

「多色撮像による近傍渦巻銀河の HII 領域 SED の研究計画」

西浦 慎悟、土橋 一仁 (東京学芸大学・自然科学系・宇宙地球科学分野)

柏木 雄太 (東京学芸大学・大学院教育学研究科)

富田 晃彦 (和歌山大学・教育)、濤崎 智佳 (国立天文台・野辺山)

1. はじめに—系外銀河における星生成—

本稿では、2006 年度から東京大学天文学教育研究センター木曾観測所の 105cm シュミット望遠鏡と 2kCCD を用いて行っている”多色撮像観測による近傍銀河 HII 領域の SED 研究”の計画概要を紹介する。なお進捗状況については、本シンポジウムの柏木氏の講演(柏木雄太 2008, “輝線撮像観測による M81・M101 の HII 領域の研究”, 木曾シュミットシンポジウム 2008)を参照して頂きたい。

現代天文学の最終目標の一つは、銀河の形成・進化の物理過程を明らかにすることである。20 世紀末に始まった観測機器の大型化・高感度化・高精度化は遠方宇宙の観測を可能にし、直接、銀河の形成進化を議論できるようになった。そして現在では $z=7$ (6.96)の銀河や $z=6$ (5.7) の大規模構造が発見されるに至っており(Iye et al. 2006, Nature, 443, 186; Ouchi et al. 2005, ApJL, 620, L1)、今後さらなる遠方銀河の観測が進むものと期待される。これら遠方銀河の形成・進化を議論する際には、より精密な観測データの解析と同時に、理論モデルとの比較・考察が必要不可欠となる。

銀河の理論的な化学的・光学的進化モデルは、四半世紀以上も前から現在に至るまで、様々なものが提唱され続けており(Larson 1974, MNRAS, 169, 229; Larson & Tinsley 1978, ApJ, 219, 46; Arimoto & Yoshii 1987, A&A, 173, 23; Matteucci 1994, A&A, 288, 57; Kodama & Arimoto 1997, A&A, 320, 41 など)、これらにもとづいた銀河の化学的・光学的進化モデル計算コードとして、GISSEL99 (Bruzual & Charlot 1993, ApJ, 405, 538; 2003, MNRAS, 344, 1000)、PEGASE (Fioc & Rocca-Volmerange 1997, A&A, 326, 950)、STARBURST99 (Leitherer et al. 1999, ApJS, 123, 3)などが公開されている。ただし、実際にコードに入力すべきパラメータは非常に多く、何らかの方法によって現実的と思われる値を選ばなければならない。

銀河の形成進化の追跡は、観測的にはその Spectral Energy Distribution (以下 SED)の時間変化を議論することで実現される。これは銀河の星生成の推移を理解することであり、この時の重要な要素は、初期質量関数(initial mass function = IMF)と星生成史(star-forming history = SFH)の二つである。IMF は、恒星誕生時のゼロ歳主系列星の質量分布関数であり、サルピーター型(Salpeter 1955, ApJ, 121, 161)やスケロ型(Scalo 1986, Fundam. Cosmic Physics, 11, 1; 1998, “Stellar Initial Mass Function”, ASP. Conf. Ser., 142, 201)がよく用いられるが、他にも様々なものが提唱されている (Miller & Scalo 1979, ApJS, 41, 513; Kennicutt 1983, ApJ, 272, 54; Ferrini 1991, “Chemical and Dynamical Evolution of Galaxies”, p. 520; Rana & Basu 1992, A&A, 265, 499; Kroupa, Tout & Gilmore 1993, MNRAS, 262, 545)。また IMF に付随する条件として、形成される恒星の最大質量と最小質量がある。一方、SFH は星生成率の時間関数で与えられ、これについても、instantaneous burst, constant, δ 関数的、指数関数的増加・減少、ガス量の冪に比例、など多数のタイプが提案されている。SFH に付随する条件としては、銀河風の有無とその発生時期が重要である。

