

Tomo-e Gozen の時間分解能を 空間分解へ活かす

直川史寛

東京大学理学系研究科 物理学専攻 博士1年
ビッグバン宇宙国際研究センター

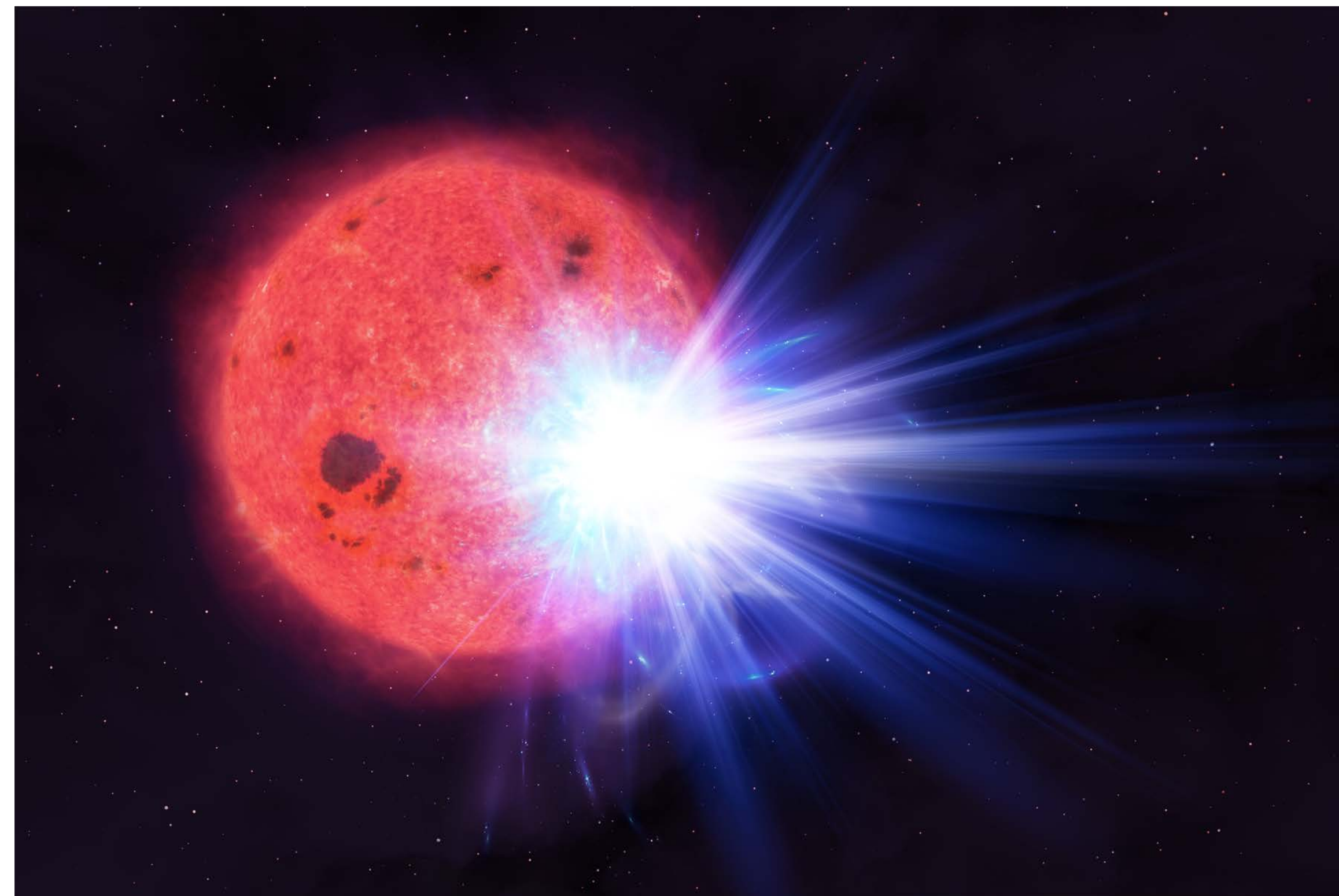
大澤亮

国立天文台

● 時間軸天文学

by トモエゴゼン (と TriCCS)

HeSO



HeSO (Hertz stellar object) サーベイ

- 秒~分スケール変動天体探査
- M型星高速フレア(右画像)、高速自転白色矮星
白色矮星周りの系外惑星からのトランジット信号
- 全北天サーベイをしたい

Credit : 東京大学木曾観測所

M.Aizawa, K.Kawana, K.Kashiyama, R.Ohsawa,
H.Kawahara, F.Naokawa, T.Tajiri, N.Arima, H.Jiang,
T.Hartwig, K.Fujisawa, T.Shigeyama, K.Arimatsu, M.Do,
T.Kasuga, N.Kobayashi, S.Kondo, Y.Mori, S.Okumura,
S.Takita, S.Sako,
PASJ, 74, 1069-1094, 2022

- トモエ (CMOSセンサ) をの**高い時間分解能**を
空間分解に活用するアイデアを2つ
- 実装や実際の観測等は**まだ手付かず**
分からないことだらけ・・・
- とりあえず皆様からご意見・ご教授**いただきたい**
質疑応答・懇親会でよろしく**お願い**します！

