



荷電粒子が電磁場から受ける力を考慮した オーロラのアニメーション

Aurora Animation considering the force applied to charged-particles in an electromagnetic field

津郷 晶也, 玉木 徹, 金田 和文
広島大学大学院工学研究科





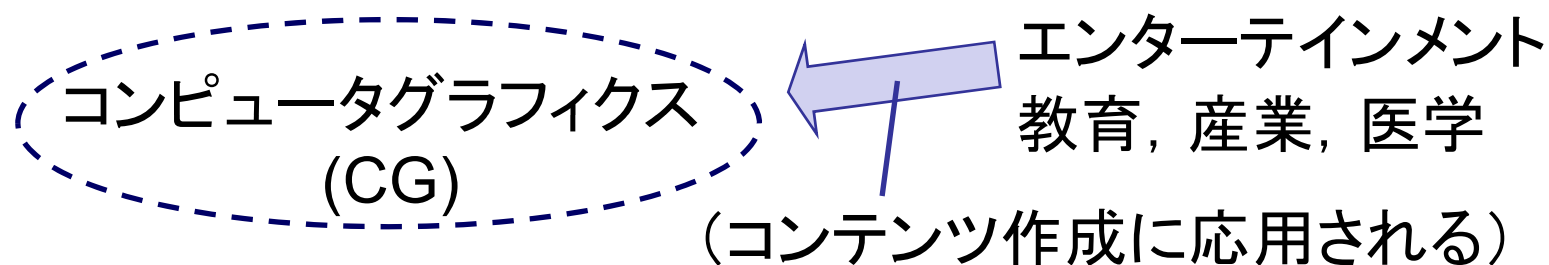
目次

- はじめに
 - 研究背景
 - オーロラの基本原理
 - 関連研究
 - 本研究の目的
- 提案手法
 - 概要
 - シミュレーションモデル
 - レンダリング
- 結果
- 考察
- まとめと今後の課題



研究背景

利用される分野



気象光学現象

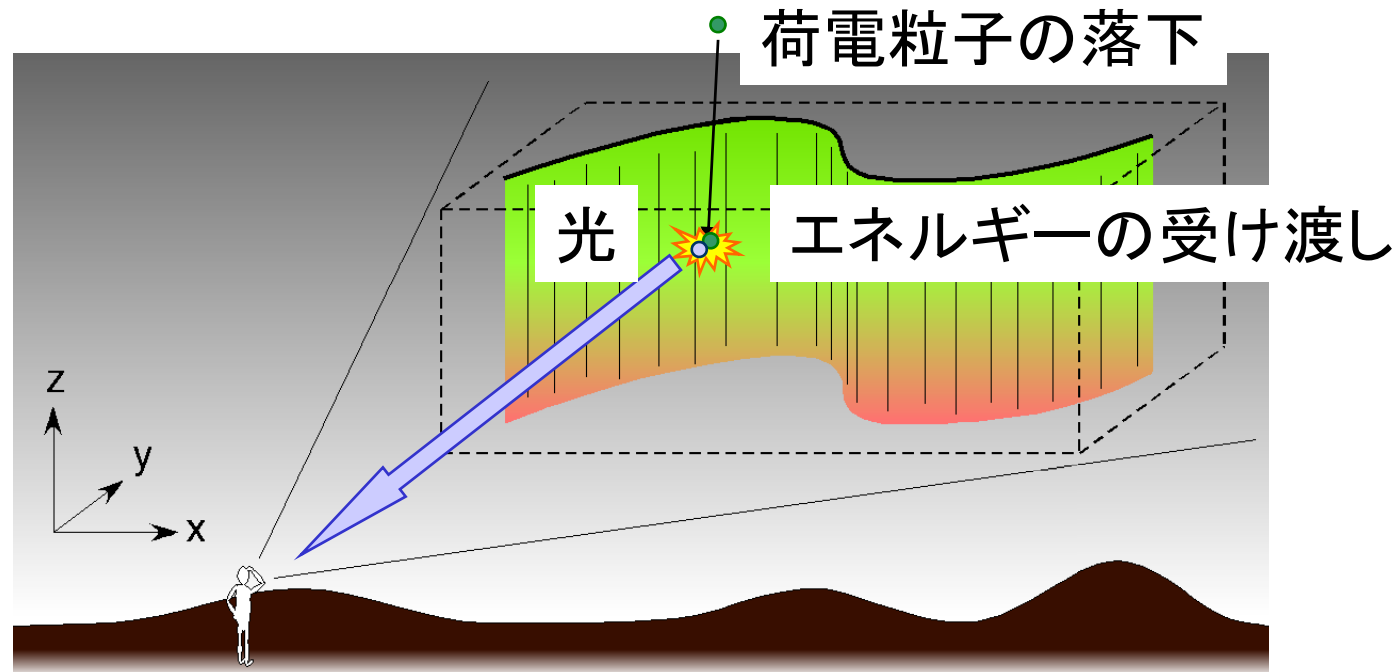
様々な題材が古くから研究されている

例 : オーロラ、虹、ハロ、雷、
蜃気楼・・・etc.



