

論文審査の結果の要旨

氏名 内田 元

初期宇宙の標準理論となっているインフレーション理論では、インフラトン場と呼ばれるスカラー場に起因する真空のエネルギーによって宇宙は指数関数的膨張をする。この膨張は真空の相転移によって真空のエネルギーが熱エネルギーに転化されることによって終了する。真空の相転移が1次相転移である場合、エネルギー状態の高い“偽”真空の領域内に、エネルギーの低い“真”真空の泡が核生成されそれが全空間を覆うことによって終了する。また、最近オープンインフレーション理論が提唱され、この理論では、一つの泡の中を、我々の住む宇宙と同定することができる。しかしこの理論に応用する場合、泡の核生成に重力の効果が顕著になる場合を考えなければならない。

本論文は、WKB近似のもと一般的なポテンシャルを持つ場に対して重力の効果を考慮した偽真空崩壊を表す波動関数を求め、崩壊後の系の状態を同定し、崩壊確率を算出しこの問題に大きな知見を与えている。

重力を考慮した場合の偽真空崩壊の研究は、Coleman & De Luccia (1980) によって始められた。重力とスカラー場が結合することにより、重力を考慮していなかった場合とは異なり、スカラー場が配位する空間自体もスカラー場の値に応じて変化する。またポテンシャルエネルギーの原点も自由に決められない。このため崩壊中のポテンシャルエネルギーが正の場合、バウンス解を考慮する際のスカラー場が配位する四次元ユークリッド空間は、無限の \mathbb{R}^4 ではなく、コンパクトな有限の四次元球 S^4 となる。ポテンシャルの形から、ユークリッド的古典解は無限の虚時間をかけなければ偽真空に到達できないので、有限の四次元球上ではバウンス解のスカラー場は偽真空の値をとらない。つまり、重力を考慮するミンコフスキー背景時空の場合のように、一般に崩壊前の状態（三次元面全面でスカラー場が偽真空をとる状態）を含むようなバウンス解は存在せず、ミンコフスキー背景時空上と同様の議論はできない。そこで従来は、ポテンシャルが適当な条件を満たしてバウンス解は崩壊前の状態を含んでいると仮定して議論が進められて来た。その結果、崩壊確率は $e^{-(S_B - S_F)}$ と算出され、またバウンス解の解析接続により偽真空崩壊後は真の真空の泡が膨張していくと同定された。崩壊過程でのポテンシャルエネルギーに対するポテンシャル障壁の曲率の比が十分に大きければ、このように崩壊前の状態を含むバウンス解は存在すると考えられているが、この条件無しではスカラー場が「無限」の虚時間をかけなければ偽真空に到達できな

いことを考え合わせると、この比は「無限」でなければならぬことが分かる。この条件を Thin-Wall Limit と呼ぶが、このようなポテンシャルは明らかに非現実的である。

本論文では、この問題を解明し、崩壊確率を計算するため、重力の効果の含まれた偽真空崩壊を表すよう波動関数を求め、崩壊確率を算出し、崩壊後の系の状態を同定している。Banks, Bender & Wu (1973) の方法では、ユークリッド古典解から配位空間上の二状態を結ぶ一径数の状態族を構成できれば、その状態族を用いてその状態間の WKB 波動関数の比を求めることが出来る。崩壊前後の状態を結ぶ一径数の状態族はユークリッド的古典解であるバウンス解からは構成できないが、バウンス解と偽真空解から一径数の状態族の構成の仕方によっては別の状態間の WKB 波動関数の比が得られる。特に、バウンス解から崩壊後の状態と $a = 0$ 付近の状態とを結ぶ一径数の状態族を構成することが可能で、偽真空解からは崩壊前の状態と $a = 0$ 付近の状態とを結ぶ一径数の状態族を構成できる。ただし、これらの $a = 0$ 付近の状態はそのスカラー場の値が ϕ_1 または ϕ_F と異なるので、全く同じ状態では無い。しかしバウンス解より新しく構成されたこの一径数の状態族を用いて、崩壊後の波動関数は進行波成分のみを持つという出立境界条件より、 $\phi = \phi_1$ の $a = 0$ 付近の状態での WKB 波動関数が決まる。この $a = 0$ 付近は量子力学の古典回帰点のように、ポテンシャルを簡単な形に近似することが可能で、その近似のもと波動関数を求めることができる。波動関数に正則条件を課すと、この波動関数の形は制限され、ポテンシャルエネルギーがプランクエネルギーよりも十分に小さいような系では、この波動関数と崩壊後の状態から求めた WKB 波動関数を接続することが可能で、 $a = 0$ 付近の波動関数が決まる。この波動関数は $a = 0$ 付近で ϕ 方向に広がった波動関数であるので、同様に崩壊前の状態と $\phi = \phi_F$ の $a = 0$ 付近を結ぶ WKB 波動関数と接続することができる。このようにして、この論文では出立境界条件と正則条件を満たす、崩壊前後を結ぶ波動関数が求めている。この波動関数から求められる崩壊確率は、WKB 近似の範囲で、前に示したバウンス解の方法で求めた値、 $e^{-(S_B - S_F)}$ と同じである。このように申請者は、従来根拠の弱かったバウンス解の方法が、WKB 近似の範囲で正しいことを明らかにしている。

この様に、申請者は重力の効果 that 顕著な場合について、偽真空の崩壊について極めて緻密な解析をおこなった。その結果、WKB 近似のもと一般的なポテンシャルを持つ場に対して重力の効果を検討した偽真空崩壊を表す波動関数を求め、崩壊後の系の状態を同定し、崩壊確率を算出しこの問題に大きな知見を与えた。

この論文は、佐々木 節氏との共同研究であるが、論文提出者が主体となって計算、解析をおこなったもので、論文提出者の寄与は十分おおいかったものと判断した。したがって博士（理学）の学位を授与できると認める。