

ミラ型変光星を用いた 楕円銀河の高精度距離測定

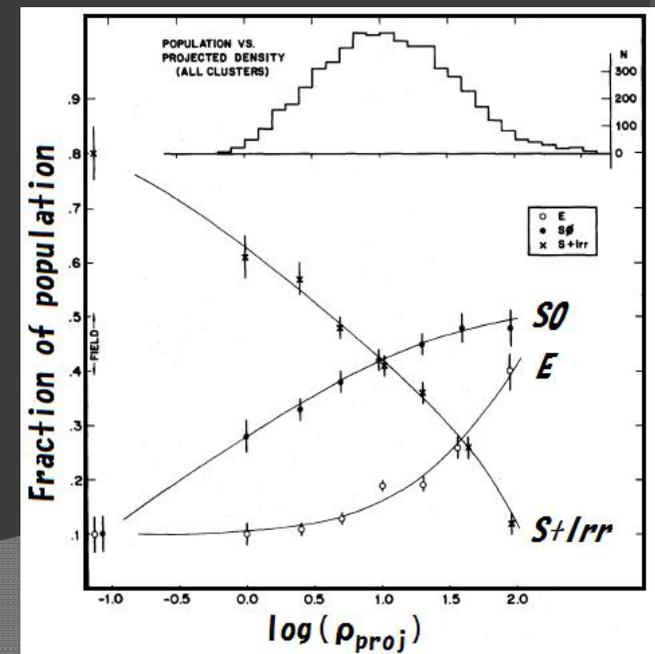
松永典之
(東大天文センター)

はじめに

- ◎ IRSF/SIRIUSの経験から：
 - 安定して常時使うことのできる赤外線装置は大変有効である。
 - 豊富な観測時間を活かして、世界でも稀少な近世外線での変光星観測を行いたい。

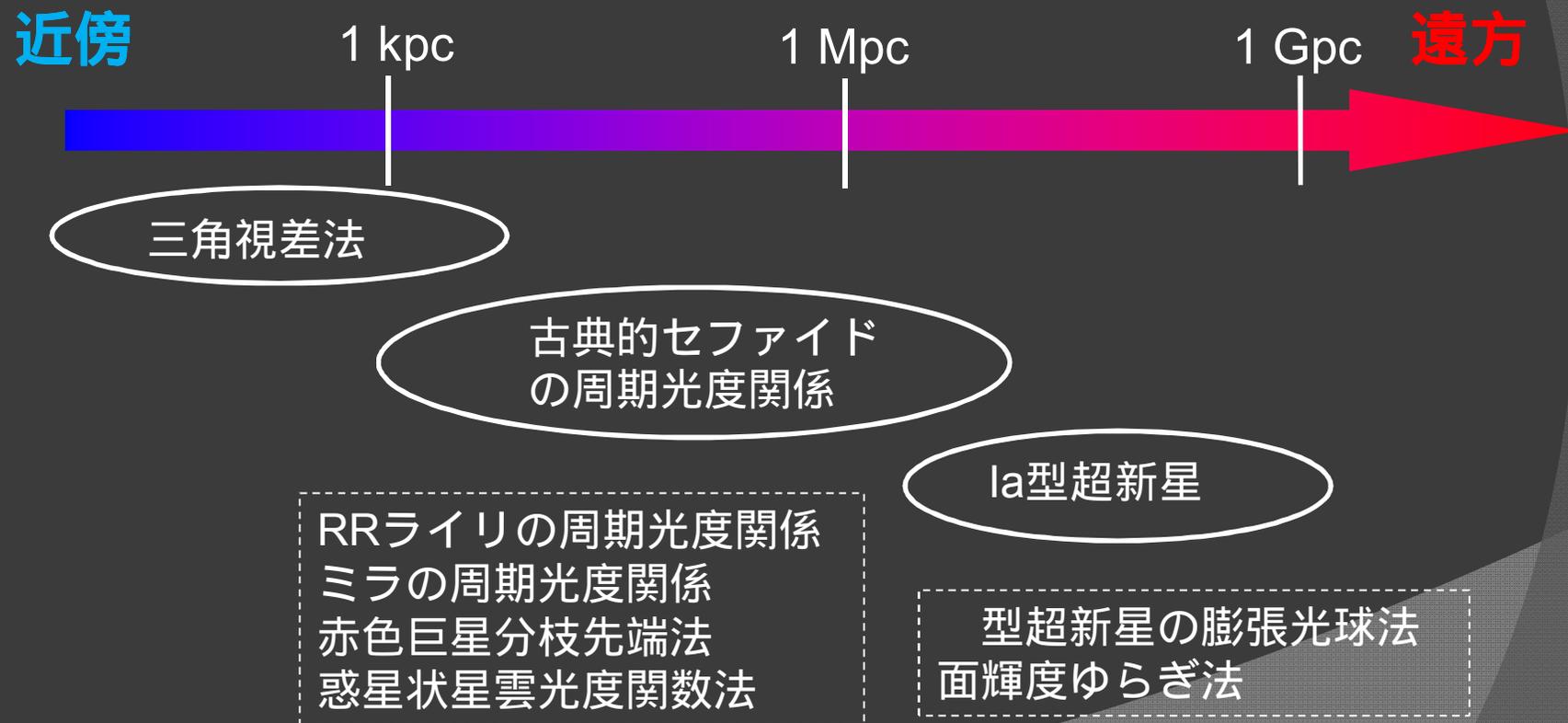
楕円銀河

- ◎ 宇宙初期の銀河形成・進化を物語る重要な化石
 - 古い星が支配的
 - 銀河団の中心部分に向かって多い。
- ◎ 楕円銀河の正確な距離決定によって・・・
 - 渦巻銀河とは異なる銀河団内での分布
(Cf. おとめ座銀河団)
 - 光度など基本的な物理量



