

# 8m電波望遠鏡の改修と 波長21cm電波輝線による銀河系の中性水素の観測(II)

## Development of a Galaxy HI observation system for the 8m radio telescope at Misato Observatory (II)

観光学部・学生自主創造科学センター：○尾久土正己

観光学部：佐藤奈穂子

教育学部：富田晃彦、石塚互

システム工学部：曾我真人

みさと天文台：矢動丸泰、豊増伸治、小澤友彦

甲南大学：佐藤文隆

M. OKYUDO, N. SATO, A. TOMITA, W. ISHIZUKA, M. SOGA, Y. YADOMARU,  
S. TOYOMASU, T. OZAWA and H. SATO

○印研究代表者連絡先：[okyudo@center.wakayama-u.ac.jp](mailto:okyudo@center.wakayama-u.ac.jp)、電話073-457-8504

本研究に関連するホームページURL：<http://www.wakayama-u.ac.jp/~okyudo/NewEar/>

要約：我々は、8 m電波望遠鏡を用いた、銀河系からの中性水素(HI エイチワン)輝線を観測するシステムの立ち上げを行ってきた。本研究では、基本性能の測定観測を行い、電波望遠鏡の性能が明らかになってきている。さらに、銀河系からのHI輝線による観測から、我々の銀河系の2次元地図の作成を行った。これにより、50年前の最先端の天文学の追体験が可能となった。また、新しい電波天文学の教材である、1 m電波望遠鏡の開発を行っている。また、大学生がこれらをテーマとした研究を行っている。最後に、広く一般市民を対象とした普及活動の新たな切り口として、SETI観測もはじめた。

### 1. はじめに

我々は、生涯学習教育研究センターに設置した地域連携組織「宇宙教育研究ネットワーク(通称:NewEar)」の枠組みを活用して、宇宙・天文をテーマとした、一般を対象とした広報普及活動・大学生教育・共同研究や共同開発、また、研究会やシンポジウムの開催を行ってきた。みさと8 m電波望遠鏡プロジェクトは、このNewEarの活動の一環として行っている、電波天文学をテーマとした研究・教育活動である。

#### 1.1 背景

現代生活において、ラジオや電子レンジをはじめ、高性能電波通信技術を注ぎ込んだ携帯電話など、電波を利用した製品が広く普及しており、これらの電波を

扱う技術は、欠くことのできないものとなっている。同時に、現代天文学における電波天文の重要性も高まりつつある。現在、南米チリに各国の共同のもと建設中の巨大電波望遠鏡であるALMA(アルマ)は、日米欧のそれぞれにおいて最優先に実現すべき地上観測装置計画と位置づけられている。

ところが、電波天文どころか電波を用いた製品に対する一般の認知度は、高いとは言えない。その一因として、理科教育において興味や理解を増進させるための重要な手段である実験・観察が、電波や電波天文学に関しては非常に少ないことがあげられる。例えば、学校の授業や公開天文台での宇宙の観察手段は可視光に偏っており、宇宙電波を扱うところはあまり多く

ない。また、現代生活における電波利用や電波通信技術においても、それぞれの機器はブラックボックスと化している。

我々は、このような状況を打破するために、宇宙電波を素材とした教材の製作や電波望遠鏡を用いた観測実習を通じて、宇宙や電波を身近なものに感じ、同時に電波についての理解も深められるような機会を提供することを目指している。

### 1.2 HI(エイチワン)輝線

HI輝線は、人類が初めて検出した地球外からの電波輝線であり、宇宙空間に存在する中性水素原子から放射される電波である。その周波数は1.4GHz、波長は21cmであることから、21センチ線とも呼ばれる。このHI輝線を放射する中性水素原子は、星の原材料であり、星間物質として特に銀河面に多量に分布する。そのため、HI輝線は小口径電波望遠鏡でも容易に受信できる強度を持ち、電波天文学の入門に適している。また、1958年、オールト(J. H. Oort)はHI輝線の観測データを元に、我々の銀河系の2次元地図の作成を行った(参考文献[1])。これは、当時の最先端のサイエンスであり、この結果より、我々の銀河系は渦巻き腕を持つ銀河である観測的証拠が初めて得られた。(電波天文とオールトの研究詳細については、添付Aを参照)このように、HI輝線は歴史的に見ても重要な観測輝線である。

しかし、日本の電波天文学は、戦略的にこの周波数を避けてきた結果、日本国内には本格的にHI輝線観測を行う望遠鏡が存在しなかった。サイエンスの最先端では、観測周波数の高周波化や、装置の大型化により高分解能化・高感度化が追求されており、HI輝線を観測できる望遠鏡としては、海外のVLAやGBTなどの大型望遠鏡が稼働している。しかし、低周波・低分解能の小口径望遠鏡にも、教育や一般普及の面をはじめとした果たすべき役割はまだ多いと考える。

### 1.3 みさと8m電波望遠鏡

みさと天文台の8m電波望遠鏡(図1参照)は、もともと「野辺山動スペクトル計」と呼ばれ、1977年から国立天文台野辺山太陽電波観測所で70~220MHz帯での太陽電波観測に用いられていたものである(参考文献[2])。1994年の運用終了後そのまま放置されていたのを、1998年にみさと天文台へ移設し、機械系のみ駆動可能な状態で保存されていたものである。みさと天文台では、この望遠鏡自体を日本の電波天文学の歴史を伝える展示物として来訪者に公開していた。

この静態保存されていた70~220MHz用の太陽電波



図1 みさと8m電波望遠鏡(2008年10月撮影)

観測望遠鏡を、1.4GHzの銀河面観測用に転用するための改修工事が、2005年から始まっている。

より短い波長の電波を効率よく受信するため、より高い鏡面精度が必要となり、回転放物面のパラボラを新しいものと交換した。受信システムも、新しい周波数に対応するものと入れ替えた。また、元来太陽のみ観測する望遠鏡だったため、天球のうち太陽軌道付近しか観測できなかったものを、全天のさまざまな方向に分布している中性水素原子を観測できるように、架台の改修・駆動装置の更新。併せて、老朽化の酷い部分の補強や塗装などを行った。そして、我々の銀河系からのHI輝線によるファーストライトにも成功した。

我々はこの望遠鏡によって、銀河面に沿ったHI輝線観測と、その観測データを用いた銀河系の2次元地図の作成が可能となった。この、約50年前の最新の天文学の研究を、自分たちの手で追体験することが我々の最初の目的である。また、この8m電波望遠鏡の立ち上げノウハウを蓄積することにより、高校・公開天文台が購入できるような、安価な電波望遠鏡の開発も行っている。さらに、この望遠鏡は公開天文台に設置さ

れているため、電波天文学の広報塔として利用でき、電波天文学に触れる機会を提供している。そして、国内唯一の本格的HI 観測用望遠鏡として、高校生の観測実習や、大学生の卒業論文・修士論文の研究素材としても利用している。

以下、本稿では8 m電波望遠鏡および電波天文に関するプロジェクトの成果を報告する。2章においては、前年度に引き続き行っている望遠鏡の保守整備と性能向上について述べる。3章では、望遠鏡での試験観測の結果及びその解析結果を示す。4章以降では、本研究で取り組んだ教育活動について紹介する。4章では学生および一般を対象として開催した「手作り電波望遠鏡工作教室」について、5章では8 mを用いた観測実習について、6章では大学生の行った卒論研究について紹介する。また、7章では、一般普及の別の切り口であるSETI (セチ) について紹介する。8章では、まとめと今後の展開について述べる。

## 2. 望遠鏡の保守整備・性能向上

前年度に引き続き、望遠鏡の改修工事を行っている。また、劣化などからトラブルを起した部品の交換や高性能な部品への交換も行っている。

### 2.1 赤緯駆動モーターの更新

8 m電波望遠鏡は、目的の天体へその方向を向けるのに、赤経と赤緯の2軸の駆動モーターを用いている。2006年度の赤経駆動機構の改修に引き続き、赤緯駆動の粗動モーターの改修も行った。既存のモーターは、回転が速く、目的の天体の方向を向いた時の位置決定精度に不安があるため、高出力・低速回転のモーターへの交換を行った。

### 2.2 エンコーダーの交換

エンコーダーとは、望遠鏡の光軸の傾きを物理的に検出する装置で、赤緯方向や赤経方向に望遠鏡が駆動した時、望遠鏡の向いている方向を、エンコーダーの数値から知ることができる。しかし、8 m電波望遠鏡の運用中に、時折、エンコーダー値の再現性に著しい低下が見られる事が発覚した。これは、エンコーダーの劣化（あるいは破損？）によるものと考えられる。そのため、エンコーダーを新しいものと取り替えた。交換以降、以前のような不具合は確認されていない。また、以前は720パルス/回転の分解能であったものを2000パルス/回転に変更した。結果、角度分解能が上がり、より精密な望遠鏡の駆動が実現している。



図2 8 m電波望遠鏡ウェイト部分(2008年7月撮影)  
サビ止め塗料の部分が、新しくなった部分。この後、上から白い塗料を塗る。

### 2.3 ウェイトの更新

1998年の望遠鏡の移設工事の際、バランスウェイトを支持する棒を切り離して運搬し、みさと天文台で溶接により再接合した。しかし、一度切断した箇所を経年劣化が激しく危険なため、新しい支持棒との交換を行った(図2参照)。交換に際し、安全のため支持棒を以前のものより太いものを採用した。また、棒の長さを以前より長くしたため、トルクが大きくなっており、結果、安定して駆動できるようになった。

