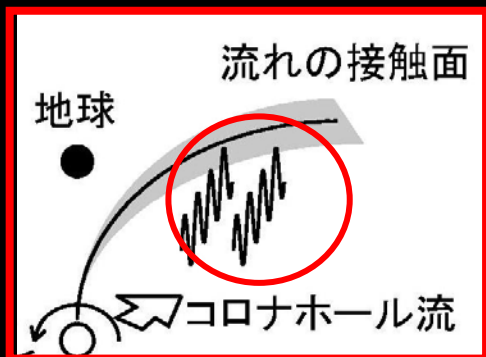
3. 放射線帯はいつ増えるのか？

磁気嵐を起こす太陽風大規模構造 => 強い南向き磁場が必要

CME



CIR

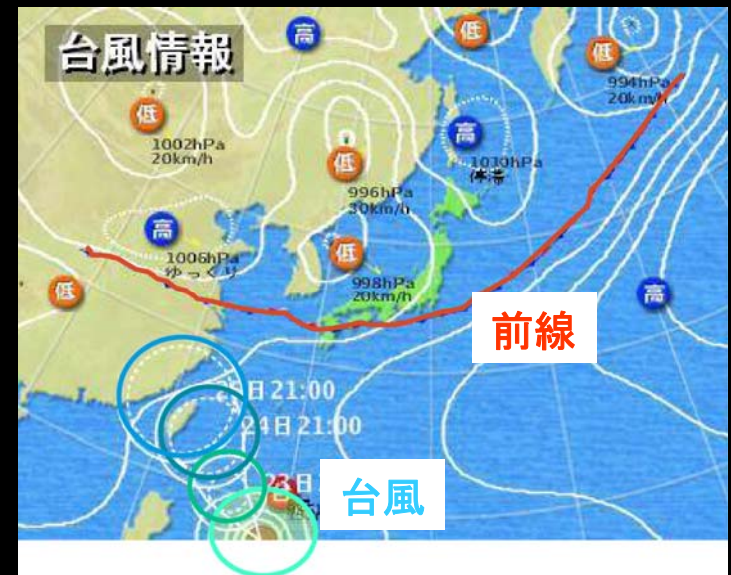
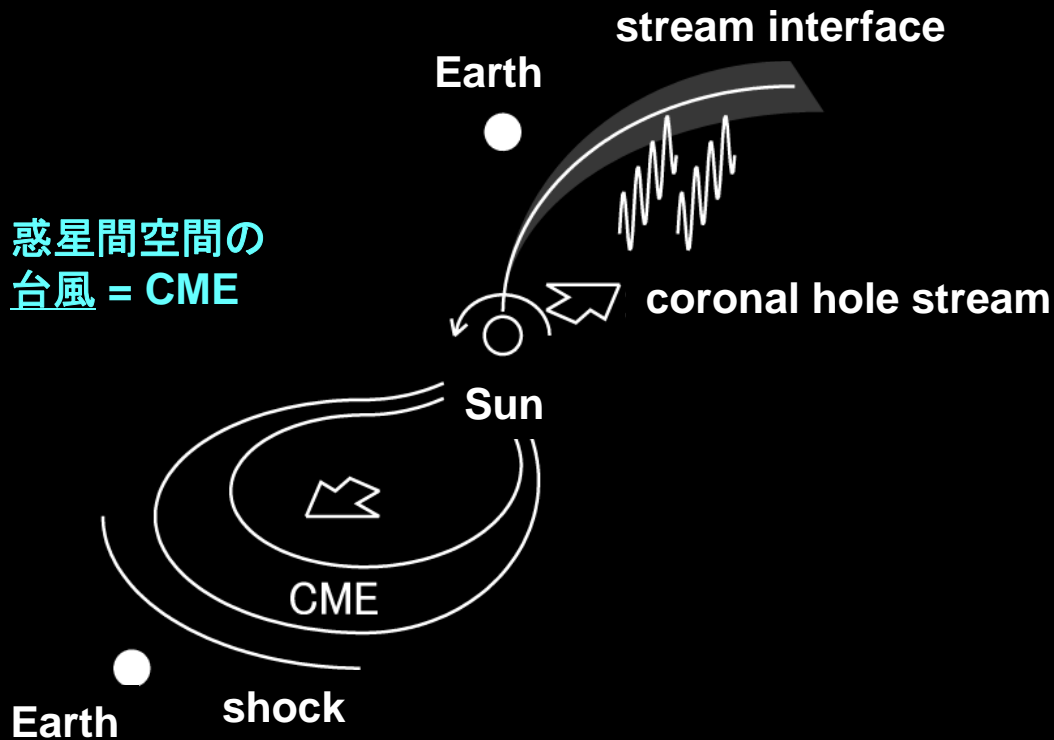


(ひので画像)

Kataoka and Miyoshi, 2006

大規模構造として考える・・・宇宙の天気図

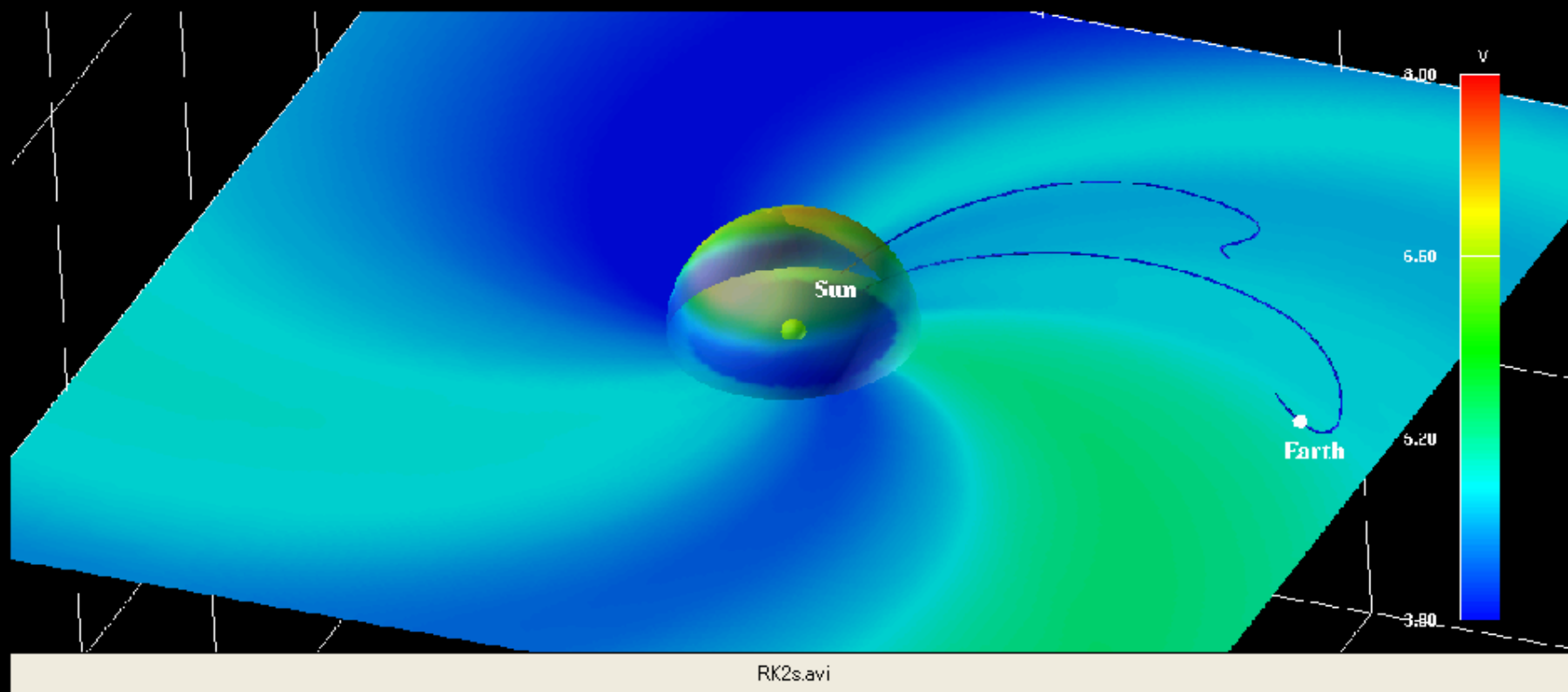
惑星間空間の 寒冷前線 = CIR



Air Mass climatology in Space(気団)のconcept

– (McPherron and Siscoe, *Space Weather*, 2004)

