

Tomo-e Gozen 試験機による 微光流星の観測

大澤亮
木曾シュミットシンポジウム2016

Contents

1. Tomo-e Gozen と流星観測
2. 微光流星の検出ソフトウェア
3. Tomo-e PM による微光流星の観測
4. 観測結果の紹介とまとめ

Tomo-e Gozen の目指すサイエンス

1. 高速広視野サーベイ

超新星ショックブレイクアウト / 重力波対応天体 / GRB afterglow

2. 高速変動現象

Fast Radio Burst 可視対応天体 / マイクロフレア

3. 高速移動天体

流星 / 低起動人工衛星 / Near Earth Objects

流星 as fast moving objects

- 塵が大気に突入して発光

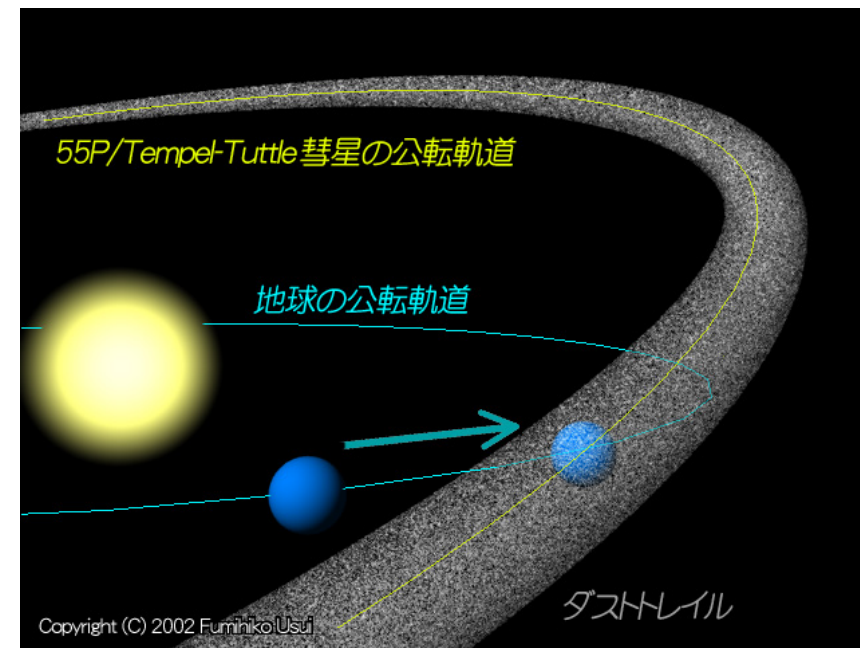
- 塵の主な起源: 彗星(短周期)
- 典型的なサイズ: mm-cm
- 突入速度: 50-70km/s
- 発光高度: 80-120km

- 流星群

- 特定の時期に集中 → ダストトレイル

- 散在流星

- ランダム → 母天体軌道から散逸



<http://www2.nao.ac.jp/~toshikasuga/papers/meteor.pdf> より

Tomo-e サイエンス検討会資料(猿楽さん) より引用

流星 as fast moving objects

流星の光度と質量の関係 ($V=35\text{km/s}$)

等級	質量 (g)	観測手法
-10	10^4	火球
-5	10^2	肉眼/写真
0	1	写真/ビデオカメラ
5	10^{-2}	ビデオカメラ/レーダ
10	10^{-4}	レーダ/望遠鏡

