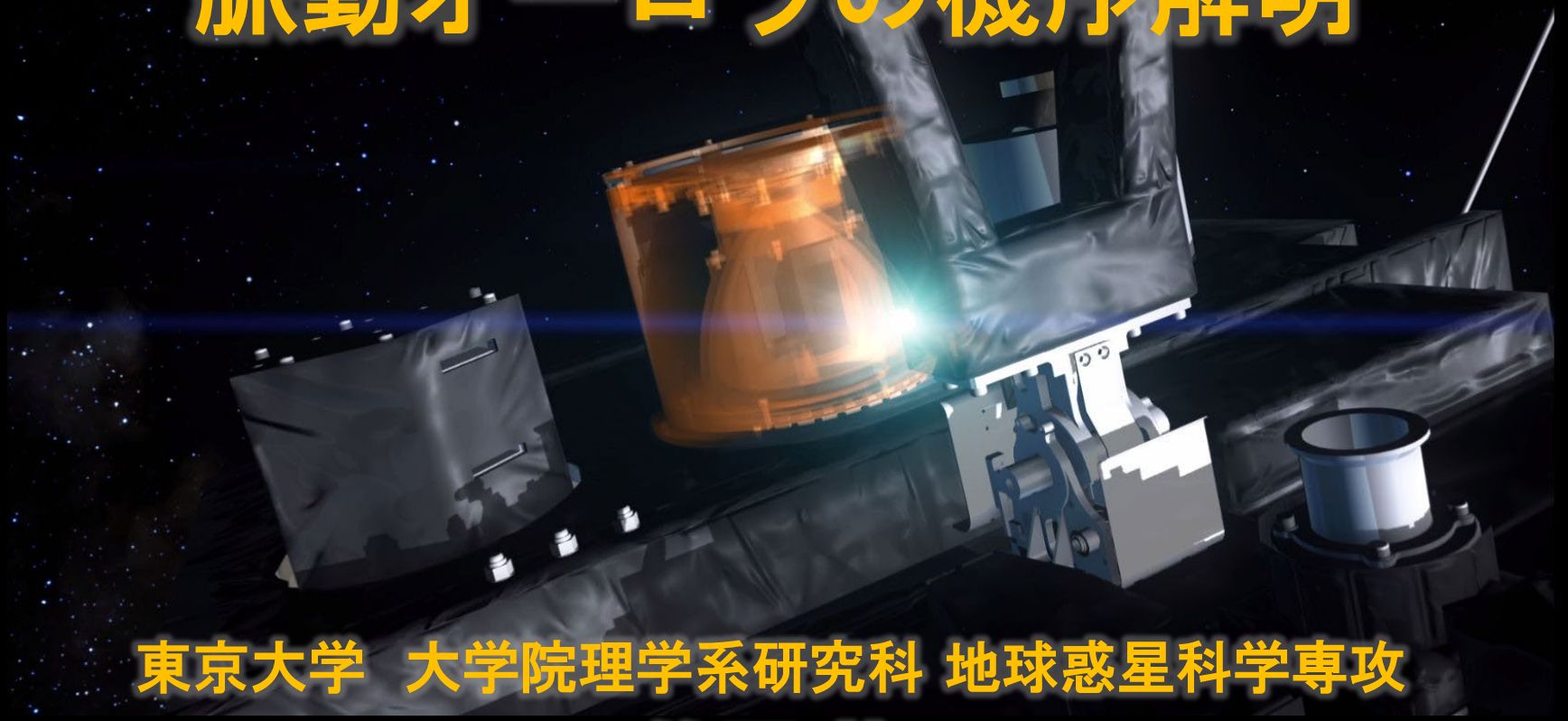
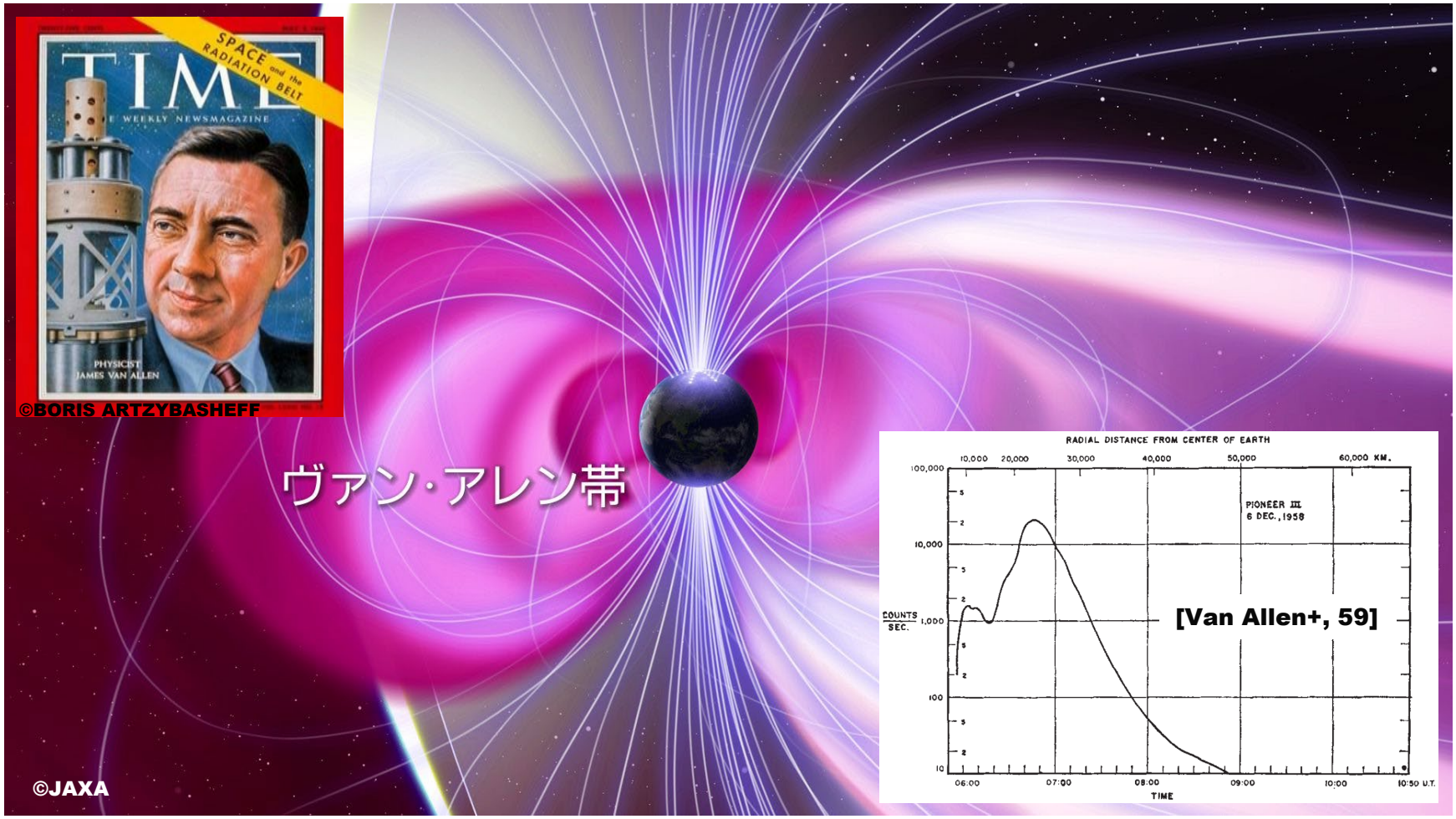
ERG(あらせ)衛星の観測による波動粒子相互作用の実証と脈動オーロラの機序解明



