

可視赤外線観測装置技術ワークショップ 2025

# TAO/MIMIZUKUモニタ観測に向けた 標準星整備と補助ツールの開発

小島裕樹 (東京大学理学系研究科)

宮田隆志、上塚貴史、平尾優樹、左近樹、成瀬日月、妹尾梨子 (東京大学)

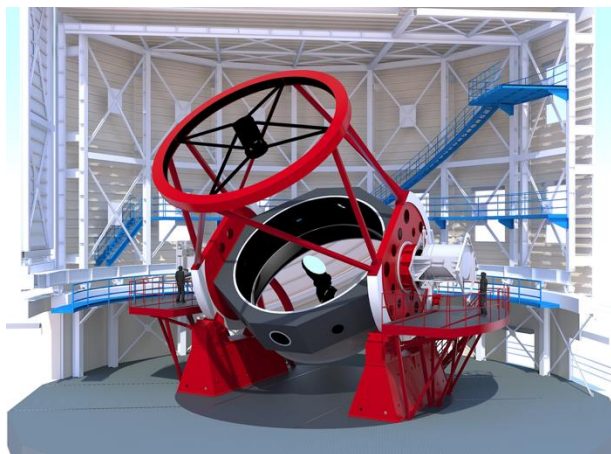
# TAO/MIMIZUKU

## TAO (The University of Tokyo Atacama Observatory) 計画

- チリのチャントール山に口径6.5m光赤外線望遠鏡を建設し、銀河や惑星の起源を解明するための観測を行う計画。

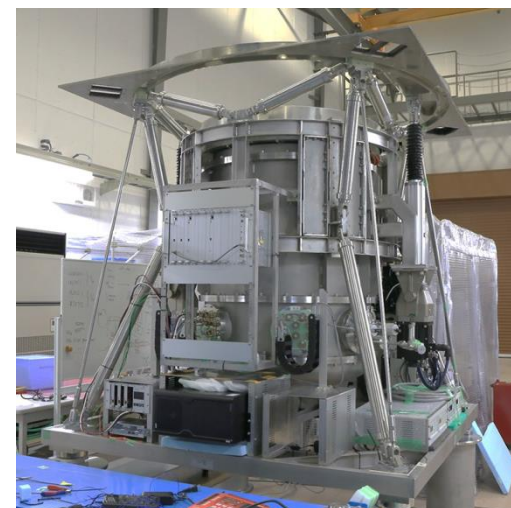
## MIMIZUKU (Mid-Infrared Multi-field Imager for gaZing at the UnKnown Universe)

- 中間赤外線領域 (MIR) で、1%の精度で測光モニタ観測を狙うTAO望遠鏡の観測装置。



6.5m望遠鏡のイメージ

(出典: <https://tao-telescope.atlassian.net/wiki/spaces/FR/overview>)



MIMIZUKU

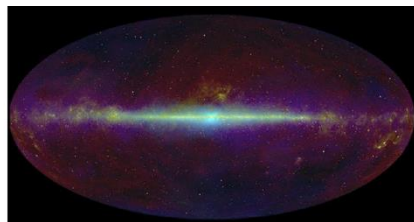
(出典: <https://www.ioa.s.u-tokyo.ac.jp/TAO/mimizuku/pub/>)

# 標準星

- モニタ観測には、明るさが既知で変光しない星 (**標準星**) が校正のために必要。
- 既知のMIR標準星は**436**個ほど、MIMIZUKUでの観測には不足。  
(例: 全天なら約**75,000**個必要)
- K型巨星に注目
  - MIRで明るい・数が多い・既知のMIR標準星の中で割合が大きい (~75%)

→MIMIZUKUでの観測の準備段階として、

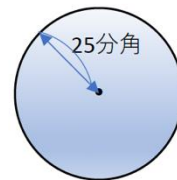
K型巨星がMIR標準星として十分明るさが安定しているかを調べた。



全天(~41,253平方度)

(Credit: NASA/JPL-Caltech/IRAS/2MASS/COBE)

÷



≅

75636個

MIMIZUKUで観測できる範囲

(~0.545平方度)

