

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 平成31年度

受付番号 201960055

氏名

大里 健

(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： パリ (国名：フランス)
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。
次世代観測計画に向けた理論・シミュレーションの両面で迫る観測的宇宙論
3. 派遣期間：平成 31年 4月 1日 ～ 令和 3年 3月 31日
4. 受入機関名及び部局名
受入機関名：パリ天体物理学研究所
部局名：

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。

研究背景

宇宙の進化を紐解く宇宙論は、近年の観測技術の向上により実証科学としての地位を確固たるものにした。特に、通常物質であるバリオン (4.94%) に加え、ダークマター (26.5%)、ダークエネルギー (68.42%) を宇宙におけるエネルギーの構成要素とした Λ CDMモデルは宇宙における銀河から銀河団に至る大規模構造の形成を説明することを可能にした。宇宙背景放射の観測などから、この模型が含む複数のパラメータが高精度にかつ無矛盾に決定され、宇宙論の標準模型として広く認識されるようになった。一方で、物理学的見地に基づいて暗黒成分の本質や、修正重力理論の可能性といった標準宇宙論を越える新しい物理の可能性に迫る必要がある。

こうした謎を解明すべく、大規模な観測計画が立案、実行されている。2022年に打ち上げが予定されているEuclid計画に加え、日本においては、すばる望遠鏡に搭載される超広視野分光器Prime Focus Spectrograph (PFS) による大規模銀河分光観測が2023年から開始する予定である。これら分光観測において、各銀河の視線方向の距離は銀河中のガスから発せられる輝線の波長変化 (赤方偏移) を通して測定される。この赤方偏移を視線方向の距離に変換することで、銀河の三次元分布を得る。銀河分布のパワースペクトルから、宇宙初期のプラズマの音速で決まるバリオン音響振動の距離スケールを測定し、ダークマターの存在量やダークエネルギーの性質を決定することが可能である。また、測定される赤方偏移は宇宙の膨張と銀河自身の運動による速度 (特異速度) の二つの要因によって引き起こされるが、これらの成分は完全に縮退しており、独立に分解することは不可能である。宇宙の膨張は等方的である一方、赤方偏移の測定においては視線方向という特別な方向が現れるため、観測されるパワースペクトルは方向依存性をもつ。この現象を赤方偏移空間歪みと呼ぶ。この赤方偏移空間歪みは物質の速度場の情報を含んでおり、修正重力理論のような宇宙の構造の成長率を変化させる機構を制限する良い観測量となる。銀河分光観測においては、銀河分布のパワースペクトル測定による重力理論の検証やニュートリノ質量の決定が主たる科学目標の一つとして位置付けられている。

研究の実施状況

研究成果1 赤方偏移空間パワースペクトルおよびバイスペクトルの高速計算手法

観測的宇宙論において重要な役割を果たしてきたのが、銀河の三次元分布の観測である。銀河は密度の高い場所で形成されるため、その空間分布は宇宙の大規模構造を反映している。銀河分布の統計の情報を要約したものとして、フーリエ変換の振幅であるパワースペクトルがよく用いられる。このパワースペクトルは宇宙の物質量や膨張率の変化に敏感であり、宇宙論パラメータの制限に用いられてきた。宇宙の等方性から、測定されるパワースペクトルもまた等方的であることが予想されるが、銀河の持つ固有運動により視線方向という特別な方向に対する依存性が生じる。この現象を赤方偏移歪みと呼ぶ。この赤方偏移歪みは物質の速度場の情報

を含んでおり、特に修正重力理論を制限する上で有用である。この赤方偏移歪みの理論的取り扱いはいままでよく研究されてきたものの、計算コストの観点から実際の観測データを用いた統計解析には用いられず、制限する宇宙論パラメータの数を2, 3個に限るなど限定的な解析が行われていた。そこで、予め必要な計算を先に実行し、効率的に任意の宇宙モデルにおいて赤方偏移歪みの影響を高速に計算する解析的な手法を開発し、50倍以上の高速化に成功した。これまで困難であった全ての宇宙論パラメータを同時に制限する統計解析にも十分用いることが可能である。

さらに我々はパワースペクトルよりも高次の情報を含む統計量であるバイスペクトルについても高速化の手法を応用した。バイスペクトルはパワースペクトルと異なり、引数である波数ベクトルの組み合わせが多いため、より大きな計算量が必要である。我々の高速化手法を適用すれば、数時間かかっていた計算が数分程度に圧縮することが可能であることを示した。

研究成果2 次世代分光観測に向けた模擬銀河カタログの作成

観測データから得られる銀河分布と理論から予言される物質分布（バリオンとダークマター）は相関しているものの、完全に同一ではない。銀河の形成過程は非線形であり、銀河分布を解析的に予言することは困難である。そこで、銀河分布と物質分布は単純な比例関係にあるという、線形バイアス仮定がこれまで用いられてきた。この仮定は極めて大スケール (> 100 Mpc) では成り立つものの、それ以下の小スケールでは、重力や銀河形成といった非線形な物理によって両者の関係は複雑になるため、この単純な仮定は破綻してしまう。一方で小スケールは、パワースペクトルの精度の高い測定が可能であり、修正重力理論や標準理論を超えた物理の効果が卓越する領域でもある。したがって、次世代の観測計画の科学的成果を最大限引き出すためには、これらの小スケールにおける銀河と物質の関係を詳らかにすることが重要である。この関係をより直接的に調べられる手法として、ガスや星といったバリオン成分の進化の近似的なモデルをもとに、物質による重力進化と銀河の形成を同時に解く銀河形成シミュレーションが挙げられる。銀河形成シミュレーションでは物質分布と銀河分布を同時に得られるため、両者の関係を調べる上で最も効果的な手法である。

