

令和 2 年 6 月 7 日現在

機関番号：12608

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2019

課題番号：15K17632

研究課題名（和文）空間的小スケールの原始密度揺らぎを制限する新手法の確立

研究課題名（英文）A new method to constrain the small-scale primordial density perturbations

研究代表者

須山 輝明 (Suyama, Teruaki)

東京工業大学・理学院・准教授

研究者番号：20456198

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：小スケール原始密度揺らぎの重力成長によって形成されるコンパクト天体(原始ブラックホール及び極小ダークマターハロー)が引き起こす様々な観測シグナルを理論的に求めた。それらの理論予言を既存(あるいは将来)の観測と比較し、原始密度揺らぎのパワースペクトルの振幅に制限を与えた。研究実施期間中に、LIGO観測所による重力波の初検出・ブラックホール連星の発見という予期しない歴史的快挙があった。そこで、この観測結果を用いて、恒星質量原始ブラックホールの存在量に従来よりも厳しい上限を得ることができた。その後、原始ブラックホールの重力波による検証方法の提案やブラックホールの形成に関する理論研究も行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

この研究で得られた原始密度揺らぎに関する知見によって、密度揺らぎの起源と考えられるインフレーションの解明が進むことが期待される。特に、LIGOによる最近の重力波観測によって一気に注目されることになった原始ブラックホールの検証は、原始密度揺らぎだけでなく、ダークマターの正体にも関わるため、宇宙論分野だけでなく、素粒子物理学や天文学にも影響のあるテーマである。また本研究の原始ブラックホールに関する成果は、様々なメディアで取り上げられ、一般の人々への宇宙科学の普及という点においても貢献できたと考えている。

研究成果の概要（英文）：I computed several observational signals caused by compact objects (primordial black holes and ultra-compact dark matter halos) formed by gravitational growth of small-scale primordial density fluctuations. By comparing those theoretical predictions with existing (or future) observations, I obtained upper limits on the amplitude of the power spectrum of the primordial density fluctuations. During the research period, there was an unexpected historical achievement of the first detection of gravitational waves and the discovery of a black hole binary by the LIGO observatory. In this historical event, I was able to obtain a new upper limit for the abundance of stellar mass primordial black holes by using the LIGO result. After that, I also proposed the verification method of the primordial black hole by gravitational waves and conducted theoretical research on the formation of the primordial black hole.

研究分野：宇宙物理学

キーワード：原始密度揺らぎ 原始ブラックホール 重力波 コンパクトハロー

1. 研究開始当初の背景

この研究を申請したのは、Planck 衛星による宇宙マイクロ波背景放射(CMB)の揺らぎの観測結果が発表されて2年程経った頃である。Planck 衛星は、CMB 温度揺らぎの発見に結びついたCOBE 衛星(2006年ノーベル物理学賞)、宇宙論パラメータの決定及びインフレーション模型の制限を可能にした WMAP 衛星、を引き継いだ最高性能の角度分解能を誇る観測装置である。Planck 衛星の感度はすさまじく、この観測によって CMB で取り出せる宇宙論的情報はほぼ全て取り尽くされた(B モード偏光やスペクトル歪みなど一部例外を除く)。その結果、原始密度揺らぎのパワースペクトルが、ギガパーセクスケールからメガパーセクスケールまで精密に決定され、インフレーション模型や原始密度揺らぎの生成機構に対する新しい制限が導かれた。一方、インフレーション理論によると、具体的な大きさはインフレーション模型によるものの、原始密度揺らぎはギガパーセクスケールからメートルスケールまでのおよそ25桁にも亘る全てのスケールで普遍的に存在すると考えられている。CMB の観測で大スケール側の3桁ほどの原始密度揺らぎについては詳細に分かってきたが、より小スケールの原始密度揺らぎは、ホライズン再突入後に重力成長や複雑な物理素過程を経て、現在では銀河や星などの天体形成に至っているため、小スケール揺らぎを大スケールにおける CMB の観測のように、直接的に観測することは極めて難しい。このような困難はあるが、この短波長領域の原始密度揺らぎの大きさが制限できれば、初期宇宙論へはインフレーション模型などへのさらなる制限が与えられ、素粒子物理には構造形成を支配するダークマターの性質への新たな知見がもたらされ、宇宙物理には天体形成の解明に貢献するといった影響がある。このように、小スケールの原始密度揺らぎは、複数の分野にとって重要なテーマであり、宇宙論の新たなフロンティアと言えるだろう。

