

令和 1 年 10 月 30 日

海外特別研究員最終報告書

独立行政法人 日本学術振興会 理事長 殿

採用年度 平成29年度

受付番号 753

氏 名 奥田 健悟

(氏名は必ず自署すること)

海外特別研究員としての派遣期間を終了しましたので、下記のとおり報告いたします。

なお、下記及び別紙記載の内容については相違ありません。

記

1. 用務地 (派遣先国名) 用務地: ローザンヌ (国名: スイス)

2. 研究課題名 (和文) ※研究課題名は申請時のものと変わらないように記載すること。

階層性問題が示唆する TeV スケール物理と宇宙の超大規模構造

3. 派遣期間: 平成 29 年 10 月 1 日 ~ 令和 1 年 9 月 30 日

4. 受入機関名及び部局名

スイス連邦工科大学ローザンヌ校 (EPFL)

5. 所期の目的の遂行状況及び成果…書式任意 **書式任意(A4判相当3ページ以上、英語で記入も可)**

(研究・調査実施状況及びその成果の発表・関係学会への参加状況等)

(注)「6. 研究発表」以降については様式 10-別紙 1~4 に記入の上、併せて提出すること。

本研究の大きな目的は、電弱スケールとプランクスケールとを隔てる階層性に関する理解を深めることであった。より具体的に言えば、LHC 実験の結果を受けて注目を集めるようになった「素粒子標準模型は、電弱スケールを遥かに上回る高エネルギー領域までを記述する有効理論である」という可能性に注目し、それに動機付けられた隠れた対称性「スケール不変性」を持つ理論をあらゆる角度から調べ、その妥当性を検討してきた。研究計画申請段階では、宇宙論的考察に重きを置く予定であったが、受入研究者であるシャポシュニコフ教授と議論を進めるうち、信頼出来る解析を行うためには理論的な側面のより深い理解が不可欠であることが明らかとなった。このため、派遣期間前半ではスケール不変な模型の構築とその宇宙論的帰結について、後半は主にスケール不変な模型の紫外完全性や局所的スケール不変性への拡張について議論してきた。

まず本研究は、次のような観察とそれに伴う疑問に答える形で進んできた。

- スケール不変性はラグランジアンを制限し、特にスカラーポテンシャルは古典論レベルで南部ゴールドストーン場(ディラトン)に相当する平坦な方向を持つ。もしスケール不変性が量子異常により破れるならこのディラトン方向のポテンシャルが持ち上がるため、宇宙論は古典的に期待されるものから大きく変更される。このとき観測事実を矛盾なく説明できるのか？
- このスケール不変性の破れは量子化・繰り込みに伴い必要となる“基準スケール”に因るものであり、ここには古典論には存在しなかった新たなパラメータが入り込む余地がある。この“隠れた”パラメータが場の理論におけるスケール不変性の破れ方を決めるが、結果として宇宙の時間発展はどのように影響を受けるのか？
- そしてこのパラメータは新たな相互作用を誘起し理論の繰り込み可能性を壊す。これは、摂動計算が信頼できなくなる“切断”スケールが現れることを意味する。このような“低エネルギー”有効理論の枠内で、宇宙進化を議論するために必要な諸物理量を正しく求めることは可能なのか？ もし不可能であるなら、この切断スケール以上の高エネルギー領域を記述する紫外完全な理論が必要となる。しかしヒッグス質量への量子補正を抑えるためには、重い粒子の導入は許されない。そのような理論とは一体どのようなもので、どのように重力理論と繋がるのか？
- また一般座標変換不変性を持つ重力理論においては、スケール不変性の概念は局所的なもの(ワイル不

