

ブラックホールおよび重力波を探針とする原始宇宙の研究

Probing the primordial universe with black holes and gravitational waves



仙洞田 雄一
Yuuiti Sendouda

弘前大学大学院理工学研究科
准教授
Associate Professor,
Graduate School of Science
and Technology,
Hiroshima University

研究の目的、背景

Purpose and Background of the Research

本研究の目的は約140億年前の宇宙の様子を明らかにすることである。数世紀にわたる物理学の進歩により、宇宙開闢から数分が経ったあとの時点での宇宙はビッグバンと呼ばれる高温高密度の状態であったことが理解されてきたが、それ以前の有様の解明は道半ばである。現在の有力な仮説によれば、ビッグバン状態になる前の宇宙はインフレーションと呼ばれる指数関数的な加速度的膨張を起こしていたとされており、またそこで成立していた重力の法則も一般相対性理論とは異なるものだったのではないかと想像されている。それらの原始的な宇宙に関する仮説を観測に基づいて検証していくことが、現代物理学のフロンティアの一つとなっている。

本研究ではビッグバンの最中に形成するとされているブラックホール(原始ブラックホール)と、インフレーション中あるいはそれ以前に生成するとされている重力波(原始重力波)の二つに着目し、それら原始宇宙の「化石」の探索を通じて当時の宇宙の姿を明らかにする方法の確立に取り組んだ。原始ブラックホールの代表的な成因はインフレーションの時期に生まれる密度の揺らぎの重力崩壊であり、その生成量が分かればインフレーションの機構についての重要な情報となる。また原始重力波は初期宇宙の空間の量子論的な揺らぎとして生成するとされ、発見されればインフレーションが起きていたことの直接的な証拠になる。

The purpose of this research is to understand the state of our universe around 14 billion years ago. Thanks to the progress in physics over the past few centuries, it has been established that the universe after a few minutes since its beginning was in a hot and dense state, a period called the big bang. Despite this great scientific achievement, however, further exploration into the era preceding the big bang is yet halfway. A convincing hypothesis suggests that the universe before the big bang had undergone a period of an exponentially accelerated expansion called cosmic inflation, and many theoretical arguments imply that the laws of

nature, especially gravity, at work then were necessarily modified with respect to the known ones. Testing these hypotheses for the primordial universe is one of the frontiers in modern physics.

In this series of studies, we elaborated on search strategies for two hypothetical "fossils" of the primordial universe, viz. black holes formed during the big bang (Primordial Black Holes; PBHs) and gravitational waves generated from quantum fluctuations during or before cosmic inflation (Primordial Gravitational Waves; PGWs). The statistical properties of these objects serve as unique and crucial probes to the early universe, since the environment of the universe at around the moments of their production is encoded therein. Indeed, since a representative source of PBHs is the density fluctuations seeded by inflation, their abundance should bring us important information about the dynamics of inflation; PGWs are expected to be produced from quantum mechanical fluctuation of space-time in an accelerated phase, so its existence, if confirmed, should serve as direct evidence of the occurrence of cosmic inflation.

研究成果

Research Results

原始ブラックホールと原始重力波のそれぞれの検討を通じ、主に次のような結論を得た。

【原始ブラックホール】原始ブラックホールが銀河系を取り囲む暗黒物質のハローの中に分布していることを仮定し、それらがホーキング効果によって放射するガンマ線の強度分布を理論計算し、ガンマ線の観測データと比較することで原始ブラックホール存在の兆候を探索した。残念ながらその証拠は得られず、存在量の上限值を得るに止まったが、 5×10^{14} グラム程度の質量帯においてはこれまでの研究の中で最も厳しい制限となった。これはインフレーションから生まれる揺らぎの非常に短い波長帯の振幅に対する稀有な制限になった。

【原始重力波】インフレーションが起きる前の宇宙の膨張則を原始重力波の観測によって探る方法を議論した。将来、重力波の観測が進展し、全天での強度分布を測ることができるようになれば、インフレーション以前の非等方的と考えられる宇宙膨張の証拠が得られる可能性があることを示した。また、原始重力波を重力理論の検証に用いることを議論した。一般相対性理論に対してワイル曲率の補正が加わる形の複数の理論を検討し、そうした枠組みで原始重力波の理論計算を行った。一般相対性理論の場合にはない偏極が生じることや強度が変化することなどを明らかにした。

Through the investigations of PBHs and PGWs, we have reached several conclusions as outlined below.

PBHs: Assuming PBHs are distributed in the dark-matter halo surrounding our Galaxy, we calculated the intensity map of gamma-rays due to Hawking radiation of those PBHs and

compared it with the actual observations in search of any signature of PBHs. We found no evidence for their existence and placed the severest constraint on the abundance of PBHs with mass around 5 times 10^{14} grams. Though undiscovered, in this way, PBHs play a unique role as a probe into the fluctuations on smallest scales generated by inflation.

PGWs: We explored methodology to probe the expansion law of the universe before inflation through as yet unachieved observations of the PGWs. Our method, in principle, allows one to search for evidence of the existence of an era before inflation, which is arguably characterised by anisotropic expansion, in the all-sky intensity map of the PGWs expected to become available in the future. Another subject is the law of gravity at work during inflation. We considered two gravity theories with Weyl-curvature corrections to general relativity and showed that the PGWs in those gravity theories exhibit extra polarisations or changes in the amplitude.