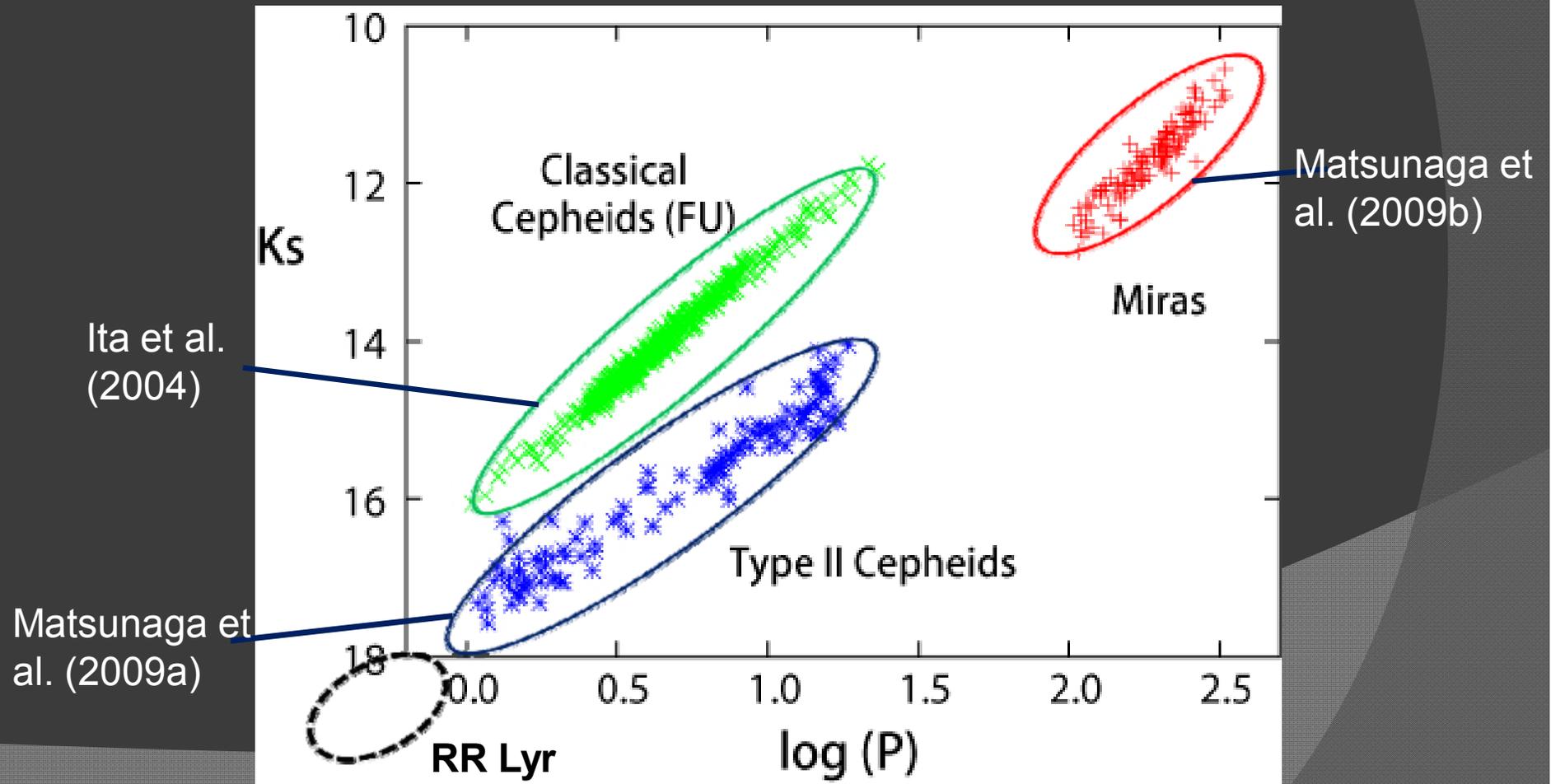
距離のはしご

- ◎ 三角視差法では届かないが、個々の星が見えるという範囲では、セファイドの周期光度関係が基本的な役割を果たす。



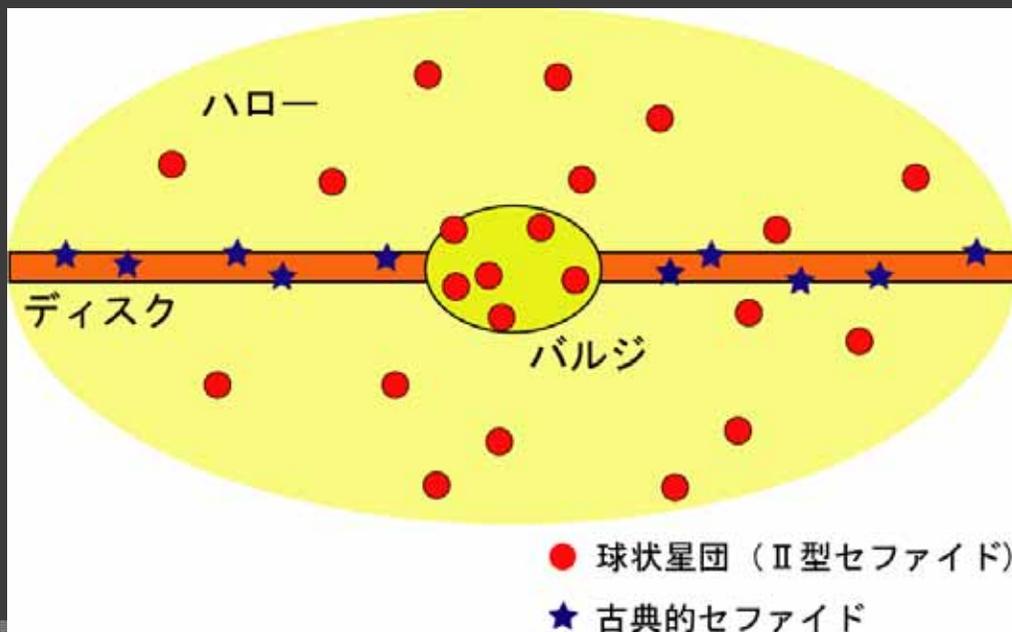
周期光度関係

- ◎ LMCにある数種類の変光星の周期光度関係
 - すべて、IRSF/SIRIUSの観測に基づく。



変光星の年齢

- ◎ 古典的セファイド
 - 若いグループ（ディスクなど）。3 ~ 10 太陽質量。
- ◎ 型セファイド・RRライリ
 - 年老いたグループ（球状星団など）。約 1 太陽質量。
- ◎ ミラ型変光星は 1 ~ 5 太陽質量程度



