

銀河面に隠された セファイド変光星の探査

松永典之(京大・学振特別研究員)

- Introduction
 - セファイドについて
- 南ア・IRSF望遠鏡による探査の初期成果
 - 現在行っているテスト観測について
- 木曾シュミットによる観測の提案

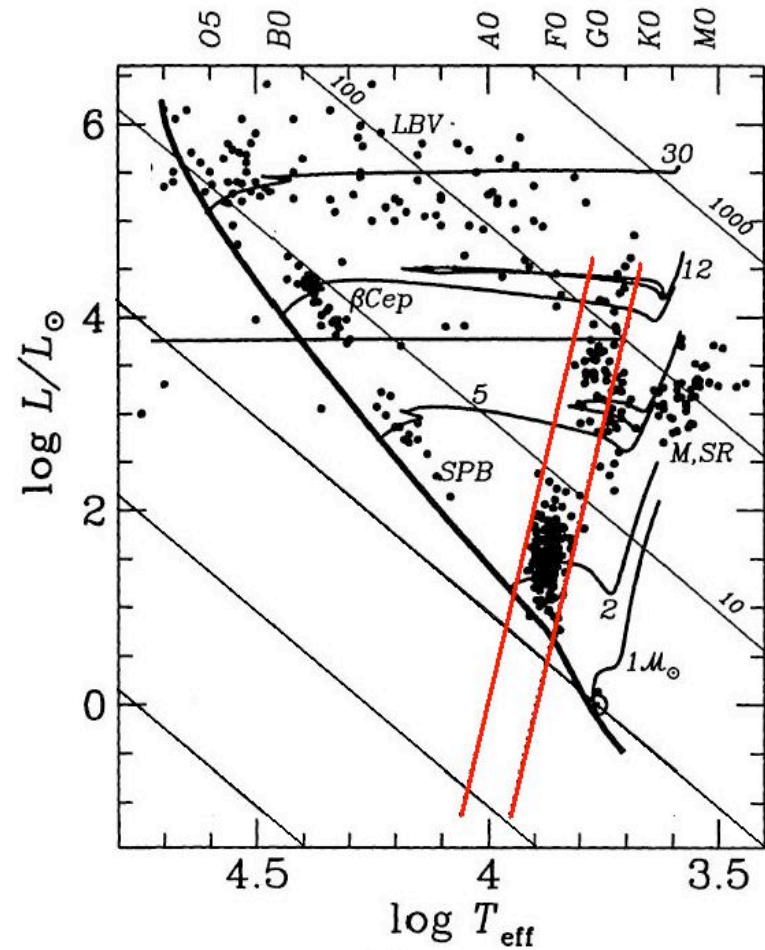
セファイドで何がわかるか。



INTRODUCTION

セファイド変光星

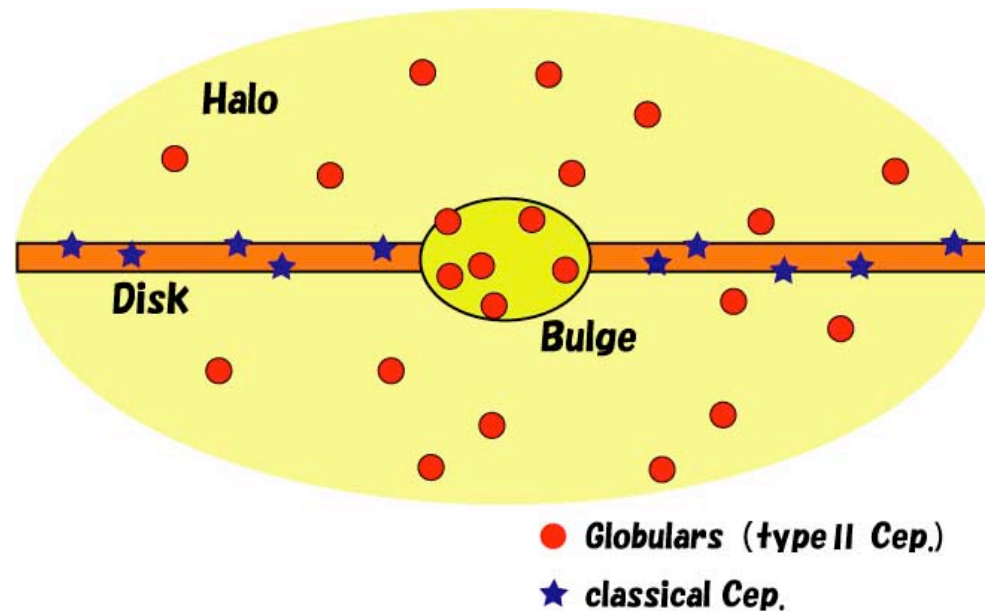
- 周期1-100日程度の脈動変光星
- セファイド不安定帯



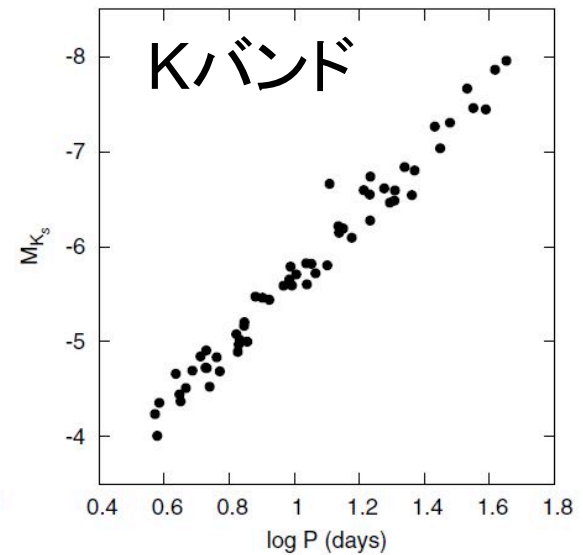
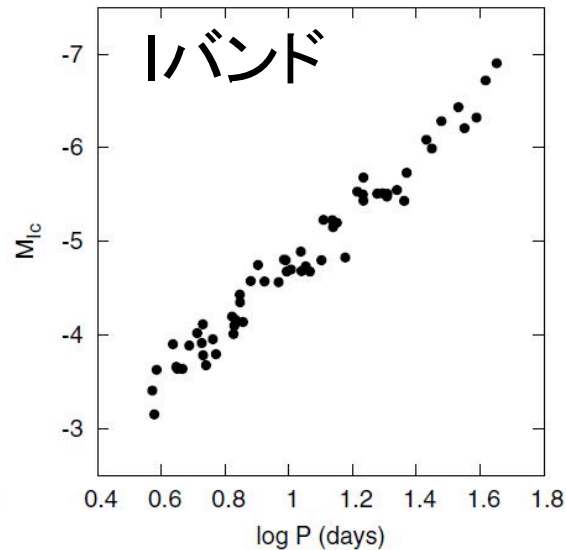
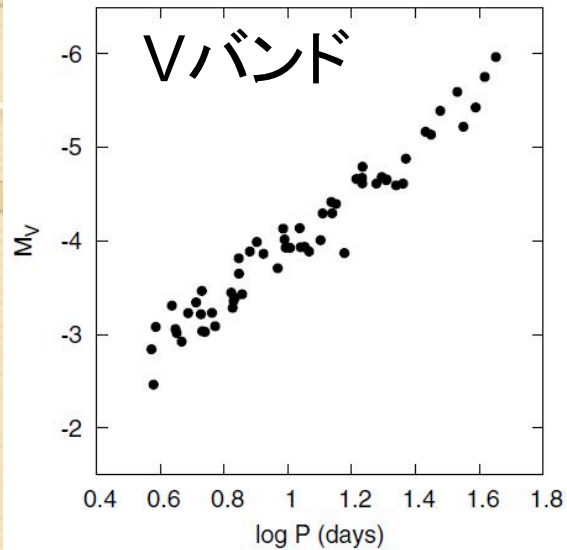
Gauchy & Saio (1995)

種族の異なる2つのセファイド

- 古典的セファイド
 - 若い・中小質量星(2-10 M_{sun})
 - 本研究ではこちらに注目
- II型セファイド
 - 古い・小質量星(約1 M_{sun})



セファイド変光星の周期光度関係



Fouque et al. (2007)

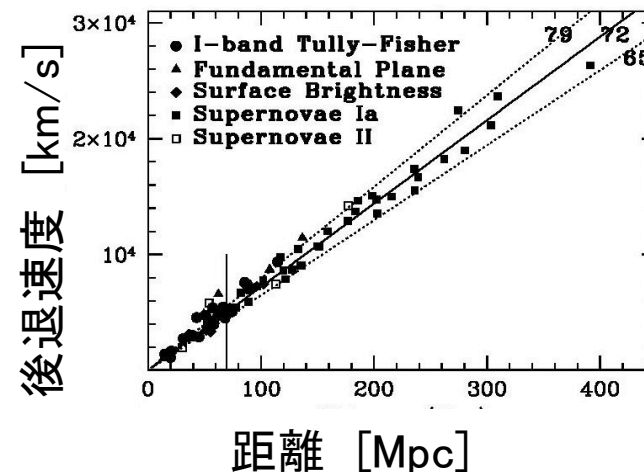
- 1908年、Leavittが発見。
- 1920年代、Hubbleが渦巻星雲の性質を明らかにしたり、宇宙膨張則を発見するのに利用した。
- **距離指標**として盛んに利用されてきた。

宇宙論への応用

- 系外銀河の距離測定
 - 「距離のはしご」の1ステップ
 - 系統誤差が存在

ハッブルの法則

Freedman et al. (2001)



近傍

1 kpc

1 Mpc

1 Gpc

遠方

三角視差法

セファイド周期光度関係

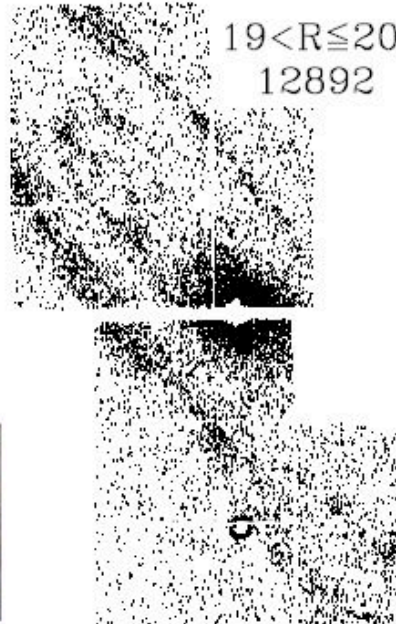
Ia型超新星

銀河の構造への応用

- Cepheidの分布は渦巻き腕・超巨星といった若い天体をトレースする。



color map



supergiants

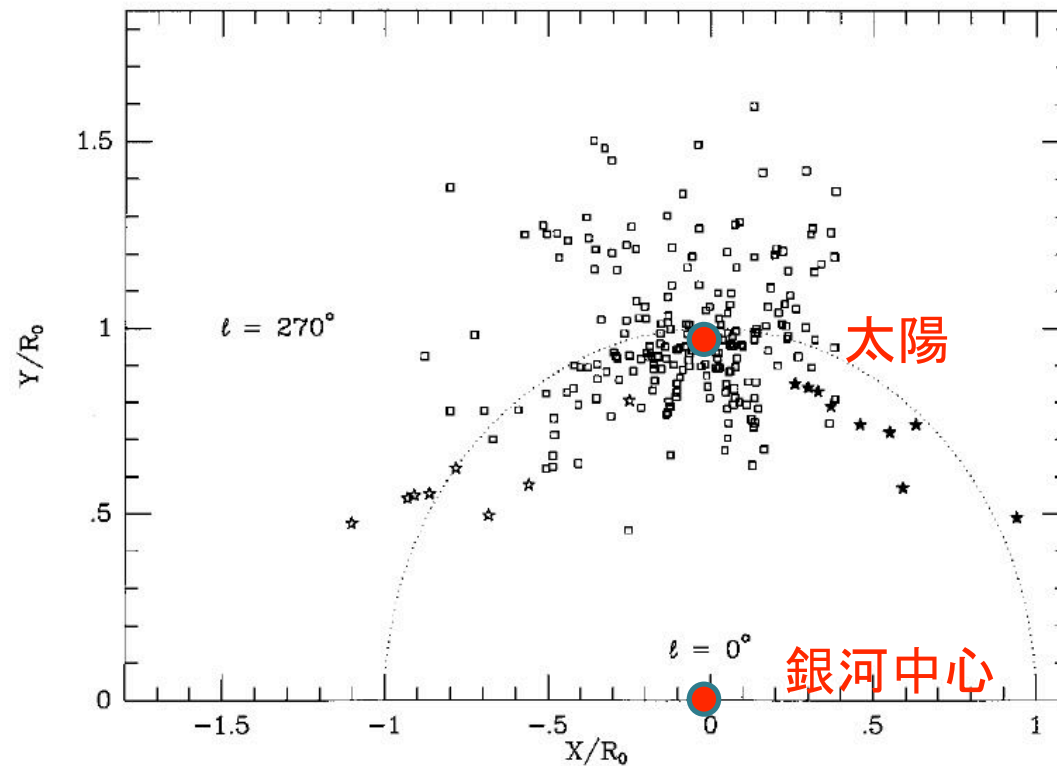


Cepheid

An et al. (2004)

