

令和元年6月5日現在

機関番号：11101

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K17675

研究課題名(和文)高エネルギー宇宙線観測および加速器実験に基づくブラックホール暗黒物質シナリオの検証

研究課題名(英文) Verification of the black-hole dark-matter scenario in the light of high-energy cosmic-ray observations and high-energy accelerator experiments

研究代表者

仙洞田 雄一 (Sendouda, Yuuiti)

弘前大学・理工学研究科・准教授

研究者番号：80606111

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,800,000円

研究成果の概要(和文)：軽量の原始ブラックホールが銀河系内外に暗黒物質の一部として存在している可能性を検証するために、それらの原始ブラックホールからHawking放射によって生成される高エネルギー粒子のスペクトルおよび宇宙線として地球に伝播する量の精密な計算を行なった。数値計算にはLHCなど最新の高エネルギー粒子衝突実験のデータを反映したパラメータや公開計算コードPYTHIA 8を取り入れた。計算結果をFermi LATとAMS-02を含む最近の宇宙ガンマ線および反陽子宇宙線の観測データと比較することで、5掛ける10の14乗グラム付近の質量を持つ原始ブラックホールの存在量に対する強い上限を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

宇宙には質量を持つという性質しか明らかになっていない暗黒物質が存在していると言われ、その正体の解明は宇宙物理学の最大の目標の一つである。本研究では、宇宙初期から存在する原始ブラックホールがその正体であるとする仮説の部分的な検証を試みた。原始ブラックホールのうち比較的軽いものはHawking効果と呼ばれる現象によって様々な粒子を放射すると考えられ、それらが宇宙空間を伝播して地球に到達し、宇宙線として観測される可能性がある。最近の観測データとの比較から、着目した質量範囲にある軽い原始ブラックホールの量だけでは暗黒物質の全体を担うには十分ではなく、他の候補に目を向けていく必要があることが分かった。

研究成果の概要(英文)：In order to verify a hypothesis that light, primordial black holes (PBHs) constitute some portion of the dark matter in the universe, we have numerically studied the spectra of emitted particles from PBHs due to the Hawking effect and the subsequent propagation to the earth. The numerical calculations have been carried out using up-to-date parameters and a public code PYTHIA 8 that take into account the newest experimental data from the recent hadron collider experiments such as LHC. Comparing the calculated cosmic-ray spectra of high-energy photons and antiprotons with the recent observational results from Fermi LAT, AMS-02 and so on, we put a strict upper bound on the abundance of PBHs with mass around five times ten to the fourteenth grams.

研究分野：宇宙物理学

キーワード：ブラックホール 暗黒物質 宇宙線

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

## 1. 研究開始当初の背景

- (1) 国際宇宙ステーションに搭載された宇宙線観測装置 AMS により、約 10–350 GeV の高エネルギー領域において、従来の理論で予想される量の数倍にのぼる反陽子宇宙線が地球に飛来していることが発見された (右図、<http://www.ams02.org/> 2015 年 4 月 15 日付記事より引用)。また、8 GeV 以上の領域で陽電子量の超過も見つかっていた。これらのことから、銀河系内に未知の宇宙線源が存在する可能性があり、正体不明の暗黒物質がその一部を担っているのではないかと考えられた。

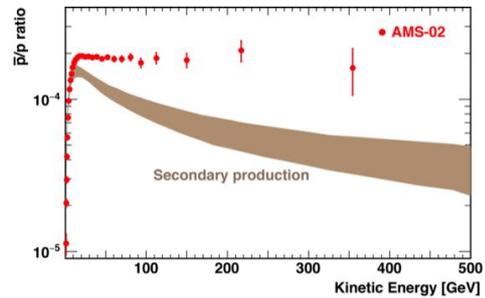


図 反陽子宇宙線の観測

- (2) 大型ハドロン衝突型加速器 LHC での実験データが蓄積され、高エネルギーのハドロンジェットの解析と、それらの実験データをよく再現するモンテカルロ数値シミュレーション計算コードの開発が進められていた。
- (3) 重力波の観測から、天体物理学的に説明することが難しい大きさの質量を持つブラックホールが宇宙に数多く存在することが分かり、そういったブラックホールの起源が問題となっていた。