国立極地研究所[<http://polaris.nipr.ac.jp/~aurora/indexJ.html>]

オーロラ現象

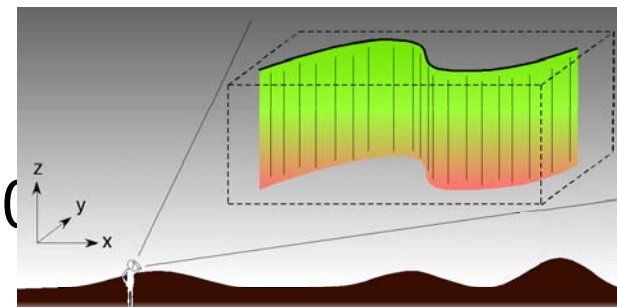


- 動きの基本構成
 - スプリットティング、回転運動
- 地球大気へ侵入してからの特徴
 - 衝突する大気粒子の種類によって色が異なる
 - 大気粒子密度は高度に依存

関連研究

静止画の研究

- G. Baranoski, J. Roken, et al. [2000]
形状はサイン曲線による近似
荷電粒子の落下に衝突でのぶれを考慮



- 米山, 近藤 [2005]
形状はサイン曲線による近似
荷電粒子の落下に大気粒子密度の変化を考慮

動画の研究

- G. Baranoski, J. Wan, et al. [2005]
オーロラ形状をメッシュとして扱う
荷電粒子に働くローレンツ力を考慮して動きを決定

本研究の目標

従来手法の問題点

- オーロラ形状の断裂（スプリッティング）が再現できていない
- 荷電粒子の落下方法でエネルギー変化が考慮されていない

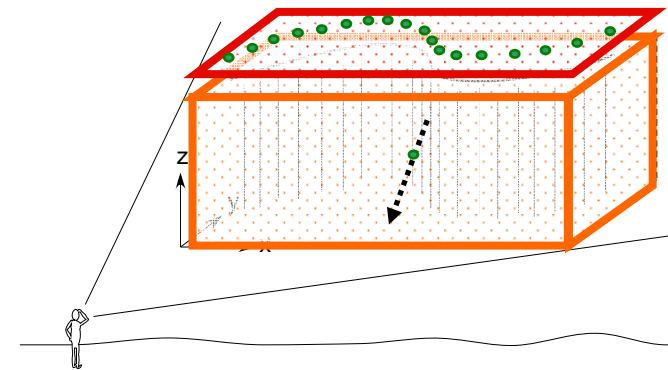
目標

オーロラのアニメーションを実現する

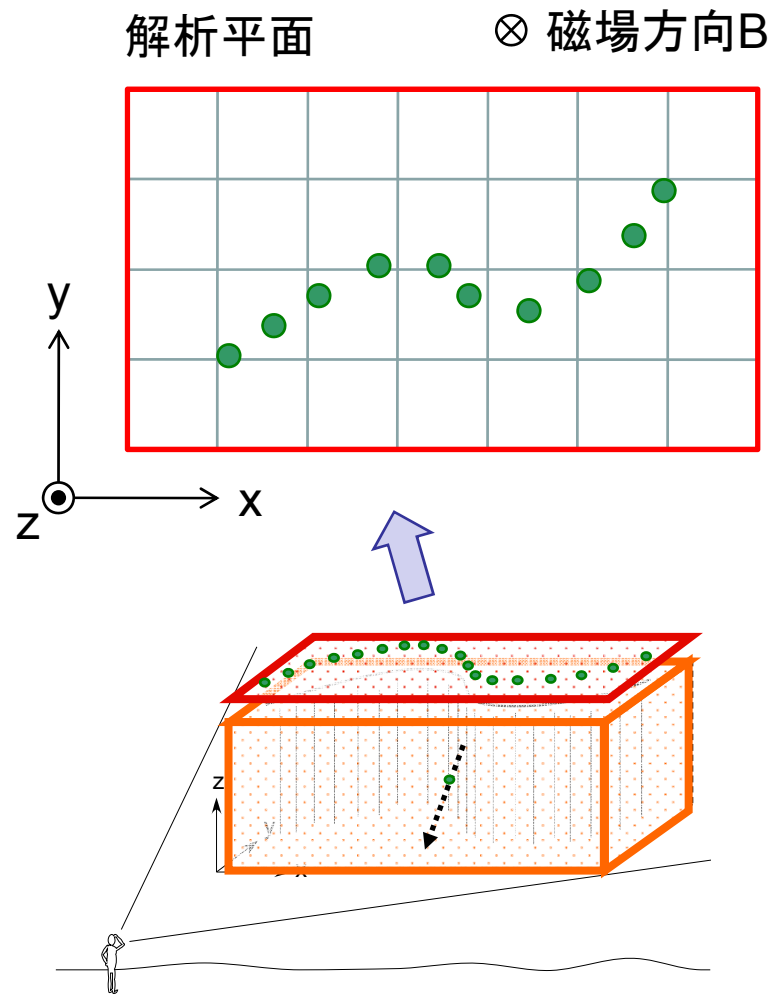
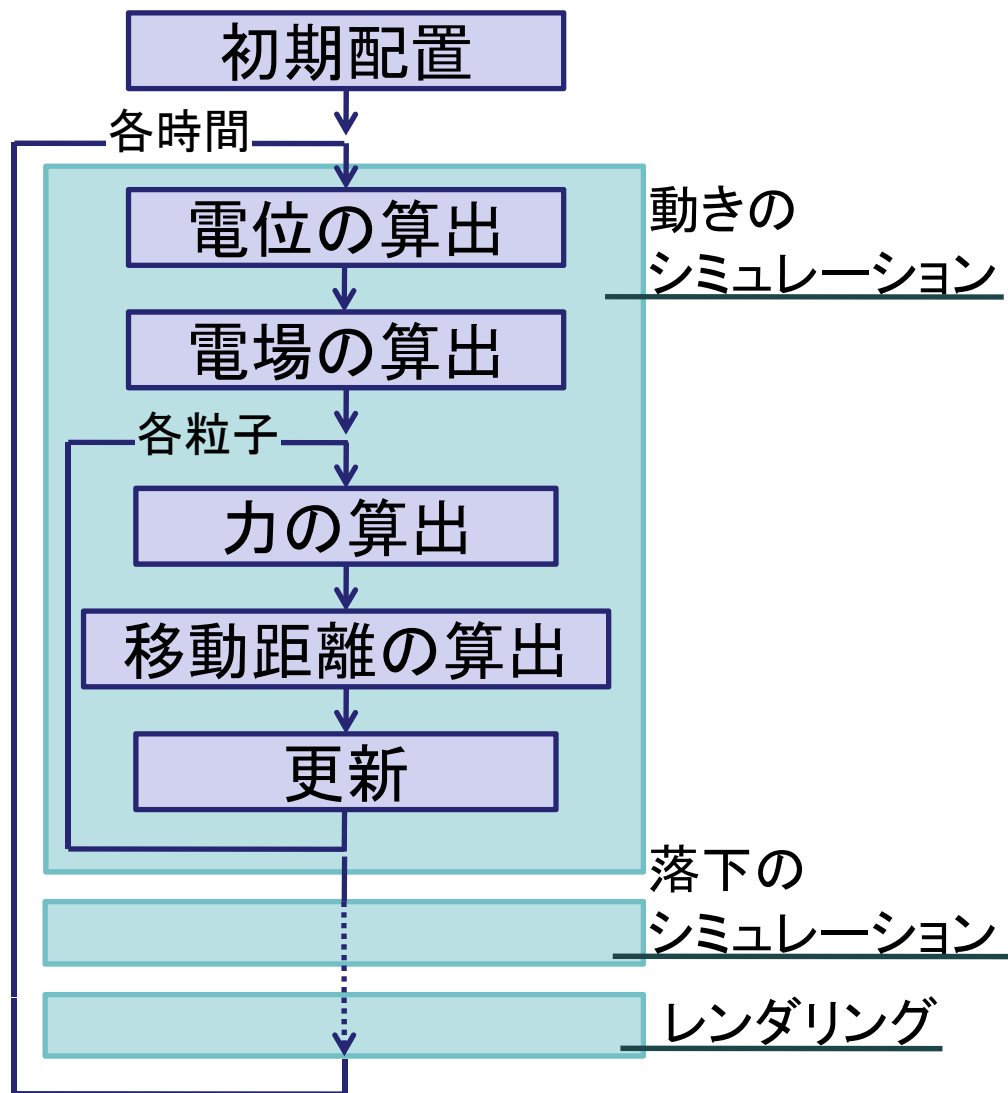
- オーロラ形状をパーティクルとして扱う
- 荷電粒子の速度（エネルギー）を考慮した距離でサンプリング

