

Title	Theoretical studies on cosmological implications of the electroweak symmetry breaking
Author(s)	田中, 正法
Citation	大阪大学, 2023, 博士論文
Version Type	VoR
URL	<a href="https://doi.org/10.18910/92160">https://doi.org/10.18910/92160</a>
rights	
Note	

*Osaka University Knowledge Archive : OUKA*

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

## 論文内容の要旨

氏名 ( 田中正法 )

論文題名

Theoretical studies on cosmological implications of the electroweak symmetry breaking

(電弱相転移の宇宙論的意味に関する理論的研究)

## 論文内容の要旨

素粒子の標準模型(SM)は加速器実験の結果と無矛盾である。その一方で、バリオン数非対称性問題(BAU)や暗黒物質などの宇宙論的観測事実はSMでは説明できない。これらの問題を解決するために新しい物理模型を考える必要がある。SMのヒッグスセクターを拡張した拡張ヒッグス模型では、電弱対称性の破れのダイナミクスが著しく変化する。特に電弱相転移のダイナミクスが変化する。SMの電弱相転移はクロスオーバーであるが、拡張ヒッグス模型では電弱相転移が1次相転移になる可能性がある。そのような電弱1次相転移は宇宙論的観測によって検証できる可能性がある。

電弱1次相転移はBAUなどの説明をする際に重要な役割を果たす。電弱バリオン数生成はバリオン数非対称性を説明できる有望なシナリオである。このシナリオでは、電弱1次相転移が起きる際にバリオン数非対称性が生成される。このような理由から電弱1次相転移の検証は重要である。

強い電弱1次相転移が実現される拡張ヒッグス模型では、一般にヒッグス3点結合 $hhh$ がSMの予言から20から30%程度ずれる。すなわち、強い電弱1次相転移は、 $hhh$ 結合が精密測定できる将来の加速器実験であるILCやHL-LHCなどで検証できる可能性がある。一方で、初期宇宙で1次相転移が起きると、特徴的な重力波スペクトルが予言される。初期宇宙での1次相転移は、真空泡の生成と膨張で進行する。その真空泡が互いに衝突することで、特徴的な重力波が発生する。特に電弱1次相転移由来の重力波スペクトルは、 $10^{-3}$ - $10^{-1}$ Hzでピークを持つ。そのような重力波スペクトルは、将来の重力波干渉計であるLISAやDECIGOなどで観測できる可能性がある。

本博士論文では、繰り込み可能な拡張ヒッグス模型の具体例として、Two Higgs doublet model (THDM)での電弱相転移を議論する。また、強い電弱1次相転移を伴うTHDMが予言する $hhh$ 結合や重力波スペクトルについて議論する。そして、電弱バリオン数生成を実現するには、質量が2TeV以下の新しいスカラー粒子が存在する必要があることを示す。加えて、将来の $hhh$ 結合の測定と重力波観測を通じて、新しいスカラー粒子の典型的な質量スケールを間接的に探れることも示す。

次に、新しい有効場の理論での電弱相転移について議論する。前述したように、SMはLHCなどの加速器実験の結果と無矛盾であり、新しい粒子の兆候は未だ確認されていない。このような理由からStandard Model Effective Field Theory (SMEFT)の枠組みがしばしば用いられてきた。SMEFTでは、SMが含むフェルミオン場やボソン場によって構成される高次元演算子をSMに追加することで、新粒子による低エネルギー現象論への影響を記述する。その一方で、新粒子が大きな量子補正を実現する可能性がある。このような現象をノンデカップリング効果と呼び、電弱1次相転移の実現に重要な役割を果たす。SMEFTはノンデカップリング効果を伴う拡張ヒッグス模型の記述には適切ではないため、SMEFTに代わる新しい有効理論が必要になる。この新しい有効理論の候補として、近年nearly aligned Higgs effective field theory (naHEFT)が提案された。このnaHEFTはノンデカップリング効果を伴う拡張ヒッグス模型を有効的に記述できる。本論文では、模型に依存しない $hhh$ 結合や重力波スペクトルへの予言をnaHEFTを用いて議論する。

