

日本天文学会早川幸男基金による渡航報告書

Shocking Supernovae: surrounding interactions and unusual events

氏 名: 大内竜馬 (京都大学D1 (渡航当時))

渡航先: スウェーデン・ストックホルム

期 間: 2018年5月26日~6月3日

今回私は、2018年5月28日から6月1日にかけてスウェーデンのストックホルムで開催された“Shocking Supernovae: surrounding interactions and unusual events”という研究会議に参加し、“The effect of continuous energy deposition in the envelope on its dynamical behavior and mass loss.”というタイトルでポスター発表を行いました。本研究会は、超新星爆発の衝撃波と星周物質の相互作用に関する様々なトピックを紹介、議論するものであり、100人超が参加した大規模な会議でした。本会議において、自身の研究テーマに関連する普段なかなか聞くことのできない話を数多く聞くことができ、さらに様々な研究者の方々と自身の研究テーマについて議論することができ、大変有意義なものになりました。

大質量星 ($M \gtrsim 8M_{\odot}$) は、その進化の最期に超新星という爆発を起こします。この際、大質量周りに高密度の物質が存在すると、超新星の衝撃波と星周物質が相互作用し、光度曲線やスペクトルに大きな影響を与えます。このような天体に関して、逆に観測データを用いて星周物質の密度の推定、ひいては爆発直前 (数年前~数十年前) の大質量星からの質量放出率の推定がなされてきました。それらの研究によって、一部の超新星は超新星が起きる直前に、標準的な恒星風では説明ができないほどの極めて高い質量放出率を示すことが明らかになってきました。このような超新星直前の質量放出の原因として、コア内部の対流によって生成された重力波 (gravity waves) が音波として外層に伝搬し、そこでエネルギー散逸が起

きるとする説が先行研究で提唱されてきました (Quataert & Shiode, 2012)。しかし、これらのエネルギー散逸率分布に関しては不定性が大きく、観測されている質量放出がどの程度まで再現できるかはわかっていませんでした。

そこで私の研究では、上述の重力波理論の妥当性の検証を行うことを目的としました。そのために、進化晩期の大質量星の外層に、様々なエネルギー散逸率分布をパラメータとして与えて動的な恒星進化計算を行うことで、引き起こされる質量放出の性質を調べました。その結果、エネルギー注入率の大きさが大質量星のエディントン光度を下回るときは、準静水圧平衡的に膨張するのに対し、エディントン光度を一桁以上上回る場合には外層がほぼ全て放出されることを明らかにしました。さらに、注入率がエディントン光度と同程度である場合、外層が数十年程度の時間スケールで振動し、質量の一部が放出されることを明らかにしました。本研究会においては、これらの結果をポスター発表しました。

本発表について何人かの研究者と議論させていただき、それらは大変有意義なものでした。その中でもよく尋ねられたのが、本研究で人工的に与えているエネルギー注入率は、重力波理論に基づいて計算しているのかというものでした。本研究では、エネルギー注入率を、物理過程の詳細には触れずに、エネルギー保存則に抵触しない範囲で幾分恣意的に与えていました。しかし、観測との比較によって質量放出機構に制限を与えるためには、重力波理論などの物理過程とエネルギー散逸率の結びつきをきちんと考慮することが大切だと考えるようになりました。また、重力波理論で予測されるエネルギー散逸は非球対称であるが、それを一次的に与えるのは問題ないのかというコ

メントもありました。それは実際そうであるので、将来的には多次元計算を行うことも視野に入れるようになりました。

これら海外の研究者との議論に加え、自分の研究テーマに関する様々な話を聞いたことも収穫でした。特に自分がやっている大質量星の進化という分野は、国内の研究者人口がそれほど多くはないため、当分野の専門家の話を聞いたことは大きな収穫でした。これらの議論や他の人の発表を聞いてみて、自分の今後の研究の進め方が大分定まったように思います。

