

# CMOSカメラを用いた 月面衝突閃光の観測

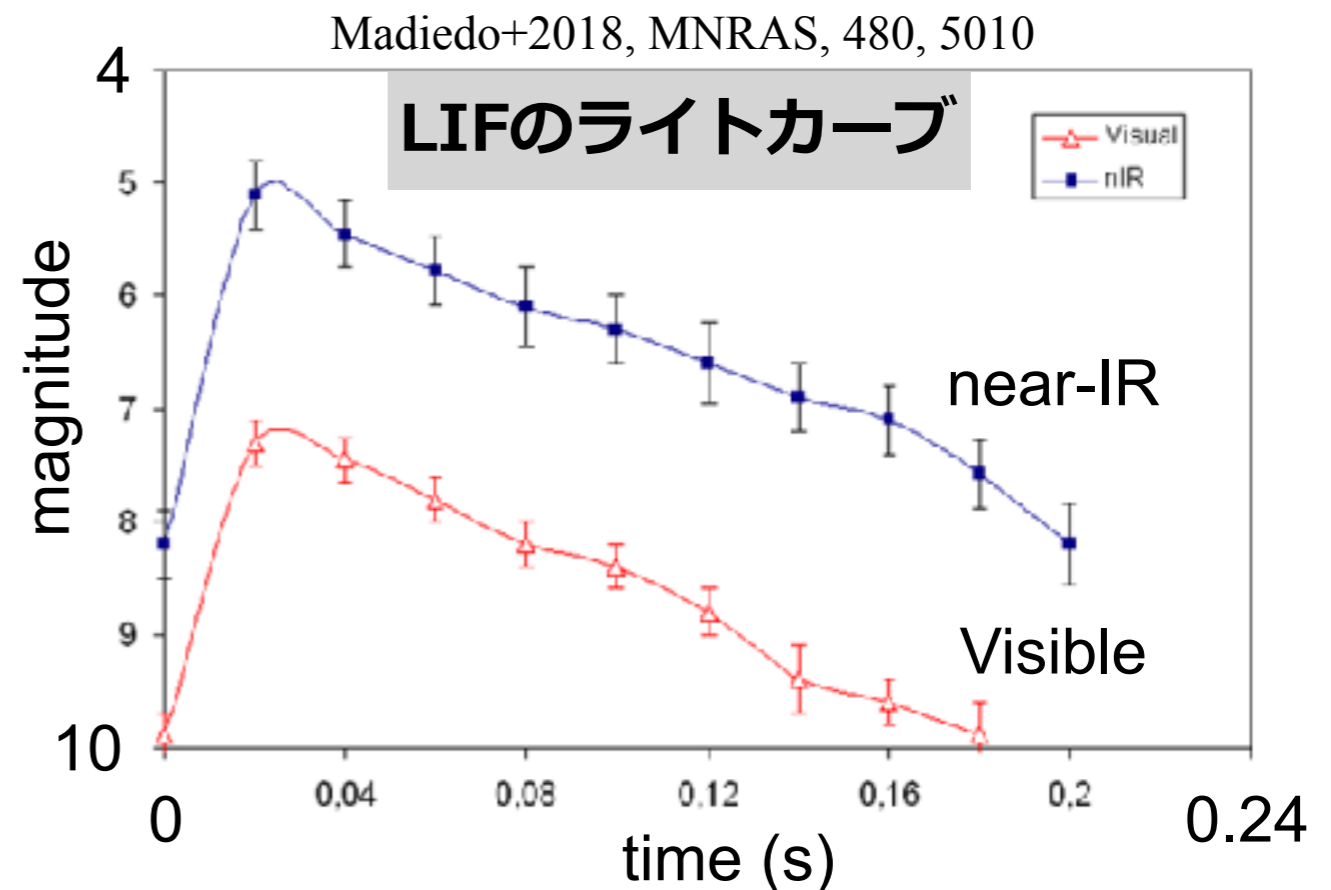
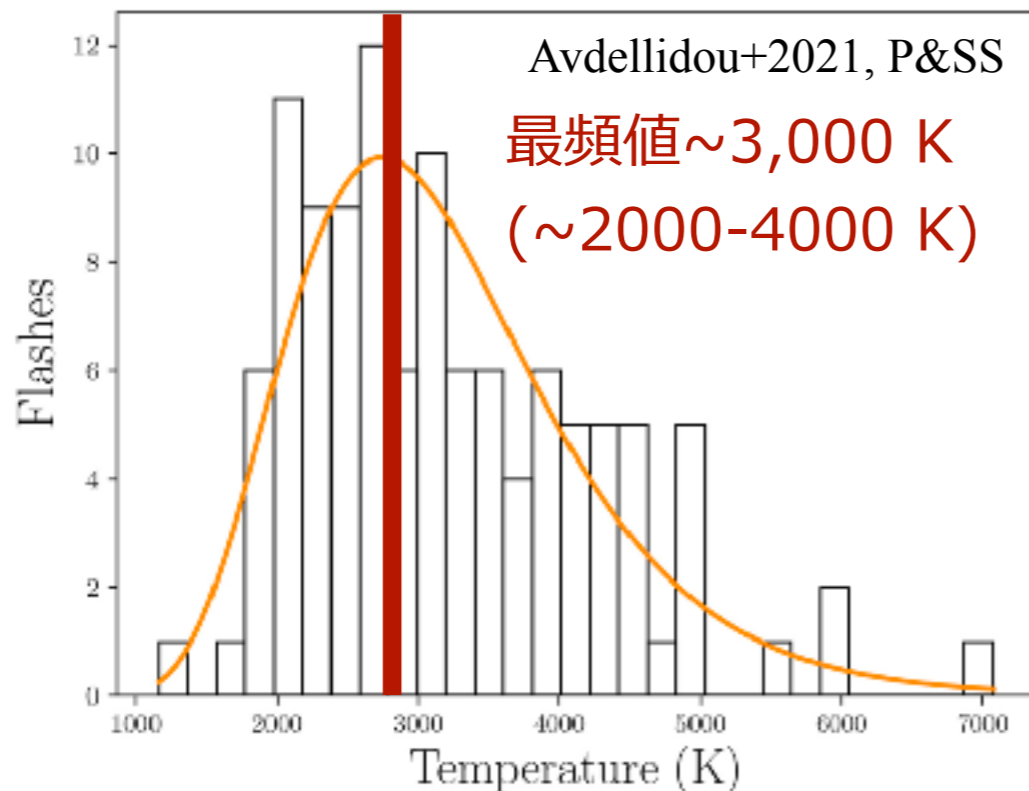
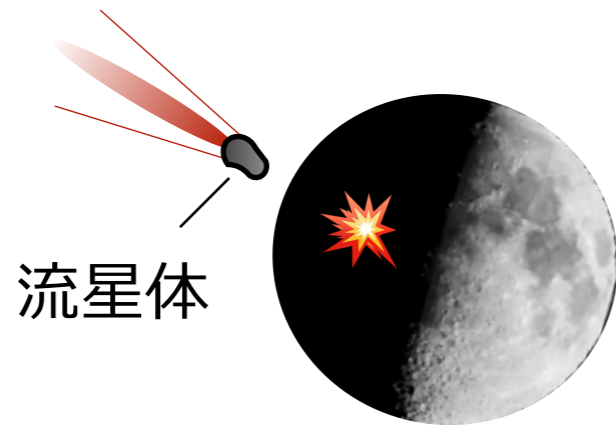
有馬 宣明 (日本大学)