銀河系のセファイド探査の現状

- 銀河中心の側は近傍のセファイドだけ。
 - 可視光探査しか行われていない。
 - 銀河系よりも系外銀河のセファイドがよく観測されている。←銀河系のものは広視野でないが無理。



銀河系の構造・運動学への応用

- セファイドの分布と運動
 - 周期光度関係による位置
 - 視線速度・接線速度

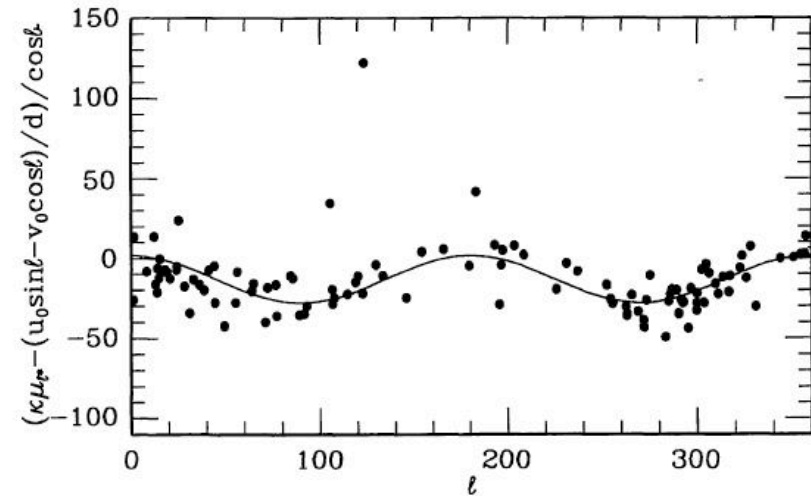
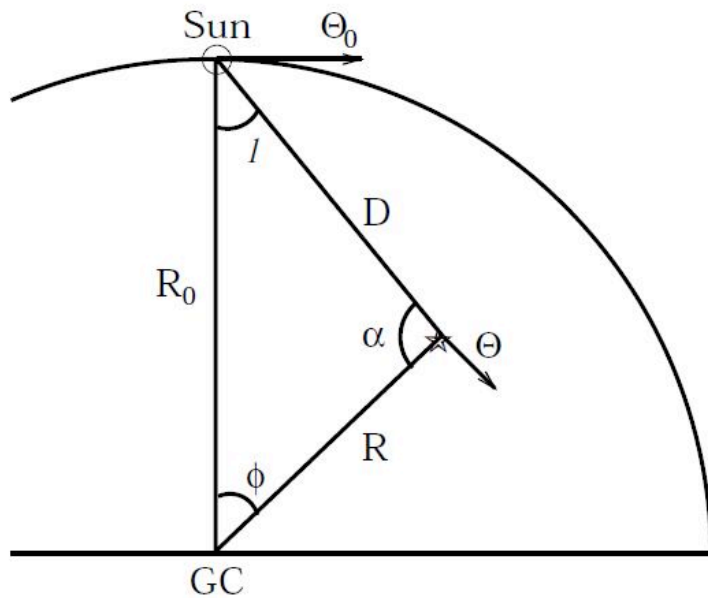


Figure 3. As Fig. 2 but for stars with distances less than 2 kpc. The curve illustrates solution 5 of Table 4.

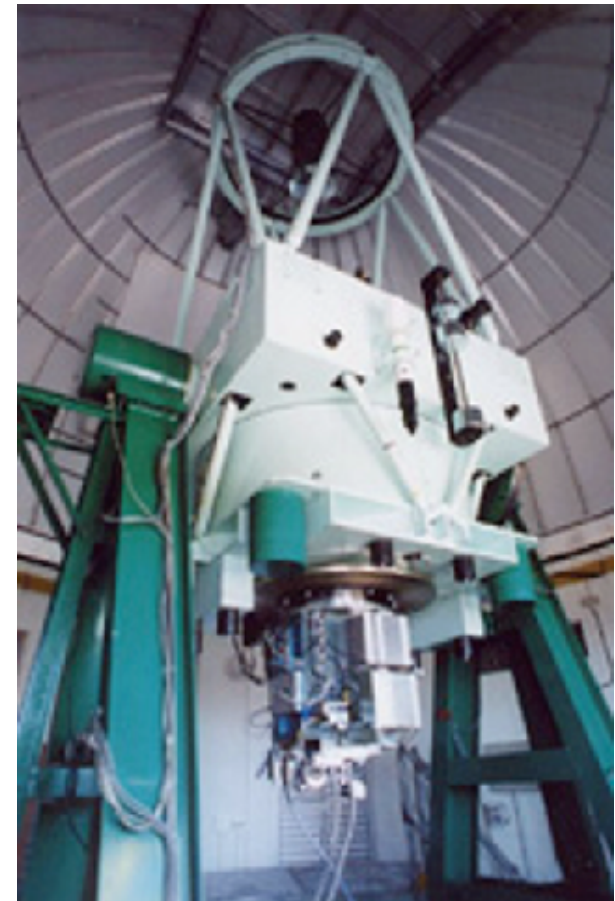
Feast & Whitelock (1997): セファイドの銀経と固有運動との関係。曲線は銀河回転に従っていると仮定して解いた関係式。

銀河面で隠されたセフィイドがどれくらい新しく見つかるか近赤外でテスト。

IRSF望遠鏡による探査

観測装置—IRSF/SIRIUS

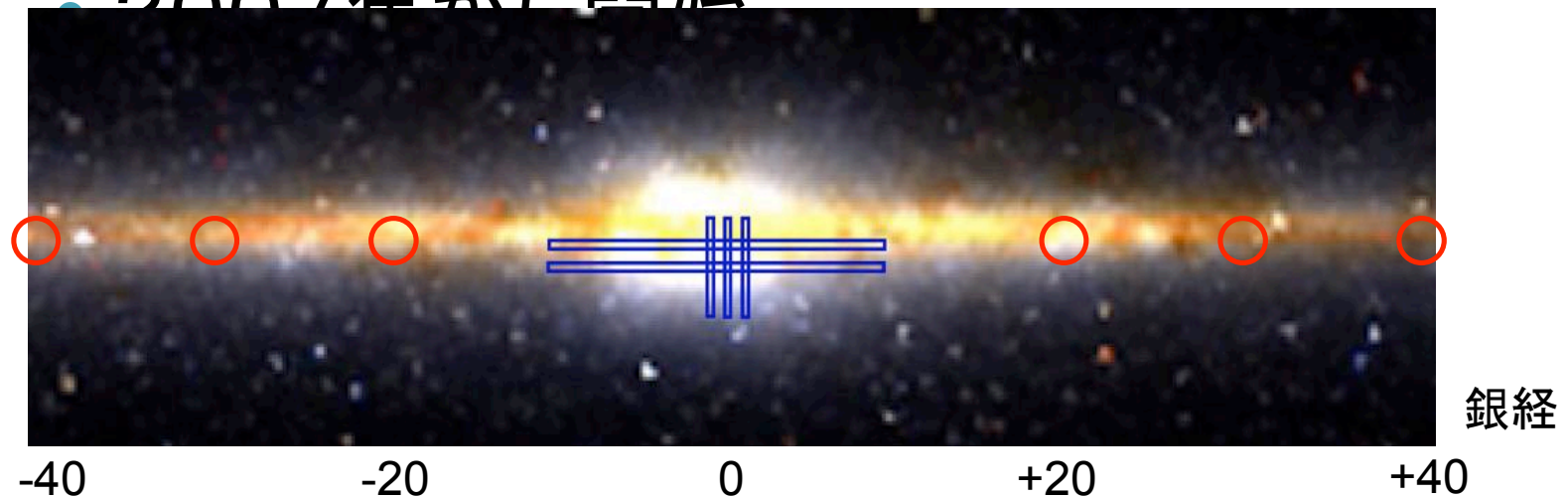
- 名古屋大学(Z研)と国立天文台が建設
- 南アフリカ天文台
 - サザーランド観測所
- IRSF (= Infrared Survey facility)
 - 1. 4m光赤外望遠鏡
 - 経緯台式
- SIRIUS (= Simultaneous 3-color infrared imager for unbiased survey)
 - JHKs 3バンドの同時撮像
 - FOV=7.7'×7.7'



IRSFによる変光星探査

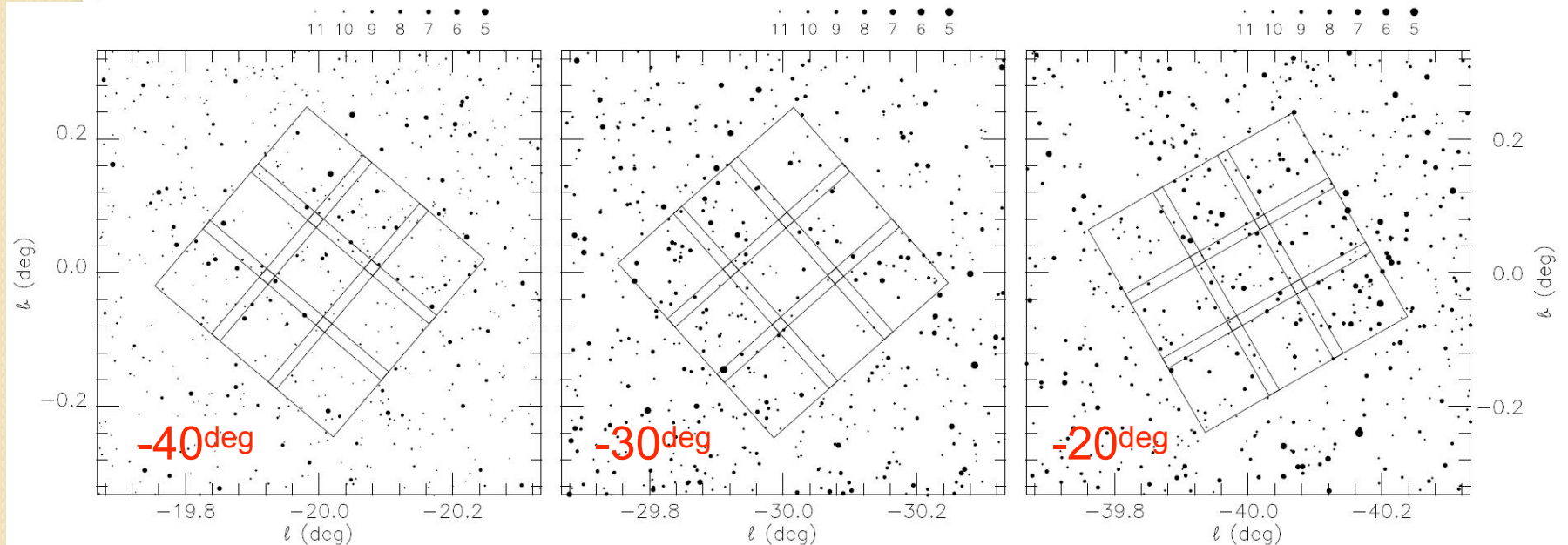
- バルジのミラ・サーベイ
 - 約9平方度(青枠)
- ディスクのセファイド・サーベイ
 - 銀経 -40^{deg} , -30^{deg} , -20^{deg} , $+20^{\text{deg}}$, $+30^{\text{deg}}$, $+40^{\text{deg}}$ の方向の狭い領域(赤丸)でテスト探査

