

計算機シミュレーションが拓く 宇宙天気の研究

京大大学生存圏研究所
海老原祐輔



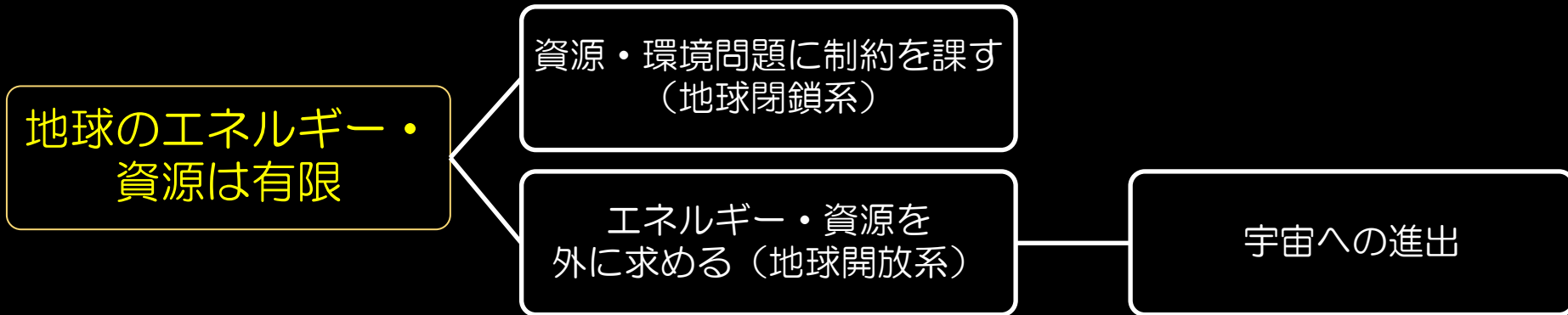
© JAXA/NHK

地球のエネルギー・
資源は有限

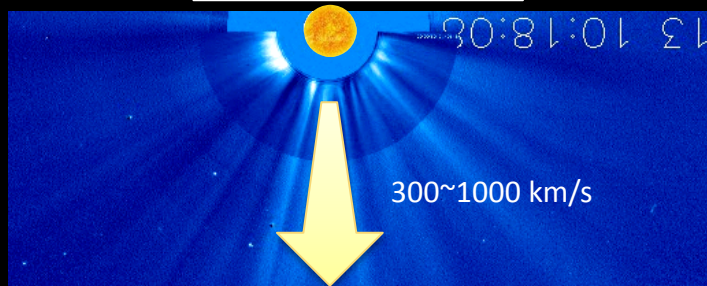
資源・環境問題に制約を課す
(地球閉鎖系)

エネルギー・資源を
外に求める(地球開放系)

宇宙への進出



宇宙圏



太陽風（高温の高速プラズマ流）
(0.001~0.02 W/m²)

高温・高エネルギー粒子の生成
巨大電流の生成

- ❖ 極めて希薄 ($<10^{-8}$ パスカル)
- ❖ プラズマが支配的
- ❖ 光の速さに近い粒子も飛び交う
(放射線帯)

宇宙飛行士



© NASA

人工衛星



© JAXA

オーロラ



© NIPR

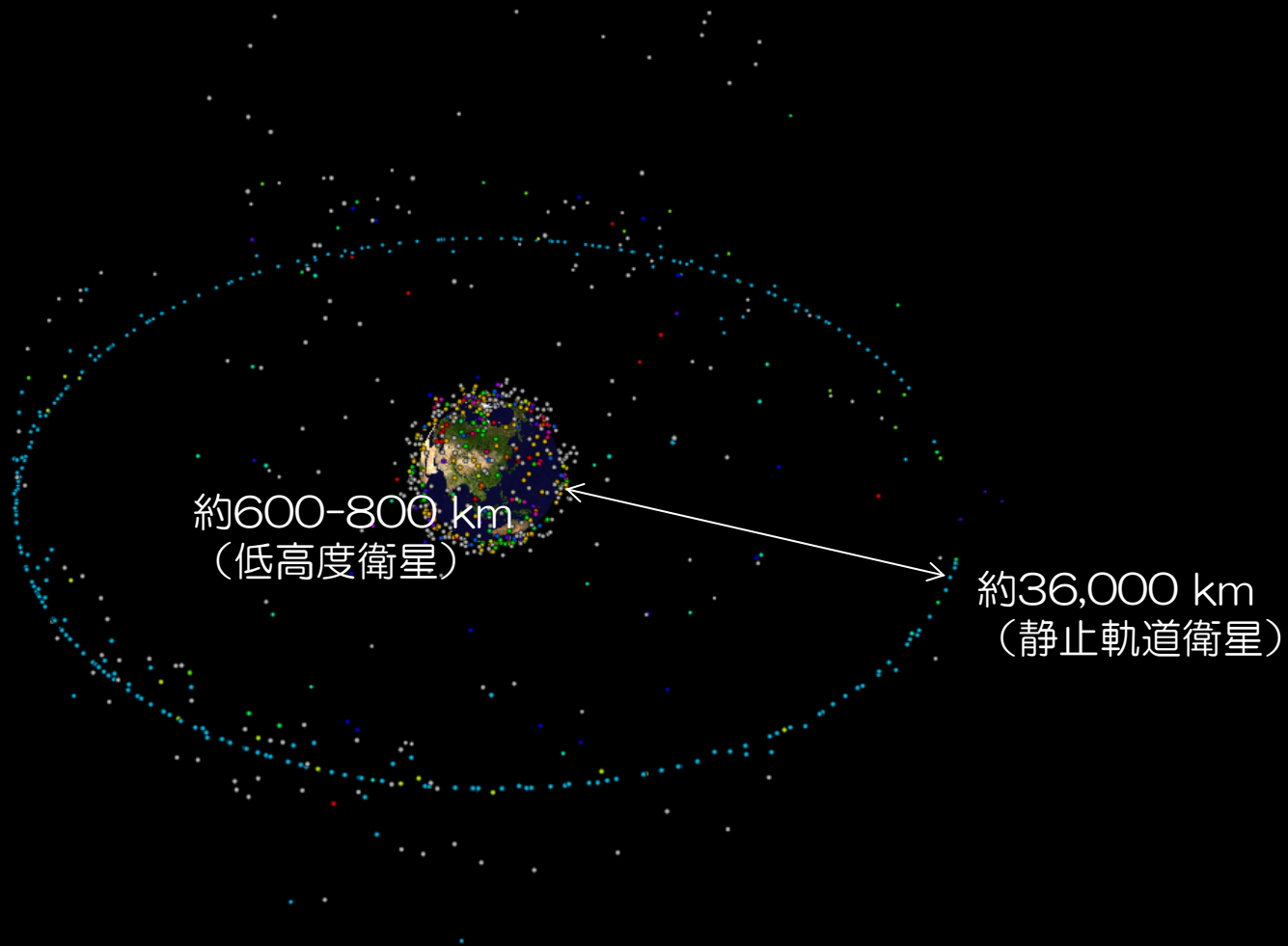
「宇宙天気とは、宇宙や地上にあるシステムに対して性能や信頼性を低下させたり、人類の生命や健康を脅かす太陽、太陽風、磁気圏、電離圏、熱圏の状態を指す。」

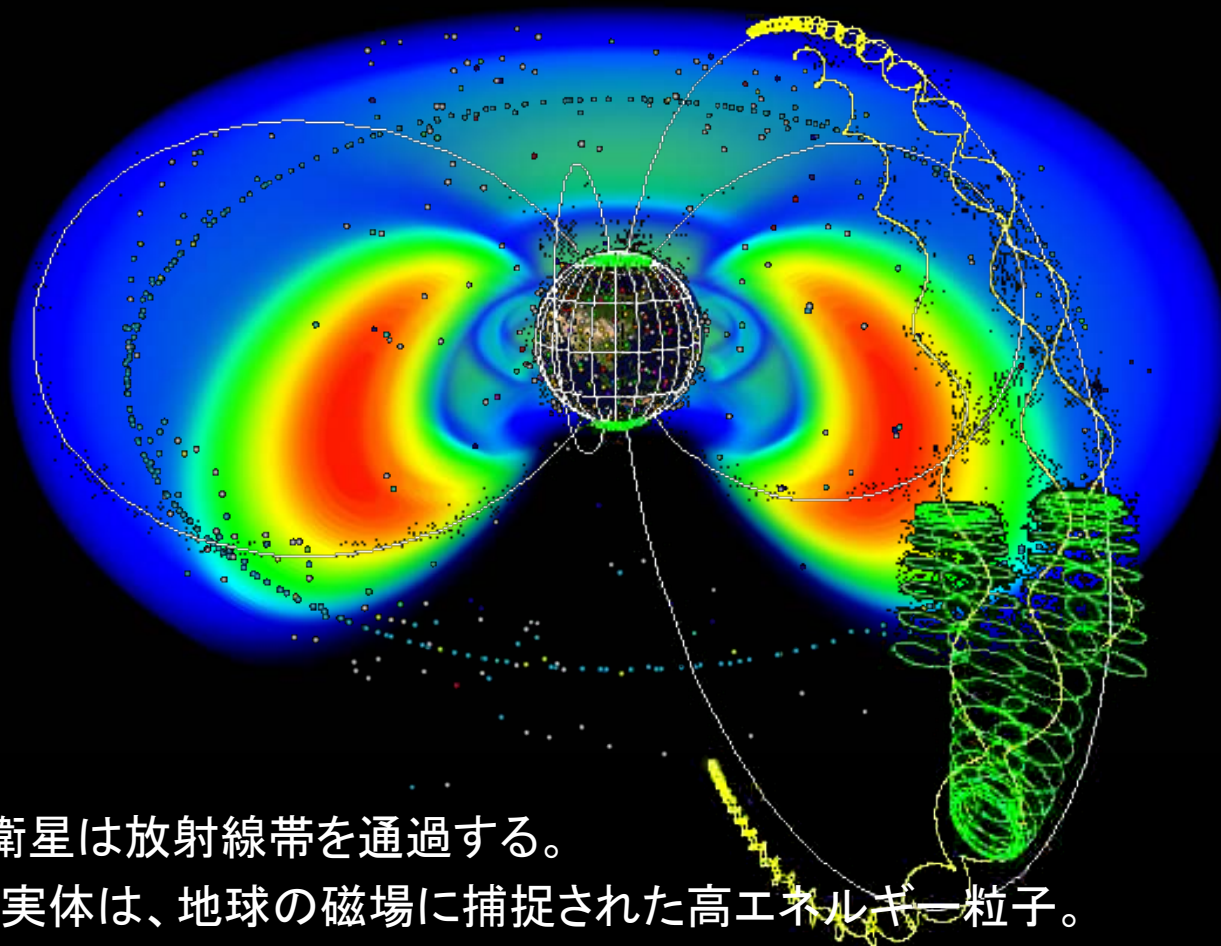
（アメリカ国立宇宙天気計画）

“The term space weather refers to conditions on the Sun and in the solar wind, magnetosphere, ionosphere, and thermosphere that can influence the performance and reliability of space-borne and ground-based technological systems and that can affect human life and health.” (U.S. National Space Weather Plan)