提案手法

- 動きのシミュレーション
 - オーロラ形状をパーティクルで表現
 - 電場、磁場による力を算出
 - (初期形状: ベジエ曲線+サイン曲線)
- 落下のシミュレーション
 - 落下速度(エネルギー)
 - 大気粒子と衝突したときのゆらぎ
 - 大気粒子密度の高度依存
- レンダリング
 - レイキャスティング法



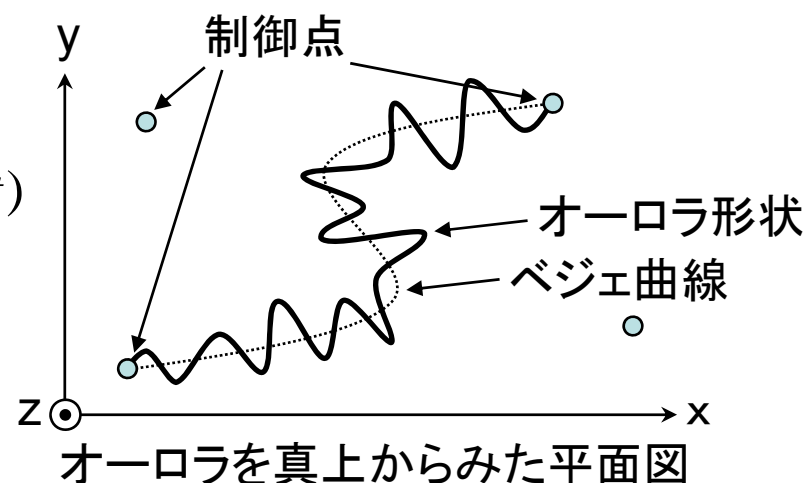
動きのシミュレーション



オーロラ形状の初期配置

- ベジエ曲線とサイン曲線を利用

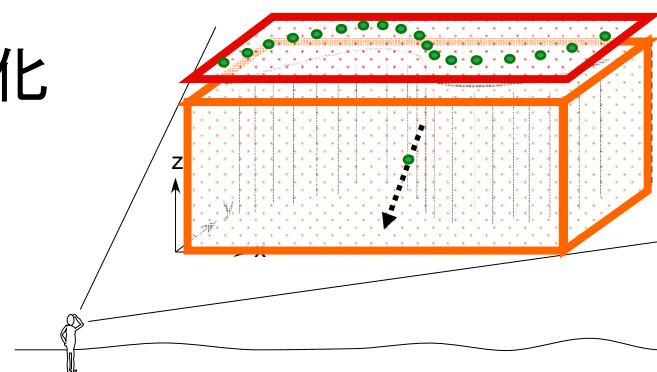
$$P(t) = \underbrace{\sum_{i=0}^n P_i B_i^n(t)}_{\text{ベジエ曲線}} + w \underbrace{\left(\sum_{j=0}^N A_j \sin[2\pi f_j t] \right)}_{\text{サイン曲線}} \hat{N}(t)$$



