

## 岡山天体物理観測所の夜光スペクトル

家 正則, 西原英治\*, 菅井 肇\*

### Night Sky Spectrum at Okayama Astrophysical Observatory

by

M. Iye, E. Nishihara\*, and H. Sugai\*

(1991年5月31日受理)

#### Abstract

Spectroscopic CCD observations of night sky emission at Okayama Astrophysical Observatory were carried out in December 1988 and in April 1991 using the Cassegrain spectrograph mounted on the 188 cm telescope.

Spectral lines of atmospheric emission and artificial light sources were identified for the wavelength range 3600–10000 Å. It is emphasized that although the site is heavily contaminated by city light at the optical band below 7000 Å, the dominant light source at the near infrared band beyond 7000 Å is the atmospheric emission lines of OH radicals. This fact shows that the observation at Okayama Astrophysical Observatory in the near infrared band is not so heavily handicapped in terms of the sky brightness as the observation in the optical wavelength band.

The spectra in the 9000 Å band of a Seyfert galaxy I Zw 1 and a star forming galaxy Mrk 1259 are shown to illustrate the results of elimination of the atmospheric emission lines.

#### 1. はじめに

微光天体のスペクトル観測には、天体光に重なる地球上層大気発光や市街地からの人工光を把握し、場合によりそれらを除去する必要がある。近年、市街光の増加によりどの観測所でも可視光域では夜空が明るくなり、微光天体の観測に支障をきたすようになってきている。しかしながら、近赤外線領域では人工光に比べて上層大気発光が主成分となる。このため、国内の観測所でも近赤外線領域の観測に限れば、世界的な観測所と比べても夜空の明るさでは遜色が無く、あまり不利でない条件で行える観測があるとされている。

観測地でのこれらの前景スペクトルの性質を良

く知っておくことは、天体観測の基本としてきわめて重要である。我々は CCD カメラを用いた微光天体の分光観測を行うために、岡山天体物理観測所での夜光スペクトルの測定を1988年12月と1991年4月に、3600–10000 Å域について行った。それらの観測結果を報告する。

#### 2. 旧システムによる予備観測と解析

第1期の予備観測は1988年12月8日に川上肇氏製作の CCD カメラ (日本 TI 社) を取り付けて、銀河の分光観測を行った際に、300本/mm、7500 Å ブレーズの回析格子を用いて行った。中心波長4000 Å, 5000 Å, 6300 Å, 7650 Å, 9000 Å の5帯域で、各々30分露出のスペクトル画像3枚ずつを比較的天頂に近い方向で得た。中心波長7650 Å と9000 Å の観測では、2次光除去のための

\* 東京大学理学部 (Department of Astronomy, University of Tokyo)

フィルター (R60) を用いた。各帯域は約1400 Åの波長域をカバーしている。使用した CCD 素子を日本 TI 社の TC-215 であり、12 μm 角の画素が 1000×1018 個並んだものであり、スリット方向は 4 画素分をビンニングして読みだした。スリット幅は 300 μm (2 秒角相当) を用いた。波長スケールは 1.48 Å/画素、波長分解能は 7 Å である。観測当夜の空は月齢 29.1、全体に薄曇りで時々晴れ間が見える程度であった。画像処理は FACOM 上で川上氏製作のパッケージを用いて行った。7650 Å 以下の 4 波長域の場合、各 3 枚の画像から 1 枚のみを選び解析した。主な処理は、ダーク画

像の差引、出力画像でのスリット方向 100 画素分のデータの積分、波長校正、スペクトル線の同定などである。

図 1 はこれらの処理を行って抽出した 5 波長域のスペクトルをつないだものである。CCD の感度補正、回折格子のブレイズ効率補正などは行っていないため、短波長側と長波長側では出力が落ちる表示になっていることに注意する必要がある。全体に 6000 Å あたりで盛り上がっているように見えるのは、高圧ナトリウム灯の D 線の裾が広がっているのと、CCD の感度分布がこのあたりで良いためである。図 1 は生データをつないただけであ