上述のEuclid計画の他にも、次世代分光観測として、日本の研究機関が主導するすばる望遠鏡のPrime Focus Spectrograph (PFS)計画が挙げられる。観測される銀河は酸素や水素といった元素からの輝線を元に観測されるが、これらの輝線は寿命の短い大質量星からの放射であるため、星形成率の大きい銀河がより選択的に輝線銀河として観測される。すなわち、輝線銀河は形成して間もないハローに見つかりやすいことが予想されるが、実際に準解析的モデルを用いた研究によって確かめられている。本研究では銀河形成シミュレーションとして、既にシミュレーションデータが公開されているIllustrisTNGを用いた。IllustrisTNGは観測された銀河の個数分布や形状を高精度で再現する銀河形成シミュレーションであり、重力相互作用に加えて、星形成や超新星によるフィードバックといった天体物理学起源の効果も考慮されている。この銀河形成シミュレーションで得られたデータを元に、実際の観測条件を適用し模擬観測を行う。例えばPFS計画においては、観測対象は赤方偏移0.8-2.4の範囲における[O II]輝線で明るい銀河である。そこで、種族合成モデルに基づいたPÉGASE-3コードを用いてシミュレ

ーション中の全ての銀河について代表的な輝線の強度を計算した。このシミュレーション中の銀河について、現実と同様なパワースペクトルを用いた統計解析を行なった。シミュレーションでは最初に用いた宇宙論パラメータが予め分かっているため、統計解析によって推定された値と直接の比較が可能である。両者の比較から、理論モデルを用いた統計解析では輝線銀河はより特異速度が大きい環境にあることが明らかになった。このような効果は未だ理論モデルに十分に考慮されていない。したがって、より正確な宇宙論パラメータ推定を行うためには、理論モデルの精密化が必要という結果を得た。

研究成果3 熱的Sunyaev-Zel'dovich効果における超サーベイモードの寄与

熱的Sunyaev-Zel'dovich (tSZ) 効果という観測量の共分散行列推定において、超サーベイモードの影響に関する研究を行った。tSZ効果とはCMBの光子が銀河団などに存在する高温のガスを通過するうちに、自由電子との逆Compton散乱によってエネルギーを獲得し、CMBの温度にさらなる異方性が生じる効果である。tSZ効果は宇宙のガス分布を反映しており、宇宙論パラメータ、特に密度ゆらぎの振幅に非常に敏感であることが知られている。

tSZ効果についても、主な統計量はパワースペクトルである。このパワースペクトルの測定の統計的なばらつき・誤差に対応する量が共分散行列である。この共分散行列は解析的な理論モデルによって計算することが可能であるが、従来の計算においては観測領域の大きさを越えた揺らぎの効果(超サーベイモード)が考慮されていなかった。特にtSZ効果は重い銀河団からの寄与が大部分を占めており、この銀河団の形成は長波長の揺らぎに敏感である。そこで、我々はこの超サーベイモードの効果を理論モデルに取り入れ、より正確な共分散行列の推定を可能にした。

研究成果4 銀河形成シミュレーションを用いた模擬重力レンズ効果観測

近年、重力レンズ効果の測定を主な科学目標に掲げた大規模な観測計画が世界的に立案、実行されている。特筆すべき例として、日本の研究機関が主導する、すばる望遠鏡に搭載された広視野撮像カメラHyper Suprime-Cam (HSC) による広域撮像観測が挙げられる。最新の大型望遠鏡による撮像観測はこれまでにない広域を観測するため、統計誤差が格段に抑えられる。一方で、観測データを解釈する理論モデルにおいては暗黒物質の性質(質量や生成機構)や重力の性質に多くの仮定を課している。観測領域が狭く、統計誤差が優勢な従来の観測においては粗い近似のもとでも問題にならなかったが、統計誤差を極限まで抑えた近代的な観測データに直面した際、理論モデルの予言精度も同程度以上に高めなければ、誤った物理的な結果を導いてしまう。従って高性能の望遠鏡からもたらされる観測データを十分に活用するためには、これまで考慮されていなかった系統誤差の要因を精査する必要がある。

近年、重力レンズ効果における系統誤差として挙げられているのが、銀河形成の効果である。重力レンズ効果は宇宙の密度場を観測するため、星や銀河の形成に対してはあまり影響を受けないと考えられてきたが、超新星や大質量ブラックホールからのエネルギー放出(フィードバック効果)によって、密度場が影響を受けることが示唆されてきた。我々はこの影響を正確に評価するため、銀河形成シミュレーションを用いて、実際の観測条件に即した模擬観測を

行なった。この模擬観測では、初めて近傍宇宙から遠方宇宙における長い時間スケールにおいて測定を行い、銀河形成が重力レンズ効果に与える影響を定量的に評価した。また、この模擬観測は10000回という、これまでにない多数のシミュレーションから構成されており、機械学習の手法への応用の可能性がある。

成果発表・関係学会の参加状況

2年間の任期中に4件の国際学会口頭発表を行い、また学会誌に14報の論文発表を行った。これは上記の研究成果のうち研究成果3, 4による論文を含む。また、研究成果1, 2についても近日中に論文として投稿予定である。