

1. イントロ

現在、LMC形状問題には以下の意味がある。これまで標準光源サンプルの数が足りなかった

- 1) LMC方向のレンズ発生天体の種族。
- 2) MW-LMCシステムの力学的状態
- 3) LMC傾きの宇宙論的距離指標への影響

これまでの傾き

以前は等級・運動のトレーサーの結果は大体一致してた。

$\Theta = 170 - 190^\circ$ 、 $I = 25 - 45^\circ$  Westerlund 1997

ところが、最近異なる結果が出てきている。

$\Theta = 145$  RC:Olsen/Salyk2002,

Cepheid:

Cadwell/Coulson1986,

Laney/Stobie1986

$\Theta = 122$  C星 van der Marel/Cioni 2001 円形をはずした

これくらい $\Theta$ が変わると、結果として形も細長くなり、 $\epsilon = 0.31$

$\Theta = 129$  C星の運動 van der Marel 2001

ここでは、MACHOのCepheid+2MASSで調べる。

2. データ選択

MACHO --> 3126 Cepheids = 1966FU+1160FO V, Rc光度曲線

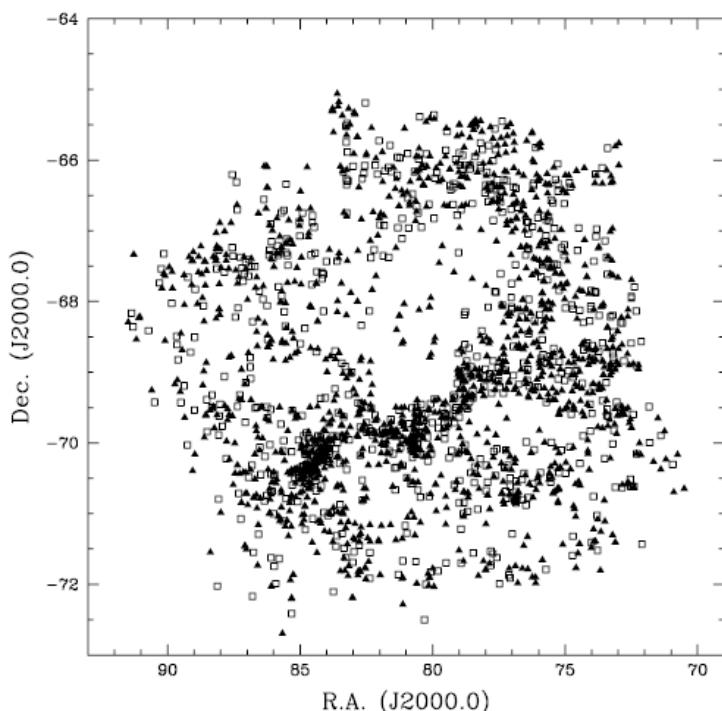


図1 Cepheids 分布  
 ▲=FU  
 □=FO  
 分布は若い種族と一致。  
 全ての Cepheids は中心数度以内にあり、FUとFOに分布の差はない。  
 バーとNWアームに多いことは、若い種族であることと一致する。分布の幾何学的中心は $\alpha = 80.4^\circ$ ,  $\delta = -69.0^\circ$  である。  
 次の処理を行なう。  
 1) 2MASSと同定  
 2) 8次フーリエで光度曲線  
 3) 眼視で不良フィットを撥ねる。

最終的には、

2106Cepheids = 1357FU + 749FO が残った。

2. 1. 測光較正

2MASS——>Bessell/Brett(1988)の homogenized system への変換を行なうと、赤化がよく研究されているので、扱いが容易になる利点がある。一方、Carpenter2001 の変換式が2MASS予備データに基いているため変換誤差が大きい。——> 2MASSシステムで考える。

3. 方法

### 3. 1. 一般的な手続き

$$\bar{m}_{\lambda,i} = \alpha_{\lambda} \log P_i + \beta'_{\lambda} + \Delta\mu_i + R_{\lambda} \Delta E(B-V)_i \quad (\lambda = V, R) \quad (1)$$

### 3. 2. ランダム位相補正

$$m_{\lambda}(\phi) = \bar{m}_{\lambda,i} + \Omega_{\lambda}(\phi) \quad \Omega_{\lambda}(\phi) = \sum_{j=1}^2 [A_{\lambda,j} \cos(2\pi j \phi) + B_{\lambda,j} \sin(2\pi j \phi)]$$

$$\phi_i = 2\pi \cdot \text{mod} \left( \frac{T_{2MASS,i} - T_{0,i}}{P_i} \right)$$

すると、

$$m_{\lambda,i}(\phi_i) = \alpha_{\lambda} \log P_i + \beta'_{\lambda} + \Delta\mu_i + R_{\lambda} \Delta E(B-V)_i + \Omega_{\lambda}(\phi_i) \quad (\lambda = J, H, K) \quad (2)$$

(1)と(2)式をN個の星に対して書くと、5N個の式になる。未知数は、下の2N+22個

$(\alpha_{\lambda}, \beta_{\lambda}) \times 5 = 10$

$(A, B) \times (j=1, 2) \times (J, H, K) = 12$

$\Delta \mu_i, \Delta E(B-V)_i = 2N$

TABLE 1  
RESULTS OF THE RANDOM-PHASE CORRECTION

Band	$\sigma_r$ (Random Phase)	$\sigma_c$ (Corrected)	$(\sigma_r - \sigma_c) / \sigma_r$
FU Cepheids			
<i>J</i> .....	0.161	0.129	0.20
<i>H</i> .....	0.133	0.114	0.14
<i>K<sub>s</sub></i> .....	0.142	0.129	0.09
FO Cepheids			
<i>J</i> .....	0.135	0.127	0.06
<i>H</i> .....	0.118	0.115	0.03
<i>K<sub>s</sub></i> .....	0.137	0.134	0.02