● 2007年から開始



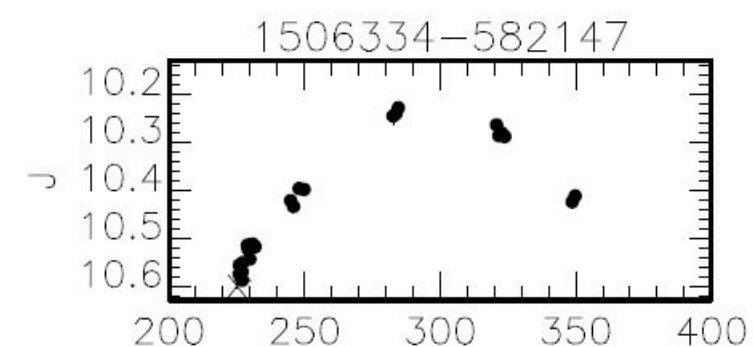
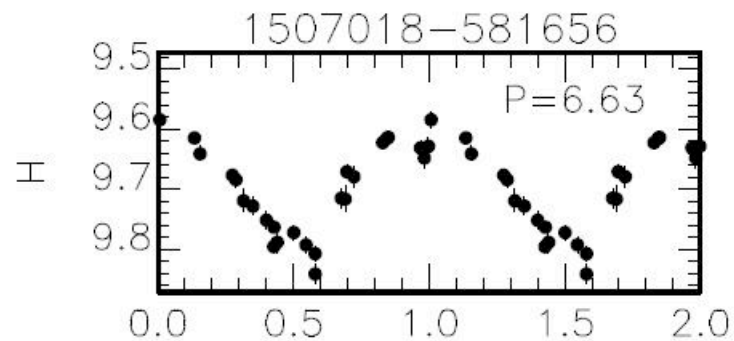
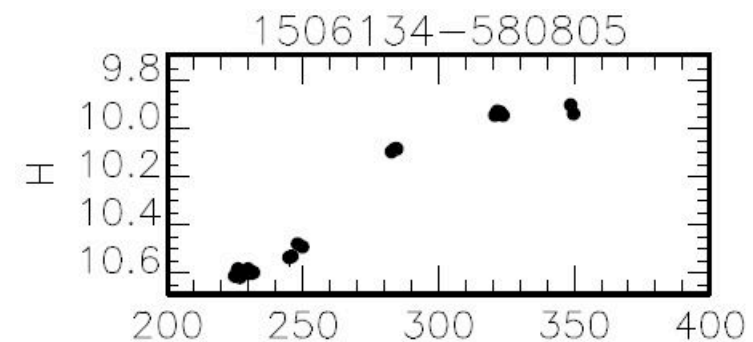
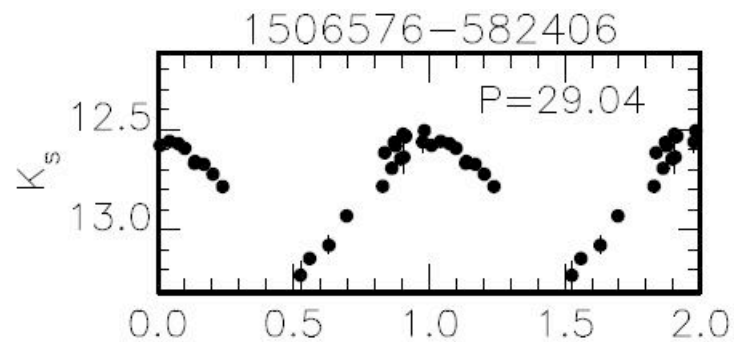
本発表で使用したデータ

- 銀経 -40^{deg} 、 -30^{deg} 、 -20^{deg} の方向でそれぞれ20分角四方(9視野)
- 2007年5月～9月に行った25回程度の反復観測(1日当たり1～6回)
- 1領域1回の観測に必要な時間は、2分程度(1.6秒積分5回)



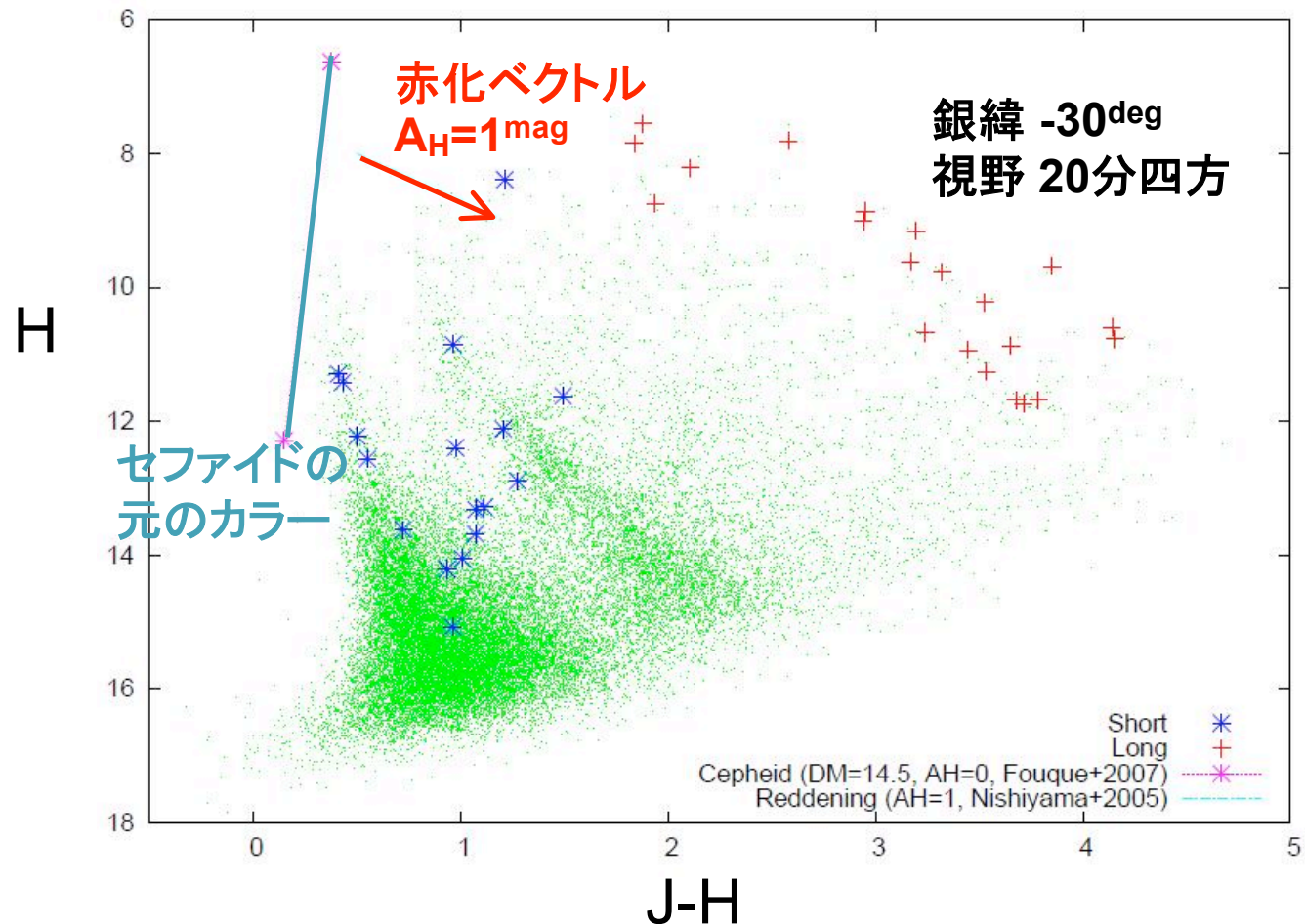
結果

- -20^{deg} 、 -30^{deg} 、 -40^{deg} の方向にそれぞれ11個、10個、13個のセファイドを検出。
- 長周期変光星も数十個ずつ検出。



色等級図

- (*) セファイド+他の短周期変光星(1日以下)
 - $A_H=1\sim 2^{\text{mag}}$ の赤化を受けている。
- (+) 長周期変光星



距離と星間吸収の推定

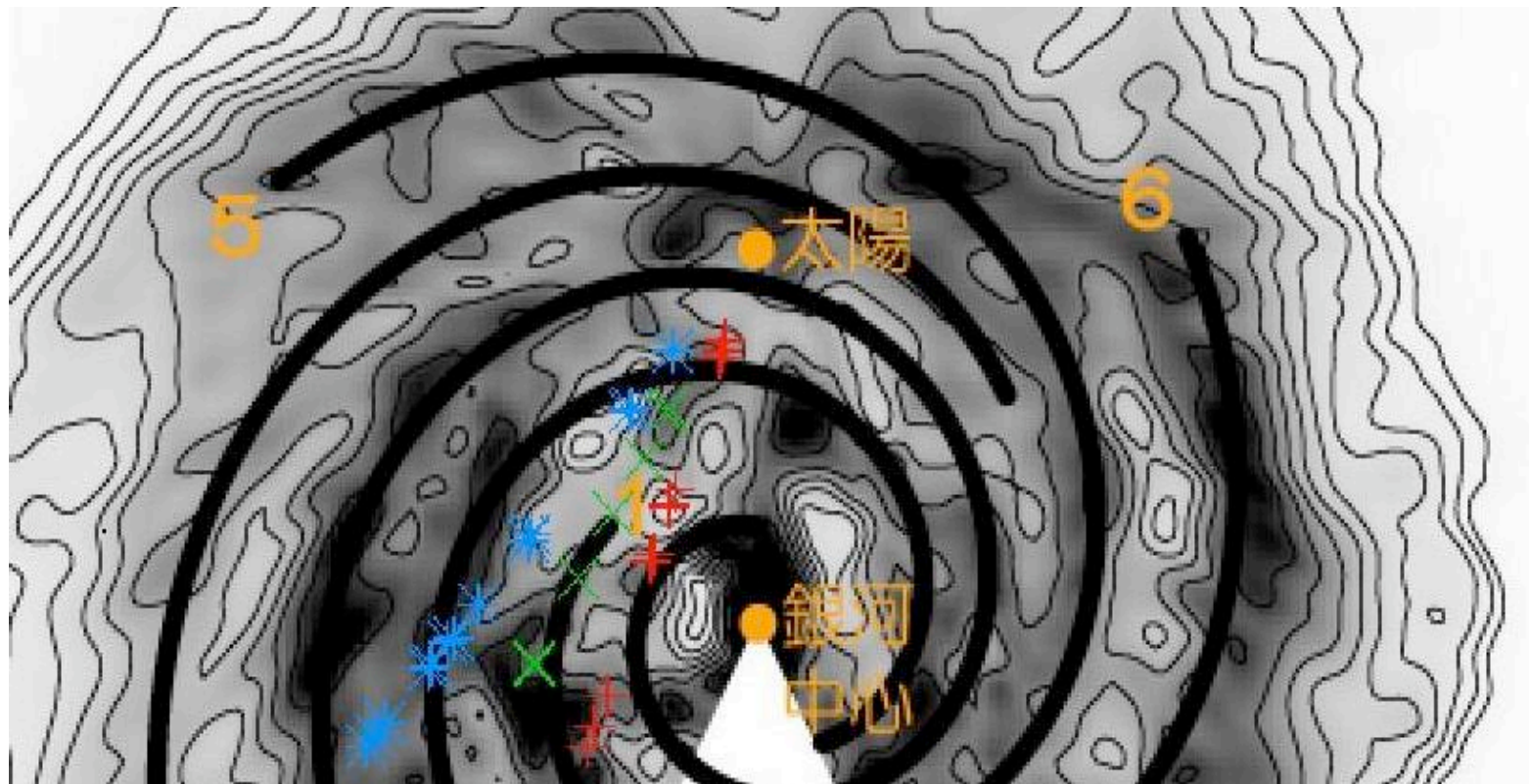
- 周期と2バンド以上の平均等級(J, H, K_s)があれば、距離 μ_0 と赤化量 A_H が求められる。
 - JHK_sバンドでの周期光度関係 $\underline{M_J}, \underline{M_H}, \underline{M_{K_s}}$
 - 赤化則 $\underline{A_J/A_H}, \underline{A_{K_s}/A_H}$

