

気球による銀河系中心部の観測

早川 幸男*・小泉 裕*・松本 敏雄*・村上 浩*
宇山喜一郎・山上 隆正・J. A. Thomas**

(1981年9月4日受理)

概 要

1980年4月、オーストラリアにおいて、気球搭載の望遠鏡を使い銀河系中心部の近赤外観測を行なった。今日の観測は、以前の我々の観測に比べて狭い視野の検出器を用い、波長 $2.4\ \mu\text{m}$ と $3.4\ \mu\text{m}$ の2色のデータを得ることができた。その結果から $|l| \leq 15^\circ$, $|b| \leq 10^\circ$ の領域で波長 $2.4\ \mu\text{m}$ の空間分解能 0.8° と 0.6° の Contour Map 及び波長 $3.4\ \mu\text{m}$ の空間分解能 0.8° の Contour Map を描くことができた。バルジは中心部付近では銀河面に沿ってくびれ、中心には鋭いピークが存在している。また銀河面上は、赤外線源の分布と星間塵による吸収むらの影響を受け小さな凹凸の見られる複雑な Contour Map になっている。この小さなハンプのいくつかは太陽近傍のH II領域と対応がついた。また、銀河面上での星間吸収量が2波長での観測が求められた。

1. 序

我々は、1976年の観測(早川 et al, 1977)から、波長 $2.4\ \mu\text{m}$ 、視野 2° 口の検知器による銀河系中心部の Contour Map を得た。この観測からバルジとディスクの2成分を分離し、途中の星間塵による吸収を補正してバルジの本来の構造が得られた。その結果、バルジは r 1/4法則(de Vaucouleur, 1958)には合わず、質量光度比を一定と仮定した Miyamoto モデル(Miyamoto and Nagai, 1975)で説明することができた。しかし、1976年のデータは、視野 2° 口による観測のため中心部の詳細な構造は得られず、また星間塵による吸収量は、電波観測で得られたガス分布をもとに、ガスと塵の比から求めたものであった。今回の観測では、視野 0.8° と 0.6° の検知器を使い、波長 $2.4\ \mu\text{m}$ の詳細な

* 名古屋大学理学部

** メルボルン大学

Contour Map と、銀河面付近の波長 $3.4 \mu m$ の Contour Map が得られ、誤差が大きいながら、星間塵による吸収量を直接求めることができた。以下、観測結果と吸収量について報告する。

2. 観 測

a) 観測装置

図1は望遠鏡を搭載しているゴンドラの全体図である。ジュラルミン製のゴンドラは、上部フレームと下部フレームに分けることができる。上部フレームは、液体窒素タンクで囲まれた望遠鏡内籠を支え、この内籠の仰角は、駆動モーターを使って約 20° から約 50° まで任意に変えることができる。光学系は、口径 150 mm 、 $F/1$ のシリコン製二枚組レンズを持つ屈折望遠鏡で、このレンズで集光された光は、干渉フィルターを通して焦点面上にある検知器に像を結ぶ。使用した干渉フィルターと検知器の諸元は、表1にまとめてある。望遠鏡全体は、検知器も含め液体窒素で冷却されており、望遠鏡の熱輻射と検知器の熱雑音を減少させている。表1の第3欄には、各検知器の設計上の視野と、観測中に測定した実際の視野が比較してある。検知器D1及びD2では、ほぼ設計どおり 0.8° の視野を得ることができたが、D3及びD4では、冷却によるレンズの歪などで、像が検知器の受光面より広がり、実際の視野は 0.6° になった。また今回の観測では、入射光をチョッピングして同期検波する方法は採用せず、検知器の出力を直流増幅する方法を用いた。この方法では入射光量は2倍の得になるが、検知器の出力は温度変化を直接受けることになる。しかし、観測中に冷却望遠鏡の温度変化はほとんどなく、4つの検知器の出力には大きなドリフトは見られなかった。このほか、望遠鏡内籠にはスターカメラと傾斜計が同架されており、上部フレームには、地磁気センサーが取り付けられている。これらの装置は、気球の姿勢を決定するのに