また、みさと天文台は一般のお客さんが気軽に遊びに来る公開天文台であり、電波望遠鏡の傍まで近寄れる。幼児などが望遠鏡の傍で遊ぶ時にウェイトにぶつかる危険性を指摘され、ウェイトには衝撃吸収剤を巻いてカバーをかける対応をした。

### 2.4 LNA (低雑音増幅器)の交換

LNA (Low Noise Amplifier 低雑音増幅器)は、パラボラ面の焦点部分に設置されている信号増幅器であり、受光部の直下の防水箱に納められている。このLNAは、その性能が望遠鏡自体の性能に大きく影響を及ぼす部品である。しかし、常に屋外の劣悪な環境にさらされており、また、防水箱自体の劣化も認められたため、新しいものへの交換した(図3参照)。交換した部品は、以前と同様に川越無線製作のLNAである。但し、前回は、1.4GHzのみに特性をもつLNAを使用していたが、1.4 - 1.6 GHzの広範囲にわたって特性を持つLNAとの交換をした。また、将来的に、1.6GHzのあるOHメーザーのある周

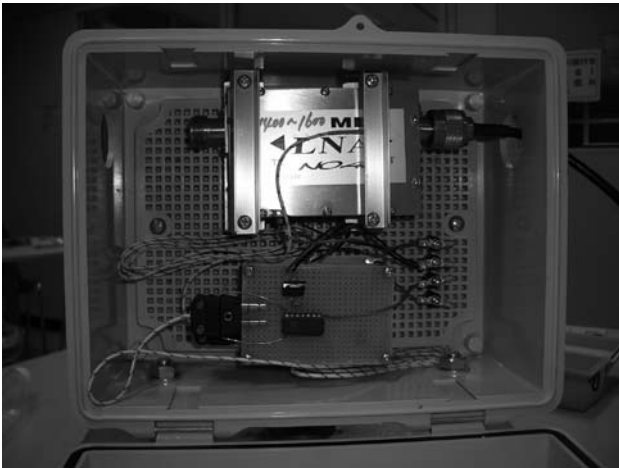


図3 焦点に設置する防水箱（2008年6月）

焦点のフィード直下に設置した新しい防水箱。大学で作業している時の様子。箱の中には、新しいLNA(上)と温度計(下)が収められている。

波数帯も受信可能となった。なお、前回の防水箱は、密閉型としたが、気密の完全性が保たれておらず、内部に水の浸入があったため、今回の防水箱は、逆に、水抜き穴の設置し水の溜まるのを防ぐ構造とした。今後も、細やかな維持管理が望まれる。

併せて、LNAの駆動時の温度環境を調査するために、J型熱伝対を用いた温度計を製作し、観測小屋の中から、焦点部に設置してあるLNAの温度およびLNAを収めた防水箱内の温度を測定できる仕掛けを作った。

## 2.5 信号ケーブルの交換

8m電波望遠鏡において、LNAの出力信号は同軸ケーブルを用いて観測小屋の受信機へと伝送されている。2008年4月、このケーブルに破損・劣化部分が見つかった。これは、みさと天文台に出没するイノシシの齧り跡ではないかと推測されている。また、地面の近くに設置されているため、草刈機によるダメージと思われる跡も見つかった。実際、8m電波望遠鏡の観測データを詳しく見てみると、2008年頃以降のデータに原因不明の性能の低下、具体的にはシステム雑音温度の上昇（詳しい説明は、3章を参考）が認められていた。このケーブルの劣化がその一因でないかと考えている。

新しいケーブルへ交換し、ケーブルの埋設作業などを行った。また、イノシシなどの被害を少なくすべく、ケーブルの地上部分をスチールパイプなどで覆う処置を施した。

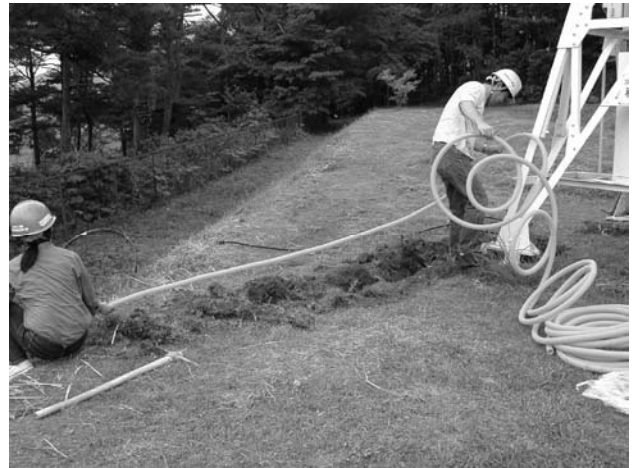


図4 ケーブル埋設工事（2008年6月）

望遠鏡(右)からの信号を伝送する同軸ケーブルは、地中に埋設したプラスチックパイプの中を通す。写真は、埋設する溝を掘っているところ。

## 2.6 焦点距離調節装置

8m電波望遠鏡では、受信機器を焦点部に設置し、かつ焦点距離の調節をするため、受信機を半円弧のスチールパイプで支持している(図5参照)。しかし、この焦点距離調節装置の調整を行うためには、大人2人が鏡面に上る必要があり、時間もかかる大仕事であった。そのため、新しい調整機構の検討をしていた。

新たな装置を搭載した結果、パラボラの焦点距離の調節が女性一人の力で行えるようになった。また、ネジを回転させることにより、わずかな力で可動するため、以前に比べ、精度の高い焦点距離の調節が可能と



図5 焦点距離の調節

望遠鏡の鏡面に上がり、焦点距離の調節をしている様子。この写真に写っている、焦点距離調節装置は以前のものである。

なっている。同時に、焦点部の受信機器のメンテナンスも容易になった。加えて、新しい調節機構は、円弧パイプをパラボラに固定する部材の接地部分が、以前のものより大きくなっており、望遠鏡の高度変化による光軸のゆがみの減少も期待できる。

### 3. 望遠鏡の観測結果

#### 3.1 性能評価観測

電波望遠鏡で取得されたデータを正しく評価するため、また、得られたデータを他望遠鏡のデータと比較するために、望遠鏡の基本性能の測定が重要である。8 m電波望遠鏡では、以下のパラメータについて測定観測を行い、データを取得した。

##### (1) システム雑音温度

望遠鏡で受信された信号は、増幅器やミキサー、バンドパスフィルターなどさまざまな電子部品によって、受信・処理されている。システム雑音温度とは、これら部品自体が発する熱雑音が、受信信号へと与える影響を評価する値である。電波望遠鏡がどの程度効率よく電波信号を検出できるか、ひいては、どの程度まで微少な電波信号まで捉えられるか、に関わる指標である。この値が小さいほど感度が良く、少ない積分時間（光学カメラで言う露光時間）で高品質の受信データを得ることができる。また、電波天文においては、このシステム雑音温度を用いて、受信電波の強度をアンテナ温度（単位[K(ケルビン)]）に変換して扱うことを慣例としている。

システム温度の測定は、R-Sky法を用いる[3]。これは、給電部の前にアブソーバー（電波吸収体）を置いた時のアンテナ温度（R）と、天頂を向けた時のアンテナ



図6 システム温度の測定

鏡面にて給電部の前にアブソーバーをかざしている様子。

温度（SKY）とを測定し、比較する事により得られる（図6参照）。SKYでのアンテナ温度を宇宙背景放射（約3[K]）とみなし、Rでの受信温度を常温（約300[K]）として、受信機内部の熱雑音を温度で評価する。

システム雑音温度は、毎回の観測時に測定していたが、ファーストライト時の値に比べ、原因不明の上昇（つまり性能の悪化）がみられていた。例えば、2007年3月の測定で170[K]であったが、2008年9月の測定では、約240[K]の高い値を示している。これは、約40%の性能の劣化に相当する。その後、2章に記述したケーブルの劣化などが見つかり、システムの更新をしたため、改めて精密な測定を行った。測定は、2008年12月7日～25日の間の10日に、合計17回の測定を行った。その結果の平均値を取ると、 $182^{+43}_{-21}$ [K]となった。これは、改修作業の前と比べて改善しており、当初の良質な値と一致している。

一方で、システム雑音温度の測定誤差が、約20%と少々大きめである。我々は、LNAの動作温度による性能の変化を疑い、LNAに設置した温度計を用いてシステム雑音温度とLNAの温度の関係を調べてみた。しかし、現時点で有意な相関は見られていない。

##### (2) ビームサイズ・ビームパターン

ビームサイズとは、電波望遠鏡で天体を観測した時に、どの程度の細かい空間構造を測定できるかを表す空間分解能に対応する指標である。仮想的に2つの電波源を考え、どちらも点源とみなせる時、この2つの電波源がどれくらい離れている時に、2つに分解して検出することが出来るか、で表す。この2つの電波源を分離検出できる最小距離（離角）をビームサイズ呼び、角度の単位で表す。ビームサイズの値が小さいほど、細かい構造を分解して詳細に観測できる事を表す。

一般に、パラボラを持つ望遠鏡のビームサイズは、パラボラの口径に反比例して小さくなり、観測波長に比例して大きくなる。具体的には、ビームサイズを $\theta$  [rad]、パラボラ直径D[m]、波長 $\lambda$  [m]とすると、 $\theta = 1.2 \times \lambda / D$ の式で表される。8 m電波望遠鏡で、この値を計算すると、1.84[deg]となる。

ビームサイズの測定は、太陽を用いた待ち受け観測で行った。望遠鏡を太陽の日周運動の通り道に向けて固定し、日周運動によって天体が望遠鏡のビームの中を移動してゆくのを観測する方法である。この方法によって得られるデータは、ビームパターンと呼ばれ、望遠鏡の感度の分布が、主ビームにどれだけ集中して