1 Gyr以上の年齢の星
しかない銀河：

× 古典的セファイド
型セファイド
RRライリ
ミラ型変光星

楕円銀河の距離決定法

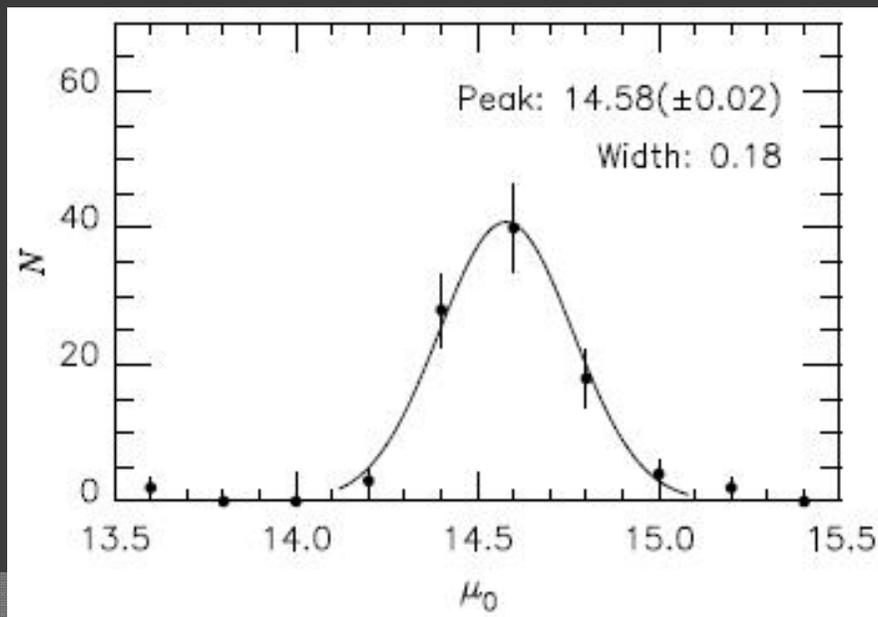
- ◎ 古典的セファイドがないので、高年齢の種族に使える距離指標が必要。

| 距離指標 | 精度 | 到達できる距離 |
|------------------|----|---------|
| RRライリのP-L関係 | | × |
| 型セファイドのP-L関係 | | × |
| ミラ型変光星のP-L関係 | | |
| 赤色巨星分枝先端法(TRGB法) | | |
| 惑星状星雲光度関数法 | | |
| 面輝度ゆらぎ法 | | |
| フェイバー・ジャクソン関係 | × | |

ミラ型変光星による距離決定

◎ 周期光度関係の利用

- ひとつひとつのミラに対する距離決定精度は ± 0.2 mag ほど。何十個かまとめて使うことで統計誤差が小さくできる。
- 系統誤差
 - LMCの距離の不定性
 - 金属量への依存性がよくわかっていない。

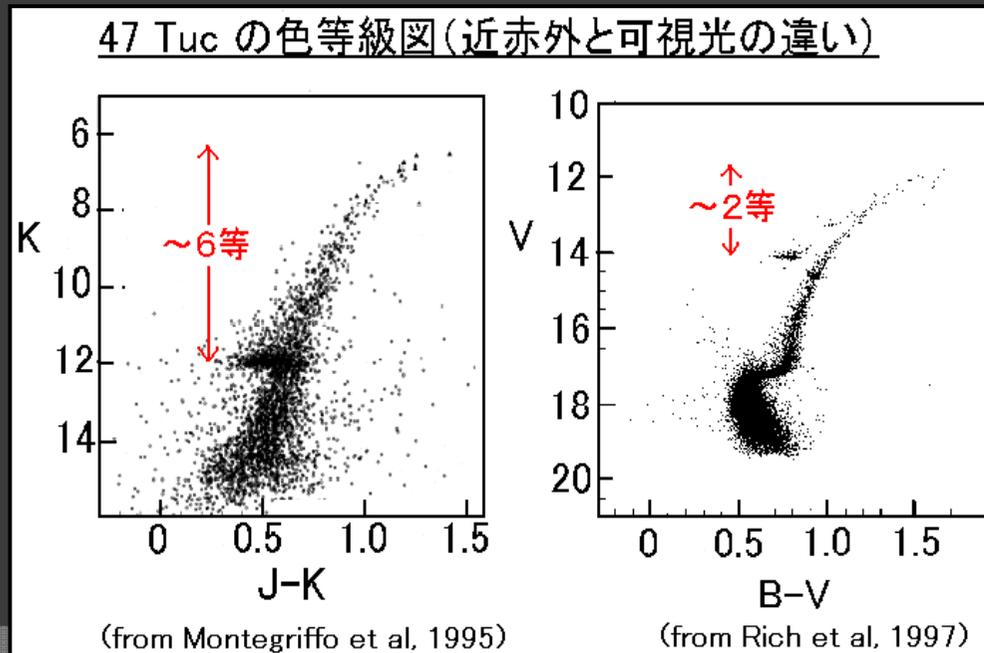


銀河中心の距離決定

$\mu_0 = 14.58 \pm 0.02^{\text{stat}} \pm 0.11^{\text{syst}}$
(Matsunaga et al. 2009)

