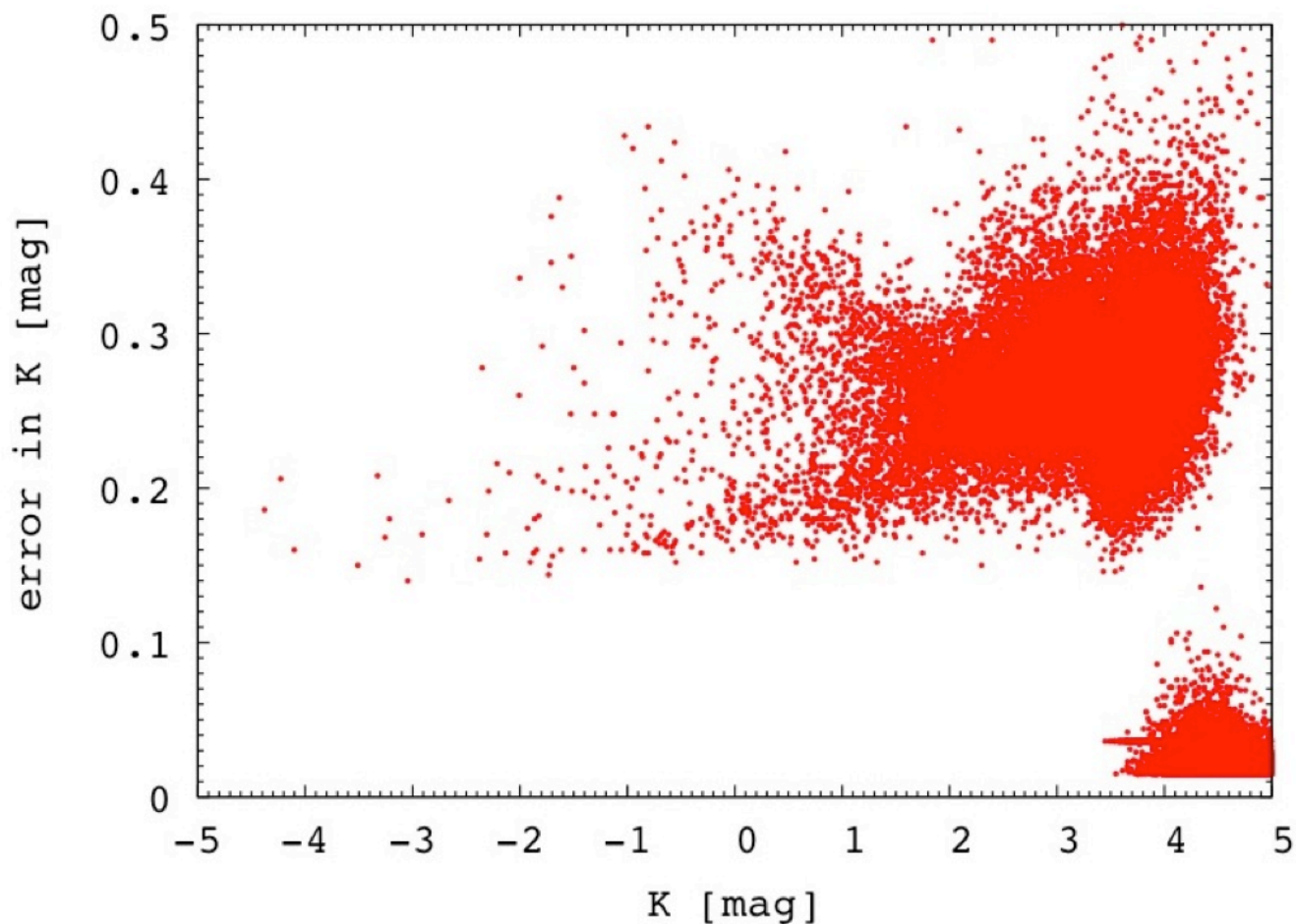


明るい星の近赤外観測

東北大学 板 由房

明るい星の近赤外線測光データ

- 2MASS : Ksで5等ぐらいを境に酷いことに。



明るい星は何個くらいある？

- $K_s < 6\text{mag}$ は全天に189,416天体
 - 内訳は以下

K_s [mag]	$m \leq -5$	$-5 < m \leq -4$	$-4 < m \leq -3$	$-3 < m \leq -2$	$-2 < m \leq -1$	$-1 < m \leq 0$	$0 < m \leq 1$	$1 < m \leq 2$	$2 < m \leq 3$	$3 < m \leq 4$	$4 < m \leq 5$	$5 < m \leq 6$
Number	0	3	5	11	48	1068	555	1948	5346	13900	46751	119781

- このうち北天から観測できるもの($\delta > -30\text{deg}$) 120,539天体
 - 内訳は以下

K_s [mag]	$m \leq -5$	$-5 < m \leq -4$	$-4 < m \leq -3$	$-3 < m \leq -2$	$-2 < m \leq -1$	$-1 < m \leq 0$	$0 < m \leq 1$	$1 < m \leq 2$	$2 < m \leq 3$	$3 < m \leq 4$	$4 < m \leq 5$	$5 < m \leq 6$
Number	0	2	3	7	34	977	406	1347	3662	8984	30039	75078

有名どころの星と、その絶対等級

星の種類	絶対等級 @K-band [mag]	見かけ等級 [mag] ($A_k/A_v=0.1$, $A_v=1\text{mag/kpc}$)		
		100 pc $A_k=0.01$	1 kpc $A_k=0.1$	5 kpc $A_k=0.5$
ミラ (P ~ 300 day)	~ -7.5	-2.5	2.6	6.5
古典的セファイド (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

明るい星のいいところ

- 距離が分かる
 - 絶対値が決められるということに等しい
 - Hipparcos 100pc, 10%
 - GAIA 10kpc, 10%
- 色々な手法/ややこしい観測方法で観測できる
 - より詳細なデータが手に入る
 - e.g., 高分散分光、偏光分光
 - 遠方／暗い天体では感度的に難しい
- 感度が悪い波長でも、近いから受かる可能性も
 - e.g., 中間赤外、遠赤外

明るい近傍天体の理解をして初めて遠方天体の理解ができる。
明るい星をないがしろにしてはいけない。

明るい星を“赤外で”観測する意味

- 星間減光が可視に較べて小さい
 - $A_k/A_v \sim 1/10$
 - $A_v \sim 1\text{mag/kpc} \rightarrow A_k \sim 0.1\text{mag/kpc}$
- なので、近傍の星を赤外で観測すると
 - ほぼ星間減光は無視できる
 - 真の明るさ
 - 真の色

$$m_\lambda = M_\lambda + 5 \log(D/10) + \cancel{A_\lambda}$$

$$\begin{aligned} C_{\lambda_1-\lambda_2} &= m_{\lambda_1} - m_{\lambda_2} \\ &= M_{\lambda_1} - M_{\lambda_2} + \cancel{A_{\lambda_1} - A_{\lambda_2}} \\ &= C_{\lambda_1-\lambda_2} \end{aligned}$$

例えば明るい変光星

近傍変光星カタログ GCVS(ver.Sep2015)

