

令和 2 年 4 月 2 日

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 201960625

氏

名

山田 将樹

(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：マサチューセッツ工科大学（ボストン）（国名：米国）
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。
インフレーションおよびその後のバリオン数・暗黒物質・ブラックホール生成の研究
3. 派遣期間：令和 元年 9 月 1 日 ～ 令和 2 年 4 月 2 日
4. 受入機関名及び部局名
Massachusetts Institute of Technology, Center for theoretical 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。

所期の目的の遂行状況及び成果

山田 將樹

私の研究の目的は、宇宙の始まりから現在までを矛盾なく自然に記述することができる理論およびモデルを構築し、その検証可能性を議論することである。海外特別研究員としてマサチューセッツ工科大学に滞在するにあたって、特にランドスケープ宇宙論、相転移からの重力波の生成、原始ブラックホールの形成方法、およびインフレーション後の熱化についての研究を行った。派遣期間を短縮する必要があったために短い時期ながらも、2つの論文を執筆し学術誌に掲載することができた。

マサチューセッツ工科大学のある米国ボストンはハーバード大学やタフツ大学など、近い距離に多くの大学が存在している。私はこれらの大学にも訪れてセミナーに参加したり発表したりすることを通して、様々な共同研究を始めることができた。以下の初めの2つの研究はそれぞれタフツ大学の Alexander Vilenkin 教授と元ハーバード大学の研究員である中居氏との共同研究による成果である。3つ目の研究はマサチューセッツ工科大学の受け入れ研究者である Alan Guth 教授との共同研究である。

[1. ランドスケープ宇宙論に関する研究]

・[背景と目的] 高温高密度の初期宇宙は高エネルギーの素粒子理論によって記述されるため、素粒子の究極理論と考えられている超弦理論と初期宇宙論は密接に関係している。超弦理論の低エネルギー有効理論によれば、取りうる準安定な真空状態が大量にあり、その一つ一つが異なる物理の宇宙を記述する。どの真空が我々の宇宙に対応する真空かは理論的に決定することができないため、この理論においては観測量が確率的な分布として予言される。この確率分布と我々の宇宙における観測値を比べることによって、超弦理論の低エネルギー有効理論に対して様々な示唆を得ることができる。このような超弦理論から示唆されるランドスケープに基づく宇宙論は、日本ではあまり浸透していないが世界的には最先端の研究である。実際、この分野はアメリカの第一線の研究者たちが牽引してきており、この研究を行う最適な環境である。

・[遂行状況および成果] 確率的な分布を定義するためには確率の測度を定義しなければならないが、無限の広さをもつ宇宙においてはその定義に任意性がある。しかし、理論的に整合性の取れた定義であって、かつ知られている観測量の値を常識的な確率で予言するような測度というのはこれまでにほとんど提案されてきていなかった。私はアメリカのタフツ大学の Alexander Vilenkin 教授と共同でこの問題に取り組み、これら2つの条件を満たす確率測度を提案した。その上で、これを用いて暗黒エネルギーや空間の曲率の確率分布を計算し、空間の曲率が将来的に観測される確率が7%程度あることがわかった。これが観測された場合、我々の宇宙はランドスケープのなかで真空の相転移か

ら発生した可能性を支持することになり、宇宙の始まりを理解する大きな第一歩となる。この結果を Alexander Vilenkin 教授との共著論文として学術雑誌で発表した。

[2. ヒッグスの相転移からの重力波に関する研究]

・[背景と目的] 受け入れ機関であるマサチューセッツ工科大学には、近年重力波を史上初めて観測することに成功した LIGO の研究機関がある。観測されたのはブラックホール連星の衝突によって生じた重力波であるが、今後様々な観測が始まり感度が上がっていくなかで、初期宇宙の非自明なダイナミクスから放射される重力波が観測されることも期待されている。特に、宇宙の温度が 100 GeV 程度であった時代にはヒッグス場の相転移が起こることが知られている。このときの相転移が一次相転移であった場合には、相転移の泡の形成およびその衝突に伴って重力波が放射されることがある。このような重力波の放射量や周波数スペクトルを計算すると、将来的な重力波観測実験によって初期宇宙を探ることができることになる。

・[遂行状況および成果] 元ハーバード大学の研究員であった中居氏との共同研究によって、ヒッグス場の相転移のときに同時に 5 次元目の時空が相転移をして 4 次元時空になった可能性について探求した。これは素粒子標準理論に内在する階層性問題を解決する一つのモデルであるが、このような相転移の強さを決めるパラメーターは量子重力の影響を受けてしまい計算不能であることが知られていた。我々は、相転移のダイナミクスが量子重力の影響を受けないようなシンプルなモデルを提案し、そして相転移のダイナミクスにおいて放射される重力波の大きさとスペクトルを計算した。重力波のスペクトルはちょうど将来的な重力波観測実験である LISA の感度にかかるように予言され、このような観測によって宇宙初期の相転移の情報が得られることを示した (図 1)。この結果を学術雑誌に掲載して発表した。

[3. 原始ブラックホールの形成に関する研究]