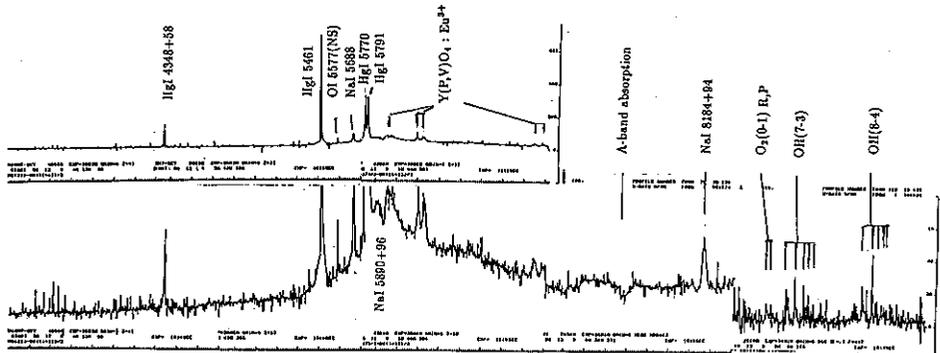


図 1 岡山天体物理観測所の夜光スペクトル。1988年12月6日—8日。天頂距離45度以内で観測したスペクトル画像23枚からの合成。天候は薄曇りまたは曇り。188cm 望遠鏡カセグレン分光器、川上氏製作の CCD カメラ、300本/mm、7500 Å ブレイズの回折格子を使用。

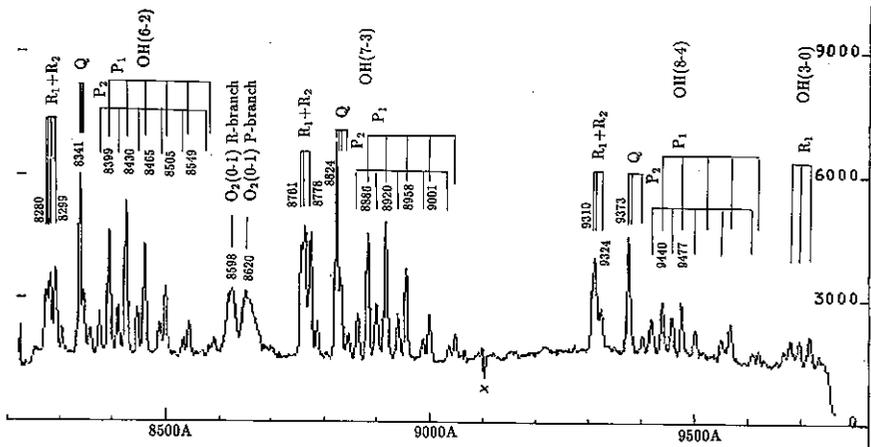


図 2 岡山天体物理観測所の9000 Å 域の夜光スペクトル。1988年12月6日—8日。天頂距離45度以内で観測したスペクトル画像11枚からの合成。天候は薄曇りまたは曇り。

るが、4000 Å 域から7650 Å 域のスペクトルはよくつながっている。中心波長9000 Å 域のスペクトル(図2)については、S/N比を改善するため、12月6日から8日に同じ波長域の設定で撮影した11枚の画像を使用した。30分積分のダーク画像も4枚の平均を使用した。スペクトルを抽出するのにも、他の波長域の場合とは異なるスリット上の領域を用いた。このため、スペクトル強度(縦軸)のスケールが一致せず、図1には8300 Åあたりで段差がついている。従って、これは実際のスペクトルの構造ではない。