現在運用中の人工衛星

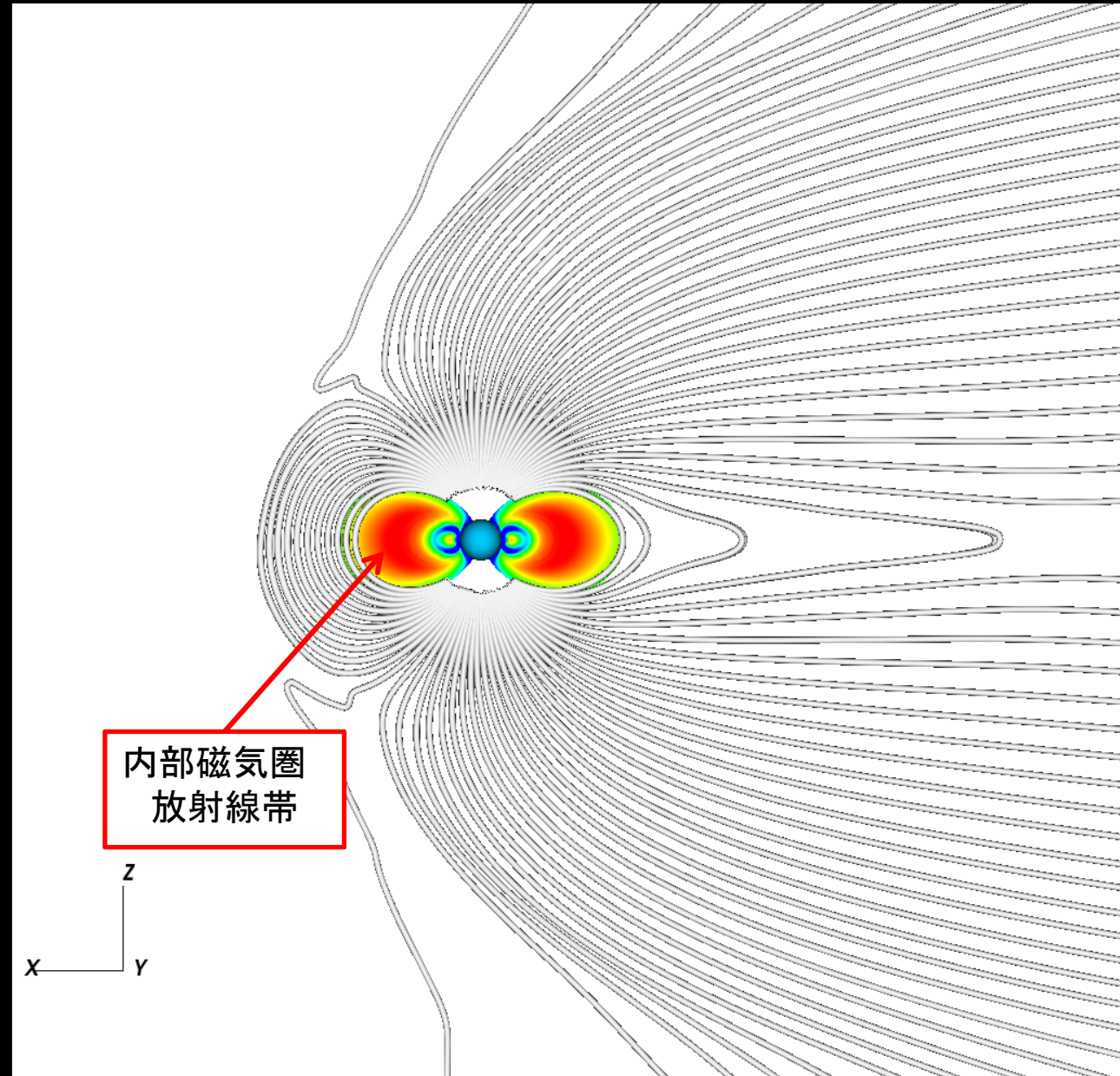
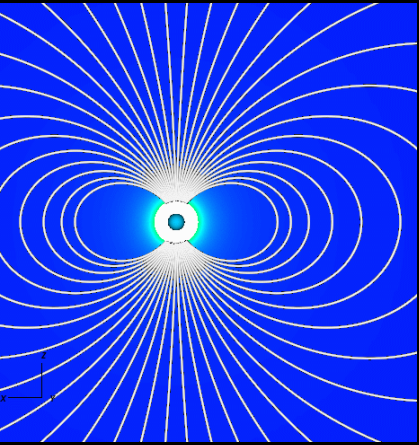
Satellite Tracker 3Dによって可視化



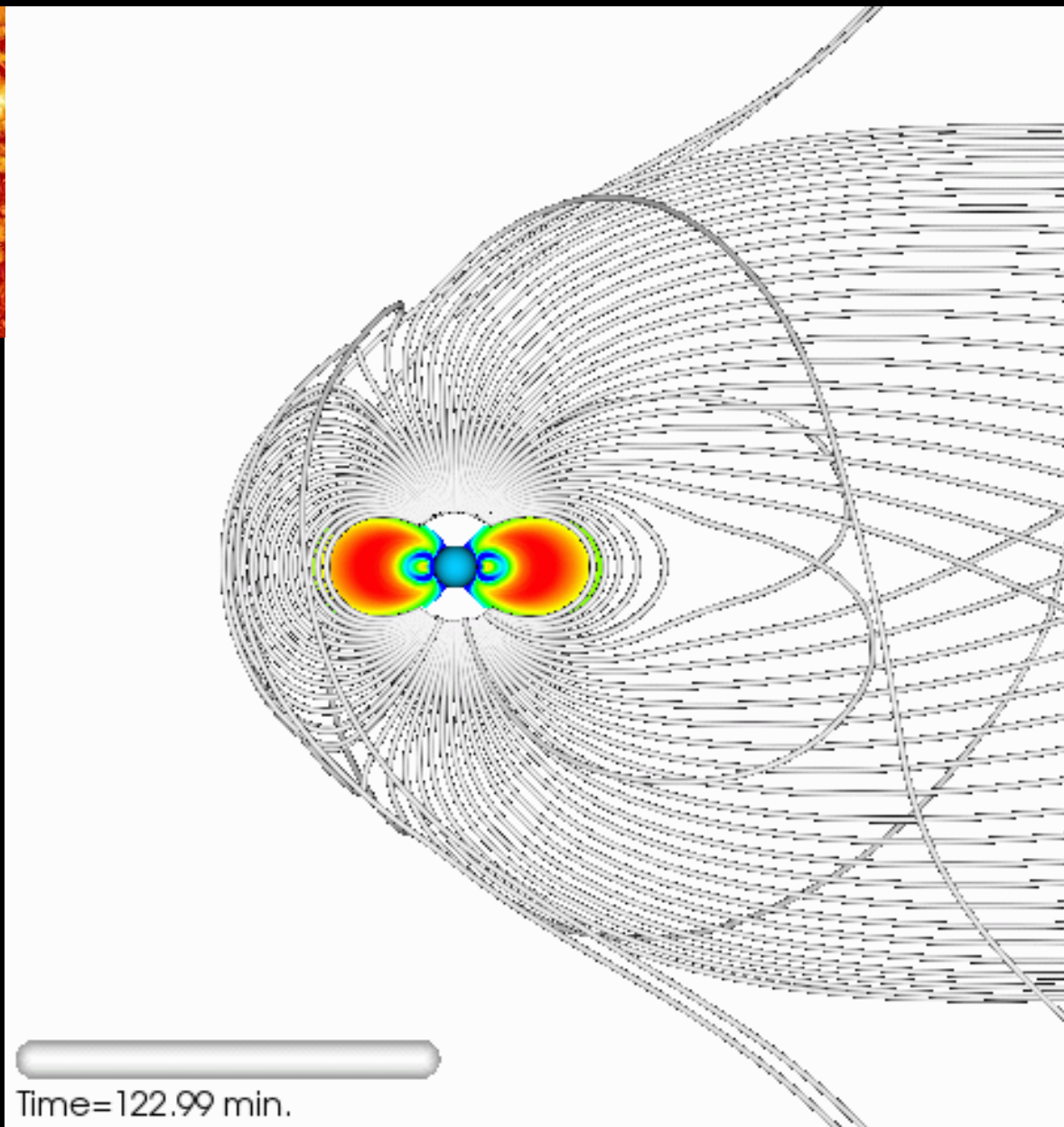
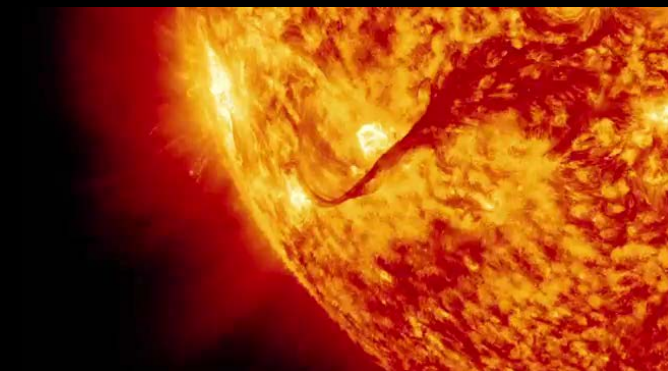


- 多くの人工衛星は放射線帯を通過する。
- 放射線帯の実体は、地球の磁場に捕捉された高エネルギー粒子。
- 放射線帯が強まると、人工衛星に損害を与える。

磁気圏



外的・内的要因による磁気圏の変動



なぜ放射線帯が強まるのか？

放射線帯の形成理論1：内部加速

~電子ボルト
密度が高い

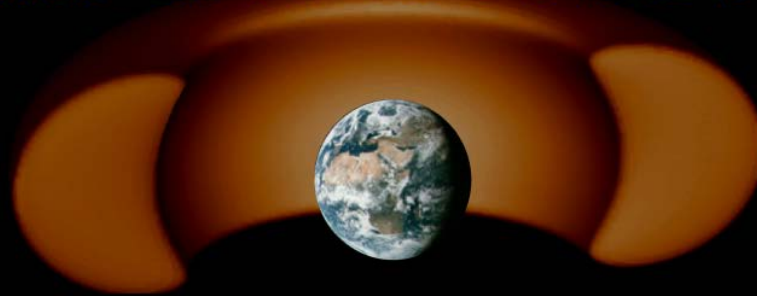
~キロ電子ボルト
エネルギー密度
(プラズマ圧)が高い

~メガ電子ボルト
光速に近い粒子が
集まっている

低温プラズマ (プラズマ圏)



高温プラズマ (リングカレント)



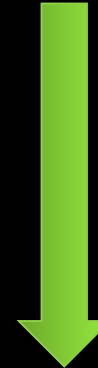
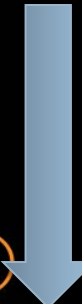
高エネルギー粒子 (放射線帯)