東京大学　大学院理学系研究科 地球惑星科学専攻

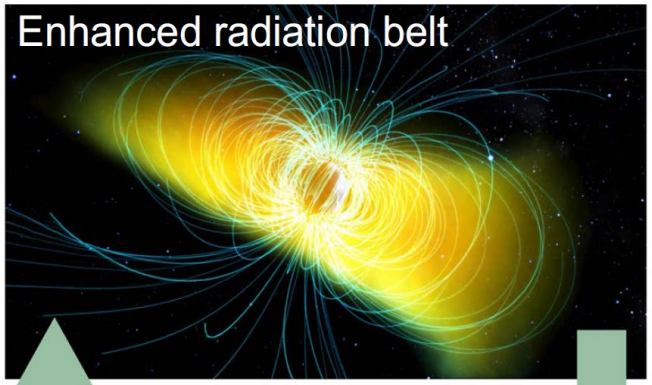
笠原 慧

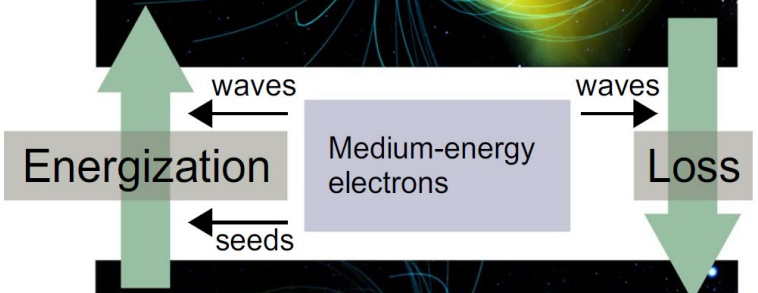
ERGの探査する放射線帯（ヴァン・アレン帯）

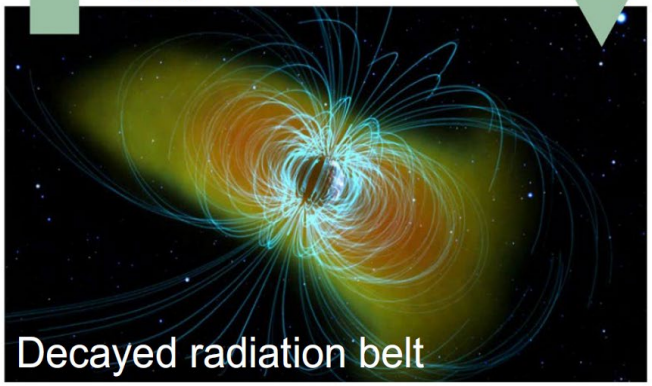


- 高エネルギー（>MeV）の電子が地球を取り囲む雲のように存在
- 太陽風電子（~10 eV）や電離圏電子（< 1eV）が一体どうやってそこまで加速されるのか？？？

放射線帯の変動と波動粒子相互作用

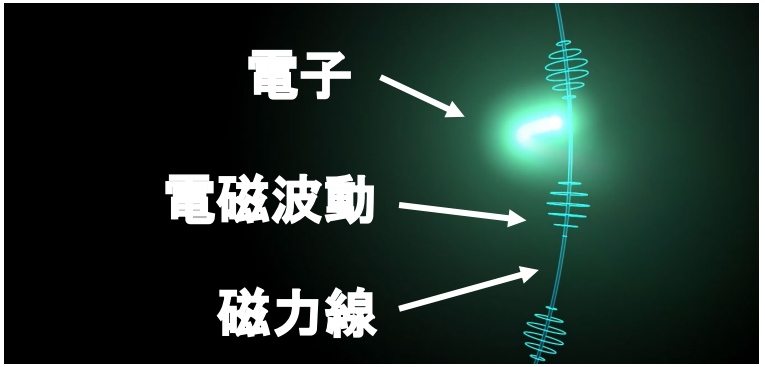






直接観測

波動粒子相互作用
粒子が波を励起
波が粒子を加速･散乱(➔消失)



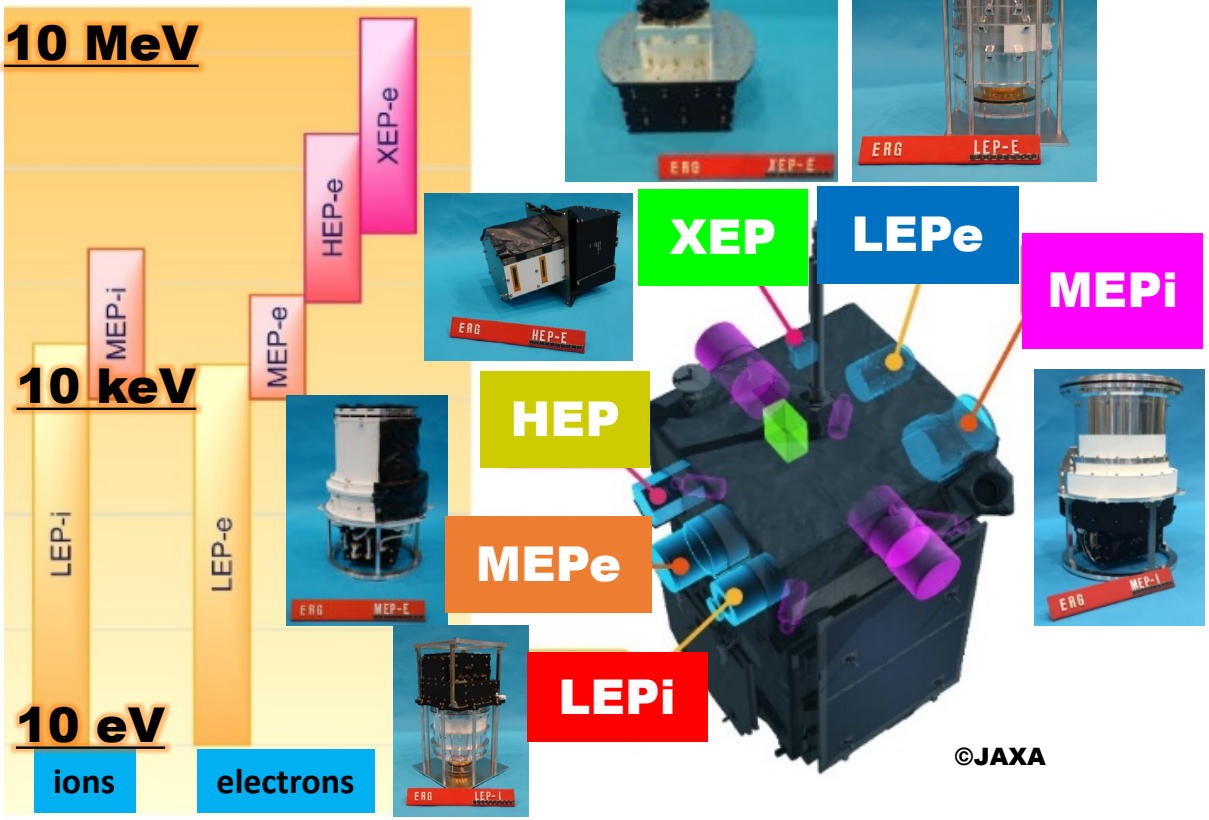
- 放射線帯は消長を繰り返す
- 粒子加速と粒子消失の両方を定量的に理解しなければならない
- 波動粒子相互作用を直接観測する

ERG搭載の粒子機器

放射線帯電子 (MeV)

波動励起のエネルギー源 (keV)

波動の特性を決める (eV)