市街光としては、水銀灯の輝線( $\lambda$ 4348+58, 5461, 5770, 5791), 蛍光水銀灯の蛍光材料の輝線( $\lambda$ 5940, 6150, 6190, 6970, 7030), 高圧ナトリウム灯の輝線( $\lambda$ 5890, 5896, 8184, 8195)の存在が確認できた。大気光としては、[OI] ( $\lambda$ 5577)の輝線, OHの振動回転輝線バンド(6-2, 7-3, 8-4, 3-0), O<sub>2</sub>の振動回転輝線バンド(0-1), O<sub>2</sub>の振動回転吸収線バンド(0-0), の存在が確認できた。

### 3. 新 CCD システムによる本観測と解析

第2期の本観測は1991年4月22日に188cm望遠鏡のカセグレン分光器にフォトメトリック社のCCDカメラシステム(通称SNG)を取り付けて行った。回折格子はやはり300本/mm, 7500 Å プレーズのものを用いた。中心波長4000 Å, 5000 Å, 6000 Å, 7000 Å, 8000 Å, 9000 Å の6波長帯域について、26時から28時にかけて、ほぼ天頂の方向で各々15分露出の画像を得た。2次光除去フィルターは用いなかった。使用したCCD素子はフォトメトリック/フォード社のPM516Aであり、20 μmの画素が1032×1032個並んだものである。実際にはメモリの関係で、852×1032画素を用い、2×2画素のビンニングにより426×516画素のデータ形式で読みだした。以下、画素というときはビンニング後の画素をさすものとする。読みだし雑音は約12電子相当であった。分光器のスリットは300 μmを用いた。波長スケールは2.47 Å/画素、波長分解能は7 Åである。各画像は約1275 Åの波長域をカバーしている。当夜の月齢は7.9で、空の状態はややhazyであり測光夜ではなかったが、著しい雲は認められなかった。

得られた夜光のCCD画像はSUNワークステーション上の画像処理パッケージIRAFで処理した。主な処理内容は、バイアス画像の差引、数値フィルタリング処理による宇宙線イベントの除去、スリット方向に200画素分を積分することによるS/Nの改善、比較スペクトルによる波長同定、6波長域のスペクトルのつなぎ合わせ、などである。ダーク成分は1.2カウント程度であったので、特に差引をしていない。

最終的に得られた夜光スペクトルを図3a-fに示す。2次光除去フィルターを用いなかったため、強い水銀輝線( $\lambda$ 3650, 4047, 4348+58)の2次スペクトルが7000—9000 Å 帯域のスペクトルに重なっている。1次光の3本の水銀輝線の強度比と2次光の同じ3本の水銀輝線の強度比の違いは、回折格子のブレイズ効率のちがいによるものであろう。図4aにはこれらのスペクトル全体をつなぎ合わせたものを示す。図4aのつなぎ合わせの際には、隣合う画像間の2カウント程度のレベルの差をオフセットして合わせた。宇宙線イベントの除去にはスリットの上側100画素分と下側100画素分のスペクトルを比較も行って万全を期した。図3cの6000 Å 帯域のスペクトルはスケールアウトしているため、図4bに5000 Å 帯と6000 Å 帯を合わせて縦軸を縮めたものを示した。

1988年の観測に比べて全体にS/Nの良いスペクトルが得られたので、市街光としては、水銀灯の輝線( $\lambda$ 3650, 3663, 4047, 4078, 4348, 4916, 5461, 5770, 5791), 蛍光水銀灯の蛍光材料の輝線( $\lambda$ 5940, 6150, 6190, 6970, 7030), 高圧ナトリウム灯の輝線( $\lambda$ 5890, 5896, 8184, 8195), の存在が確認できた。大気光としては、[OI] ( $\lambda$ 5577, 6300, 6364), の輝線, NaI $\lambda$ 5890+96の輝線, OHの振動回転輝線バンド(8-3, 4-0, 9-4, 5-1, 6-2, 7-3, 8-4, 3-0), O<sub>2</sub>の振動回転輝線バンド(0-1), の存在が確認できた。高圧ナトリウム灯のD線は極めて強く、圧力拡幅効果により約1000 Å 幅に広がっている上、自己吸収を示しているが(図5参照), その中心に上層大気のシャープなナトリウム輝線が重なっている様子が図4bから伺われる。また、蛍光水銀灯の蛍光材料の輝線と同定した幅が広く強い輝線は、蛍光水銀灯内面に塗布されている蛍光物質Y(P, V)O<sub>2</sub>:Eu<sup>3+</sup>の

