

# Thirty “Millimeter” Telescope によるモニタ—観測の紹介と、 せいめい望遠鏡に期待する事

東北大学 板 由房

田實さんに頂いたメール：

セッションでキーにしていきたいトピックは

- モニタ—観測
- リモート・キュー・自動化
- せいめい望遠鏡での複数装置での観測

になってくるかとおもっています。

もちろん全部を入れる必要はございません。

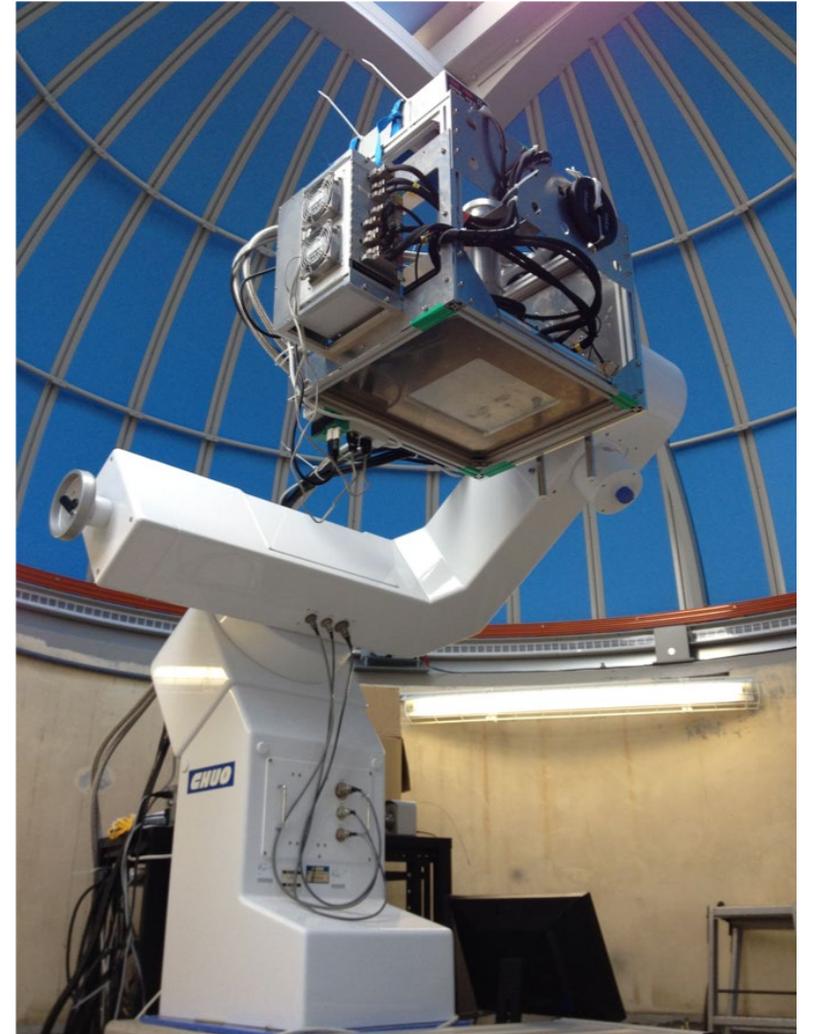
板さんの場合は前ふたつのトピックをカバーしていただけるかと思っています。

# 今日の話の内容

- 板研が岡山で運用しているTMMTの紹介
- せいめい望遠鏡に期待すること、大型、中型望遠鏡でやりたいこと
  - 無邪気にこういう装置が欲しいというのを言ってみます。

# TMT じゃなくて TMMT です

- Thirty **MilliMeter** Telescope
  - 2k x 2k VIRGO, 5deg x 5deg FOV
  - TMTの 1/1000 です。
  - せいめい望遠鏡の ~1/127 です。
  - $K_s < 7\sim 8$  magの明るい星がターゲットです。
- **板研専用**のJHKs望遠鏡
  - Pros:
    - 観測時間：誰にも遠慮はいらない
    - ハンズオン：教育に役立っていると自負しています
  - Cons:
    - お金！：持ってる人(津村さんと諸隈さん)にたかった
    - マンパワー：学生さんを岡山に常駐させられない
- 様々な方にご協力頂いてなんとかやっています。
  - 市川先生、泉浦さん、筒井さん、柳澤さん、田實さん、前原さん、黒田さん、歴代の板研の学生さん



# Search Page

In this site, I write Ks band with K band.

## Single object search

### Select bands

J  H  K  All bands

### Enter coordinates in equatorial coordinate(J2000)

R.A. Dec.(J2000):

The following writings are allowed:

19 11 16.7904 +17 51 51.084  
19:11:16.7904+17:51:51.084  
19h11m+17d51m  
19h11+17d51  
19.187997h+17.864190d  
287d49m11.856s+17d51m51.084s  
287.8199600 +17.8641900 <=> 287.8199600d+17.8641900d

### Figure settings

Figure title:

Figure outliers:  Don't plot

Submit

## Multiple objects search

Input a coordinate file below.

選択されていません

The input file needs to contain one equatorial coordinate (J2000) per line.

学生さんが作ってくれた

# リモート化・自動化

田實さんに頂いたメール：せいめい望遠鏡もモニター的な観測が行われるサイエンスが多く、またこれからリモート化、キュー観測などの自動化を考えていかなければなりません。口径は違いますが、それらを一から作って実現している板さんの経験から、せいめいのリモート化・自動化でどんなところに気をつけたらいいのか、という議論に発展させるきっかけが得られればと思っております。

## • 私達が経験したトラブル

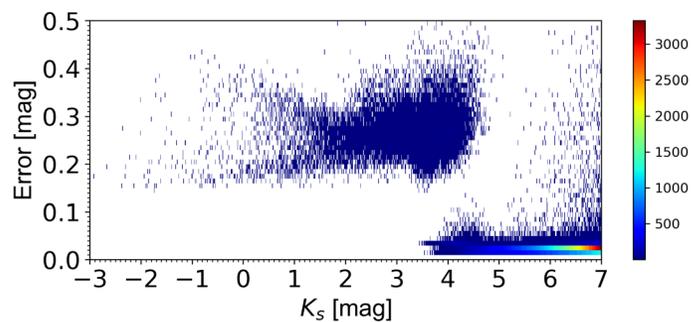
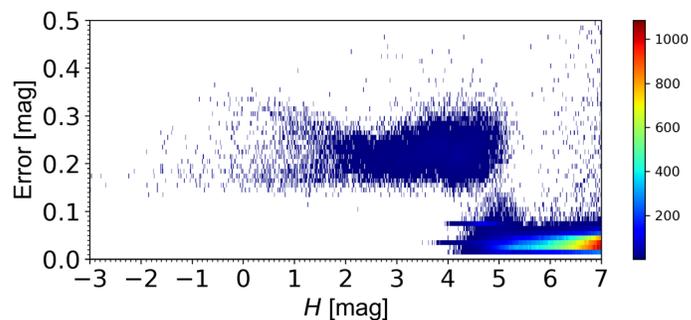
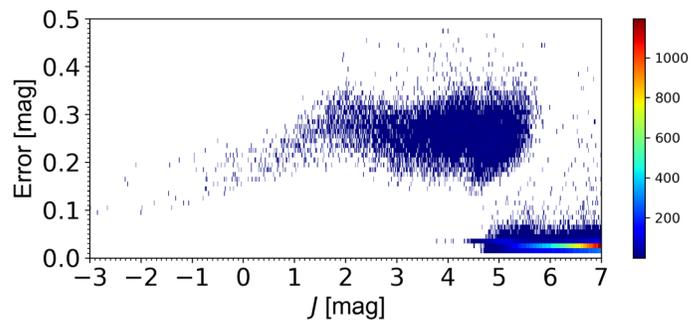
- 計画停電(年に数回)
  - 現地に人、協力者が必要
- ネットワークトラブル
  - ネットワークが断線しても自律的に観測できる仕組みが必要
- 計算機の故障
  - 冗長化すれば良いが、、、
- TEXIO電源の故障
  - 壊れると思っていたいなかった。
  - 一つ間違えれば検出器が壊れるところだったかも。。。

## • 自動化に関して

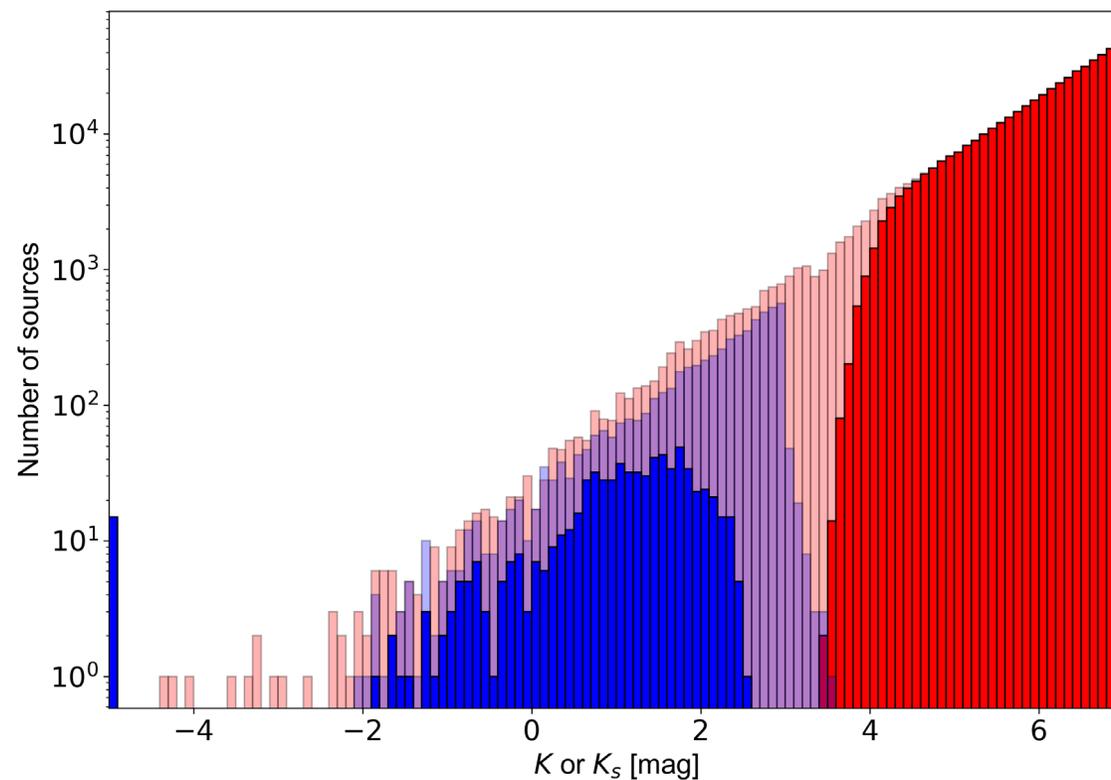
- 天体リストを食わせると、西側の天体から優先的に観測するようなソフトは作成した。
  - 望遠鏡が動く距離が最小になるような最適経路、等の最適化はできていない。数理統計の専門家さんをお願いしたいところ。
- ちゃんとデータがとれたか？の判断は、人の目が必要。
  - データが取れた後、それなりの時間内にデータ処理がされ、チェック後にフィードバックがかけられるような体制

