

自然科学研究機構

 国立天文台
NAOJ

国立天文台ニュース

National Astronomical Observatory of Japan

2019年11月1日 No.316

特集 野辺山観測所の50年



- I 野辺山で太陽電波の観測を始めて50年 / II 野辺山宇宙電波観測所の歴史と成果 / III 電波干渉計の仕組みを知ろう—後編—
- ・「Nobeyama Science Workshop 令和元年」開催報告
- ・「電波天文観測実習」報告
- ・野辺山でのアウトリーチ活動
- ★ ミニアルバム：野辺山太陽電波干渉計
- 付録：2020年国立天文台カレンダー 野辺山宇宙電波観測所 / 野辺山宇宙電波観測所スペシャル・ポスター / 電波天文まんが「アルマーの冒険」09回「パラボラアンテナを作って太陽の電波観測」



11

2019

- 表紙
- 国立天文台カレンダー

03

特集

野辺山観測所の50年

I 野辺山で太陽電波の観測を始めて50年

中島 弘 (元野辺山太陽電波観測所)

II 野辺山宇宙電波観測所の歴史と成果

立松健一 (野辺山宇宙電波観測所長)

トピックス

- Nobeyama Science Workshop 令和元年 開催報告
竹川俊也 (野辺山宇宙電波観測所)
- 「電波天文観測実習」報告
梅本智文 (野辺山宇宙電波観測所)
- 野辺山でのアウトリーチ活動
衣笠健三 (野辺山宇宙電波観測所)

★ミニアルバム：懐かしの野辺山太陽電波干渉計

III 電波干渉計の仕組みを知ろう—後編—

川村 晶 (星の手帖社) / 監修：永井 洋・平松正顕 (アルマプロジェクト)
/ 協力：黒木修隆 (神戸大学大学院)

14

18

26

おしらせ

- 2020年国立天文台カレンダーができました (テーマは野辺山宇宙電波観測所)
- KAGRA完成記念式典・重力波望遠鏡3者による研究協定を締結

別冊★電波天文まんが「アルマーの冒険」09回
「パラボラアンテナを作って太陽の電波観測」

27

編集後記／次号予告

28

連載「国立天文台・望遠鏡のある風景」20

野辺山宇宙電波観測所「虹の向こうに」

撮影：野辺山宇宙電波観測所



表紙画像

北天の星空の時の移ろいを背景に野辺山観測所の45メートルミリ波電波望遠鏡 (左奥) と電波ヘリオグラフ (手前のたくさんのパラボラアンテナ)。撮影：長山省吾 (天文情報センター)

背景星図 (千葉県立郷土博物館)

渦巻銀河M81画像 (すばる望遠鏡)

★付録1

野辺山宇宙電波観測所スペシャル・ポスターを同封します！

今月号の特集「野辺山観測所の50年」のスペシャル・ポスターをお届けします (※台外発送のみ)。



★付録2

さらに「2020年国立天文台カレンダー 野辺山宇宙電波観測所」も同封！くわしくは26ページをご覧ください。

国立天文台カレンダー

2019年10月

- 2日 (水) 幹事会議
- 5日 (土) 4D2Uシアター公開 (三鷹)
- 10日 (木) 防災訓練 / 科学戦略委員会
- 11日 (金) 4D2Uシアター公開&観望会 (三鷹)
- 12日 (土) 4D2Uシアター公開 (三鷹)
- 16日 (水) 総研大専攻長会議
- 18日 (金) 幹事会議
- 19日 (土) 4D2Uシアター公開 (三鷹)
- 23日 (水) プロジェクト会議
- 25日 (金) 三鷹・星と宇宙の日
- 26日 (土) 三鷹・星と宇宙の日

2019年11月

- 2日 (土) 4D2Uシアター公開 (三鷹)
- 6日 (水) 運営会議
- 8日 (金) 幹事会議 / 4D2Uシアター公開&観望会 (三鷹)
- 9日 (土) 4D2Uシアター公開 (三鷹)
- 16日 (土) 4D2Uシアター公開 (三鷹)
- 20日 (水) 総研大専攻長会議
- 22日 (金) 幹事会議
- 23日 (土) 観望会 (三鷹)
- 27日 (水) プロジェクト会議
- 28日 (木) 安全衛生委員会

2019年12月

- 6日 (金) 幹事会議
- 7日 (土) 4D2Uシアター公開 (三鷹)
- 13日 (金) 4D2Uシアター公開&観望会 (三鷹)
- 14日 (土) 4D2Uシアター公開 (三鷹)
- 18日 (水) 総研大専攻長会議
- 20日 (金) 幹事会議
- 21日 (土) 4D2Uシアター公開 (三鷹)
- 25日 (水) プロジェクト会議
- 28日 (土) 観望会 (三鷹)

特集

野辺山観測所の50年

第I部・野辺山で太陽電波の観測を始めて50年

第II部・野辺山宇宙電波観測所の歴史と成果

第III部・電波干渉計の仕組みを知ろう―後編―

日本の電波天文学を長きにわたって牽引してきた野辺山観測所。その歴史は、1969年10月の東京天文台野辺山太陽電波観測所の開所に遡ります。この特集では、その半世紀に及ぶ野辺山における太陽電波・宇宙電波の観測の歴史を振り返ってみましょう。あわせて、2019年9月号の前編に続いて「電波干渉計の仕組みを知ろう―後編―」もお届けします。

協力
野辺山宇宙電波観測所

I 野辺山で太陽電波の観測を始めて50年

今から半世紀前、野辺山の地で最初に産声を上げたのは太陽電波天文学でした。その歴史を紐解きます。

★p14-15にミニアルバムがあります。

図01 160 MHz干渉計（赤い大型のアンテナ群）と17 GHz相関型干渉計（手前に並ぶ銀色のアンテナ群）

中島 弘

（元野辺山太陽電波観測所）



第2次大戦後の1949年、東大東京天文台（メートル波とデシメートル波帯）と名大空電研究所（マイクロ波）で太陽電波天文学が始められた。アメリカ、フランス、オーストラリアと並んで世界第一線の観測的および理論的研究が行われた。1965年の夏、東京天文台における電波天文学将来計画が検討され、①宇宙の電波観測を始めること、②電波写真が撮れるような大型のメートル波帯の太陽電波干渉計を建設することがきまった。当時三鷹で太陽を観測していた各種の太陽電波望遠鏡は、テレビ・FM放送や様々な工場から発する雑多な電波（都市電波雑音）のため、太陽からの弱い電波は受かりにくくなっていた。東京から比較的近いところで電波雑音の少ない広い場所を捜したが、長野県南牧村野辺山以外では結局見つからず、信州大学農学部と野辺山地区にお願いして、160 MHz干渉計は野辺山に建設することになった。160 MHz干渉計がほぼ出来上がりつつあった1969年、野辺山太陽電波観測所が開設された。その後、野辺山では各種の太陽電波望遠鏡が建設された。1970年には最初の160 MHz干渉計が完成し、その後、70～600 MHz帯の動スペクトル計、17 GHz \times 12素子干渉計、17 GHz相関型干渉計、17、35、80 GHzの太陽活動モニター望遠鏡が建設された。1988年に東京天文台は大学共同利用機関としての国立天文台に改組され、その際野辺山と名大空電研究所の太陽電波グループは野辺山太陽電波観測所に統合された。両グループの技術的蓄積を生かし、世界第一級の電波ヘリオグラフ（1992年17 GHz部分が完成、1995年17と34 GHzによる2周波化が完成）が建設された。本文では、主として、それらの建設がどのような考えで進められどんな問題があったかを中心に記してみたい。

●01 160 MHz干渉計の建設と高精度化のための改修

160 MHz干渉計は、東西系一次元複合干渉計（全長2300 m、分解能2分角）及び南北系一次元複合干渉計（全長1600 m、分解能5分角）による東西・南北独立一次元干渉計である（図01・図02）。当時としては、世界でもトップクラスの太陽電波観測用の電波干渉計であった。

私が関口英昭さんとともに野辺山太陽電波観測所に赴任

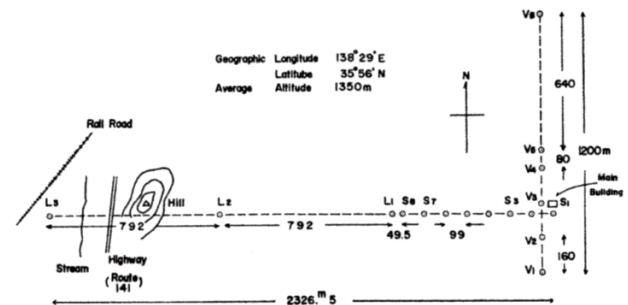


図02 160 MHz干渉計のアンテナ配列 (T. Takakura, A. Tsuchiya, M. Morimoto and K. Kai, Proc. ASA 1 (2), Nov. 1967のFigure 1より転載)

したのが1970年8月、160 MHz干渉計の立ち上げの真最中で、野辺山在住の甲斐敬造さんはもちろん三鷹の太陽電波部からは理論の内田豊さんまでが立ち上げに参加しておられて、驚いた。同時に、160 MHz干渉計を設計し建設を主導した土屋淳さんが既に天文台の他のグループに移られておられたことを知って、さらに驚いた。

一つ問題点があった。日本とほぼ同じ経度をもつオーストラリアに96個のアンテナを円形（直径3 km）に並べた二次元電波干渉計（当初の周波数80 MHz）が1967年に完成し、どんどんデータを出していた。観測周波数が違うとはいえ東西・南北独立の一次元装置と本格的な二次元装置の違いは明らかなので、甲斐さんをはじめ東京天文台の太陽電波グループは大きな圧力を感じていたはずである。私自身も、新しい電波望遠鏡を作る時には、同じ分野の世界の研究の中でその装置がどういう特徴を持った装置（世界一の特徴）なのかを明確に定義すること、そのための技術的ノウハウを蓄積すること、の重要性を痛感した。

1970年秋には160 MHz干渉計の立ち上げは終了し、太陽の定常観測が始まり、観測にもとづいた研究結果も出始めた。干渉計の太陽観測や保守を三鷹の太陽電波部と野辺山グループの共同で進める中で、干渉計の問題点も浮かび上がってきた。①アンテナ直下に置かれた真空管受信機の不安定さ、②局発信号を観測室からアンテナへ送る回路が位相的に不安定で、受信信号の位相が気温の変化で変わってしまうこと、③強い宇宙電波源を使って行うアンテナごとの位相較正も大変

な作業で、簡略化が課題、④観測結果を出すための出力装置が不十分、といった諸点である。

その後、デジタルデータ処理システムの開発や干渉計の利得・位相の較正を実時間でやるシステムの開発などは、平林久さんを中心にして進められ、観測およびデータ解析の能率化が進んだ。1978年から83年にかけて、160 MHz干渉計の半導体化、位相と利得の安定化、多相関器システム化、ミニコンピュータによる画像合成用のソフトウェアの開発を進め、さらに実時間モニター用の複素高速フーリエ変換器の製作などを行った。これにより、160 MHz干渉計は、非常に安定的に連日の観測が継続できるようになった。

●02 メートル波帯～デシメートル波帯の高感度スペクトル計

70～600 MHzの動スペクトル計は、70～220 MHz帯マルチチャンネルスペクトル計と200～600 MHz帯音響光学型スペクトル計に分けて製作された。前者は1976年から、後者は1977年から太陽の定常観測を始めた (図03)。

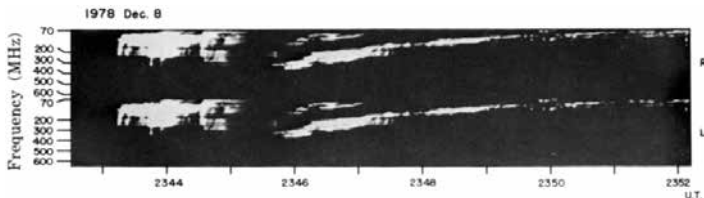


図03 70～600 MHz動スペクトル計による観測例 (Kai, K., et al., 1980, Publ. Astron. Soc. Japan, 32, 371のFig. 3の上から2番目の図より転載)

デシメートルからメートル波帯の電波スペクトル計は、太陽コロナ中での電波強度の周波数分布およびその時間変動を測定する装置であり、太陽コロナ中での高エネルギー電子や擾乱の発生と伝播を調べる上で極めて重要な役割を果たす。一般に太陽で発生するデシメートル～メートル波帯の電波では、高い周波数の電波はコロナの底の方で、低い周波数の電波はコロナのより外側の場所で生成されるので、電波スペクトルの観測から擾乱の深さ方向の情報をある程度得ることができる。従って、160 MHz干渉計と70～600 MHz動スペクトル計との同時観測を行えば、太陽コロナ中の電波擾乱の動きをほぼ三次元的に追跡することができる。

人工雑音レベルが低い野辺山においても、メートル波帯にはTV、FM等の強い通信電波が混入する。従って、70～220 MHz動スペクトル計では、狭帯域に分波した後に混信のないチャンネルを探して増幅するマルチ・チャンネル方式を採用した。一方、200～600 MHzの周波数帯では、低い周波数に見られるような強烈な混信が少ないので、電気信号を超音波に変換して超音波分光を行う音響光学型 (A-O) の電波スペクトル計の可能性を探ることになった。

甲斐さんは、1972年にオーストラリアに再度出張した折、電波スペクトル計を手掛けていたCole博士に会い、日本でもA-O方式の電波スペクトル計をつくれる可能性を考えた。日本に帰った後、1974年に超音波素子についての基礎実験を始めた。幸いA-Oの試作・応用に携わっていた松下技研の速水、福永両氏の協力を得て、動スペクトル計としての実用

化の見通しをえた。その上、松下技研で試作中の中心周波数300 MHz、帯域幅200 MHzの超音波変調素子を特別注文で分けていただくことができた。これを使って1976年には、200～600 MHz帯動スペクトル計が完成し、期待通りの高分解能スペクトルを記録した。

●03 17 GHz 12素子干渉計 (東西一次元)

太陽活動国際観測年の計画として、1969年に17 GHz (波長1.76 cm) の多素子干渉計 (東西一次元) の予算が認められ、アンテナ12台の製作が行われた。当時土屋さんが考えたアンテナ配列は、8×4の複合干渉計 (8個は基本間隔でならべ、残りの4個は8個分の長さだけ離して並べる。分解能～40秒角) であった。角分解能はかなり高いので、実現すれば世界的にも評価の高い太陽電波干渉計となる。問題は、間隔の広い4個のアンテナの位相合わせができるのか、が疑問であった。名大空電研究所の田中春夫先生に相談し大木健一郎さんと出した結論は、今の我々の力では間隔の広い4個のアンテナの位相合わせは困難である、ということだった。

以上の結果、最初の17 GHz太陽電波干渉計 (東西一次元) としては、旧来型のシステムと同じ、アンテナ12個を基本間隔 (1700 m) で1列に並べることに決定した。各アンテナからの出力信号は等長になるように導波管を使って足し合わせ、最後の出力に受信機をつけて完成した (図04)。1971年秋から太陽の連続観測を始めた。

この方式の電波干渉計では、1枚の太陽像を出力するために150秒程かかるので、時間変化の激しい太陽フレア (爆発現象) は受からない。感度はかなり良いので、変化のゆっくりした活動領域の特定に活躍した。また、アンテナの間隔によって、太陽からの電波強度がどのように変わるかを直接知ることができた。これが次の相関型干渉計への拡張で大きく役だった。



図04 手前が12素子干渉計。

●04 17 GHz 相関型干渉計 (東西一次元)

1970年代中程から太陽フレアをより高い分解能で観測しようとする学問的要請は高まっていた。活動域内のどの領域からいかなる特徴をもつ電波が発生するか、それが時間的にどう推移するかという空間的、時間的にマイクロな構造を調べる段階にきていた。日本や米国ではX線やガンマ線を観測する人工衛星の打ち上げも計画されていた。

そこで、相関型干渉計は、東西一次元の干渉計 (4つのアンテナを基本間隔で並べ、10個のアンテナは基本間隔の4倍で並べる) ではあるが、高い空間分解能 (48秒角) と時間分

解能 (0.8秒) を持つ装置として設計された。技術的には多くの解決すべき課題があった。主な設計仕様と課題は以下のとおりである。

①NHK技術研究所の小西氏と電々公社武蔵野通研の平山氏に指導をしていただき、低雑音ミキサーを開発する。②位相と遅延補正器などの開発。③弱い信号から1000倍も強い信号にも対応できるアナログ相関器を開発し、計算機を使ってフーリエ逆変換により像合成する。④太陽がどんな構造をしているか、同じ間隔のアンテナ対からの相関器出力は同じはず、という原理を使って、太陽の観測中に時々刻々各アンテナの位相と利得を校正する (実時間自己較正法)。この方法では観測した太陽像の位置が決まらないので、画像合成後の太陽像のリムを使って太陽の中心を決める。⑤太陽活動を監視し、同時に装置の健康診断をするために、観測時間中に実時間で太陽画像を出力する (図05)。⑥オフラインの像合成には天文台の計算機を、オンラインでの画像合成や必要な機器の制御などにはミニコンピュータを使用する。