最後に、電弱1次相転移と原始ブラックホール(PBH)の関係について議論する。初期宇宙で1次相転移が実現すると、対称相と非対称相の間で大きなエネルギー密度のゆらぎが生じる。そのような大きなエネルギー密度のゆらぎによってPBHが生成される可能性がある。すなわち、現在あるいは将来のPBH観測を通じて電弱1次相転移が検証できる可能性がある。模型に依存しない結果を得るために、naHEFTを用いて電弱1次相転移とPBHの関係を議論する。電弱1次相転移由来のPBHの質量は、太陽質量の $10^{-5}$ 倍である。そのようなPBHは、現在および将来のマイクロレンズ実験(Subaru HSC, OGLE, PRIME, Roman Space Telescope)によって観測される。従って、マイクロレンズ実験を通じて電弱1次相転移が検証できる。本論文では、 $hhh$ 結合の測定や重力波観測に加えて、PBH観測が電弱1次相転移の検証に有用であることを示す。

## 論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 ( 田 中 正 法 )	
	(職) 氏 名
論文審査担当者	主 査 教授 兼村 晋哉
	副 査 教授 大野木 哲也
	副 査 教授 住 貴宏
	副 査 准教授 佐藤 亮介
	副 査 助教 柳生 慶
<b>論文審査の結果の要旨</b>	
<p>博士論文 Theoretical studies on cosmological implications of the electroweak symmetry breaking (日本語題目:電弱相転移の宇宙論的意味に関する理論的研究)の論文審査の結果の要旨は次のとおりである。</p> <p>田中正法氏は、素粒子物理学で、未だ未確定の部分である電弱対称性の自発的破れの性質、特に初期宇宙における電弱相転移の理論とその検証可能性について、次に述べる新しく独創的で重要な研究を行った。</p> <p>宇宙物質・反物質非対称性は未解決の問題であり、その説明には素粒子標準理論を超える新物理理論が必要である。初期宇宙のインフレーション期以降に、宇宙物質・反物質非対称性が生成される為には、サハロフの条件と呼ばれる条件を理論が満たすことが要求される。この条件によれば初期宇宙には熱的に非平衡な時期がなければならない。電弱バリオン数生成と呼ばれる有力な仮説では、この熱的非平衡は、電弱相転移が一次相転移であれば実現し得る。標準理論ではこの条件は満たされないが、拡張理論では、電弱相転移が一次相転移になり得ることが知られている。電弱一次相転移が実現される場合、ヒッグス粒子の自己結合の強さに標準理論予想からのズレが現れることや、特徴的な重力波スペクトルが発生するなど、特徴的な現象が予言される。先行研究では、これらの現象を用いて電弱相転移を検証する試みが提案されている。しかし、これらの検証には将来の国際線形加速器実験や宇宙空間での重力波観測を待たねばならず、より近未来の実験で検証可能な方法が待たれていた。</p> <p>田中正法氏は、既に探索が始まっている原始ブラックホールを用いて電弱相転移のダイナミクスを探る新しい可能性を理論的に研究した。臨海温度付近で相転移が比較的ゆっくり生じる場合には、空間的に相転移が完了した領域と未完の領域が発生することによりエネルギー密度に濃淡が生じる。それがある臨界点を超えると、太陽質量の10万分の1程度の質量を持つ原始ブラックホールが発生する可能性がある。田中氏はこの可能性に基づいて、どのケースに電弱相転移由来の原始ブラックホールが発生し得るかを、新しい有効場理論(nearly aligned Higgs Effective Field Theory)を用いて一般的に研究し、原始ブラックホールが発生する相転移の理論を調べた。ある種の理論では、将来の加速器実験や重力波観測に加え、より近未来の原始ブラックホール探索を用いて電弱相転移を検証し得ることを明らかにした。</p> <p>本成果は今後の電弱相転移研究や原始ブラックホール探索に大きな波及効果をもたらす独創的成果であり、博士(理学)の学位論文として十分価値のあるものと認める。</p>	