

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2006～2008

課題番号：18740157

研究課題名 (和文) 宇宙の進化における位相的欠陥の役割

研究課題名 (英文) Roles of topological defects in the evolution of the universe

研究代表者

山口 昌英 (YAMAGUCHI MASAHIDE)

青山学院大学・理工学部・准教授

研究者番号：80383511

研究成果の概要：

これまで行われてきたコスミックストリングの研究のほぼ全て、テンションは時間に依らないと仮定されてきた。しかしながら、振動する場との結合がある場合やブレインワールドモデルにおいては、一般にテンションは時間依存性を持つ。この新しいクラスのストリングに初めて着目し、宇宙における進化や構造形成への影響を議論した。また、超紐理論に基づいて提案されている宇宙に収縮時期があったとするシナリオにおいて、これまでの常識を覆し、コスミックストリングが最新の観測によって示唆されている密度揺らぎの性質を説明できる可能性があることを示した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	900,000	0	900,000
2007年度	1,200,000	0	1,200,000
2008年度	1,200,000	360,000	1,560,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	360,000	3,660,000

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：宇宙物理

## 1. 研究開始当初の背景

最近の超紐理論の発展により、超紐自身が宇宙において現在観測される可能性が指摘され、また、ブレインによるインフレーションの後にブレイン同士の衝突の結果、位相的欠陥が生成されることが示されて以来、位相的欠陥は、宇宙論の研究者のみならず素粒子論の研究者にも大きな注目を浴びている。また、観測的にも、重力レンズ効果等を使って紐を見つけた、と主張する複数の観測グルー

プが現れてきた。さらには、重力波源として将来の観測での有力なターゲットとなること、WMAP衛星によって示された、予想よりもかなり早い時期での再イオン化を説明するのに、インフレーションによる揺らぎに加えて、紐から作られるような大きな非ガウス性を持った揺らぎの混入が適していることなど、一時期、研究が衰退傾向にあった位相的欠陥が、理論的にも観測的にも再び大きな注目を集め始めている。

## 2. 研究の目的

最近の理論並びに観測の発展を踏まえ、宇宙の進化における位相的欠陥の様々な役割を明らかにすることを目的としている。具体的には、まず、位相的欠陥により作られる密度揺らぎの役割について研究を行う。位相的欠陥により作られる密度揺らぎの種は、等曲率的で、かつ、因果的に作られると考えられている。その結果、WMAP衛星等による最近の宇宙背景放射の観測、特に偏光の観測により、位相的欠陥により作られる密度揺らぎは主成分に成りえず、インフレーションによって作られるものの副次的なものと結論付けられている。しかしながら、次のような場合には、驚くべきことに、この常識が必ずしも成り立たなくなる可能性がある。ブレイン宇宙論で提案されているような宇宙の収縮期があると、位相的欠陥により作られる密度揺らぎのサイズはホライズンを越えることが出来る。さらに、収縮により温度が上がると、破れていた対称性が回復し、位相的欠陥が消える。その結果、等曲率的な性質が源の消滅のために断熱的に変わり、作られる宇宙背景放射の揺らぎが、温度だけでなく偏光の性質も含め、インフレーションによって作られるものと極めて酷似するようになる。収縮期に作られる通常のスカラ場場の揺らぎも同様な性質を持ちえるが、特殊な場合にのみ、スケール不変な揺らぎを作ることが知られている。一方、位相的欠陥の進化は基本的にホライズンにしかよらないため、収縮期にも同じことが予想され、かなり一般的な収縮の場合に対してスケール不変な揺らぎを作ることが期待される。どのような種類の位相的欠陥の進化並びに収縮期から膨張期への遷移に対して上記の事が成り立つかを明らかにする。

また、このようにして作られた揺らぎを、インフレーションによって作られたものと観測的に区別するためには、二点相関ではほとんど相違がないため、高次相関に現れる非ガウス性を調べる必要がある。しかしながら、非ガウス性については、インフレーション理論の枠組みにおいても様々なモデルが混在しよく分かっていない点がある。従って、上記のシナリオだけでなく、通常のインフレーション理論における非ガウス性についても調べ、両者を区別できるように準備する。