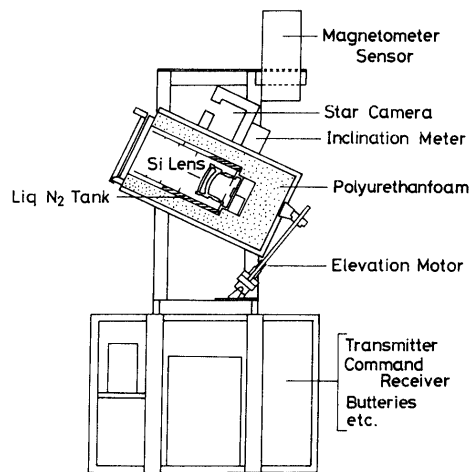


図1 気球搭載赤外線望遠鏡

表1. 検知器及びフィルター

N 0	検知器		干渉フィルター		夜光のゆらぎによる観測限界 $\times 10^{-11} \text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$
	受光面 (mm)	F.O.V (degree) 設計 実測	中心波長 $\lambda (\mu\text{m})$	バンド幅 $\Delta\lambda (\mu\text{m})$	
D 1	2 ϕ	0° 8 ϕ 0° 9 ϕ	3.38	0.14	± 5
D 2	2 ϕ	0° 8 ϕ 0° 9 ϕ	2.38	0.09	± 2
D 3	1 ϕ	0° 4 ϕ 0° 6 ϕ	2.38	0.09	± 2
D 4	1 ϕ	0° 4 ϕ 0° 6 ϕ	2.38	0.09	± 2

使われる。下部フレーム内には、検知器のメインアンプ、バラスト、テレメーターが搭載されており、メインアンプで増幅された各種信号は、テレメーターを通して気球基地へ送信される。

このゴンドラ全体は、方位角方向の回転を制御する“気球よりもどし姿勢制御装置”を通して気嚢に吊り下げられており、この装置と内籠の駆動モーターで経緯台を構成している。観測方法は、仰角を一定に保ったまま“よりもどし装置”で方位角方向のスキャンを行なう。天球の回転により観測対象が移動するので、1時間から2時間ごとに仰角を変えて、同じ観測領域をスキャンし続けることができる。スキャン中の気球望遠鏡の姿勢は、地磁気センサーと内籠の仰角から0.25秒おきに計算できる。その他、スターカメラは、 $f/135 \text{ mm}$ 、 $F/2.8$ のレンズを持ち、画角 7.3×10.2 の星野写真を1分間に2枚の割合で自動的に撮影する。また傾斜計は、内籠の仰角を、 30° を中心に $\pm 15^\circ$ の範囲で読み出すことができ、2つの装置は姿勢決定に補助的に使用した。

気球のフライトは、1980年4月2日と4月13日の2回 Australian Balloon Launching Station (東経 $141^\circ 15'$ 、南緯 $34^\circ 14'$: Mildura, Victoria, Australia) から行なわれた。以下、4月2日と4月13日の観測をそれぞれ観測1、観測2とする。両フライトとも装置はほぼ正常に作動し、銀河系中心部と大、小マゼラン雲を観測することができた。観測1と2の観測時間と観測対象は、表2にまとめている。両観測で表面測光が行なわれた中心部は、 $|l| \leq 15^\circ$ 、 $|b| \leq 15^\circ$ の領域である。観測1は、観測2と比較してスキャン回数は多いが、スキャン幅は小さく、 S/N 比もやや悪くなっている。そのため、以下の解析結果はおもに観測2のデータをもとにしている。気球望遠鏡の姿勢は、前述の方法を用い、観測中に

表2. 観測概要

	観測対象	スキャン数	観測時間
観測1	銀河系中心	60	4時間30分
	小マゼラン星雲	20	2時間20分
観測2	大マゼラン星雲	32	4時間
	銀河系中心	35	4時間10分

望遠鏡に受かる比較的明るい星で補正を行なった。30分から1時間ごとに明るい星が受かったので、星野写真の解析をしなくても姿勢は充分精度良く決定できた。各検知器の天球上でのスキャンパスの誤差は、視野 0.8° のD1, D2検出器で $\pm 12'$ 、視野 0.6° のD3及びD4検出器で $\pm 6'$ となっている。また星野写真の解析から、ゴンドラ全体は、方向角方向のスキャンのほかに微小な振動を伴うことがわかった。この振動は、周期3秒、振幅 $3'$ 程度で、全観測にわたって見られた。この微小振動は“よりもどし装置”の安定性の限界と思われる。各検知器の出力の絶対値は、各観測ごとに複数個の標準星を観測して決定した。