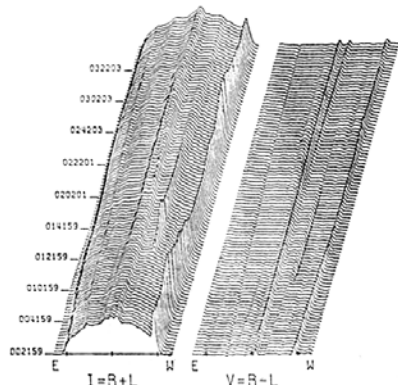


図05 17 GHz 相関型干渉計の実時間モニター出力による観測例。2分に1枚のマップで構成しており、活発な太陽活動の観測例である (東京天文台太陽電波グループ 昭和55年 (1980年)、台報第19巻、第一冊 (第72号) の図IX-1より転載)。

17 GHz 相関型干渉計の建設は、太陽電波グループ全員で分担し、ほとんど自作に近い形で行い、4年の歳月をかけて1978年8月に完成した (p04・図01)。なお、1981年7月には既存の相関型干渉計に1台のアンテナを追加して、空間分解能を24秒角に向上させた。以上のように17 GHz 相関型干渉計の建設に皆で取り組んで得られた技術的蓄積が、次の電波ヘリオグラフの製作・保守の力になった。

1980~81年の太陽活動極大期をめざして、宇宙研とNASAからそれぞれ二次元硬X線望遠鏡、X線とガンマ線スペクトル観測装置を載せた衛星が打ち上げられた。17 GHz 相関型干渉計は数多くのフレアを観測し、電波観測だけでも、あるいは宇宙研とNASAの衛星のデータと比較して、新しい成果が次々とも出るようになった。例えば、フレアの前兆現象、フレアの種類、電波フレアと硬X線・ガンマ線フレアの時間発展の比較、活動領域間で同時に起こるフレア、等々である。

●05 17、35、80 GHzの太陽活動モニター用望遠鏡

太陽フレアからの電波スペクトルは、通常、10 GHz 付近に極大があり、それ以上の周波数では光学的に薄くなる。その結果、17、35、80 GHzの周波数スペクトルからは、太陽フレアで生成された高エネルギー電子のスペクトルの情報を得ることができる。このようなデータは、17 GHz 多相関器型干渉計から得られた情報を解析する上でも極めて重要なデータとなる。



図06 1、2、3.75、9.4、17、35、80 GHzの太陽活動モニター用望遠鏡群の写真。手前の3つ並んだパラボラアンテナの真ん中が35 GHzで両側が80 GHz。以後、17、9.4、3.75、2、1 GHzの各アンテナが並ぶ。

三鷹に置かれた17 GHz強度偏波計は、1964年より連続観測を行ってきたが、老朽化がはげしくなったため、観測の自動化を目標に全面的に作り直し、野辺山で1978年1月より観測を開始した。ミリ波帯の35 GHz強度偏波計と80 GHz強度計は、それぞれ1983年5月と1984年2月から連続観測を続けている。なお、名大豊川観測所で太陽活動をモニターしてきた1、2、3.75、9.4 GHz強度偏波計群は1993年度末に野辺山に移設され、1994年から、17、35、80 GHzの望遠鏡群とともに定常観測をはじめた (図06)。

ミリ波帯では周波数が高くなるにつれ、静かな太陽が放射する定常電波のフラックスが急激に増大し、電波バーストの強度は急激に低下する。そのため、ミリ波帯における激しい大気吸収の影響を受けて定常電波成分が激しく時間変動するため、電波バーストの検出が困難となる。このため、太陽全面をモニターする通常の小さな望遠鏡では、電波バーストがほとんど受からない。ここでは、80 GHz強度計で採用した設計アイデアについて紹介する。

新たに完成した80 GHz (波長3.75 mm) 強度計は、共通の赤道儀架台に据え付けた2台の小口径アンテナ (直径25 cm) の干渉計である。2つのアンテナの間隔を静かな太陽の干渉成分がほぼ0となるように設定することによって、大気吸収による受信レベルの揺らぎの原因となる成分を打ち消すことに成功した。このアンテナ間隔では、電波バーストはサイズが小さいのでほとんど影響を受けない。その結果、バーストの受信検出感度は、ほぼ受信機自体の最小検出感度まで下がり小さな電波バーストも受かるようになった。

●06 電波観測と衛星上のX線観測との密接な関係

太陽フレアにおける高エネルギー電子の発生、伝搬、閉じ込めを理解するうえで、電波観測と衛星搭載の硬X線望遠鏡からのデータを比較・検討することは極めて重要である。野辺山太陽電波観測所は1984年頃から、宇宙科学研究所で計画中のSolar-A衛星に搭載予定の硬X線望遠鏡の設計、製作、テストの作業に宇宙研、東大理とともに加わった。小杉健郎さんは、設計段階では、ピッチ角合成望遠鏡を提案し、コリメーター配置の最適化と画像のシミュレーションを行い、その後も主要な役割を果たした。

●07 電波ヘリオグラフ

①大型の太陽電波写真義の構想

1972年ころ名大空電研究所の田中先生が電波天文グループの研究会で、将来計画として、アンテナ600台による二次元10秒角の分解能をもつ大型太陽電波望遠鏡の建設を提案された。

②基本設計段階

1980年位から東京天文台、名大空電研究所、名古屋大学A研の太陽電波グループが野辺山または空電研究所に集まって、次期大型太陽電波望遠鏡の設計会議が始まった。野辺山の設計会議には、石黒正人さん、森田耕一郎さんも参加された。検討結果は以下にまとめられる。

最初に建設場所をどこにするかが議論されたが、結局野辺山とすることに決まった。次期太陽望遠鏡の建設のために信州大学農学部から比較的平らな場所を借りると仮定すると、敷地の広さは東西600m南北250mの程度である。少なくとも10秒角以下の空間分解能を達成するためには、観測周波数はミリ波に近くなる。結局、アンテナをT型に並べるとして、最初に周波数17 GHzの電波ヘリオグラフを建設し、少し遅れて34 GHzの観測機能を付け加えることになった。アンテナ配列から決まる画像のシミュレーションを行って、直径80 cmのアンテナ84台をT型のベースラインの上にT字中心から基本間隔、2倍、4倍、8倍、16倍に並べることになった(図07)。その他の仕様は次のとおり。

- ・基線長：東西488.96m／南北220.06m
- ・基本間隔：1.528m
- 以下の数字では、左側が17 GHz観測、右側が34 GHz観測である。
- ・観測周波数：17 GHz、33.8 GHz
- ・波長：17.6 mm、8.9 mm
- ・空間分解能：～10秒角、～5秒角
- ・時間分解能：100 ms、100 ms
- ・偏波観測機能：左右両偏波、強度のみ

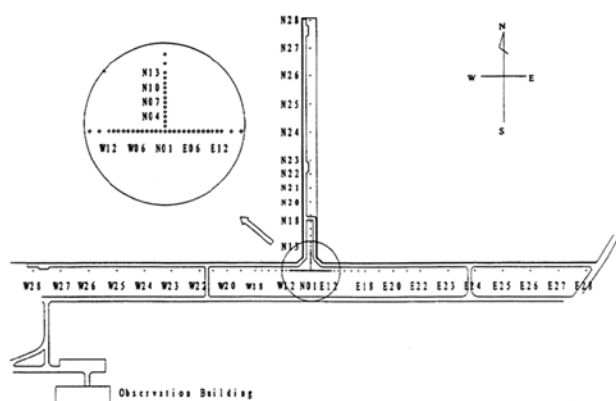


図07 電波ヘリオグラフのアンテナ配列 (Nakajima, H., et al., 1994, Proceedings of the IEEE, 82, 5のFig.2より転載)。

③国立天文台発足

1988年7月1日国立大学共同利用機関「国立天文台」が発足し、東京天文台と名大空電研究所の両太陽電波グループが野辺山太陽電波観測所に統合された。これによって電波ヘリオグラフを建設する体制が出来上がった。

電波ヘリオグラフの具体的な設計に入る前には、空電研究所の西尾正則さんを中心とするグループが、8 cm (周波数3.75 GHz) 電波写真儀の受信機を、ビームを振って二次元

電波画像をつくる方式から多相関器型のシステムに変更した。その際、デジタルバックエンドとして、1ビットサンプラーを使ってデジタル化し、相関処理を行う方式を採用した。この方式は電波ヘリオグラフでも採用することになったので、その製作上のノウハウはきわめて重要であった。

④建設段階

1989年に電波ヘリオグラフの予算の内示があった。1991年(太陽極大期)に打ち上げられることが決まった日本の太陽観測衛星“ようこう”との共同観測をめざし、1990年度と91年度の2か年で電波ヘリオグラフを完成させることをめざした。幾つかのグループに分けて仕様書をまとめ上げた。

1992年2月末アンテナと受信機の据え付けが終わり、3月のはじめからすべての動作をチェックする立ち上げ調整を全員で分担して行った。電波ヘリオグラフは、6月末頃に定常観測に入ることができた(図07・08)。データ解析のための像合成プログラムの作成は、花岡庸一郎さんが主導した。

定常観測の開始以来9月中だけでも、電波ヘリオグラフは大規模から小規模まで多くのフレアを観測している。国内外の研究者との共同研究も始まり、電波ヘリオグラフと光学、磁場、X線などの観測データとを合わせた解析が進められた。

電波ヘリオグラフのデータは国内外の研究者に公開されているので、フレアの発生とともに多くの現象の解析が進み、観測開始からの27年間に数多くの論文として出版されてきた。

⑤電波ヘリオグラフの2周波(17と34 GHz)化

鷹野敏明さんと入交芳久さん(名大大学院生)が中心となって2周波観測用の周波数選択膜サブレフ(17 GHz反射、34 GHz透過)を開発してきた。アンテナの主焦点に置いたホーンで受けた34 GHz信号は、フロントエンド内で低雑音受信機で増幅し、次のミキサーで17 GHz受信機と同じ中間周波数に変換した。その後の回路は、17 GHz用の受信機を時分割で利用した。電波ヘリオグラフの2周波観測は、1995年10月末から定常観測を始め、現在に至っている。

⑥野辺山太陽電波観測所の閉鎖と電波ヘリオグラフの国際共同観測

電波ヘリオグラフが定常観測を開始して約23年(2太陽周期)経過した2013年3月に、野辺山太陽電波観測所は閉鎖された。それ以後、電波ヘリオグラフは、名古屋大学地球環境研究所(担当：増田智さん)が世界の研究者を集めて、運用を継続している。詳しいことは、柴崎清登さんが2015年3月号の国立天文台ニュースで紹介しているので、ここでは省略する。なお、太陽活動を監視する1～80 GHzの望遠鏡群の運用は、野辺山太陽電波観測所が閉鎖された後、野辺山宇宙電波観測所が担っている。



図08 完成した電波ヘリオグラフ。

Ⅱ 野辺山宇宙電波観測所の歴史と成果

1969年の野辺山太陽電波観測所の開所から13年後の1982年に野辺山宇宙電波観測所が開所しました。その37年間の歴史とおもな研究成果を簡単に振り返ってみましょう。

野辺山太陽・宇宙電波観測所全景空撮写真。ヘリオグラフが完成した1992年ごろ。

立松健一
(野辺山宇宙電波観測所)



●01 野辺山宇宙電波観測所の歴史

野辺山宇宙電波観測所は、日本の天文学初の国際レベルの大型観測装置を備える観測所として開所した。建設予算総額110億円。それまで日本の基礎科学予算の最高額であった陽子シンクロトロン70億円を超えるものであった。観測所当初の望遠鏡は、45m望遠鏡とミリ波干渉計。その後、南米チリに設置されたASTE望遠鏡の建設・運用も2011年度までは野辺山宇宙電波観測所が行った（現在はチリ観測所管轄）。紙面の都合もあり、開所式以前の歴史、アルマ関係、は割愛する。開所式以前については、日本天文学会百年史編纂委員会編「日本の天文学の百年」（恒星社厚生閣）の13章、海部宣男著「電波望遠鏡をつくる」（大月書店）を参考にされたい。

1982年3月には宇宙電波観測所の開所式が行われた。前日からの大雪で、大変であったそうである。写真01は、野辺山宇宙電波観測所開所式であいさつする東京大学東京天文台の古在由秀台長（当時）。

45m鏡は、完成時に世界最大のミリ波望遠鏡であり、世界一の座はGreen Bank Telescopeに譲ったが、現在でも世界第一線級のミリ波望遠鏡（単一鏡）である。1982年のNature誌に「Japan reaches for the stars; Radio-dish looks set to excel」という記事が掲載された。「Japan is likely to enjoy a

substantial lead in this branch of astronomy, possibly the first basic science in which it might take a world lead」と書かれている。基礎科学の最前線に日本が躍り出たマイルストーンである。

海部宣男氏（今年4月に亡くなられた）の音頭で、野辺山関係の歴史的資料や物品を整理して活用するためのワーキンググループ活動を行っている。昨年、海部さんが開所直後（1983年ごろ）の「仕事分担表」（森本雅樹氏による；写真02）を見つけた。表に登場する方々（敬称略）は、赤羽賢司、森本雅樹、海部宣男、祖父江義明、石黒正人、長根潔、宮沢敬輔、東條新、平林久、近田義廣、井上允、高原文郎、稲谷順司、春日隆、長谷川哲夫、井上志津代、宮地竹史、中島潔、神澤富雄、岩下浩幸、半田一幸、高橋文雄、村田和男、川合登己雄、石野隆志、森田耕一郎、鈴木博子、中井直正、大石雅寿、林正彦、趙世衡、鈴木左絵子、半田利孝（原文のママ）、M、新技官である。



写真01 開所式であいさつする古在由秀台長（当時）。



写真02 野辺山宇宙電波観測所開所直後の「仕事分担表」。

野辺山宇宙電波観測所に関する代表的技術開発を紹介する。45mパラボラ主鏡の重力変形の影響を抑え込む「ホモロガス変形法」（フォン・ヘルナーの理論を森本雅樹氏が持ち込む；三菱電機との共同）、鏡面精度を測定するためのレーザー測距測角儀（測機舎との共同）、カーボンファイバーによる高精度鏡面パネル（三菱電機との共同）、マスターコリメーターを用いた高指向精度の確立（測機舎の共同）、大型の音響光学型分光計（AOS；太陽電波での応用を甲斐敬造氏から聞き、海部宣男氏が開発主導）、FX型相関器（近田義広氏の発

明)、SIS超伝導受信機の開発(稲谷順司氏、野口卓氏など)。ハードウェア関連では、望遠鏡製作を担当した三菱電機はもちろん、日本通信機、測機舎、などの協力があつた。ソフトウェア開発では、観測制御ソフトウェアCOSMOS、観測データ解析ソフトウェアLINEPROC、AIPSの移植、NewStar、NOSTAR、CASAの開発がなされた。ソフトウェア開発では、富士通の協力があつた。

45 m鏡は、1981年12月2日に初ライン観測に成功し(22 GHzのH₂Oメーザー)、1982年1月27日には初ミリ波ライン観測に成功した(86 GHzのSiOメーザー)。1982年12月30日には、日本で初めて系外銀河の分子輝線観測に成功している(CO輝線、M82)。45 m鏡のミリ波受信機は、ミリテック社製のショットキ・バリアダイオード受信機から始まり、初のSIS超伝導受信器S40(1987年運用開始、坪井昌人氏ほか)、そしてS80/100(1989年運用開始)、マルチビーム受信機BEARS(1988年ファーストライト、1999年度共同利用開始、砂田和良氏ほか)、単ビーム2SB受信機T100(2007年運用開始、2008年度共同利用開始)、同T70、2ビーム2SB受信機TZ(2009年運用開始)、マルチビーム受信機FOREST(2011年ファーストライト)、などが開発された。T100以降の受信機開発には、小川英夫氏ほか大阪府立大学のチームに参加いただいている。また、T70の開発は、酒井剛氏が主導した。45 m分光計は、音響光学型電波分光計(AOS)から始まり、2010年度にはデジタル分光計SAM45(日本のアルマとの共同開発)が稼働した。45 m鏡の共同利用は、1982年度に10 GHz連続波、40 GHzライン観測で開始され、1983年度から100 GHz帯がオープンになり、また、海外からのプロポーザル受付も開始し、現在に至っている。VLBI観測の共同利用も、水沢VLBI観測所を通じた公募として行われている。