小スケール原始密度揺らぎの直接観測は非常に難しいので、原始密度揺らぎが重力成長することで宇宙初期に形成されるコンパクト天体からの観測シグナルを理論的に計算し、それらを観測と比較することで原始密度揺らぎに制限を与えるという間接的アプローチによる制限が現実的となる。これまでそのようなコンパクト天体として、ダークマターミニハローと原始ブラックホールが考えられてきた。このようなコンパクト天体の形成には、もっと後に形成する星などとは異なりバリオンの複雑な素過程が効かず、原始密度揺らぎの痕跡をより色濃く残しているという利点がある。ダークマターミニハローに関しては、先行研究があるものの、そこではハローの密度プロファイルとして球対称という非常に理想的な状況でしか実現しないであろうものが用いられており、またダークマターの有力な候補である WIMP(weakly interacting massive particles)の対消滅のチャンネルも限定されており、現実的な状況設定での解析にはなっていないという問題があった。また、原始ブラックホールに関しては、この研究課題が開始して1年も経たない内に、予期しなかった一大ブレイクスルーがあった。LIGO 重力波干渉計による重力波の初検出及び連星ブラックホールの発見(2017年ノーベル物理学賞)である。LIGO で見つかったブラックホールは、それまでの宇宙物理学で想定されていたものよりも重かったこと、あまり自転角運動量が大きくないこと、などの興味深い特徴を示しており、俄然LIGO ブラックホールの起源が宇宙物理の重要課題として浮上した。この緊迫した状況の中で、LIGO の発表から一カ月ほどの間に、LIGO ブラックホールが原始ブラックホールである可能性が、私を含む複数の研究グループによって独立に提案された。こうして、研究課題開始時には予想していなかったことであるが、重力波を用いて原始ブラックホールを検証、さらには小スケールの原始密度揺らぎを制限するという全く新しい研究分野が始まった。この新規の分野の黎明期において、本研究課題が先駆的な成果を継続的に出すことが適切な戦略であると判断し、以降の研究では特に原始ブラックホールと重力波の研究を集中して行った。人生で一回経験できるかできないかというレベルのこの嬉しい科学的発見に接して、一早く本研究課題が関わりを持つことができたのは非常に幸運と言えるだろう。

2. 研究の目的

本研究では、未だ観測がほとんどなく制限がついていないメガパーセクスケールよりも小スケールの原始密度揺らぎの大きさを制限する手法を提案し、既存のあるいは将来の観測から原始密度揺らぎに制限を課すことを目的とする。

3. 研究の方法

上述のように原始密度揺らぎを直接観測することは不可能なので、原始密度揺らぎが重力成長することで形成されるコンパクト天体(ダークマターミニハロー及び原始ブラックホール)からの観測シグナルを理論的に計算し、それらを観測と比較することで原始密度揺らぎに制限を与えるという間接的アプローチをとる。ダークマターミニハローに関しては、N 体シミュレーションから示唆されている現実的な密度プロファイル及び WIMP(weakly interacting massive particles)の対消滅のチャンネルとして b クォーク対、タウレプトン対、W ボソン対の3種類

を考え、最終生成粒子として光子、ニュートリノを考える。原始ブラックホールに関しては、連星ブラックホールの合体率を計算し、それから原始ブラックホールの存在量に対する上限を求め、原始密度揺らぎの大きさに焼き直す。原始ブラックホール質量関数が広がりを持つ場合の連星ブラックホールの合体率の質量依存性を求め、質量分布から原始ブラックホールを制限する可能性を探る。

