

海外特別研究員最終報告書

独立行政法人日本学術振興会 理事長 殿

採用年度 2019

受付番号 201960039

氏名

吉浦伸太郎

(氏名は必ず自署すること)

海外特別研究員としての派遣期間を終了しましたので、下記のとおり報告いたします。

なお、下記及び別紙記載の内容については相違ありません。

記

1. 用務地（派遣先国名）用務地：メルボルン（国名：オーストラリア）
2. 研究課題名（和文）※研究課題名は申請時のものと変わらないように記載すること。
宇宙再電離期21cm線の掃天観測と疎性モデリングによる前景放射除去法の開発
3. 派遣期間：平成・令和 31 年 4 月 1 日 ~ 令和 2 年 12 月 1 日
4. 受入機関名及び部局名
受入機関名：メルボルン大学 (The University of Melbourne)
部局名：School of Physics
5. 所期の目的の遂行状況及び成果…書式任意 **書式任意 (A4 判相当 3 ページ以上、英語で記入も可)**
(研究・調査実施状況及びその成果の発表・関係学会への参加状況等)
(注)「6. 研究発表」以降については様式 10-別紙 1~4 に記入の上、併せて提出すること。

背景と目的

ビッグバン後の初期の宇宙は中世水素のガスで満たされている。構造形成に伴って宇宙の初期に初代星形成や銀河形成が起こり、それに伴って放射された紫外線光子が周囲の水素を電離したと考えられている。この時代を宇宙再電離期と呼ぶ。当時の水素の分布には天体放射由来の非一様性が生じるため、当時の中性水素の超微細構造線である21cm線を観測できれば、初代星や銀河進化を探る上で非常に有効であると考えられている。しかし、21cm線の電波は非常に微弱であり、3桁以上明るい銀河系や系外銀河のシンクロトロン放射などによる前景放射によって覆い隠されてしまう。さらに、装置のキャリブレーション由来の誤差が前景放射の滑らかなスペクトルに揺らぎを与えることで、21cm線の検出を強く妨げている。そのため、21cm線の観測には精密な電波観測と前景放射除去が必須である。本研究の目的は宇宙再電離期の21cm線観測の障害となる前景放射除去の手法を開発することにある。

各研究の具体的な状況及び成果

所期の計画では前景放射除去のために、疎性モデリングの解を推定する手法を学び、ビジビリティから前景放射を取り出すコードの開発を行予定であった。疎性モデリングを基にした基礎的なコードの開発は行い、いくつかのデータに対して適応したものの、十分な性能を示さなかった。この結果を受け、データ解析の専門家との議論ののち、観測データは予想以上に装置や解析の系統誤差の影響を受けて周波数方向への滑らかさを失っているため、さらなる工夫が必要である可能性が出てきた。観測されたビジビリティは装置や解析、モデル化の困難な前景放射の影響を受けている。例えば、低周波観測では電離層による位相の誤差が問題になる。人工電波やビームの影響も多大である。そこで、目的の達成のために、まずは観測データの装置や解析由来の系統誤差の検証を十分に行う必要があると判断した。MWAの15時間分のデータセットを解析し、地球の電離層、ビームの周波数依存性、人工電波による汚染具合、銀河系放射の影響などの影響を明らかにした。また、前景放射軽減のための相互相関手法の開発や宇宙再電離期に予測される21cm線への初期パワースペクトルへの影響の調査も行った。各研究の詳細は以下で述べる。

(1)MWAの超低周波観測データの解析

(中間報告書より一部抜粋、修正)

前景放射を適切に除去する上で、装置や解析のさらなる理解が必要であることがわかったため、キャリブレーションに伴う困難の理解を深めるために、メルボルン大学のBart Pindor博士との共同研究として、MWA超低周波データの解析を行った。MWAの超低周波データは75MHzから100MHzの周波数幅で、再電離期以前の宇宙の夜明けと呼ばれる時代の21cm線の周波数に相当する。この周波数帯での電波観測では高周波の観測以上に熱雑音や電離層、巨大なビームの影響が強いため、キャリブレーションや装置の系統的な誤差を理解する上で有用である。さらに、超低周波の

観測はEDGESの21cm線検出報告以来その検証に強い関心が寄せられており、この周波数帯の研究に着手するのは非常に重要である。

本研究では以下の系統誤差を調査した。(i)最新の人工電波検出ソフトウェアであるSSINSを用いて、観測データのうち人工電波に汚染されたデータの検出を行った。(ii)この周波数帯[75-100MHz]ではビームのサイズが大きく変動するため、周波数によってデータに寄与する電波源が大きく変動する。そこで、前景放射除去に用いる電波カタログの作成を最適化し、前景放射除去の効果を向上させた。また、408MHz帯の全天電波シグナルとMWAのビームモデルを用いて、銀河系の放射が観測方向によってどのように変動するかを明らかにし、データとの比較を行った。(iii)キャリブレーションソフトウェアRTSでは視野の明るい天体に対して個別にキャリブレーションを行うが、キャリブレーションの誤差がバンドごとに揺らぎを作ってしまうため、前景放射除去後に強い残渣を残すことがわかった。そこで、個別にキャリブレーションに用いる天体数を減らすことで、前景放射の寄与を1桁ほど低減した。(iv)電離層のズレがキャリブレーションモデルと観測量との解離を生むため、間違ったモデルでのキャリブレーションが行われてしまう。そこで、一旦電離層を各天体の方向で計測し、その情報を元にキャリブレーションのモデルを更新することで、エラーを軽減した。

