

放射線帯の大規模な変化 – その1 –

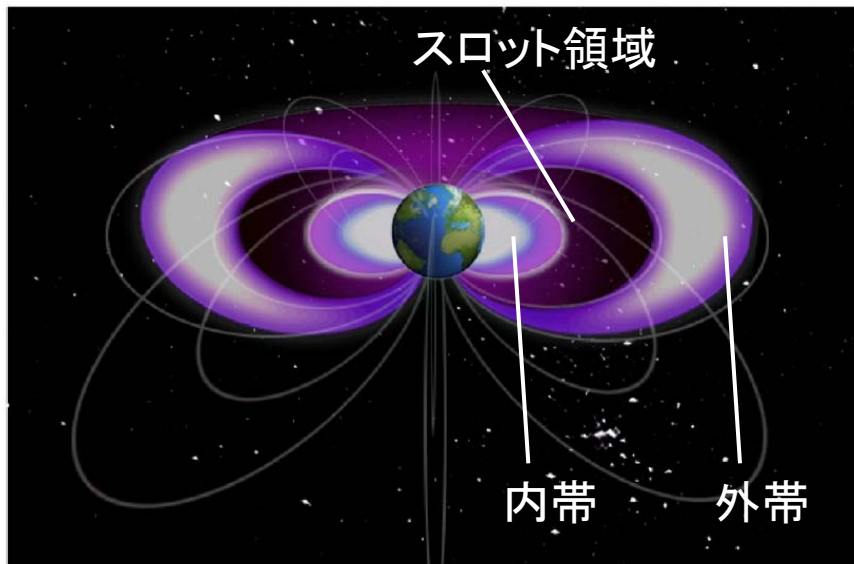
Ultra-relativistic electron enhancement

名古屋大学太陽地球環境研究所
三好由純

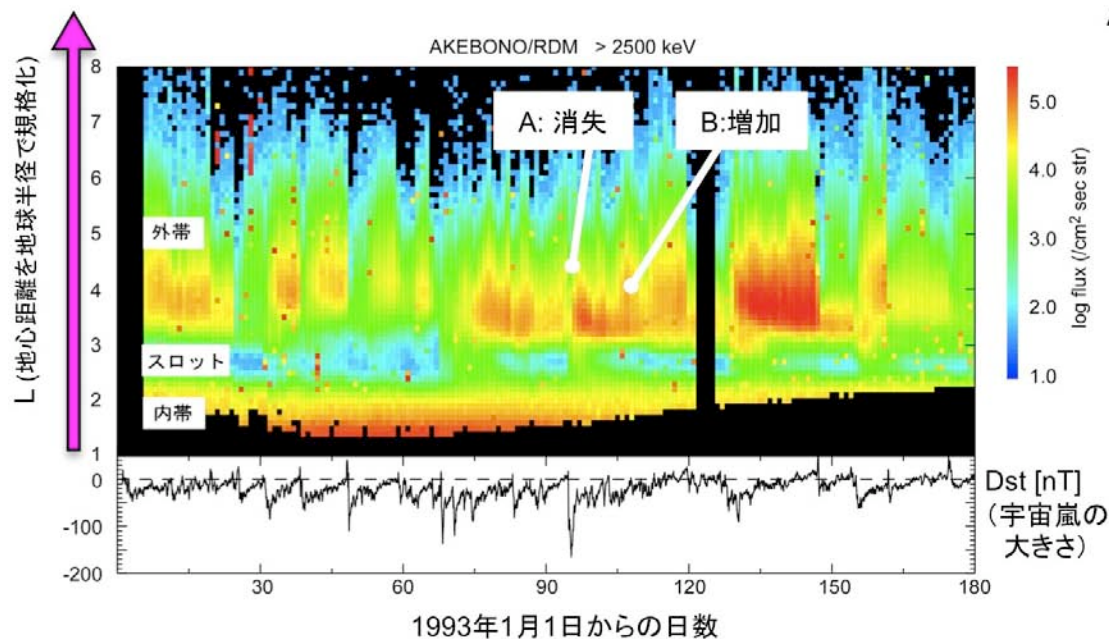
Outline

- 1 : Ultra-relativistic electron eventの概要
- 2: 形成メカニズム/地球までの距離
- 3: New Beltの継続時間

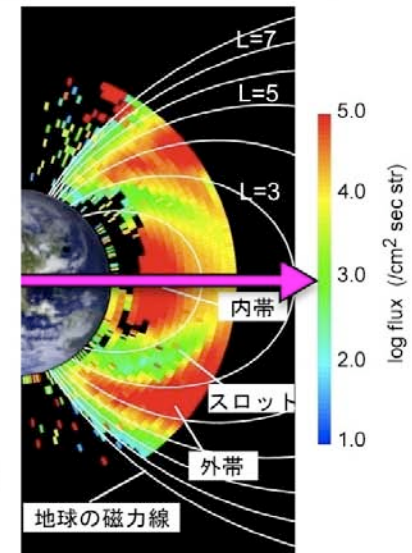
放射線帯



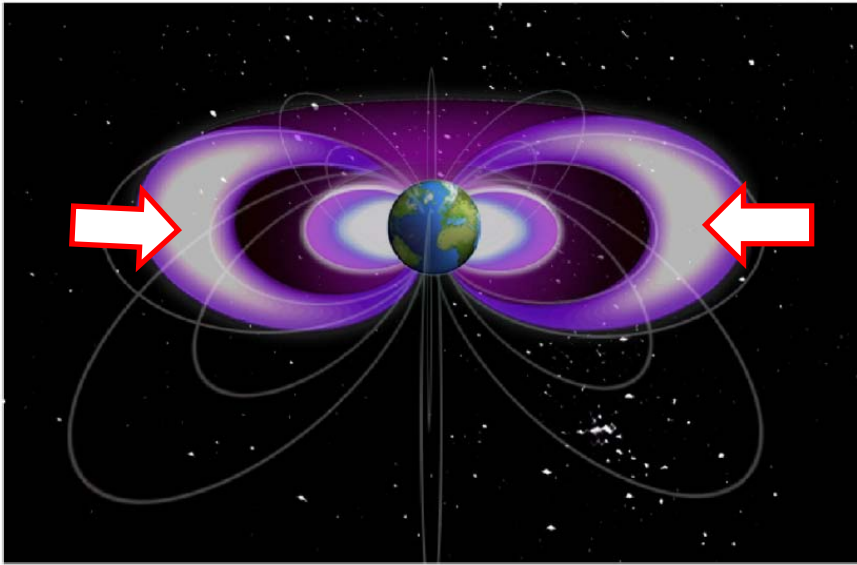
- ・>MeVのイオン/電子捕捉帯
- ・電子は2重構造
 - 内帯: $L \sim 1.5$
 - 外帯: $L \sim 4.5$



