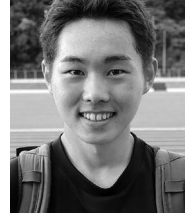


自作卓上ホーンアンテナとソフトウェア無線機を用いた中性水素21 cm輝線の検出



谷 敷 怜 空

〈豊田工業高等専門学校電気・電子システム工学科 〒471-8525 愛知県豊田市栄生町 2-1〉
 e-mail: 72138@toyota.kosen-ac.jp

近年、安価で高性能の低雑音増幅器，ソフトウェア無線受信機（SDR）の普及，またデータ通信速度および記録容量の増大により，アマチュア無線技術を用いての天体観測が手軽に行えるようになってきている．今回は17歳の工業高等専門学校生がイギリス・マンチェスター近郊のSKA 観測所本部を訪問し，SKA 観測所の研究者による指導の下でキャンプマット（銀マット）とアンテナを用いた自作電波望遠鏡で，SDRにより天の川銀河由来の中性水素21 cm輝線の検出に成功したので報告する．このような簡単な電波望遠鏡は，観測装置の立ち上げ，天体観測，データの解析までの一連の流れを学ぶのに際して，適切な教材になりえるであろう．

1. はじめに

天の川銀河には恒星だけではなく，星間物質と呼ばれる塵やガスが存在している．星間物質の中で中性水素原子ガスは，最も豊富に存在するガスである．中性水素は陽子と電子からなり，両者のスピンの向きが平行か反平行かで微小なエネルギー準位差が発生する．これを超微細構造と呼ぶ（図1）．このエネルギー準位差によって放射される電磁波の周波数は $f=1420.405$ MHzであり，波長は $\lambda=21.106$ cmとなる．このような中性水素の基底状態の超微細構造に伴う放射を水素21 cm輝線と呼ぶ [1]．水素21 cm輝線は水素原子が観測者に対して運動していると，ドップラー効果により観測周波数が水素原子ガスの速度に応じて変化する．可視光領域では星間物質による減光の影響を受けやすいが，電波ではその影響を受けにくい．そのため，水素原子ガスの詳しい分布や運動の様子を調べることができる [2]．今回は著者がイギリス・マンチェスター近郊のSKA（Square Kilometre Ar-

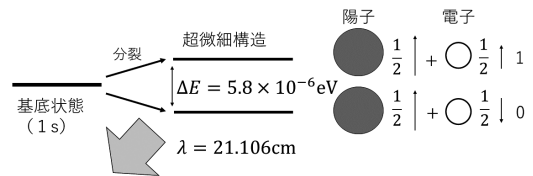


図1 基底状態の水素原子のエネルギー準位が分裂することによって超微細構造が生じる．スピン平行の状態と反平行の状態の2準位間のエネルギーの差は $\Delta E=5.8 \times 10^{-6}$ eVであり，このエネルギーに対応する電磁波の波長は21 cmである [1]．

ray) 観測所を訪問し，SKA 観測所（SKAO）の研究者による指導の下でキャンプマット（銀マット）とソフトウェア無線受信機（SDR）を用いた簡単な自作電波望遠鏡を製作し，その望遠鏡を用いて銀河系由来の水素21 cm輝線の検出に成功したので報告する．製作に必要な物品はインターネット通販で調達することが可能である．17歳の学生が適切な指導の下に製作から立ち上げまでを半日で行い，校正データを取得する方法と周波数スイッチ法の両手法での検出に成功することができた．

