アタカマ1m 望遠鏡近赤外線カメラ ANIR による 近傍 LIRGs の Paα 観測

東京大学大学院理学系研究科 利川 興司

指導教員 田中 培生

平成 22 年 1 月 28 日

目 次

目 次

第	I部 Introduction	1
1	Luminous InfraRed Galaxies 1.1 LIRGs とは 1.2 LIRGs 観測の目的	1 1
2	星形成率 2.1 星形成率導出の手法と問題点	2 2
3	Paα による星形成領域の観測 3.1 Paα 観測の優位性 3.2 Paα 観測の難しさ 3.3 近傍銀河の Paα 観測	5 5 9
第	II 部 近赤外線観測カメラ ANIR	10
4	東京大学アタカマ $1\mathrm{m}$ 望遠鏡と近赤外線カメラ ANIR	10
5	ANIR 概要	12
6	フィルタ 6.1 フィルタ透過率測定 6.2 フィルタ性能 6.3 広帯域フィルタ測定結果 6.4 狭帯域フィルタ測定結果 6.5 Paαoff フィルタ仕様	14 14 15 15 15 15
7	フィルタホイール概要	19 19 21 23 23 23 23 25
第	III 部 近傍 LIRGs の観測	28
8	イントロダクション 8.1 先行研究 8.1.1 Hα 輝線フラックスを用いた星形成率の推定 8.1.2 銀河中心領域の水素輝線観測	28 28 28 28 28

8.2 ANIR による Paα 観測の特徴 28

目 次

9	観測	28
	9.1 観測目的	28
	9.2 観測天体選定	29
	9.2.1 観測天体リスト	29
	9.3 観測手法	30
10	解析とその結果	30
	10.1 画像合成	30
	10.2 等級原点の算出	31
	10.3 システム効率	36
	10.4 Paα 輝線フラックス	40
	10.4.1 大気透過率の波長依存性	40
	10.4.2 輝線画像の合成、測光	41
	10.4.3 水蒸気量と大気透過率	41
	10.4.4 Paα 輝線フラックスの計算結果	46
11	議論	51
	11.1 星形成率の推定	51
	11.2 Hlphaから推定した星形成率との比較	51
	11.3 赤外光度から推定した星形成率との比較	52
	11.4 AGN の寄与	52
	11.5 フラックスの中心集中度による星形成率の比較	54
	11.6 ペアとなる銀河の有無	55
12	まとめ	57

第 IV	部	付録
ЯΙV	미	リリ亜米

60

非常に明るい赤外銀河:LIRGs(Luminous InfraRed Galaxies) は、z < 0.3の近傍系外に数多く存在し、星形成や相互作用が盛んなことがわかっている。LIRGs は主な光源として HII 領域の他に AGN や LINER をとるものが存在する他、相互作用の強さや銀河の形状が多様である。一方、星形成率とは銀河の種類や進化段階、環境により顕著に変化するパラメータであるため、多様な LIRGs の星形成率を知ることによって銀河における物質の循環や力学的進化を理解することが出来る。

従来、減光の少ない銀河が対象であれば可視波長域の水素再結合輝線 $H\alpha(656.3nm)$ で見通すことが出来、そのフラックスから星形成率を見積ることが有効な方法であった。しかし、 $H\alpha$ 輝線にはダストの吸収大きく受けること、波長分解能が足りない場合は [NII] 輝線 (654.8nm、658.4nm)の混在を受けるといった難点がある。近赤外波長域の水素輝線である $Pa\alpha(1.875099\mu m)$ を用いることでこれらの問題が解決する。しかしながら、 $Pa\alpha$ の波長帯は大気の水蒸気による吸収を強く受け、地上からの観測が非常に困難であった。

そこで我々は、南米チリ・チャナントール山頂 (標高 5640m)の東京大学アタカマ 1m 望遠鏡 (miniTAO)/近赤外線観 測装置 ANIR で、近傍 LIRGs の Paa 狭帯域フィルタ撮像観測を行うことにした。チャナントール山頂はその標高と 乾燥した気候のおかげで大気中の水蒸気量が非常に少なく Paa 輝線の観測が可能となる。観測は 2009 年 6 月、10 月 の 2 回の観測において、ANIR の Paa オフバンド狭帯域フィルタ (λ =1.909 μ m、 $\Delta\lambda$ =0.0326 μ m)を用いることによ り、赤方偏移 *cz* = 4000 ~ 7000*km/s* の近傍 LIRGsLIRGs20 天体の撮像に成功した。このとき、ANIR では安定して FWMH~0.5-1.0arcsec の星像を得た。これにより、チャナントール山頂の miniTAO 望遠鏡が世界最高水準のシーイ ング性能を示すことが証明できた。

ANIR によって得られた Paα 光度からダスト吸収の補正をせずに星形成率を算出した結果、減光の比較的少ない銀河 5 天体においては、減光を補正した Hα フラックスから推定した星形成率とよく一致した。また、よりダスト減光の 激しい領域では Hα に対する Paα の優位性が期待される。これにより、Paα 輝線の地上観測による星形成率の推定が 実用的な手段であることがわかった。

また、光源として HII 領域が支配的である銀河は、赤外線光度から推定した星形成率とも良く相関した。

Paα 輝線を観測することが有効な手法であることが実証されたため、今後の観測では、約 100 ある観測可能 LIRGs の 残りを観測していくことになる。

概 要

第1部 Introduction

1 Luminous InfraRed Galaxies

1.1 LIRGsとは

LIRG:Luminous Infra
Red Galaxy $| {\tt I}$

$$10^{11}L_{\odot} < L_{ir} < 10^{12}L_{\odot} \tag{1}$$

の、赤外で非常に明るい銀河である。I 赤外波長域のトータルフラックス F_{ir} 及び光度 L_{ir} は IRAS サーベイ (1983) の結果に基いた Sanders& Mirabel(1996)[1] による推定方法があり、以下のように表される。

$$F_{ir} = 1.8 \times 10^{-14} (13.48f_{12\mu m} + 5.16f_{25\mu m} + 2.58f_{60\mu m} + f_{100\mu m})[Wm^{-2}]$$
⁽²⁾

$$L_{ir} = L(8 - 1000\mu m) = 4\pi D^2 F_{ir}[L_{\odot}]$$
(3)

但し、 $f_{12\mu m}$ 、 $f_{25\mu m}$ 、 $f_{60\mu m}$ 、 $f_{100\mu m}$ はそれぞれ 12μ m、 25μ m、 60μ m、 100μ m での IRAS による観測量 [Jy] である。 なお、赤外線光度 L_{ir} が

$$L_{ir} > 10^{12} L_{\odot} \tag{4}$$

のものは ULIRG: Ultra Luminous Infrared Galaxy と呼ばれる。

系外近傍 (z < 0.3) には $L_{ir} > 10^{11} L_{\odot}$ の、LIRG や ULIRG に分類される赤外銀河が数多く存在することがわかって いる。その多くは豊富な分子ガスを含む渦状銀河が強い相互作用、衝突合体によって強い赤外線放射をしている。以 下に、光度によるだいたいの傾向を挙げる [1]。

- $L_{ir} < 10^{11} L_{\odot}$ この光度の赤外銀河は多くが単独の孤立した銀河で、ガスの豊富なスパイラルを持つ。赤外線光度は 主に星形成領域のダスト再放射による。
- $10^{11}L_{\odot} < L_{ir} < 10^{12}L_{\odot}$ 分子ガスが豊富なものが多く、銀河同士の強い相互作用が顕著にみられるようになる。セイファート銀河もみられるようになり、明るくなる程にその割合は大きくなる。
- L_{ir} > 10¹²L_☉ ほぼ全てが衝突合体銀河であり、分子ガスの異常な中心集中がみられる。その中心へ流れこむガスに よる、中心周りのスターバースト、AGN によって明るく輝く。非常に強いダスト減光によって内部でのスター バースト、AGN の振舞いを見ることは困難だが、両者が活発な環境であると考えられている。

1.2 LIRGs 観測の目的

近傍の LIRGs には可視光のスペクトル情報より、その光源として支配的なものが I 型 AGN であるもの、II 型 AGN であるもの、II 型 AGN であるもの、LINER であるもの、スターバーストであるものがそれぞれ、少なくない割合で存在することがわかって いる (e.g. Kim et al. 1995[2])。また、相互作用の度合も孤立しているものから相互作用の弱いもの、強いもの、衝突 合体しているものまで様々なものが存在する (e.g. Dopita et al. 2002[3])。こういった多様な特徴をもち、且つ星形成 が盛んである近傍の LIRGs を多数観測することから星形成や銀河の形状、物質の空間分布、化学組成を探ることによ り、銀河の進化の過程を探る大きな手がかりとなる。

2 星形成率

星形成率は銀河の種類や進化段階、環境により顕著に変化する。また、星形成の頻度によって、銀河における物質の循環や力学的進化は大きく左右される。星形成率を正しく見積もることは、銀河の進化を理解する上で重要な課題の一つであるといえる。

2.1 星形成率導出の手法と問題点

星形成率の決定に関しては多くの方法がとられている (e.g. Bell & Kennicutt 2001 [4]; Sullivan et al. 2001[5]) が、 近傍の銀河でさえ未だ確実な方法は決まっていない。星形成率に関して不明瞭となってしまうのは、主に星形成領域 の周辺に存在する星間ダストのせいである。ダストの引き起こす減光はその量と分布によって変わるものである。以 下に代表的な星形成率の見積り方法と特徴を挙げる。

UV continuum の観測

熱い OB 型星が出す紫外線を直接観測することは、そのまま OB 型星の数を見積もることになる。寿命の短い OB 型星の数は、若い星の数、つまりは現在生まれつつある星の数を見積もるよい指標になると考えられる。しかし波長の短い紫外線はダストの影響を強く受けてしまい、その補正も難しい。結果、銀河ごと星形成率の推定に大きな不定性を残す。

水素再結合線

OB 型星からの光子の数、つまりは紫外線のフラックスの強さが星形成率の指標となることは上の手法で述べた。紫 外線のフラックスが強ければ強いほど、周辺の水素ガスは励起されて電離状態になる。この電離された水素ガスが電子 と再結合し、励起状態が変わるときに放出される再結合線のフラックスを測定することによって星形成率を推定する。 可視光の Hα 輝線 (656.28nm) がよく用いられており、典型的な星形成領域における星形成率導出の式は Leithrer& Heckman(1995)[6] によれば、

$$SFR_{H\alpha} = 7.9 \times 10^{-42} L_{H\alpha} (erg/s) [M_{\odot}/yr]$$
⁽⁵⁾

である。また、スペクトル情報 Hα/Hβ (Balmer decrement) からダストの減光を見積もって補正する方法がとられる。 しかし、可視光の Hα ではダストによって完全に見えなくなることもある。こういった場合、赤外線波長域の輝線を 用いるのだが地上からの観測は難しいという難点がある。主な水素再結合線の波長は表1にまとめた。

重元素の衝突励起線

例えば [OII](372.7nm) が星形成との良い相関をもつことが知られている (Kennicutt 1998[7])。しかしそのフラック スは星形成だけでなく金属量にも強く依存する。つまり、星形成率の情報が金属量に依存し、不定性が大きくなる。 (e.g. Kewley et al. 2001A[8]; Kewley& Dopita 2002[9])