表1 位相補正の効果

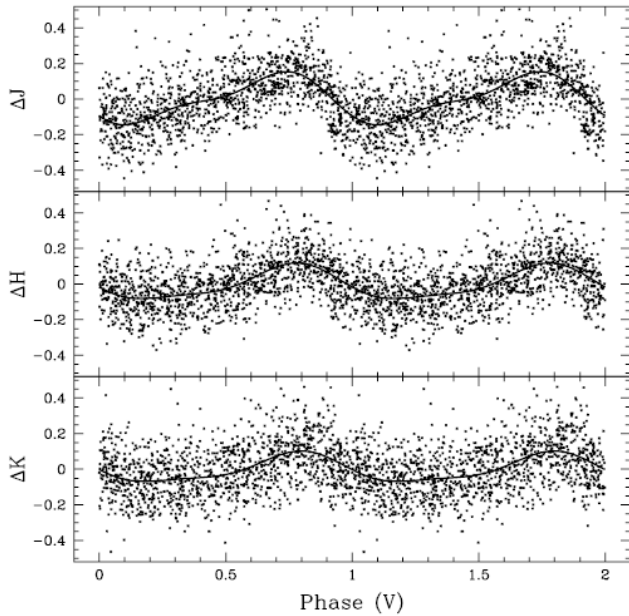


図2 FU—セファイドの位相補正 $\Omega(\phi)$  各点はPLR  
での値と観測値との差

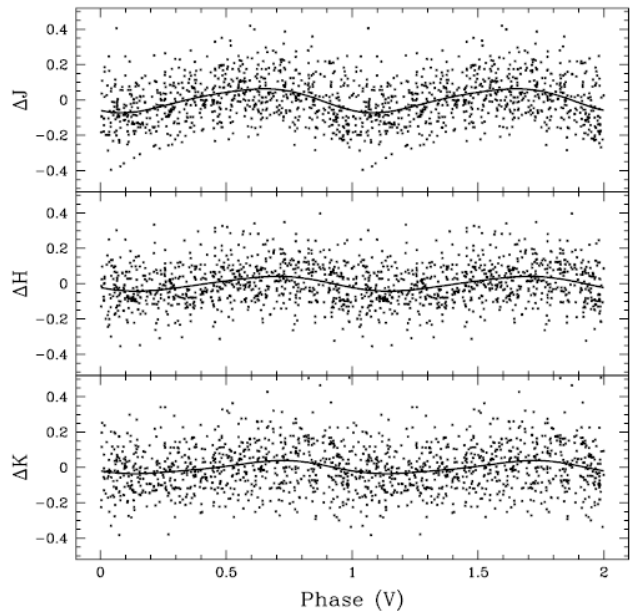


図3 FO—セファイドについて同様。

結局、J, H, Kバンド毎に平均光度曲線を決めて、位相 $\phi$  から各バンドでの補正量を決定している。  
上の表1を見ると、FUではJで20%、Kで10%になる。これは振幅が波長と共に減少することに対応する。

同様に振幅の小さなFOでも効果は小さい。

### 3. 3. エラー

セファイドのPL関係に含まれるエラーは、

$$\sigma^2 = \sigma_0^2 + \sigma_\mu^2 + \sigma_{red}^2 + \sigma_{phot}^2 + \sigma_{cor}^2(NIR)$$

$\sigma_0 = PLR$ で吸収しきれない $M_\lambda(M, Te, Z, \dots)$ の誤差全て

$\sigma_\mu =$  距離エラー、 $\sigma_{red} =$  減光エラー、 $\sigma_{phot} =$  測光・較正エラー

$\sigma_{cor}(NIR) =$  ランダム位相エラー

$\sigma_{cor} = 0.05$ ,  $\sigma_{phot} =$  既知  $\sigma_{red} =$  解に含まれる  $\sigma_\mu =$  解に含まれる

——> Intrinsic Error  $\sigma_0$ だけが未知だが、 $= 0.05$ とおく。

しかし、 $\sigma_0$ を 0.05 変化させても、円盤の方位角を  $0.5^\circ$ 、傾きを  $0.1^\circ$  変えるだけで影響は小さい。

(1)、(2)は2段階で解く。

$$\bar{m}_{\lambda,i} = \alpha_\lambda \log P_i + \beta'_\lambda + \Delta\mu_i + R_\lambda \Delta E(B-V)_i \quad (\lambda = V, R) \quad (1)$$

$$m_{\lambda,i}(\phi_i) = \alpha_\lambda \log P_i + \beta'_\lambda + \Delta\mu_i + R_\lambda \Delta E(B-V)_i + \Omega_\lambda(\phi_i) \quad (\lambda = J, H, K) \quad (2)$$

$$m_\lambda(\phi) = \bar{m}_{\lambda,i} + \Omega_\lambda(\phi) \quad \Omega_\lambda(\phi) = \sum_{j=1}^2 [A_{\lambda,j} \cos(2\pi j \phi) + B_{\lambda,j} \sin(2\pi j \phi)]$$

$$\phi_i = 2\pi \cdot \text{mod} \left( \frac{T_{2MASS,i} - T_{0,i}}{P_i} \right)$$

## 第1段階

VRJHKの全バンドで、観測値にエラーの重みを無視して、 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\{A, B\}$ を求める。

多分：(1)、(2)で、 $\Delta \mu$ 、 $R \Delta E(B-V)$ を無視して、 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\Omega$ の項だけを解く。

求めた $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\{A, B\}$ を用いて、 $\Delta \mu$ 、 $\Delta E(B-V)$ を個々の星に対して決める。この時はエラーの逆数を重みにして最小二乗法を適用する。

## 第2段階

もう一度上の作業を繰り返す。ただし、今回は $\Delta \mu$ 、 $\Delta E(B-V)$ で $m$ が補正されている。

この結果、改良されたPL関係が得られる。

## 4. 結果

### 4. 1. PL関係

TABLE 2  
FITTED PL RELATIONS FOR FUNDAMENTAL-MODE CEPHEIDS

Band	$\alpha_\lambda$	$\beta'_\lambda$	$\sigma_{\text{fit}}$
Iteration 1			
<i>V</i> .....	$-2.616 \pm 0.038$	$17.444 \pm 0.025$	0.280
<i>R</i> .....	$-2.780 \pm 0.033$	$17.161 \pm 0.021$	0.239
<i>J</i> .....	$-3.068 \pm 0.018$	$16.389 \pm 0.011$	0.129
<i>H</i> .....	$-3.180 \pm 0.016$	$16.121 \pm 0.010$	0.114
<i>K<sub>s</sub></i> .....	$-3.175 \pm 0.018$	$16.038 \pm 0.011$	0.129
Iteration 2			
<i>V</i> .....	$-2.615 \pm 0.002$	$17.443 \pm 0.002$	0.018
<i>R</i> .....	$-2.782 \pm 0.003$	$17.162 \pm 0.002$	0.023
<i>J</i> .....	$-3.074 \pm 0.006$	$16.394 \pm 0.004$	0.044
<i>H</i> .....	$-3.187 \pm 0.007$	$16.128 \pm 0.004$	0.049
<i>K<sub>s</sub></i> .....	$-3.183 \pm 0.010$	$16.045 \pm 0.007$	0.074

NOTE.—Iteration 1 refers to the PL fits to raw data, while iteration 2 refers to the fits to data corrected for distances and reddening (see § 3.3) Note that the effect of the mean line reddening,  $E(B - V)_{\text{LMC}}$ , has not been taken out in data for iteration 2.

TABLE 3  
FITTED PL RELATIONS FOR FIRST-OVERTONE CEPHEIDS

Band	$\alpha_\lambda$	$\beta'_\lambda$	$\sigma_{\text{fit}}$
Iteration 1			
$V$ .....	$-3.123 \pm 0.080$	$16.990 \pm 0.031$	0.315
$R$ .....	$-3.190 \pm 0.069$	$16.695 \pm 0.027$	0.272
$J$ .....	$-3.323 \pm 0.032$	$15.896 \pm 0.013$	0.127
$H$ .....	$-3.371 \pm 0.029$	$15.629 \pm 0.011$	0.115
$K_s$ .....	$-3.348 \pm 0.034$	$15.552 \pm 0.013$	0.134
Iteration 2			
$V$ .....	$-3.123 \pm 0.005$	$16.990 \pm 0.002$	0.019
$R$ .....	$-3.193 \pm 0.007$	$16.696 \pm 0.003$	0.026
$J$ .....	$-3.336 \pm 0.012$	$15.904 \pm 0.005$	0.047
$H$ .....	$-3.385 \pm 0.014$	$15.638 \pm 0.006$	0.056
$K_s$ .....	$-3.363 \pm 0.023$	$15.561 \pm 0.009$	0.092

NOTE.—Iteration 1 refers to the PL fits to raw data, while iteration 2 refers to the fits to data corrected for distances and reddenings (see § 3.3) Note that the effect of the mean line reddening,  $E(B - V)_{\text{LMC}}$ , has not been taken out in data for iteration 2.