野辺山ミリ波干渉計は、1982年に22 GHzと115 GHzで初フリンジ(2素子)、1984年に初画像(22 GHz, Cyg A)、1987年に22 GHz共同利用開始、1988年に初のCO観測(Maffei 2, IC342など)、1994年から6素子運用となった。45 m鏡とミリ波干渉計を結合するRAINBOW干渉計は、1998年度予算がつき、2000年度に共同利用に供された。2007年度まで共同利用を継続、2010年度に干渉計としての運用を終了した。干渉計のもっとも新しい素子アンテナ1台(F号機)は、単一鏡の電波望遠鏡SPARTとして大阪府立大学のグループが惑星電波観測用に利用している(2011年より)。

サブミリ波観測を行うためのASTE望遠鏡は、野辺山宇宙電波観測所、日本の各大学、チリ大学などの共同で行われた。1992年より、ASTE望遠鏡、ALMA望遠鏡のためのサイト調査が行われた。1999年度の野辺山における建設・試験観測開始を経て、チリに移設・設置され、2002年から試験観測を開始した。

野辺山宇宙電波観測所のVLBIグループは、45 m鏡を含むKNIFE(鹿島野辺山干渉計)実験に参加した(1989-1992年)。米国NASA/JPLの提案をもととしたTDRS衛星による初のスペースVLBI実験では、1986年は臼田64 m鏡が参加してS-bandにて、つづいて1988年に45 m鏡が参加した2 cmでのスペースVLBI実験に成功した。国際ミリ波VLBI観測、J-NET、「はるか」衛星を含むスペースVLBI(VSOP、1977-2005年)に参画した。この流れは、水沢VLBI観測所のVERA、

そしてKaVA、EAVN、45 m鏡を含んだ共同利用に続いている。

観測所は、東京大学の山本智氏の主導する「富士山頂サブミリ波望遠鏡」(1998-2005年に稼働)に協力した。また、観測所キャンパス内で運用された別機関の望遠鏡としては以下がある。東京大学(当時)の長谷川哲夫氏のグループは、60 cmの230 GHz電波望遠鏡VST-1を1991年に野辺山に設置した。大阪府立大学は、前記SPART以外に、1.85 m電波望遠鏡を野辺山で運用している(2009年より運用)。

次章以降、観測所の科学成果を概観する。引用回数は単なる1つの指標に過ぎないが、数多くの成果の中から客観性を持って選択をするために、あえて引用回数(NASA ADS、2019年8月調査)の順に紹介させていただく。FORESTを用いた最近の成果に関しては、間もなく出版されるPASJ特集号、プレスリリースなどと重複するので割愛する。

●02 45 m鏡関係の研究成果

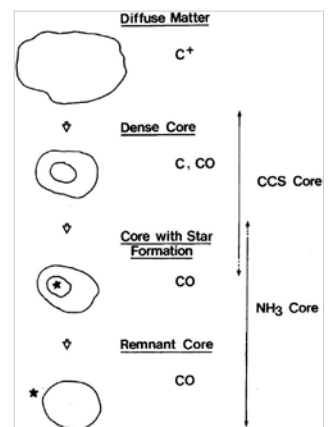
写真03が45 m鏡(八ヶ岳を背景に)である。45 m鏡に関連したおもな研究成果論文を紹介する。



写真03 野辺山宇宙電波観測所45 m電波望遠鏡。

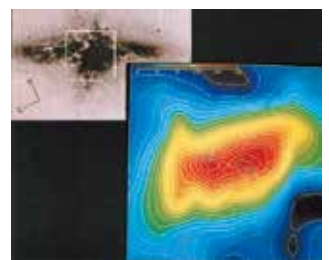
・鈴木博子ほか(1992, ApJ, 392, 551) 275回引用。炭素鎖分子が星間空間で果たす役割の重要性に早くから気づいた鈴木氏がリーダーシップをとった研究。1987年に急逝された後、共同研究者が論文をまとめた。星間化学の教科書的成果となった(図04)。

図04 収縮する分子雲の化学進化の概念図(鈴木ほか1992)。



・中井直正ほか(1987, PASJ, 39, 685) 190回引用。系外銀河M82をCO分子で観測し、銀河面から垂直に伸びるスパー状分子雲を発見した(図05)。

図05 M82の光学写真(白黒)と、CO分子画像(カラー)(中井ほか1987)。



・立松健一ほか (1993, ApJ, 404, 643) 184回引用。オリオン座A巨大分子雲をCS分子でサーベイし、125個の分子雲コアを同定。巨大分子雲で初めての本格的分子雲コアサーベイ (図06)。

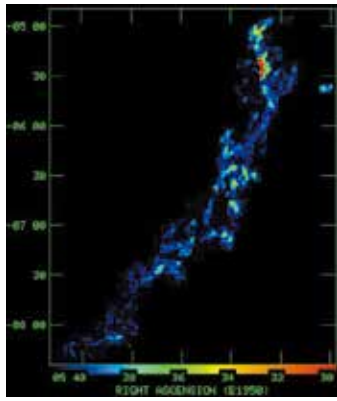


図06 オリオン座A分子雲のCS分子マップ (立松ほか 1993)。

・坪井昌人ほか (1999, ApJS, 120, 1) 180回引用。天の川銀河中心部をCS分子でマッピング観測。多くの分子雲が銀河面に平行な分子雲リッジの存在を明らかにした。

・Susana Lizanoほか (1988, ApJ, 328, 763) 176回引用。アレシボの電波望遠鏡を用いて双極分子流天体HH7-11のHI流を発見し、また野辺山45m鏡を用いてHI風とCO分子流の中間速度に対応するHCO⁺輝線を検出した。

・海部宣男ほか (1984, A&A, 26A, 134, 7) 173回引用。原始星L1551 IRS5のまわりに回転する分子雲ディスクを発見。45m鏡初期の代表的成果。

・岡朋治ほか (1998, ApJS, 118, 455) 167回引用。天の川銀河中心領域をCO輝線で観測し、多数の高速コンパクト分子ガス雲を見出す。

・祖父江義明ほか (1984, Natur, 310, 568) 161回引用。天の川銀河中心部に電波連続波で見えるΩ状ループを発見。45m鏡初期の代表的成果。

・大西利和ほか (1998, ApJ, 502, 296) 158回引用。おうし座分子雲を、名古屋大学4m電波望遠鏡を用いてC¹⁸O輝線にて広域観測を行い、そこで検出されたC¹⁸Oコアを45m鏡で追加観測。

なお、忘れてはならない代表的研究としては中井直正ほか 1993, Natur, 361, 45) 117回引用、がある。系外銀河NGC4258に毎秒1000 kmの速度をもつ水メーザー輝線を発見 (図07)。この結果をもとに米国の電波望遠鏡VLBAで追観測を行い、三好真ほか (1995, Natur, 373, 127) 956回引用による、超巨大ブラックホールの世界で初めての非常に確実な観測証拠の取得に至る。また、45m鏡による17個の星間分子の発見 (現在知られている星間分子の総数は約200) は、大変重要な成果である。

2007年以降に出版された比較的新しい論文で引用回数が高いものは以下。

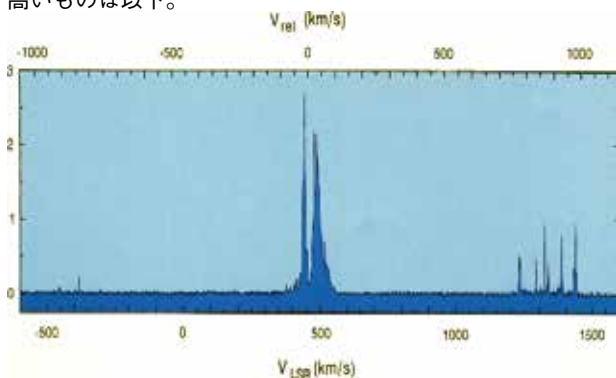


図07 NGC4258で観測された水メーザー輝線のスペクトル (中井ほか 1993)。

・久野成夫ほか (2007, PASJ, 59, 117) 124回引用。野辺山レガシー観測。40個の近傍渦巻銀河のCO観測を行い、銀河のバーの強さと分子ガスの中心集中度に相関があること、バーの中の分子ガスがバーによって中心に効率よく輸送されることこの証拠を得た (図08)。

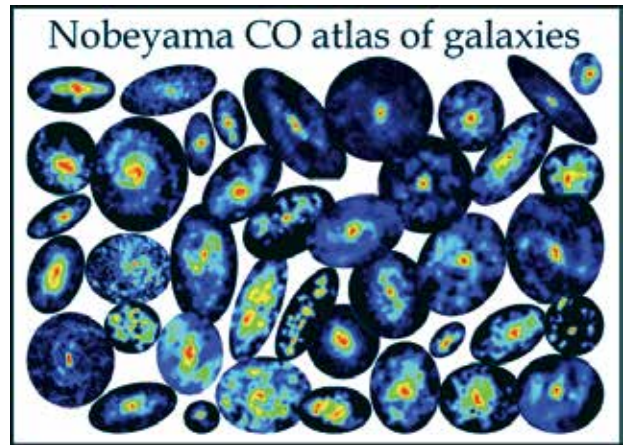


図08 近傍渦巻銀河の野辺山COアトラス (久野ほか 2007)。

・坂井南美ほか (2008, ApJ, 672, 371) 119回引用。暖かい分子雲における炭素鎖分子の形成 warm carbon-chain chemistry (WCCC) という新しい事象を発見し、星間化学にパラダイムを築いた (図09)。

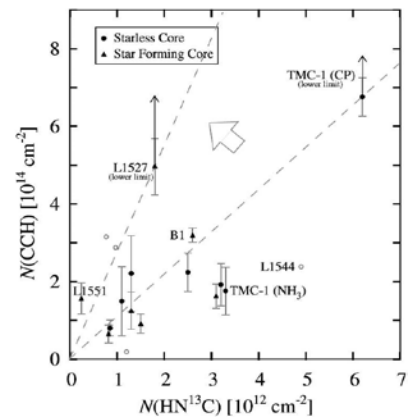


図09 WCCC分子であるCCHの柱密度と参照分子HN¹³Cの柱密度の比較 (坂井ほか 2008)。

・幸田仁ほか (2009, ApJ, 700L, 132) 114回引用。渦巻

銀河M51を45m鏡とCARMA干渉計で観測し、データをコンバインして、渦状腕の通過に伴い、巨大分子雲アソシエーション (GMA) が集まり、小さな分子雲に壊れていく様子を明らかにした。

・小野寺幸子ほか (2010, ApJ, 722L, 127) 101回引用。野辺山レガシー観測として、近傍渦巻銀河M33をCO輝線にて観測し、巨大分子雲より大きなスケールでは、分子ガスの面密度と星形成率の間の相関関係Kennicutt-Schmidt則が成り立っているが、それより小さなスケールでは相関にばらつきが大きくなることを明らかにした。

巨大ブラックホールの発見、星間分子の発見ならびに炭素鎖分子の化学、銀河中心部の活動性と分子ガスの運動、分子雲コアの統計的研究、近傍渦巻銀河中の星形成、原始星周囲のディスク状構造、が45m鏡の科学成果の柱である。

●03 ミリ波干渉計関係の研究成果

写真10は、1992年ごろの野辺山ミリ波干渉計。その後、6素子が加わった (1994年に運用参加)。ミリ波干渉計のおもな研究成果論文を紹介する。



図10 野辺山ミリ波干渉計（1992年ごろ）。

・坂本和ほか（1999, ApJ, 525, 691）239回引用。野辺山ミリ波干渉計とOVRO干渉計を用いてCOにて20個の近傍渦巻銀河をマッピング。バーのない銀河に比べバーのある銀河は分子ガスの中心集中度が高いことを統計的に示し、バーによるガス輸送理論に観測的サポートを与えた。野辺山ミリ波干渉計の代表的な成果（図11）。

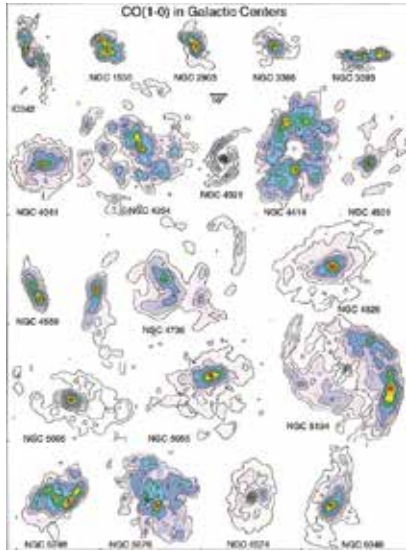


図11 野辺山ミリ波干渉計とOVRO干渉計で観測された近傍渦巻銀河のCO地図（坂本ほか1999）。

・北村良実ほか（2002, ApJ, 581, 357）169回引用。おうし座のT Tau型星13個に対して、1秒角分解能で原始惑星系円盤の統計的研究を行った。その結果、進化に従い円盤サイズが大きくなることを示した（図12）。

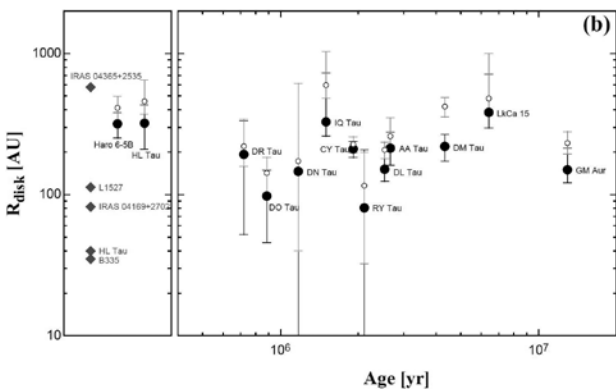


図12 T Tau型星の原始惑星系円盤の半径と年齢の関係（北村ほか2002）。

・太田耕司ほか（1996, Natur, 382, 426）159回引用。赤方偏移4.69の遠方銀河BR1202-0725からのCO輝線を発見し、 10^{11} 太陽質量にも達する分子ガスの存在を明らかにした。当時最も遠い銀河からの分子ガス検出であり、Omont（1996, Natur, 382, 428）との発見競争があった（図13）。

・坂本和ほか（1999, ApJS, 124, 403）155回引用。ミリ波干

渉計で最初に紹介した、野辺山ミリ波干渉計とOVRO干渉計を用いた20個の近傍渦巻銀河のマッピング観測のデータの詳細。

・石附澄夫ほか（1990, Natur, 344, 224）130回引用。銀河IC342のCO観測を行い、銀河中心核付近のリング状分子ガス・リッジを発見した。

・河野孝太郎ほか（2001, ASPC, 249, 672）119回引用。野辺山ミリ波干渉計と45m鏡を結合させたRAINBOW干渉計を用い、近傍のセイファート銀河のイメージング・サーベイを行った。7天体のうち3天体で、スターバースト銀河でも起こらないような非常に高いHCN/CO比およびHCN/HCO⁺比を観測。

・大橋永芳ほか（1991, AJ, 102, 2054）98回引用。11個の原始星IRAS点源をCS輝線と98GHz連続波で観測し、CS輝線はembedded天体で検出され、連続波はT Tau型星で検出される傾向。進化に従い、T Tau型星では星周物質が円盤としてより中心集中して分布していることを示唆。

まとめると、渦巻銀河のバーの役割の研究、銀河中心核付近の活動性の研究、原始惑星系円盤の進化、が野辺山ミリ波干渉計の研究の柱であった。

●04 ASTE関係の研究成果

写真14がASTE望遠鏡である。ASTE関係のおもな研究成果論文を紹介する。

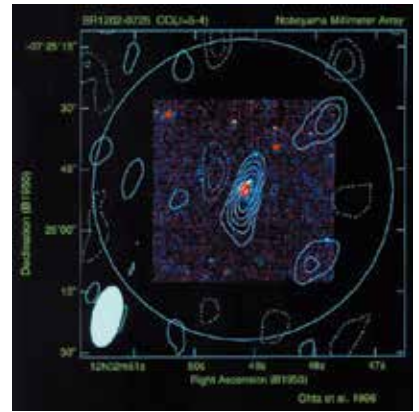


図13 BR1202-0725のCO(J=5-4)輝線地図。



図14 ASTE望遠鏡。

・江沢元ほか（2004, SPIE, 5489, 763）155回引用。ASTE望遠鏡紹介。

・澤田剛士ほか（2008, PASJ, 60, 445）95回引用。野辺山45m鏡とASTE望遠鏡用に開発されたOn-the-Flyマッピング観測モード（望遠鏡でスキャンしながら分光観測を行う）の紹介（p14・図15）。