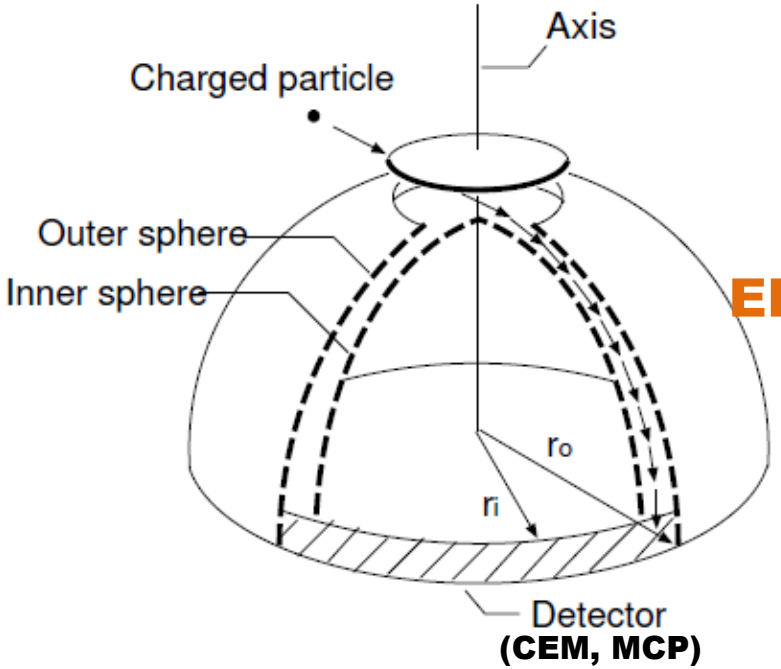


- 広いエネルギーレンジを複数の観測器でカバーする
- 中間エネルギー電子が励起する電磁波動は高エネルギー電子の生成・消失に寄与する(と予想されている)ので重要

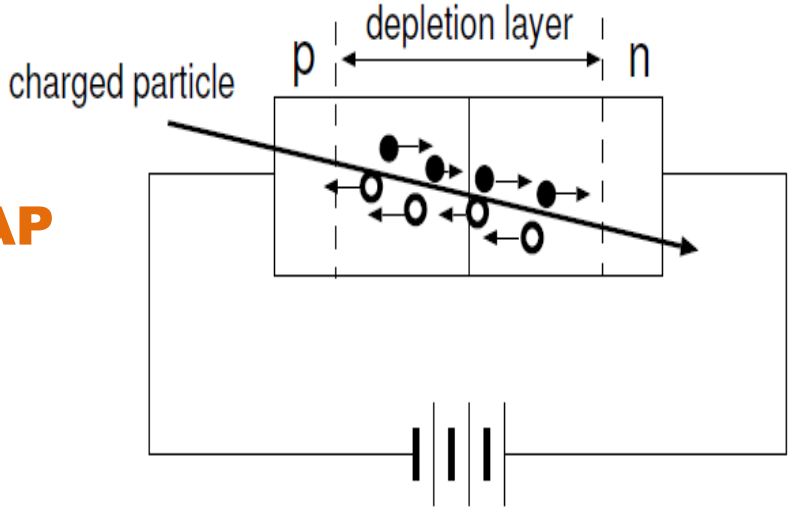
LEPの原理

HEPの原理

1eV　　1keV　　1MeV　　エネルギー



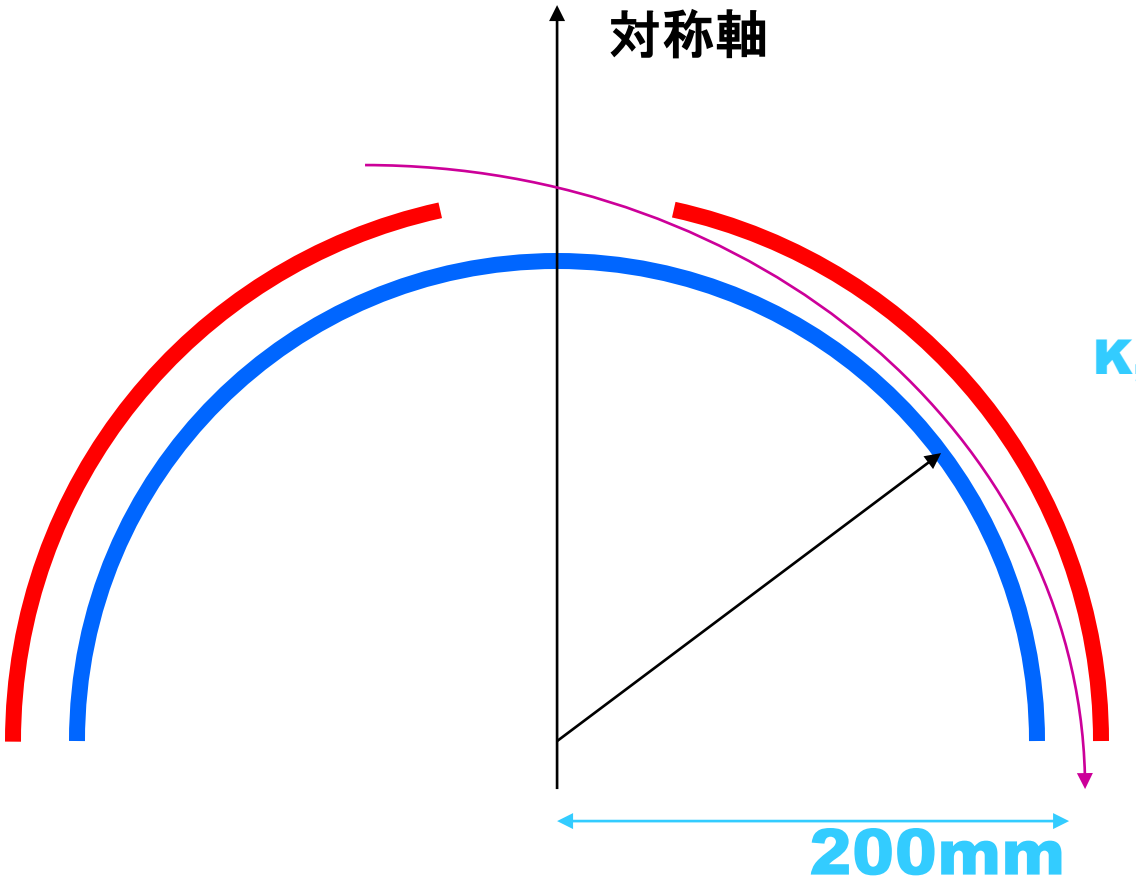
従来:
ENERGY GAP



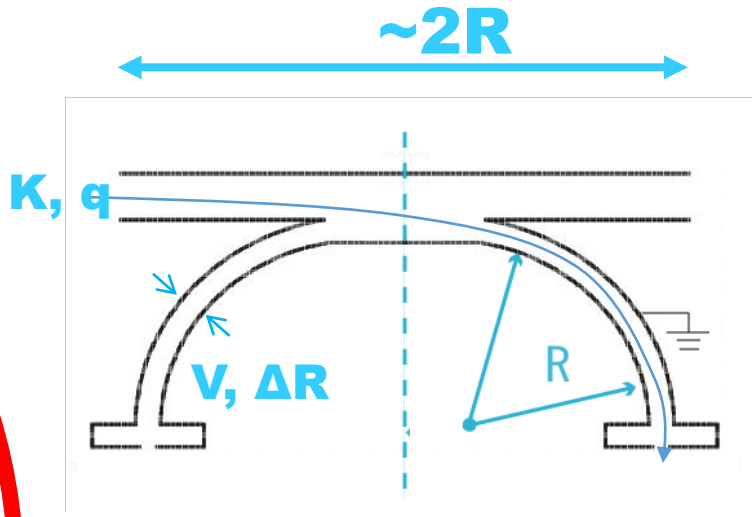
- 静電分析器を用いる
  - 電場で粒子を曲げる
- 高エネルギー側への拡張？
  - 分析器サイズが大きくなる