大規模構造として考える・・・宇宙の天気図



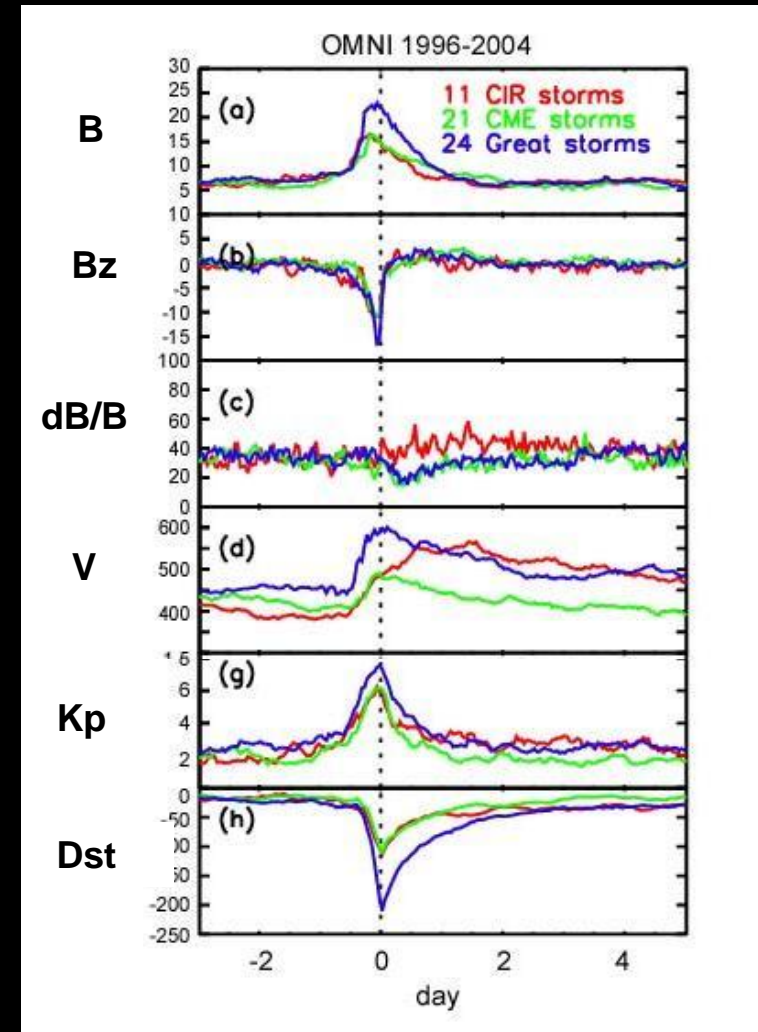
Courtesy of 片岡さん

* CME storm –

Dst minimumで、速度は最大
recovery phaseで、Dstはゆっくり減衰

* CIR storm --

recovery phaseで、CHSが出現
Alfven waveが卓越
recovery phaseで、substormを駆動
Dstも低い値を維持



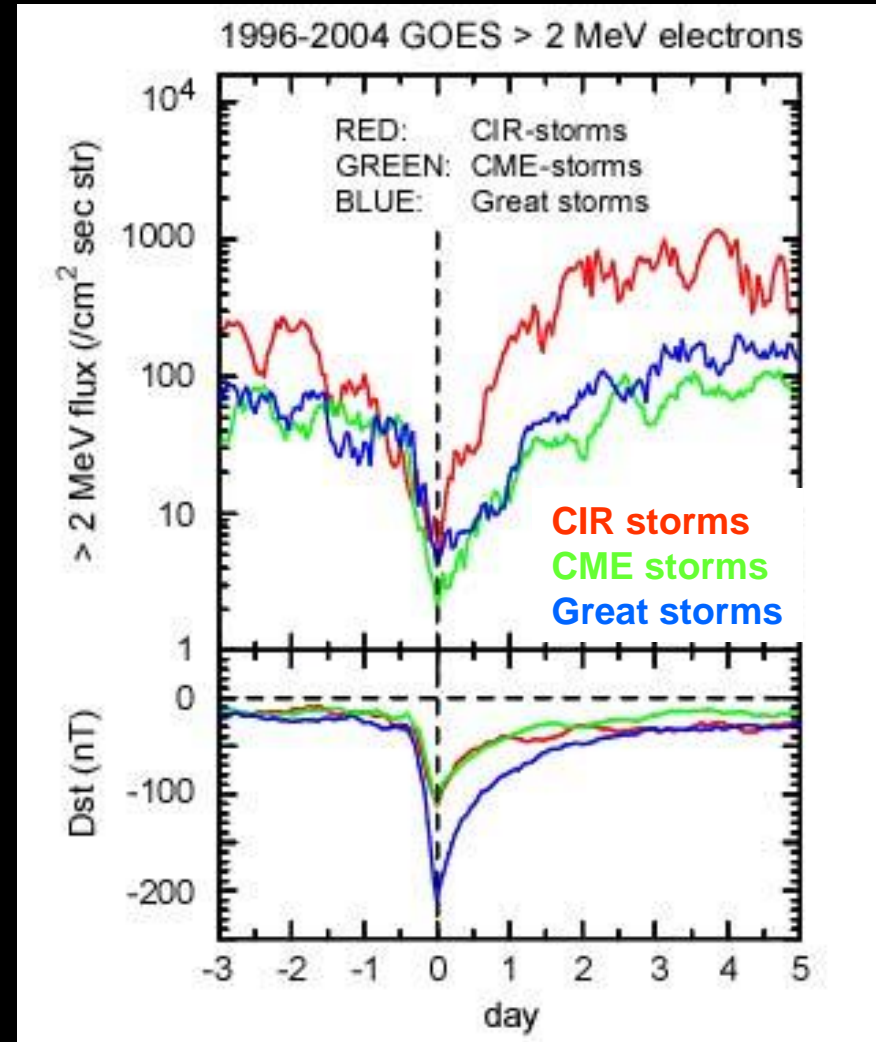
静止軌道では...

CIR-stormが、
 もっとも大きなfluxの増大を引き起こす
 (80%以上の磁気嵐で増加する)

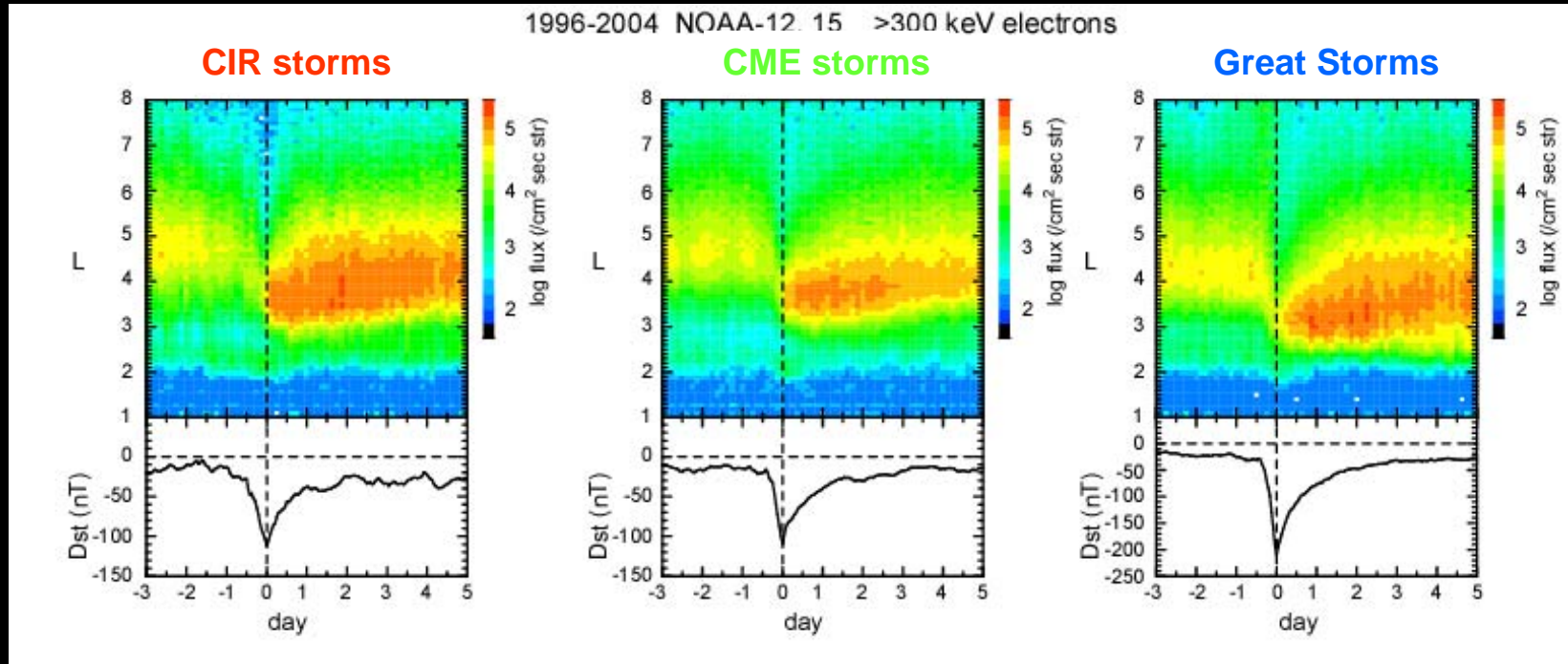
CME-stormは、
 放射線帯外帯増大にはsecondary
 (増加する磁気嵐は40%程度)

fluxの増大は、
 minimum Dstの大きさとは関係しない

GOES > 2 MeV electron



NOAA > 300 keV electron



Miyoshi and Kataoka, 2005

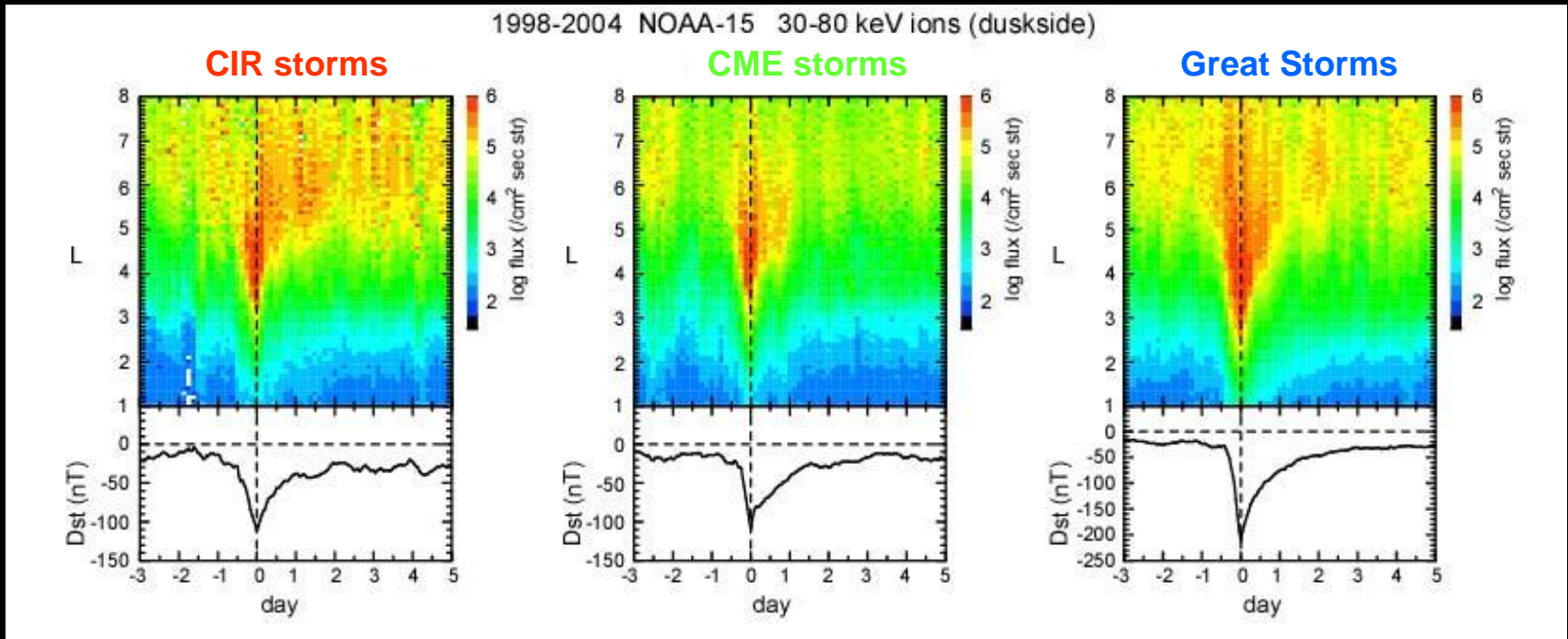
外側 (L > 3.5) - CIR-stormが、もっとも大きなfluxの増大を引き起こす