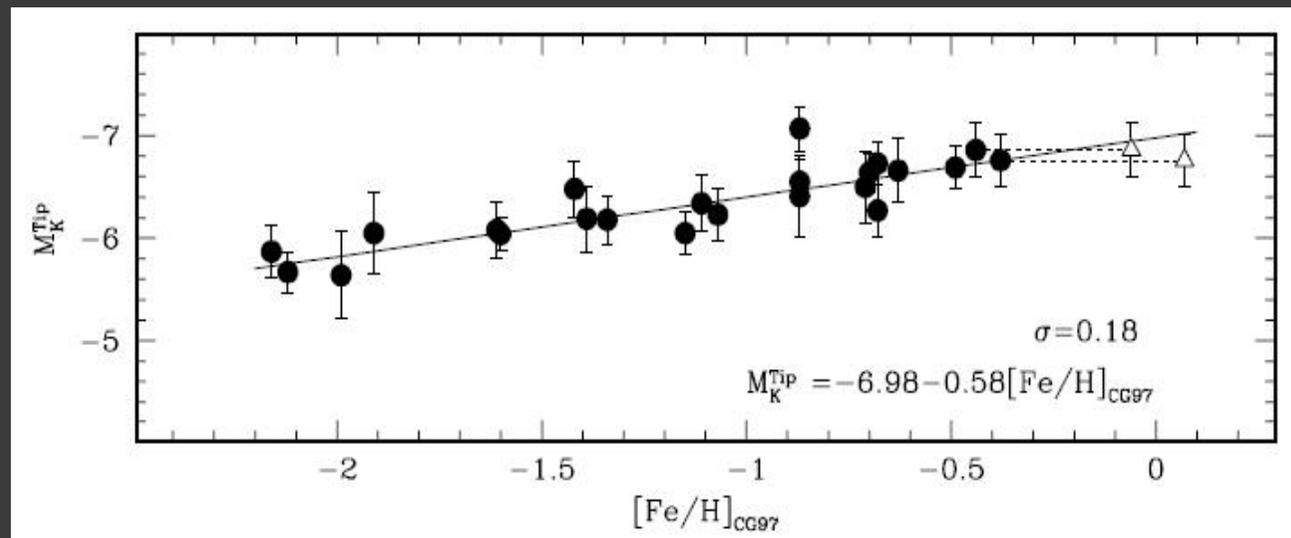
近赤外線観測の有利な点

- ◎ ミラの周期光度関係は近赤外でないとダメ。
- ◎ ミラが目立つので混んだ領域でも検出・測光しやすい。
 - 楕円銀河では重要な利点
 - それでもやはりAOは欲しい。



TRGB法 (赤色巨星分枝先端法)

- ヘリウムフラッシュの光度が、金属量にそれほどよらずほぼ一定であることを利用
 - 比較的精度が高いが、ほとんどの場合tipの等級を求めるのに ± 0.10 等ほどの誤差が出る。
 - S. Sakai氏(UCLA)らが精密な方法論を確立している。



どれくらいの精度が出るか

- ◎ 100個のミラが見つければ

→ ± 0.02 (stat.) ± 0.10 (syst.) mag

$\Delta[\text{Fe}/\text{H}] = 0.3$ dex に対し、 $\Delta\mu_0 \sim 0.05$ mag

(ただし、まだあまり確立されていない。)

- ◎ TRGB法

→ ± 0.10 (stat.) ± 0.10 (syst.) mag

$\Delta[\text{Fe}/\text{H}] = 0.3$ dex に対し、 $\Delta\mu_0 \sim 0.2$ mag (Kバンドの場合)

- ◎ 10Mpcにおけるの $\Delta\mu_0$ の影響

| | | | | | | | |
|---------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| $\Delta\mu_0$ (mag) | 0.02 | 0.05 | 0.10 | 0.15 | 0.20 | 0.30 | 0.50 |
| ΔD (kpc) | 90 | 230 | 460 | 690 | 920 | 1400 | 2300 |

* MWとM31の距離：700 kpc

Cen Aの場合

- ◎ Cen A (NGC 5128)
 - S0銀河
 - 電波銀河で最も近いAGNがある。
 - Rejkuba (ESO)らがミラ型変光星の観測を行った。



Centaurus A
(MPG/ESO 2.2-m + WFI)

ESO PR Photo 14a/03 (10 June 2003)