- オーロラ形状の離散化 (荷電粒子初期位置)

幅方向 : $t(0 < t \leq 1)$ の値を離散化

厚み方向 : w の値を離散化



オーロラ形状の運動 (1/2)

- 電荷密度 $\rho = \frac{q_0 N}{\Delta S}$

— 粒子数

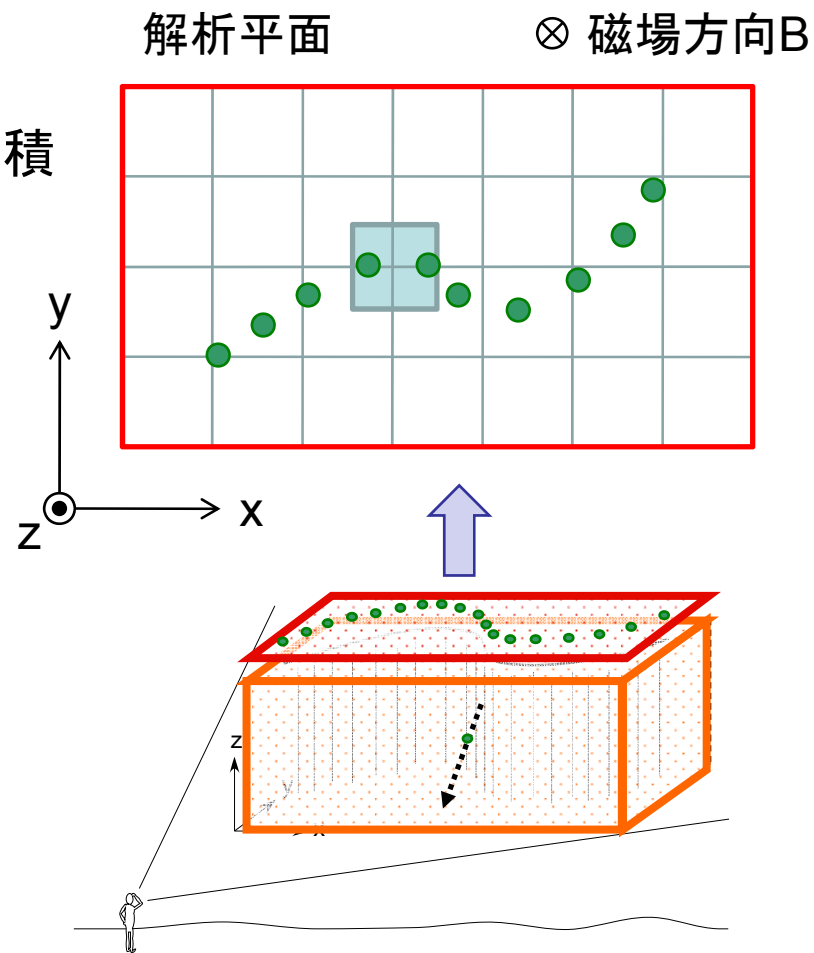
— 微小面積

- 空間中の電位 (ポアソン方程式) $\nabla^2 \phi = -\frac{\rho}{\epsilon_0}$

反復計算 (SOR法) で算出

- 空間中の電場 $\mathbf{E} = -\nabla \phi$

$$\left(\begin{array}{l} q_0 \text{ 電荷素量} \\ \epsilon_0 \text{ 真空の誘電率} \end{array} \right)$$



オーロラ形状の運動 (2/2)

- 荷電粒子にかかる力 $\mathbf{F} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v}_0 \times \mathbf{B}) - \mu |\mathbf{v}_0|^2 \frac{\mathbf{v}_0}{|\mathbf{v}_0|}$
 - 電磁場から受ける力 (ローレンツ力)
 - 抵抗成分