内側 (L < 3.5) - CME-driven great stormが、
 もっとも大きなfluxの増大を引き起こす

外帯が内側にシフトする

放射線帯増大にeffectiveな太陽風構造は、放射線帯の領域で異なる。
 内側のフラックス増大は、minimum Dstに依存する。

NOAA 30-80 keV ions (dusk-side)



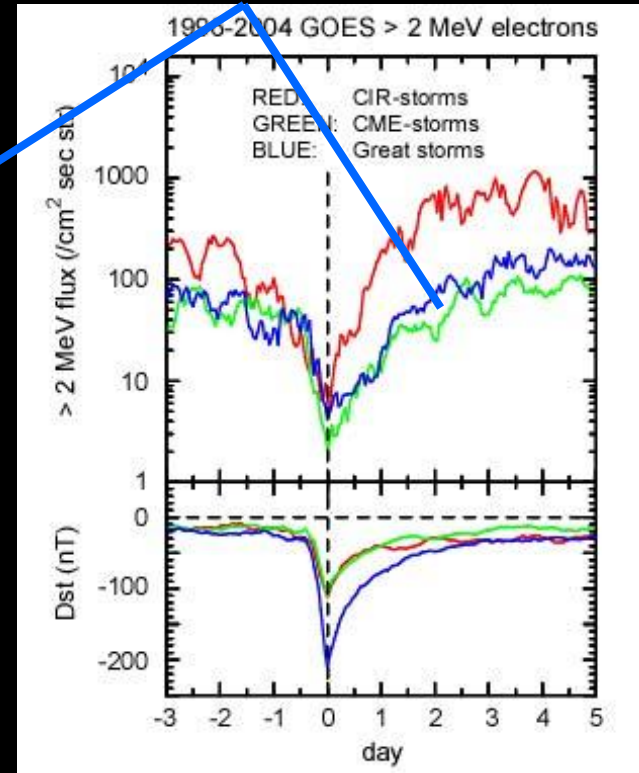
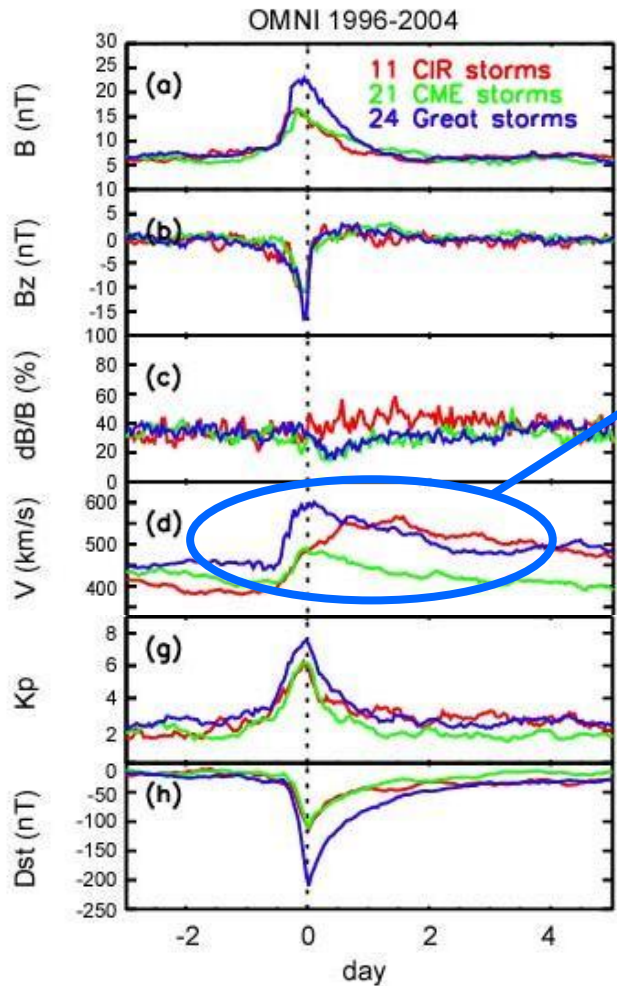
Miyoshi and Kataoka, 2005

CIR-stormとCME-stormでは、主相のフラックス、空間変動は、ほぼ同じ。
 CME-driven great stormが、もっとも大きなfluxの増大を引き起こす。
 ring currentの内側境界が地球側に接近する。

CIR-stormはrecovery phaseにおいて、連続して粒子注入が起こり、
 recovery phaseは、数日に渡って持続する。

CME磁気嵐とCIR磁気嵐 (太陽風構造と放射線帯)

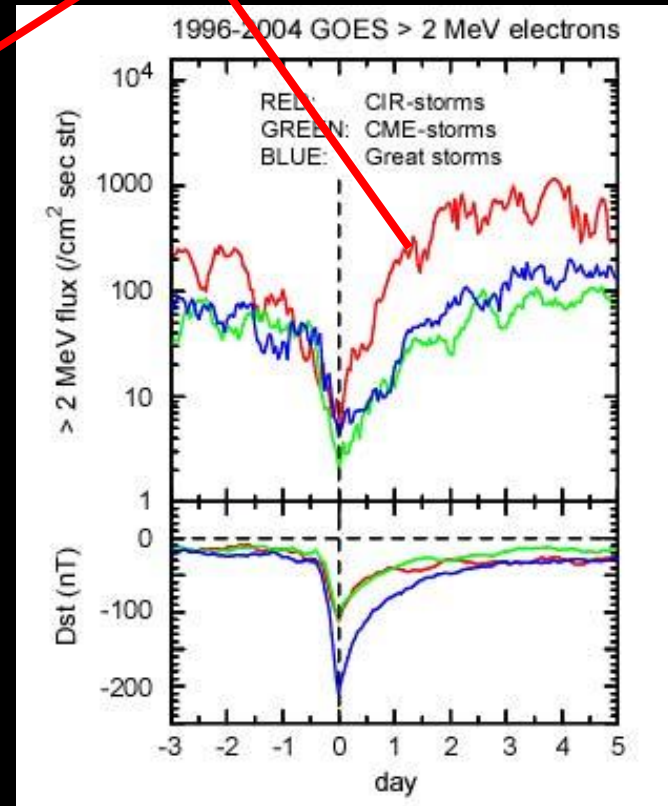
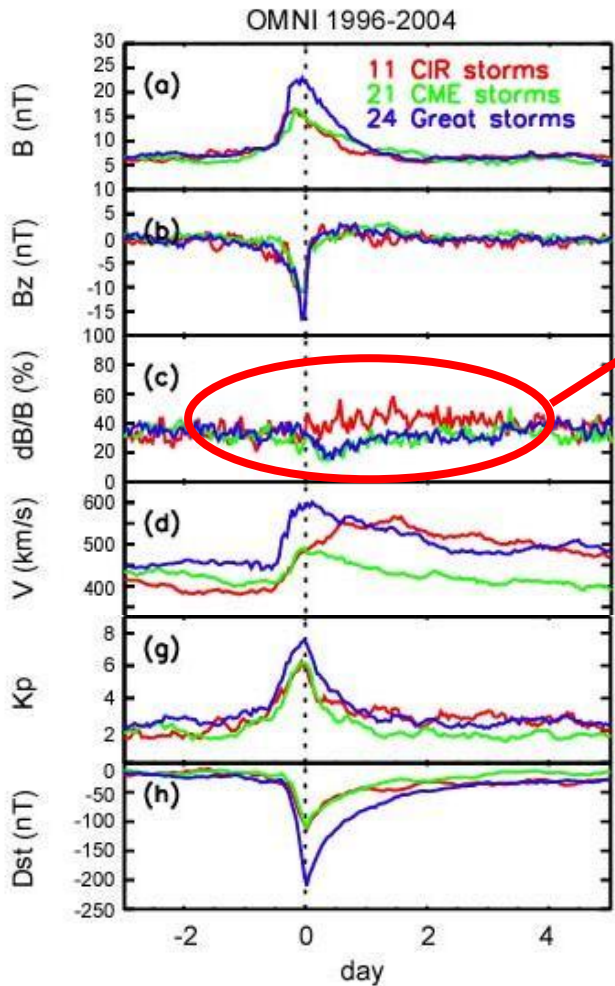
CME磁気嵐の太陽風速度が速い
放射線帯は増加していない