また、ダストの影響はやはり大きい。z < 1.5あたりで有効とされる手法である。

		Lyman		Balmer		Paschen		Brackett		Pfund
m		n=1		n=2		n=3		n=4		n=5
2	$Ly\alpha$	1215.34								
3	${\rm Ly}\beta$	1025.44	$\mathrm{H}\alpha$	6562.85						
4	$Ly\gamma$	972.27	${\rm H}\beta$	4861.37	$\mathrm{Pa}\alpha$	18750.99				
5	$Ly\delta$	949.48	$\mathrm{H}\gamma$	4340.51	${\rm Pa}\beta$	12818.06	${ m Br}\alpha$	40511.1		
6	$Ly\epsilon$	937.54	${\rm H}\delta$	4101.78	${ m Pa}\gamma$	10938.08	${ m Br}eta$	26251.3	$\mathrm{Pf}\alpha$	74577.8
7		930.49		3970.11		10049.36		21655.1		46524.8
8		925.97		3889.09		9545.96		19445.4		37395.1
9		922.90		3835.43		9229.00		18174.0		32960.7
10		920.71		3797.94		9014.90		17362.0		30383.5
11		919.10		3770.67		8862.77		16806.4		28721.9
12		917.88		3750.20		8750.46		16407.1		27574.9
13		916.93		3734.41		8665.02		16109.2		26743.8
14		916.18		3721.98		8598.38		15880.4		26119.2
15		915.57		3712.01		8545.37		15700.5		25636.1
16		915.08		3703.90		8502.47		15556.3		25253.8
17		914.67		3697.20		8467.24		15438.8		24945.5
18		914.32		3691.60		8437.94		15341.7		24692.9
19		914.03		3686.87		8413.31		15260.4		24483.1
20		913.79		3682.85		8392.39		15191.7		24306.8
系列端	Lyc	911.50	Bc	3646.85	\mathbf{Pc}	8203.56	Brc	14585.1	Pfc	22787.6

表 1: 水素スペクトル各系列と波長 (Å)

2. 星形成率

遠赤外線のフラックス

星形成領域を覆っているダストが、内側の大質量星からの紫外光、可視光を吸収し、再放射したものをとらえる。 ダストから放出される光を観測するため、ダストの減光を受けないという利点がある。星形成率の導出には8-1000µm のトータルの光度:*L_{ir}*が用いる方法があり、ダストの豊富なスターバーストを仮定した場合、Kennicutt(1998)[7] に よれば

$$SFR_{ir} = 4.5 \times 10^{-44} L_{ir} (erg/s) [M_{\odot}/yr]$$
 (6)

となる。

また、スターバーストではない他の一般的な銀河の星形成に関するモデルも提唱され始め、Inoue et al. 2000[10] は

$$\frac{SFR}{M_{\odot}yr^{-1}} = \frac{3.3 \times 10^{-10}(1-\eta)}{0.4 - 0.2f + 0.6\epsilon} \frac{L_{ir}}{L_{\odot}}$$
(7)

と表している。

但し、式 7 の f は水素によって吸収されたイオン化光子の割合、 η は L_{ir} に占めるシラスの割合、 ϵ は OB 型星から の非イオン化光子がダストに吸収された効果を補正するものである。

3. Paα による星形成領域の観測

3 Pa^α による星形成領域の観測

3.1 Paa 観測の優位性

減光の少ない銀河の星形成に関しては 2.1 で述べたように、可視の水素輝線 H α のフラックスから星形成率を見積ることが多い。しかし、H α 輝線はダストの吸収を大きく受けることや、波長分解能が足りない場合は [NII] 輝線 (654.8nm, 658.4nm) の混在を受けるといった難点がある。そこで、近赤外波長域の水素輝線である Pa α (1.875099nm) を用いることによりこれらの問題の解決ができる。Pa α のダスト減光を受ける前の強度は、典型的な温度、密度の星形成領域において H α と比較して $\frac{1}{8}$ 程度の強度である。しかし減光を考慮した場合、Pa α は一般的なダスト減光 ($A_V \sim 3$) において H α と同程度の明るさとなる (Quillen & Yukita 2001[11])。よりダストの密な観測対象では Pa α が優位になる。なお、他に近赤外波長域水素輝線の代表的なものとして Br γ (2165.1nm) があり Pa α 以上のダスト透過力が見込まれるが、減光を受ける前の強度が H α の約 $\frac{1}{100}$ と弱く、 $A_V \sim 50$ 程度まで Pa α 優位のままである。

3.2 Paa 観測の難しさ

赤外線の波長域は、大気中の水蒸気、*CO*₂分子などによる吸収を受け、地上まで光が到達する波長帯が限られてくる。Paαの波長帯は大気の水蒸気による吸収を強く受け、地上からの観測が非常に困難である。図4の標高 2600m での大気透過率¹をみると、Paα 輝線の波長付近は吸収によりほとんど大気を透過しない。

このように赤外線の波長域は、大気中の水蒸気、*CO*2 分子などによる吸収を受け、地上まで光が到達する波長帯が 限られてくる。しかし、できるだけ高地から観測することでこの大気の吸収の影響を小さくすることが可能である。そ こで我々は、南米チリ・チャナントール山頂 (標高 5640m)の東京大学アタカマ 1m 望遠鏡 (miniTAO) において Paa 狭帯域フィルタ撮像観測を行うことにした。このサイトでは大気中の水蒸気量が非常に少なく Paa 輝線の観測が可能 となる。

図 1~3 はチャナントール山頂 (miniTAO:5600m)、マウナケア山頂 (すばる望遠鏡:4200m)、チリ・ラスカンパナス 天文台 (マジェラン望遠鏡:2600m) での近赤外波長域での大気透過率である。それぞれ、可降水量 PWV を 0.5mm, 1.0mm, 6.0mm とし、大気吸収計算ソフト ATRAN を用いて大気透過率を計算した。図 1-3 をみると、H-band(1.65µm 帯) と K-band(2.2µm 帯) の間の、1.8-1.9µm あたりに、5600m では大気の窓が少し現れているようにみえる。Paα 波長周辺の大気透過率を図 4 に記す。図 4 を見ると視線速度により大気透過率の変動が激しく例えば視線速度が静 止系から 50km/s 増えるだけで大気透過率が 10%程度に落ち込む。季節により地球の公転運動で視線速度は最大数十 km/s 変化するので、速度成分には注意を払う必要がある。しかし、大気の窓の部分では充分に観測が行える大気透過 率 (50~70%) が得られると判断できる。



図 1: 大気透過率:5600m(PWV=0.5mm)



図 2: 大気透過率:4200m(PWV=1.0mm)

3. Pa*α* による星形成領域の観測



図 3: 大気透過率:2600m(PWV=6.0mm)



図 4: Paa 波長周りでの大気透過率

3.3 近傍銀河の $Pa\alpha$ 観測

図 5 は cz < 9000 km/s の近傍での $Pa\alpha$ 透過率である。標高 5600m で、赤方偏移した波長域において、より良好な (~ 95%) 大気の窓が現れていることがわかる。このように赤方偏移した近傍銀河の $Pa\alpha$ 撮像が充分可能であることが 予想できる。



図 5: 近傍天体における Paa 波長域の大気透過率 上:5600m 下:2600m

^{第II部} 近赤外線観測カメラANIR

4 東京大学アタカマ1m望遠鏡と近赤外線カメラANIR

東京大学アタカマ天文台計画(TAO 計画)は、南米チリ・アタカマ砂漠、標高 5640m のチャナントール山頂に 口径 6.5m の赤外線望遠鏡を中心とした天文台を建設する計画である。その先駆けとして口径 1m の東京大学アタカ マ 1m 望遠鏡(miniTAO 望遠鏡)[12]が建設された。観測装置としては近赤外線カメラ ANIR[13]、中間赤外線カメラ MAX38[14]が搭載される。ANIR: Atacama Near InfraRed camera はその名の通り、近赤外波長域用の観測装置で ある。miniTAO1m 望遠鏡のあるチャナントール山頂ではその非常に高い標高と低い水蒸気量のため、水素の Paa 輝 線の1.8751µm 付近に大気の窓が出現(3.2節)する。ANIR はこれを通して従来地上からは難しかった Paa 輝線の観 測により、銀河系の星間ガスのイオン化状態の大局構造の研究等を目的としている。2009 年 5~6 月には望遠鏡は学 術研究用途に充分な性能を持つまでに調整が済み、近赤外線カメラ ANIR を望遠鏡にとりつけてのファーストライト を果たすことに成功した。試験用 CCD カメラおよび ANIR では安定して FWHM ~ 0.5 – 1.0 arcsec の星像が得ら れていて、チャナントール山頂サイトにある miniTAO 望遠鏡は世界最高水準のシーイング性能を示すことを証明し た。さらに ANIR による Paa 輝線観測の成功は良好な赤外線大気透過率を示しており、チャナントール山頂が世界 最高レベルの赤外線観測条件を有すると考えられる。

光学系	Cassegrain / Ritchey-Chretien
有効口径	1042.4mm
最終 F 比	12.0
主鏡口径	1060mm
主鏡 F 比	2.5
副鏡口径	222.88mm
視野直径	10 分
プレートスケール	$16.644 \ \mathrm{arcsec/mm}$

表 2: miniTAO1m 望遠鏡パラメータ



図 6: 1m 望遠鏡見取図



図 7: 山頂ドーム内に組みあがった 1m 望遠鏡

5 ANIR 概要

ANIR の外観及び内部構造を図 8、9 に載せる。入射窓から入った光はフィルタホイールの回転により選択された フィルタを通過する。二つのフィルターホイールは合わせて 8 枚のフィルターが収納可能である。フィルタを通過し た特定の波長の光はオフナー光学系により検出器:PACE-HAWAII2 まで導かれる。検出器上のピクセルスケールは 0.["]31/pix で、視野は 5.[']3 である。

また、ANIR では入社窓前面にダイクロイックミラーを挿入することにより、CCD カメラと連携した可視赤外同時観 測も可能である。

再結合光学系	オフナー光学系
検出器	PACE-HAWAII-2
ピクセルフォーマット	1024×1024
視野	$5.'3 \times 5.'3$
ピクセルスケール	$0.^{''}31/\mathrm{pix}$
読み出しノイズ	$15e^{-1}$ rms
広帯域フィルタ	Y, J, H, Ks
狭帯域フィルタ	Pa β , Pa α , Pa α -off, N207
最終 F 比	12.0

表 3: ANIR パラメータ



図 8: ANIR 外観



図 9: ANIR 図面

6. フィルタ

6 フィルタ

ANIR にインストールされているフィルタは広帯域 Y、J、H、Ks に加えて狭帯域 Pa α , Pa β 、Pa α off、N207 の計 8 枚である。広帯域フィルタはいずれも、Barr Associate 社²製、狭帯域フィルタはいずれも日本真空光学株式会社³製 のものである。

6.1 フィルタ透過率測定

2008 年 8-9 月に国立天文台先端技術センター⁴ オプトショップで島津製作所製分光光度計 UV3100PC を用いて ANIR にインストールするフィルタの透過率測定を行った。UV3100PC の仕様を表 4 に記す。 液体窒素冷却デュワーにフィルタをインストールし、UV3100PC にとりつけて常温及び 77K で測定をした。但し、 Paα オフバンドフィルタのみメーカーによる常温での測定結果である。

表 4: 畠	津製作所製	UV3	8100 F	rcთ	スペ	ック
--------	-------	-----	--------	-----	----	----

	190~3200 nm
分解能	0.1 nm
光源	重水素ランプ、ハロゲンランプ
回折格子により測定波長を可変	
検出器	フォトマル、PbS セル
検出部の大きさ	$2 \times 16 \text{ mm}$