変性)へと拡張され得る。この局所対称性を量子論レベルで保つことは可能なのか？

シャポシュニコフ教授との議論から得られた成果（現在継続中のものに関しては、これまでの議論の中で固まった今後の研究方針）は次の四点に大別される。

- ① スケール不変性が量子的に破れるか、または保たれるかによって宇宙論がどう変わるかを詳しく調べた。プランクスケール程度の大きな質量を持つ粒子が存在しない場合に、ディラトン場の初期条件に関する微調整無しに観測事実との整合性を保つ二つの可能性を検討した。一つ目のシナリオは「スケール不変性の量子的破れによって現れるスカラーポテンシャルの鞍点に我々の宇宙が実現される」というものである。二つ目の可能性は「スケール不変性が量子論レベルで保たれる」という、より単純なものである。
- ② 隠れたパラメータ M を「ヒッグス場の値が M より大きいとき量子的スケール不変性が近似的に回復する」ように標準模型に導入した。切断スケールを評価し、ヒッグス有効ポテンシャルそのものは低エネルギー有効場の理論の範囲内で計算可能であることを明らかにした。それに基づいて M の宇宙論への影響を調べ、特に「トップクォーク質量が実験中心値 173GeV の場合でも、我々の電弱真空は絶対安定になり得る」ことを発見した。このときヒッグス場はインフラトンの役割を果たし得るが、インフレーション後の宇宙の温度は切断スケールを超えるため、宇宙進化の完全な記述のためにはより基本的な理論が必要となる。また別の可能性として「重力とヒッグス場の間の非最小限結合が無くても、ヒッグスポテンシャルは平坦化され得て、そこで引き起こされるインフレーションは CMB 揺らぎを説明できる」という M の選び方があることを示した。この場合、有効理論の枠内で宇宙進化が記述可能である一方、この特殊な M の値を説明する理論が必要となる。[Phys. Rev. D99, 103528 (2019) “Asymptotic Scale Invariance and its Consequences” M. Shaposhnikov and K. Shimada] これに関して 4 つの国際会議で発表を行った。
- ③ 重力理論との類似点である「エネルギースケールの定義そのものにダイナミカルな場が関与する」ことに着目し、スケール不変な理論の紫外完全化のシナリオとして漸近安全性の可能性を議論した。スカラー場一つの最も単純な模型の繰り込み群に、微分展開二次のオーダーで非自明な紫外固定点が見れることを見た。さらにフェルミオン等を含むより現実的な模型において、固定点が存在できるのか、またその位置がどう変わるのかを今後調べていく。
- ④ 量子化・繰り込みに伴い導入されるスケールの全てが、ダイナミカルな場により与えられているならば、スケール不変性のみならず、ワイル不変性も量子異常を持たないはずである。このことに基づいて、スカラー場が重力理論に特殊な形で結合した模型を構築した。現在、この模型が実際に量子的ワイル不変性を持つことを具体的に示すための計算を進めている。

以下ではこれらの成果について詳しく述べる。

- ① 重力セクターも含めたスケール不変性を実現するために、標準模型ヒッグス場 h に加え新たなスカラー場 ϕ の存在を仮定し、その場の真空期待値がプランクスケール m_p を与えるとする。本研究では ϕ を B-L ゲージ対称性のヒッグス場とみなした。

まずはスケール不変性が量子的に「破れる」場合の宇宙論を詳しく調べた。ディラトン場のポテンシャルが持ち上がり、モジュライ問題を引き起こす。つまりディラトン場がポテンシャルの最小値に到達するまでの間に二度目のインフレーションが起こり、それ以前に生成されたバリオン・暗黒物質を希薄化してしまう（一度目のインフレーションはディラトン方向とは直行する方向のポテンシャルエネルギーによって引き起こされる）。この問題を解決するためあらゆる可能性を調べた。

一つは、二度目のインフレーションが観測されている CMB 揺らぎを説明する場合である。このとき揺らぎの振幅を説明するためには、先行研究[1]によって議論されているように、ディラトンポテンシャルが十分に持ち上がる必要がある。我々の模型では、B-L ゲージボソンがプランクスケール程度の質量を持つ場合に限ってその条件が満たされ、十分な揺らぎが生成されるが、ヒッグス質量に非常に大きな量子補正をもたらしてしまう。