CME磁気嵐では、外帯は十分に
発達しない

太陽風速度のみでは、外帯の発達には不十分

CIR磁気嵐のrecovery phaseで、
Alfven wave構造が発達



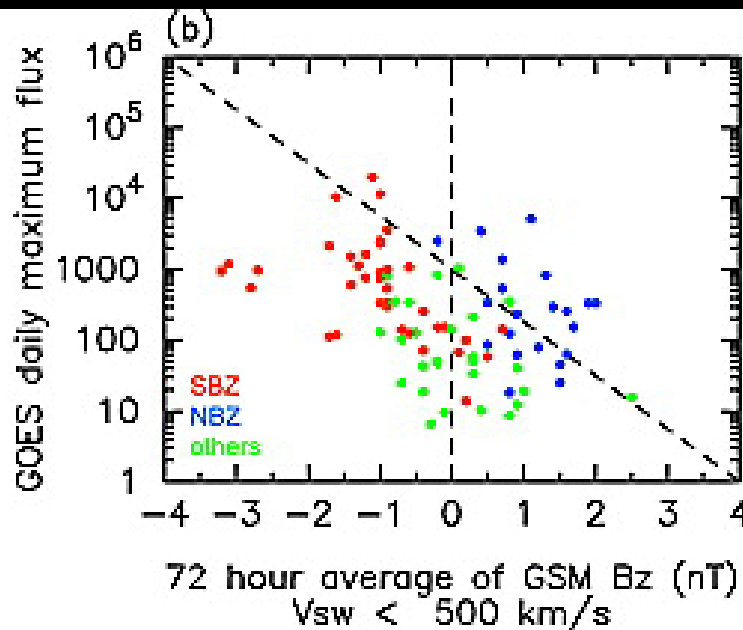
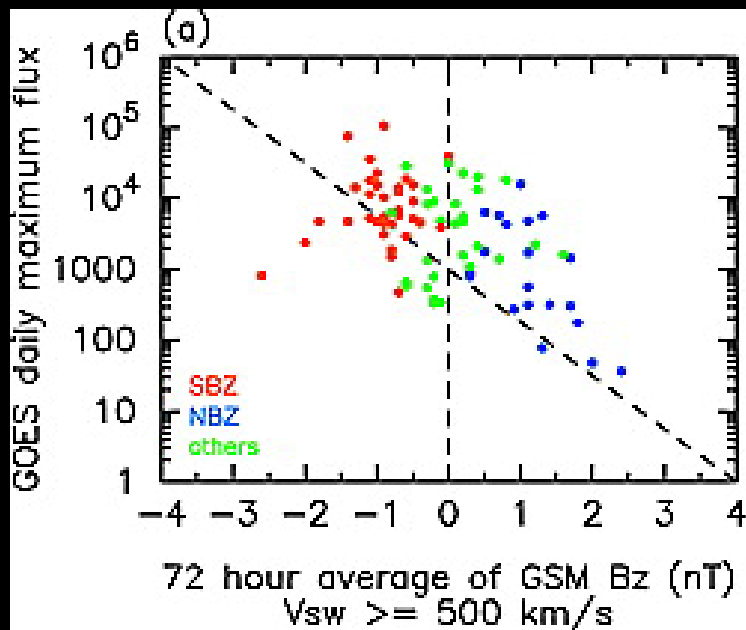
このとき、外帯は大きく発達する。
コロナホール流中のAlfven waveが、
外帯の発達に重要

コロナホール高速風+IMF Bzの重要性

$V_{sw} > 500$ km/s

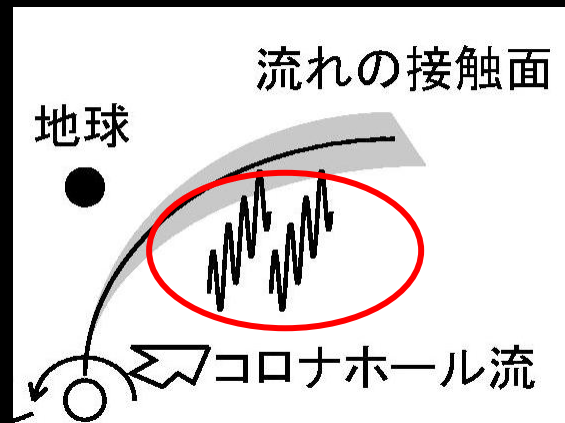
$V_{sw} < 500$ km/s

静止軌道のMeV電子



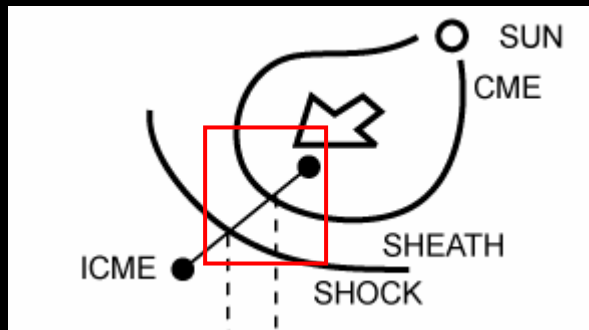
コロナホール流中の磁場強度

Miyoshi and Kataoka, 2008



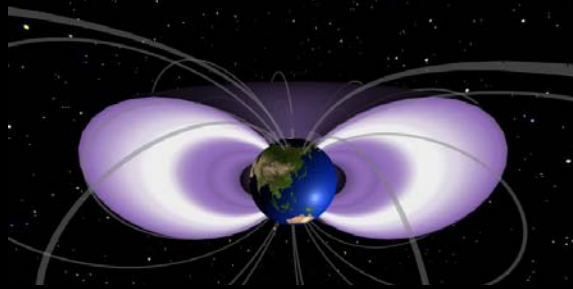
このfluctuationのもつ磁場が、
外帯の増加に本質的

CME - 大きな磁気嵐を作る



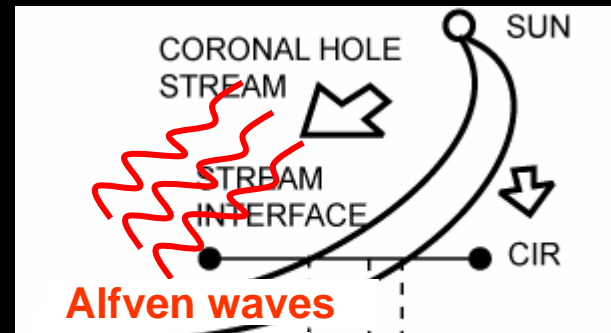
sheath/MCの
電場が主相を駆動

リングカレント粒子を地球に
近いところに注入



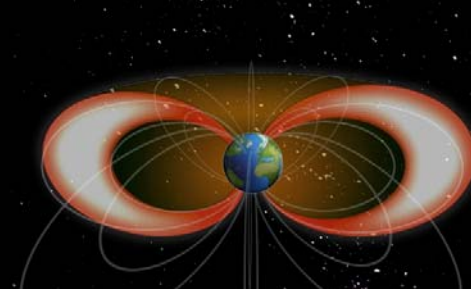
リングカレントが発達する

CIR - 外帯を大きく発達させる



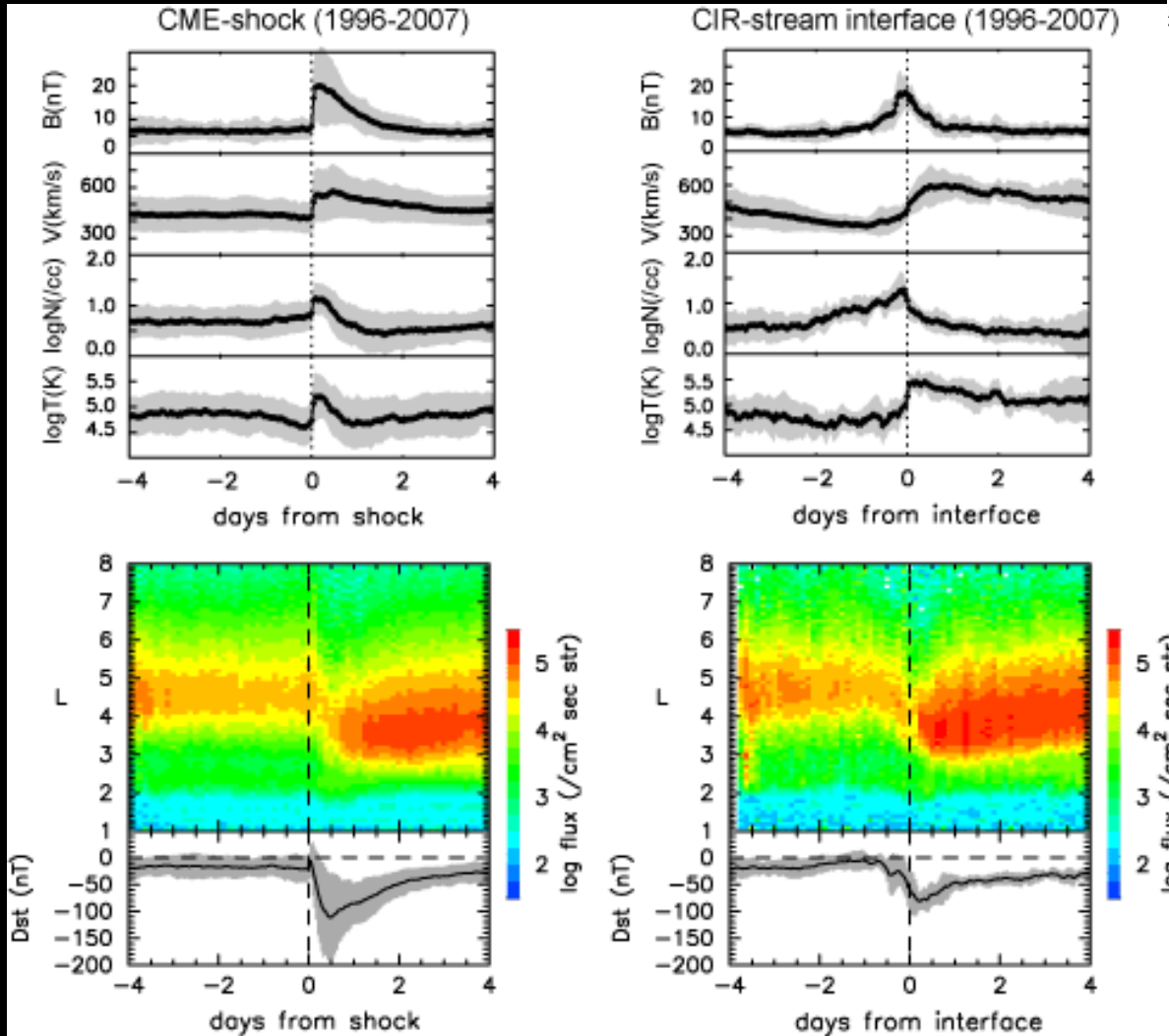
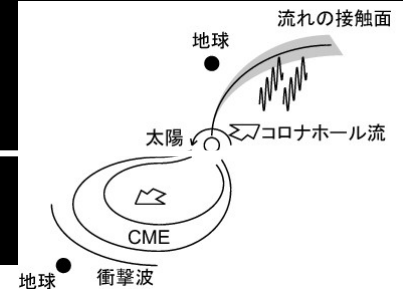
CHS中の
Alfvén waveが外帯発達を駆動