① 高温プラズマの注入

② 電磁波動の励起

③ 加速



放射線帯の形成理論2:外部供給

~電子ボルト
密度が高い

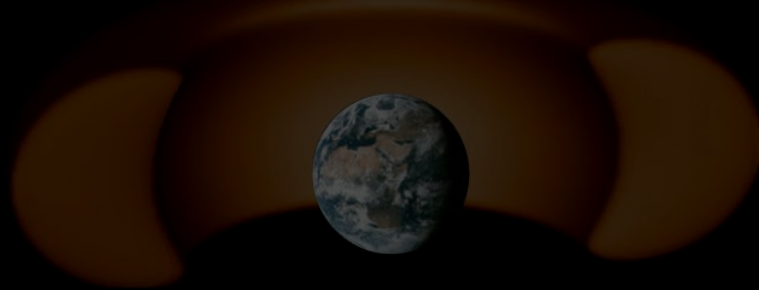
~キロ電子ボルト
エネルギー密度
(プラズマ圧)が高い

~メガ電子ボルト
光速に近い粒子が
集まっている

低温プラズマ (プラズマ圏)



高温プラズマ (リングカレント)



高エネルギー粒子 (放射線帯)



高エネルギー粒子の
拡散的・直接的な注入

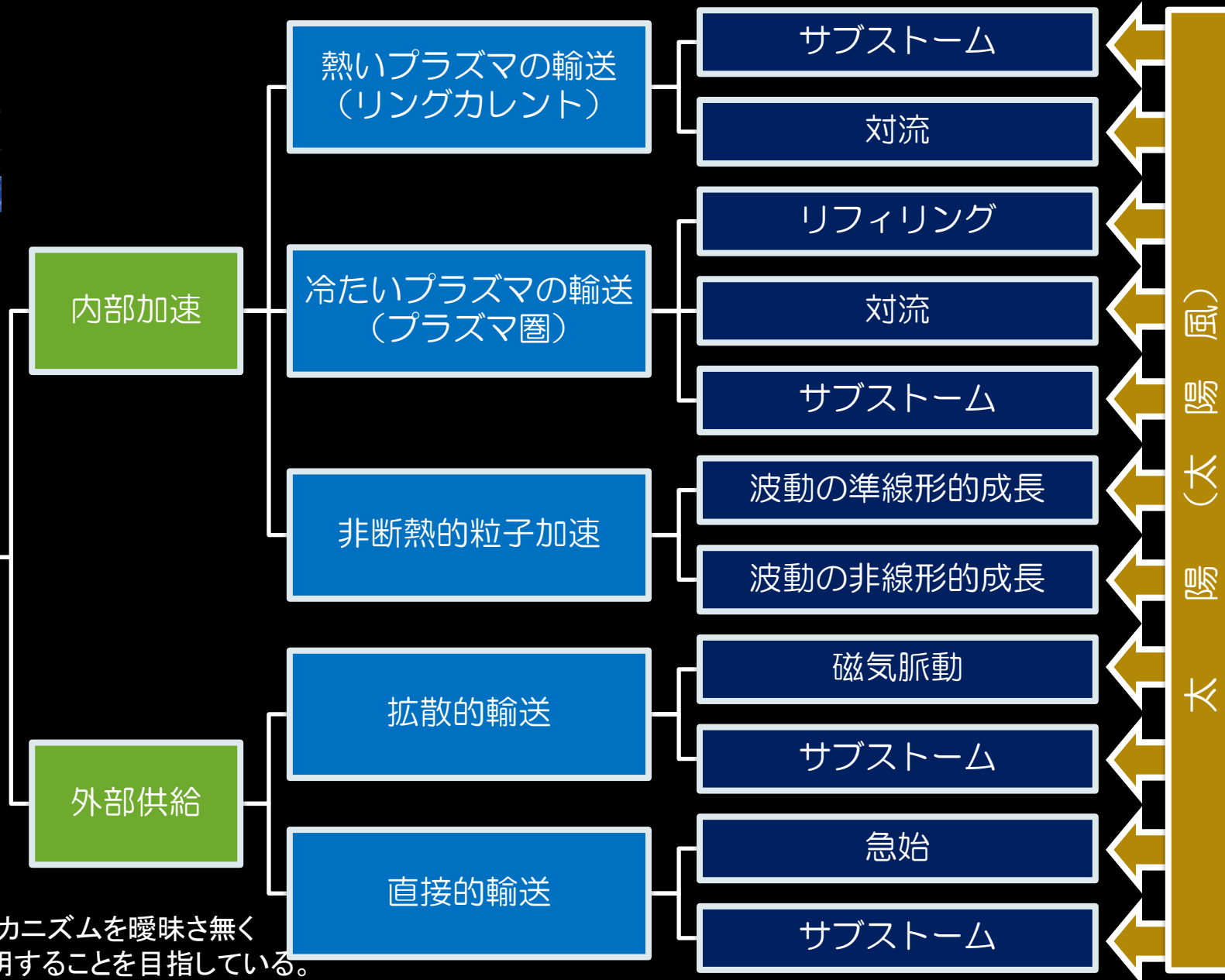
①'