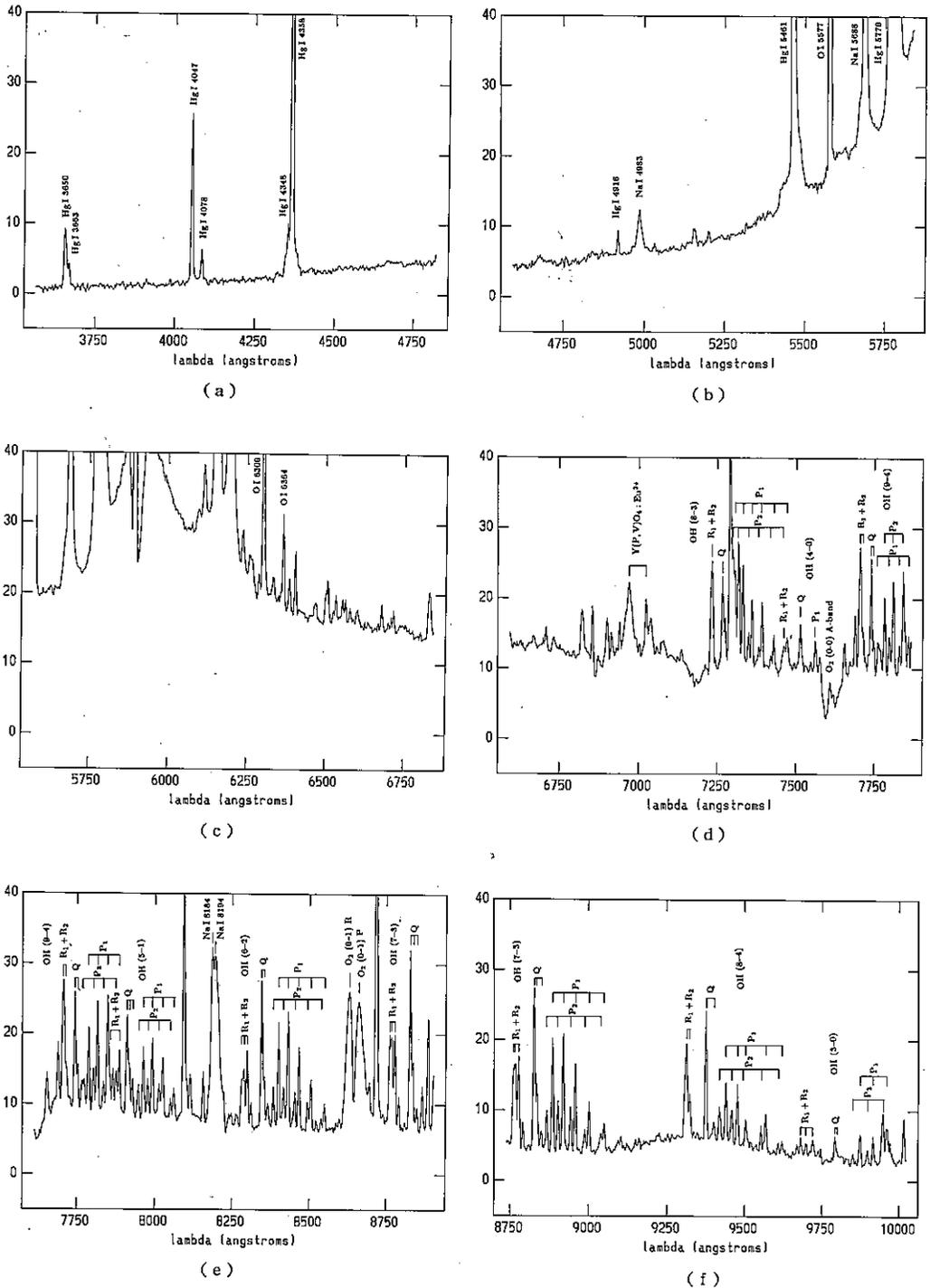


図3 岡山天体物理観測所の夜光スペクトル。1991年4月23日午前2-4時、天頂付近で観測。空の状態は晴れ、ただし、ややヘイジー。188cm 望遠鏡カセグレン分光器、ホトメトリック社 CCD カメラ、300本/mm、7500 Å プレーズの回折格子を使用。(a)4000 Å 帯域、(b)5000 Å 帯域、(c)6000 Å 帯域、(d)7000 Å 帯域、(e)8000 Å 帯域、(f)9000 Å 帯域。

