入来の丘から

VERA 口径 20 m 電波望遠鏡による中性水素 21 cm 輝線の観測へ向けて

今井 裕 (鹿児島大学)

宇宙の元素組成の大部分を占める水素は、恒星に取り込まれたり、大部分が原子（中性）として星間空間を漂ったりします。このような中性水素（HI、エイチワン）から成る星間ガス雲は、波長 21 cm の超微細構造遷移スペクトル線源として観測されます。HI ガス雲は、可視光線で見える銀河円盤よりも遥かに広く銀河間空間にも及ぶ範囲まで分布していることが知られています。これら HI ガスが銀河へ降り積もり、次々と恒星を形成するための材料を提供しているはずです。しかし実際、このようなガスがどこからどのようにどの程度銀河へ降り積もるのか、そしてどのようにこれらガスから恒星を形成するのかについて、多くの未解決課題が残されています。

私達は現在、上記 HI 21 cm スペクトル線だけでなく、波長が近い水酸基（OH）18 cm 線を身近で高感度観測できるシステムの構築に取り組んでいます。その足掛かりとして、国立天文台 VERA 入来口径 20 m 電波望遠鏡のカセグレン焦点に HI 21 cm 線用受信システムの搭載を試行しています。この受信システムは、鹿児島大学理学部「理数インテンシブ教育プログラム」の「サイエンス・クラブ」と呼ばれる活動の一環として、当時の学部 1・2 年生が中心となって製作されました。既にその 50 cm 四方の正方形開口ホーン単独にて、天の川（銀河面）方向の 21 cm 線の観測に成功しています（図 1、2）。

もしこのシステムを 20 m 鏡のカセグレン焦点に搭載し、天体追尾観測ができれば、HI 21 cm 線や OH 18 cm 線を高感度で観測でき、強力なメーザー放射を伴う 18 cm 線については VLBI（超長基線電波干渉法）観測を通した高精度電波源位置計測（アストロメトリ）の実現につながります。「天の川銀河立体地図作成事業」を実施してきた VERA にとっても、この事業の新たな方式に基づく継承へとつながることになります。

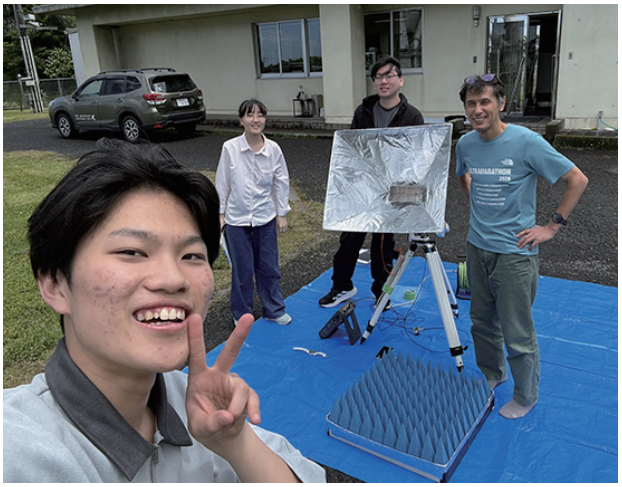


図 1 : サイエンス・クラブで作成された 21 cm 線観測システムを囲んだ測定チーム集合写真（2026 年 5 月 31 日 VERA 入来局にて撮影）。正方形開口ホーンおよび給電素子部は 2022 年に製作され、信号増幅部および電波分光部は、最近（2026 年 4 月以降）アップグレードされました。

