

1. Introduction

i =inclination angle θ =position angle of the line of nodes

Westerlund 1997 の表 3.5 に以前の結果がまとめてある。

信頼できる結果に限ってもどちらの角度も25° に渡る。

見かけから決める方法は円盤の固有の形が円形であるという仮定に頼っている。多くの証拠は LMC の真の形がもっと複雑であることを示唆している。

HI のゼロ速度カーブは半径が変わると 20° 動く。

——>円形の円盤を離れてトレーサーの等級を距離指標に使う。

絶対等級は決定困難なので等級差で0. 2-0. 4等に及ぶ相対的な距離比を使う。

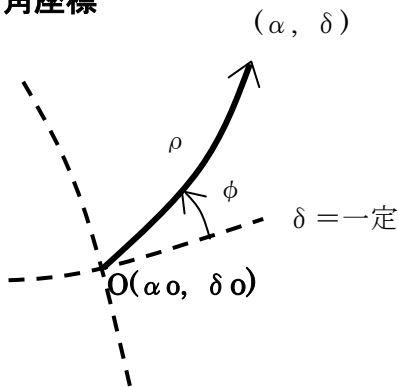
サンプル数はこれまで問題だった(例えばセファイド)が、Zaritsky et al 1997, DENIS, 2MASS などで大規模データが扱えるようになった。

Weinberg/Nikolaev が AGB を用いて角度の決定をざっと行なった。

この論文では AGB、RGB 星がどう見えるかを使って LMC の viewing angles を解析する。

2. モデル

2. 1. 角座標



$$\cos \rho = \cos \delta \cos \delta_0 \cos(\alpha - \alpha_0) + \sin \delta \sin \delta_0$$

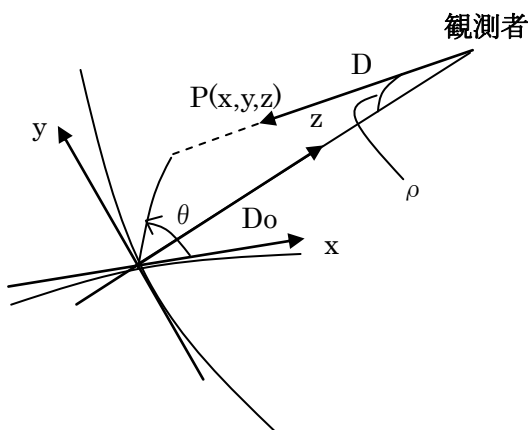
$$\sin \rho \sin \phi = \sin \delta \cos \delta_0 - \cos \delta \sin \delta_0 \cos(\alpha - \alpha_0)$$

$$X(\alpha, \delta) = \rho \cos \phi, \quad Y(\alpha, \delta) = \rho \sin \phi$$

zenith equidistance distant projection

2. 2. 相対距離と等級

(1) 第1直交座標系 (x, y, z)



第1直交座標と角座標の関係

$$x = D \sin \rho \cos \phi$$

$$y = D \sin \rho \sin \phi$$

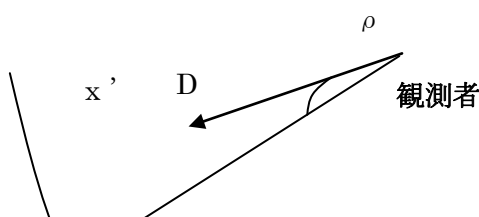
$$z = D_0 - D \cos \rho$$

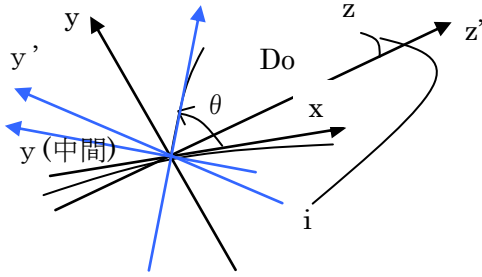
(2) 第2直交座標 (x', y', z')

(x, y, z)をz軸の周りに反時計方向に θ 回す。 θ =the position angle of the line of nodes

次に、x'軸(the line of nodes)の周りに時計方向に i 回す。 $y-$ が遠く、 $y+$ が近づく。

一意性を考えると、 $0^\circ < \theta < 180^\circ$ 、 $0^\circ < i < 180^\circ$ が必要十分。





θ = 等緯度線から測ったノード線の角度、 ϕ = 等緯度線から測った点 P の角度

$$x' = x \sin \theta + y \cos \theta$$

$$y' = -x \sin \theta \cos i + y \cos \theta \cos i - z \sin i$$

$$z = -x \sin \theta \sin i + y \cos \theta \sin i - z \sin i$$

$$x' = D \sin \rho \cos(\phi - \theta)$$

$$y' = D [\sin \rho \cos i \sin(\phi - \theta) + \cos \rho \sin i] - D_0 \sin i$$