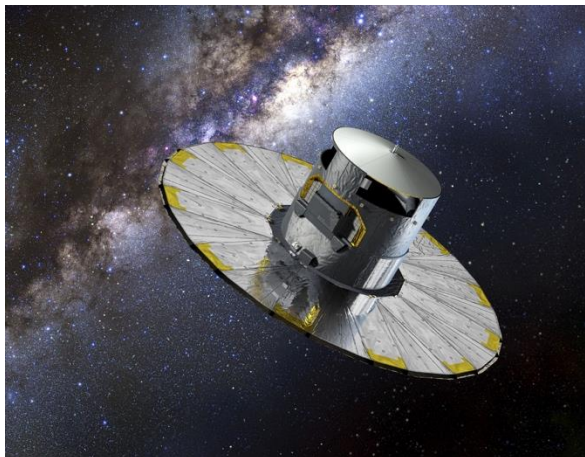
# 使用したサンプル・データ

## ➤ Gaia衛星のデータ Gaia DR3

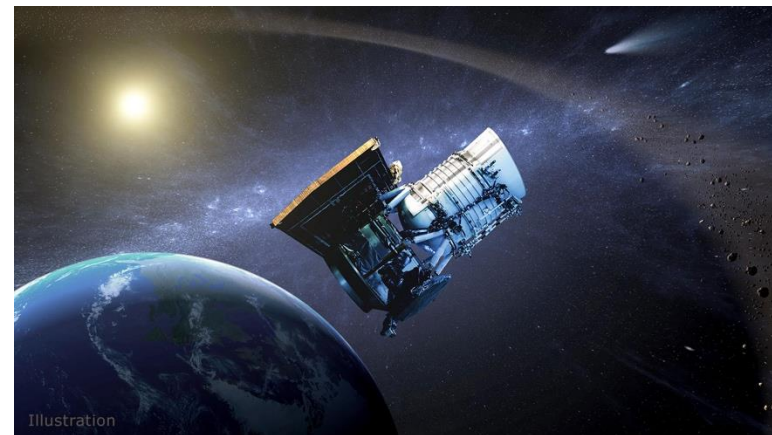
- 有効温度 $T_{\text{eff}}$  : 3,700 ~ 5,200 K, 半径 $R$  :  $> 10 R_{\text{sun}}$ という条件を課して **K型巨星サンプル5,615,041個**を抽出。

## ➤ NEOWISE衛星のデータ NEOWISE Final Data Release

- MIRでの変光を調べるためにW1 (3.4 $\mu\text{m}$ ), W2 (4.6 $\mu\text{m}$ )での~10年間の観測データを取得。



Gaia衛星 (Credit: ESA-D. Ducros, 2013)



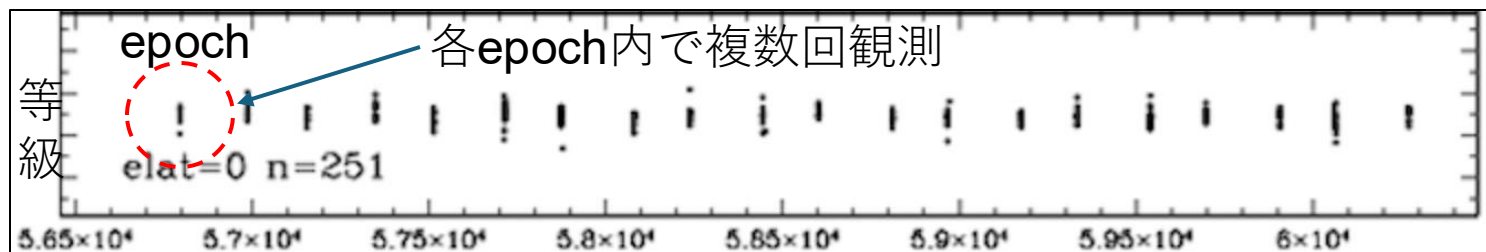
NEOWISE衛星 (Credit: NASA/JPL-Caltech)