FU, FOセファイドのPL関係は上の表の通りである。 $\Delta \mu$ 、 $\Delta E(B - V)$ の効果の有無(近似1, 2)を示す。

下図: 左は $\Delta \mu$ 、 $\Delta E(B - V)$ の効果なし。右は効果考慮。

VRとJHKでの分散の差は明らかである。

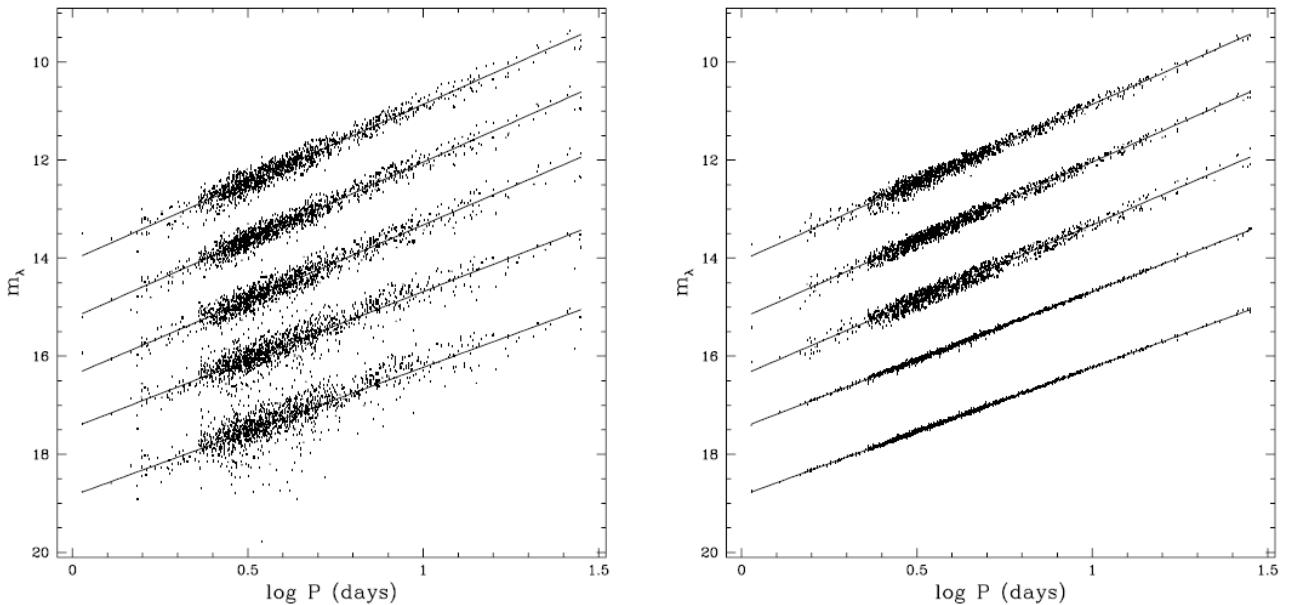


FIG. 4.—PL relations for FU Cepheids. *Left*: Iteration 1 (fitting observed magnitudes). *Right*: Iteration 2 (fitting magnitudes corrected for distance and reddening). Solid lines are fitted PL relations. The PL relations are vertically offset for clarity. The difference in error reduction between optical and NIR bands suggests that scatter in  $V, R$  is dominated by distance and reddening variations, while scatter in NIR bands is due to photometric and phase errors.

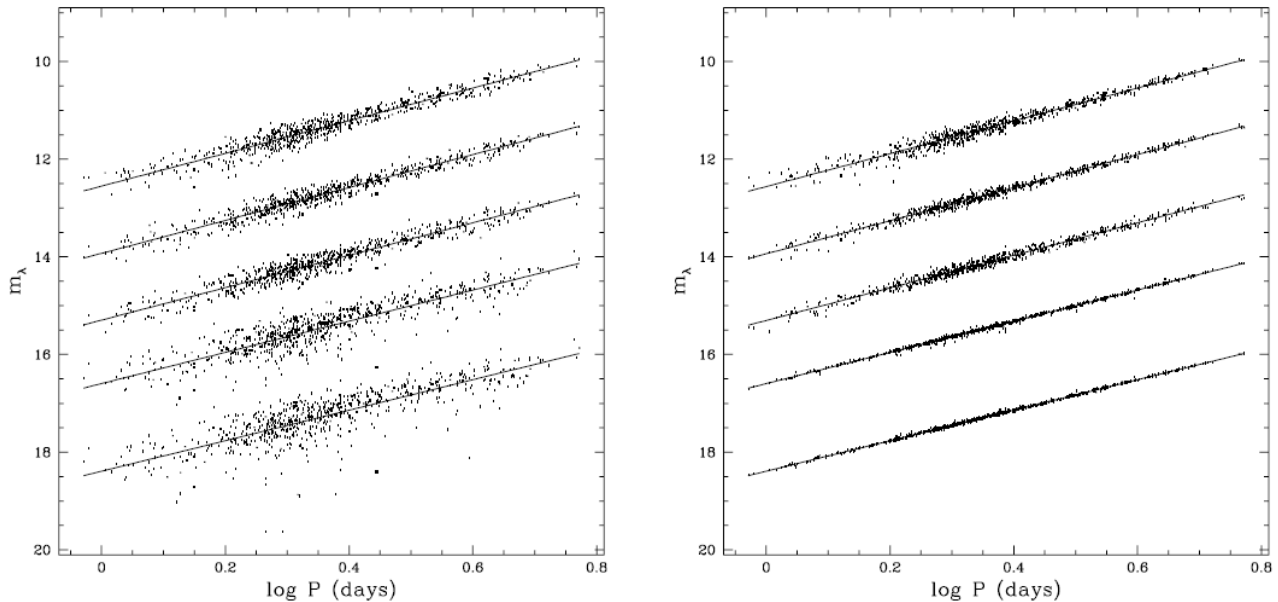


FIG. 5.—PL relations for FO Cepheids. The panels are as in Fig. 4. The relations are vertically offset for clarity.