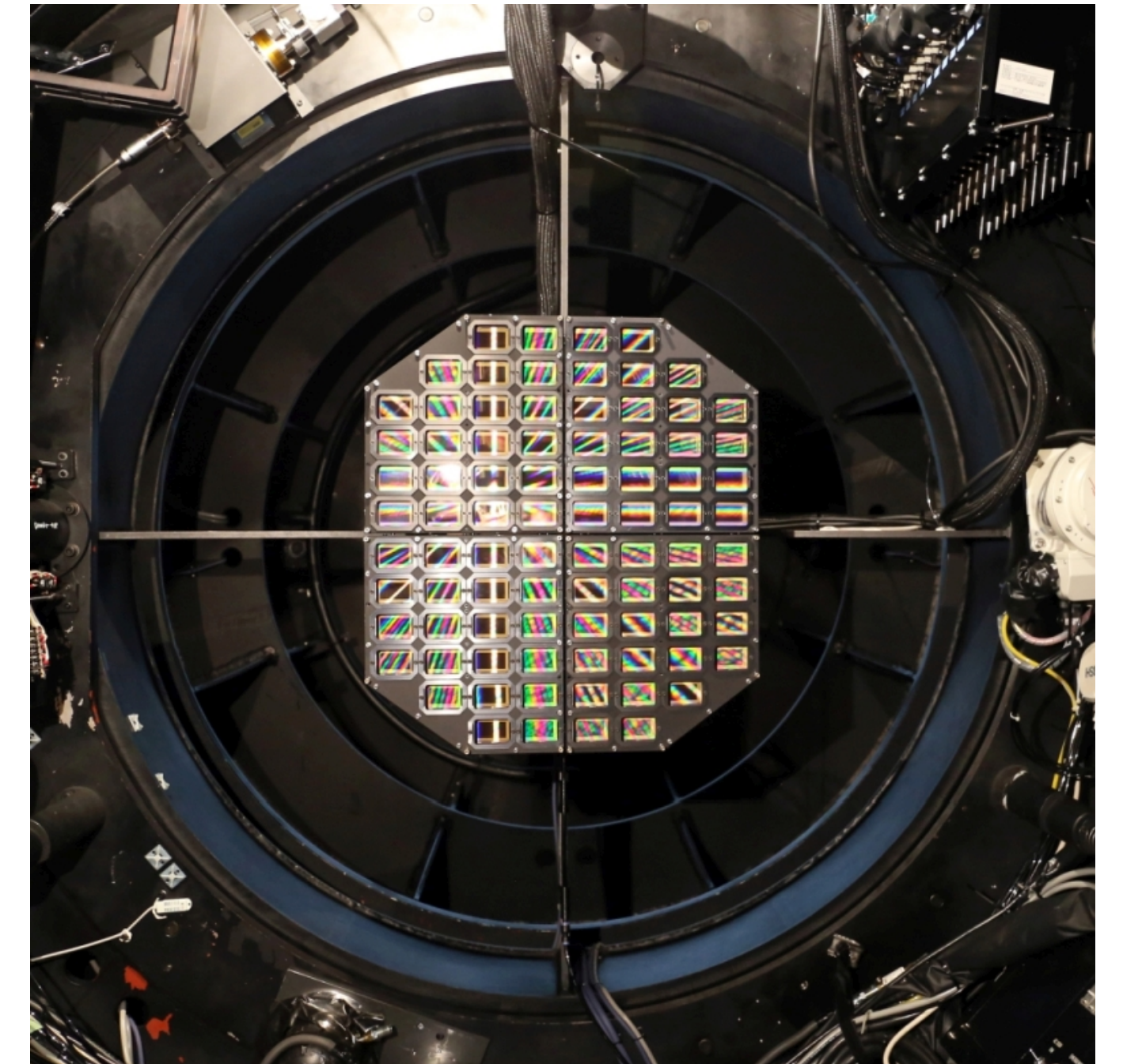
● 高い**時**間分解能

- 普通の観測：毎秒 2 フレーム
- 部分読み出しなら：毎秒 160 フレーム
- CMOS センサによる

速い読み出し時間 & 低い読み出し雑音

● 広い視野

ワンポイントティンングで 20 平方度をカバー



クレジット：東京大学木曾観測所

一方、**空**間分解能は・・・

口径 D と観測波長 λ で決まる

$$\text{回折限界} \sim \frac{\text{観測波長}}{\text{口径}}$$

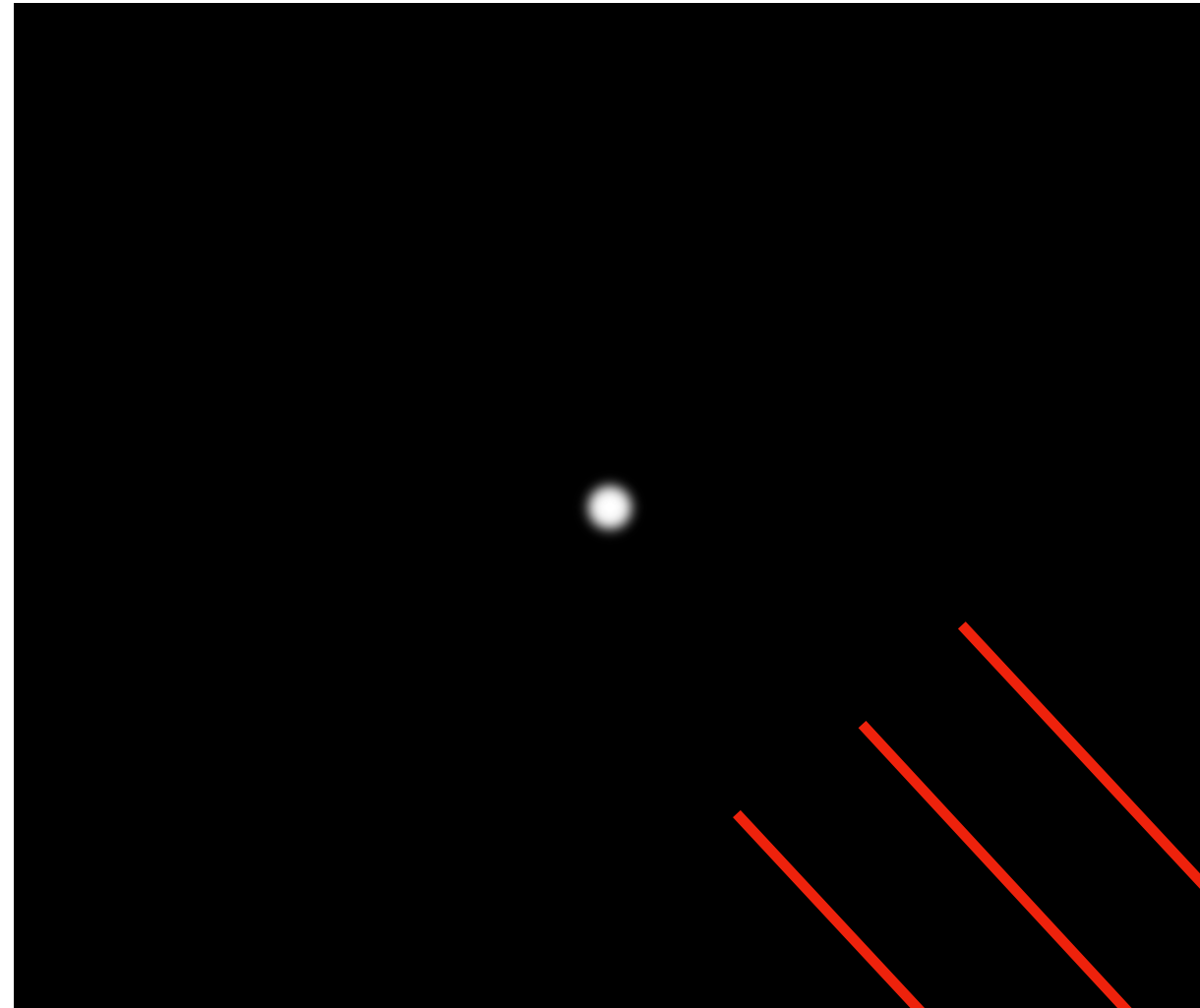
木曾シュミット (1.05 m) \rightarrow 0.1 秒角 くらい
すばる (8.2 m) \rightarrow 0.01 秒角 くらい

実際にはシーイングで決まる

木曾だと典型的には 4 秒角 くらい

日本で一番良い所でも 1 秒角 切るか切らないか

ハワイで平均 0.5 秒角 くらい

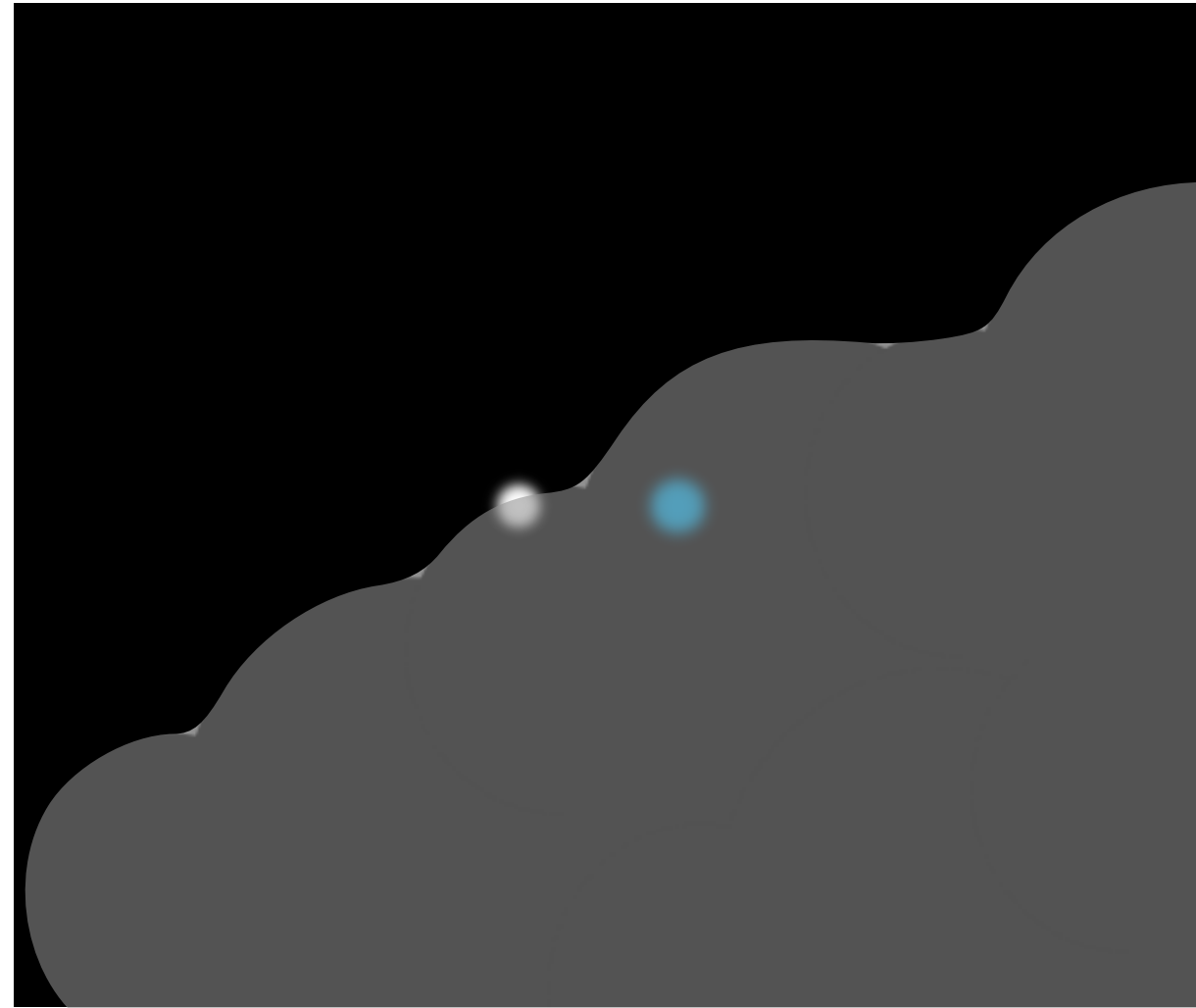


天球上での
輝度分布 (点源)