# データの処理・制限

正確な明るさの変化を知るために、以下のような制限をした。

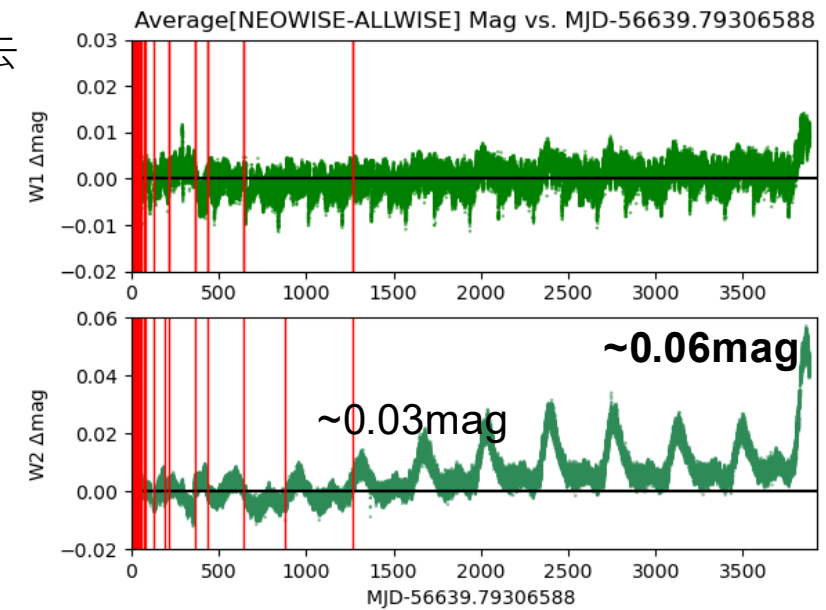
1. NEOWISEで高精度観測可能な等級範囲 ( $8 < W1, W2 < 8.5$ ) の星を抽出
2. コンタミネーションがないなどの、質の良いデータのみ制限
3. NEOWISEのキャリブレーションの安定性の時間変動 (右図) を除去
4. 観測が集中的に行われた期間 (epoch) ごとに平均し、SN比 $>300$ のepoch数が19以上の星を抽出

→312個のK型巨星が残った。



時間

(出典: [https://wise2.ipac.caltech.edu/docs/release/neowise/expsup/sec2\\_1.html](https://wise2.ipac.caltech.edu/docs/release/neowise/expsup/sec2_1.html))