系内星生成領域や系外銀河の研究では、観測結果とサルピーター型 IMF との整合性が議論されるケースが多く、実際にどの程度までパラメータの幅が許されるのかは決して自明ではない。従って銀河の形成進化モデルをより高精度なものにするためには、多様なパラメータの幅を何らかの方法で制限していく必要がある。

これに関連して、ここ 10 年の間に幾つかの研究結果が報告されている。Ferguson et al. (1998, ApJL, 506, L19; 1998, ApJ, 116, 673)では、近傍渦巻銀河 M74(NGC628)や NGC6946 などの外縁部に複数の HII 領域を検出したことが報告されている。銀河外縁部は金属量も少なく、恒星の原料となるガスやダストの量も少ないため、このような場所

での星生成は、通常の巨大分子雲内でのものとは異なる IMF や SFH が影響している可能性がある。先日も GALEX が M83 の最外縁部に紫外線源を発見している。また Cedres et al. (2005, ApJ, 634, 1943)では、同じ渦巻銀河であっても、グランド・デザイン型とプロキュラント型で、IMF に関わる恒星質量の上限値が異なる可能性が示唆されている。これらは従来のパラダイムとは異なる星生成システムが存在している可能性を示している。これを検証するためにも、星生成に関連した各種パラメーターの変域を調べることは重要な意味を持つ。

2. 近傍渦巻銀河の星生成(HII)領域:

我々はこのパラメータを制限する方法として、近傍渦巻銀河の渦状部に存在する個々の星生成領域の SED を取得、理論モデルとの比較で IMF と SFH を考察する研究を提案してきた。銀河全体を一つの系と見なす星生成現象の議論は、実際に恒星が誕生している星生成領域スケールでの情報を smear してしまう恐れがある。従って現段階での IMF・SFH の議論は、星生成領域スケールで行う方が、より現実に即した考察が可能である。

