

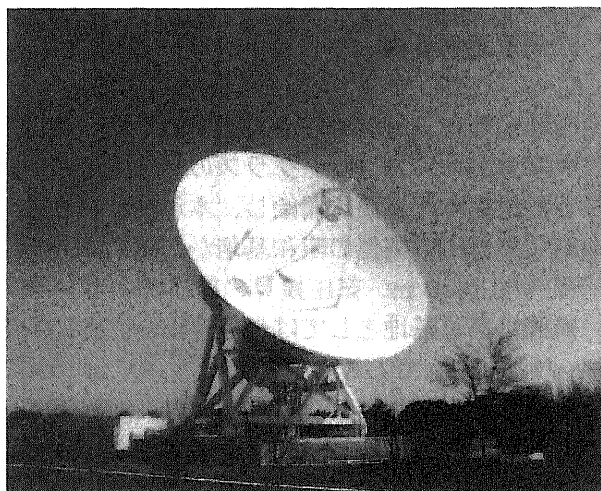
## I V. 宇宙観測グループ

教 授 中井 直正  
準研究員 山内 彩  
大学院生 5名

研究室が発足して2年目に入り、大学院生も修士課程の2学年（5名）がそろい、学群4年の卒研究生は7名を受け入れた。また11月1日付けで準研究員の山内彩が着任した。昨年度に引き続き研究室のさまざまな研究教育体制の整備を行うとともに、国土地理院32m鏡の電波望遠鏡化と南極望遠鏡計画をグループの2本の柱とし、それに必要な装置の開発を行った。またこれまでに行ってきた銀河の観測的研究も継続し、新しい発見も行うことができた。

### 【1】国土地理院32m鏡の電波望遠鏡化

大学の近くにある国土地理院が有している口径32mのアンテナ(右写真)は測地VLBI(超長基線電波干渉計)に使われており、観測周波数は2GHzと8GHzである。これを国土地理院との協議により、20GHz帯受信機等を搭載して宇宙電波天文観測にも使用できるように準備を進めている。20GHz帯ホーンや切り替えミラー、受信機室などはアンテナ建設時からすでに設置されている。観測周波数は21.5-24.5GHzで中間周波数は4-7GHzであり、期待される空間分解能はHPBW $\sim$ 100"である。具体的な研究対象としては水メーザーやアンモニアなどのスペクトル線観測による活



動的銀河中心核の研究、遠方宇宙の銀河の観測などである。32m鏡単独による単一鏡観測を行うとともに国内のアンテナと結んで超長基線電波干渉計(VLBI)観測も計画している。

本年度に行った具体的な事項は以下のとおりである。

(a) 国土地理院と共同研究を行うため、「超長基線電波干渉計による高精度観測に関する共同研究」の協定を締結した。またソフトウェア電波望遠鏡の開発を共同で行うため、情報通信研究機構とも共同研究契約を締結した。

(b) 大気による吸収を補正して天体からの電波の強度を正しく得るための強度較正装置の設計を進めた。ステッピングモーターによる駆動によりフィードホーンの前に室温の吸収体を出し入れする回転チョッパ方式を採用し、20GHz焦点部に格納できるように設計した。

(c) 既設の20GHz帯フィードホーンに接続する受信機部を設計した。受信周波数は21.5-24.5GHzとし、偏波計で右回偏波と左回偏波に分離したあと、高利得かつ低雑音で増幅できる初段の増幅器としてHEMT増幅器を採用し、これらを収納して20Kに冷却するためのクライオスタットを設計し、必要な容量の機械式冷凍機を選定した。これらは受信機室に設置されるが、冷却のためのコンプレッサーをその外に置くことにした。

(d) 冷却HEMT増幅器の出力は受信機室を経由して同軸ケーブルでシェルターに伝送される。シェルター内で局部発信周波数を混合して差を取り4-7GHzの中間周波数に変換し、電気光変換器に

導入する第一中間周波数部を設計した。信号は光ファイバーを経由して観測棟に伝送され、電気信号に戻されたあと、ビデオバンドに変換する第二中間周波数部も設計した。

(e) ビデオバンドに変換された信号を分光するための電波分光計を汎用計算機によるソフトウェアで製作した。デジタル分光計はアナログ分光計に較べて性能が安定であるが、従来は一般的には専用LSIを用いたハードウェア分光計であった。しかし、専用LSIの製作は非常に高価であるため、我々はパーソナルコンピュータを用いたソフトウェア分光計を開発した。信号を高速サンプリングして取り込み、それを高速フーリエ変換したあと2乗することによってパワースペクトルを得るものである。開発したものは2ビットで1GHzでサンプリングし、汎用計算機に取り込んで処理を行って、最大周波数帯域幅が512MHzで最大分光点数が105万点の分光器を実現した。分光点数、従って周波数分解能は可変である。アラン分散を求めて見ると分光強度は時間的に極めて安定であることも示された。開発した分光計はソフトウェア分光計としてはこれまでで最も周波数帯域幅が広いものである。なお、この分光計の開発において、情報通信研究機構・鹿島宇宙通信研究センターの協力を得た。

