

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年5月29日現在

機関番号：24402

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2009～2011

課題番号：21540276

研究課題名（和文） 相対論的非一様宇宙に関する理論的な研究

研究課題名（英文） Theoretical study on relativistic inhomogeneous universe

研究代表者

中尾 憲一 (NAKAO KENICHI)

大阪市立大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号：90263061

研究成果の概要（和文）：非一様宇宙の様々な性質を明らかにする為に、以下の3つのテーマについて研究を行った。(1)ブラックホールを構成要素とする宇宙モデルの宇宙空間の膨張速度が一様等方宇宙と類似の法則に従うことを示した。宇宙空間の膨張速度が一様等方宇宙と類似の法則に従うことを示した。(2)円筒対称な無限に長い非一様性の解析により、宇宙検閲官仮説の反例につながりうる結果を得た。(3)宇宙の地平サイズと同程度の球対称な巨大ボイド(低密度領域)を持つ宇宙モデルの解析により、ダークエネルギー問題に関して非一様性の解析が重要であることを示した。

研究成果の概要（英文）：In order to show various natures of inhomogeneous universe, the following three subjects: (1) construction of initial data of a universe model composed of regularly aligned black holes and its cosmic volume expansion; (2) cylindrical inhomogeneous structures with infinite length; (3) cosmological model with a spherically symmetric void of a comparable size with a cosmological horizon scale. For the subject (1), I showed that the volume expansion rate of a black hole universe model is determined by an equation similar to that of the homogeneous and isotropic universe model. For the subject (2), I obtain a very significant result that may lead to a counterexample of the cosmic censorship hypothesis. For the subject (3), I studied the spectrum of the cosmic microwave background radiation, kinematic Sunyaev-Zel'dovich effect, redshift drift and the evolution of anisotropic density fluctuations. These results imply that inhomogeneity of the universe is very important to decide what is the dark energy and how large it is.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	700,000	210,000	910,000
2010年度	600,000	180,000	780,000
2011年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	1900,000	570,000	2470,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：宇宙論・相対論・非一様宇宙・ダークエネルギー

1. 研究開始当初の背景

ビッグバン宇宙モデルは、宇宙の一様等方

性を仮定した上で、一般相対論と地上で成り立つ物理法則が宇宙の至るところで成り立

っているという仮定のもとに構築され、重要な観測事実を極めて自然に説明することに成功した。そして、現在の観測的宇宙論の最重要課題は、一様等方な大域的宇宙モデルを特徴づける宇宙論パラメーターと物質の状態方程式を観測によって明らかにすることである。特に、ダークエネルギーの状態方程式やその存在量を決定することは、本研究開始当初から終了した現在にいたるまで、未だに重要なテーマであり続けている。しかしながら、我々の宇宙には星や銀河、銀河団、さらには超銀河団といった非一様性が存在しており、これらの非一様性は、宇宙論パラメーター等を決定するための観測結果に影響を与える。したがって、観測的宇宙論において、非一様性が観測結果に及ぼす影響を予想し、それらを取り除くことはきわめて重要であった。この重要性は今も変わることは無い。

2. 研究の目的

本研究の目的は以下の3点である。

- (1) 非一様宇宙の大域的な進化と非一様性の関係の解明。
- (2) 非一様宇宙で形成されるブラックホールと宇宙論的な非一様性の生み出す時空特異点の構造の解明。
- (3) 宇宙の非一様性が、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の解明。

3. 研究の方法

- (1) ブラックホールが周期的に並ぶ真空の宇宙を数値相対論により解析することによって、小スケールだが摂動的にあつかうことのできない非一様性の存在が、宇宙の大域的な力学進化に及ぼす影響を明らかにする。
- (2) 閉じた宇宙モデルにおける重力崩壊の解析的モデルを構築することによってブラックホールの構造の解析を行うことと平行して、宇宙論的なスケールの非一様性の生み出す時空特異点の構造を明らかにする。
- (3) Lemaitre-Tolman-Bondi 解は、球対称に分布した塵状物質の運動と、それが存在する時空を記述するアインシュタイン方程式の厳密解である。この解を用いて構成した非一様宇宙モデルの解析を行う。