・K. S. Scottほか（2010, MNRAS, 405, 2260）94回引用。

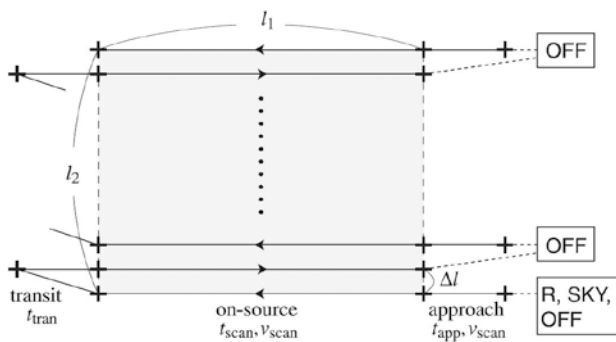


図15 OTFスキャンの例 (澤田ほか 2008)。

AzTEC/ASTE 連続波カメラを用いて、GOODS-S 領域の波長 1.1 mm 観測を行い、confusion limited マップを得た。ソース・カウントにより、1.1 mm 赤外背景放射の2/3が、短波長では検出できない赤方偏移3以上の dust-obscured 銀河によるものとした (図16)。

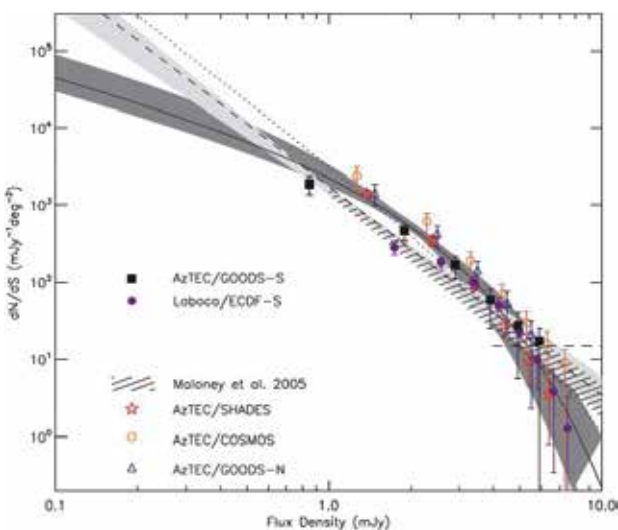


図16 AzTEC/GOODS-S サーベイによるソース・カウント図 (Scottほか 2010)。

- ・ Min S. Yun ほか (2012, MNRAS, 420, 957) 81回引用。同上の観測データから、赤方偏移分布とサブミリ波銀河の性質を議論した。同程度の質量の銀河を比較した場合、赤方偏移2以上の銀河の比星形成率は、赤方偏移0のその10-100倍高いことを示した。

- ・ I. Aretxaga ほか (2011, MNRAS, 415, 3831) 81回引用。AzTEC/ASTE を用いた COSMOS 領域の研究。1.1 mm ソース・カウントの超過は、galaxy-galaxy および galaxy-group のレンジ効果によるらしいことを示した。

- ・ 森口義明ほか (2005, ApJ, 631, 947) 71回引用。TeV ガンマ線源の超新星残骸 G347.3-0.5 を、名古屋大学 NANTEN 望遠鏡、ASTE、CSO 望遠鏡で CO 輝線にて観測し、CO 分布と X 線分布の比較から分子雲が残骸に付随することを示し、高励起 CO 輝線の残骸による加熱の可能性を吟味し、観測された CO のウィング成分を残骸起源と原始星起源にて検討。

●05 大学院・大学学部教育における45m鏡の貢献

観測所の将来を考える必要から45m鏡の教育的側面を調べた。ヒストグラムは、45m鏡を用いた修士・博士論文数

である (図17・2018年6月7日集計)。2019年3月のデータが入っていないので、2015-20の bin は5/4倍して補正する必要がある。修士論文は、単調増加で年平均10本の修士論文が45m鏡で書かれた。博士論文は、年3件程度でコンスタントである。電波天文学のすそ野が広がり、45m鏡が大学院修士課程の教育に大きな役割を果たしてきたことがわかる。詳細は以下のURLで公開している。

<https://www.nro.nao.ac.jp/~kt/html/Nobeyama45mMDthesis.html>

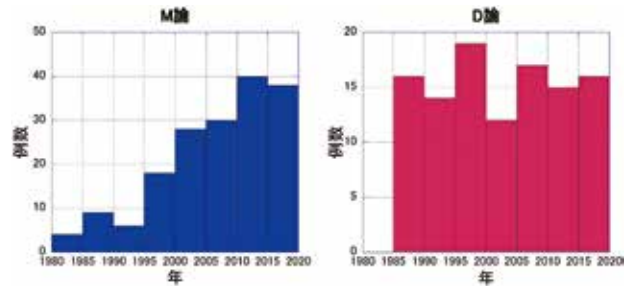


図17 野辺山45m鏡関連の修士論文、博士論文 (5年ごと)。

野辺山宇宙電波観測所では、毎年、45m鏡観測実習を実施している。これに関しては梅本智文氏の記事 (16ページ) を参照。

●06 野辺山宇宙電波観測所の今後

2022年3月に共同利用を終了し、それ以降は競争的資金などによる専用利用に移行する予定。財政難に対応すべく2019年9月末に本館・共同利用宿舎を閉鎖。所員は45m観測棟と機構展示室に移住しつつある。共同利用に関し、2019年6月以降、旅費の支給を終了、国立天文台三鷹などからのリモート観測基本の運用への変更、週末・年末年始・ゴールデンウィークの観測を終了、夜間サポートを終了。厳しい台所事情ではあるが、45m鏡ができるだけ長く現役でいられるように鋭意努力中。

観測所の教育広報活動を、今後如何に維持していくかは喫緊の課題である。2019年3月に協定書を結び、地元南牧村との連携を強化している。村による観測所有料ガイド (ガイド無し見学はこれまで通り無料)、村による観測所守衛所横での観測所関連グッズの販売などを始めた。

野辺山宇宙電波観測所の将来を応援していただければ幸いです。また、この場を借りて、歴代所員に深く感謝する。



Nobeyama Science Workshop 令和元年 開催報告

竹川俊也 (野辺山宇宙電波観測所)

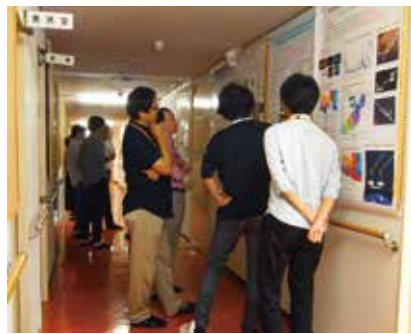
野辺山45m鏡は、共同利用が開始された昭和57年(1982)以来、日本の電波天文学を牽引する主力装置として活躍してきました。数多の重要な成果をもたらした平成の世を駆け抜けた45m鏡ですが、環境やニーズの変化に従い、残念ながら令和4年(2022)3月までに共同利用観測を終了することとなりました。このような状況ですので、「野辺山」の話題となると、まるでお通夜の参列者のような顔をされる方がいらっしゃいますが、45m鏡は決して下を向くことはなく(そもそも上しか向けないのだが)、今なお現役で科学成果を挙げ続けています。そしてそのユーザーの多くは次世代を担う若手研究者たちです(筆者自身も45m鏡ハードユーザーのピチピチのポストドクである)。そんな元気な45m鏡ユーザーが一堂に会し、最新成果や研究展望について明るく語り合い、新時代における単一鏡でのサイエンスの可能性を考えることを目的として、9月4日から6日にかけて、野辺山宇宙電波観測所にて、「Nobeyama Science Workshop 令和元年」を開催しました。

野辺山では共同利用開始以降30年以上にわたり、毎年ユーザー向けの研究集会(ユーザーズミーティング)を開催していました。野辺山ユーザーズミーティングは良い意味で敷居が低く、学生の初陣の場としては丁度よく、非常に教育効果も高い賑やかな研究会でした。しかし近年では、観測所の人員削減や運営体制の変化に伴い、野辺山ユーザーズミーティングはASTE望遠鏡やALMAのユーザーズミーティング@三鷹キャンパスと統合されるようになり、野辺山でのサイエンスに主眼を置いた研究会は行われ



01 中には不貞腐れたような顔で写ってしまった人もいるが概ね皆さん楽しげな表情の集合写真。心なしか立松所長だけが集合しきれていないように見える(写真右)。

なくなっていました。このような背景のもと、野辺山のアクティブユーザーを中心に声をかけ実現したのが今回の研究会でした。世話人は筆者の他に、金子紘之 研究員、鳥居和史 助教(国立天文台野辺山)、山岸光義 研究員(JAXA/ISAS)、竹腰達哉 研究員(東京大学)、岡 朋治 教授(慶應義塾大学)、徂徠和夫 准教授(北海道大学)です。



03 ポスター講演の様子。

研究会には学部生からいわゆる大御所まで幅広い世代から計72名に参加していただきました。うち28名は学生、14名はポストドクであり、参加者の半数以上は若手研究者でした。全部で41件の口頭講演と16件のポスター講演があり、テーマも星形成や銀河、装置開発や次世代計画に至るまで広範に渡り、様々な視点から意見や質

問が飛び交う非常に活気に溢れた研究会となりました。もちろん成果発表だけでなく、研究会終盤には将来の45m鏡の活かし方(生かし方)についての建設的な議論が交わされました。懇親会では、定番のオードブルや寿司の他に、カレーライスや地ビールがふんだんに振る舞われ、筆者は大きな赤方偏移を示しました。会期中には45m鏡下部機器室の見学会も行われ、非常に参加者の満足度の高い研究会となりました。観測所本館の閉鎖に伴い、これが所内で行える最後の研究会となってしまいましたが、新時代の幕開けにふさわしい実に有意義な3日間でした。

●本研究会は、JSPS 科研費19K14768「高速度分子雲に着目した銀河系中心領域に潜む中間質量ブラックホールの探査」(研究代表者:竹川俊也)、18K13593「世界最大の一酸化炭素輝線撮像観測で探る銀河群環境が星間ガスに及ぼす統計的研究」(研究代表者:金子紘之)、17K14261「赤外線衛星観測によって解き明かす星形成活動にともなった有機分子進化の全貌」(研究代表者:山岸光義)、自然科学研究機構若手研究者による分野間連携研究プロジェクト「大規模分子雲データと機械学習による天の川銀河の3次元空間構造の復元と解明」(研究代表者:鳥居和史)の助成を受け開催いたしました。最後になりますが、参加者の皆様、そして諸々の面倒ごとを引き受けてくださいました井出秀美さんを始めとした観測所員の方々に、この場を借りて深く感謝いたします。



02 講演の様子。

野辺山太陽電波干渉計

Mini Album

懐かしの

第1部で紹介した初期から中期にかけての太陽電波干渉計の画像を中心に、当時を振り返ります。



①	②
	③
④	⑤
	⑦
⑥	⑧

(14ページ) 160 MHz 干渉計とハヶ岳／①160 MHz 干渉計の建設／②法月鉄工所での仮組み／③東京天文台野辺山太陽電波観測所の開所式 (1969年10月) ／④160 MHz アンテナに降り積もった雪／⑤観測室のひとコマ／⑥17 GHz 12素子干渉計の建設／⑦17 GHz 相關型干渉計の建設 (12素子干渉計のアンテナの並び替えを実行中) ／⑧80 GHz・35 GHz 強度偏波計 (手前) と17 GHz 強度偏波計 (奥) は現在も活躍中 (06ページ参照) ●記録画像提供: 野辺山宇宙電波観測所

「電波天文観測実習」報告

梅本智文（野辺山宇宙電波観測所）

野辺山宇宙電波観測所では毎年、総研大「夏の体験学習」として、天文学に関心を持つ理科系の大学生を対象に電波天文観測実習を行っています。野辺山45m電波望遠鏡を使った観測を通して、電波天文学の観測研究の実際にあふれてもらい、将来の進路決定に役立ててもらおうことが目的です。第一回の1998年から（1回休止があったため）今年で第21回となります。以前は8月に実施していましたが、第16回より大学院入試前の6月に実施するようになりました。電波天文学全般の入門コースになる様にプログラムも工夫されています。

今年の電波天文観測実習は6月3日から6月7日まで、4泊5日の日程で野辺山宇宙電波観測所にて行われました。野辺山観測所縮小に関する報道で心配したのですが、国内のみならず外国のアメリカから南は沖縄の大学まで、例年並みの応募がありました。電波天文学の観測研究にあふれる機会がめったにない大学の学生に門戸を広げるのがこの実習の目的でもあります。書類選考の結果決まった12名の学生の皆さん（定員は8名）が4人ずつ3班に分かれて実習を行いました。

自己紹介、諸連絡、観測方法と観測データから物理量の導出に関する講義ののち、各班に分かれて、観測対象天体に関する先行研究等について論文を調べ、観測計画の立案を行います。思わぬトラブルが発生し思うようにデータが取れなかったなどの問題はありましたが、無事に観測ができました。観測が終わると、あとは成果報告会までの時間との戦いとなります。怒涛の観測データ処理、解析から物理量の導出、さらに観測結果の解釈を頭を悩ませながら発表資料を作り上げていきます。成果報告会では、それぞれの班員が趣向を凝らし、作成したプレゼンはたいへん興味深いものでした。

この観測実習の役割は、観測計画の立案から、観測データの解釈に頭を悩ませつつ、時間の迫ったプレゼンの準備をする、というまさに研究者が日頃やっている事をたった数日間で体験することで、実習生本人が自身の成長、変化を実感できる場になっている事です。初日の説明会では不安げな表情だったが、観

測立案の段階では、チューターの指導の下とはいえ、実習生の全員が口を出し、アイデアを出し合うようになる様子は、たいへん印象的です。その後自然と役割分担が決まると、自分の担当を行いながら、全員で考察の議論に参加し、議論することの楽しさを実感している様子がうかがえます。成果発表の時には自分の成長の実感と自信にあふれる様子が表情にみごとに現れていました。

実際に、終了後実習生に取ったアンケートでは、「大学の授業を休んででも来る価値のある実習だった」、「自分たちの手でやりきったということが大きな自信となった」、「研究とは何かを知る機会となり研究者になりたいと思った」等の感想がありました。また「異なるバックグラウンドの学生達との交流も貴重だった」という意見は、この観測実習が一生涯に渡る交流のきっかけの場としての役割を果たしているとも言えます。

現在天文業界で活躍する天文学者の中にも電波天文観測実習の経験者が多いです。チューターを担当したメンバーの中には、かつて電波天文観測実習に参加し、その後電波天文学の分野に進み学位を取得し、研究者の道に進んだ方が多くいます。このことは、実習生が電波天文学に



01 初日最初のミーティング。みな緊張の面持ち。



02 45m電波望遠鏡での観測風景。いいデータが得られたかな。



03 データ解析に夢中。

進み、研究者となりチューターとして実習で指導を行うという、人材育成の良い循環ができていることを意味します。本来の電波天文学の裾野を広げるという目的が正に実現されており、20年間以上培ってきた電波天文観測実習は日本の天文学の財産と呼べるものではないでしょうか。今後も電波天文学を担う若手の育成につながることを期待して、できるだけ実現が可能となる工夫を行い、どんな形であっても継続していきたいと思えます。

野辺山でのアウトリーチ活動

衣笠健三（野辺山宇宙電波観測所）

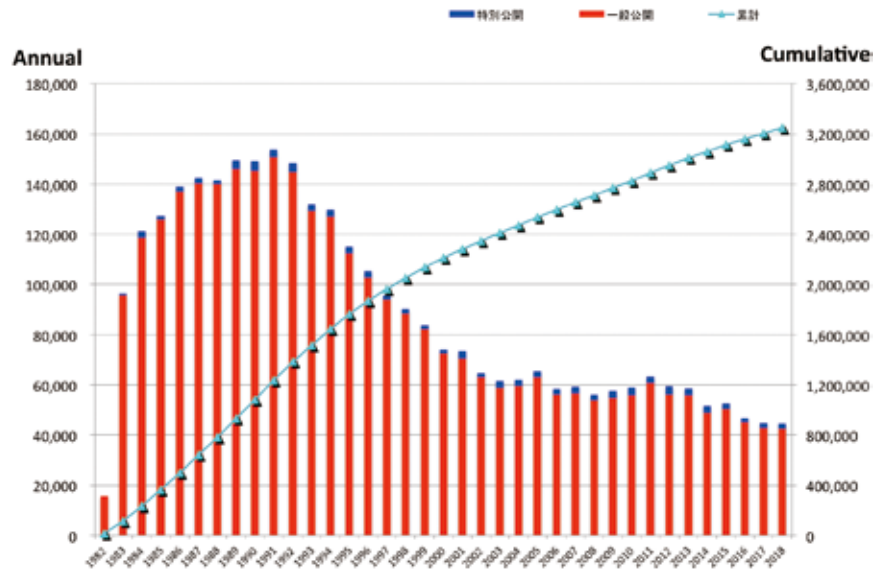
野辺山キャンパスでのアウトリーチ活動は、研究成果リリースなどの広報活動から、電話問い合わせ、一般見学者への対応、地域連携など多岐に渡ります。以下では、野辺山に特徴的な、一般への公開活動と地域連携についてみていきたいと思います。