- Kで6等より明るいものの数/()の中は2MASSデータ無し/全体の数
 - Cepheid 18(3)/200
 - W Virginis 1(12)/263
 - RR Lyr 482(453)/7940
 - Luminous Blue Variables 0(1)/4
 - Wolf-Rayet 8(0)/35
 - Irregular variables 3015(32)/4139
 - Semi regular 3857(37)/6442
 - Mira 3893(86)/8077
 - R Coronae Borealis 13(1)/47
 - RV Tau 27(0)/153
 - ZZ Ceti 0(23)/70

セファイド変光星の周期光度関係

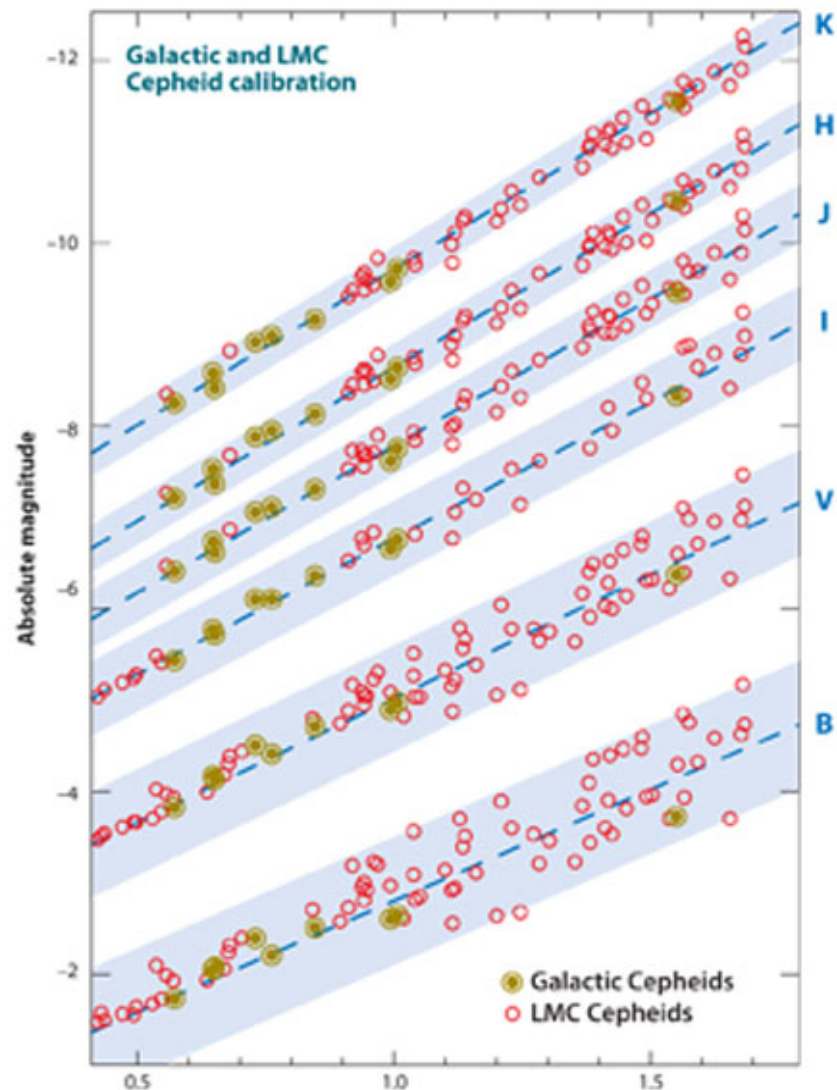
可視よりも、近赤外の方が関係がタイト

理由:

脈動不安定帯は有限の温度幅を持つ。その温度幅に対する明るさの変化が、可視の方が赤外よりも大きいから。

c.f.

赤色巨星(例えばミラ型)の場合は分子の深いバンド吸収帯が可視にあり、その影響も加わる。



周期光度関係でセファイド変光星の距離を 求める？

- 星間減光をどう見積もる？

$$m_{\lambda} = M_{\lambda} + 5 \log(D/10) + A_{\lambda}$$

$$M_{\lambda_1} = a_{\lambda_1} \log P + b_{\lambda_1}$$

$$M_{\lambda_2} = a_{\lambda_2} \log P + b_{\lambda_2}$$

$$C_{\lambda_1-\lambda_2} = \alpha_{\lambda_1,\lambda_2} \log P + \beta_{\lambda_1,\lambda_2}$$

$$C_{\lambda_1-\lambda_2} = m_{\lambda_1} - m_{\lambda_2}$$

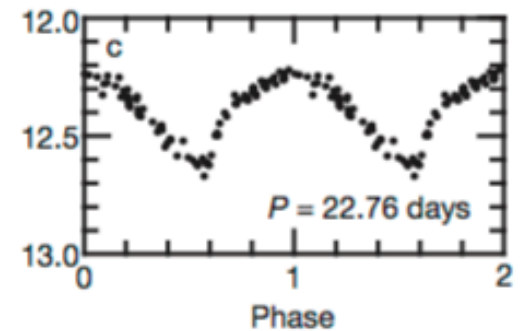
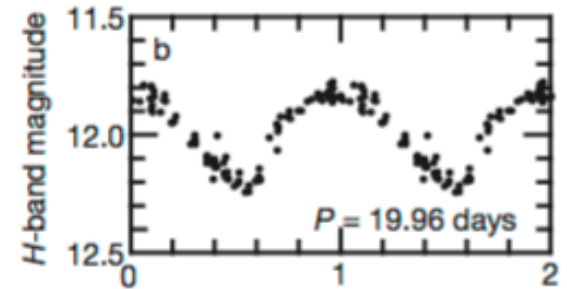
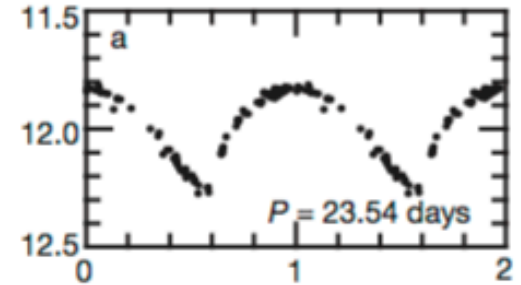
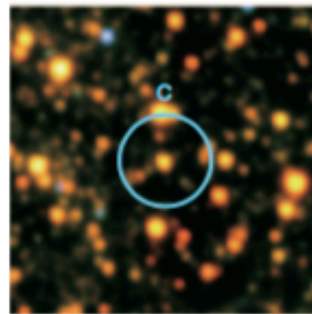
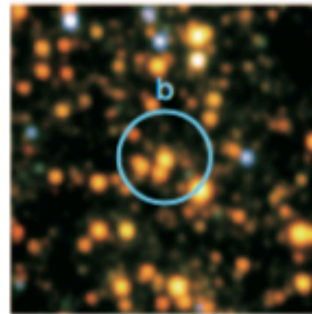
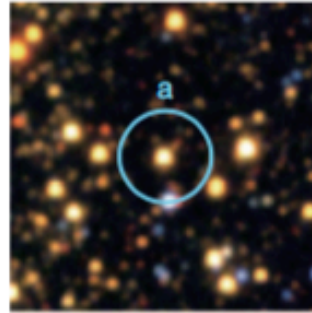
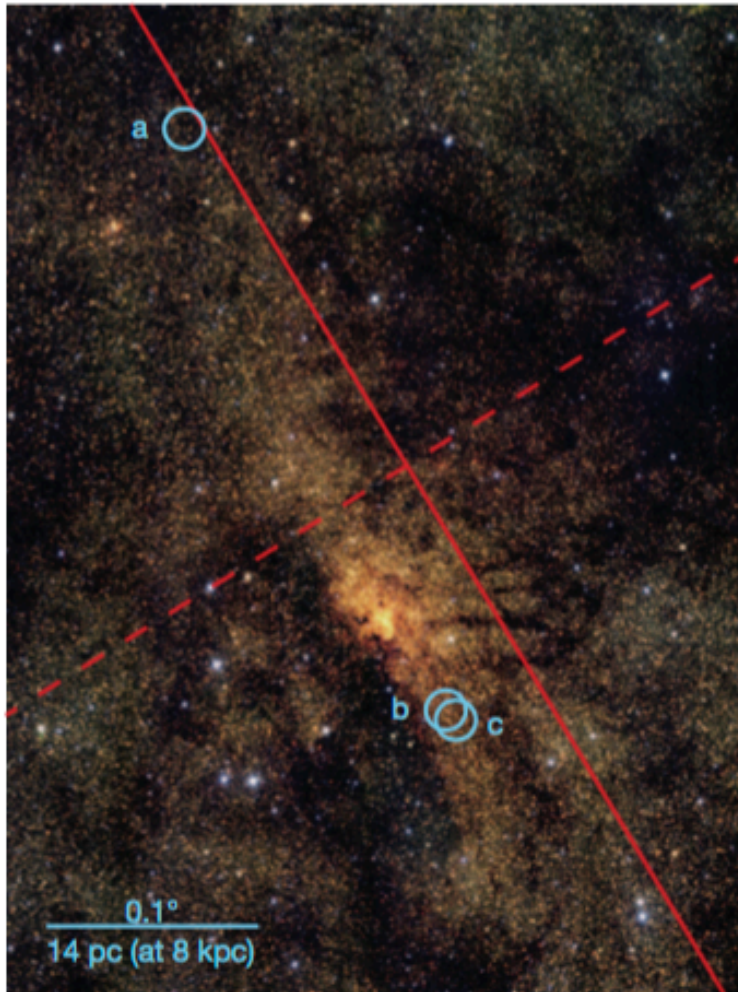
$$= M_{\lambda_1} - M_{\lambda_2} + A_{\lambda_1} - A_{\lambda_2}$$