4. 研究成果

- (1) ブラックホール宇宙の初期条件：ブラックホールが等間隔で並んだ宇宙モデルの初期条件を数値的に構成し、その解析を

行った。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は10元連立準線形偏微分方程式であり、解析的な手法で一般解を求めることは不可能であり、強い重力場を伴う現象の研究においては、数値的な手法が非常に重要な役割を演じる。アインシュタイン方程式をコーシー問題として数値的に積分する研究方法は、数値相対論と呼ばれている。もちろん、ブラックホール宇宙の研究においても、数値相対論に頼らざるを得ない。

アインシュタイン方程式をコーシー問題として解くとは、3次元空間の計量テンソルの時間発展という形式で積分するということである。アインシュタイン方程式は3次元空間の計量テンソル6成分の時間に関する2階微分の方程式6本、時間に関する1階微分の方程式4本の連立偏微分方程式である。後者は、コーシー問題の初期条件が満たすべき拘束条件と呼ばれる方程式である。初期条件は、3次元空間の計量テンソル6成分とその時間微分6成分だが、そのうちの4成分が拘束条件で決定され、他の4成分が座標変換の自由度に対応するので、自由に決められるのは残りの4成分だけである。この4成分が物理的な自由度である。座標を適切に選び、物理的自由度を適切に与えた上で、拘束条件を解くことによって望みの初期条件を設定する必要があるが、これは自明な作業ではない。

本研究では、ブラックホールが等間隔に並ぶ宇宙の初期条件を与える手法は与え、宇宙空間の膨張速度が、一様等方宇宙のフリードマン方程式と類似の方程式にしたがって、ブラックホールの質量と間隔の関数になることを明らかにした。また、数値計算により拘束条件の解を具体的に構成した。

この研究は数値相対論を宇宙論に応用する新しい試みであり、今後は、ブラックホール宇宙の時間発展を明らかにする必要がある。

- (2) 自己相似な円筒対称重力波の解の分類：本研究の開始前に、中尾、原田、栗田、森澤の4人は、円筒対称な塵状物質の重力崩壊の数値シミュレーションを行い、その仮定で生成される重力波が自己相似性を持つことを明らかにした。この結果は、「宇宙で起きる重力現象は、漸近的に自己相似的に振る舞う」という自己相似予想を支持する結果である（自己相似予想は、球対称系でその正当性を示唆する結果が得られているが、円筒対称系ではそれまで知られていなかった）。

ところで、円筒対称性を持つ真空中の重力波を記述する一般解が知られており、

Einstein-Rosen(ER)波と呼ばれている。この研究では自己相似性をもつ ER 波に注目してその完全な分類を行なった。この研究の副産物として、円筒対称系の準局所的なエネルギーの良い指標と考えられていた C-エネルギーがミンコフスキー時空でもゼロでない値を与えることが明らかになり、C-エネルギーの使用には注意が必要であることが明らかにされた。

- (3) 逆回転する無衝突粒子から構成される無限に薄い円筒対称殻の不安定性：漸近的に平坦な円筒対称系では、もっともらしいエネルギー条件を満たす物質や放射のみが存在する場合、事象地平は形成されず、時空特異点は裸の特異点を呼ばれる事象地平に囲まれない原理的に観測可能なタイプに限られることが知られている。しかし、物理的にもっともらしい物質や放射のみが存在する円筒対称系でそれらの崩壊によって時空特異点が形成されるかどうかは自明ではない。

本研究では、それまで安定だと考えられていた逆回転する無衝突粒子からなる円筒対称殻が、線形摂動に対して不安定であることが明らかにした。これは、もっともらしい初期条件から始まる重力崩壊では、裸の特異点は形成されないという宇宙検閲官仮説の反例につながる発見でもある。今後は、数値相対論を併用し時空特異点の形成可能性とその構造の解明を行なう必要がある。

- (4) 高次元時空における光的な円筒対称殻の崩壊によるブラックストリング形成：超弦理論は我々の宇宙は 10 次元時空であることを予言する。そしてこの理論に触発され、短距離の重力相互作用は 5 次元以上の高次元な振る舞いをすると言するモデルがブレイン宇宙モデルである。高次元時空では、円筒対称系の重力崩壊により無限に長く伸びた事象地平が形成される。その内部はブラックストリングと呼ばれる。このブラックストリングは、摂動に対して不安定であることが知られており、最終的に裸の特異点が形成される可能性が示唆されている。それゆえ、正則な初期条件から始まる重力崩壊現象では、ブラックストリングが形成されない可能性があるが、