# TMMTの意義

2MASSカタログの等級-Errプロット

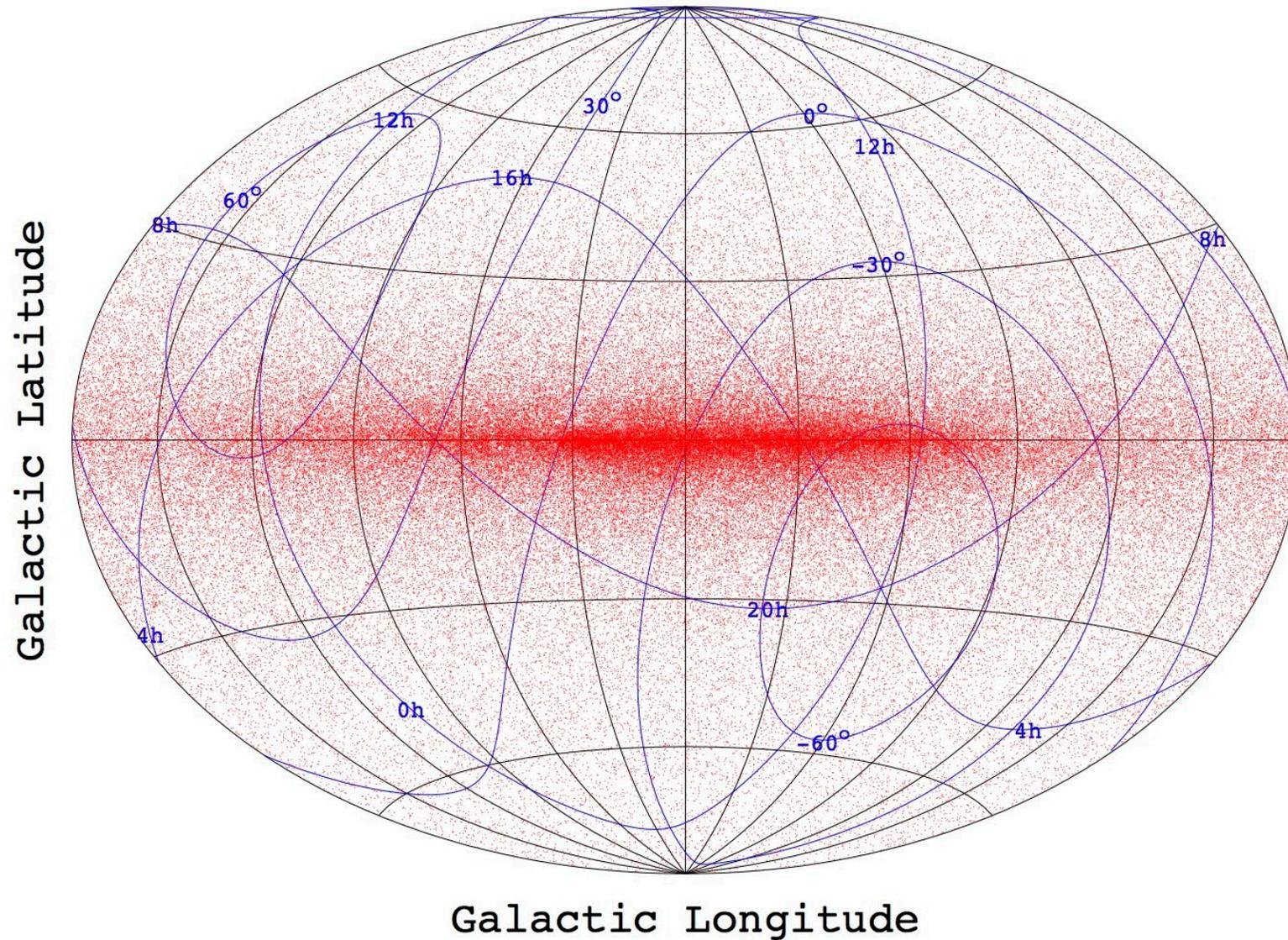


2MASSカタログ(赤)と、TMSSカタログ(青)の、  
Kバンドの明るさ毎の天体数プロット  
透明部 = 全天体、不透明部 =  $S/N > 20$ の天体のみ



Ita et al, 2021, PASJ, submitted

# 2MASSカタログで $K_s < 6.0$ magの分布



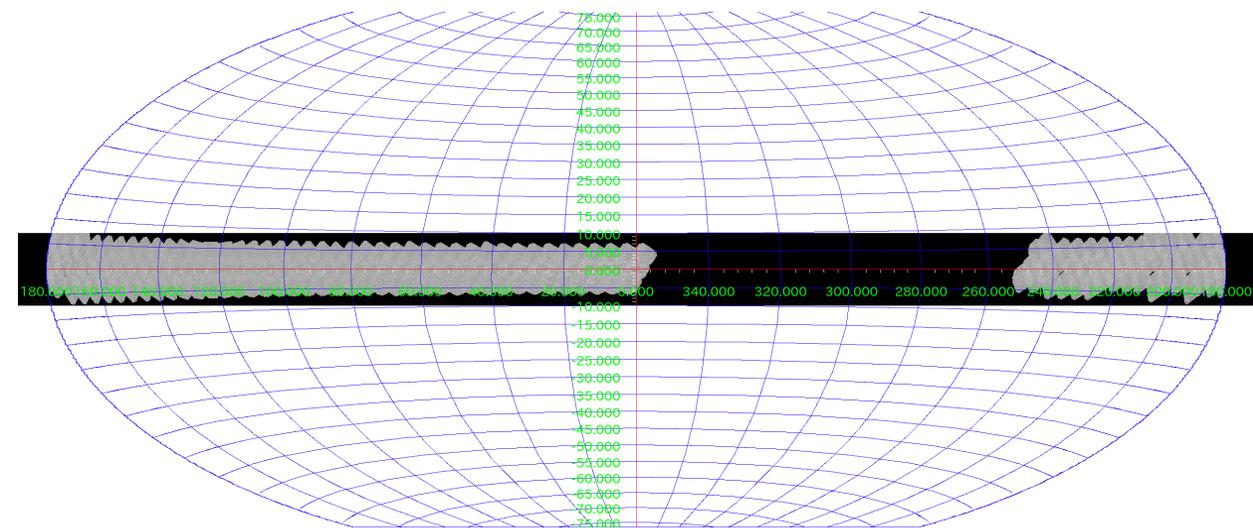
# TMMTによる2つのサーベイ

銀河面サーベイ観測(single epoch)

→ 天源測光カタログの作成

銀河面モニター観測

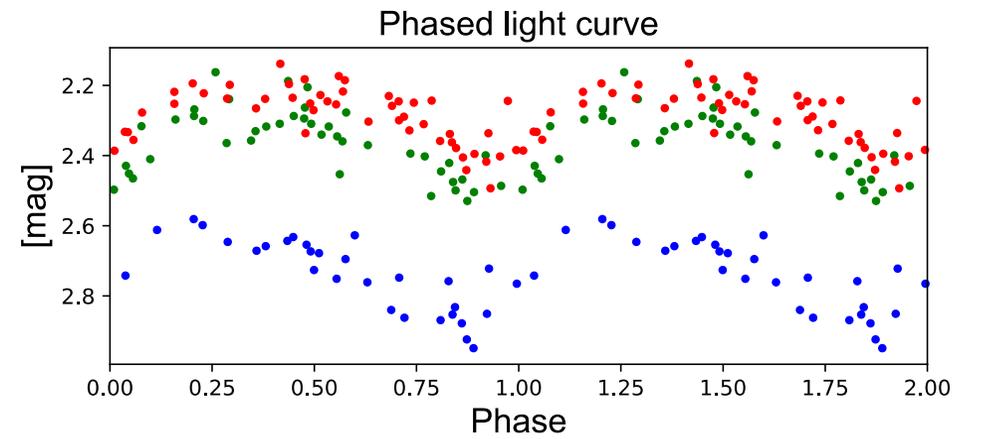
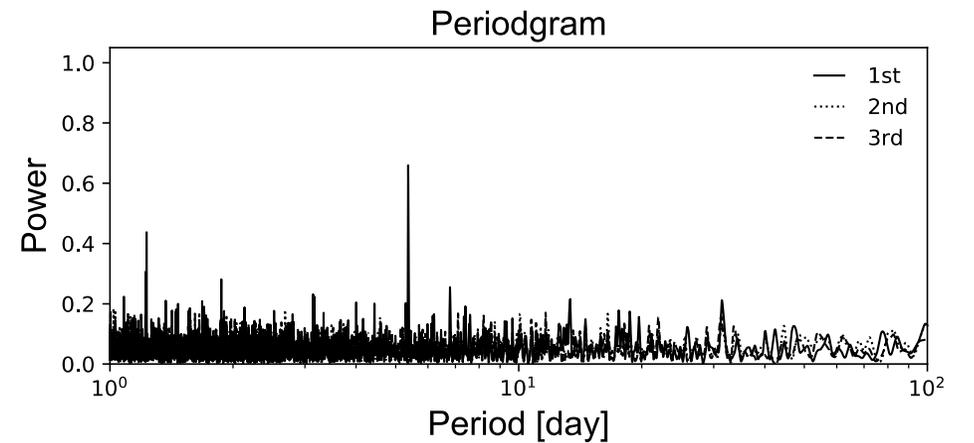
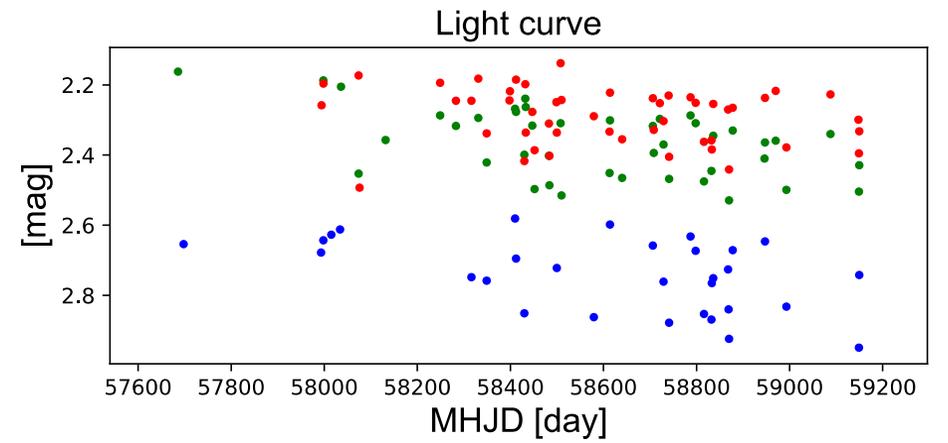
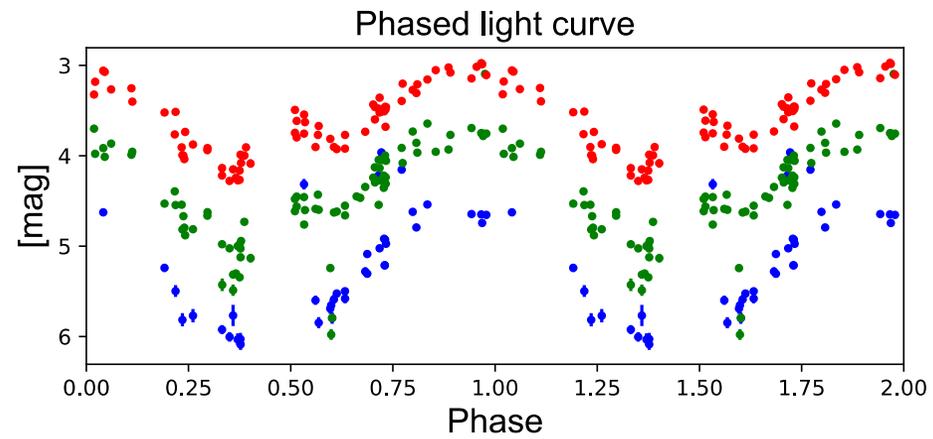
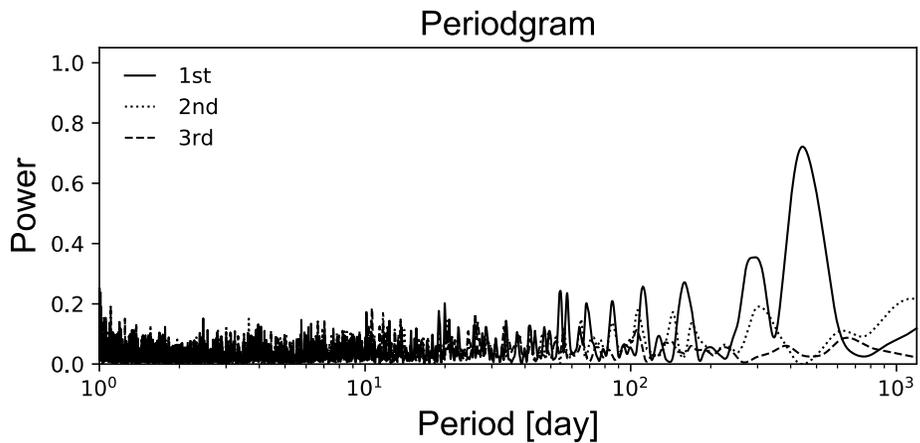
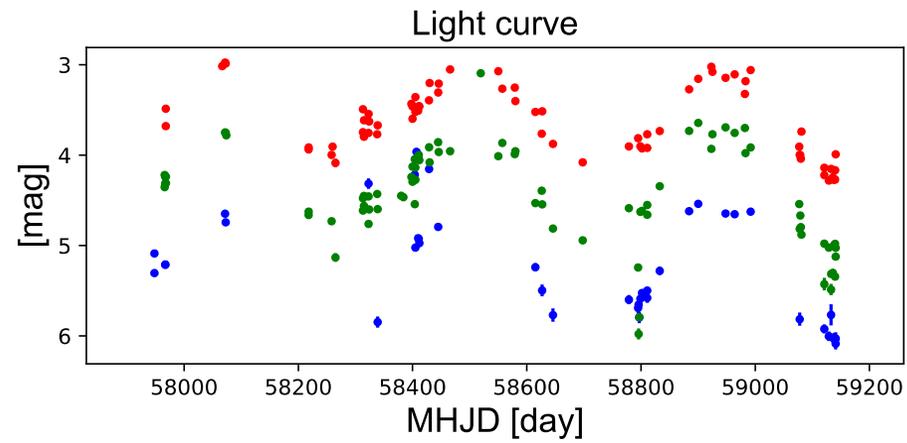
→ 変光天体