共同研究者：青木翼, 荒木湧斗, 阿部新助 (日本大学), 川端美穂 (京都大学), 有松亘 (NAOJ/石垣島天文台)

背景: ChatGPT

# 月面衝突閃光とは

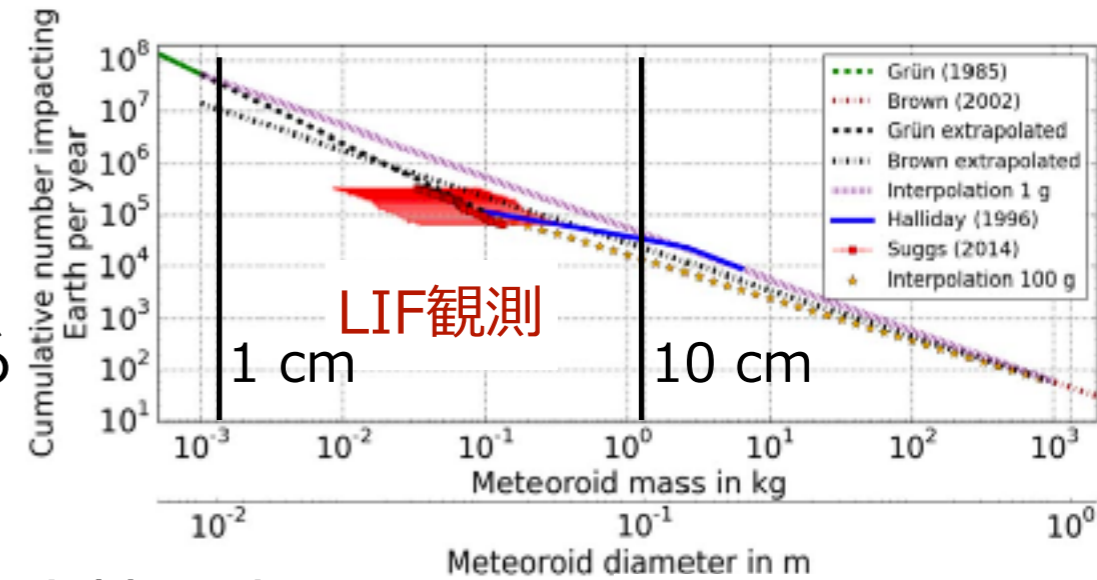
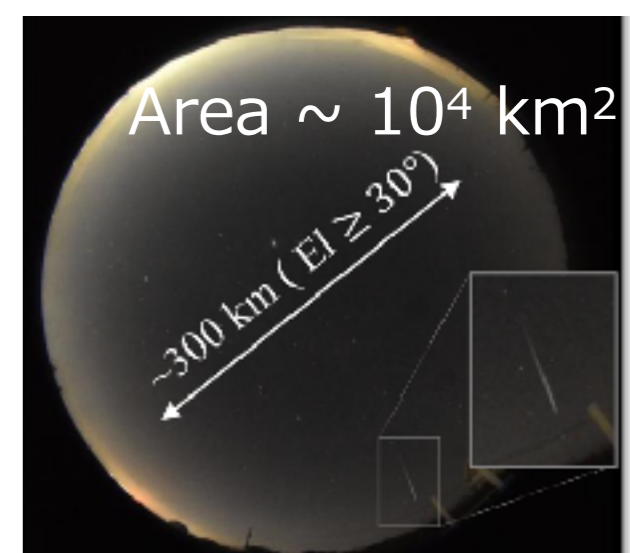
- 月面衝突閃光 Lunar Impact Flash (LIF) ・ ・ 直径 cm以上の流星体が月面に超高速 ( $\sim 20-71$  km)で衝突し、可視光～近赤外線で光る現象
  - 発光の継続時間は  $\sim 0.01 - 0.1$  秒程度
  - 1999年しし座流星群の大出現の際に初検出 (e.g., Ortiz+2000, Nature, 405, 921)