©European Southern Observatory

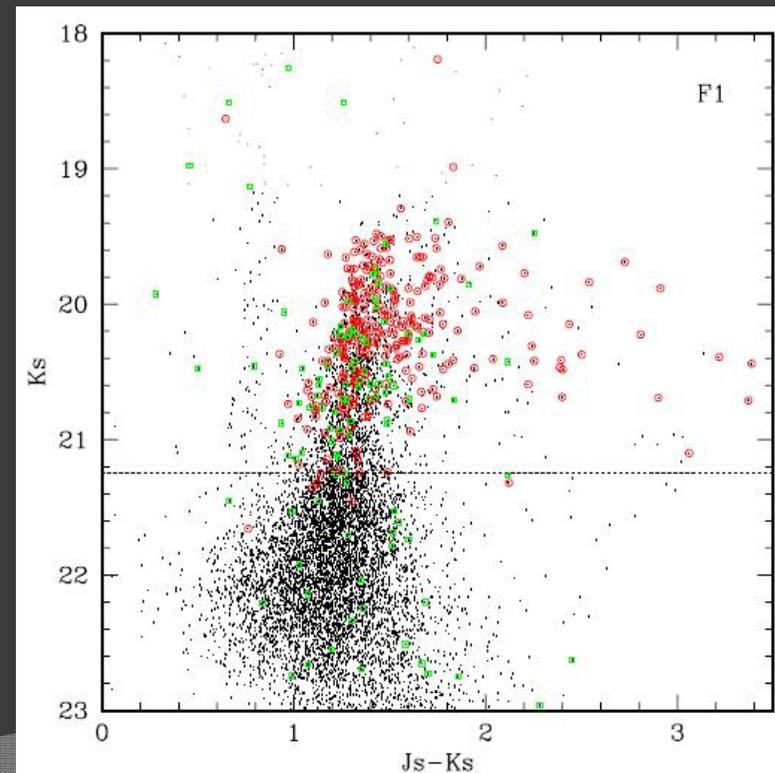
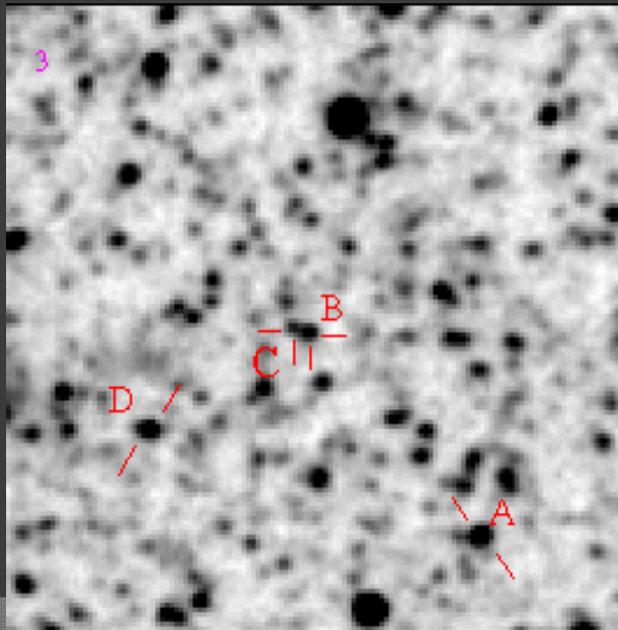


| # | DM (mag) | Method | Reference |
|----|------------------|--|--------------------------------------|
| 1 | 26.6 | Stellar luminosity function (LF) | Sersic (1958) |
| 2 | 29.6 | Largest HII regions | Sandage & Tammann (1974) |
| 3 | 27.73 ± 0.14 | Planetary nebula LF | Hui et al. (1993) |
| 4 | 27.97 ± 0.14 | Planetary nebula LF | (3) revised by Harris et al. (1999) |
| 5 | 27.53 ± 0.5 | Globular cluster LF | Harris et al. (1988) |
| 6 | 27.86 ± 0.16 | <i>I</i> -band RGB tip (WF chips of WFPC2) | Soria et al. (1996) |
| 7 | 27.76 ± 0.16 | <i>I</i> -band RGB tip (PC chip of WFPC2) | Soria et al. (1996) |
| 8 | 27.98 ± 0.15 | <i>I</i> -band RGB tip (WFPC2) | Harris et al. (1999) |
| 9 | 27.48 ± 0.06 | <i>I</i> -band SBF | Tonry & Schechter (1990) |
| 10 | 27.71 ± 0.10 | <i>I</i> -band SBF | (9) revised by Israel (1998) |
| 11 | 28.18 ± 0.07 | <i>I</i> -band SBF | (9) revised by Marleau et al. (2000) |
| 12 | 28.12 ± 0.15 | <i>I</i> -band SBF | Tonry et al. (2001) |

Rejkuba (2002-2004)の観測

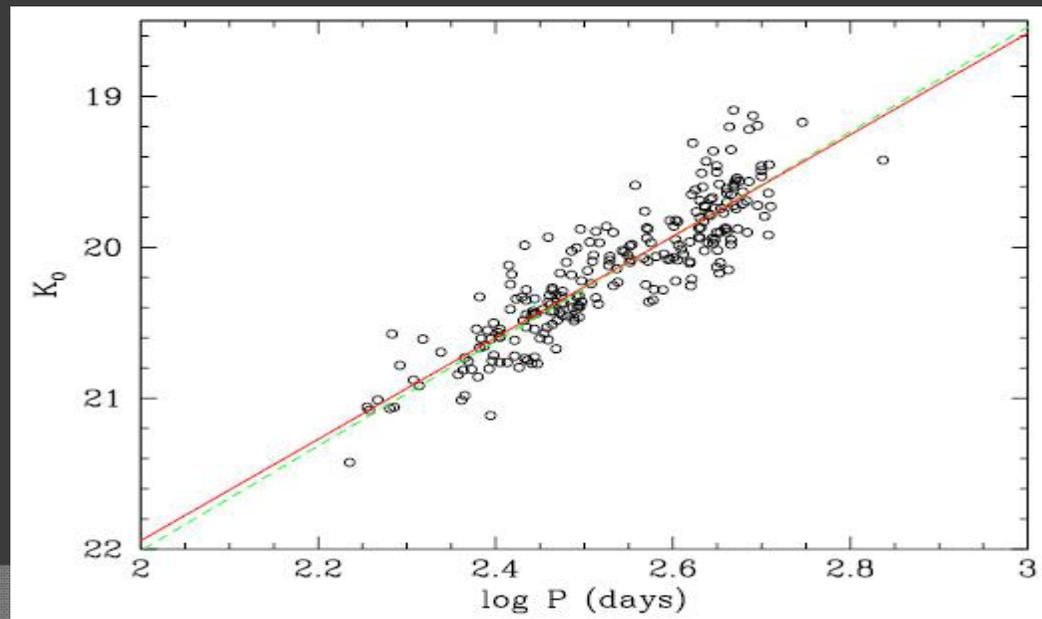
◎ VLT-8.2m / ISAAC

- 1999~2002にかけて約20回
- 0.148"/pix (1k1k Hawaii Rockwell array)
- FWHM ~ 0.4"
- Exposure ~ 60 min