最終的に15時間分のデータを元に系統誤差クリーンな6時間分のデータを取り出し、これまで得られていたパワースペクトルの上限を1桁改善した。本研究の結果は国内外の学会で発表し、論文として本年度中に投稿予定である。

(2)電離層の影響と解析の精度の検証

(中間報告書より一部抜粋、修正)

前述のように地球の電離層は系外電波源の電磁波に遅延(屈折)を引き起こし、電波源の見かけの位置を変えてしまう。もし、この電離層の影響を補正せずに電波源を差し引いてしまうと、その残渣が残り続け、21cm線の観測に影響を及ぼす。本研究では、MWAのデータ解析ソフトウェアであるRTSで行われている電離層補正の方法を理解・改善することで、前景放射除去の効率を向上させることを目的とする。また、RTSで行われている電離層補正の精度は解析的にしか確かめられておらず、実験的に検証する必要がある。そこで、RTSに供えられている観測シミュレーションモードのソースコードを書き換え、電離層の影響を取り入れることで、RTSの精度を検証する。

検証の結果、ノイズの影響で0.1Jy程度の電波源に関しては電離層の補正がうまくいっていないことがわかった。ここでノイズになっているのは熱雑音に加えて、対象天体以外の暗い天体のサイドローブが作る揺らぎである。熱雑音の影響ならば、時間積分することで精度を向上させることができる。一方、サイドローブの揺らぎは独立な基線長の情報が必要になる。電離層変動のタイムスケール(数秒から数分)で基線を増やすのは容易ではないので、さらなる電離層補正の方法が必要になる。さらに、超低周波データ解析で明らかにしたように、電離層による天体の見かけの位置のズレはキャリブレーションの結果に影響を及ぼす。そこで、キャリブレーションを2回行い、間にキャリブレーションモデル中の天体位置の更新を行うことで、ゲインを改善することができた。この改善でパワースペクトルにして系統誤差が1.5倍程度軽減した。この影響は低周波ほど大きいですが、高周波側(167MHz付近)の観測でも同様のことが起こる可能性がある。特に電離層の活動が大きいデータにおいて、今回の方法は将来の電波観測キャリブレーションの精度向上が期待できる。

(3)21cm線グローバルシグナル観測による宇宙の初期パワースペクトルへの制限 (中間報告書より一部抜粋、修正)

21cm線グローバルシグナル観測装置であるEDGESによって、赤方偏移17.8の時代に強い21cm線の吸収線が存在することが示唆されている。この吸収線は従来の理論モデルでは説明できず、他の影響、例えば強い背景電波源の存在や特殊な相互作用を行うダークマターの存在が議論されている。ただし、この検出はEDGES一例のみであり、特に吸収線の強度に関しては観測や解析の系統誤差の可能性が否めない。一方で、この赤方偏移に吸収線が存在するならば、それよりも過去に水素ガスのスピン温度とガスの運動温度を結びつける天体がある初期条件から生成されたことを示唆する。本研究では宇宙の初期揺らぎ(曲率揺らぎ)のパワースペクトルが標準的なモデルに比べて強いようなモデルを、21cm線の吸収線から制限できるかどうかを調べた。具体的には数値計算コード(21cmFAST)を用いて、様々な初期パワースペクトルの元で吸収線がどう変化するかを調べた。天体物理の影響による不定性はあるが、初期パワースペクトルに対して $k > 10$ [Mpc]のスケールで、これまでの研究で得られているよりも数桁強い制限が得られることを示した。この結果はすでに論文にまとめられ、Physical Review Dに掲載された。

(4)UV光度関数を用いた宇宙の初期パワースペクトルへの制限

前述(3)で明らかにしたように、宇宙の初期パワースペクトルの値はダークマターの質量関数、ひいては銀河UV光度関数の形状に大きな影響を及ぼし、最終的に21cm線の進化を決定する。そこで、本研究ではすでにハッブル望遠鏡で観測されている高赤方偏移の銀河UV光度関数を用いて、初期パワースペクトルの強さに初めて制限を与えた。まず、初期パワースペクトルからUV光度関数を計算し、マルコフモンテカルロ法を用いてパラメータ推定を行うコードを開発した。このコードを用いて、 $10 < k < 1000$ [Mpc]のスケールでこれまで得られてきた上限に比べて1桁程度強い上限値を得ることができた。この結果は論文としてまとめられPhysical Review Dに掲載された。

(5)機械学習を用いたライマンアルファ輝線銀河からの21cm線の推定 (中間報告書より一部抜粋、修正)