← 2バンド(R, I)同時観測から黒体温度の推定  
NELIOTAプロジェクト (2017-) by 1.2 m望遠鏡

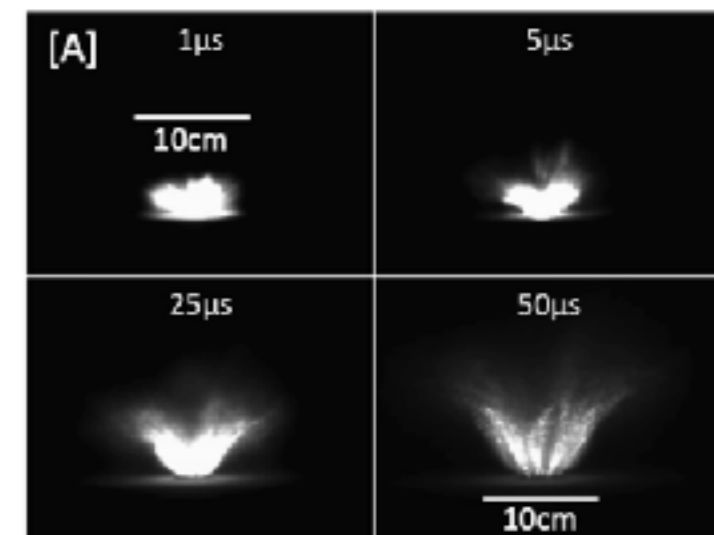
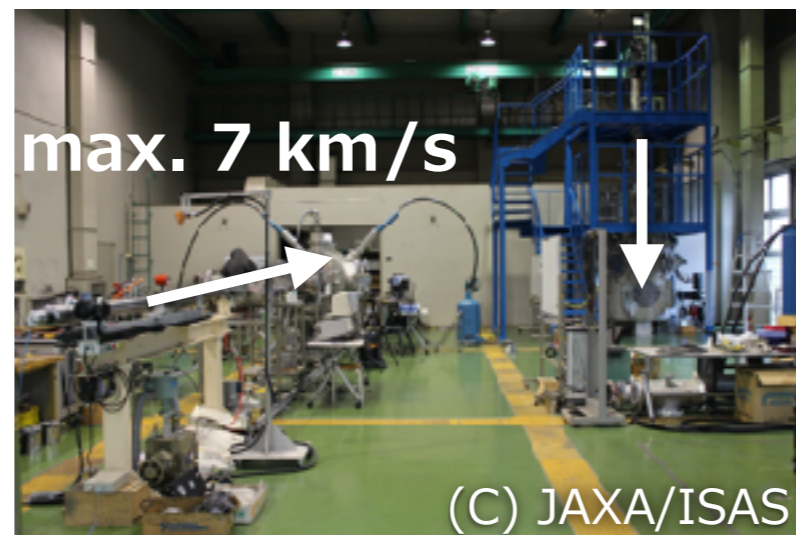
# なぜ月面を観測？

- 月面は天然の「巨大な検出器」
  - cm サイズの流星体は、地球大気に突入して明るい火球として見える. しかし低頻度
  - 月面は大気観測に比べ面積が約100倍
  - 流星(<~ mm)と小惑星(>1 m)の間を繋ぐ流星体の頻度分布を効率的に調べられる



- 月面は天然の「衝突実験場」
  - 大気が（ほぼ）無いため、固体天体同士の直接衝突となる
  - 室内の衝突実験は ~7 km/sが限界だが、超高速(>20 km/s)衝突の振る舞いを直接観測できる

Drolshagen+2017, P&SS



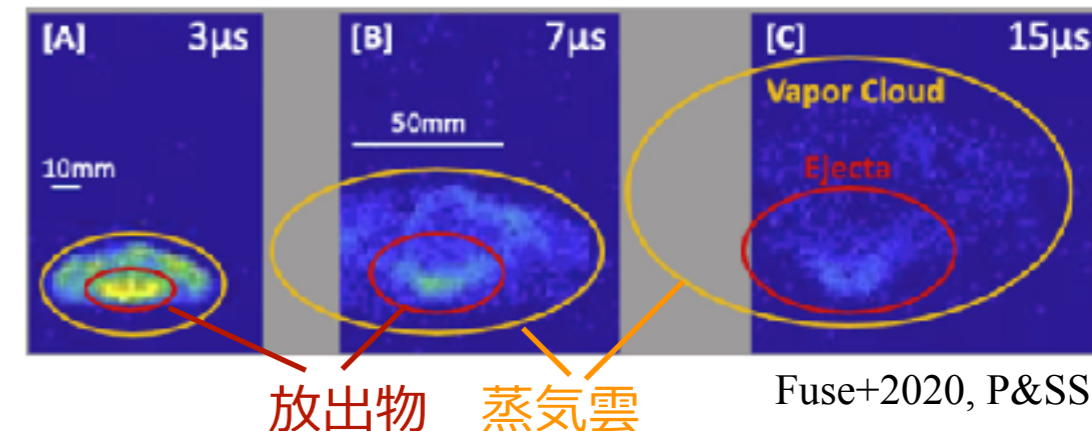
Fuse+2020, P&SS

# 本研究の目的：LIFの発光物理の理解

- LIFの発光は単一温度の黒体放射なのか？

- 従来の2バンド観測では単一黒体放射の妥当性を評価できていない  
→ 3バンド以上の同時観測が必要
- 室内衝突実験(Fuse+2020)やLIFの超低分散分光スペクトル(yanagisawa+2021)から、衝突初期の蒸気雲由来の高温成分が示唆