ただ、ちょっと納得しにくいところもあるな。個々の星でPLRと観測値のずれを赤化に押し込んでるわけだ。

仮定した赤化曲線で $\sigma$ が最小になるように $A_v$ を決めているから、誤差が赤化のせいでも、ある程度までは強制的に補正されてしまう。つまり、仮に残差が赤化のためでなくても赤化の関数形を持つ成分は補正されちゃう。

k- $\sigma$  クリッピング法 (Udalski et al 1999, Groenewegen 2000)について。

PLフィットの際、k-標準偏差を越したデータを除いて、逐次近似する。kの取り方で結果が動く。

今回は別法として、ベストフィットのPLRが求まり、それで距離を決めたら円盤から7kpc離れたセファイドを除いた。33星が手前、11星が向こう側にあった。これらはマイクロレンズングとの関係で重要。

その後で最終PL関係を決める。したがって、円盤傾きの議論にこのアウト라이어は含まれていない。

#### 4. 2. DMと赤化

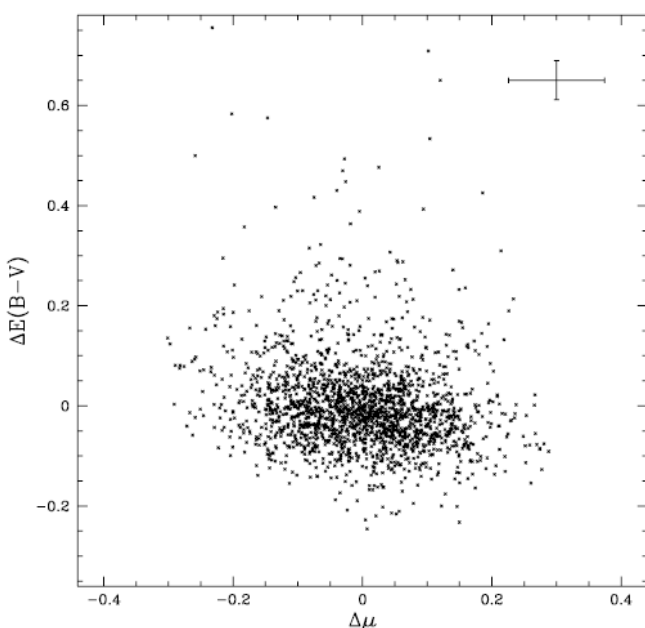


図6 セファイドの $\Delta\mu$ と $\Delta E(B-V)$   
 (1)、(2)を見ると、 $\Delta\mu$ と $\Delta E(B-V)$ は和の形で入っているから逆相関になる。  
 しかし、LMCに普通のダスト層を考えると遠い星ほど大きい赤化を受けるべきで、この結果とは逆である。  
 赤化軸への投影はモード値より0.6-0.7等大きい赤化まで長いテールが伸びている。これは、Harris, Zaritsky, Thompson 1997 と一致する。

#### 4. 2. LMC平均距離と赤化

$\Delta \mu$  と  $\Delta E(B-V)$  は LMC までの平均の  $\mu$  と  $E(B-V)$  からのズレである。

#### 4. 3. 1. 平均赤化

文献中の平均赤化(前景含む)は、 $\langle E(B-V) \rangle = 0.074$  Cadwell/Coulson 1985)

$= 0.20$  Harris et al 1997

ここでは、異なる次の3方法で求めた。

##### 第1法

MACHOから選んだ Bump Cepheids 20 星のモデル Keller/Wood 2002

——> 絶対等級、固有カラー ——> 個々の星の 距離+赤化絶対値

——> 絶対赤化を、統計的に求めた相対赤化と比較して

平均赤化  $\langle E(B-V) \rangle = 0.16 \pm 0.04$ ,  $\langle \mu \rangle = 18.57 \pm 0.13$

##### 第2法

HSTのWFPC2フィールドで、平均星形成史Code(Harris/Zaritsky2001)と比較して

赤化を決める。HSTフィールド中心から15'以内のセファイドを取ってきて、マッチに必要なシフト量から

$\langle E(B-V) \rangle = 0.12 \pm 0.04$

##### 第3法

$f_0$ ="ゼロ"赤化星の割合を仮定して、それらは測光エラーで負の赤化になり得るとする。

$f_0 = 0.05 \rightarrow \langle E(B-V) \rangle = 0.11$

以上3つの平均として、 $\langle E(B-V) \rangle = 0.14$

過去のセファイド平均赤化  $\langle E(B-V) \rangle = 0.074$  (Caldwell/Coulson 1985) より高いが、

$\langle E(B-V) \rangle = 0.137$  (Udalsky et al 1999) や、 $\langle E(B-V) \rangle = 0.16$  (Oestreicher/Schmidt-Kaler 1996) と合う。

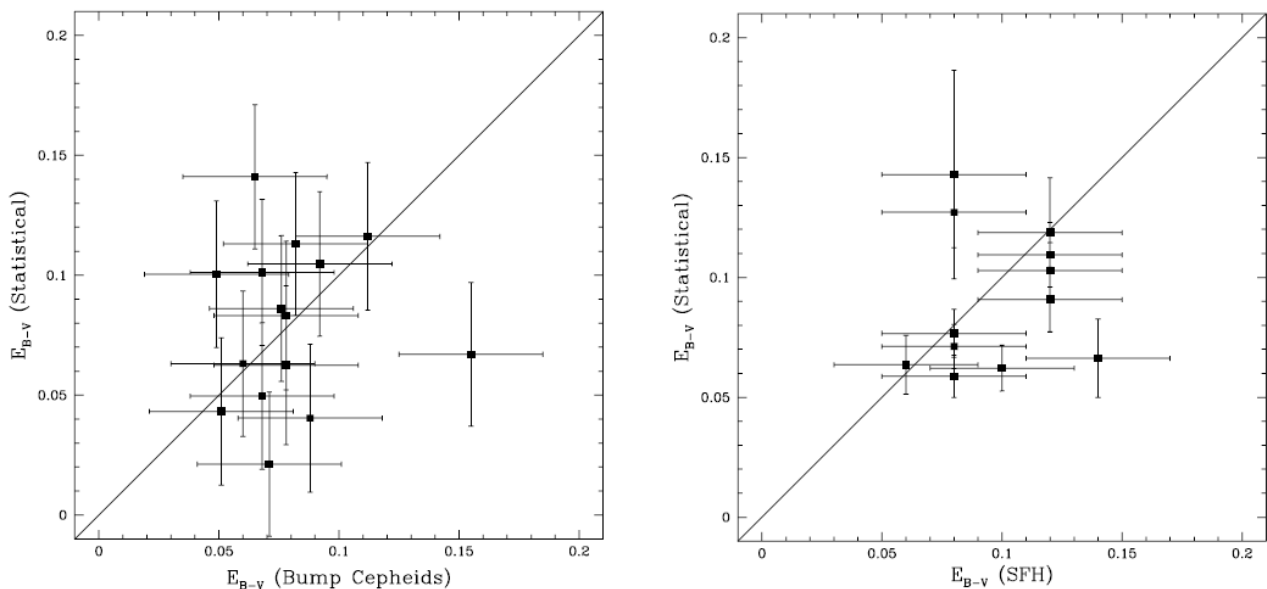


FIG. 8.—Calibration of the reddening zero point  $\overline{E(B-V)}$  based on theoretical models of bump Cepheids (*left*) and HST WFPC2 fields (*right*). The differential reddening derived from eq. (11) were shifted by 0.16 (*left*) and 0.12 (*right*), according to the mean zero point from each method. Straight lines in both panels show one-to-one dependence.