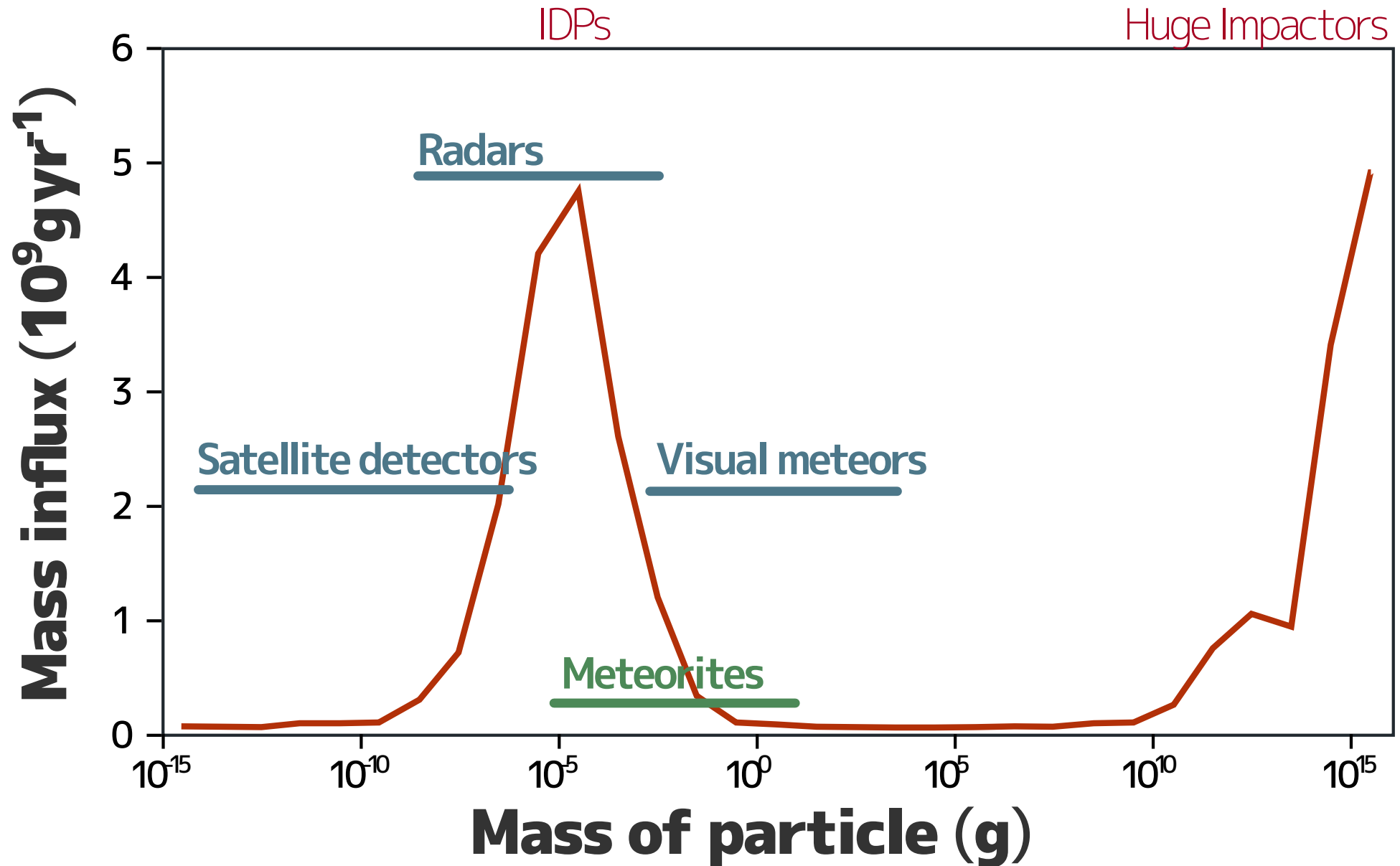
~1.3mm

~300 μm

M>10の流星を検出するには**望遠鏡による動画観測**が必須

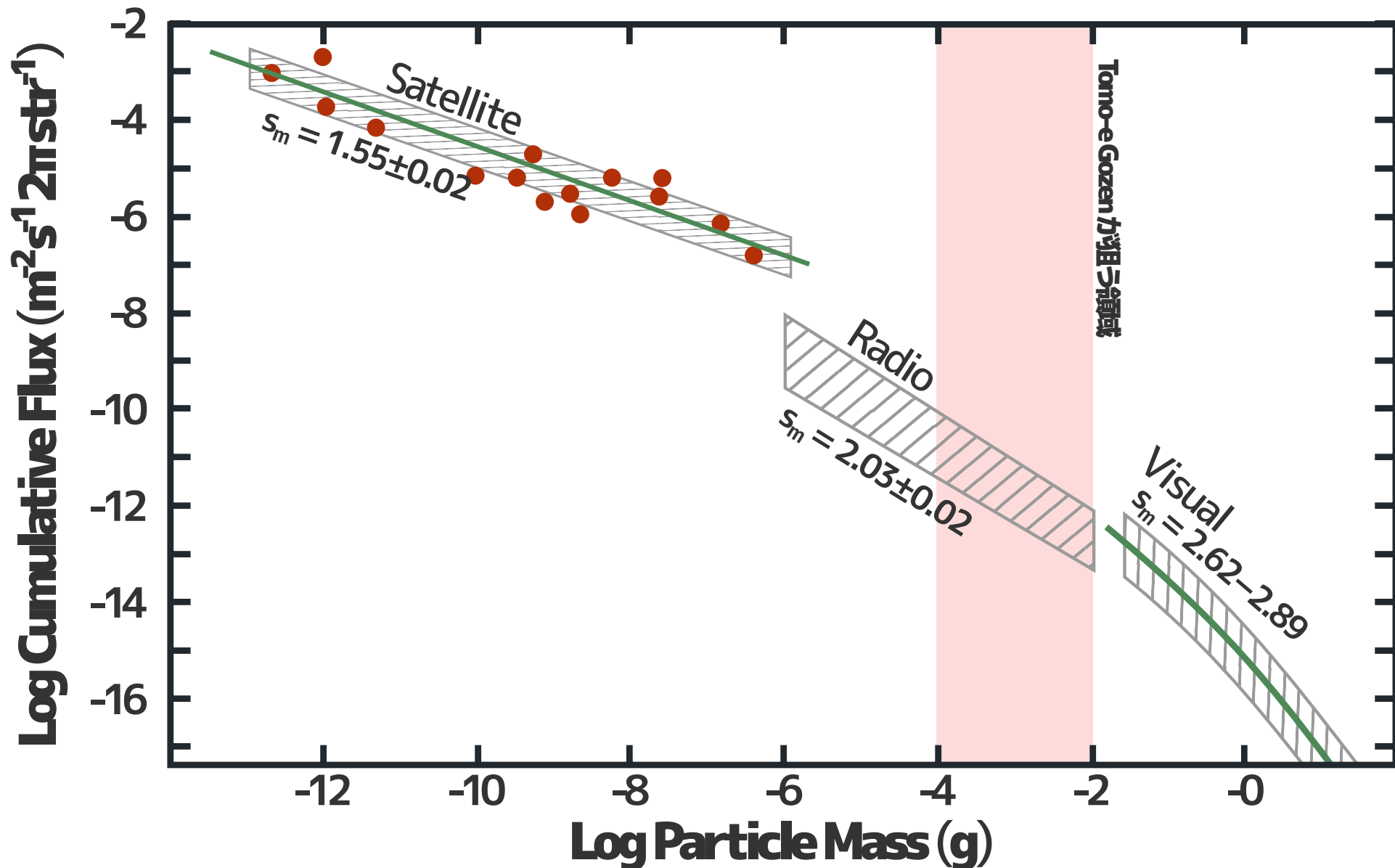
微光流星

Interplanetary Dust Particle の質量分布



流星 as fast moving objects

流星の光度関数 \Rightarrow Interplanetary Dust Particle の質量分布



Cumulative flux of particles to the Earth's surface, Hughes (1987)より引用

微光流星

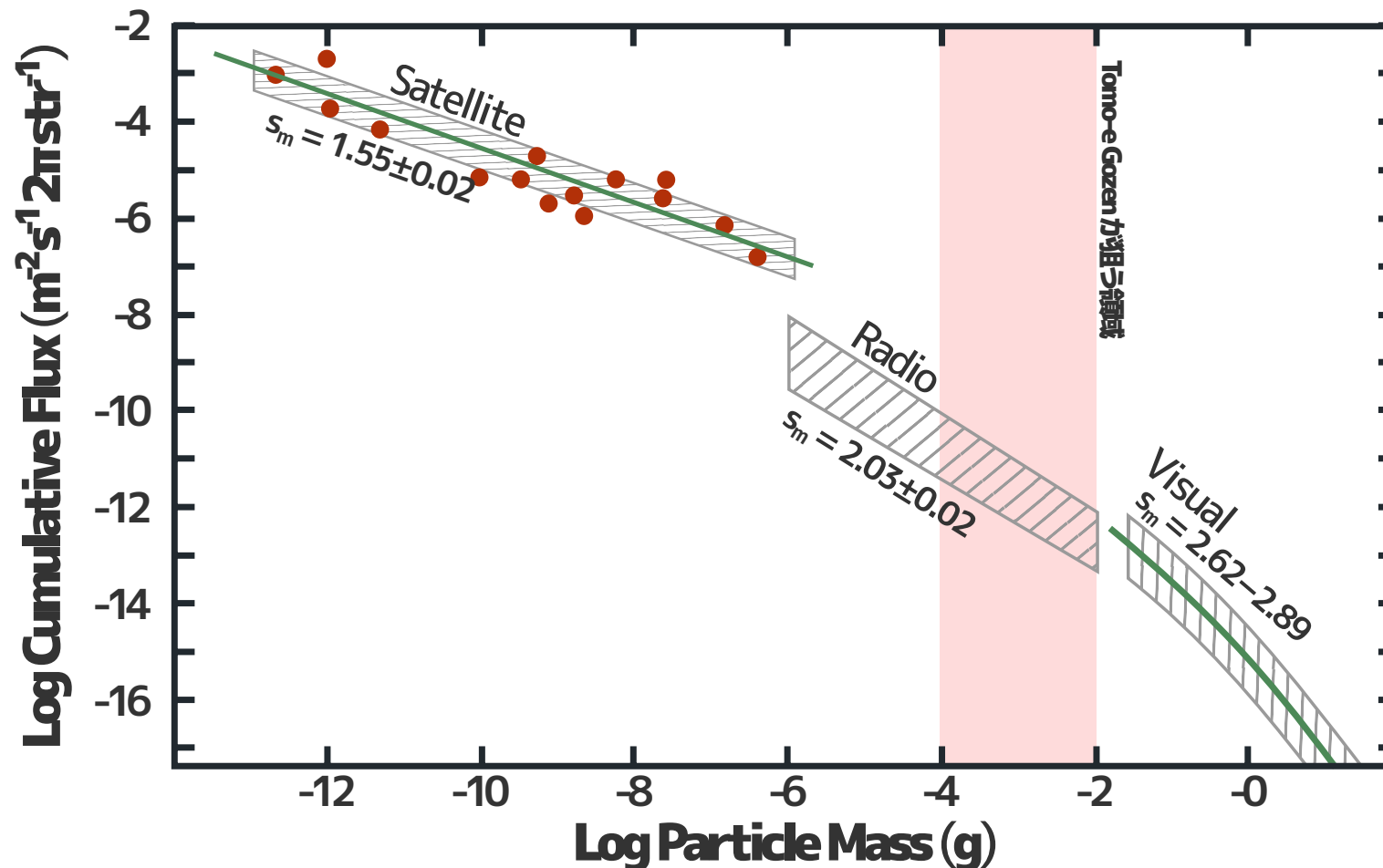
流星の光度関数 \Rightarrow Interplanetary Dust Particle の質量分布