- 半導体素子(Siなど)を用いる
  - 生成される電荷量を計測
- 低エネルギー側への拡張？
  - 十分な大きさの信号が出ない

MEPの開発：静電分析器



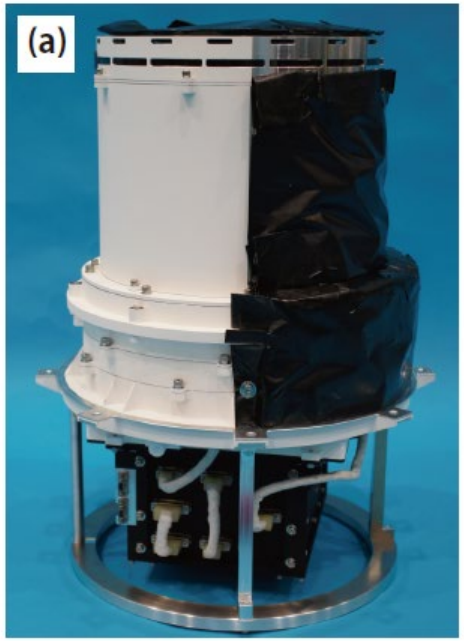
従来型

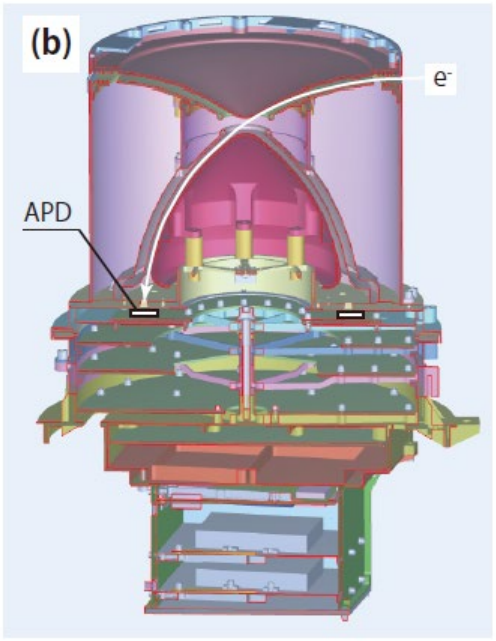


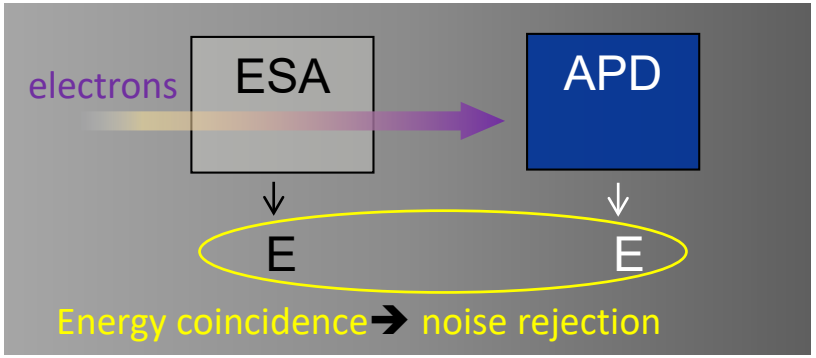
$$(\text{遠心力})\frac{2K}{R} = \frac{qV}{\Delta R}(\text{電場})$$

- 1kV/mmの電場で~100 keVまで計測するには半径200mmが必要
- 従来型では半径200mm ➔直径400mm ➔衛星搭載困難
- 新たなデザインにより直径200mmを実現 [Kasahara+, Rev. Sci. Instrum., 2006]

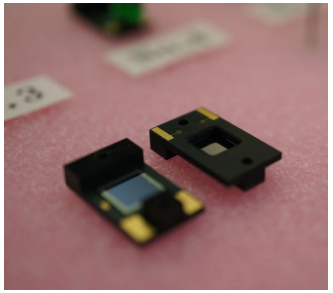
MEPの開発：放射線対策







[Kasahara+18, EPS]

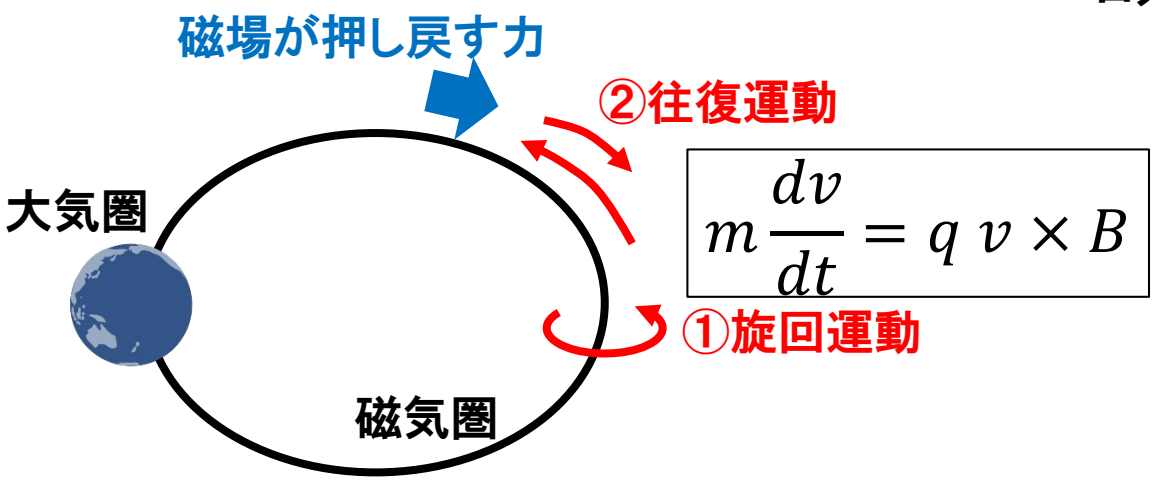


- 放射線帯の高エネルギー粒子は筐体を貫通して検出器を鳴らす
  - ➔背景雑音になる
- 静電分析器によるエネルギー決定＋APDによるエネルギー決定
  - ➔両エネルギーが一致しなければ雑音とみなす