AKEBONO/RDM > 2500 keV



放射線帯



- ・>MeVのイオン/電子捕捉帯
- ・電子は2重構造
 - 内帯: $L \sim 1.5$
 - 外帯: $L \sim 4.5$

主要加速メカニズム

1: 動径方向拡散 [外部供給]

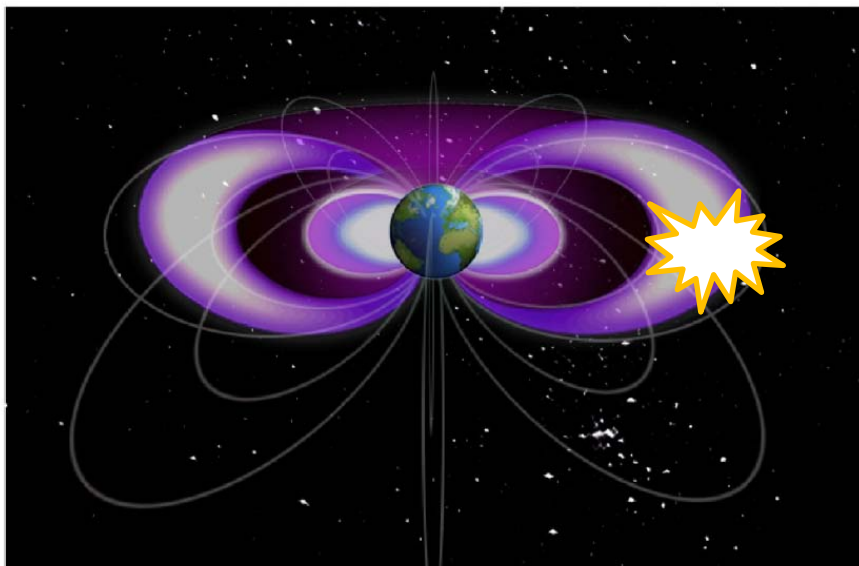
: ULF波動との共鳴拡散過程

電子の第一断熱不変量は保存。動径方向の移動にともなって加速・減速

$$\mu = \frac{p_{\perp}^2}{2m_0 B}$$

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

放射線帯



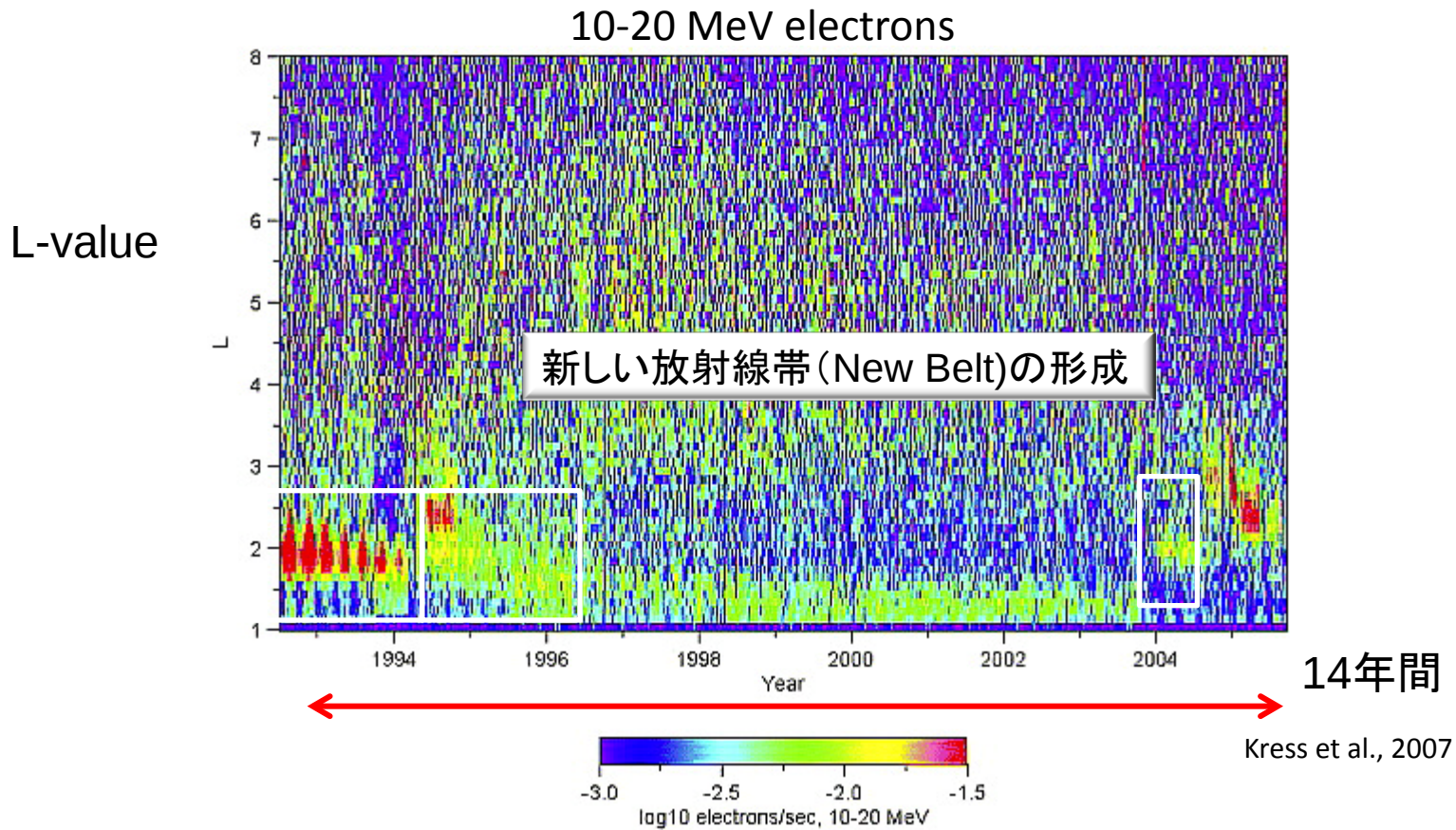
- ・ $> \text{MeV}$ のイオン/電子捕捉帯
- ・電子は2重構造
 - 内帯: $L \sim 1.5$
 - 外帯: $L \sim 4.5$

主要加速メカニズム

2: 波動粒子相互作用による加速 [内部加速]