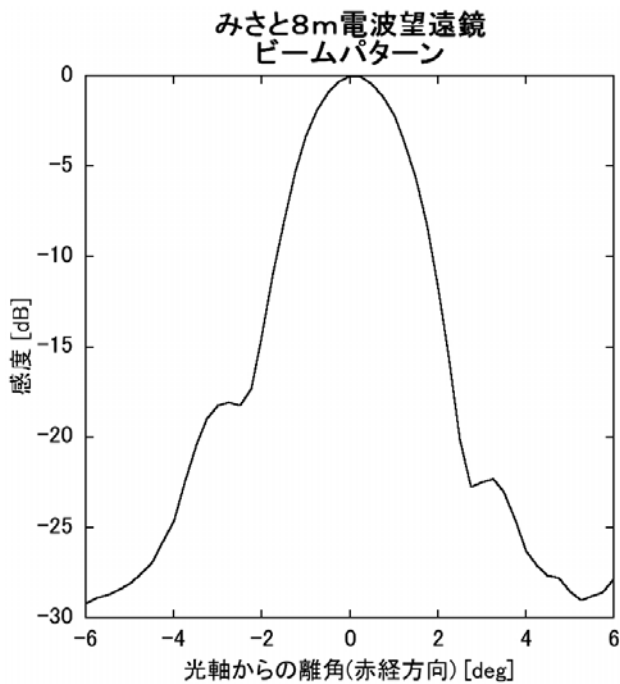


図7 8 m電波望遠鏡のビームパターン

太陽を用いた待ち受け観測。10回の測定の前平均を示す。縦軸は受信感度を(中心での感度を基準に)規格化したものを、指数で表す。横軸は光軸からのずれを、観測時刻から変換した角度を表す。

いるかを評価するのに用いる。ビームサイズは、このビームパターンにおいて、中心に比べ感度が半分になる半値幅の大きさとして測定できる。この観測方法を用いる利点は、望遠鏡の追尾性能に依存せずに観測が出来る事である。観測天体は太陽を用いたが、約2度のビームサイズに対して、約0.5度の太陽直径は有意に小さいので、太陽を点源と見なして解析を行った。また、天体の高度変化による望遠鏡の重力変形などの影響を最小限にするため、測定は1日1回太陽の南中時に限る事とした。太陽の日周運動は、1分間に0.25度動くので、南中前後の計約1時間にわたり1分おきに測定をおこなった。

観測は2008年12月7日～25日にわたり、合計10回行った。得られた結果を平均したものを、図7に示す。縦軸が規格化した感度を表し、横軸は観測時刻から計算した太陽からの離角を表す。感度が最大の望遠鏡の光軸方向から離れるにつれて、受信感度が下がっている。感度が最大値の半分になる値の幅を半値幅と呼び、望遠鏡のビームサイズの値として採用した。この望遠鏡でのビームサイズの測定結果は、10回の平均値で  $2.07^{+0.06}_{-0.08}$  [deg]であった。

なお、測定されたビームサイズの値であるが、太陽(直径0.5[deg])などの天体に比べ、とても大きい値となっている。しかし、HI輝線の分布はこのビームサイズよりも有意に広範囲に広がっており、サーベイ観測を想定すると、効率や感度の点で有利に働く。HI輝線を観測する望遠鏡として、十分適当な大きさと言える。

最後に、ビームパターンの特性を、サイドローブから見てみる。サイドローブは、主ビーム以外からの受信性能を表し、8 m電波望遠鏡の場合、図7において光軸から±3[deg]離れた所に現れている小さなピークが第1サイドローブである。サイドローブが大きいと、目的天体以外からの雑音の混入につながり、望遠鏡の性能が悪化する。ビームパターンの理想では、サイドローブは小さいほどよく、ビームサイズも小さいほど良い。しかし、このふたつは、サイドローブを小さくするとビームサイズが大きくなり、ビームサイズを小さくするとサイドローブが大きくなる、という二律背反の関係にある。8 m電波望遠鏡のサイドローブの大きさは、-15dB以下に抑えられており、まずまず実用に耐えうる(理想は-20dB以下)。また、左右対称性もよく、全体として、質のいいビームパターンと言える。今回の観測で測定したのは、中心を通る東西方向の一軸についてのみなので、今後、南北方向や2次元のビームパターンの取得も進めて行きたい。

### (3) 開口能率

開口能率とは、電波望遠鏡の電波を集める効率を表す指標である。理想的な電波望遠鏡では開口面積(この場合、直径8 mの円の面積)で集光を行うが、実際の望遠鏡では、さまざまな集光を妨げる要因が働く。例えば、鏡面でのジュール損失や、支柱などによる幾何学的ブロッキング、回折や、鏡面照射分布の偏りなどが、望遠鏡の有効開口面積を減少させる。これらの効果を、理想開口面積に対する集光面積の割合で表したものが、開口能率である。この値は、他の電波望遠鏡で得られたデータとの比較など、観測データを絶対評価する際に必要な値である。

開口能率の測定は、既知の電波源を観測して行う。8 m電波望遠鏡では、太陽を用いて測定した。具体的には、さきほどのビームサイズの測定で得られたデータを用いる。観測した最大強度と既知の太陽の強度を比べる。ところで、太陽はその表面で爆発現象などが観察される非常に活動的な天体で、毎日の電波強度が変化している。この太陽電波の強度を正確に知るため

に、野辺山太陽電波観測所にある野辺山強度偏波計 (NoRP) のデータを用いた。この偏波計は、1GHzや2GHzをはじめとする多周波観測で太陽を毎日観測しており、較正済みデータを公開している。我々の知りたい1.4GHzの強度は、この観測データの内挿により求める事ができる。このデータは、Web上で毎日公開・更新されている。

開口能率の測定期間は2008年12月7日～25日で、その間太陽に目立った爆発現象も無く、得られた計13回全てのデータを解析に用いた。その結果、開口能率は  $0.59^{+0.12}_{-0.06}$  となった。

一般的な望遠鏡の開口能率は、0.6～0.7程度である。8 m電波望遠鏡の開口能率が小さめなのは、この望遠鏡の給電部の構造による。我々の採用した給電部の放射特性が-10dB以上の感度を持つのは、光軸を中心に半径63度の範囲となっている。これは、口径8 mのパラボラのうち中心の直径約6.1mの部分に対応する。つまり、中心の直径6.1mを特に効率的に使用した望遠鏡となっているためである。先ほどの(2)ビームサイズの測定において、測定値が計算値よりも少々大きめなものも、同様の理由からである。

ところで、パラボラ面のうち、直径6mよりも外側の部分の役割であるが、効率的ではないとはいえ電波を集める役割を果たしており、また、外からの不要な雑音を遮断する役割も持つ。電波は光よりも波長が長いので、回折により容易に不要な雑音電波が漏れこむため、この部分の果たす役割は非常に重要である。

#### (4) ポインティング精度

実際の天体観測において、観測者は天体を天球上の座標(赤経・赤緯など)を用いて指定する。望遠鏡がどの程度の精度で指定した座標を向いているかを表すのが、ポインティング精度である。一般的なポインティング精度は、望遠鏡のビームサイズよりも小さい事が望ましい。

ポインティング精度の測定は、座標が既知の電波天体を観測して行う。また、この観測に使う電波天体は、ビームサイズよりも有意に小さく点源とみなせる必要がある。8 m電波望遠鏡では、太陽とCas A (カシオペア座の超新星残骸) とTau A (おうし座の超新星残骸・かに星雲M1) を用いて測定を行った。

2008年8月から2009年4月の間に取り溜めた約50回分の観測データを用いてデータ解析を行った。結果は、平均誤差1.37 [deg]であった。これは、望遠鏡の空間分解能とくらべると、少々大きめであり、今後の改善

が必要である。ひとつには、この測定以降に、2.6節の焦点部の改造を行ったため、現在、測定時よりも精度が上がっている可能性がある。また、将来的には、ずれの詳細な解析を行い、ソフトウェア上での補正を行い、ポインティング精度の向上を目指す。

### 3.2 HI輝線観測

8 m電波望遠鏡におけるHI輝線観測の結果を紹介する。我々の電波望遠鏡プロジェクトの最初の目的は、天の川からのHI輝線を観測し、自分たちの手で銀河系2次元地図を作成することにある。これまでの改修で、HI輝線のファーストライトに成功している。

HI輝線観測は、2008年7月11日から13日に行った。銀河面 (=天の川) にそって銀経0度 (=銀河中心方向) から250度まで、10度きざみで観測を行った。なお、260度から360度の範囲は南天にあるため、北半球にある8 m電波望遠鏡からは南中高度が低すぎて観測できない。この観測データを用いて、銀河系の2次元地図の製作を行う。