## 2. 研究の目的

- (1) さまざまな最新の宇宙線観測データが、銀河系内外に暗黒物質として分布している可能性のある軽量の原始ブラックホール (以下、PBH) の起こす粒子放射の帰結として説明できるかどうかを調べること。
- (2) その結果から PBH の存在量を推定ないし制限し、PBH が宇宙の暗黒物質の正体であり得るかを判断すること。

## 3. 研究の方法

各種の宇宙線観測データが、銀河系内外に暗黒物質として存在する PBH からの粒子放射によって説明可能であるかを調べるために、それらから放射されて地球に到達する宇宙線フラックスを精密に計算することを試みた。そのために、

- ブラックホールからの粒子放射のモンテカルロ計算
- 銀河系内の宇宙線の伝播計算

のそれぞれを、最新の加速器実験の結果を取り込みながら実行した。そうして得られる PBH に由来する宇宙線スペクトルを観測データと比較することで、PBH が宇宙の暗黒物質のうちどれほどの割合を占め得るのかを判断しようとした。

## 4. 研究成果

- (1) ブラックホールから放射される反陽子の計算のために、LHC を含むハドロン衝突加速器での最近の実験データに適合するモンテカルロ計算コード PYTHIA の最新版であるバージョン 8 を用い、一次粒子として放射されるクォーク、レプトン、ゲージ粒子、ヒッグス粒子のそれぞれからジェット様に枝分かれして最終的に生成される安定粒子のエネルギースペクトルを求めるコードを作成した。ブラックホールの Hawking 温度、あるいは質量に応じた放射スペクトルを計算することが可能になった。また、荷電宇宙線の銀河磁場内の伝播を拡散現象として取り扱い、拡散方程式を半解析的に数値積分するコードを作成した。特に着目したい宇宙線である反陽子に関しては、標準的な現象による銀河円盤内の生成量をより正確に見積もるために、宇宙線陽子と星間ガスの衝突で生じる反陽子の生成断面積に最近の実験結果に基づくフィッティング式を取り入れた。これらにより、ブラックホールの質量分布と空間分布の入力に対して、地球で観測される PBH 由来の宇宙線スペクトルの出力が得られるようになった。

(2) Hawking 放射を起こす軽量の PBH が銀河系内および系外に暗黒物質として存在する可能性を想定し、それらから放出されて伝播したのちに地球に宇宙線として到来するガンマ線および反陽子のフラックスを定量的に評価することを行なった。ガンマ線は銀河系外に一樣等方的に分布する PBH と銀河系内の暗黒ハローに密に分布する PBH から放射される二つの成分を共に考慮した (図 1)。反陽子については、銀河系暗黒ハロー内の PBH から定常的に放射されて地球に到来する成分と、地球近傍で個々の PBH からバースト的に放射されて到来する二つの成分を検討した (図 2)。また、ガンマ線と反陽子の観測データには、それぞれ Fermi LAT と AMS-02 による最新のものを含めた。観測されている宇宙線フラックスと、PBH から放射されて到来することが予想される宇宙線フラックスとの比較から、 $5 \times 10^{14}$  グラム付近の質量を持つ PBH がそれらの宇宙線の源として顕著な寄与をする可能性が除外されることが分かり、上述した 2 種 4 成分の宇宙線それぞれから PBH 存在量に対する同程度のオーダーの強い制限が得られることが分かった。