: 高周波R-モード波動(whistler, etc)とのサイクロトロン共鳴相互作用
電子の第一断熱不変量を破って加速

1: Ultra-relativistic electron event



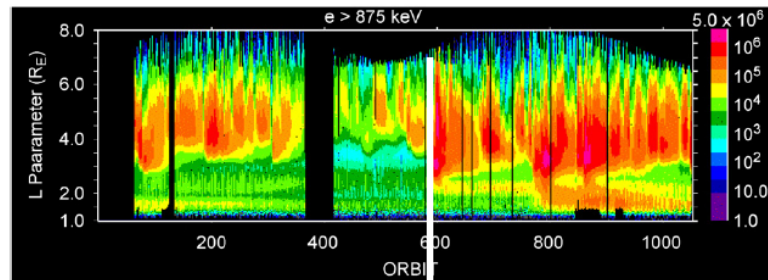
10 MeV以上の電子がL~3以下付近に出現する現象

- 1991/03/21 ..最大のSCイベント
- 1994/02/21
- 2003/10/29

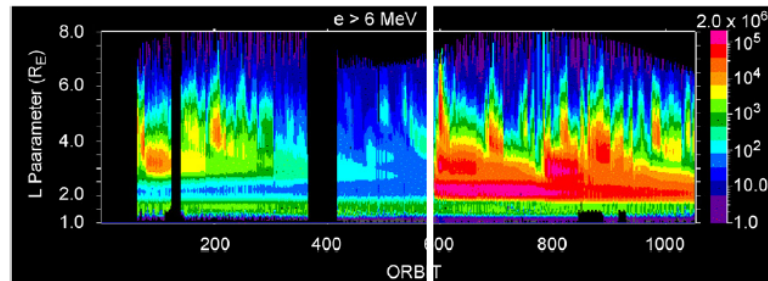
例1 : 1991/03/24 SSC Event

電子の観測 (CRRES衛星)

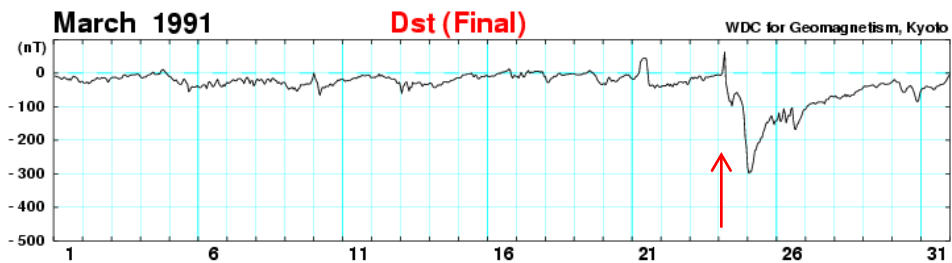
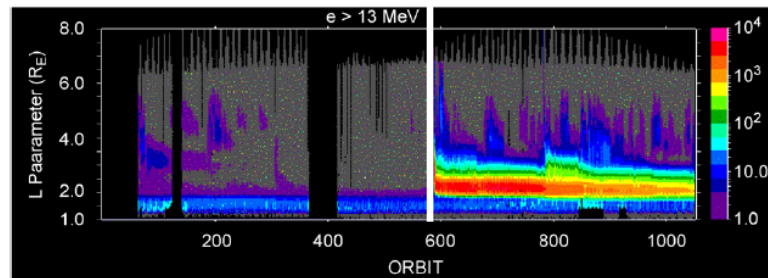
875 keV



