

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 23 日現在

機関番号：15401  
 研究種目：基盤研究（C）  
 研究期間：2010～2012  
 課題番号：22540283  
 研究課題名（和文）非平衡の場の理論を用いたレプトジェネシスとレプトン数の破れの研究  
 研究課題名（英文） Study on lepto-genesis and lepton number violation  
 with non-equilibrium quantum field theory  
 研究代表者  
 両角 卓也（MOROZUMI TAKUYA）  
 広島大学・大学院理学研究科・准教授  
 研究者番号：20253049

### 研究成果の概要（和文）：

宇宙のレプトン数の生成とその後の時間発展を非平衡の場の量子論に基づいて研究した。粒子数の時間発展を場の量子論に基づいて計算することが可能になった。初期時間に粒子数-反粒子数非対称性がある場合に粒子数を保存しない質量項を導入すると、粒子-反粒子の振動がおきる。場の量子論では無限個の調和振動子が含まれ振動周期が波長ごとに異なる。このために初期時間の非対称性が減衰して初期値に回帰しない。このように、本研究によって宇宙のレプトン数の時間発展に関する新たな知見が得られた。

### 研究成果の概要（英文）：

We study the generation and the time development of lepton number of universe. One can compute time evolution of the particle number using non-equilibrium quantum field theory. Assuming that the asymmetry of particle number and anti-particle number exists at initial time, we include the mass term which does not conserve the particle number. Then, particle and anti-particle oscillation occurs. In our calculation with quantum field theory, as time goes, the asymmetry shows damping oscillation behavior and does not return to the initial value. This phenomenon occurs because there are infinite numbers of the oscillation modes with variety of their periods in the quantum field theory calculation. This is a new discovery of the project related to the time evolution of lepton number of universe.

### 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	900,000	270,000	1,170,000
2011 年度	600,000	180,000	780,000
2012 年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	2,100,000	630,000	2,730,000

### 研究分野：素粒子論

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：素粒子論・非平衡の場の理論・シーソー模型・レプトジェネシス・レプトン数

#### 1. 研究開始当初の背景

(1) 非平衡の場の量子論を、初期宇宙の素粒子模型による粒子数生成の問題に適用して現在の粒子数-反粒子非対称性を説明

しようという研究が盛んになってきた。

(2) ニュートリノ振動実験やニュートリノレス2重ベータ崩壊の実験によって、レプトンセクターにおけるCPの破れやレプトン数

の破れを観測できる可能性が高まっていた。

(3) 小さなニュートリノ質量を説明するシーソー模型においては低エネルギーの CP の破れとレプトン数生成による物質、反物質非対称性の生成 (レプトジェネシス) の関係が調べられ、レプトジェネシスによる粒子数生成の熱的過程を定量的に調べる方法の開発することが必要だった。

## 2. 研究の目的

(1) 宇宙の物質生成機構の有力な候補であるレプトジェネシスを、非平衡の場の理論を用いて研究する。特にレプトジェネシスの物理過程を生成されるレプトン数の観点から研究する。

(2) レプトジェネシスにおける電子数、ミューオン数、タウレプトン数の生成量はレプトンフレーバーの破れの現象と密接な関係があると予想される。この関係を非平衡過程を扱うのに適した実時間形式での非平衡の場の理論に基づいて調べる。

(3) レプトジェネシスを生成されるフレーバーの観点から場合分けをし、それぞれの場合にニュートリノ混合やその CP 対称性の破れ、ニュートリノレス 2 重ベータ崩壊、 $\tau \rightarrow e(\mu)\gamma$  等の実験で測定されるレプトン数非保存現象の大きさを予言し、レプトジェネシスの様々なシナリオごとに、低エネルギーでのレプトンフレーバーの破れにどのような特徴が現れるのかを明らかにする。

## 3. 研究の方法

(1) 非平衡の場の量子論 (Schwinger, Keldysh, Calzetta, Hu らによる) をサハロフの粒子数生成の条件; CP 対称性の破れと粒子数の破れの要素が組み込まれた素粒子模型に適用し、粒子数密度の時間発展を計算する。