野辺山キャンパスの一般公開を開始したのは、野辺山宇宙電波観測所が開所した1982年です。研究機関の一般公開は現在では当たり前ですが、当時、多くの研究機関は非公開であったため、文字どおり野辺山はPR活動の先駆けとなった機関です。一般公開開始から累積した見学者数は、2013年10月に300万人に達しました。現在でも年間4万人以上の方が見学に訪れています（図01）。45m電波望遠鏡の規模の大きさ、電波ヘリオグラフの数、アルマ望遠鏡の礎たるミリ波干渉計など、説明をしなくても宇宙に思いをはせることのできる観測装置のほか、構内パネルやミニアンテナを使って電波天文と観測所について説明を実施しています。

一方、特別公開は1983年から実施しています。それ以降、今年で37回目を数える特別公開も他に類を見ないでしょう。職員だけでなく、OB/OGを含めた多くのボランティアにて、講演会だけでなく、工作や実験など多くのイベントを実施しています。参加者のこれまでの平均は約2500名。地元南牧村の人口が2倍近くに膨れ上がる日となります（図02）。また近年では、近隣の信州大学農学部野辺山ステーション、筑波大学山岳科学センターハヶ岳演習林とともに、地元感謝



02 野辺山特別公開2019の様子。晴天に恵まれてたくさんの方々が観測所を訪れました。



01 一般見学開始からの年間見学者数と累計数の推移。

デーを実施し、3機関がどのような研究を行っているのかを地元の方々にお知らせする機会を設けています。

他にも、星名所として知られる野辺山の夜空をアンテナとともに撮影する星空撮影会や、県内の美術館とコラボしたアーティストインレジデンスなど、特色のあるイベントを開催しています。

地域連携活動は、時期によっては、観望会を実施したり、地元ケーブルテレビに出演したりすることがありました。しかし、近年まであまり継続的な活動とはなかったようです。それでも、研究観測は地元からの理解が必要であることと、地元地域の星空を観光資源とする動きから、最近では地域連携活動が継続的に行われています。例えば、南牧村観光協会主催の「手ぶらde星空鑑賞会」は、2012年から始まった女性をメインターゲットとした星空鑑賞会で、観測所は特別協賛という形で協力し、見学ツアーや講演会などを実施しています。また、2015年には南牧村観光協会、2019年には南牧村と協定を結び（図03）、イベントでの相互協力だけでなく、野辺山キャンパスを使った南牧村の観光等の活動も始まりました。

一方、長野県の天文や宇宙関係の団体や個人とともに「長野県は宇宙県」といったキーワードで、長野県の星空や観測環境を多くの方々に伝える活動を2016年より実施しています。野辺山を



03 南牧村との協定締結の様子。大村公之助南牧村長（右）と常田佐久国立天文台長（左）。

発起としたこの活動は、東大木曾観測所やJAXA臼田宇宙空間観測所などとも協力しつつ、信州大学、長野高専と、さらには科学館やプラネタリウム、そして各地域も星の会とも連携し、各施設をめぐるスタンプラリー（図04）などのイベントや県内の夜空の暗さ測定といった活動に発展しています。全国におけるアストロツーリズムの盛り上がりに一役買っているといっても過言ではないでしょう。



04 「長野県は宇宙県」スタンプラリーは、こどもたちにも大人気。

野辺山宇宙電波観測所の創始者の1人である故海部宣男元台長の「科学の成果を社会に知らせるのは、科学者の責務である」（野辺山宇宙電波観測所30周年記念誌）の言葉を理念として、野辺山でのアウトリーチ活動を引き続き実践していきたいと思っています。

Ⅲ 電波干渉計の仕組みを知らう—後編—



前半では、電波で天体を観測する電波望遠鏡の簡単な仕組み、そして波を数学的に扱うために、フーリエ級数展開やフーリエ係数を用いて波の形をスペクトルとして表現できることを説明しました。後半では、いよいよ電波干渉計の仕組みの本質に迫ります。

川村 晶
(星の手帖社)



監修：永井 洋／平松正顕
(アルマプロジェクト)
協力：黒木修隆
(神戸大学大学院)

■ 後編

★「電波干渉計の仕組みを知らう」の全体像をつかむために、9月号掲載の前編と今号の後編を合わせた記事全体の小見出しと要点を紹介します。

■ 前編

●01 電波干渉計の正確な理解をめざして

●02 光と電波の違い

光の望遠鏡は電磁波の「エネルギー（光子の数）」を測りますが、電波の望遠鏡は「波」としての性質（振幅や位相）も計測します。

●03 波の基本と干渉

波は「振幅」「角周波数」「位相」で表されます。複数の波が重なり合うことで「干渉」が起こります。

●04 電波望遠鏡の仕組み

電波望遠鏡は、天体からの電波の位相が1/2周期ずれるだけの角度の2倍が「視野（そして分解能）」となります。

●05 ヤングの干渉実験

「ヤングの干渉実験」の結果から、天体が発した電波を同じ方向を向いたふたつのアンテナで受信したとき、視野内の天体の位置によって受信した電波の位相が異なることがわかります。

●06 フーリエ級数解析やフーリエ変換にあえて足を踏み入れる

「フーリエ級数展開」を行うと、周期関数で表される複雑な波が、どのような単純な波の組み合わせでできているかを「スペクトル」で示すことができます。

●07 フーリエ変換は干渉計理解のヤマ場

周期関数でない任意の関数は「フーリエ変換」でスペクトルが得られます。波だけでなく2次元の形もフーリエ変換が可能で「uv平面」にスペクトルで表せます。また「逆フーリエ変換」によって、スペクトルから2次元の形へと戻すこともできます。

●08 電波干渉計の基本原則

●04・●05の復習をします。

●09 ファンシッター・ゼルニケの定理

干渉計の考え方の基本は「遠くの光源から放たれた光を離れた2か所で観測したとき、その光を干渉させて得られる干渉縞には、光源の形をフーリエ変換した成分が盛り込まれている」という「ファンシッター・ゼルニケの定理」に依拠しています。

●10 幾何学的遅延と相関器のはたらき

「相関器」によって、ふたつのアンテナで受信した電波を干渉させ、その電波がどれだけ似通ったものかを示す「相互相関関数」を得ます。さらにそれをフーリエ変換して「クロスパワースペクトル」を得て、uv平面上の1点のスペクトルを示します。

●11 野辺山電波ヘリオグラフの例

電波干渉計のアンテナの並びとuv平面との関係を考えるには、野辺山電波ヘリオグラフが良い例となります。アンテナの並びには重要な意味があることがよくわかります。

●12 電波干渉計の分解能

アンテナの間隔が大きいくほど、電波干渉計が実現できる分解能は高くなります。しかし、uv平面上のスペクトルから天体の姿を正しく導き出すには、できる限りさまざまな間隔と方向でアンテナを組み合わせて多くのスペクトルを集める必要があります。

●07 フーリエ変換は干渉計理解のヤマ場

フーリエ級数展開やフーリエ係数を用いれば、どんな波でもスペクトルに変換できるかといえば、実はそう簡単ではありません。なぜなら、その波は周期関数のみに限られているからです。実際に自然界の現象などを関数として表現した場合、そこに周期性があるとは限りません。そこで、非周期の関数でも、フーリエ級数展開と同様にスペクトルを得られるように考え方を拡張したものが「フーリエ変換」です。

フーリエ変換では、非周期関数の周期が無限大であると考えます。つまり、無限の時間を1周期と仮定するのです。このとき、関数の展開は無級数の形ではなく、積分の形で表現されることになり、以下のような式で表されます。

$$\text{フーリエ変換} \quad F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-i\omega t} dt$$

一見、難しそうな式ですが簡単にまとめると、「係数のような数値」ではなく、「関数」として扱えるようにしたもので、時間 t の関数に $e^{-i\omega t}$ をかけて、 $-\infty$ から ∞ まで無限大の時間で積分することによって「ある波を表す時間(t)の関数を周波数(ω)ごとのスペクトルで表す関数に変換する」ということなのです。

突然、「 e 」が現れましたが、これは自然対数の底の e のことです。ネイピア数とも呼ばれる値で、三角関数の式からの変形には「オイラーの公式」が使われています。 i は、2乗すると -1 になる虚数単位です。

$$e^{i\omega t} = \cos(\omega t) + i \sin(\omega t) \quad (\text{オイラーの公式})$$

$$\ast e = 2.718281828459045235360287471352 \dots$$

オイラーの公式を使って、周波数 ω の正弦波を時間 t の関数として考えた場合の一般式は、

$$f(t) = A e^{i\omega t}$$

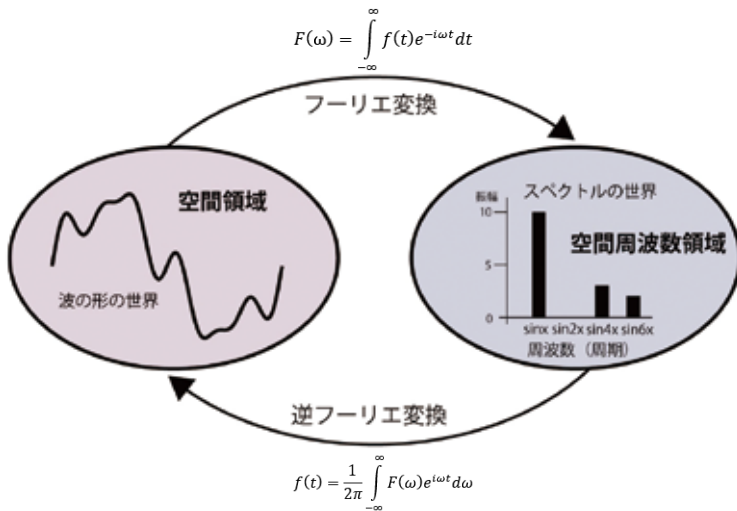
で表すことができます。ここでの A は振幅です。したがって、時間の関数としての正弦波の正体は、 $e^{i\omega t}$ でもあるのです。

さらに、数学的には逆向きの「ある周波数(ω)ごとのスペクトルで表された関数を時間(t)の関数とした波に変換する」ことも可能です。こちらは逆フーリエ変換と呼びます。

逆フーリエ変換

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) e^{i\omega t} d\omega$$

つまり、波の形をスペクトルに変換し、さらにスペクトルから再び波の形へと戻すこともできるということです。「波の形を知っていること」と、「その波の周波数スペクトルを知っている」ことは、数学の世界では同じことなのです。また、その概念として、波を形として認識する側を「空間領域」、それをフーリエ変換してスペクトルとして認識する側を「空間周波数領域」と呼んでいます。



このように、フーリエ変換によって得られたスペクトルから波の形について分析を行うことを「フーリエ解析」と呼んでいます。

さらに、フーリエ変換の手法を拡張すれば、1次元の波だけではなく、「2次元の形」にも応用できます。例えば、風景の画像も縦横のラインに細かく分解して、その明るさの変化を波としてとらえることで、フーリエ変換を行い、スペクトルに分解することも可能になります。もちろん、天体の姿も2次元でのフーリエ変換ができるのです。

それでは、実際に天体の画像を2次元のフーリエ変換してみましょう。

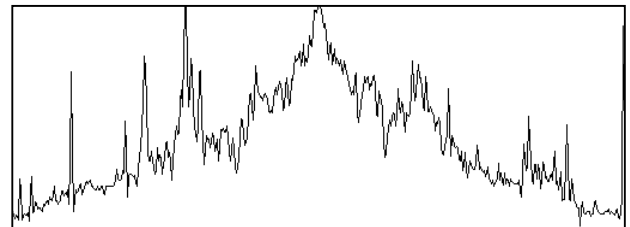
画像 (図01a) は、すばる望遠鏡が撮影した系外銀河のNGC4946です。可視光で撮影したカラー画像ですが、説明を単純にするため、モノクロ化してトリミングしています。この画像の中央横一列のピクセル (画素) だけを取り出して、その明るさをグラフにしてみると、山の稜線のような形であることがわかります (図01b)。つまり、この画像はフーリエ変換して、周波数ごとのスペクトルで表現することが可能だというわけです。

ここでは、神戸大学大学院工学研究科准教授の黒木修隆先生が画像処理の研究用として開発した「FFT2D」というソフトウェア (Windows版のみ) を使って実際に2次元の天体画像をフーリエ変換を行ってみました。FFTとは高速フーリエ変換 (fast Fourier transform) のことで、特にコンピューターでの計算に特化した手法です。

図02は、NGC4946の画像をFFT2Dに読み込ませたもので、さらに2次元のフーリエ変換を施し、空間周波数の2次元のスペクトルとして表示したものが、図03です。空間周波数のス



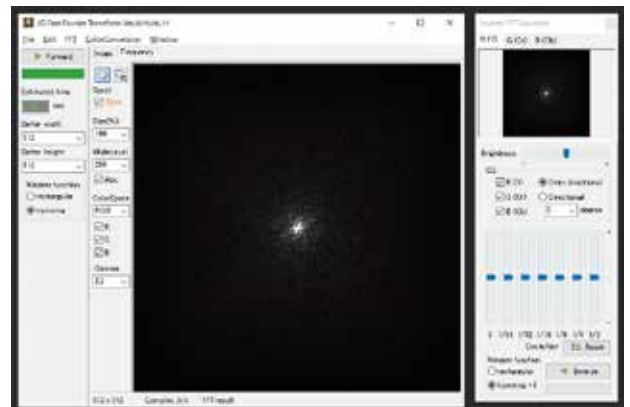
01a すばる望遠鏡が撮影した系外銀河のNGC4946。



01b aの画像の中央横一列のピクセル (画素) だけを取り出して、その明るさをグラフにしたものです。



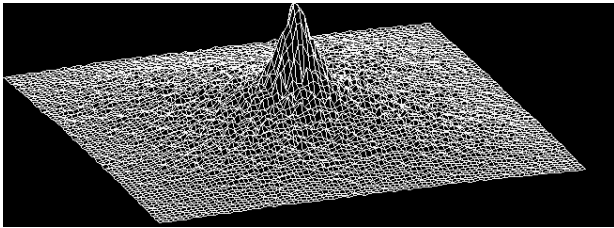
02 NGC4946の画像サイズは512ピクセル角にリサイズしてあります。FFTは2の累乗であると、より高速に計算できるとのことです。



03 読み込んだNGC4946の画像を2次元のフーリエ変換した結果。球状星団のようにも見えます。

ペクトルは、中央ほど「周期が長く、周波数の低い波」を、反対に周辺ほど「周期が短く、周波数の高い波」を示しています。また、明るい点ほどスペクトルの強度が強い（波の振幅が大きい）ことを示しています。

さらに、**図04**は、市販の画像処理ソフトで空間周波数のスペクトルを3次元グラフに表してみました。スペクトルの強度の分布もよくわかります。



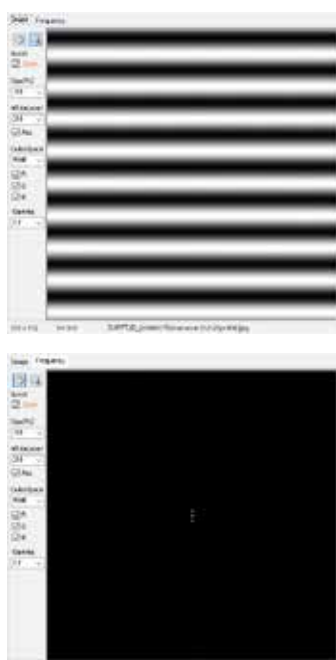
04 スペクトルの強度をよりわかりやすく可視化するために3Dグラフ化してみました。*スペクトルの強度はステライメージ8（アストロアーツ社）にて3Dグラフ化。

ちなみに、一般的に空間周波数のスペクトルでは、横方向を「水平周波数」、縦方向を「垂直周波数」と呼んでいて、それぞれuとvで示されます。そこで、このスペクトルは「uv平面」とも呼ばれます。

uv平面に示されるスペクトルの特徴は、原点から上の半分と下の半分とは、原点での回転対称になっていることです。つまり、原点から上にある1点のスペクトルは、原点を挟んで点対称の位置に同じ強度のスペクトルが現れているということです。これは、電波干渉計のアンテナの配置ともきわめて深い関連がある特徴といえます。