8 m電波望遠鏡の受信するHI輝線は、宇宙空間に多量に存在する中性水素原子が放射する。我々の描く地図は、実は、中性水素原子の分布の地図に他ならない。

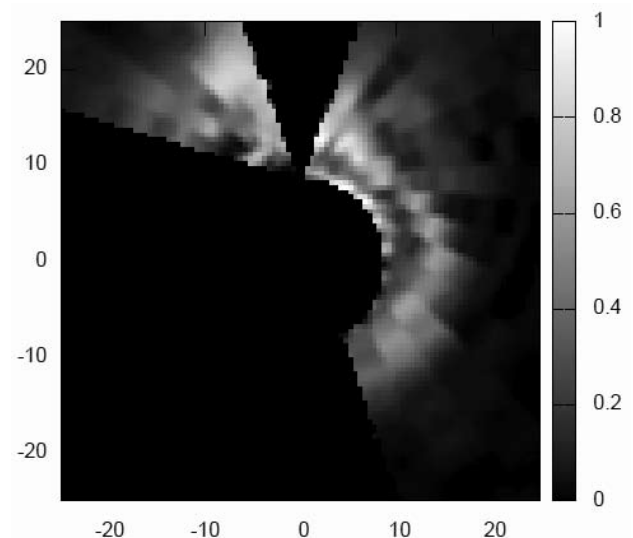


図8 銀河系の2次元地図

8 m電波望遠鏡のデータから作成した銀河系の2次元地図。縦軸・横軸は、銀河中心からの距離で、単位は[kpc] (1pc=3.26光年)。座標(x, y)=(0, 0)に銀河系の中心、(0, 8)に太陽があり、銀極の北方向から見たところ。グレースケールが中性水素の濃度を相対的にあらわしている(右のスケールバー参照)。銀経0度付近・180度付近の三角形領域は、原理的にデータの質がよくないため、無データ。また、太陽半径より内側の領域も、解が一意に決まらず、未解析。

一方で、銀河系の地図と聞いて一番初めに想像するのは、星の分布図である。星の原材料であり中性水素原子は、星の多数存在する場所には多数存在する。つまり、星の分布を知りたいとき、中性水素の分布を調べるのは、そう間違っていないはずである。

我々は銀河系を横から見ているため、2次元地図を作るには、各水素原子までの距離を知る必要がある。HI輝線観測では、中性水素原子の量にくわえ、その原子の運動する速度も知ることができる。(電波の波の性質からドップラーシフトを用いて計算できる。)そのため、銀河系に以下の簡単な仮定を適用すると、電波を放射する水素原子までの距離を求めることができる。使う仮定は、(a)銀河系の構成物質(太陽・水素原子含む)は、銀河中心のまわりを円軌道で回転運動している。(b)その回転速度は、中心からの半径によってのみ決まる。(c)太陽の半径と回転速度は既知とする。の3つである。これらの仮定を用いて、8 m電波望遠鏡の観測データから作られた2次元地図を図8に示す。渦巻き腕が何本か見られる。また、過去の先行研究(付録A参照)と比べると、相似点が見られる。今から約50年前、この研究により銀河系が渦巻き銀河であるはじめての証拠が得られた。

### 3.3 連続波観測の試験観測

宇宙電波の観測方法は、大まかに輝線観測と連続波観測に分けられる。技術的な困難さを比べると、輝線観測の方が容易である。我々がファーストライトを実現したHI観測も輝線観測である。以前の8 m望遠鏡では、連続波の観測感度があまり良くなく、太陽しか受信する事が出来なかった。しかし、2章で触れたような改修作業により性能向上がなされ、月をはじめとする他の天体の受信が可能となった。

試験観測には、ウェスターハウトが1958年に発表した、周波数1.390GHzの強い電波源のリスト[4]を用いた。このリストは、観測者の頭文字をとって、Wカタログと呼ばれている。このWカタログを参考に、8 m電波望遠鏡で1.4GHzの連続波観測を行い、10個程度の天体から電波の受信に成功した。天体の内訳は、銀河中心や月をはじめ、散光星雲や超新星残骸、電波銀河などが含まれる。図9に観測の一例を示す。電波銀河と超新星残骸からの信号がわかるグラフである。縦軸が電波強度で、横軸が地球上の位置に対応する角度である。この観測も、日周運動による天体の運動を利用して、望遠鏡を固定したまま観測を行った。左のピークは、はくちょう座の電波銀河(Cygnus A)に対応し、

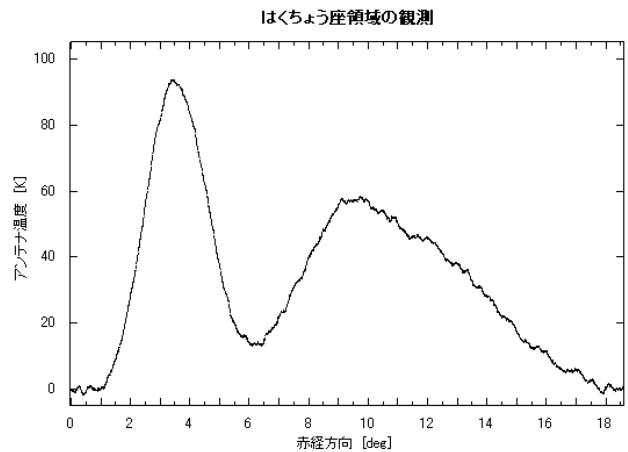


図9 連続波観測の結果

はくちょう座領域の待ち受け観測の結果。横軸は観測開始地点からの相対的な赤経方向のずれを表し、縦軸は信号の強度を表す。左ピークが電波銀河Cygnus A、右が超新星残骸Cygnus Loop。

右のピークは、はくちょう座の超新星残骸(Cygnus Loop)に起因する。電波銀河Cygnus Aは、約7億光年離れた我々の銀河系の外の天体であり、我々は、7億年前に放射された電波を受信できた事となる。

## 4. 手作り電波望遠鏡工作教室

### 4.1 はじめに

電波望遠鏡プロジェクトの目的のひとつに、一般を対象とした電波天文の広報普及活動をあげた。そして、手軽な実験が出来ない、という電波天文の欠点を克服するため、電波望遠鏡を用いた実験を容易にする、教

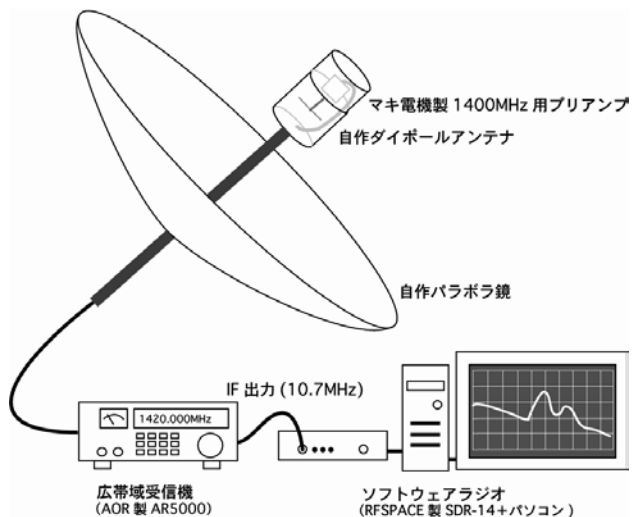


図10 1 m電波望遠鏡のシステム[5]

パラボラ部とダイポールアンテナ部の製作を行った。



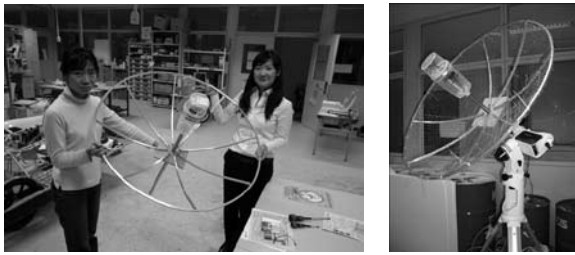


図11 工作教室のための試作機

試作機製作中の様子。工作教室のチラシに使用した写真。

材の開発を目指している。その目標を達するための手段として、だれでも持てる安価な小型電波望遠鏡の開発を行ってきた。その成果として、直径1mの小口径望遠鏡の、集光部に関する開発に成功した(図10、図11参照)。そこで、高校生以上のシニアを対象とした工作教室の開催し、一般の方に電波望遠鏡作りを体験してもらおうと決意した。この望遠鏡の製作においては、中学生の技術の授業のレベルが必要である。なお、受信機器については、現在開発中であり、まだ高価な部品が必要となっている。なお、この工作教室の開催にあたり、山口大学の藤沢健太氏にも協力を頂いた。また、望遠鏡製作の補助要員として、和歌山大学教育学部の富田研究室の学生に協力してもらった。

#### 4.2 開催

2008年11月23～25日の3日間にわたって「手作り電波望遠鏡工作教室」開催した。参加申込多数の場合に備えて、参加人数約20人として事前に参加申込を請うたが、20名の申込があり、申し込んだ人全員の参加となった。参加者の内訳は、高校生、大学生、高校の先生、プラネタリウム職員をはじめとして、親子連れやOLさんなど、多岐にわたる(図12～図14参照)。16グ



図12 工作教室 講義風景

ループ20人の参加者は、1日目・2日目と電波望遠鏡の製作に取組み、2日間ですべての参加者が各自の望遠鏡を完成させた。また、完成したすべての望遠鏡で、銀河系からのHI輝線の受信に成功した(図15参照)。