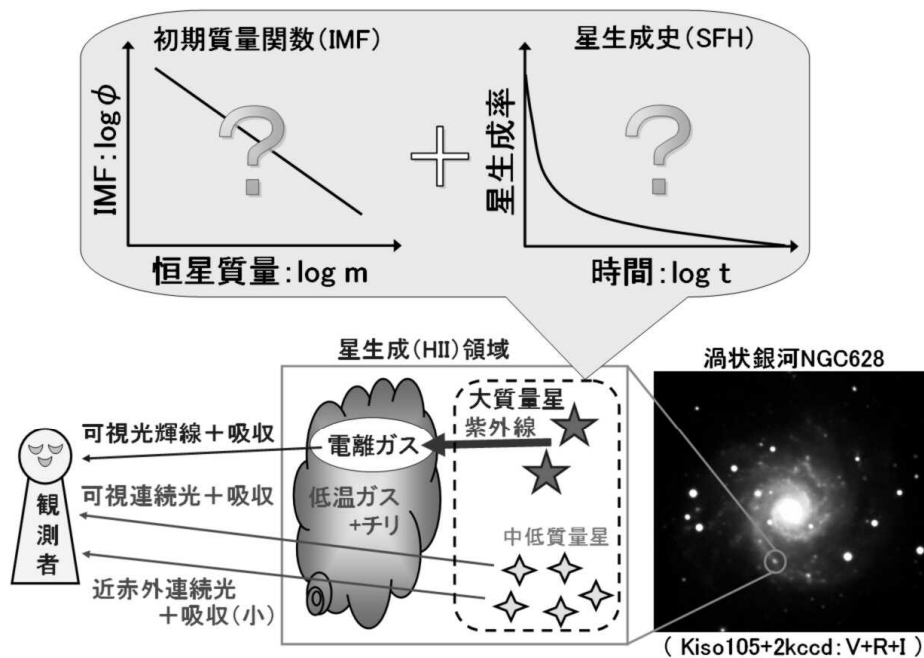


図1: IMF・SFH と系外銀河 HII 領域の構造および多波長観測の概念図。

渦巻銀河の HII (星形成) 領域は、渦状腕に沿って存在する青くコンパクトな斑状構造として観測される。これら斑状構造の一つ一つが我々の銀河の巨大分子雲(Giant Molecular Cloud=GMC)に匹敵するかまたはそれ以上のサイズの HII 領域であると考えられる(図1右端画像: NGC628の渦状腕中に丸印で示した淡い斑状構造)。HII 領域は今まさに多数の恒星が誕生している場所である。そのために、様々な恒星からその温度に応じた黒体放射スペクトルが放射され、中でも大質量星起源の紫外線は大量のガスやダストの一部を電離する。そしてその電離ガスからは温度・密度・金属量などに応じた輝線スペクトルが放射される。結局恒星から放射された紫外線と可視光の多くは、ガスとダストに吸収されてしまうが、可視光のうちの長波長成分は吸収を受けながらもガスとダストをくぐり抜けて観測される。中低質量星からの黒体放射は、その温度が低いために主なエネルギーは可視光の長波長側から近赤外線波長域で放射される。この放射成分は紫外線や可視光に比べて、ガスやダストによる吸収をあまり受けずに観測される。ガスやダストによる吸収は取り扱いが難しい要素ではあるが、多波長観測やバルマー系列の $H\alpha$ ・ $H\beta$ 輝線観測から吸収量補正が出来るだろう。吸収量が補正された HII 領域の SED は、恒星からの黒体放射成分と電離ガスからの輝線成分からな

そのため、ここから後者を取り除くことが出来れば、HII 領域内に存在する星団からの SED が得られる。これを可能にするためには HII 領域に特徴のある輝線成分に対応した狭帯域フィルターが必要となる。また狭帯域撮像によって得られた輝線成分については、電離ガス星雲の進化モデル(例えば Dottori 1981, Ap&SS, 80, 267; Garcia-Vargas et al. 1995, A&AS, 112, 13)と比較することで、星団とは独立にその進化を議論することができる可能性がある。

そして HII 領域内星団の SED を理論モデルと比較することで、大質量星から中低質量星までを幅広くカバーした IMF と SFH を議論することが可能となる。特に近傍渦巻銀河は電波領域の観測データや文献も豊富に存在するため、それらを加えることでより詳細な星形成のプロセスが見えて来るだろう。図1に本観測研究の概念を示した。

3. 木曾 2kCCD カメラ用狭帯域フィルター:

前述したような近傍渦巻銀河に存在する HII 領域の大局的な SED を得るためには、銀河全体を一度に撮像できるような広視野 CCD カメラと、HII 領域に特徴的な輝線に対応した狭帯域フィルターセットが必要となる。東京大学大学院理学系研究科附属天文学教育研究センター木曾観測所の 105cm シュミット望遠鏡 + 2kCCD カメラの視野は 51.2 分角四方であり、殆どの近傍銀河を周辺領域と共に撮像できるほど広い視野を持ち、また Johnson-Cousins の標準測光フィルター(U, B, V, R, I)に加えて、2005 年度には H α 、[SII] λ λ 6716,6731 輝線に対応した狭帯域フィルターが製作・装備された(図2および表1参照、通称 Ha6417, Ha6577, Ha6737)。この仕様は、本観測研究に必要な条件をほぼ備えていると見て良い。しかしながら HII 領域から放射される可視光域の主な輝線成分は、バルマー系列の H α と H β 、そして禁制線の [OIII] λ λ 4959,5007 と [SII] λ λ 6716,6731 であり、前述したフィルターに加えて H β および [OIII] に対応した狭帯域フィルターが必要なことは明白である。図2に典型的な近傍系外銀河 HII 領域の可視光域スペクトルと、本観測研究に必要な狭帯域フィルターの感度特性のイメージを示した。なお近傍系外銀河 HII 領域のスペクトルは、Boker et al. (2001, AJ, 121, 1473)から引用した NGC4449(後退速度 207km/s)のものである。