焦点面での像



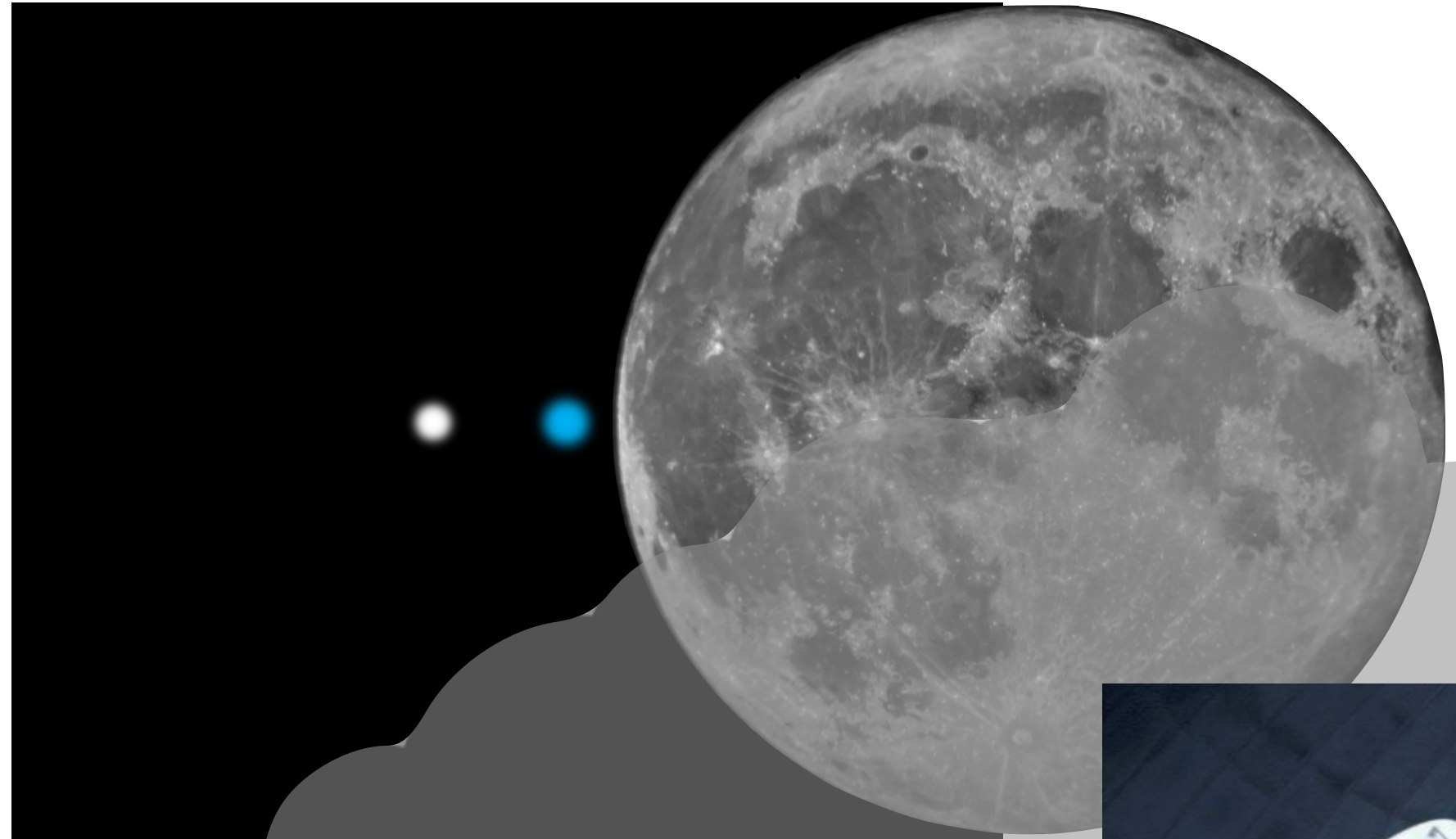


大気

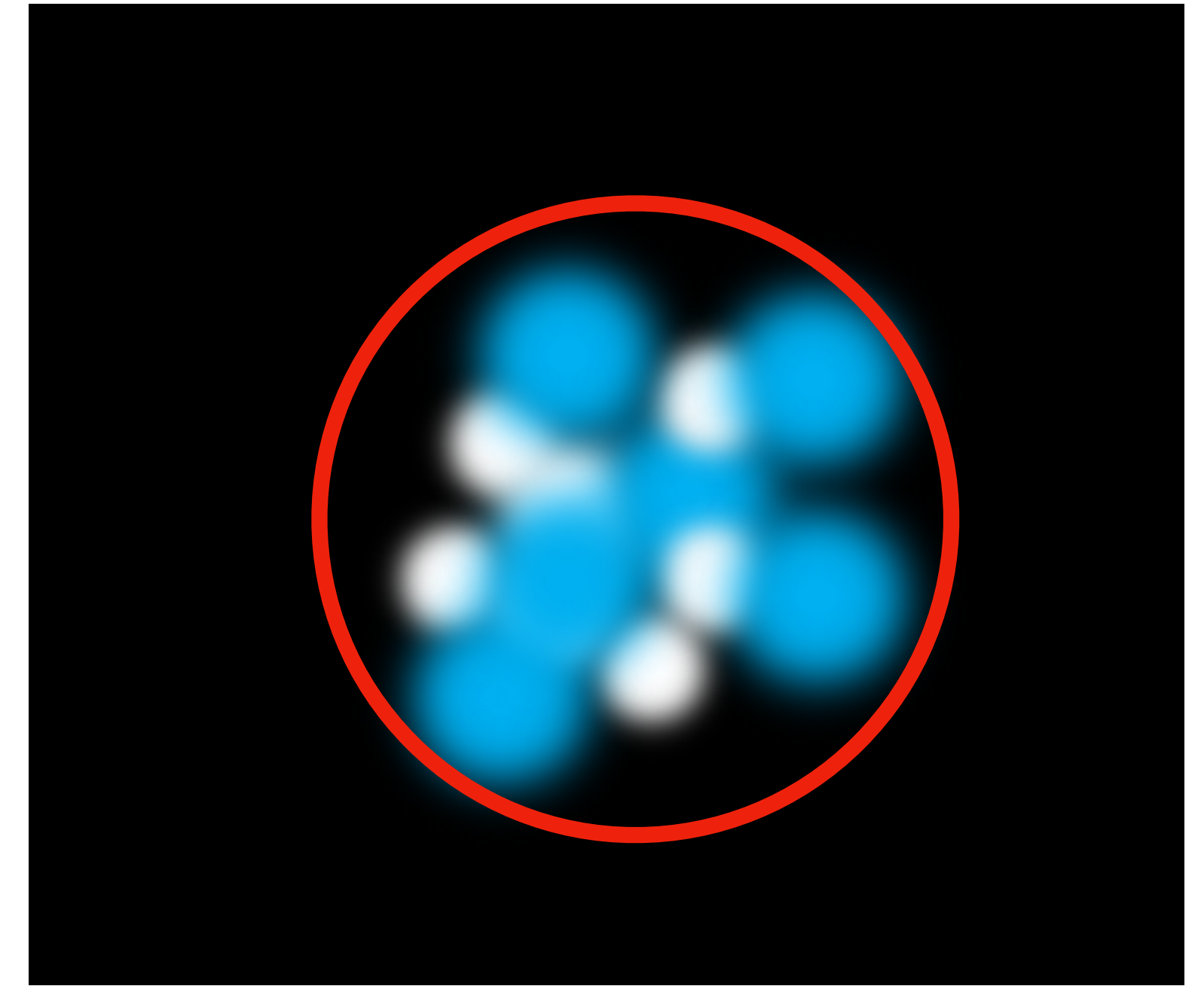


一つ目のアイデア

月を使う



大気

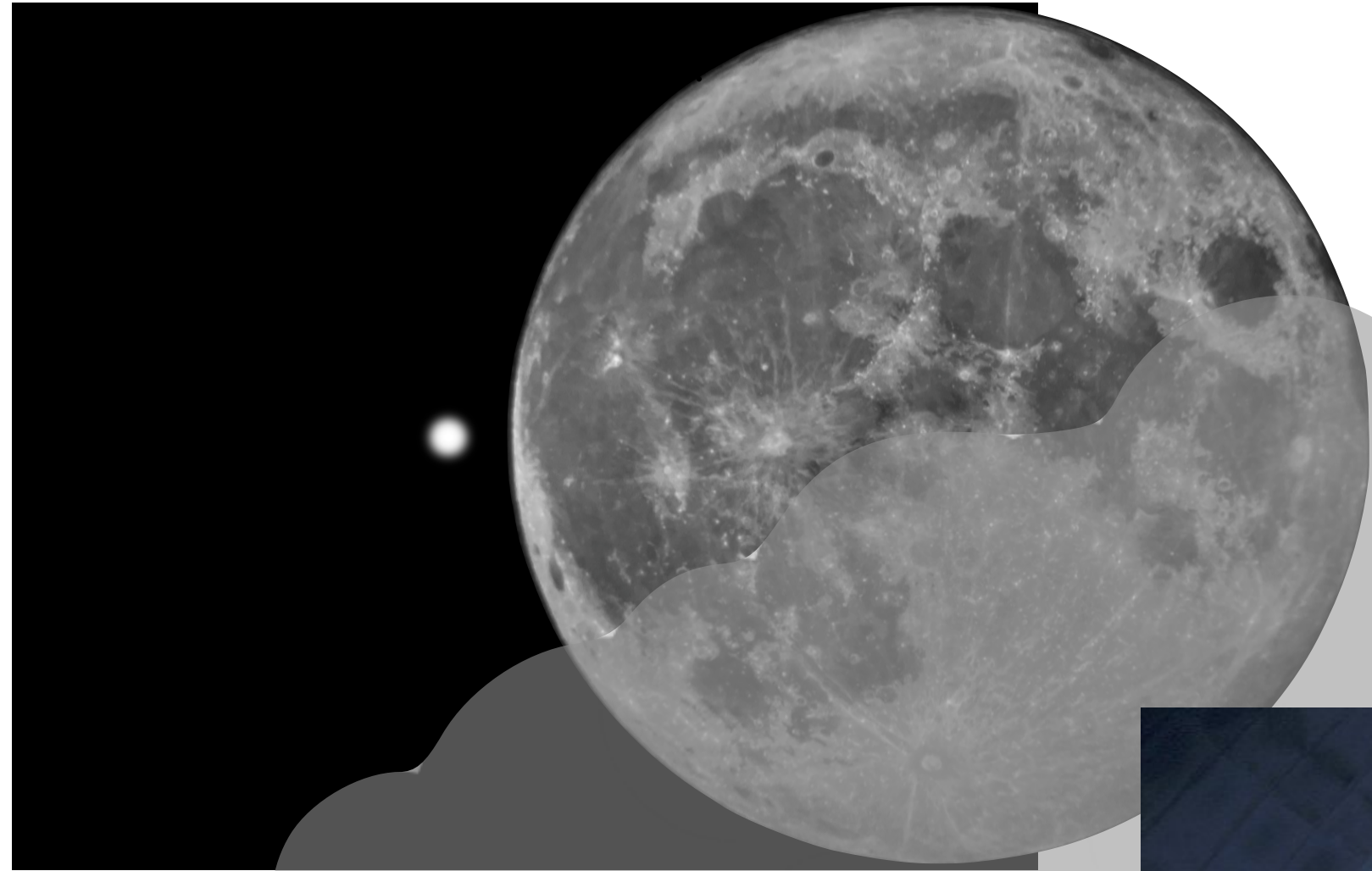


flux



time