#### 4. 3. 2. LMC赤化地図

観測領域を  $10 \times 10$  グリッドに分けて、各ビンでセファイドの相対赤化の重み付き平均を計算した。

次に  $\langle E(B-V) \rangle = 0.14$  を足して絶対値に直した。図9の右図には  $40 \times 40$  グリッドで等高線マップを作った。

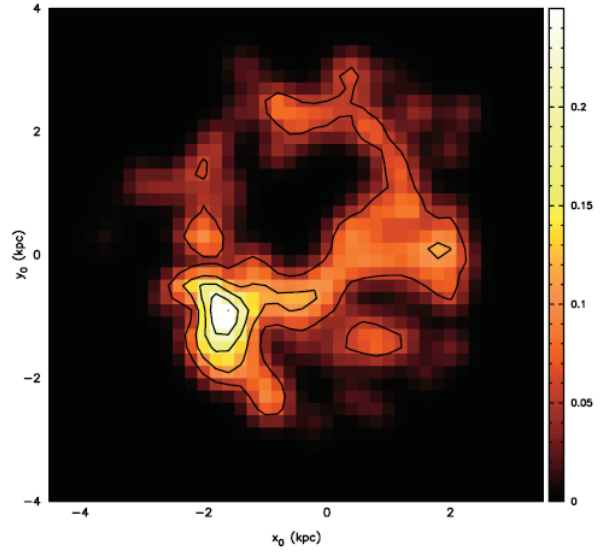
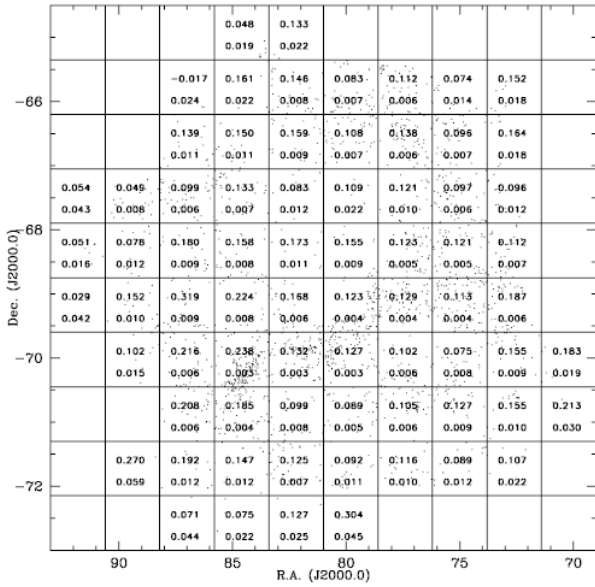
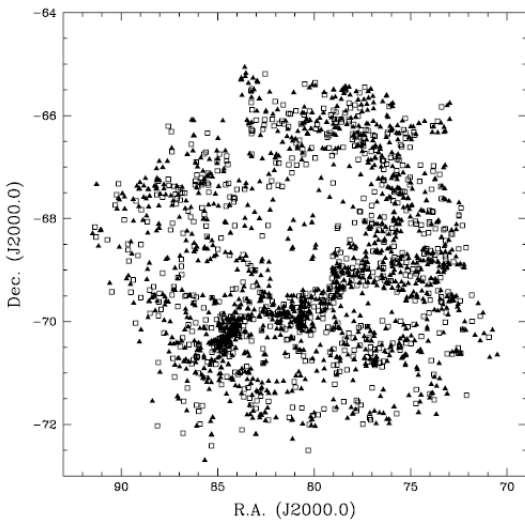
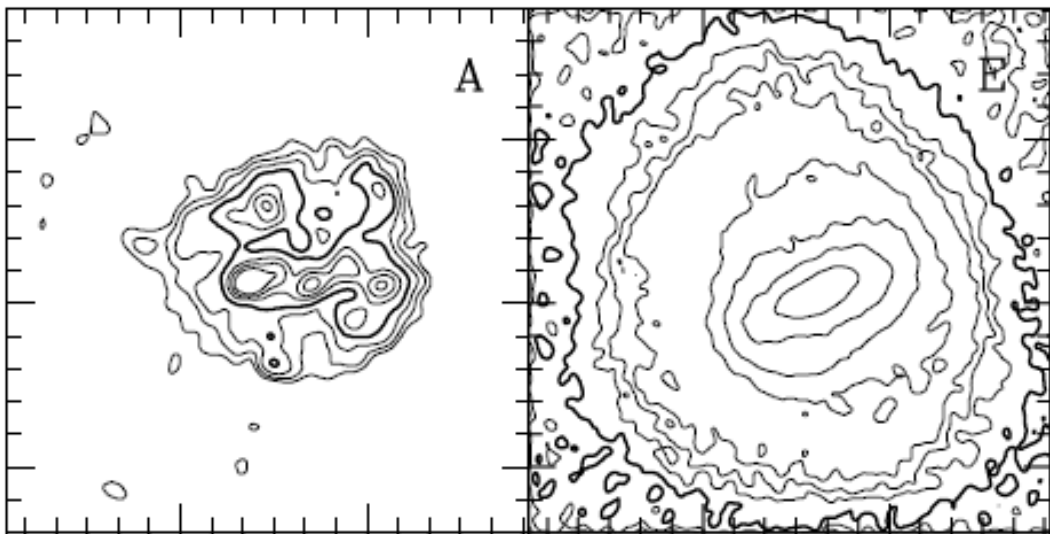


Fig. 9.—*Left*: Reddening distribution for LMC Cepheids. Data are binned on a  $10 \times 10$  coordinate grid. In each bin, we compute weighted averages and standard deviations, using  $E(B - V) = 0.14$ . *Right*: Reddening map of the LMC, derived from Cepheids. To produce the map, we computed average reddening on a  $40 \times 40$  grid in  $(x_0, y_0)$ -coordinates and used Gaussian smoothing with  $\sigma_x = \sigma_y = 1$  kpc. Contour levels are spaced by 0.05 mag. In both panels the high-reddening zone near 30 Dor ( $\alpha \sim 86^\circ$ ,  $\delta \sim -69^\circ$ ) is clearly visible.

上の赤化マップで最もはっきり見えるのは  $\alpha = 86^\circ$ 、 $\delta = -69^\circ$  の30Dor、スーパージャイアントセルLMC2, LMC3を含む領域である。ただし、30Dor自体ではMACHO観測は行なわれていない。



同じくはっきり見えるのは、北西と南東の渦状腕である。  
**本当はどれなんだろう？**  
 Schmidt-Kaller1976, Luks/Rohlfis1992, Schwering1989 をあたった方がよい。  
 左に、この論文の図1セファイド分布、下に Weinberg/Nikolaev 2001 からのグループAの分布を出す。濃さが逆に見えるのが面白い。  
 セファイドとグループAの年齢差かな？



