

これまでの研究歴 (A4判1枚程度)

February 15, 2012

木下 俊一郎

近年、一般相対論を超えた基礎理論の最有力な候補として発展著しい理論が超弦理論です。そこでは私たちが住む時空次元は本来、10次元であるという驚くべき示唆が得られています。その結果、新しく描き出される宇宙像として、私たちの4次元宇宙が高次元時空中のブレーンと呼ばれる膜状の部分空間であるという考えや、通常の観測では検知されないサイズへとコンパクト化された4次元以外の余剰空間が付随している姿など、高次元時空から4次元宇宙を実現するための多種多様なアイデア・モデルが提唱されています。このような背景の下、超弦理論のような高次元理論に基づく宇宙モデルにおいて、主に重力相互作用に係わる現象を明らかにするべく、これまで以下のような研究活動を行ってきました。

非定常ブラックホールのHawking温度 [論文2]

ブラックホールが熱力学的な性質を持ち、Hawking温度で熱輻射をするということは、重力理論と量子論を結びつける上で非常に重要な現象の一つです。また宇宙物理・宇宙論の観点でも興味深い対象となっています。しかし、一般にHawking温度の導出自体は、定常ブラックホールであることに強く依存しており、この性質が非定常なブラックホールへどう拡張されるかは、数多くの議論が成されていますが、時空の幾何学的性質に主眼を置いたものであることが否めません。

私たちは、元来のHawking輻射の導出であるBogoliubov変換による方法を、非定常な背景時空に適用することで、平衡に近いブラックホールのHawking温度が、未来のイベントホライズン上の幾何学量ではなく、過去のホライズンに付随する表面重力によって決定されることを示しました。さらに、この結果をAdS/CFT対応に適用することで、熱平衡にある系へエネルギーを注入した時、次の熱平衡系にいたるまでには有限の時間を要し、これはブラックホール時空での因果律からも自然な結果であることを示しました。

AdS/CFT対応を用いたブラックホール物理の解析 [論文4]

超弦理論が示唆する、ゲージ理論と重力理論の双対性の一つの体現であるAdS/CFT 対応の新たな応用として、低次元の強結合量子系のダイナミクスを、それに対応する古典重力理論で記述しようという試みが成されています。このような試みの一つとして提案されたホログラフィック超伝導のモデルは、強相関電子系での超伝導相転移を模した現象を、ブラックホール時空により重力理論側で記述しようとするものです。このモデルは、電荷を帯びたブラックホール時空、電磁場、さらに電荷を帯びた複素スカラー場で系が記述され、このスカラー場の不安定性による凝縮がゲージ理論側での超伝導相転移に対応します。これまで、低温側つまりブラックホールの帯びた電荷が大きい場合に不安定性が存在し、高温側でも存在する通常の荷電ブラックホール解の他に、荷電スカラー場も帯びたブラックホール解が存在することが示されていました。そこで私たちは、このホログラフィック超伝導のモデルにおいて、Einstein-Maxwell-complex scalar系の運動方程式を数値的に解くことで、その相転移現象の非平衡プロセスの解析を行いました[論文4]。まず不安定なパラメータ領域(低温側)の荷電ブラックホールを始状態として時間発展を追い、不安定性によりスカラー場が凝縮していき、最終的にスカラー場を帯びたブラックホール解へと安定に収束していく様子を明らかにしました。これにより、先にその存在が示されていたスカラー場を帯びたブラックホール解が安定で不安定性の終状態であることを示し、超伝導・常伝導相をあらわす秩序変数の相転移中の時間発展の様子も示しました。

フラックスコンパクト化と加速膨張宇宙の安定性 [論文5,9,10,11,12,13]

高次元時空から4次元宇宙を構成する要素の一つとして、現在の実験・観測では感知できない小スケールへの余剰次元のコンパクト化が挙げられます。余剰次元のコンパクト化を行った場合、余剰次元の大きさや形の自由度にとまらぬ場が出現することになります。フラックスによるコンパクト化は、このコン

コンパクトな余剰次元の形を運動方程式の解としてダイナミカルに実現し、かつ安定に保つことで、実験事実と矛盾するような余剰次元由来の余分な自由度を抑える有力な手段です。

このようなフラックスコンパクト化での宇宙モデルを調べるため、6次元の新しいブレーンワールドモデルの提唱、性質の解明を行いました。その中で時空の線形摂動に対する安定性解析を行い、4次元ブレーン上が加速膨張するde Sitter宇宙の場合、宇宙の膨張率が大きくなり過ぎると、フラックスによる余剰2次元空間の安定化が破れ、時空自体が不安定になることを示しました。また一方、de Sitter時空は、ブラックホールのevent horizonと類似のcosmological horizonを持ち、この面積に付随したエントロピーを持つことが知られています。そこで時空の熱力学的性質を調べるため、保存量である全フラックスをパラメータとして時空の解系列を表わした結果、不安定になる時空はエントロピーが低い系列に属し、一方で安定な時空はより高いエントロピーを持っていることがわかり、前述の動的安定性が熱力学的な安定性と密接に関係していることを明らかにしました。以上のことにより、これまで一部の高次元ブラックホール時空について指摘されていた時空の動的安定性と熱力学的安定性の対応関係が、de Sitter時空を含むブレーン宇宙モデルにも存在することを示し、de Sitter時空のエントロピーが時空の安定性に関わることを明らかにしました[論文10]。

次に、余剰次元の数をより一般化したFreund-Rubinコンパクト化モデルでのde Sitter時空の性質を調べました。このモデルにおいては、余剰次元の数が4以上の場合、4次元de Sitter時空の膨張率が低い場合においても、余剰次元の形の変形に対応する新たな不安定性が存在することが知られていましたが、その明確な理由についてはわかっていませんでした。私は、6次元ブレーンモデルで得られた知見を元に、この不安定性が余剰次元の形が変形した新たな時空の系列の存在を意味することを発見し、実際にそのような解の系列を構成しました[論文9]。さらにこの新しい系列の時空について線形摂動に対する動的安定性と、エントロピーを基準にした熱力学的安定性について解析し、宇宙の膨張率が低い場合は、余剰次元の形が変形した新しい系列の時空の方が高いエントロピーを持ち、かつ動的にも安定であることを示しました。これにより余剰次元空間の形の相転移により、時空が安定化されうることを指摘しました[論文5]。

以上