

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 29 日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2011～2015

課題番号：23244057

研究課題名(和文)時空構造と非平衡物理学の統一的理解の探求

研究課題名(英文)Unified understandings of space-time structure and non-equilibrium physics

研究代表者

北澤 良久(KITAZAWA, Yoshihisa)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・教授

研究者番号：10195258

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 37,000,000円

研究成果の概要(和文)：時空構造と非平衡物理学の統一的理解の探求をテーマとして掲げた本共同研究の主要な研究実績として、de Sitter時空特有の赤外量子揺らぎが微視的理論の結合定数の時間変化をもたらす可能性を指摘した。この現象が、理論の局所的ローレンツ不変性の帰結である事を明らかにした。またこの赤外量子効果が、紫外発散と混合することによって、ダークエネルギーの時間変化をもたらすと予想されることを指摘し、その実験的検証可能性を議論した。

研究成果の概要(英文)：Our collaboration is titled as Unified understandings of space-time structure and non-equilibrium physics. The major achievements of our collaboration are the followings. de Sitter space-time produces its characteristic super-horizon quantum fluctuation. We have pointed out that it could make fundamental couplings time dependent. We have made it clear that this effect is a consequence of the local Lorentz invariance of the general covariant theory. We have also pointed out that this quantum effect with ultra violet infrared mixing, could lead to time dependence of Dark energy and discussed its possible experimental confirmation.

研究分野：素粒子論

キーワード：時空構造と非平衡物理学 赤外量子揺らぎ 結合定数の時間変化 ダークエネルギー

1. 研究開始当初の背景

「宇宙項問題」「ブラックホール蒸発と情報喪失問題」「時空のダイナミカルな生成」などの未解決問題の理解には、真空のダイナミカルな理解が本質的に重要であり、これまでの平衡系の場の理論からスコープを広げ、不安定で非平衡な“真空”を理解するための統一的なパラダイムを構成しなくてはならない。時間依存する時空や地平面をもつ時空での場の量子論と、時空の微視的模型として提案されている超弦理論や行列模型の解析を基礎にして、「時空の非平衡物理学」の構築へ向けた取り組みを行う本共同研究は、「時空構造と非平衡物理学の統一的理解の探求を」テーマとして掲げた。

2. 研究の目的

Polyakov や Tsamis, Woodard などの先駆的な研究に基づき、本共同研究は、非平衡系の場の理論の方法を用いて、真空が時間とともに変化する de Sitter 時空での物理的理解を深めた。特に、宇宙の大規模構造の起源とされる赤外量子効果が、宇宙項の時間変化と de Sitter 時空に付随する対称性をダイナミカルに破る機構を与える可能性を探求した。

宇宙項、もしくは暗黒エネルギーを真空エネルギーとして解釈できないかという問題を検討した。宇宙初期のインフレーション期に生成された量子ゆらぎが、その後の宇宙の歴史の中で凍結して残り、そのエネルギーが現在の宇宙項、もしくは暗黒エネルギーを与えうるかどうか、非常に軽い質量をもつスカラー場を用いて、調べた。

3. 研究の方法

スカラー場の赤外領域におけるスケール不変性に起因する宇宙項の時間依存性とドジッター不変性の破れの可能性を非線形シグマ模型において調べた。エネルギー運動量テンソルの期待値におけるリーディングの時間依存性は摂動展開の全次数で相殺する

事を示した。また3ループレベルまで、時間依存性を消去する繰り込み処方が存在する事を示した。一方高次微分相互作用に関しては、リーディングの時間依存性の相殺が起こらない事を示した。

時空の微視的模型として提案されている超弦理論や行列模型の解析によって、以下に述べる研究成果を発表した。

4. 研究成果

ドジッター時空において、スーパーホライゾンスケールの重力子による量子効果を研究した。この効果が、微視的理論のローレンツ不変性を破らない事を示した。相互作用する場の理論においては、相互作用の強さが、時間とともに減少する効果をもたらす事を示した。相互作用の時間変化は、相互作用のタイプごとに、スケール指数で指定される。我々はスケール指数の相対比は、ゲージに依存せず、物理的な観測可能量であると提唱した。

正の宇宙項を持った、ドジッター宇宙の量子効果の理解は大きな課題であり、宇宙項問題の解決に不可欠である。ドジッター時空において、重力子の量子揺らぎはスケール不変を示す。そのため、重力子のプロパゲーターには、赤外効果として時間の対数依存性が現れ、ドジッター時空のスケール不変性を破る。我々は、スーパーホライゾンスケールの重力子によるローカルな物質場のダイナミクスに対する物理的効果を研究した。我々は、この効果が、微視的理論のローレンツ不変性を破らない事を示した。具体的には、スカラー場とフェルミ場において、この効果は、時間に依存する場の繰り込み効果を生ずる。相互作用する場の理論においては、相互作用の強さが、時間とともに減少する効果をもたらす事を示した。相互作用の時間変化の大きさは、相互作用のタイプごとに、スケール指数で指定される。これらのスケール指数は重力子

のゲージに依存する。この事実は、時間の
変化スピードが観測者の座標系に依存する
ことに起因する。我々はスケール指数の相
対比は、ゲージに依存せず、物理的な観測
可能量であると提唱した。

本共同研究の主要な研究実績として、de
Sitter 時空特有の赤外量子揺らぎが微視的
理論の結合定数の時間変化をもたらす可能
性を指摘した。この現象が、理論の局所的
ローレンツ不変性の帰結である事を明らか
にした。またこの赤外量子効果が、紫外発
散と混合することによって、ダークエネル
ギーの時間変化をもたらすと予想されるこ
とを指摘し、その実験的検証可能性を議論
した。