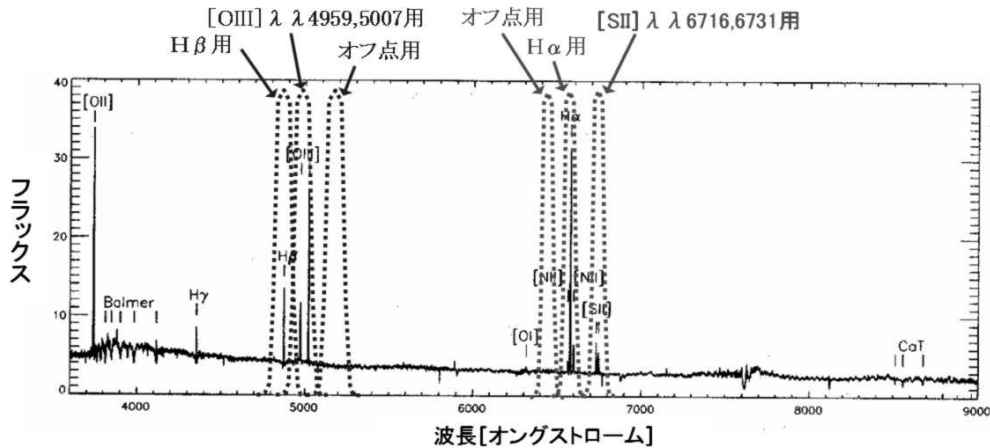


図2: 典型的な系外銀河 HII 領域のスペクトルと狭帯域フィルターのフィルター関数。

そこで、さらに H β 、[OIII]輝線に対応した狭帯域フィルターを木曾観測所と共同で製作し(図2および表1参照、通称 N487, N499, N519)、これによって必要となる狭帯域フィルターセットをほぼ全て備えることが出来た。表1に本観測計画で使用する狭帯域フィルターの仕様を掲げた。これら狭帯域フィルターの製作にあたっては、i) HII 領域の内部運動を数 10km/s 以内(例えば Fuentes-Masip et al. 2000, AJ, 120, 752)、ii) 渦巻銀河自身の回転運動を 300km/s 以内(例えば Rubin et al. 1985, ApJ, 289, 81)、さらに iii) 銀河の後退速度を 3000km/s 以内と仮定し、この条件下であれば輝線成分をカバーできる感度特性を提案した。図3に6つの 2kCCD カメラ用狭帯域フィルターと、従来の広帯域フィルターの感度特性(F/3 における実測値)を示した。なお広帯域フィルターの感度特性は Bessel (1990, PASP,

102, 1181)から引用したものであり、感度特性のピークを 100%としている。

表1: 2kCCD 用狭帯域フィルター@F/3 の仕様

外形 --- 縦 100mm×横 100mm (誤差 0.1mm 以下)

有効形 --- 96mm×96mm 以上

厚み --- 8.5mm (誤差+0.0mm、-0.2mm)

感度特性曲線 --- 波長に対して対称的なガウス型

フィルター	中心波長 (ピーク)	FWHM	帯域@FWHM	透過率 (ピーク)	備考
N 4 8 7	4879 Å	86 Å	4837 Å-4923 Å	85%	H β
N 4 9 9	4993 Å	114 Å	4933 Å-5047 Å	91%	[OIII] λ λ 4959,5007
N 5 1 9	5179 Å	122 Å	5131 Å-5253 Å	92%	H β、[OIII]オフ点
H a 6 4 1 7	6417 Å	79 Å	6396 Å-6475 Å	86%	H α、[SII]オフ点
H a 6 5 7 7	6577 Å	83 Å	6555 Å-6638 Å	86%	H α
H a 6 7 3 7	6737 Å	83 Å	6716 Å-6799 Å	87%	[SII] λ λ 6716,6731