表3に、各観測ごとに使用した標準星と、波長 $2.4\mu m$ と $3.4\mu m$ の輻射流束を示してある。

表3 標準星と輻射流束

標準星	観測	輻射流束	
		$2.38\mu m$ ($\times 10^{-13} W \cdot cm^{-2} \cdot \mu m^{-1}$)	$3.38\mu m$ ($\times 10^{-14} W \cdot cm^{-2} \cdot \mu m^{-1}$)
α cen A	1	1.2	3.2
α cen B	1	0.52	1.4
α sco	1	1.2	3.5
ϵ sco	1	3.9	1.1
η sgr	1及び2	1.3	3.8
α Her	2	7.7	2.3

この輻射流束は、Thomas et al (1973)による南天赤外標準星のKバンド($2.2\mu m$)及びLバンド($3.4\mu m$)の測光から内挿して求めた。各観測で別々に決定した絶対値は、10%程度違っているが、観測2の絶対値の方が信頼性が高いので、こちらを基準にした。また観測2の $2.4\mu m$ の視野の異なる検知器間にも絶対値の差があり、D2検知器はD3及びD4検知器と比較して20%絶対値が高くなっている。この原因は、おもに各検知器の視野の決定に伴う誤差によると考えられるので、誤差の少ないD2検知器の絶対値を基準にし、D3及びD4検知器の絶対値を1.2倍してある。Contour Mapの表面輝度の誤差は、波長 $2.4\mu m$ 、 $3.4\mu m$ ともに $\pm 10\%$ 程度あると考えられる。

検知器の出力のノイズは、検知器自体によるものと、夜光の時間的・空間的な変動によるものがある。検知器のノイズは、各検知器ごとの差はあるが、約 $\pm 1 \sim 2 \times 10^{-11} W \cdot cm^{-2} \cdot \mu m^{-1} \cdot sr$ である。これは表1の第6欄に示した夜光のゆらぎより小さく、観測誤差は夜光のゆらぎで決まってくる。波長 $2.4\mu m$ でのゆらぎは、銀河の成分と比較して充分小さいが、波長 $3.4\mu m$ では大きく、夜光のレベルの引き方で得られるContour Mapが多少異なってくる。

b) 観測結果

図2は、観測2の波長 $2.4\mu m$ 、視野 0.8° のContour Mapで、銀河面を 0.33° のメッ

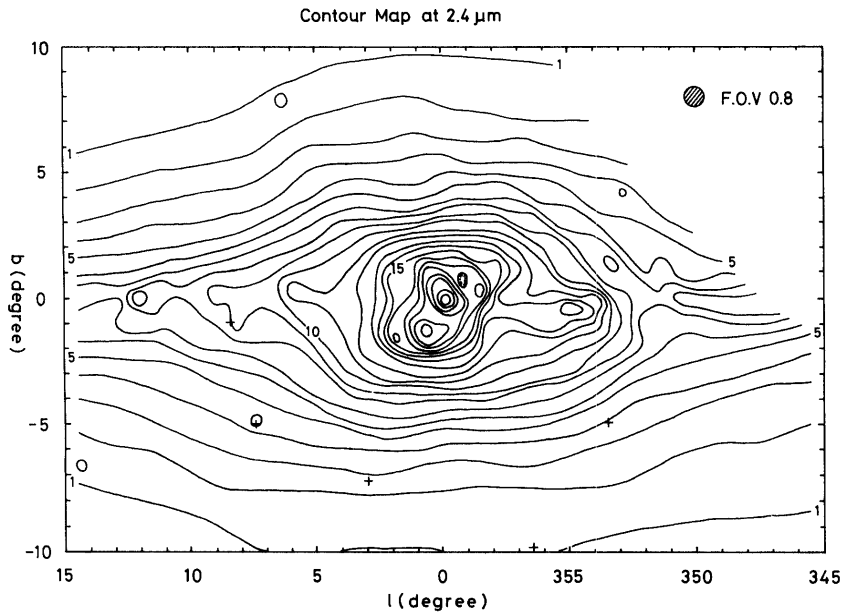


図2. 波長 $2.4 \mu\text{m}$, 視野 0.8° の Contour Map. Contour Level は $1 \times 10^{-10} \text{Wcm}^{-2} \mu\text{m}^{-1} \text{sr}^{-1}$ ことの表面輝度をあらわす。+印はKバンドで0等より明るい星をプロットしたものである。中心の表面輝度は $2.2 \times 10^{-9} \text{Wcm}^{-2} \mu\text{m}^{-1} \text{sr}^{-1}$ である。