ニュートンの法則

$$\mathbf{F} = m \frac{d\mathbf{v}}{dt}$$

- 荷電粒子の移動速度

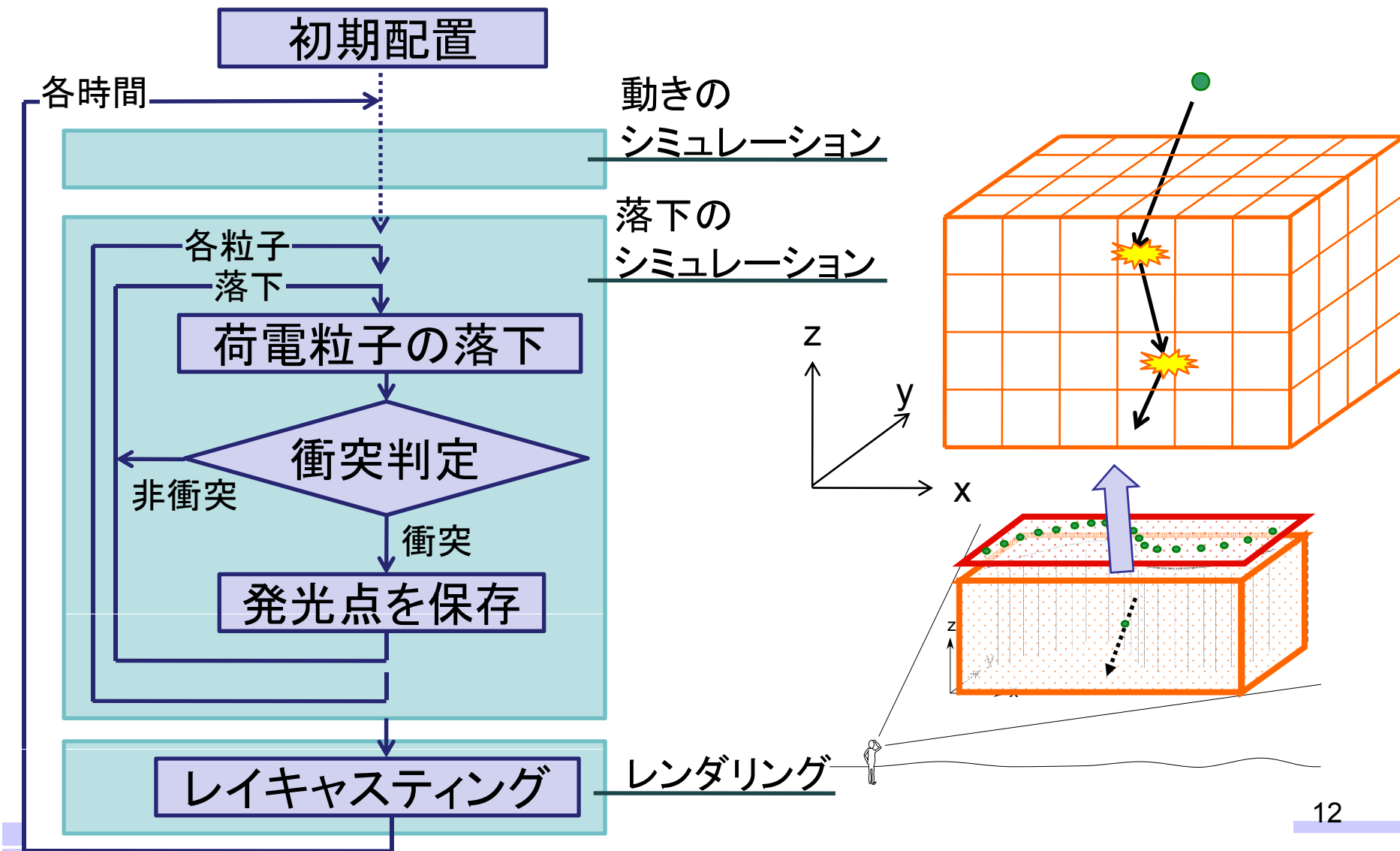
$$\mathbf{v} = \frac{\Delta t}{m} \mathbf{F} + \mathbf{v}_0$$

- 荷電粒子の移動距離

$$\Delta \mathbf{p} = \mathbf{v} \Delta t$$

各粒子に加算するベクトル

落下のシミュレーション



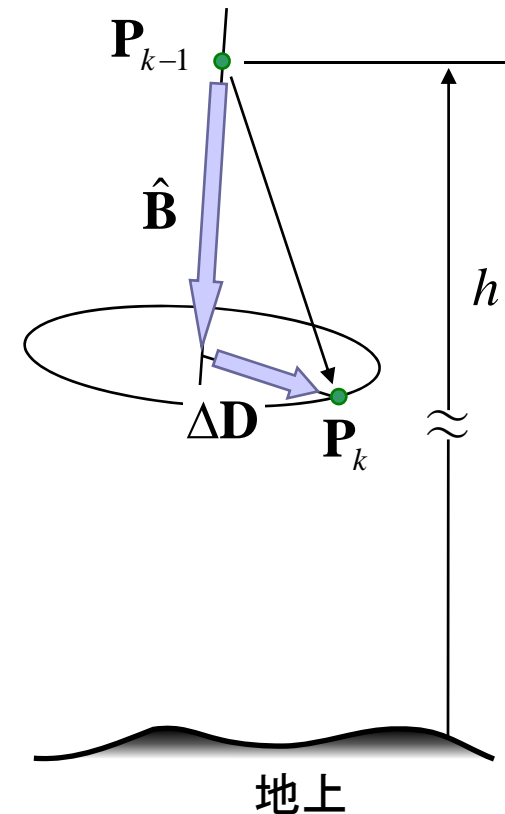
荷電粒子の落下

- 衝突によるゆらぎ、エネルギー変化を考慮

$$\mathbf{P}_k = \mathbf{P}_{k-1} + \underbrace{\tilde{v} \Delta \tilde{t}}_{\text{進行距離}} \frac{\hat{\mathbf{B}} + \Delta \mathbf{D}}{\underbrace{|\hat{\mathbf{B}} + \Delta \mathbf{D}|}_{\text{単位進行方向}}}$$

$$\tilde{v}(U, h) = \sqrt{2 \left(\frac{U}{m} - \underbrace{gh}_{\text{位置エネルギー}} \right)}$$