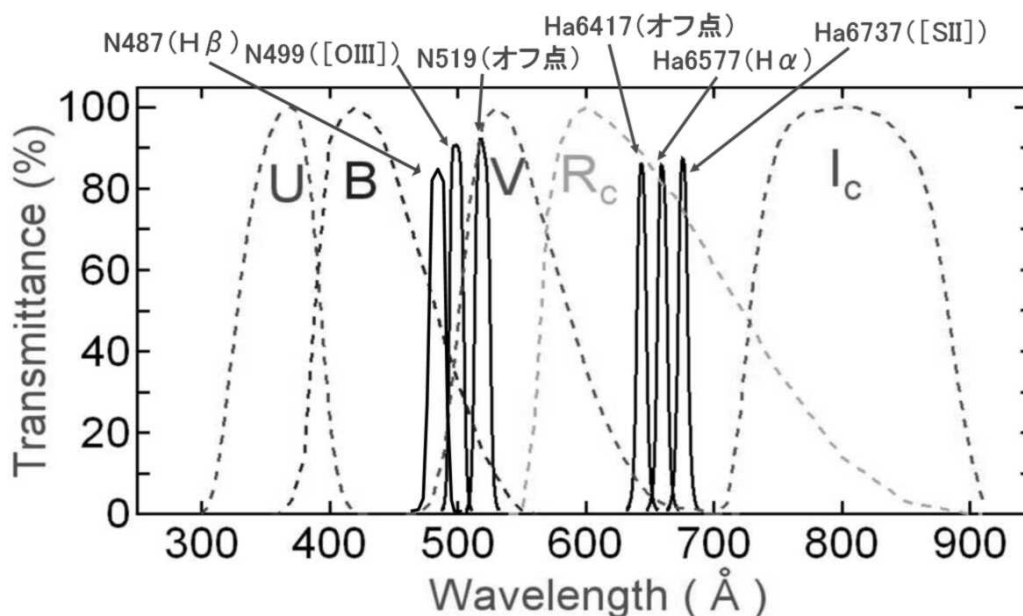


図3: 木曾 2kCCD カメラ用の広帯域・狭帯域フィルター。

4. 観測サンプルおよび観測計画:

近傍渦巻銀河の観測サンプルとしては、狭帯域フィルターの仕様上、後退速度 3000km/s 以下のものにしなければならない。また HII 領域の測光を行うために、比較的 face-on に近い銀河である必要がある。これらの条件とハッブル形態を考慮して、14個の近傍渦巻銀河(不規則銀河を含む)をサンプルとして選出した。表2にサンプル銀河の概要を示す。

これらに対して、前述した5つの広帯域フィルターと6つ狭帯域フィルターによる全 11 バンド撮像観測を行う。この観測では広帯域フィルターの透過幅(ここでは FWHM で議論)に比べて、狭帯域フィルターの透過幅が 1/10 程度であるため、観測時間の殆どは狭帯域撮像に割り当てることになる。そこで H α・[SII]撮像に各 30-45min を割り当てることを

基本とし、波長感度を考慮してH β ・[OIII]撮像にはその倍の各60-90minを割り当てることとした。広帯域撮像については、B、V撮像に各15min、R_c、I_c撮像に各9minを割り当てることとした。またUバンド撮像には30-60minを割り当てることにした。

なお本観測の基本ともなるH α 撮像の積分時間については、Devereux et al. (1995, AJ, 110, 1115)で、M81のH α 狭帯域撮像から85個のH α 源を検出した結果が報告されており、これを参考に導出した。Devereux等の観測はKitt Peak National Observatory (KPNO)のthe Case Western Burrell Schmidt望遠鏡(0.6m)に2048 \times 2048フォーマットのCCDカメラ(FOV \sim 1度角四方、 \sim 2"/pix)と狭帯域フィルター($\lambda_c=6568$, FWHM=74Åと $\lambda_c=6481$, FWHM=72Å)を搭載して行われており、フィルター毎の積分時間は30minずつである。ここでフィルターの透過幅と(やや大胆な仮定だが)サイトのシーイングがほぼ同じと考えると、検出限界は集光力とピクセル・サイズで決まる。木曾105cmシュミット鏡+2kCCDカメラでは、集光力3倍(105²/60²)、1ピクセルに落ちる光量は0.56倍(1.5²/2.0²)なので、単純計算では木曾105cmシュミット+2kCCDカメラの方が、約1.7倍効率が良いことになる。実際にはシーイングの効果が加わることで効率は下がるだろうが、H α 撮像を彼等の1-1.5倍の積分時間で行えば、ほぼ同数のH α 源は検出できると考えた(実際にはM81に対して彼等の検出数を数10%上回った)。