$|b| < 5 \text{ deg}$  &  $0 < l [\text{deg}] < 245$   
の領域をJHKsで観測済み



左図の領域を、2016年12月から、  
～2回/月程度の頻度でJHKでモニター観測中



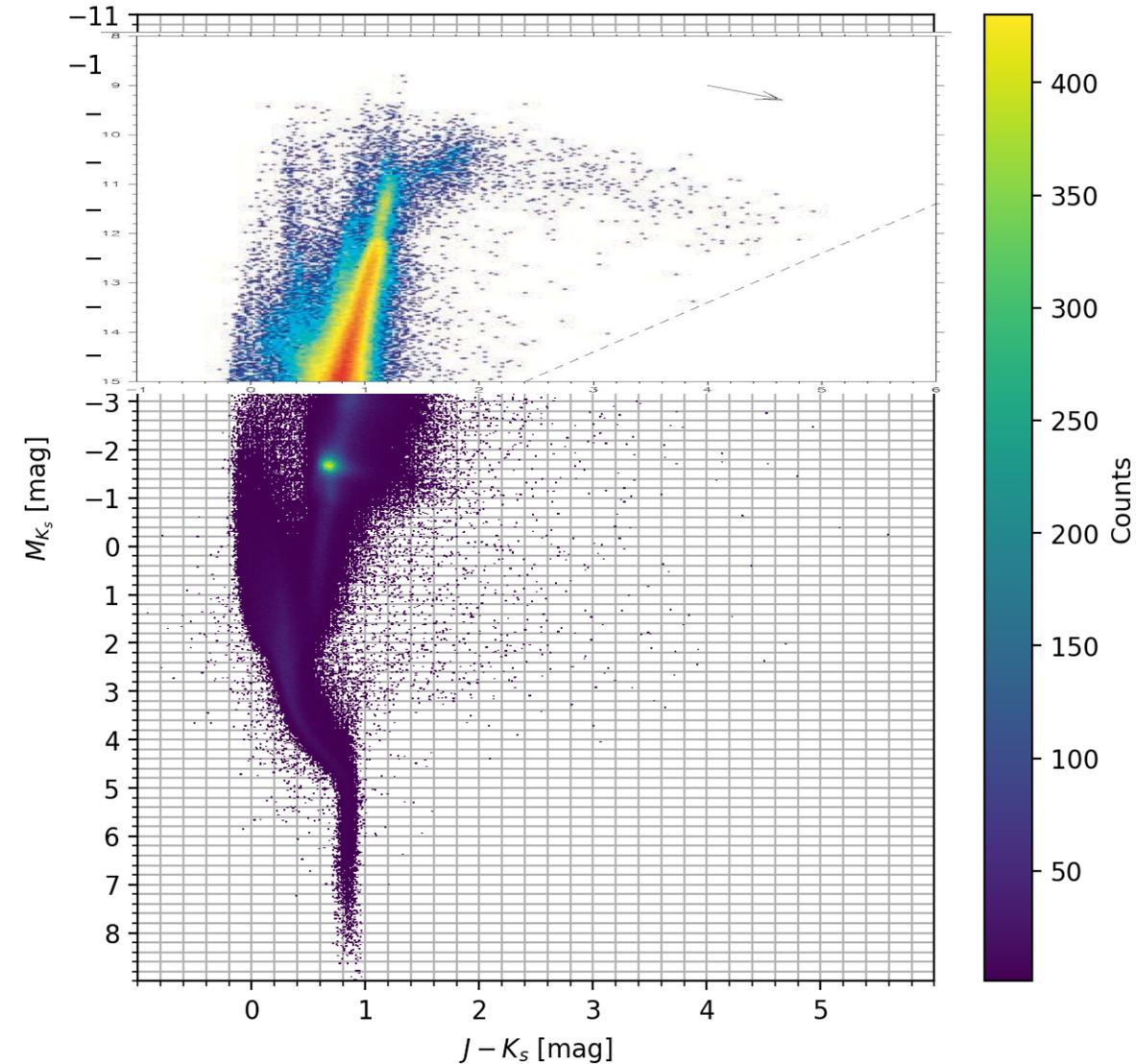
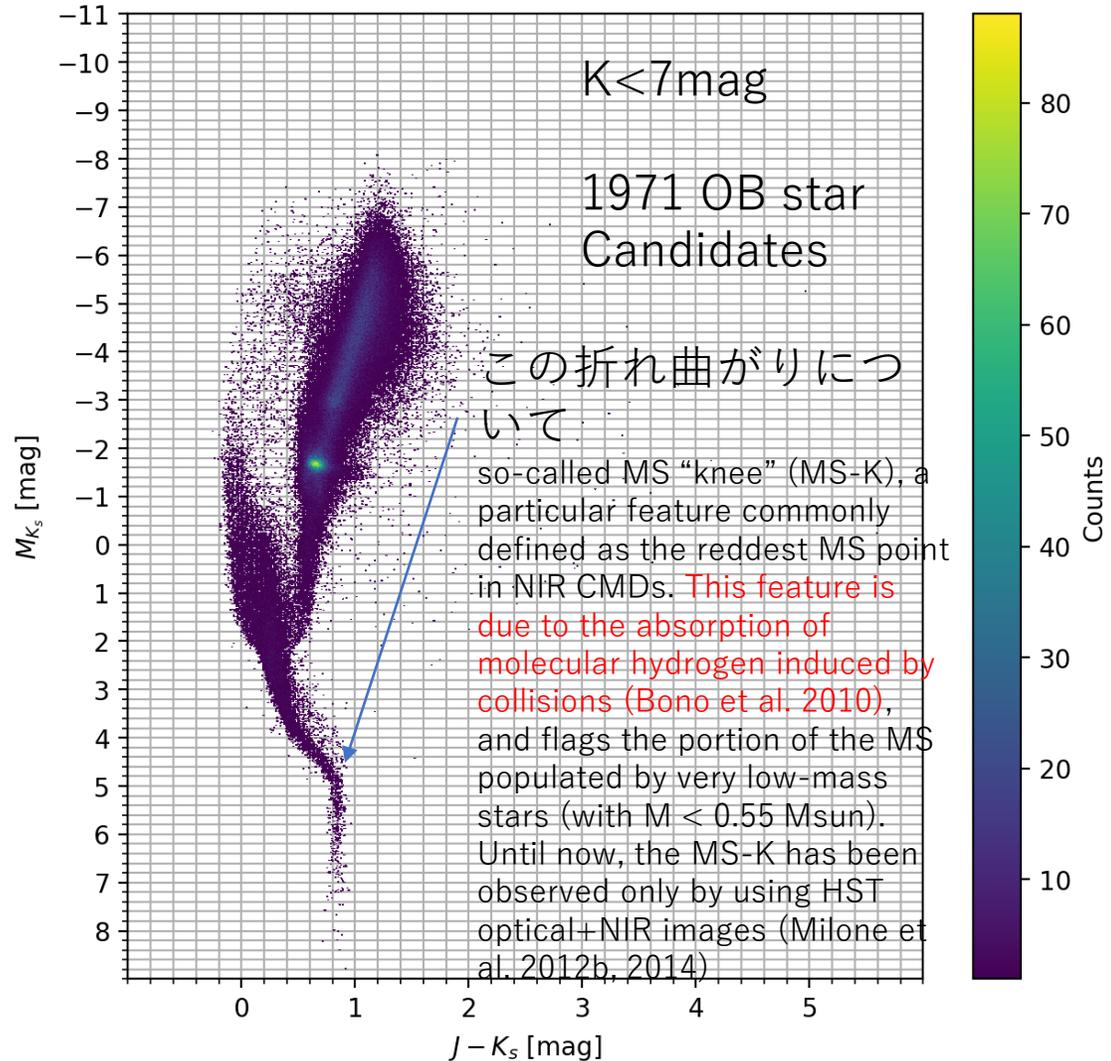
KK Sge  
Mira

$\delta$  Cep  
Classical  
Cepheid

# Survey volume

Star Type	Abs. Mag @K-band [mag]	Apparent Mag (assuming $A_k/A_v=0.1$ , $A_v=1\text{mag/kpc}$ )		
		100 pc $A_k=0.01$	1 kpc $A_k=0.1$	5 kpc $A_k=0.5$
Mira (P ~ 300 day)	~ -7.5	-2.5	2.6	6.5
Classical Cepheid (P ~ 5 day)	~ -4.5	-0.5	5.6	9.5
RR Lyr (P ~ 0.5 day)	~ 1.2	6.2	11.3	15.2
Red Clump	~ -1.6	3.4	8.5	12.4

# RGB Tipより明るい所はTMMTの独壇場 = AGB星、大質量星



# 明るい天体を研究対象にするメリット → easy to follow-up!

フォトン稼げる

感度が悪い波長でも観測できる

- 要フォトンな観測
  - 高分散分光
  - 散乱光(偏光観測)
  - 精密測光(トランジット等)
- 低感度(地上観測を想定)
  - 紫外線
  - 中間赤外
  - 電波

必ずしも 明るい=近い ではないが  
近いものは空間分解できる

- 干渉計
  - 星の表面
  - 星周構造
- 直接撮像
  - 系外惑星
  - 連星

せいめい望遠鏡では是非follow-upをさせていただきたいです。

これを受けて、せいめい望遠鏡に期待すること、やってみたいこと

- 赤外ではTMMTで見えるくらいに非常に明るい、可視では非常に暗いような赤い天体
  - 例：強い星周減光を受けた天体
    - R CrBの星周ダストの生成と破壊の様子
    - あえて可視で観測するには大望遠鏡を使う必要あり。
- 個人的に欲しい装置・機能
  - すばる/FOCASのような、高分散偏光分光ができる観測装置
    - すばるの競争率高すぎ。。。
    - 星周ダストの運動を直接測定したい
  - 中間赤外(N-band)で撮像/分光(低分散)モニターできるような観測装置
    - すばる/COMICSがデコミッションになっちゃった。。。
    - 質量放出の開始のタイミング

R CrB型星の星周減光

# 話の拠り所となる式

$$\tau_{\lambda} = \frac{\ln 10}{2.5} A_{\lambda}$$

$$\tau_{\lambda} = n_d \sigma_{ext, \lambda} L$$

$$\frac{A_{\lambda_1}}{A_{\lambda_2}} = \frac{\sigma_{ext, \lambda_1}}{\sigma_{ext, \lambda_2}}$$