2. 観測装置

指導を受けた観測装置および観測手法は、マンチェスター大学名誉教授の Peter Wilkinson 氏による、Development in Africa with Radio Astronomy (DARA) プロジェクト [3] で用いられた物がベースとなっている。図2に観測システムのブロック図を示す。システムは、アンテナ部、受信部、データ取得部に分けられる。アンテナ部は円錐ホーンアンテナとカンテナから構成される。円錐ホーンは開口部の直径が30 cmでビームサイズは約40°である。カンテナとは、ホーンアンテナの導波管部に空き缶を使ったものである。受信部は、市販の水素21 cm輝線検出用に開発されたモジュールNooElec SAWbird+H1m [4] と低雑音アンプSPF5189Zで構成されていた。SAWbirdは2つの低雑音アンプとBand Pass Filter (BPF) からなるモジュールである。データ取得部はSDRとWindowsノートPCからなる。SDRは2.048 MHzでサンプリングし、中心周波数1420.406 MHzの複素電圧データを8ビット符号なし整数でUSBを介してノートPCのハードディスクに書き出しているとのことであった。複素数データは $I+jQ$ と表されるが、 I 値と Q 値はそれぞれ0から255まで変化し、 I と Q の各値から127.5を引いて、 $-127.5\sim+127.5$ の範囲に変換し、複素データをFFT（高速フーリエ変換）し、パワースペクトルを得るとの説明を受けた。

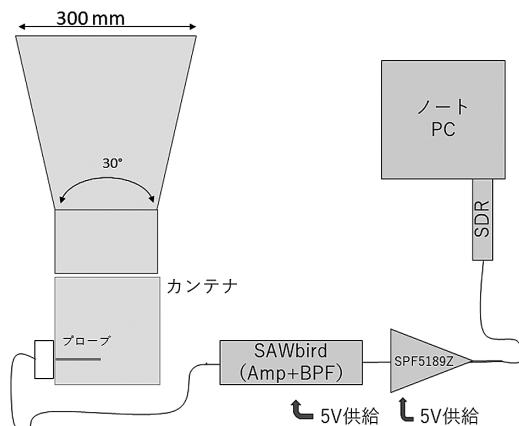


図2 観測システムブロック図。

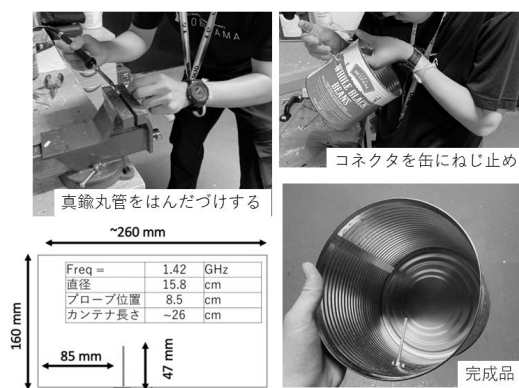


図3 カンテナ作成の様子。簡単な工作のみで製作が可能である。

3. 手作り望遠鏡作成

望遠鏡の作成（とくにカンテナとホーンアンテナ）について説明する。図3にカンテナ作成の様子を示す。カンテナ用の空き缶はSKAOの食堂から提供してもらった直径~160 mmの業務用食缶を用いた。受信用の元素は直径3 mmの真鍮丸管で、缶の内壁からの長さは47 mmである。設置位置は缶の底面から85 mmで製作した。カンテナの作成手順は以下の手順で行った。

- 1) 缶の底面から85 mmの位置にSMAコネクタが通る大きさの穴をあけた。
- 2) 穴にSMAコネクタを挿入し、それを参考にねじ穴をあけた。この時グランドを取るため穴の周りの紙を剥いだ。
- 3) 直径3 mmの真鍮丸管を長さ47 mmに切断しSMAコネクタをはんだ付けした。
- 4) SMAコネクタを缶に開けた穴に挿入し、ねじで固定した。

続いてホーンアンテナの作成について説明する。今回はキャンプマット（銀マット）を材料として製作した。寸法、製作の過程を図4に示す。製作したカンテナの直径（~160 mm）に適合す

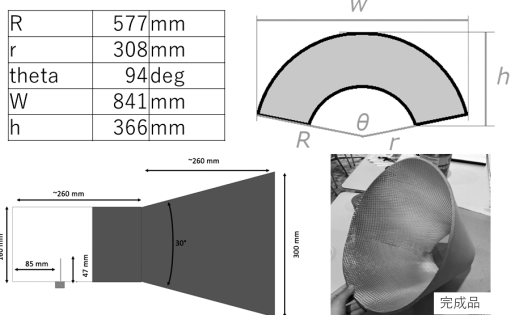


図4 ホーンアンテナ. 段ボールで型紙を作ったのちにその型紙にそってマットを裁断した.