#### 4. 4. 円盤の傾き角

各セファイドの  $\Delta \mu$  を求めた。NE側が近い。



$$z_0, j = Ax_{0,i} + By_{0,i} + C \quad i=1, N$$

で近似する。

Weinberg/Nikolaev 2001の座標系を使う。

$\langle \mu \rangle = 18.5$ を採用。A, Bから $\theta$ と*i*が決まる。

$$\theta = \arctan\left(-\frac{A}{B}\right) + \text{sign}(B) \frac{\pi}{2},$$

$$i = \arccos\left(\frac{1}{\sqrt{1+A^2+B^2}}\right).$$

$(\alpha_0, \delta_0) = (79^\circ.40, -69^\circ.03)$  HIの回転中心

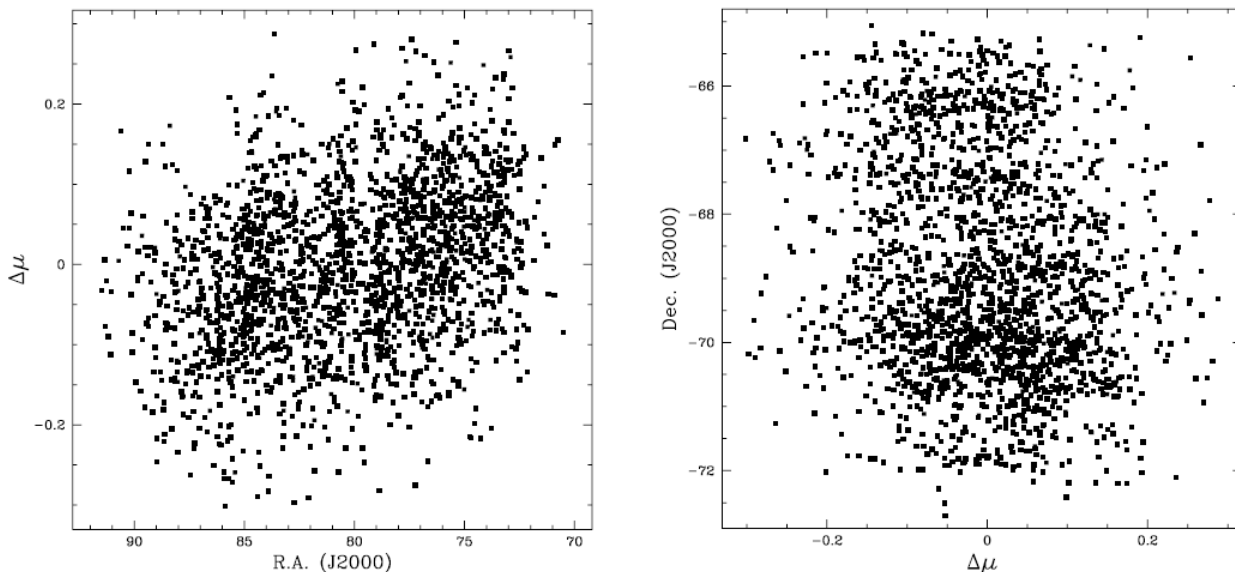


FIG. 10.—Distance moduli (offsets) for individual Cepheids as functions of spatial coordinates. The results for FU and FO Cepheids are combined. The linear drift in magnitudes is clearly visible and corresponds to the main LMC disk. The error bars on the distance moduli are not shown, to make the plot less crowded; the typical error in distance modulus is  $\sim 0.1$  mag.

$$\theta = 151^\circ.0 \pm 2^\circ.4, \quad i = 30^\circ.7 \pm 1^\circ.1.$$

## 5. 議論

### 5. 1. 以前の結果との比較

60平方度でこれだけの数(2000)のセファイドを使った解析は初めてで内部LMC構造の最も精密な研究である。

i     $\theta$

170-190 見かけの軸比

28.6 142.4 73 セファイド Cadwell/Coulson 1986

45 145 21 セファイド(JHK) Laney/Stobie 1986

37 167 ただ、エラーバーが大きい Welch et al 1987

? ? 825 セファイド Groewegen et al 2000

**W=I-1.55(V-I) Wesenheit index(Ext.Free)を用いているが、データがバーに限定されていて傾きに不適切。また、V, IのみでJHKを無視しているのも問題。**

35.4 142 RC Olsen/Salyk 2002

34.7 122.5 C星の modal Mag. Morel/Cioni 2001

129.9 C星の運動 van der Marel 2002

アスペクト比からの位置角が180度付近なのに対し、等級から求めた値は低い。MC01, MえたI02で

は特に低い。

## 5.2. 採用したパラメターの結果への影響

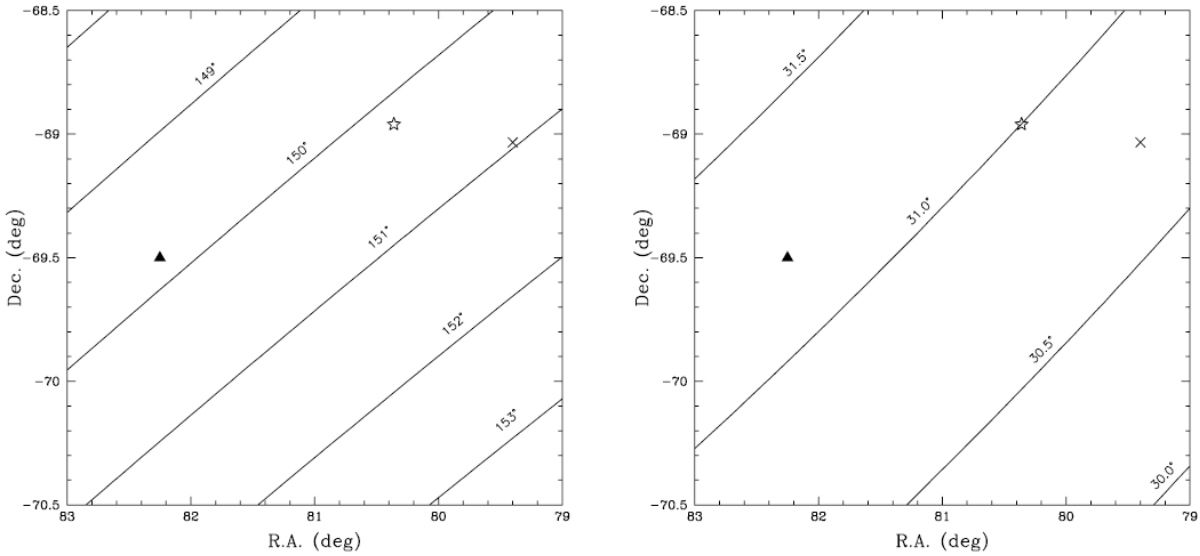
### 座標原点の位置による傾き角への影響

$\alpha$        $\delta$

79.4    -69.03 HI回転中心(Kim et al 1998)

80.4    -69.0    この論文のセファイドサンプルの幾何学的中心

82.25   -69.5    炭素星分布中心(MC01)



原点の違いではMC01の方位角を説明できない。ただ、彼らの同心円の半径は小さい。

MC01の結果を再現するために、同じ同心円を用いた。第1リング(R1)は $R=2.5-3.4$ 度で、そのリングに対する、この論文の4.4節の方法で求めた傾き角の変化を下に示す。