これらの設計や製作は大学院生や学群4年生(卒研生)とともに行った。

## 【2】南極望遠鏡計画

南極大陸内陸部の高原地帯は地上で最もミリ波～赤外線領域の天文観測に適した場所である。そこに筑波大学独自の口径10mクラスの高精度アンテナを設置してサブミリ波～テラヘルツ帯で天文観測を行う計画を昨年度から開始し、本年度からサイト調査を行うための装置の開発に着手した。

望遠鏡設置場所は南極の昭和基地から約1000km内陸側にあるドームふじ基地であり(南緯77°)、地理的標高は3810m、気圧換算の標高は4200～4300mである。ここは日本の極地研究所が持つ基地で、南極にある基地としては最も高いところにある(南極の高原地帯で最も高いのは地理的標高が4100mのドームAであるが、そこは300mの差でしかない)。極地研究所の測定データによると、気温は平均が-54℃、最低が-80℃、最高が-20℃という極低温であり、そのため大気中の水蒸気は少ない。年間を通して高気圧のもとにあるので晴天率も高く、年間降水量はわずか数ミリメートルである。風はかなり特殊で、高原地帯なので5-8m/sの風速はかなりあるが、10mを超える風は非常に少なく、20m/sを超えることは年間を通してほとんど無い。平均風速は5.8m/sで、ハワイ・マウナケア山頂やチリのALMAサイトよりも弱い。このような風は望遠鏡やドームを設計する上で都合の良いものである。

計画としては、まずサイト調査を行ってテラヘルツで大気の透過率が高いことを確認したあと、口径30cm程度のポータブル望遠鏡を作ってドームふじ基地で実際の観測経験を積み、その後、口径10mクラスの本格的望遠鏡を設置する予定である。

本年度は、サイト調査のための装置の設計を行い、製作を開始した。主目的は大気の透過率の測定であり、装置としてはラジオメータとフーリエ分光器である。

(a) 220GHzの単一周波数において大気の吸収率を測定するヘテロダイン方式の常温ラジオメータを整備した。仰角を変えて大気の光学的厚みを常時、測定するものである。

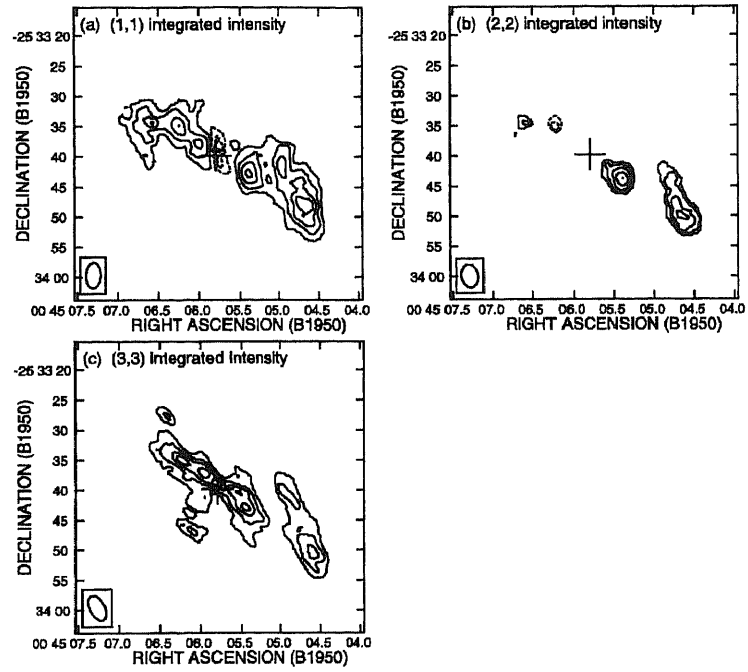
(b) 0~2THzの広い周波数帯の大気の吸収率を測定するためにフーリエ分光器を用いる。分光された信号はInSb(インジウムアンチモン)を用いた検出器で検出されるが、InSbは4K以下に冷却する必要がある。従来は液体ヘリウムで直接に冷却されていたが、南極ドームふじ基地では大量の液体ヘリウムを用意することが不可能なので機械式冷凍機を用いることにした。しかし、InSbを安定して動作させるためには、冷却温度の変動と機械的振動を極めて小さいものに抑える必要がある。そのため、冷凍機の冷凍温度の変化を抑えるための特別な工夫とコンプレッサーによる機械的振動を除振するための特殊機構を開発した。