岡山天体物理観測所の夜光スペクトル

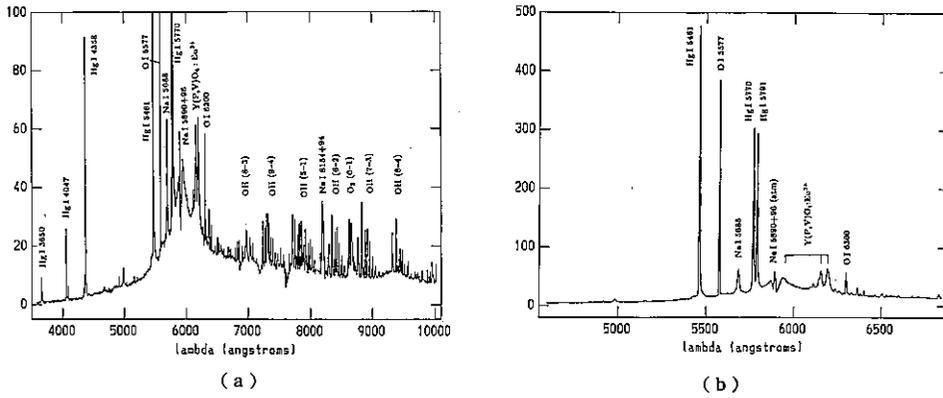


図4 (a)図3a-fの全波長域のスペクトルをつないだものである。(b)5000—6500 Å帯域のスペクトルを表示したもの。

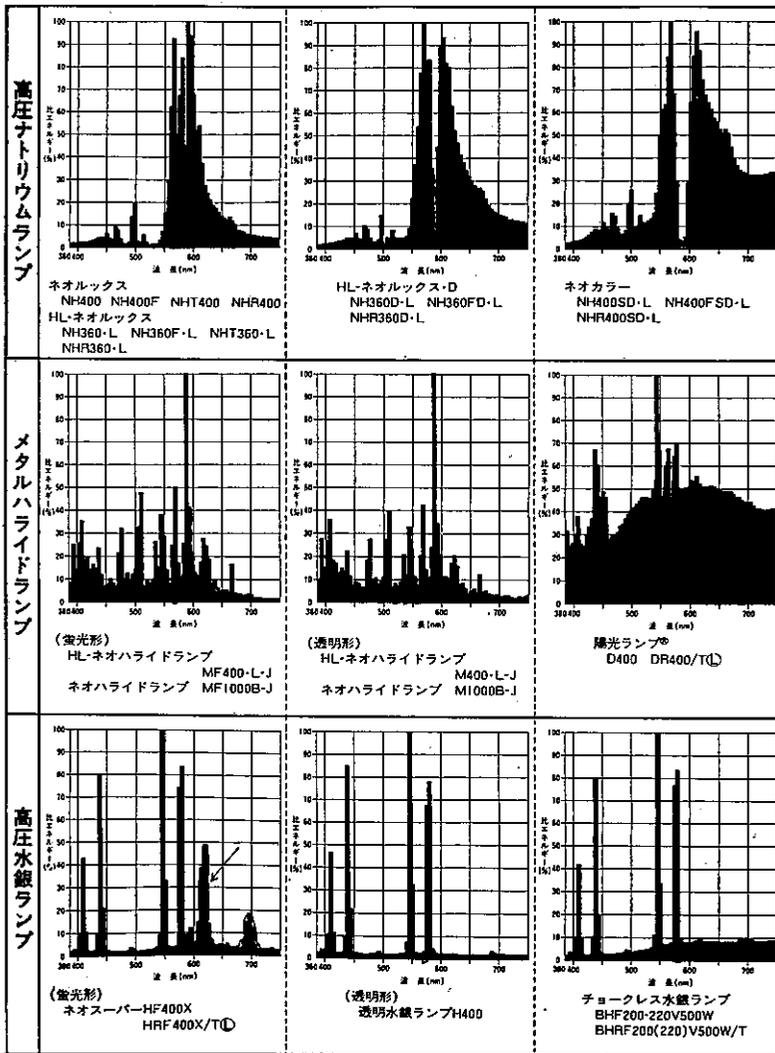


図5 高圧ナトリウムランプ、高圧水銀ランプ、メタルハライドランプのスペクトル (東芝ライテック社技術資料)

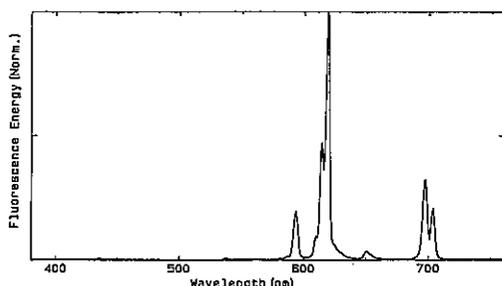


図6 蛍光水銀ランプ用蛍光体  $Y(P, V)O_4:Eu^{3+}$  のスペクトル (東芝ライテック社技術資料)

主バンド、副バンドスペクトルである(図6参照)。

#### 4. 考察

大気発光は時間変動することが知られている。人工光も当然、人間活動に応じて変化する。従って、岡山天体物理観測所での夜光スペクトルがいつも本論文の観測データのようになるわけではないことに注意する必要がある。あくまでも、これらはまずまずの夜空と少し曇りがちの夜空の2回の観測時の例である。

図4に比べると、図1の薄曇り時の観測データではOI, OH,  $O_2$ などの通常の夜光輝線に比べて、水銀灯や高圧ナトリウム灯による人工光スペクトルが強いことが確認できる。これは、薄雲により市街光が反射されるためである。

これらの観測はいずれも快晴測光夜の状況下で行われたものではないが、快晴夜の場合との違いを次のように考察する。OH輝線のマイネル帯の発光高度は80—90km, [OI]5577Å輝線の発光高度は80—110km, [OI]6300Å輝線の発光高度は200—300kmである<sup>1)</sup>。薄雲の高さは10km以下であろう。薄雲がある場合、上層大気からの夜光光子は薄雲によりミー散乱される。薄雲の光学的な厚みに応じて、本来地表に達するべき光量の一部は薄雲により宇宙空間へ散乱反射され、残りの部分のみが最終的には地表に到達する。薄雲の光学的厚みが極端に大きくない場合には、大気発光が面光源であるためもあり、大気光の輝度は薄雲を通して著しく減少することはない。

一方、市街地からの人工光は薄雲があると、散乱・反射されて地表に戻って来る量が増加する。

従って、本稿のスペクトルデータは、大気光については快晴夜よりもやや弱めに出ているのに対し、人工光のデータについては快晴夜よりも強めに出ていると見なすべきであろう。実際、ほぼ晴れであった1991年4月のスペクトルと比べると、雲の量が多かった1988年12月の観測では人工光のスペクトルが強く出ている。