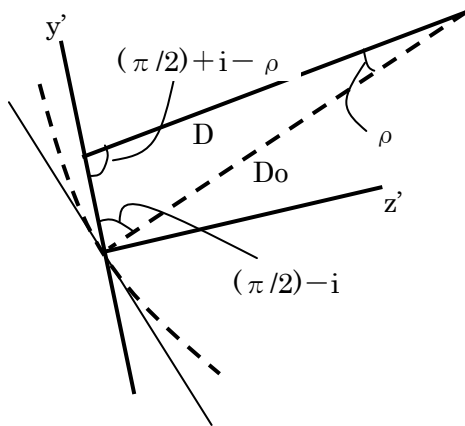
$$z' = D [\sin \rho \sin i \sin(\phi - \theta) - \cos \rho \cos i] + D_0 \cos i$$

関心があるのは (x', y') 平面上の点 (ρ, ϕ) までの距離 D である。上式に $z' = 0$ として、

$$\frac{D}{D_0} = \frac{\cos i}{\cos i \cos \rho - \sin i \sin \rho \sin(\phi - \theta)}$$

(1) ノード線上の点に対しては $\phi = \theta, \theta + \pi$ なので、 $D/D_0 = 1/\cos \rho$

(2) ノード線に垂直な線上の点に対しては $\phi = \theta \pm (\pi/2)$ より、 $D/D_0 = 1/\cos(i \pm \rho)$



$$\frac{D}{D_0} = \frac{\sin(\frac{\pi}{2} - i)}{\sin(\frac{\pi}{2} + i - \rho)} = \frac{\cos i}{\cos(i - \rho)}$$

(3) $\rho \ll 1$ の時は、展開して

$$\frac{D}{D_0} = 1 + \rho \tan i \sin(\phi - \theta)$$

同じ星が (x', y') 面上の2点にあるとき、等級差は

$$\begin{aligned} \mu = m - m_0 &= 5 \log(D/D_0) = (5\pi/180 \ln 10) \cdot \rho \cdot \tan i \cdot \sin(\phi - \theta) \\ &= 0.038 \cdot \rho \cdot \tan i \cdot \sin(\phi - \theta) \end{aligned}$$

ここで、 ρ はどで与えている。 ρ = 一定の円上で μ は

位置角 θ 、振幅 $0.038 \cdot p \cdot \tan i$ のサインカーブとなる。

LMC の星は $p = 10^\circ$ まで、Westerlund1997 は $i=45^\circ$ としている。

2. 3. 方位角

通常使用される方位角 Φ は北から反時計方向に測る。ここでは西から φ をはかるから、両者は

$$\Phi = \varphi - 90^\circ$$

“position angle of the line of the nodes” Φ の一意性を保証するため Westerlund1997 の定義、

$\Phi_{\text{near}} = \Phi - 90^\circ$ は観測者に近いという系を採用する。

3. NIR データから LMC 構造を調べる方法

3. 1. DENIS データ

ここでは主に DENIS-DCMC (Cioni et al 2001) を用いる。これは2, 3バンドで検出された天体を含む。

3. 2. CMD

次ページの図2には、LMC 全領域の CMD を色々なバンドの組み合わせで示した。

パネル右の横線は CIONI2001 で決めた TRGB 等級である。

3. 3. LF の抽出

TRGB を精度良く決めるにはサンプル数が多くなければいけない。

AGB は LF 上にはっきりした不連続は作らない。しかし、ピークを作る。TRGB より精度が高い。

(I, I-J) の組み合わせで AGB の MODE を調べるのが最適と判った。

モードのピーク巾は $\sigma = 0.3$ で、モードの決定精度を調べるために N と σ を変えたガウス分布からランダム抽出を行なうモンテカルロテストを行なった。 $\Delta m = \sigma / \sqrt{N}$ と予想されるが、テストでは