$$J = \underline{M_J} + \mu_0 + \left(\frac{A_J}{A_H} \right) \cdot A_H$$

$$H = \underline{M_H} + \mu_0 + 1 \cdot A_H$$

$$K_s = \underline{M_{K_s}} + \mu_0 + \left(\frac{A_{K_s}}{A_H} \right) \cdot A_H$$

発見したセファイドの空間分布



- 渦巻き腕と一致が見られる。
 - M31の観測などから期待される結果。
- ガス・星形成領域ではなく、恒星による渦巻き腕のトレース。

初期成果のまとめ

- 今まで見つかっていなかった銀河面に隠されたセフィイドが見つけれられる。
- 渦巻き腕との関係など銀河系の構造が調べられそう。

シュミットの広視野を活かした長期的な観測提案

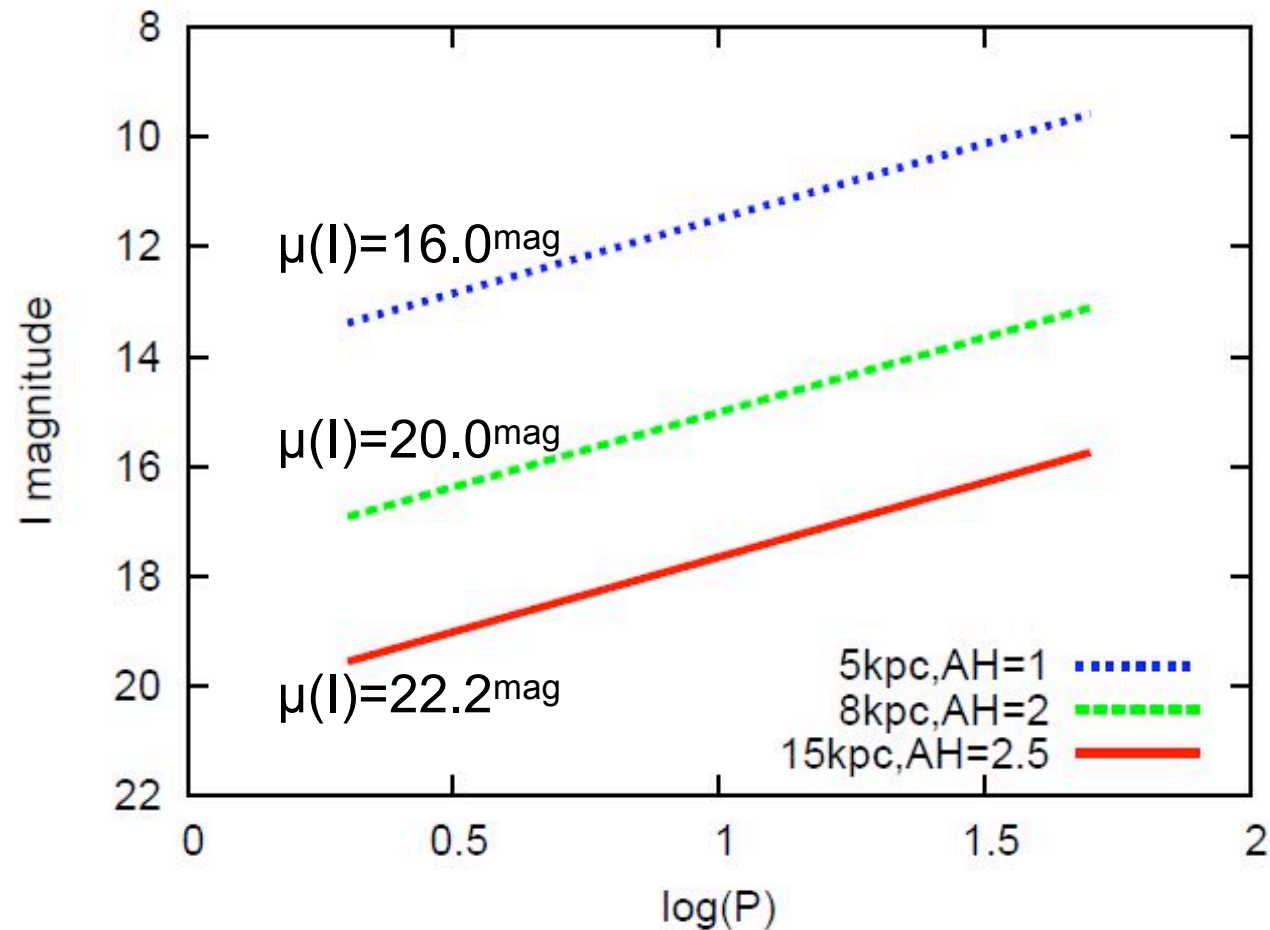
○ **木曾シュミットによる観測
の提案**

木曾シュミットによる観測

- 2kCCD→KWFC, 主にIバンドで反復
 - セファイドの振幅がJHKsよりも大きいので有利。
- 追加的にRバンド
 - 星間吸収を調べるために2バンド必要
 - セファイドのカラー変化はだいたいわかっているので、数回観測すれば十分。
- 広視野カメラによるサーベイ効率

必要な積分時間

- 広いダイナミック・レンジが必要
 - 距離と星間減光がいろいろな天体を探査
 - 15分積分と短い積分(例えば15秒)を組み合わせる



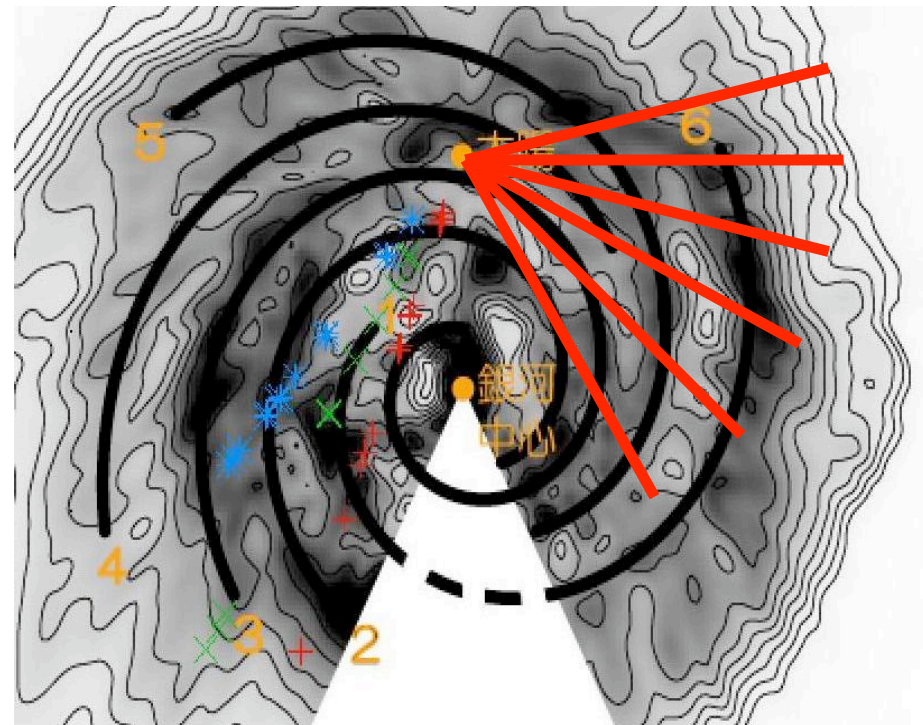
必要な観測時間

- 15分積分
 - 3分積分 5回 $(180^{\text{sec}}+120^{\text{sec}})*5=25^{\text{min}}$
- 短時間積分
 - 15秒積分 4回 $(15^{\text{sec}}+120^{\text{sec}})*4=9^{\text{min}}$
- 各領域を1回観測するのに**40min**

- 1平方度を観測するのに必要な時間は
 - 2kCCD (1.4視野分) → **約1時間**
(8kモザイクでさらに高効率！)
 - IRSF/SIRIUS (81視野分) → **約2時間半**
- 各視野30回の観測を行い、晴天率1/3とすると、**1視野あたり60時間(1週間)**の観測時間が必要。

観測領域

- 15度おきに**6つの視線方向** ⇔ **合計6週間**
 - 1視野30回の観測 ⇔ 1週間
 - IRSF/SIRIUSの観測から、2kCCDで1視野を観測すれば数十個のセファイドが期待できる。
- 松井氏提案のミラ・炭素星探査とデータを共有できる部分がある。

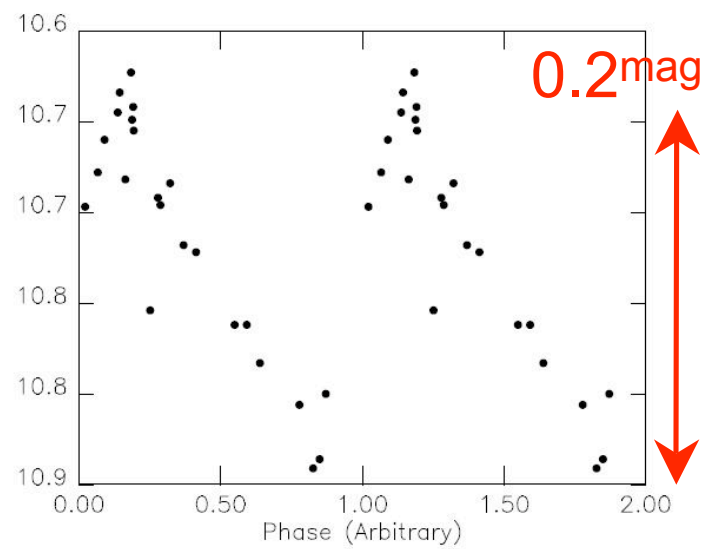
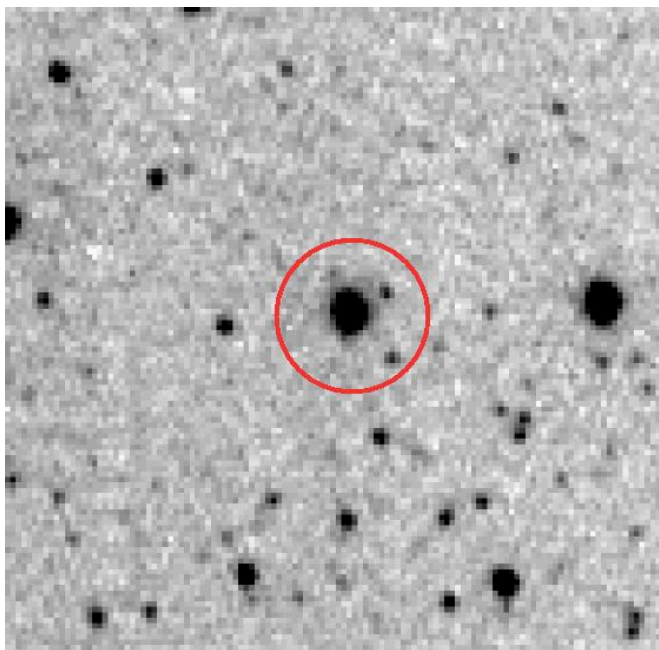