室内衝突実験の放出物 & 蒸気雲の様子



- 流星群由来の流星体を狙う

- 母天体の軌道情報から速度が分かる（衝突速度の不定性が小さい）
- 流星の分光観測から化学組成が得られている（輝線発光の診断が可能）

高速3バンド同時観測が可能なCMOSカメラを用いた月面観測を実施

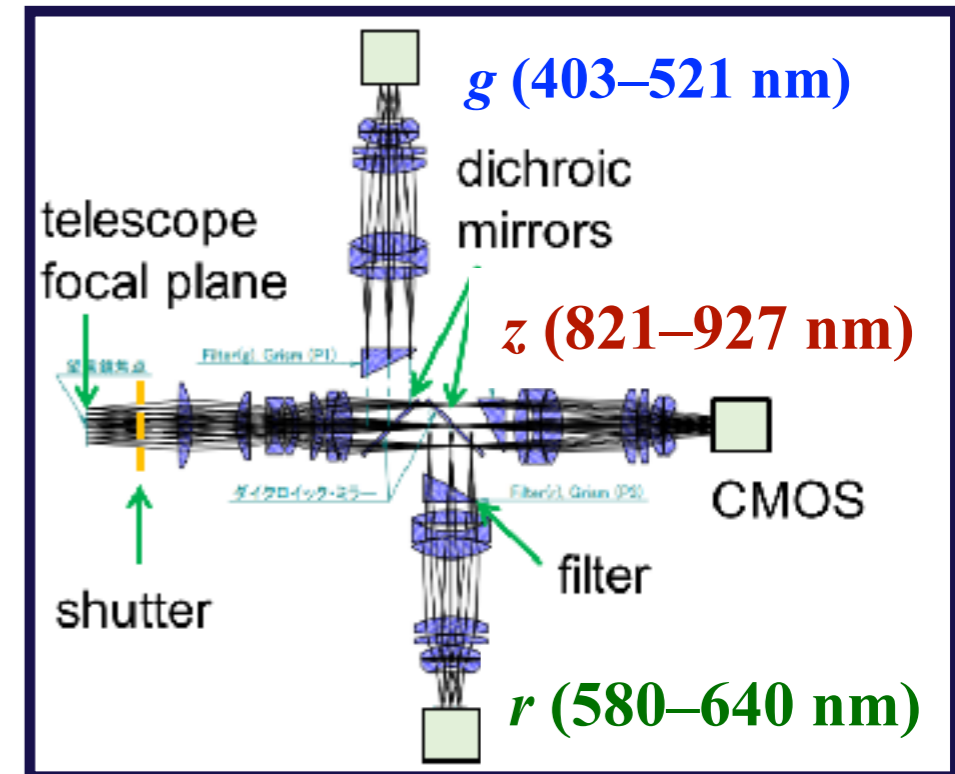
# CMOSカメラ TriCCS による月面観測

- TriCCS = Tricolor CMOS Camera and Spectrograph
  - 3.8 mせいめい望遠鏡@岡山天文台に搭載の可視近赤外線撮像分光装置
  - 最高**98 fps**で**3バンド同時**撮像が可能

現行のNELIOTAプロジェクトとの性能比較

	Telescope D (m)	Filters	Frame rate	FoV (arcmin <sup>2</sup> )
<b>Seimei/ TriCCS</b>	<b>3.8</b>	<b>3 (g, r, z)</b>	<b>98 (10.2 ms)*<sup>1</sup></b>	12.6 x 7.5
NELIOTA	1.2	2 (R, I)	30 (33 ms)	17.0 x 14.4

\*<sup>1</sup> readout time of ~0.4 ms



(C)京都大学岡山天文台

- ターゲット：ふたご座流星群由来のLIF
  - 母天体：(活動)小惑星 (3200) Phaethon
- 観測日時：2025年12月15日 04:30~05:30, 06:00~06:40(JST)頃

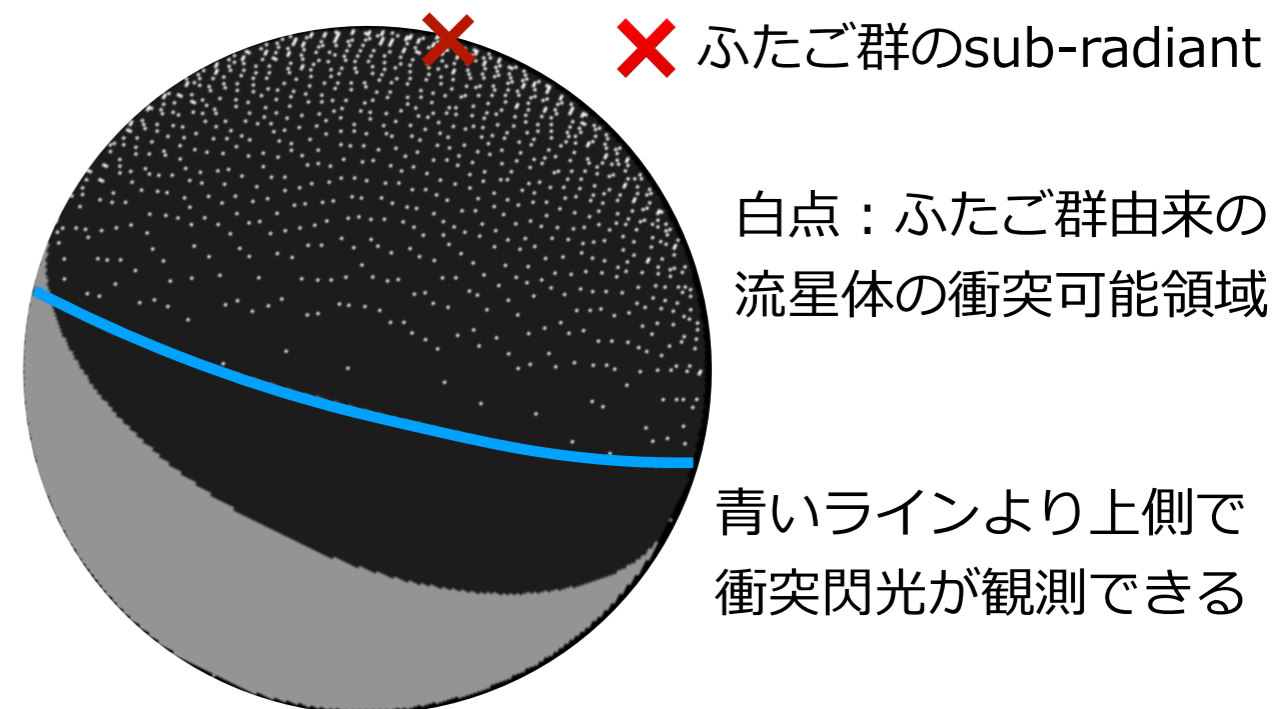
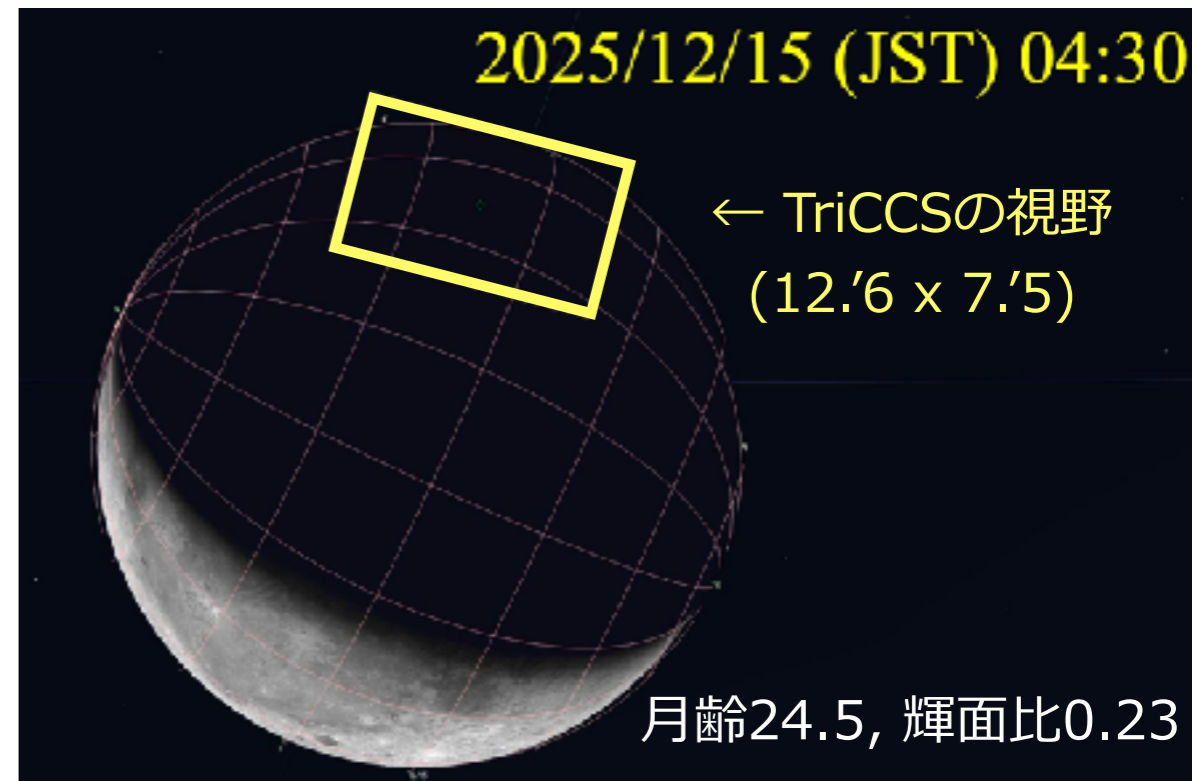
# 観測手順