$\Delta m = 1.4 \cdot \sigma / \sqrt{N}$ であった。

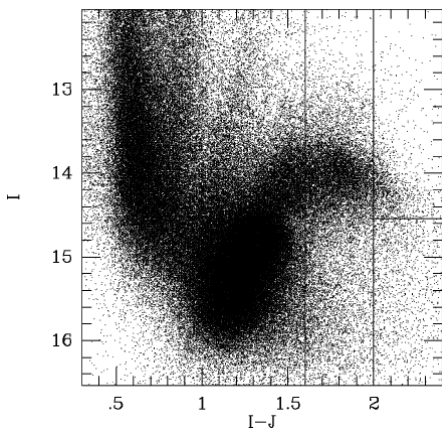


図2-a AGB モードサンプル領域

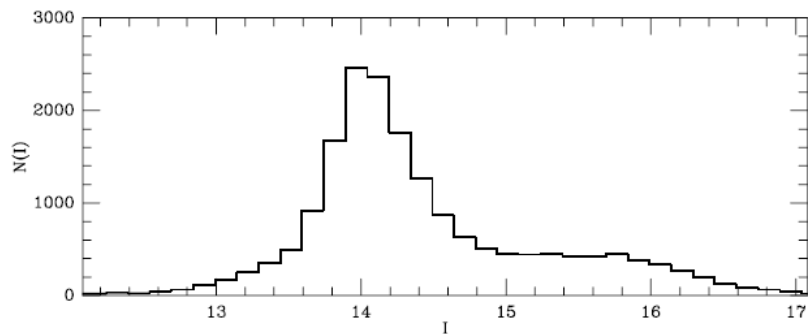


図3 サンプルビン=0.15等。ガウス巾 $\sigma = 0.3$

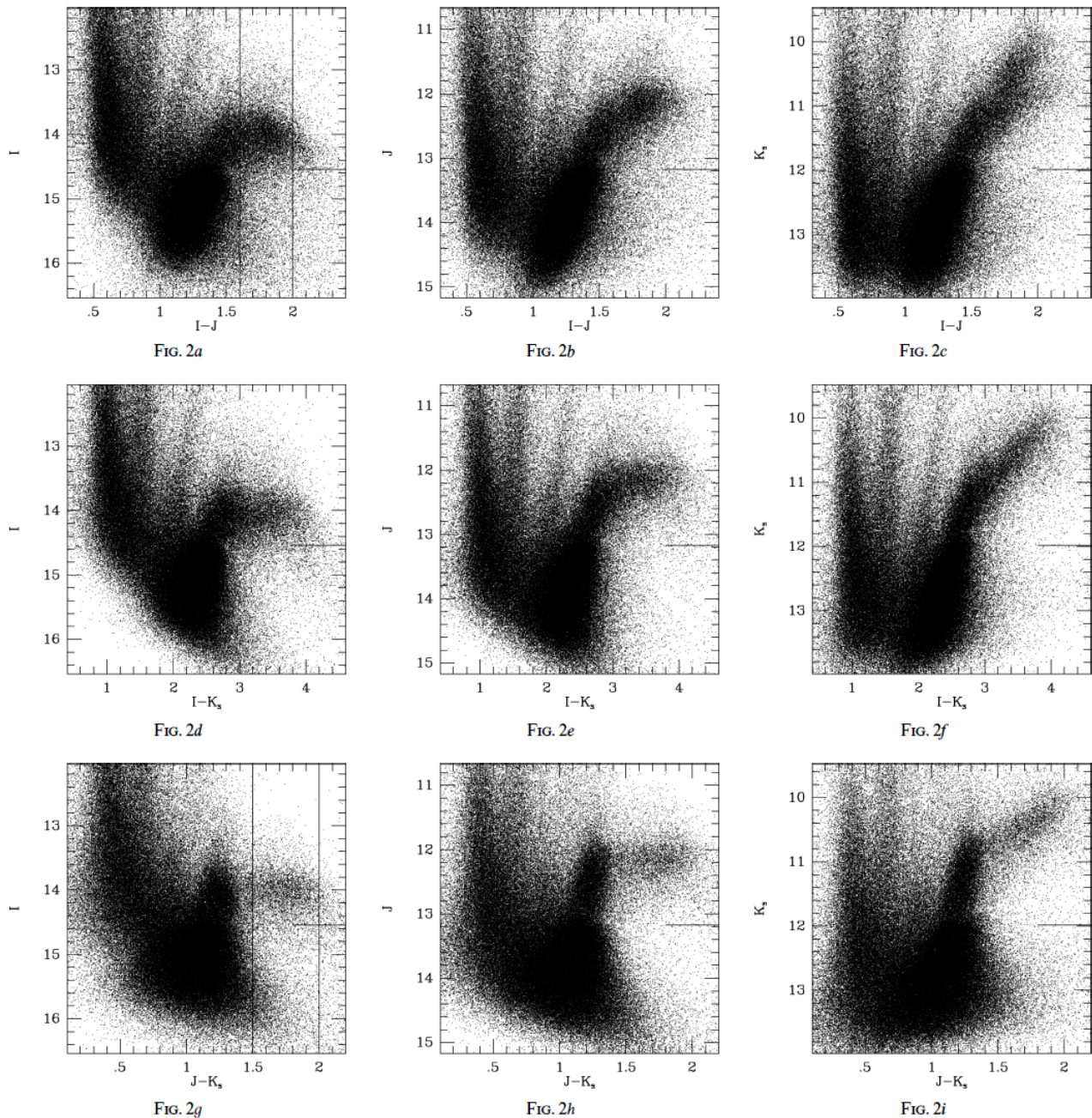


図2 色々な組み合わせの CMD。 LMC 全体 **VERC** が下の 3 図でははっきりしないのはなぜ？

J も等級が安定している

3. 4. AGB LF の解析

LMC をセクションに分けて、各セクションで LF ピークをガウスフィットした。ピークが非対称なのでシステムティックエラーの可能性はあるが、相対距離を問題にしているので M に対する一定のバイアスは許容される。