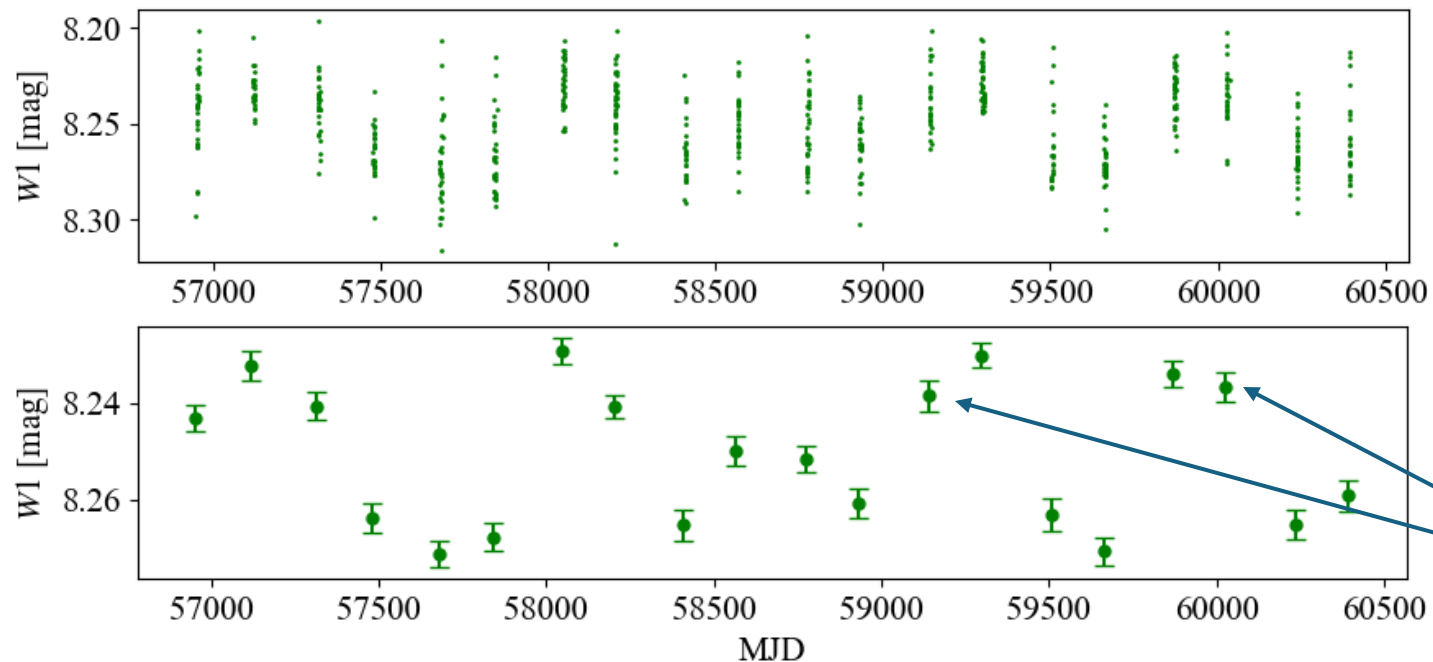


(出典: [https://wise2.ipac.caltech.edu/docs/release/neowise/expsup/sec4\\_2d.html](https://wise2.ipac.caltech.edu/docs/release/neowise/expsup/sec4_2d.html))

# 変光指標の計算

変光の指標として、3種類の量を計算

- epochごとに平均した等級たちの標準偏差 (W1\_std, W2\_std)
- epochごとに平均した等級たちのPV値 (W1\_PV, W2\_PV)
- NEOWISEの測定誤差から求められる観測限界 (W1\_lim, W2\_lim)



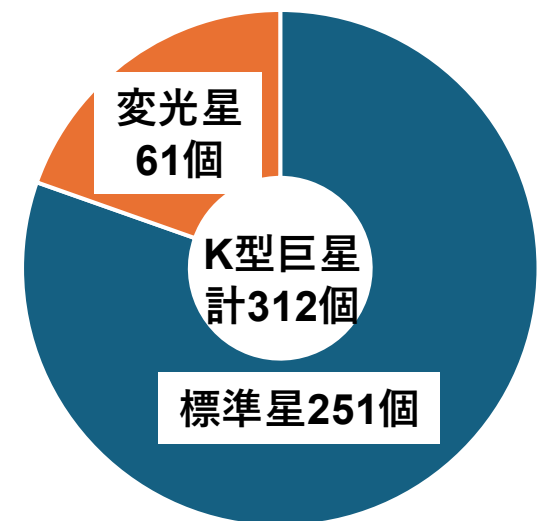
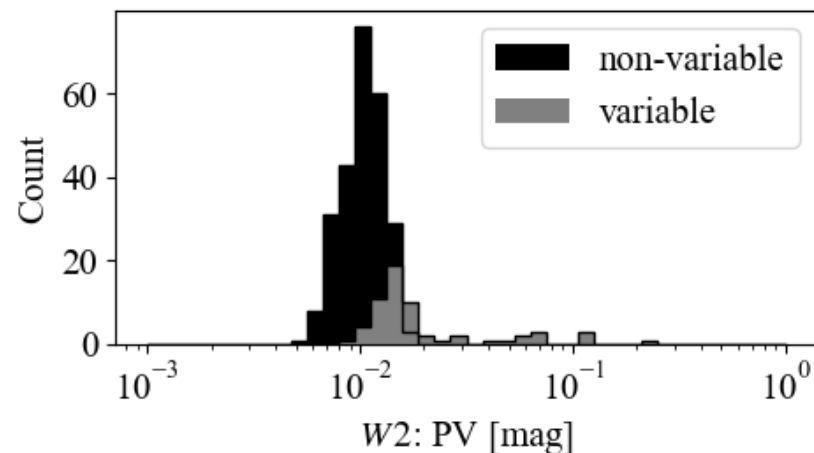
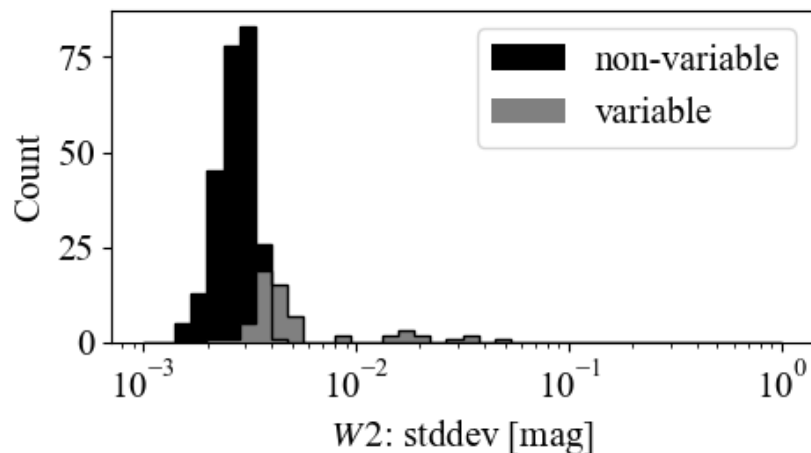
各epochで  
平均