4. 研究成果

ある特定のスケールでピークを持つ原始密度揺らぎパワースペクトルに対し、ピーク高さと位置を自由パラメータとして、ダークマターミニハロー内部から WIMP 粒子の対消滅によって生成される宇宙線(光子およびニュートリノ)フラックスのスペクトルを評価した。それを既存の宇宙線観測データと比較することで、各スケールに対する原始揺らぎの大きさに対する上限を導いた。広範囲のスケールに対して、対消滅断面積の値として保守的な場合を考えても、スペクトルの大きさとしておよそ 10 万分の 1 程度の制限が得られることが分かった。これによって、将来ダークマターが WIMP 粒子だと確定すると、小スケール揺らぎに非常に厳しい上限が課されることが明らかになった。

小スケール原始重力波の振幅が大きくなると、2 次摂動の効果により密度揺らぎを作り出し、それが原始ブラックホールになる過程に着目し、原始ブラックホール存在量の観測制限から原始重力波のパワースペクトルに上限を課した。得られた上限は、広範なスケールに亘って、ビッグバン元素合成や CMB 揺らぎの観測による従来の制限よりも厳しく、原始ブラックホールによる制限が有効であることを示すものである。

LIGO による重力波初検出の発表を受けて、原始ブラックホールが質量比にしてダークマター全体のおよそ 0.1 パーセントを占めれば、重力波観測を説明できることを示した。この結果は、原始ブラックホールが LIGO の観測を説明できることを示しただけでなく、同時に恒星質量原始ブラックホールがダークマター全てを担う可能性を強く排除したことになる。この研究成果は、重力波の観測と初期宇宙・ダークマターを繋ぐ非常に面白い成果だということで、発表論文が *Physical Review Letter* 誌の Editor's suggestion に選定された。

高赤方偏移で見つかっている 100 億倍太陽質量を超える超巨大ブラックホールの起源は未だに謎に包まれている。興味深いシナリオの一つとして、原始ブラックホール説が知られているが、このシナリオは CMB スペクトル歪みの非検出と矛盾することが知られていた。この矛盾は原始密度揺らぎが強い非ガウス性を持てば解消されることを示し、既存の観測とは矛盾しない超巨大原始ブラックホールを生成するインフレーションモデルを提唱した。

広がりを持った原始ブラックホール質量関数を考え、原始ブラックホール連星を構成する 2 つのブラックホールの質量を軸とする平面上での連星合体イベント数分布を解析的に導出した。そして、合体イベント数分布からある簡単な数学的操作で定義される無次元量が、原始ブラックホールの質量分布の形とは無関係に、1 に非常に近い値をとることを示した。原始ブラックホールの質量分布の形は、初期宇宙の理論モデルに強く依存し、本当の初期宇宙の理論が分かっていない現状では、原始ブラックホールの質量分布にも大きな不定性がある。そのため、原始ブラックホールの質量分布の形に影響されない本研究の結果は、今後の重力波観測で多数の合体イベントが見つかり、統計的議論が可能になると、原始ブラックホール仮説を検証するための非常に強力な手法になると期待される。

重力・宇宙論の分野では定評のある学術誌 " *Classical and Quantum Gravity* " の招待レビュー論文として、原始ブラックホール研究のこれまでの総括、及び今後の大発展が期待される重力波天文学の枠組みでの原始ブラックホール研究の展望を代表著者として執筆した。この総説論文の引用回数は、この報告書作成時において 200 回を超えており(Google scholar に基づく)、該当分野で有益な文献となっていると言える。