我々は階層性問題の観点からより興味深い可能性として、重い粒子が存在しない模型における解決策を探した。このとき二度目のインフレーションは観測と矛盾するため避けられなければならない。最もナイーブなものは、一度目のインフレーションの後にディラトン場が直接ポテンシャルの最小値へと落ちるような初期条件の微調整である。高温宇宙における有限密度効果を考慮しつつ初期条件への制限を調べたが、非常に強い微調整が必須であることが確かめられた。そのような微調整を説明する機構は、少なくとも我々の単純な模型の中には存在しない。そこで我々は、初期条件の微調整を必要としない解として「潰れずに残る領域が現在観測されている宇宙になっている」可能性について調べた。この時、ディラトンと直行方向のポテンシャルは安定かつ標準模型ヒッグス質量 125GeV を与える。一方で、ディラトン方向のポテンシャルは不安定で、かつ現在の宇宙年齢程度ではその不安定性が見えないほどに平坦でなければいけない。つまり我々の宇宙はポテンシャルの鞍点に実現されている場合である。ディラトン方向の不安定性は、ポテンシャルを持ち上げる働きをする粒子（我々の模型では B-L ゲージボソン）の

質量が電弱スケールより小さいときに現れる。さらに十分な平坦性は B-L ヒッグス場 ϕ の真空期待値が非常に大きく、かつ他の場との結合が非常に弱い場合に実現されることが分かった。結果として有効理論は、標準模型に三つの右巻きニュートリノを加えた模型に一致する。

さらに我々は、より単純な可能性として、スケール不変性は量子論レベルで「保たれる」と仮定した。この量子的スケール不変性は“基準スケール”がダイナミカルな場 h と ϕ の値により決まるとすることで実現され、ディラトン方向のポテンシャルは完全に平坦となりモジュライ問題は解決される。この可能性はシャボシュニコフ教授による先行研究[2]により知られていたものの、「プランクスケールの粒子の存在無しに、観測と整合的なスケール不変な模型を構築する」という観点から「スケール不変性は量子論レベルでも保たれるべきである」という主張はこれまでなされていなかった。今後、模型によらない一般的な議論を纏めて発表したいと考える。

②「スケール不変性が量子論レベルで破れるか、または保たれるか」は、低エネルギー場の理論の範囲内では、上述の通り繰り込みにおいて「基準スケールが固定されているか、ダイナミカルな場により与えられているか」の違いとして理解される。これは、紫外理論の性質の一部が繰り込み処方という形で低エネルギー場の理論に現れることを意味し、結果として宇宙の時間発展に影響を与える。我々は、宇宙論的な整合性から紫外理論に関する何らかの情報を得られないかと考えた。

ここでは新しい場を導入せずに、標準模型への、繰り込み処方の違いから来る影響を調べた。ヒッグス場 h があるスケール M よりも大きい時に、量子的スケール不変性が回復する『漸近的スケール不変』な処方を導入した。摂動計算の方法を整備し、それに基づきヒッグス有効ポテンシャルを求めた。漸近的スケール不変性の最も重要な影響として、 $h > M$ における有効ポテンシャルはあたかも量子補正がないかのように振る舞う。通常のスケール不変性が量子的に破れる場合には、大きなトップクォーク質量のために h がある値 h_* より大きい時にポテンシャルエネルギーが負となり、我々の電弱真空が不安定化されることが知られている。しかし今、 $M < h_*$ を仮定するとポテンシャルは正に保たれ、電弱真空は絶対安定となることが分かる。もう一つ重要な点は、理論がくりこみ不可能となり摂動的ユニタリティーがヒッグス場に依存したエネルギースケール $\Lambda = (M^2 + h^2)^{1/2}$ で壊れることである。つまり摂動計算はこの切断スケール Λ 以上では信頼できない。我々には有効ポテンシャルの摂動的評価に最も効いているエネルギースケールは Λ 以下であり、漸近的スケール不変性が電弱真空を安定化するという結論に矛盾が無いことを示した。