るように製作した. 今回はキャンプマットを材料として製作したが, 段ボールにアルミホイルを張って製作したり, バルーンでホーンの形を作ったりして製作することもできるとの話を伺った. ホーンの製作に関しては工夫(面白いものをめざして)の余地があると感じた. キャンプマットの表面のアルミ箔の品質が電磁波の損失に影響を及ぼすため, 段ボールに食品用アルミホイルを貼って製作されたホーンを用いた方が感度が良いとの助言を得た.

4. 銀河面の観測

このようにして作成された電波望遠鏡で銀河面の観測を行った. 観測日時は現地時間2023年7月28日AM10:00 (BST)で, 観測方向は銀経 $l=180^\circ$ とした. 観測セットアップは観測システムブロック図と同じものである. 実際の観測セットアップは図5に示す. 観測したい銀経 180° の方位角 (Az), 仰角 (El) を調べて, スマートフォンのコンパスとレベルアプリでアンテナの位置合わせを行った. 位置合わせは, ビーム幅が約 40° と大きく, およそ 5° 程度の精度で十分だったので, 段ボール箱と書籍を用いて行った. ホーンの直径を大きくし, ビームを絞っていく場合はより正確な位置合わせが必要になるだろう. たまたま職場体験でSKAOを訪問していた現地の高校生と一緒に観測を行うことができた. 現地

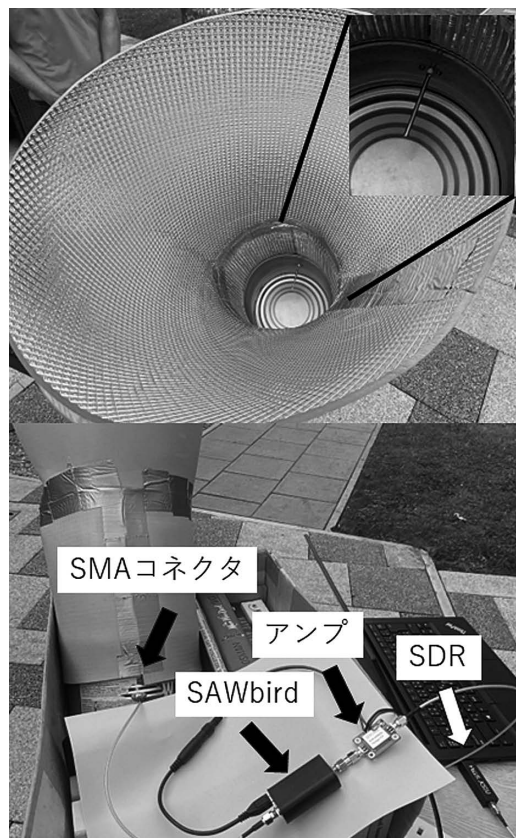


図5 上図がホーンを正面から見た様子. モノポールアンテナが見える. 下図は実際の観測セットアップである.

の高校生とともに自分の手でくみ上げた観測装置で観測することができたことはとても素晴らしい体験となった.

観測の手順は以下の通りであった. 取得されるパワースペクトルには, 観測システム自身がつくるノイズからの寄与が含まれる. そのため受信部の入力に黒体とみなせる電波終端を取り付けて校正データを取得した(図6上段). その後, 電波終端を取り外し, ホーンアンテナを受信部に接続して銀河面データを取得した(図6中段). 図中の楕円で囲まれた部分が銀河面の中性水素原子からの21 cm信号成分である. この銀河面データを校正データで割り, 縦軸を温度スケールに変換するために295 K (22°C) を乗じ, 横軸を周波数に