表2: 11バンド撮像観測用サンプル

銀河名	赤経(2000)	赤緯(2000)	形態	サイズ (' × ')	後退速度 (km s ⁻¹)
Sa - Sab					
NGC 3031 (M81)	09h55m33.2s	+69d03m55s	SAab	26.9 \times 14.1	-34
NGC 4569 (M90)	12h36m49.8s	+13d09m46s	SABab	9.5 \times 4.4	-235
Sb - Sbc					
NGC 224 (M31)	00h42m44.3s	+41d16m09s	SAb	190 \times 60	-300
NGC 3521	11h05m48.6s	-00d02m09s	SABbc	11.0 \times 5.1	801
NGC 4321 (M100)	12h22m54.9s	+15d49m21s	SABbc	7.4 \times 6.3	1571
NGC 5055 (M63)	13h15m49.3s	+42d01m45s	SAbc	12.6 \times 7.2	504
Sc - Scd					
NGC598 (M33)	01h33m50.9s	+30d39m36s	SACd	70.8 \times 41.7	-179
NGC628 (M74)	01h36m41.8s	+15d47m00s	SAC	10.5 \times 9.5	657
IC 342	03h46m48.5s	+68d05m46s	SABcd	21.4 \times 20.9	31
NGC 5457 (M101)	14h03m12.6s	+54d20m57s	SABcd	28.8 \times 26.9	241
NGC 6946	20h34m52.3s	+60d09m14s	SABcd	11.5 \times 9.8	48
Sd - Irr, interacted galaxy など					
NGC 2903	09h32m10.1s	+21d30m03s	SBd	12.6 \times 6.0	556
NGC 4449	12h28m11.9s	+44d05m40s	IBm	6.2 \times 4.4	207
NGC5194/95 (M51)	13h29m55.7s	+47d13m53s	GPair	17.0 \times 11.5	600

(背景がグレーになっている銀河は、2008年08月の段階で観測が完了したもの)

5. 画像処理とフラックス・キャリブレーション:

観測データの画像処理は、基本的にIRAFによって行っている。ただしデータ量が膨大であるため、バイアス合成、

バイアス差し引き、フラット合成、フラット・フィールドニングについては、オリジナルのシェル・スクリプトを用いて自動にリスト作成を行い、それを IRAF 上でバッチ処理するようにしている。背景光(スカイ)の差し引き、画像の位置合わせは、SPIRAL を使用して手動で行っており、加えて seeing 合わせやフラックスのレベル合わせも手動で行っているため、今後これら手動部を出来る限り自動処理できるようにしていきたい。

また本来、分光標準星の観測を行ってフラックス・キャリブレーションを行うべきであるが、気象条件が刻々と変化する日本ではこれを効率良く行うのは難しい。そこで、フラックス・キャリブレーションには、ターゲット銀河と同一視野内にあり、SDSS(=Sloan Digital Sky Survey)にて測光データが公開されている恒星を使用することにした。SDSS フィルター・システム(u' , g' , r' , i' , z')と Johnson-Cousins フィルター・システム(U , B , V , R_c , I_c)の間の等級変換・カラー変換については、Smith et al. (2002, astro-ph/0201143)で示された関係式、