原始密度揺らぎから原始ブラックホールが作られると、同時に 2 次摂動の効果によって背景重力波も作られることが知られている。10 の 13 乗 ~ 15 乗グラム付近の原始ブラックホールが作られたとすれば、LIGO 等の地上重力波干渉計の感度域にピークを持つ背景重力波が必然的に存在するはずであることに着目し、LIGO 干渉計によって上記の質量域の原始ブラックホールの存在の検証可能性を明らかにした。原始揺らぎのパワースペクトルが狭い波長域でピークを持つ場合には、LIGO-02 でもシグナルノイズ比にして 2 以上のシグナルが期待され、デザイン感度では広い波長域で 10 を超えるシグナルノイズ比でシグナルが受かるという結果が得られた。LIGO 干渉計でこのような背景重力波が検出されない場合は、既存の原始ブラックホールの制限よりも何十倍も厳しい制限が得られることが分かった。ちなみに、この研究成果は研究課

題最終年度に導かれていたが、論文が完成し学術誌に投稿したのは課題終了2カ月後(2020年5月)である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 10件 / うち国際共著 3件 / うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Suyama Teruaki, Yokoyama Shuichiro	4. 巻 2019
2. 論文標題 Clustering of primordial black holes with non-Gaussian initial fluctuations	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 1-13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1093/ptep/ptz105	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 He Minxi, Suyama Teruaki	4. 巻 100
2. 論文標題 Formation threshold of rotating primordial black holes	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 1-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1103/PhysRevD.100.063520	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Suyama Teruaki, Yokoyama Shuichiro	4. 巻 2020
2. 論文標題 A novel formulation of the primordial black hole mass function	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 1-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1093/ptep/ptaa011	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Kocsis Bence, Suyama Teruaki, Tanaka Takahiro, Yokoyama Shuichiro	4. 巻 854
2. 論文標題 Hidden Universality in the Merger Rate Distribution in the Primordial Black Hole Scenario	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 1-13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aaa7f4	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Tomohiro Nakama, Teruaki Suyama, Kazunori Kohri, and Nagisa Hiroshima	4. 巻 97
2. 論文標題 Constraints on small-scale primordial power by annihilation signals from extragalactic dark matter minihalos	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.97.023539	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Sasaki Misao, Suyama Teruaki, Tanaka Takahiro, Yokoyama Shuichiro	4. 巻 35
2. 論文標題 Primordial black holes?perspectives in gravitational wave astronomy	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Classical and Quantum Gravity	6. 最初と最後の頁 1-76
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6382/aaa7b4	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Misao Sasaki, Teruaki Suyama, Takahiro Tanaka, Shuichiro Yokoyama	4. 巻 117
2. 論文標題 Primordial black hole scenario for the gravitational-wave event GW150914	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.117.061101	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Tomohiro Nakama, Teruaki Suyama	4. 巻 94
2. 論文標題 Primordial black holes as a novel probe of primordial gravitational waves. II: detailed analysis	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 1-20
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.94.043507	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Tomohiro Nakama, Teruaki Suyama, Jun'ichi Yokoyama	4. 巻 94
2. 論文標題 Supermassive black holes formed by direct collapse of inflationary perturbations	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 1-15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.94.103522	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Tomohiro Nakama, Teruaki Suyama	4. 巻 92
2. 論文標題 Primordial black holes as a novel probe of primordial gravitational waves	5. 発行年 2015年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 1,6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.92.121304	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計30件 (うち招待講演 18件 / うち国際学会 25件)