図13 工作教室 作業風景1



図14 工作教室 作業風景2



図15 工作教室 電波受信実験中

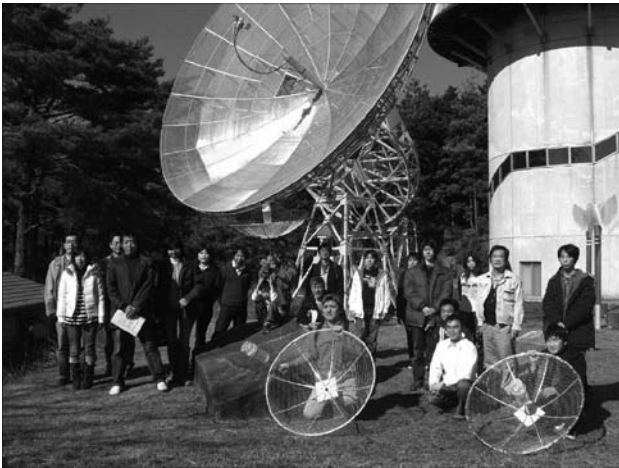


図16 工作教室 みさと天文台にて

製作した1m電波望遠鏡を持つての集合写真。人口電波の妨害の少ないみさと天文台においても、希望者を対象に、1mを用いた受信実験をおこなった。



図17 工作教室 8m電波望遠鏡観測小屋内にて

8m電波望遠鏡を動かして、実際に観測を行っている様子を説明。

最終日は、みさと天文台に集合し、8m電波望遠鏡を実際に駆動し、宇宙からのHI輝線を受信する様子を観察してもらった(図16・図17参照)。

#### 4.3 終了後

参加者と継続的な情報共有をするため、工作教室終了後にメーリングリストを作り、作成した望遠鏡の改造方法など、情報交換を行った。また、この工作教室から派生した活動として、以下をあげる。

参加者の吉住千亜紀氏は、プラネタリウムを有する社会教育施設「あすたむらんど徳島」の職員であった。彼女は工作教室に参加した体験をまとめたポスターを製作した。また、ちょうど電波望遠鏡ALMA(アルマ)をテーマとした企画展示の期間であったため、ポスタ

ーと自作した1m電波望遠鏡を併せて、展示をおこなっている(図18・19参照)。

工作教室の参加した東京の高校3年生が、電波天文にさらなる興味を持ち、8m電波望遠鏡を用いた観測実習を行った。詳しくは、次章を参照。

工作教室にアシスタントとして参加した和歌山大学教育学部の4回生3人が、電波望遠鏡作りに興味を持ち、卒業研究のテーマとして電波天文に取り組んだ。これらの結果は、卒業論文にまとめられている(6章参照)。うち一人が、工作教室で用いたテキストを元に、工作教室に参加しなかった人でも1m望遠鏡が作れる「1m電波望遠鏡手引書」の作成を行った。

今後の課題である安価な受信機の開発を、近畿大学の太田泉氏とその学生との共同研究で進めている。



図18 あすたむらんど徳島 プラネタリウムにて

電波望遠鏡ALMAの企画展示の様子。左のパネルが工作教室のポスター。パネルの後ろに製作した1m電波望遠鏡が展示されている。



図19 あすたむらんど徳島 プラネタリウムにて電波望遠鏡ALMAの企画展示の様子。

## 5. 高校生による観測実習

電波望遠鏡プロジェクトの教育・一般普及のひとつとして、学生が本格的な装置を用いての観測を行い、電波天文に触れる機会を提供する、という事をあげた。我々が実際に行った、高校生を対象とした観測実習について報告する。

### 5.1 観測実習（兵庫・山口）

西はりま天文台の森本雅樹氏と時政典孝氏、また、山口大学の藤沢健太氏との協力の下に、兵庫県立大学附属高校と山口県の宇部高校の高校生を対象とした観測実習を行った(図20・21参照)。いずれも、天文台や大学とつながりのある高校で、生徒は科学部の部員である。観測計画は学生の手によって立てられ、それぞれ、銀河円盤と高銀緯分子雲を対象としたHI輝線観測を行った。

2007年9月、みさと8m電波望遠鏡を用いて観測実習を行った。観測データは、高校生の手によりデータ処理・解析が行われ、その結果を第10回日本天文学会ジュニアセッション（2008年3月25日開催）にて発表した。兵庫県立大学附属高校の学生は、銀河円盤からのHI輝線観測を行い、観測結果から、銀河系の回転速度を半径ごとに求め、「私たちの銀河を知るために～天の川銀河の回転速度の計測～」というタイトルで発表を行った。宇部高校の生徒は、高銀緯分子雲の観測を行い、「高銀緯分子雲複合体MBM53.54.55領域周辺のHI輝線観測」というタイトルで発表を行った。結果は、残念ながら検出には至らなかった。但し、この観測実習は、2008年度の改修工事が行われるより前に行っているため、また、あいにくの雨天のためデータの性質があまり良くなかった。

### 5.2 観測実習（東京）

4章で報告した「手作り電波望遠鏡工作教室」の参加者のうち、特に電波望遠鏡に興味を持っていた東京大学教育学部附属中等教育学校6年生の松村正隆氏に、8m電波望遠鏡を用いた観測実習の場を提供した。2008年4月、観測実習を行い、天の川に沿ってのHI輝線の観測データを得た。そして、その観測結果を用いて、銀河系の2次元地図を作成した。特に簡単化のため、スペクトルのピークを用い、強いHI放射点を2次元上にプロットする方法を選んだ。

松村氏が以前から取り組んでいる独自の電波望遠鏡作成の顛末を含め、1m電波望遠鏡工作教室の参加体験、そして8m電波望遠鏡での観測結果と、その解析結果の図の作成過程をまとめ、「電波で見る宇宙



図20 観測実習風景(兵庫・山口)

森本雅樹氏による観測前のレクチャー。



図21 観測実習風景(兵庫・山口)

8m電波望遠鏡観測小屋での観測風景

～電波望遠鏡の自作と運用～というタイトルで、高校の卒業研究として提出した。結果は、校内選考において優秀な取り組みと認められている。

## 6. 大学生の卒論研究

和歌山大学教育学部自然環境教育課程の2008年度4回生の3人が、卒業研究として電波天文に関わるテーマで論文を書いた。

また、これらの研究内容は、卒論研究会だけではなく、大学生本人によって宇宙カフェ（2009年2月16日開催）や、みさと天文台臨時天文教室（2009年2月15日開催）などの一般を対象としたイベントでの発表もおこなった。これは、天文の一般普及を目的とする資格制度「星のソムリエ」にて準案内人の資格を有する3人にとって、科学の知識の少ない聴衆に対する発表の

経験にもなる。

以下、それぞれの研究内容の詳細を記す。

### 6.1 「みさと 8 m電波望遠鏡の性能評価」

本稿3.1節で報告したみさと 8 m電波望遠鏡の基本性能の測定は、和歌山大学教育学部の富田研究室4回生の宮崎恵氏と協力の下に行われた。その観測結果のデータ解析と考察を卒業研究としてまとめた。詳細結果は、3章を参照したい。

測定解析した結果は、天文学者のコミュニティーである日本天文学会の2009年春季年会（2009年3月開催）や、第39回天文天体物理若手夏の学校（2009年7月28日）において発表を行っている。現在、大学院に進学し、電波天文学で修士論文を書くために、研究に励んでいる。

### 6.2 「1 m電波望遠鏡手引書の開発」

本稿4章で報告した 1 m電波望遠鏡の製作ノウハウをまとめ、工作教室の情報を様々な人と共有する事ができるように、「1 m電波望遠鏡製作の手引書」作成を行った。工作教室に参加しなかった人でも、1 m電

波望遠鏡を作れることを目指している。これは、富田研究室の4回生である比嘉貴子氏によってすすめられた。

この手引書は、理系の大学生や高校の先生が読んで理解、製作できるレベルを目指した。中学・高校でまったく技術の科目をとっていない学生にも理解できるように、絵や写真を多用し、基礎的な説明をふんだんに盛り込んである。例をあげると、図22のように、ネジやナットの説明が詳細に載っている。また、この 1 m電波望遠鏡の制作費は約一万五千元で、材料の殆どをホームセンターで入手できる。読者の便利のため、手引書には必要な材料や道具のリストも付いている。現在、この手引書を用いて、近畿大学の学生が試作を行っている。

### 6.3 「電波による銀河系地図作製」

本稿3.2節において、8 m電波望遠鏡で得られた観測データから、我々の銀河系2次元地図の作成を行った。このデータ解析のプロセスを詳細に解説し、50年前の天文学の最先端の研究を追体験できる手引書「電