運動エネルギー



大気粒子との衝突判定

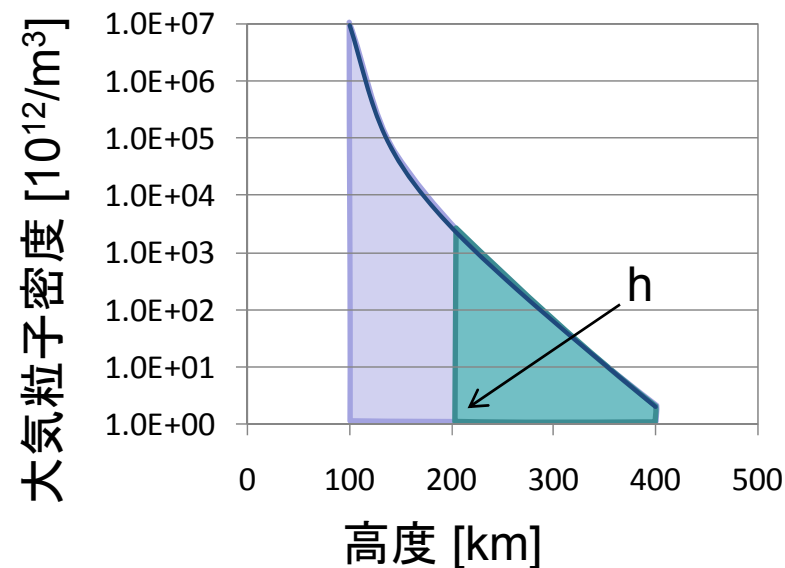
- 衝突確率の設定
(大気粒子密度の高度依存性を考慮)

$$P_{hit}(h) = \alpha \frac{D_{sum}(h)}{D_{sum}(100)}$$

$$D_{sum}(h) = \int_h^{400} D(z) dz$$

高度h~400kmの粒子数

$\left\{ \begin{array}{l} D(z) \text{ 高度 } z \text{ km} \text{ における密度} \\ \alpha \text{ 「1keVの電子の進入高度は} \\ \text{150km} \text{」となるよう設定} \end{array} \right.$



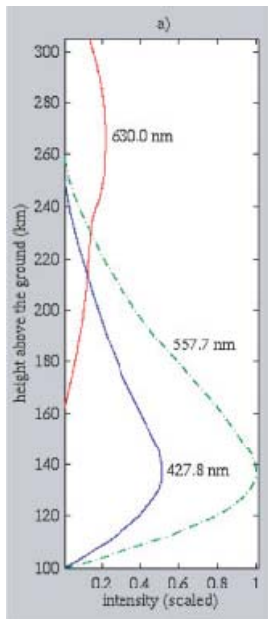
高度と大気粒子密度の関係

文部省国立天文台編「理科年表CD-ROM」

レンダリング

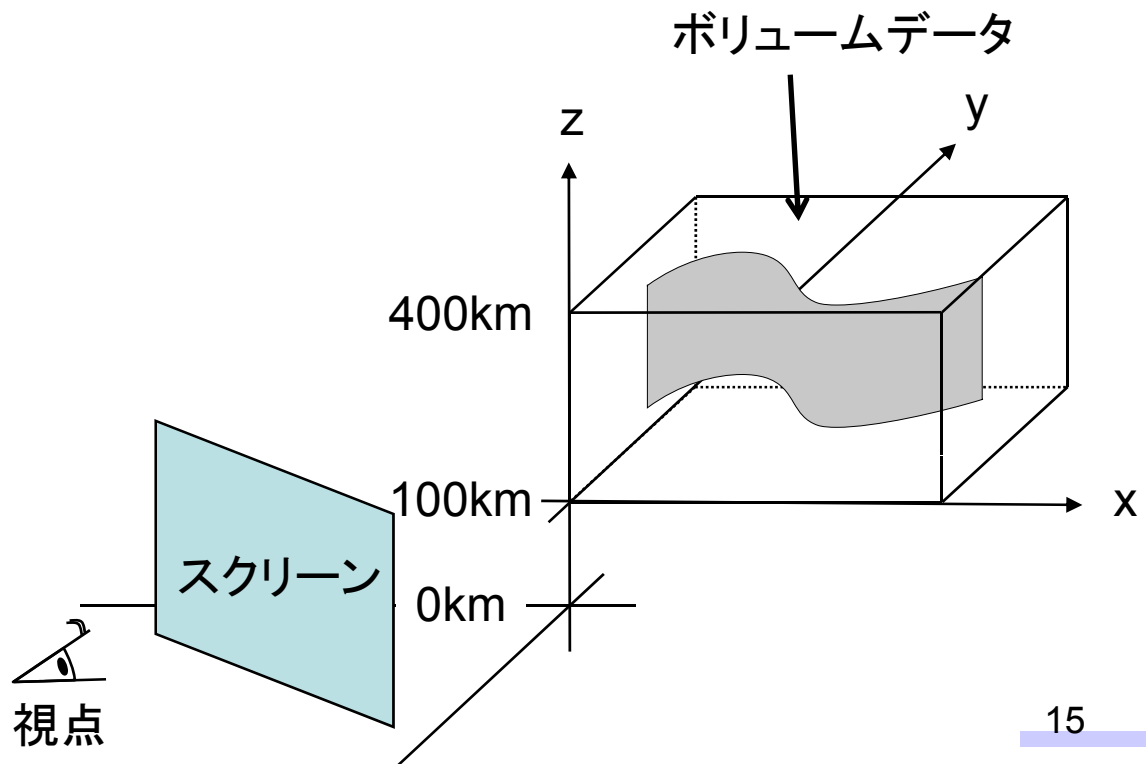
- ボリュームデータをレイキャスティング法により可視化
- 高度に依存した色づけ