シミュレーション

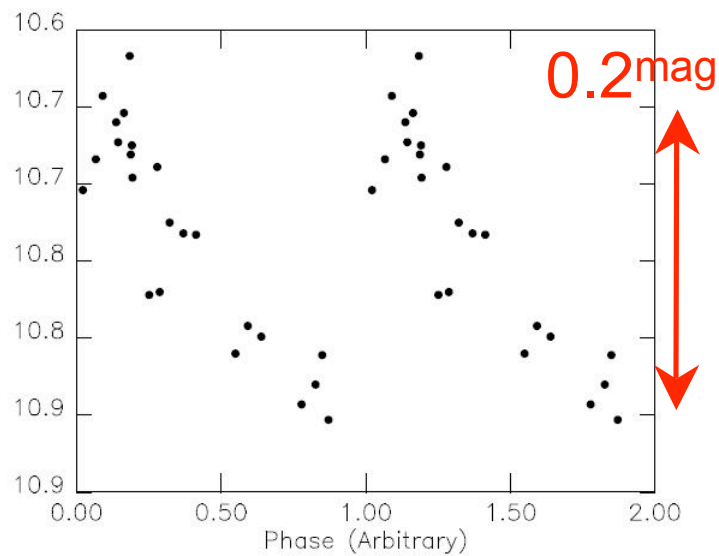
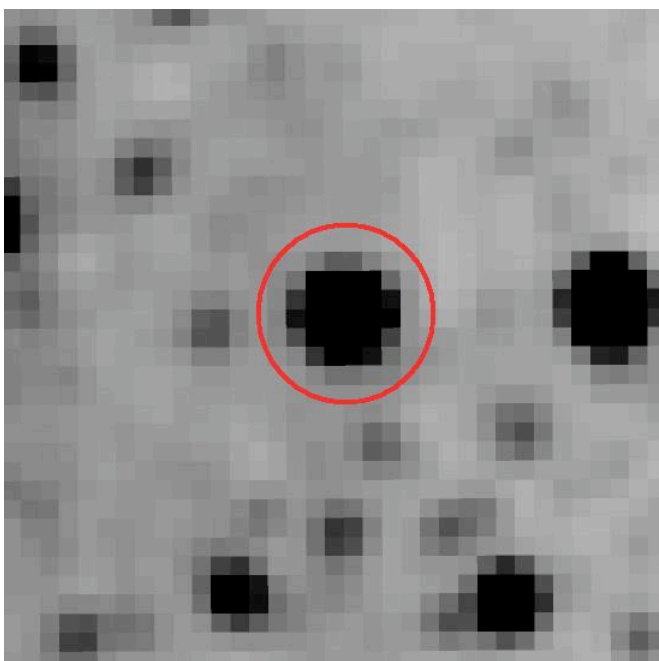
- IRSF/SIRIUSのJバンド画像を、木曾のシーイングサイズに合わせてみて解析してみる。
- IRSF/SIRIUS—1.3" (3pix)
- 木曾シュミット2kCCD—3.9" (2.6pix)
- $L=-20^{\text{deg}}$ のある視野で見つけた3つのセファイドについて実験

- $\sigma=3\text{pix}$ のガウシアンでconvolution
- ピクセルサイズの比($0.45/1.5=0.3$)を補正。
- Jバンドとの波長の差は無視する。
 - 振幅がJバンドの方が大きい。

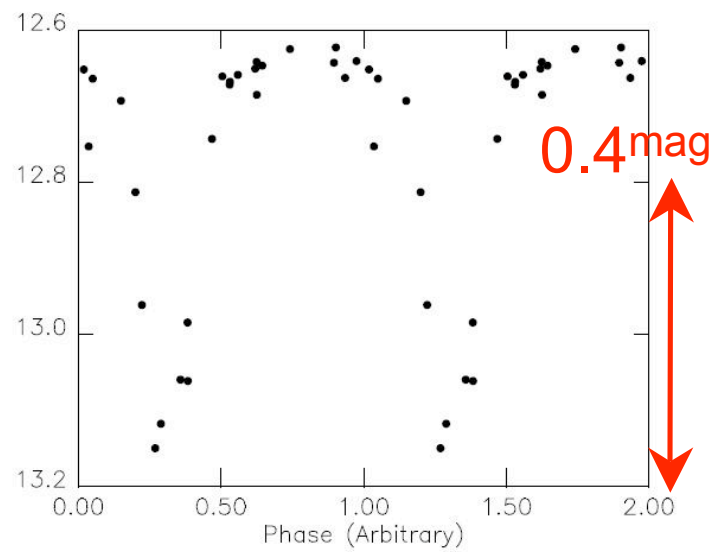
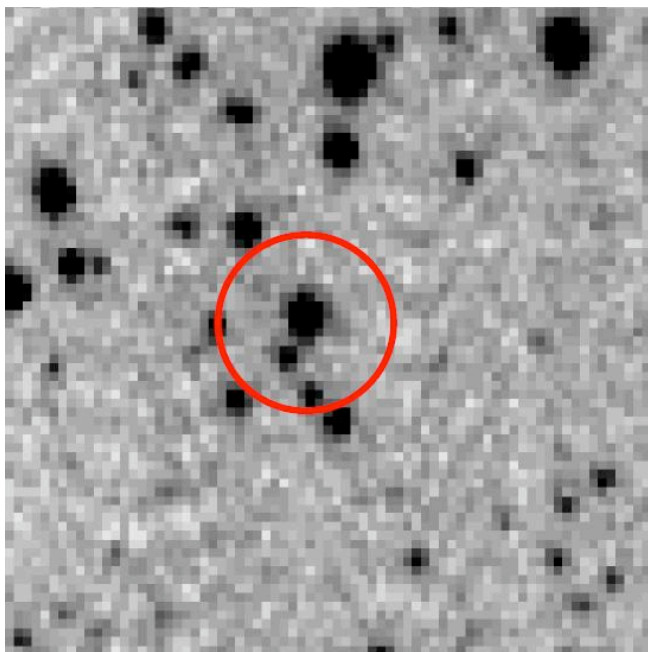
SIRIUS (J)



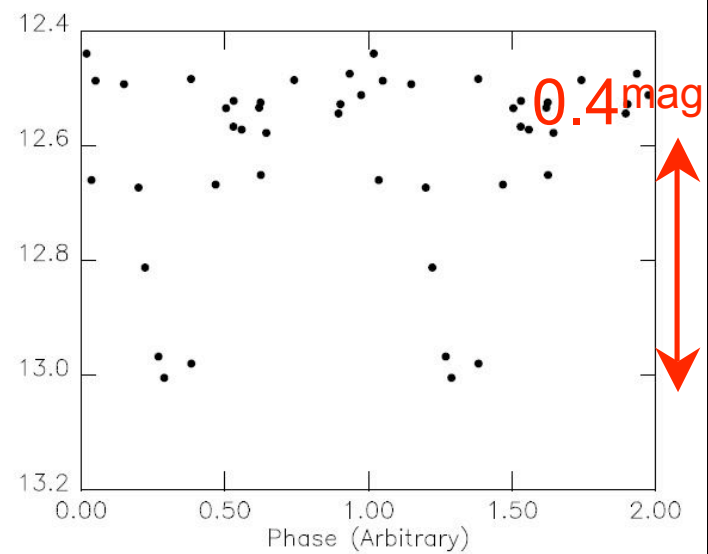
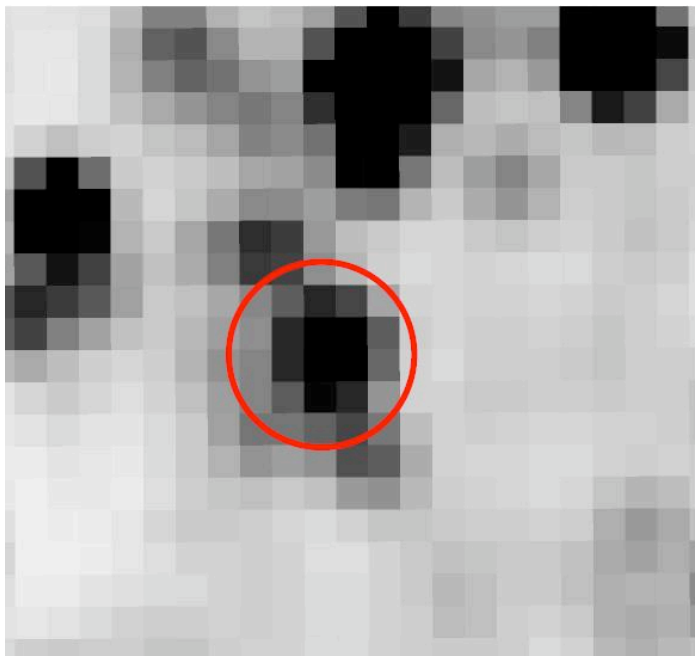
2kCCD (I)



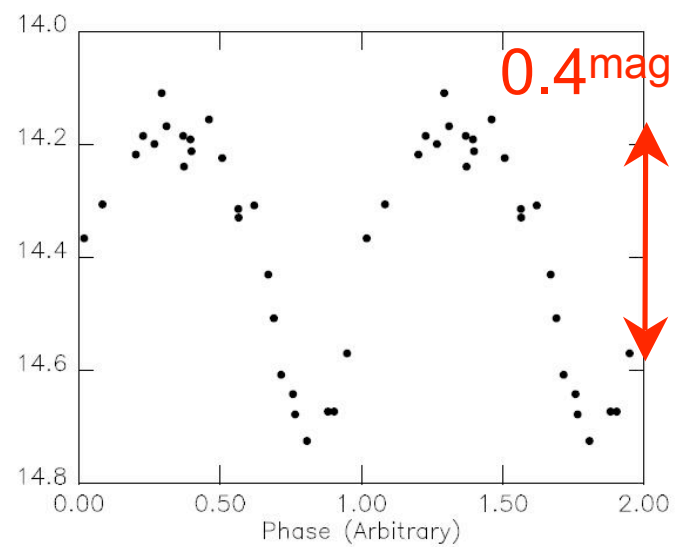
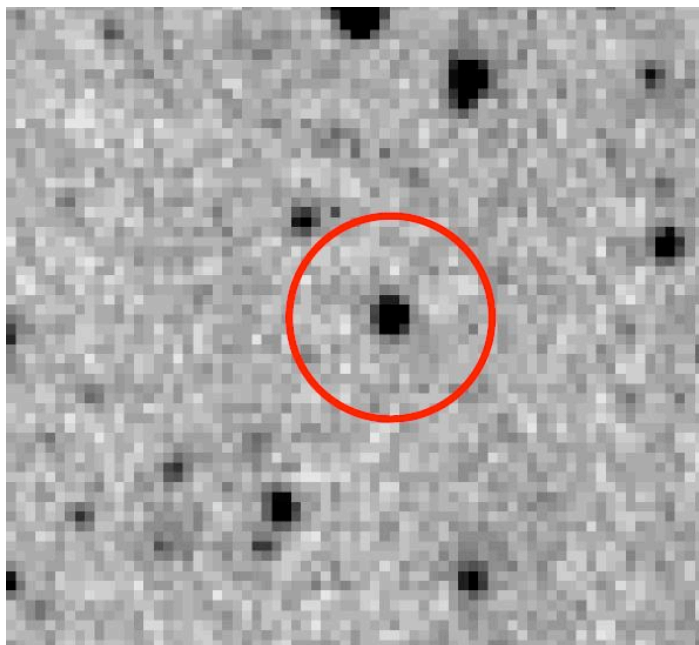
SIRIUS (J)