$$= C_{\lambda_1-\lambda_2} + A_{\lambda_1} - A_{\lambda_2}$$

減光補正レシピ：

- 1.見かけの色を観測
- 2.周期を観測
- 3.P-C関係で真の色を見積もる
- 4.1と3を較べてカラーエクセスを知る
- 5.減光量を見積もる
- 6.補正して、距離を出す。

例：Matsunaga et al, 2011, Nature



なので、

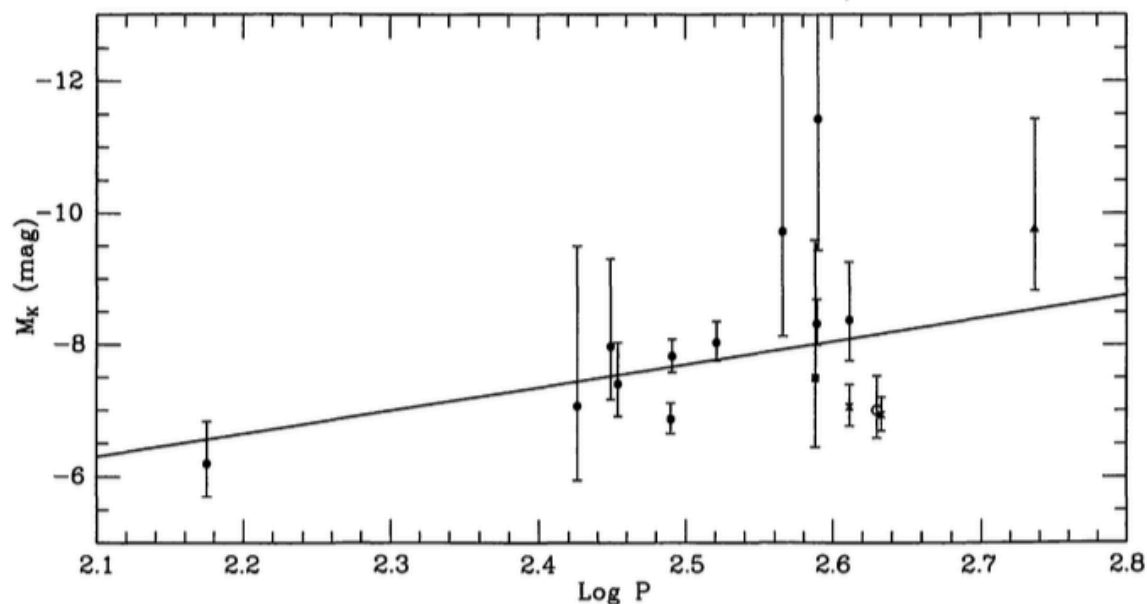
- 近傍のセファイド変光星を
 - 赤外で観測して
 - 赤外だと星間減光の影響を受けにくい
 - 星周減光フリー(としてもよい)のセファイド変光星のみを使って周期光度関係を求めて、
 - 更に、周期と真の色の関係式を作るのが、周期光度関係を使って距離を出す上ですごく大事。
- GAIAで遠いところにあるセファイド変光星の数がいくら増えたところで、減光の影響があるので、**結局、近間のセファイド変光星が一番重要な役割をはたすことになる。**
- **真の色と周期に、メタル量依存性があるかどうかを知りたい場合は、近間のセファイドならメタル量だって容易に測れる。**