Aは等級スケール。なんとかしてこれを観測で求める。

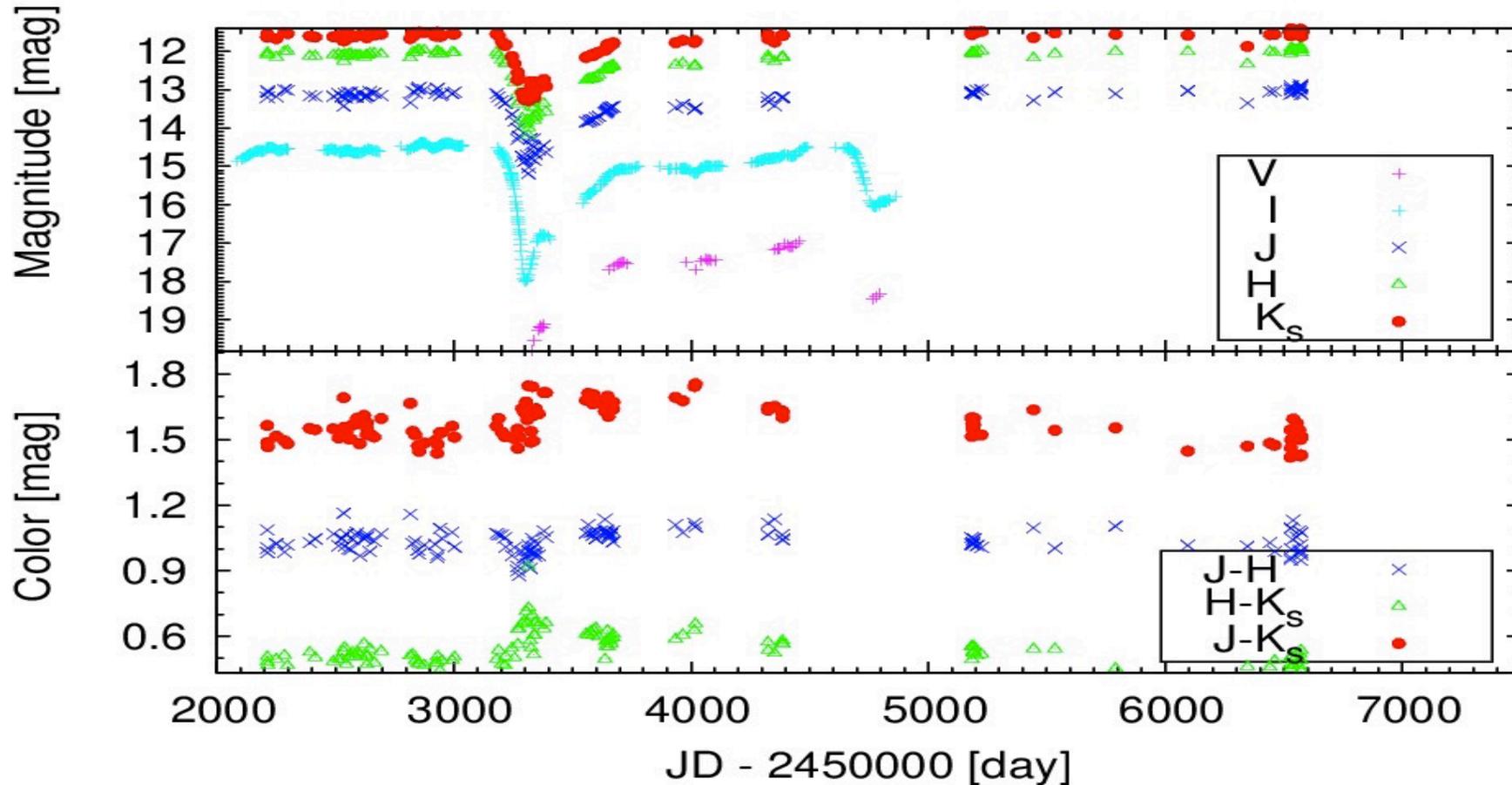
$\sigma$ にダスト粒子のサイズと種類(複素屈折率)の効果が反映される。

$n_d$ だのLだの、見積もるのが難しい変数は、異なる波長で比をとって考えると、消えてハッピーになれる。

この比は「減光則」を表す。

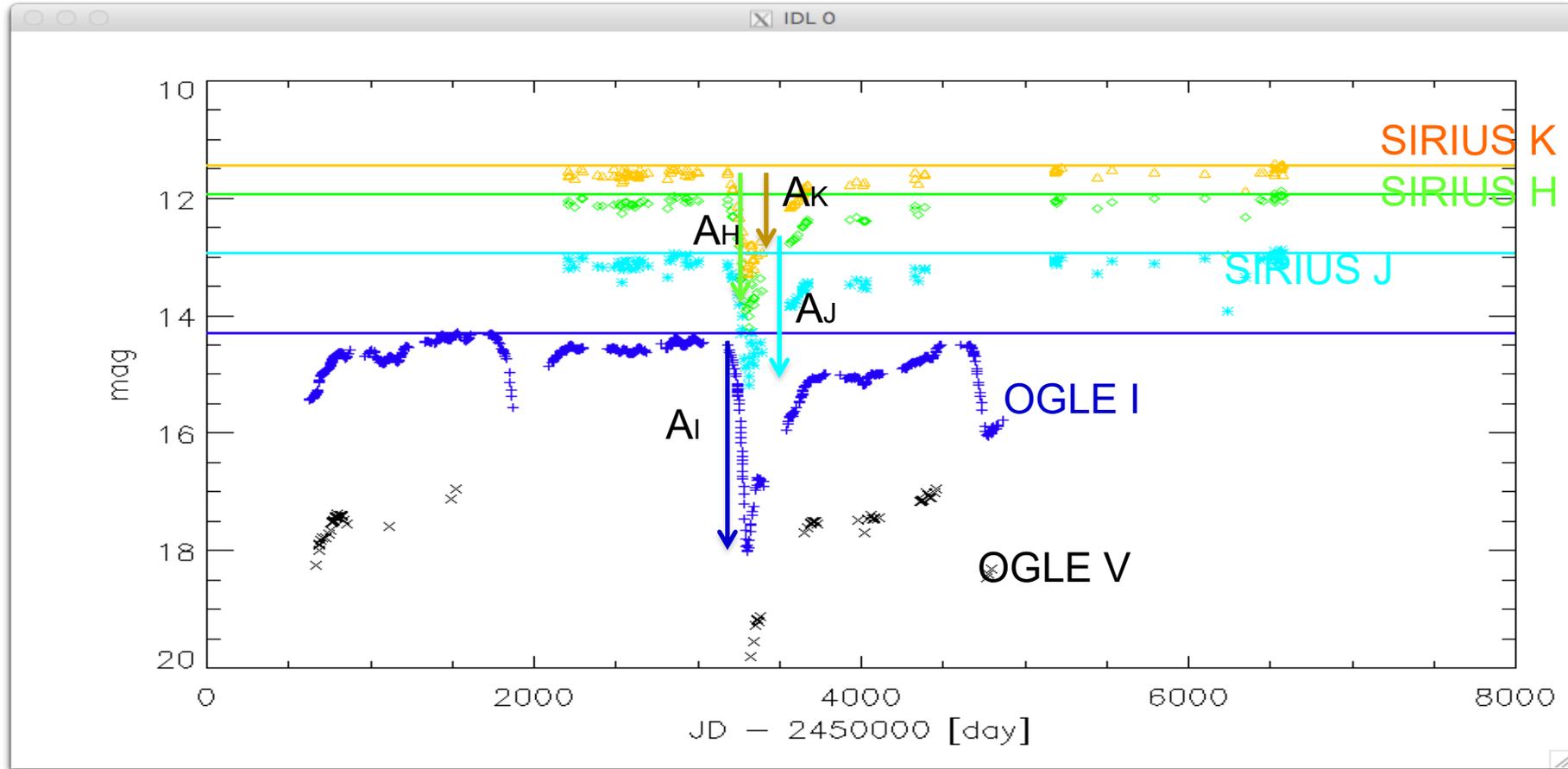
# R CrB型星(炭素星、F型)