大気粒子の種類・密度は高度により変化

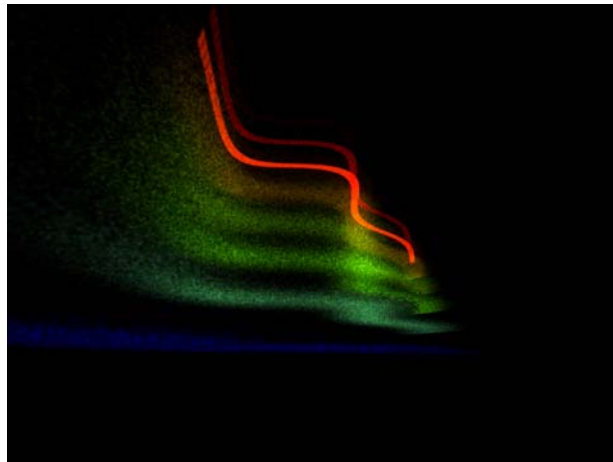


高度と発光色・発光強度

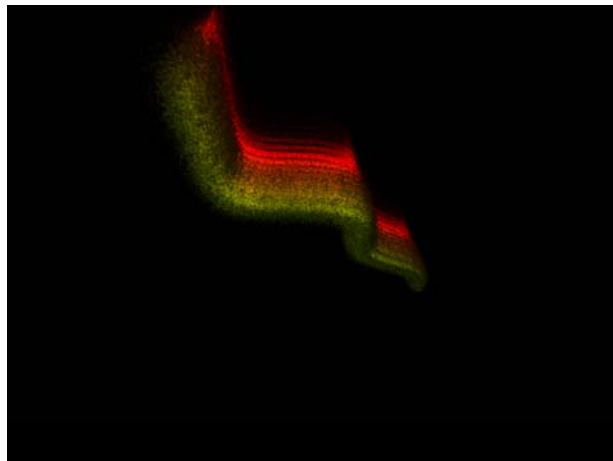
[Brekke A., 1999]



結果画像



$t=0, U_0=10\text{keV}$



$t=0, U_0=1\text{keV}$

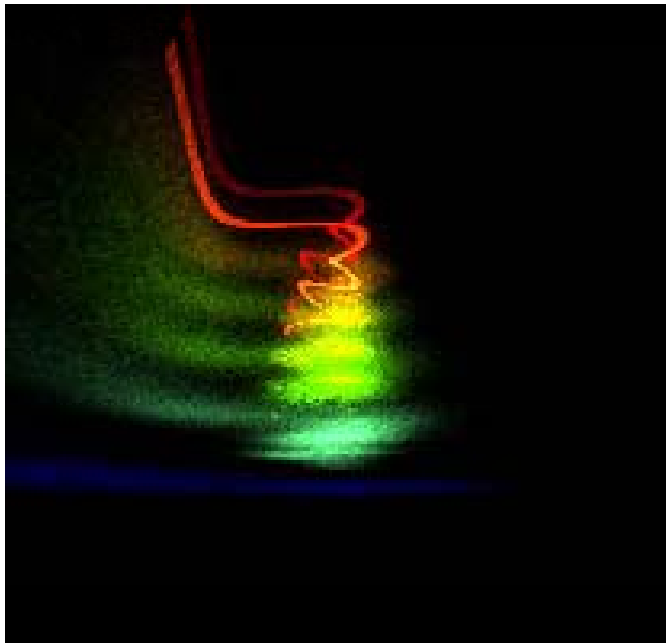
○ モデリングパラメータ

粒子数 : 200,000個
ボリュームサイズ: $600 \times 400 \times 300$
ベジエ制御点 : 4点
サイン曲線数 : 4種類

○ レンダリングパラメータ

視点位置 : $(-200, -200, -100)$
画像サイズ : 1024×768 pixel

結果動画 (1)



30FPS

- モデリングパラメータ

粒子数 : 200,000個
ボリュームサイズ: 600 × 400 × 300
ベジエ制御点 : 4 点
サイン曲線数 : 4 種類

- レンダリングパラメータ

視点位置 : (-200, -200, -100)
画像サイズ : 200 × 200 pixel

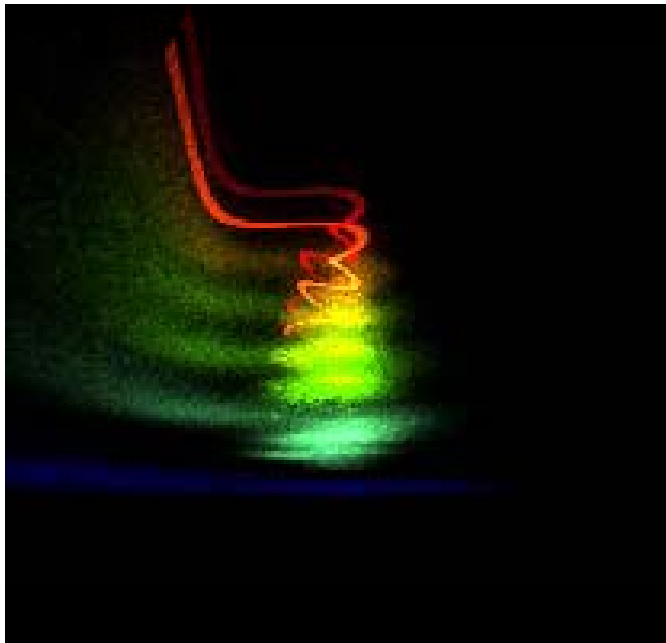
- 30FPS

回転運動の速度は5~10km/s

南極の科学2 オーロラと超高層大気[古今書院, 1983]

➡ 速くても1分かけて1回転起こす

結果動画 (2)