サイズが μm – cm の範囲の IDPs は直接観測が難しい

$<\mu\text{m}$ サイズ: 人工衛星による直接計測 / $>\text{m}$ サイズ: 可視光で直接観測

流星観測: 地球大気を detector とすることで **IDP を 1 粒ずつ数える**

Tomo-e Gozen: 1mm – $100\mu\text{m}$ でのサイズ分布を初めて光学観測から決定する



Tomo-e Gozen & 微光流星

広視野動画観測による微光流星の検出

望遠鏡による微光流星観測の課題

a. trail loss: フラックスが分散してしまうことによる SN 比の低下

光子が同じピクセルに落ちないため積分がかからない

人の目では容易に検出できるが個々のピクセルの SN 比は低い

検出アルゴリズムを流星に特化することで微光流星を検出

b. background flux: 積分により背景ノイズに埋もれる

流星の速度は典型的に $10^\circ/\text{sec}$ \Rightarrow 視野内を一瞬で通過する

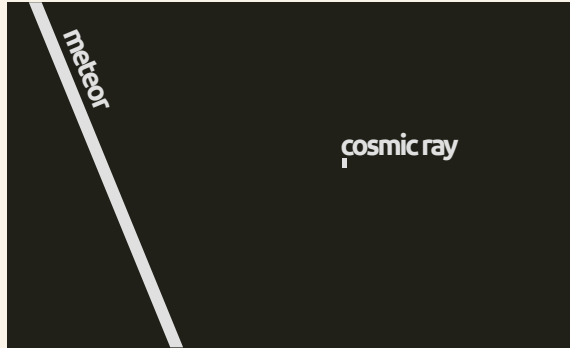