① 月高度が  $>20$  deg を超えたらJPL Horizonsの月の天体暦(1分毎)を使い月追尾を開始

② 月の縁が視野に入り、かつ月面上のふたご群のsub-radiant の位置を考慮した位置・角度に手動でoffsetをかける (何回かイテレーション)

③ 視野位置が決まったら98 fps, 1000フレームを1セットとして連続撮像を開始

日大・船橋キャンパスからも40 cm望遠鏡 (non-filter) を用いた同時観測を実施



# 解析フロー

Standard image reduction (dark/flat)

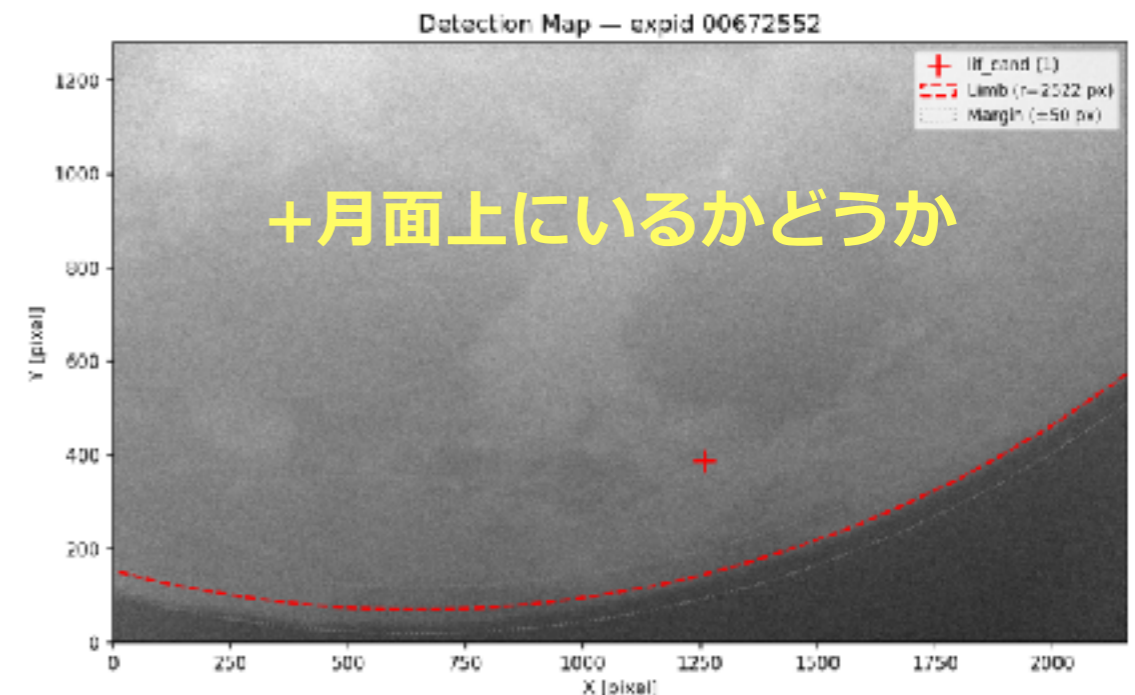
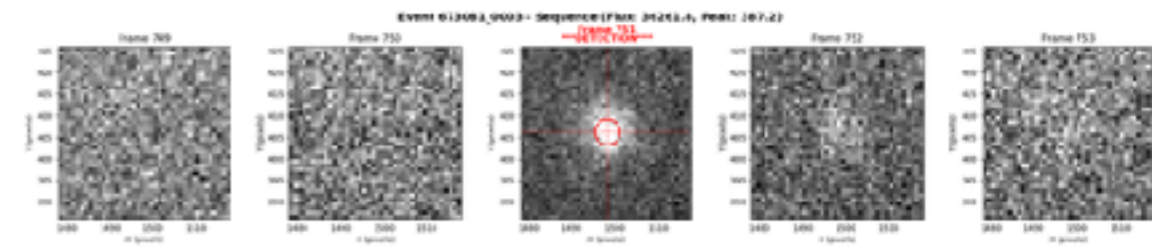
Background estimation following [4]  
 $B_t = \alpha I_{t-1} + (1 - \alpha)B_{t-1}$  with  $\alpha = 0.125$

