

## 論文の内容の要旨

### Towards the spontaneous compactification of extra dimensions with generalized gravity

(拡張重力理論による余剰次元の自発的コンパクト化への道程)

田原 弘章

■本研究の背景と動機 宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) の観測によって、宇宙膨張をさかのぼった極初期は放射に満たされていたというビッグバン宇宙論が支持された一方で、平坦性問題や地平線問題などが未解決問題として残された。それらを同時に解決するのがインフレーションであり、なおかつ量子効果によってスケール不変な曲率揺らぎをつくることで、宇宙の一樣等方性だけでなく、現在の銀河などの構造の由来も説明することができる。インフレーションを起こす最も簡単な方法はスカラー場のポテンシャルエネルギーを用いることであり、様々なモデルが提案されている。一般化ガリレオン理論は、高階微分が運動方程式に現れないという制約の下で、重力とスカラー場の最も一般的な相互作用を与え、単一スカラー場のモデルを統一的に記述することができる。さらに一般化ガリレオン理論は、一般相対論を内包し、知られている他の重力理論を広く含む拡張重力理論であり、我々の宇宙の重力を記述する可能性がある。一般相対論では、空間曲率が正なる場合を除き、一樣非等方な膨張宇宙は、宇宙項が存在する下で必ず等方化することが知られている。言い換えれば、一般相対論には等方アトラクターのみが存在する。これは宇宙無毛定理と呼ばれており、インフレーションによって宇宙が等方化されるという期待を補強する。一方で、一般化ガリレオン理論を用いて一樣非等方宇宙を考察すると、非等方解もアトラクターになり得ることが、本博士論文では指摘される。この非等方アトラクターは、一般相対論でも存在した等方アトラクターに加えて存在し、どちらに収束するかは初期条件に依存する。これから得られる示唆は、4次元宇宙でインフレーションを起こした時に、我々が住むほぼ一樣等方な宇宙を得るには、最初からある程度等方でなければならないということである。非等方アトラクターが現在の宇宙にどのように関わるのかについては、3つの可能性が考えられる。一つは、宇宙は4次元時空での非等方アトラクター上にあるという可能性であり、本博士論文では、非等方アトラクターまわりの摂動を計算してこれを棄却した。もう一つは、宇宙は4次元時空での等方アトラクター上にあり、非等方

アトラクターは存在しないかほとんど影響しないという可能性である。本博士論文では、非等方アトラクターの存在を許す理論の制限のために、ブラックホール周辺などの強重力場における摂動の安定性条件を導いた。最後の一つは、高次元時空の非等方アトラクターの上で、等方な低次元宇宙が我々の宇宙として生成されている可能性である。本博士論文では、この素朴なアイデアに基づき、拡張重力理論の下での高次元時空の動力学を調べ、小さい余剰次元空間が維持される解を求めた。

■一様非等方宇宙の発展 一般化ガリレオン理論の4次元の場合は特にホルンデスキー理論と呼ばれる。ホルンデスキー理論に基づいてビアンキ I 型宇宙の発展を計算し、あるクラス ( $G_{5X} \neq 0$  もしくは  $A_5 \neq 0$ ) では非等方アトラクターが存在することを解析的に示した。また、幾つかのモデルで、非等方インフレーションが起こることを数値的に計算した。従来知られていた非等方インフレーションでは、ベクトル場などの向きを持った量を用いて、インフレーション時の非等方性を維持していた。一方で本博士論文は、向きを持たないスカラー場のみが追加された重力理論を用いて非等方インフレーションを起こしたという点で新しい。また、実現される非等方膨張率の典型的な大きさが等方膨張率と同じ程度であり、CMB の観測から許されている 1% レベルの非等方性をつくるには微調整が必要であることがわかった。反対に、ある方向がその他の方向よりもゆっくり膨張する解を自然に構成することが可能であると判明し、高次元時空での類似解を調べる動機となった。