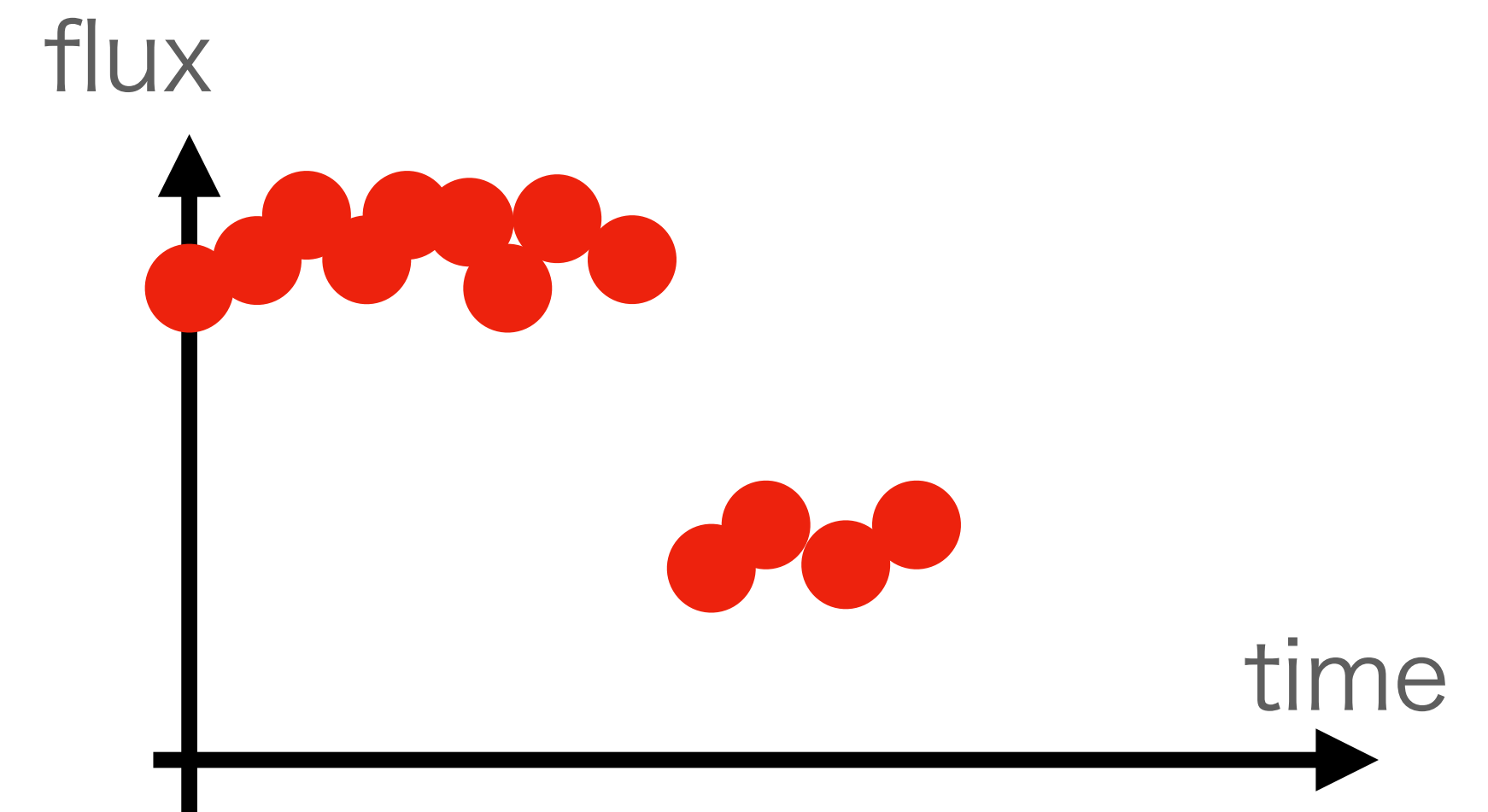
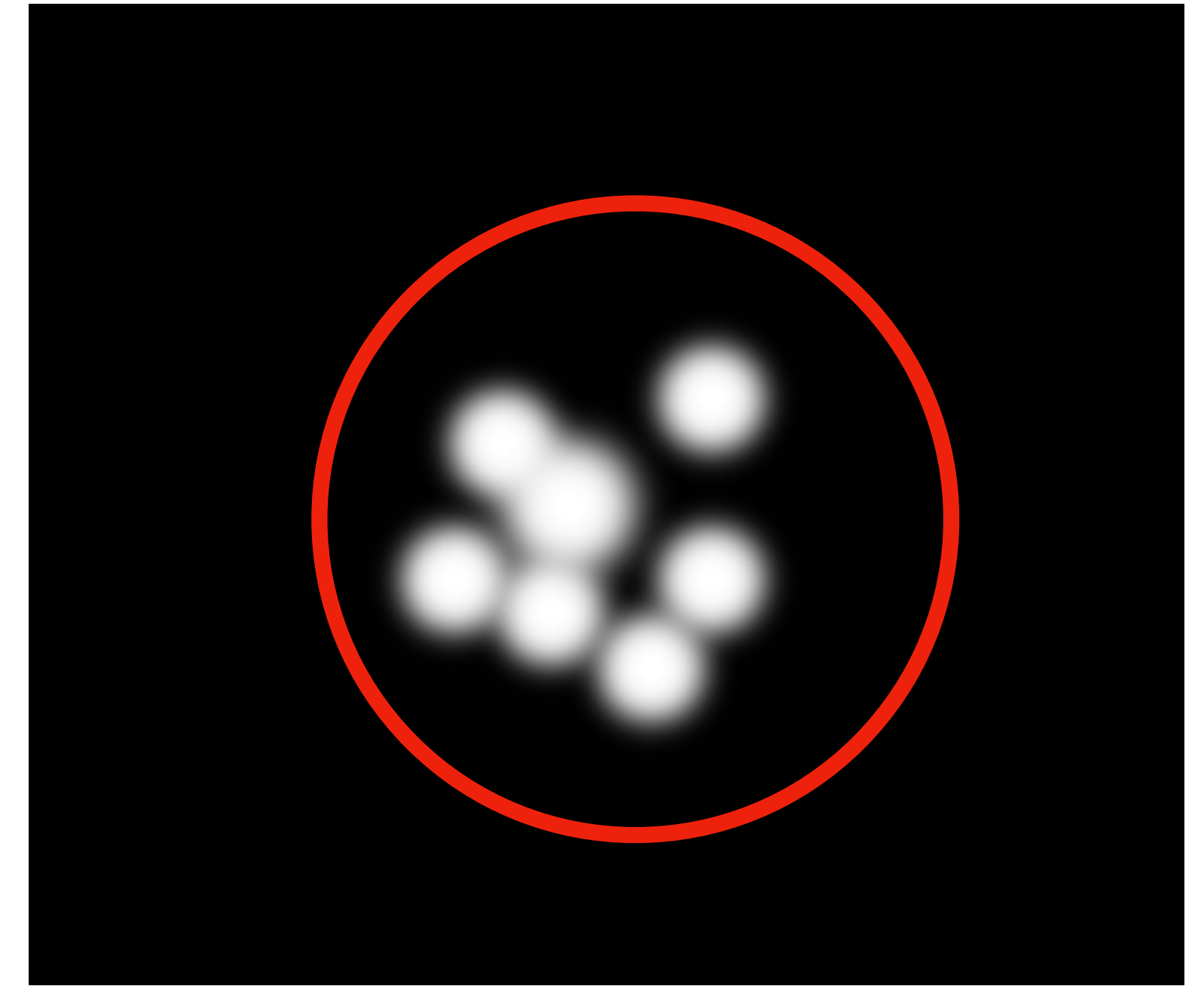
クレジット：東京大学木曾観測所



大気

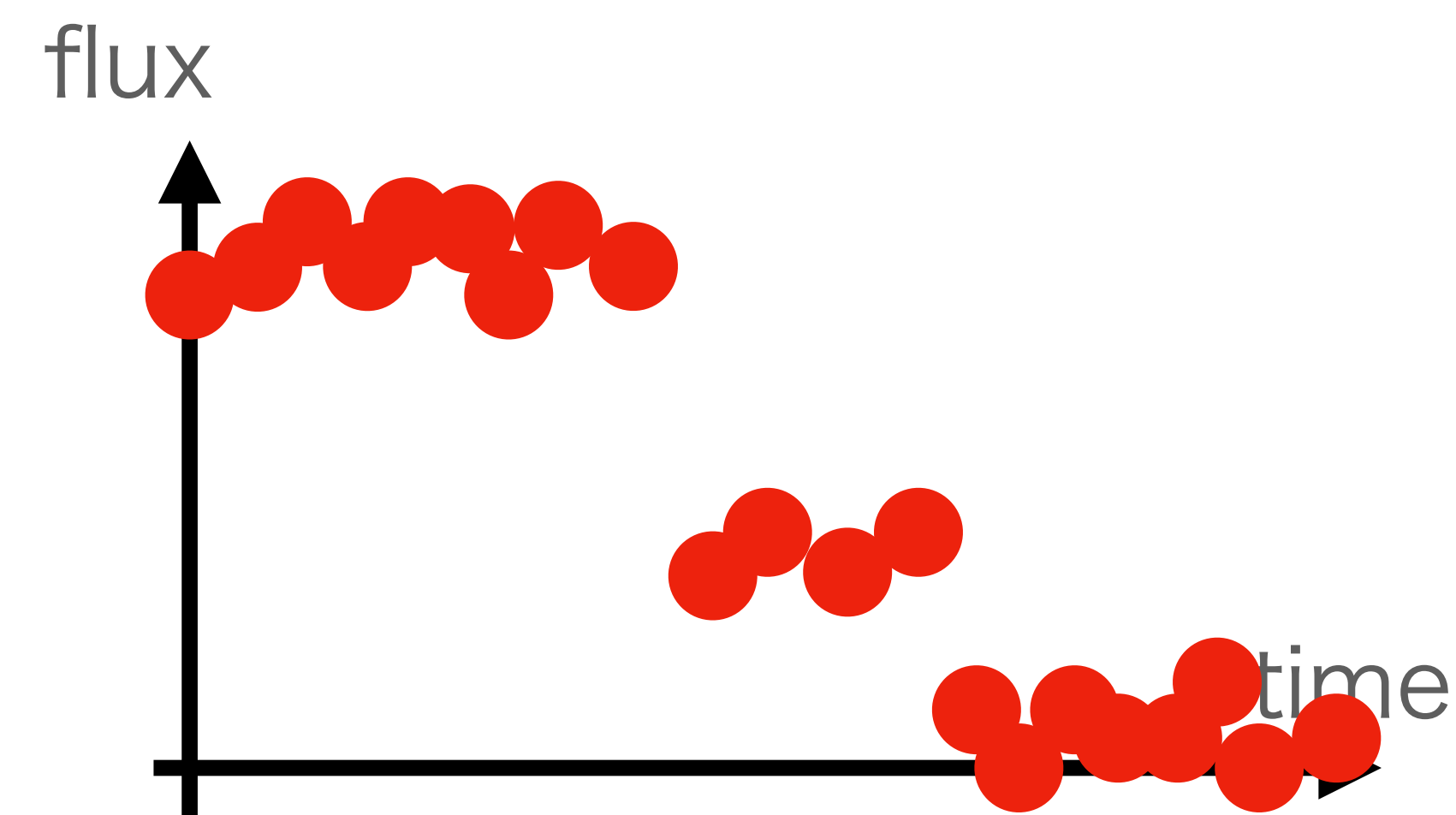
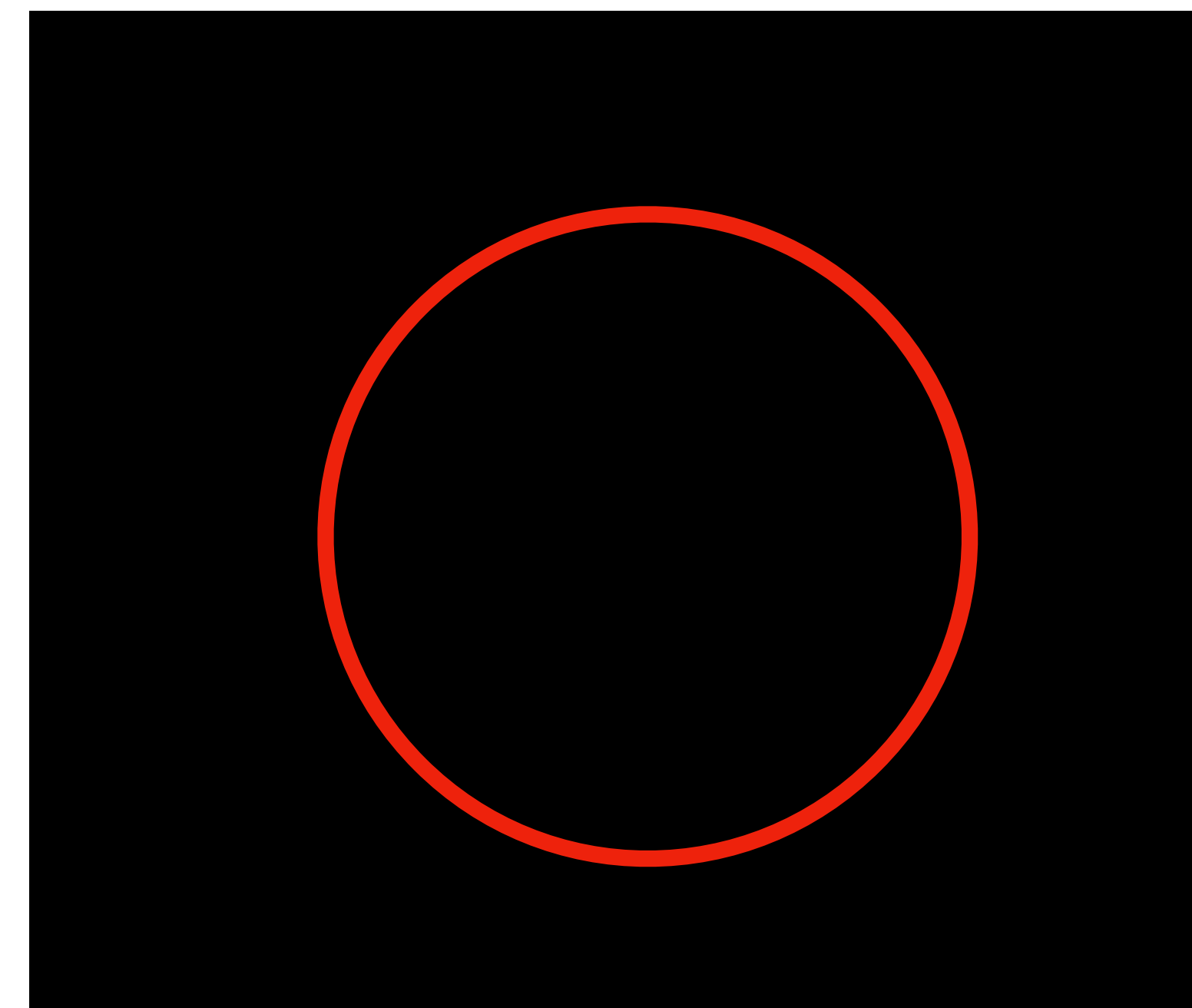