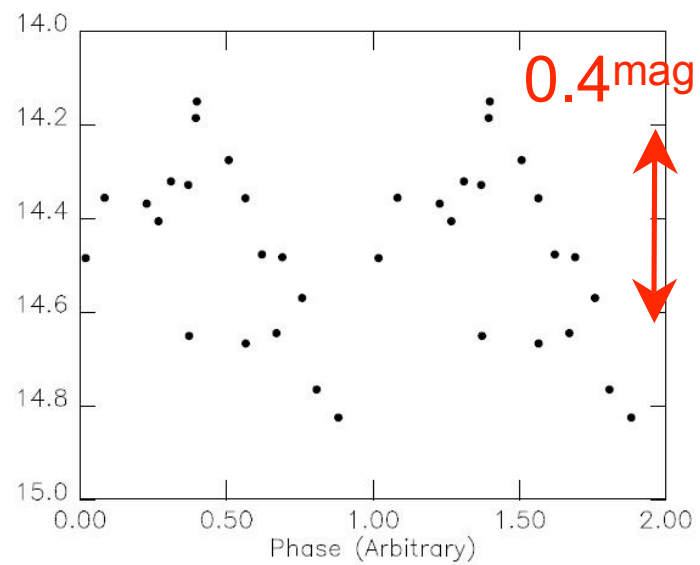
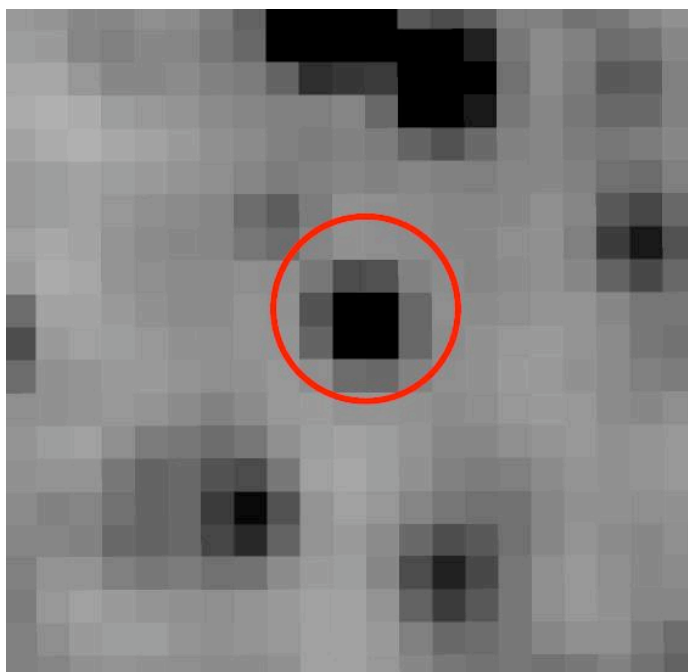
2kCCD (I)



SIRIUS (J)



2kCCD (I)



シミュレーションの結果

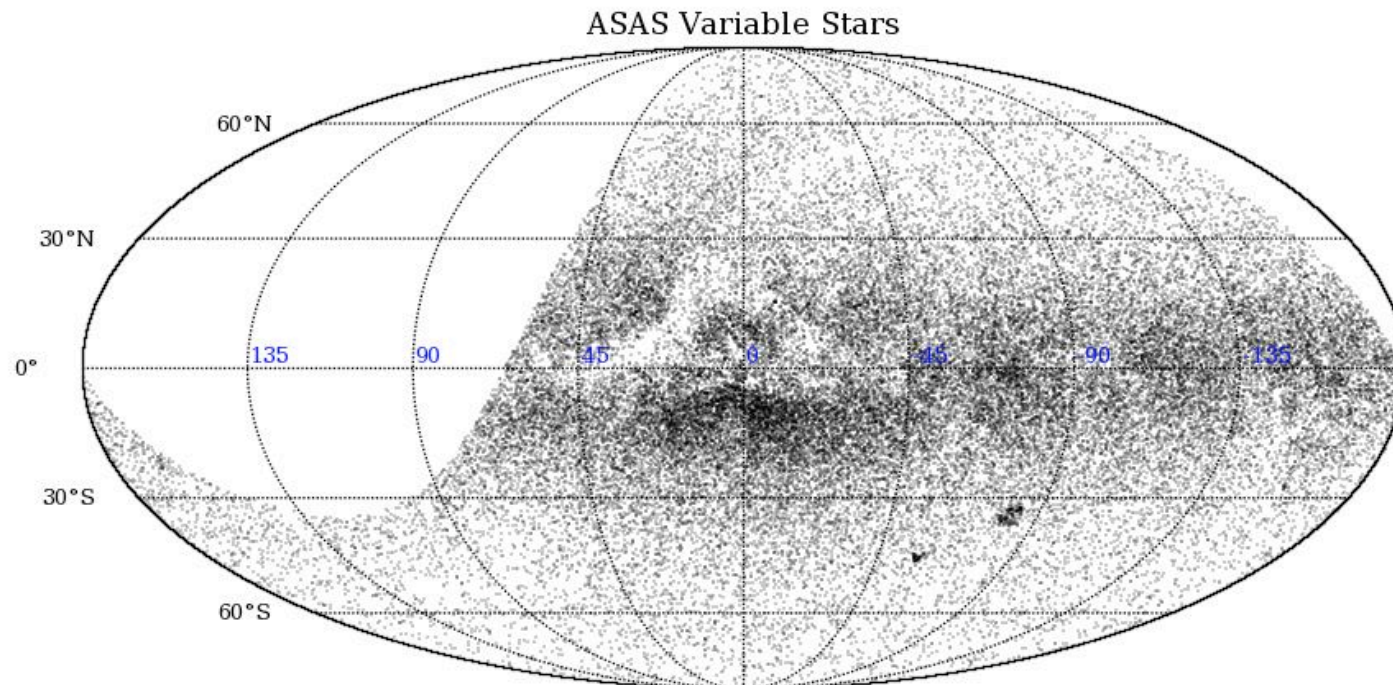
- 2kCCDの分解能では精度が落ちる。
- ライトカーブの周期性は確認できる。
- シミュレーションはJバンドでの変光に基づいているが、Iバンドでは振幅が1.5倍ほど大きい。
 - $\text{Amp}(J) \sim 0.4 \text{ Amp}(V)$: Welch et al. (1984)
 - $\text{Amp}(I) \sim 0.6 \text{ Amp}(V)$: Stetson et al. (1996)
- セファイドの探査が可能と期待できる。

他のプロジェクト

- 北半球の銀河面の広い領域で変光星を探查する計画は他に無さそう。
 - ASAS : 南の全天だが低分解能(観測進行中)
 - OGLE: バルジ領域(観測進行中)
 - VISTA: バルジ領域と南の銀河面(来年開始)

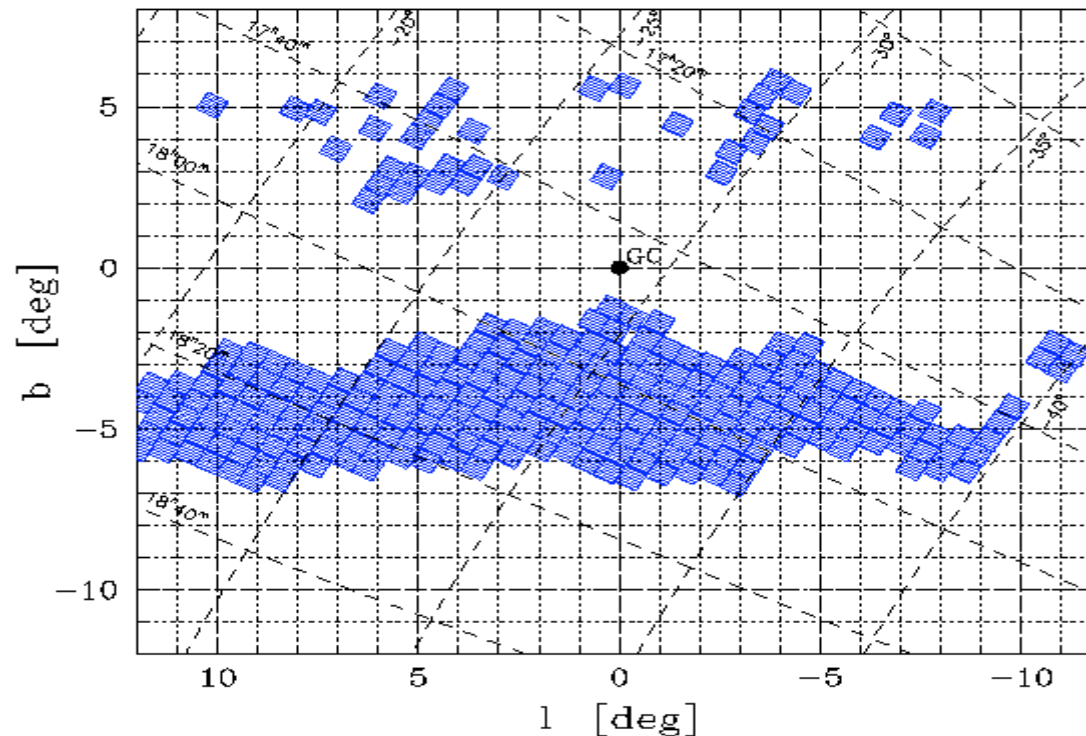
ASAS

- All-Sky Automated Survey
 - Chile, LCO; Hawai, Maui
- 赤緯+28^{deg}以南
- $V < 14^{\text{mag}}$, $I < 13.5^{\text{mag}}$
- 15 arcsec/pixel (2k*2k CCD,