■一様非等方宇宙の摂動論 非等方アトラクターでの摂動のふるまいを解析するため、軸対称ビアンキ I 型宇宙での摂動を計算した。軸対称性により、軸に関する空間反転に対するパリティの偶奇で摂動を分類することができる。偶パリティと奇パリティの摂動は互いに独立に発展するため、分けて解析することが可能である。先ず、非等方アトラクターを仮定せずに一般の非等方性の下での摂動の分散関係を調べた。その結果、偶パリティモードの重力波がスカラー波と独立に発展せず、伝播速度が混合する現象を発見した。すなわちホルンデスキー理論において非等方背景を通過する重力波は、複屈折をすることが許される。次に、宇宙が非等方アトラクターに収束することを仮定した結果、近づくにつれ重力波の伝播速度が上昇し、中性子星連星合体の観測による伝播速度の制限を超えてしまうことが明らかになった。これは、4次元時空での非等方アトラクターが、我々の宇宙の解たりえないことを示している。また、非軸対称ビアンキ I 型宇宙での摂動の分散関係も与えられた。最後に、特異的な摂動のふるまいをういた宇宙の一様化について考察が与えられた。

■静的球対称時空の摂動論 上の摂動の解析により、非等方解はゴーストを持ち現実的な宇宙モデルにならないことが明らかになったので、強い重力場をつくるブラックホールに注目することにした。場の配位の仮定として静的球対称性のみを課し、摂動の分散関係を求めた。球対称性により、原点に関する空間反転のパリティによって摂動が分類され、奇パリティモードは重力波の片方の偏光モードを表し、偶パリティモードはもう片方の偏光モードとスカラー波を表す。先行研究によって奇パリティモードの分散関係は動径・角度方向ともに求められていたものの、偶パリティモードは動径方向の分散関係のみが求められていた。本博士論文では、角度方向を含めた完全な分散関係を求め、予想されていた分散関係の混合が起こることを明らかにした。これは、拡張重力理論を観測的に制限する新しい視点を与えられられる。また、求められた分散関係を用いて、角度方向の摂動に対する新たな安定性条件を導いた。これにより、ブラックホール解とそれを許す重力モデルのさらなる理論的制限が可能となる。

■余剰次元の凍結 余剰次元空間が小さく保たれるような高次元時空のダイナミクスを得るため、拡張重力理論である一般化ガリレオン理論に基づき、平坦な空間曲率を持つ一般次元の一樣非等方時空の発展を計算した。ただし簡単のため、一樣スカラー場の運動が時空の発展に影響しないクラスの理論に制限した。この理論クラスは、高階微分を含まない一般的な重力理論であるラブロック理論を含んでいる。結果として、4次元の場合と同様に非等方アトラクターが存在し、パラメータ間の階層性を仮定すると、ある空間方向が残りの空間方向と比べて緩やかに膨張もしくは収縮することが明らかになった。この方向を余剰次元とみなすと、余剰次元方向の膨張率と宇宙次元方向の膨張率の比を、階層性を強めることで任意に小さくすることが可能である。非等方アトラクターは、等方な圧力を持つエネルギー成分に満たされているときにアトラクターとして機能するため、宇宙史で通常想定される時期のうち、インフレーション期、物質優勢期、そして宇宙項優勢期に余剰次元方向の成長を小さく留めることができる。放射などの非等方な圧力を持つエネルギー成分に満たされているときは、一般に非等方アトラクターが機能しないが、先行する等方的エネルギー優勢期に余剰次元の膨張率が小さくなっていけば、余剰次元の膨張加速度が宇宙次元のそれと比べ抑制されることが分かり、依然として余剰次元体積を小さく保つことができると期待される。特に、放射優勢期には放射の状態方程式が特別な条件を満たすため、余剰次元空間の膨張率が減衰することを示した。したがって、一樣性の仮定の下では、宇宙史の全期間において余剰次元が凍結し、フリードマン方程式に従う宇宙が拡張重力理論によって実現した。