6 MeV



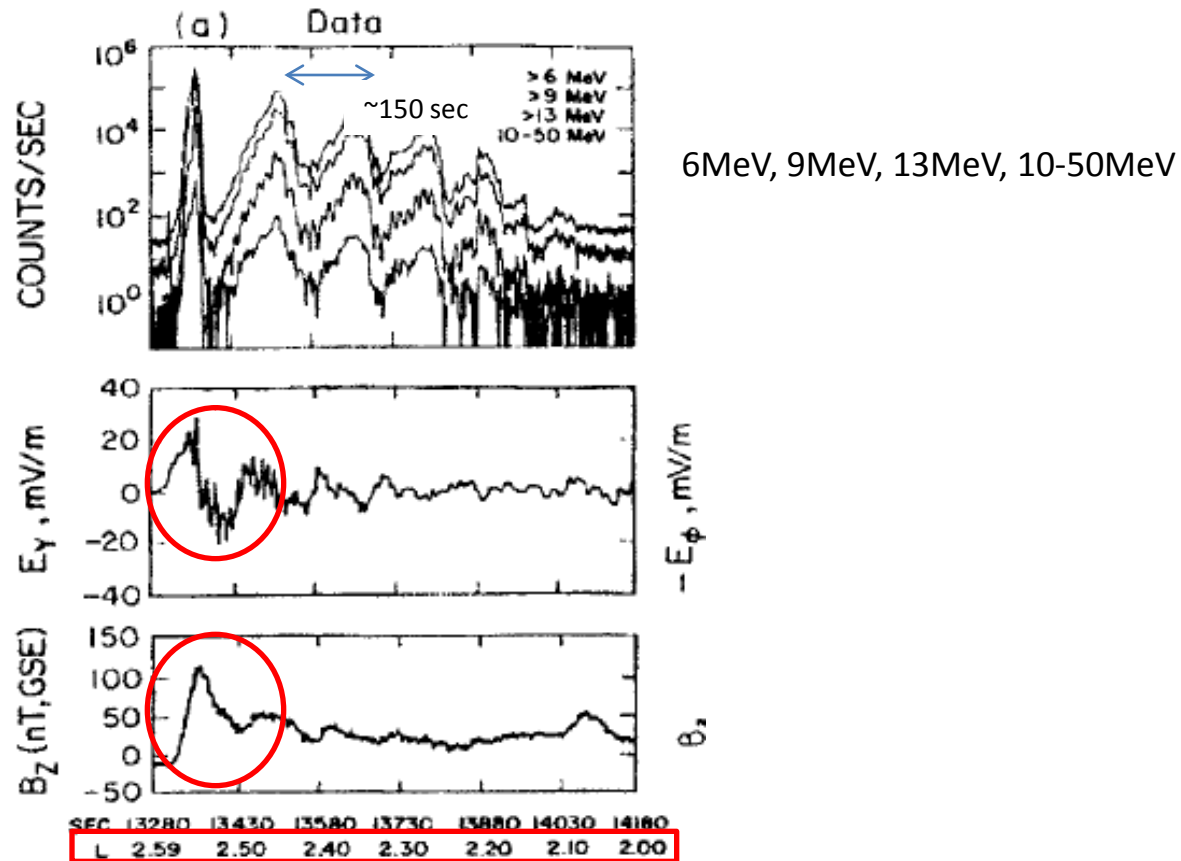
13 MeV



Blanc et al., 1999

例1 : 1991/03/24 SSC Event

電子の観測



Li et al., 1993

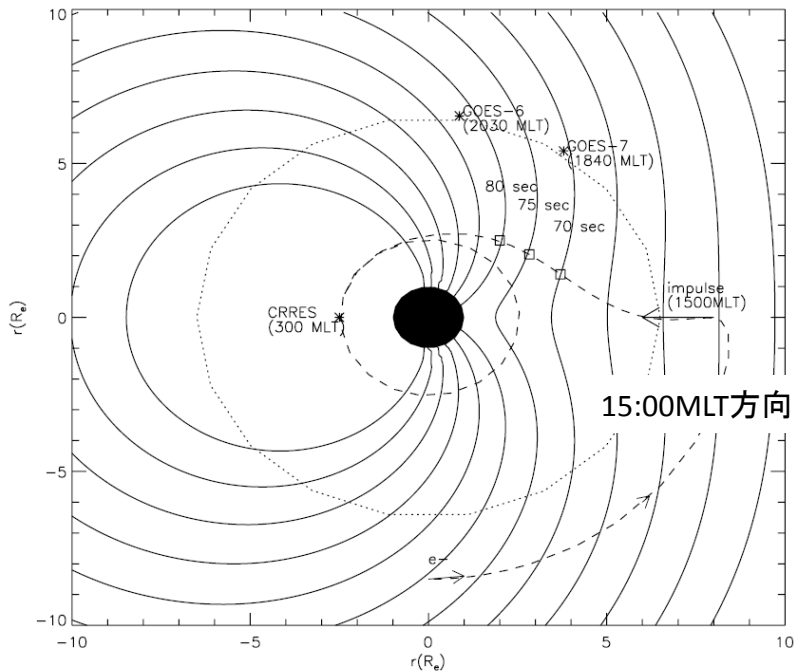
- $L \sim 2.5$ に10 MeV以上の電子の注入。 ± 20 mV/mの電場と同時に観測
- 1分以内の急激なフラックスの上昇と、ドリフトーエコー
- 90度方向に卓越する異方性

例1: 1991/03/24 SSC Event

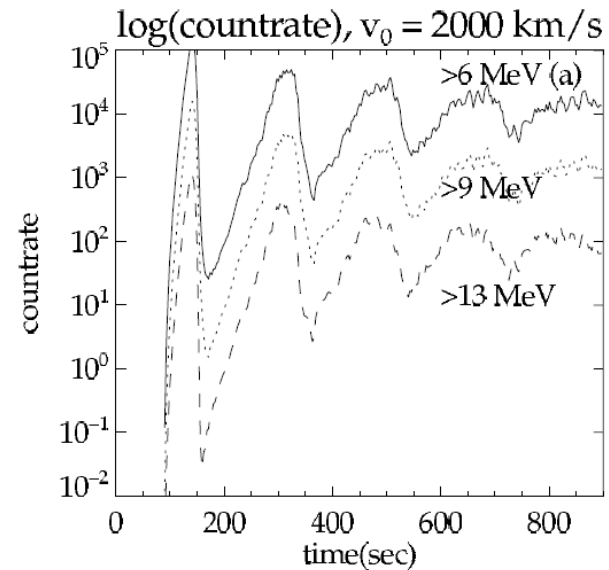
シミュレーションによる解釈

- 1: 衝撃波到来に伴って、磁気圏が圧縮(静止軌道が惑星間空間)
- 2: Fast modeの波が昼側から夜側に向けて伝搬
- 3: Fast modeによるtransit加速によって電子が加速

モデル化された電場の伝搬



Gannon et al., 2005



$E_0 = 240 \text{ mV/m}, V_0 = 2000 \text{ km/s}$

$$\mathbf{E}(r, t) = -\hat{e}_\phi E_0 (1 + c_1 \cos(\phi - \phi_0)) (e^{-\xi^2} - c_2 e^{-\eta^2})$$

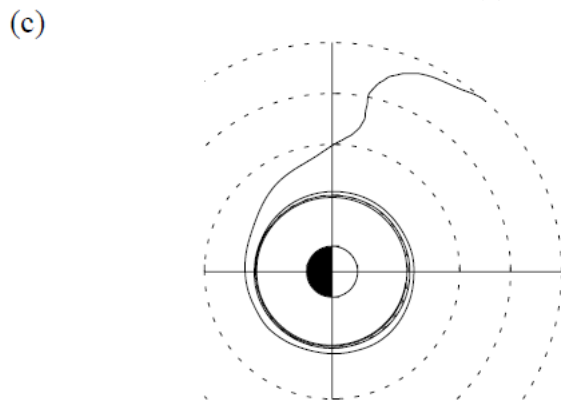
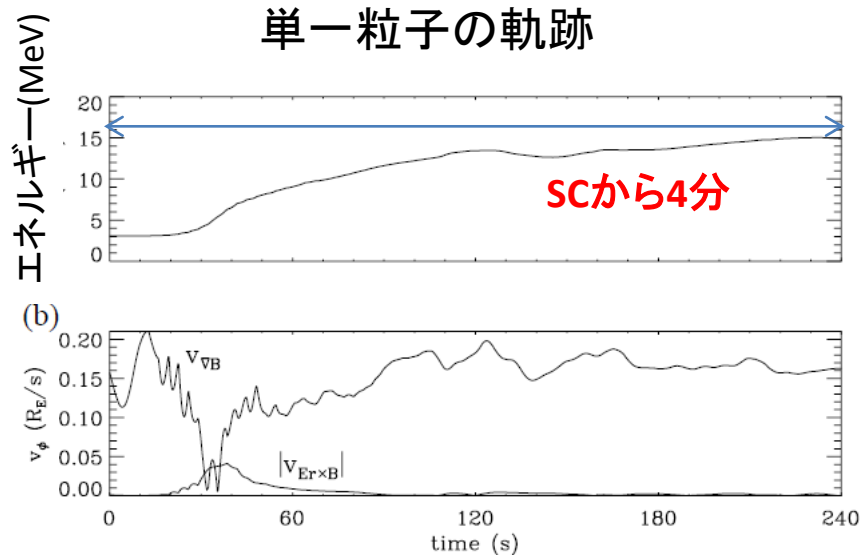
$$\xi = [r + v_0(t - t_{ph})]/d$$