セクション数で N が変わるが、10セクションでは $\Delta m = 0.011$ 、100セクションで $\Delta m = 0.036$

4. データ・モデル比較の定式化

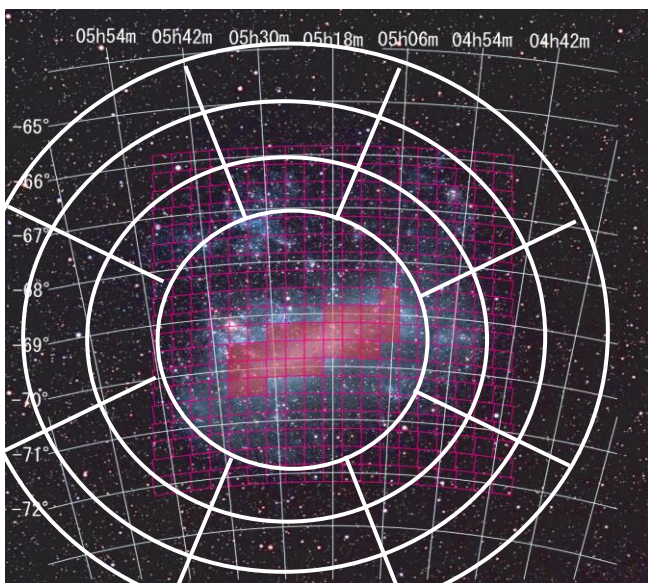
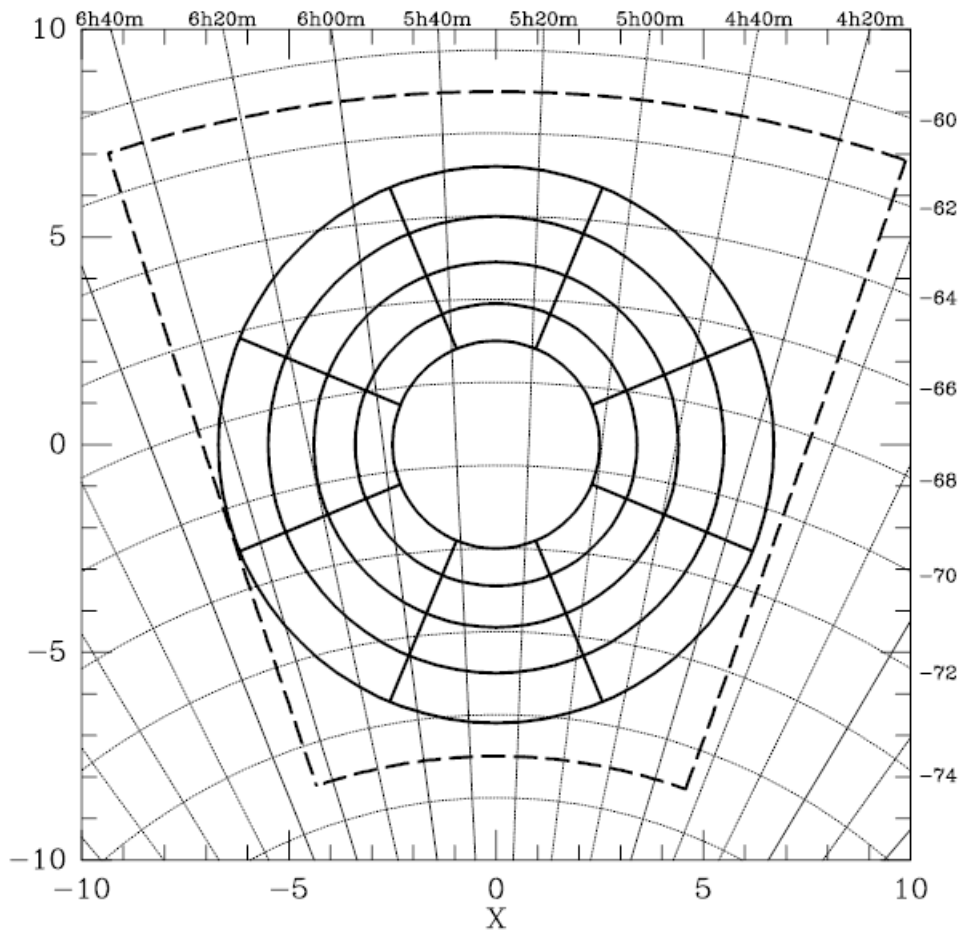
4. 1. グリッド