 $^{2} \rm http://www.barrassociates.com/$

⁴http://atc.mtk.nao.ac.jp/

³http://www.ocj.co.jp/

6. フィルタ

6.2 フィルタ性能

測定データより、以下の値を求める。

- ピーク透過率(%)
- 半値波長: ピークの半分の透過率となる波長 λ₁, λ₂。ここでは λ₁ < λ₂ とする
- 実効波長: $\lambda_{eff} = \frac{\int \lambda T(\lambda) d\lambda}{\int T(\lambda) d\lambda}$
- ¥值幅 : $\Delta \lambda = \lambda_2 \lambda_1$
- 実効透過率 : $T_{eff} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} T(\lambda) d\lambda}{\Delta \lambda}$
- 6.3 広帯域フィルタ測定結果

広帯域フィルタの透過率プロットを図10に記す。

いずれのバンドでも温度による透過率プロファイルの変化はほとんど無い。各バンドのおよその透過率は常温、低温 共に Y:70%、J:90%、H:95%、Ks:65%である。各バンドフィルタの詳細なパラメータは表5にまとめた。

表 5: 広帯域フィルタ性能: ピーク透過率、 T_{eff} の単位は%。 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_{eff}, \Delta \lambda$ の単位は nm

室温	ピーク透過率	λ_1	λ_2	λ_{eff}	$\Delta\lambda$	T_{eff}	77K	ピーク透過率	λ_1	λ_2	λ_{eff}	$\Delta\lambda$	T_{eff}
Y	78.41	970.8	1070.2	1021.45	99.4	69.79		78.97	971.1	1070.4	1021.68	99.3	70.21
J	92.05	1171.5	1330.1	1250.85	158.6	87.7		92.03	1171.3	1329.9	1250.67	158.6	87.51
Η	98.57	1483.5	1780.5	1632.10	297	95.44		98.28	1483.2	1780.5	1632.02	297.3	95.16
Ks	68.90	1990.6	2312.1	2149.90	321.5	64.73		68.85	1990.3	2311.8	2150.19	321.5	64.7

どのバンドも常温、低温での実効波長 λ_{eff} の変化は 0.3nm 以下、実効透過率 T_{eff} の変化は 0.5%以下で、誤差の範囲内と判断できる程度である。

6.4 狭帯域フィルタ測定結果

 $Pa\alpha$ 、 $Pa\beta$ フィルタの透過率プロットを図 11 に記す。 また、 $Pa\alpha$ off フィルタの、メーカーによる常温での透過率測定値をプロットを図 12 に記す。

温度による透過率プロファイルの変化は $Pa\beta$ フィルタの場合ほとんど無いが、 $Pa\alpha$ フィルタは低温で 2%程度透過 率が落ちている。ピーク付近でのおよその透過率は $Pa\alpha$ が 85~90%、 $Pa\beta$ が 90%、 $Pa\alpha$ off が 95%程度である。

ピーク透過率 (%)、半値波長 (λ_1,λ_2)、半値幅 $\Delta\lambda$ 、実効波長 λ_{eff} 、実効透過率 T_{eff} (%) を表 6 にまとめた。

 $Pa\beta$ の静止座標系での波長は 1281.8nm、 $Pa\alpha$ は 1875.099nm である。これに対し、低温での実効波長 λ_{eff} の測定 値は $Pa\beta$: 1281.26nm、 $Pa\alpha$: 1875.39nm であり、輝線をとらえるのに問題無い差異である。



図 11: 狭帯域フィルタ透過率の測定値 — 赤:常温/青: 77K



図 12: Pacoff 透過率の測定値 (日本真空)

6.5 $Pa\alpha off フィルタ仕様$

 $Pa\alpha off$ フィルタの仕様を決めるにあたり、これを用いて近傍 LIRG/ULIRG の埋もれた星形成領域をピックアップ できることを目指した。cz < 9000 km/s における $Pa\alpha$ の波長での大気透過率は 3.3 節の図 5 に示してある。

近傍 LIRG/ULIRG を Sanders el al.(2003)の THE IRAS REVISED BRIGHT GALAXY SAMPLE[15] から

- 赤緯: Dec < 30[deg]
- $L_{ir} > 10^{11} L_{sol}$

の条件でピックアップすると、条件を満たす天体数とその赤方偏移分布は表7のようになる。

そこで、

- 図 5 において、cz=3500-4200km/s に比較的大きな大気の窓の穴がある
- 2750-5200km/s はハッブル宇宙望遠鏡の NICMOS カメラで多く撮像されている [16]
- cz=4000km 以下は天体が少ない

以上を考慮した上で、*cz* = 4000 ~ 7000*km/s* の天体をカバーする為に以下のような仕様とした。

• 中心波長 $\lambda_c = 1.910 nm$

表 6: 狭帯域フィルタ仕様 : ピーク透過率、 T_{eff} の単位は%。 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_{eff}, \Delta \lambda$ の単位は nm

室温	ピーク透過率	λ_1	λ_2	λ_{eff}	$\Delta\lambda$	T_{eff}	77K	ピーク透過率	λ_1	λ_2	λ_{eff}	$\Delta\lambda$	T_{eff}
$\mathrm{Pa}\beta$	89.85	1270.8	1291.4	1281.04	20.6	84.2		88.91	1270.6	1292	1281.26	21.4	82.3
$Pa\alpha$	88.25	1871.6	1879.5	1875.49	7.9	77.59		87.29	1871.5	1879.4	1875.39	7.9	76.96
$Pa\alpha off$	96.18	1893.0	1925.6	1909.25	32.6	89.74							

cz(km/s)	天体数
< 2000	3
< 3000	5
< 3500	12
< 4000	20
< 5000	41
< 6000	69
< 7000	90
< 8000	101
< 9000	112
< 10000	122

表 7: 速度分布と天体数

• 半値幅 $\Delta \lambda = 20nm$

製作した Paαoff フィルタの実測値は表 6 のとおりで、この仕様を満たしている。

7 フィルタホイール

7.1 フィルタホイール概要

ANIR では、真空冷却容器中にフィルタホイールを設置してホイールの回転によりフィルタを切り替え、入射窓を 通過してきた光の任意の波長域だけオフナー光学系へと導く。ホイールはフィルタ穴 5 つのものを 2 枚組み合わせた。 各ホイールにインストールされたフィルタを図 13 及び表 8 に示す。

表 8: フィルタ穴とフィルタの対応

フィルタ穴番号 フィルタ Wheel1 Wheel2 フィルタ \mathbf{Ks} $Pa\alpha$ 1 2 $Pa\alpha off$ open 3 Υ $Pa\beta$ \mathbf{J} 4207N5Η open



図 13: フィルタホイール断面 (左がホイール 1、右がホイール 2)



図 14: 組みあがったフィルタホイールボックス



図 15: フィルタホイール回転方法

7.2 フィルタホイールの回転

フィルタホイールの回転には、Portescap 社⁵ 製のモーター P430-258-005 を元に真空冷却環境下用に改造した真空低温モーター⁶を用いる。

図15のように、フィルタホイールの外周に歯を150掘り、モーター軸に取り付けた歯数12のギアと噛み合わせる。

7.3 モーター駆動概略

モーターの駆動と制御には以下のものが必要になる。

ドライバーボード Portescap 社の DC ステッピングモータ・ドライブサーキット EDM453-00 を使用した。

```
モータ制御コントローラ株式会社メレック<sup>7</sup>のステッピング&サーボモータ用4軸コントローラC-870V1を使用した。
```

制御用計算機 高地運用の為に SSD を搭載した、デュアルコアプロセッサの LINUX OS の ANIR 制御用計算機を使用した。

配線を図 16 に記す。

⁷http://www.melec-inc.com/

⁵http://www.portescap.com/

⁶名古屋大学 Z研究室によって改造手法が確立された



図 16: モーター制御配線概略図



図 17: ホール素子の原理

7.4 ホール素子

モーターが指定したとおりに回転していることを監視するためにフィルタホイールに磁石を埋め込み、ホール素子 を用いてその位置を検出する。

7.4.1 ホール効果とホール素子

導体または半導体試料において、例えば x 軸方向に電流を流し、y 軸方向に磁場をかけるとする。このとき試料を 流れ、x 軸方向に動いている荷電粒子は磁場によるローレンツ力を受けて z 軸方向に動く。これによって電流と磁場 の両方に直交する方向に電場(ホール電場)が現れ、荷電粒子の運動が z 軸方向に曲げられる (図 18 参照)。これが ホール効果である。ホール素子はこのホール効果を利用した磁気センサである。図 18 においては、電流 I を流してい るときに磁場 B がかかると、ab 間に電流が生じる。このように、磁石の発生する磁界を電気信号に変換し出力する ことができる。

7.4.2 ホール素子の実装

フィルタホイールの5つあるフィルタ穴の外側にそれぞれ1つずつ、計5個の磁石を埋め込む。図18のように1つ だけ磁石の極性の方向を逆にする。これは、磁場を検出したときに他の4箇所と磁場の向きが逆になることで区別を つけ、原点とする為である。

フィルタホイール、モータ - 、ホール素子の配置を図 19 に記す。ホール素子のインターフェースボードと制御用計 算機は USB によって接続される。

例として、モーターを一回転させたときのホール素子による磁石の検出の様子を図 20 に示す。5 箇所のフィルタ穴 の位置でピークが検出され、一ヶ所だけ正負逆のピークが表れることがわかる。この点が原点である。 ピークを検出していない、つまり無磁界のときにも出力端子間に生じる電圧は0 ではなくオフセットの電圧があるが、 これはホール素子の基本特性の1 つである。これはホール素子に電流を流すだけで発生する。つまり、ホール素子の 出力端子間にはオフセット電圧とホール出力電圧の和が出力される。このため、ホール素子を使ってモーターの動作 を制御する場合には事前にオフセット電圧のデータをとる必要がある (7.5 節を参照)。



図 18: 磁石の配置



図 19: ホール素子の配線



図 20: ホール素子によるピークの検出例

7.5 モーター駆動ソフトウェア

モーター駆動の制御や、必要な情報を取得するプログラムについて解説する。なお、各コマンドの引数の [motor number] にはモーター番号の0か1を選択して挿入する。

 mtr_{calib}

(./mtr_calib [motor number] [ALL/OFFSET/CYCLE/PHASE])

- 用途 ホールセンサを用いたフィルタホイールの回転に必要なパラメータを測定し、制御用計算機のデータベースに書 き込む。ホール素子のオフセット電圧、フィルタホイール1回転のパルス数、フェーズ補正値が取得できる。
- 使いかた 最後の引数によって、4つのモードが選択できる。OFFSET ならホール素子オフセット電圧、CYCLE なら フィルタホイールー周のパルス数、PHASE ならフェーズ補正値を測定し、ALL ならばその全てを実行する。

 $\mathbf{mtr_cntreset}$

./mtr_cntreset [motor number]

用途 モータードライバ上の、モーターの現在値アドレスを0に書き換え、更にその値を制御用計算機のデータベース に書き込む。

 mtr_filter

./mtr_filter [FILTER NAME] (NOSENSOR)

7. フィルタホイール

用途 フィルタホイールを回転し、任意のフィルタに切替える。

[FILTER NAME] に挿入する文字列はフィルタ名である Paa, Paaoff, Pab, N207, Y, Ks, H, J あるいは open, close の 10 通り。

FILTER NAME の後に SENSOR と書き加えると、ホール素子により各フィルタ穴に埋め込まれた磁石の位置を監視しながら駆動、正しい位置へ移動したかを確認できる。

FILTER NAME の後に何も書き加えない、あるいは NOSENSOR と書き加えると目標のフィルタに切替えるのに必要なパルス数を送ってフィルタを切替えるが、ホール素子モニタによる位置確認は使わない。

モーターの脱調により正確にホイールが正常に回転しないことがあるので、常に正しいフィルタに切り替わっている かを確認できる、前者の方法を推奨する。

```
mtr\_get\_filter
```