ところで、uv平面の概念を理解するのはなかなか難しいので、単純化した実例を見ていきましょう。まずは、正弦波の振幅を黒から白までの明るさとして、0から255までで表すデジタルデータで表現したモノクロの縞模様を作ってみました。それをフーリエ変換するとどのようなスペクトルが得られるのか、実験してみましょう。

ここでは、正弦波の進む方向と周期の異なる3つの縞模様の画像を用意し、それぞれFFT2Dを使って高速フーリエ変換を行ってみました（**図05~10**）。結果は単純明快で、大きく縦方向に進む波で描いた縞は縦方向（v軸）の中心にほど近い位置にスペクトルが現れます。また、横方向の細かい縞は中心から横方向（u軸）へ離れた位置にスペクトルが現れます。もちろん、斜めの縞も、しかりです。模様のパターンと、スペクトルの関係



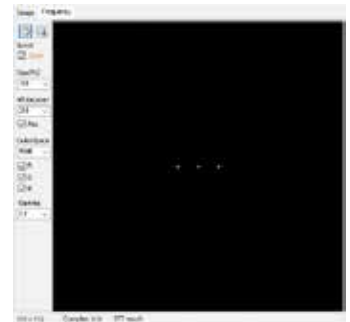
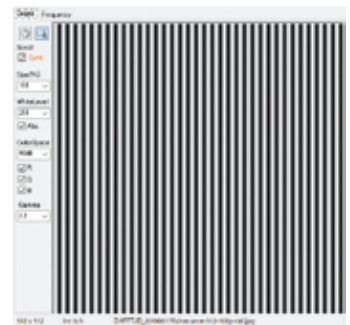
05・06 幅広の横縞をフーリエ変換してみました。原点（中央）と原点を挟んで縦並びに近い位置に明るい点が見えます。上下の点がスペクトルで、位置が縞模様の周期、明るさがスペクトルの大きさを示します。

性がよくわかるでしょう。

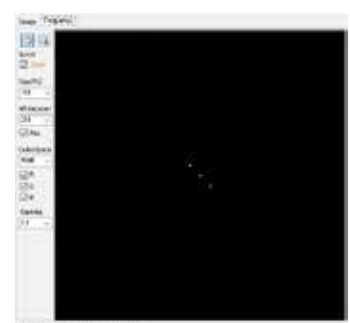
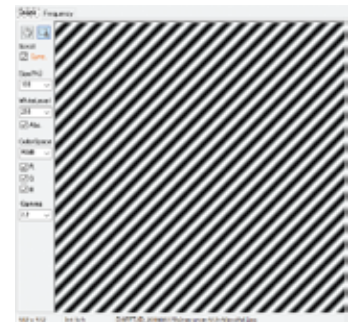
また、FFT2Dでは、空間周波数領域で7レベルの周波数帯ごとにスペクトルの強度を強めたり、弱めたりすることができるイコライザーが装備されています。イコライザーでスペクトルの強度を変更して、さらに空間領域の画像へと書き戻すことも可能です。ちなみに、表示されている単位の「Cycle/dot」は、波の1周期が画像の何ドットに含まれているかを示すもので、「1/16 Cycle/dot」の表示は、16ドットに1周期の波が含まれていることを示しています。当然、「1/2 Cycle/dot」よりも「1/64」の方が、周期の長い波になります。

そこで、NGC4969の画像を使い、まずは**図11**のように高い周波数の「1/2 Cycle/dot」と「1/4 Cycle/dot」のイコライザーのバーを下げて、完全にカットしてから空間領域の画像に戻すと、全体的にぼんやりとした画像になってしまいました。周波数の高い、細かい模様がなくなりました。

また、**図12**のように「0 Cycle/dot」や「1/64 Cycle/dot」のイコライザーのバーを下げてスペクトルから画像へと戻すと、今度は銀河そのものの存在が失われるほど大きな構造が見えなくなりました。銀河の手前の恒星の輝きなどは、周波数が高く、細かい模様なので、残っていることがわかります。



07・08 比較的細かい縦縞をフーリエ変換してみました。こちらは横並びで、幅広の縞模様よりも原点から遠い位置にスペクトルが現れています。縞が明瞭（高コントラスト）なほどスペクトルは強くなります。

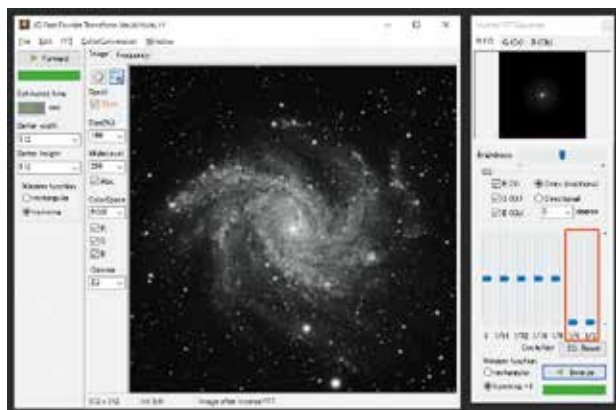


09・10 斜め45度に傾いた縞模様もフーリエ変換してみました。今度は原点を挟んで斜め45度の位置にスペクトルが現れました。もちろん、逆向きの斜めの縞模様なら逆の傾きでスペクトルが現れます。

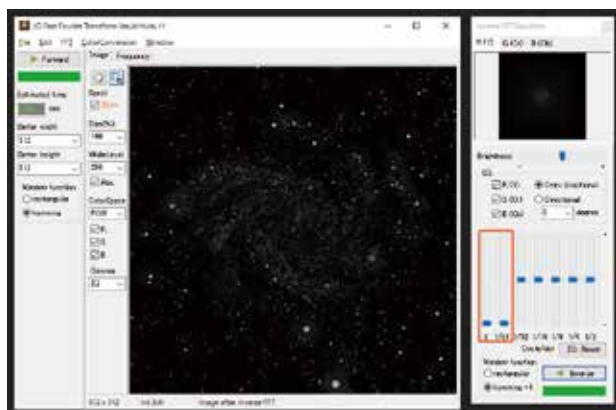
FFT2Dはだれでもダウンロードして利用できますので、いろいろな画像をフーリエ変換して、空間領域と空間周波数領域での「振る舞い」を体験してみるとよいでしょう。

<http://cas.eedept.kobe-u.ac.jp/~kuroki/>

●08 電波干渉計の基本原則



11 細かい模様の特クトルを弱めて（画面右の赤枠で囲ったスライド操作）逆フーリエ変換すると、オリジナルの画像に比べ、分解能が低くなったような「ピンボケ状」になります。細かい部分の表現が失われてしまうからです。



12 大きな模様のスペクトルを弱めて（画面右の赤枠で囲ったスライド操作）逆フーリエ変換を行うと、なんと銀河の姿がほとんど見えなくなってしまいました。右側のスペクトルの表示部分では、中央に穴が空いたようになっています。

●デジカメのJPEG圧縮のはなし

スマートフォンやデジタルカメラなどで撮影された画像データの保存形式はいくつもありますが、データを実際に表示される画素数や色数で保存すると、大きな容量になってしまいます。そこで、画像データを「圧縮」する技術が生まれました。画像数はそのままに、データの容量を小さくできるので、気軽にインターネット回線を使ってやり取りすることができます。よく知られているのは、PNG形式やJpeg形式でしょう。

PNG形式はデータを画像として再現したとき、元の画像を完全に再現できる可逆圧縮と呼ばれる技術です。画質は保たれるものの、極端に小さな容量にはできません。

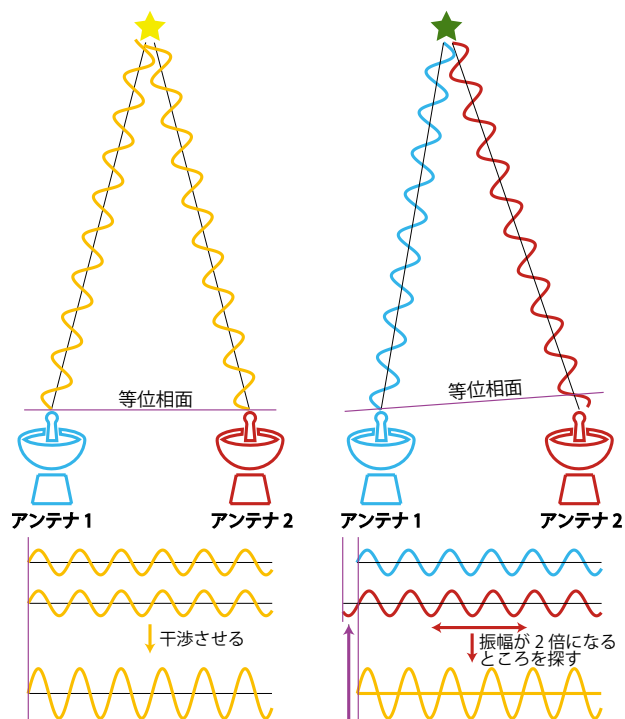
Jpeg形式は、高い圧縮率で、データの容量を小さくすることが可能です。それには、人の認知能力の特性が利用されています。実は人の画像を認知する能力は、周波数の低い大きな変化の模様ほど敏感で、周波数の高い細かい模様は見えていてもさほど意識しないとされています。「木を見て森を見ず」という故事がありますが、どうやら人の目は「森は見えても葉っぱは見えない」ということのようなのです。

Jpeg形式では、フーリエ変換と同じように空間領域と空間周波数領域の変換を行う「離散コサイン変換」を用い、画像を空間周波数領域に変換して、画像のなかで人の認知能力の鈍感な周波数が高くても細かい模様のデータだけを選択的に間引き、データの容量を小さくしているのです。他にも「ハフマン符号化」や「ジグザグスキャン」といった技術も用いられていますが、基本的には細かい模様の情報を捨てている、ということなのです。身近なアイテムにも、フーリエ変換のような数学的手法が応用されているというわけです。

まずは、「前編（2019年9月号）05章 ヤングの干渉実験」の中で説明した天体からやってくる電波をふたつのアンテナで受信して干渉させたことを振り返ってみます。ここでは、観測の条件を少し明確にしておきましょう。

まったく同じ性能のふたつのアンテナがある間隔を空けて、それぞれが天頂に向いているとします（地球の表面の曲率は無視します）。そして、天頂には星のような天体があったとします。この天体はそれぞれのアンテナの視野中心にあることになります。しかもこの天体は、特定の単一の周波数のみの電波を放出すると仮定します。この場合、この天体から放出される電波は、ふたつのアンテナに同時に到達します。観測された電波は、電圧の時間変化の波としてとらえることができるので、ふたつのアンテナから出力されるふたつの波をそのまま干渉させる（足し合わせる）と、波の振幅は2倍になります。

次に、この天体がふたつのアンテナを結ぶ方向に、天頂からわずかに下がってきたとします。つまり、天体がアンテナの視野の中央からわずかにずれて位置している状態です。このとき、天頂に向いているふたつのアンテナで天体を観測すると、天体からの電波の到達時間にわずかですが差が出てきます。天体からそれぞれのアンテナまでの距離がわずかに異なるからです。このまま同時に観測された波を干渉させて



電波源（天体）からの電波は、ふたつのアンテナに同時に届く。そのまま干渉させる（足し合わせる）と振幅は2倍になる。

干渉させて（足し合わせて）振幅が2倍になるように位相をずらすと、アンテナ2にどれくらい電波が遅れて届いたか、つまり電波源の位置がわかる。

13 離れた位置にあり、ぴったり同じ方向を向いたふたつのアンテナで、電波源（天体）からの電波を受信した場合、アンテナの視野の中心に電波源（黄色の星マーク）があれば、同じ位相でふたつのアンテナに同時に電波が届きます。ところが、電波源が視野中心から離れた場所（緑色の星マーク）にあると、それぞれのアンテナまでの距離がごくごくわずかに変わります。距離の違いは、電波の到達時間の違い、すなわち同時に電波を受信しても位相がずれた状態になるのです。電波干渉計では、この位相のずれを利用しているのです（9月号前編p29図06を再掲）。ちなみに、電波源は無制限の位置にあるので、電波は等位相面が平行に進んでいきます（同p26図03を参照）。

も、位相が合っていないので振幅は2倍にはなりません。また、位相のずれる量は、天体の位置によって変わってくるのは明らかです。

●09 ファンシッター・ゼルニケの定理

こうして、ふたつのアンテナ（電波望遠鏡）があれば、視野の中の天体の位置を位相のずれによって知ることができます。つまりそれは、ひとつのアンテナの観測よりもはるかに高い分解能を得ることができることになるのです。これが電波干渉計で天体の画像を得るための基本的な考え方ですが、より理論的に体系立ててまとめられた定理として「ファンシッター・ゼルニケの定理」があります。

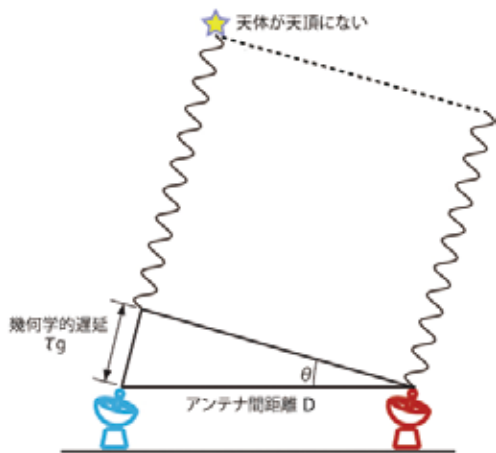
ファンシッターとゼルニケはいずれもドイツの物理学者で、ファンシッター・ゼルニケの定理は、もともと光の干渉についての知見です。その意味を簡単な言葉でおおまかに説明すると「遠くの光源からの光を離れた2か所で観測し、その光を干渉させて得られる干渉縞には、光源の形をフーリエ変換した成分が盛り込まれている」ということになります。これは数学的にもきちんと証明されている事象であり、もちろん光と同じ電磁波である電波でもファンシッター・ゼルニケの定理は成り立ちます。

このファンシッター・ゼルニケの定理を元に、電波干渉計で天体の画像を得るまでの仕組みを簡単に説明していきましょう。

●10 幾何学的遅延と相関器のはたらき

ところで、観測したい天体は、常に天頂にあるわけではありません。その場合、すでに天体とそれぞれのアンテナの距離が異なっていることになります。そこで、距離の違いによる電波の到達時間の違いをあらかじめ補正しておく必要があります。

たとえば、ふたつのアンテナがぴったり同じ天体を向いて、アンテナ間の距離が正確にわかっている場合、天体からの電波の到達時間の差は簡単に求められます。これを「幾



14 観測したい天体が天頂にない場合、天体から発せられた電波は地面に置かれたふたつのアンテナには、時間差を持って届きます。電波を干渉させる場合、この時間差である幾何学的遅延 τ_g をあらかじめ考慮する必要があります。かつては信号線の長さを物理的に調整しましたが、現在ではデジタル的な処理が行われます。

学的遅延（一般的に τ_g で示す）」と呼んでいます。幾何学的遅延を考慮して信号を重ね合わせて干渉させれば、視野の中心にある電波源から観測された波の振幅は最大になるはずですが、もちろん、これはふたつのアンテナを結んだ線の上で、地面に対して垂直に立てた面の中に天体がある場合ですが、任意の位置の天体でも幾何学的遅延は計算することが可能です。

幾何学遅延 (τ_g) は以下の式で求められます。

$$\tau_g = \frac{D \cos\theta}{c}$$

幾何学的遅延は、アンテナ間距離 D にベクトル S （天頂からの天体の角度 θ の \cos を取る）を掛け（つまり、天体から見たアンテナ間の距離に相当）、さらに光速 (c) で割る、となります。単位は秒、つまり時間です。電波の進む速さは、光と同じ光速です。式からわかるように、幾何学的遅延に電波の周波数は影響しません。

電波干渉計では、ふたつのアンテナで電波を観測して電気信号として出力された波は、「相関器」と呼ばれる装置（コンピュータ）で処理して、「相互相関関数 $C(\tau)$ 」を得ます。

相互相関関数は、ふたつの関数があるとき、互いにどれだけ似ているか（類似度）を数値化して示す場合に用いられる数学的手法です。電波干渉計の場合は、ふたつのアンテナからの信号の類似度を知ることによって、天体の位置や形の情報を得るための手がかりにしようということになります。

天体から直接やってくる電波の放射強度を時間変化での関数で示すと

$$E(t) = E_0 \cos(2\pi\nu_0 t)$$

E_0 : エネルギーの大きさ ν_0 : 周波数 t : 時間

となります。単純な余弦波（コサイン波）と考えると、エネルギーの大きさが波の振幅の最大となり、グラフに描けば、時間の変化によって波打つことがわかります。

さらにふたつのアンテナで得られた電波を電圧の信号としての時間変化で示すと

$$\begin{aligned} V_1(t) &= a_1 E_0 \cos(2\pi\nu_0 t) \\ V_2(t) &= a_2 E_0 \cos[2\pi\nu_0(t - \tau_g)] \end{aligned}$$

