

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 25 日現在

機関番号：24402

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2017

課題番号：25400265

研究課題名(和文) 相対論的非一様宇宙の研究

研究課題名(英文) Research for relativistic inhomogeneous universe

研究代表者

中尾 憲一 (Nakao, Ken-ichi)

大阪市立大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号：90263061

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：現代の標準宇宙モデルは、「我々のいる場所は特別ではない」というコペルニクス原理を作業仮説として構築されている。この作業仮説を観測事実としたいところだが、非コペルニクス的な非一様性、すなわち我々を中心として等方的な非一様性が存在するかどうかを直接確認することは不可能であり、間接的に確認することもそれほど容易ではない。本研究での主な成果は、非コペルニクス的な密度揺らぎがコペルニクス原理と整合的な非等方密度揺らぎの重力不安定性による成長や、宇宙背景放射の揺らぎに与える影響を明らかにし、非コペルニクス的な揺らぎにある程度の制限を与えることが可能であることを示したことである。

研究成果の概要(英文)：The standard model of the modern physical cosmology is based on the working assumption called the Copernican principle which states that we are not located at the privileged position of the universe. In order to strengthen the basis of the modern physical cosmology, it is very important to observationally confirm whether this working assumption is good. However, it is, in practice, impossible to directly check whether non-Copernican inhomogeneities, i.e., inhomogeneities isotropic with respect to our location do or do not exist. It is not so easy to confirm it even indirectly. Through this research project, the effects of non-Copernican density perturbations on the growth rate of Copernican density perturbations to form clusters of galaxies and the anisotropies of the cosmic microwave background radiation have been revealed, and then it has been shown that we can put the upper bound on the non-Copernican inhomogeneities through those effects.

研究分野：重力理論

キーワード：一般相対性理論 宇宙論 非一様宇宙 ダークエネルギー 構造形成 ブラックホール

1. 研究開始当初の背景

距離-赤方偏移関係、宇宙背景放射の揺らぎ、銀河分布に関する観測データから、宇宙の加速膨張が強く示唆されている。宇宙空間の一樣等方性と一般相対論の正当性を仮定すると、この観測事実はダークエネルギーを示唆するが、宇宙空間は厳密に一樣等方ではなく、また、大域的なスケールでの一般相対論の正否は自明ではない。

2. 研究の目的

(1)非一樣宇宙の大域的な進化と非一樣性の関係を明らかにする。

(2)宇宙論的ホライズン・スケールの非一樣性が、距離-赤方偏移関係等の宇宙論的な観測結果に与える影響を解明する。

3. 研究の方法

(1)数値相対論によるブラックホール宇宙の解析と並行して、準解析的にブラックホール宇宙の等角平坦近似によって解析を行う。

(2)相対論的な重力多体系を解析する数値プログラムを構築し、宇宙論的な構造形成のシミュレーションを行うことによって、非摂動的に非一樣宇宙モデルの力学的進化を解析する。

(3)コペルニクス原理の観測的検証方法を提案するために、巨大ボイド宇宙モデルにおける様々な観測量の解析を行うとともに、ダークエネルギーの観測における非コペルニクス的な非一樣性の影響を明らかにする。

4. 研究成果

(1)研究代表者とその共同研究者によって初期条件設定法が開発された、ブラックホール宇宙モデル(ブラックホールが等間隔に並ぶ宇宙モデル)の時間発展を数値相対論によって解析した。数値相対論は、重力波源として有望なブラックホールや中性子星の連星系の時間発展を調べることを主な目的として発展してきた手法であり、近年目覚ましい進歩を遂げた。本研究は、この数値相対論の手法を宇宙論に適用した先駆的な研究である。ブラックホールのみが存在する宇宙は極めて非一樣であり、宇宙空間の膨張速度をどのように定義するかは非自明である。解析した宇宙モデルは周期的な構造を持つので、一周期の境界面の面積に注目し、その時間変化率を調べたところ、ブラックホール間の距離が非常に短い場合ですら、一樣等方なダスト宇宙である Einstein-de Sitter 宇宙モデルと同じ膨張則にしたがって進化することが明らかになった。