Source detection ( $5\sigma$ ) on  $D_t = I_t - B_t$

FWHM cut ( $1.5'' < \text{FWHM} < 5.0''$ )

Detected in 3-bands, same pos. & time

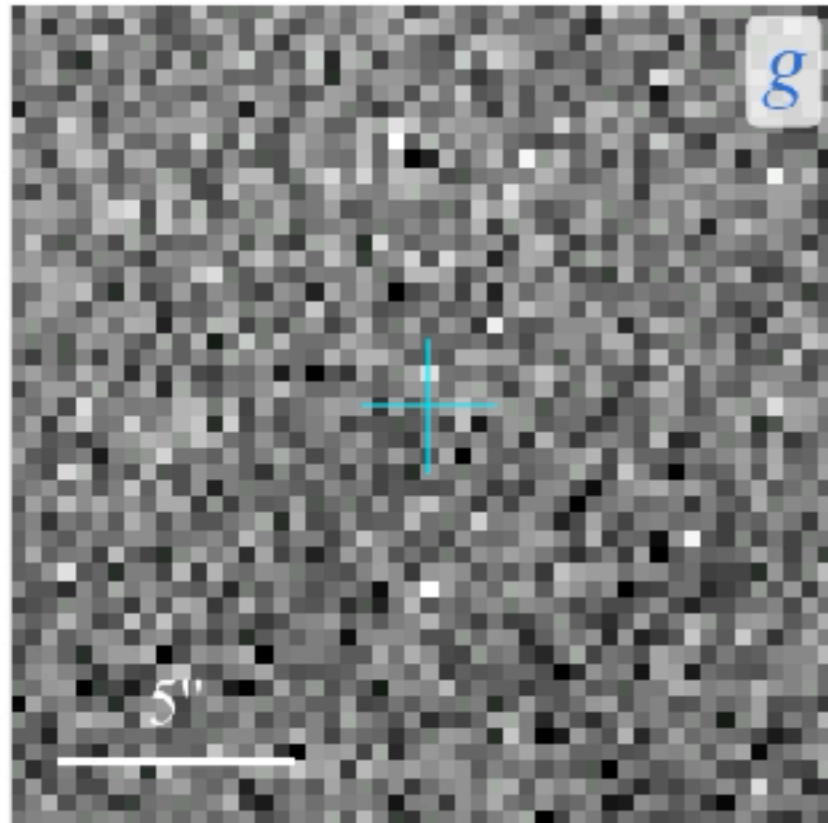
Human visual inspection to confirm



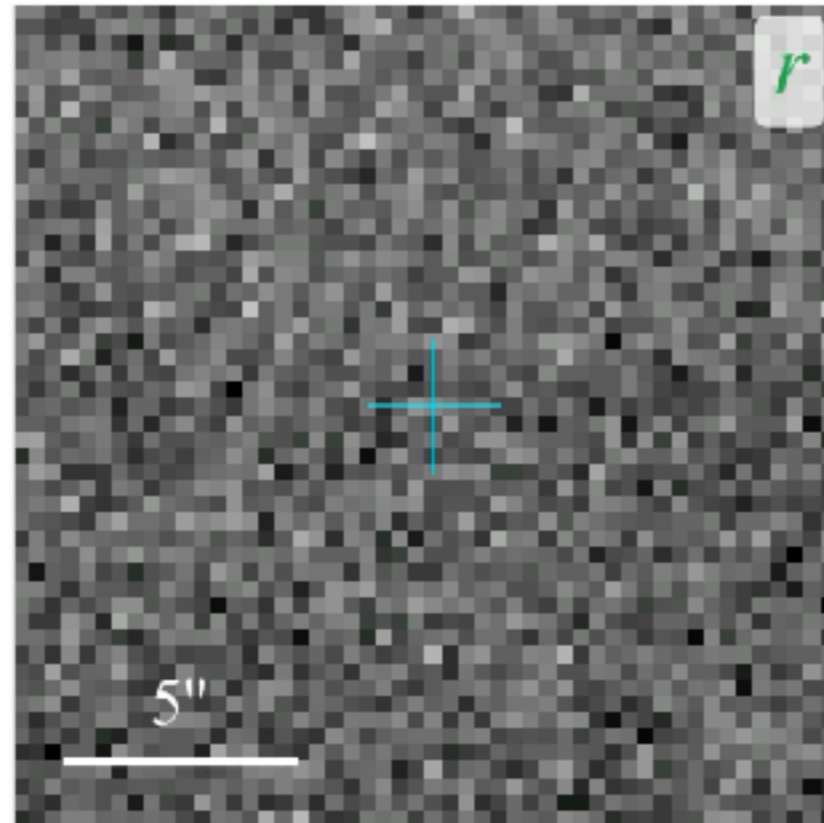
日大・40 cm望遠鏡との同時検出  
された1イベントを発見!

# 3バンドで検出されたLIF (LIF 251214A)

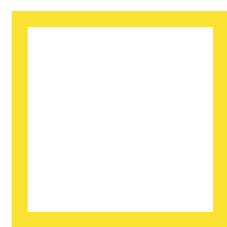
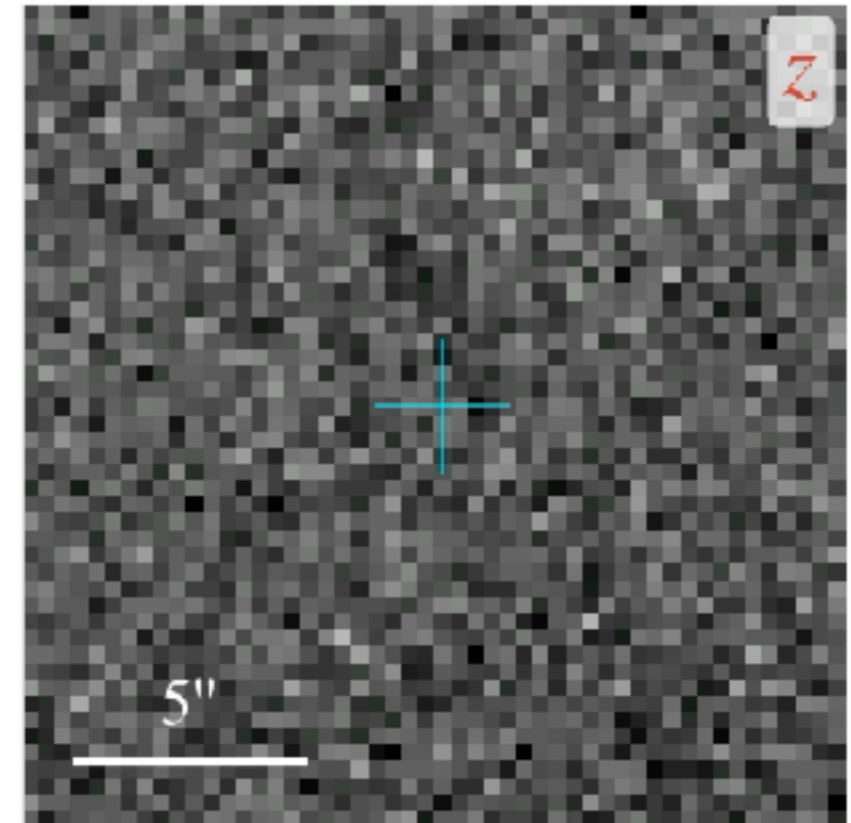
403–521 nm