数日にわたって、
持続した粒子注入を起こす



放射線帯が発達する

太陽風構造依存性



Kataoka and Miyoshi (2006), updated

インターネットでの週間予報の発信

JAPANESE VERSION - Housou Bunka Foundation Space Weather Forecast - Microsoft Internet Explorer

アドレス http://hbksw1.stelab.nagoya-u.ac.jp/cgi-bin/wiki3_6_2/wiki.cgi?page=JAPANESE+VERSION

詐欺サイトの監視がオンです

Contents

- ENGLISH VERSION
- JAPANESE VERSION

Link

Radiation Belt Models

- NOAA/SEC
- NASA/GSFC
- UC/LASP
- JAXA/SEES
- NICT

Space Weather Info

- NOAA/SEC
- SpaceWeather.com
- Solar Monitor

Space Wx Info Japan

- NICT1
- NICT2

Real Time Data

- HINODE
- STEL/IPS
- STEREO
- STEREO SW
- SOHO
- SOHO/PM
- ACE
- GOES Particle
- GOES M
- Dst Inde

更新記録

2007年05月12日 日本語版テスト運用開始。
2007年09月20日 英語版の開設。宇宙天気メーターver0を設置。
2007年10月13日 新聞やラジオ番組で紹介されました。日本語サイト構成変更。
2007年11月01日 アジア太平洋地域宇宙機関会議(APRSAX)のWebサイトで紹介されました。
2008年01月10日 「子供の科学」(誠文堂新光社)の「GoGo! ミルボ」で紹介されました。
2008年02月25日 Wiki運用開始。
2008年04月14日 予報信頼度をA,B,C,Xで表示。

週間予報

2008年04月21日(月)10時00分(日本時間)更新

今日	明日	2日後	3日後	4日後	5日後
					
40%	20%	60%	60%	60%	70%
/	C	C	C	A	A

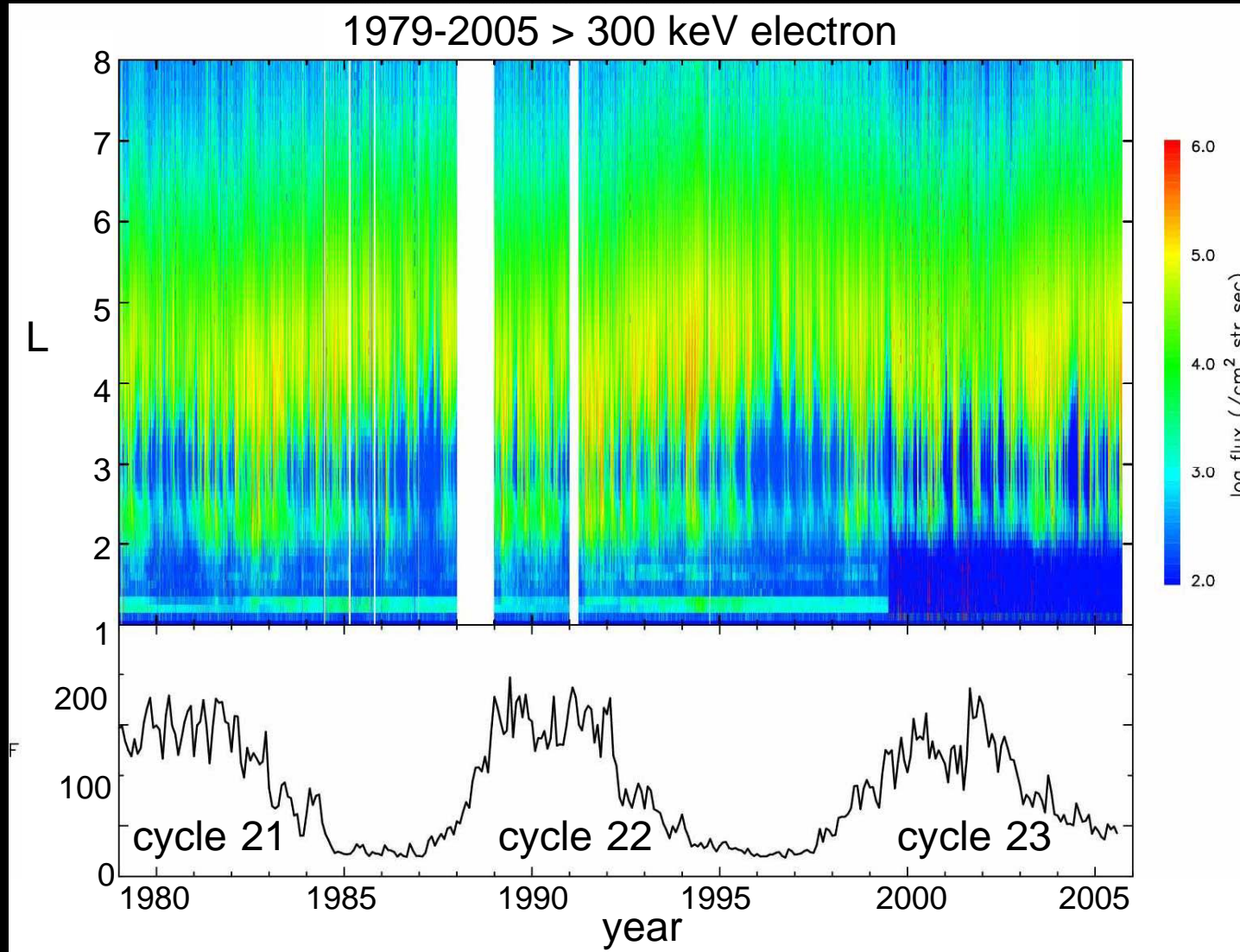
今回の流れの接触面の通過:2008年04月17日(木) 現在4日目
次回の流れの接触面通過の予想:2008年04月21日(月)-04月22日(火)
特記事項:(予報当番:片岡)

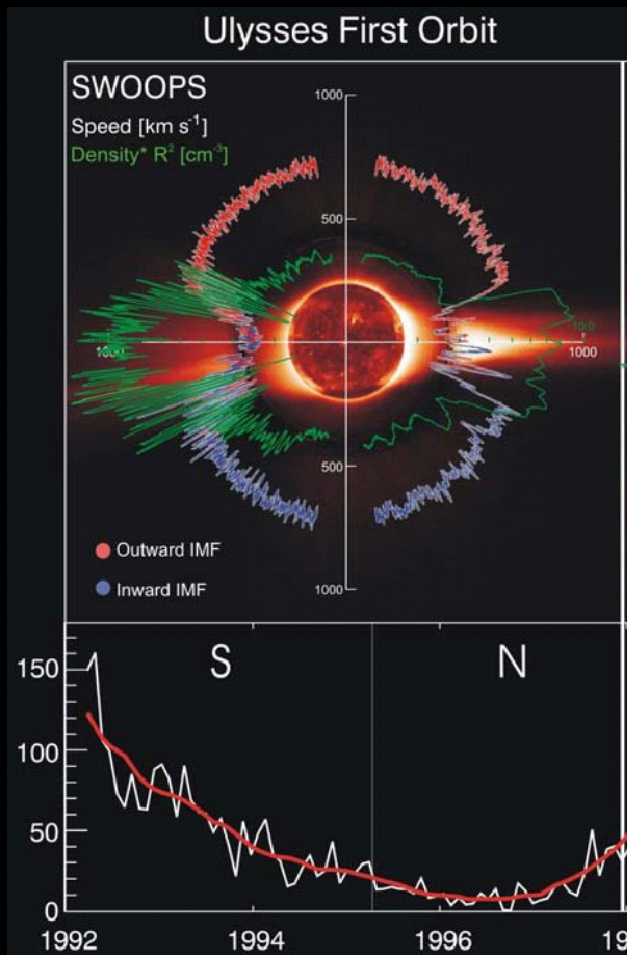
宇宙天気メーター(Ver.0)