不定期にダスト塊を「噴出」する。  
視線方向と重なると大減光が起こる



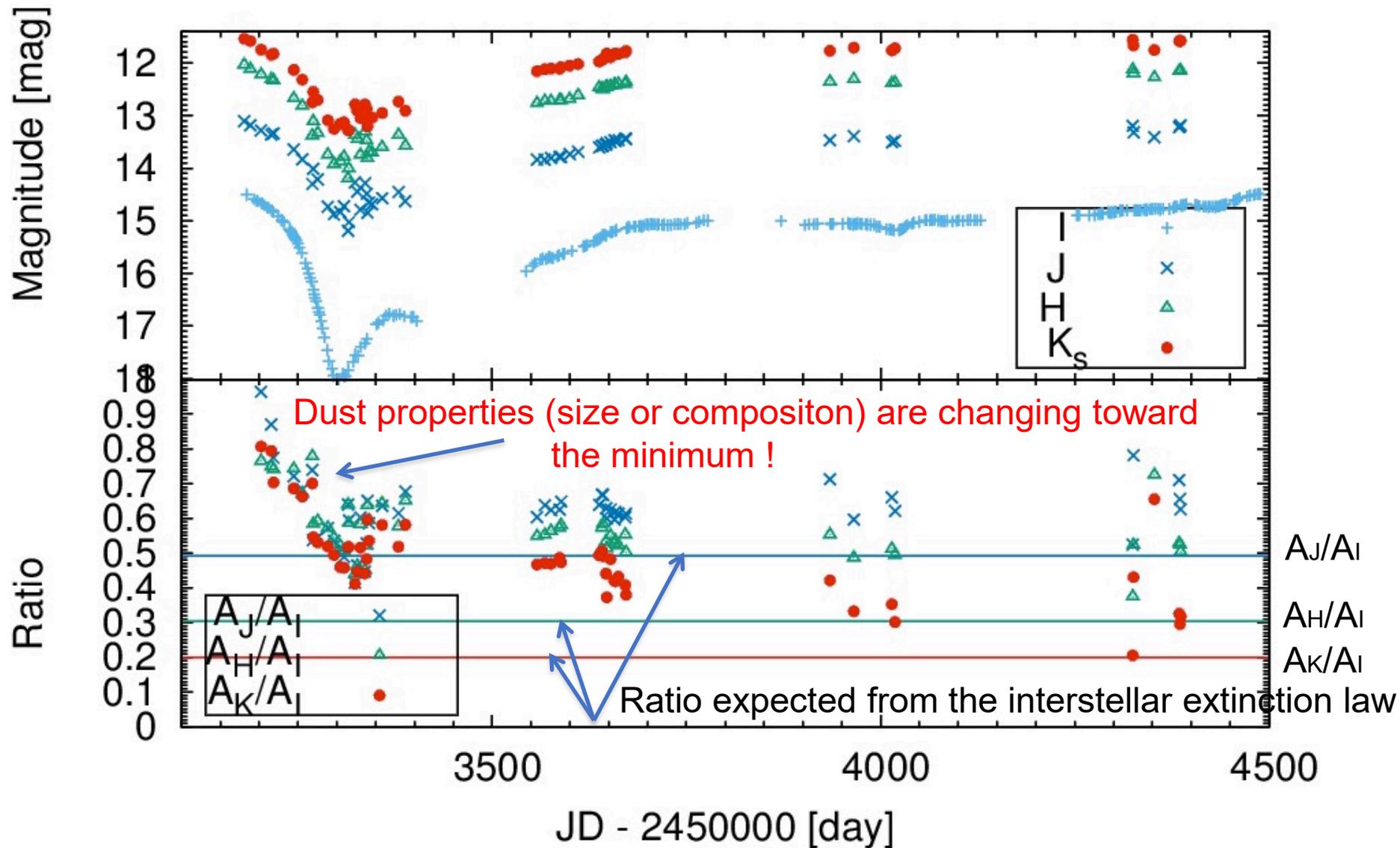
A RCB candidate in the SMC

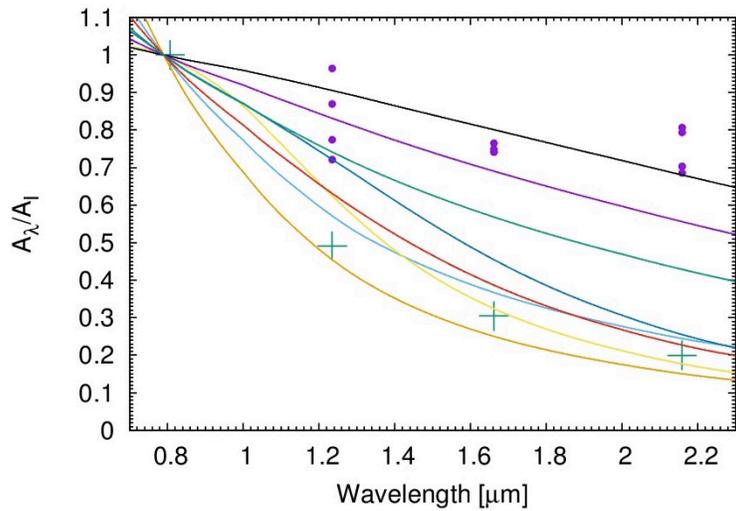
# 減光の深さを測る



A RCB like star in the SMC

# 星周「減光則」が時間変化する様子



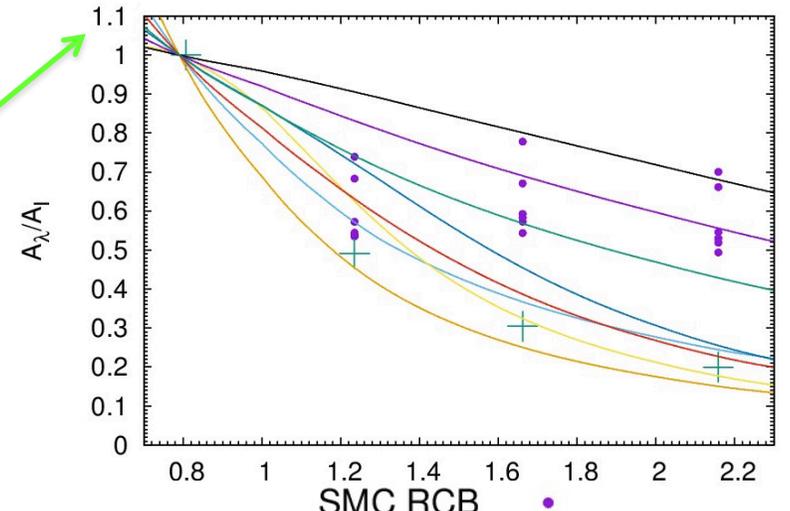


MRN サイズ分布

$$n(a) \propto a^{-q}$$

for

$$a_{\min} < a < a_{\max}$$

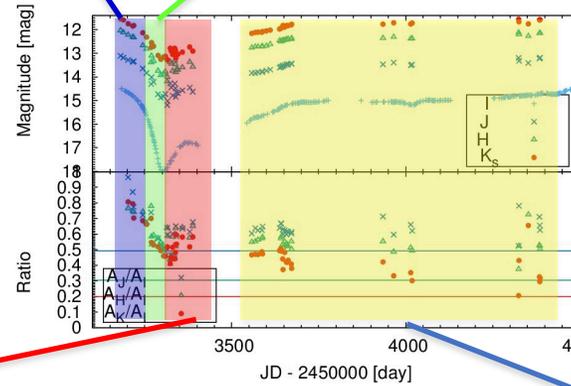


アモルファスカーボンを仮定して、  
q と a\_max を変えたモデルを計算

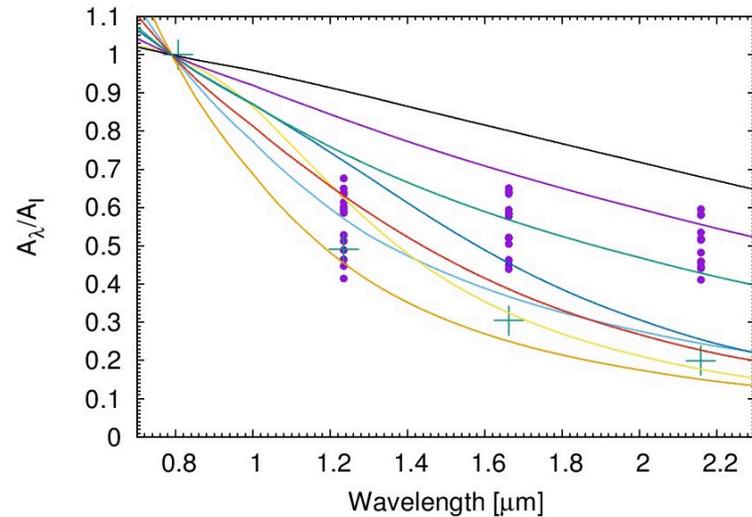
early phase: q=2.5, max=0.55μ

late phase: q=3.5, max=0.55μ

fits data well.

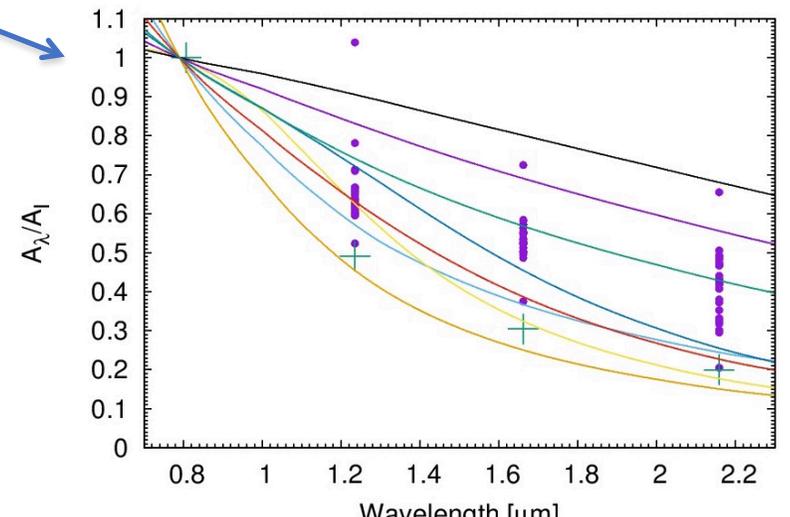


- SMC RCB
- Interstellar
- 0.01μm
- 0.10μm
- 0.15μm
- MRN, q=2.5, min=0.005, max=0.25
- MRN, q=3.5, min=0.005, max=0.25
- MRN, q=2.5, min=0.005, max=0.55
- MRN, q=3.0, min=0.005, max=0.55
- MRN, q=3.5, min=0.005, max=0.55



極小期に向けてダストサイズが急成長し、極小期から時間がたつにつれて、成長したサイズのダストが壊れていっている描像を考えると合うような。

→ダストの成長と破壊を見ている？

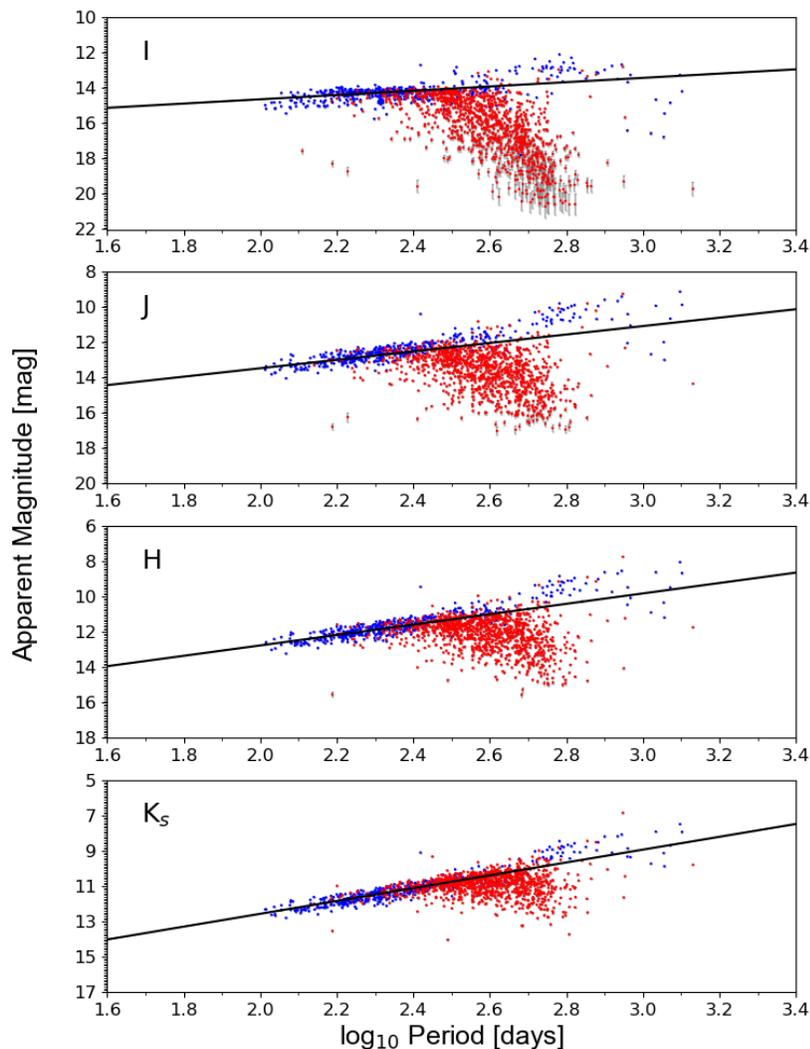


# 中/大望遠鏡

- 分光（低分散でよい）モニターができれば、「星周減光則」をちゃんと出せそう。
  - 「個性」はある？
    - R CrB型星ごとに減光則は違うのか？
- R CrB型星は炭素質ダストによる星周減光則を調べる事に相当する。例えば新星とかでダストを作るような物があればO-rich星周ダストの星周減光則が出せる??
- 星周減光則から星間減光則へどう繋がっているのか？が興味があるところ。

# ミラ型星の星周減光

# ミラのPLR



IはOGLEの<I>、JHKは2MASSの1回観測

青：O-rich、赤：C-rich (OGLEカタログによる、カラーでの分類)

仮定：

- ミラは「O,Cによらず」本来は一つのPLRにのるんだ！
- PLRから外れて暗く出てる星は「星周減光」を受けたんだ！
  - 実際、 $\lambda \rightarrow$ 大 でズレが小さくなっている
- $P < 200$  dayのO-rich星は星周減光を受けてないんだ！ここでPLRを決めたら、全てのミラは本来その延長線にのるはずなんだ！