$$\eta = [r - v_0(t - t_{ph} + t_d)]/d$$

$$t_{ph} = t_i + \left(\frac{c_3 R_e}{v_0} \right) [1 - \cos(\phi - \phi_0)].$$

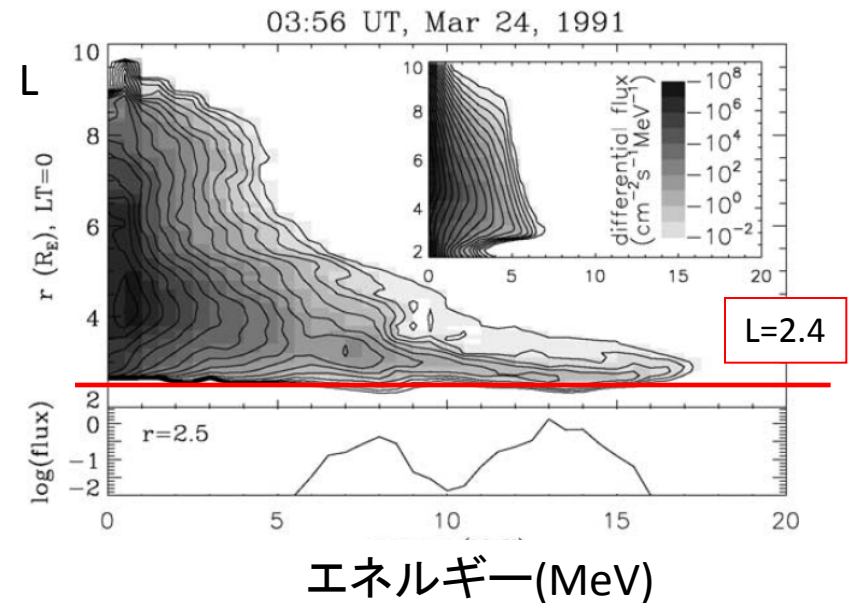
例1: 1991/03/24 SSC Event

MHD+テスト粒子計算結果



- 9 Re付近にあったMeV電子が内側に輸送されて加速

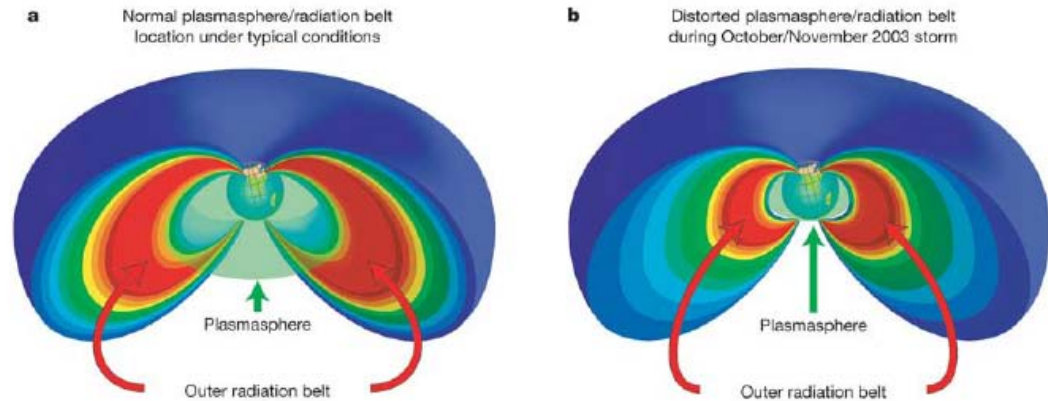
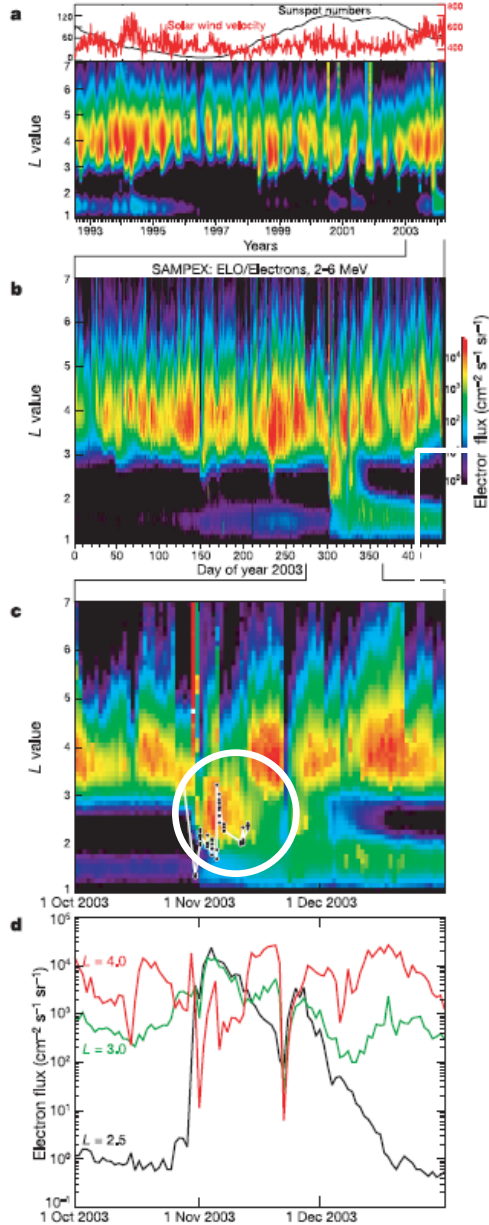
粒子の分布の変化 (SCから15分後)



- $L=2.5$ 付近に15MeV以上の電子分布を形成

例2: 2003/10/29 event

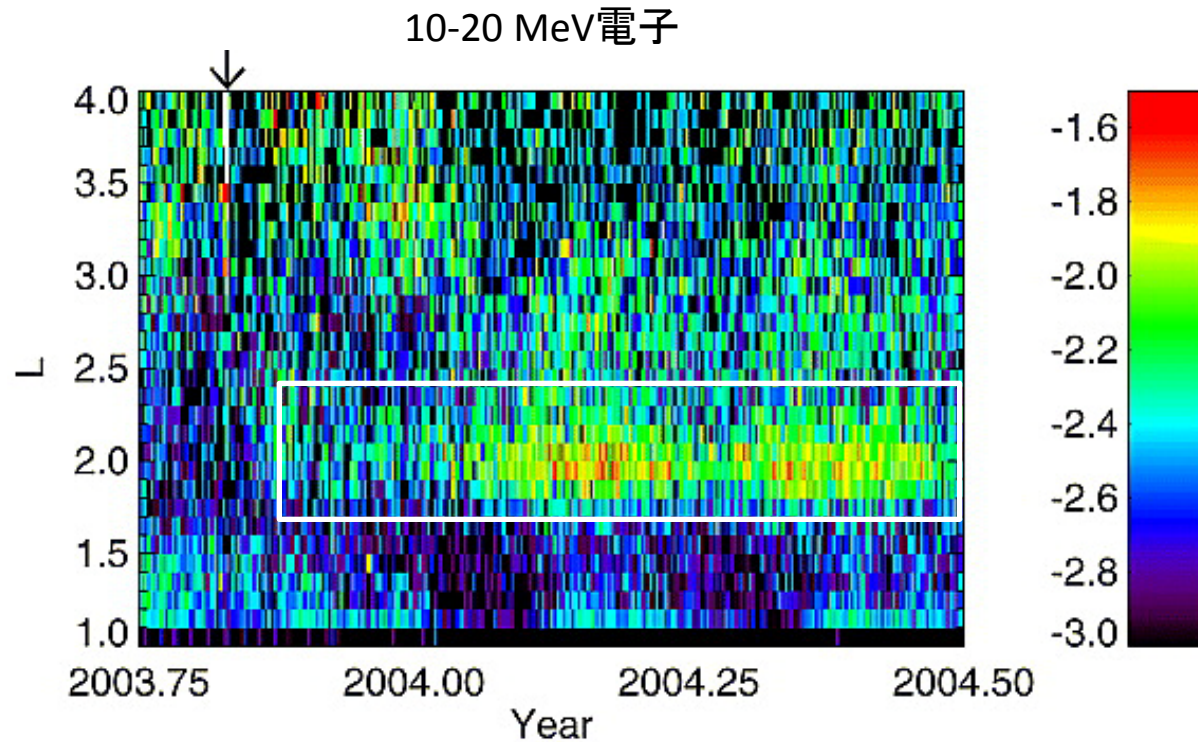
Relativistic 電子の観測 [2-6 MeV] (低高度 SAMPEX 衛星: 赤道面に衛星なし)