さらに、従来の位相的欠陥並びに超紐理論のほぼ全ての研究では、張力が時間によらず一定であるとされてきた。しかしながら、ワープ空間ではブレインの位置の時間変化と共に、また、従来の宇宙論でも、位相的欠陥を作る場の真空期待値が他の場によって与えられる場合には、その場の時間変動により、張力も時間と共に激しく変化する。この場合に、従来考えられて来たものとは定量的に全

く異なると考えられる、宇宙における位相的欠陥の様々な役割について考察する。例えば、WMAP衛星等の観測により、位相的欠陥の張力について制限が与えられている。しかしながら、時間と共に張力が変わる場合には、この制限は大きく変更されることが予想される。紐を作る場の真空期待値が、暗黒物質である他の振動する場によって与えられるような時には、張力はスケール因子のマイナス三乗に比例して変化する。そのため、WMAPからの制限が弱い小さなスケールでは、時間に寄らない場合に比べて非常に大きな張力を持ちうる。このことは、周波数によっては、重力波源として現在考えられているよりも遥かに大きい寄与を与えることになり、LISAやLIGOまで待たずとも、Advanced LIGO若しくは現在稼働中のLIGO Iですら、ゆうに検出可能であるかもしれない評価を行う必要がある。

## 3. 研究の方法

位相的欠陥により作られる密度揺らぎ、特に、膨張期の前に収縮期があるような宇宙での密度揺らぎについて考察する。まず、収縮期においても位相的欠陥の進化はホライズンによって決まると考えられるので、各スケールの揺らぎがホライズンを越えるときの大きさを、時間の冪型に仮定しておく。位相的欠陥が存在する限りにおいては等曲率的であり、膨張期の手法とほぼ同じようにその進化を追うことが出来る。この際、後の収縮期から膨張期への遷移でモードが混ざる恐れがあるので、成長解・減衰解共にきちんと求めておく。収縮が進み、温度が高温になると、位相的欠陥を作っている元の場の対称性が温度効果のために回復するので、ある臨界温度で位相的欠陥は消えてなくなる。その結果、揺らぎの進化方程式は源の項がなくなるので齊次方程式になり、揺らぎは断熱的なものになる。この方程式を、収縮期から膨張期に渡るまで解くことにより、最終的な密度揺らぎの種の形を求めることが出来る。その結果、収縮期での初期の大きさが、時間のどのような冪型であるならば、最終的な揺らぎがスケール不変になるかを明らかにすることが出来る。この際に、次の点について気をつける必要がある。収縮期で回復した対称性が、膨張期に温度の低下と共に再び破れ、位相的欠陥が再び出来る可能性があることである。この位相的欠陥によっても新たな密度揺らぎが作られるが、これは等曲率かつ因果的に作られた性質を持つ。従って、収縮期の位相的欠陥によって作られた揺らぎが、膨張期の位相的欠陥によって作られた揺らぎよりも大きくなる必要がある。収縮期に十分揺らぎが増幅されれば問題はないが、そうでない場

合でも、遷移の際に揺らぎが一気に増幅される可能性がある場合が知られている。また、全く別の解決策として、膨張期での対称性の破れ方が収縮期と異なり、位相的欠陥が出来ないようにものになっていけばよい。収縮期での対称性の回復の仕方と膨張期での破れ方が、対称性を表す群の同じ部分群を通る必然性はないからである。

次に、膨張宇宙で、時間変化する張力を持った紐により作られる宇宙背景放射の非等方性を求める。そのためには、紐の運動についての異なる時刻での二点相関関数の性質さえ分かればよいことが知られており、さらに、その性質から背景放射の非等方性を求める手法も確立されており、Pogosianによりパブリックに使える数値計算コードが公開されている。本研究では、この数値計算コードを張力の時間変化がある場合に適用できるように書き直し、宇宙背景放射の非等方性への影響を調べ、張力に対してどのような制限が得られるかを考察する。