<http://hbksw1.stelab.nagoya-u.ac.jp>

17:46

太陽活動周期の変動との対応

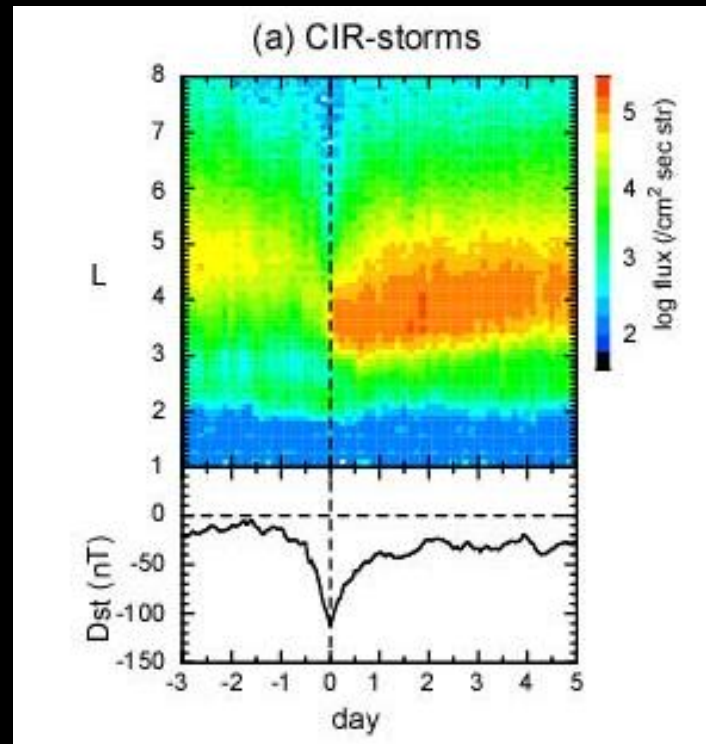


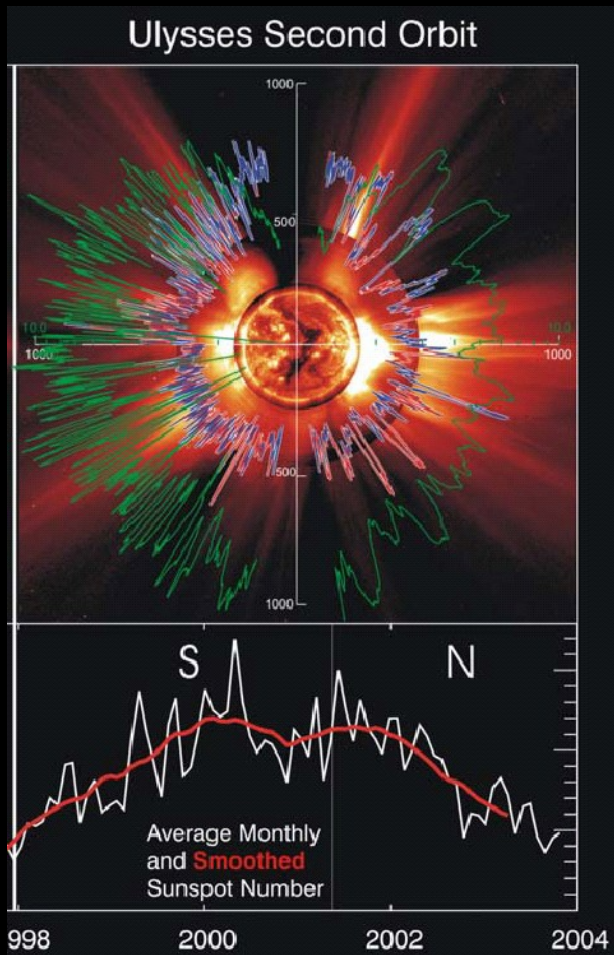


Zhang et al. [2005]

solar- declining phase ~ minimum

CIR磁気嵐が増加= 放射線帯外側が発達
 外帯が大きく成長する

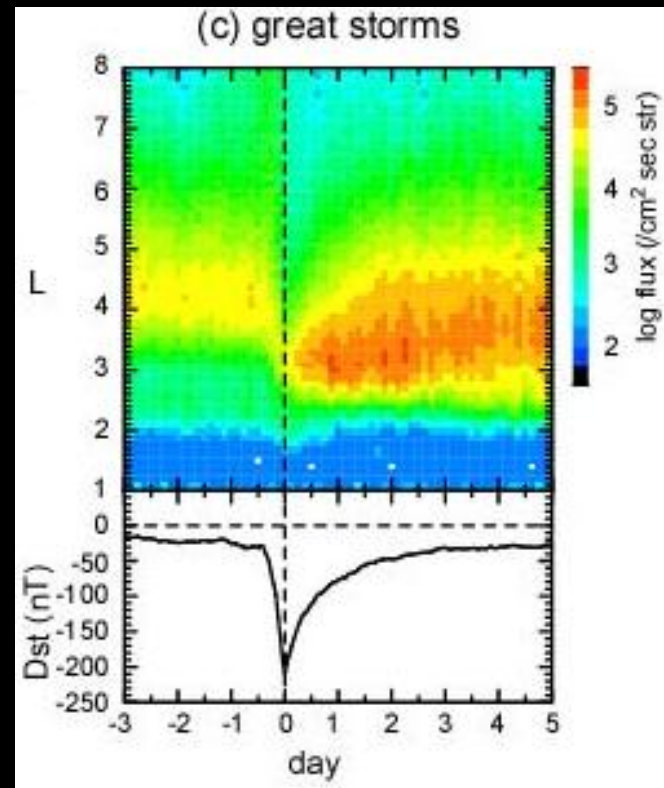


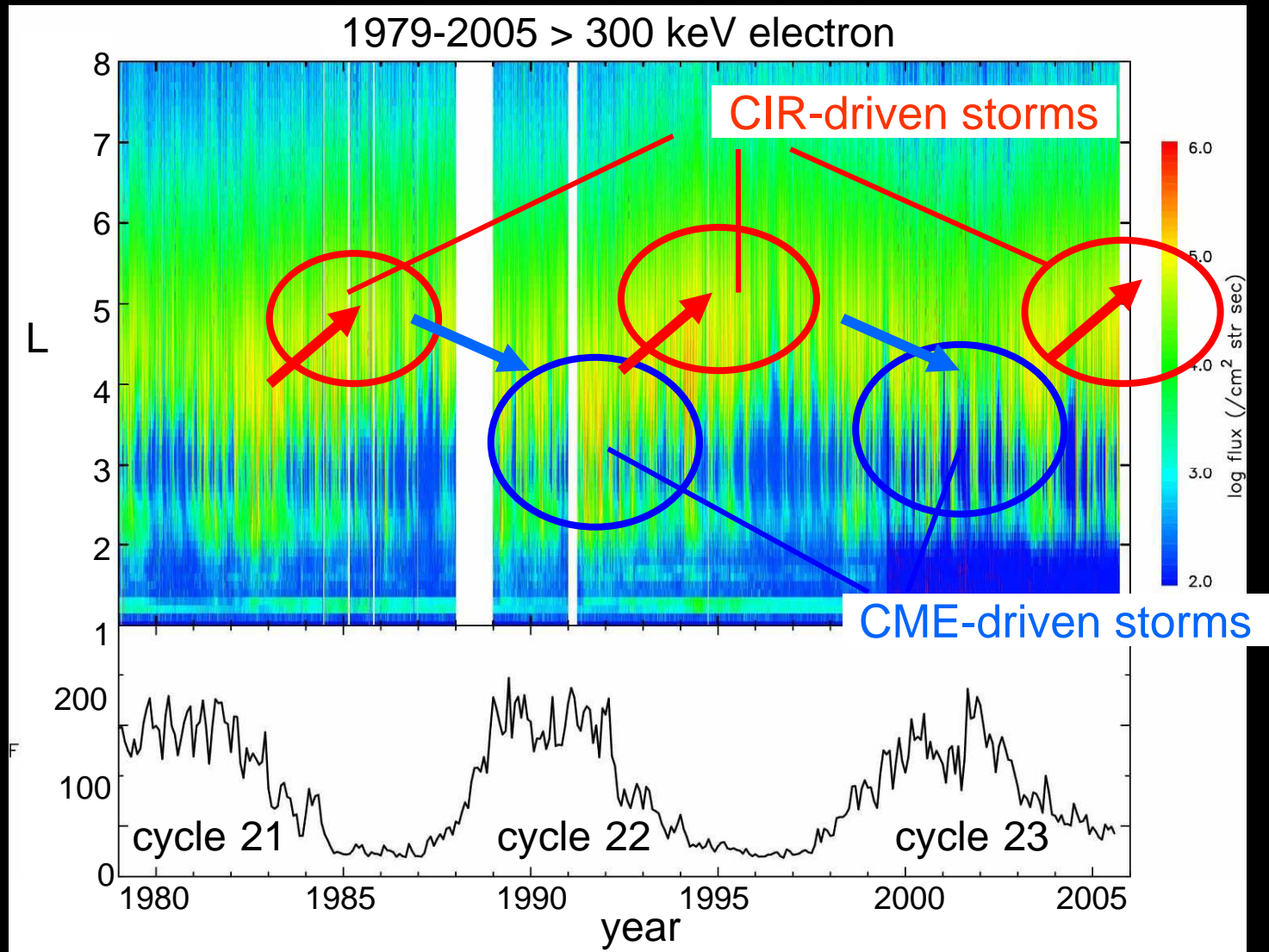


Zhang et al. [2005]

solar-maximum

CME磁気嵐が増加 = 放射線帯内側が発達





太陽活動におけるstorm-driver sourceの違いが、
放射線帯の長期変動を作りだしている。

Miyoshi et al. [2004]

粒子の輸送・加速モードの実態は何か？

Fokker-Plank方程式 (stochasticとして考える):