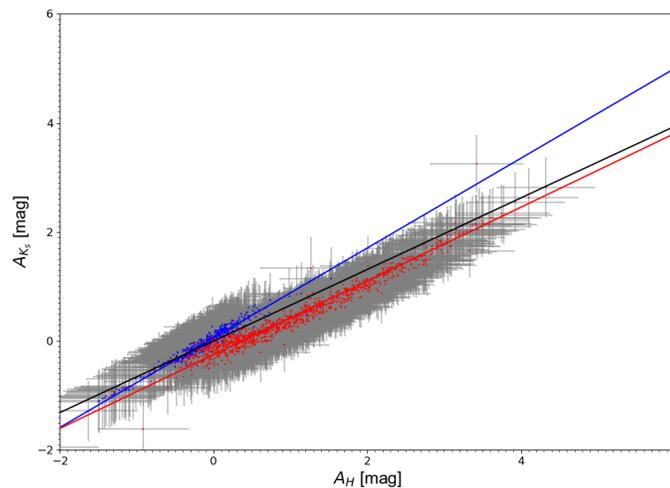
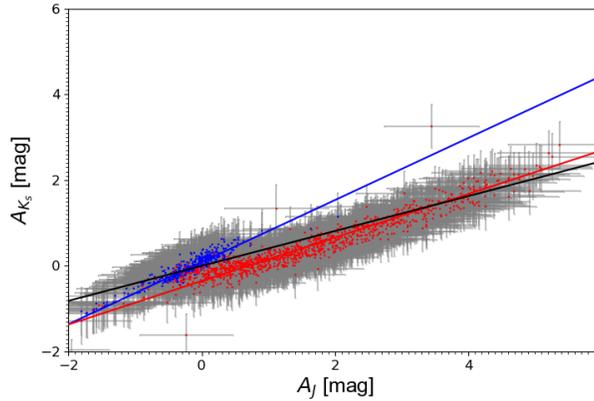
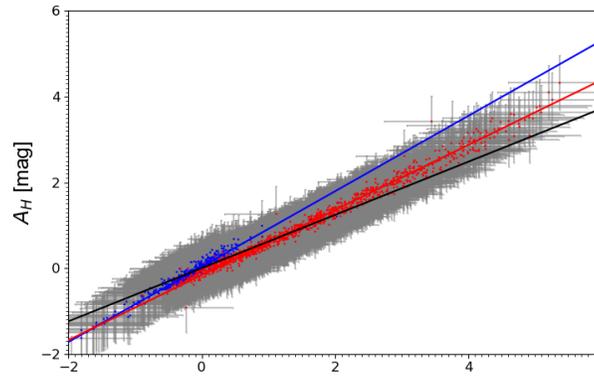
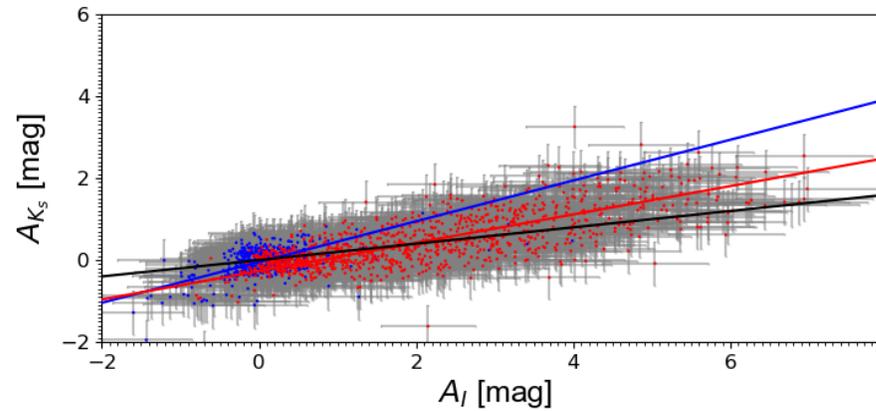
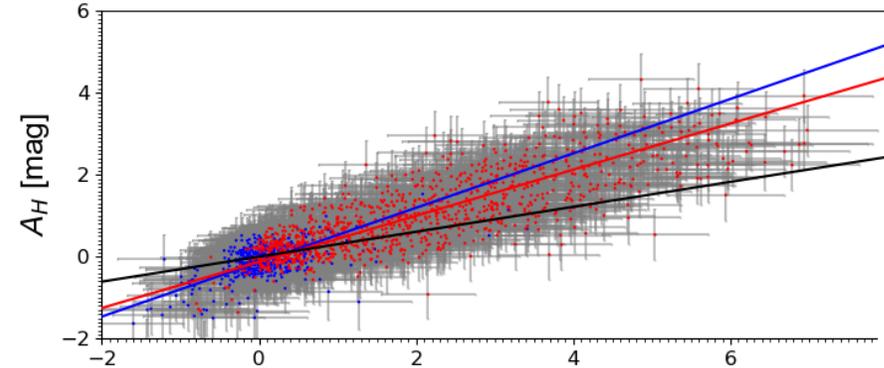
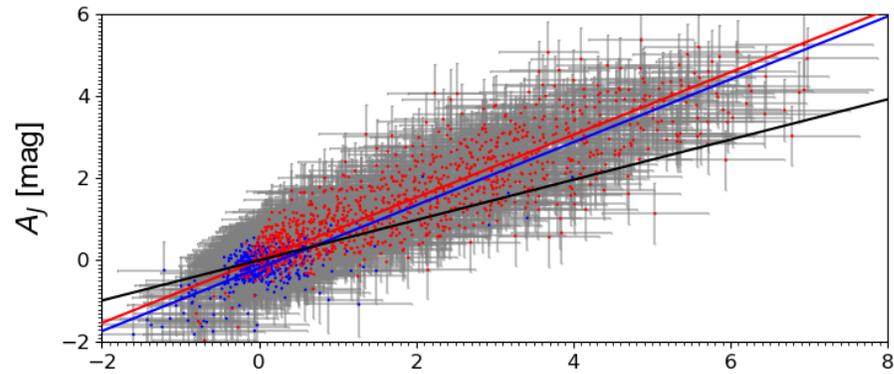
# 話の拠り所となる式

$$m_{plr, \lambda} = a_{\lambda} \log P + b_{\lambda}$$

P<200dayで決めたPLRが予想する等級  
= 星周減光を受けてない時の等級

$$A_{\lambda} = m_{obs, \lambda} - m_{plr, \lambda}$$

星周減光は、観測された等級とPLRが予想する等級との差として定義。なので単位はmag



青：O-rich、赤：C-rich

黒：星間減光則

わかること：

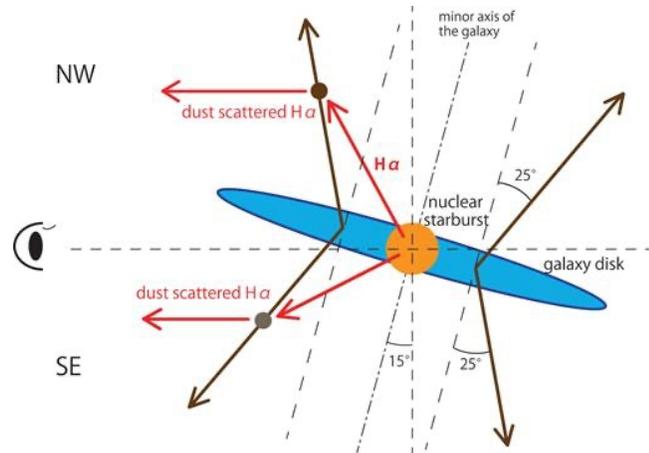
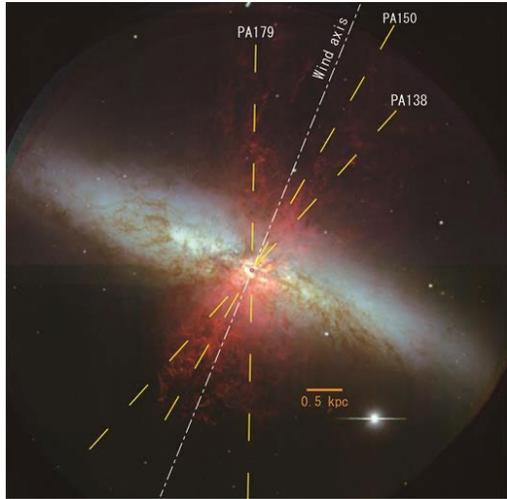
ミラの星周減光則は星間減光則と異なる

OとCで異なる

表面組成を固定すればミラ型星の星周環境は個性がない = ミラ型星の星周環境はどれも似たようなもの。ダストの種類、サイズ。

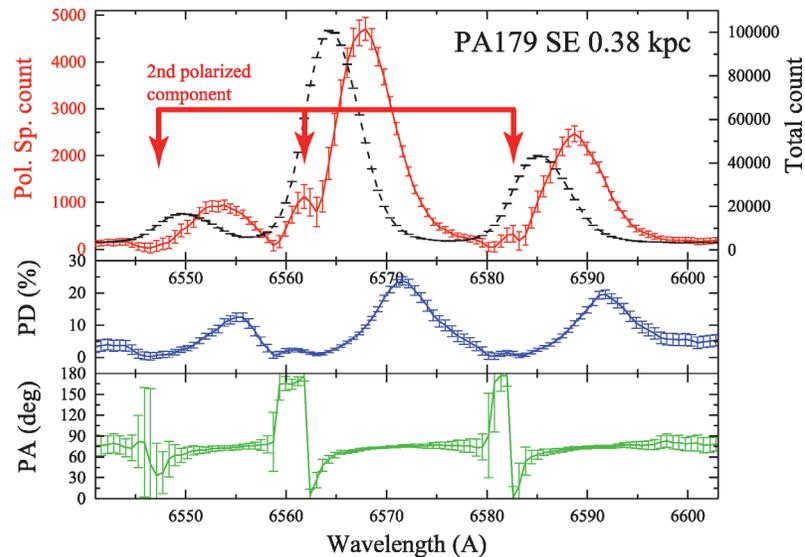
ダストの運動を直接捉える

# Yoshida et al., 2011, 2019, の偏光分光観測手法



- 赤：散乱光のみのスペクトル
- 黒：total lightのスペクトル
- ズレからダストの移動速度を直接測定できる。

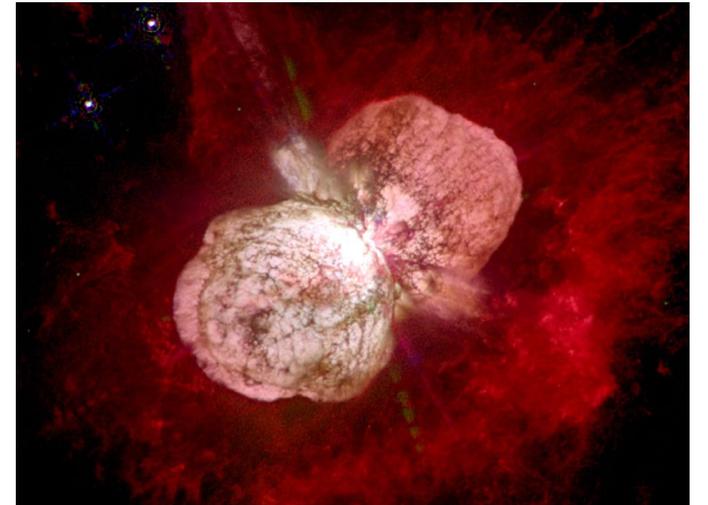
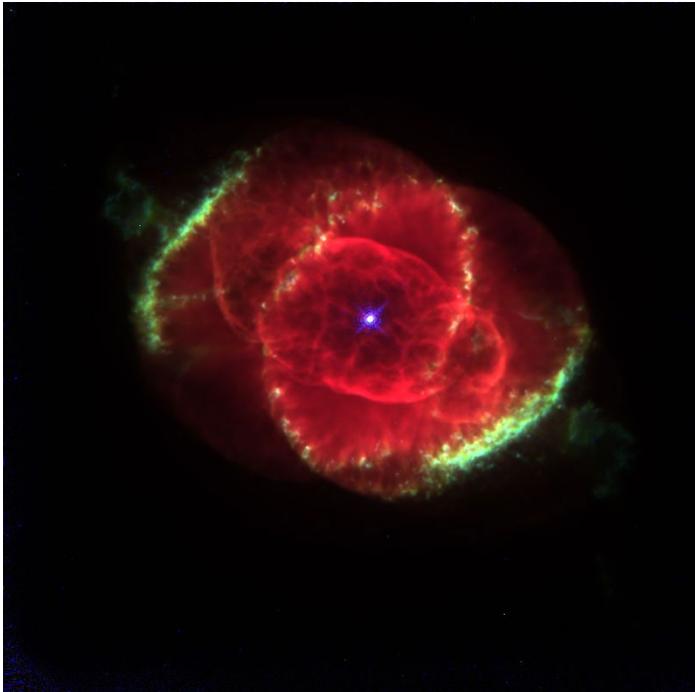
M82



手法を輝線を出す恒星に適用したい。  
M81の場合にくらべて速度が $>1$ 桁 遅い  
→より高分散の観測が必要

• P-AGB, PN, Nova等

• WR, eruptive stars, LBV等



大規模なマズロスは恒星進化  
のどの段階で始まる？

# Salaris et al., 2016, A&A, 590, 64

<https://www.aanda.org/articles/aa/pdf/2016/06/aa28181-16.pdf>

- 47TucのHB starのモデリングから
  - the RGB mass loss allowed by the HB modelling is **consistent with  $\Delta M_{\text{RGB}} \sim 0.23 \pm 0.07 M$**  estimated from the detection of their circumstellar envelopes by means of mid-IR photometry (Origlia et al. 2007).