580–640 nm

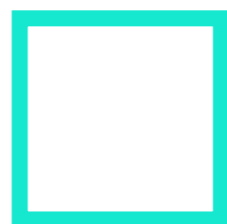


821–927 nm



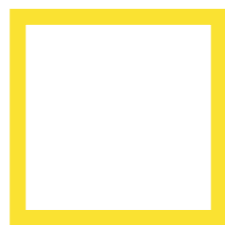
ピークフレーム

$t = -10.2$  ms



検出フレーム

# 3バンドで検出されたLIF (LIF 251214A)



ピークフレーム



検出フレーム

# 3バンドで検出されたLIF (LIF 251214A)

3バンドのピークフレーム (検出 1 枚目)

g (403 – 521 nm)

r (580 – 640 nm)

z (821 – 927 nm)

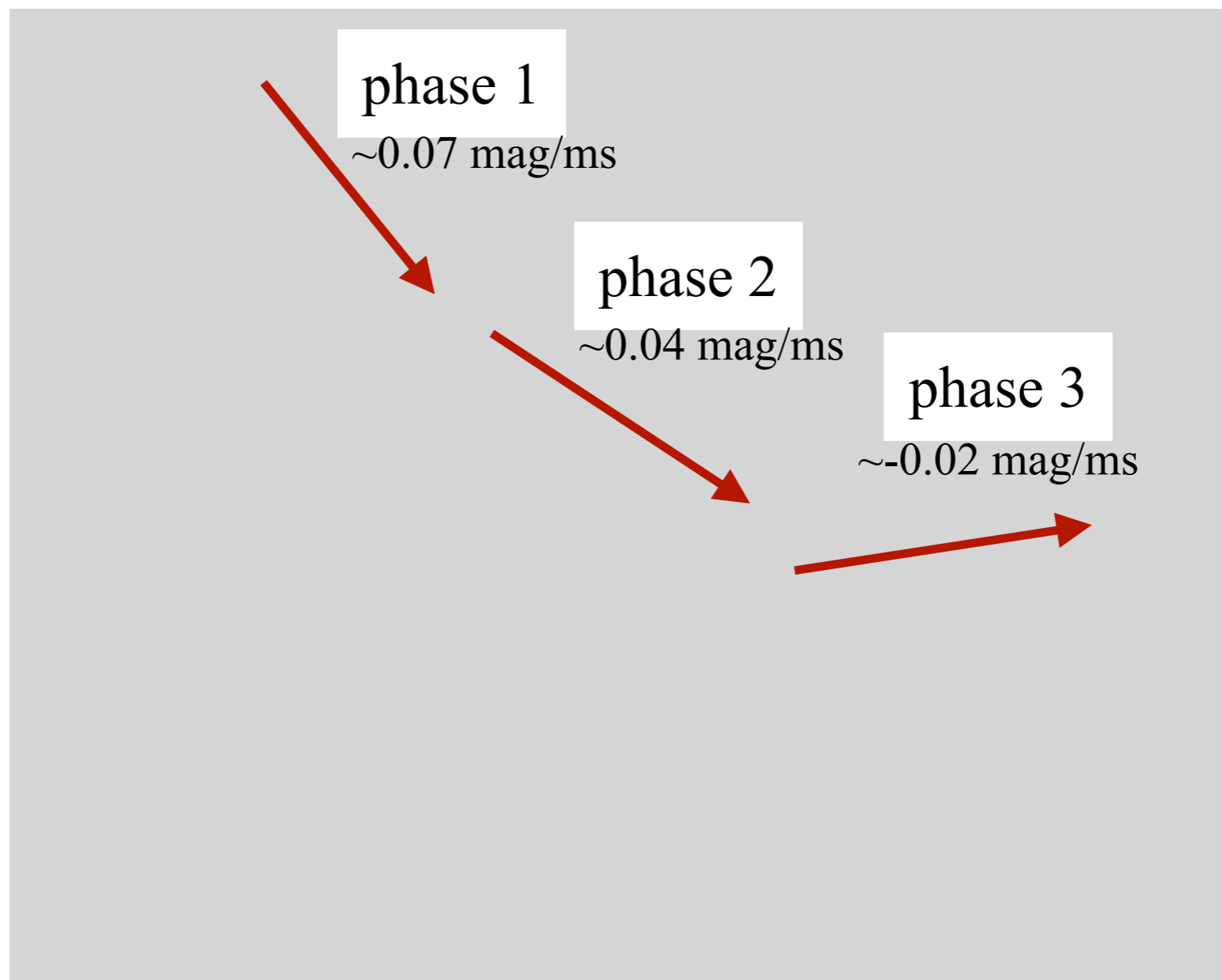


← 高精細月面画像 (Virtual Moon Atlas) にTriCCS  
画像を重ね、1度刻みで月面緯度, 経度を読み取った

ふたご群起源である確率  $p^{\text{GEM}} = \frac{N_{\text{GEM}}}{N_{\text{GEM}} + N_{\text{SPO}}} \sim 0.82$