放射線帯粒子の輸送に注目すると、

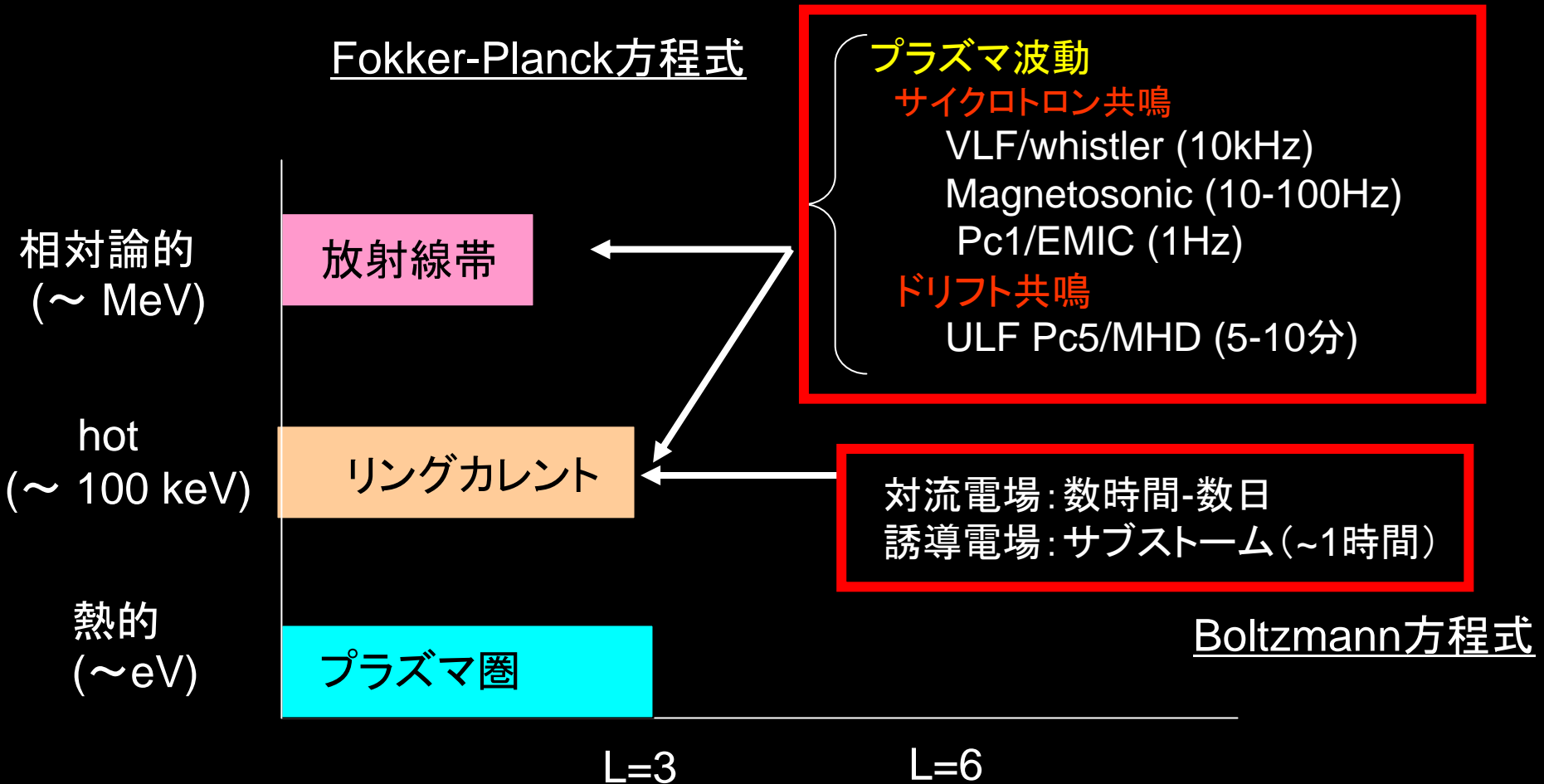
第一、第二不変量は保存、第三不変量のみ破れる

Boltzmann + Fokker-Plank方程式:

異なる時間スケールの現象、異なるエネルギーの粒子を解く

プラズマ波動の介在する現象は、Fokker-Plankで記述

内部磁気圏の場・波動の階層構造



ポイント

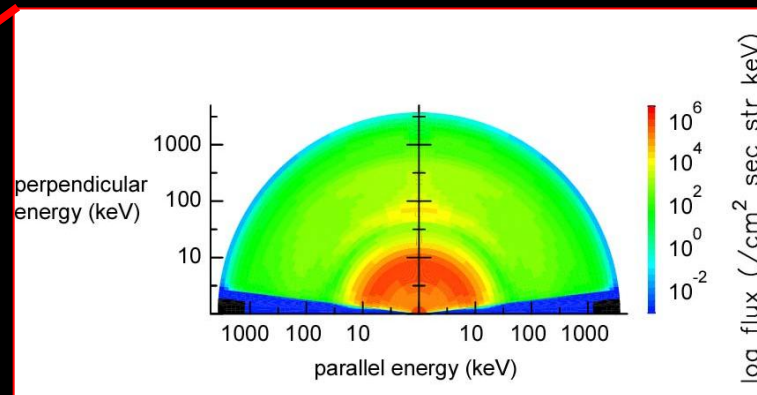
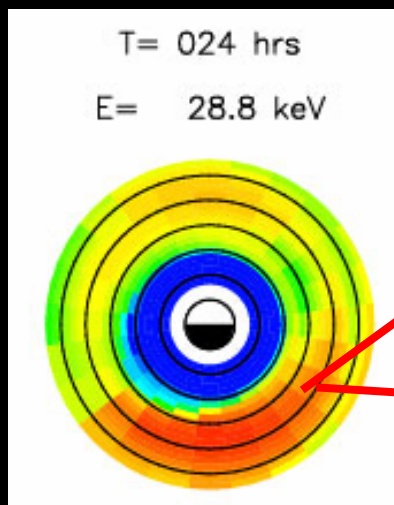
$$\underbrace{\frac{\partial f}{\partial t} + v \cdot \nabla f + \frac{q}{m} (E + v \times B)}_{\text{輸送}} = L^2 \frac{\partial}{\partial L} \left(\frac{D_{LL}}{L^2} \frac{\partial f}{\partial L} \right) + \underbrace{\text{Source}}_{\text{内部加速}} - \underbrace{\sum_i \frac{f}{\tau_i}}_{\text{ロス}}$$

- * 粒子の輸送による加速過程 ... 磁気圏大規模電場、ULF pulsation
- * 波動を介在させた加速過程、消失過程
... 異なるエネルギー、領域起源のプラズマとの相互作用

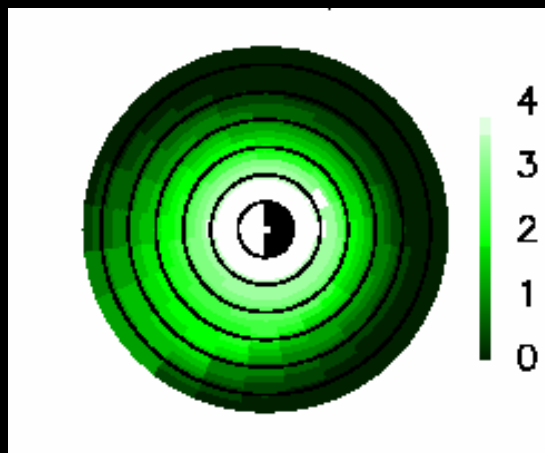
エネルギー階層であり、
エネルギーによってダイナミクスが異なるので分布関数として扱う必要がある。

Boltzmann方程式による記述

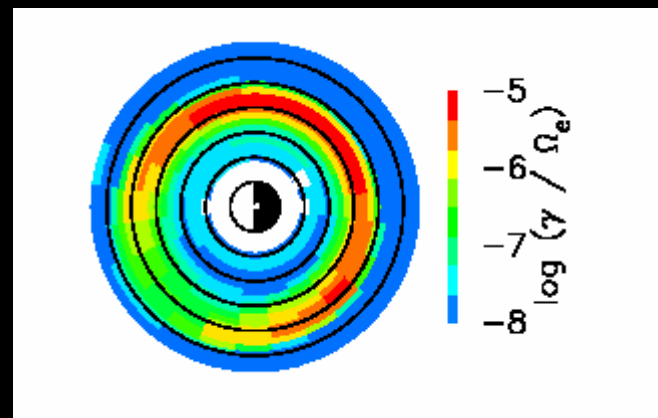
粒子の分布関数を計算 (500eV-5MeV)



cold plasmaの分布を計算



ホイッスラー波動の分布を計算



4. むすびにかえて

粒子の輸送・加速モードの実態は何か？

Fokker-Plank方程式 (stochasticとして考える):

放射線帯粒子の輸送に注目すると、

第一、第二不変量は保存、第三不変量のみ破れる

Boltzmann + Fokker-Plank方程式:

異なる時間スケールの現象、異なるエネルギーの粒子を解く

プラズマ波動の介在する現象は、Fokker-Plankで記述

$$\frac{Df}{Dt} = L^2 \frac{\partial}{\partial L} \left(\frac{D_{LL}}{L^2} \frac{\partial f}{\partial L} \right) + \frac{1}{\sin \alpha} \frac{\partial}{\partial \alpha} \left(D_{\alpha\alpha} \sin \alpha \frac{\partial f}{\partial \alpha} \right) + etc ...$$

radial diffusion

波動粒子相互作用

プラズマ波動の介在する現象 -- ULF波動によるradial diffusion
 VLF波動によるサイクロトロン共鳴
 → Fokker-Planck型の方程式で記述されてきた。
 波動スペクトルの情報、共鳴条件等がDにくりこまれている
 対流電場による輸送 -- ボルツマン方程式

問題意識: ULF/VLFともにstochastic性の保証への疑問

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla f + \frac{q}{m} (\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot \nabla f = etc ...$$

DCから高周波数プラズマ波動との相互作用まで右辺にいれる

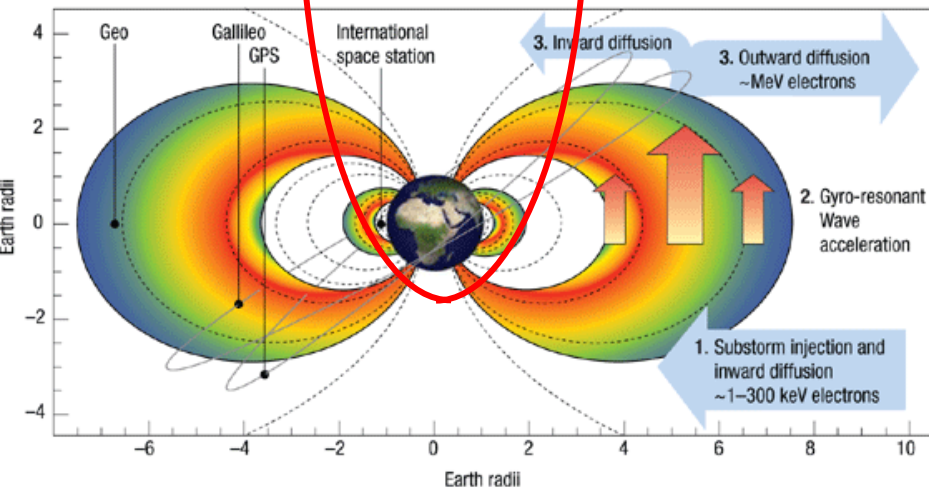
4. むすびにかえて

現状の観測の問題点

- 提案されている多くのメカニズムが、赤道面での相互作用を想定しているのに、赤道面で何が起きているのかわからない
- phase space densityのradial profileの観測例が少ない・不確定
 - 赤道面での分布関数の観測がない
 - エネルギーのカバーが不十分なので、PSDの導出に限界
 - 信頼できる内部磁気圏の磁場モデルがない