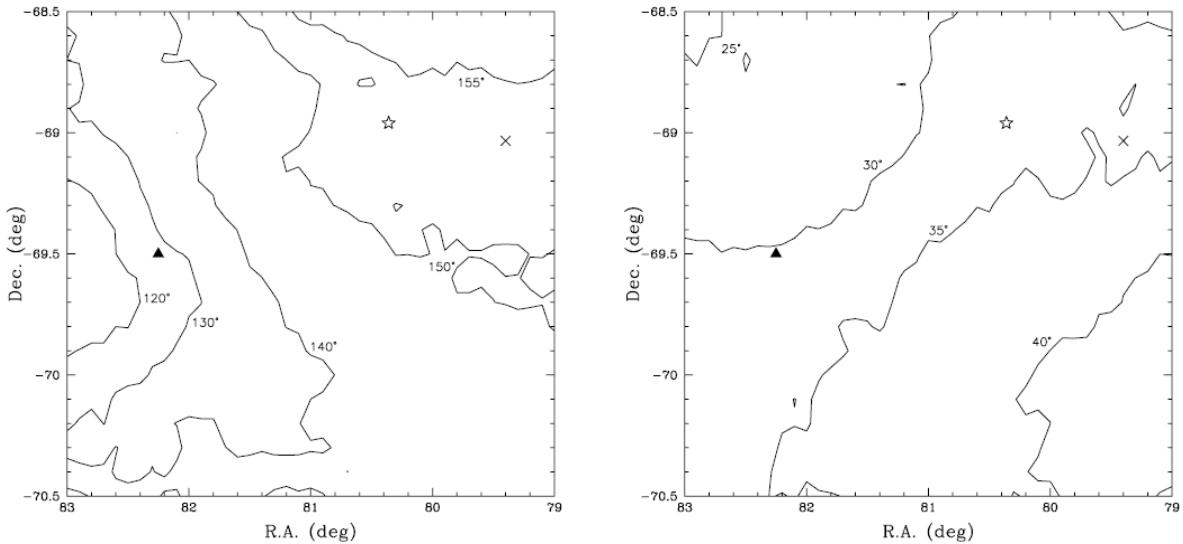


Fig. 12.—Same as Fig. 11, except viewing angles are derived from the ring of stars,  $2.5 < \rho < 3.4$  from the origin. The contour levels are labeled in degrees, and the symbols are as in Fig. 11.

変だと思う。4.4. はあるサンプルの  $\Delta \mu$ 、したがってスケールの大きさは不定だが、から求めた平面  $Z=aX+bY+C$  と座標系との角度を求めている。平面の向き自体は同じはずで、図12のように大きく変化するの不思議。説明はこの後にあった。

図12を見ると、原点が2度ずれると位置角が35度も動く。特に、MC01原点では531星から、 $i=30.6$ ,  $\theta = 127.7$  で近い値が得られた。一方、HI回転中心原点、615星では  $i=34.0$ ,  $\theta = 153.6$  で他の標準的な値に近い。第二リング、 $R=3.4-4.4$ 度ではMC01(323星)で、 $i=26.3$ ,  $\theta = 118.1$ , HI回転中

心(173星)で  $i=22.7$ ,  $\theta = 147.4$  である。

この差の原因は、サンプルの選択効果である。LMC内側が非平面的なことが原因。

下で、(1)HI回転中心R1 (2)MC01中心でR1 (3)平面近似

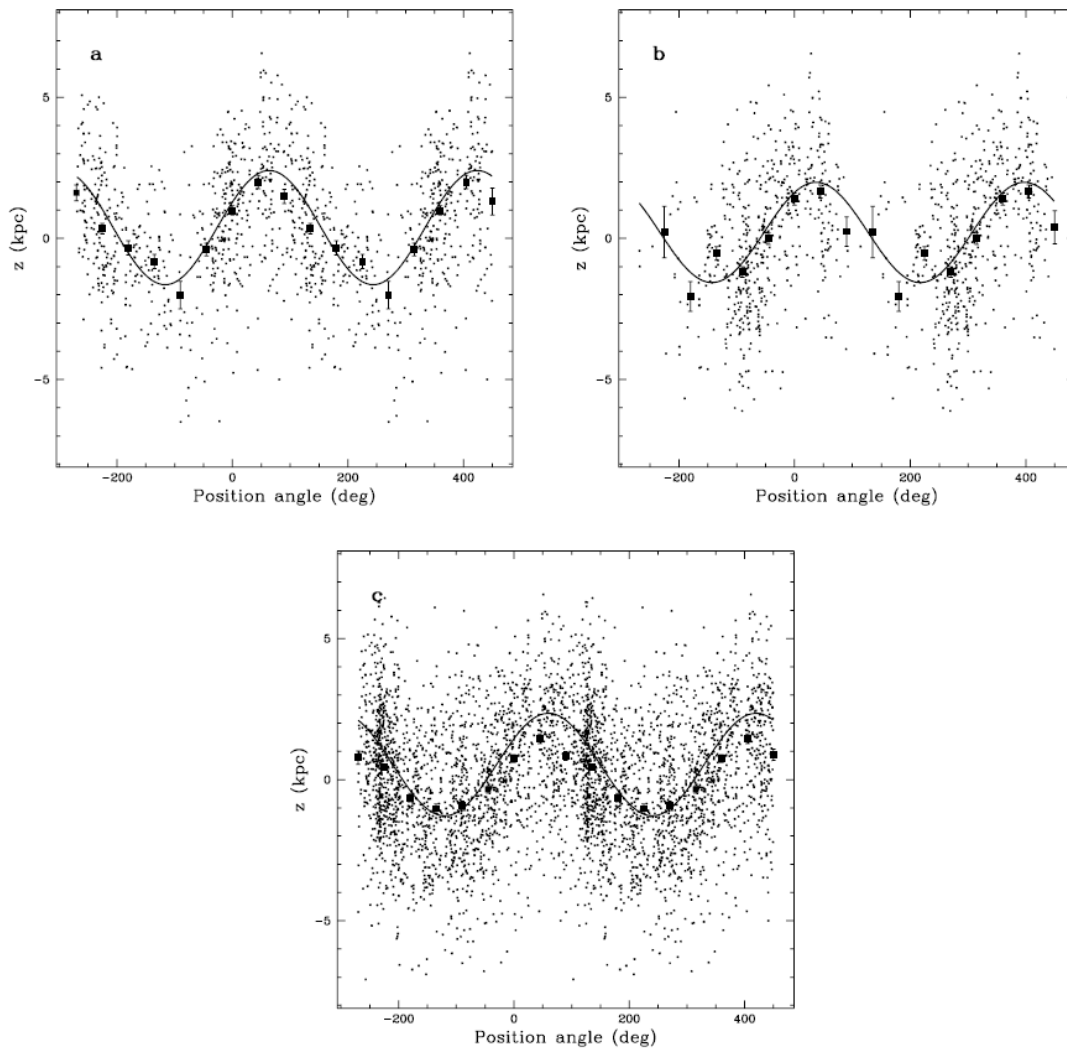


FIG. 13.—Distance offsets ( $z$ -coordinate) and expected signal from inclined disk (*solid line*) for three models: (a) first radial ring and H I rotation center, (b) first radial ring and MC01 center, and (c) full plane and MC01 origin (solution 9 in Table 4). Points with error bars show data binned by  $45^\circ$ , to enhance signal-to-noise ratio. The data in (b) are the subset of data in (c). The  $x$ -axis is position angle in the plane of the sky, increasing counterclockwise from north.