V_1, V_2 : 電圧 E_0 : 天体からやってくる電波のエネルギーの大きさ ν_0 : 周波数 t : 時間 τ_g : 幾何学的遅延

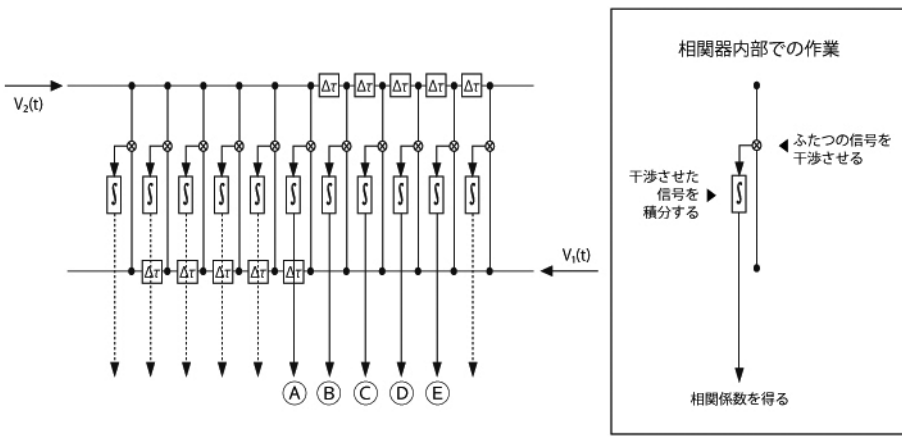
* a_1, a_2 は、アンテナの性能のばらつきを平均化する係数です。

全く同じ性能のアンテナを作ることはできないので、補正値を使います。

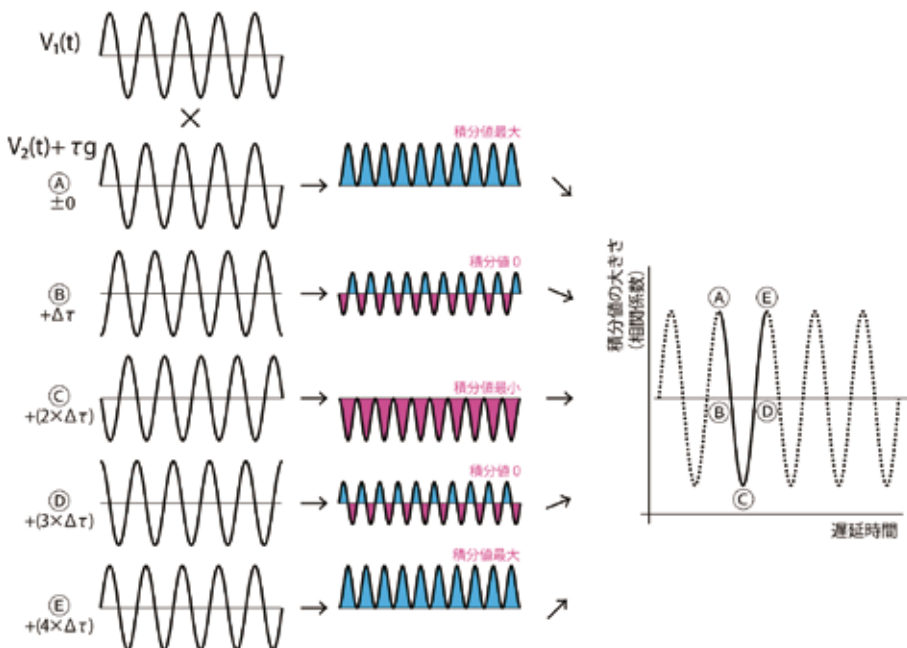
となります。一方のアンテナからの信号には幾何学的遅延を反映させます。このふたつの信号から相互相関関数 $C(\tau)$ が得られます。

$$\begin{aligned} C(\tau) &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} V_1(t - \tau_1) V_2^*(t - \tau) dt \\ &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} V_1 \cos(2\pi\nu_0(t - \tau_1)) V_2^* \cos(2\pi\nu_0(t - \tau_g - \tau)) dt \\ &= \frac{1}{2} a_1 a_2^* |E_0|^2 \cos(2\pi\nu_0(\tau - \tau_1 + \tau_g)) \end{aligned}$$

相互相関関数は、ふたつのアンテナからの信号の幾何学的遅延を補正した上で、さらに少しずつ遅延時間 (τ) を変えて干渉（ここではかけ算）させ、さらに積分を行うことで答えを導き出します（図15）。



15 相関器の仕組みを模式的に示します。ふたつのアンテナからの一方の信号に遅延時間を与えては干渉（一般的にはかけ算）させ、その波形を積分していくことで相互相関関数を求めます。AからEは、例として次のフリンジを描く仕組みに対応させています（※）。



16 相関器でフリンジを描く仕組み。単一周波数で点像の天体をふたつのアンテナの視野中心で観測することを仮定しました。信号をずらす遅延 ($\Delta \tau$) は、説明を単純化するため90度ごとの位相に相当する時間としてしています。Aは遅延時間が0の場合。ふたつの信号はぴったり重なるはずですので、干渉（かけ算）させると再び描かれる波はすべてプラスになり、積分値は最大になります。B、Dのように位相が90度、270度ずれた場合は、波がプラスとマイナスに等しく振れるので、積分値は打ち消し合って0になります。さらに、位相が完全に反転している180度では、マイナスの積分値となります。この繰り返しで、相互相関関数としてのフリンジを得ることができます。本来なら、観測は無限の時間で行う必要がありますが、電波の周波数での波の繰り返しの数を考えると、短い時間でもじゅうぶんなデータとなります。

もしも、単一周波数の電波が正弦波（もしくは余弦波）でやって来ると仮定すれば、信号の遅延時間をずらして干渉させれば、それを積分した値が増えたり減ったりすることがわかります。この場合、その積分値を縦軸、遅延時間を横軸にとって表したグラフは、再び波の形になります。これをフリンジ、もしくは干渉縞と呼んでいます。

ちなみに、連続した幅のある周波数の電波の場合、理論的には幾何学的遅延与えた時のみ、すべての周波数で同じ形の波が重なるので、フリンジは鋭いピークを示す形になります。

また、相互相関関数 $C(\tau)$ の式の中には、天体の放射強度である E_0 （絶対値の2乗）の項があり、フリンジの振幅の大きさが天体の放射強度に依存することがわかります。

上記は単一周波数の場合を想定していますが、連続し

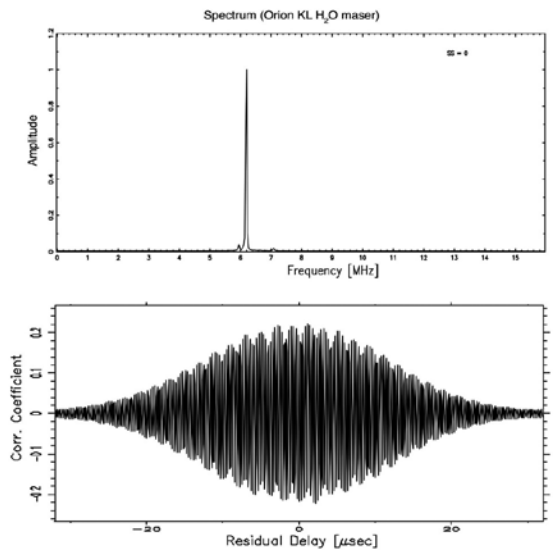
た幅のある周波数電波を観測した場合、細かく分割した周波数幅毎に相互相関関数を求めます。分割した周波数幅毎に得た相互相関関数を時間積分することで、2つのアンテナ間の信号の相関を周波数の関数として得ます。これはまさに時間の関数である相互相関関数から周波数の関数へとフーリエ変換していることに他なりません。こうして得られる関数をクロスパワースペクトルと呼んでいます。

この操作を数学的に書くと、

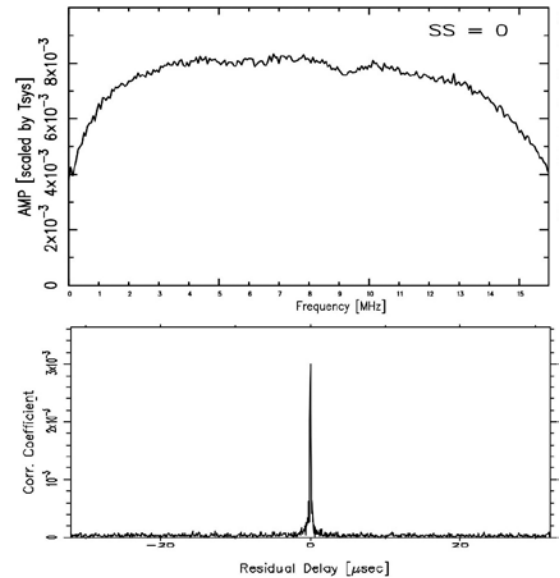
$$\hat{C}(v) = \int_{-\infty}^{\infty} C(\tau) e^{-2\pi i v \tau} d\tau$$

$$= \frac{1}{4} a_1 a_2^2 |E_0|^2 \delta(v - v_0) e^{-2\pi i v_0 (\tau_1 - \tau_2)}$$

（※）「干渉計サマースクール2005教科書」国立天文台 編「Chapte 3 干渉計の原理」より図版を転載（図17・18）およびアレンジ（図15）。



17 フリンジの例として、Orion KL IRC2 からの水蒸気メーザー放射 (22.235 GHz)。上のグラフが分光器でのスペクトル。ほぼ単一周波数ですので、下の図のようにフリンジは振動しているように描かれます。完全に単一周波数であれば τ について無限に振動が続くフリンジとなります。しかし、電波のスペクトルが有限の周波数帯域を持つため、遅延時間が大きくなるとフリンジの振幅は減少しています（※）。



18 幅広い周波数帯の電波を放出している天体では、すべての周波数の電波で位相が一致するのは遅延が0の時のみ。遅延があれば、いろいろな周波数の電波が弱めあってしまうためです。したがって、フリンジは遅延時間が0で鋭いピークを示します。図はクエーサー4C 39.25の観測結果（※）。

このクロスパワースペクトルこそが電波干渉計で求めたいデータなのです。

ファンシッター・ゼルニケの定理によれば、離れた2か所で観測された光源（電波源）からの光（電波）の干渉縞をフーリエ変換したものは、光源の形の情報を持っているとします。そしてそれは、クロスパワースペクトルが空間周波数領域の uv 平面上の1点（実際には原点を挟んだ点对称の2点）の空間周波数スペクトルになっているということなのです。

先に2次元の画像をフーリエ変換して、空間周波数領域の uv 平面にスペクトルとして表示したことを思い出してみましょう。 uv 平面上の1点のスペクトルが、2次元画像を構成する縞模様のひとつに対応していました。

空間周波数 u は、

$$u = \frac{D \cos \theta}{\lambda}$$

で求められます。D cos θ は、天体からアンテナを見たとき、

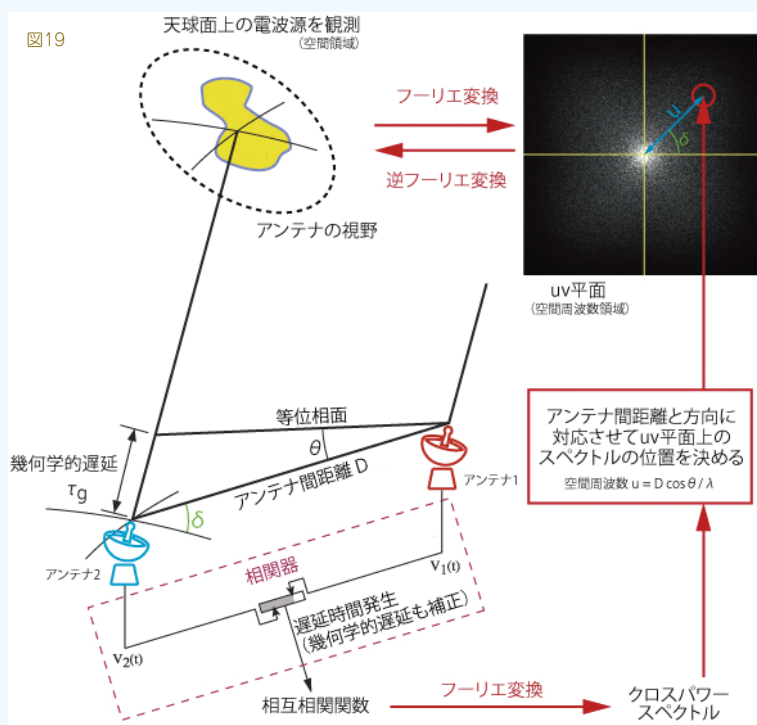
ふたつのアンテナの距離に相当し、これを観測波長で割った値が空間周波数 u になるのです。つまり、観測波長（周波数）を決めてしまえば、ふたつのアンテナ間の距離だけが空間周波数 u を決める要素となります。

さらに、クロスパワースペクトルの e の累乗項を変形すると、空間周波数 u が現れます。これはクロスパワースペクトルが空間周波数の関数になっている、すなわち、電波干渉計の出力は空間周波数で特徴づけられる縞模様だということになります（※）。

よって、一組のアンテナペアによる uv 平面上のスペクトルは、アンテナを結ぶ方向で、その距離と観測周波数から求められる空間周波数 u の位置の1点のみしか得られないのです。したがって、2次元の天体の姿を描き出すには、ふたつのアンテナ間の距離と方向を多種多様に配置し、 uv 平面を埋め尽くせるだけのクロスパワースペクトルを集めないといけません。一連のプロセスをまとめると、図19のようになります。

●干渉計で天体の姿が高い解像度で得られる仕組み

天球面上に天体の姿（放射された電波でできた模様＝電波の強度分布）があるとします。この天体の姿は、「形」として認識できる空間領域にある。もしも、この天体の姿をフーリエ変換すれば、空間周波数領域の uv 平面上に周波数ごとのスペクトルを得ることができることになる。一方、離れた場所にあるふたつのパラボラアンテナが、天球面上の同じ位置に向いていて、天体からの電波を受信する。このとき、天体からの物理的な距離が異なるため、ふたつのアンテナには電波が時間差を持って到達することになる。受信した電波は、電圧の信号として変換された後、相関器に導かれ、まずは幾何学的遅延を加えて電波の到達時間差を補正する。さらに、それぞれの信号の位相をずらしながら干渉させることで、相互相関関数を得る。当然のことながら、相互相関関数は天体の姿が変われば異なるものになる。アンテナ間距離や方向、観測周波数によっても同様だ。相互相関関数は時間の関数なので、これをフーリエ変換することで、周波数の関数であるクロスパワースペクトルが得られる。このクロスパワースペクトルは、空間周波数 u 、つまりアンテナ間の距離に依存する。クロスパワースペクトルを空間周波数のスペクトルとすると、 uv 平面の一点のスペクトルに当てはめることができる。つまり、たくさんのクロスパワースペクトルを集めれば、天体の電波画像を作ることができる。

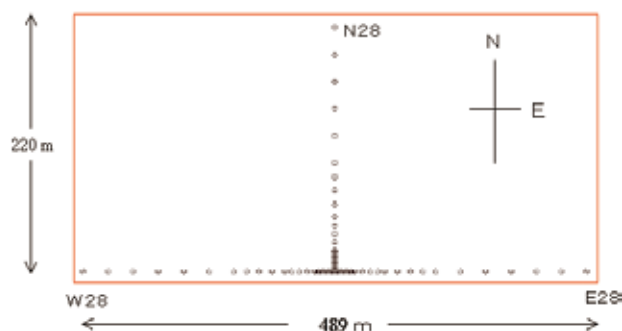


●11 野辺山電波ヘリオグラフの例

こうした、アンテナの並びと、 uv 平面との関係を理解するには、野辺山電波ヘリオグラフ（旧・野辺山太陽電波観測所＝現・名古屋大学管轄）は、視覚的にもたいへんわかりやすいシステムです。

太陽観測専用で作られた電波ヘリオグラフには、84基の口径80 cmのパラボラアンテナが、東西500 mに56基、南北220 mに28基、Tの字を逆さまにした形に並んでいます（図20）。