放射線帯形成の物理

安心・安全な
宇宙の利用

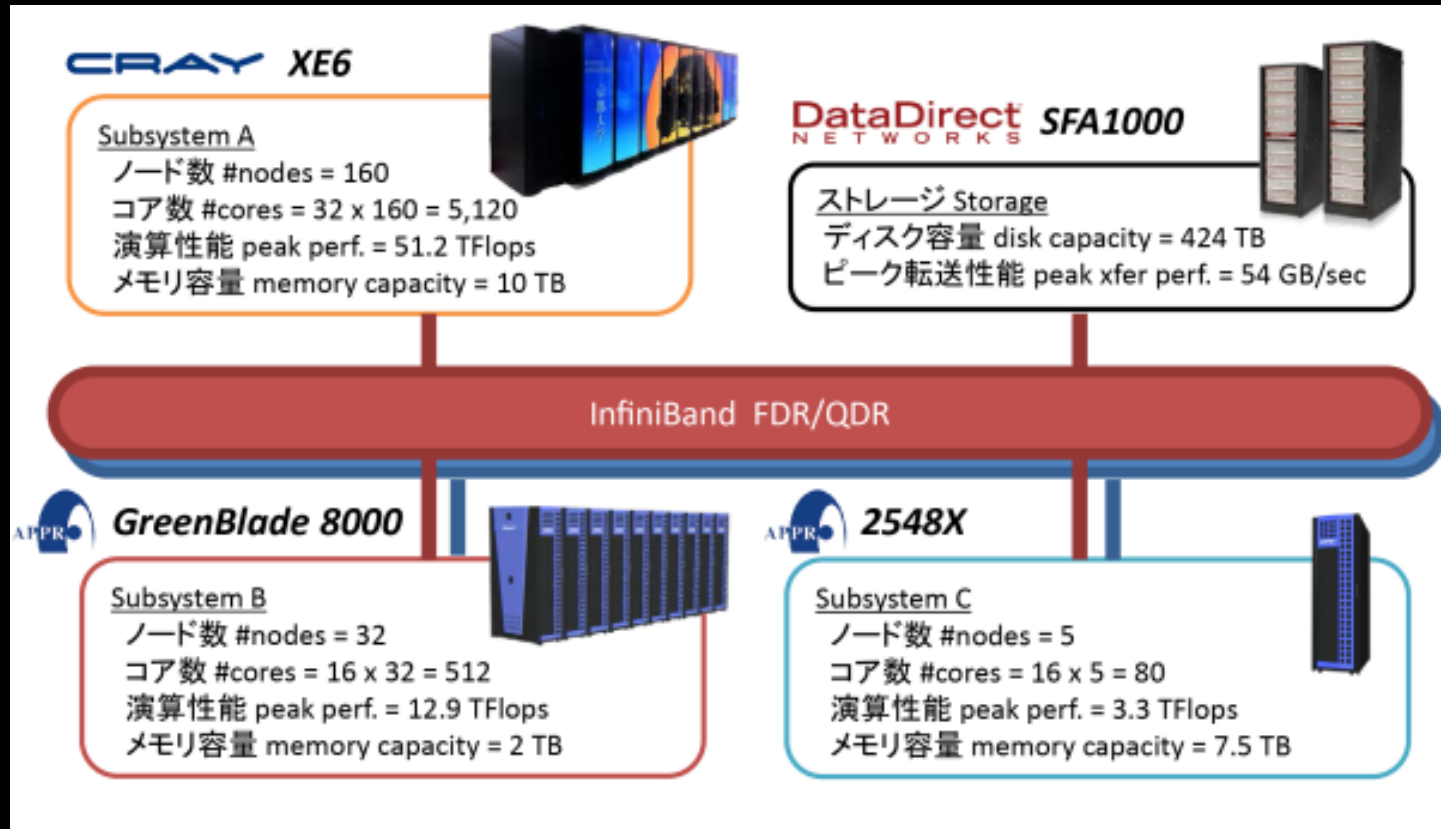


放射線帯形成

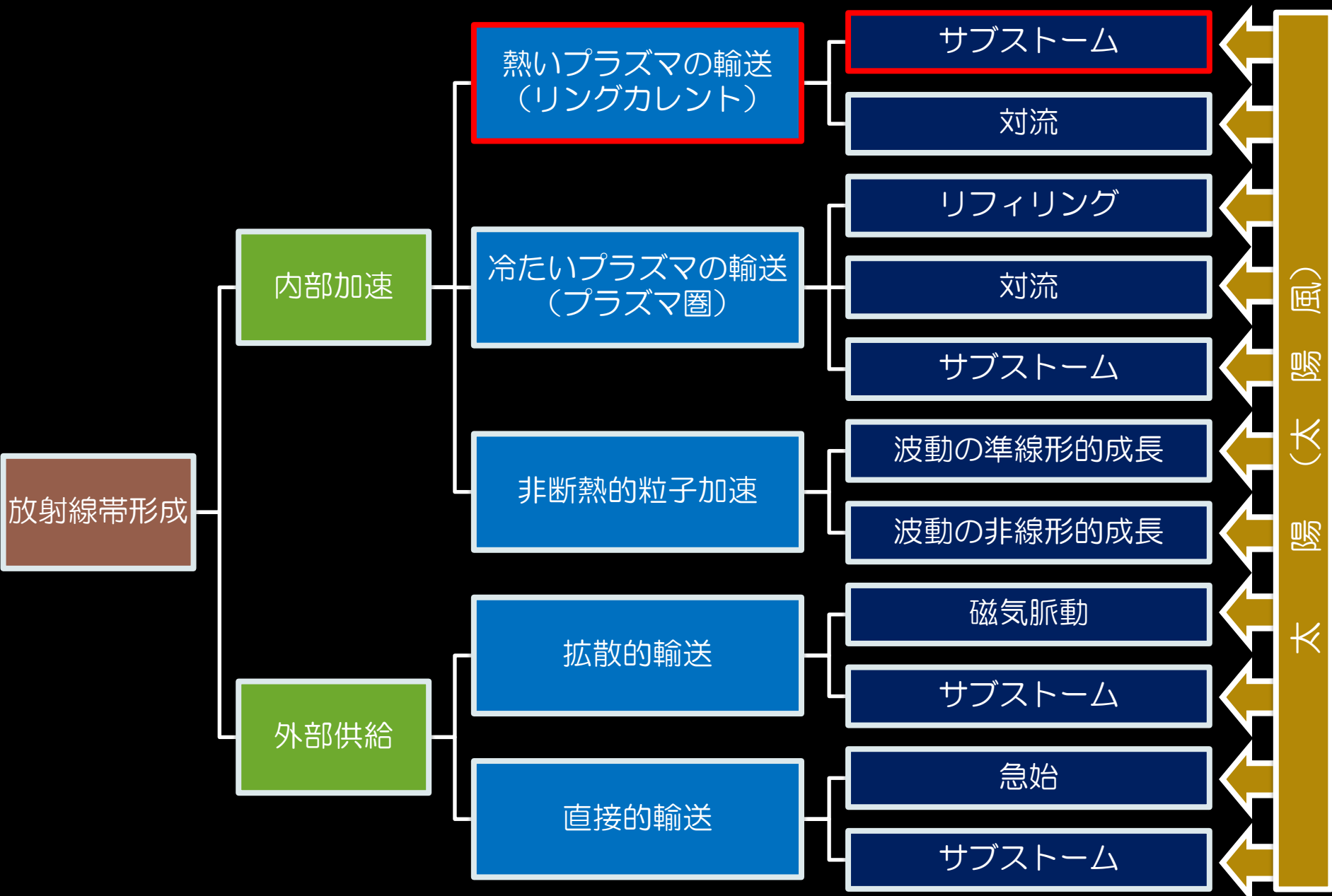


放射線帯増加のメカニズムを曖昧さ無く
物理的に正しく解明することを目指している。

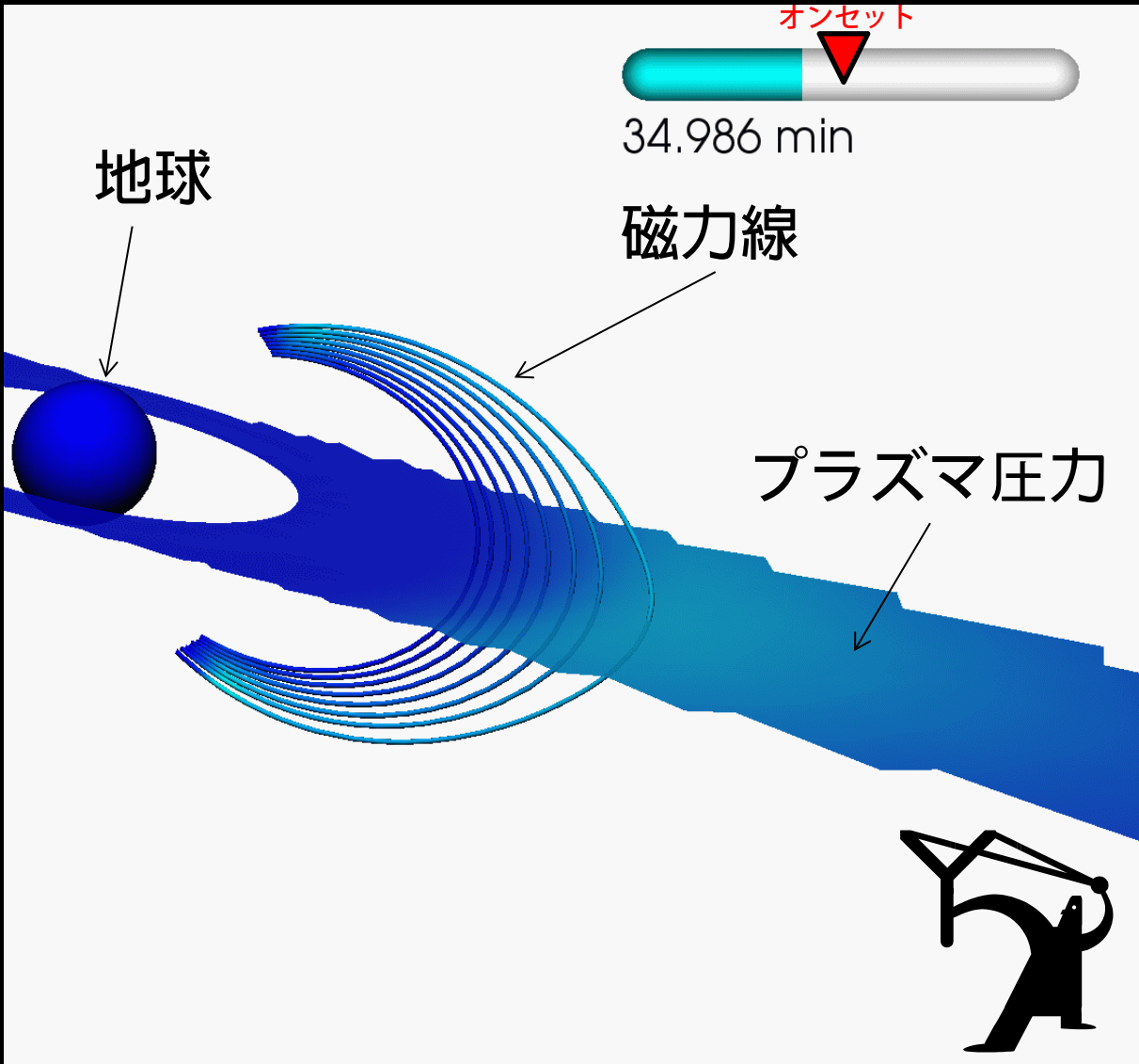
生存圏研究所 全国・国際共同利用型の設備



放射線帯形成の物理



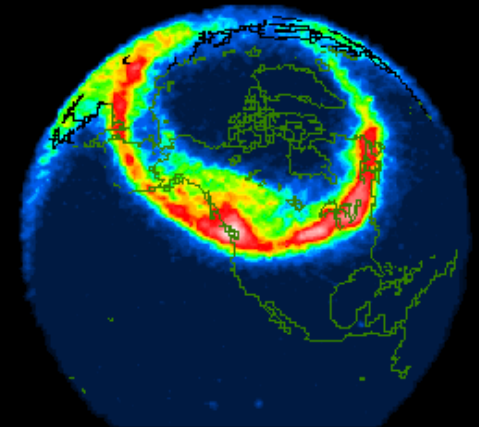
サブストームの再現実験



何故熱い電子が注入されるのか？

VIS Earth Camera
99/295 07:08 UT

人工衛星が観測したオーロラ

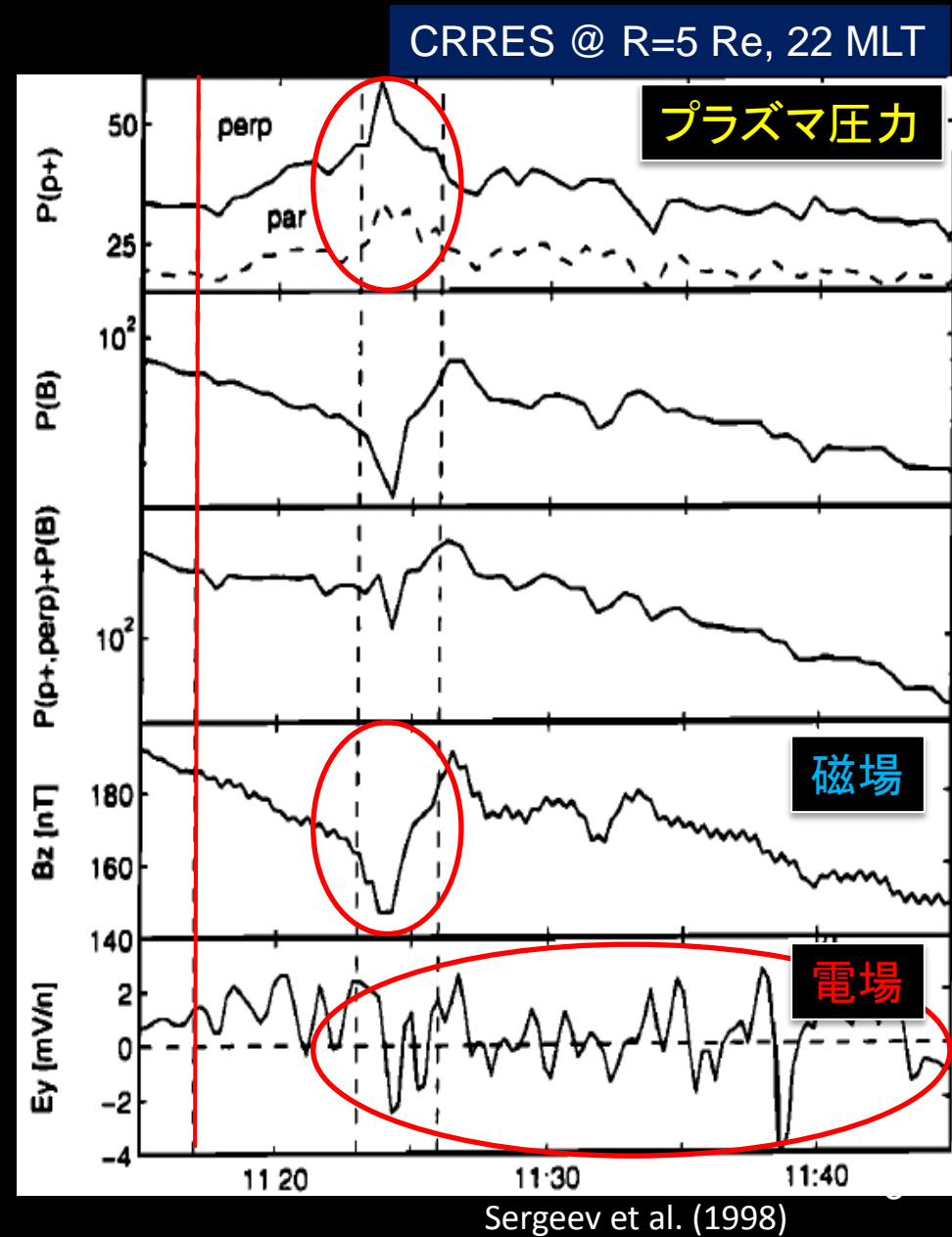
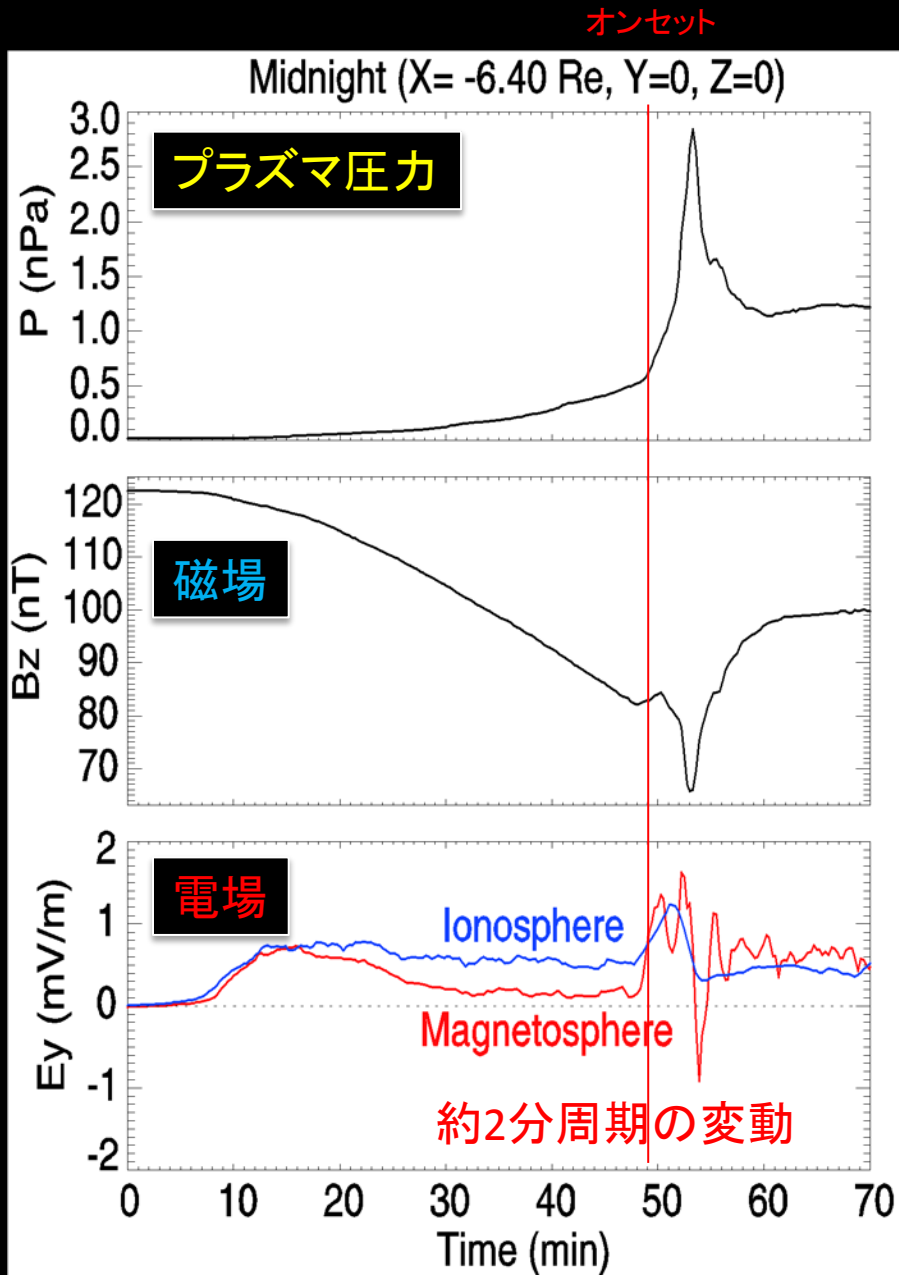