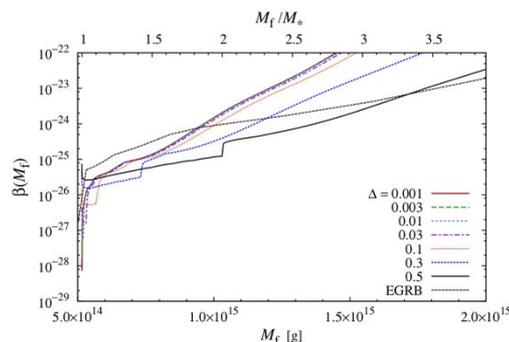


図 1 銀河系内と系外の PBH からガンマ線によって与えられる PBH 存在量上限の比較。引用文献 より。

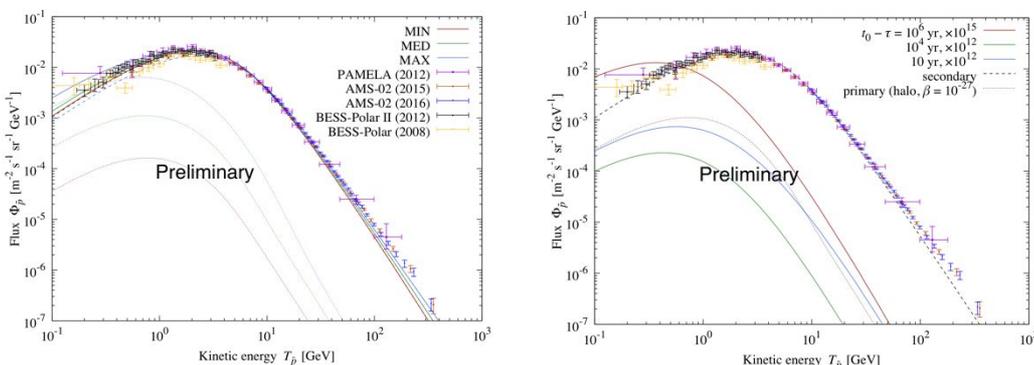


図 2 銀河系内の PBH から放射される反陽子の上限量 (左: 定常成分、右: バースト成分)。引用文献 より。

## < 引用文献 >

B.J. Carr, Kazunori Kohri, Yuuiti Sendouda, Jun'ichi Yokoyama, Constraints on primordial black holes from the Galactic gamma-ray background, Physical Review D, Vol. 94, 2016, 044029

仙洞田雄一、原始ブラックホールの観測的制限、第 30 回理論天文学宇宙物理学懇談会シンポジウム、2017

## 5 . 主な発表論文等

[雑誌論文](計 2 件)

B.J. Carr, Kazunori Kohri, Yuuiti Sendouda, Jun'ichi Yokoyama, Constraints on primordial black holes from the Galactic gamma-ray background, Physical Review D, 査読有、Vol. 94, 2016, 044029  
DOI: 10.1103/PhysRevD.94.044029

Kimitake Hayasaki, Keitaro Takahashi, Yuuiti Sendouda, Shigehiro Nagataki, Rapid merger of binary primordial black holes: An implication for GW150914, Publications of the Astronomical Society of Japan, 査読有、Vol. 68, 2016, 66  
DOI: 10.1093/pasj/psw065

[学会発表](計 4 件)

仙洞田雄一、原始ブラックホールの観測的制限、第 30 回理論天文学宇宙物理学懇談会シンポジウム、2017

仙洞田雄一、 $5 \times 10^{14} \text{g}$  付近の質量を持つ PBH への宇宙 X・ガンマ線観測からの制限、第 6 回観測的宇宙論ワークショップ、2017

仙洞田雄一、 $5 \times 10^{14} \text{g}$  付近の質量を持つ PBH への宇宙ガンマ線観測からの制限、相対論宇宙論 東北研究会 2017、2017

Yuuiti Sendouda、Gamma-ray constraints on the primordial black hole mass function around and above  $5 \times 10^{14}$  grams、Workshop on Primordial Black Holes、2017

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。