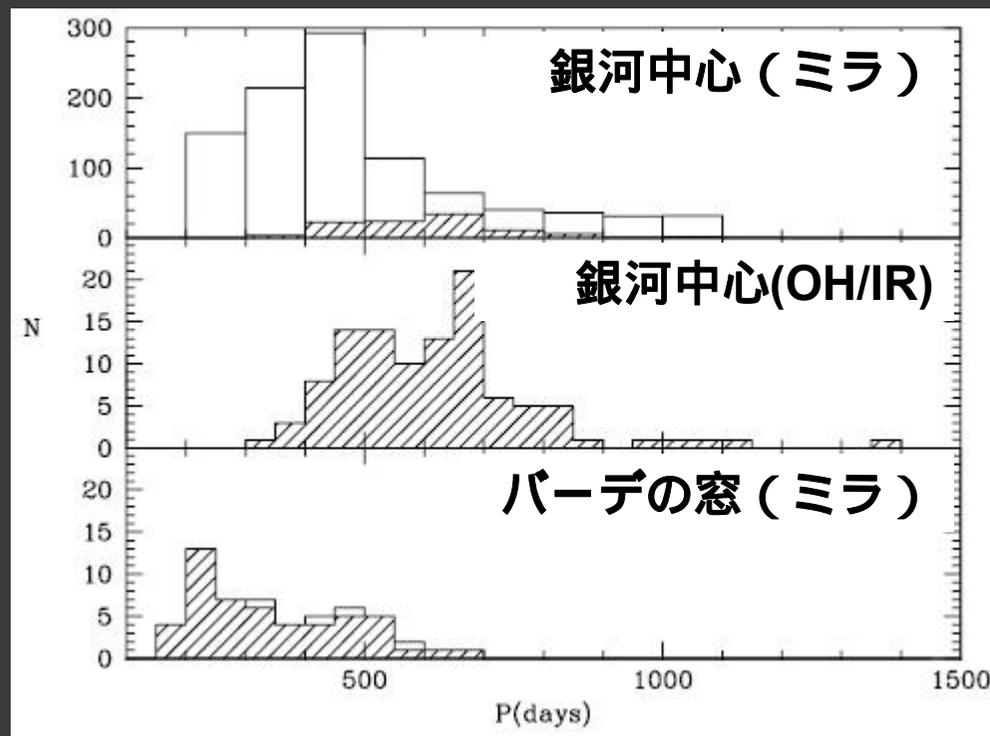
Rejkubaによるミラの発見

- ◎ 1000個以上の長周期変光星を発見
- ◎ 局部銀河群の外にある銀河で初めて（現在のところ唯一）
- ◎ 周期光度関係を利用して距離測定
 - $\mu_0(\text{Cen A}) = 27.96 \pm 0.11 \text{ mag}$ (系統誤差込み)
 - 同時に求めたTRGB法の結果では $27.87 \pm 0.16 \text{ mag}$



さらにミラ型変光星の応用

- ◎ 周期分布がどういう年齢の星がいるかという指標になる。
 - 周期が長いほど若い星(100Myr程度まで)の存在を示す。



楕円銀河変光星探査の観測目的

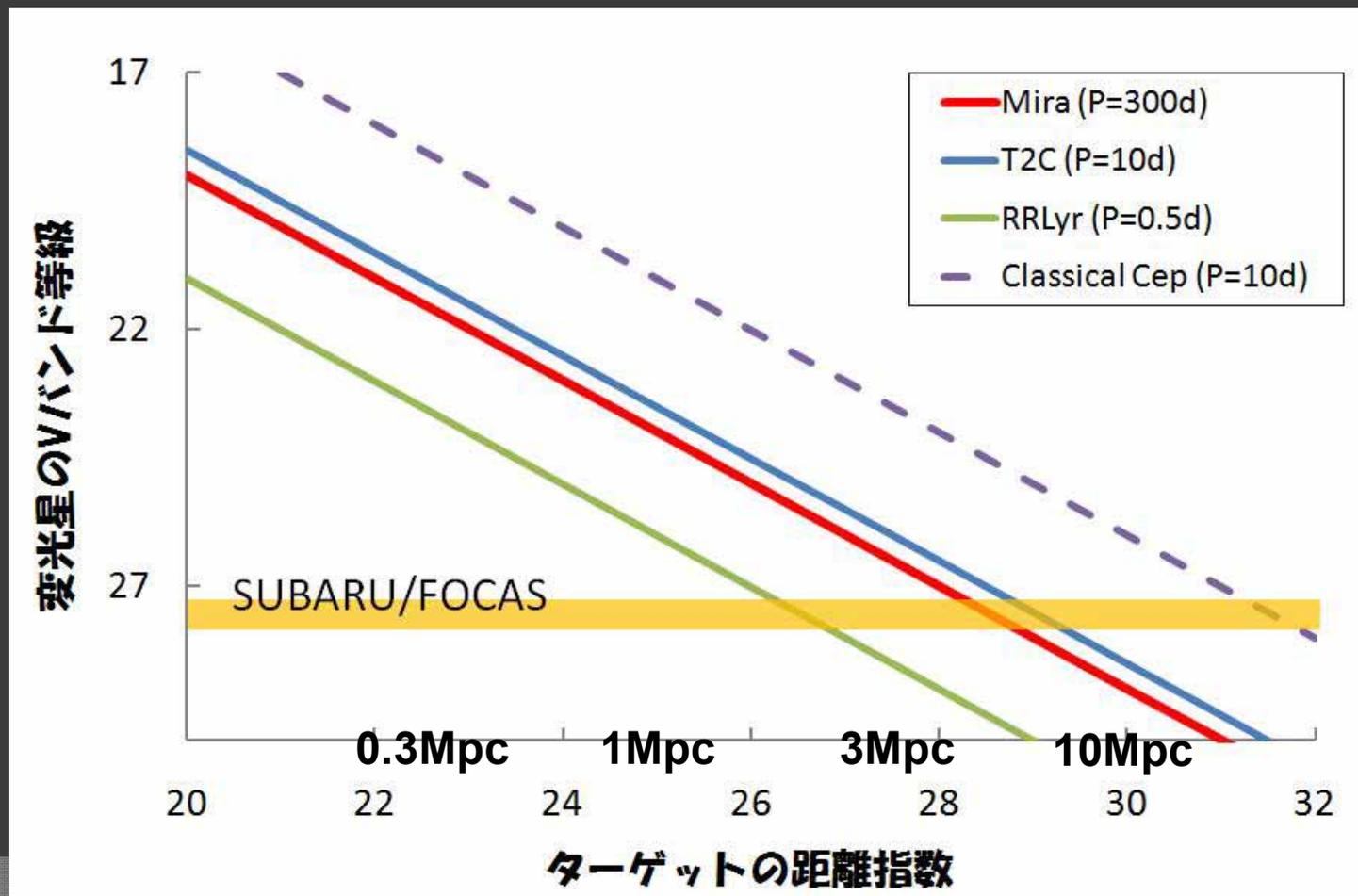
- ◎ 距離と銀河にある恒星の年齢構成の調査
 - ミラ型変光星のP-L関係を利用した距離決定
 - ミラ型変光星の周期分布は、主に100Myr~10Gyrの年齢構成を調べる指標となる。
 - 同時に
 - 赤色超巨星(< 100Myr の若い種族)の探査
 - TRGB法などによる距離決定
- ◎ 銀河群・銀河団内における分布
- ◎ 銀河の基本的な物理量(質量光度比など)の測定

