

2022年度の研究活動について

白崎正人 統計思考院 助教

2022年度は、2編の主著論文を発表することができました。以下に論文の内容と研究活動で得た所感についてまとめたいと思います。

1 高速電波バーストと観測的宇宙論

「Probing cosmology and astrophysics with fast radio bursts: cross-correlations of dark matter haloes and cosmic dispersion measures」という題の論文 (M. Shirasaki et al., Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 512, 2, pp.1730-1750, 2022) を書きました。

高速電波バースト (Fast Radio Bursts; FRB) は、およそ1GHzの周波数帯域における天文観測で見つかる、持続時間1ミリ秒程度の突発的な電波パルスです。FRBの発生源や発生メカニズムは未だ不明で、地球外生命体の活動の痕跡である可能性も議論されています。電磁気学によれば、荷電媒質中を進む電波の伝搬速度は真空中より遅くなり、電波の周波数が低くなるにつれて到達時間が遅れていきます。到達時間の遅れは、パルスの発生源と観測者の間にあるプラズマ電子密度を視線方向に積分した量として知られる分散量度 (Dispersion Measure; DM) で特徴付けられます。DMが大きいことは、パルスがプラズマ電子密度の濃い領域を通過してきたか、パルス発生源が遠くにあるかを意味します。現在観測されているFRBが持つDMは、我々の住む銀河系の典型的なDMの値と比べ、著しく大きいものが見つかっており、FRBの発生源の多くは、銀河系外にあることがわかっています。

FRB研究の王道は、その発生源と発生メカニズムの解明です。一方で、FRB観測で自動的に得られるDMに着目する研究も最近は見られるようになりまし。これは、カナダが進める大型FRB観測実験 (Canadian Hydrogen Intensity Mapping Experiment; CHIME) が、FRBの検出数を飛躍的に向上させていて、DMの統計的な性質を詳しく調べることが現実味を帯びてきたためです。宇宙マイクロ波背景放射と呼ばれるビッグバン宇宙の残光を調べる観測によって、元素表を構成する物質 (バリオン) は、全体のエネルギー密度の5%程度にしかならないと推定されています。この推定は、遠い過去の宇宙の姿から導かれたもので、我々の近傍の宇宙でバリオンがどれくらいあるかはきちんと理解されていません。DMは視線方向にある全ての電子密度の積分値ですので、我々の近場 (ビッグバンから100億年かそれ以上経過した宇宙) に存在するバリオンを観測的に検出することができます。原理的には、DMの統計解析によって、ビッグバン宇宙を基にした推論の答え合わせができるはずなのです。

一口に統計解析と言っても、いろんなやり方が考えられます。これまでよく研究されてきた手法は、DMのヒストグラムを解析するというものです。この方法は、FRB源が我々からどれくらい離れているかがわかっているならば有用なのですが、現実的には、FRB源までの距離を推定するのは困難です (現状観測されるFRBのほとんどはパルスを一回しか出さないで、天球面上でFRB源になる天体を特定するのが難しいからです)。そこで、我々は距離が精度良くわかっている銀河などの天体とDMの空間的な相関解析を行うことを提案しました。距離 d にある銀河の周りで、DMが平均より高い値になっていけば、これは距離 d にある銀河に付随するバリオンを検出できたことを意味します。現象論的なDMの物理モデルを作って解析してみると、既存の銀河観測データと20000個のFRBデータがあれば、1%レベルの精度で相関信号を検出できることがわかりました。また、この高精度の相関信号を、銀河とFRB到来方向を結ぶ距離の関数として解析することで、銀河の周りにどれくらいバリオンが存在するかを10%レベルで検証でき、バリオンがビッグバンから現在に至るまでどのような密度成長を経験してきたかを調べられることがわかりました。

この手の相関解析は、銀河観測では広く用いられているのですが、FRB界隈ではあまり浸透していないようでした。論文を投稿した後、一番初めについた査読者はおそらくFRB観測の専門家だったようで、相関解析の初歩的な部分を勘違いされているようでした。査読者の勘違いを指摘するために、かなり気を使って丁寧なレポートを書き、修正版は新