本研究では光的な円筒殻の崩壊モデルを構成し、多少歪んだ形状からの崩壊でも、ブラックストリングが形成されうることを示した。

- (5) 宇宙背景放射の揺らぎのスペクトルと整合的な巨大ボイド宇宙モデル：宇宙背景放射の揺らぎのスペクトルは、バリオン音響振動に対応する特徴的なスペクトルを持ち、宇宙モデルに強い制限を与える

観測結果となっている。

本研究では、Ia 型超新星の観測から得られた距離-赤方偏移関係と整合的で、且つ宇宙背景放射の揺らぎのスペクトルと整合的な巨大ボイド宇宙モデルを Lemaitre-Tolman-Bondi 解を用いて構成できることを示した。

- (6) 運動学的 Sunyaev-Zel'dovich 効果の観測と整合的な巨大ボイド宇宙モデル：Ia 型超新星の観測から得られた距離-赤方偏移関係と整合的な巨大ボイド宇宙モデルでは、銀河団が宇宙背景放射に対して大きな相対速度を持つ為に、銀河団中のプラズマ化したガスが宇宙背景放射のスペクトルを逆コンプトン散乱によりゆがめるので、背景放射のスペクトルの観測により巨大ボイド宇宙モデルはほとんど否定されているという指摘がなされていた。

本研究では、電離水素の中性化によって背景放射と物質の相互作用が切れる宇宙の晴れ上がりと呼ばれる時期の背景放射の非一様性を導入すると、観測的制限は無くなることを具体的に示した。

- (7) 巨大ボイド宇宙モデルにおける赤方偏移の時間変化：巨大ボイド宇宙モデルとダークエネルギーの存在する一様等方宇宙モデルを識別する最も有力な方法の一つは、天体の宇宙論的赤方偏移の時間変化の観測だと言われている。巨大ボイドモデルは、赤方偏移が時間とともに弱くなるが、ダークエネルギーモデルは、赤方偏移が時間とともに強くなると考えられている。本研究では、密度がボイドの中心からの距離の非減少関数になっているボイド宇宙モデルが、この観測によってダークエネルギー宇宙モデルと識別可能であることを数学的に厳密に示すとともに、密度が距離の減少関数になっている領域があると、観測的に識別が困難になる場合があることを、具体的にモデルを構成して示した。

- (8) 巨大ボイド宇宙モデルにおける密度揺らぎの成長：Ia 型超新星の観測から得られた距離-赤方偏移関係と整合的な巨大ボイド宇宙モデルにおいて、密度揺らぎの成長が明らかになれば、銀河や銀河団の分布の観測データを用いて巨大ボイド宇宙モデルに制限をつけることが可能になる。それゆえ、密度揺らぎの線形摂動解析は、非常に重要な研究テーマなのだが、Lemaitre-Tolman-Bondi 解の線形摂動の計算が非常に困難であることから、まともな解析はこれまで誰も行なっていなかった。

本研究では、Lemaitre-Tolman-Bondi 解の線形摂動を行なうことはせず、ボイド構造も一様等方宇宙からの摂動として

取り扱い, ボイド構造が銀河団に対応する密度揺らぎの形状にどのような影響を与えるかを, 逐次近似によって解析した. その結果, 一様等方宇宙モデルの場合と異なり, ボイド宇宙モデルでは銀河分布の相関関数が, 非等方になることが明らかになった. 今後は, 赤方偏移空間での相関関数を求め, 観測データと直接比較することにより, ボイド宇宙モデルの正否を確認することができる.

- (9) スカラー場のボイド宇宙モデルの膨張則: 球対称なスカラー場の自己相似解を用いて, 球対称のボイドが存在するスカラー場の宇宙モデルを構成し, その距離-赤方偏移関係を調べた. その結果, ダークエネルギーの導入をせずに, 宇宙空間の膨張が加速されることを示した.

この研究成果は, 我々の宇宙とは直接関係のない単純化しすぎたモデルだが, スカラーテンソル理論のスカラー場とこのモデルのスカラー場を同一視して, より現実的な宇宙モデルの構築を考える必要がある.