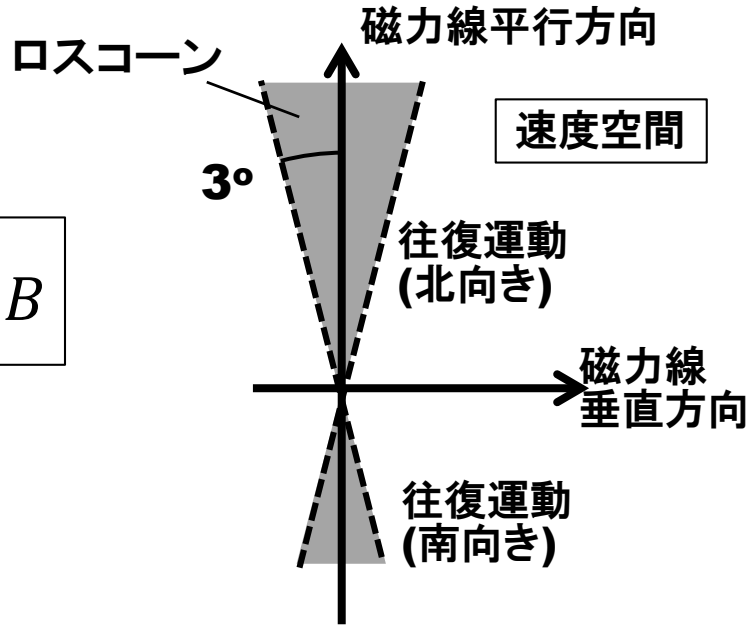
明滅（脈動）するオーロラ

- オーロラパッチのサイズ: 10 km - 1000 km
- 明滅周期:2 秒 - 40 秒

磁気圏における電子の挙動



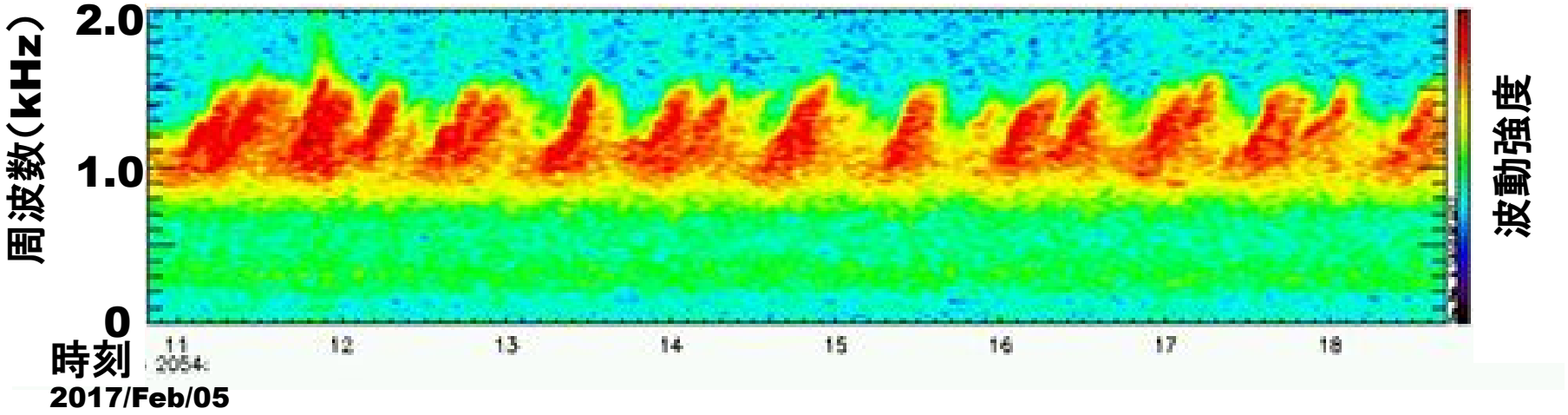
$$m\frac{dv}{dt} = q\,v \times B$$



- 磁力線に巻きつく旋回運動
- 磁力線に沿った南北往復運動
  - ただし電子の速度が磁力線に対して成す角<3°であれば，大気圏に届く
- オーロラを発光させるには，何らかのメカニズムで電子の往復運動を破る必要がある➔ 今回の場合は「コーラス波動」

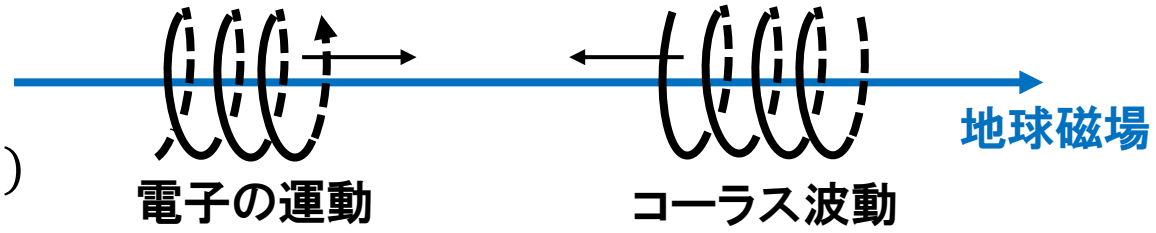
コーラス波動との共鳴（波動粒子相互作用）

（金沢大学プレスリリース資料より
https://www.kanazawa-u.ac.jp/rd/45590）



- 宇宙に鳴り響く電磁波の一種（地球・惑星磁気圏で頻繁に観測される）
- 波動の電磁場が地球磁場に巻きつくように回転しながら伝搬する

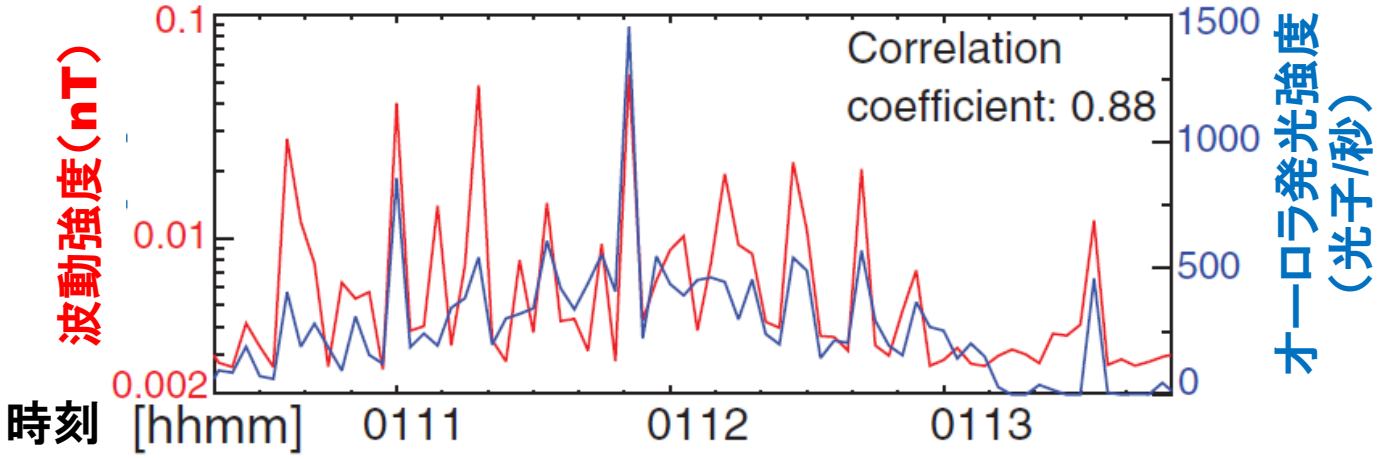
$$m\frac{dv}{dt} = q\left(E_w + v \times (B + B_w)\right)$$