しい査読者に回ったらしく、無事に(?)アクセプトとなりました (査読者の勘違いを指摘するのに、「The referee is wrong.」などと言うなと極めて教育的な指導をしてくれた博士課程時代の指導教官に感謝します)。

2 自己相互作用を持つ暗黒物質による構造形成

「Modelling self-interacting dark matter substructures - I. Calibration with N-body simulations of a Milky-Way-sized halo and its satellite」という題の論文 (M. Shirasaki, T. Okamoto, S. Ando, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 516, 3, pp.4594-4611, 2022) を書きました。

21世紀を生きる天文学者のほとんどは、暗黒物質という未知の物質が宇宙には満ち溢れていると信じています。暗黒物質は、平均して宇宙にある物質密度の約85%を占めていて、それ自身は光を出さない (あるいは出しているとしても現状の観測で検出できない) という性質を持っていると言われています。暗黒物質は、宇宙の主要な重力源となり、銀河など我々が観測する天体を取り囲んでいると考えられています。暗黒物質の存在は、宇宙マイクロ波背景放射や銀河内部の星の運動などから確実視されています。正直に言えば、重力源にしかならない都合の良い物質を仮定しなければ、ビッグバン宇宙の残光に残る非等方性や、銀河内部の星の運動を説明できないのです。

一方で、暗黒物質が重力的にしか影響を及ぼさないと考えると問題になる観測結果もあります。例えば、非常に暗い渦巻銀河の星の運動を観察すると、銀河中心付近で、質量密度 ρ が銀河中心からの半径 r に対して一定になる場合が見つかっています。一方で、暗黒物質が単なる重力源であれば、 $\rho \propto r^{-1}$ というスケーリング則になることが数値シミュレーションで明らかになっています。この不一致は、コア-カusp問題として知られており、現在でも確実な解答が得られていません。この問題を解決する1つの可能性は、暗黒物質はそれ自身と出会うと反跳するというモデルです。自己相互作用する暗黒物質 (Self-Interacting Dark Matter; SIDM) として知られるこのモデルでは、銀河中心で暗黒物質密度が高くなるうとすると、密度の低い銀河外縁部から熱が流入して外向きに圧力が生じ、密度の上昇を抑えることができます。SIDMの散乱断面積が $O(1) \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$ 程度であれば、コア-カusp問題は解決できると考えられています (100億年間で、銀河内部のSIDM粒子が少なくとも1回以上散乱すればよい計算になります)。

さて、SIDMが正しいとして、我々が住む銀河である天の川銀河の観測からその証拠を見つけることはできるでしょうか? 天文学者は、天の川銀河内部にある非常に暗い銀河 (通称矮小銀河) の星の運動を観測することで、SIDMの証拠を探せるはずだと考えています。矮小銀河には、ガスがほとんどなく、星と暗黒物質で構成されているので、暗黒物質の性質を探索するのに適した天体です。矮小銀河は、小さい銀河が天の川銀河の外から降着してできたと考えられ、現在も天の川銀河本丸の重力に引っ張られて抜け出せなくなっています。矮小銀河の観測からSIDMの証拠を探すために、SIDMを仮定した矮小銀河の時間進化を追う数値シミュレーションを行いました。降着時の角運動量や質量、SIDMの散乱断面積を様々に変えて、どういうケースでもシミュレーション結果を説明できるような数値モデルを作ることができました。

論文を投稿後、査読者からのコメントを読んでいるうちに、共同研究者がシミュレーションコードのバグを見つけてくれました。このバグはすべてのシミュレーション結果に影響していたため、すべてのシミュレーションをやり直すことになりました。バグを直して論文第二稿を投稿すると、査読者からの返事はリジェクト、エディター裁量でMajor Revisionとなりました。短期間でバグを直し、シミュレーションの再解析を (頑張っ) したため、査読者からシミュレーションコードにさらなるバグがあるのではないかと疑われたようでした。査読者の返事であった懸念点を全て確認し、もう一度投稿して無事にアクセプトとなりました。査読者とのやり取りの間に、第一子が生まれ、育児と論文改訂で目が回るほど忙しかったのですが、それも今となっては良い思い出です。