積分時間を長くするほど流星がノイズに埋もれて消えていく

0.5 秒モニタリング観測により高い感度を実現

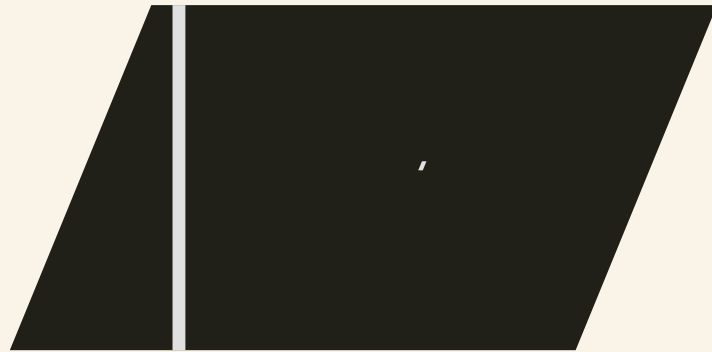
流星検出アルゴリズム

Hough 変換の応用による直線構造の検出

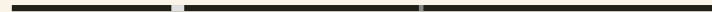
Original Image



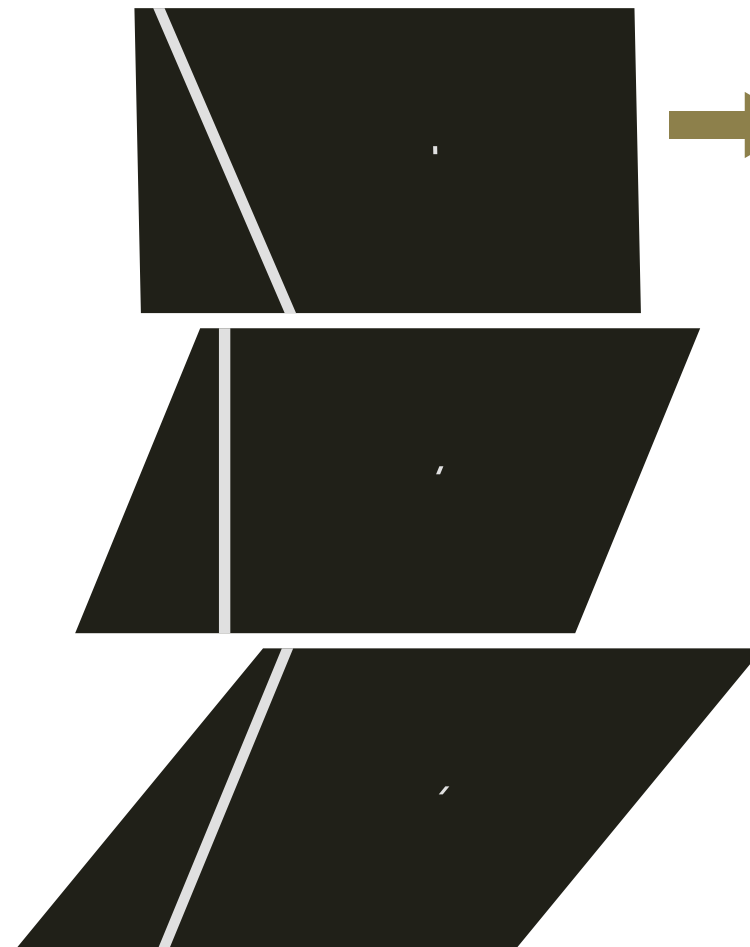
Slanted Image



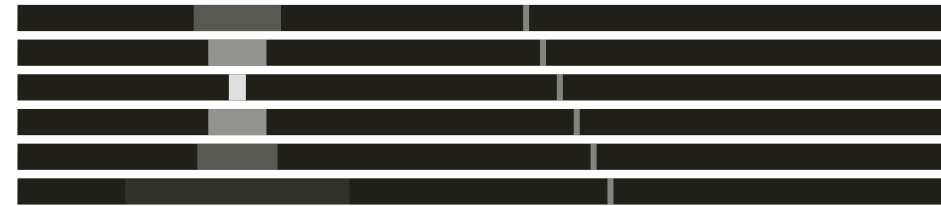
Compressed Array



Set of Slanted Images

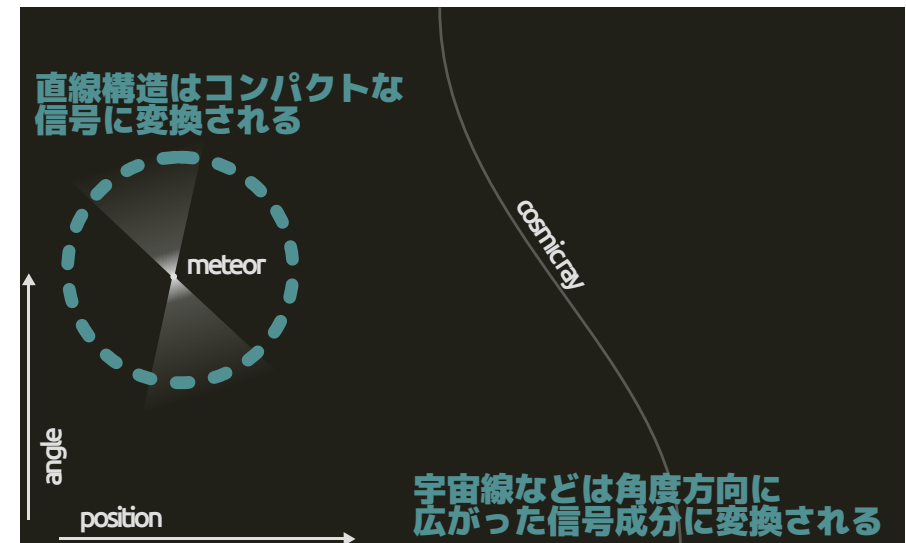


Set of Compressed Arrays



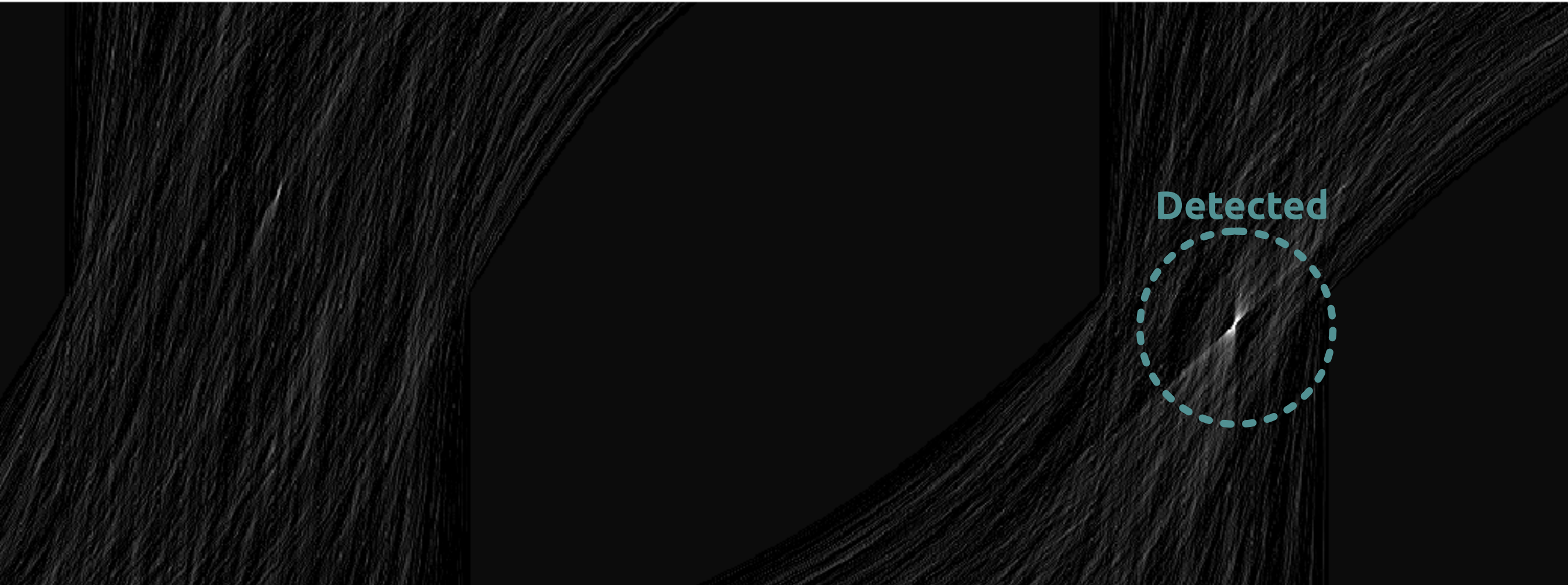
Stack Arrays

Converted Image



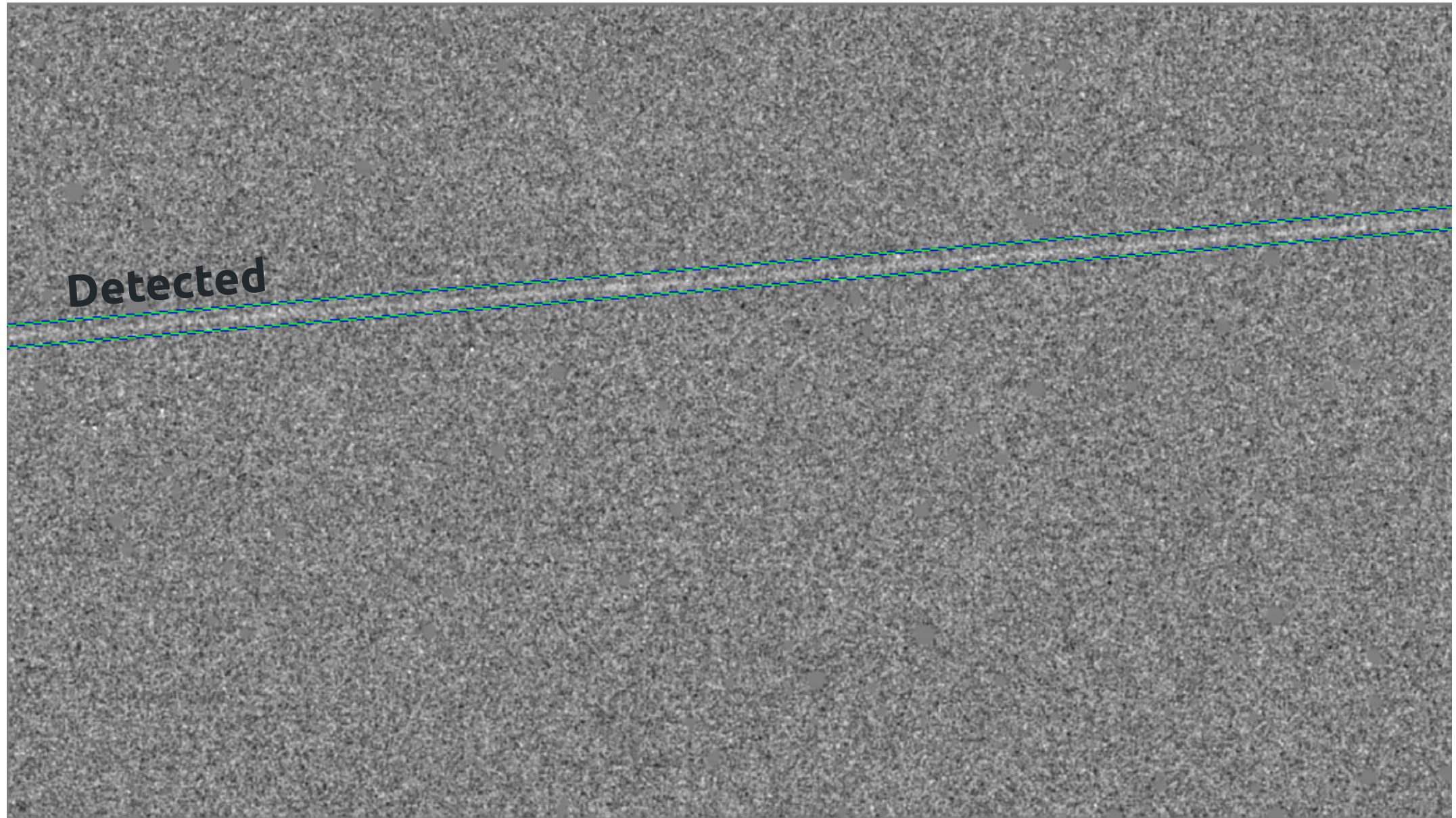
流星検出アルゴリズム