さらに、ヒッグス場と重力の非最小限結合 ξ を導入して解析を進めた。このとき $h > m_p / \xi^{1/2}$ において、プランクスケールは h に依存した有効プランクスケールによって置き換えられる。この拡張は、ヒッグスポテンシャルを平坦化して h にインフラトンの役割を担わせるためにシャボシュニコフ教授による先行研究[3]の中で導入されたものであり、そこで仮定されていた「処方1」はパラメータ M を $m_p / \xi^{1/2}$ に一致するように選ぶことに相当する。つまり本研究での試みは処方1の一般化に他ならない。またもう一つ頻繁に議論される「処方2」は $M = \infty$ を選ぶことに相当し、よってスケール不変性を完全に壊す通常の処方になっている。まずは上と同様に、ヒッグス有効ポテンシャルを摂動的に計算した。重要な違いは、ヒッグス場が非最小限結合 ξ を通して時空計量と混ざる点であり、これによって切断スケール Λ のヒッグス場依存性は変更を受け、また有効ポテンシャルの形はより複雑になる。現象論的に興味のあるパラメータ領域では、ポテンシャルエネルギーは最大で四回ゼロを横切ることが分かる。有効ポテンシャルが h の関数として非単調な振る舞いをするのは宇宙論的帰結を議論する上で重要である。特に原子ブラックホールの生成や、量子トンネル効果による一次相転移に伴う重力波生成、バリオン数生成を可能にし得る。一方で大きな h に対する有効ポテンシャルの振る舞いは単純であり、スケール不変性のためにあたかも量子補正のない平坦ポテンシャルに漸近していき、そこではヒッグスインフレーションが実現される。しかしながらインフレーション後、再加熱温度は Λ を超える可能性があり、摂動計算が信頼できなくなる。我々はひとまず、これに伴う不定性を、宇宙を満たす物質の有効状態方程式の不定性に読み替えて CMB パワースペクトルを評価した。高エネルギー領域で何が起こるのかは最も重要な問題の一つであり、③への動機となった。

また我々は標準模型の臨界性に動機付けられて、パラメータ M を「ヒッグス四点自己結合とそのベータ関数が同時に消えるスケール」と同一視した。この時、ヒッグスポテンシャルは非最小限結合 ξ 無しで、 $h > M$ において平坦化される。この場合、インフレーション後の再加熱温度が Λ を超えることはない。CMB スペクトルは低エネルギー有効理論のみで予言可能であり、観測値と 2σ の範囲で整合的な値を得た。ヒッグスポテンシャルの平坦性はしばしば、重力理論の漸近安全性の文脈で議論されている。これは「時空計量の量子揺らぎがプランクスケール以上で支配的になり、理論の紫外固定点が現れることで、非摂動的なくりこみ可能性が実現される」という考え方であり、次の③における研究方針となった。

③ 繰り込み群は、あるエネルギースケールにおける物理量を何らかの基準スケールにおけるそれと比較することで定義される。量子的スケール不変な理論では、ダイナミカルな場そのものによって基準スケールが与えられる。一方でスケール不変性を持たない通常の重力理論においては、基準スケールは固定されているが、エネルギースケール(または長さ)の定義そのものにダイナミカルな計量場が現れる。我々はこの類似性に着目した。厳密繰り込み群方程式に基づく解析によって重力理論の非摂動的繰り込み可

能性「漸近安全性」が期待されており、このシナリオがスケール不変な理論においても成り立つと予想した。

平坦時空上の量子的にスケール不変なスカラー場理論において、微分展開二次のオーダーまでを考慮して厳密繰り込み群方程式を導出した。このとき非自明な固定点が現れるが、その値は強結合領域に入りつつあるため微分展開の正当性を見極める必要がある。現在、微分展開三次のオーダーでの計算を進めており、もし結果として固定点が弱結合領域に移るのなら、矛盾なくその存在を示せたことになる。またフェルミオン等を含むより現実的な模型に議論を拡張することも可能であり、今後詳しく調べる予定である。

④ 通常、汎関数積分測度の一般座標変換不変な定義には質量次元を持つ量が導入される。これが場の空間における“長さ”の基準を与え、ワイル不変性の量子異常の原因の一つになると考えられる。逆に言えば、この場の空間における基準スケールが(実空間におけるそれとともに)ダイナミカルな場によって与えられていれば、ワイル不変性は量子論レベルで保たれると期待される。この可能性は先行研究[4]などによって議論されているものの、具体的な証明は与えられていない。