ミラ型星は？

GAIAで言われているサイエンスケース

- 周期光度関係の校正

van Leeuwen et al., 1997
Hipparcos + K data



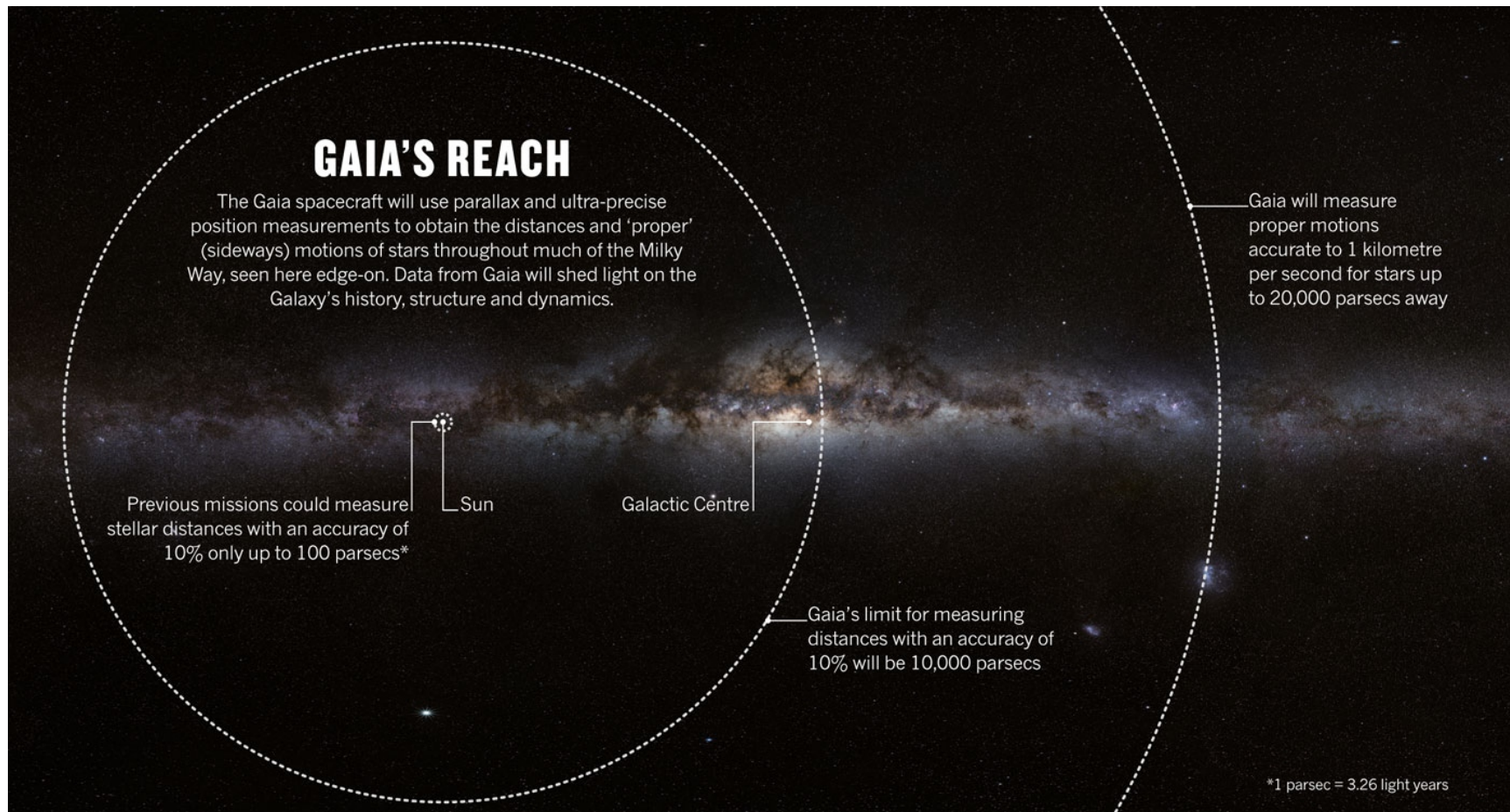
Hipparcos:
エラーを支配
しているのは
距離の誤差

↓
GAIA:
エラーを支配
するのが
測光誤差は嫌

Figure 2. The M_K -log P relation. Open circle, the C-type Mira, R Lep; filled square, the symbiotic Mira, R Aqr; filled triangle, the double period Mira, R Cen; crosses, the fundamental pulsators, χ Cyg and R Cas; filled circles, other stars. The line is the relation from the LMC with the commonly adopted distance modulus (18.50).

LMCの傾きを使って、ゼロ点だけ求めた。
Universality(メタル依存性)の議論ができていない。

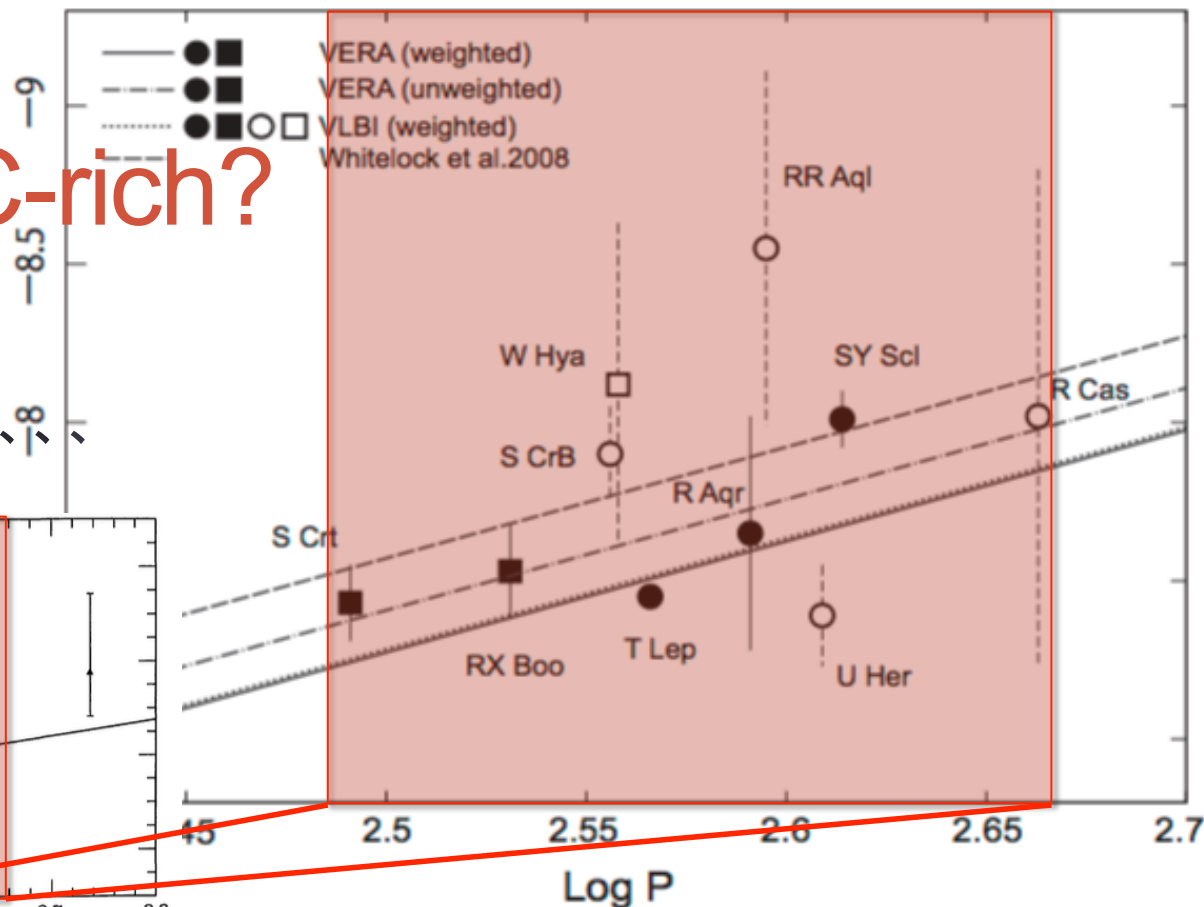
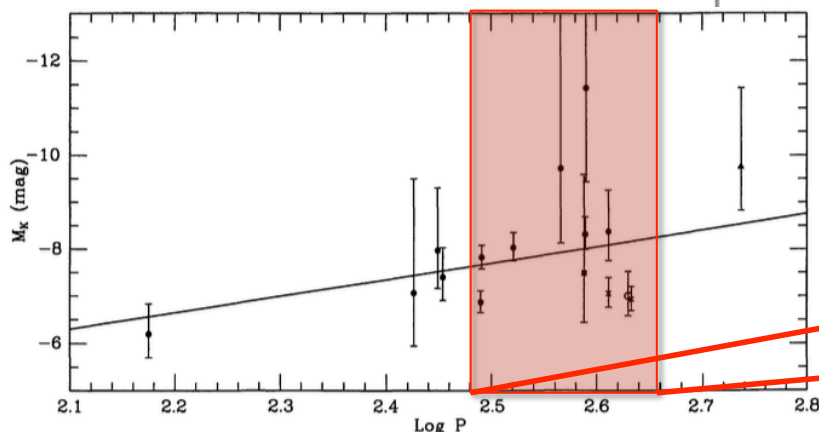
GAIAが見る範囲



短周期 nor C-rich?