中央部の構造、バーと 30Dor は以下の問題がある。 → $\rho > 2.5$ 度のみを扱う。

バー： 中心から 0.5 度ずれ (Westerlund 1997)、円盤面ともずれる (Zhao/Evans 2000)。

30Dor： 強い UV 源なのに HI に変化がない (Luks/Rohlf 1992)

電波の運動 L 成分のセンターだが、円盤の向こう側にある。(Dickey et al 1994)



IRSF サーベイは CIONI が内側として排除した領域と言えるくらいだ。

$\Delta \Phi = 4.5^\circ$ 、 ρ (度) = (2.5 - 3.4 - 4.4 - 5.5 - 6.7)

$O = (5h29m, -69.5^\circ)$ = DCMC の outer isopleths の中心。

4. 2. ベストフィットモデル

$\mu_{\ln}(i, \Theta) = \ln$ グリッドのモデル等級変化

m_0 = 円盤中心でのみかけ等級。フィットで決まる値。

$$\mu_{\ln}(i, \Theta) + m_0 = m_{\ln} + \Delta m_{\ln}$$

$$\chi^2 = \sum_{l=1}^L \sum_{n=1}^N \left[\frac{m_{\ln} - \mu_{\ln}(i, \Theta) - m_0}{\Delta m_{\ln}} \right]^2 \text{ の極小を探す。}$$

5. I-バンドの結果

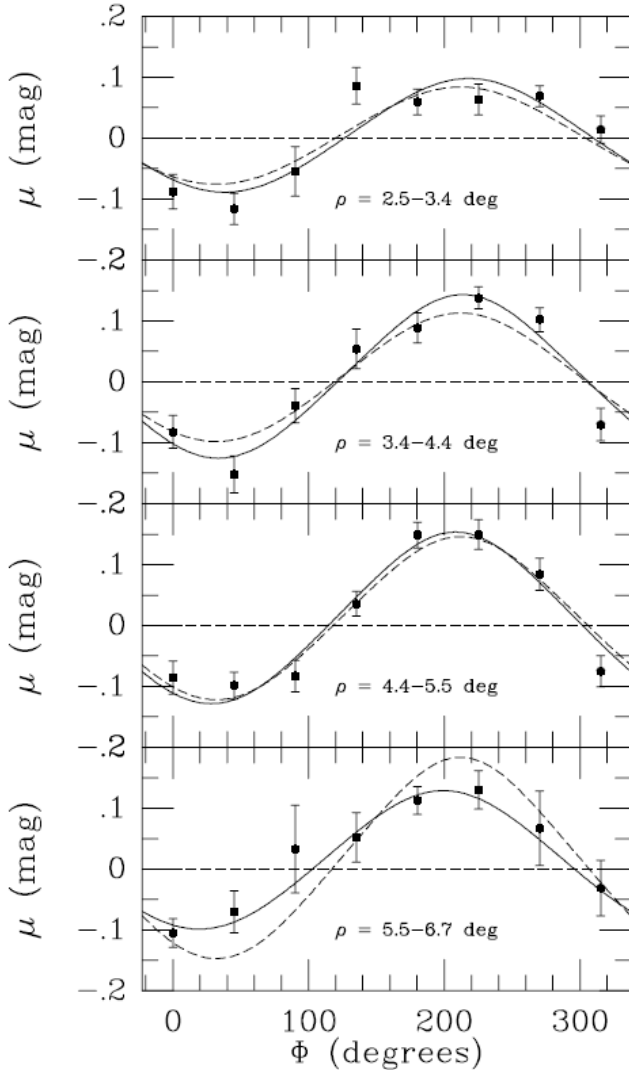


図5には、4本のリング状でのIバンドLFモードの変化 μ を示す。

鎖線は (i, Θ) が全 ρ で共通。

不変傾斜モデル

$$\chi^2 = 48.9$$

$$i = 36.5^\circ \pm 1.5^\circ$$

$$\Theta = 121.9^\circ \pm 3.3^\circ$$

エラーはガウスランダムエラーを仮定して、 $\Delta \chi^2 = 1$ から決めた。

エラーはガウスランダムエラーを仮定して、 $\Delta \chi^2 = 1$ から決めた。

実線は各 ρ 毎に最適 (i, Φ) 。

変動傾斜モデル

$$\chi^2 = 30.1$$

6. バンドとカラーの影響

観測された変化が円盤の傾きに由るならば、他のCMD特長、他のバンドで共通の変化が現れるはず。

バンドに由る違いを見るために、以下を計算。カラー選択しているのでA,Bは部分的に相関がある。

$$\chi_{AB}^2 \equiv \sum_{l=1}^L \sum_{n=1}^N \frac{(\mu_{A,\ln} - \mu_{B,\ln})^2}{\Delta \mu_{A,\ln}^2 + \Delta \mu_{B,\ln}^2}$$