大気光には $NO_2$ 分子による微弱な連続光成分があると言われているが、今回の観測では連続光成分については、大気光と市街光の寄与の分離はできていない。

#### 5. 近赤外線領域での大気光

これらの観測で明らかになったことで重要なのは、波長7000Å以上の帯域では人工光よりもOHなどの大気光が前景放射の主成分となるということである。都市化のため夜空が可視光では明るくなってしまったと言われている岡山観測所でも、7000Åより長波長の近赤外線領域では人工光の影響は大気光を上回るほどではない。実際、2回の観測で7000Å近傍の $Y(P, V)O_4:Eu^{3+}$ 輝線より長波長域で、同定された人工光は高圧ナトリウムの輝線(λ8184, 8195)のみである。

この事実は、近赤外線での観測を行う限りにおいては、岡山観測所など国内の観測所でも夜空の明るさについては、そう不利でないことを示唆している。

ただし、大気発光と並んで重要な大気吸収については、残存水蒸気量の大きい国内の観測所はハワイの高山の観測所などと比べると明らかに不利である。

#### 6. 9000Å帯域でのCCDカメラによる天体観測例

8000—10000Å帯域では地球大気の輝線放射が強いため、銀河などの微光天体の観測は可視域に比べると困難が多いが、それだけに研究が遅れている波長帯である。この波長域には、CaII三重線(λ8498, 8542, 8662), OIλ8446, [SIII]λ9069, 9532などのスペクトル線があり、これらに着目した天文学的な研究が注目され始めている。例えば、銀河の恒星系のCaII吸収線の観測から恒星系の速度分散を求めた研究があるが、可視域の吸収線

に比べて速度分解能が高いのと、3重線のためより精度の高い測定ができるという利点がある<sup>2)</sup>。また、銀河内の電離ガスから放射される[SIII]輝線強度を[SII]  $\lambda 6716, 6731$ の輝線強度と比較して、硫黄の組成比を求めたり、輻射場の温度指標となる輻射軟度パラメータを求めたりすることも可能である<sup>3)</sup>。

クエーサーやI型セイファート銀河の中には、強いFeIIの輝線スペクトルを示すものがある、これら電子密度が $10^8-10^{10}\text{cm}^{-3}$ のいわゆる広線領域(BLR)において、部分的にさらに高密度( $10^{11}-10^{13}\text{cm}^{-3}$ )・高柱密度( $10^{24}-10^{25}\text{cm}^{-2}$ )のガス領域が存在することを示唆している。ところが、FeII輝線は多重項なので、輝線スペクトルが重なり合っており連続光との分離が難しく、運動学的な考察が困難である。Persson<sup>4)</sup>はFeII輝線と同様、低電離領域から放射されると考えられる輝線としてCaII 3重項を選び、その有無をFeII輝線の強いセイファート銀河について調べ、数例につ

いてその存在を示した。CaII輝線を用いたこのような新しい観測が岡山においてどの程度可能であるかを調べるために、1988年の観測時に、1型セイファート銀河I Zw 1などの9000Å域の分光観測を行った。

この波長域では地球大気中のO<sub>2</sub>やOHの輝線バンドが強いため、30分露出の生画像には図7(下)のような大気の輝線スペクトルが多数見られる。しかしながら、I Zw 1の中心部のスペクトルから、その周辺の夜空のスペクトルを注意深く差し引くと、地球大気の共通な輝線バンドは消え去り、I Zw 1自身のOI及びCaII 3重項の輝線(図7上)が浮かび上がって来ることが実証された。この銀河の赤方偏移 $z=0.061$ で輝線の波長がシフトしていることから、同定には疑問の余地がない。