現在は、若干の方向修正をしたものの、本研究テーマに関する論文の執筆に着手しております。今回参加した研究会は自分が現在興味を持ってい



研究会参加者との記念写真

るテーマに合致するものでしたので、是非とも参加したいと思っておりました。そのような願望を現実にしてくださった早川基金に厚く御礼を申し上げます。

日本天文学会早川幸男基金による渡航報告書 *HSC Collaboration Meeting May 2018 in Princeton*

氏 名：樋口 諒（東京大学宇宙線研究所D1
（渡航当時））

渡航先：アメリカ・ニュージャージー

期 間：2018年5月27日～5月31日

申請者は本渡航で2018年5月28-30日にアメリカ合衆国のプリンストン大学で行われた国際会議“HSC collaboration meeting May 2018 in Princeton”に参加しました。本会議において申請者は自身の高赤方偏移の原始銀河団をテーマとした研究成果についての口頭発表と、他の研究者との議論を行いました。以下に本渡航の主旨と得られた成果について報告いたします。

原始銀河団は $z=0$ までに銀河団へ進化すると

予想される、銀河の高密度領域です。原始銀河団の探査は宇宙再電離のプロセスを理解する上で重要です。宇宙再電離の主要な電離源の種類や分布によって宇宙再電離のプロセスには2つのモデルが考えられます。1つ目は原始銀河団のような高密度領域から宇宙再電離が進行するモデル (Inside-Out)、2つ目は銀河間水素の再結合率の低い低密度領域から優先的に宇宙再電離が進行するモデル (Outside-In) です。この2つのモデルを検証するためには、宇宙再電離期 ($z > 6$) と宇宙再電離後 ($z < 6$) において、原始銀河団周辺の銀河間水素の電離状態を統計的に調べる必要があります。しかし高赤方偏移の原始銀河団は数が少なく、 $z \sim 6$ より遠方の原始銀河団候補は数例しか

知られていません。以上を受け、本研究では Shibuya et al. (2018a) ですばる望遠鏡の超広視野主焦点カメラ (HSC) の広視野撮像データから検出された $z=5.7$ (6.6) の Ly α 輝線銀河 (LAE) のサンプルを用いて原始銀河団の探査を行いました。

申請者は $z=5.7$ (6.6) の合計 14 (21) 平方度の領域において HSC で検出された LAE の分布を調べた結果、14 (28) 個の原始銀河団候補を検出しました。これまでの研究では、この時代の原始銀河団は $z=5.7$ と $z=6.01$ で 1 つずつしか確かなものは確認されておられません。 $z\sim 6-7$ での複数の原始銀河団候補の検出は、今後初期の銀河団形成の統計的な議論を可能とするものです。また、申請者はこれまでの LAE の分光観測のデータをまとめ約 250 天体の分光データを構築することで、検出された原始銀河団候補の 3 次元構造を調べました。その結果、 $z=6.6$ の原始銀河団候補の 1 つは赤方偏移の平均が $z=6.574$ であることがわかりました。これは現在見つかった複数の構成天体が分光同定された原始銀河団候補の中では最遠方となります。

さらに申請者は宇宙再電離のプロセスの検証のために、Inoue et al. (2018) の宇宙再電離のシミュレーションから、LAE の Ly α 輝線の等価幅

(EW) と LAE の密度超過 (δ) の関係 (EW- δ 関係) が宇宙全体の銀河間水素の中性度 X_{HI} に応じてどのように変化するかを調べました。EW- δ 関係を一次関数 $EW = EW_{\delta=0} + \alpha\delta$ でフィッティングし、一次関数の傾き α の値の変化で EW- δ 関係の変化を調べました。宇宙再電離完了後から宇宙全体の銀河間水素の中性度 X_{HI} が高くなるにつれて、Inside-Out モデルの場合は EW- δ 関係が正の方向に傾くことを確認しました。HSC で検出された実際の LAE のサンプルに同様の解析を行った結果、 $z=5.7$ (宇宙再電離完了直後) から $z=6.6$ (宇宙再電離期末期) の間に、相関の 1σ の不定性を超えた進化は見られませんでした。また、Inoue et al. (2018) のモデルの解析により、今後 HSC の観測で得られるより大きな・より遠方の LAE も含む LAE のサンプルから、宇宙再電離の Inside-Out/Outside-In のモデルの判定ができる可能性を示しました。以上の内容は世界でも類を見ない広視野の撮像範囲を誇るすばる望遠鏡 HSC と、Ly α 輝線が中性水素の散乱の影響を受けやすい LAE の性質を組み合わせるという申請者のアイデアにより初めて実現した研究です。