TAO/NIRCAMによる観測

- ◎ 1時間のon-source積分→ $K=22$ mag (5σ)
- ◎ どんな距離にあるどんな変光星が観測できるか

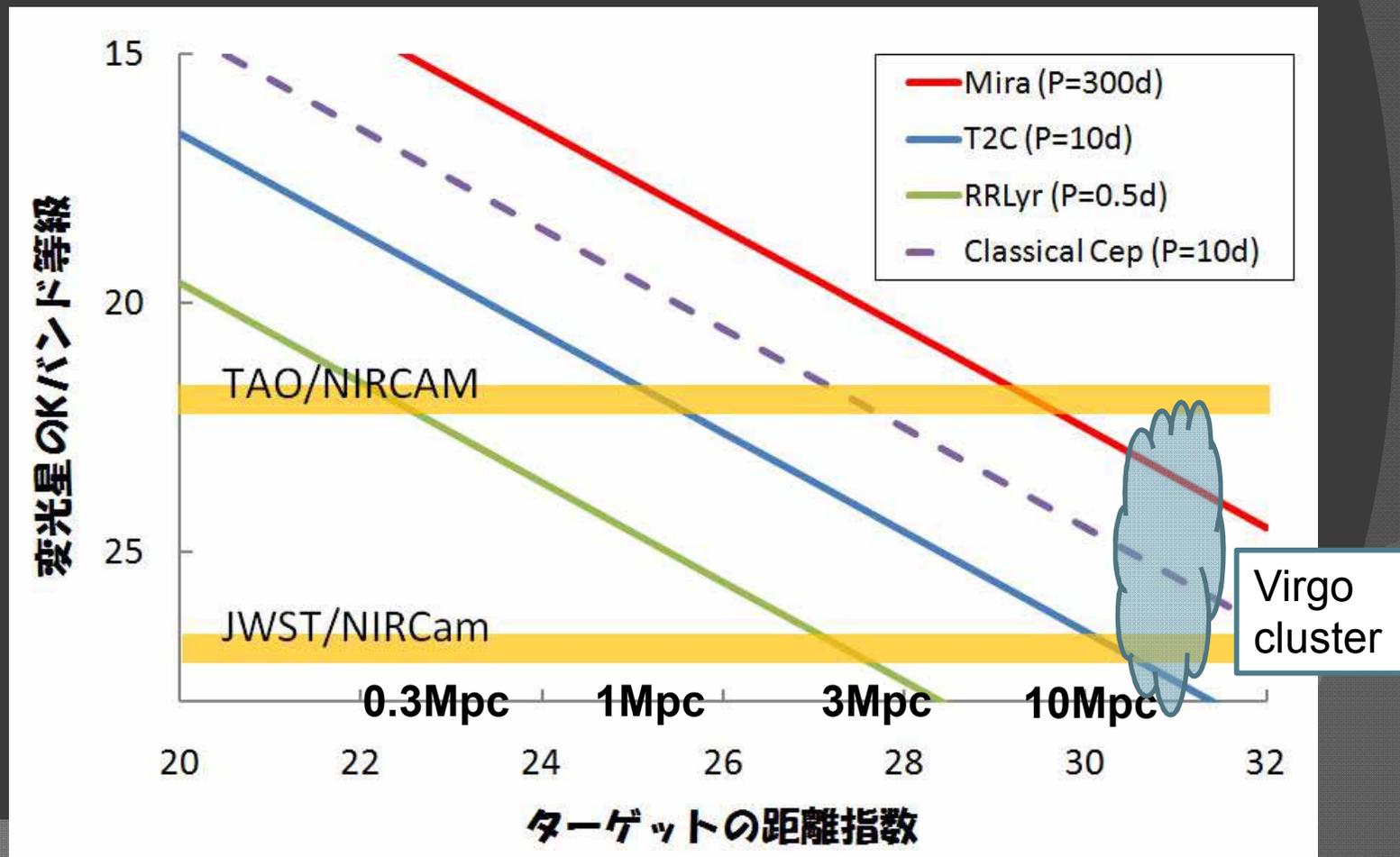
Vバンドでの変光星探査に必要な等級

- HSTでは27等くらいまでの撮像を行い、20Mpcくらいの銀河にあるセファイドを観測。
- ミラはVバンドでは暗く、さらにP-L関係を持たない。



Kバンドでの変光星探査に必要な等級

- ミラ型変光星が明るくなり、赤外の方が探査に有利。
- セファイドが探査可能な範囲は、HST→JWSTでそれほど伸びないが、ミラ型変光星では非常に遠くまで見える。