1. 発表者名 須山輝明
2. 発表標題 Hidden universality in the merger rate distribution in the primordial black hole scenario
3. 学会等名 Mini workshop on Primordial Black Holes as Dark Matter, or not, Louvain University (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 須山輝明
2. 発表標題 Merger rate of primordial black hole binaries
3. 学会等名 The Dark Side of Black Holes, Solvay Institute (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 須山輝明
2. 発表標題 Testing PBHs by gravitational-wave observations
3. 学会等名 Spring workshop on gravity and cosmology (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 須山輝明
2. 発表標題 Primordial black holes and gravitational wave astronomy
3. 学会等名 Summer School on Gravitational Wave Astronomy (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 須山輝明
2. 発表標題 原始ブラックホールは暗黒物質を説明できるか？
3. 学会等名 2019年度 天文・天体物理若手夏の学校 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 須山輝明
2. 発表標題 Clustering of primordial black holes with non-Gaussian initial fluctuations
3. 学会等名 15th Recontres du Vietnam, Cosmology (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 須山輝明
2. 発表標題 原始ブラックホール連星と重力波イベント
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 須山輝明
2. 発表標題 Clustering of primordial black holes with non-Gaussian initial fluctuations
3. 学会等名 The 29th Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 須山輝明
2. 発表標題 Clustering of primordial black holes with non-Gaussian initial fluctuations
3. 学会等名 Focus week on primordial black holes (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 須山輝明
2. 発表標題 A review on primordial black holes
3. 学会等名 9th International conference on gravitation and cosmology
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 須山輝明
2. 発表標題 Probing primordial perturbations from inflation
3. 学会等名 International Conference on the Emerging Issues in Cosmology and Particle Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 須山輝明
2. 発表標題 Computations of quantities characterizing PBHs formed from primordial perturbations
3. 学会等名 Cosmic acceleration (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Teruaki Suyama
2. 発表標題 Testing a primordial black hole hypothesis by merger distribution in mass plane
3. 学会等名 Essential next steps for gravity and cosmology (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Teruaki Suyama
2. 発表標題 Probing ultralight scalar field dark matter with GW interferometers
3. 学会等名 The 2nd Korea-Japan bilateral workshop on String Axion Cosmology (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Teruaki Suyama
2. 発表標題 Primordial black holes - perspectives in gravitaitonal wave astronomy-
3. 学会等名 FAPESP-JSPS Workshop on dark energy, dark matter, and galaxies (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Teruaki Suyama
2. 発表標題 Primordial black holes and gravitational waves
3. 学会等名 International KEK-Cosmo and APCosPA Winter School 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Teruaki Suyama
2. 発表標題 PBH binary formation in radiation dominated era
3. 学会等名 Focus week on primordial black holes (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Teruaki Suyama
2. 発表標題 Primordial black holes in the era of gravitational wave astronomy
3. 学会等名 Area workshop of ``Gravitational Wave Physics and Astronomy: Genesis'' (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Teruaki Suyama
2. 発表標題 Hidden universality in the merger rate of the primordial black hole binaries
3. 学会等名 Third symposium on ``Why does the Universe Accelerate?'' (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Teruaki Suyama
2. 発表標題 LIGO and Primordial Black Holes
3. 学会等名 Conference on Particle Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Teruaki Suyama
2. 発表標題 Primordial black holes in the era of gravitational wave astronomy
3. 学会等名 Third LeCosPA symposium (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Teruaki Suyama
2. 発表標題 Primordial black holes and gravitational waves
3. 学会等名 CosPA2017 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Teruaki Suyama
2. 発表標題 Primordial Black Hole Scenario for the Gravitational-Wave Event GW150914
3. 学会等名 Spanish-Portuguese relativity meeting (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Teruaki Suyama
2. 発表標題 Primordial Black Hole Scenario for the Gravitational-Wave Event GW150914
3. 学会等名 Symposium on New development in astrophysics through multimessenger observations of gravitational wave sources (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Teruaki Suyama
2. 発表標題 Primordial Black Hole Scenario for the Gravitational-Wave Event GW150914
3. 学会等名 Workshop on primordial black hole (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 須山輝明
2. 発表標題 LIGOと原始ブラックホールからの重力波
3. 学会等名 日本物理学会第72回年次大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 須山輝明
2. 発表標題 原始ブラックホールと重力波
3. 学会等名 秋の学校「理論と観測から迫るダークマターの正体とその分布」(招待講演)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Teruaki Suyama
2. 発表標題 Probing primordial perturbation on small scales
3. 学会等名 Mini-workshop on inflation (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Teruaki
2. 発表標題 Generation of sparse and localized curvature perturbation from inflation
3. 学会等名 COSMO15 (国際学会)
4. 発表年 2015年

1. 発表者名 Teruaki Suyama
2. 発表標題 Primordial black holes as a novel probe of primordial gravitational waves
3. 学会等名 Second LeCosPA symposium (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2015年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----