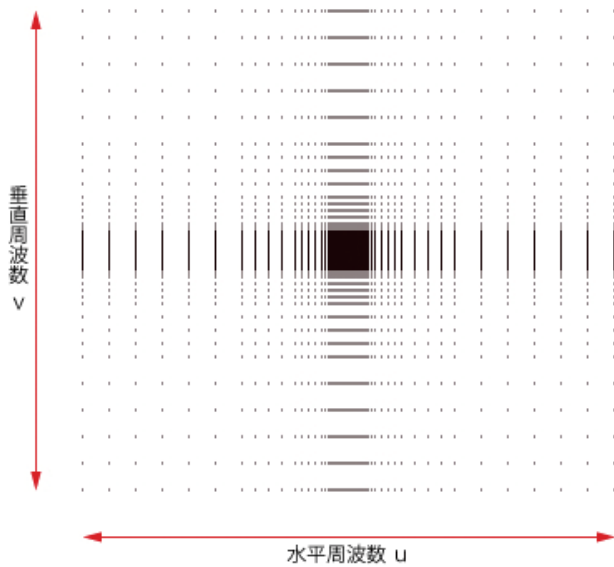
このアンテナ配置で、それぞれのアンテナが2つで一組となり、クロスパワースペクトルを取得した場合、そのクロスパワースペクトルの位置を uv 平面に示したものが図21です。



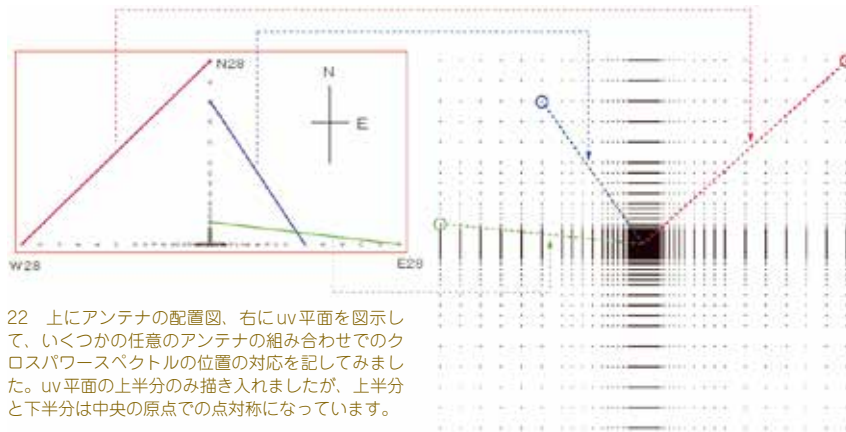
20 28基ずつ3方向に伸びるように並ぶ野辺山電波ヘリオグラフのパラボラアンテナの配置図。すべてのアンテナ間で干渉計を構成するので、(84×(84-1))÷2で、計3486対の干渉計が構成できます。

(※) クロスパワースペクトルの e の累乗項を式変形していくと空間周波数 u が現れます。

$$v_0(\tau_i - \tau_g) = v_0\tau_i - v_0\frac{D \cos \theta}{c} = v_0\tau_i - \frac{D \cos \theta}{\lambda} = v_0\tau_i - u$$



21 84基のアンテナで作るのuv平面 (uvマップとも呼ぶ)。クロスパワースペクトルが現れる位置を示しましたが、それでもかなり隙間が空いています。



22 上にアンテナの配置図、右にuv平面を図示して、いくつかの任意のアンテナの組み合わせでのクロスパワースペクトルの位置の対応を記してみました。uv平面の上半分のみ描き入れましたが、上半分と下半分は中央の原点での点対称になっています。



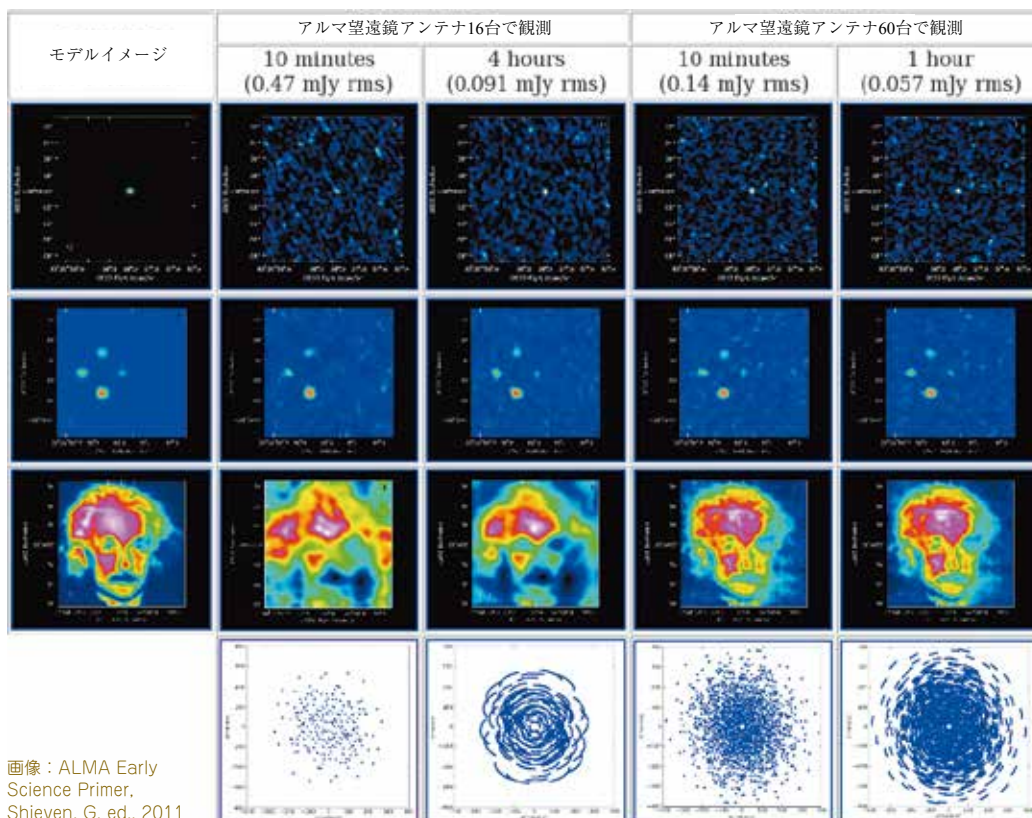
24 電波ヘリオグラフ。

アンテナの位置とクロスパワースペクトルの位置の関係は、次の図のようになります。任意のふたつのアンテナを選んで、その関係性を示しました (図22)。

クロスパワースペクトルを配置する位置は、任意のふたつのアンテナ間の距離から算出される空間周波数 u と角度がと角度がそのまま uv 平面上の位置に反映されます。また、一方のアンテナを原点に置くようにします。ちなみに、もう一方のアンテナを原点に置けば、原点と点対称にクロスパワースペクトルが位置すると考えることができます。空間領域の画像を空間周波数領域のスペクトルに変換したとき、 uv 平面の上下が原点対象であることが理解できるでしょう。

しかし、これだけのアンテナを並べても、 uv 平面上にクロスパワースペクトルを埋め尽くすことがむずかしいという現実があります。

そこで、さまざまな技術や手法を用い、不足しているクロスパワースペクトルの値を補完するなどして、 uv 平面全体を埋めて天体の電波画像を得ているのです。



23 アルマ望遠鏡で得られる天体の姿のシミュレーション。恒星だけの点像なら、アンテナ数と地球の自転によるふたつのアンテナの向きが変わる観測時間にかかわらず、比較的高い再現性を得られます。しかし、複雑な構造がある天体では、観測時間に関わらず、アンテナ数が多いほどより忠実に天体の姿を再現できます。もちろん、たくさんのクロスパワースペクトルを取得できるように観測時間が長いほど(地球の自転を利用)、構造が詳細にわかるようになります。

画像: ALMA Early Science Primer, Shieven, G. ed., 2011

●12 電波干渉計の分解能

電波干渉計の説明で、「電波干渉計を使えば、ふたつのアンテナ間の距離に匹敵する口径のアンテナと同等の解像度が得られる」などと記されているのをよく見かけます。これだけでは電波干渉計の本質を説明していることにはなりません。ふたつのアンテナ間の距離が大きくなるほど、空間周波数が大きくなって、細かい模様を再現するためのクロスパワースペクトルが取得できます。

それでは実際に、どの程度の分解能が得られるのでしょうか。

恒星のような点状で単一周波数の電波源が、アンテナの視野中央からふたつのアンテナを結ぶ方向に少しずれている場合を考えてみます。このとき、天体からそれぞれのアンテナへ電波が到達する時間は、幾何学的遅延に加え、わずかに遅延が起こります。時間のずれは、すなわち位相のずれでもあります。

電波源のアンテナの視野中心からの位置のずれ Δl が、どのくらいの位相のずれの $\Delta\varphi$ となるかは、

$$\Delta\varphi = 2\pi u \Delta l$$

という式で表されます。

この位置のずれは、空間周波数 u に依存していることがわ

かります。空間周波数 u は、数値が大きくなればそれだけ細かい縞模様の再現ができることを示します。それは模様のわずかな違いを検知できるということであり、つまりは高い分解能を実現していることになります。

ちなみに、干渉計の分解能は、

$$\theta \text{ (ラジアン)} \approx \lambda/L \quad L \text{ はアンテナの距離 (m)}$$

で示されます。これはすなわち、口径 L メートルの望遠鏡と同等の分解能を持つということに他なりません。

ただし、電波干渉計でのふたつのアンテナの距離が持つ意味は、**分解能というよりも空間周波数で示される一方向のみの大きさの模様の再現が可能であること**だといえるでしょう。したがって、天体の姿の全体像を得るためには、**多方向かつ、間隔の短いアンテナの組み合わせも必要**であるといえます。

アルマ望遠鏡の場合、解像度の高い部分は欧米の12mアンテナのアレイ（配置）が、さほど解像度の必要ない大きな模様を日本のACA（アタカマコンパクトアレイ）の7mアンテナが、さらに低い解像度や天体からの実際の放射量などは、12mアンテナを単独（干渉計ではなく）で利用するTP（トータルパワー）アレイにて観測しています。アンテナ間の距離を伸ばせば伸ばすほど分解能はあがるものの、天体の全体像を得るには、実はACAが欠かせないのです。



26 アルマ望遠鏡のACA（中央の密集した7mアンテナ群）と周囲の広い領域に配置される多くの12mアンテナ。

●終わりに

これまで筆者（川村）は、「電波干渉計は、ふたつのパラボラアンテナを組み合わせると、その距離を直径としたアンテナと同じ性能になる」という解説を聞くごとに、その仕組みをもっと詳しく知りたいと思ってきました。そして数年前、国立天文台ニュースの企画でアルマ望遠鏡の現地取材に行ったときに、自分で納得できる程度に電波干渉計の原理を正確に理解したいと強く思うようになりました。ほとんど知識ゼロからのスタートですが、そんな筆者が、どこまで理解できるかに挑戦してみようというのがこの記事のスタンスです。直感的に原理を理解しやすい光の望遠鏡とくらべて、電波干渉計がこれほど複雑なプロセスを経て観測に用いられているとは当初は思ってもいなかったもので、全体像を把握するには骨が折れました。そういう意味では、筆者の理解不足もあって正確な説明が欠けているところもまだ多いのですが、あとは読者のみなさんが個々に興味のある箇所や疑問点を調べて、より電波干渉計の理解を深めていくためのきっかけとなれば幸いです。

最後になりましたが、監修をいただいたアルマプロジェクトの永井 洋さん、平松正顕さん、ご協力いただいた太陽観測科学プロジェクトの篠原徳之さん、そして神戸大学大学院の黒木修隆先生にはたいへんお世話になりました。この場をお借りして御礼申し上げます。

2020年国立天文台カレンダーができました。

2020年国立天文台カレンダーができました。今回のテーマは野辺山宇宙電波観測所。第4回「野辺山観測所・星空撮影会」で撮影された作品をご紹介します（※台外発送分に同封）。



ふしらせ
NO.01

大型低温重力波望遠鏡KAGRAが完成、重力波望遠鏡3者による研究協定を締結

岐阜県飛騨市神岡町に建設が進められてきた大型低温重力波望遠鏡KAGRA（かぐら）がこのたび完成し、米国のLIGO（ライゴ）、欧州のVirgo（バーゴ）との研究協定を締結しました。これら主要な3者の重力波望遠鏡で同時観測することによって、重力波を発生させた天体をより正確に特定できるようになります。

KAGRAは、東京大学宇宙線研究所、高エネルギー加速器研究機構、自然科学研究機構 国立天文台を共同ホスト機関とした協力体制の下、富山大学をはじめとする国内外の研究機関・大学の研究者との共同で、2010年から進められてきたプロジェクトです。2019年4月、全ての機器の搬入、設置が完了し、現在、精密なレーザー干渉計として動作させるための調整や、検出感度を高めるための試験、調整を進めています。2019年内に重力波の観測運転を開始し、LIGO、Virgoとの共同観測を行う予定です。

このKAGRAの完成記念式典が2019年10月4日、岐阜県飛騨市神岡町にあるKAGRA坑内にて執り行われました。さらに同日、富山市内において、KAGRA、LIGO、Virgoとの間で研究協定調印式が



大型低温重力波望遠鏡KAGRA。真空ダクトが設置された3キロメートルの腕トンネル。左上は、2019年10月4日に行われた研究協定調印式。協定書への調印後に、固く握手を交わすVirgoプロジェクトのヨー・バンデンブランド代表、KAGRA研究代表者の梶田隆章 東京大学宇宙線研究所長、LIGOプロジェクトのデビット・ライツイ代表（左から）。（クレジット：国立天文台）

行われました。重力波天体は、複数の重力波望遠鏡で同時観測を行い、それぞれの望遠鏡に重力波が到達した時間差を利用してその位置を特定します。したがって、高い精度で特定するためには、多数

の重力波望遠鏡が観測に参加することが極めて重要です。2019年内に共同観測が行われますが、その間に重力波天体の検出とその正確な位置特定が実現できると期待が高まります。

編集後記

来年少生になる息子の就学時健診に行ってきました。「べんきょう（※面接のこと）がおもしろかった」と報告するも、何を聞かれたのかはさっぱり覚えていない息子。。。小学生になってからが大変そうです。(G)

初めてマレーシアに出張してきました。タイもそうですが天文学はこれから東南アジアがますます勢いを増しそうな予感がしました。(は)

先月のチリからの帰国は、夜間外出禁止令発令中。サンティアゴ空港に着いてみたら、米系航空会社の私の便は4時間繰り上げて出発済みでびっくり。現地職員が早く帰宅できるようにとのこと。いろいろなことが起きるものです。(I)

今年の「三鷹・星と宇宙の日2019」は、アルマ望遠鏡アンテナのサイズを実感するために12m実寸大の垂れ幕を用意。風が強くALMA棟の壁には吊るせませんでした。廊下に掲示したところ、私も含めてその大きさに改めて驚きました。(h)

ミーハーな私は今回ラグビーのわかファンになり、難解なルールの根底にある原則がわかってくると、その面白さにはまりました。こどもも週末はラグビーを見るのが当たり前になり、そして、ラグビーロス。(K)

10月、ニュージーランド、テカポに滞在。南天の素晴らしい星空も堪能できました。(W)

授業をしに鹿児島の上甕島の中学校へ。生徒は学校外でも大きな声で挨拶してくれます。とても気持ちいいものでした。自然豊かな美しい島でした。(e)

国立天文台ニュース
NAOJ NEWS

No.316 2019.11

ISSN 0915-8863

© 2019 NAOJ

(本誌記事の無断転載・放送を禁じます)

国立天文台ニュース編集委員会

●編集委員：小久保英一郎（委員長・天文シミュレーションプロジェクト）／渡部潤一（副委員長）／石井未来（TMT推進室）／秦和弘（水沢VLBI観測所）／勝川行雄（SOLAR-C準備室）／平松正顕（アルマプロジェクト）／伊藤哲也（先端技術センター）
●編集：天文情報センター出版室（高田裕行／ランドック・ラムゼイ）●デザイン：久保麻紀（天文情報センター）

★国立天文台ニュースに関するお問い合わせは、上記の電話あるいはFAXでお願いいたします。
なお、国立天文台ニュースは、<https://www.nao.ac.jp/naoj-news/>でもご覧いただけます。

発行日／2019年11月1日

発行／大学共同利用機関法人 自然科学研究機構
国立天文台ニュース編集委員会

〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1

TEL 0422-34-3958（出版室）

FAX 0422-34-3952（出版室）

国立天文台代表 TEL 0422-34-3600

質問電話 TEL 0422-34-3688

12月号は、今年で開所120周年を迎えた水沢VLBI観測所（旧緯度観測所）の記念記事として初代所長「木村 栄の生涯一前編」を送ります。2項の発見で名高い木村さんのその素に迫ります。お楽しみに！

次号予告



NAOJ
photo sketch

国立天文台

望遠鏡のある風景

野辺山宇宙電波観測所
「虹の向こうに」

撮影：野辺山宇宙電波観測所

20