- 周期光度関係の校正

- VERA等、VLBIもいろいろ、



- メーザー天体

- 長周期にバイアス
- 観測されてるのは O-rich Miraのみ

Fig. 6. Period–luminosity relation derived from astrometric VLBI observations. Filled symbols represent absolute magnitudes M_K derived from VERA observations. Open symbols represent those from other VLBI observations conducted by Vlemmings et al. (2003) and Vlemmings and van Langevelde (2007). Square symbols are used to denote semiregular variables. The dashed line shows a relation reported by Whitelock et al. (2008).

なので、

- 近傍のミラ型変光星を(ただしGAIAでサチらないような)
 - 赤外で観測して、時間平均された光度を求めて、
 - 赤外だと星間減光の影響を受けにくい
 - 星周減光フリー(としてもよい)のミラ型変光星のみを使って、更に、様々な周期のものを使って周期光度関係を求めて、
 - 周期と真の色の関係式を作るのが、ミラ型星の周期光度関係を使って距離を出す上ですごく大事。
- ただし、、、
- ミラ型星の場合は、星間減光の他に**星周減光**も考えないといけないので、セファイド変光星程単純ではない。

例えば明るい Red Clump

Red Clump ?

コアでHeが安定的に燃焼している段階
滞留時間が長いために、“クランプ”する。

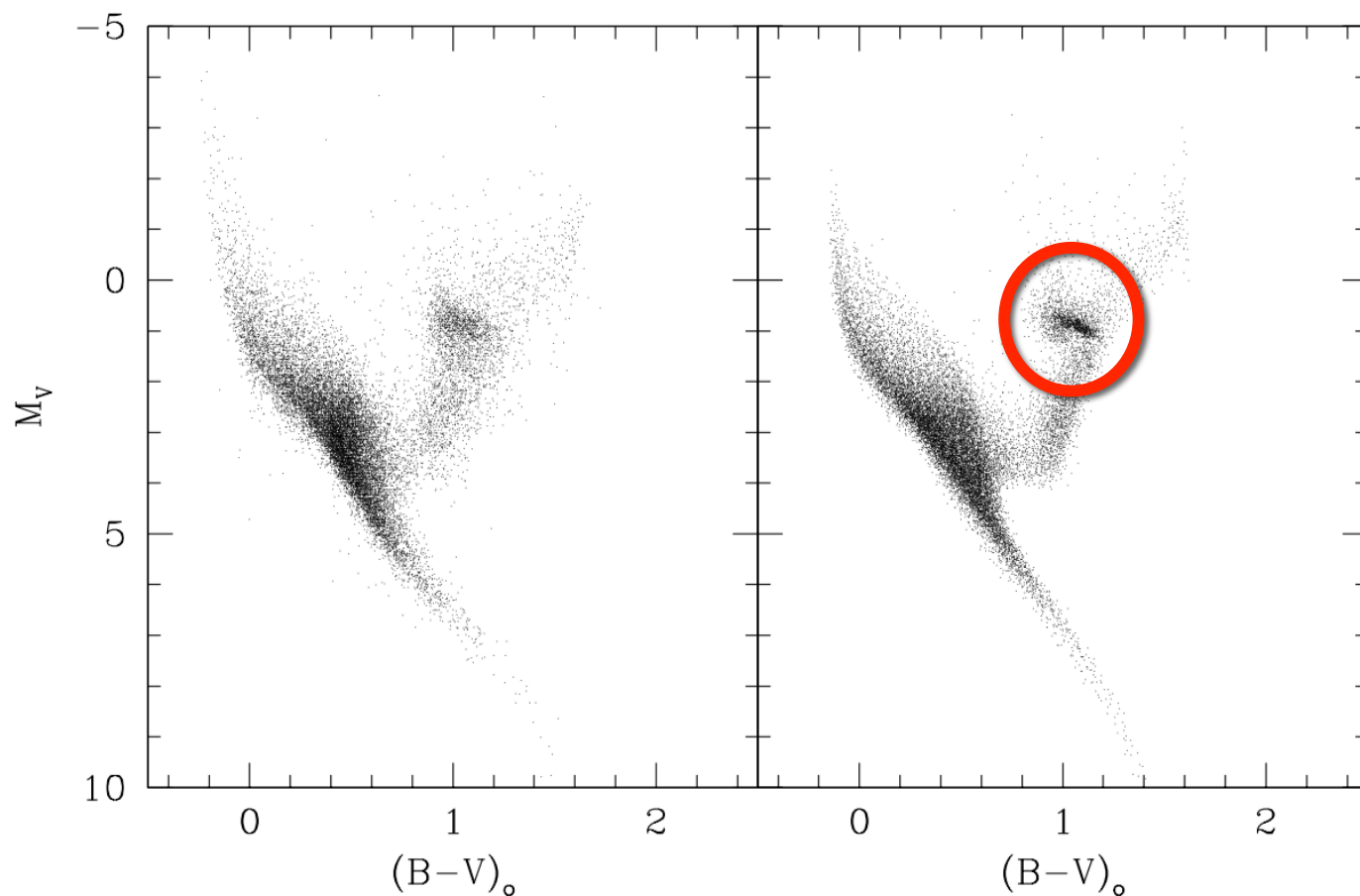
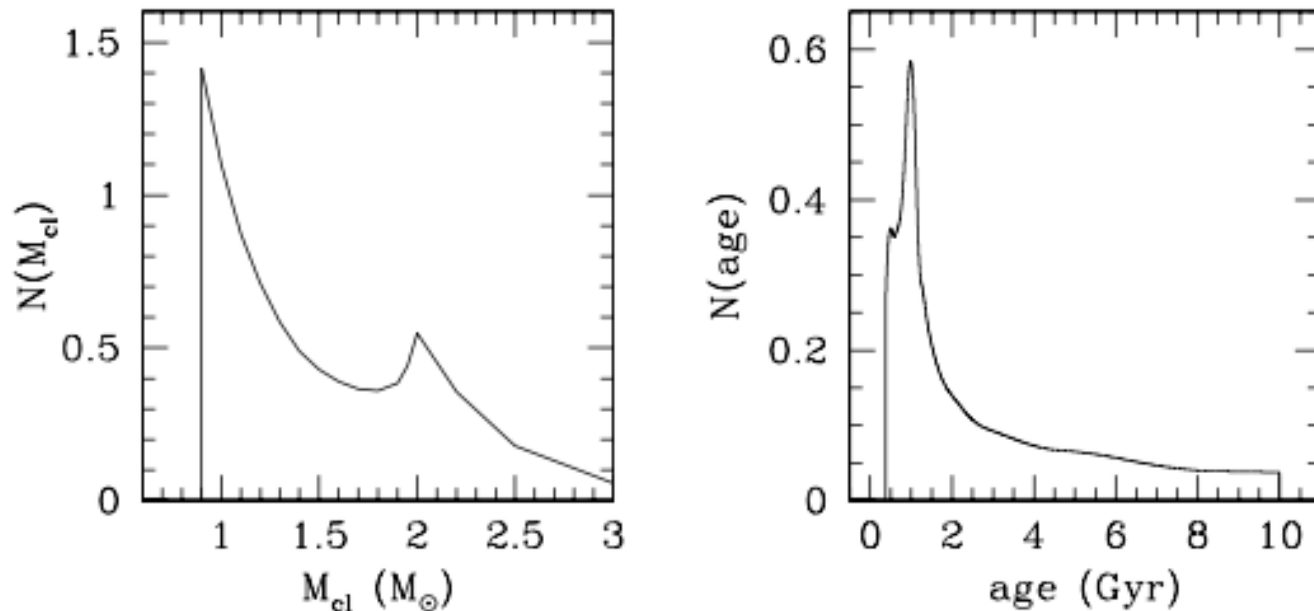