変換してスペクトルを得た（図6下段）。スペクトルの中心が1420.4 MHz付近に存在していることを確認した。

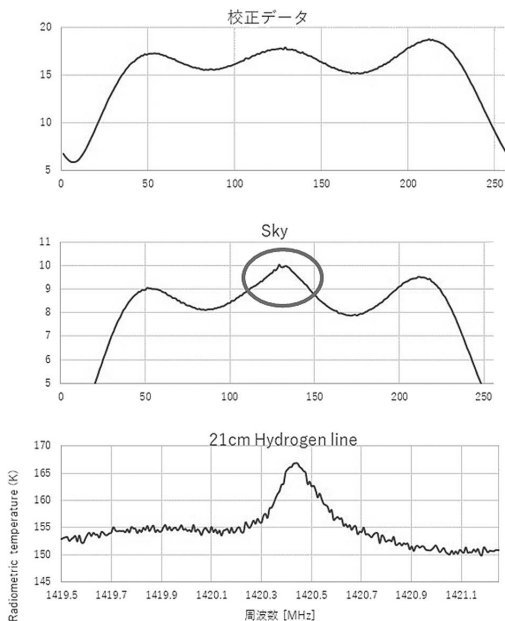


図6 観測によって取得されたデータ。上から順に、校正データ，銀河面データ，検出されたスペクトルである。

実際に水素原子ガスの視線速度を求める際には、地球の自転と公転に対する動きを考慮し補正を行う必要がある。局所静止基準に対する我々観測者の速度を求める必要がある。今回は、NRAOのグリーンバンク100 m望遠鏡での補正計算ツール [5] を用いて計算した。地球上での観測者の位置による違い（アメリカ・ウェストヴァージニアとイギリス・マンチェスター）は、今回のデータ解析実習では無視できる大きさであるとのことであった。図7に局所静止基準の補正を加えた後のスペクトルを示す。補正後の視線速

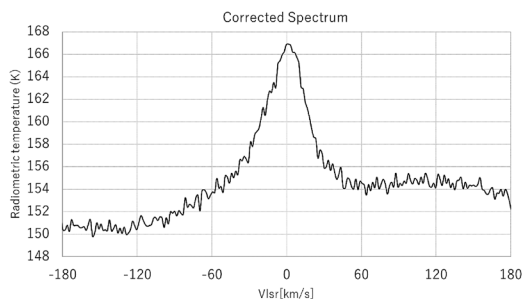


図7 局所静止基準の補正を加えたのちのスペクトル。補正後のスペクトルの中心速度が0であることが分かる。

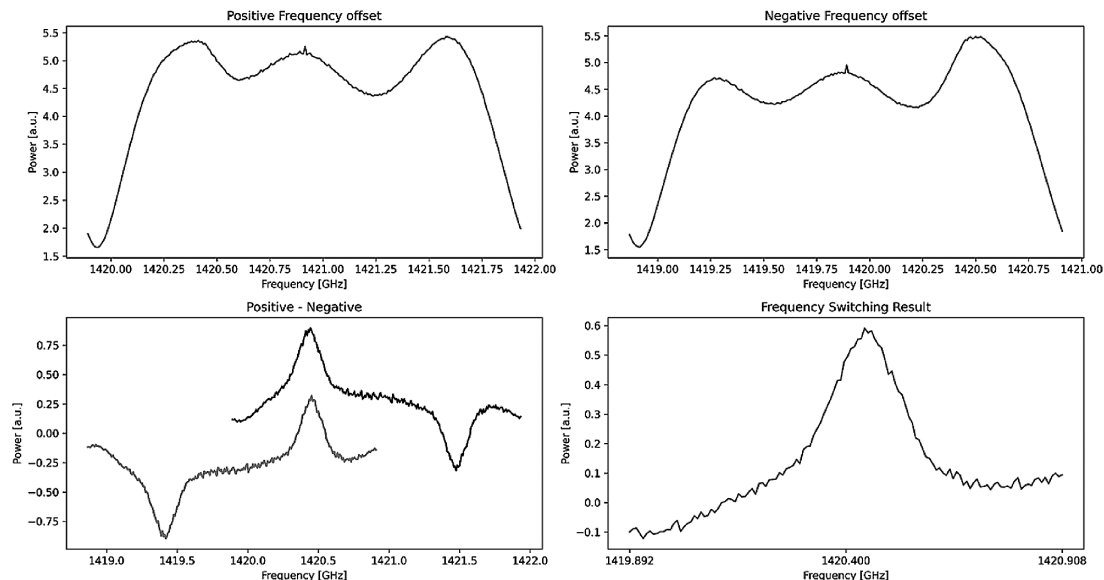


図8 周波数スイッチ法によって得られたスペクトル。左上が中心周波数1419.888 MHz, 右上が中心周波数1420.912 MHz, 左下で両者のデータを差をとっている。右下が周波数スイッチ法によって得られたスペクトルである。