Hough 変換の応用による直線構造の検出



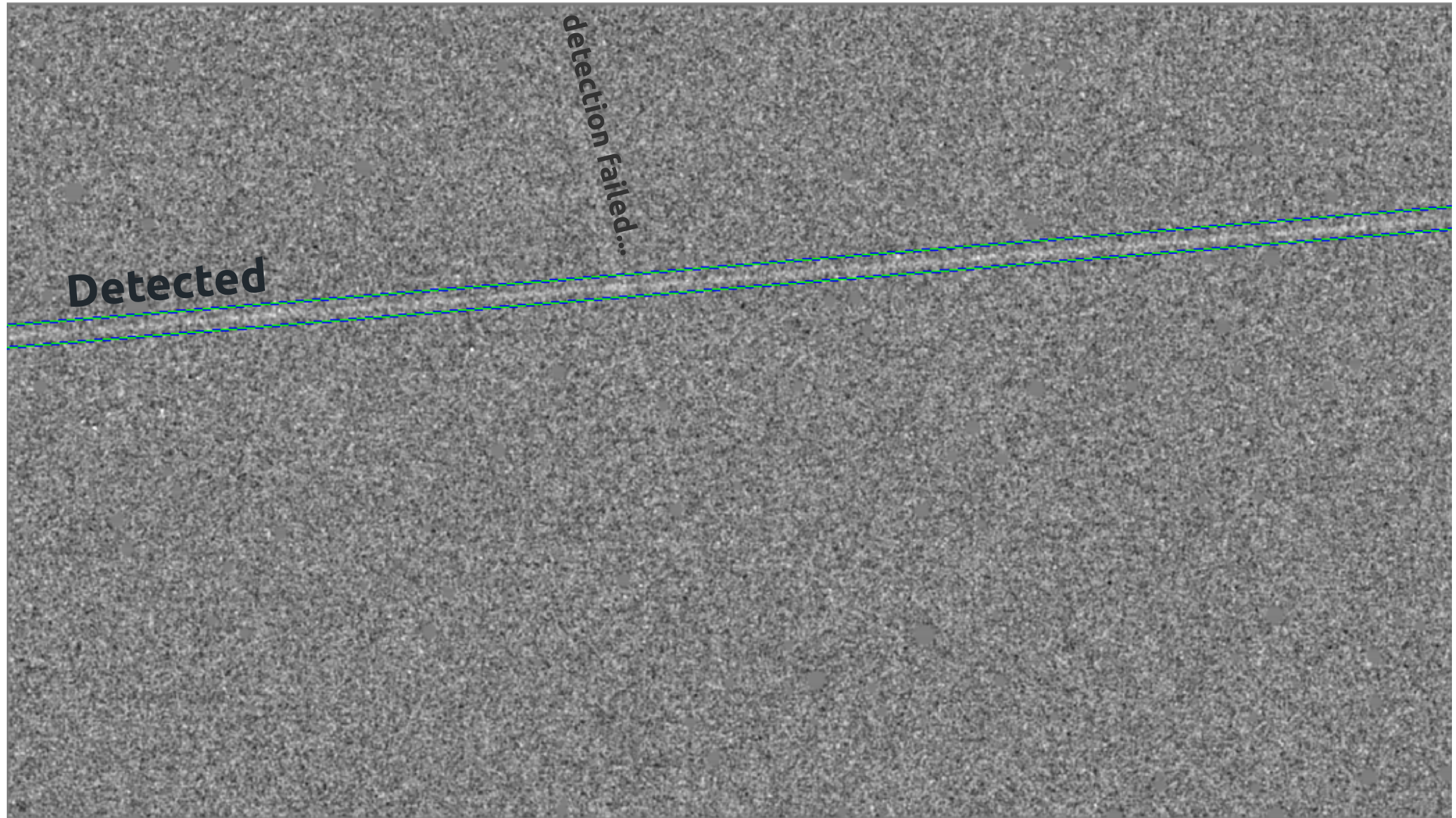
流星検出アルゴリズム

Hough 変換の応用による直線構造の検出



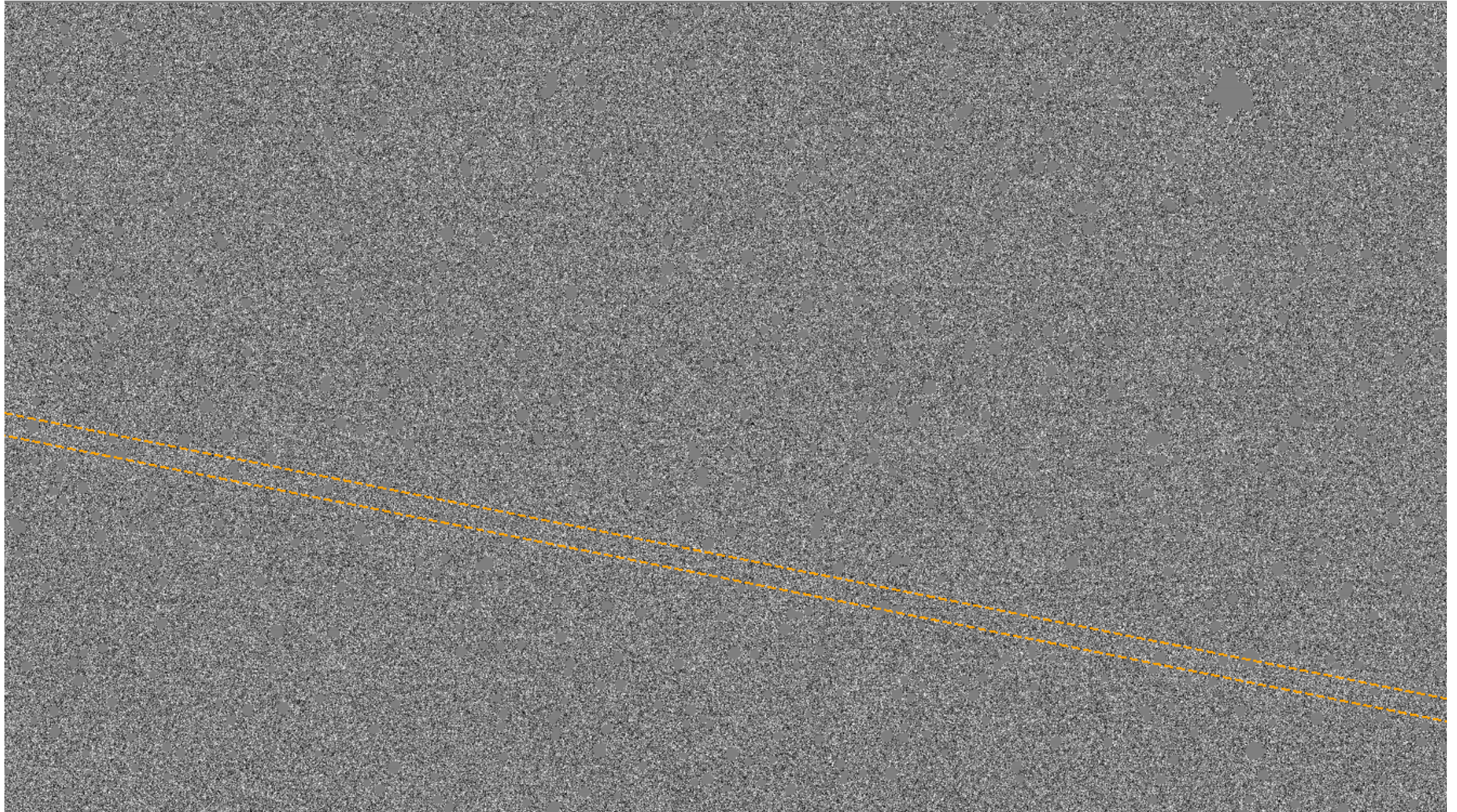
流星検出アルゴリズム

Hough 変換の応用による直線構造の検出



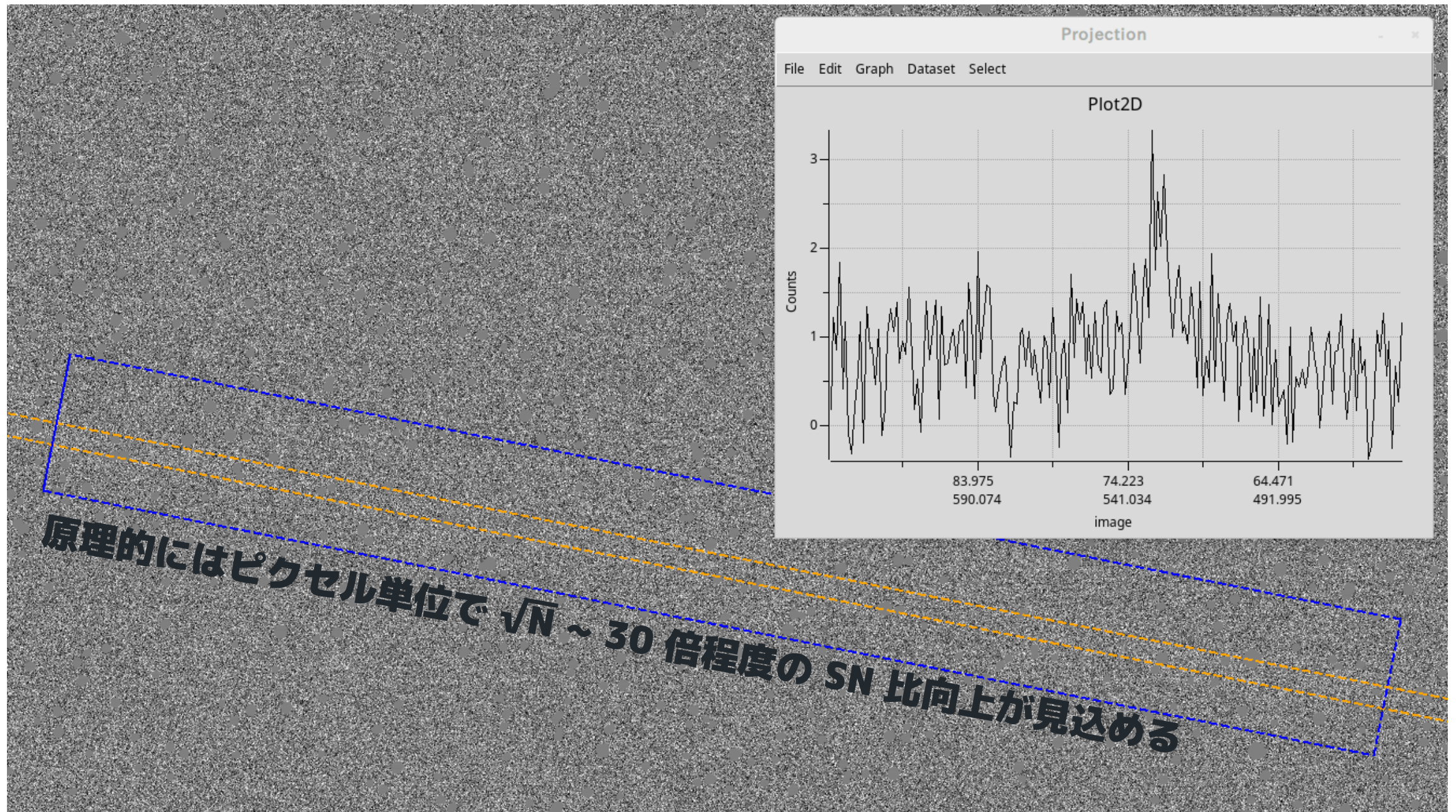
流星検出アルゴリズム

Hough 変換の応用による直線構造の検出



流星検出アルゴリズム

Hough 変換の応用による直線構造の検出



流星モニタリング観測

Tomo-e PM による観測 on 2016.04.11

観測日	2016.04.11 (およそ5時間分)
観測領域	地球の影領域 (人工衛星の影響を抑える)
観測モード	1 exp. = 0.5 秒積分 × 360 frame
フィルタ	なし
データ総量	290880 frame
総検出数	18362 events
流星検出数	2002 events (重複含む)
検出レート	~20 events/180s
等級*	7.5–15.5 mag.