# ライトカーブ

- 10.2 ms per frame で得られたライトカーブから見えてきたこと
  - 青い側のg,rバンドは急速に減光 ( $< \sim 20$  ms)
  - 一方、zバンドは $\sim 90$  ms 程度持続 + 異なる減光率のフェーズが見える



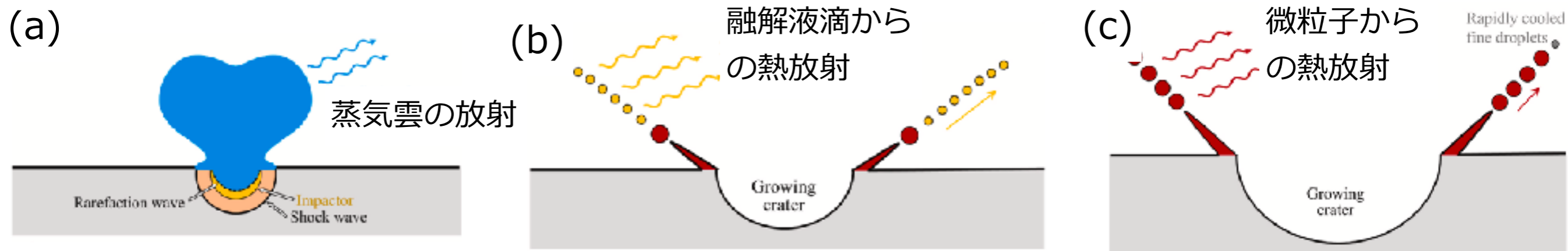
# 単温度黒体放射フィッティング

- Frame 0 (peak フレーム)
  - $T = 3,300$  K (c.f. 典型値は  $\sim 2,500$ - $3,500$  K)
  - $\chi^2 = 42 \rightarrow$  単温度黒体モデルはデータと乖離大
  - g-band に合わせようとする  $\sim 5,600$  K
- Frame 1 (peak +1)
  - $T = 2,480$  K ( $\chi^2 = 15$ )
  - g-band に合わせようとする  $\sim 5,500$  K

$\sim 10$  msの間に高温成分の寄与が見える  
(従来のNELIOTA観測はR, Iの2バンド, 33 ms)

# g-band におけるフラックス超過の起源

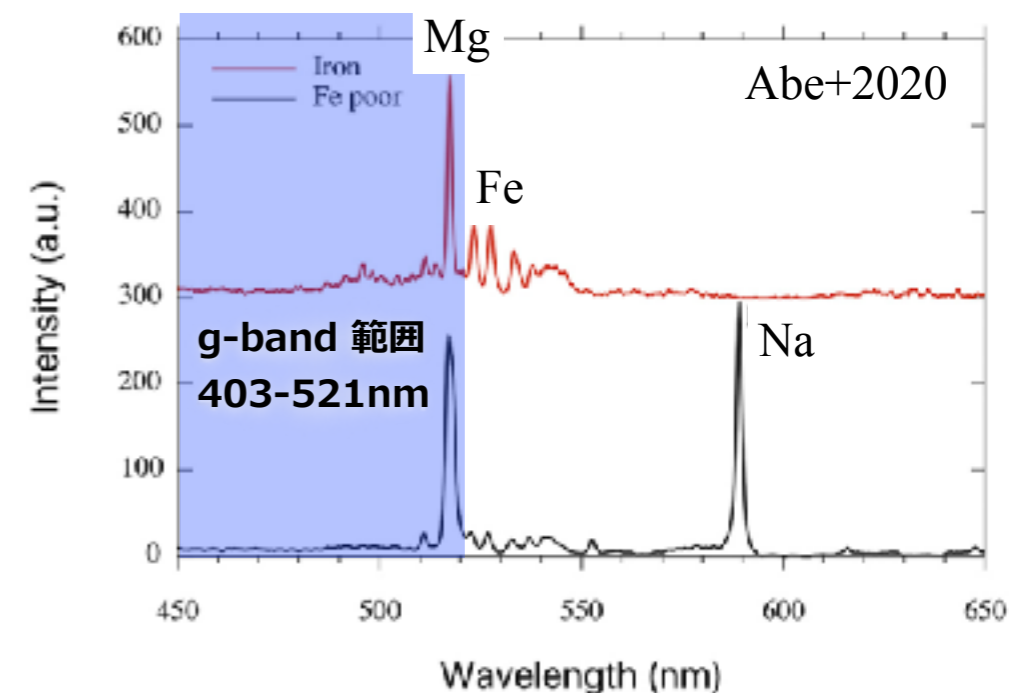
- 衝突直後に流星体が気化・電離し、高温蒸気・プラズマ雲の形成を示唆
    - 先行研究のLIF発光の物理的描像を捉えたか？ (Fuse+2020, Yanagisawa+2025)
- 衝突直後(a)高温の蒸気雲・プラズマ発光 → その後(b,c)融解した微粒子の熱放射



“The radiation from the expanding vapor plume would be a source of a LIF” by Yanagisawa+2025

Yanagisawa+2025

- この発光が流星体由来だとすると
  - ふたご座流星群のMg, Feに富む組成からこれらの元素の輝線発光が寄与したか？
  - ただし、月面の砂レゴリス由来(二酸化ケイ素他)も含まれているはずで、起源の切り分けが必要



# まとめと今後の展望

- CMOSカメラTriCCSを用い, 98 fps 3バンドによる月面衝突閃光を初検出
  - 10.2 msの高い時間分解能により、ライトカーブの減光率の違いが見えた
  - これまで仮定されてきた単温度の黒体放射の妥当性を検証した
- 初期(<~ 10 ms)にg-band excessが見られ、単温度黒体放射からの乖離
  - 衝突直後の高温蒸気雲による放射が~10 msまで続いたと考えられる
  - ふたご群の流星体由来の元素による輝線発光(Mg, Fe)を示唆
- 今後の継続観測（ふたご群; 12月中旬+おうし座南群; 11月上旬）
  - 短波長側のexcessが母天体の化学組成に由来しているのか、それとも月レゴリス由来なのかを調査
  - ライトカーブに見られた3フェーズもサンプルを増やし統計的有意性を検証