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9件)

- ① 柳哲文, 阿部博之, 中尾憲一, 孝森洋介, “Black hole universe: construction and analysis of initial data”, arXiv:1204.2411, 査読無, 2012.
- ② 栗田泰生, 中尾憲一, “Dynamical instability in a relativistic cylindrical shell composed of counter rotating particles”, Progress of Theoretical Physics, 査読有, Vol. 128, No. 1, 2012 に掲載予定.
- ③ 柳哲文, 中尾憲一, “宇宙原理の検証”, 日本物理学会誌 BUTURI, 査読有, Vol. 67, No. 1, 2012, p.37-43.
- ④ 西川隆介, 柳哲文, 中尾憲一, “Evolution of density perturbations in a large void universe”, Physical Review D, 査読有, Vol. 85, 2012, 103511 (10 ページ).
- ⑤ 柳哲文, 甲斐智博, 中尾憲一, “Redshift drift in LTB void universes”, Physical Review D, 査読有, Vol. 83, 2011, 043527 (8 ページ).
- ⑥ 柳哲文, 中尾憲一, 佐々木節, “CMB observations in LTB universe Part II: the kSZ effect in an LTB universe”, JCAP, 査読有, Vol. 10, 2010, 011 (19 ページ).
- ⑦ 柳哲文, 中尾憲一, 佐々木節, “CMB observations in LTB universe Part I:

matching peak positions in the CMB spectrum”, JCAP, 査読有, Vol. 07, 2010, 012 (19 ページ).

- ⑧ Swastik Bhattacharya, Pankaj S. Joshi, 中尾憲一, “Accelerated cosmic expansion in a scalar field universe”, Physical Review D, 査読有, Vol. 81, 2010, 024025 (10 ページ).
- ⑨ 原田知広, 中尾憲一, Brien C. Nolan, “Einstein-Rosen waves and the self-similarity hypothesis in cylindrical symmetry”, Physical Review D, 査読有, Vol. 80, 2009, 024025 (15 ページ); erratum 109903.

[学会発表] (計10件)

- ① 柳哲文, 阿部博之, 中尾憲一, 孝森洋介, “ブラックホール宇宙”, 第67回日本物理学会年次大会, 2012年3月26日, 関西学院大学西宮上ヶ原キャンパス
- ② 西川隆介, 中尾憲一, 柳哲文, “ヴォイド宇宙モデルにおける密度揺らぎ相関関数”, 第67回日本物理学会年次大会, 2012年3月25日, 関西学院大学西宮上ヶ原キャンパス
- ③ 栗田泰生, 中尾憲一, “円筒シエルの不安定性について”, 第67回日本物理学会年次大会, 2012年3月24日, 関西学院大学西宮上ヶ原キャンパス
- ④ 阿部博之, 孝森洋介, 中尾憲一, 柳哲文, “ブラックホール宇宙の初期条件とその構造”, 日本物理学会秋季大会, 2011年9月18日, 弘前大学文京町キャンパス
- ⑤ 西川隆介, 中尾憲一, 柳哲文, “ボイド宇宙における構造形成”, 日本物理学会秋季大会, 2011年9月16日, 弘前大学文京町キャンパス
- ⑥ 柳哲文, 中尾憲一, 甲斐智博, “LTB 時空を用いた逆問題と赤方偏移ドリフト”, 日本物理学会秋季大会, 2010年9月14日, 九州工業大学戸畑キャンパス
- ⑦ 西川隆介, 中尾憲一, 柳哲文, “アンチコペルニクス宇宙モデルの摂動論”, 日本物理学会秋季大会, 2010年9月14日, 九州工業大学戸畑キャンパス
- ⑧ 阿部博之, 中尾憲一, 孝森洋介, 柳哲文, “ブラックホール宇宙の初期条件”, 日本物理学会秋季大会, 2010年9月12日, 九州工業大学戸畑キャンパス
- ⑨ 寺川達哉, 中尾憲一, 孝森洋介, 木村匡志, 阿部博之, 伊形尚久, 宮本雲平, “(N+1)次元円筒対称 null shell の重力崩壊によるブラックストリングの形成とその安定性”, 日本物理学会秋季大会, 2010年9月11日, 九州工業大学戸畑キャン

パス

- ⑩ 原田知広, 中尾憲一, Brien C. Nolan,
“Einstein-Rosen 波と円筒対称時空に
おける自己相似仮説Ⅱ”, 日本物理学会秋
季大会, 2009年9月10日, 甲南大
学岡本キャンパス

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中尾憲一 (NAKAO KENICHI)

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

なし ()

研究者番号：

(3) 連携研究者

なし ()

研究者番号：