今回の渡航により、申請者は初めての海外の研究会での口頭発表を経験することができました。この場を借りて、早川基金に御礼申し上げます。

日本天文学会早川幸男基金による渡航報告書 COSPAR2018/Cool Stars 20

氏 名: 行方宏介 (京都大学 D1 (渡航当時))
渡航先: アメリカ / ロサンゼルス・コロラド・ボストン
期 間: 2018 年 7 月 15 日 ~ 8 月 5 日

私たち京都大学の研究グループは、太陽型星 (G 型主系列星) におけるスーパーフレアという

現象を研究し、「スーパーフレアはどのようなメカニズムで起きるのか?」という問題に取り組んでいます。今回私は、2018 年 7 月 15 日 ~ 8 月 5 日に、アメリカの 3 都市 (ロサンゼルス・コロラド・ボストン) を訪問し、私の研究成果について、国際会議での発表、および共同研究を行いました。まず最初に、ロサンゼルスにて、国際

会議 COSPAR に参加しました。本会議は、今回で 42 回目の開催で、太陽・地球分野の数千人もの研究者が一堂に会す、世界規模の会議です。本会議にて、太陽フレアと恒星のスーパーフレアの比較から得られた、スーパーフレアのエネルギー解放機構について、口頭発表を行いました。スーパーフレアは白色光フレア（可視光増光）として発見されていることから、そのエネルギー解放機構を紐解くには、太陽の白色光フレアと比較することが重要であると考えられます。そこで、私たちは、太陽観測衛星 SDO, Hinode, および Kepler 衛星のデータを駆使し、太陽の白色光フレア・恒星のスーパーフレアの統計的性質を比較する研究を行い、空間分解して観測のできない恒星のスーパーフレアも、同様の物理メカニズム（磁気リコネクション）で起きているということを観測的に証明しました。発表では、スーパーフレアを起こす星は年齢などに何か関係があるのか、若い星は磁場の分布はどうなっているのか、などの質問が出ました。我々の研究によって、太陽とよく似た年齢のスーパーフレア星も見つかっていますが、太陽型星での磁場分布は観測的にはあまりよくわかっていない部分も多く、将来的に研究すべき内容だと感じました。また、Rachel Osten 氏の発表では、フレア時のエネルギー分配則が、恒星フレアと太陽フレアでどう違うかという重要な研究のレビューがなされていました。発表後に Osten 氏と話をしたところ、恒星フレアの X 線・可視光の同時観測はそこまで多くなく、CME（コロナ質量放出）は未検出だとおっしゃっていました。将来的に、可視光・X 線の同時観測に加えて分光観測を行い、フレアのエネルギーが放射エネルギーと運動エネルギーにどのように分配されているのかを調べることで、恒星フレアが太陽フレアと同じなのか、そうでないのかを調べる必要があると感じました。

次に、コロラド大学にて、同大学の Adam Kowalski 氏と、(1) 我々が観測した恒星フレア

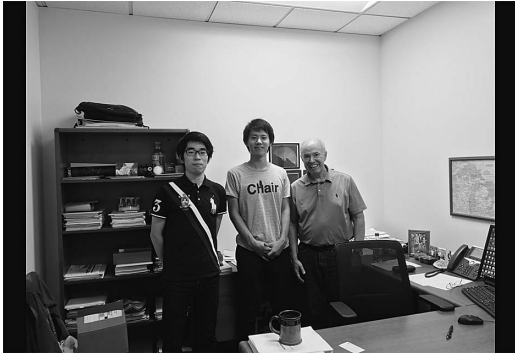


コロラド大学でのゼミ発表の様子

の H α 線のブルーシフトスペクトル (Honda et al. 2018) をどのように解釈するか？ (2) 太陽型星のスーパーフレアがどのようなスペクトルを示すのか？という内容の共同研究を行いました。