これらの開発は学群4年生(卒研)とともにいった。またラジオメーターとフーリエ分光器の整備・開発には東京大学と国立天文台の協力を得た。

### 【3】銀河の観測的研究

#### (1) 棒渦巻銀河 NGC 253 の中心部のアンモニアの観測

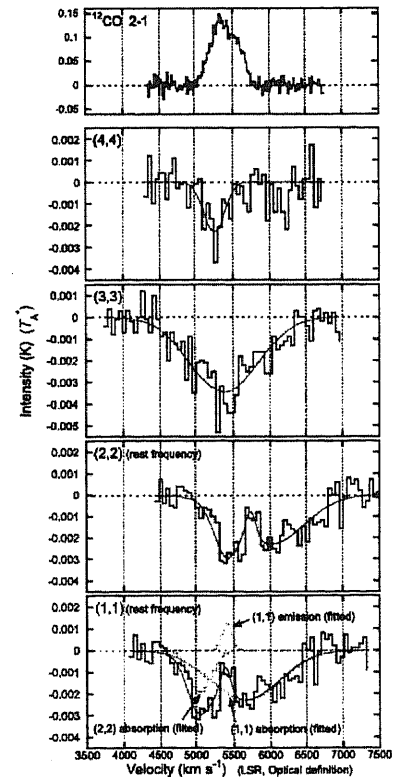
距離約 3 Mpc にあって中心部で爆発的星形成が起きている棒渦巻銀河の中心部のアンモニアを VLA でマッピングした。空間分解能は  $4'' \times 3''$  である。観測したのは国立天文台野辺山の 45 m 鏡で強く受かっていた  $(J,K)=(1,1)$ ,  $(2,2)$ ,  $(3,3)$  の 3 本のスペクトル線である。右図にその積分強度の分布を示す。3 本の輝線とも CO 分子と同様に概ね棒状構造にそって分布しているが、大変興味深いのは、この 3 本の輝線の強度が場所によって異なり、励起温度とオルソ・パラ比が場所によって大いに異なることを示している。実際、 $(J,K)=(1,1)$  と  $(2,2)$  の強度比から求めた励起温度は 15 K 以下から 28 K と場所によって差があった。また中心部では  $(J,K)=(1,1)$  が強い連続波電波を背景にして吸収線で観測された。(査読論文 1)



#### (2) 超高光度赤外線銀河 Arp 220 における超高速アンモニア吸収線の発見

銀河の中には、赤外線放射が太陽光度の  $10^{12}$  倍にも達し、クエーサーに匹敵するものが見ついている。そのような銀河は超高光度赤外線銀河と呼ばれる。この強い赤外線放射は激しい星形成に基づくものと考えられているが、活動的銀河核 (AGN) との関係も議論され、実際、銀河の中心に AGN を持つものも少なくない。

Arp 220 はこのような典型的な超高光度赤外線銀河であり、銀河全体の形状が不定形であることと中心核を 2 つ持つことから、2 つの銀河が合体したものであると考えられている。またガスも非常に豊富であり、星形成が盛んであることも知られている。我々はこの銀河のアンモニアを国立天文台野辺山の 45 m 電波望遠鏡 (空間分解能  $71''$ ) で観測したところ、 $(J,K)=(1,1)$ ,  $(2,2)$ ,  $(3,3)$ ,  $(4,4)$  の 4 本のラインが吸収線で観測された。さらに  $(J,K)=(1,1)$  と  $(3,3)$  の線幅は 1800 km/s にも達する驚くべき幅の



広さであった。これほど広い線幅の分子線はこれまでに発見されたことがなく、唯一の近い例が、渦巻銀河 NGC 4258 の中心核で発見された水メーザーの速度の分布が約 2000 km/s にわたっているのが唯一である（個々のスペクトル線の幅は狭い）。