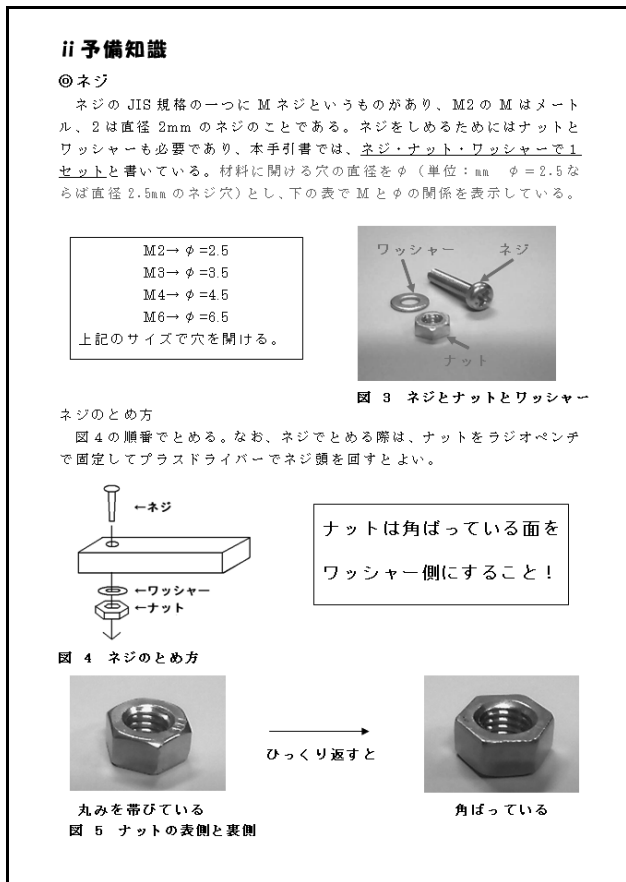


図22 「1 m電波望遠鏡製作のための手引書」から

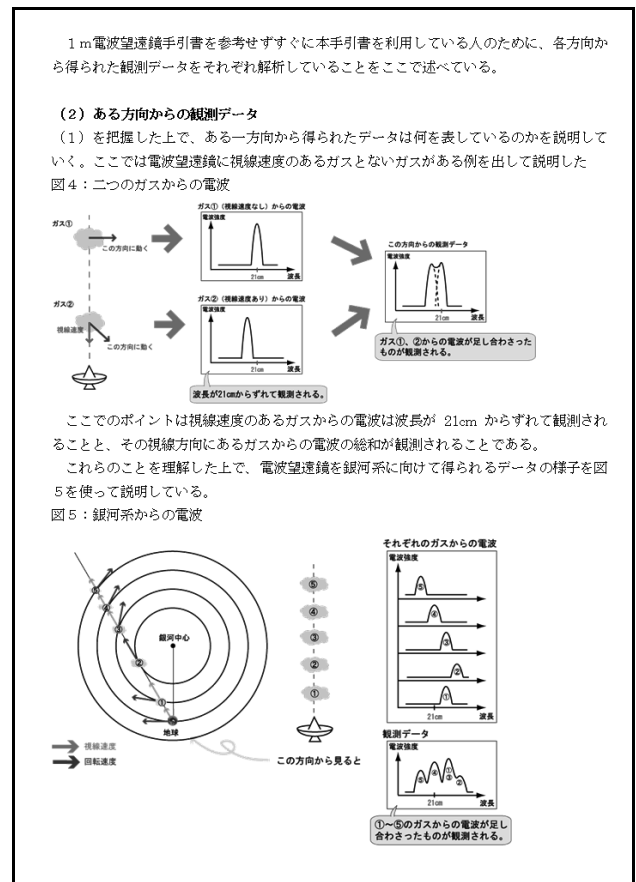


図23 「電波による銀河地図作製」から

波望遠鏡で銀河系地図を作ろう!!」の作成を行った。これは、富田研究室4回生の菊池かおり氏が作成した。

銀河系の2次元地図の作成の手順は、実際少々込み入った手続きを必要とする。しかし、使う数学・物理は高校生レベルで十分であり、この点をポイントに、手引書の作成を行った。内容は、基本的な天文知識の解説からはじまり、自ら描いたポンチ絵を多量に挿入し、噛み砕いた説明を目指した。手引書の1ページを図23に紹介する。また、HTMLの特性を生かし、上級者用の詳細な解説をリンクとして配置している。この手引書には、すぐに解析を始められるように、観測データのサンプルも紹介しているが、前節の1 m電波望遠鏡の製作と組み合わせれば、自前でデータ取得と解析が可能となる。

次のステップとして、この手引書を使った高校生・大学生の教育実践を行い、手引書の改良を進めていく必要がある。現在、次年度の4回生が1 m電波望遠鏡を用いたデータ取得とこの手引書を使ったデータ解析の研究に取り組んでいる。

## 7. SETI (セチ)

### 7.1 SETIとは

SETI(Search for Extra-Terrestrial intelligence, 地球外知的生命探査)は「セチ」と読み、電磁波を用いた地球外知的生命の探査を指す。用いる電磁波は、古典的には電波であるが、近年、可視光などによるSETIも行われてきている。

特に強く断っておくと、UFO(unidentified flying object, 未確認飛行物体)など、エイリアンクラフトの探査は目的では無い。宇宙に地球と同程度の通信技術を持つ知的文明が発達したと考え、その文明と、遠隔通信によりコンタクトをとる方法を模索し実行する試みである。

人類はじめてのSETI観測は、1960年アメリカで行われた。直径280mのアレンゴ望遠鏡を特定の星へ向けて、地球外知的生命からの信号が届いていないか調査が行われたのである。その後も、たくさんのSETI観測が行われた。近年では、太陽系外惑星系の研究の進展が目覚しく、系外惑星の発見が続々と続いている。最近のSETI観測では、そういった系外惑星をもつ恒星を対象とし、より詳細に行われている。

周波数1.4GHzの電波は、銀河系で最も強い電波輝線であるHI輝線を含み、知的生命が最もはじめに作るであろう電波望遠鏡で受信可能である。そのため、

1.4GHz帯は、SETI観測において最も有望と考えられる周波数のひとつである。8 m電波望遠鏡は、現在日本で、本格的な1.4GHz帯が観測可能なほぼ唯一の望遠鏡であり、SETI観測での成果が期待されている。

### 7.2 全国同時SETI観測実験

西はりま天文台の鳴沢真也氏が中心となって、日本全国のさまざまな望遠鏡で、一齐に目標の天体を観測するSETI観測を計画している。参加する望遠鏡には、さまざまな周波数を受信できる電波望遠鏡だけではなく、多数の光学望遠鏡も含まれる(図24参照)。現在、5つの電波望遠鏡と21の光学望遠鏡が参加を表明している。みさと8 m電波望遠鏡も参加予定である。

これまでに、多数の施設が同時にSETI観測を行った例はない。しかし、同時に同じ天体に対し、地表の異なる地点からSETI観測を行うことには、重要な意味がある。過去のSETI観測において、知的生命からの信号と疑われる電波の検出例が無い訳ではない。しかし、これらの結果は、人類や自然発生の可能性を否定するのが非常に難しい。そこで、同時SETI観測が提案される。電波と光で同時に同じ天体を観測することにより、主星のフレアなどの自然起因の現象との切り分けが可能となる。そして、もし地球上の十分離れた地点で同時に同じ周波数の信号が受信できたならば、人類起因の可能性を否定できる。つまり、疑わしい信号を受信したときの信憑性が高くなる。

本観測に先立ち、リハーサル観測を2009年3月29日に行った。リハーサルでの観測ターゲットはかに座55番星という地球から41光年離れた恒星である。この星には5つの惑星が確認されており、そのうち第4惑星に

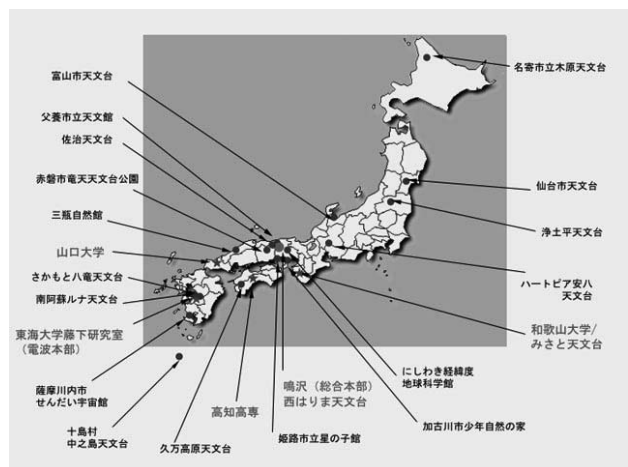


図24 全国同時SETI観測 参加施設一覧

現在、5電波望遠鏡と21光学望遠鏡が参加予定。(鳴沢氏HPより)

岩石からなる衛星が存在すれば、そこで生命の発生及び知的生命体への進化が起きる可能性が示唆されている。観測当日は、みさと天文台へ来台したお客さんを相手に、ミニ講演会を含むイベント形式で、SETI観測中の望遠鏡の観察をしてもらった(図25参照)。なお、8m電波望遠鏡によるリハーサル観測の結果をカラー口絵に示す。このデータ処理の結果、 $5\sigma$ 以上の有意な信号を検出しなかった。また、他の観測施設においても、信号を検出しなかった。

本観測は2009年11月11-13日に行う予定である。観測ターゲットは、過去に強い信号が検出された事のあるカシオペア座領域を予定している。なお、実際に地球外知的生命起源と思われる信号を受信した場合、IAA(国際宇宙航行アカデミー)が議決し、IAU(国際天文学連合)などでも採択された「地球外知的生命の発見後の活動に関する諸原則についての宣言」に従って行動する予定である。

SETI観測の詳細については、鳴沢氏の著作「望遠鏡でさがす宇宙人」(旬報社刊)に詳しい。みさと8m電波望遠鏡もSETI望遠鏡として紹介されている。

## 8. まとめ 今後の取り組み

前年度に引き続き、8m電波望遠鏡において銀河系からのHI輝線を観測するシステムの立ち上げを行っている。また、基本性能の測定観測から、8m電波望遠鏡の性能が明らかになってきた。

8m電波望遠鏡の基礎パラメータの取得の結果は、以下の通り。ビームサイズは $2.07^{+0.06}_{-0.08}$ [deg]、開口能率は $0.59^{+0.12}_{-0.06}$ 、典型的なシステム雑音温度は $182^{+43}_{-21}$ [K]であった。また、ポインティング精度は $1.37$ [deg]と大きく、今後の改善が望まれる。8m電波望遠鏡で得たHI観測データを元に、我々の銀河系の2次元地図の作成を行った。これにより、8m望遠鏡の観測結果から、銀河系が渦巻き銀河である証拠を得ることができた。これは、50年前の最先端の天文学の追体験である。また、観測装置の更新により、連続波での感度が上昇し、複数の連続波源の受信に成功した。

また、新しい電波天文学の教材である、1m電波望遠鏡の開発が一部完了した。「手作り電波望遠鏡工作教室」を開催し、電波望遠鏡の一般普及を図っている。

高校生を対象とした、8m電波望遠鏡を用いた観測実習を行った。対象となった高校生は、兵庫と山形の科学部の生徒と、望遠鏡工作教室の参加者の東京の高校生である。それぞれ、8m電波望遠鏡を用いて観測