シュに分け、スキャンパスに沿って各メッシュごとに検知器の出力を平均して表面輝度を計算してある。スキャンパスは、平均 0.9° おきに銀河面を横切っている。各 Contour Level に付けた数値は、 $1 \times 10^{-10} \text{Wcm}^{-2} \mu\text{m}^{-1} \text{sr}^{-1}$ 単位の表面輝度を表わし、図中の '+' 印は Two-MICRON SKY SURVEY A PRELIMINARY CATALOG (Neugebauer and Leighton 1969) から、Kバンドで0等より明るい星をプロットしたものである。図3は、波長 $2.4 \mu\text{m}$ 視野 0.6° の Contour Map で、観測2のデータを基本に観測1のデータの一部を加えてある。図3のメッシュは 0.2° で、スキャンパスは平均 0.5° おき、中心部ではもっと密に銀河面を横切っている。各 Contour Level と '+' 印は、図2と同じで、Contour Map のところどころに見られる同心円状の構造は、明るい星の影響である。図4は、波長 $3.4 \mu\text{m}$, 視野 0.8° の Contour Map で、観測1と2のデータのうち夜光のゆらぎの小さいスキャンを使って書いてある。それでも夜光のゆらぎが大きいため、中心部だけを Map にしてある。各 Contour Level は図2や図3と同じ $1 \times 10^{-10} \text{Wcm}^{-2} \mu\text{m}^{-1} \text{sr}^{-1}$ おきである。

0.8° 視野の図2と図4から $2.4 \mu\text{m}$ と $3.4 \mu\text{m}$ の表面輝度の比

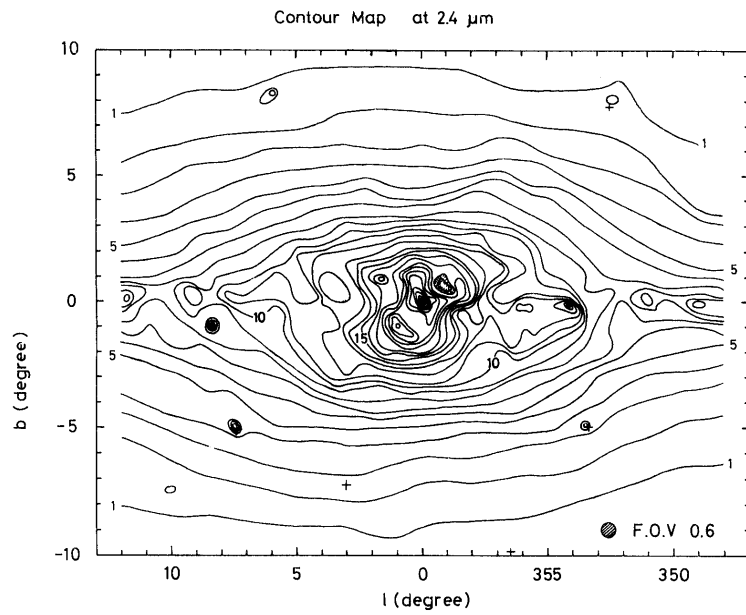


図3. 波長 $2.4 \mu\text{m}$, 視野 0.8° の Contour Map, Contour Level の単位と +印は図2と同じである。中心の表面輝度は $2.7 \times 10^{-9} \text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$ である。

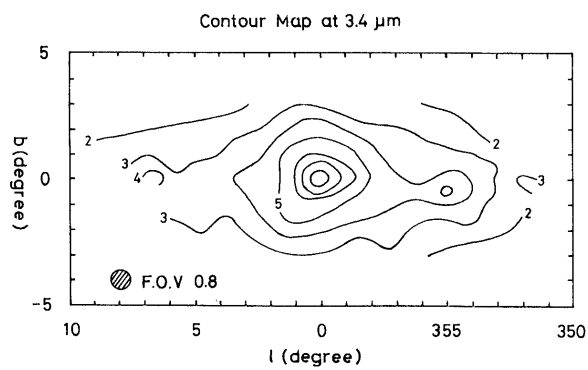


図4. 波長 $3.4 \mu\text{m}$, 視野 0.8° の Contour Map. Contour Level の単位は、図2と同じであるが、 $1 \times 10^{-10} \text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$ の Level は夜光のゆらぎが $\pm 5 \times 10^{-10} \text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$ があるため書いてない。