クレジット：東京大学木曾観測所





大気



月による星食の利用

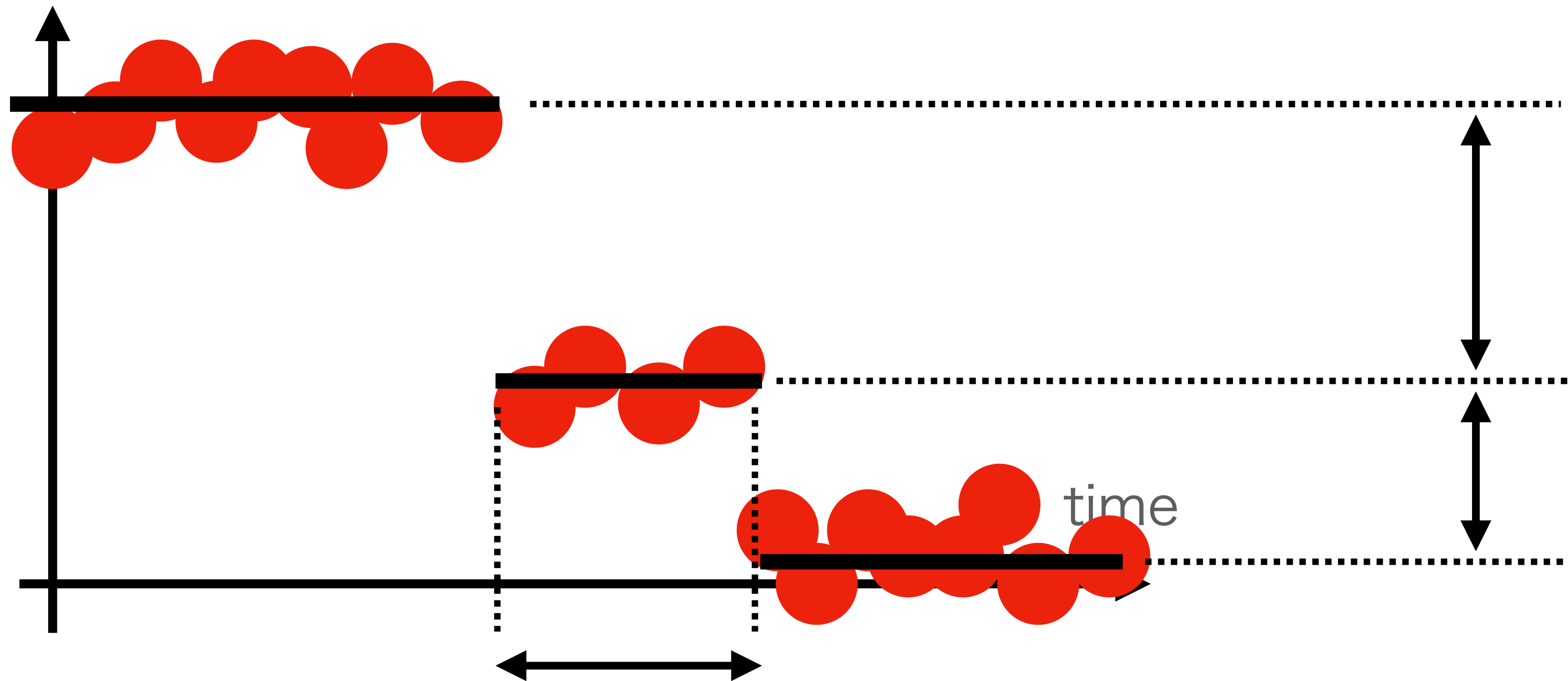
- 重星の分解・新たな重星の発見



異なる2地点からの観測で、両天体の位置関係も特定可能。



flux



フラックス比からそれぞれの星の等級も算出可能

この時間から、離角を測定可能 → 時間分解能が高ければ高いほど良い

月による星食の利用

参考：星食観測日本地域コーディネーター (JCLO) 編 『星食観測ハンドブック2020』
http://astro-limovie.info/jclo/documents/Handbook/HandBook2020_Rev1000.pdf

● 重星の分解・新たな重星の発見

- アマチュア観測では普通に行われている
- 高速撮像 (動画撮影) が必要 → 研究観測用の普通の CCD では難しい
- CMOS なら可能なのでは??

トモエやTriCCS といえどアマチュア観測の時間分解能には及ばないが、深さでは優位性がある！！

- 月の移動速度 0.52秒角/秒

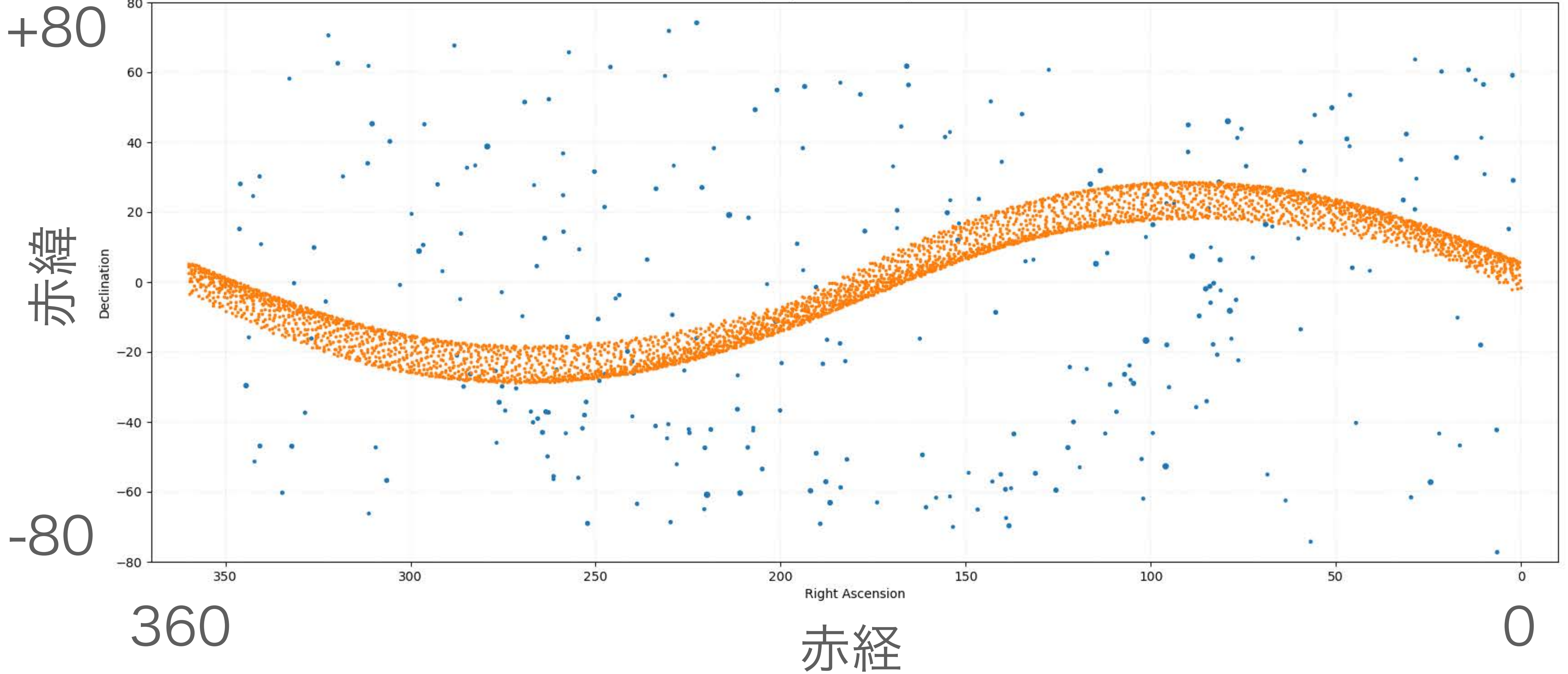
1 fps	~1 秒角
100 fps	~0.01 秒角

シーイングを超えて星を分解できる！
 現状の トモエ (or TriCCS) でも可能！

参考：離角の小さい重星の星食における光量変化のシミュレーション
https://astro-limovie.info/occultation_observation/doublestar.html