*Video rate magnitude (Iye+ 2007)

流星モニタリング観測

Tomo-e PM による観測 on 2016.04.11

検出されたイベントから流星を抽出

1. 目視で抜き出す

流星プロファイルの抽出

1. 該当のフレームを表示する
2. 検出した流星の角度に合わせて Region>Projection を配置
3. 流星が流れる方向に average をとってデータを保存

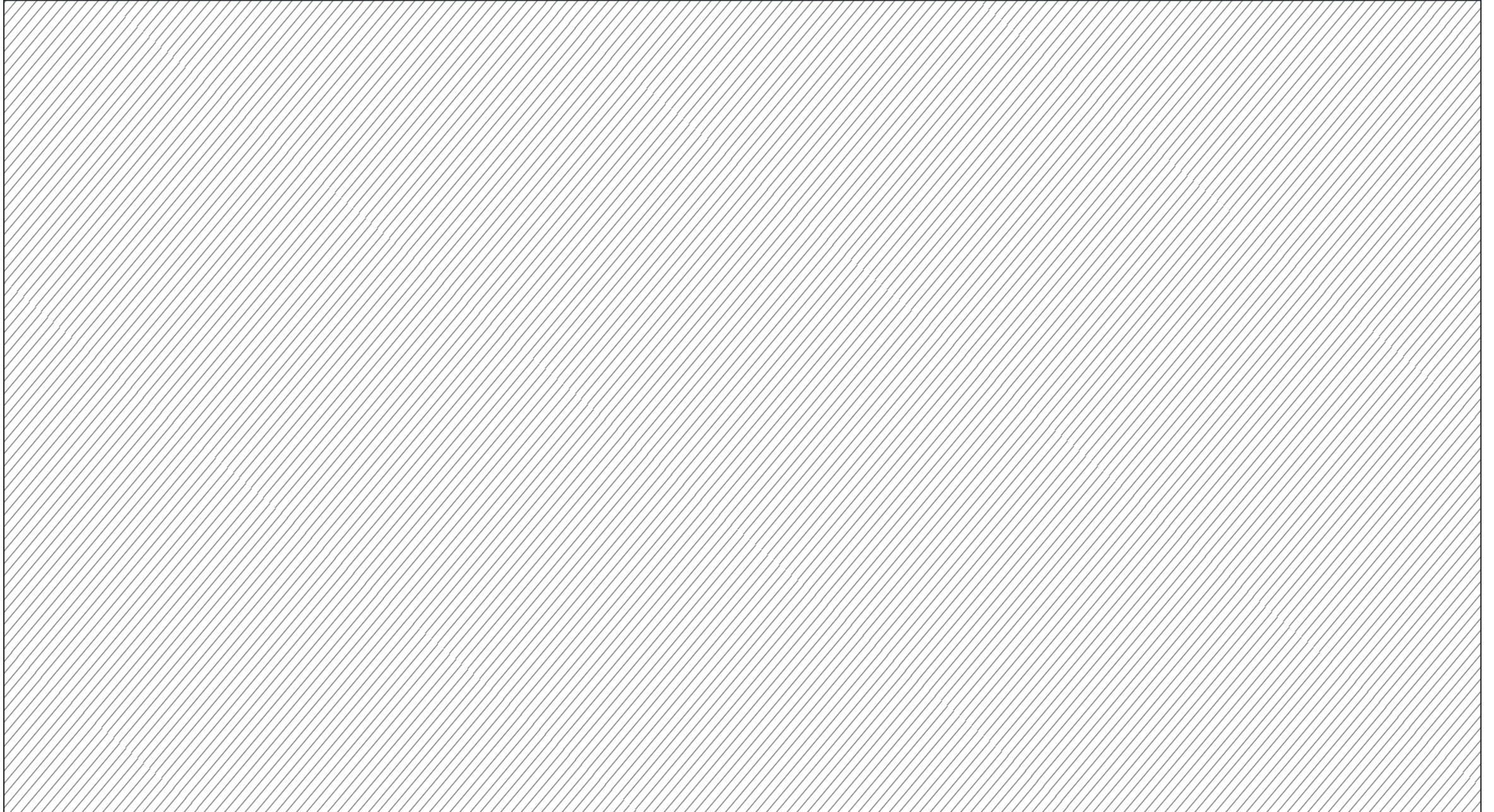
明るさの測定

1. Gaussian profile と線形 continuum を仮定してフィット
2. フィット結果からガウシアン¹の面積を計算 (ADU 単位, 長さ 1 pixel の線輝度)
3. 180s 積分した画像から等級原点を計算
4. ADU 単位を等級に変換
5. 流星が $10^\circ/\text{s}$ で移動すると仮定 \Rightarrow 0.033s でおおよそ 1000 pixel
6. 線輝度を 1000 倍して 30 Hz 観測を模した Video Rate Magnitude を計算