# 過去の研究をまとめると

- TRGBに相当する明るさ付近で急にMass-lossをはじめる星はある。
- Origliaの47Tucの結果は、 $\sim 1M_{\text{sun}}$ の星は $0.2M_{\text{sun}}$ 程度をRGB期間中に捨てる事を示唆している。
  - ただ、Origliaの結果はBoyerに否定された。
- モデル側からの要請としてはOrigliaを支持し $0.2M_{\text{sun}}$ 程度をRGB期間中に捨ててほしい。
  - IR-excessがあるRGB候補星は、明るさがTRGBに集中
    - RGBなのかE-AGBなのかは不明
  - IRAS/LRSの結果からは、シリケートは見つからない
    - IR-excessはダスト起源だとは思われている。free-freeでIR-excessが見えてる可能性は棄却されている
    - AIOxなのか？

# Dust evolutionary sequence

<https://homepage.univie.ac.at/walter.nowotny/PUBLIKATIONEN/Nowotny-2015-GALAGB3-printed.pdf>

<http://iopscience.iop.org/article/10.1086/376857/pdf>

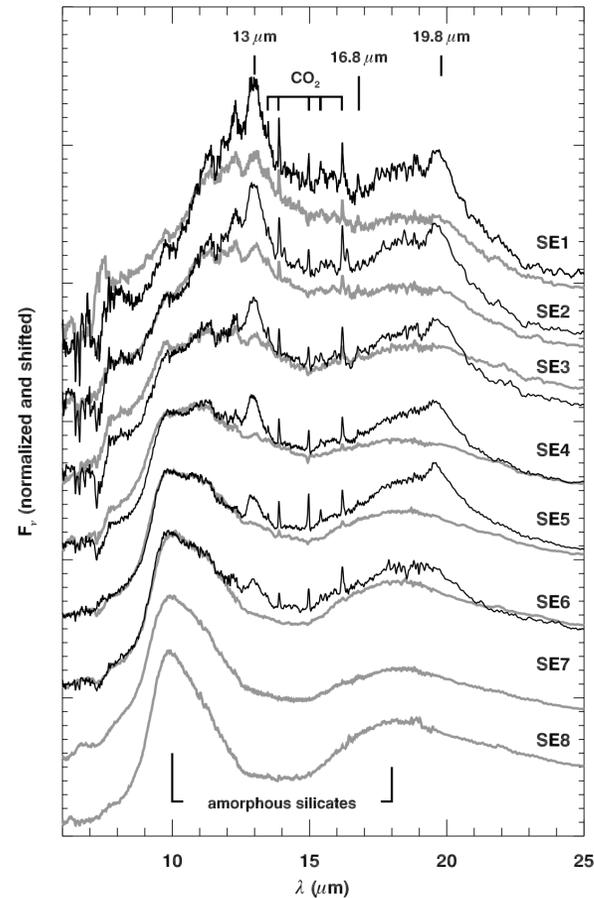


FIG. 1.—Comparison of spectra with the strongest (*black*) and weakest (*gray*)  $13\ \mu\text{m}$  features at each silicate emission index. The spectra with strong  $13\ \mu\text{m}$  features also show strong emission from carbon dioxide, most notably at  $13.9$ ,  $15.0$ , and  $16.2\ \mu\text{m}$ , an additional component to the  $18\ \mu\text{m}$  silicate feature in the vicinity of  $19.5$ – $20.0\ \mu\text{m}$ , and a weak feature in some spectra at  $16.8\ \mu\text{m}$ . Not marked is the  $12.3\ \mu\text{m}$  feature, which we consider as a likely artifact.

- After the onset of mass loss, the spectra of SRVs with optically thin dust shells (SE1-3; g Her) are characterized by emission features of different refractory oxides, such as amorphous alumina  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , spinel  $\text{MgAl}_2\text{O}_4$ , or magnesiowuestite  $(\text{Mg,Fe})\text{O}$  (with some feature identifications still being debated). With increasing MLR, emission by silicates becomes apparent (SE3-6; EP Aqr) in addition. The sequence continues with Miras of intermediate mass loss (SE6-8; o Cet)

# GAIA+WISE サンプル

$|b| > 20$ ,  $\text{dec} > -30$

$\omega / \sigma \omega > 10$

$\sigma_k < 0.1 \text{ mag}$

$\sigma_{w3} < 0.1 \text{ mag}$

色等級図を書いて、

$K_s - W3 > 0.3 \text{ mag}$

$M_{Ks} > -6.8$  &  $M_{Ks} < -5.8$

を満たすものをピックアップ

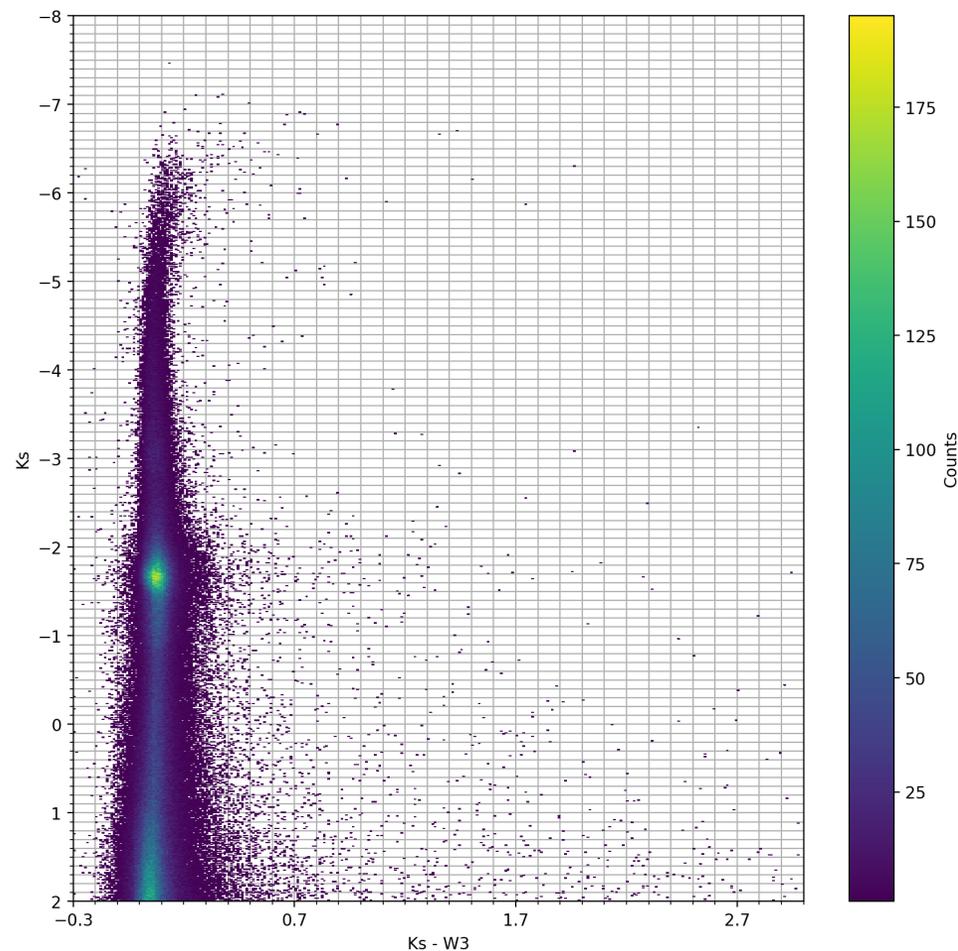
全部で119個

その中から19Bで観測できるRAを考えて、

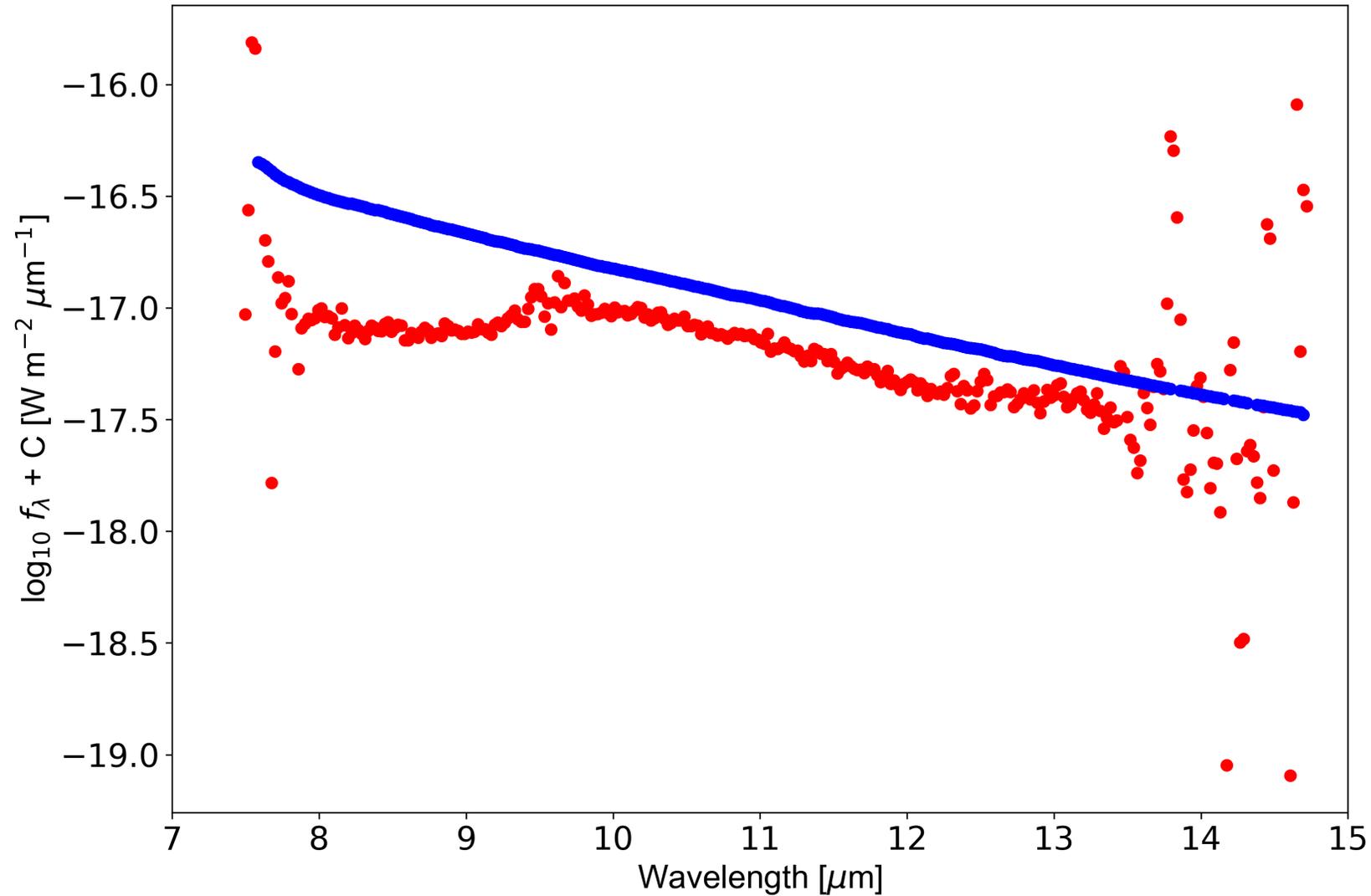
$20\text{h} < \text{RA} < 6\text{h}$ かつ

W3(12ミクロン)は500mJyがほしい  
4.5magなので、W3で4.5magより明るいもの

は17星



# すばる/COMICSで観測してみた



青：標準星

赤：あるTRGB星

以上です。

- 超小型の望遠鏡ですが、尖った特徴があると思っています。今後、せいめい望遠鏡をはじめ、中型～大型の望遠鏡でfollow-upしていけば、結構面白い事ができるような気がしています。
- TMMTの「次」も考えています。
  - 国立天文台ハワイ観測所が持つ遊休赤外検出器(HAWAII-2)を獲得しました。
  - TMMT(VIRGO, engineering grade) → TMMT2(仮称、HAWAII-2, science grade) : 測光精度大幅UPを期待。
  - 市川隆 東北大名誉教授に教えて頂いています。
    - 学部生に戻ったつもりで修行中です。