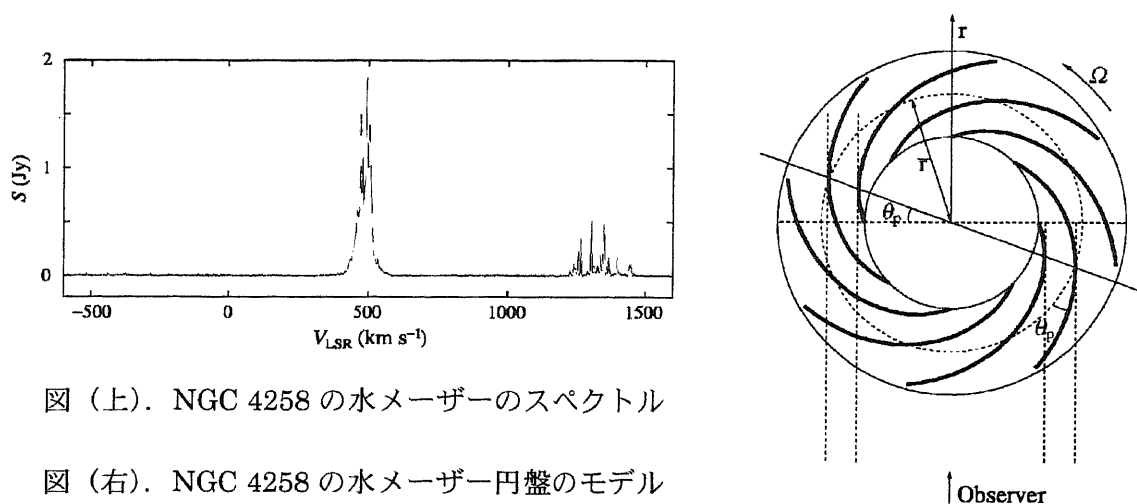
このアンモニアの吸収線は AGN である銀河中心核の強い連続波電波を背景にして観測されるものであり、その広がり $\theta$ は 1"と非常に狭い領域から出ている。このような小さな領域が 1800 km/s もの大きな速度を持っていることになり、AGN 周囲の速度構造を調べる上で極めて重要である。現在、より高い空間分解能での速度構造を明らかにするため、米国の大型干渉計 VLA で観測を行い、その結果を解析中である。（査読論文 3）

### (3) 水メーザー観測による活動的銀河中心核の研究

2 型セイファートや LINER などの中心から出ている超強力な水メーザー（メガメーザー）を超長基線干渉計（VLBI）で観測することは、活動的銀河中心核（AGN）の分子ガスの分布と運動を 0.001"より高い角分解能で直接に測定することができる唯一の手段である。この角分解能は 10Mpc の距離で 0.05pc の距離に相当し、ブラックホール周囲の降着円盤の外縁を直接に見ることができる。

AGN からの水メーザーのスペクトルは典型的には銀河中心速度付近の成分とそれより赤方偏移した成分、青方偏移した成分の 3 成分から成るが（例、下左図の NGC 4258）、ほとんどの水メーザーのスペクトルは青方偏移成分よりも赤方偏移成分の方がフラックスが大きく未だに未解明の謎となっている。その唯一の理由として、メーザー円盤が渦巻構造をしているモデルが提唱されているが、直接観測は困難なので現在までにそれを支持する観測的証拠は得られていない。我々は、NGC 4258 の水メーザーの高速度成分（赤方偏移成分、青方偏移成分）の速度を 13 年にわたってモニターし、赤方偏移成分が  $dV/dt = 0.036 \pm 0.007$  km/s/yr で減速していること、また青方偏移成分が  $dV/dt = 0.20 \pm 0.10$  km/s/yr で加速していることを初めて観測的に明らかにした。これはメーザー円盤が渦巻状になっていることの初めての証拠であり、その速度変化から渦巻腕のピッチアングルは  $2^\circ \pm 1^\circ$  であると推定した（下右図）。（査読論文 4）。

我々はまた、NGC 6946 という 2 型セイファートにおいて、新たに水メーザーを発見した。等放射を仮定した場合の光度は太陽の 340 倍であり、メガメーザーである。スペクトルは銀河中心速度付近の成分とそれより赤方偏移した成分、青方偏移した成分の 3 成分から成るので、横向きのメーザー円盤をしていると推定される。（査読論文 2）



図（上）. NGC 4258 の水メーザーのスペクトル

図（右）. NGC 4258 の水メーザー円盤のモデル

<論文>

(査読論文)

1. Takano,S., Hofner,P., Winnewisser,G., Nakai,N., Kawaguchi,K.  
“High Angular Resolution Observations of the (J, K) = (1, 1), (2, 2), and (3, 3) Transitions of Ammonia in NGC 253”  
Publ. of Astron. Soc. Japan, 57, 549-561 (2005)
2. Sato,N., Yamauchi,A., Ishihara,Y., Sorai,K., Kuno,N., Nakai,N., Balasubramanyam,R., Hall,P.  
“Water-Vapor Maser Survey for Active Galactic Nuclei: A Megamaser in NGC 6926”  
Publ. of Astron. Soc. Japan, 57, 587-594 (2005)
3. Takano,S., Nakanishi,K., Nakai,N., Takano,T.  
“Extremely High-Velocity Gas in the Galaxy Arp 220, Revealed with Ammonia Absorption Lines”  
Publ. of Astron. Soc. Japan, 57, L29-L32 (2005)
4. Yamauchi,A., Sato,N., Hirota,A., Nakai,N.  
“Detection of the Velocity Drift of High-Velocity Water Maser Features of a LINER NGC 4258: Evidence of a Spiral Maser Disk”  
Publ. of Astron. Soc. Japan, 57, 861-869 (2005)