① 粒子数期待値を持つ初期密度行列の導出。

② 初期密度行列を用いた実時間 2 点グリーン関数の導出。粒子数密度と実時間グリーン関数の関係の導出。

③ 任意の時刻における粒子数密度の計算。

④ 膨張宇宙の効果の計算。ドジッター時空上での粒子数密度の時間変化を計算する。

(2) 素粒子標準模型を超える模型の現象論的な研究。特に CP 対称性の破れ、ニュートリノの質量、レプトンフレーバーの破れに関係する模型を研究する。

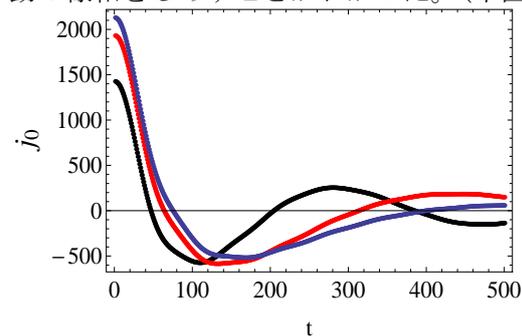
## 4. 研究成果

### (1)

① 宇宙のレプトン数の生成とその後の時間発展を非平衡の場の量子論に基づいて研究した。粒子数の時間発展を、場の量子論を用いて記述することによって、量子論的に計算することが可能になった。初期条件と

して、粒子数、反粒子数非対称性がある場合の熱、化学平衡状態を記述する量子統計の密度行列を複素スカラー場の理論の場合に求めた。これは、化学ポテンシャルと温度で記述される。この密度行列を用いて対応する初期粒子数密度の期待値を計算した。

② 粒子数非保存の効果の研究: 粒子数非保存を破る、相互作用や質量項を導入することで粒子数の期待値がどのように時間変化するかを研究した。特に複素スカラー場の理論の場合に粒子数を破る質量項を相互作用として導入した場合、粒子数-反粒子数振動の量子力学的な Toy 模型とは異なる振る舞いを示すことを明らかにした。量子力学的な模型では粒子数期待値は振幅が一定の振動的な様相をしめす。これを場の量子論に拡張すると量子力学的なモデルと違って、初期時刻にゼロでない粒子数期待値から始めた場合に、波長の異なる振動モードが異なる周期で振動するため、その重ね合わせは、時間が経つと打ち消しあい減衰振動の様相をしめすことがわかった。(下図)



(上図: 粒子数密度の時間変動の減衰振動的な振る舞い: KEKPH2012: 学会発表⑤より)

(2) ① 超対称なシーソー模型のレプトンフレーバーの破れを研究した。特に重いスカラーニュートリノセクターの超対称性の破れが  $\tau$  レプトンやミューオンのレプトンフレーバーの破れにどのように影響するかを調べた。

② ヒッグスセクターをニュートリノ質量の観点や CP の破れの観点から拡張した模型の研究を行った。ニュートリノの質量を小さなヒッグス粒子の期待値で説明する模型の研究では、期待値の量子補正に対する安定性を調べた。  $\tau$  レプトン崩壊の CP 対称性の破れやレプトン数の破れに拡張したヒッグスセクターの CP の破れがどのように寄与するかを調べた。

(3) さらに研究の展開として、特に膨張宇宙の下で粒子数がどのように時間変化するかを研究している。

## 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 7 件)

① 木村大自, Kang Young Lee, 両角 卓也  
The Form Factors of  $\tau \rightarrow K \pi (\eta) \nu$  and  
the predictions for CP violation beyond  
the standard model

Progress of theoretical and experimental  
physics, vol 5 (2013) 053B03 1-41

DOI:10.1093/ptep/ptt013

査読有

② 堀田 龍一, 両角 卓也, 高田浩行  
Particle Number Production and Time  
variation with Non-equilibrium field  
theory

TOMSK STATE PEDAGOGICAL UNIVERSITY  
BULLETIN, vol 13 (2012) 61-64

[http://vestnik.tspu.ru/eng/index.php?option=com\\_content&task=view&id=3384&Itemid=595&year=2013](http://vestnik.tspu.ru/eng/index.php?option=com_content&task=view&id=3384&Itemid=595&year=2013)

査読無

③ 堀田 龍一, 両角 卓也, 高田浩行  
Contribution from the interaction  
Hamiltonian to the expectation value of  
particle number with the non-equilibrium  
quantum field theory

AIP Conference Proceedings 1467(2012)  
239-242

DOI:10.1063/1.4742107

査読無

④ 木村大自, Kang Young Lee, 両角 卓也,  
CP violation of extended Higgs sector  
And its impact on  $D^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$  decays

AIP Conference Proceedings 1467(2012)  
266-269

DOI:10.1063/1.4742114

査読無

⑤ 両角卓也, 高田浩行, 玉井考太郎  
Quantum correction to the tiny vacuum  
expectation value in the two-Higgs-  
doublet-model for the Dirac neutrino mass  
Physical Review D 85, 055002-(1-13),  
(2012)

DOI:10.1103/Phys.RevD.85.055002

査読有

⑥ 木村大自, Kang Young Lee, 両角卓也,  
中川桂太  
Charged Higgs boson flavor changing  
Current in  $\tau \rightarrow \nu_{\chi} K \pi$