図8はスターバースト銀河であるマルカリアン1259の波長域8500—9500Åの輝線スペクトルの観

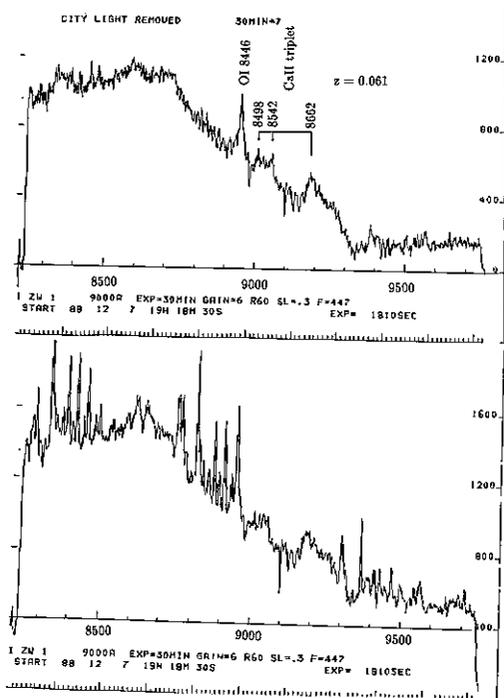


図7 セイファート銀河I Zw 1 ( $z=0.061$ )の9000Å域のスペクトル。生データと夜光除去後のデータ。OI, CaII 3重線が認められる。露出時間30分。

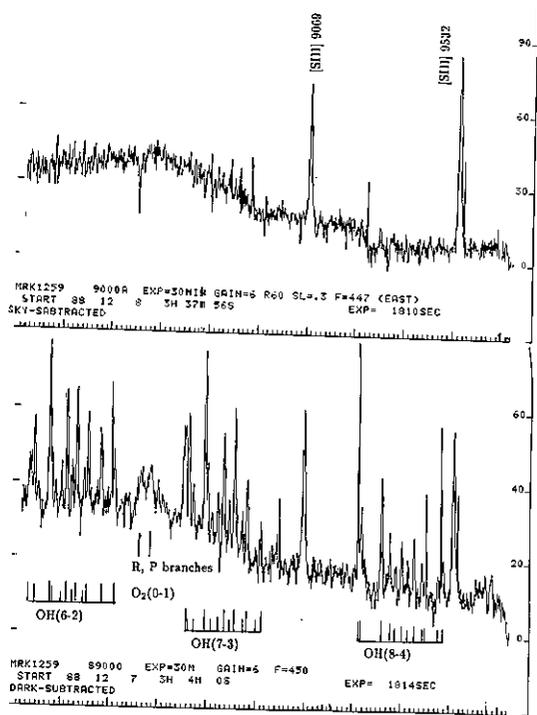


図8 星生成銀河マルカリアン1259 ( $z=0.007$ )の9000Å域スペクトル。生データと夜光除去後のデータ。[SIII]の禁制線が認められる。露出時間30分。

測例である。I Zw 1の場合と同様に大気の発光スペクトルを除去することにより，[SIII]の禁制線スペクトルが浮かび上がって来る。

この波長域での観測は，写真乾板や光電増倍型カメラなど，これまでの検出器では感度が不十分か，精度が不十分なため，実現することができなかった。7000—10000 Å帯域でのCCDによるこのような微光天体のスペクトル観測，及び大気発光成分の除去法の確立は，これから迎える赤外線二次元カメラによる1—2.3 $\mu$ m帯域でのスペクトル観測のリハーサルとしても意義が大きいと考える。

#### 謝辞

これらのスペクトルの同定にあたっては，田屋明氏（東芝総合研究所）から図5，6の水銀灯などのスペクトルデータを提供して頂いた。また，山下泰正，宮下曉彦氏には本データの解釈についていろいろと御教示頂いた。観測にあたっては川上肇，沖田喜一，綾仁一哉氏にご協力頂いた。

#### 参考文献

- 1) 永田武，等松隆夫：超高層大気の物理学，裳華房，(1973)
- 2) Pritchett, C.: 1978, *Astrophys. J.*, **221**, 507.
- 3) Vilchez, J.M., and Pagel, B.E.J.: 1988, *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.*, **231**, 257.
- 4) Persson, S.E.: 1988, *Astrophys. J.*, **330**, 751.