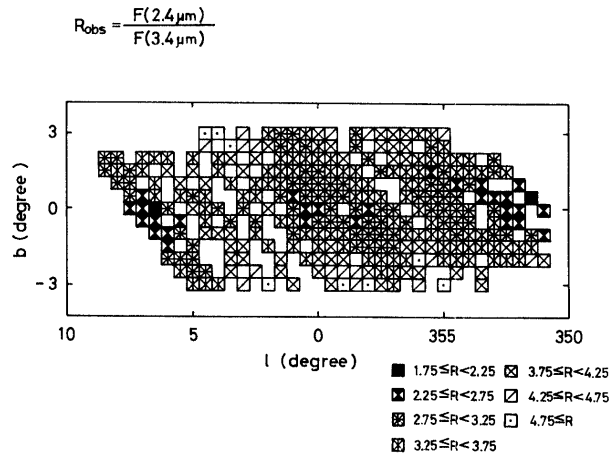


図5. 波長 $2.4 \mu\text{m}$ と $3.4 \mu\text{m}$ の表面輝度の比 R_{obs} を 0.5° メッシュごとに示してある。 R_{obs} は赤外線源の固有の比 R_{int} と途中の星間塵による吸収で決まってくる。

$$R_{\text{obs}} = \frac{F(2.4\mu\text{m})}{F(3.4\mu\text{m})}$$

を 0.5° メッシュごとに平均したのが図5である。 R_{obs} が最も大きなメッシュで約4.5、最も小さなメッシュで約2.0である。白く抜けているメッシュは、スキャンパスが欠除しているか、夜光のゆらぎを強く受け銀河の成分との分離ができなかった所である。 R_{obs} は、赤外線源の固有の比 R_{int} と、途中の星間塵による吸収量の双方に依存し、視線方向に積分した吸収量になっている。仮に赤外線源の固有の比 R_{int} が場所によらず一定とすると、図5は星間塵による吸収むらを表わし、 R_{obs} の大きな所で吸収は弱く小さな所で強いことになる。一般的に吸収量は銀河面上で強く、銀緯が増加するに伴い急に減少することがわかる。

波長 $2.4 \mu\text{m}$ の Contour Map 図2と図3は、視野の違いはあるものの全体に良く似た、Contour Level を示している。バルジは $l = \pm 10^\circ$ 、 $b = \pm 9^\circ$ に楕円状に広がり、 $l = \pm 3^\circ$ 以内になると銀河面に沿ってくびれ始め、中心の 0.5° 以内には、鋭いピークが存在している。バルジが本来くびれた構造になっているとは考えにくいので、このくびれは、銀河面上に存在する強い吸収層の影響によるものと考えられる。狭い視野の検知器による図3から、 $l = 1.5$ 、 $b = 1$; $l = 1^\circ$ 、 $b = -1^\circ$ にはハンブが、 $l = 359^\circ$ 、 $b = 0.5^\circ$ には窪みが見られるが、これも吸収むらによる見かけの構造と考えられる。 $l = 354^\circ \sim 356^\circ$ 、 $b = -1^\circ \sim 0^\circ$ には、表面輝度の高い部分が存在し、1975年の観測以来問題となっている。今回の観測から、この部分は、 $3.4 \mu\text{m}$ でも明るいことがわかり、 R_{obs} は約3で周囲と比較して特に吸収が弱いとは言えない。Kawara et al. (1981) による地上望遠鏡の観