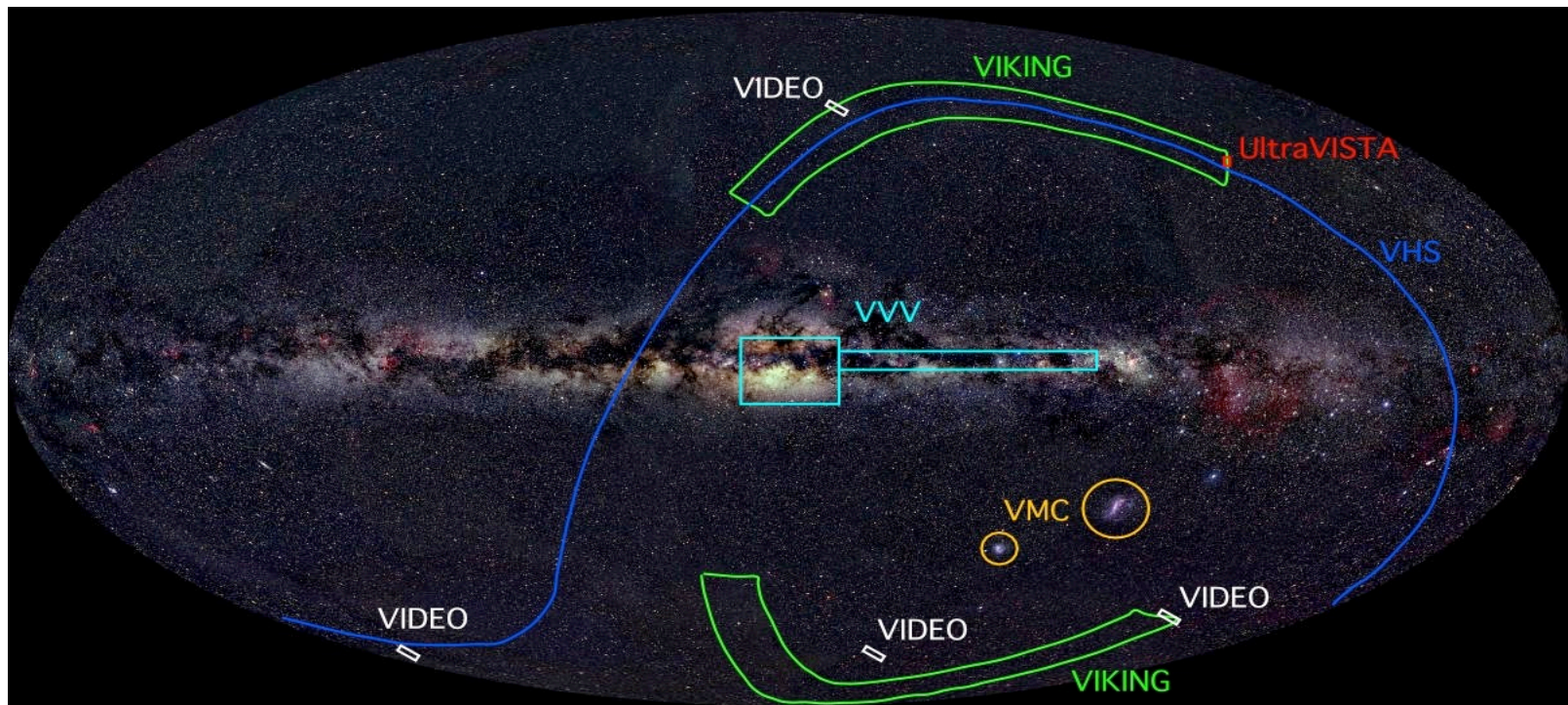
OGLE

- Optical Gravitational Lensing Experiment
- La Campanas天文台、主鏡口径 1.3 m
- OGLE-III 2001年から観測継続
- 2k*4k SITe CCD 8個
- バルジ : $|\ell| < 11\text{deg}$, $b \sim \pm 5\text{度}$



VISTA

- ESO/Paranal Observatoryに建設中
- 主鏡口径 4.1m が山頂に到着(今年4月)
- 2k*2k HgCdTe検出器 16個、Z~Ks
- VISTA Variables in the Via Lactea
- バルジから南側の銀河面520平方度を反復観測



まとめ

- 木曾シュミットの広視野を活かした、他では行われていない観測。
- 古典的セファイドによる距離決定という標準的な手法でありながら、未開拓の分野。
- ミラなど他種類の変光天体の発見も期待。
 - 松井氏のプロジェクトとのデータ共有。
 - (特に面白そうなアラートがなければ)マイクロレンズ天体などが調べられる程の観測は想定していない。

解析ソフトの紹介

- <http://www.kusastro.kyoto-u.ac.jp/~nmatsuna/Japanese/software/soft.htm>

ソフトウェアの公開

解析のために開発したソフトのうち、一般的な目的に使えるものを公開しています。

1. [OPM\(天体カタログ同定ソフト\)](#)
位置座標と等級が求められている2つの天体カタログどうしを同定するソフト (C言語)
2. [autodao \(IRAF/daophotによる自動測光パッケージ\)](#)
IRAF/daophotによる測光を補助するためのパッケージ (IRAFのclスクリプト、C言語)
3. [seqxym \(変光データ合成ソフト\)](#)
時系列になっている複数の測光結果から各天体の変光情報をまとめるソフト (C言語)
4. [cmdxym \(色等級図・二色図作成ソフト\)](#)
2つ(または3つ)のフィルターによる画像の測光結果から色等級図・二色図を作るソフト (C言語)

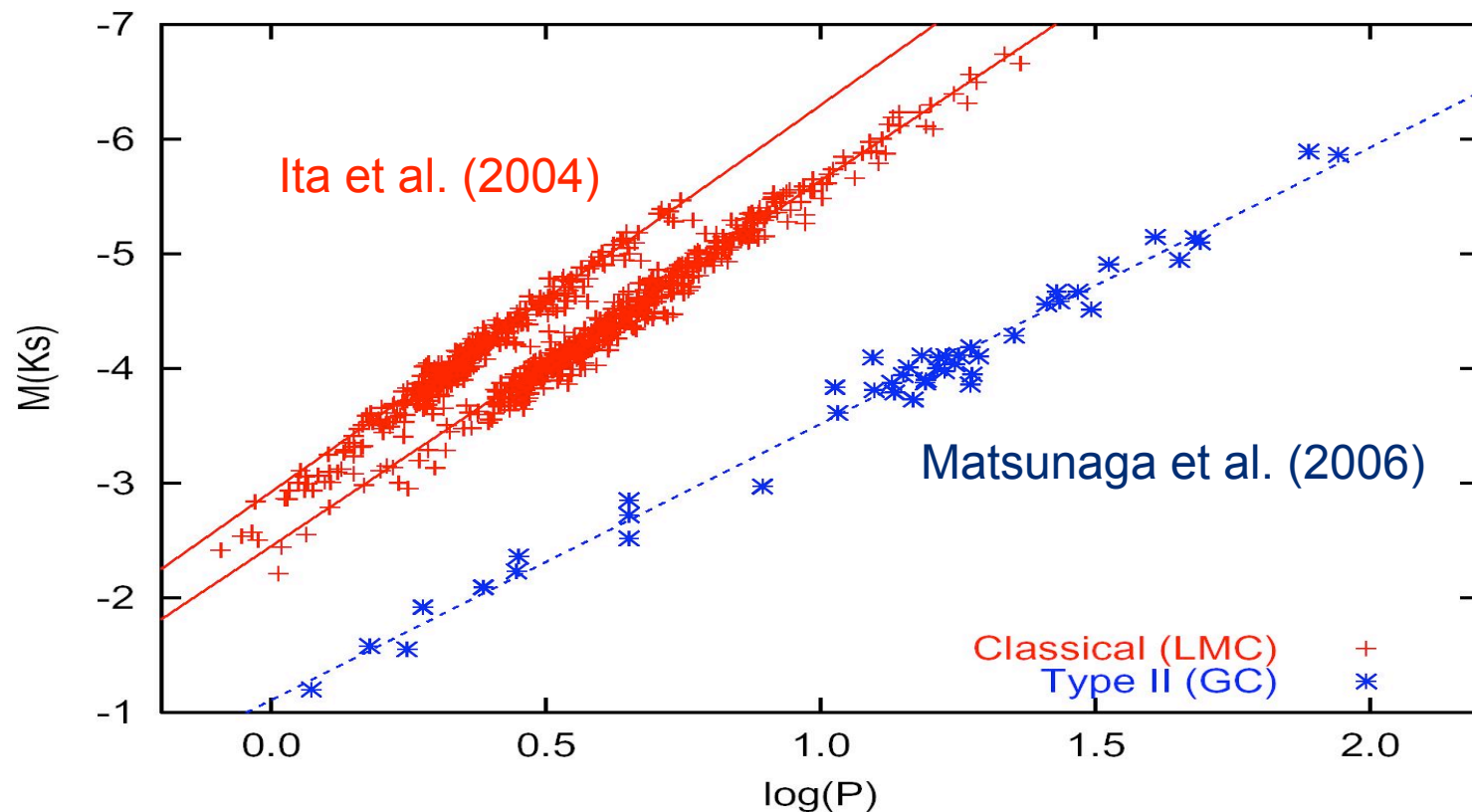
たとえば、以下のような作業を行ないたいという場合におすすめです。

- **3つのフィルターでとった画像があるのでRGBカラー合成をしたい。**
→ [autodao](#)で各画像の測光を行ない、[OPM](#)を使って適当なカタログと同定して座標系を各FITS画像に入力しましょう。
- **ある領域を2つ(または3つ)のフィルターで観測したので色等級図・二色図を作りたい。**
→ [autodao](#)で各画像の測光を行ない、[cmdxym](#)を使って各フィルターに対する測光結果をまとめましょう。
- **ある領域を何回も観測したので、変光星を探したい。**
→ [autodao](#)で各画像の測光を行ない、[seqxym](#)を使って各天体の時系列データをまとめ直して調べましょう。

