

## 論文審査の結果の要旨

氏名 齊藤 遼

本論文は5章からなる。第1章はイントロダクションとして、原始ブラックホールと宇宙の暗黒物質、およびその観測的痕跡について本論文の目的に照らし合わせながら解説している。原始ブラックホールとは、初期宇宙の密度揺らぎから生成されるコンパクトな物体であり、生成機構や時期により定まる質量スペクトルを持つと理論的に予言されている。宇宙の暗黒物質の主要な成分ともなりうると考えられており、観測的な証拠あるいは何らかの制限を得ることは重要である。これまでに、主に重力レンズ現象の観測などからその存在数や典型的質量に対して強い制限が与えられているが、およそ月質量あるいはその10万分の1程度までの質量をもつならば暗黒物質の有力な候補となる。本論文の目的は、原始ブラックホールの生成機構と、その際に放出される重力波についての理論的研究を行い、将来の重力波検出実験および高エネルギー線観測によって原始ブラックホールの痕跡を検出する方法を提案することである。

第2章では原始ブラックホールの生成機構に関する理論モデルが紹介される。標準的な一様等方宇宙モデルに基づき、宇宙初期の密度揺らぎの進化を記述する方程式を導入し、密度揺らぎの波長と生成されるブラックホールの質量およびその時期の対応を明らかにする。また、これまでに得られた、重力レンズ現象やX線およびガンマ線宇宙背景放射の強度の観測による制限を順に解説している。注目すべき原始ブラックホールの質量範囲を定めており、本研究の目的につながっている。

第3章では原始ブラックホール生成時に放出される重力波の振幅を解析的に取り扱う。宇宙初期でのスカラーおよびテンソル揺らぎ（それぞれ密度ゆらぎと重力波に対応する）の発展方程式を導入し、高次摂動法を用いて重力波の振幅の発展を計算する。原始ブラックホールの生成モデルとしては、ある波長においてのみ密度揺らぎの振幅が特異に大きいモデルを考える。密度揺らぎ超過を箱形関数を用いて記述し、放出される重力波振幅を計算し、現在の宇宙における重力波としての痕跡を振動数依存性も含めて明らかにした。すでに稼働している重力波検出実験および将来の計画の感度計算を行い、将来のスペース重力波衛星による観測で十分検出が可能であると結論づけた。原始ブラックホー

ル生成時に重力波が放出されるというアイデアは新しく、将来の重力波観測が大きく期待される。

第4章では、2009年に報告された宇宙線中の陽電子数超過に着目している。この未解明の問題について、暗黒物質が原始ブラックホールと超対称性粒子の2成分から成る理論モデルを考案し、暗黒物質崩壊および対消滅による高エネルギー粒子の生成によって解決することを提案する。原始ブラックホールと微視的な暗黒物質粒子が共存する場合には、原始ブラックホールがいわば種となってその周辺に暗黒物質粒子を引きつける。このようにして宇宙早期に形成される「マイクロ暗黒ハロー」は現在の天の川銀河にも多数残存すると考えられ、その場合には微視的な暗黒物質の局所的密度が場所により大きく異なる。高密度領域では暗黒物質対消滅率が増加し、太陽系近傍での宇宙線中陽電子数超過を説明しうるとともに、点状ガンマ線源となると考えられる。申請者は将来のガンマ線望遠鏡によりそのような点源を観測できると結論づけた。

第5章では得られた結果と将来の観測への展望を議論し、本論文を総括する。

なお、本論文第3章は横山順一氏との共同研究をもとにしているが、原始ブラックホール形成時の重力波放出という着想は論文提出者本人が得たものであり、密度揺らぎの発展や重力波スペクトルなど主要な結果は全て論文提出者が計算し、考察を与えたものでオリジナルな成果と判断する。また、第4章は白井智氏との共同研究をもとにしている。マイクロ暗黒ハロー生成と暗黒物質粒子対消滅の痕跡については共同研究者との議論をもとに発展したものであるが、ハロー中の密度分布や高エネルギー粒子生成率の計算遂行から結果の解析まで論文提出者がおこなったものであり、論文提出者の寄与が十分であると判断する。

暗黒物質の正体は宇宙論および宇宙物理学に残る大きな謎の一つである。本論文はその候補として原始ブラックホールを提案し、その質量や存在量に重力波とガンマ線の観測によって迫る方法を提案した。現在稼働中、および将来に計画されている重力波実験やガンマ線望遠鏡計画に大きな示唆を与える。初期宇宙に生成される重力波の検出へ向けた重要な第一歩であり、世界最先端の研究であると判断する。

したがって、博士（理学）の学位を授与できると認める。