### 5. 3. MC01 との比較

MC01 の9. 1. 節では  $\theta$  が座標原点によらないと述べていた。

サンプル数、精度を考慮するとこちらの方が良い。

### 5. 4. LMC バーは面と並んでいるか？

Zhao/Evans 2000 バーは円盤とずれている。

バー:  $y > 0.5x - 0.8$ ,  $y < 0.5x$ ,  $y > -2x - 5.3$ ,  $y < -2x + 2.7$

バー領域内の553セフィイドを用いて、ノード方向から見た円盤からのズレ分布を調べた。

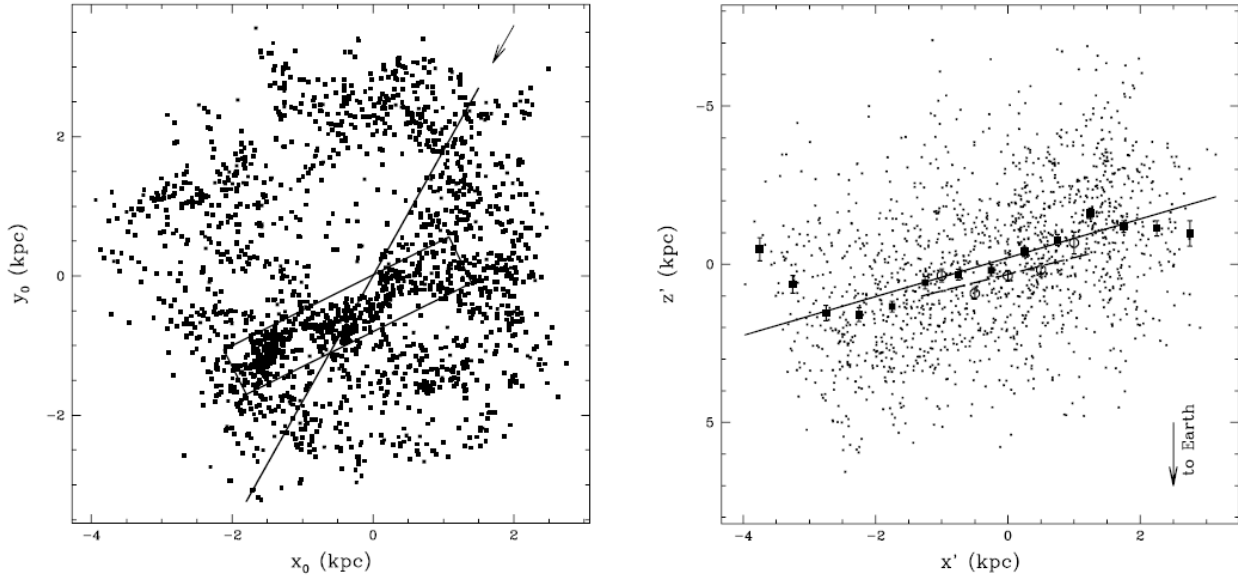


FIG. 14.—Analysis of spatial separation of LMC bar and disk. *Left*: Selection of bar Cepheids (*boxes*) and the adopted line of sight for coordinate transformation. The arrow indicates the line of sight for an imaginary observer, i.e., observer is in the sky plane looking along the line of nodes. *Right*: Distance offsets for all stars (*crosses*) and mean binned offsets for disk (*squares*) and bar (*circles*) Cepheids. The error bars indicate the errors of the binned means (i.e., weighted by number of stars per bin). Straight lines indicate linear least-squares fits to disk data (*solid line*) and bar data (*dashed line*). The offset between the two is  $\sim 0.5$  kpc.

右図を見ると、

1. 円盤は対称的なく1kpcのワープしている。
2. バーは円盤と沿って0.5kpcこちらに近く横たわっている。それぞれを右図でフィットして、

$$z' = -0.614(0.035)x' - 0.205(0.056) \quad (\text{disk}),$$

$$z' = -0.528(0.162)x' + 0.318(0.095) \quad (\text{bar}).$$

## 5. 5. 近似平面からのずれ

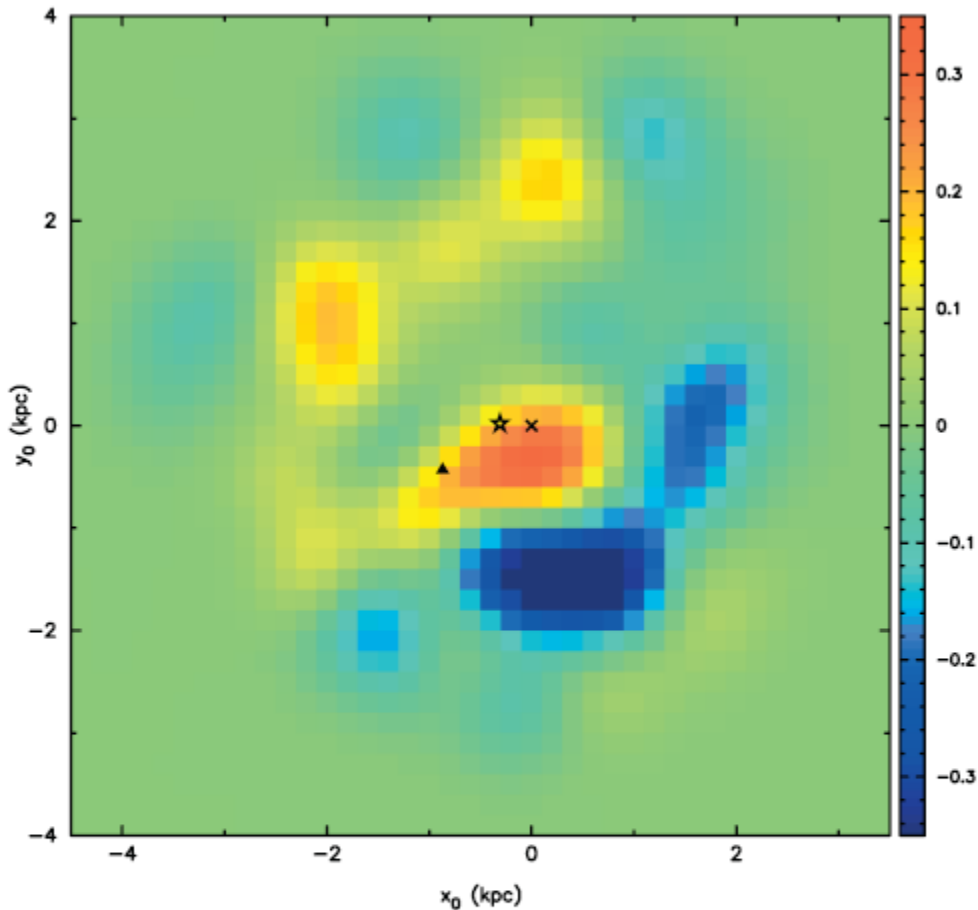


FIG. 15.—Map of residuals from planar solution. The map was obtained by binning residuals, computing variance-weighted average in each bin, and smoothing the resulting distribution with a Gaussian kernel ( $\sigma_x = \sigma_y = 0.4$  kpc). To reduce the noise in the map, we only used bins with number of stars in them greater than 3. Negative (positive) residuals denote material behind (in front of) the fitted plane. The meaning of the symbols is the same as in Fig. 11.

上のズレマップを見ると、バーが手前にあることと、ワープがはっきり判る。  
星が3つ以下のピンはノイズを減らすためゼロにした。

1. 測光ゼロ点の相関が人工的な効果を生む。意味不明！
2.  $\Delta \mu - \Delta E(B-V)$  反相関で、赤化を強く見積もりすぎると、距離を遠くする。  
統計的に処理しているから多分小さいだろう。

#### 6. まとめ

LMC 内側  $\rho < 4^\circ$  セフィイドから、HI 回転中心に対して、 $\theta = 151.0 \pm 2.4$ 、 $i = 30.7 \pm 1.1$   
MC01 のリングは原点位置に影響される。

バーは0.5kpc浮いている

>0.3kpcの対称ワープ

多数のセフィイドが円盤から遠くにある。