2023年4月から 2034年3月までの白道

April, 2023-March, 2034



月による星食の利用

● 重星の分解・新たな重星の発見

— 最近の研究例

プレヤデス星団での星食を VLT で観測
重星を 5 個検出 (最小離角は 0.017 秒)
(うち 3 個は新発見)

Richichi et al. A&A 541, A96 (2012)

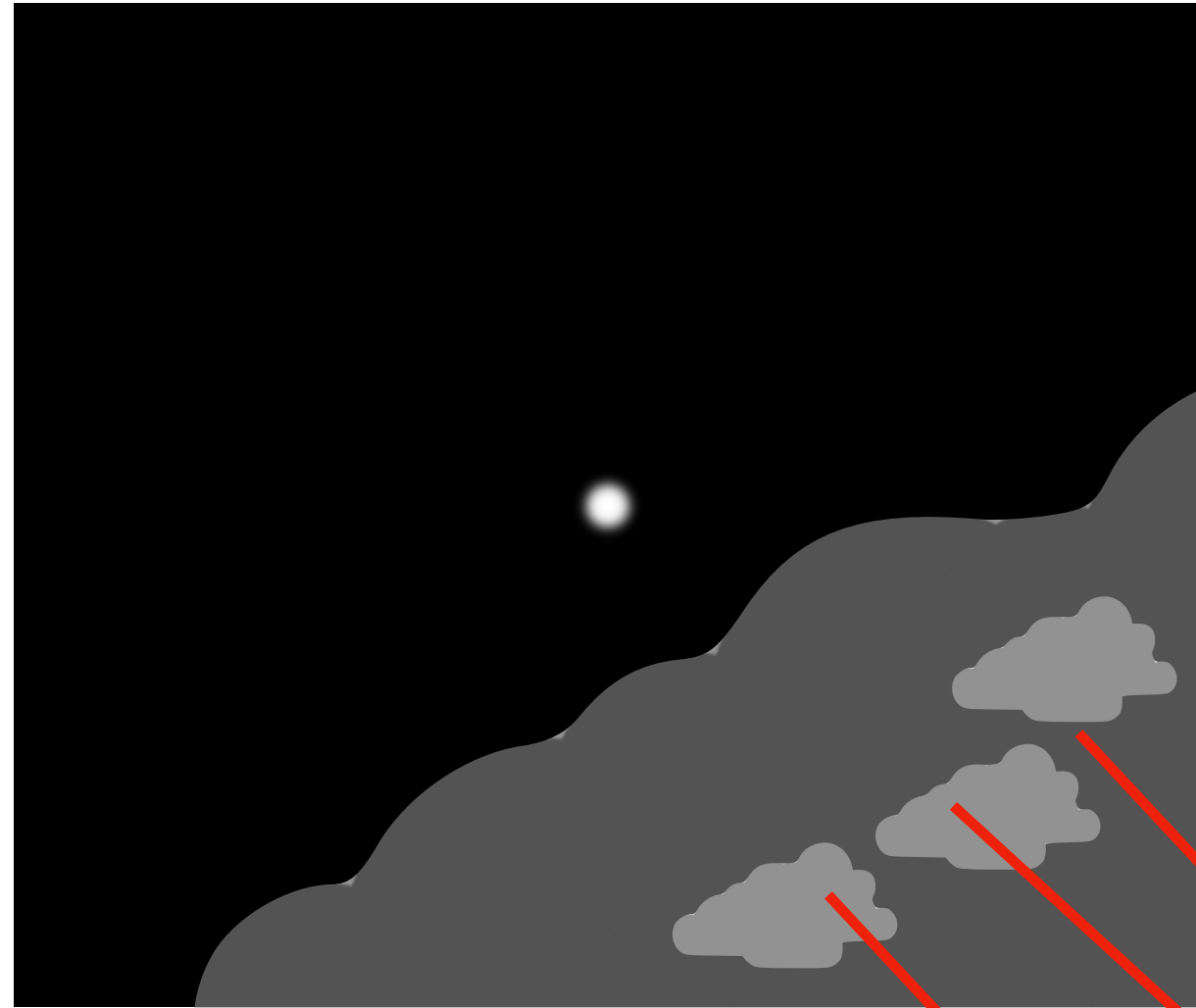
● その他の利用法

- 太陽系天体の座標の測定 → 位置天文学の誤差補正
- 月の地形の測定
- 最初に発見されたクエーサーの座標同定にも使われた

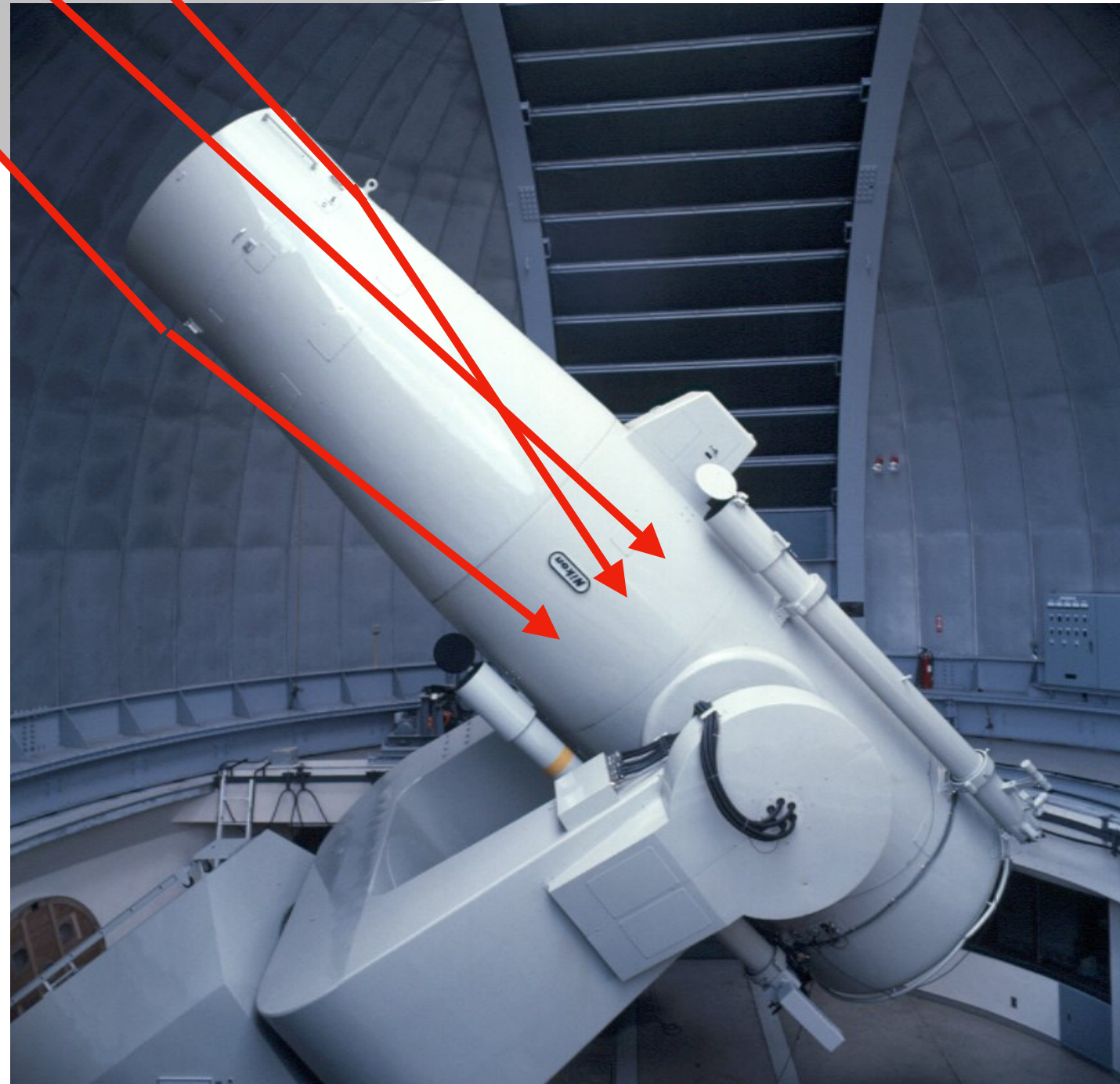
Hazard et al. Nature Physical Science 233, 89-91 (1971)