今後の展望 Future Prospects

マルチメッセンジャー天文学の発展により多様で精密になっていく宇宙観測データを用いて原始ブラックホールの更なる探索を進め、インフレーション機構や暗黒物質の正体の解明に貢献していきたい。また、原始重力波に関する理論研

究を進めることで宇宙創成の機構や究極的な物理法則を解明する手法の確立に取り組んでいきたい。

We plan to contribute to revealing the mechanism of inflation as well as the nature of dark matter by performing more thorough searches for PBHs using diverse and precise observational data from multi-messenger astronomy. Further developments in theoretical studies on PGWs are also projected as a viable approach to the true origin of the universe and ultimate physical laws.

主な研究資金(直接経費) Main Research Funding (Direct Costs)

JSPS 科研費 JP24111701/2012年度～2013年度 /1,700,000円

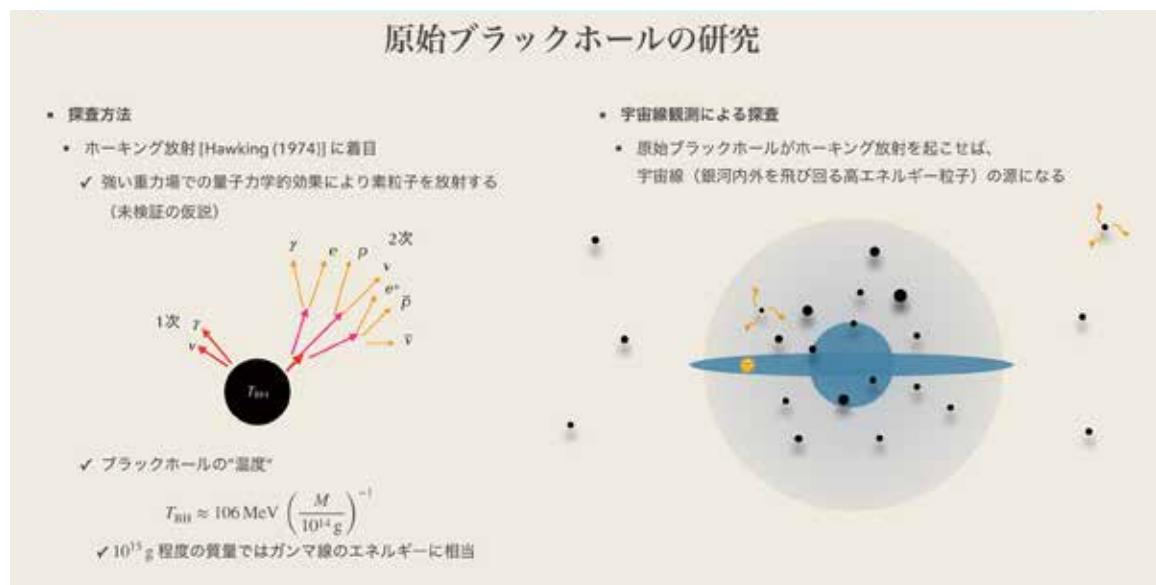
JSPS 科研費 JP26800115/2014年度～2015年度 /1,800,000円

JSPS 科研費 JP16K17675/2016年度～2018年度 /1,800,000円

JSPS KAKENHI JP24111701/FY2012-2013/1,700,000yen

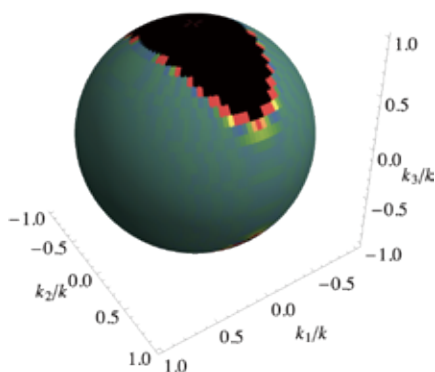
JSPS KAKENHI JP26800115/FY2014-2015/1,800,000yen

JSPS KAKENHI JP16K17675/FY2016-2018/1,800,000yen

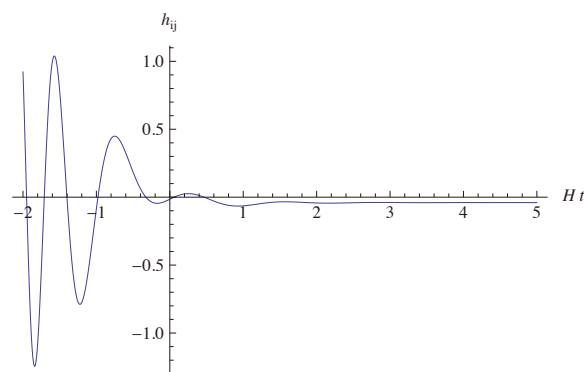


左: ブラックホールのホーキング放射。
Left: Hawking radiation from a black hole.

右: 銀河系のダークマターハローの中に存在する原始ブラックホール。
Right: PBHs in the dark-matter halo of our Galaxy.



インフレーション以前の宇宙に由来する原始重力波の非等方性。
Anisotropy of PGWs from a pre-inflationary phase.



アインシュタイン-ワイル重力理論での原始重力波の波形。
Waveform of PGW in Einstein-Weyl gravity.