- ・外帯が内側に押し込まれたような描像。
- ・MeV電子の内側への輸送は、MHD波動 (Loaneu et al., 2005)

例2:2003/10/29 event

Ultra-relativistic 電子の観測 [10-20 MeV]



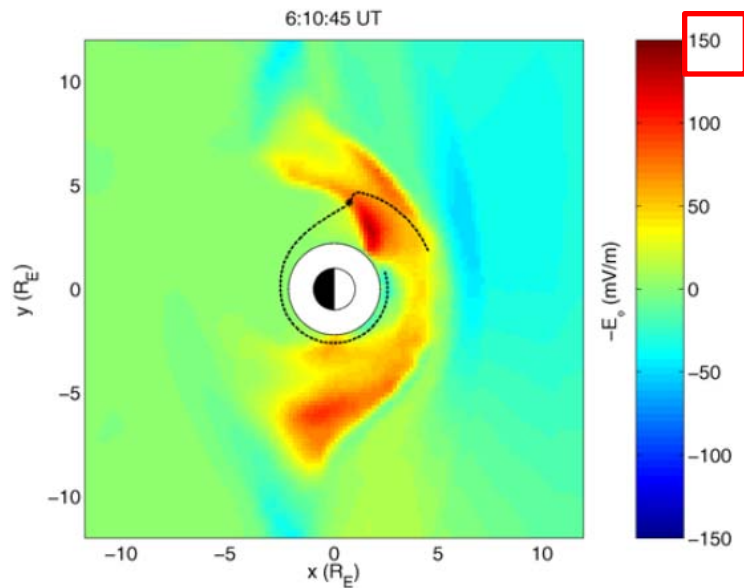
Looper et al., 2005

- SSCのあと、少し遅れて電子の増加が見え始める。
- 赤道面では急速に増加、ピッチ角散乱の時定数によりSAMPEX高度に来るのに時間がかかる。

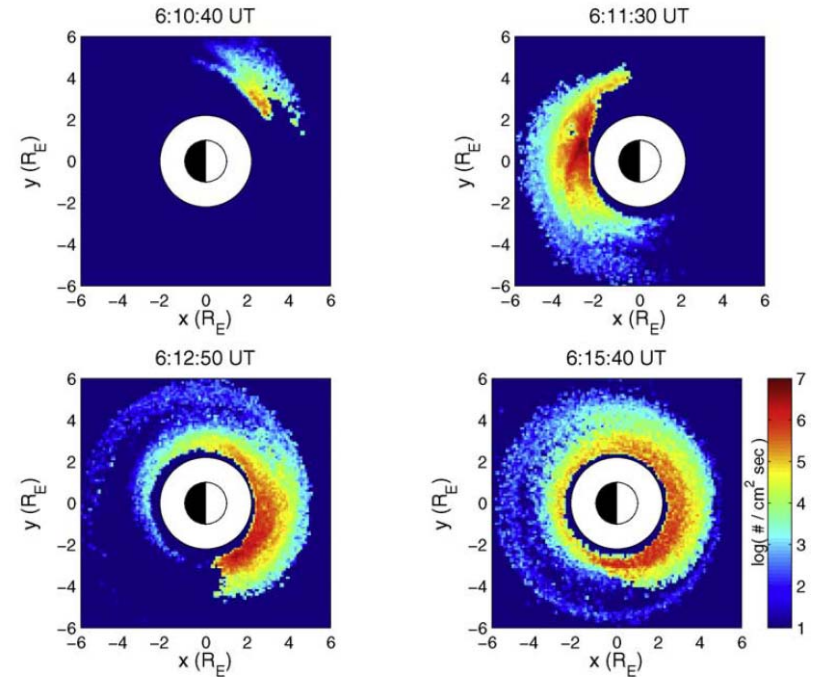
例2:2003/10/29 event

Ultra-relativistic 電子のシミュレーション

MHDによる赤道面電場分布と電子軌道(10 MeV)



SSCの10分後



- 初期分布として、 $E=1-7$ MeVを $L=3\sim 8$ に分布

Kress et al., 2007

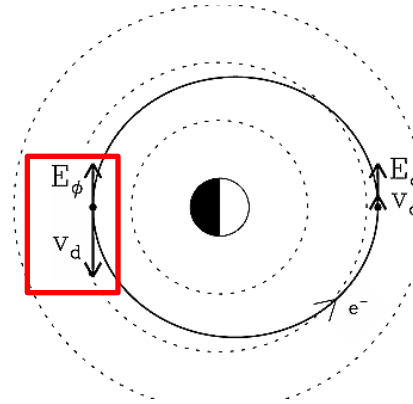
2: 加速/輸送メカニズム

運動方程式

$$\frac{dW}{dt} = e \vec{v} \cdot \vec{E} + \frac{\mu}{\gamma} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$\vec{v} = \frac{\vec{b}}{B} \times \left(-c \vec{E} + \frac{\mu c}{e \gamma} \nabla B \right)$$