Nuclear Physics B Proceedings Supplements  
Vol 218, Issue 1, (2011), 3-8

DOI.10.1016/j.nuclphysbps.2011.06.002

査読無

⑦ Syn Kyu Kang, 両角卓也, 横崎統三

Effects of large threshold corrections  
in supersymmetric type I seesaw model

Journal of High Energy Physics,  
2010-11 (2010) 061 1-28

DOI:10.1007/JHEP11(2010)061

査読有

[学会発表] (計 13 件)

① 堀田龍一 (両角卓也)  
非平衡の場の量子論を用いた curved space  
における粒子数生成プロセスの研究  
日本物理学会 68 回年次大会 2013 年 3 月  
26 日 広島大学 (東広島市)

② 木村大自 (両角卓也)  
背景場の方法を用いた形状因子による  
形状因子による  $\tau \rightarrow K \pi \nu$  崩壊の研究  
日本物理学会 68 回年次大会 2013 年 3 月  
28 日 広島大学 (東広島市)

③ 梅枝宏之 (両角卓也)  
クオークシーソー模型における CP violation  
日本物理学会 68 回年次大会 2013 年 3 月  
28 日 広島大学 (東広島市)

④ Morozumi Takuya  
CP violation for quark seesaw model  
KEK flavor factory workshop, KEK  
(つくば市) 12/March/ 2013

⑤ Morozumi Takuya  
Time variation of particle number in  
curved apace time  
KEK 素粒子現象論研究会 KEK-PH2013  
2013 年 3 月 4 日, 高エネルギー加速器研究機  
構 (つくば市)

⑥ Morozumi Takuya  
Time variation of particle and  
anti-particle number in curved space time  
3rd International conference on Dark  
Matter, Dark Energy, and Matter and  
Anti-MatterAsymmetry, 28Dec.2012  
Hsinchu, Taiwan

⑦ Morozumi Takuya  
Particle and Anti-Particle Number  
Asymmetry by solving Quantum Boltzmann  
Equation  
International conference on flavor  
physics and cosmology, 11.Aug.2012,  
Weihei, China

⑧ Morozumi Takuya  
Particle number production and Time  
Variation with Non-equilibrium field  
Theory, 3rd Aug. 2012  
Quantum Field Theory and Gravity,2012,  
Tomsk, Russia

⑨ Morozumi Takuya  
Time variation of particle number in  
non-equilibrium quantum field theory  
YongPyong2012, 21.Feb.2012, YongPyong  
winter conference on particle physics  
竜平, 韓国

⑩ 堀田龍一 (両角卓也)  
非平衡な場の量子論における粒子数期待値  
に対する相互作用からの寄与  
日本物理学会 第67回年次大会  
2012年3月27日 関西学院大学

⑪ Morozumi Takuya  
The variation of particle number in  
quantum mechanical model  
A.P.C.T.P Winter School, 25, Feb., 2011,  
Asia Pacific Center for Theoretical  
Physics, Pohang, 韓国

⑫ 両角卓也  
非平衡の場の量子論を用いた粒子数の時間発展と  
レプトジェネシス  
新潟冬の研究会, 素粒子物理学の展望 2011年1  
月7日 新潟県, 湯沢東映ホテル

⑬ Morozumi Takuya  
Charged Higgs flavour-changing current in  
 $\tau \rightarrow \nu_X K \pi^0$   
The 11th International Workshop on  
Tau lepton Physics, 13.Sep.2010, 英国,  
Univ. of Manchester

[その他]  
ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

両角 卓也 (MOROZUMI TAKUYA)  
広島大学・大学院理学研究科・准教授  
研究者番号: 20253049

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号:

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号:

### (4) 研究協力者

高田 浩行 (TAKATA HIROYUKI)  
トムスク教育大学・理論物理・准教授  
堀田 龍一 (HOTTA RYUICHI)  
広島大学・理学研究科・博士課程後期  
大学院生  
木村 大自 (KIMURA DAIJI)  
近畿大学・工学部・非常勤講師  
Kang Young Lee  
Gyeongsang National University  
物理教育・教授  
横崎 統三 (YOKOZAKI NORIMI)  
東京大学・Kavli IPMU・日本学術振興会  
特別研究員  
玉井 考太郎 (TAMAI KOTARO)

広島大学・理学研究科・博士課程後期大学院  
生

川崎 涼夢 (KAWASAKI RYOMU)  
広島大学・理学研究科・博士課程前期大学院  
生

梅枝 宏之 (UMEEDA HIROYUKI)  
広島大学・理学研究科・博士課程前期大学院  
生

中川 桂太 (NAKAGAWA KEITA)  
広島大学・理学研究科・博士課程後期大学院  
生