$$\chi_{IJ}^2 = 3.5 \quad \chi_{IK}^2 = 7.4 \quad \chi_{JKJ}^2 = 1.7$$

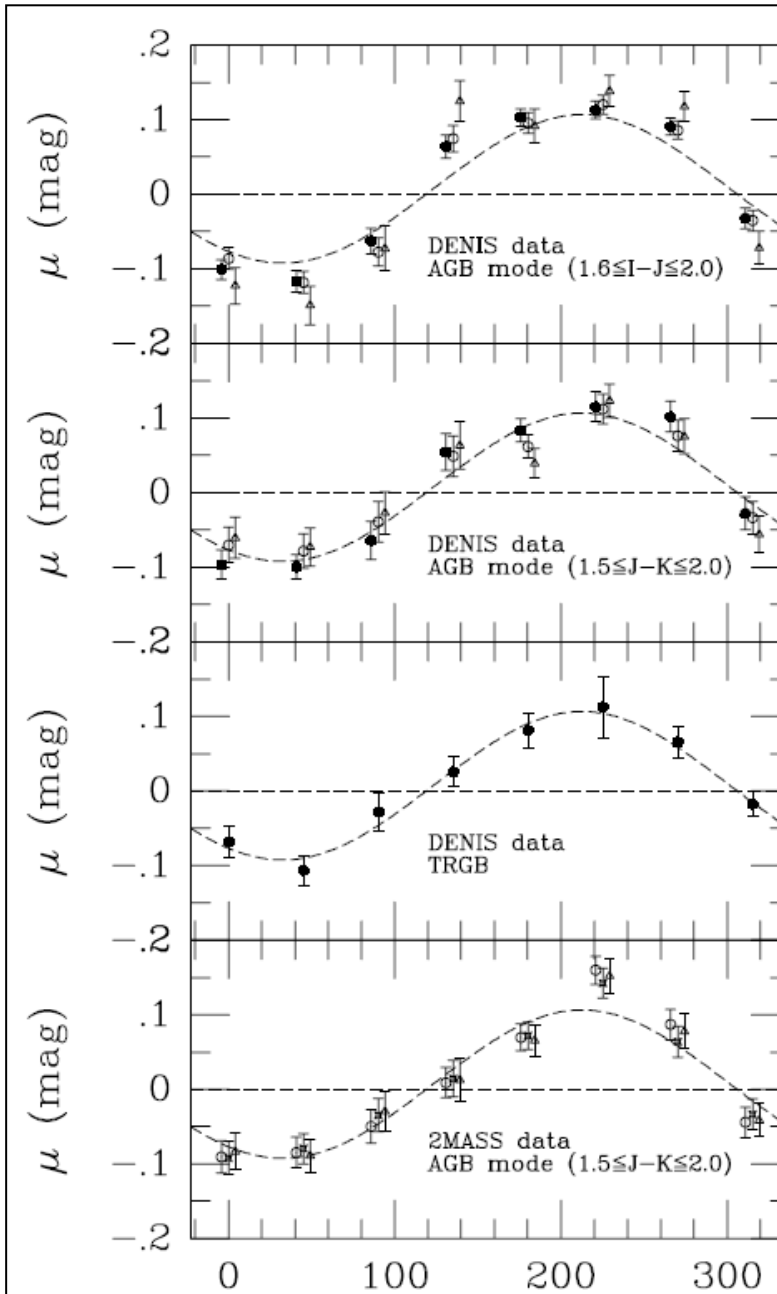


図6 $2.5 < \rho < 6.7$ に対し、

●=I, ○=J, △=K

1 : AGB モード $1.6 < I-J < 2$

2 : AGB モード $1.5 < J-K < 2$

3 : TRGB

4 : 2MASS AGB モード

$1.5 < J-K < 2$

□=H(2MASS)