これらの標準偏差  
などを変光指標に

# 変光解析と結果

- 以下の条件を満たしたものをMIR標準星として使えると判断した。
  - ①  $W1\_std < 1.469 * W1\_lim$ ,  $W2\_std < 1.469 * W2\_lim$  (無変光星の99.7%信頼区間の上限)
  - ②  $W1\_PV < 7.32 * W1\_lim$ ,  $W2\_PV < 7.32 * W2\_lim$  (無変光星がゆらいで落ちる確率が0.5%)
- 312個のK型巨星サンプル中、MIR標準星候補は80.4% (251/312)
- この結果は、できる限り正確なデータを用いて調べると、K型巨星の8割はMIMIZUKUで用いられるレベルで明るさが安定していたことを示している。

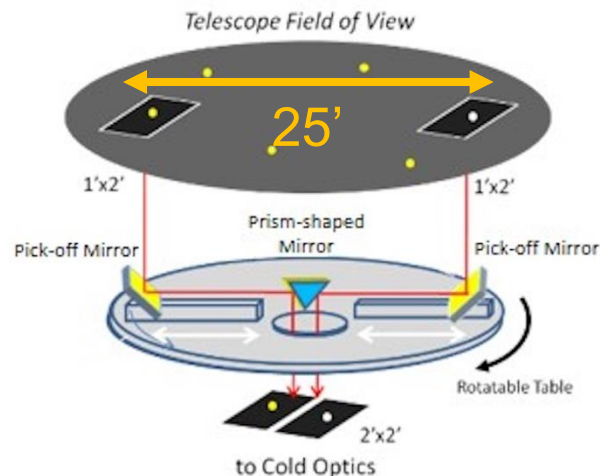
→K型巨星の、MIR標準星としてのポテンシャルを示唆



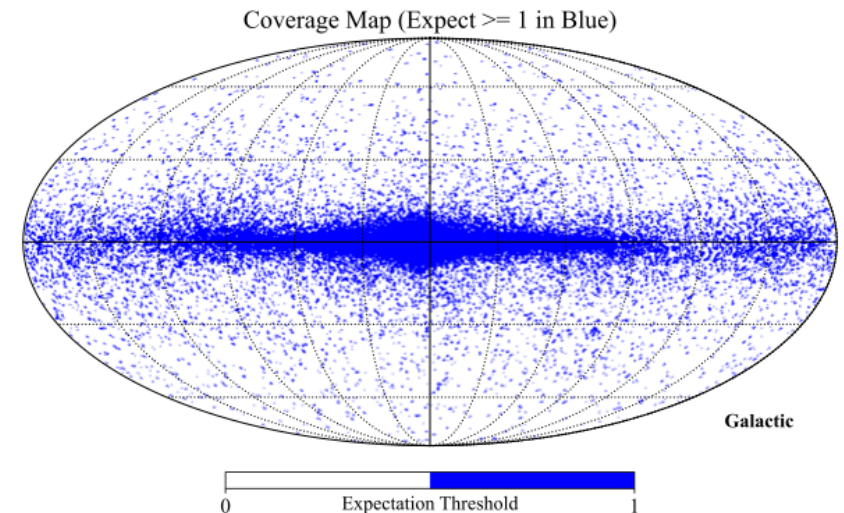
# 観測可能領域のシミュレーション

- MIMIZUKUは、最大**25'**離れた**2視野**での同時観測により高精度モニタを実現
- **80.4%**という値からMIMIZUKUで観測可能領域を以下のように計算
  1. MIMIZUKUで観測可能な明るさの**K型巨星57601**個を準備
  2. このサンプルからランダムに**80.4%**抽出を**100**回繰り返す
  3. 各々の星の**25分角**以内に抽出回数分の値を与え**100**で割る
- 観測可能と期待される領域を計算すると**~7000 deg<sup>2</sup> (全天の約17%)**

↑既知の**MIR標準星**を用いた場合の約**25倍**の広さ！



2視野同時観測のイメージ  
(出典: <http://133.11.160.242/TAO/mimizuku/pub/?Observing>)



MIMIZUKUで観測可能と期待される領域 (青)