二つ目のアイデア

スペックル

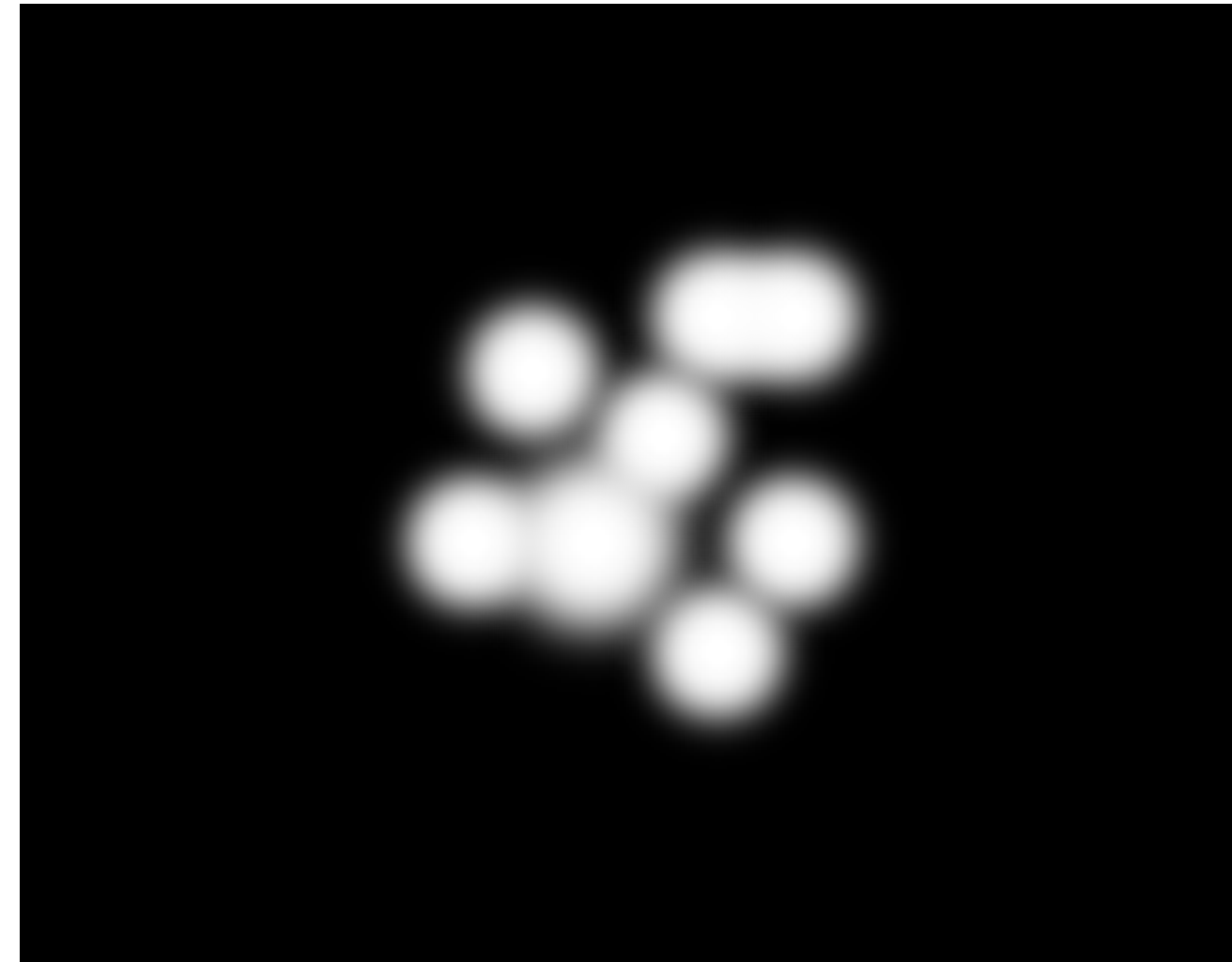


大気

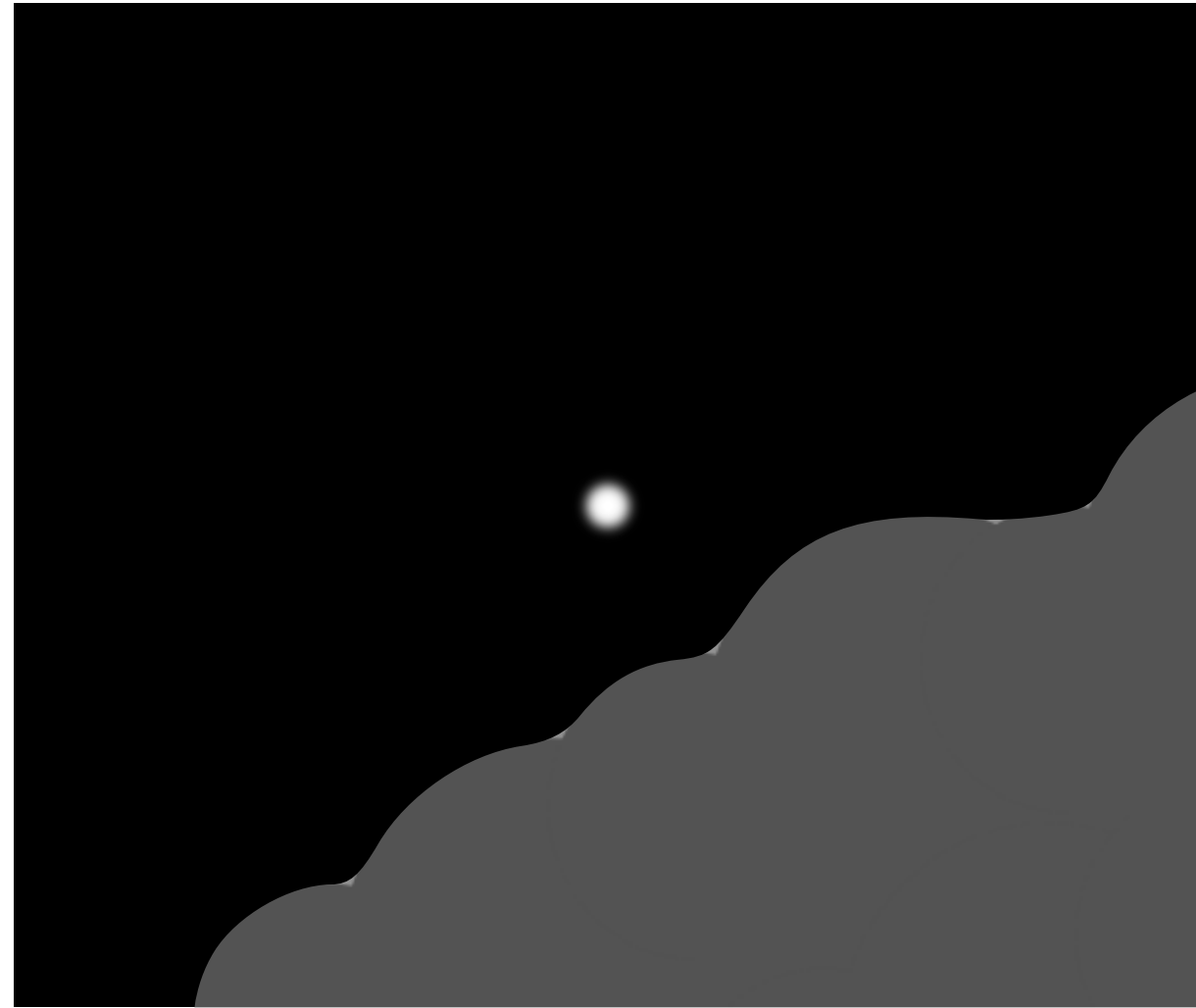


クレジット：東京大学木曾観測所

スペックル像



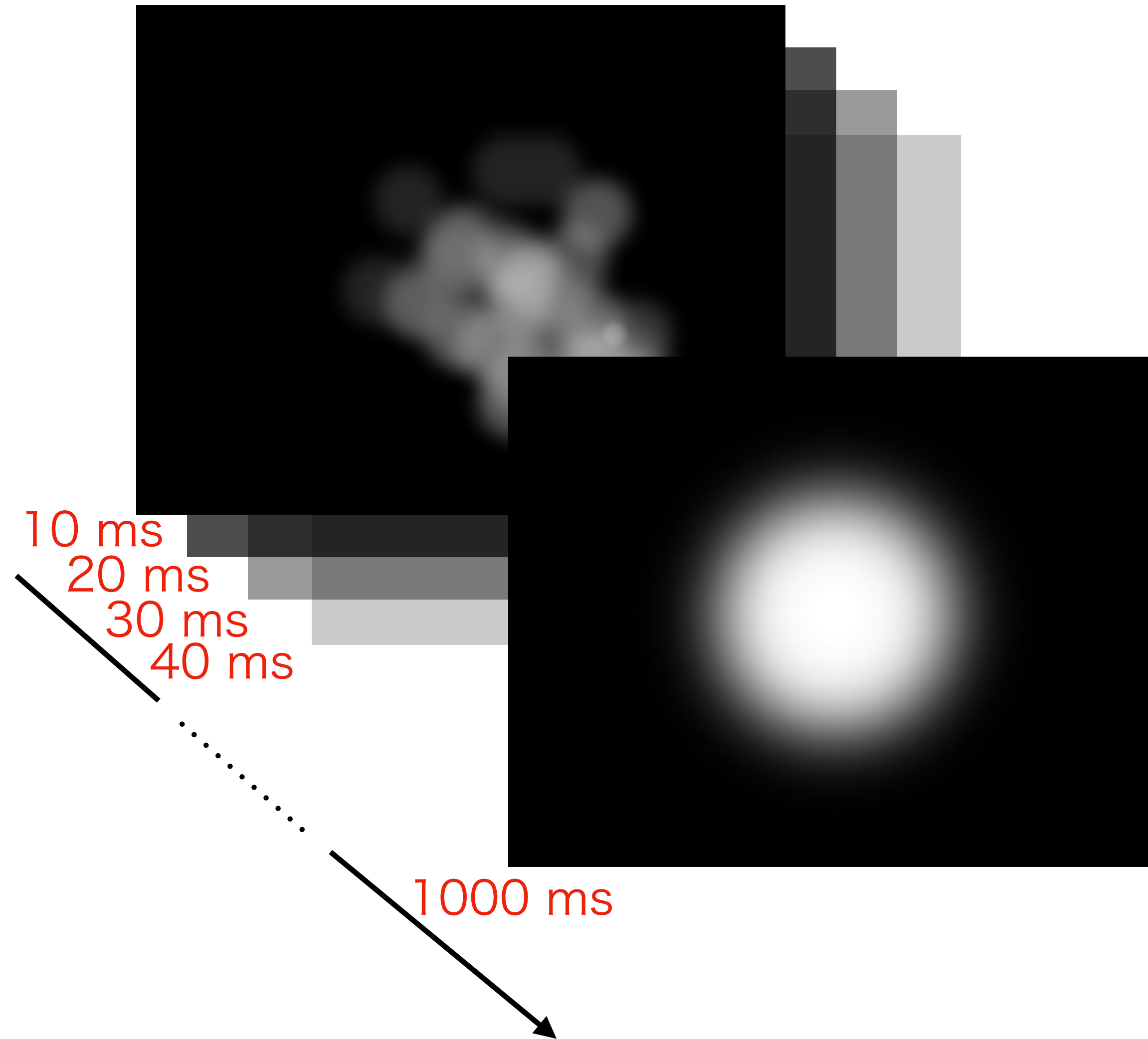
可視光では、 ~ 10 ms の
時間スケールで変化



大気

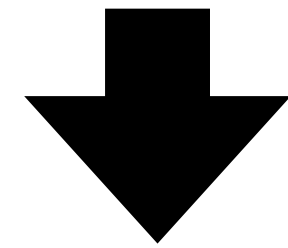


クレジット：東京大学木曾観測所



スペックル像

- 理論上は、**回折限界程度の情報**を持っている。
- **短時間露出**で、スペックル像を取得すれば、そこから回折限界像の情報取得が可能

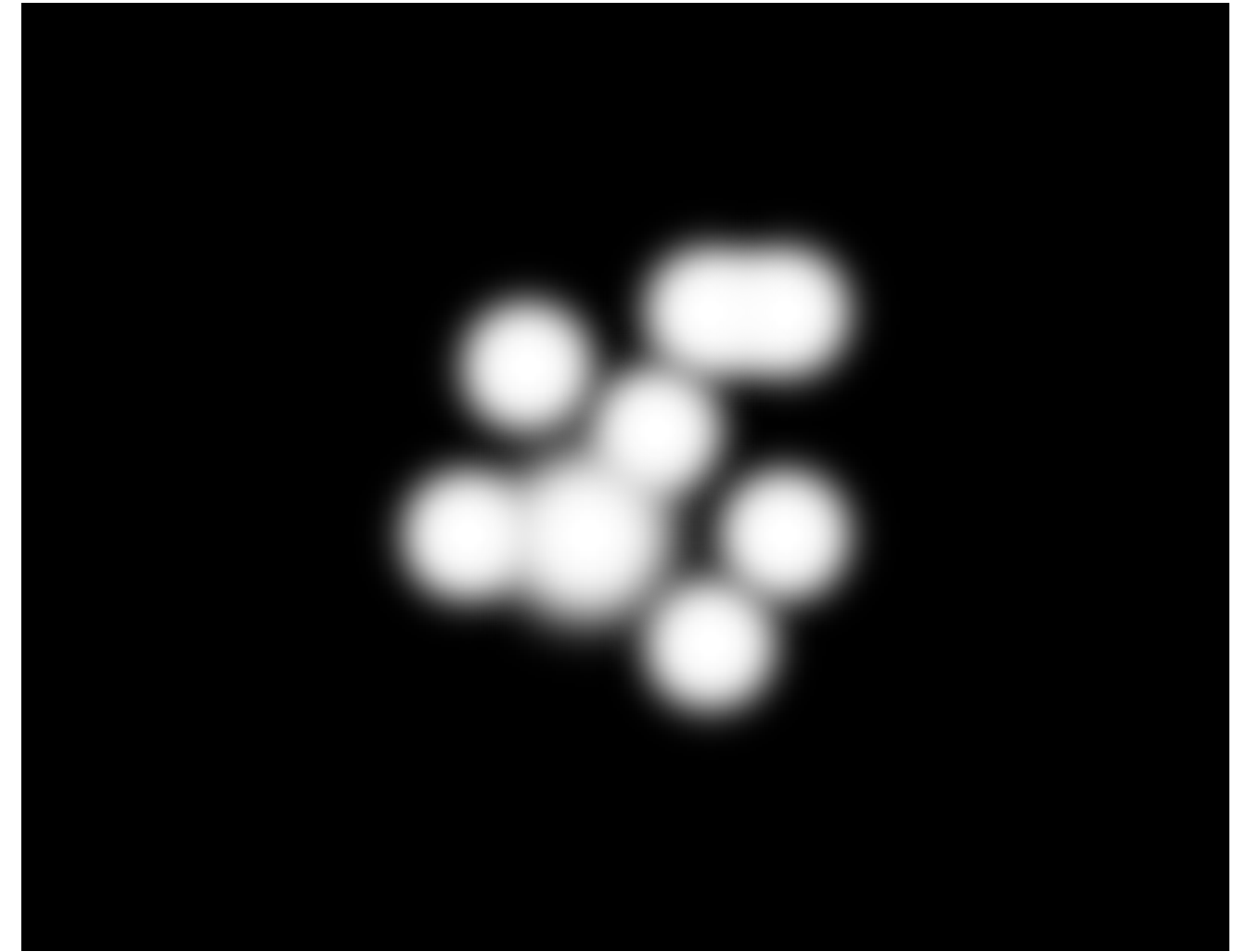


スペックル干渉

- 1970年 ラベリーが提唱 Labeyrie(1970) Astron. Astrophys., Vol. 6, pp. 85–87
- パワースペクトルを用いた解析。統計平均で位相の情報が失われる。
- 重星の分解に活用される。

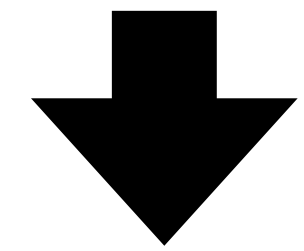
スペックル・イメージング

- **像再生の方法**もある。



スペックル像の活用

- 昔は割と行われていた？
- 非常に短い時間での露出が必要 (色々犠牲が出そう)
- CCD では大変 (読み出し時間・読み出し雑音)?
- 補償光学やスペース望遠鏡の普及で、メリット減？



CMOS 使えるのでは？

- 無理をしなくても、10ms 程度での読み出しが可能
- 撮像装置を新しく改良・追加する必要はない
- 補償光学がなくても、回折限界程度の像が得られる。
- 安価 (無料) に、望遠鏡の口径が活かせる！！！！



スペックル・イメージング (最近の研究から)

Schodel et al. “Holographic Imaging of Crowded Fields: High Angular Resolution Imaging with Excellent Quality at Very Low Cost”. MNRAS 429, 1367–1375 (2013)

スペックル を使えば、月の星食に頼らなくても
分解能を上げられる！！！！

スペックル干渉・イメージング
CMOS の使い道としていいのでは？

土居さん