宇宙項問題の理解に関しては、以下の研究
成果を発表した。

宇宙初期のインフレーションには、場の値
がプランクスケール程度に大きい Large
Field Inflation (LFI)と原点近傍から出発
する Small Field Inflation (SFI)があり、
全く異なる予言をする。最近、テンソルス
カラー比に対する制限から SFI が再検討さ
れている。しかし SFI では初期条件を極端
に不自然な値にとらないとならず、これが
SFI の大きな問題となっていた。これに対
して、LFI に引き着いて SFI が起こる模型
を考えると、一回目のインフレーション後
のプレヒーティングとよばれる急激な粒子
生成のために、引き続いて起こる SFI の初
期条件がダイナミカルに自然に導かれるこ
とを示した。

ローレンツ型 IIB 行列模型において、臨界
時刻より後に SO(9)対称性が SO(3)対称性
に自発的に破れることを見出した。これは
3 + 1 次元の膨張する宇宙のダイナミカル
な出現と解釈されうる。さらに、フェルミ
オンの寄与を単純化することにより、早い
時刻での膨張の様子を有効的に記述すると
期待される模型と後の時刻でのそれを有効

的に記述すると期待される模型を提唱した。
前者においては、膨張則が指数関数的であ
ること、後者においては膨張則が時刻の
1/2 乗に比例することを見た。これらは、
それぞれインフレーション宇宙と輻射優勢
宇宙での膨張則に等しい。また、前者の模
型において繰り込み群的手法を確立し、小
さな行列サイズで後の時刻を調べることを
可能にした。膨張により、作用は大きくな
るため、後の時刻では行列模型の古典解が
支配的になることが予想される。ここでは、
古典解を系統的に調べ、宇宙項問題を自然
に解決するような宇宙論的に興味深い解を
見出した。さらに、標準模型が IIB 行列模
型のなかでどのように実現するかを交差す
る D ブレーンから動機付けられた機構に
基づいて議論した。

またこの研究と平行して、モンテカルロ法
に現れる符号問題に対する複素ランジュバ
ン法を研究し、ゲージ・クーリングの正当
性の証明、特異ドリフト問題の原因解明な
ど、重要な成果を得た。

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 52 件)

(主なもののみ掲載)

1 Time Dependent Couplings as
Observables in de Sitter Space
Hiroyuki Kitamoto, Yoshihisa Kitazawa
Int.J.Mod.Phys. A29 (2014) no.8,
1430016

2 Hiroyuki Kitamoto, Yoshihisa
Kitazawa

"Soft Gravitons Screen Couplings in de
Sitter Space"

Phys.Rev. D87 (2013) 124007

3 Soft Graviton effects on Gauge
theories in de Sitter Space

Hiroyuki Kitamoto, Yoshihisa Kitazawa
Phys.Rev. D87 (2013) no.12, 124004

4 Dynamical fine-tuning of initial conditions for small field inflation

Satoshi Iso, Kazunori Kohri, Kengo Shimada.

DOI: 10.1103/PhysRevD.93.084009.

Phys.Rev. D93 (2016) no.8, 084009.

⁵ H. Aoki and S. Iso,

Evolution of Vacuum Fluctuations of an Ultra-Light Massive Scalar Field generated during and before Inflation, Progress of Theoretical and Experimental Physics (2015) 113E02 (28 pages).

⁶ Power-law expansion of the Universe from the bosonic Lorentzian type IIB matrix model

Yuta Ito, Jun Nishimura, Asato Tsuchiya
JHEP 1511 (2015) 070

⁷ New Insights into the Problem with a Singular Drift Term in the Complex Langevin Method

Jun Nishimura, Shinji Shimasakim
Phys.Rev. D92 (2015) no.1, 011501

[学会発表](計 48 件)
(主なもののみ掲載)

¹ Satoshi Iso,

New Physics at LHC ,
Nayang Technological University,
Singapore

Dynamical generation of weak scale -
cosmological implication
2016 3/2 (招待講演)

² Satoshi Iso,

Dynamical fine-tuning of initial conditions
of small field inflations
Annual theory meeting in Taiwan, NCTS,
Shinchu, Taiwan
2015 12/9 (招待講演)

³ 西村 淳

複素ランジュバン法におけるゲージ・クー
リングの一般化とその応用

「離散的手法による場と時空のダイナミク
ス」研究会 2015,岡山

9月15日(火)(招待講演)

⁴ A. Tsuchiya,

“Exponential and power-law expansion
of the Universe from the type IIB matrix
model”

「Corfu 2015 Workshop on
Noncommutative Field Theory and
Gravity」ギリシャコルフ島、2015年9
月21日～9月27日 (招待講演)

⁵ A. Tsuchiya

“Exponential and power-law expansion of
the Universe from the type IIB matrix
model”

「Numerical approaches to the holographic
principle, quantum gravity and cosmology」
京都大学基礎物理学研究所、2015年7月21
日～7月24日 (招待講演)

[図書](計 4 件)

(主なもののみ掲載)

¹ 土屋麻人 「弦理論と行列模型」サイエ
ンス社、2014年3月

[産業財産権]

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

[その他]

無し

6. 研究組織

(1)研究代表者

北澤 良久 (KITAZAWA, Yoshihisa)

高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子
核研究所・教授

研究者番号: 10195258

(2)研究分担者

磯 暁 (ISO, Satoshi)

高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子
核研究所・教授

研究者番号: 20242092

(3)研究分担者

西村 淳 (NISHIMURA, Jun)

高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子
核研究所・准教授
研究者番号： 90273218

(4)研究分担者

土屋 麻人 (TSUCHIYA,Asato)
静岡大学・理学部・准教授
研究者番号： 20294150

(5)研究分担者

青木 一 (AOKI,Hajime)
佐賀大学・工学研究科・教授
研究者番号： 80325589