質問・ご要望はお気軽に松永まで。

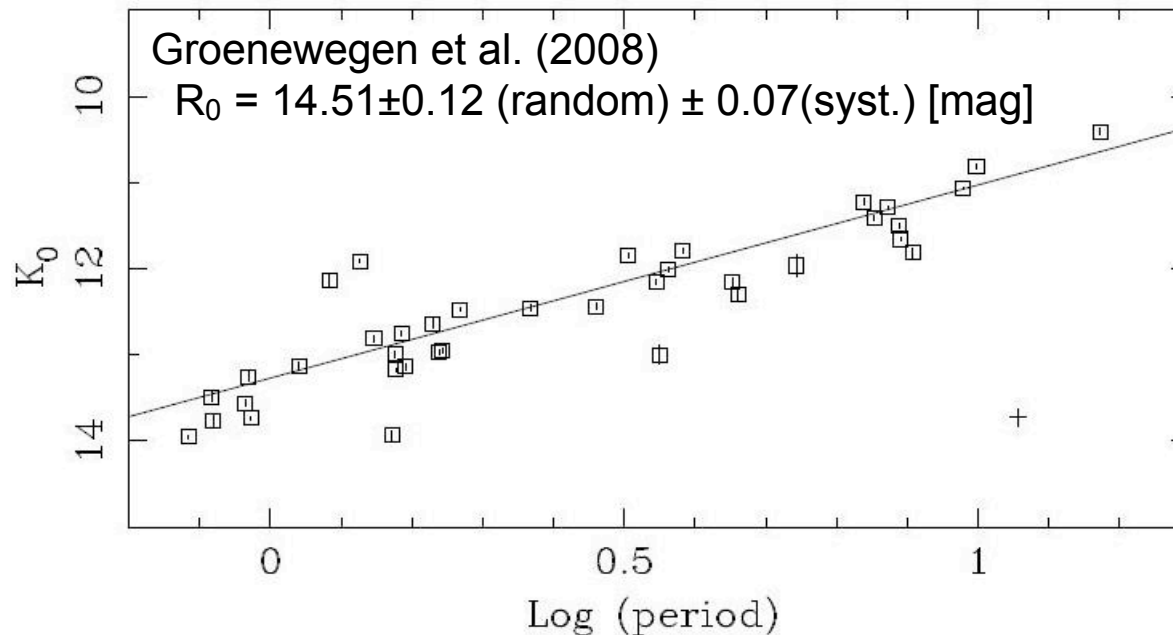
2種類のセファイドの周期光度関係

- ゼロ点・傾きとも異なる。
- II型セファイドでは励起振動星が確認されていない。



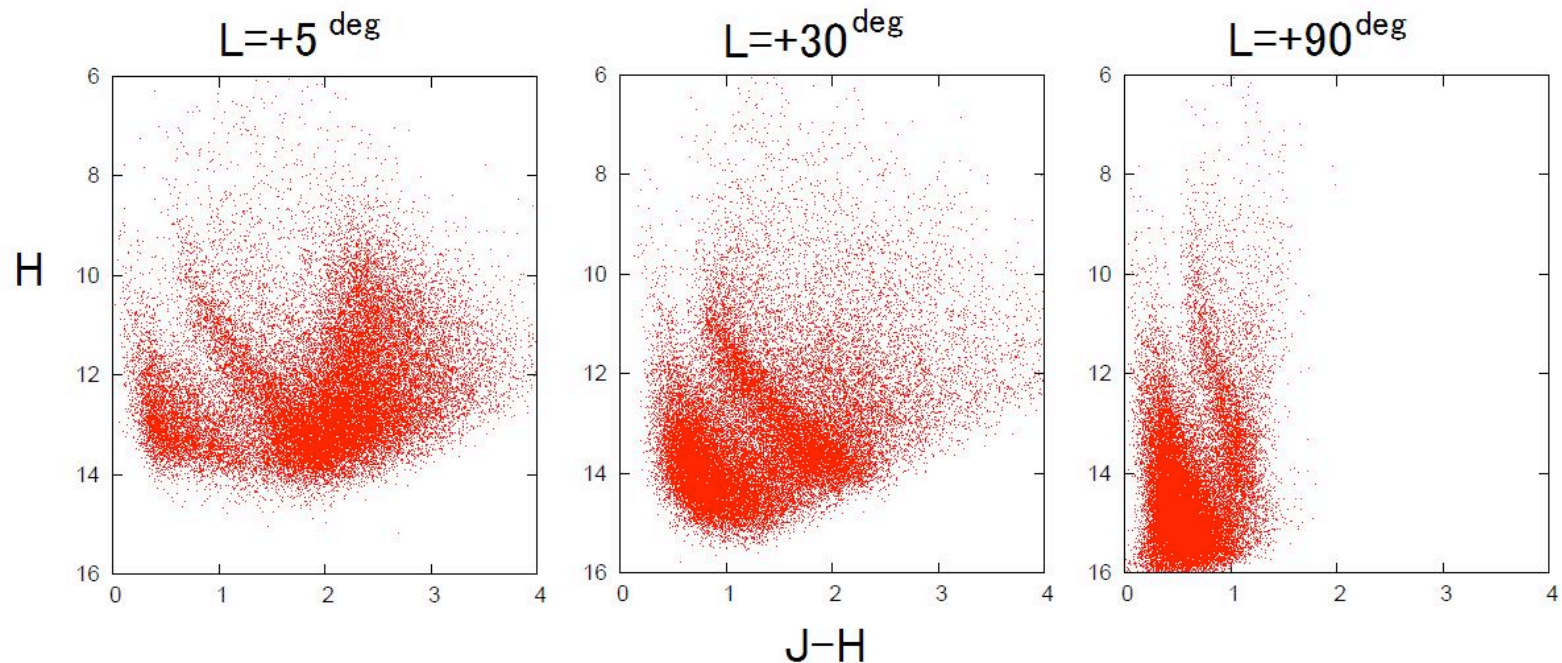
距離指標としてのII型セファイド

- Matsunaga et al. (2006, MN, 370, 1979)
 - 近赤外のはっきりとした周期光度関係を発見。
- Groenewegen et al. (2008, A&A, 481, 441)
 - II型セファイドとRR Lyrから銀河中心の距離を測定。
- Feast et al. (2008, MN, 386, 2115)
 - 年周視差のあるII型セファイドで距離指標の較正。



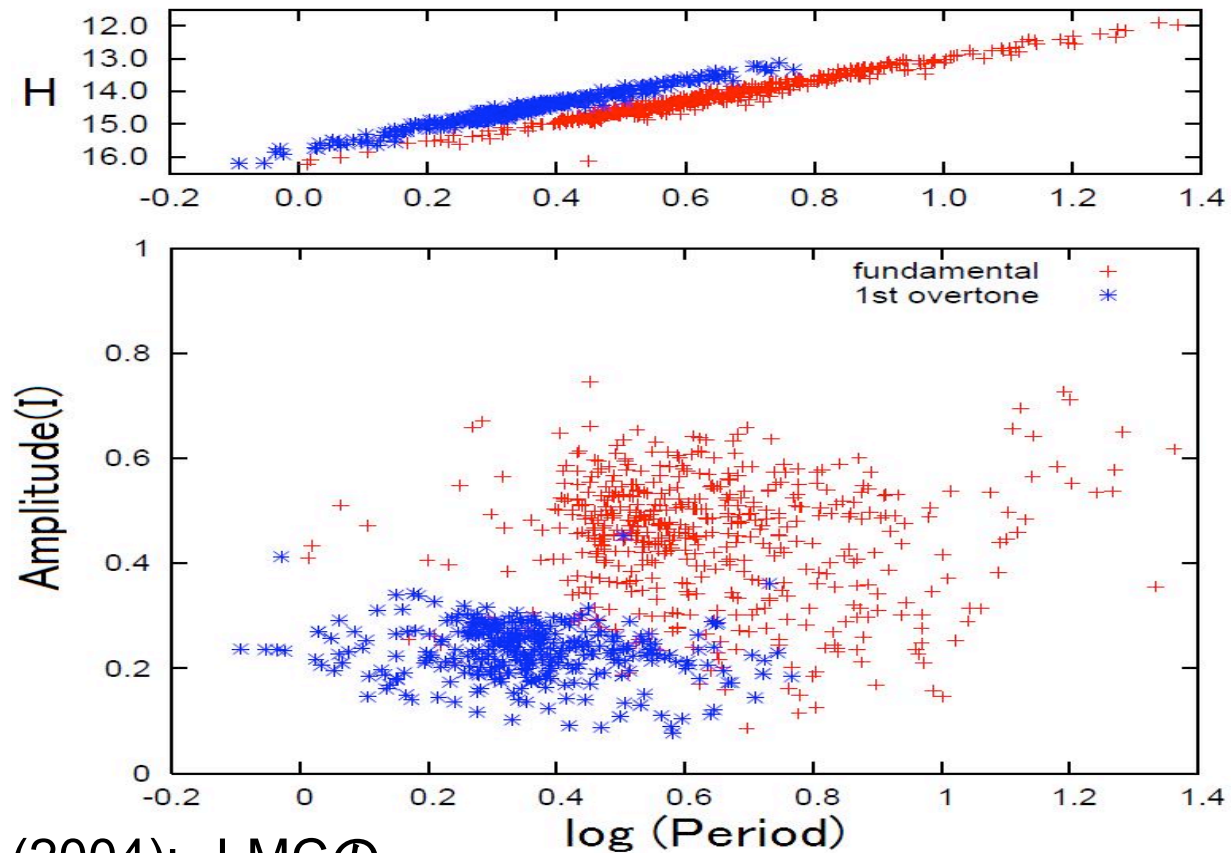
Ⅱ型セファイドの混入について

- ディスク領域には第Ⅱ種族が少ない。
- OGLEによるバルジの探査では11平方度に54個のⅡ型セファイドを発見。 $|L| > 30\text{deg}$ のディスク領域では無視できる密度になると予想される。



脈動モードの区別

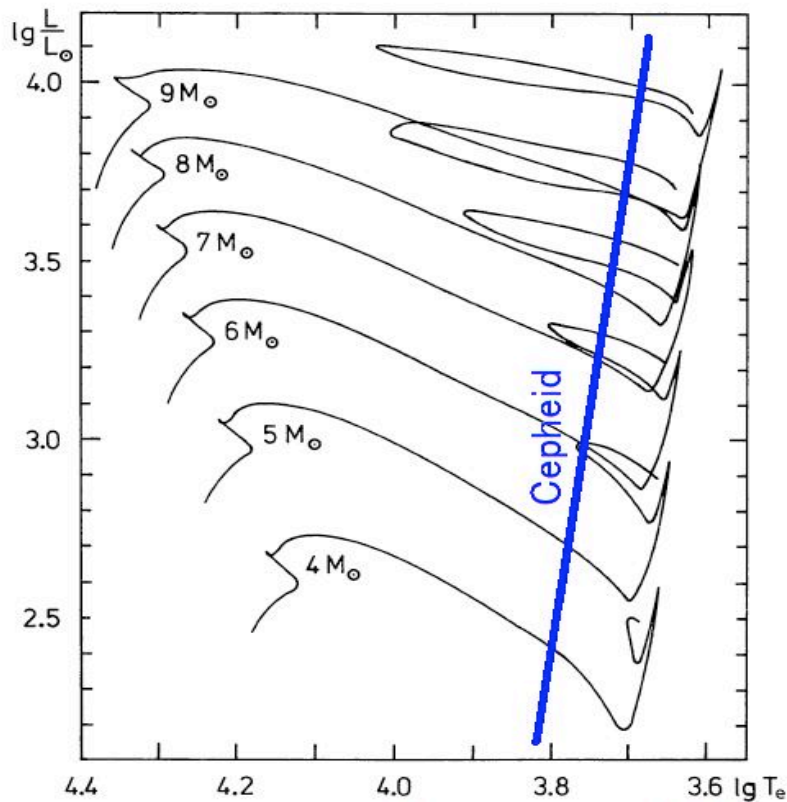
- 励起振動モードのセファイドは系統的に振幅が小さい。



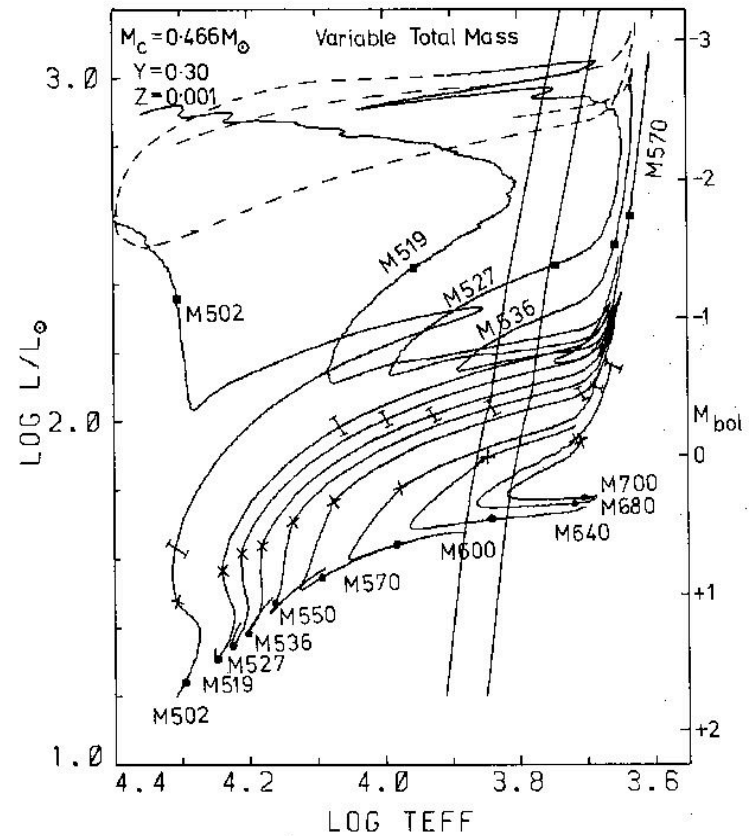
Ita et al. (2004): LMCの
セファイド、OGLE-IIデータ

進化トラックとセファイド

- 古典的セファイドーBlue Loop
- II型セファイドーポスト水平分枝



Matraka et al. 1982



Gingold (1976)

ハッブル定数

(Tegmark et al. 2006)