- 「共鳴」する波動の電磁場により電子の往復運動を破ると思われる

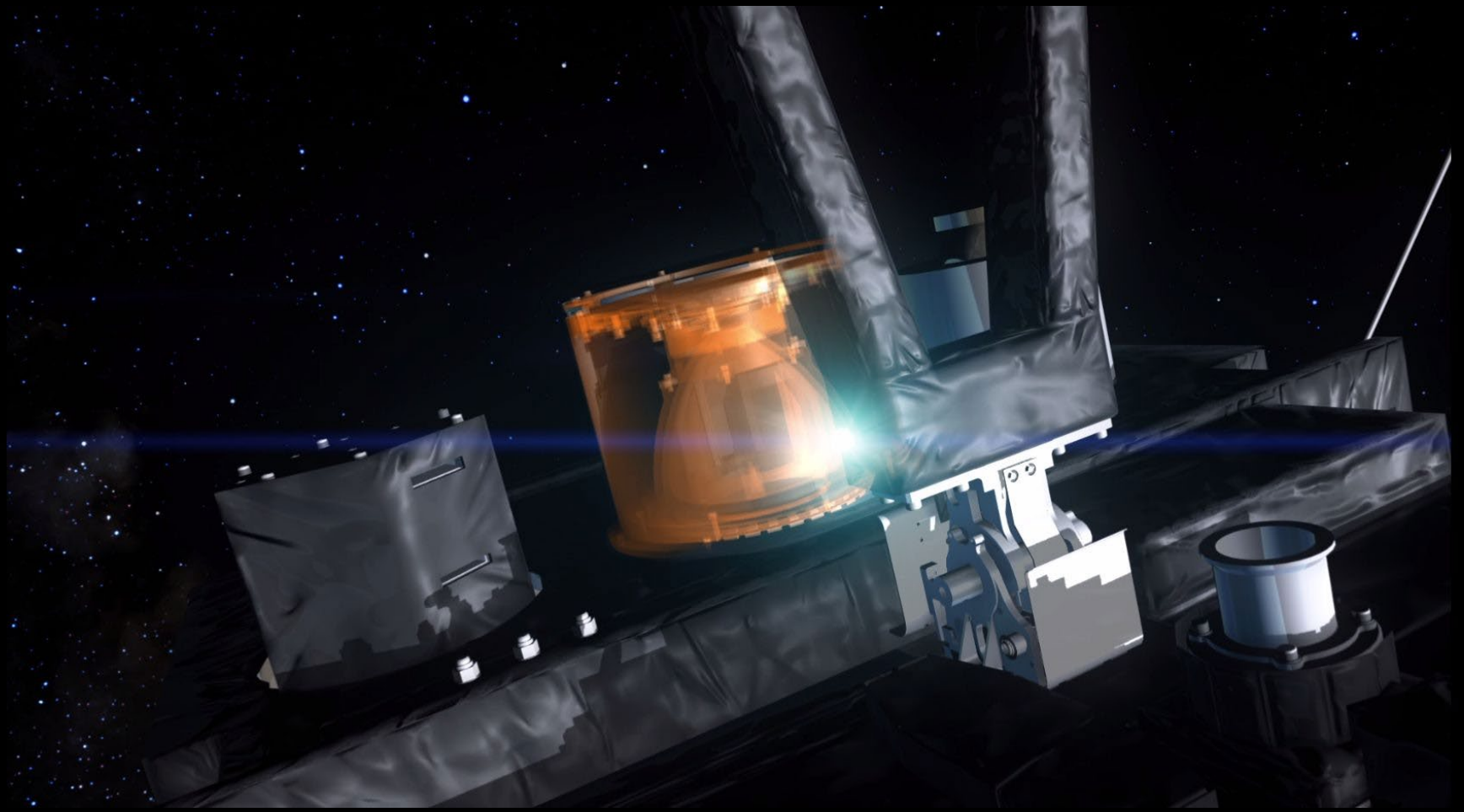
過去の観測

（Nishimura+2010, Scienceを改変）



- コーラス波動とオーロラ発光の高い相関
  - 初期報告はTsuruda+1981 (Canadian J. Phys.)
- 【予想】コーラス波動が磁気圏の電子の往復運動を破るのだろう
- しかし，この観測では，電子フラックスに強弱は見られなかった
  - 磁力線に沿って往復運動せずに大気に降り込む「隠された」電子を，高い角度分解能で抽出する事が必要

MEP-eによる観測



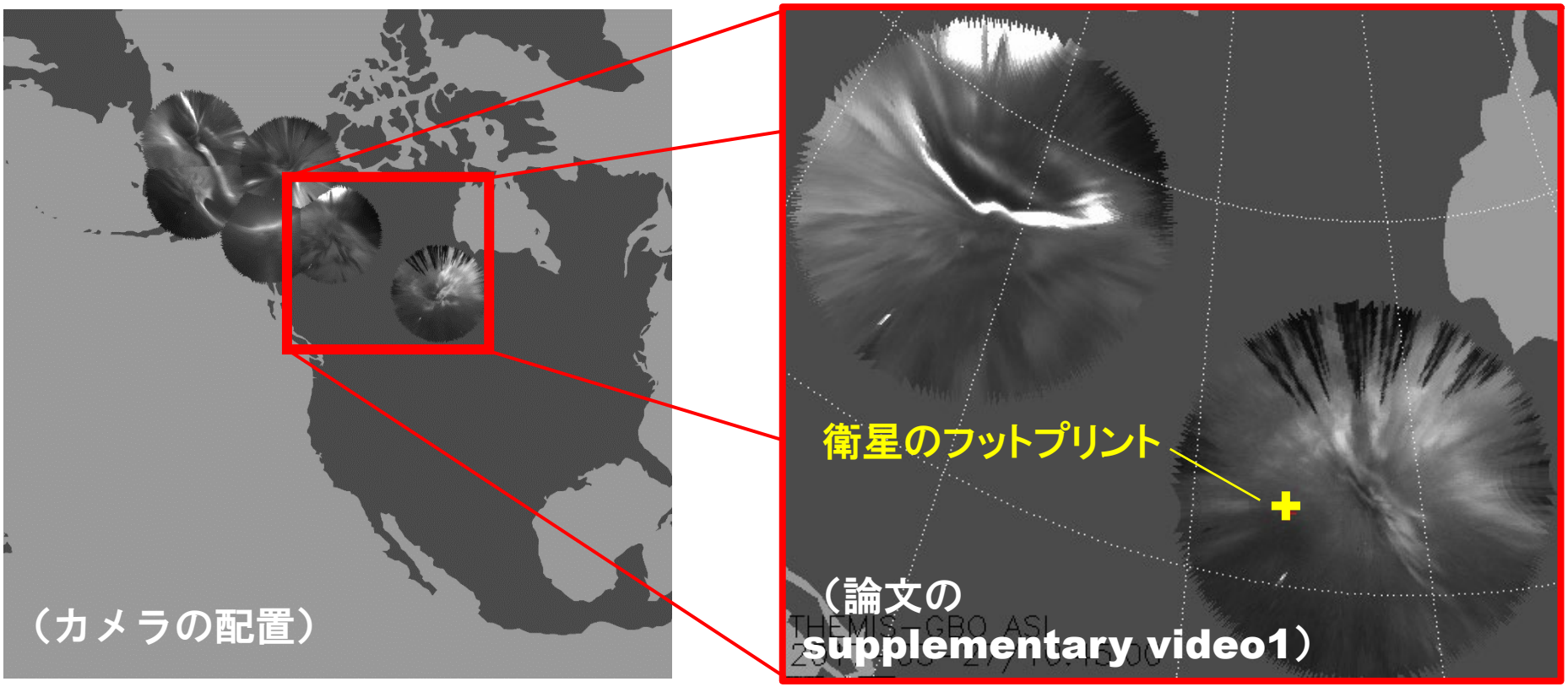
- 中間エネルギー電子分析器（MEP-e）:
  - 7-87keVの電子のエネルギーと飛来方向を観測
  - 高い角度分解能（半値全幅3.5° 以下）が特徴 ➔「隠された」降込み電子を観測可能（注:これまでの類似のセンサは10-20° 程度）

不安

- 脈動オーロラの発生時に，
  - 地上のカメラが脈動オーロラをはっきりと捉え，かつ
  - ERGが磁力線を介してそのカメラにつながっており，かつ
  - ERGが「波動粒子相互作用」の現場にいる
- という幸運をつかむことができるだろうか？

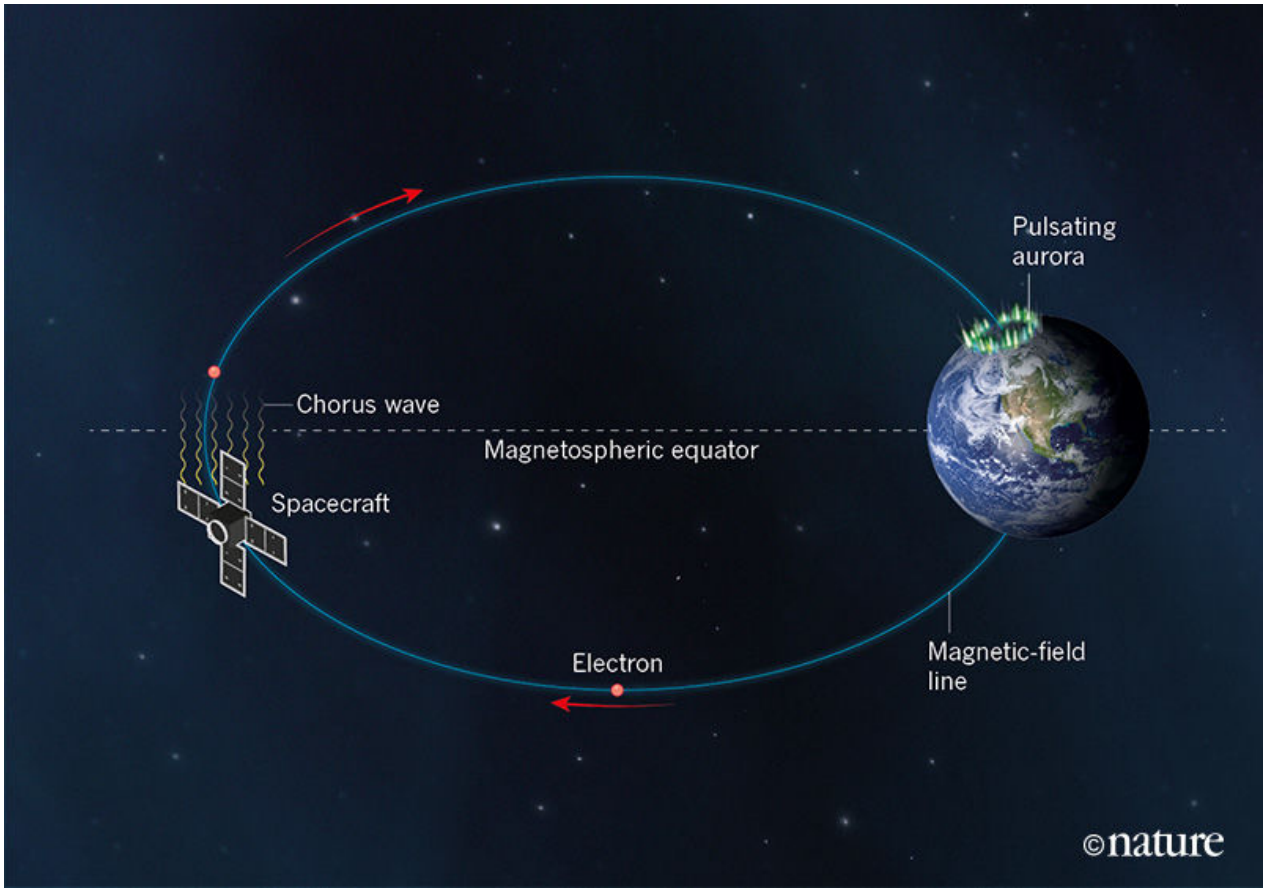
- 仮に理論予測が正しかったとしても，複数の現象が複雑に重畳して発生していることの多い宇宙空間で，予測に合う観測データを抽出できるだろうか？
  - 他の現象に隠されてしまって，はっきりとした結論が出せないのではないだろうか？