(1) に関しては、短い滞在期間中にもかかわらず、Kowalski 氏の 1 次元輻射輸送流体コード (RADYN) を用いて試験を行いました。結果、微弱なブルーシフト ($\sim 10 \text{ km s}^{-1}$) を示したものの、観測 ($\sim 100 \text{ km s}^{-1}$) を説明するには足りませんでした。また、この微弱なブルーシフトはシミュレーションの下部境界の影響も考えられ、さらに深い領域までの拡張が必要です。一方で、H α 線の長波長側に吸収があった場合も、同様のスペクトルを示すことから、これは低温高密度なポストフレアループによって吸収を受けているのかもしれないと考えられます。今後の研究で、観測を説明するモデルを作ろうと話しました。また、(2) については、磁場が強いと期待される恒星フレア (Namekata et al. 2017) は、足元のフレアリボンが広がるスピードも速いと期待され、単位面積当たりのエネルギー注入時間が太陽フレアよりも短く、フレアのスペクトルに大きく影響を与えようという議論をしました。これを足がかりに、今後も共同研究をやっていこうという話になりました。

他にも、コロラド大学では、Edward Cliver 氏



Edward Cliver氏との記念写真。コロラド大学にて。

と太陽でのスーパーフレア発生の可能性について議論し、Kevin France氏にはUVでの恒星フレア観測結果について教わり、非常に充実した日々を過ごしました。

その後、私はボストンに向かい、国際会議「Cool Stars 20」に参加しました。これは、太陽型星などの磁気活動性を示すあらゆる星を取り扱う会議で、主に太陽コミュニティの学会しか参加したことがなかった私にとっては非常に有意義な会議でした。ここで私は、恒星黒点の寿命の観測について、ポスター紹介のための口頭発表+ポスター発表（b講演相当）を行いました。ポスターには多くの方が来てくださり、特に、私の恒星黒点の寿命を測定する研究が恒星の自転周期の決定にも重要な役割を果たしうるというコメントは、新たな発見でした。一方で、空間分解した黒点

と、星全体としての光度曲線の関係に疑問を抱く方が多く、両者の違いを今後研究していかなければなりません。そこで、ワシントン大学のJames Davenport氏と共同で、以上の問題に取り組むことになり、今後の共同研究の足がかりにもなりました。会議では、Gaia衛星の成果報告、Kepler衛星の後継機であるTESS衛星の観測開始などが特集されており、プロジェクトの規模の大きさや期待される成果などに心踊らされました。また、恒星の磁気活動性の研究業界では、磁気活動性の長期変化（太陽の11年周期に対応）や、スナップショット的な黒点の分布に関する研究が多いのが印象的で、個々の黒点の時間変化はあまり研究が進んでいないのが現状のようでした。こうした発表を聞くことで、自分の研究が世界のフロンティアにいることを認識し、その重要性を実感しました。

これらの訪問で得た成果を、京都大学せいめい望遠鏡での高分散分光観測など、私たちのグループの今後の研究計画にも活かしていきたいと考えています。

最後に、この研究会の主催者の方々はもちろんのこと、このような貴重な渡航の機会をくださった日本天文学会と早川幸男基金、および関係者の方々に深く感謝いたします。ありがとうございました。

日本天文学会早川幸男基金による渡航報告書 EHT Imaging Workshop

氏名：田崎文得（国立天文台特任研究員（渡航当時））

渡航先：アメリカ・マサチューセッツ

期間：2018年7月25日～8月5日

2018年7月23日から7月27日の期間にハー

バード大学のBlack Hole Initiativeで開催されたEHT Imaging Workshopに7月25日から参加し、7月30日から8月3日まではEHT観測データからの画像復元について詳細に議論するために、アメリカへ渡航しました。