# 観測補助ツールの開発

- MIMIZUKUでの観測計画を助けるツールを作成
  - Jupyter notebookでAladin Liteが使えるipyaladinを使用
- 目的や制限条件・機能
  - 目的: 目標天体と同時観測できる標準星を(簡便に)探せるようにする
  - 制限条件: 用いる標準星、目標天体の座標、観測日、明るさ範囲など
  - 基本機能: 条件を満たす標準星(目標天体の $<25'$ )の情報とAladin画像を表示
  - 追加機能: astroplan (Morris et al. 2016) を使って観測可能か判定、標準星を選択したら観測イメージがどうなるかも表示したい

The screenshot displays the ipyaladin web interface. At the top, there's a file path and a '1. ファイル読み込み' button. Below that, a '表示する列の選択' dropdown is visible. The main section is titled '1.5 観測サイト設定' (Observation Site Settings) and includes fields for '観測所' (TAO (Cerro Chajnantor)), '観測日' (2025/11/06), '経度 (deg): -67.742222', '緯度 (deg): -22.986667', and '標高 (m): 5640'. A checkbox for 'Visibility計算を有効化' is checked. Below this is the '2. 検索条件' (Search Conditions) section, which includes 'サーベイ' (2MASS (Color)), '中心RA: 18h09m01s', '中心Dec: -20d05m08s', '抽出半径 (arcmin): 25', '等級別' (等級 min: -5, 等級 max: 20), 'PA (度): 0', and '傾き角 (度): 30'. A '表示比率(Aladin %): 60' slider is also present. A green '2. 検索も表示実行' button is at the bottom of the settings. Below the settings, there's a status message: '最終結果: 12個の天体が見つかりました。Visibility計算中... Visibility計算完了: 0/12個の天体が観測可能。チェックボックス別を併用して天体を確認できます。ヒント: Observable列のマークで観測可能性を確認できます。' Below this is a table with columns 'No.', 'SOURCE\_ID', 'ra', 'dec', and 'Coords'. The table contains 6 rows of data. To the left of the table is a visualization of a star field with a yellow circle highlighting a region. The visualization includes a toolbar with zoom and pan controls and a coordinate display showing '1.827° x 1.094°'.

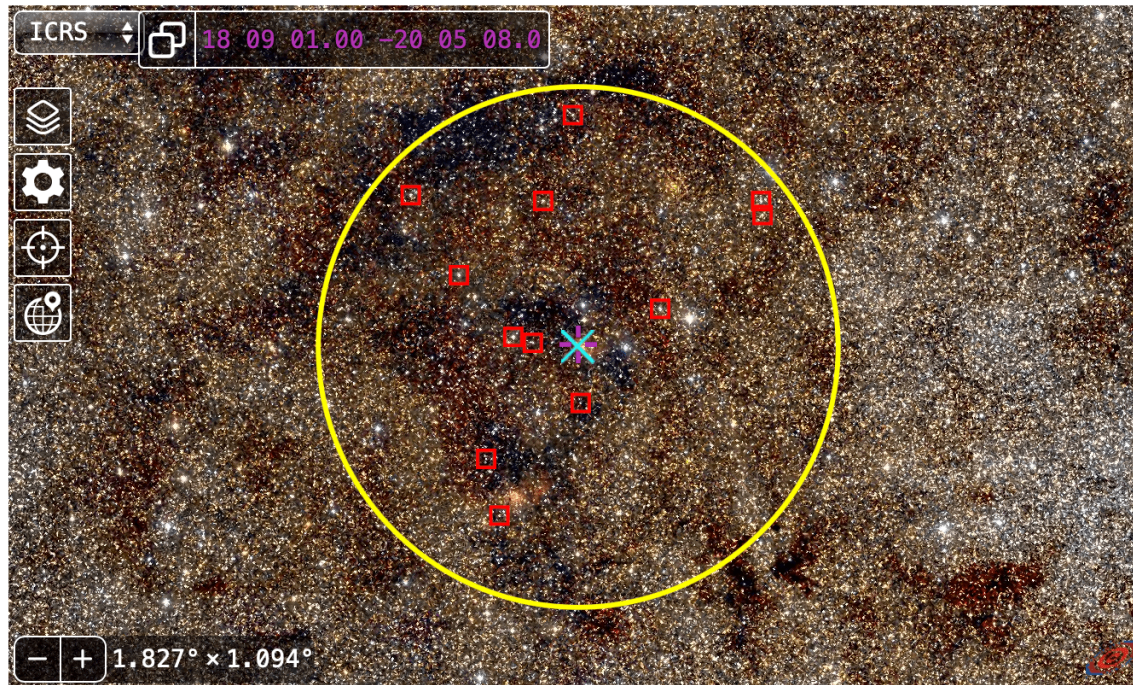
No.	SOURCE_ID	ra	dec	Coords
1	4094286052912526336	272.331641	-20.078870	272.331 -20.078
2	4094283750810051968	272.249979	-20.175211	272.249 -20.175
3	4094286396509906432	272.365057	-20.069346	272.365 -20.069
4	4095039596337568736	272.114391	-20.024249	272.114 -20.024
5	4094293092352770688	272.457530	-19.970455	272.457 -19.970
6	4094289903835436928	272.411435	-20.264547	272.411 -20.264