鎖線は皆同じで

I=34.7, $\Theta = 122.5$ モデル

図6で最も大事な結果は、I-JとJ-Kという二つのカラー選択からの結果が一致したことである。

7. TRGB 解析

TRGB の決定精度が AGB モードより大きいので有用性は少し落ちる。チェックには使える。

銀河系の影響はオフセット位置でのデータを差し引いて除いた。

8. 動径方向の変化

$$\mu_{in}(i, \Theta) + m_0 = m_{in} + \Delta m_{in}$$

m_0 = 円盤中心でのみかけ等級。フィットで決まる値。

なので、 m_0 の動径変化が気になる。

$\langle m_0 \rangle$ = 全リングの m_0 平均 として、

$m_0 - \langle m_0 \rangle$ を I, J, K バンドで調べた。

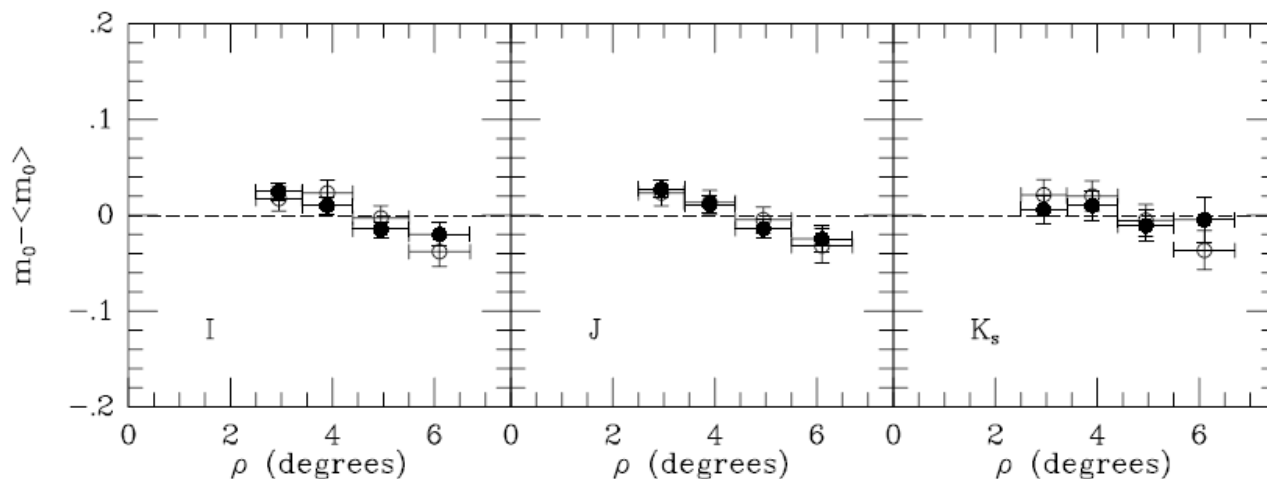


図7 $m_0 - \langle m_0 \rangle$ の動径変化

(1) $|m_0 - \langle m_0 \rangle| < 0.03$ (2) 小さいが確かに、周辺部の星が明るい。

9. モデルの仮定の影響

9. 1. LMC 中心の位置

(I, θ)には影響ない

9. 2. 面密度分布の形

(I, θ)には影響少ない

9. 3. 平面的構造の影響

LMC が面的であることには、以下の様々な証拠がある。

1) Vr の分散が小さい。

2) PLR の分散が小さい

3) HI の運動

4)他の Magellanic Irr.が横向きの際にスケールハイト小さい

厚みが増すと等級変化の振幅は平面の時より小さくなる。

9. 4. ダスト吸収

Zaritsky 1999 によると LMC の星間減光は典型的には $A_v = 0.4$ 、強いところで $A_v = 1.0$

Schweing 1989 は空間変動が大きいと報告した。

——> CMD 特徴の変動は傾きよりダスト吸収の研究にならないか？

しかし、

1) セクションが 2 平方度以上あり細かい変化はならされる

2) NIR では減光自体が小さい

ので傾き効果のほうが大きい。

ただ、 m_0 の動径方向の変化 0.04 等は中心近くと周辺部での吸収の差が原因かも？

9. 5. 年齢、金属量

あり得るが、とにかく何でも 0.04 等以内にフィットしてるんだから、効果はそれ以下。

9. 6. システムティックエラー

小さい。

9. 7. 前景と背景の星

前景銀河系の星はカラー選択で大きく減る。

背景銀河は大体暗いのでやはり落ちる。

10. ワープとねじれ

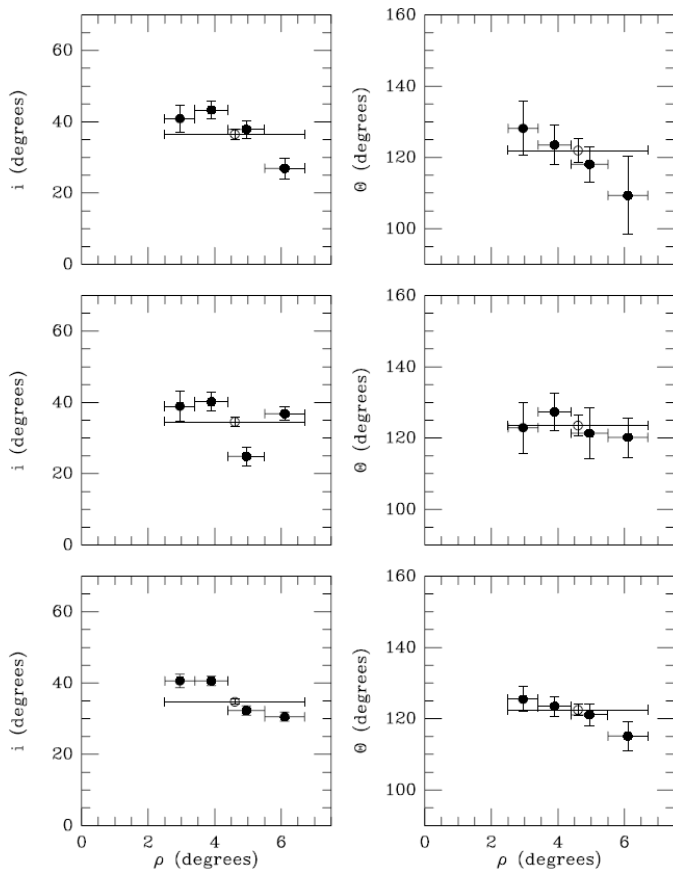


図8 傾き角 i とノード線方位角 Θ の中心距離 ρ による変化

上段：Iバンド AGB モード (DENIS)
中段：J,H,K の AGB モード (2MASS)
下段：全体でのフィット

i も Θ も遠ざかると小さくなる。これはワープと考えると理解できる。

左下の図を見ると $\rho = 4.4$ 度を境に $i = 40$ 度から 31 度へ急落している。 Θ は 125 度から 115 度へとゆっくり低下している。システムティックエラーも幾分効いているかも知れないが、ワープは自然な解釈である。もう一つの解釈は厚みが周辺ほど増えて、その結果 i が下がるというものである。

11. 以前の結果との比較

I のまとめは Westerlund 1997 の表 3. 5 にある。 $i = 25-45^\circ$ 、 $\Theta = 140-190^\circ$