今回の観測（地上全天カメラ）



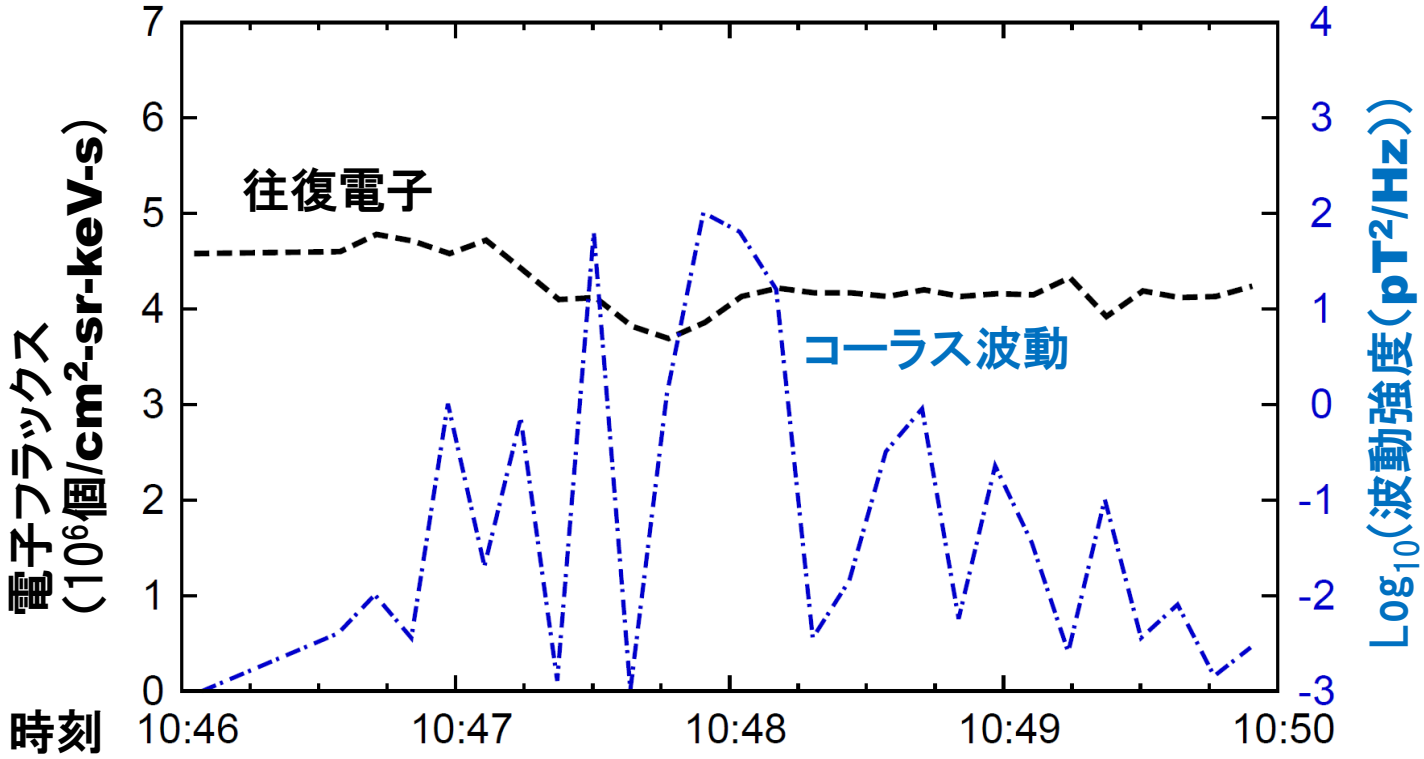
- NASAのTHEMISプロジェクト全天オーロラカメラの動画
- 顕著な脈動オーロラ
- あらせ衛星のフットプリントがカメラの視野に入っている
  - ➔カメラでとらえた脈動オーロラにつながる磁力線上にあらせ衛星がいたはず

ERG衛星の観測位置



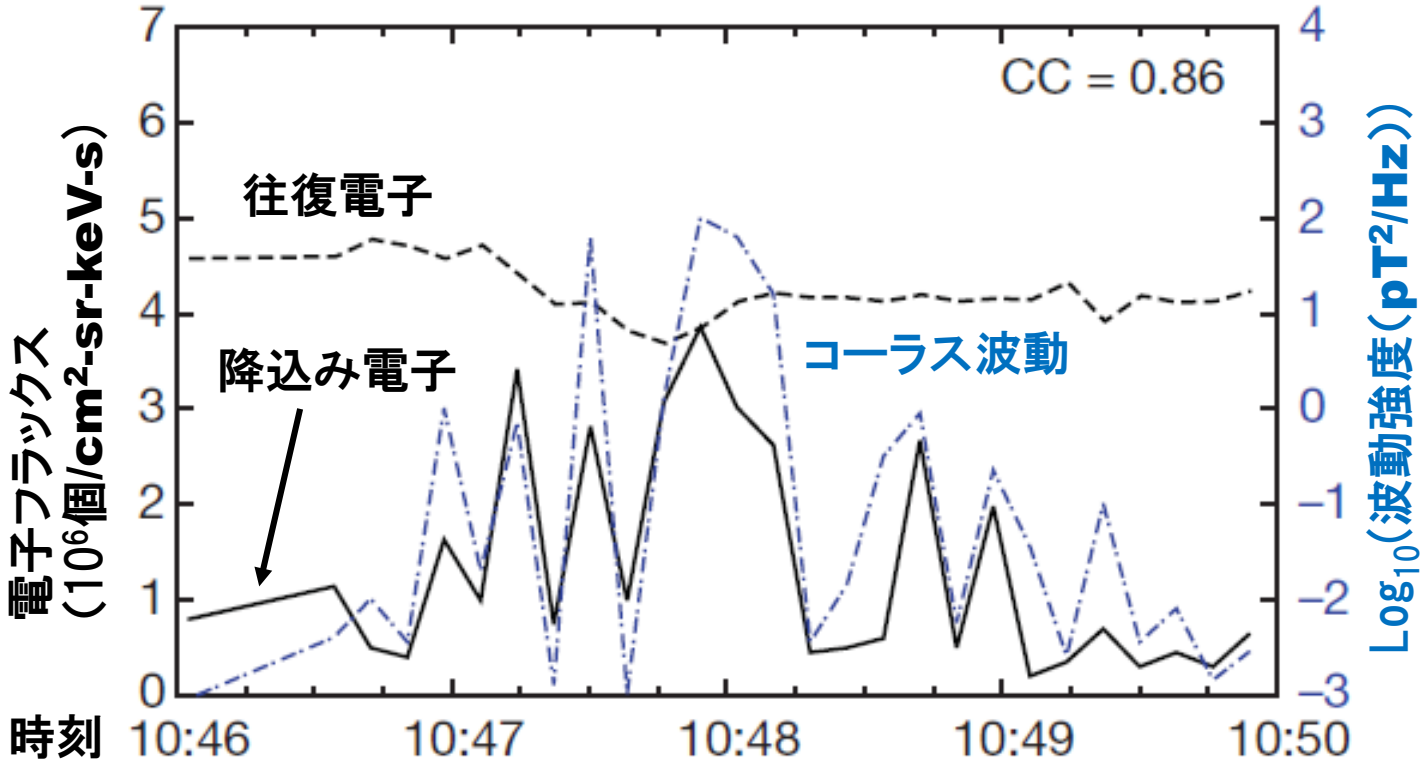
- THEMISの全天カメラは高層大気で発光するオーロラを地上から観測していた
- あらせ衛星は磁気圏（高度30,000km程度）で電子および電磁場を観測していた