Visible Imaging System
The University of Iowa

NASA/Goddard Space

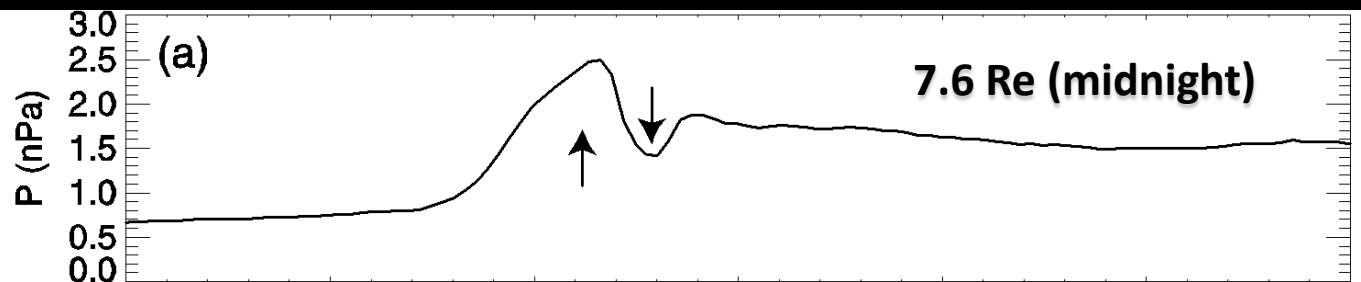
- 一旦引き延ばされた磁力線が、急激に縮む→**双極子化**
- 磁場の**双極子化**は単調ではない。

シミュレーションと観測の比較 (プラズマ圧力、磁場、電場) 15

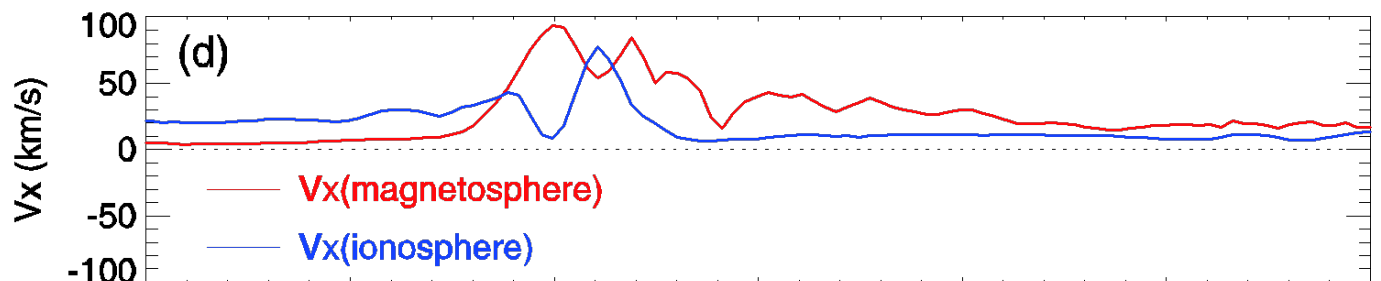


双極子化時の電場とその振動

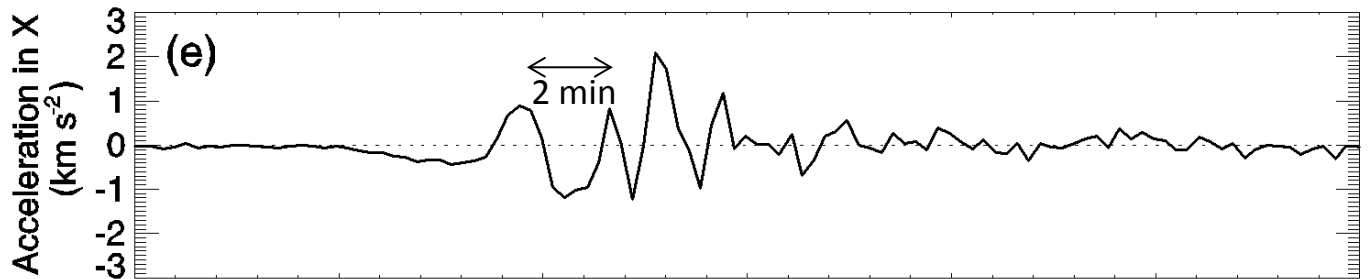
プラズマ圧力



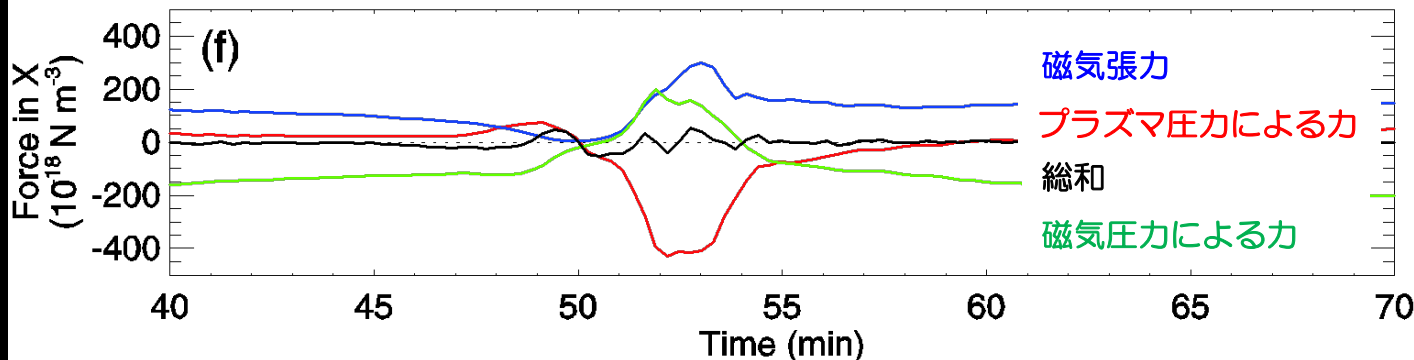
地球方向の
速度



地球方向の
加速度



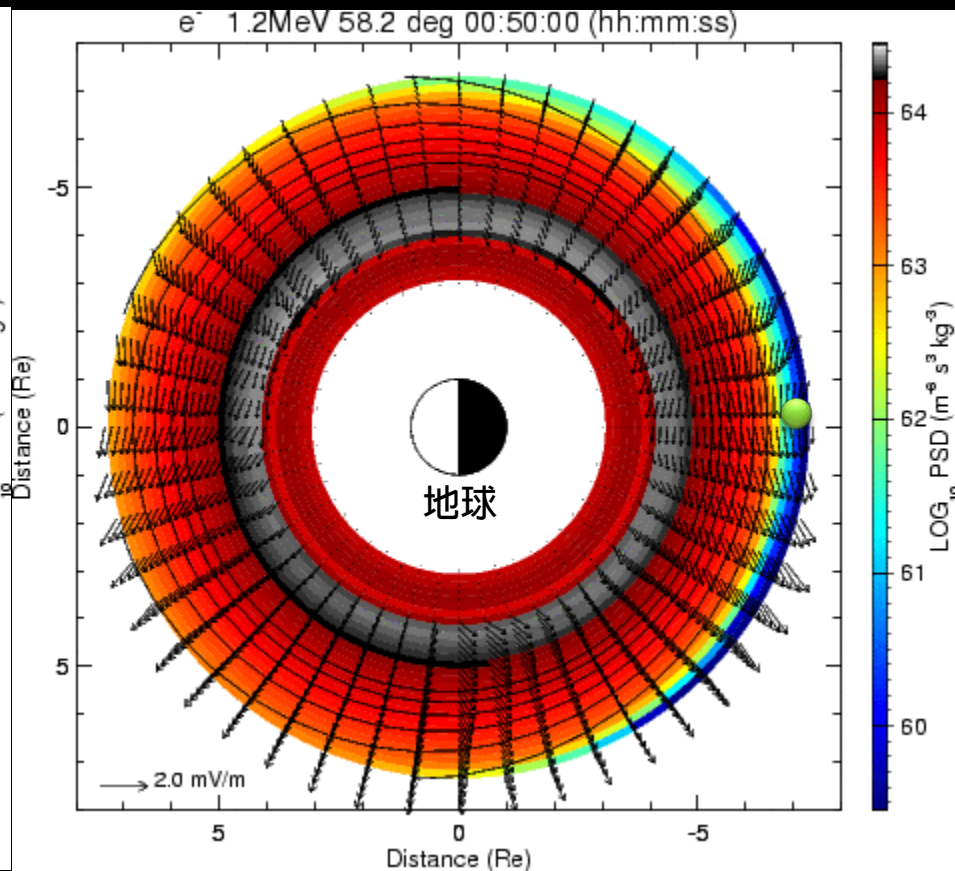
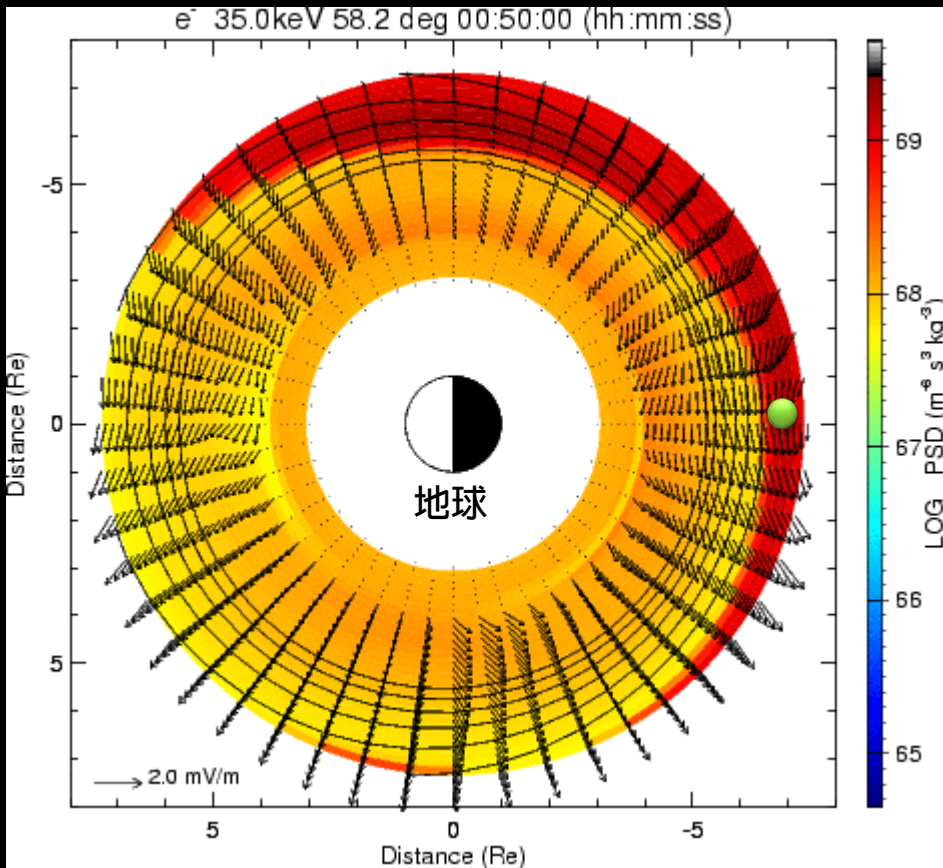
地球方向の力