ここで出した i はいいが、 Θ が過去と違う。

11. 1. Photometric Circular Disk Model

固有形状 = 真円と考え、形から傾き角と向きを決める。

1) 等輝度線 De Vaucouleurs/Freeman 1973, Bothun/Thompson 1988, Schmidt/Gochermann 1992

2) 星密度 Weinberg/Nikolaev 2001, 星団密度 Lynga/Westerlund 1963, Kontizas et al 1990,

HII R Feitzinger et al 1977

3) HI, 連続波 McGee/Milton 1966, Kim et al 1998 Alvarez et al 1987

これらの結果は概ね $\Theta = 160-190^\circ$ で今回と違う。これはむしろ対称軸の方向に関する情報を与えていると考えるべきである。

1 1. 2. Kinematic Circular Disk Model

HI Rohlfs et al 1984, Luks/Rohlfs 1992, Kim et al 1998

星団 Freeman et al 1983, Schommer et al 1992,

PN Meatheringham et al 1988

HIIR Feitzinger et al 1977

C 星 Kunkel et al 1997, Graff et al 2000, Alves/Nelson 2000

i は $\sin i$ と回転曲線が縮退するので決めにくい

ここでも円形でないと V_r 最大の方向とノードの方向はずれる。

1 1. 3. The Relative Distance Variation Method (Cepheids)

Cadwell/Coulson 1986 73 星 —> $i=29$ 度、 $\Theta = 142$ 度

Laney/Stobie 1986, NIR 14 星 $i=45$, $\Theta = 145$

Welch et al 1987 NIR 23 星 $i=37$, $\Theta = 167$

最近の MACHO, EROS, OGLE などで Cepheid が 1000 個くらい見つかった。

ただし、中心近くバーに沿っていて円盤の傾きを出すには向かない。

Groenewegen 2000 OGLE セファイドを使用。ノード位置角はセファイド分布長軸と垂直な方向で決定。

何で垂直なんだ？

とにかくそうやって、つまりバーの方向 $+90$ 度 $= \Theta = 206^\circ$

i はノードに垂直、つまりバーに沿ってセファイド等級変化を調べて $i=18^\circ$ と決めた。

しかし、彼の Θ の決め方に何の物理的根拠もない。

1 1. 4. The Relative Distance Variation Method (2MASS AGB)

Weinberg/Nikolaev 2001 2MASS AGB $1.6 < J-K < 1.7$ 数が足りない。領域が大きい。領域数小さい。

μ は NS に変化なく、EW に変化大

—> $\Theta = 170^\circ$ (彼らが星分布から出した値) と矛盾しない。

本論文と異なる。統計が不十分なためである。

1 2. LMC までの距離

SN1987A Panagia et al 1991, McCall 1993

HV982 Fitzpatrick et al 2001

HV2274 Nelson et al 2000

1 3. 結論

OK