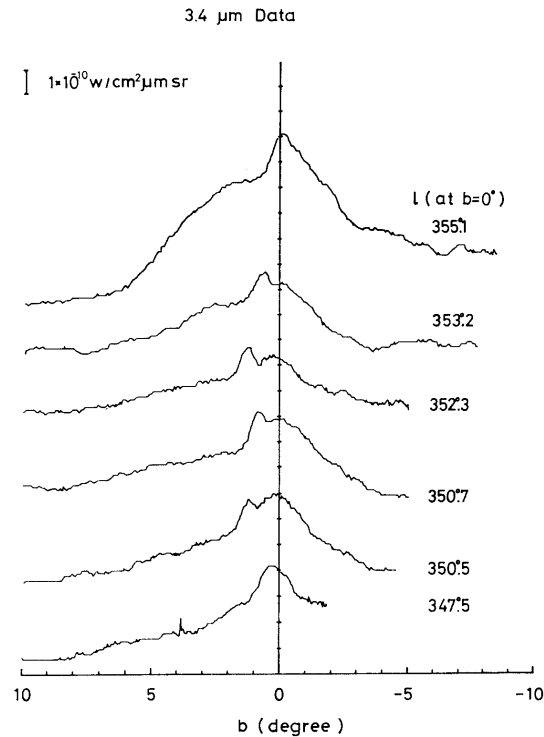


図6. スキャンパスに沿った波長 $3.4 \mu m$ のデータ
右側の数値は、銀河面を横切る際の銀経を示している。

測から、 $l = 355^\circ$ 、 $b = -0.6^\circ$ にはKバンドでの等級が1.39等と1.00等の星が存在することがわかった。この星の輻射流束を 0.8ϕ と 0.6ϕ の検知器による表面輝度になおすと、それぞれ $1.2 \times 10^{-10} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$ 、 $2.5 \times 10^{-10} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$ となり、 $2.4 \mu m$ のハンプを良く説明できる。しかし、この2つの星だけで2度以上に広がったハンプすべてを説明するのは難しいだろう。

一方、図2と図4のハンプのいくつかは、個々の赤外線源と対応がついた。図4から $l = 7^\circ$ 、 $b = 0^\circ$ に、図2から $l = 353^\circ$ 、 $b = 1^\circ$ ； $l = 351^\circ$ 、 $b = 1^\circ$ に小さなハンプがあることがわかる。図6は、スキャンパスに沿った $3.4 \mu m$ のデータを、 $l = 350^\circ \sim 353^\circ$ にかけて示したものである。この図から銀河面から約1度離れた所に $1 \times 10^{-10} \text{ Wcm}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1} \cdot \text{sr}$ 程度のハンプがはっきり見られる。これらのハンプは、それぞれ、H II領域、W 28 ($l = 6.5 \sim 7^\circ$ 、 $b = -0.2 \sim 0.1$)、NGC 6357 ($l = 353.1^\circ$ 、 $b = 0.3 \sim 0.9$)、

NGC 6334 ($l = 351.4$, $b = 0.7^\circ$) に対応している.

3. バルジまでの吸収量

今回の観測は2波長で行なわれたため、観測値が受けている星間吸収量を見積ることができない. 今、バルジの中の吸収は無視できるほど小さく、ディスク中の星間塵による吸収がほとんどであると仮定してバルジまでの吸収量を計算してみる.

バルジまでの吸収量は、2波長でのバルジの表面輝度の比 $R_{\text{Bulge, int}}$ から、吸収を受けない時のバルジの固有の比 $R_{\text{Bulge, int}}$ を仮定して計算できる. 図2から $l = \pm 8^\circ$ より外側ではバルジの寄与は無いと考え、 $l = 10^\circ \pm 0.5^\circ$ でディスク成分の平均を求めると銀河面上では次のようになる.

$$\begin{array}{ll} 2.4 \mu m & 8.4 \pm 0.4 \times 10^{-10} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \mu m^{-1} \cdot \text{sr}^{-1} \\ 3.4 \mu m & 2.7 \pm 0.7 \times 10^{-10} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \mu m^{-1} \cdot \text{sr}^{-1} \end{array}$$

このディスク成分を中心部の Contour Level から差し引くことでバルジのみの寄与を推定でき、それから2波長でのバルジの表面輝度の比 $R_{\text{Bulge, obs}}$ が得られる.

$$R_{\text{Bulge, obs}} = \frac{F(2.4 \mu m)_{\text{Bulge, obs}}}{F(3.4 \mu m)_{\text{Bulge, obs}}} \quad (1)$$

次に、近赤外の輻射はおもに晩期型星によることから、ディスクとバルジの近赤外でのスペクトルは、ほぼ同じと仮定する. この仮定のもとに、バルジの固有の比 $R_{\text{Bulge, int}}$ を図5の星間塵による吸収の影響の少ない $b = \pm 3^\circ$ の R_{obs} から求めると次のようになる.

$$R_{\text{Bulge, int}} = 4.0 \pm 0.7$$

M31の中心核の $R_{\text{Bulge, int}} = 3.3$ と比較すると、この値は20%近く大きい、 $2.4 \mu m$ と $3.4 \mu m$ の絶対値の誤差がともに $\pm 10\%$ あるので誤差範囲内と考えられる.