Figure 1. Left panel: *Hipparcos* data. Right panel: theoretical simulation (see text).

Red Clump stars

- Age and Mass
 - 1から10Gyrまで分布、1Gyrあたりにピーク。
 - Initial massが0.8-1.2Msunのものが大半



Salpeter IMF
Constant SRF from
0.1 to 10 Gyr ago

Figure 2. Mass (left panel) and age (right panel) distribution of clump stars for the case of a constant star formation rate (see text).

近傍Red Clump stars

- Hipparcos
 - 約600個のRC星
 - $\Delta\omega/\omega < 0.1$ を満たす。
 - 太陽から約125pc圏内に相当
 - 絶対等級のエラーが0.22等以下に相当
 - e.g., Paczynski & Stanek 1998, Alves 2000, Laney & Pietrzynski 2009
- Metallicity
 - 近傍RCのメタル量の幅
 - $-0.6 < [\text{Fe}/\text{H}] < +0.35$
 - McWilliam 1990, Liu et al., 2007

Red Clump

絶対光度のage/metallicity依存性

可視(I-band)
Udalski 2000

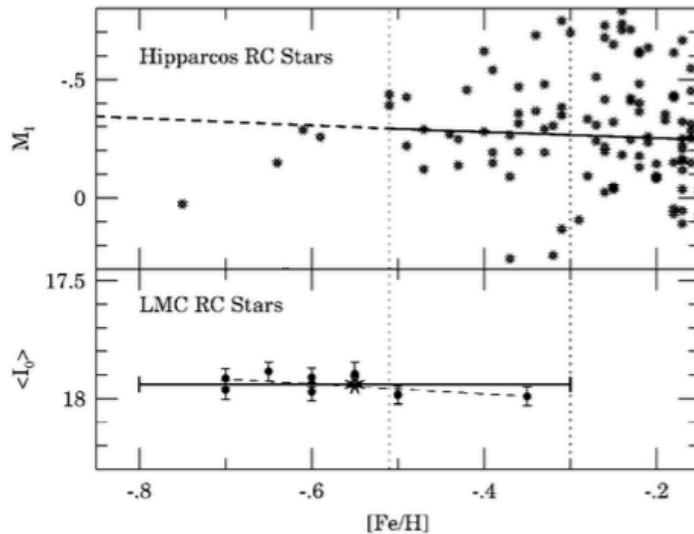


Fig. 3.— M_I of Hipparcos RC giants (top) and $\langle I_V \rangle$ of RC stars in nine fields in the LMC (bottom) plotted as a function of metallicity. The asterisk in the lower panel denotes the mean metallicity of RC stars in the LMC and the horizontal bar spread of metallicity. Dotted lines indicate the range in which metallicities of the local and LMC stars overlap. The solid thick line in the upper panel marks the derived relation of M_I on $[Fe/H]$ (eq. [1]), while the dashed line is its continuation resulting from Girardi's (1999a) models. The dashed line in the lower panel indicates possible relation for the LMC RC stars.

Within the range of metallicities covered by the nearby red clump stars ($-0.5 < [Fe/H] < 0.1$) the slope of the brightness-metallicity relation in the I-band turned out to be a small but nonnegligible $0.14 \text{ mag dex}^{-1}$

年齢依存性は
 $\pm 0.05 \text{ mag}$ 程度

近赤外

Helshoecht&Groenewegen 2007

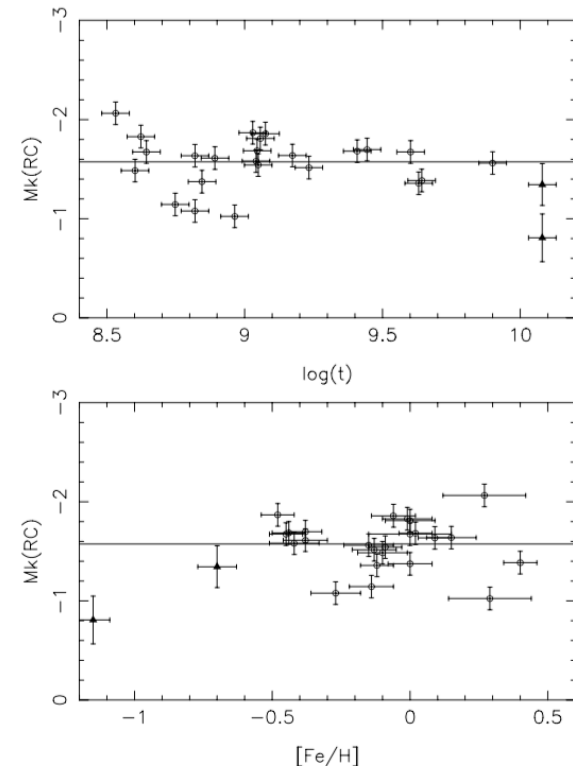


Fig. 4. Absolute K -magnitude dependence of the RC on age (t) and metallicity ($[Fe/H]$). The two triangles represent the globular clusters.

$M_K(RC)$ can be neglected for metallicities between -0.5 and $+0.4$ dex and for ages between $10^{8.5}$ and $10^{9.9}$ years.

宇宙の距離を測る物差しとしての Red Clump

- 近赤外の絶対等級がmetallicity, ageにはほぼ依存しない。
- 近傍の(星間減光フリーとしてもよい)Red Clump星の明るさをきちんと決めておけば良い。
 - 明るすぎるので、近赤外の観測データが無い。。。
 - 2MASSだと精度が悪い >15%

真の明るさと真の色

- 近傍星の観測をして明らかにすれば、減光則の研究に使えるはず。
 - 西山さん@宮城教育大等の素晴らしい仕事がある。
 - セファイド変光星を使えば、方向別、距離別の減光則まで調べられるかも??