#### 4. 研究成果

これまで行われてきたコスミックストリングの研究のほぼ全てで、テンションは時間に依らないと仮定されてきた。しかしながら、振動する場との結合がある場合やブレインワールドモデルにおいては、一般にテンションは時間依存性を持つ。この新しいクラスのストリングに初めて着目し、宇宙における進化や構造形成への影響を議論した。まず、テンションに時間変化がないときと同じように、系がスケーリング則に落ち着く事を解析的に示した。また、宇宙背景放射の非等方性の観測や大規模構造の観測から、これらのテンションに対する制限を与えた。次に、ニュートリノの質量やウォームダークマター (WDM) の質量に対する考察を行った。ニュートリノや WDM の質量の絶対値については、それらの free streaming による宇宙の大規模構造への影響を考察することにより一番厳しい上限が得られる。しかしながら、これらの制限は、初期の密度揺らぎとしてインフレーションから作られたものだけを考えることにより得られているが、ストリングから作られる揺らぎを考慮することにより、制限が緩和される可能性がある。解析的・数値的両方の手法により、ニュートリノの質量に対する制限はほぼ変わらない一方、WDM の質量に対する制限は大きく緩和されうることを示した。

次に、宇宙には膨張期の前に収縮期が存在すると、その際に自然に存在する宇宙紐が密度の揺らぎの起源になる可能性がある、というアイデアを提唱し解析的にその性質を調べた。このような収縮期における宇宙紐は膨張期におけるものと異なり、以下の理由により観測から示唆されている 4 つの性質を持

つ密度揺らぎを生成できる。1：収縮期においても宇宙紐の進化は本質的にホライズンスケールにしか依存しないため、そのエネルギー密度が宇宙の全体のエネルギー密度と常にほぼ一定の割合を保ち、結果として振幅がほぼスケールによらない密度の揺らぎを预言する。2：揺らぎが作られた初期には膨張期と同様にエントロピー的な性質を持つ。しかしながら、収縮期の宇宙においては時間と共に温度が上がるので、ある臨界温度において(破れていた)対称性が回復し宇宙紐が消滅する。従って、揺らぎの源がなくなるので、密度揺らぎの性質がエントロピー的なものから断熱的なものになる。3：収縮期においては膨張期と異なり、エネルギー密度が輻射や物質によって支配されていると、ホライズンスケールの方がスケール因子の収縮よりも早く収縮し、ある(共動)スケールは時間と共に必ずスーパーホライズンになる。4：ストリング一本の分布は非ガウス性がかなり強いが、実際には何本もの分布の平均を取ったものが観測されるので、(中心極限定理により)ガウス分布に近くなる。このように、宇宙に膨張期の前に収縮期が存在すると、その際に自然に存在する宇宙紐が密度の揺らぎの起源になる可能性を提唱した。

さらに、インフレーションシナリオにおける密度揺らぎの非ガウス性についても考察を行った。例えば、インフラトンの崩壊率がある場の値に依存しており、その場が揺らぐことにより小さな密度の揺らぎが生成されることが知られている(modulated reheating シナリオと呼ばれる)。このモデルでは、大きな非ガウス性が生成されるが、これまでは3点相関関数までしか計算されておらず、他のモデルと区別することが出来なかった。申請者はこのモデルでの4点相関関数を計算し、このモデルに特有の3点相関関数との関係式を導出することに成功した。また、このモデルに限らず、揺らぎがインフレーション中に作られる場合に普遍的に成り立つ不等式を導出した。これらの関係式は、将来の観測でモデルを区別する際に非常に役に立つことが期待される。また、宇宙の初期には様々な場が存在し原始密度揺らぎに寄与する可能性がある。カーバトンと呼ばれる場もそのようなものの一つだが、インフラトンとカーバトンが共存する場合に、原始密度揺らぎの预言がどのようになるかを系統的に調べた。ある種のインフレーションモデルは、インフラトンだけが密度揺らぎの起源である場合には既に WMAP 等の観測から棄却されている。しかしながら、カーバトンも考えることにより、预言がどのように変わり現在の観測と矛盾しないようになるか、また、非ガウス性はどのように大きくなるか、について明らかにした。さらに、この場合に特有