ハワイとかだと、確かに 10 ms で良いのかも
日本だと、もっと細かく刻まないといけないと思う
岡山の条件の良い日に TriCCS で部分読み出し
すれば可能かもしれないけど



直川

先ほどの論文
Schodel et al.

我々の結果では
スペックルのタイムスケールより多少長くても
イメージングできた



直川

一旦、現物を見てみよう

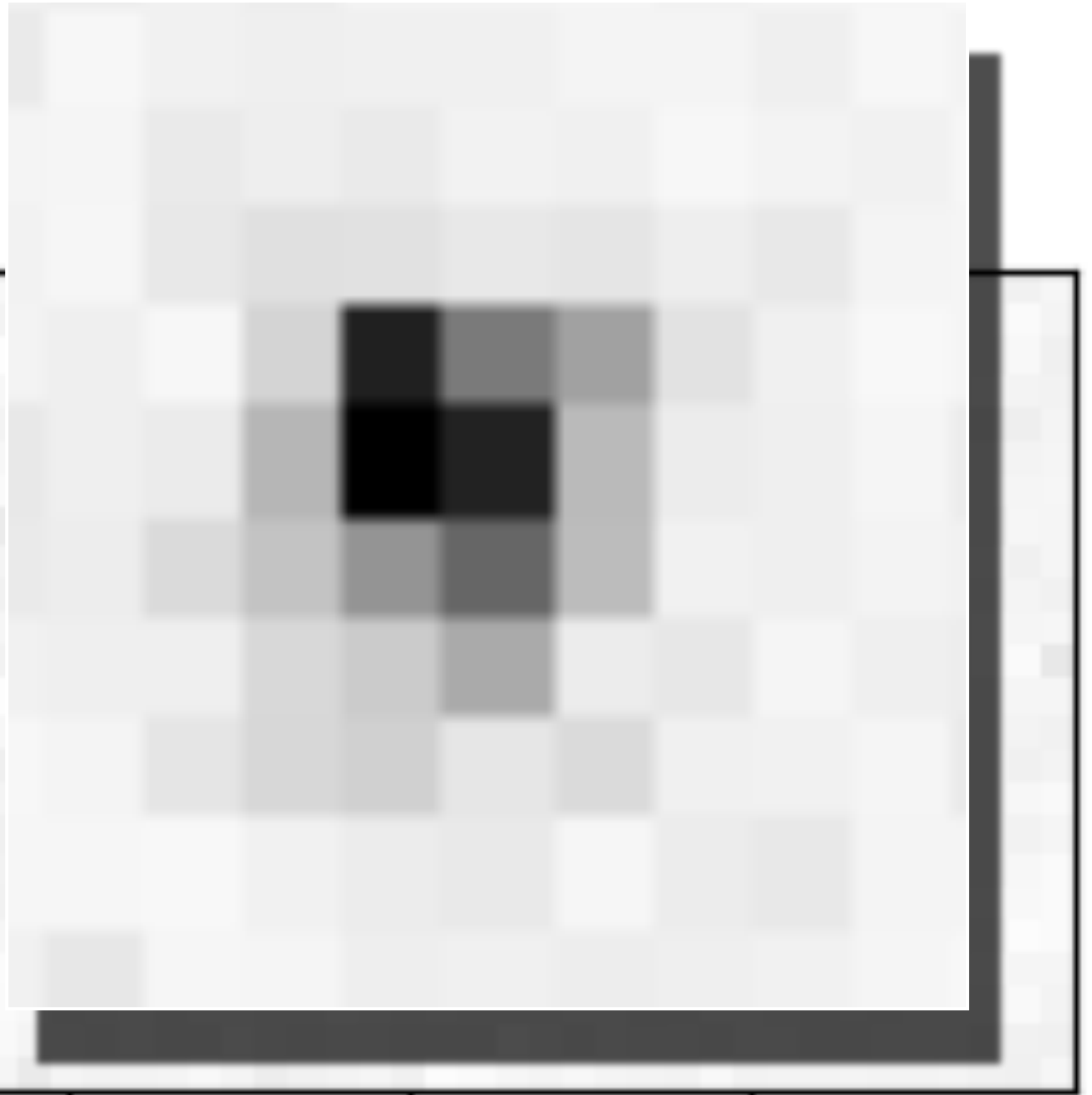
実際にトモエで高速撮像を行った星像

57 fps (~17 ms)

有馬さん提供

0

- ピクセル数が足りない！！
- 現状の トモエ (TriCCS) では出来ない
- 拡大光学系 or より密なピクセルが必要



0

10

20

30

40

50

60

70

スペックル干渉・イメージング

- **ポストプロセスで行える (無料・安価)**
 - 拡大光学系 or 細かいピクセルがあれば良い
- **レーザー・波面センサいらない。**
- **広視野でも適用可能**
 - 次世代補償光学でも、すばる HSC の視野にすら適用できない
- **宇宙にでなくて良い。場所はどこでも良い。**
- **各天文台の口径をフルに活用できる**

読み出しノイズが低いセンサーが必要 (速いだけじゃだめ)

CMOS が有効

まとめ

- ポストプロセスで行える (無料・安価)
 - 拡大光学系 or 細かいピクセルがあれば良い
 - レーザー・波面センサいらない。
 - 広視野でも適用可能 (?)

 - 宇宙にでなくて良い。場所はどこでも良い。
 - 各天文台の口径をフルに活用できる
-
- これから CMOS の稼働が増えてくる
 - CMOS と 高速撮像の利用価値を増やす

月による星食・スペックル像による空間分解

- 重星の分解・新たな重星の発見
- 恒星・BH 連星の候補の選定

スペックル像による空間分解

- 惑星の表面分解？
- 星が混んでいる領域の測光精度向上
- 空間分解能が必要で、時間のかかる観測
 - 連星のモニタリング

月による星食

- 木曾シュミットやせいめいで月の近くを見ると、どのようなになる？
- 星食のような現象の測光はどのようにする？援用できるソフトある？

スペックル像

- 木曾シュミットやせいめいに拡大光学系をつけることは難しい？
- 補償光学と比して、本当にメリット薄？
- 何か他に良いサイエンスターゲットは無い？
- 今後の CMOS 搭載計画 (例：すばる) で応用できない？