今回の観測（ERG衛星）



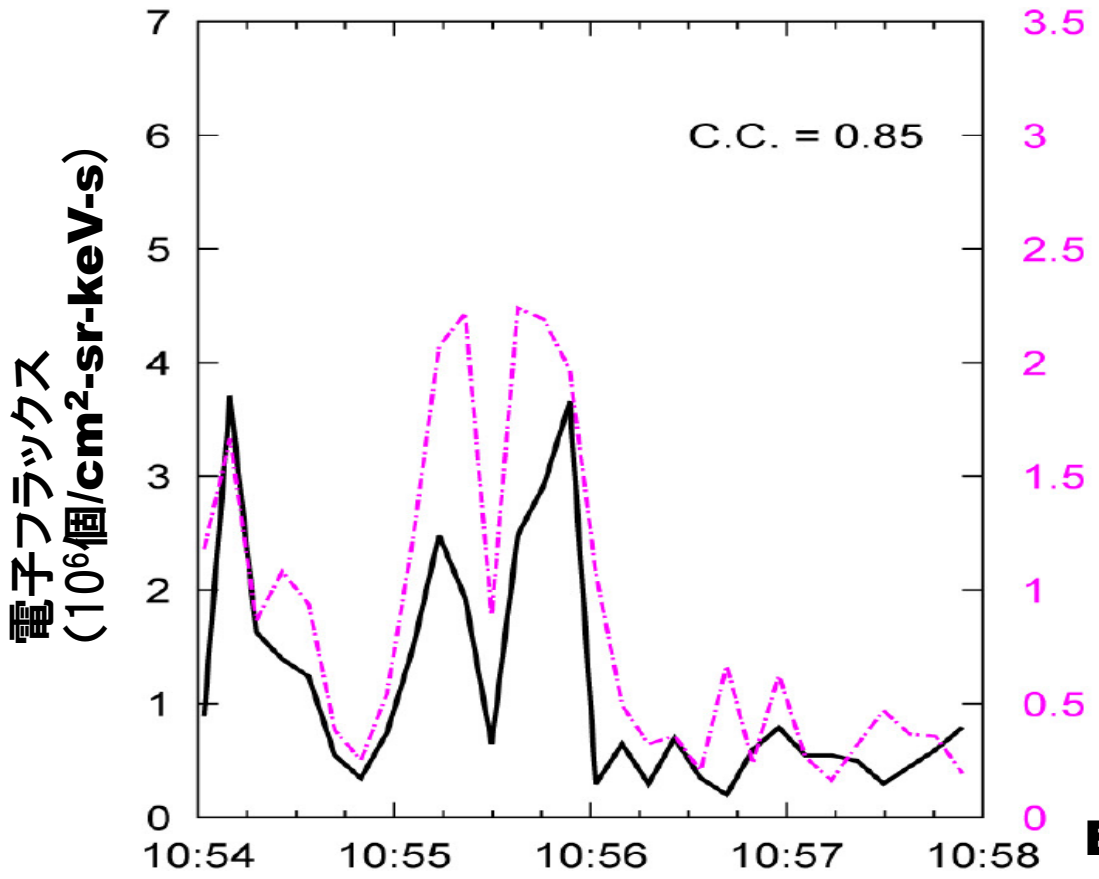
- 往復運動電子のフラックスはほとんど変化していない
- コーラス波動との相関は見えない

今回の観測（ERG衛星）



- 往復運動電子のフラックスはほとんど変化していない
- コーラス波動と降り込み電子フラックスの間に高い相関（相関係数0.86）
  - 「隠れた」電子はコーラスに合わせて密かに揺れていた
- 降り込み電子のフラックスはオーロラ発光に十分な強度であった

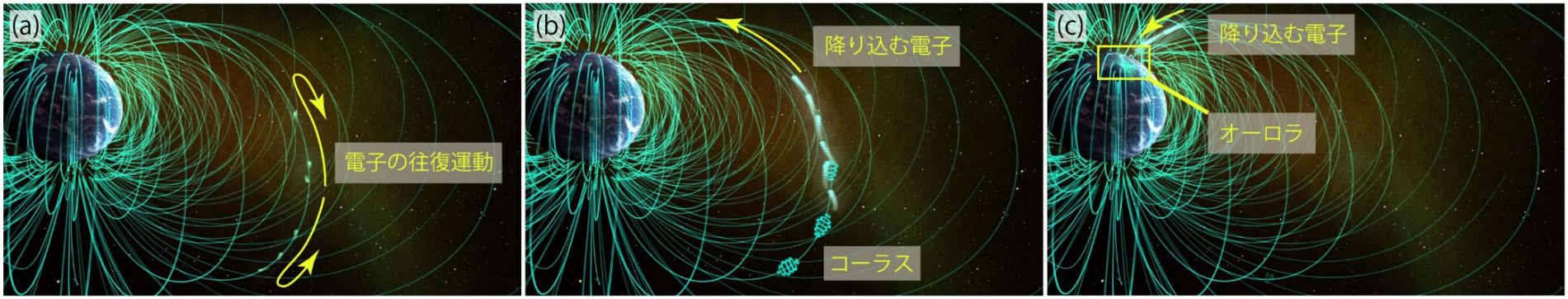
今回の観測（ERG衛星）



（論文の
Extended data Figure2
を改変）

- 降り込み電子フラックスとオーロラ強度の間に高い相関

観測のまとめ・解釈



- **ERG（あらせ）衛星のプラズマ観測データを解析した**
  - **2017/03/27 (定常観測開始から4日目)の事例**
  - **地上で観測された脈動オーロラに対応する場所にERG衛星はいた**
- **磁気圏の「隠された」降り込み電子と「コーラス」波動の高い相関が得られた**
  - **降り込み電子とオーロラ強度の間にも高い相関が得られた**
  - **高い角度分解能での電子観測で初めて可能になった**
- **「コーラス」波動に揺さぶられた電子が大気に降り注ぎオーロラが発生する，というシナリオを実証する決定的な結果**

意義・今後の課題

- 波動粒子相互作用，特に電子の散乱に関する理論的な予測を実証的に示した
  - 放射線帯電子の消失を理解するうえで重要なマイルストーン
  - 波動による粒子の散乱の理論は放射線帯に限らず，遍く宇宙プラズマ現象において重要

- 実は，コーラス波動の強弱の起源は未だ不明
  - コーラス波動のエネルギー源となる高エネルギー電子は今回使用した観測器**MEP-e**で計測している
  - ただし，波動の強弱は低エネルギープラズマや磁場強度にも依存するため，データを包括的に解析する事が必要

謝辞

- ERGプロジェクトを通じてかけがえのない体験をさせていただきました
- 「チームでなければ成しえない」プロジェクトには悪魔のような魅力がありました
- 機器開発および衛星開発を通じてお付き合いいただいたメーカの方々，ERGを成功裏に打ち上げてくださったイプシロンロケットプロジェクトの皆様にこの場を借りて改めて感謝の意を表します
- ERGプロジェクトメンバーをはじめとするISASの教育職・一般職・秘書の方々には，技術的・事務的・精神的にいつも支えていただきました

- たくさんの人に支えられ美しい宇宙の神秘を垣間見られたことに，深く感謝いたします