- 経度方向の電場によって加速



Elkington et al., 2003

Transit加速

電子の磁場ドリフト速度 ~ 波の伝搬速度

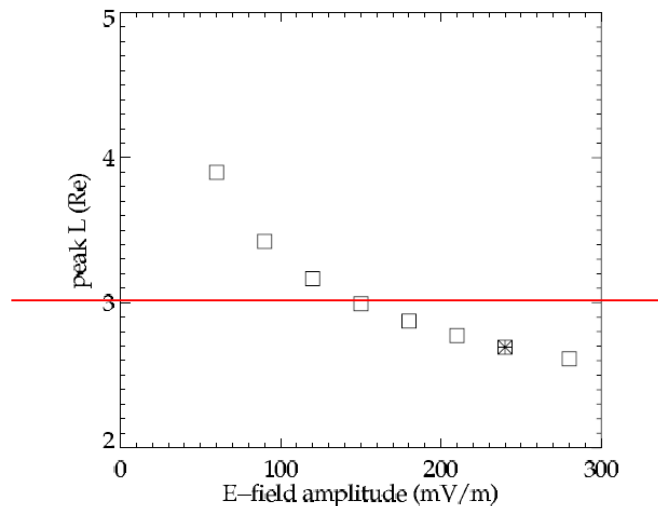
$$v_{ph} = \frac{\omega}{k} \sim v$$

-> 電子の系では、常に同じ電場を見る = transit加速

- ・電場パルスの振幅および伝搬速度が、加速に重要
- ・動径方向拡散とは異なり、パルス的に輸送

2: 加速/輸送メカニズム

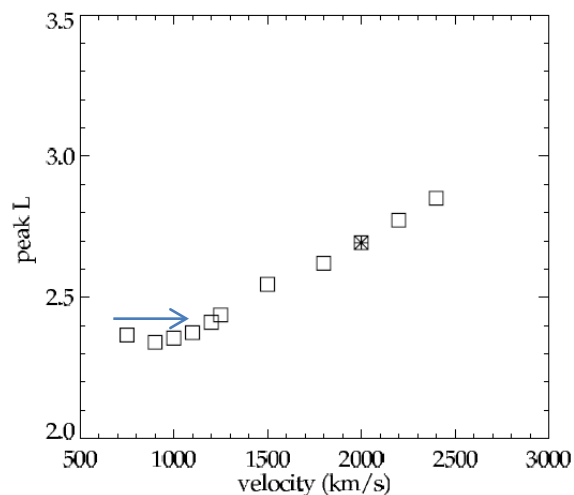
パルス電場の電場とピーク位置



- ・ $L < 3$ に10MeV以上の電子のフラックスピークを作るには
140 mV/m以上の電場が必要

(通常の衝撃波は 10 mV/mのオーダー)

パルス電場の伝搬速度とピーク位置



- ・パルス電場と長い時間相互作用=地球近くまで進入
- ・エネルギーによって、適切なパルス電場速度が異なる(はず)

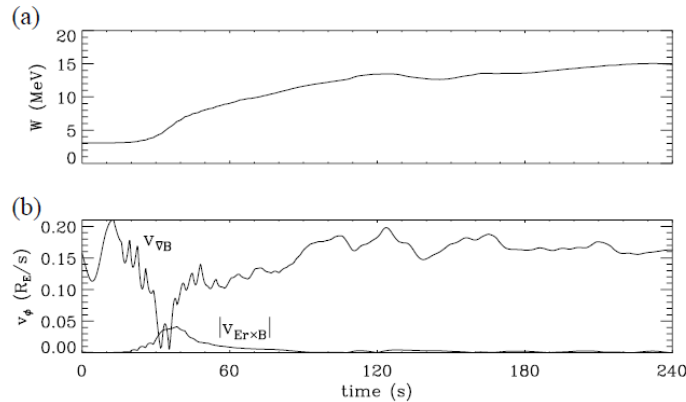
$$\mathbf{E}(r, t) = -\hat{e}_\phi E_0 (1 + c_1 \cos(\phi - \phi_0)) (e^{-\xi^2} - c_2 e^{-\eta^2})$$

$$\xi = [r + v_0(t - t_{ph})]/d$$

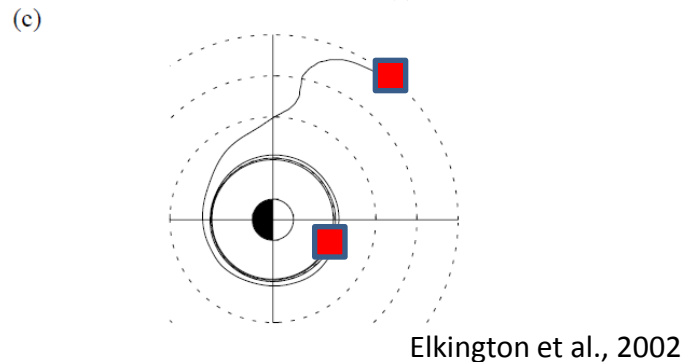
$$\eta = [r - v_0(t - t_{ph} + t_d)]/d$$