明るさのキャリブレーションには USNO-B B1 等級を使用した

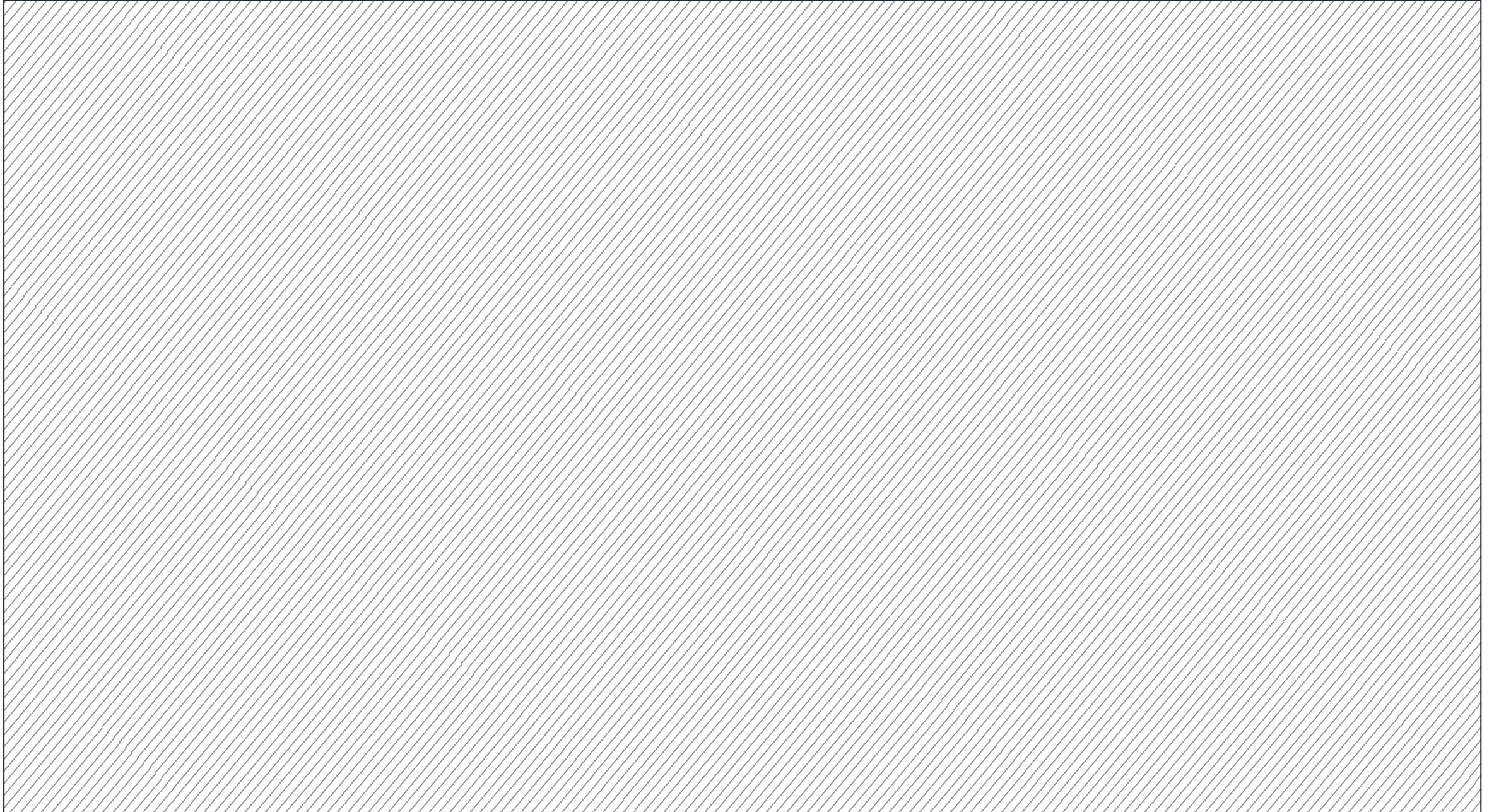
流星モニタリング観測

Tomo-e PM による観測 on 2016.04.11



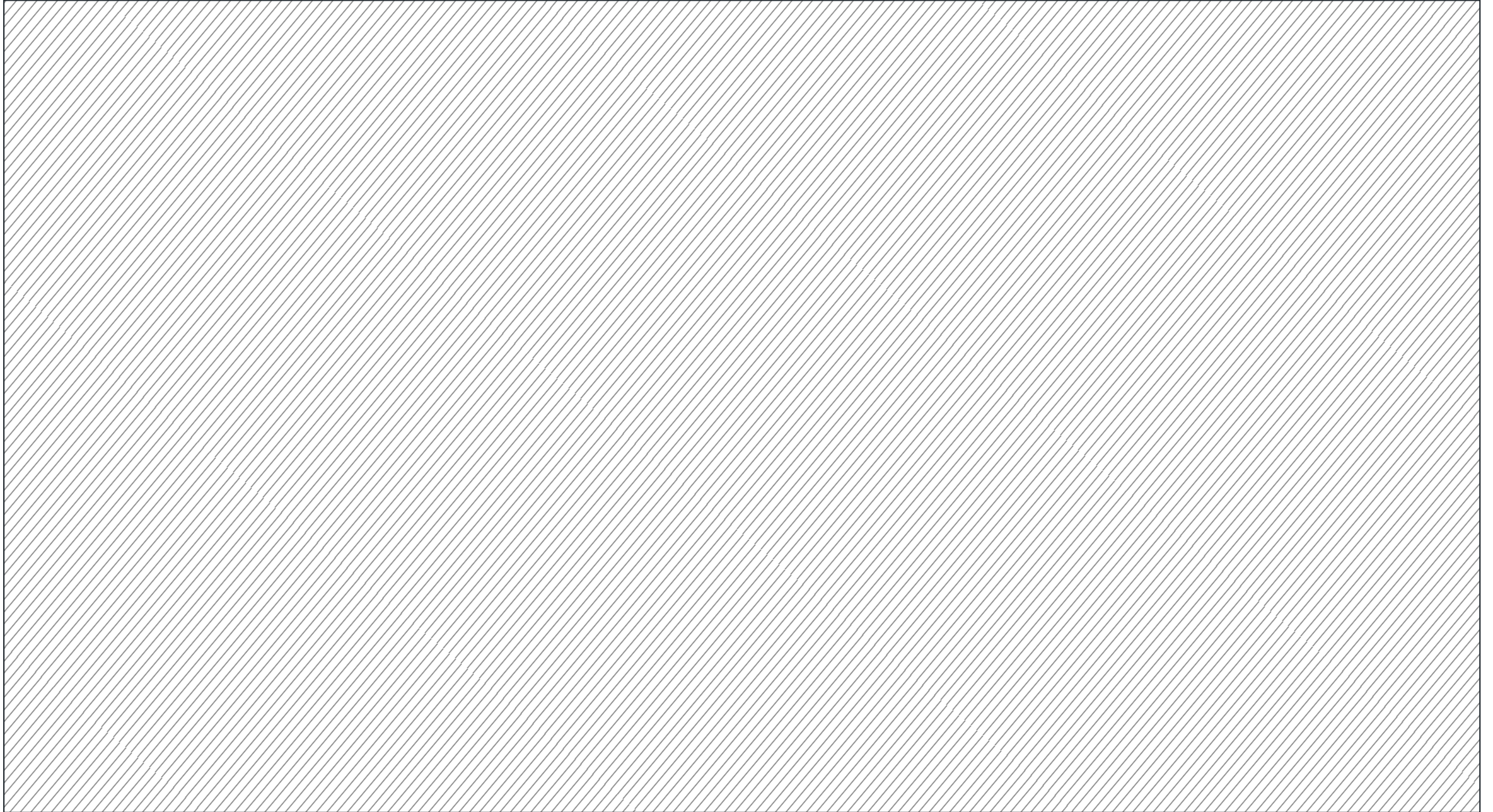
流星モニタリング観測

Tomo-e PM による観測 on 2016.04.11



流星モニタリング観測

Tomo-e PM による観測 on 2016.04.11



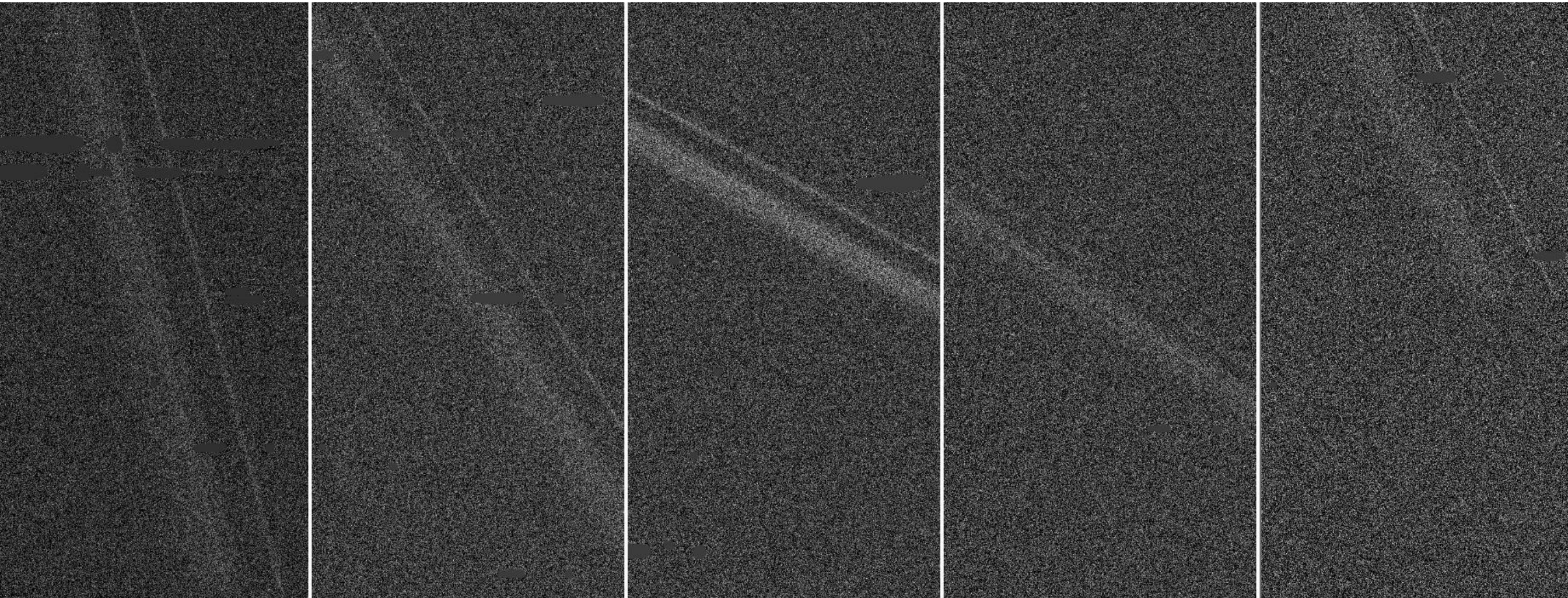
Tomo-e による流星観測

結果のまとめと今後の課題

1. 微光流星は Tomo-e Gozen のサイエンスケースのひとつ
2. 流星を効率よく検出するためのソフトウェアを開発
3. Tomo-e PM のデータを用いて散在流星の光度関数を求めた
 - 3-1. $M_V \sim 8.5-15.5$ mag. の流星を検出 (cf. ~ 7 mag. @V-band. Iye+, 2007)
 - 3-2. $dN \sim r^M dM \Rightarrow r \sim 2.5$ ($M_V \sim 12-14$ mag.)
 - 3-3. データを増やせば2-3桁のダイナミックレンジで光度分布が書ける
4. ソフトウェアのアップデート(誤検出対策, 星の差し引き)
5. 未検出率の評価 (検出率の方向依存性, 限界光度)
6. 方角や線幅についての議論, 分裂する流星の検出