5FPS

- モデリングパラメータ

粒子数 : 200,000個
ボリュームサイズ: 600 × 400 × 300
ベジエ制御点 : 4 点
サイン曲線数 : 4 種類

- レンダリングパラメータ

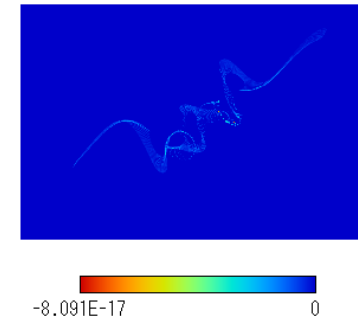
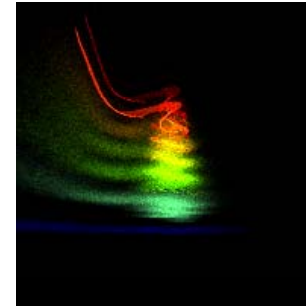
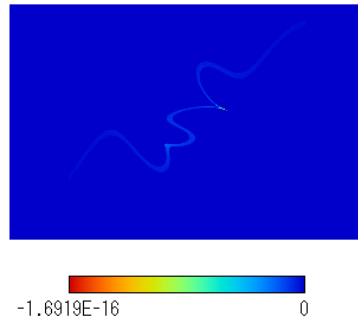
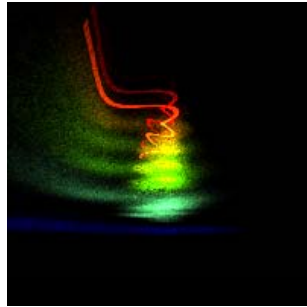
視点位置 : (-200, -200, -100)
画像サイズ : 200 × 200 pixel

- 30FPS



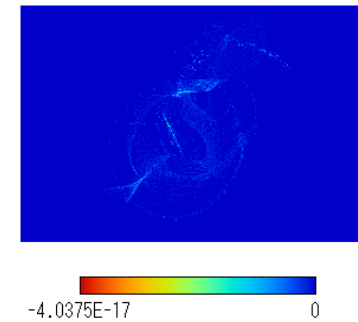
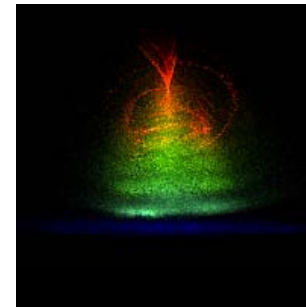
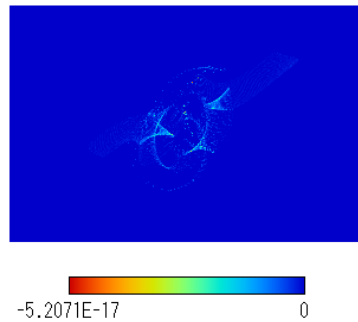
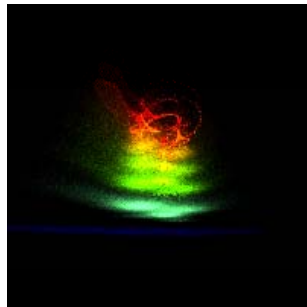
結果動画 (3)

0/10
[sec]



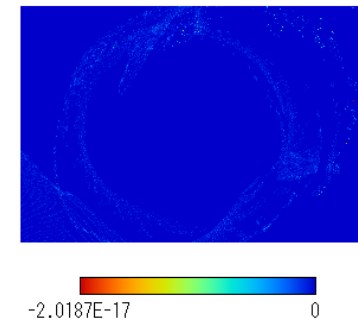
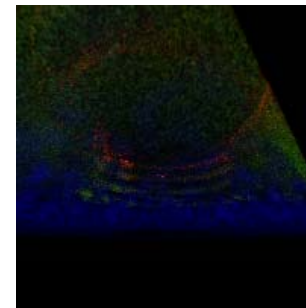
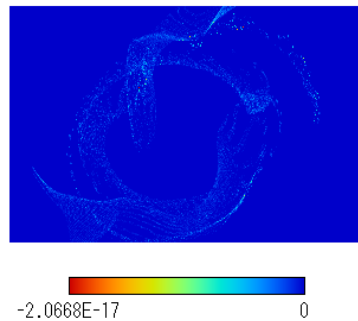
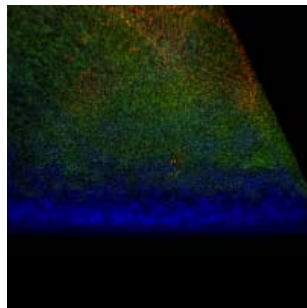
1/10
[sec]

2/10
[sec]



3/10
[sec]

4/10
[sec]



5/10
[sec]

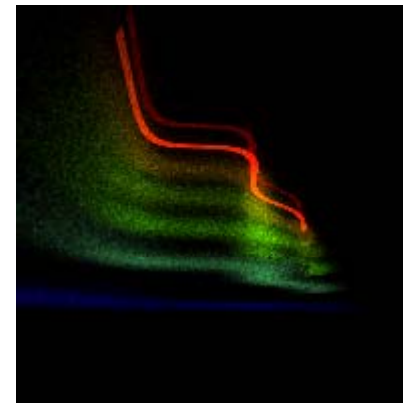


考察

- オーロラ形状の断裂が再現できる可能性を示せた
→ 大気の流れの影響、新しい荷電粒子の侵入
モデル化に問題がある
- 実写と離れた結果画像
→ 落下のサンプリング時間、衝突確率の設定



実写画像



結果画像

まとめと今後の課題

まとめ

- 電磁場、エネルギー変化を考慮したシミュレーション
 - オーロラ形状が断裂する可能性
 - エネルギー変化を考慮した再現が可能

今後の課題

- 荷電粒子の連続的入射の考慮
- 荷電粒子と大気粒子の衝突モデルの検討