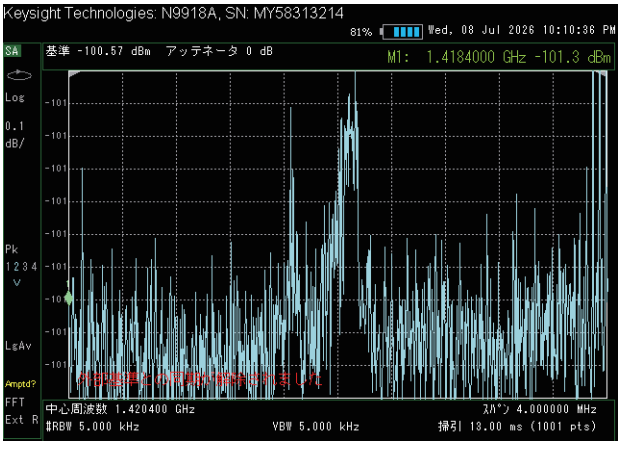


図 2 : サイエンス・クラブ 21 cm 線観測システムを用いた観測で取得した天の川方向における HI 21 cm 線スペクトル（2026 年 7 月 8 日データ取得）。HI 21 cm 線の静止周波数（1420.40575 MHz）のすぐ近く（表示しているスペクトルの中心周波数は 1420.400 MHz）に対象の輝線が見えている。周波数分解能は 5.0 KHz である。縦軸の目盛間隔は 0.1 dB である。

しかし現実は、非常に深刻な人工電波干渉（radio frequency interference=RFI や EMI=electromagnetic interference と呼ばれる）源が邪魔をして、50 cm 四方開口ホーン単独で検出できる 21 cm 線が VERA 20 m 鏡カセグレン焦点では全く検出できない状況です[注1]。14 cm 未満の波長帯では問題なく宇宙電波を観測できますが、波長がそれ以上の場合、この焦点は電波環境としては強力雑音にまみれた非常に厳しい条件となります。

この RFI/EMI をどのように解消するべきか / 解決できるのか。2026 年 7 月 11 日の計測（測定風景を図 3 に示す）によると、50 cm 四方開口ホーン単独ではシステム雑音温度が 200 K 程度だったのに対し、これを VERA 20 m 鏡カセグレン焦点に置くとシステム雑音温度が 1,100 K 程度[注2]に跳ね上がることが分かりました。この RFI/EMI は、多数の線スペクトルの集合だけでなく、連続スペクトル源から構成されていることが判明しました。当該測定地点付近で RFI/EMI 発生源として考え得るものとして、Ethernet 機器・スイッチング電源・FPGA を組み込んだアナログ—デジタル変換装置、等が挙げられます。20 m 鏡上部機器室のすぐ外では 21 cm 線を観測できる程度にこれら RFI/EMI は弱くなりますが、上部機器室内では金属の壁で多重反射されることもあり、RFI/EMI があらゆる方向から観測システムへ入射していることが考えられます。副鏡でも反射し、開口ホーンのほぼ真正面からも RFI/EMI が入射していることでしょう。

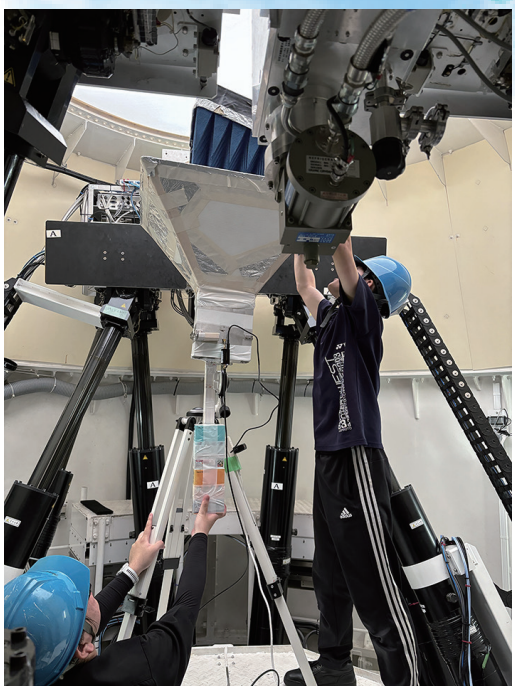


図 3 : VERA 20 m 電波望遠鏡上部機器室内における 21 cm 帯受信システム性能と RFI/EMI 強度の測定の様子。2026 年 7 月 11 日撮影。