$$t_{ph} = t_i + \left(\frac{c_3 R_e}{v_0}\right) [1 - \cos(\phi - \phi_0)].$$

2: 加速/輸送メカニズム



- 10 MeV at L=2.5の電子の起源は、1-2 MeV at L=6の電子
- 衝撃波到来前に、外帯外側に十分なMeV電子が存在する必要



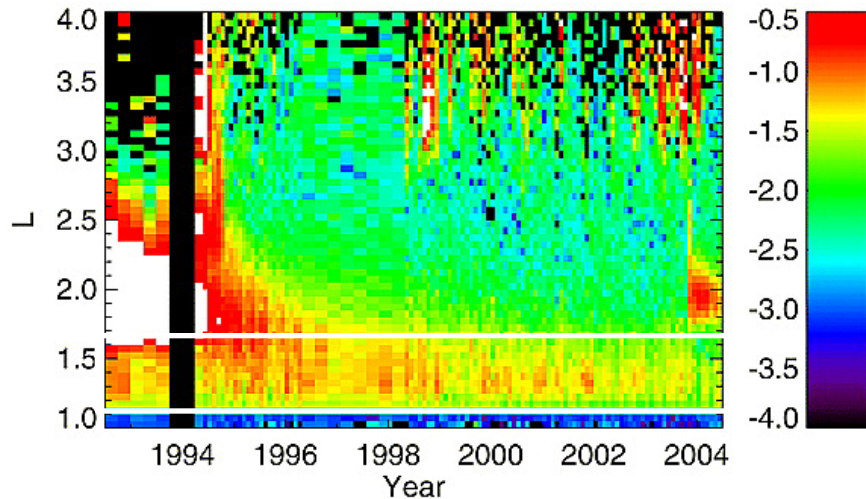
Ultra-relativistic electron eventが稀な理由

- 電子を輸送するために大きな電場を作り出す衝撃波が必要
- 衝撃波到来前に、外帯外側に十分な量のMeV電子が存在する必要

・・・電磁場の観測例が一例しかないために、詳細説明には新しい観測が必要

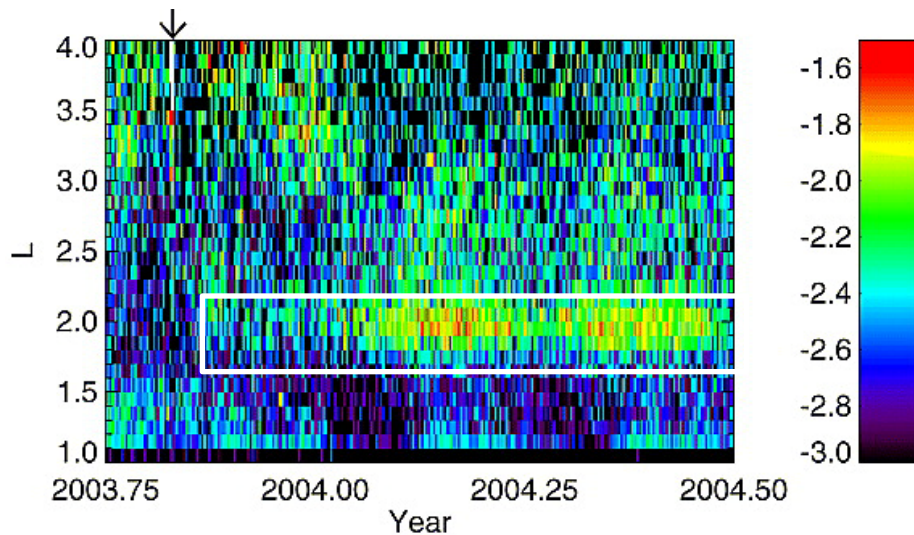
3: Ultra-relativistic electron eventのその後

10-20 MeV electrons



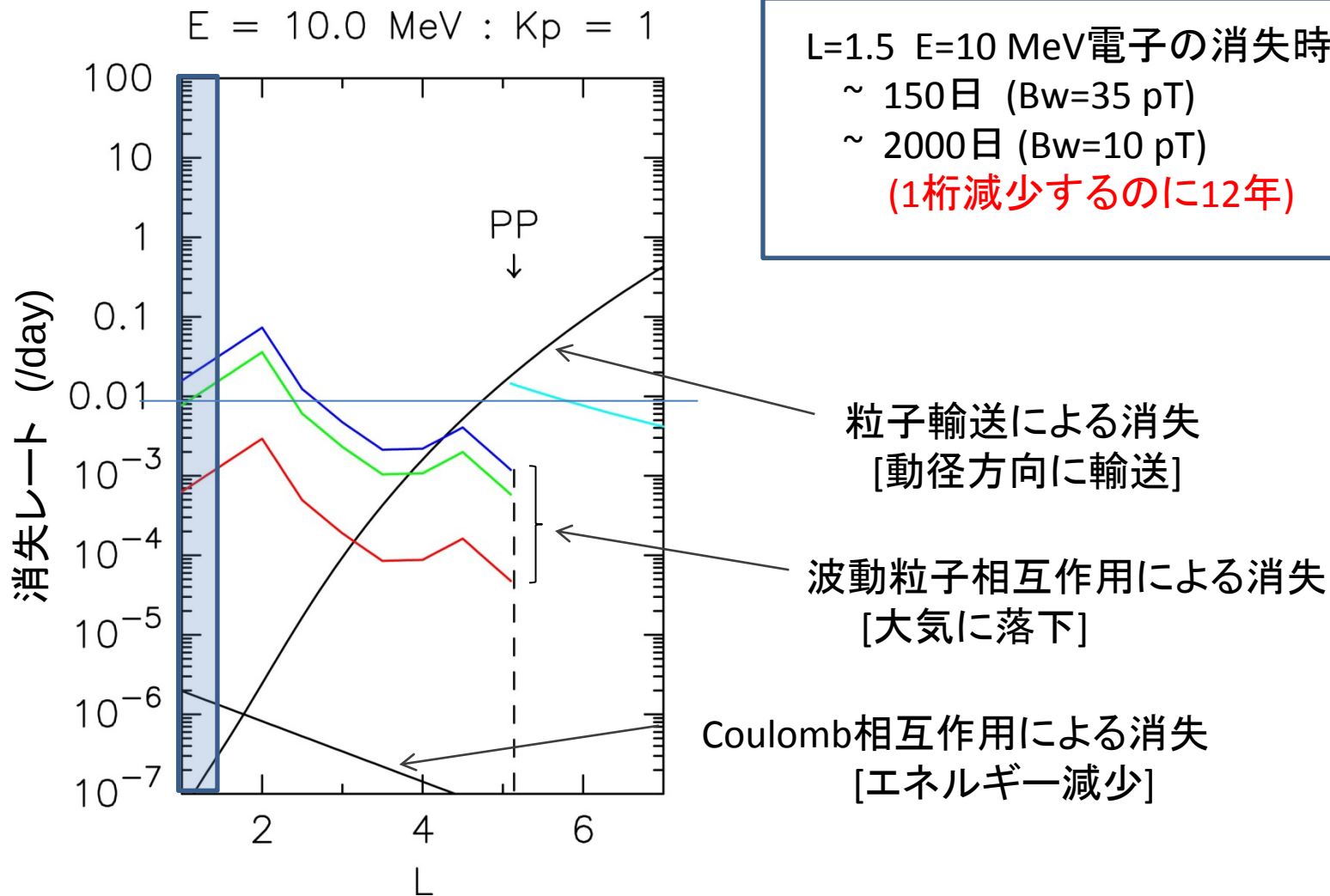
Ultra-relativistic electron eventの後
>10 MeV電子は長期間(~10年)にわたって
存在

発生頻度は稀だが、近地球放射線環境への
インパクトは大きい。



Looper et al., 2005

3: Ultra-relativistic electron eventのその後



L=1.5 E=10 MeV電子の消失時定数

~ 150日 (Bw=35 pT)

~ 2000日 (Bw=10 pT)

(1桁減少するのに12年)

- ・地球に近い場所の主消失要因は、波動粒子相互作用によるピッチ角散乱。
- ・波動強度が10pT程度であれば、10年程度 電子を滞留させることが可能かもしれない？

4: まとめ

- Ultra-relativistic electron eventについてのreviewと考察。
 - 1太陽活動周期に数回しか起こらないが、近地球の高エネルギー放射線環境を大きく変え、10年程度にわたって影響を及ぼす。
低高度衛星のtotal doseについて、10年分を一度にうけることに相当
 - Ultra-relativistic electron eventの起源:
 - 強い惑星間空間衝撃波によるパルス電場によるtransit加速
 - 100mV/m以上の振幅が必要
 - 外帯外側に種となるMeV電子が必要
 - 捕捉された電子が長寿命(long-life time)は、
波動粒子相互作用による消失を考えると説明できそう。
-
- 電磁場のin-situ観測は一例しかない。今後の観測が重要。
 - 内部磁気圏の電磁場擾乱(過渡応答)のモデル化