$$B = g' + 0.47 \times (g' - r') + 0.17$$

$$V = g' - 0.55 \times (g' - r') - 0.03$$

$$U - B = 0.75 \times (u' - g') - 0.83$$

$$B - V = 1.02 \times (g' - r') + 0.20$$

$$V - R_c = 0.59 \times (g' - r') + 0.11$$

$$R_c - I_c \text{ for } (r' - i') < 0.95 = 1.00 \times (r' - i') + 0.21$$

$$R_c - I_c \text{ for } (r' - i') \geq 0.95 = 0.70 \times (r' - i') + 0.49$$

を用いた。Smith et al. (2002)によると、この等級変換・カラー変換の精度は 0.02-0.03 等である。

狭帯域撮像データのフラックス・キャリブレーションは、さらに Johnson-Cousins システムで描かれる恒星の SED を線形補間し、狭帯域フィルターを透過するエネルギー量を計算することで実現した。なおこの計算の際には、本来波長に対して対称的なガウス型である狭帯域フィルターの感度特性を、同じ FWHM を持つ矩形波型の感度特性と仮定した(図4参照)。図4中に斜線部で示した部分のエネルギーを計算して、最終的には AB 等級(Oke & Gunn 1983, ApJ, 266, 713; Fukugita et al. 1996, AJ, 111, 1748; 市川 1997, 天文月報, 90, 23)によって表現した。

等級・カラー変換 (u' , g' , r' , i' , z') \rightarrow (U , B , V , R_c , I_c) SEDを線形補間して、矩形波型のフィルター感度特性で内挿

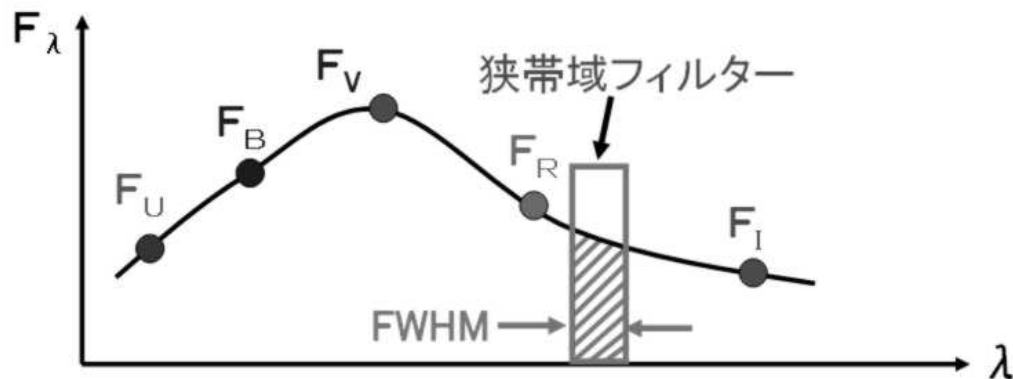


図4: 恒星の SDSS データを用いたフラックス・キャリブレーションの原理。

実際には、画像処理が終了したターゲット銀河の撮像データから、飽和しておらずかつ十分に明るい恒星を 10 個程度選び出し、これを用いてフラックス・キャリブレーションを行っている。等級のゼロ点決定の際の系統誤差は、典型的に 0.03-0.05 等、最大で 0.07 等であった。

フラックス・キャリブレーション用の恒星の測光は IRAF/apphot、HII 領域の検出および測光には Source Extractor を使用した。またオフ点波長帯や広帯域フィルター波長帯では、HII 領域が渦状腕などに埋もれてしまうため、コントラストを上げるために、median filtering した画像を差し引くなどの工夫を行った。

表2に示したように、2008年8月現在、5天体(M81, M100, IC342, M101, NGC2903)の11バンド撮像観測が完了しており、さらにそのうちのM81とM101については画像処理、フラックス・キャリブレーションまでも終了している。これらのHII領域に存在する電離ガスに関する研究の進捗状況は、前述したように本シンポジウムの柏木氏の講演(柏木雄太 2008, “輝線撮像観測によるM81・M101のHII領域の研究”, 木曾シュミットシンポジウム2008)を参照して欲しい。

6. 観測データの共有を目指して:

本観測研究は、元々筆者が木曾観測所の観測所プロジェクトとして提案したものである(西浦 2005, “近傍銀河HII領域の多色撮像観測の提案”, 木曾シンポジウム 2007 集録)。これは、本観測研究に必要な観測時間があまりに膨大になるためである。2kCCD カメラのデータ読み出し時間(95sec)とデータ転送時間、そして次の撮影のためのワイプ時間を合計すると、1フレーム撮影の度に125secの時間が別途必要となる。これを考慮すると本観測では1銀が当たり、B, V, R_c , I_c の4バンドの撮像で73min、Uバンド撮像に64min、 $H\alpha$ 、[SII]狭帯域撮像に128min、 $H\beta$ 、[OIII]狭帯域撮像に192minが必要となり、総計7.6hにも及ぶ。マンパワーや経済的な問題などから、結局、本観測研究が木曾観測所のプロジェクト研究として遂行されることは無かったが、筆者(西浦)は当初プロジェクト観測を提案した際の理念を維持したいと考えている。即ち比較的早い時期でのサイエンス・データの公開である。これだけの可視光域多波長撮像のデータは他に類が無く、本研究で狙うHII領域の星団や電離ガスの研究以外にも様々な研究で使用できると考えている。そこで、将来的に研究者一般に公開することを前提に、まずは研究グループ内でデータ共有を行うためのネットサイトを用意した。このページでは、研究の概要や観測サンプルの備忘録に留まらず、論文執筆の際に必要な望遠鏡・観測機器のスペックや広帯域・狭帯域フィルターの感度曲線、重要と思われる参考文献なども記録するようにしている。また運営システムにはPukiWikiを使用しているため、許可を持つものは誰でも、インターネット・ブラウザ上でページの編集が可能である。将来的にはこの上で画像処理、フラックス・キャリブレーション済みのfitsデータも公開していきたいと考えている。ただし現在はパスワードをかけてあり、共同研究者と一部の木曾観測所ユーザー以外にはアクセス不可能である。

ここ10年ほどの間、木曾観測所では、比較的大きな計画には観測時間を重点的に割り当てるといことが行われてきた(ex. 2kCCD カメラの立ち上げ、HCGsの深撮像、彗星のダスト・トレイル・サーベイなど)。しかしながら、国立大学の独立行政法人化によって、大学教員は「自分が属する研究業界ではなく、自分が所属する大学への貢献をより強く求められる」ようになりつつあり、本来の研究・教育以外にも多様かつ大量の義務を背負わされつつある。この影響は中小大学ほど大きく、特に教員免許更新のための現役教員研修の実施を命じられている教育大学・教育学部に属する研究者は、大学の通常業務と併せて、もはや身動きが取れない状況になっている。これは観測時間さえあれば、研究が進んで論文を執筆できるような状況では無くなっていることを意味している。さらに筆者は各種UMやシンポジウムにおいて、研究や開発に対する研究者の意識が、研究機関所属者・大規模大学所属者・中小大学所属者・教育系大学所属者で大きく乖離していると感じている。大型プロジェクト研究や開発を進めるに際して、最初の二者に属する研究者が積極的に行動できるのに対して、中小大学所属者は如何にしてそれに関わるための資金を調達し、マンパワーを確保するかを問題とする。そして最後の教育系大学所属者は、日常業務をこなしながらも如何に大型プロジェクト研究や開発に関わることなく単独で成果を出すか、そして理科教育に関わる成果を提出できるかを熟考するのである。資金およびマンパワー不足は現在どの機関でも慢性化しており、現在の木曾観測所だけでは、20年前に出版された銀河カタログのようなまとまった成果を出すことは不可能だろう。そしてまた同時に大学教員には、従来の研究・教育以外の業務が大きな負担として重くのしかかっている。サイエンスの成果を効果的に出力するためには、

観測所とユーザーとの新しい形の協力関係を構築する必要があるのではないだろうか？これからは観測所とユーザーがより緊密な協力関係を築いて研究を進めることで、かつてのような大きな成果を出すことは出来ないだろうか？

最後に、狭帯域フィルターN487の設計とN499の設計・製作には、2006年度住友財団基礎科学研究助成からのサポートを頂いた、ここに深く感謝したい。また六つの狭帯域フィルター作製に関して、全くの素人である私と辛抱強く緊密な連絡を取り合い、こちらの要求通りの素晴らしいフィルターセットを作成して下さった朝日分光の木村俊彦氏とフィルター作製の機会を与えて下さった中田好一前木曾観測所所長にも深く感謝したい。