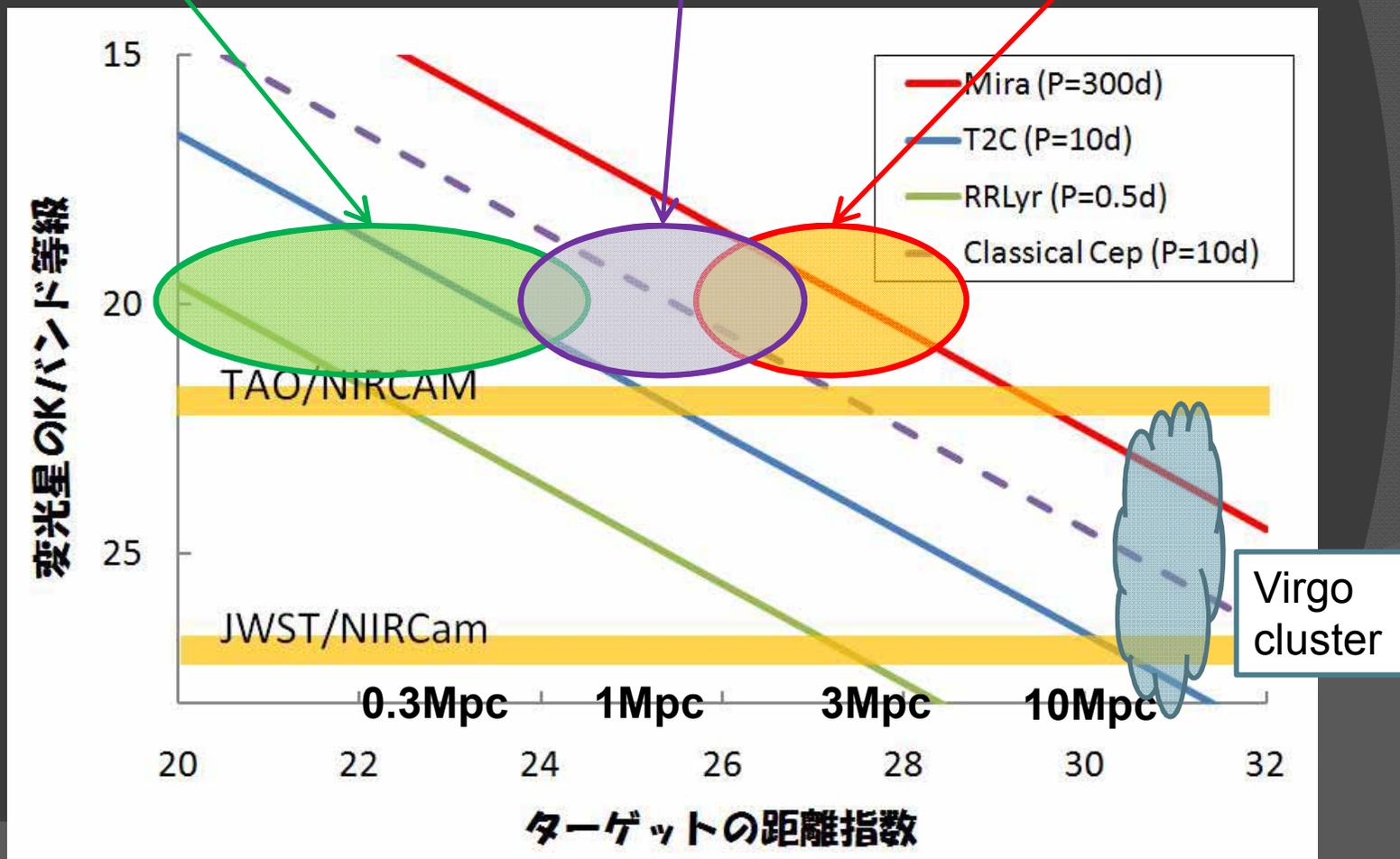


TAO/NIRCAMで観測できる変光星

1 Mpcより近いT2C
及び、300kpcより
近いIRRライリ

3Mpcより
近い古典的
セファイド

10Mpcより
近いミラ



観測ターゲット候補

- ◎ 10Mpc以内にある近傍楕円銀河およびレンズ状銀河
 - 不完全なサーベイだが・・・あまり多くない

| 名称 | 別名 | 形態 | RA | DE | およその距離 | 補足 |
|-------------|-------|-------|-------|--------|---------|-------------|
| ESO 294-010 | | dG | 00:27 | -41:51 | 1.9 Mpc | ScI. Group |
| ESO 410-005 | | dG | 00:16 | -32:11 | 2 Mpc | ScI. Group |
| NGC 404 | | dE/S0 | 01:09 | +35:43 | 3.2 Mpc | LINER-AGN |
| NGC 3379 | M 105 | E | 10:48 | +12:34 | 8.1 Mpc | LINER-AGN |
| NGC 5102 | | S0 | 13:22 | -36:38 | 3.2 Mpc | Cen A Group |
| NGC 5182 | Cen A | S0 | 13:25 | -43:01 | 3.8 Mpc | Cen A Group |
| NGC 5206 | | S0 | 13:34 | -48:09 | 4.6 Mpc | Cen A Group |

必要な観測時間

- ◎ **1回あたり1時間**の積分を繰り返す。
- ◎ 最初の数回でミラの検出が可能かどうか調べる。
 - 不可能な場合はSBF法等でおよその距離 (± 0.2 mag)を決める。
- ◎ ミラが検出できそうなら、**3年間**かけて**25回**くらい反復観測。
- ◎ Overhead (積分時間の2倍)を入れて、1天体あたり**50時間** (~7夜分)

まとめ

- ◎ 古典的セフィイドが存在しない楕円銀河等について、ミラ型変光星を利用した高精度(± 0.1 mag)の距離測定を行う。
- ◎ TAO/NIRCAMで、10Mpcくらいまでの銀河のミラを観測できる。
- ◎ 銀河群・銀河団の構造や、銀河の基本的な物理量（光度など）を精度よく求める。