$R_{\text{Bulge, obs}}$ と $R_{\text{Bulge, int}}$ をもとに Van de Hulst の理論吸収曲線 No.15 (Van de Hulst, 1957) を用いてバルジまでの吸収量を求める.

波長 λ での全吸収 A_λ は、次の式で表わされる.

$$A_\lambda = -2.5 \log \left(\frac{F(\lambda)_{\text{obs}}}{F(\lambda)_{\text{int}}} \right) \quad (3)$$

$F(\lambda)_{\text{obs}}$: 観測された表面輝度

$F(\lambda)_{\text{int}}$: 固有の表面輝度

一方、理論吸収曲線 No.15 から $A_{2.4}$, $A_{3.4}$ と、Vバンドでの全吸収 A_V との間には次の関係が成立する.

$$A_{2.4} = 0.078 A_V \quad (4)$$

$$A_{3.4} = 0.047 A_V \quad (5)$$

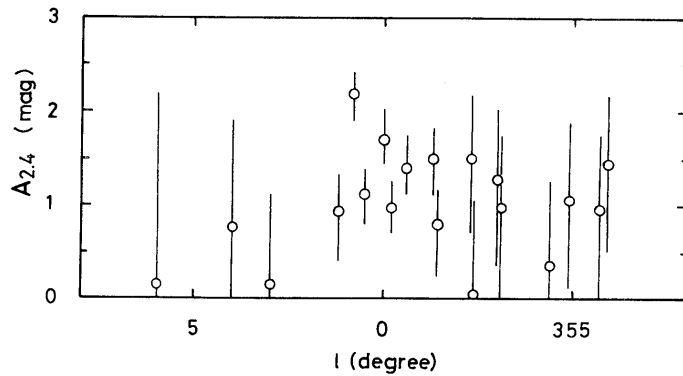


図7. 銀河面上での全吸収 $A_{2.4}$ の銀経変化

(3), (4), (5)式から全吸収 A_V と $A_{2.4}$ は, 次のようになる.

$$A_V = -80.7 \log \left(\frac{R_{\text{Bulge, obs}}}{R_{\text{Bulge, int}}} \right) \quad (6)$$

$$A_{2.4} = -6.29 \log \left(\frac{R_{\text{Bulge, obs}}}{R_{\text{Bulge, int}}} \right) \quad (7)$$

但し, $R_{\text{Bulge, int}} = 4.0 \pm 0.7$

図7は, $A_{2.4}$ の銀経分布を示したもので, 誤差が比較的少ないのは, $l = \pm 2^\circ$ 以内に限られている. この中心部で吸収量を平均すると $A_{2.4} = 1.3 \pm 0.5$ 等, Vバンドでは $A_V = 17 \pm 6$ 等となる.

4. 結論

視野の狭い検知器による Contour Map から, バルジは中心近くでは左右からくびれ, 中心には鋭いピークが存在していることがわかった. また銀河面上には, 1度程度の広がりを持つ凹凸の一部は, 星間塵による吸収むらによる見かけの構造と考えられる. 一方, ハンプのいくつかは, H II領域に対応し, W28, NGC 6334, NGC 6357は, 近赤外でも明るいことがわかった. バルジまでの吸収量を2波長での表面輝度から求めると銀河系中心方向では, $A_{2.4} = 1.3$ 等, $A_V = 17$ 等となった. 今後, 吸収量の二次元分布を得ることができれば, 吸収の補正をしたバルジの固有の構造が明らかにできるだろう.

参 考 文 献

- de Vaucouleurs, G. : 1958, in Handbuch der Physik, **53**.
- 早川, 伊藤, 松本, 宇山, : 1977, 東大宇宙研報告, **13**, 845.
- 早川, 松本, 村上, 宇山, 山上, Thomas, J. A. : 1980, 東大宇宙研報告, **16**, 995.
- Kawara et al. : 1981, Private Communication.
- Miyamoto, M. and Nagai, R. : 1975, Publ. astron. soc. Japan. **27**, 533. Neugebauer, G. and Leighton, R. B. : 1969, TWO - MICRON SKY SURVEY, A PRELIMINARY CATALOG, NASA SP - 3047 (National aeronautics and space administration, Washington D. C.)
- Thomas, F. A., Hyland, A. R. and Robinson, G. : 1973, mon. not. R. astr. soc., **165**, 201.
- Van de Hulst, H. C. : 1957, LIGHT SCATTERING BY SMALL PARTICLES (Willey, Chapman and Hall).