# 観測補助ツールの開発

Aladinの表示を更新しました。処理完了。

使い方のヒント:

- 図中の星のマーカの近くに番号が表示されます
- 番号は表のNo.列と対応しています
- 星をクリックすると詳細情報が表示されます
- 表のNo.列と図中の番号を照合して天体を確認できます

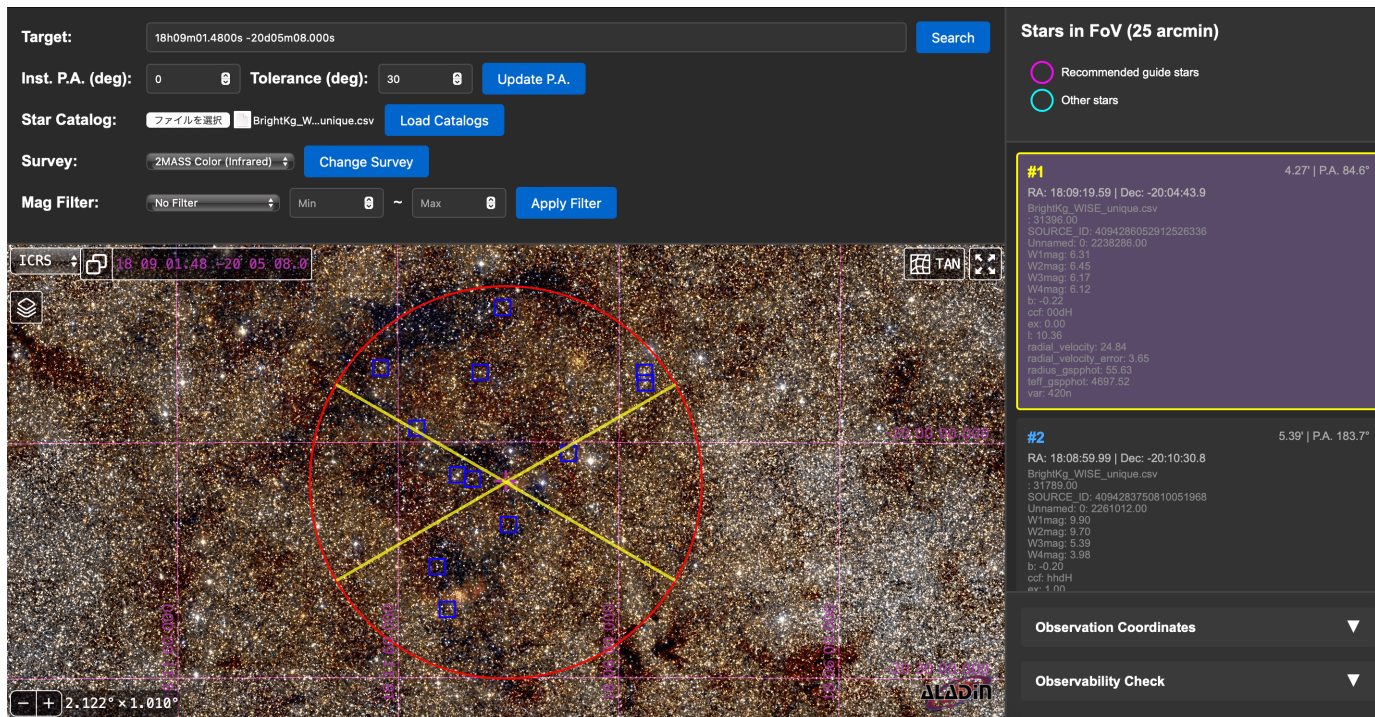


標準星の場所と情報

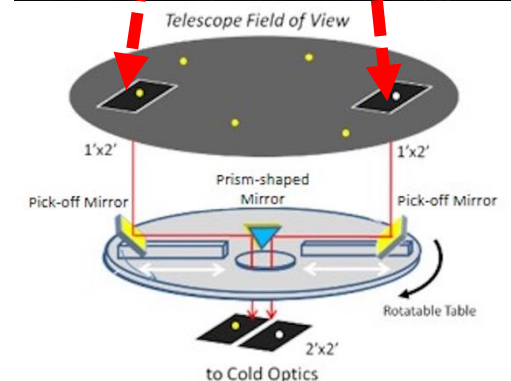
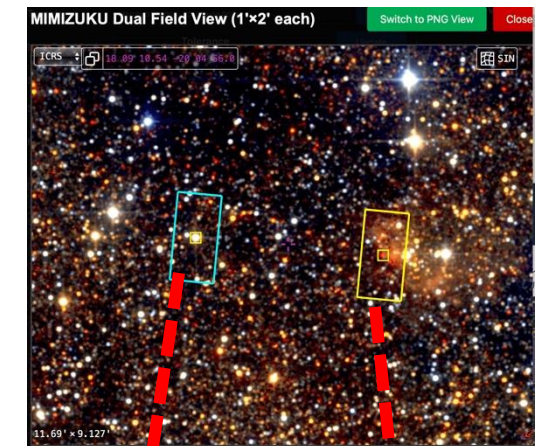
No.	SOURCE_ID	ra	dec	Coords
1	4094286052912526336	272.331641	-20.078870	272.331 -20.078
2	4094283750810051968	272.249979	-20.175211	272.249 -20.175
3	4094286396509906432	272.365057	-20.069346	272.365 -20.069
4	4095039596337588736	272.114391	-20.024249	272.114 -20.024
5	4094293092352770688	272.457530	-19.970455	272.457 -19.970
6	4094269903835436928	272.411435	-20.264547	272.411 -20.264

# 観測補助ツールの開発

- 色々不便な点もありそう
  - Jupyter notebookがないと使えない・ライブラリのインストールも必要・ipyaladinでできることが制限
- Aladin Lite v3 APIを用いたブラウザで動くWebアプリを作成中



ファイルを開くだけ



観測イメージの確認

# まとめ

- TAO/MIMIZUKUでのモニタ観測のためにMIR標準星を整備する必要があった