./mtr_get_filter [motor number]

用途 制御用計算機のデータベースを読み込み、現在合わせてあるフィルタを表示する。更に、他のフィルタのインス トール状況も表示する。

 mtr_get_sensor

./mtr_get_sensor [motor number]

用途 ホール素子の出力信号を取得することで、ホール素子電圧を表示する。

 $\mathbf{mtr}_{-}\mathbf{init}$

./mtr_init [motor number]

用途 モータードライバボードを無効化、モーターコントローラの信号出力も一時停止し、モータードライバボードの 初期化をする。

 mtr_mv_adr

./mtr_mv_adr [motor number] [address]

用途 [address] で指定したアドレスまでモーターを回転させた後、モーターコントローラーから到着地点のアドレス を読み取り、制御用計算機のデータベースに書き込む。

 mtr_mv_npulse

./mtr_mv_npulse [motor number] [npulse]

用途 [npulse] で指定したパルス数だけモーターを回転させた後、モーターコントローラーから移動後のアドレスを読み取り、制御用計算機のデータベースに書き込む。

7. フィルタホイール

mtr_origin

./mtr_origin [motor number]

用途 ホールセンサを用いて原点を探し、移動する。その後、制御用計算機上のアドレス、フィルタの値を原点のもの に書き換える

ホールセンサを使用しながらフィルタホイールを 1.8 周回転させる。ホイール 1 周あたり正のピークが 1 つ、負のピー クが 4 つ見付かるはずである (7.4.2 節参照)。このとき見付かった正のピークが原点であり、目標地点となる。

 $\mathbf{mtr_stop}$

./mtr_stop

用途 モーターの駆動を強制的に停止する。モーターが止まらないなどの緊急時に使用。

^{第III部} 近傍LIRGsの観測

8 イントロダクション

8.1 先行研究

8.1.1 Ηα 輝線フラックスを用いた星形成率の推定

水素再結合線のフラックスから星形成率を推定する場合、可視光の H α 輝線のフラックスが用いられてきた。Dopita et al.(2002)[3] は 50Mpc~100Mpc の近傍 LIRGs43 天体の H α 輝線の狭帯域フィルタ撮像を行った。 観測対象として H α で観測できる減光の少ない銀河を選んでおり、可視光のスペクトルの観測データを元に、支配的 な光源が HII 領域とわかるものを選んで [2]、H α のフラックスから式 (5) を用いて星形成率 $SFR(H\alpha)$ を推定した。

H α のフラックスは、分光による輝線強度比 [H α]/[H β] からダスト減光を補正し、更に [NII] 輝線の混入による影響を補正した場合、 $SFR(H\alpha) \ge SFR(IR)$ に相関関係がみられ、典型的なサンプルで $SFR(H\alpha)$ が SFR(IR) のおよそ $\frac{1}{3} \sim \frac{1}{2}$ という結果になった。

また、ダストが $H\alpha$ を吸収した場合、その分はダストの再放射に寄与する。このことから、ダスト減光 $A_{H\alpha}$ とSFR(IR)に相関がある可能性が考えられ、比較したところ、若干の比例関係が見られた。

8.1.2 銀河中心領域の水素輝線観測

Quillen & Yukita(2001)[11] はハッブル宇宙望遠鏡の WFPC2、NIICMOS3 を使い、NGC1512、NGC2903、NGC4449、NGC6946、M51 の中心領域を Pa α 、H α で撮像した (A_V は $0\sim5$)。両輝線に映る形状はほぼ同じで、Pa α でのみ見える領域も少数だがあった。

両輝線のフラックスの強度を比較したところ、 $Pa\alpha A_V > H\alpha$ の強度が等しくなるときの減光 A_V が 3.06 > 2推定された。

8.2 ANIR による $Pa\alpha$ 観測の特徴

 $H\alpha$ 輝線のフラックスから星形成率を推定する際、 $H\alpha$ 輝線にはダストの吸収大きく受けること、波長分解能が足りない場合は [NII] 輝線の混入を受けるといった難点がある。しかし、近赤外波長域の $Pa\alpha$ 輝線を用いることでこれらの問題が解決できる。また、8.1.1 節で述べたように、ダスト減光 $A_{H\alpha}$ と SFR(IR) の比例関係がみられ、星形成が活発な領域である程ダストが豊富で減光が激しくなると予想される。そういった領域では、特に $Pa\alpha$ が $H\alpha$ に比べ、優位になる。

8.1.2 節での NICMOS3 カメラでの Paα 狭帯域撮像は銀河中心付近のみを撮像したものだが、ANIR を用いた観測では、その広い視野によって銀河全体を捉えるという点で違いがある。

9 観測

9.1 観測目的

 $Pa\alpha off$ バンドフィルタを用いて近傍 LIRG の $Pa\alpha$ 輝線を観測し、そのフラックスから LIRG の星形成率を推定する。

表 9: 観測天体

name	R.A.	DECL.	cz	D	$logL_{ir}$	観測日	観測バンド
	(J2000)	(J2000)	(kms^{-1})	(Mpc)	(L_{\odot})	(yyyy/mm/dd)	
NGC 0023	$00 \ 09 \ 55.1$	+25 55 37	4536	59.62	11.05	2009/10/26	J,H,Ks,Pa α off,Pa β
NGC 0232	$00 \ 42 \ 46.5$	-23 33 31	6047	79.23	11.30	2009/10/21	H,Ks,Pa α off
ESO 244-G012	$01 \ 18 \ 08.6$	$-44 \ 27 \ 40$	6866	90.96	11.39	2009/10/21	H,Ks,Pa α off
UGC 02238	$02 \ 46 \ 17.0$	$+13 \ 05 \ 45$	6436	83.37	11.26	2009/10/27	H,Ks,Pa α off
IRAS F02437 $+2122$	$02 \ 46 \ 38.3$	$+21 \ 35 \ 06$	6987	90.66	11.11	2009/10/22	H,Ks,Pa α off
NGC 1614	$04 \ 34 \ 00.1$	$-08 \ 34 \ 46$	4746	62.61	11.60	2009/10/15	$_{\rm J,H,Ks,Pa\alpha off}$
MCG-05-12-006	$04 \ 52 \ 06.8$	-32 59 24	5622	75.05	11.12	2009/10/14	$_{\rm J,H,Ks,Pa\alpha off}$
ESO 557-G002	$06 \ 31 \ 46.3$	$-17 \ 37 \ 15$	6339	85.61	11.19	2009/10/19	H,Ks,Pa α off
IRAS F06592-6313	$06 \ 59 \ 40.3$	$-63\ 17\ 53$	6882	94.76	11.17	2009/10/27	H,Ks,Pa α of
NGC 2342	$07 \ 09 \ 19.6$	$+20 \ 38 \ 12$	5276	72.21	11.25	2009/10/23	J,H,Ks,Pa $\alpha off,Pa\beta$
IC $4687/6$	$18\ 13\ 38.6$	-57 43 36	5188	74.12	11.55	2009/06/11	J,H,Ks,Pa $\alpha off,Pa\beta$
IRAS F18293-3413	$18 \ 32 \ 40.2$	-34 11 26	5449	77.76	11.81	2009/06/11	J,H,Ks,Pa $\alpha off,Pa\beta$
ESO 339-G011	$19\ 57\ 37.5$	-37 56 10	5722	79.84	11.12	2009/10/25	H,Ks,Pa α of
NGC 6926	$20 \ 33 \ 04.8$	$-02 \ 01 \ 39$	5970	81.94	11.26	2009/06/12	J,H,Ks,Pa α off,Pa β
ESO 286-G035	$21 \ 04 \ 11.2$	-43 35 34	5208	71.98	11.13	2009/10/27	H,Ks,Pa α of
ESO 343-IG013	$21 \ 36 \ 10.8$	-38 32 38	5714	77.99	11.07	2009/10/25	H,Ks,Pa α of
NGC 7130	$21 \ 48 \ 19.6$	-34 57 05	4824	65.99	11.35	2009/10/26	J,H,Ks,Pa $\alpha off,Pa\beta$
NGC 7469	$23 \ 03 \ 15.5$	$+08 \ 52 \ 25$	4922	65.23	11.59	2009/10/22	$_{\rm J,H,Ks,Pa\alpha off}$
MCG-01-60-022	$23 \ 42 \ 02.2$	$-03 \ 36 \ 48$	6966	91.19	11.21	2009/10/17	J,H,Ks,Pa $\alpha off,Pa\beta$
NGC 7771	$23 \ 51 \ 24.7$	+20 06 39	4336	57.11	11.34	2009/10/27	H,Ks,Pa α of

9.2 観測天体選定

Sanders el al.(2003) THE IRAS REVISED BRIGHT GALAXY SAMPLE[15] から選択した。

- 赤緯: *Dec* < 30[*deg*]
- $L_{ir} > 10^{11} L_{sol}$
- 4000 km/s < cz < 7000 km/s

以上を満たす天体のうちで、夜に観測可能な天体を時季別に以下のように考え、観測候補とした。

- 2009 年 6 月 11 日 ~12 日 赤経 : 10h < R.A. < 21h
- 2009 年 10 月 14 日 ~27 日 赤経: 0h < R.A. < 7h30m, 18h < RA < 24h

9.2.1 観測天体リスト

表 9 に観測した天体とその赤経赤緯、赤方偏移、距離、 $logL_{ir}$ 、観測日、観測バンドを記した。観測天体は $D = 50 \sim 100 Mpc$ の近傍 LIRGs20 天体である。

9.3 観測手法

いずれの天体、バンドも9点ディザリングで撮像しており、ディザリング幅は60"である。積分時間の確保による S/N比の向上と、サチュレーションの回避を両立するために9枚撮像した画像を重ね合わせる方法をとった。また、 9枚の画像をメジアンを用いて重ね合わせることでスカイ画像を作成できる。

各バンドでの積分時間は以下のようである。

- J : $30s \times 9$
- H : $30s \times 9$
- Ks : $30s \times 9$
- $Pa\alpha off: 120s \times 9$
- $Pa\beta$: $60s \times 9$

10 解析とその結果

データ解析には天文解析用のソフトウェアパッケージ IRAF を用いた。

10.1 画像合成

各天体各バンドについて、9点ディザリングで撮像した9枚の画像 RAWFRAME[1-9] をそれぞれ合成する。

1. 各画像のカウントのレベル合わせをする。各画像についてカウントの平均 MEAN[1-9] をとる。このときクリッ ピングにより、星がある明るいピクセルは除く。9 枚全体の平均は

$$AVG = \frac{1}{9} \sum_{n=1}^{9} MEAN[n]$$

であり、

LEVEL[n]=AVG-MEAN[n]

を考えると、以下のように生画像に LEVEL[n] を足せば 9 枚の画像のレベルが合う。

RAWFRAME[n]+LEVEL[n]

- 2. スカイ引き:レベル合わせをした9枚の画像の各ピクセルのメジアンをとることで、スカイ画像を作り、これ を引く。
- フラットフレーム割り:フラットフレームは全日程、30秒以上積分の全ての撮像を用いて、J、H、Ksバンド で作成した。ナローバンドの場合、Paβの画像はJバンドのフラットフレーム、Paαoffの画像はHバンドのフ ラットフレームを用いた。
- 4. 画像に WCS 座標情報を書き込む
 - (a) ANIR 画像上で 2MASS カタログの星のピクセル座標 (x,y) を測定する。
 - (b) ANIR 画像上のピクセル座標 (x,y) と 2MASS カタログ座標を用い、ANIR 取得画像での WCS の解を計算 する。
 - (c) この WCS を ANIR 取得画像ヘッダに WCS 座標情報を書き込む。ここまでを 9 枚全てで行う。
- 5.9 枚の画像を、WCS を用いて位置を合わせてメジアンで足し合わせる。以上で最終画像が完成する。