図25 全国同時SETI観測 みさと天文台にて

当日来台のお客さんを対象にイベントを行った。屋外のベンチ上のモニターにデータ取得PCの画面を表示して話をしている。

を行い、その結果をまとめ、天文学会ジュニアセッションなどの場を利用し発表をしている。

和歌山大学教育学部の4回生の3人と電波望遠鏡を素材とした研究をおこなった。「みさと8m電波望遠鏡の性能評価」、「1m電波望遠鏡手引書の開発」、「電波による銀河系地図作製」の三つのタイトルで卒業論文としてまとめた。

最後に、広く一般市民を対象とした普及活動の新たな切り口として、SETI観測をはじめた。8m電波望遠鏡の観測周波数は、日本のSETI観測において重要な位置を占める。この11月には、全国同時SETI観測の参加を計画している。

以上の結果について、国内外のさまざまな研究会で発表した。

今後の取組みとして、以下の点を上げる。

引き続き8m電波望遠鏡の維持整備を続ける。ポインティング精度の向上と2次元ビームパターンの取得が急務である。科学観測においては、長時間望遠鏡時間を占有できる大学望遠鏡の強みを生かし、もっと細かい間隔での銀河地図作製や、広帯域での全天HI輝線サーベイ観測、電波銀河の強度モニターなどを行っていきたい。また、今後大量の観測データが取得される事が容易に想像できるため、観測データを効率的に解析するためのソフトの開発も望まれる。

1m電波望遠鏡は、パラボラ部が完成し、次に安価な受信部の開発を目指し研究を行っている。この研究は、近畿大学の太田研究室と共同で行っている。

2008年度に引き続き、2009年度4回生2人も電波望遠

鏡に興味を持ち、研究を始めている。また、大学院に進学した宮崎氏も研究や発表の活動を進めている。

2008年度から始まった、新たな試みであるSETI観測も続けていきたい。目下の目標は、2009年11月に全国同時SETI観測の本番観測である。

また、電波は可視光にくらべ、視覚に訴える力が劣るが、観光学部に新設されたデジタルプラネタリウムを用いれば、それを補うことが可能である。例えば、8m電波望遠鏡で全天サーベイを行い、その観測データをプラネタリウムに投影すれば、可視光で見た星空と電波でみた空のイメージを比較でき、実際には肉眼で感知できない電波の広がりや疑似体験できるはずである。これも新たな電波天文の入口としたい。

最後に、電波望遠鏡立ち上げノウハウの蓄積は、バルーンサットなどの遠隔通信において有用である。実際、2009年7月22日の皆既日食の日に、鹿児島で放球したバルーンサットからの映像伝送において、8mの試験機であった2m電波望遠鏡が重要な役割を果たした。また、現在、このノウハウを生かし、深宇宙探査衛星と通信するための受信局製作のために予算獲得すべく、外部競争的資金への申請中である。

本研究の以上の結果は、以下の国内および国際研究会(査読無し)において成果の発表をした。

○ N. Sato, M. Okyudo, A. Tomita, W. Ishizuka, M. Soga, and 14 peoples "Development of a Galaxy HI observation system for the 8m radio telescope at Misato Observatory", Global Hands-On Universe Conference 2007, (2007. 7)

○ N. Sato, M. Okyudo, A. Tomita, S. Toyomasu, "Educational activities for radio astronomy using the Misato 8m radio telescope in Wakayama", 7th East Asian Meeting on Astronomy, Session VI, (2007. 10).

○ 佐藤奈穂子、尾久土正己、富田晃彦、石塚互、曾我真人、矢動丸泰、豊増伸治、小澤友彦、下代博之：SETI研究会(第16回 西はりま天文台ワークショップ)「みさと8m電波望遠鏡を用いたSETI観測の可能性」2007. 11.

○ 尾久土正己、佐藤奈穂子、藤垣元治、富田晃彦、藤沢健太、下代博之、小澤友彦、吉住千亜紀：「市民を対象にした電波望遠鏡工作教室」日本天文学会2008年春季年会, 2008. 3.

○ N. Sato, M. Okyudo, A. Tomita, W. Ishizuka, M.

Soga, and 14 people, "Development of a Galaxy HI observation system for the 8m radio telescope at Misato Observatory II", Global Hands-On Universe Conference 2008, Meeting, (2008. 7)

○ 佐藤奈穂子、尾久土正己、富田晃彦、石塚互、曾我真人、藤垣元治、矢動丸泰、豊増伸治、小澤友彦、下代博之：「みさと8m電波望遠鏡」日本天文学会2008年秋季年会, 2008. 9.

○ 佐藤奈穂子、宮崎恵、比嘉貴子、菊池かおり：「和歌山大学における電波望遠鏡 成果報告」第2回宇宙カフェ(共同研究成果報告会&宇宙プロジェクト発表会/115回わかてん会合/第2回 NewEar研究会), 2009. 2.

○ 佐藤奈穂子、菊池かおり、比嘉貴子、宮崎恵、富田晃彦、尾久土正己、小澤友彦：「手作1m電波望遠鏡製作とデータ解析の手引書」日本天文学会2009年春季年会, 2009. 3.

○ 宮崎恵、富田晃彦、佐藤奈穂子、尾久土正己、下代博之、矢動丸泰、豊増伸治、小澤友彦、和歌山大学宇宙教育研究ネットワーク(New Ear)：「みさと8m電波望遠鏡性能評価」日本天文学会2009年春季年会, 2009. 3.

○ 宮崎恵、富田晃彦、佐藤奈穂子、尾久土正己、下代博之、矢動丸泰、豊増伸治、小澤友彦、和歌山大学宇宙教育研究ネットワーク(New Ear)：「みさと8m電波望遠鏡性能評価」, 2009年度 第39回天文天体物理若手夏の学校, 2009. 7.

また、以下の学術雑誌や収録等に掲載している。

◎ 尾久土正己、佐藤奈穂子、富田晃彦、石塚互、曾我真人、矢動丸泰、豊増伸治、小澤友彦、佐藤文隆：「8m電波望遠鏡の改修と波長21cm電波輝線による銀河系の中性水素(HI)の観測」和歌山大学オンライン創成プロジェクト報告書2007

◎ 尾久土正己、佐藤奈穂子、藤沢健太、富田晃彦、石塚互、佐藤敏行、塩川貴之、近多健輔、雪谷俊之、半田利弘：「中性水素21cm輝線用の小型電波望遠鏡の製作と高校での天の川の観測実習」, 地学教育, Vol. 60, No. 5, pp. 171 - 178, 2007. 9. (査読あり)

◎ N. Sato, M. Okyudo, A. Tomita, W. Ishizuka, M. Soga, T. Yadomaru, S. Toyomasu, T. Ozawa, F. Sato, H. Geshiro, Y. Ichikawa, K. Yaji, T. Handa, T. Ebisuzaki, K. Fujisawa, Y. Sofue, H. Nakanishi, S. Sakamoto and H. Agata, "Development of a Galaxy HI



observation system for the 8m radio telescope at Misato Observatory”, Proc. of Global Hands-On Universe Conference 2007 (eds., T. Handa and M. Okyudo), 89 - 93, 2008. 7. (査読なし)

◎ 佐藤奈穂子、尾久土正己、富田晃彦、石塚互、曾我真人、矢動丸泰、豊増伸治、小澤友彦、下代博之：「みさと 8 m電波望遠鏡を用いたSETI観測の可能性」, 第16回西はりま天文台ワークショップ「SETI研究会」収録、p70, 2008. 3. (査読なし)

本研究から派生した、高校生や大学生による研究発表や研究論文を以下に示す。

- 第10回日本天文学会ジュニアセッション：國安他、「高銀緯分子雲複合体MBM53. 54. 55領域周辺のHI輝線観測」セッション9, 40 (2008. 3)
- 第10回日本天文学会ジュニアセッション：川口 & 中根、「私たちの銀河を知るために～天の川銀河の回転速度の計測～」セッション10, 43 (2008. 3)
- みさと天文台臨時天文教室：宮崎恵、比嘉貴子、菊池かおり「和歌山大学生による研究紹介」, 2009. 2.
- 2008年度和歌山大学教育学部 地学教室卒業研究発表会及び卒業論文：宮崎恵「みさと 8 m電波望遠鏡の性能評価」, 2009. 2.
- 2008年度和歌山大学教育学部 地学教室卒業研究発表会及び卒業論文：比嘉貴子「1 m電波望遠鏡手引書の開発」, 2009. 2.
- 2008年度和歌山大学教育学部 地学教室卒業研究発表会及び卒業論文：菊池かおり「電波による銀河系地図作製」, 2009. 2.
- 東京大学教育学部附属中等教育学校 58回生 卒業研究：松村正隆「電波で見る宇宙 ～電波望遠鏡の自作と運用～」, 2009. 3.