Event Horizon Telescope (EHT) は、ミリ波・

サブミリ波 VLBI (超長基線電波干渉計) を構築して, ブラックホールシャドウの撮像を目指す国際プロジェクトで, アルマ望遠鏡を含めた高感度 VLBI 観測を 2017 年春と 2018 年春に実施しました. 私は EHT のイメージング作業グループに所属し, これまで 2017 年春の観測データを使って, 画像復元に取り組んできました. 2017 年秋に実施した第 1 回の Imaging Workshop を皮切りに, 較正天体の画像復元に作業グループ全体で取り組み, EHT データの



2018年7月に開催された2nd Imagin Workshopの集合写真.

特性を明らかにしながら, 画像復元にどのようなアプローチが有用であるかなど, 議論を重ねてきました. そして 2018 年 6 月には, ブラックホールシャドウ撮像の本ターゲットである楕円銀河 M87 の中心核と天の川銀河の中心核 (いて座 A 星) の観測データが較正ののち内部公開され, 作業グループを 4 つに分けてそれぞれのグループが独立して (結果を共有せずに) 画像復元に取り組む「イメージングチャレンジ」を開始しました. 本渡航中に行われた Imaging Workshop では, それぞれのグループで復元した画像を初めて共有し, 結果の一致度を確認しました. その後, データの問題点を明らかにしたり, イメージング工程の確認・改良などを行いながら, 画像復元の試行錯誤を繰り返しました.

私自身は, これまで開発に携わってきた新しい画像復元手法を使って, EHT データの画像復元に取り組みました. この電波干渉計の新しい画像復元手法は, 疎性モデリングという劣決定問題から「疎」な解を選ぶ統計技法を応用しています. VLBI の観測データは, 空間周波数領域でのビジビリティという量で, それをフーリエ変換することで画像が得られます. しかしながら観測サンプリングが密でないため, 従来手法では観測できな

い空間周波数領域をゼロで埋めてからフーリエ変換することで画像を構成していました. 偽の信号を入れて作成された画像は, ノイズに埋もれてしまいます. そこで点源モデルで画像を再構成し, 典型的な分解能として回折限界で画像を畳み込むことで最終画像を得るのです. 一方で新手法は, 解が疎であると仮定することで, 観測できない空間周波数領域をゼロで埋めることなく, 観測ビジビリティを再現する画像を直接得ることができません. 画像が疎であるというのは, ここでは (1) 多くのピクセル値がゼロである, (2) 多くの隣り合うピクセルの値の差がゼロである, という 2 つを仮定しています. この仮定により, コンパクトでなおかつ滑らかな画像を, 回折限界で畳み込むことなく得られるのです. 私はこれまで, この手法を VLBA という米国の VLBI のデータに適用し, M87 の 7 mm 画像を復元することに成功し, 実際に従来手法よりも 6 倍程度まで電波コアに近いジェットの根元を空間分解することができました. EHT による全ての観測データはプロジェクトの厳しい情報管理の下にあるため, 本渡航で得られた結果についてはこの場で公開することはできませんが, 今後も成果発表へ向けて尽力していく所存です. (M87 の成果は本報告書作成後の

2019年4月に発表されました.)

Black Hole Initiativeに滞在中は、実際に画像を復元し、得られた画像の評価をすることに貢献することができました。それと同時に、普段はネットワーク越しでしかコミュニケーションを取ることのできない作業グループメンバーと実際に

会って話をし、食事に行くなどの密な交流ができたことで、帰国後のコミュニケーションを円滑に進めることができています。このようなかけがえのない機会を与えてくださった、日本天文学会早川幸男基金ならびに関係者の皆様には厚く御礼を申し上げます。

日本天文学会早川幸男基金による渡航報告書 *Hinode-12*

氏 名：長谷川隆祥 (宇宙科学研究所／東京大学
D1 (渡航当時))