微光流星の分光観測

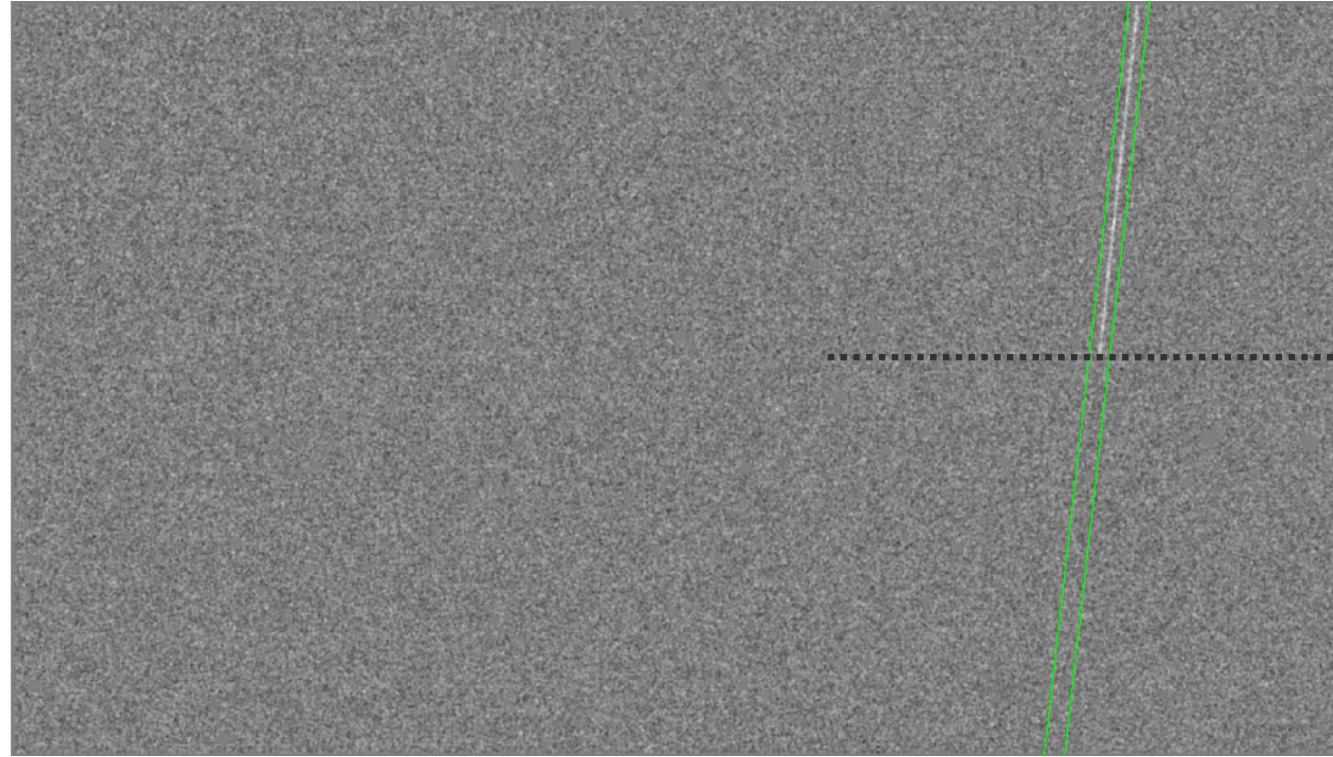
$M_V \sim 10 \text{ mag.}$ の流星の分光 ($R \sim 10$)



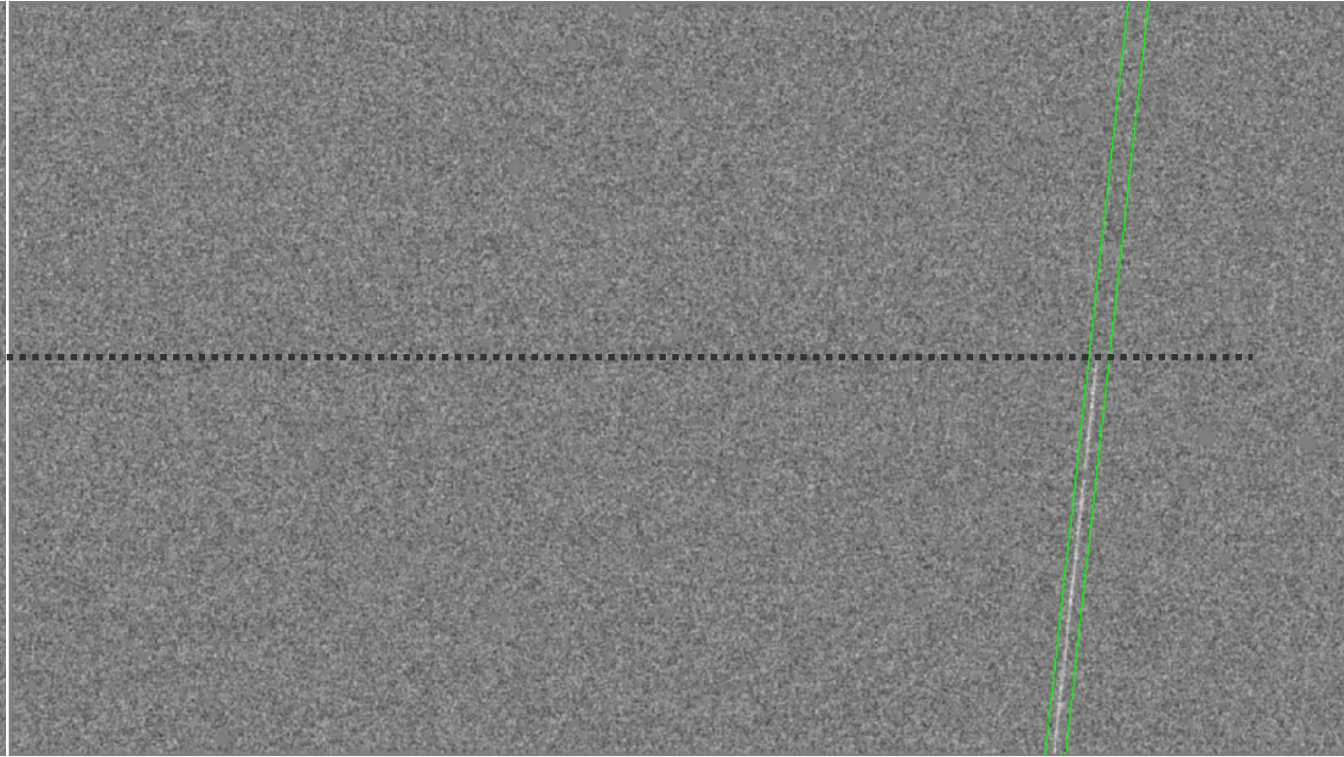
データは現在解析中

ローリングシャッターによる流星の分割

N枚目のフレーム



N+1枚目のフレーム



N枚目のフレームで図中点線のあたりを読み出している最中に流星が通過した
N枚目のフレームは点線よりも上に、N+1枚目のフレームには点線よりも下に流星が映る
流星が上から下に流れたことを意味するわけではない

流星の検出に致命的に失敗した例