の関係式も導出した。

## 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 19 件)

1. Takeshi Chiba and Masahide Yamaguchi: Extended slow-roll conditions and primordial fluctuations: Multiple scalar fields and generalized gravity, *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, 0901, 019, 1-16, (2009), 査読有。
2. Teruhiko Kawano and Masahide Yamaguchi: Reheating in chaotic D-term inflation, *Physical Review D*78, 123511, 1-5, (2008), 査読有。
3. Kazuhide Ichikawa, Teruaki Suyama, Tomo Takahashi, and Masahide Yamaguchi: Primordial curvature fluctuation and its non-Gaussianity in models with modulated reheating, *Physical Review D*78, 063545, 1-20 (2008), 査読有。
4. Takeshi Chiba and Masahide Yamaguchi: Extended slow-roll conditions and rapid-roll conditions, *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, 0810, 021, 1-16 (2008), 査読有。
5. K. Ichikawa, T. Suyama, T. Takahashi, Masahide Yamaguchi: Non-Gaussianity, Spectral Index and Tensor Modes in Mixed Inflation and Curvaton Models, *Physical Review D*78, 023513, 1-21 (2008), 査読有。
6. K. Kadota, T. Kawano, and Masahide Yamaguchi: New D-term chaotic inflation in supergravity and leptogenesis, *Physical Review D*77, 123516, 1-8 (2008), 査読有。
7. J. Martin and Masahide Yamaguchi: DBI-essence, *Physical Review D*77, 123508, 1-9 (2008), 査読有。
8. T. Kawaguchi, M. Kawasaki, T. Takayama, Masahide Yamaguchi, and J. Yokoyama: Formation of intermediate-mass black holes as primordial black holes in the inflationary cosmology with running spectral index, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 388, 1426-1432 (2008), 査読有。
9. T. Suyama and Masahide Yamaguchi: Non-Gaussianity in the modulated reheating scenario, *Physical Review D*77, 023505, 1-8, (2008), 査読有。
10. K. Kadota and Masahide Yamaguchi: D-term chaotic inflation in supergravity, *Physical Review D*76, 103522, 1-5 (2007), 査読有。
11. T. Chiba, Y. Himemoto, Masahide Yamaguchi, and J. Yokoyama: Effective Search Templates for a Primordial Stochastic Gravitational Wave Background, *Physical Review D*76, 043156, 1-7 (2007), 査読有。
12. T. Gherghetta, K. Kadota, and Masahide Yamaguchi: Warped Leptogenesis with Dirac Neutrino Masses, *Physical Review D*76, 023516, 1-6 (2007), 査読有。
13. O. Seto and Masahide Yamaguchi: Axino warm dark matter and  $\Omega_b - \Omega_{DM}$  coincidence, *Physical Review D*75, 123506, 1-7 (2007), 査読有。
14. K. Ichiki, Masahide Yamaguchi, and J. Yokoyama: Lepton asymmetry in the primordial gravitational wave spectrum, *Physical Review D*75, 084017, 1-8 (2007), 査読有。
15. R. H. Brandenberger, W. Kelly, and Masahide Yamaguchi: Electroweak Baryogenesis with Embedded Domain Walls, *Progress of Theoretical Physics*, 117, 823-834 (2007), 査読有。
16. T. Chiba, T. Kobayashi, Masahide Yamaguchi, and J. Yokoyama: Time variation of proton-electron mass ratio and fine structure constant with runaway dilaton, *Physical Review D*75, 043516, 1-10 (2007), 査読有。
17. T. Takahashi and Masahide Yamaguchi: Effects of Cosmic Strings on Free Streaming, *Physical Review D*74, 063512, 1-7 (2006), 査読有。
18. K. Ichikawa, T. Takahashi, and Masahide Yamaguchi: Implications of cosmic strings with time-varying tension on CMB and large scale structure, *Physical Review D*74, 063526, 1-9 (2006), 査読有。
19. M. Kawasaki, T. Takayama, Masahide Yamaguchi, and J. Yokoyama: Power spectrum of the density perturbations from smooth hybrid new inflation model, *Physical Review D*74, 043525, 1-10 (2006), 査読有。

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

山口 昌英(YAMAGUCHI MASAHIDE)  
青山学院大学・理工学部・准教授  
研究者番号: 80383511