減光則といえばこれ！というくらいの論文

Rieke & Lebofsky, 1985, ApJ, 288, 618

意外と知られてない事実：

TABLE 1
MEASUREMENTS OF OBSCURED STARS

Source	<i>J</i>	<i>H</i>	<i>K</i>	<i>L</i>	<i>M</i>	<i>N</i>	10.4/ <i>N</i>
<i>o</i> Sco	2.24	1.73	1.54	1.39		1.50	0.929 ± 0.011
G.C. Source 7	13.73	9.15	6.55	4.5 ^a	3.8 ^a	2.2 ^a	
G.C. Source 22	13.47	9.61	7.86				
G.C. Source 23 .....	...	10.30	8.07	6.67	5.82	5.2	0.23 ± 0.04
G.C. Source 24 .....	...	10.69	8.35	6.58	5.75	4.90	0.26 ± 0.04
Kob 9 .....	...	8.7 ^b	6.4 ^b	4.8 ^b		3.4	0.48 ± 0.02
VI Cyg No. 12	4.38 ^c	3.28 ^c	2.72 ^c	2.22 ^c			

^a From Becklin *et al.* 1978.

^b From Kobayashi *et al.* 1982.

^c From Harris, Woolf, and Rieke 1978.

この7つの星を使って、減光則を導いている。

各photometryの精度は～10%

Name	(J-K)0	(H-K)0	(K-L)0	(K-M)0	E(J-K)	E(H-K)	E(K-L)	E(K-M)
GC7	1.13	0.30	0.15	-0.21	6.05	2.30	1.90	2.96
GC22	1.25	0.35	0.21	-0.19	4.36	1.40	---	---
GC23	1.25	0.35	0.21	-0.19	---	1.88	1.19	2.44
GC24	1.25	0.35	0.21	-0.19	---	1.99	1.56	2.79
Kob9	1.13	0.30	0.15	-0.21	---	2.00	1.45	---

銀河中心方向に存在する星の真の色を「假定」し、それと観測を較べてカラーエクセスを計算した。*o* ScoとVI Cyg NO.12は假定した真の色が書いてない。。。

で、作っちゃいました。 Thirty Millimeter Telescope 略称TMT ?

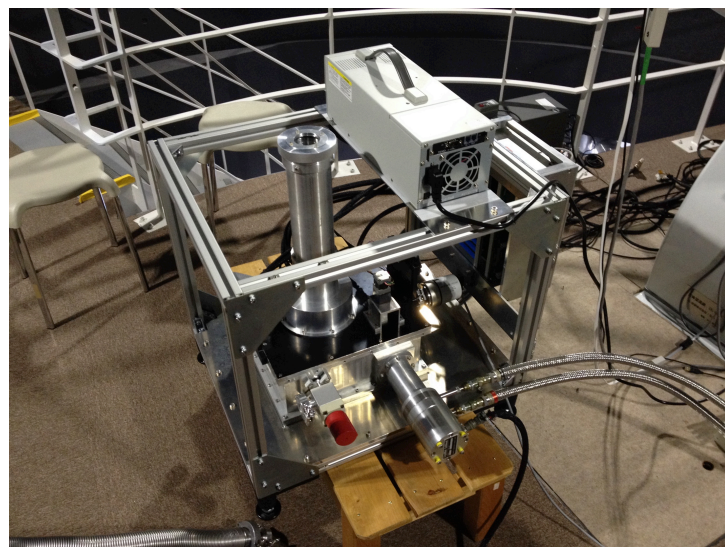
某大望遠鏡と同じ略称ですが、“ミリメートル”です。

はいはい、ニッチなやつですよ。

でも、「山椒は小粒でもぴりりと辛い」と言うではないですか。

TMT/TMMT/IR-TMT

観測地	岡山天体物理観測所 4mドーム
有効口径	30mm
フィルター	J, H, K' お金があればKsを買いたい
焦点距離	500 mm
飽和限界／検 出限界	1／9 [mag] @ K', 100sec (10secx10dither), 10 σ
検出器	Virgo-2K 2K x 2K, 20um/pix
Pixel scale	8.7 arcsec/pix
視野	5 deg x 5 deg