(2)無衝突粒子からなる無限に薄い球殻の相対論的な多体系を理解するための第1段階として、同心の球殻の2体系の進化を詳細に

解析した。同様な系はニュートン重力の場合でも考えることができ、先行研究が存在する。無衝突粒子から成る球殻を考えているので、衝突後は互いにすり抜けるが、何も変化がないわけではなく、エネルギーのやりとりが起きる。外側から内側に入った球殻はエネルギーを受け取り、内側から外側に出る球殻はエネルギーを減少させる。相対論的な系とニュートン的な系の違いは、相対論的な系の方が衝突の際にやり取りするエネルギーの値が大きくなることであり、驚くべきことに、その大きさに上限は存在しない。ところで、速度分散を持った無衝突粒子から成る球殻は圧力を持つ。この圧力と重力によって、球殻が1体のみの場合は、収縮、バウンス、膨張、バウンスを繰り返す定常状態になりえる。一方、多体系の場合は、収縮、バウンス、膨張の合間に球殻どうしの衝突が起きる。相対論的な系では、衝突の相対速度によってやり取りするエネルギーが大きく変化するので、偶発的に運動エネルギー過剰の状態では球殻が収縮し、ブラックホールを形成する過程が存在することを明らかにした。この爆縮によるブラックホール形成が、3体以上の多体系の進化に与える影響を調べるのが今後の課題である。

(3)巨大ボイド宇宙モデルにおける銀河団のような構造の形成過程を明らかにするための最も直接的な手法は、巨大ボイド宇宙モデルにおける線形摂動の解析である。しかし線形摂動とはいえ、背景時空の対称性が低い為、摂動の従う方程式は、変数分離が不可能で、数値シミュレーションによる研究が必要となる。南アフリカとイギリスのグループは、数値シミュレーションに頼らずに解析を進める為に、摂動変数の一部がゼロであると仮定して研究を進めた。しかし、その変数を無視する根拠は明らかではないので、我々の研究グループでは、巨大ボイド自体を一樣等方宇宙モデルにおける摂動として扱い、逐次近似によって、巨大ボイドの影響が銀河団スケールの密度揺らぎに与える影響を計算した。それによって、銀河団スケールの密度揺らぎの進化を解析する為には、南アフリカとイギリスのグループが行った摂動変数を無視するという手法は有効ではないことを明らかにすることができた。我々の研究グループは、さらに非線形の構造形成に関する研究を進める為に、潮汐近似と呼ばれる星の連星系を解析する為に開発された手法を巨大ボイド宇宙モデルに適用し、定式化を行った。

(4)巨大ボイド宇宙モデルのように、我々を中心とする等方的な100Mpc~1000Mpcスケールの非一樣性がある場合、その存在を直接的に観測することは不可能である。何故ならば、そのような構造を確認する為には、我々の住む銀河から10Mpc~100Mpc程度移動して大域的な銀河分布を観測しなければならないが

らである（並進対称性を確認する為には、並進する必要がある）。それ故、我々を中心とする等方的な非一様性がある場合、観測データから導かれる結果には、大きな系統誤差が含まれる可能性がある。等方的な非一様性の直接観測は不可能だが、宇宙背景放射のスペクトルの観測等から、その大きさには間接的な制限がつけられている。ここでは、その制限以下の等方的な非一様性を仮定して系統誤差の評価を行い、たとえ、ダークエネルギーが宇宙定数であったとしても、ファントム的なダークエネルギーであると結論づける可能性があることを示した。また、距離-赤方偏移関係、宇宙背景放射のスペクトルの揺らぎ、そしてバリオン音響振動スケールの銀河分布という3つの観測量によって、等方的非一様性の大きさにより強い制限を課すことが可能であることを示した。

(5)(2)の無衝突粒子から成る無限に薄い球殻の2体系の解析から明らかになった爆縮による崩壊現象にヒントを得て、ブラックホールが持つことのできる最大角運動量を超える角運動量を持つコンパクトな高速回転体（superspinar と呼ばれている）の実現可能性について研究を進めた。(2)では球対称な球殻を考え、ここでは自転している球殻を考え、その初期条件を、一般相対論の基礎方程式であるアインシュタイン方程式に含まれる拘束条件を数値的に解くことによって設定した。そしてその数値解を解析することによって、球殻のサイズと球殻を構成する物質の状態方程式の関係を求め、因果律の要請と等価なドミナント・エネルギー条件を破ることなく、裸の特異点が形成されるほど、球殻はコンパクトになりうることを示した。