(国際研究会集録等)

1. Yamauchi,A., Nakai,N., Sato,N., Diamond,P.  
“Water-Vapor Maser Emission from the Seyfert 2/LINER NGC 3079”  
In Proceedings of Future Directions in High Resolution Astronomy: The 10th Anniversary of the VLBA, ASP Conference Proceedings, Vol. 340. Edited by J. Romney and M. Reid. (San Francisco): Astronomical Society of the Pacific, ISBN 1-58381-207-5, 2005., p.241-243.

(国際研究会発表)

1. Nakai,N.  
“Molecular disks of nearby galaxies”, Workshop on Submillimeter Astronomy and Receiver Technologies, Joint Workshop with the 6-th Workshop on Submillimeter-Wave Receiver Technology in Eastern Asia, December 8-10, 2005 (Purple Mountain Observatory, NAOC, CAS, Nanjing, China) (招待講演)

<学位論文>

(修士論文) 数理物質科学研究科

1. 萩原 健三郎

「汎用計算機を用いた電波天文用広帯域ソフトウェア分光計の開発」

2. 間明田 好一

「水メーザーの観測による銀河 IC 1481 の活動的銀河核の研究」

(卒業論文)

1. 石井 峻

「南極サイト調査用大気透過率測定装置の設計」

2. 小出 祐輔

「国土地理院つくば 32m 電波望遠鏡の冷却増幅部の設計」

3. 櫻井 佳奈子

「棒渦巻銀河 NGC3627 における渦状腕のパターン速度の決定」

4. 塩出 美咲

「棒渦巻銀河 NGC4321 における分子ガスの性質」

5. 櫛 香奈恵

「横向き銀河のガス密度分布を求める手法の開発とその応用」

6. 益田 多美

「A statistical study of the radial distribution of molecular gas in galaxies」

7. 山本 晃右

「渦巻銀河 M83 における分子ガスと原子ガスの相互変換」

<外部資金>

(学 内)

1. 学内プロジェクト研究 助成研究 (A) : 中井直正 (研究代表者)

「水メーザーの観測による銀河中心巨大ブラックホールの研究」(研究経費 120 万円)

(学 外)

1. 科学研究費補助金 (基盤研究B) : 中井直正 (研究代表者)

「水メーザーの観測によるセイファート銀河の統一モデルの再考」  
(交付額 1180 万円) (1/3 年)

2. 科学研究費補助金 (萌芽研究) : 中井直正 (研究代表者)

「ソフトウェア電波分光計の開拓」  
(交付額 290 万円) (1/2 年)

3. 国立天文台共同開発研究：中井直正（研究代表者）  
「南極天文学開拓のための大気状態調査に向けて」（研究経費 700万円）

#### <共同研究>

1. 「超長基線電波干渉計による高精度観測に関する共同研究」協定書  
国土交通省国土地理院（2005年4月1日～2010年3月31日）
2. 「南極天文学開拓のための大気状態調査に向けて」共同研究契約書  
大学共同利用機関法人自然科学研究機構（2005年10月5日～2006年3月31日）
3. 「広帯域アナログ・デジタル変換技術を用いた宇宙電波情報の高速分析技術に関する研究」共同研究契約書  
独立行政法人情報通信研究機構（2005年10月28日～2013年3月31日）

#### <社会活動・広報活動>

##### （講演）

1. 中井直正：天文学宇宙の講演と観望会「銀河にひそむ巨大ブラックホール」  
9月9日（金）日立市シビックセンター  
9月10日（土）水戸市県民文化センター  
9月11日（日）土浦市県南生涯学習センター
2. 講演会開催、公開講演会「宇宙・惑星・生命—21世紀の天文学—」  
主 催：筑波大学・物理学専攻  
講 師：海部宣男（国立天文台長）  
開催日：2005年10月21日（金）  
場 所：筑波大学・大学会館（ホール）

##### （新聞発表）

1. 2005年10月6日、東京新聞 他多数  
「超高光度赤外線銀河 Arp 220 における超高速アンモニア分子線の発見」