渡航先：スペイン・グラナダ

期 間：2018年9月9日～9月14日

筆者は本渡航において、太陽物理学に関する国際学会「Hinode-12」に参加するため、スペイン・グラナダを訪れました。この会議は、日本の太陽観測衛星「ひので」打ち上げ以降、最新の研究成果を報告する場として毎年開かれています。筆者は修士1年以降、毎回参加しており、3回目の今回は初めて口頭発表として申し込み、採択されました。

本会議では、「Observational Studies on Magnetic Helicity Injected by Self and Mutual Sunspot Rotation」という題目で発表を行いました。本研究のテーマである太陽面爆発（フレア）は、太陽大気中の磁場が持つ余剰なエネルギーが、磁気リコネクションを契機に運動・輻射エネルギーなどに変換される現象であり、この余剰なエネルギーは磁力線の複雑な配位という形で大気中に蓄積しています。フレア研究では「如何にこの余剰エネルギーを測るか」というのが一つのトピックですが、現状の衛星観測では太陽表面の磁場が測れるのみで、太陽大気全体の磁場は得ることはできません。このような状況において、本研究では「磁

気ヘリシティ」に着目しています。これは、「磁場の複雑さ」を定量化した物理量であり、余剰エネルギーの指標となる観測可能量です。さらに、「保存性が良い」という性質から、太陽表面の磁場の時間発展を追うことで、その上空の太陽大気中での複雑さの時間発展を得ることができます。

特に本研究では、複雑な磁場領域における黒点の回転運動に着目しています。黒点は太陽表面における磁束管の断面であり、黒点の運動は上空の磁場配位に多大な影響を与えると考えられています。本研究では黒点群における黒点自身、あるいは黒点間相互の回転運動が上空の磁気ヘリシティ蓄積にどのような役割を持っているのかを解析し、得られた結果がフレア発生のパターンとリンクしていることを確認しました。

学会においては、発表内容に対して、Paolo Romano 氏、Simon Candelaresi 氏、Stephane Regnier氏、Marc DeRosa氏などの、磁気ヘリシティに関する理論・観測的研究や、太陽磁場に関して研究をされている様々な研究者の方から声をかけていただきました。特にコメントを受けたのは、(i) 太陽表面速度場計算のセットアップをどうしたか、(ii) 本研究を統計的に進めるべき、ということでした。また、特にKirill Kuzanyan氏には深く議論に付き合っただき、本研究にフーリエ解析・ウェーブレット解析を用いて、ス

ケールを分離する (2-scale Analysis) という示唆をいただきました。また、短い時間でしたが、磁気ヘリシティの理論的側面を詳しく議論していただき、非常に有意義な時間を過ごすことができました。

さらにこの機会を利用して、会議3日目には、共同研究を行っているグループの中心人物である Louise Harra 氏と議論の場を持ちました。この共同研究では、「ひので」をはじめとしたいくつかの観測機器による同時観測によって得たフレアのデータを解析するというもので、筆者の場合は磁場発展の解析について、論文の完成に至るまでどのような方向性で解析を行うかについて、有意義な議論ができました。

今回の渡航で訪れたスペイン・グラナダは、生活リズムが日本と全く異なり、夜は10時でも明るく、昼の早い時間から夜遅くまで路上のバルに人々が詰め掛けて、賑わっていました。一方、会場を少し北へ歩くとアルバイシン地区にたどり着きます。ここにはグラナダ市街とは打って変わりアラブの文化が息づいた迷路のような旧市街地が



アルハンブラ宮殿をバックに、サンニコラス広場で。左から2番目が筆者。

広がっており、サン・ニコラス広場から壮大なアルハンブラ宮殿を臨むことができました。Excursionではそのアルハンブラ宮殿を訪れ、その豪華さ・スケールの大きさに圧倒されました。

最後に、本研究会へ参加できたのは天文学会早川幸夫基金による多大なご支援があったからです。ここに深く感謝の意を示します。ありがとうございました。