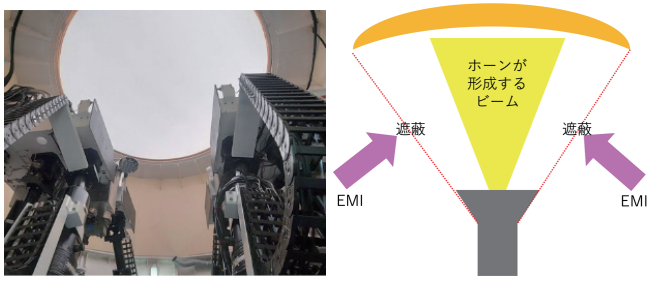


図 4 : 大掛かりな RFI/EMI 遮蔽機構の模式図。VERA 20 m 鏡による定常観測との切り替えも考慮すると、図のようには遮蔽用金網をフィドームには直接固定できない。そこで、フィドーム直径に相当するリング状枠とホーン根本の大きさ程度のリング状枠に（ほぼ扇状の）金網を縫い合わせるように固定しつつ、金網でできた円錐状構造物を図のように直立させる仕組みが必要だと考えられる。

注 1　口径 50 cm 正方形ホーンアンテナに比べ、VERA 20 m 鏡では解像度が上がる代わりに視野が狭くなるので、天球面で広がって分布する 21 cm 線のアンテナ温度は変化しない。従って、アンテナ温度に比べてシステム雑音温度を十分下げないと、21 cm 線が観測できない。

注 2　スペクトル線状の RFI が存在せず連続スペクトル状の RFI のみが存在する周波数範囲における数値。

問題の RFI/EMI が連続スペクトルの特性を持っている以上、特定波長帯だけを透過するノッチフィルタではこれらを遮蔽できません。開口ホーンの背後(つまり上部機器室中央部のいわゆる「お立ち台」、図 3）から上部機器室天井部（宇宙電波観測が入射するフィドームを除く）まで遮蔽する大掛かりな遮蔽機構の検討も必要かもしれません（図 4)。ほぼすべての RFI/EMI が特定機器からのものであれば、それだけを遮蔽することにより問題が軽減されるかもしれません。

今日の日本における電波天文学では、ALMA（アタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計）や EAVN（東アジア VLBI 干渉計）等の最新高性能観測システムを使った観測を提案・実行し、まだ誰も見たこともない天体や現象を発見したり、過去からの疑問を解明したりすることに魅力や野心を抱く研究者が多くいます。これら装置では、波長 10 cm 未満の電波(ミリ波など）を主に観測します。

その一方で、HI 21 cm 線に代表される長波長側での電波天文学もまた、日本で注目を集めつつあります。Square Kilometre Array（SKA）など次世代大型観測装置はこのような波長をカバーし、今まさに建設・立ち上げ中の段階にあります。私達は、SKA を単体としてだけでなく、別途遠隔望遠鏡も立ち上げて VLBI システムの一部としても使うような観測の実施を目指しています。その為に、従来未整備の長波長（>10 cm）帯観測システムをほぼゼロから構築・立ち上げることに取り組んでいます。しかし、この記事に見られる RFI/EMI を含め、今まで直面してこなかった問題を直視し、アイデアを凝らしてこれらを克服していく必要があります。これらの取り組みから天文学研究成果を挙げる段階へ達するのは程遠いかもしれません。しかし、「もの作り」や「もの測り」(天の川銀河研究センターニュース No.8 記事参照のこと）の楽しさやそこで身に付く汎用的なスキルもまた、貴重なものになるはずで、多くの学生・大学院生がこの取り組みを通し賢く・たくましくなっていくことを期待するところです。

謝辞：一連の HI 21 cm 線データの取得および鹿児島大学郡元キャンパス /VERA 入来局における RFI/EMI 測定は、川上香好翔 (かいと) さん (鹿児島大学 M1)、高坂ほのかさん (同 B4)、橋本煌佑さん (同 B3) が中心となって行いました。現在行われているサイエンスクラブの備品のうち、信号増幅器と RTL-SDR ドングル（受信機）を新永浩子さん（天の川銀河研究センター）から拝借しました。また、過去や現在の 21 cm 帯測定から得たノウハウについては、藏原昴平さん（名古屋大学）や中西裕之さん（石川県立大学、元天の川銀河研究センター）から助言・機材提供を頂きました。VERA 入来 20 m 電波望遠鏡への（18 cm—）21 cm 帯観測システムの搭載に関し、中川亜紀治さん（天の川銀河研究センター）はじめ、水沢 VLBI 観測所の皆さんからご支援を頂いております。この場をお借りして、皆さんへ御礼申し上げます。