10.2 等級原点の算出

等級原点 *Z_{mag}* は、画像上で、単位時間露出で1カウントとなる明るさの等級であり、ある天体の実視等級 *AB_{mag}* とその画像上のカウントを用いて以下の式で表される。

$$Z_{mag} = AB_{mag} + 2.5 \times \log \frac{\\mbox{mag} + 0.5 \times \log \frac{\\mbox{mag}}{\\fflow} \tag{8}$$

この値を、各天体各バンドにおいて求める。

- 1. WCS 情報を登録した ANIR の最終画像を用意する。
- 2. 2MASS カタログと位置情報を照し合せ、領域内、カタログ上の全天体について開口測光を行う。測光の半径は、 星像サイズの半値幅の画像上での典型値の3倍の値(8~15pix)にした。
- 3. 2MASS カタログには各天体の JHKs バンドでのベガ等級が載っている。表 10 ⁸を用いてに AB 等級に直す。な お、ANIR の広帯域フィルタの実効波長 (表 5、6) は 2MASS のフィルタとは少し波長がずれるが、2MASS の 等級をそのまま使う。但し、Pa α off バンド波長域での天体の等級は、2MASS の H、Ks バンドを内挿したもの を用いた。また、Pa β バンド波長域での等級は 2MASS の J バンドのものをそのまま使った。

表 10: 2MASS ベガ等級 0 等でのフラックス、AB 等級

バンド	$\lambda(\mu m)$	$F_{\nu} - 0mag[Jy]$	ベガ等級 0 等での AB 等級
J	1.235	1594	0.8945
Η	1.662	1024	1.3740
Ks	2.159	666.7	1.8399

- 4. 各天体の AB 等級とカウントから、式 8 より Z_{mag} を計算する。
- 5. 各バンド各天体について (AB_{mag}, Z_{mag}) をプロットしたものが図 $34 \sim 49$ である。
- 6. 図 $34 \sim 49$ に関して、 $Z_{mag} = (定数)$ として最小二乗法でフィットし、等級原点を決定する。但し、2MASS の 限界等級を考慮し (表 11)、また、明るすぎる天体はサチュレーションを起こすことを考え、フィットに扱う天 体の等級範囲を表 12 のようにした。

フィットして求めた等級原点を表 13~17 にまとめた。これを用いてカウントからフラックス密度が求まる。単位時間で 1 カウントの等級が Z_{mag} であるから、カウントを F_{ν} に変換する係数を $C_{F_{\nu}}[Jy(ADU/s)^{-1}]$ と定義してやると、

$$C_{F_{\nu}} = \frac{3630}{10^{0.4Z_{mag}}} [Jy(ADU/s)^{-1}]$$
(9)

表 11: 2MASS の限界等級 (ポイントソース)

バンド	限界等級 (mag)	
J	15.8	
Η	15.1	
Κ	14.3	

 $^{^{8}2}MASS$ web $^{\sim}-\tilde{\mathcal{Y}}$ http://www.ipac.caltech.edu/2mass/releases/allsky/faq.html

バンド	フィットに使用する明るさ (mag)
J	$12 \sim 15.8$
Η	$12 \sim 15.1$
Ks	$12 \sim 14.3$
$\mathrm{Pa}\alpha\mathrm{off}$	$10 \sim 14.7$
${\rm Pa}\beta$	$10 \sim 15.8$

表 12: バンド毎の等級フィット使用範囲。但し、Pacoff の 2MASS 限界等級は H,Ks から内挿

と表される。更に、カウントを F_{λ} に変換する為の変換係数 $C_{F_{\lambda}}[erg/s/cm^2/\mu m (ADU/s)^{-1}]$ は、 $F_{\lambda} = F_{\nu} \frac{c}{\lambda^2}$ であるから、

$$C_{F_{\lambda}} = C_{F_{\nu}} \frac{c}{\lambda^2} \tag{10}$$

と表される。各天体、バンドの $C_{F_{\nu}}$ 、 $C_{F_{\lambda}}$ を表 13~17 に記した。

表 13: J バンド等級原点、 $C_{F_{\nu}}[mJy(ADU/s)^{-1}]$ 、 $C_{F_{\lambda}}[erg/s/cm^2/\mu m(ADU/s)^{-1}]$

天体名	等級原点	$C_{F_{\nu}}$	$C_{F_{\lambda}}$
NGC0023	$21.399{\pm}0.01521$	0.0100071	1.91929e-13
IC1623A/B	$21.4047{\pm}0.008412$	0.00995466	1.90924e-13
MCG-05-12-006	$21.3878 {\pm} 0.02165$	0.0101108	1.9392e-13
NGC2342	$21.4064{\pm}0.009334$	0.00993909	1.90626e-13
IC4687/6	$21.2463 {\pm} 0.01614$	0.0115183	2.20913e-13
IRAS F18293-3413	$21.1975{\pm}0.01246$	0.0120478	2.31069e-13
NGC6926	$21.213{\pm}0.03802$	0.011877	2.27794e-13
NGC7130	$21.3641{\pm}0.01622$	0.010334	1.98199e-13
NGC7469	$21.3732{\pm}0.03104$	0.0102477	1.96545e-13
MCG-01-60-022	$21.3916{\pm}0.01245$	0.0100755	1.93242e-13
表 14: H バンド等級原点、 $C_{F_{\nu}}[mJy(ADU/s)^{-1}]$ 、 $C_{F_{\lambda}}[erg/s/cm^2/\mu m(ADU/s)^{-1}]$

天体名	等級原点	$C_{F_{\nu}}$	$C_{F_{\lambda}}$
NGC0023	$22.0687 {\pm} 0.01876$	0.00540041	6.08286e-14
NGC0232	$22.0235{\pm}0.0238$	0.00562998	6.34144e-14
IC1623A/B	$22.0776{\pm}0.01136$	0.00535632	6.0332e-14
ESO 244-G012	$22.0799{\pm}0.01593$	0.00534499	6.02043 e- 14
UGC02238	$22.0859{\pm}0.01326$	0.00531553	5.98725e-14
IRAS F02437 $+2122$	$22.0537 {\pm} 0.017$	0.00547554	6.16748e-14
NGC1614	$21.9744{\pm}0.0215$	0.00589042	6.6348e-14
MCG-05-12-006	$22.0031{\pm}0.02044$	0.00573676	6.46171e-14
ESO 557-G002	$22.0957{\pm}0.01327$	0.00526777	5.93346e-14
IRAS F06592-6313	$22.0792{\pm}0.01264$	0.00534843	6.02432 e- 14
NGC2342	$22.0816{\pm}0.008735$	0.00533662	6.01101e-14
IC4687/6	$21.9361{\pm}0.01096$	0.00610192	6.87302e-14
IRAS F18293-3413	$21.9128 {\pm} 0.008545$	0.00623428	7.02211e-14
ESO 339-G011	$22.0864{\pm}0.009797$	0.00531308	5.9845 e- 14
NGC6926	$21.9445{\pm}0.01678$	0.0060549	6.82005 e- 14
ESO 286-G035	$22.0938 {\pm} 0.03445$	0.00527699	5.94385e-14
ESO 343-IG013	$22.052{\pm}0.01383$	0.00548412	6.17714e-14
NGC7130	$22.0673 {\pm} 0.02548$	0.00540738	6.09071e-14
NGC7469	$22.0823{\pm}0.04708$	0.00533318	6.00714 e- 14
MCG-01-60-022	$22.1277{\pm}0.0052$	0.00511478	5.76113e-14
NGC7771	$22.0458{\pm}0.02958$	0.00551552	6.21252e-14

表 15: Ks バンド等級原点、 $C_{F_{\nu}}[mJy(ADU/s)^{-1}]$ 、 $C_{F_{\lambda}}[erg/s/cm^2/\mu m(ADU/s)^{-1}]$

天体名	等級原点	$C_{F_{\nu}}$	$C_{F_{\lambda}}$
NGC0023	$21.9082{\pm}0.01593$	0.00626075	4.06322e-14
NGC0232	$22.3502{\pm}0.01266$	0.00416703	2.7044e-14
IC1623A/B	$21.9226{\pm}0.03377$	0.00617827	4.00969e-14
ESO 244-G012	$21.9344{\pm}0.0575$	0.00611148	3.96635e-14
UGC02238	$21.9382{\pm}0.007071$	0.00609013	3.95249e-14
IRAS F02437 $+2122$	$21.8873\ {\pm}0.01652$	0.00638244	4.1422e-14
NGC1614	$21.7642{\pm}0.02695$	0.00714869	4.63949e-14
MCG-05-12-006	$21.821{\pm}0.03526$	0.00678432	4.40302e-14
ESO 557-G002	$21.9536{\pm}0.01333$	0.00600436	3.89682e-14
IRAS $F06592-6313$	$21.9499{\pm}0.03479$	0.00602486	3.91013e-14
NGC2342	$21.9474{\pm}0.0141$	0.00603874	3.91914e-14
IC4687/6	$21.7735{\pm}0.0104$	0.00708772	4.59992e-14
IRAS F18293-3413	$21.7531{\pm}0.007274$	0.00722215	4.68717e-14
ESO 339-G011	$21.9207{\pm}0.01067$	0.00618909	4.01671e-14
NGC6926	$21.8094{\pm}0.01375$	0.0068572	4.45031e-14
ESO 286-G035	$21.924{\pm}0.02786$	0.0061703	4.00452 e- 14
ESO 343-IG013	$21.9477{\pm}0.02743$	0.00603708	3.91806e-14
NGC7130	$21.8634{\pm}0.02554$	0.00652449	4.23439e-14
NGC7469	$21.8298 {\pm} 0.0768$	0.00672956	4.36748e-14
MCG-01-60-022	$21.9287{\pm}0.00395$	0.00614365	3.98722e-14
NGC7771	$21.8833{\pm}0.03033$	0.006406	4.15748e-14

天体名	等級原点	$C_{F_{\nu}}$	$C_{F_{\lambda}}$
NGC0023	$18.9347 {\pm} 0.01788$	0.0968337	0.796308e-12
NGC0232	$19.3503{\pm}0.06299$	0.0660369	0.543052 e- 12
IC1623A/B	$19.453{\pm}0.0499$	0.0600768	0.494039e-12
ESO 244-G012	$19.0601{\pm}0.009976$	0.0862714	0.709449e-12
UGC02238	$19.0311{\pm}0.0517$	0.0886067	0.728654 e- 12
IRAS F02437 $+2122$	$19.028 {\pm} 0.02186$	0.0888601	0.730737e-12
NGC1614	$18.7602{\pm}0.05304$	0.113717	0.93515e-12
MCG-05-12-006	$18.0073{\pm}0.002153$	0.227503	1.87086e-12
ESO 557-G002	$19.0016{\pm}0.02286$	0.0910472	0.748723e-12
IRAS F06592-6313	$18.8975{\pm}0.02433$	0.100209	0.824065e-12
NGC2342	$18.6132{\pm}0.01672$	0.130205	1.07073e-12
IC4687/6	$18.6131{\pm}0.03127$	0.130217	1.07083e-12
IRAS F18293-3413	$18.7209{\pm}0.00856$	0.117909	0.969619e-12
ESO 339-G011	$18.8931 {\pm} 0.01244$	0.100616	0.827411e-12
NGC6926	$18.8763 {\pm} 0.02519$	0.102185	0.840313e-12
ESO 286-G035	$18.9533 {\pm} 0.05269$	0.095189	0.782783e-12
ESO 343-IG013	$19.022{\pm}0.02155$	0.0893525	0.734787e-12
NGC7130	$19.118 {\pm} 0.03286$	0.0817912	0.672607 e-12
NGC7469	$19.1511 {\pm} 0.1267$	0.0793353	0.652411 e- 12
MCG-01-60-022	$19.1322{\pm}0.0029$	0.0807285	0.663867 e-12
NGC7771	18.9097 ± 0.04662	0.0990893	0.814857e-12