Appendix

# 「今更」 明るい星のモニター？

- 人類は全ての**タイプ**の変光を見つけていない
  - 例： Pietrukowicz et al., *Nature*, 2017, "Blue large-amplitude pulsators as a new class of variable stars"
    - この論文から引用: (青い大振幅変光星の発見を受けて) The evolutionary path that could lead to such stellar configurations remains unknown
- 全ての**タイムスケール**(ミリ秒から、なんなら100年単位)で観測できていない
- 全ての**波長**で観測できていない
  - 「可視」は、アマチュアの皆さんが、明るめの星を観測されています
- 「変化」の
  - 理由、タイムスケール、規模(or振幅)とその波長依存性
- 時間変化しない天体に比べ、情報が増える
  - 質量、内部構造、大気組成、星周ダスト

$$\tau_\lambda = \frac{\ln 10}{2.5} A_\lambda$$

n : number density (cm<sup>-3</sup>)

N : column number density (cm<sup>-2</sup>)

$$\tau_\lambda = n_d \sigma_{\text{ext},\lambda} L$$

$$n_d L = N_d$$

$$\sigma_{\text{ext},\lambda} = Q_{\text{ext},\lambda} \pi a^2$$

$$N_d Q_{\text{ext},\lambda} \pi a^2 = \frac{\ln 10}{2.5} A_\lambda$$

$$D = \frac{m_p N_H}{m_d N_d}$$

gas to dust ratio

$$\frac{m_p N_H}{m_d D} Q_{\text{ext},\lambda} \pi a^2 = \frac{\ln 10}{2.5} A_\lambda$$

$$N_H = n_H L = \frac{\ln 10}{2.5} A_\lambda \frac{m_d}{m_p} \frac{D}{Q_{\text{ext},\lambda} \pi a^2}$$

n : number density (cm<sup>-3</sup>)

N : column number density (cm<sup>-2</sup>)

$$N_H = n_H L = \frac{\ln 10}{2.5} A_\lambda \frac{m_d}{m_p} \frac{D}{Q_{\text{ext},\lambda} \pi a^2}$$

$$m_d = \frac{4\pi}{3} a^3 \rho_d$$

$$m_p = 1.67 \times 10^{-24} \text{ g}$$

$$n_H L = \frac{\ln 10}{2.5} A_\lambda \frac{4}{3} \frac{\rho_d [\text{g/cm}^{-3}] D a [\text{cm}]}{1.67 \times 10^{-24} Q_{\text{ext},\lambda}}$$

# ダストのサイズについて

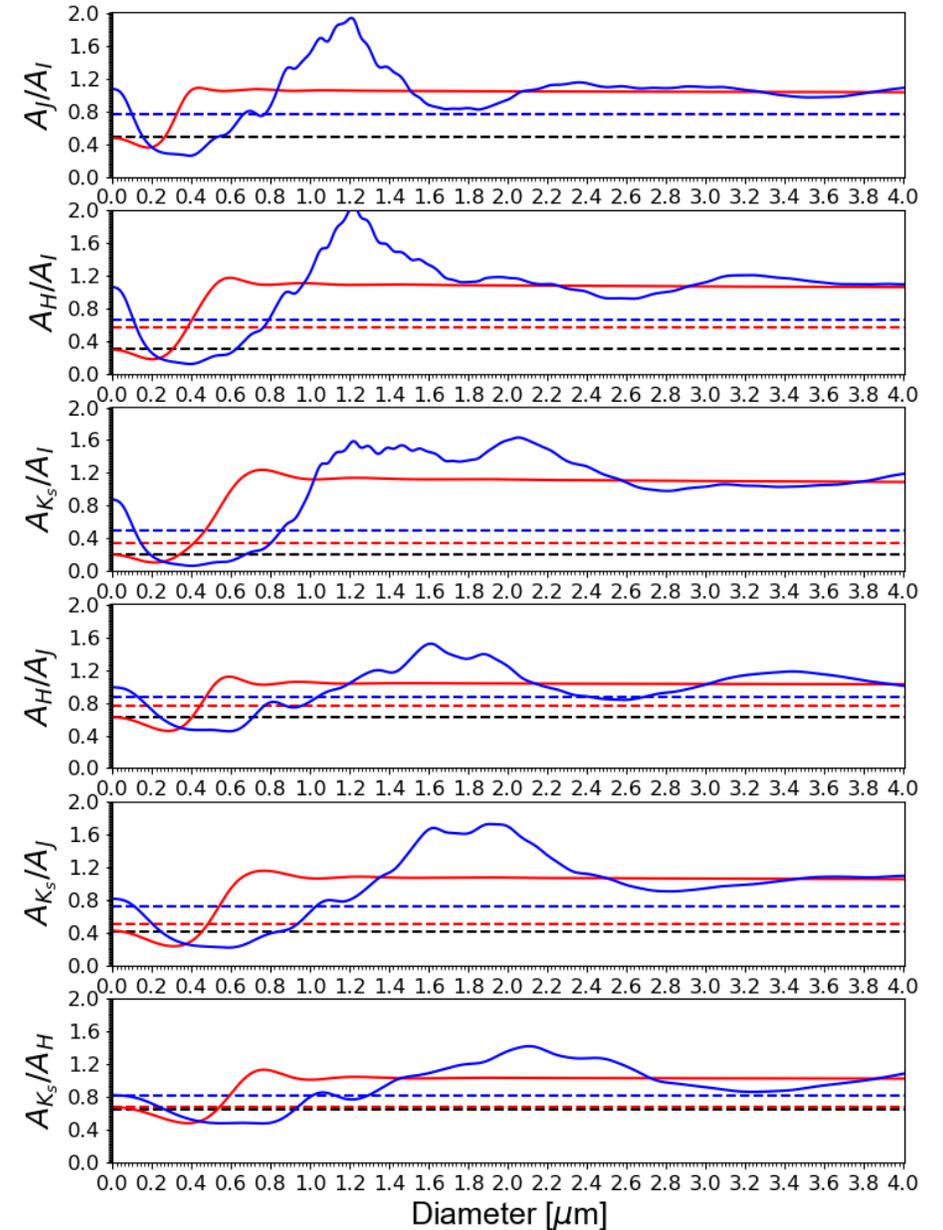
```
C = np.genfromtxt('./Lib_nk/amC-zb1.nk', skip_header=7)
#C = np.genfromtxt('./Lib_nk/amC-hann.nk', skip_header=7)
#O = np.genfromtxt('./Lib_nk/sil-dlee.nk', skip_header=7)
O = np.genfromtxt('./Lib_nk/sil-oss2.nk', skip_header=7)
#O = np.genfromtxt('./Lib_nk/OssOrich.nk', skip_header=7)
dustyの中に入っていた複素屈折率テーブルを使用。
```

物によって結構違う。。。右図はZubko1996(amorphous carbon)とOssenkopf1992(cold oxygen-rich silicate)を使っている。

実線：Mie理論線 青：O、赤：C

点線：観測された比 青：O、赤：C、黒：星間減光則

O-richミラ: 0.1  $\mu\text{m}$  程度、 C-richミラ: 0.4-0.6  $\mu\text{m}$  程度



# ダストのサイズ

星間ダスト： $a_{\max} \sim 0.25\mu\text{m}$ のMRNでよく合う。典型的サイズは $0.15\mu\text{m}$

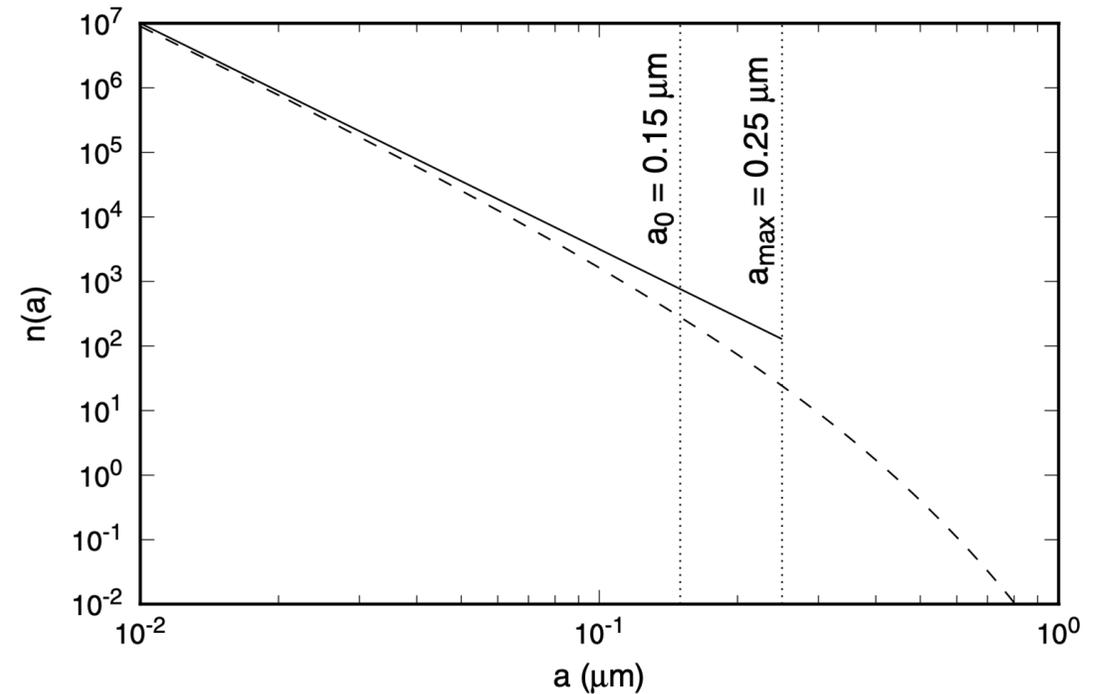
星周ダスト (O-rich&C-rich Red giants)

$$n(a) \propto a^{-3.5} \exp(-a/a_0) \quad .15\mu\text{mと}$$

のこと。

1994:炭素星IRC+10216の散乱光の観測にモデルを当てはめてざっくり $0.1\mu\text{m}$ とのこと。1996:O-rich星、なんだか面白そうな方法でみつもって(論文を良く読んで勉強しないと)だいたい $0.1-0.15$ とのこと。

Juraの結果とは炭素星の結果が異なるような？



**Figure 7.13.** Comparison of the size distribution functions discussed in section 7.3.2. The full line represents the standard 'MRN' power law with a sharp upper bound at  $a_{\max} = 0.25 \mu\text{m}$ . The broken curve represents the modified power law (equation (7.11)) with  $a_0 = 0.15 \mu\text{m}$ .

# 隕石中に見つかるダスト粒子

Dust in Galactic environment P.248

**Table 7.2.** Summary of stardust grains identified in primitive meteorites. Abundances are given by mass relative to the bulk meteorite. (Adapted from the review by Zinner 1998.)

Material	Size ( $\mu\text{m}$ )	Abundance (ppm)	Stellar source
Diamond	$\sim 0.002$	500	SNe (+ others?)
SiC	0.3–20	5	AGB stars
'Graphite'	1–20	1	SNe, AGB stars, novae
SiC (type X)	1–5	0.06	SNe
$\text{Al}_2\text{O}_3$ , $\text{MgAl}_2\text{O}_4$	0.5–3	0.03	M stars, AGB stars
$\text{Si}_3\text{N}_4$	$\sim 1$	0.002	SNe

どっかで大きくなった？それとも大きいものだけが選択的に取り込まれている？