21cm線観測に伴う系統誤差や前景放射の影響を取り除く上で有効な手法として、他の観測量との相互相関がある。たとえば、銀河は中性水素の電離源と考えられるから、銀河の周りでは21cm線は暗くなる。そのため、銀河の空間分布と21cm線の間には負の相関が期待される。例えば、21cm線とライマンアルファ輝線銀河(LAE)の相互相関が有力であるとされている。本研究では21cm線の分布をLAEの分布から推定することを試みた。この際、画像から画像への写像を模倣する機械学習に基づいたソフトウェアを使用した。ネットワークの作成にはシミュレーションの結果を用いて、700枚の訓練データを作成した。この研究で、機械学習をもちいた画像推定を行うことで、 $k=0.1$ [Mpc]の大スケールにおいてLAEの空間分布から21cm線の分布の推定が可能であること、推定した21cm線と観測される21cm線の検出が新しい相互相関の手法となり得ることを示した。この方法によって、観測されているLAEから21cm線の分布を予測し、MWAやSKAの観測データとの相互相関をとることができる。相互相関によって前景放射のさらなる低減が期待できる。また、前

景放射除去後の21cm線シグナルの検証が可能である。この結果は後述のSKA-Japanシンポジウムで発表されている。また、この結果は論文にまとめられ、現在投稿中である。

まとめ

今回の期間で宇宙再電離期の21cm線検出のために前景放射除去方法の開発やMWA観測データの解析に取り組んだ。当初想定していた前景放射除去の方法は観測に伴う系統誤差の影響を受け大きな残渣を残してしまった。そこで、ソフトウェアの改善を目指し、21cm線観測に伴う理解を深めるため、超低周波観測の解析に取り組み電離層や人工電波の影響を明らかにした。この研究でこれまでのパワースペクトルへの上限値を更新することに成功した。また、前景放射低減の手法として深層学習を用いた21cm線の予測画像との相互相関を提案し、MWAで検出可能であることを示した。新型コロナウイルスに伴う都市封鎖などの影響で当初の目的を完全に達成することはできなかったものの、将来の21cm線観測のデータ解析を改善する上で有用になる成果と経験を得ることができた。

新型コロナウイルスの研究活動への影響:

2020年3月以降、新型コロナウイルスの感染拡大に伴って研究活動に大きな影響が生じた。まず、国際航空線の休止や国境の封鎖に伴い、予定していた学会や研究打ち合わせへの参加ができなかった。また、特にオーストラリアのメルボルンでは世界で最も厳しい都市封鎖が半年間にわたって行われ、不要不急の外出の制限や違反者への罰金を伴う罰則など大変厳しい状況にあった。また、それに伴う大学の封鎖が3月から12月現在も続いており、在宅での研究を余儀なくされた。さらに、4月以降大学の計算機に故障が起き、アクセスを失うことになった。この計算機へのアクセスは今も復旧していない。このような中でも遠隔での議論は行われていたものの、対面での議論や学会の中止は進捗へ著しく影響した。

論文・学会発表状況

論文: (投稿中・投稿予定のものを含む)

- ・21cm線グローバルシグナル観測による宇宙の初期パワースペクトルへの制限については論文にまとめられ、Physical Review Dへ掲載された。
- ・UV光度関数を用いた宇宙の初期パワースペクトルへの制限についての論文がPhysical Review Dで出版された。
- ・機械学習を用いたライマンアルファ輝線銀河からの21cm線の推定について、論文にまとめられ、現在投稿中である。
- ・MWA超低周波観測の研究に関する論文を作成し、現在投稿準備中である。
- ・その他8本の共著論文が2年間の間に出版された。

学会発表:

- ・オーストラリア、ケアンズのフィッツロイ島で開かれた国際会議 BAREFOOT REIONIZATION: EXPLORING THE FIRST BILLION YEARS OF THE UNIVERSE(14th July 2019-19th July 2019)に参加し、超低周波観測データのバイスペクトル解析についてポスター発表を行った。

- ・東京三鷹の国立天文台で開かれたSKA-Japan シンポジウム(2019/9/2 -2020/9/6) にオンラインで参加し、口頭発表を行った。
- ・アメリカ、テンピのアリゾナ大学で開かれた6th Annual Science At Low Frequencies (Conference December 9-11, 2019)に参加し、超低周波観測データの途中解析結果についてポスター 発表を行った。また、同地で開かれたMWA Project Meeting(December 12, 2019)に参加し、超低周波観測データの解析について口頭発表を行った。
- ・オンライン開催の国際会議Sazerac(2020/7/6-2020/7/9)にて録画口頭講演を行った。
- ・オンライン開催の観測的宇宙論ワークショップ(2020/11/10-2020/11/12) にて超低周波の解析結果について口頭発表を行った。
- ・オンライン開催の7th Annual Science At Low Frequencies (SALF) (2020/12/1-2020/12/4)にてにて超低周波の解析結果に関して口頭発表 を行った。