度のスペクトルの中心速度がほぼ0になっていることを確認した。今回観測した、銀経 $l=180^\circ$ の方向には赤方偏移も青方偏移もないと予想されるので（視線に垂直な運動）、このスペクトルが天の川銀河由来のものであると確認できた。

これまでは天体の観測データから校正データを用いてスペクトルを得ていたが、今度は目標周波数からずらした2つの異なる周波数での観測を行い、両者の差をとることでスペクトルを得る周波数スイッチ法を試みることになった。具体的には中心周波数は、1420.912 MHzと1419.888 MHzで観測を行った後、2つの観測データの差を求めた。引き算側の出力は、強度の正負が逆転して記録されているため、出力は強度の符号を反転させる必要があるとのことであった。これら観測周波数設定の違いを考慮した上で平均化しスペクトル線を検出した。図8に周波数スイッチ法によって得られたデータを示す。左上が中心周波数1419.888 MHz、右上が中心周波数1420.912 MHz、右下が周波数スイッチ法によって得られたスペクトルである。このようにして、自作電波望遠鏡において周波数スイッチ法を用いてもスペクトルを取得できることが体験できた。

5. おわりに

このようにして、キャンプマットとSDRを用いた自作電波望遠鏡で銀河系由来の水素21 cm輝線を検出することに成功した。17歳の工業高等専門学校生が適切な指導の下、おおよそ半日で電波望遠鏡の立ち上げから検出までを行うことができた。また望遠鏡の材料はどれもネットショッピングサイトで購入可能であり、必要な工作も簡単なものばかりである。このような簡単な電波望遠鏡は、観測装置の立ち上げ、観測、データの解析までの一連の流れを学ぶのに際して、適切な教材になりえると感じた。また、天文学と技術のつながり、社会に与える影響をも伝えていけるだろう。今後は、こういった簡単な自作電波望遠鏡の

普及に努めていきたい。

謝 辞

指導していただいたSKAOの浅山信一郎さんには終始適切なご指導を賜りました。ここに深謝の意を表します。今回のSKAO訪問は、日本にいる両親、留学先のスイスにおけるホストファミリー、AFS Switzerlandの職員の皆さん、そして公益財団法人AFS日本協会の皆さんの協力なしには実現しませんでした。またSKAOの職員の皆様のご協力がなければ今回の実験を行うことはできませんでした。この場を借りてすべての皆様にお礼を申し上げます。

参考文献

- [1] 島袋隼士, 2016, 天文月報, 109, 780
- [2] 福井康夫ほか編, 2008, シリーズ現代の天文学6 星間物質と星形成 (日本評論社)
- [3] <https://www.dara-project.org/>
- [4] <https://www.nooelec.com/datasheets/100811>
- [5] https://www.gb.nrao.edu/~fghigo/gbt/setups/radvel_calc.html

Detection of the Hydrogen 21 cm Emission Line with a Handmade Horn Antenna and SDR

Riku YASHIKI

National Institute of Technology, Toyota College,
Department of Electrical and Electronic Engineering,
2-1 Eiseicho, Toyota, Aichi 471-8525, Japan

Abstract: Recent information and communication technology advancements have enabled amateur radio astronomy. A high school student who was 17 years old visited the headquarters of the SKA Observatory (SKAO) and detected 21 cm emission lines from the Milky Way Galaxy with a simple home-built radio telescope under the guidance of an SKAO researcher. This telescope was built in a half-day. Such simple home-built radio telescopes can be useful for outreach and education.