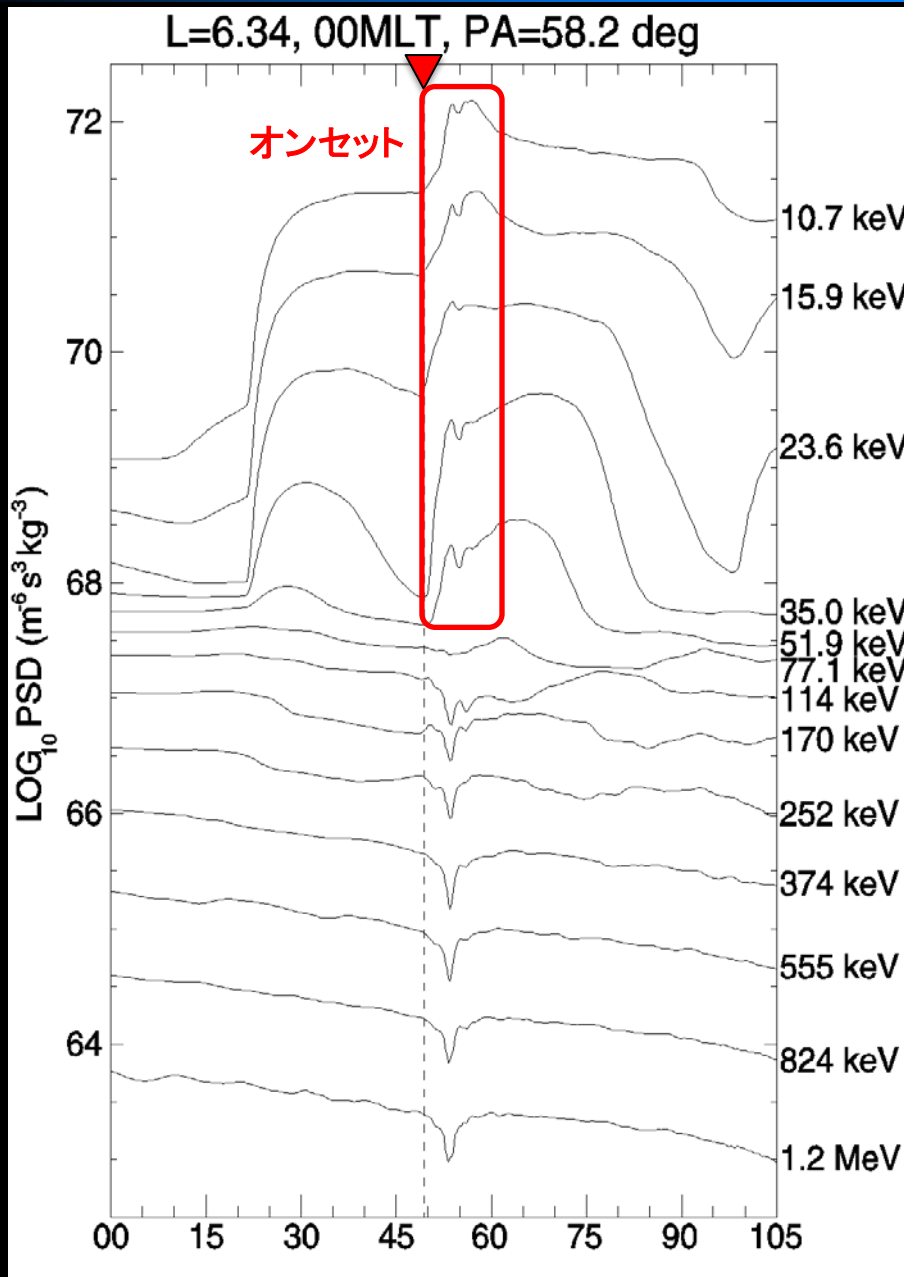
内部磁気圏電子の変動

35 keV (熱い電子)

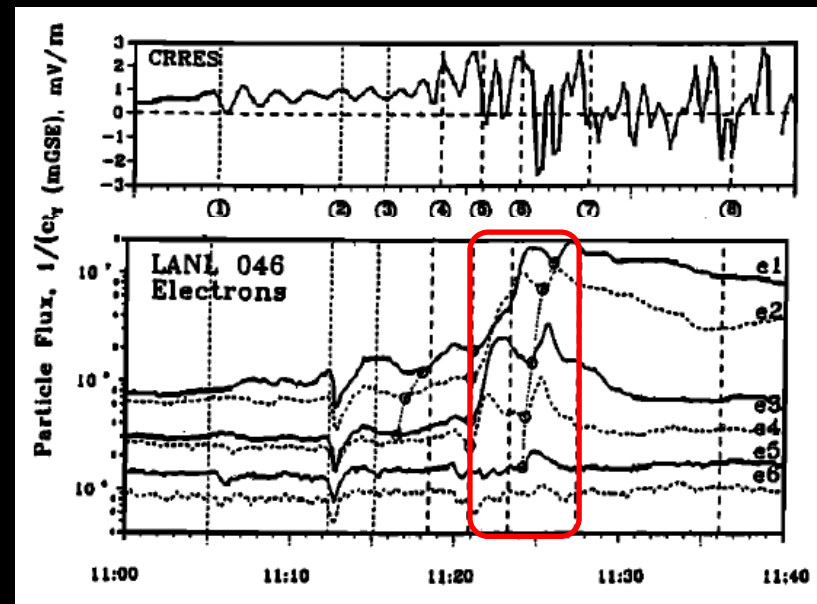
1.2 MeV (放射線帯)



電子の位相空間密度の時間変化



人工衛星による観測



Sergeev et al. (1998)

- 内部磁気圏の電子が振動しながら増加すること(電子の注入現象)が再現できた。
- 電子の注入現象は電磁流体的な力の「せめぎあい」の結果である。

放射線帯形成の物理

安心・安全な
宇宙の利用



放射線帯形成

内部加速

外部供給

熱いプラズマの輸送
(リングカレント)

冷たいプラズマの輸送
(プラズマ圏)

非断熱的粒子加速

拡散的輸送

直接的輸送

サブストーム

対流

リフィリング

対流

サブストーム

波動の準線形的成長

波動の非線形的成長

磁気脈動

サブストーム

急始

サブストーム



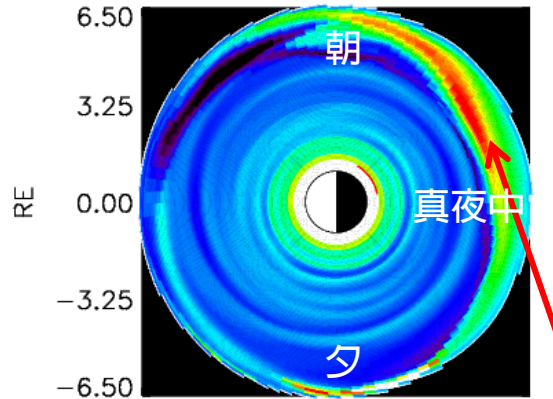
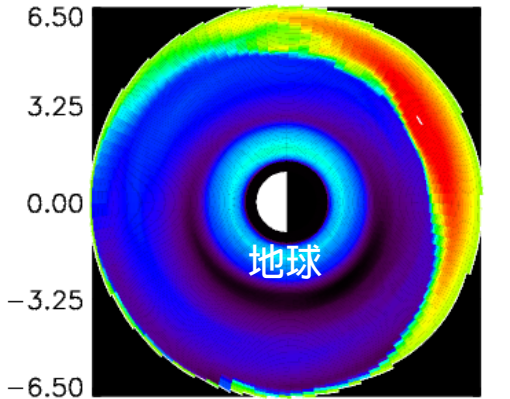
サブストーム時に電子が効率良く加速される現場

run61_12

1:14:38 UT

熱い電子の圧力

熱い電子の温度異方性



温度異方性が高い



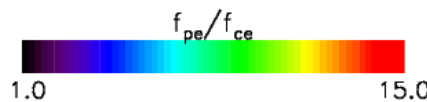
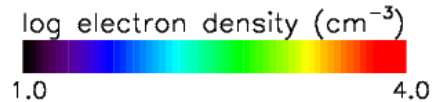
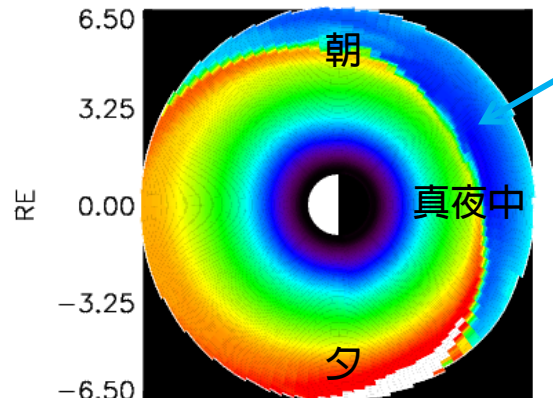
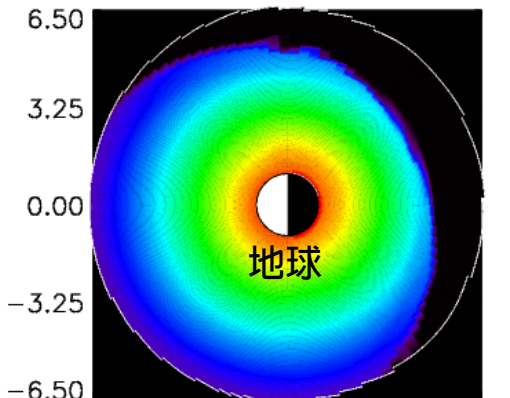
電磁波動が励起され、
電子が効率よく加速される
(放射線帯生成の現場)