表 16: Pa α off バンド等級原点、 $C_{F_{\nu}}[mJy(ADU/s)^{-1}]$ 、 $C_{F_{\lambda}}[erg/s/cm^2/\mu m(ADU/s)^{-1}]$

表 17: Pa β バンド等級原点、 $C_{F_{\nu}}[mJy(ADU/s)^{-1}]$ 、 $C_{F_{\lambda}}[erg/s/cm^2/\mu m(ADU/s)^{-1}]$

天体名	等級原点	$C_{F_{\nu}}$	$C_{F_{\lambda}}$
NGC0023	$19.1346{\pm}0.02497$	0.0805502	1.47262e-12
NGC2342	$19.1108 {\pm} 0.01135$	0.0823354	1.50526e-12
IC4687/6	$18.911{\pm}0.01061$	0.0989707	1.80938e-12
IRAS F18293-3413	$18.928 {\pm} 0.007725$	0.0974331	1.78127e-12
NGC6926	$18.9344{\pm}0.01821$	0.0968605	1.7708e-12
NGC7130	$19.0719{\pm}0.05742$	0.0853388	1.56016e-12
MCG-01-60-022	$19.057{\pm}0.01145$	0.086518	1.58172e-12

10. 解析とその結果

10.3 システム効率

望遠鏡に入射してきた光子のうち、実際に ANIR で検出できた光子の割合が、ANIR のシステムとしての効率となる。

望遠鏡に入射してくる光子の数は主鏡の口径の二乗に比例し、

$$n_{tel} = \pi \left(\frac{D}{2}\right)^2 \frac{F_\lambda \Delta \lambda}{h\nu} = \pi \left(\frac{D}{2}\right)^2 \frac{F_\nu \Delta \nu}{h\nu}$$
(11)

となる。

miniTAO1m 望遠鏡の場合、D=1m である。各フィルタ波長域での等級は、等級原点を求めたとき同様 2MASS のカ タログから算出する (10.2 節)。

また、ANIR で検出された光子の数はコンバージョンファクタ C_{ANIR}[e⁻/ADU] を用いて以下のように表される。

$$n_{ANIR} = \frac{C_{ANIR} \times (画像上のカウント数)}{積分時間}$$
(12)

ANIR のコンバージョンファクタは C_{ANIR} =3.4[e-/ADU] である。画像のカウント数は等級原点をもとめるときに開 口測光により測定している。

式(11)、(12)を用いて、

$$\eta = \frac{n_{anir}}{n_{tel}} \tag{13}$$

で、システム効率 η が計算できる。

各バンド各天体に関して、 (AB_{mag},η) をプロットしたものが図 50~65 である。プロットに対し等級原点の場合と同様、表 11 の AB 等級の範囲で最小二乗法により $\eta = (定数)$ でフィットし、システム効率とする。値を表 18~22 にまとめた。

天体名	システム効率
NGC0023	0.220208 ± 0.220208
IC1623A/B	$0.226927{\pm}0.007253$
MCG-05-12-006	$0.218552{\pm}0.001212$
NGC2342	$0.228253{\pm}0.00368$
IC4687/6	$0.193197 {\pm} 0.001255$
IRAS F18293-3413	$0.192929{\pm}0.001782$
NGC6926	$0.188658 {\pm} 0.008021$
NGC7130	$0.227368 {\pm} 0.227368$
NGC7469	$0.202877 {\pm} 0.008939$
MCG-01-60-022	$0.226758{\pm}0.005693$

表 18: J バンドシステム効率

表 19: H バンドシステム効率

天体名	システム効率
NGC0023	$0.29818 {\pm} 0.004208$
NGC0232	$0.277563 {\pm} 0.006079$
IC1623A/B	$0.291059{\pm}0.003902$
ESO 244-G012	$0.297712{\pm}0.008251$
UGC02238	$0.28971 {\pm} 0.005569$
IRAS F02437+2122	$0.293378 {\pm} 0.004431$
NGC1614	$0.272473 {\pm} 0.003144$
MCG-05-12-006	$0.272818 {\pm} 0.003957$
ESO 557-G002	$0.29871 {\pm} 0.002795$
IRAS $F06592-6313$	$0.295055{\pm}0.003387$
NGC2342	$0.297623 {\pm} 0.00297$
IC4687/6	$0.258094 {\pm} 0.002233$
IRAS F18293-3413	$0.25276{\pm}0.002778$
ESO 339-G011	$0.300372 {\pm} 0.002434$
NGC6926	$0.260297 {\pm} 0.00941$
ESO 286-G035	$0.29378 {\pm} 0.003255$
ESO 343-IG013	$0.293186{\pm}0.004661$
NGC7130	$0.292624{\pm}0.009196$
NGC7469	$0.267564 {\pm} 0.004616$
MCG-01-60-022	$0.298691 {\pm} 0.004844$
NGC7771	$0.279911 {\pm} 0.001583$

天体名	システム効率
NGC0023	$0.305182 {\pm} 0.004487$
NGC0232	$0.272619{\pm}0.01734$
IC1623A/B	$0.315482 {\pm} 0.005734$
ESO 244-G012	$0.299828 {\pm} 0.0006915$
UGC02238	$0.314698 {\pm} 0.005536$
IRAS F02437+2122	$0.30416{\pm}0.004596$
NGC1614	$0.276117{\pm}0.003566$
MCG-05-12-006	$0.294418 {\pm} 0.002405$
ESO 557-G002	$0.314801 {\pm} 0.00304$
IRAS F06592-6313	$0.309783 {\pm} 0.004839$
NGC2342	$0.315456{\pm}0.004526$
IC4687/6	$0.268448 {\pm} 0.002378$
IRAS F18293-3413	$0.266732 {\pm} 0.001452$
ESO 339-G011	$0.310185{\pm}0.003181$
NGC6926	$0.276226{\pm}0.003118$
ESO 286-G035	$0.306227{\pm}0.009394$
ESO 343-IG013	$0.312922{\pm}0.005115$
NGC7130	$0.301057 {\pm} 0.004221$
NGC7469	$0.280043 {\pm} 0.01067$
MCG-01-60-022	$0.307616{\pm}0.003108$
NGC7771	$0.290589{\pm}0.01381$

表 20: Ks バンドシステム効率

天体名	システム効率
NGC0023	$0.167864 {\pm} 0.003013$
NGC0232	$0.194082{\pm}0.008551$
ESO 244-G012	$0.192538 {\pm} 0.001775$
UGC02238	$0.173461 {\pm} 0.00569$
IRAS F02437 $+2122$	$0.196013 {\pm} 0.002662$
NGC1614	$0.147956 {\pm} 0.007141$
MCG-05-12-006	$0.0730067 {\pm} 0.0001448$
ESO 557-G002	$0.181396 {\pm} 0.004057$
IRAS F06592-6313	$0.161699 {\pm} 0.004125$
NGC2342	$0.127478 {\pm} 0.003526$
IC4687/6	$0.128556 {\pm} 0.00256$
IRAS F18293-3413	$0.142353{\pm}0.001161$
ESO 339-G011	$0.168687 {\pm} 0.002995$
NGC6926	$0.162807 {\pm} 0.003831$
ESO 286-G035	$0.17602{\pm}0.003595$
ESO 343-IG013	$0.180185{\pm}0.002724$
NGC7130	$0.200399 {\pm} 0.003672$
NGC7469	$0.1039{\pm}0.0009395$
MCG-01-60-022	$0.205489 {\pm} 0.005582$
NGC7771	$0.153842 {\pm} 0.007115$

表 21: Pacoff バンドシステム効率

表 22: Paβ バンドシステム効率

天体名	システム効率
NGC0023	$0.207261 {\pm} 0.00545$
NGC2342	$0.207162 {\pm} 0.00127$
IC4687/6	$0.174545{\pm}0.001696$
IRAS F18293-3413	$0.175878 {\pm} 0.0009029$
NGC6926	$0.1711{\pm}0.006657$
NGC7130	$0.188783 {\pm} 0.00525$
MCG-01-60-022	$0.208455{\pm}0.01406$



図 21: Paa オフバンドフィルタと大気透過率

10.4 Paa 輝線フラックス

10.4.1 大気透過率の波長依存性

Paα オフバンドの波長域は図 21 のように波長により大気透過率の変化が大きく、更に天候による大気中の水蒸気 量変化の影響も大きく受ける。この大気による影響に注意して、以下、Paα 輝線のフラックスを抽出していく。

望遠鏡に入射するフラックスについて、輝線のフラックスと連続光成分を分離したい。但し、以下では

 $F_{Pa\alpha}$: Pa α 輝線のフラックス

 $F_{Pa\alpha off}$: Pa α off バンドでのフラックス密度。観測量である。

 $F_{continuum}$: Pa α off バンドでの連続光のフラックス密度。H バンド、Ks バンドのデータ観測量から推定される値

 $\Delta \lambda$: Pa α off バンドフィルタ透過率の半値幅 (表 6)

 $T(\lambda)$: 大気透過率

 T_{eff} : Pa α off バンドでの平均の透過率で、 $\frac{1}{\Delta\lambda}\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}T(\lambda)d\lambda$ である。

 ϵ_{atm} :赤方偏移した $Pa\alpha$ 輝線波長での大気透過率

とする。

 $Pa\alpha$ オフバンドフィルタを用いたときに観測されるフラックスは $F_{Pa\alpha off}T_{eff}\Delta\lambda$ と書ける。これを $Pa\alpha$ 輝線と連続 光に分けて考えると

$$F_{Pa\alpha off}T_{eff}\Delta\lambda = \epsilon_{atm}F_{Pa\alpha} + F_{continuum}T_{eff}\Delta\lambda \tag{14}$$

と書ける。よって、 $Pa\alpha$ 輝線のフラックスは、観測されたフラックス密度 $F_{Pa\alpha off}$ とその内の連続光成分のフラック ス密度 $F_{continuum}$ を用いて以下のように表わせる。

$$F_{Pa\alpha} = \frac{1}{\epsilon_{atm}} (F_{Pa\alpha off} - F_{continuum}) T_{eff} \Delta \lambda$$
(15)

10.4.2 輝線画像の合成、測光

10.1 節で合成した Pa α off バンドの画像の測光から $F_{Pa\alpha off}$ が得られる。また、H バンド及び Ks バンドの画像から 内挿した Pa α off バンド波長域の連続光の画像の測光から得る値を $F_{continuum}$ とする。そこで、両画像を差分して輝 線画像が得られ、それを測光して輝線のフラックス密度を求める。具体的には以下の処理を行う。

- 1. 10.1 節で合成した、WCS 座標情報登録済みの合成画像 WCSFRAME を Pacoff、H、Ks 各バンドについて用意 する。
- 2. WCSFRAME 各バンド画像のカウントを、表 13~17 の変換係数を用いてフラックス密度 F_{λ} へ変換した画像 FLAMFRAME を合成する。
- H バンド、Ks バンドの FLAMFRAME から内挿して Paα オフバンドフィルタ波長域における連続光の画像 CONTINUUMFRAME を合成する。ここでは H バンドから Ks バンドまでのフラックス密度が λ の一次関数で 表せるとした。
- 4. Paαoff の WCSFRAME から CONTINUUMFRAME を引いて輝線画像 LINEFRAME ができる。
- LINEFRAME で観測対象 LIRG の領域を開口測光して (F_{Paaoff} F_{continuum})を得る。測光範囲の大きさは 表 23 にまとめた。測光の中心をカウントのピークもしくは中心にとり、天体の全領域を含む範囲にした。但し、 NGC6926 のみ形状の都合から 3 回に分けて測光した。
- 6. 以上を各天体について行う。完成画像を図 24~27 に示す。