これを見る摂動的な方法は、時空計量を平坦部分と小さな揺らぎ γ に分け、エネルギー運動量テンソルの跡への γ から来る補正を計算することである。先行研究[5]では、実空間における基準スケールのみをダイナミカルな場に置き換えた上で γ 一次の計算が行われ、このときワイル量子異常が消えると結論づけられているが、我々はその解析は十分でないと考えた。一つの理由は“真の量子異常”は γ の二次のオーダーで初めて現れるものであり、よって一次のオーダーでは汎関数積分測度の定義の重要性が見えないためである。現在、スカラー場一つが重力場と結合した最も単純な模型で、ワイル不変な汎関数積分測度を用いて γ 二次の補正を計算中であり、正しい計算の暁には量子的ワイル不変性を持つ理論の構築可能性を示すことができると考える。

またワイル不変性が量子論レベルで保たれていれば、スカラー場の自由度を消去するような時空計量の再定義が可能であるため、この模型は純粋な重力理論に等価となる。③と組み合わせることで、理論の紫外完全性についての議論を進めていく予定である。

これら①～④に加え、次の関連研究も並行して行ってきた。

⑤ スケール不変性を持つ模型の中で電弱対称性を破るためのヒッグスポテンシャルを作り出す方法の一つは、コールマン・ワインバーグ機構によるものである。この場合に実現される宇宙の熱史は標準的なものと大きく異なるため、特徴的な宇宙論的シグナルと加速器実験からの制限を組み合わせることでスケール不変性を持つ模型の検証につながると期待される。このポテンシャルは原点近傍が平坦であるため、非常に強い過冷却が起こる。つまり宇宙の温度が100GeVを下回っても電弱相転移が起こらない。結果として、標準模型 QCD(閉じ込め・カイラル)相転移が先に起こることで電弱相転移の引き金となる[6]。①と同様、B-L 対称性がゲージ化された模型の宇宙論的帰結について議論してきた(これが一時帰国の主な理由の一つであった。またこの研究に関して2018年5月に湯浅年子賞を受賞した)。

この相転移のダイナミクスは理論的にも現象論的にも興味深い。秩序パラメータとして、ヒッグス場 h に加え、カイラル対称性の破れを特徴付けるクオーク凝縮と、クオーク閉じ込めを特徴付けるポリヤコフループを合わせて考える必要がある。大きなトップ湯川結合のためにフレーバー対称性は近似的に $SU(5+1)$ であるため、クオーク凝縮場を二種類導入し、合計四つの秩序パラメータを含む有限温度ポテンシャルの計算が必要になると考えられる。現在、ハイデルベルクのグループと共同で数値計算を進めている。そしてこの四次元の場の空間で、トンネル効果によって QCD-電弱相転移が進む場合は、真空泡の膨張と衝突に伴う重力波生成やバリオン生成が期待できる。特にバリオン生成に関しては、真空泡の内と外でダイナミカルな自由度が異なっているため、通常電弱バリオジェネシスとは CP 非対称性の評価が変わる可能性があり、現在議論を進めている。

スケール不変性は、電弱-プランク階層性の一つの解釈であり、現在のところ LHC 実験結果とも相性が良い。とても簡単な拡張によって標準模型をスケール不変な模型に埋め込むことが可能であるにも関わらず、①②⑤で明らかにされたように、その隠れた対称性の宇宙論的影響は非常に大きい。ここで摂動論が破綻する切断スケールが必然的に現れるが、③④で議論されたように、重い粒子を導入することなく理論をより高エネルギー領域まで拡張できる可能性がある。紫外完全な理論が構成できたとき、それが自ずと階層性問題の解を与えると期待している。

引用文献: [1] A. Salvio, A. Strumia, JHEP06, 080(2014) [2] J. Garia-Bellido, J. Rubio, M. Shaposhnikov, D. Zenhausern, Phys. Rev. D84, 123504 (2011) [3] F. L. Bezrukov, M. Shaposhnikov, Phys. Lett. B659, 703 (2008) [4] A. Codello, G. D'Odorico, C. Pagani, R. Percacci, Class. Quant. Grav. 30, 115015 (2013) [5] F. Englert, C. Truffin, R. Gastmans, Nucl. Phys. B117, 407 (1976) [6] S. Iso, P. D. Serpico, K. Shimada, Phys. Rev. Lett. 119, 141301