これまでの放射線帯研究の限界：衛星軌道の問題

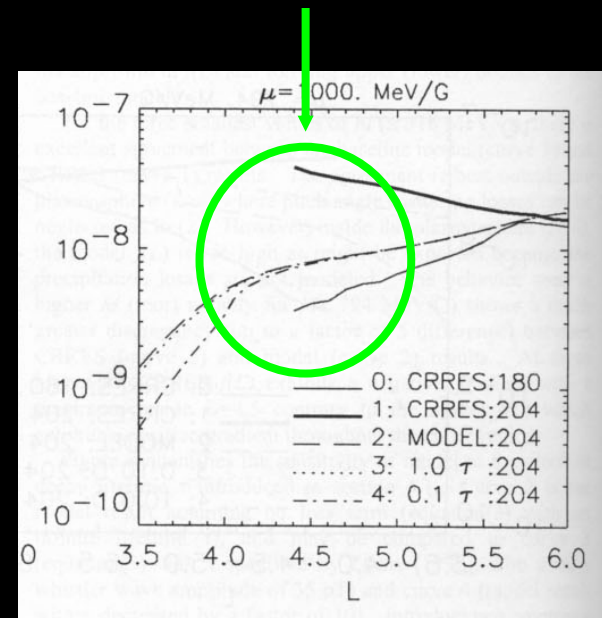
Electron acceleration in the outer radiation belt



赤道面での観測が必須

精度よく測るためには、赤道面での計測が必須。

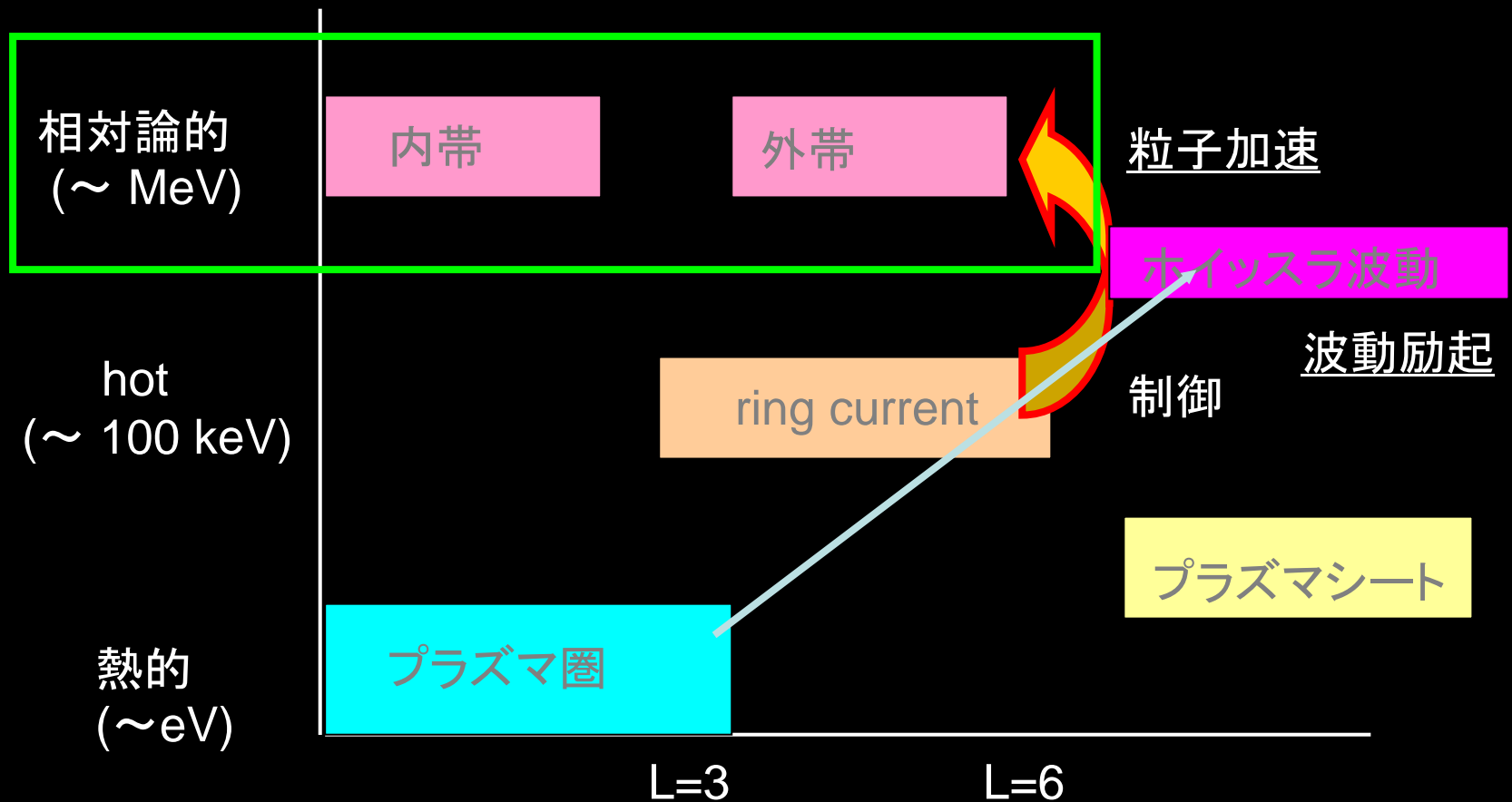
--- CRRES衛星以降、実施されていない。
CRRES衛星は1.5MeVまでしか測っていないために、不完全な観測



現状の観測の問題点

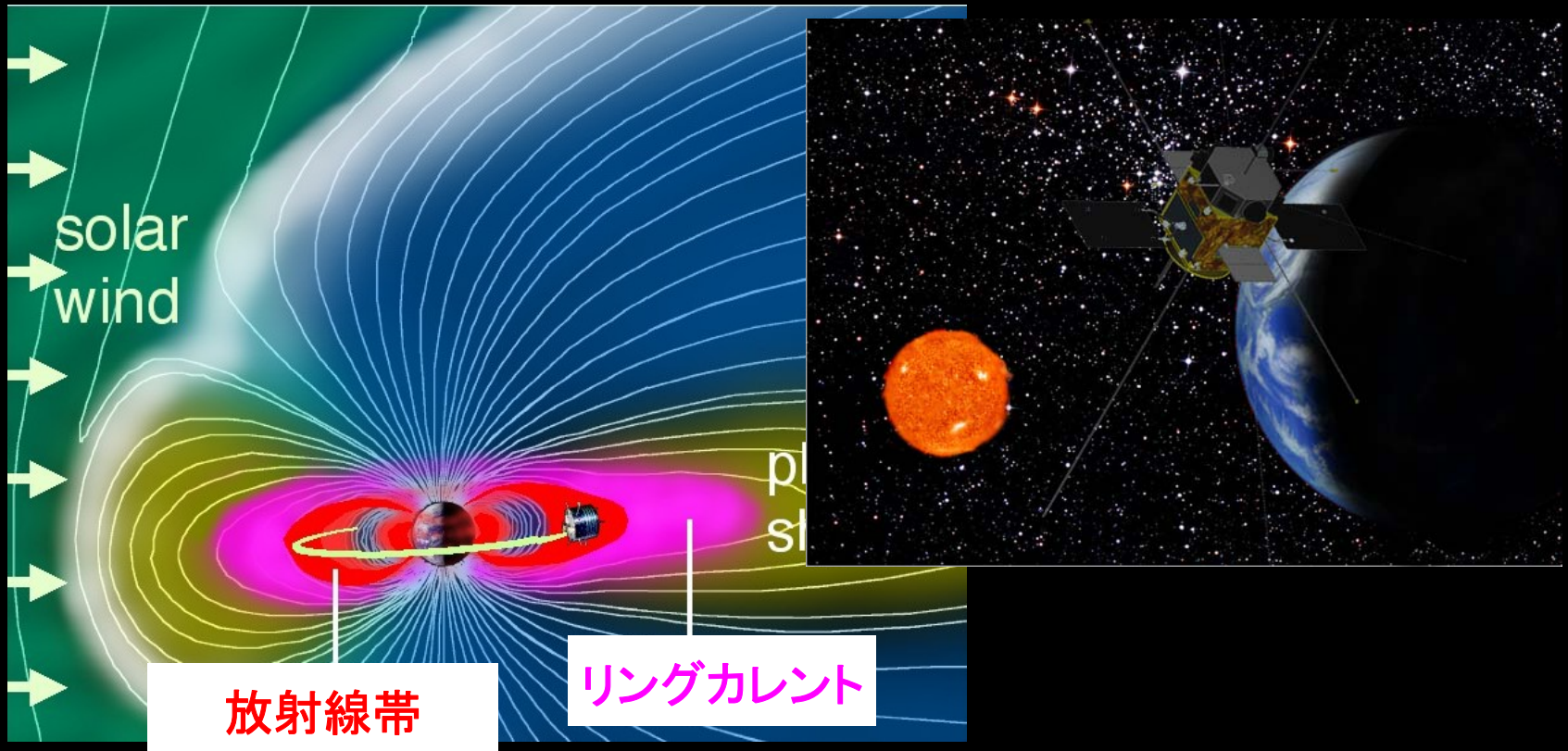
- 提案されている多くのメカニズムが、赤道面での相互作用を想定しているのに、赤道面で何が起きているのかわからない
- phase space densityのradial profileの観測例が少ない・不確定
赤道面での分布関数の観測がない
エネルギーのカバーが不十分なので、PSDの導出に限界
信頼できる内部磁気圏の磁場モデルがない
- 現状の衛星の多くが、相対論的粒子しか計測していない
「場」及び熱的、hot plasmaとの対応がわからない

これまでの放射線帯研究の限界：搭載機器の問題



これまでは、放射線帯粒子しか測っていなかった。
異なるエネルギーや、波動・場の観測が不十分 \rightarrow エネルギー階層間結合がわからない。

ERG (Energization and Radiation in Geospace) 衛星



- ・軌道： 静止軌道遷移軌道 (5-5.5 Re)
- ・粒子計測器： 10eV-20 MeV (電子)、10eV-1MeV(イオン、質量分解)
- ・波動計測器： DC-AC (電場・磁場)

次期太陽活動極大期(2012年度)打ち上げを目指し、プロジェクトを進めています。