10.4.3 水蒸気量と大気透過率

あとは $Pa\alpha$ オフバンドフィルタ波長域の大気透過率の平均値 T_{eff} と、輝線波長の透過率 ϵ_{atm} がわかれば輝線のフラックスが求められる。ただし、大気中の水蒸気量により、図 22 9 のように大気透過率が変動する。各 PWV における T_{eff} の値を表 24 に記す。

以下の方法で大気内の水蒸気量を見積もることにする。

- 1. Paαoff、H、Ks 各バンドで求めたシステム効率 η(10.3 節) を用意する。
- 2. $\eta_{Pa\alpha off}$ と、「 η_H 、 η_{Ks} の値から内挿して得られる $\eta'_{Pa\alpha off}$ の値」を比較する。 $\eta_{Pa\alpha off}$ は Paa オフバンド画像の測光データ解析から得たものであり、大気吸収の影響が含まれた値であるが、 $\eta'_{Pa\alpha off}$ は H、Ks バンドの情報から予測する値の為、大気吸収が考慮されない。つまり、 $\eta_{Pa\alpha off}$ と $\eta'_{Pa\alpha off}$ との比較で大気吸収の度合いがわかり、水蒸気量を見積もれる。
- 3. η'_{Paaoff} に大気透過率の平均値 (表 25) をかけてシステム効率の PWV 依存性を見積もる。結果を図 23 に示す。
- 4. こうして見積もった水蒸気量ごとの予測値から、η_{Paαoff}によく合致するものを選び、水蒸気量を決定する。

 $\eta_{Pacoff}/\eta'_{Pacoff}$ と、予測した水蒸気量、予測水蒸気量での $Pa\alpha$ 輝線の透過率を表 25 にまとめた。

⁹大気吸収計算ソフト ATRAN による

天体	半径 (pix)
NGC0023	30
NGC0232	30
ESO 244-G012	15
UGC02238	60
IRAS F02437+2122	15
NGC1614	40
MCG-05-12-006	40
ESO 557-G002	30
IRAS F06592-6313	15
NGC2342	80
IC4687/6	35
IRAS F18293-3413	40
ESO 339-G011	40
NGC6926	35×3 region
ESO 286-G035	40
ESO 343-IG013	50
NGC7130	25
NGC7469	40
MCG-01-60-022	70
NGC7771	30

表 23: 開口測光範囲

表 24: 可降水量別の実効大気透過率

可降水量 PWV(mm)	大気透過率平均值 T_{eff}
250	0.726
500	0.638
750	0.551
1000	0.504
1500	0.431
2000	0.374
3000	0.320



図 22: PWV 別の大気透過率



図 23: 水蒸気量によるシステム効率の予測 — PWV 毎に ×-250mm、□-500mm、色つき □-750mm、○-1000mm、 ●-1500mm、△-2000mm、色つき △-3000mm

表 25:予測される水蒸気量と $ext{Pa} lpha$ 輝線の大気透過率 — $\eta'_{Palpha off}/\eta_{Palpha off}$ は実効大気透過率 T_{eff} に相当

	$\eta'_{Pa\alpha off}/\eta_{Pa\alpha off}$	$\epsilon_{atm}(\%)$	
NGC0023	0.555958	$0750\mathrm{mm}$	46.5687
NGC0232	0.705982	$0250\mathrm{mm}$	86.8405
ESO 244-G012	0.64427	$0500\mathrm{mm}$	97.1728
UGC02238	0.572261	$0750\mathrm{mm}$	80.1236
IRAS F02437+2122	0.655206	$0500\mathrm{mm}$	95.7456
NGC1614	0.539142	$0750\mathrm{mm}$	40.6491
MCG-05-12-006	0.256699	$3000 \mathrm{mm}$	52.1844
ESO 557-G002	0.590209	$0750\mathrm{mm}$	58.4137
IRAS F06592-6313	0.533736	$0750\mathrm{mm}$	94.0969
NGC2342	0.414982	$1500\mathrm{mm}$	75.1252
IC4687/6	0.487603	$1000 \mathrm{mm}$	73.6313
IRAS F18293-3413	0.546973	$0750\mathrm{mm}$	71.1387
ESO 339-G011	0.551921	$0750\mathrm{mm}$	69.8180
NGC6926	0.605585	$0500\mathrm{mm}$	77.8625
ESO 286-G035	0.585839	$0750\mathrm{mm}$	83.7280
ESO 343-IG013	0.593155	$0750\mathrm{mm}$	57.3221
NGC7130	0.674409	$0500\mathrm{mm}$	9.9747
NGC7469	0.378839	$2000 \mathrm{mm}$	5.4824
MCG-01-60-022	0.677112	$0500\mathrm{mm}$	96.4164
NGC7771	0.538588	$0750\mathrm{mm}$	79.5433

10.4.4 Paα 輝線フラックスの計算結果

以上で得られた $(F_{Pa\alpha off} - F_{continuum})$ 、 T_{eff} 、 ϵ_{atm} より算出した各天体の $Pa\alpha$ 輝線フラックスを表 26 に示す。

天体名	$F_{Pa\alpha}(erg/s/cm^2)$
NGC0023	9.59e-14
NGC0232	4.58e-14
ESO 244-G012	3.53e-13
UGC02238	2.00e-13
IRAS F02437+2122	8.90e-14
NGC1614	6.17e-13
MCG-05-12-006	1.83e-13
ESO 557-G002	5.73e-14
IRAS F06592-6313	4.62e-14
NGC2342	2.578e-13
IC4687/6	4.76e-13
IRAS F18293-3413	6.48e-13
ESO 339-G011	9.57e-14
NGC6926	1.41e-13
ESO 286-G035	1.80e-13
ESO 343-IG013	7.06e-14
NGC7130	1.97e-14
NGC7469	2.66e-13
MCG-01-60-022	1.34e-13
NGC7771	1.37e-13

表 26: Paa フラックスの計算結果



図 24: 各バンドの最終画像及び輝線画像。右端列の画像は、Paa 輝線の画像で Paaoff の画像から、H、Ks バンドの 画像より内挿して得た連続光の画像を引いて作成した



図 25: 各バンドの最終画像及び輝線画像。右端列の画像は、Paa 輝線の画像で Paaoffの画像から、H、Ks バンドの 画像より内挿して得た連続光の画像を引いて作成した (つづき)



図 26: 各バンドの最終画像及び輝線画像。右端列の画像は、Paa 輝線の画像で Paaoff の画像から、H、Ks バンドの 画像より内挿して得た連続光の画像を引いて作成した (つづき)



図 27: 各バンドの最終画像及び輝線画像。右端列の画像は、Paa 輝線の画像で Paaoff の画像から、H、Ks バンドの 画像より内挿して得た連続光の画像を引いて作成した (つづき)

天体名	SFR(IR)	$SFR(H\alpha)$	$SFR(Pa\alpha)$	銀河のタイプ [2]
NGC0023	13.41	-	5.91	HII
NGC0232	26.76	-	2.69	LINER
ESO 244-G012	28.67	-	24.4	-
UGC02238	25.55	-	14.1	LINER
IRAS F02437 $+2122$	18.09	-	5.85	LINER
NGC1614	46.50	58.0	48.3	HII
MCG-05-12-006	16.88	-	16.0	-
ESO 557-G002	21.25	2.28	5.84	-
IRAS F06592-6313	19.38	-	3.58	-
NGC2342	26.15	-	14.6	-
IC $4687/6$	42.41	21.2	28.9	-
IRAS F18293-3413	84.61	-	44.7	HII
ESO 339-G011	15.40	-	7.10	-
NGC6926	22.26	-	9.88	Sy2
ESO 286-G035	17.28	-	9.03	-
ESO 343-IG013	14.70	5.47	6.09	LINER
NGC7130	29.34	-	6.96	LINER
NGC7469	43.39	-	167.5	Sy1
MCG-01-60-022	18.09	36.5	9.37	-
NGC7771	29.33	-	4.58	HII

表 27: L_{ir} 、H α 、Pa α から推定される星形成率 (単位は $[M_{\odot}/yr]$)

11 議論

11.1 星形成率の推定

Case B の再結合を仮定してすると式 (5) は

$$SFR(Pa\alpha)[M_{\odot}/yr] = 6.79 \times 10^{-41} L(Pa\alpha)[erg/s]$$
⁽¹⁶⁾

と変換できる (Alonso-Herrero et. al 2006[16])。

これを用いて $Pa\alpha$ フラックスの値から求めた星形成率 $SFR(Pa\alpha)$ と赤外線光度 L_{ir} から求めた星形成率 SFR(IR)[式 (6)] を表 27 に示す。

11.2 Hα から推定した星形成率との比較

Dopita(2002)[3] では、減光の比較的少ない近傍 LIRG について、H α の観測量を減光補正した後に星形成率を見積 もっている。このうち、今回のサンプルとオーバーラップする 5 天体について $SFR(Pa\alpha)$ 、 $SFR(H\alpha)$ の比較を表 27 にまとめた。

また、 $SFR(Pa\alpha)$ 、 $SFR(H\alpha)$ をプロットしたものが図 28 である。

ー般的に ULIRGs と比べてダスト減光の少ない LIRGs において、Paα 輝線から推定した星形成率は、減光補正を した Hα による星形成率と比較的良い相関関係を見せた。よって、Paα 輝線のフラックスからダスト吸収の補正をせ ずに星形成率を推定することは Hα と同等の妥当性があるとに考えられる。



図 28: $SFR(Pa\alpha)$ 、 $SFR(H\alpha)$ の比較

11.3 赤外光度から推定した星形成率との比較

SFR(IR)、 $SFR(Pa\alpha)$ をプロットしたものが図 29 である。

図 29 において破線は SFR(IR) と $SFR(Pa\alpha)$ が等しい線である。点線は破線を縦軸方向に -0.3 シフトしたもの である。星形成の推定に $Pa\alpha$ 輝線を用いた場合、赤外光度での場合に比べ、半分以下になっているものがかなりある。 それはどのような銀河なのか、以降の節で述べる。

11.4 AGN の寄与

可視のスペクトルから銀河を以下の4つにタイプ分けできる[2]。

- 1. HII 領域
- 2. LINER(Low-Ionization Nuclear Emission Region)
- 3.1型セイファート銀河
- 4.2型セイファート銀河

Kim et al.(1995)[2] による LIRGs の可視スペクトル診断において、今回観測した LIRGs のうちで 11 天体が対象と なっていた。そのタイプ分けの結果を表 27 に記す。*SFR*(*IR*)-*SFR*(*Pa* α) 関係を、銀河のタイプごとに分類して図 30 に示した。

図 30 をみると、HII 領域の支配的な銀河は NGC7771 を除いて大きな SFR(IR) 超過は無い。LINER の支配的な銀河は、SFR(IR) と $SFR(Pa\alpha)$ が等しいものから大きく SFR(IR) 超過するものまで多様である。SFR(IR) の際立つ銀河はほとんどこの、LINER の支配的な銀河である。LINER で SFR(IR) 超過となる場合、中心の AGN が周