- K型巨星に着目し、Gaia, NEOWISEのデータからMIR変光を調査
- 正確なデータを使うなどの条件をかけるとK型巨星の80.4% (251/312) がMIR標準星となりうる安定性を持ち、標準星としての高い有用性を示唆している
- K型巨星を利用することで、既知のMIR標準星を用いた場合に比べて25倍の領域 (~7000 deg<sup>2</sup>) でMIMIZUKUのモニタ観測が可能になると期待される
- 標準星を簡便に探すためのMIMIZUKUでの観測補助ツールを作成している



# 変光判定の基準について

①  $W1\_std < 1.469 * W1\_lim$ ,  $W2\_std < 1.469 * W2\_lim$

無変光の星の明るさが、分散 $\sigma_{lim}^2$ の正規分布に従うと仮定

n個サンプルを取る時、サンプルの標準偏差 $\sigma_{sample}$ と $\sigma_{lim}$ の比は以下に従う

$$\frac{\sigma_{sample}}{\sigma_{lim}} = \sqrt{\frac{\chi^2(n-1)}{n-1}}$$

→n=19の場合、99.7%の信頼区間の上限が1.469

②  $W1\_PV < 7.32 * W1\_lim$ ,  $W2\_std < 7.32 * W2\_lim$

無変光の星の明るさが、分散 $\sigma_{lim}^2$ の正規分布に従うと仮定

19個の点が全て $\pm 3\sigma_{lim}$ に入る確率は $(99.7)^{19} = 94.5\%$ 、5.5%はfalse-positive

この5.5%を0.5%に下げするためには範囲を $\pm 3.66 \sigma_{lim}$ にすれば良い

→99.5%の確率で、サンプルのPV/limは $2 * 3.66 = 7.32$ 以下になる