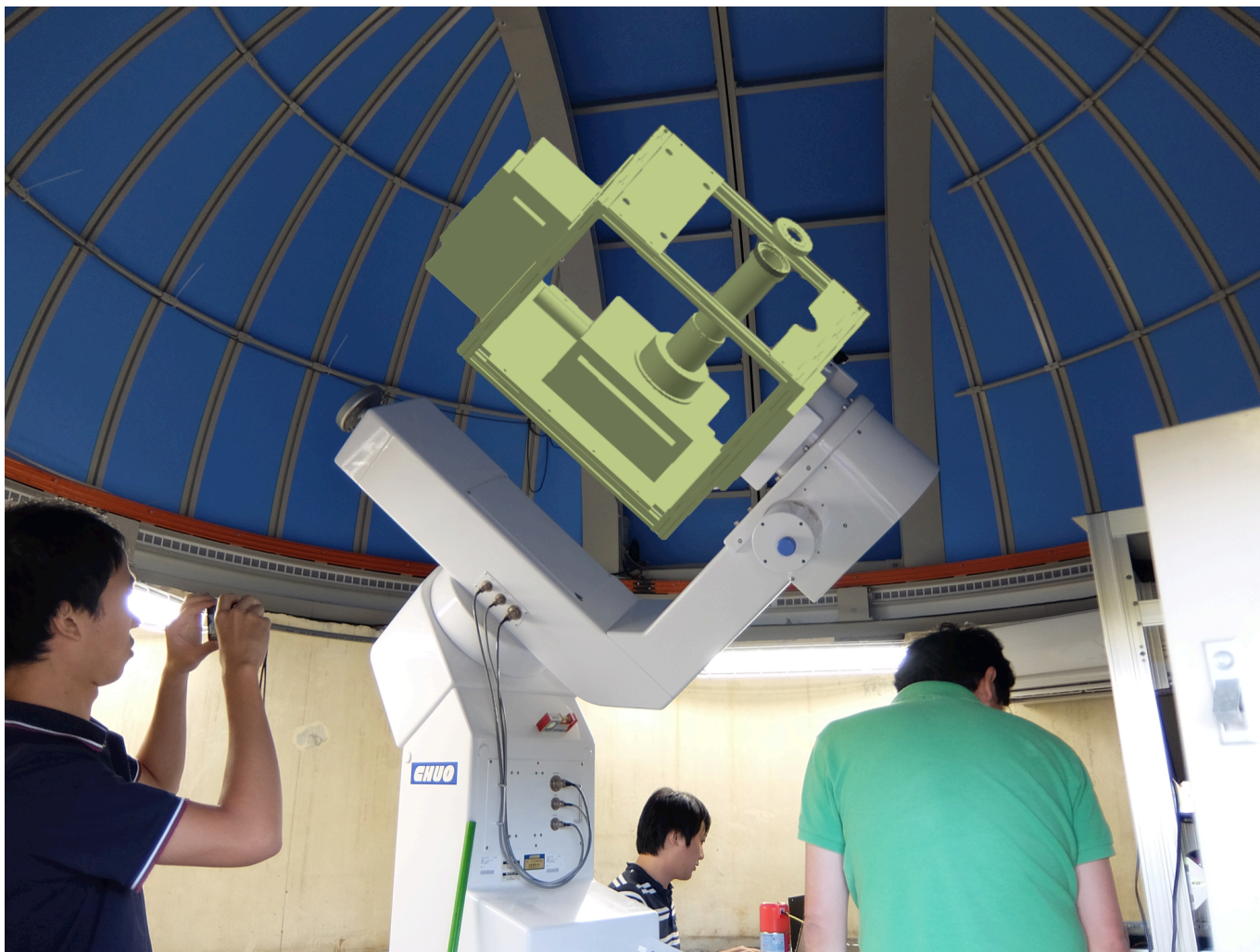


カメラ



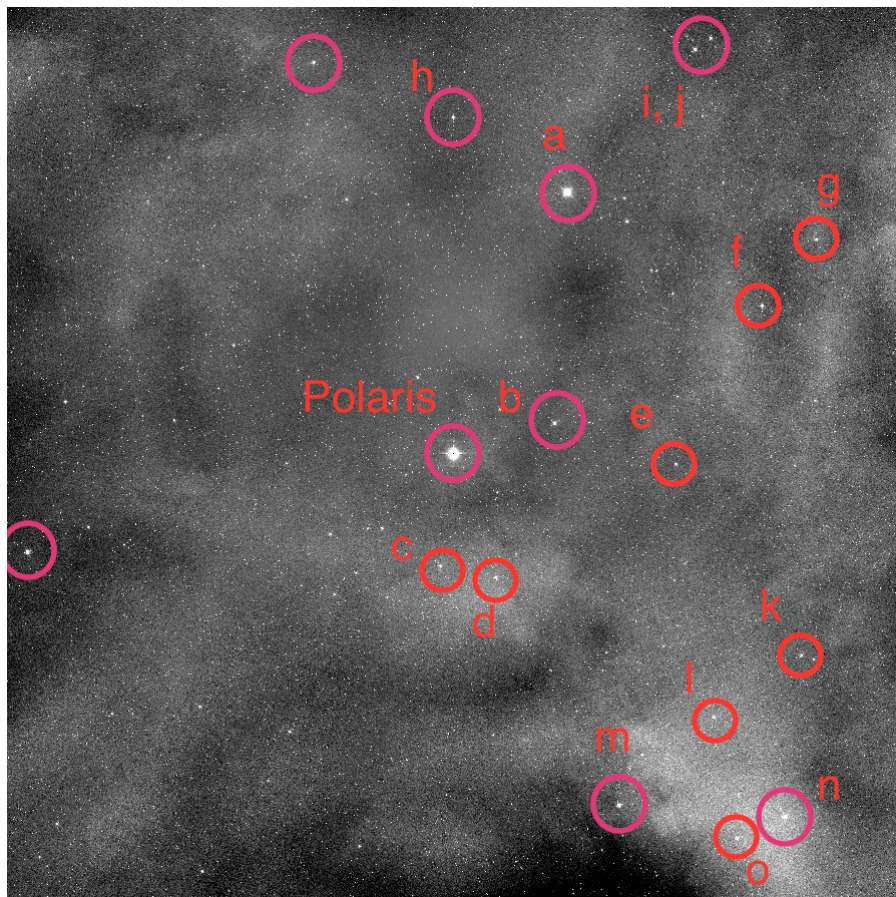
OAO 4mドーム

完成予想図



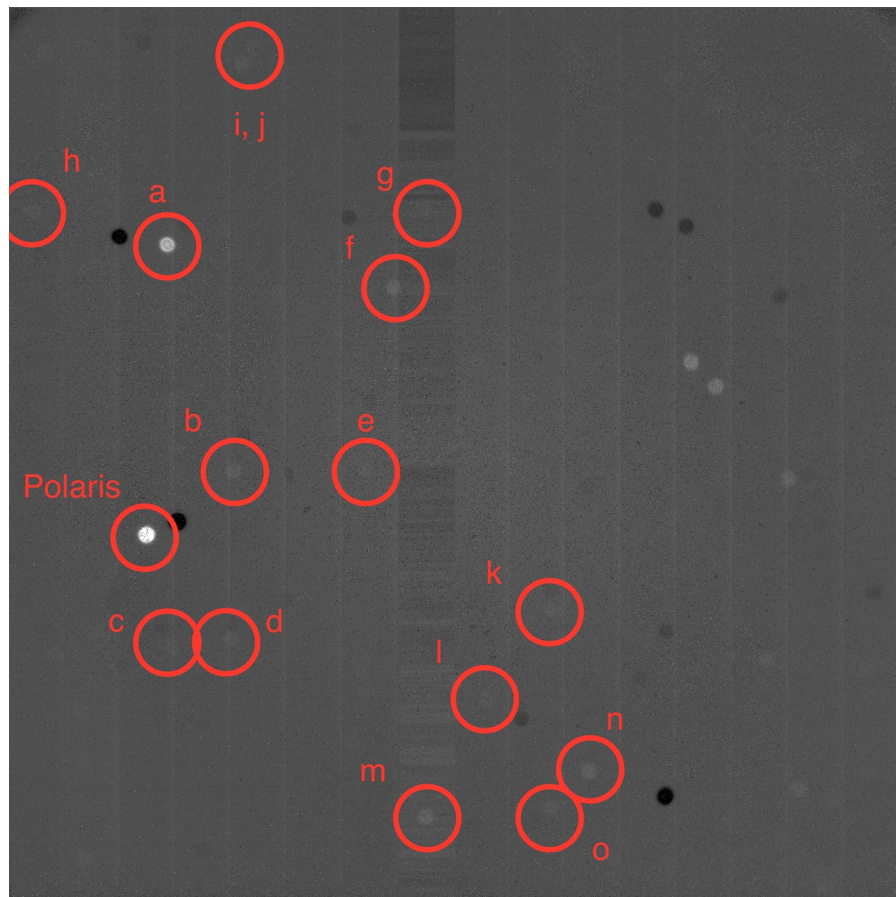
現状ステータス

- 東北大で試験観測終了



2MASS Ks, 5deg x 5deg

#ちょっと時間をおいて2枚の画像をとって、
それ同士を引き算した画像
ピンぼけしているのが残念だが、
ちゃんと写るべきものは写っている。



TMT K', 5deg x 5deg

今後の予定

- 12月上旬に岡山天体物理観測所に搬入、組み立て
- 12月中旬から観測開始
 - 大学院生がOAOに張り付いて観測。
- 架台の制御はOAOの筒井さんが担当
 - 完成済み。
 - 将来は東北大からリモート観測できるようにしたい。

乞うご期待！

明るいのしか観測できませんが、観測時間は豊富にあります。
このスペックで何か観測したい天体があれば、
是非共同研究しましょう。

まとめ

- 小口径望遠鏡を遊ばせておくのは勿体無い。
 - 赤外の検出器(きょうび、市販のものでKまで行けるのもある)をつけたら、結構いい仕事ができるのではないのでしょうか。

おしまい

ありがとうございました。