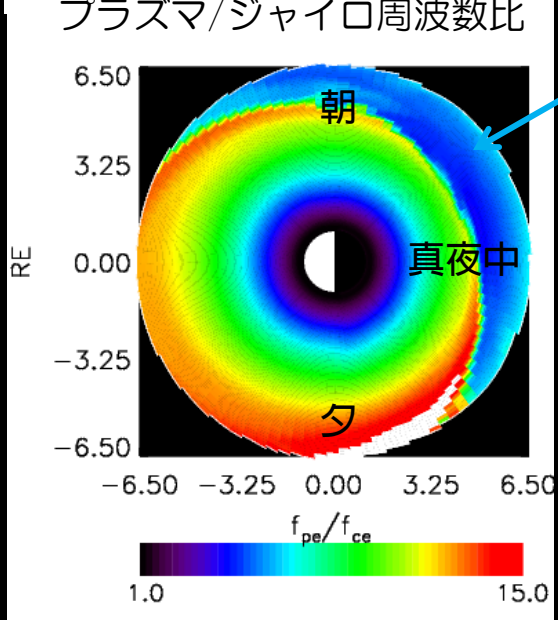
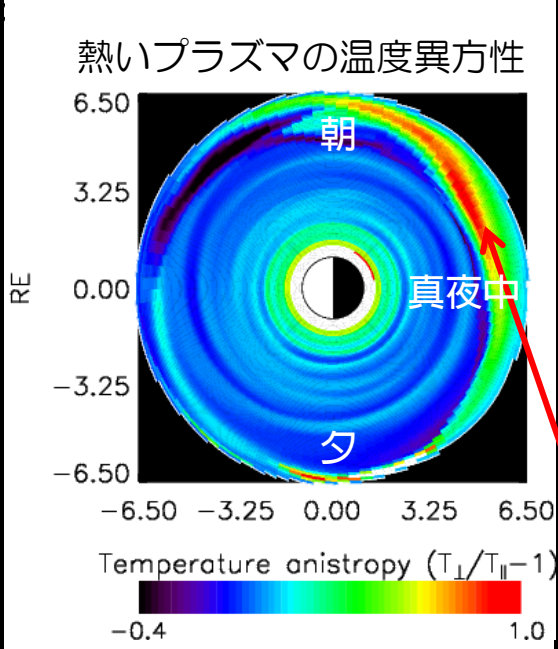
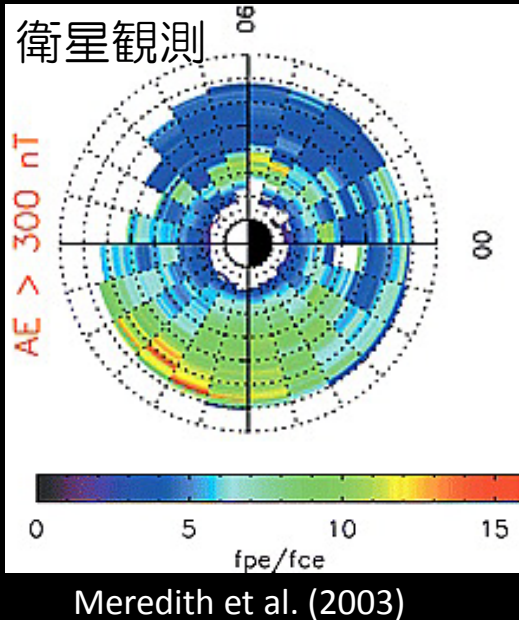
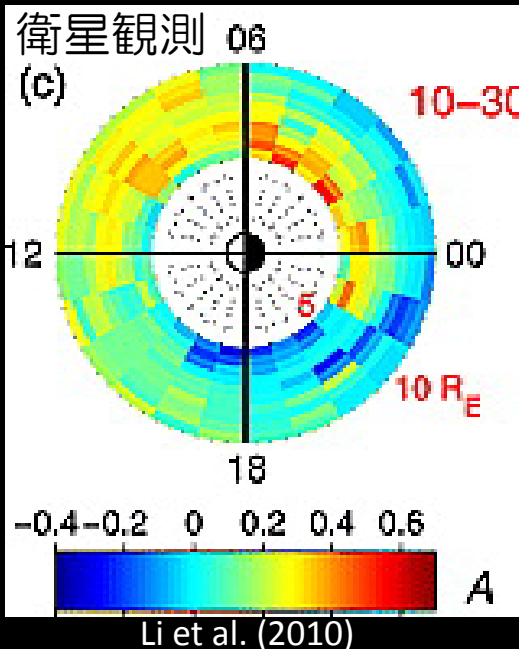
プラズマ/ジャイロ周波数比が低い

冷たい電子の密度

プラズマ/ジャイロ周波数比



サブストーム時に電子が効率良く加速される現場



温度異方性が高い

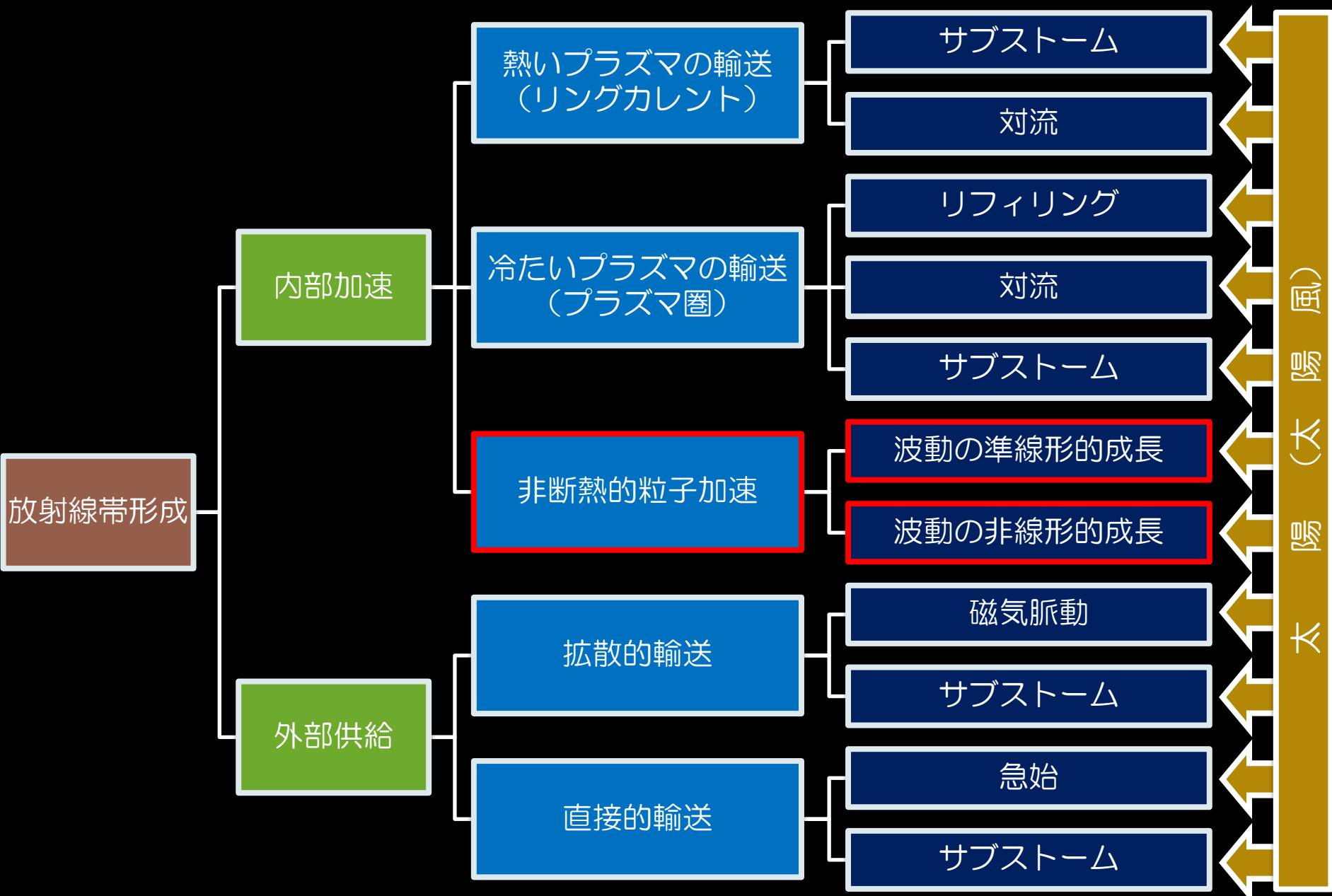


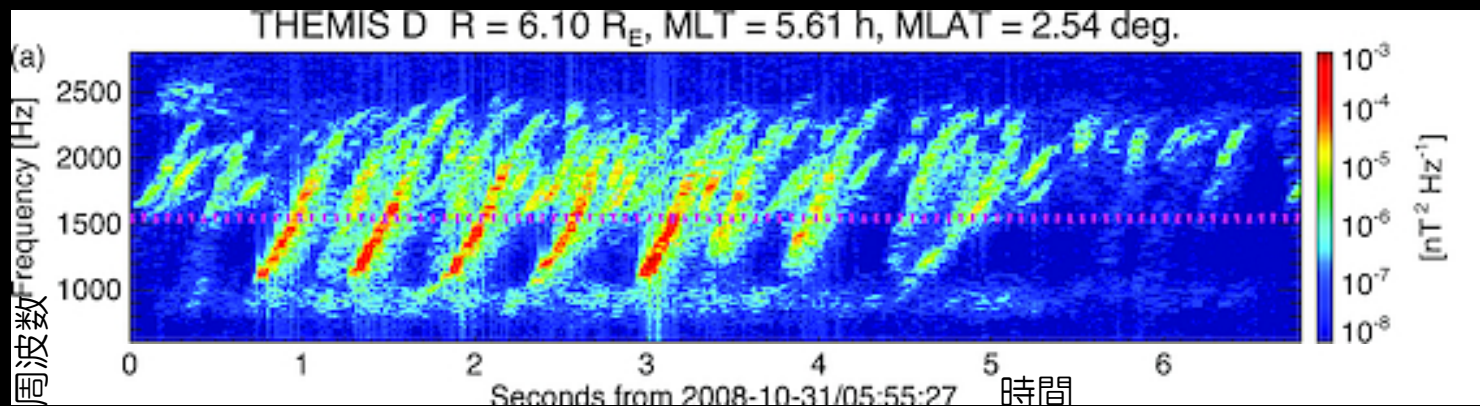
電磁波動が励起され、
電子が効率よく加速される
(放射線帯生成の現場)