(6)これまでに、数多くのブラックホール候補天体が見つかり、ブラックホールがどのように形成されるのかは、宇宙物理学における重要な問題の一つと考えられている。ここでは、星が形成される以前の初期宇宙で、ホライズン・スケールの密度揺らぎが収縮して形成される、いわゆる原始ブラックホールに注目し、物質優勢期における生成率を評価した。放射優勢期の原始ブラックホール形成とは異なり、物質優勢期では、重力崩壊が非等方に進む為、その最終生成物がブラックホールになるかどうかは自明ではない。ブラックホールになる為には、ほぼ等方に重力崩壊する必要があるのである。この研究では、重力崩壊の非等方性を評価し、放射優勢期より大きな生成率になることを示した。また、物質優勢期には潮汐トルクによって、密度揺らぎが角運動量を持つことが知られており、それによってブラックホールの生成率が抑制されると考えられる。その角運動量の効果を考慮して生成率の評価を行った。

5. 主な発表論文等
(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

- [雑誌論文](計 11 件)
- 原田知広, 柳哲文, 郡和範, 中尾憲一
Physical Review D, Vol.96(2017)083517
(査読あり)
- 根岸宏行, 中尾憲一
Physical Review D, Vol.95(2017)023003
(査読あり)
- Mandar Patil, 原田知広, 中尾憲一,
Pankaj S. Joshi, 木村匡志
Physical Review D, Vol.93(2016)104015
(査読あり)
- 原田知広, 柳哲文, 郡和範, 中尾憲一,
Sanjay Jhingan
Astrophysical Journal, Vol.833 (2016)61
(査読あり)
- 西川隆介, 中尾憲一, 柳哲文
JCAP Vol.1612 (2016) 004
(査読あり)
- 根岸宏行, 中尾憲一, 柳哲文, 西川隆介
Physical Review D, Vol.92(2015)103003
(査読あり)
- Mandar Patil, Pankaj S. Joshi,
中尾憲一, 木村匡志, 原田知広
Europhysics Letters, Vol.110(2015)30004
(査読あり)
- 中尾憲一, 木村匡志, 原田知広, Mandar
Patil, Pankaj S. Joshi
Physical Review D Vol.90(2014)124079
(査読あり)
- 西川隆介, 中尾憲一, 柳哲文
Physical Review D Vol.90(2014)107301
(査読あり)
- 西川隆介, 柳哲文, 中尾憲一
Physical Review D, Vol.88(2013)123520
(査読あり)
- 柳哲文, 大川博督, 中尾憲一
Physical Review Letters, Vol.111,
(2013) 161102
(査読あり)
- [学会発表](計 6 件)
- 中尾憲一, Pankaj Joshi, Prashant
Kocharakota, Jun-qi Guo, 田越秀行, 原
田知広, Mandar Patil, Andrzej Krolak,
日本物理学会秋季大会(2017.9)宇都宮大
学
- 原田知広, 柳哲文, 郡和範, 中尾憲一,
日本物理学会秋季大会(2017.9)宇都宮大
学
- 原田知広, 柳哲文, 郡和範, 中尾憲一,
Sanjay Jhingan
日本物理学会年次大会(2016.3) 大阪大
学
- 中尾憲一
日本物理学会秋季大会(2014.9) 佐賀大
学

西川隆介, 中尾憲一, 柳哲文,
日本物理学会年次大会(2014.3)東海大学
根岸宏行, 中尾憲一, 柳哲文, 西川隆介,
日本物理学会年次大会(2014.3)東海大学

6. 研究組織

(1)研究代表者

中尾 憲一 (NAKAO Ken-ichi)

大阪市立大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号：90263061

(2)研究分担者

()

研究者番号：

(3)連携研究者

()

研究者番号：

(4)研究協力者

柳 哲文 (YOO, ChuI-Moon)

西川 隆介 (NISHIKAWA, Ryusuke)