・[背景と目的] 近年、重力波観測実験である LIGO によってブラックホール連星の合体に伴う重力波が観測された。その結果によると、 $\mathcal{O}(10)M_{\odot}$ 程度のブラックホールの存在が示唆されている。また、構造形成の比較的初期の時代において超巨大ブラックホールが存在することも様々な観測により確かめられている。しかし、天文学の通常のブラックホールの形成機構ではこれらの観測結果を説明することができないため、宇宙初期にブラックホールを形成するシナリオを考える必要がある。このようなブラックホールを原始ブラックホールと呼ぶ。

・[遂行状況および成果] 宇宙初期にブラックホールを生成するためには、初めから非常に大きな密度ゆらぎが必要である。このような密度ゆらぎを予言するようなインフレーション模型としてハイブリッドインフレーション模型が考えられていたが、生成されるゆらぎのスケールが小さすぎて $\mathcal{O}(10)M_{\odot}$ 程度もしくはそれ以上の大きさの原始ブラックホールを形成することができないことが知られている。しかし、受け入れ研究者である Alan Guth 教授との共同研究によって、ハイブリッドインフレーションを引き起こすスカラー場が大量に存在した場合にはゆらぎのスケールを大きくする

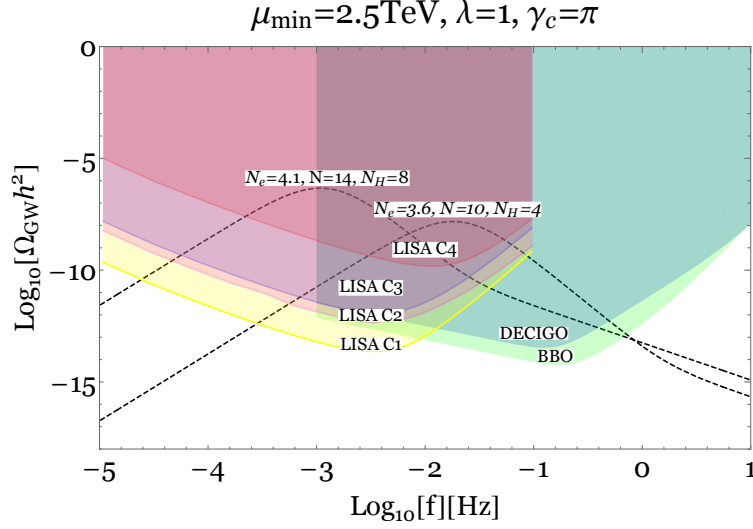


図 1: 二種類の理論パラメーターを仮定した場合の重力波のスペクトル (点線)。網掛けの領域は LISA による将来的な感度曲線である。

ことができ、十分に大きい原始ブラックホールを形成することができることがわかった。現在はこれをより詳細な数値計算によって確認し、その後学術論文としてまとめる予定である。

[4. インフレーション後の熱化の機構に関する研究]

・[背景と目的] インフレーション後からビッグバン元素合成時期までの間に、インフラトンが崩壊して宇宙を再加熱する必要がある。このとき、インフラトンの崩壊によって生成された高エネルギーの粒子が熱化する過程はまだ十分に理解されているとは言えない。特に、これを理解して宇宙の有効温度の時間発展を求めることは、初期宇宙において様々な相転移が起きた可能性を議論する上で非常に重要である。また、この熱化の過程で暗黒物質やバリオンが非熱的に生成された可能性もある。

インフラトンの崩壊によって生じた高エネルギー粒子は、ゲージ相互作用などによってエネルギーを失い熱化していくと考えられる。この計算のためには、原子核理論の分野で研究されている quark-gluon plasma の熱平衡化の計算が応用できる。特に、近年になってそのボルツマン方程式を数値的に解く方法が開発された。この方法を初期宇宙に応用することによってインフラトンの熱化の過程を数値計算することができる。これが成功すれば、宇宙の有効温度の時間発展が得られるようになり、特に宇宙の最高到達温度を求め、インフレーション後にどのような相転移が起きる可能性があるのかを議論することができるようになる。

また、暗黒物質が弱い相互作用を持っていた場合、インフラトンの熱化の過程で暗黒物質も非熱的に生成される。これは主に s-channel による暗黒物質の対生成で生じるため、熱化の数値コードにこの暗黒物質の生成過程を取り入れることは比較的簡単に可能である。これを実行し、再加熱温度と暗黒物質の非熱的生成量の関係を精度よく与える。

・[遂行状況および成果] マサチューセッツ工科大学の Gregory Ridway 氏に協力を仰ぎ、インフレーション直後の状態からボルツマン方程式を数値的に解くことを試みた。原子核物理の分野において定式化されていた方法を初期宇宙に適用できるようにアルゴリズムを改良し、数値計算コードの開発を開始した。具体的な成果はまだ得られていないがコード開発の目処は立っており、共同研究を継続して得られた結果を適宜発表する。

また、Gregory Ridway 氏との議論によって、暗黒物質の生成過程を取り入れるにあたっては、超対称性理論にモチベートされたモデルが最適であることが確認できた。つまり、熱化の過程において強い相互作用を通してグルーオンが形成され、そうして生成されたグルーオンが暗黒物質である最も軽い超対称性粒子に崩壊するというシナリオであれば、数値計算のコードを大きく変更することなく簡単な拡張で可能であることが確認できた。