## 謝辞

本研究は、和歌山大学のオンリーワン創成プロジェクト経費（平成17-18年度、尾久土 他）、国立天文台大学支援経費（平成17年度、富田 他）、科学研究費補助金 基盤C（平成17-18年度、石塚 他）、和歌山大学教育研究資金（平成18年度、尾久土 他）、国立天文台受託研究費（平成18年度、佐藤 他）、和歌山大学のオンリーワン創成プロジェクト経費（平成19-20年度、尾久土 他）、JST地域科学技術理解増進活動推進事業 機関活動支援（平成19年度、尾久土 他）の支援を受けて行われた。

最後に、さまざまな望遠鏡の整備に助言と協力を頂いた下代組機工、高性能LNAを特注で製作して頂いた川越無線、高校生の観測実習でお世話になった森本、時政、藤沢三氏、8 m電波望遠鏡をSETI観測の世界へと導いてくれた鳴沢氏に、大きな感謝の意を表す。特に、藤沢氏には、8 m電波望遠鏡立ち上げ当初から多くの助言を頂き、並々ならぬお世話になっている。また、研究協力で、1年間ともに電波天文学のゼミや研究に取り組み、卒業論文をまとめ上げた富田研究室の4回生の宮崎、比嘉、菊池三氏には、慰労と謝意を表す。

## 参考文献

- [1] J. H. Oort, F. J. Kerr, and G. Westerhout: The galactic system as a spiral nebula, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **118**, 379 - 389 (1958).
- [2] K. Kai, M. Sawa, Y. Shiomi, S. Aiba, H. Sekiguchi, N. Shibuya, T. Kosugi and, H. Nakajima: Nobeyama Radiospectrographs for Solar Observations, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, **32**, 371 - 376 (1980).
- [3] M. L. Kutner and, B. L. Ulich: Recommendations for calibration of millimeter-wavelength spectral line data, *Astrophysical Journal*, **250**, 341 - 348 (1981).
- [4] Gart Westerhout: A survey of the continuous radiation from the Galactic System at a frequency of 1390 MHz, *Bulletin of the Astronomical Institutes of the Netherlands*, vol. **14**, p215 - 261 (1958)
- [5] 尾久土正己, 佐藤奈穂子, 藤沢健太, 富田晃彦, 石塚互, 佐藤敏行, 塩川貴之, 近多健輔, 雪谷俊之, 半田利弘: 中性水素電波輝線(HI)用の小型電波望遠鏡の製作と高校での天の川の観測実習, *地学教育*, Vol. **60**, No. **5**, pp. 171 - 178, (2007. 9).
- [6] H. Nakanishi and Y. Sofue: Three-Dimensional Distribution of the ISM in the Milky Way Galaxy: I. The H I Disk, *Publ. Astron. Soc. Japan*, **55**, 191- 202 (2003)
- [7] H. Nakanishi: Observational Study in Atomic and Molecular Gas Disks of Milky Way Galaxy and Nearby Cluster Galaxy, The University of Tokyo, doctor thesis (2005)



## 添付 A

### 電波天文学とHI輝線

電波天文学は 1931 年にジャンスキー (K. G. Jansky) がメートル波の太陽系外 (天の川) 電波を発見したのが始まりである。銀河系内にある星間物質は、電離した水素 (HII エイチツー)があれば、その発する強い可視光の輝線スペクトルによって観測が可能であるが、電離していない水素原子 (HI)は、観測できないと考えられていた。しかし、HII は可視光のため、星間物質の吸収の影響を受けやすく、天の川の方向には遠くまで観測することができない。ところが、1944 年、ファン・デ・フルスト (H. C. van de Hulst) は、水素の電子のスピンの方向が遷移することで、水素原子から波長 21cm の電波輝線が放射されることを理論的に発見した。もし、この電波が観測できれば、星間吸収の影響をほとんど受けずに、銀河系の奥深くまで観測することが可能になると考えられた。1951 年、ハーバード、ライデン、シドニーなど多くの天文台でほぼ同時に、銀河系からの 21cm 輝線の観測に成功した。これ以降、銀河を観測する標準の道具として、波長 21cm の電波望遠鏡が活躍している。

### HI輝線と回転曲線

HI (中性水素) の出す 21cm 輝線は、レーザー光線のように決まった周波数で放射される。しかし、放射をする水素原子が観測者に対して運動をしていると、その運動の速度に応じて観測される周波数が微妙に変化する (ドップラー効果)。電波の観測機器は高い周波数分解能を持つので、水素原子の詳しい運動の様子を調べることができる。まず、この HI の観測により、我々の銀河系の回転曲線を測定できる。回転曲線とは、横軸に銀河中心からの半径をとり、縦軸に各半径に対応する回転速度をプロットした曲線である。(図 A1 参照)。我々の銀河は、ドラ焼きに似た、平べったい楕円体をしており、その中の星や HI ガスは、この回転曲線に沿って回転運動をしている。この回転曲線は、我々の銀河系における質量の分布と密接に関係している。

### 銀河系の2次元地図

銀河系の物質が一様に、上記の回転曲線に従って純粋な円運動をしていると仮定すると、銀河系内の HI 分布図を描くことができる。円盤上の各点の、地球に対

する相対速度 (図 A-2) を用いると、観測されたスペクトルの速度情報を円盤上の位置情報へと焼き直す事ができる。(但し、地球半径よりも小さい半径では、解が一意に決まらないため、他の要素による解析が必要となる。) 観測される HI 輝線の強度が強い場所は、水素原子が多く存在し、銀河系の渦巻腕に対応すると考えられる。これによりオールドは、はじめて観測的データから、真横からしか観測できない我々の銀河の真上から見た 2次元地図を描くことができた。この結果、我々の銀河系は、渦巻き腕が存在する、渦巻銀河であることがわかった。現在は、さらなる詳細な観測・解析が進んでおり、図 A-3 のような銀河系の姿が描かれている。

### 日本のHI観測望遠鏡

欧米では多くの電波望遠鏡が HI 観測で活躍している。一方わが国では、より波長の短い電波での観測で特徴を出し、本格的な HI 観測は行われてこなかった。本望遠鏡の完成により、国内での継続的な HI 観測が可能になる。さらに、HI 観測が銀河の渦巻き構造を明らかにしたという歴史的観測を大学生や高校生が追体験することなどで、天文教育に新しい生きた教材を提供することができると考える。

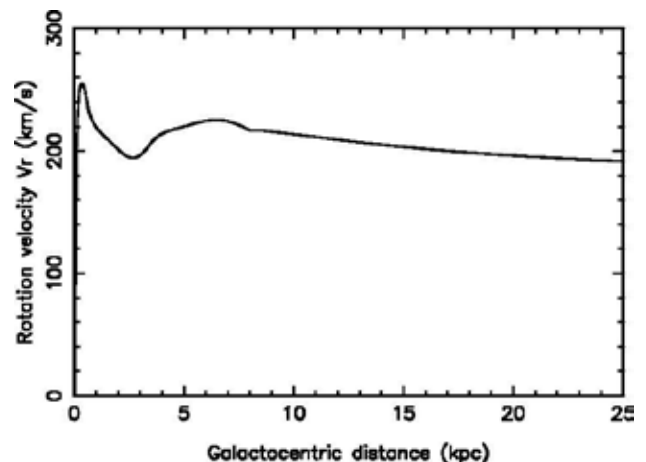


図 A-1: 我々の銀河系の回転曲線。

横軸が銀河中心からの半径を表し、縦軸が各半径における回転速度を表す。半径が大きくなっても、回転速度が一定値を保つ特徴を示す (微分回転)。これは、銀河に含まれる物質が広範囲に広がって分布している事を表している。(参考文献[6]より)

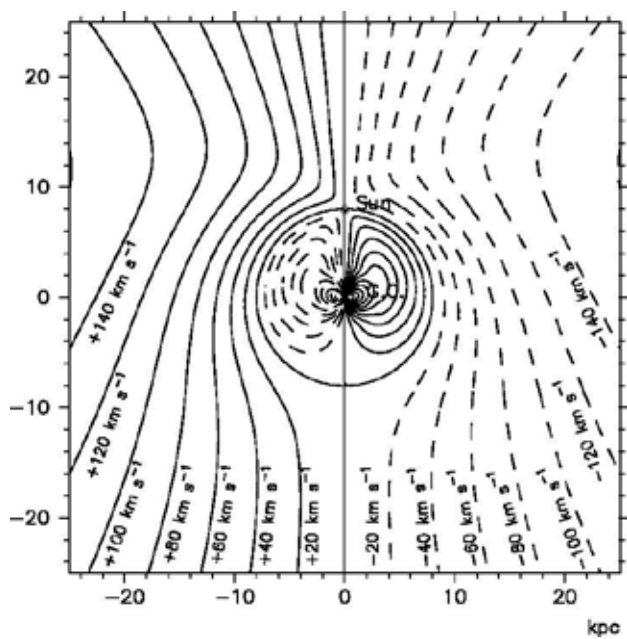


図 A-2 : 地球から観測される銀河系各点における相対速度の地図。(参考文献[6]より)

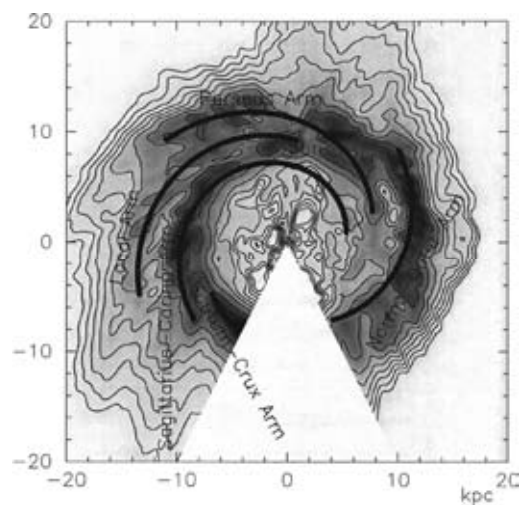


図 A-3 : 最新の研究で明らかになっている銀河系のHI分布図。(参考文献[7]より)