図 29: SFR(IR) と SFR(IR) の比較



図 30: SFR(IR) と SFR(Paa) の比較 | ×-HII 領域、△-LINER、○-セイファート 1 型銀河、●-セイファート 2 型銀河



図 31: フラックス中心集中度と SFR(IR)-SFR(Paa) 比の関係 | 横軸:(1 秒角あたりのフラックス)/(トータルのフラッ クス)、縦軸:log[F(Paa)/F(FIR)]

囲のダストを暖めてダスト放射を起こしたと考えられる。セイファート1型銀河はサンプルが1つしか無いが、非常 に大きい *SFR*(*Pa*α) 超過をしている。これは Paα 波長でのブロードラインが見えているからだと考えられる。セイ ファート2型銀河もサンプルは1つで、こちらは目立った特徴はない。

星形成率の指標としての Paα 輝線のフラックスの妥当性を考えるならば、HII 領域以外が支配的であることが分かっているサンプルは除くべきだと言える。

11.5 フラックスの中心集中度による星形成率の比較

ANIR の解像度を活かして、銀河の形状を確認することが出来る。IRAS F02437+2122(図 24) や IRAS F06592-6313(図 25)の輝線イメージを画像上で確認すると際立った中心集中をしている。また、これらは SFR(IR) 超過 が目立っていた。そこで銀河の形状的特徴として、フラックスの中心集中度を考え、SFR(IR) 超過 との関係を探る。 $\frac{SFR(Pa\alpha)}{SFR(IR)}$ 比と、銀河中心部、半径 1″の円視野の Pa α 輝線フラックスが銀河全体の Pa α 輝線フラックスに対し占め る割合 $\frac{F(Pa\alpha)_{1''}}{F(Pa\alpha)_{1+d}}$ を比較する。プロットの結果を図 31 に示す。

図 31 において、 $Pa\alpha$ 輝線フラックスの中心集中度が高い銀河、特に $\frac{F(Pa\alpha)_{1''}}{F(Pa\alpha)_{total}} > 0.5$ では大きな SFR(IR) 超 過をみせる傾向が顕著であるこれには NGC232 と IRAS F06592-6313 があてはまる。際立った中心集中のサンプル が SFR(IR) 超過をするのは、おそらく中心の AGN が周囲のダストを暖めるからだと予想される。なお、表 27 で NGC232 は LINER に分類されている。また、中心集中度が 0 に近付き、広がった銀河になるにつれ、SFR(IR) と SFR(IR) の比は大きな幅を見せるようになるため、SFR(IR) 超過をみせる銀河全てが中心集中しているわけでは ない。

観測対象の銀河	R.A.	Dec.	ペアの銀河銀河	R.A.	Dec.
ESO 557-G002	$06 \ 31 \ 46.3$	$-17 \ 37 \ 15$	ESO 557-G01	$06 \ 31 \ 46$	-17 38 47
NGC2342	$07 \ 09 \ 19.6$	$+20 \ 38 \ 12$	NGC2341	$07 \ 09 \ 12$	$+20 \ 36 \ 10$
IC4687/6	$18 \ 13 \ 38.6$	-57 43 36	IC4689	$18 \ 13 \ 40$	-57 44 53
NGC7469	$23 \ 03 \ 15.5$	+08 52 25	IC5283	$23 \ 03 \ 18$	+08 53 37
NGC7771	$23 \ 51 \ 24.7$	+20 06 39	NGC7770	$23 \ 51 \ 23$	$+20 \ 05 \ 47$

表 28: ANIR 視野内に映るペア



図 32: *SFR*(*IR*) と *SFR*(*IR*) の比較 | □-ペア無し、●-ペア有

11.6 ペアとなる銀河の有無

IRAS のビームサイズは > 1' で、分解能が 2' ~ 5' である。ANIR の視野内に収まる程近く (~ 2') にペアとなる銀河があった場合、IRAS ではペアとの区別が出来ていないと考えられる。今回の観測天体で視野内にペアが見られたのは表 28 の 5 天体である。5 天体を区別して図 29 をプロットしなおしたものが図 32 である。

図 32 において、*SFR*(*IR*) 超過の 2 天体が ESO 557-G002、NGC7771 で、ペアの銀河の影響で *SFR*(*IR*) 超過と なった可能性がある。NGC2342、IC4687/6 は他の銀河と変わらない振舞いをみせている。極めて目立つ *SFR*(*Pa*α) 超過をみせているものが NGC7469 であるが、これはセイファート 1 型銀河であり、ペアの存在の影響を考える際に は参考にならないとものみなす。

以上の考察をまとめ、以下の銀河を除外して図 29 をプロットしなおす。

• 可視スペクトルから HII 領域が支配的でないとわかっているもの



図 33: SFR(IR) と SFR(IR) の比較 — 点線は式 (17) で表される直線

中心集中の際立つ NGC232、IRAS F06592-6313

• ペアの銀河の存在による SFR(IR) 超過が疑われる ESO 557-G002、NGC7771

プロットの結果が図 33 である。傾き1の直線で最小二乗フィットし、以下の式を得た。

$$log[SFR(Pa\alpha)] = log[SFR(IR)] - 0.203$$
⁽¹⁷⁾

式 (17) は、典型的な HII 領域において、 $SFR(Pa\alpha)$ が SFR(IR) のおよそ $\frac{2}{3}$ となることを示す。 $SFR(Pa\alpha)$ が SFR(IR) に比べて少なく見積もられてしまった原因として可能性があるものは $L_{Pa\alpha}$ の過小評価か、 L_{ir} の過大評価 である。前者であれば、 $Pa\alpha$ 輝線の受ける大気吸収の補正を甘く見積もったということが考えられる。後者は、 L_{ir} が その定義方法により $\Delta log \frac{L_{ir}}{L_{\odot}}$ が 0.10 程度変動することによる。

12 まとめ

2009年6月、10月の2回の観測により、東大 miniTAO 望遠鏡/ANIR による、近傍銀河の $cz = 4000 \sim 7000 km/s$ に赤方偏移した Pa α 輝線の観測が充分に可能であることが実証された。

また、得られた Paα 光度からダスト吸収の補正をせずに星形成率 *SFR*(*Paα*)を算出した結果、減光の比較的少ない 銀河 5 天体においては、減光を補正した Hα フラックスから導出した星形成率 *SFR*(Hα) とよく一致した。Paα 輝線 の波長域では大気吸収の速度成分、水蒸気量による変動が非常に激しく、大気透過率の補正方法の実用性に懸念があっ た。しかしこの結果により、大気透過率の正確な補正が可能であることも実証された。

次に $SFR(Pa\alpha)$ を赤外線光度 L_{ir} から推定した星形成率 SFR(IR) とも比較をしたところ、AGN の寄与が大きいと 予想される銀河では SFR(IR) が大きく超過するものが目立った。更に、ANIR の分解能を生かしての銀河の形状に 関する議論も可能で、中心集中の際立つ銀河にも目立った SFR(IR) 超過が見られ、主光源としての AGN の存在が 予測される。HII 領域が支配的であり、且つ異常な中心集中の無い銀河に関しては、星形成率が SFR(IR) の $\frac{2}{3}$ 程度 になるという相関関係が得られた。

謝辞

当研究のきっかけを与えてくださり、定期的に研究の助言を下さった指導教員の田中培生先生に深く感謝を申し上 げます。東京大学天文学教育研究センターの本原顕太郎先生には天文学の基礎から研究や解析の手法、方針など多岐 に渡りサポートしていただき、大変お世話になりました。本当に有難うございました。小西真広さん、三谷夏子さん、 国立天文台の板由房さん、その他望遠鏡開発グループの皆様の御協力により、アタカマでの観測を無事に終えること が出来、大変有意義な体験とデータを得ることができました。本研究に関わった方々及び、日常的に御世話になった 東京大学天文学教育研究センターの全ての方々に心よりお礼を申し上げます。

参考文献

- [1] Sanders D. B., Mirabel I. F., 1996, ARA&A, 34, 749
- [2] Veilleux S., Kim D.-C., Sanders D. B., Mazzarella J. M., Soifer B. T., 1995, ApJS, 98, 171
- [3] Dopita, M. A., Pereira, M., Kewley, L. J., & Capaccioli, M. 2002, ApJS, 143, 47
- [4] Bell, E. F., & Kennicutt, R. C., Jr. 2001, ApJ, 548, 681
- [5] Sullivan, M., Mobasher, B., Chan, B., Cram, L., Ellis, R., Treyer, M., & Hopkins, A. 2001, ApJ, 558, 72
- [6] Leitherer, C., & Heckman, T. M. 1995, ApJS, 96, 9
- [7] Kennicutt, R. C., Jr. 1998, ARA&A, 36, 189
- [8] Kewley, L. J., Dopita, M. A., Sutherland, R. S., Heisler, C. A., & Trevena, J. 2001a, ApJ, 556, 121
- [9] Kewley, L. J., & Dopita, M. A. 2002, ApJS, 142, 35
- [10] Inoue, A. K., Hirashita, H., & Kamaya, H. 2000, PASJ, 52, 539
- [11] Quillen, A. C., & Yukita, M. 2001, AJ, 121, 2095
- [12] Sako, S. et al., "The University of Tokyo Atacama 1.0-m telescope", 2008, Proceedings of the SPIE, 7012, 70122T
- [13] Motohara, K. et al., "ANIR: Atacama Near Infrared Camera for Paschen Imaging", 2008, Proceedings of the SPIE, 7014, 70142T
- [14] Miyata, T. et al., "A new mid-infrared camera for ground-based 30 micron observations: MAX38", 2008, Proceedings of the SPIE, 7014, 701428
- [15] Sanders, D. B., Mazzarella, J. M., Kim, D.-C., Surace, J. A., & Soifer, B. T. 2003, AJ, 126, 1607
- [16] Alonso-Herrero A., Rieke G. H., Rieke M. J., Colina L., Perez-Gonzalez P. G., Ryder S. D., 2006, ApJ, 650, 835

^{第IV部} 付録

等級原点のプロット



図 34: 等級原点フィット:J バンド1



図 35: 等級原点フィット:J バンド 2



図 36: 等級原点フィット:H バンド1



図 37: 等級原点フィット:H バンド 2



図 38: 等級原点フィット:H バンド 3



図 39: 等級原点フィット:H バンド 4





23.5

23

23.5

23

図 40: 等級原点フィット:Ks バンド1



図 41: 等級原点フィット:Ks バンド 2



図 42: 等級原点フィット:Ks バンド 3


図 43: 等級原点フィット:Ks バンド 4



図 44: 等級原点フィット:Paa オフバンド1



図 45: 等級原点フィット:Paa オフバンド 2



図 46: 等級原点フィット:Paa オフバンド 3



図 47: 等級原点フィット:Paa オフバンド 4



74



図 48: 等級原点フィット:Paβ バンド 1



図 49: **等級原点フィット**:Paβ バンド 2







図 51: システム効率フィット:J バンド 2





図 52: システム効率フィット:H バンド1



図 53: システム効率フィット:H バンド 2



図 54: システム効率フィット:H バンド 3



図 55: システム効率フィット:H バンド 4



図 56: システム効率フィット:Ks バンド1



図 57: システム効率フィット:Ks バンド 2



図 58: システム効率フィット:Ks バンド 3



図 59: システム効率フィット:Ks バンド 4



図 60: システム効率フィット:Paa オフバンド1



図 61: システム効率フィット:Paa オフバンド 2



図 62: システム効率フィット:Paa オフバンド 3



図 63: システム効率フィット:Paa オフバンド 4



図 64: システム効率フィット:Pa_β バンド 1



図 65: システム効率フィット:Paβ バンド 2