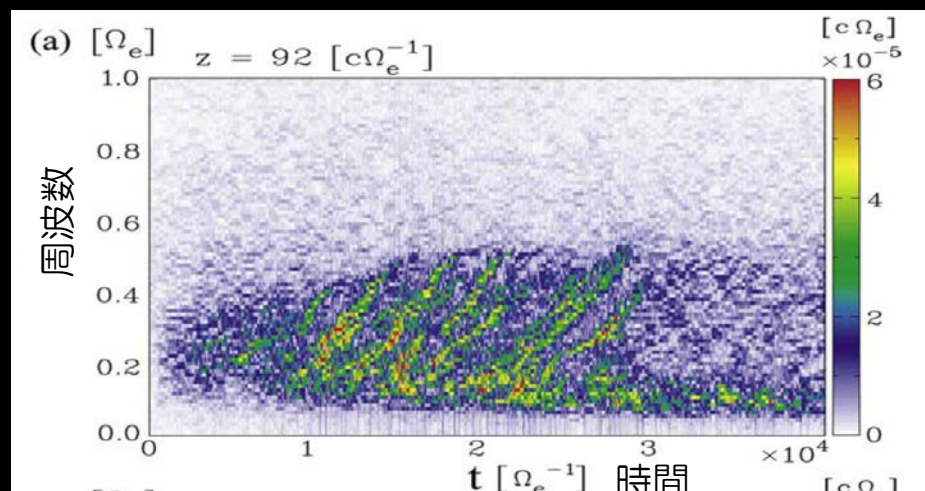
プラズマ/ジャイロ周波数比が低い

放射線帯形成の物理

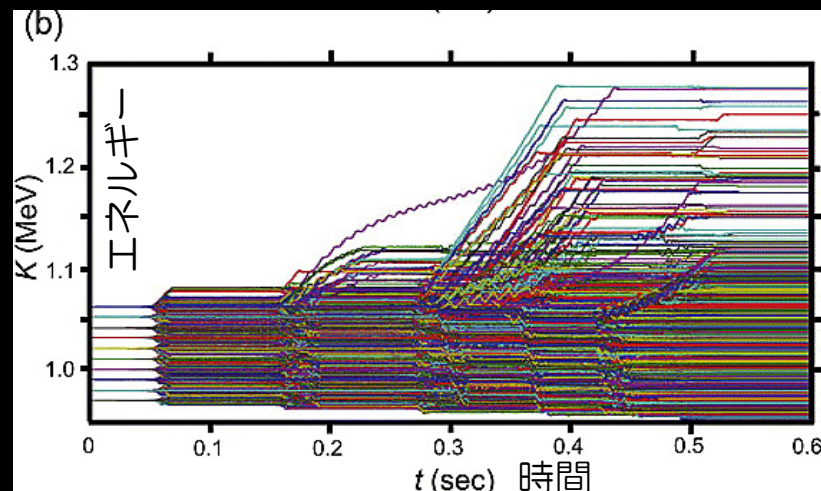




Kurita et al. (2012)



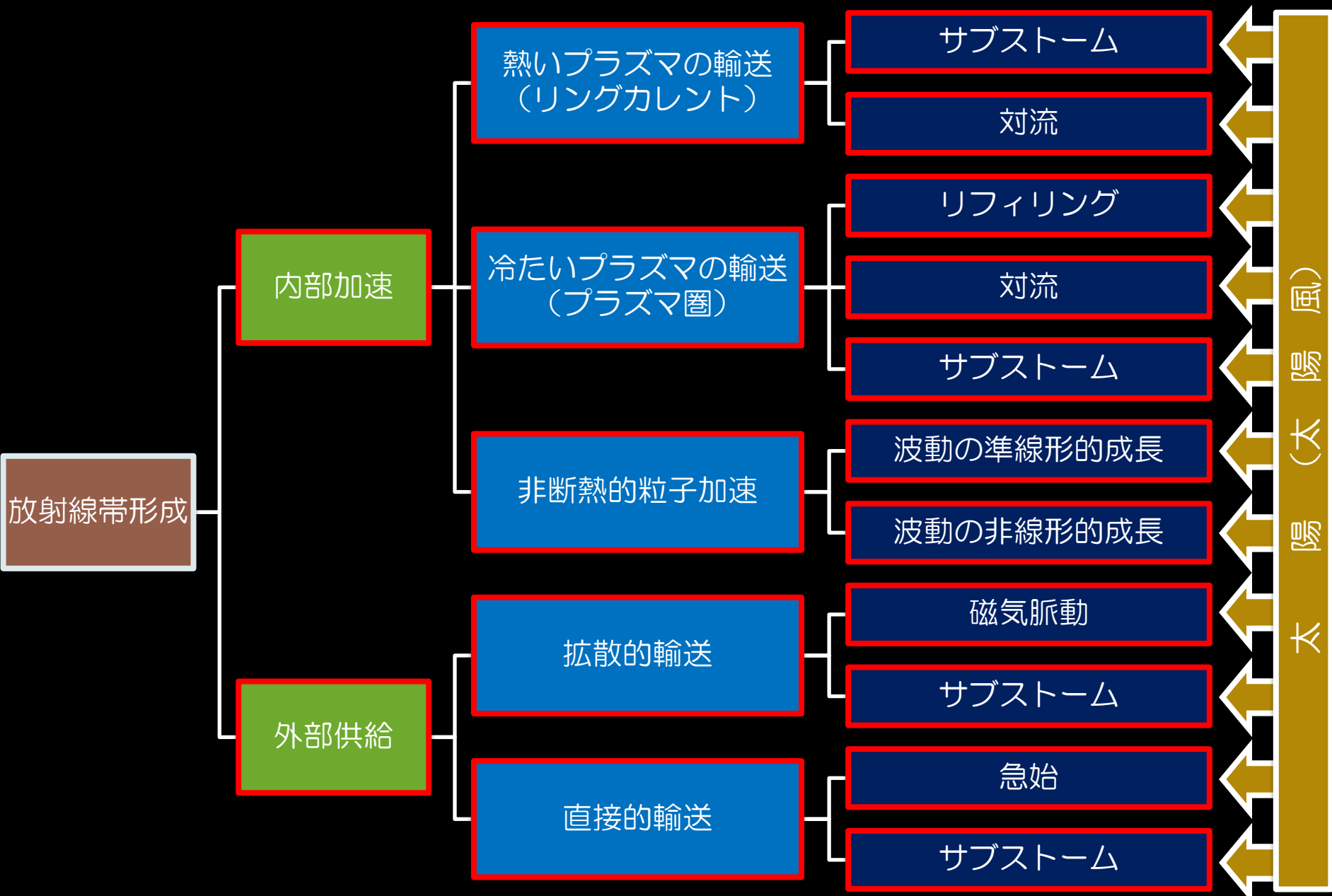
Katoh and Omura (2007)



Furuya et al. (2008)

- 計算機シミュレーションに基づいて提唱してきたコーラス放射の非線形成長理論を最近の衛星観測のデータ解析で初めて実証した。

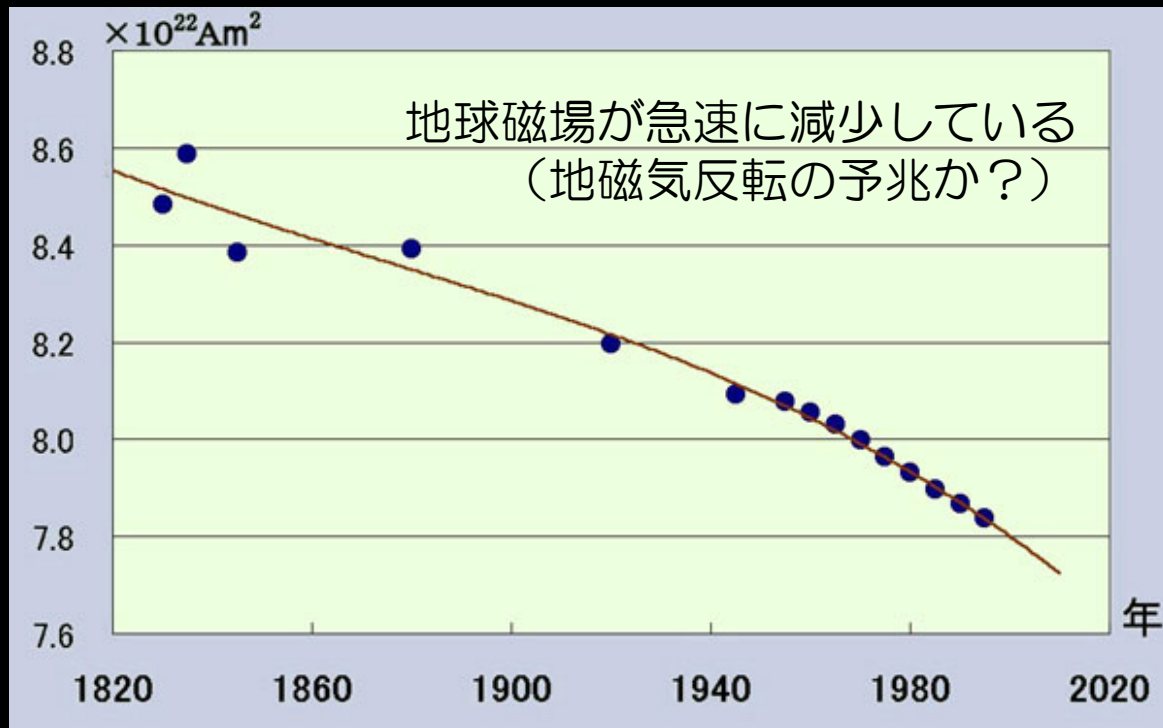
放射線帯形成の解明(現在進行中)



明日の宇宙の
天気は？



© NASA



気象庁地磁気観測所作成

- 宇宙の状態を物理的に正しく理解する。
- 数日後の宇宙天気の予測精度を向上する。
- 数100年に1度の巨大太陽爆発に対する地球の影響を予測する。
- 1~2千年後、地球磁場が大幅に弱まった（消失した）時の影響を予測し、対策の指針とする。
- 約63億年後、太陽が膨張（赤色巨星化）して地球は生存圏として存在しえるか？

- 「放射線帯増加」は、人工衛星や宇宙飛行士の安全を脅かす宇宙圏で起こる劇的な現象の一つである。
- 数値シミュレーションを駆使し、観測と比較しながら、複雑な放射線帯のダイナミクスの解明を行っている。
- 短期的、長期的な宇宙環境の変動に対して人類はどのような対処をすべきか、数値シミュレーションに基づき判断の指針を提供したい。