

学位論文要旨

拡張 Scotogenic 模型における
暗黒物質の現象論と Leptogenesis

Dark Matter Phenomenology and Leptogenesis
in an Extended Scotogenic Model

金沢大学大学院自然科学研究科
数物科学専攻

学籍番号 1924012002

氏名 橋本剛

主任指導教員 末松大二郎

提出年月 2022年1月

概要

The scotogenic model is an attractive model which can explain neutrino masses and dark matter simultaneously. Right-handed neutrinos and an inert doublet are added to the standard model in this model. In this dissertation, we extend this model with a real singlet scalar from viewpoints of the origin of the neutrino masses and cosmological inflation. The singlet scalar is assumed to have mass in a resonance region of inert doublet dark matter and plays the role of inflaton with a non-minimal coupling with the Ricci scalar. We focus our study on the case where the inflaton mass is in the TeV region and the reheating temperature is expected to be lower than 10^9 GeV. Therefore, this model requires low-scale leptogenesis to explain baryon number asymmetry in the Universe through leptogenesis. After investigating some effects of the singlet scalar for the dark matter, we address dark matter phenomenology such as high energy neutrinos and monochromatic gamma rays induced by its annihilation.

素粒子標準模型は、素粒子とその相互作用を記述する模型である。標準模型は強い相互作用、弱い相互作用、電磁相互作用の3つを $SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y$ の gauge 理論と Higgs 機構による電弱対称性の自発的破れによって説明することができる。また光子、グルーオン、そしてニュートリノ以外の標準模型粒子は Higgs boson の真空期待値によって質量を獲得し、現在知られている電弱 scale までの物理をよく記述することができる。一方で、標準模型では説明することのできない実験・観測結果も知られている。標準模型を超える物理を示唆する問題のうち、代表的なものを以下にあげる。

- ニュートリノの質量

標準模型では、fermion は Higgs boson の真空期待値によって質量を獲得する。一方で、ニュートリノには左巻きしか存在しないため標準模型の枠組みではニュートリノは質量をもたない。しかし、ニュートリノ振動の発見からニュートリノには微小な質量があることがわかっている。したがってニュートリノに質量を与えるためには何らかの形で標準模型を拡張する必要がある。

- 暗黒物質の存在

銀河の回転曲線や宇宙マイクロ波背景放射 (CMB: Cosmic Microwave Background) の揺らぎ、弾丸銀河団などの観測から宇宙には暗黒物質と呼ばれる未知の物質が存在することが分かっている。観測から要求される暗黒物質の性質を満たす粒子は標準模型には存在しないため、ニュートリノの質量同様に暗黒物質の存在は標準模型では説明することができない。

- 宇宙の baryon 数非対称性

現在の宇宙では反物質よりも通常の物質の方が多く存在している。宇宙初期では物質と反物質は同じだけ存在したと考えられており、宇宙初期の baryon 数対称な宇宙から現在の baryon 数非対称性を実現するために必要な3つの条件は Sakharov の3条件として知られている。しかし、標準模型ではこの Sakharov の3条件を満たすことができず、ビッグバン元素合成や CMB から観測されている宇宙の baryon 数非対称性を説明することができない。

これらの問題を説明するため様々な標準模型の拡張が考えられており、その中でニュートリノの質量と暗黒物質を同時に説明できる最小の模型の1つとして scotogenic 模型がある。この模型では、標準模型に inert doublet scalar と右巻きニュートリノを新たに導入する。これらの新しい粒子は Z_2 対称性の下で奇パリティをもち、標準模型のすべての粒子は偶パリティをもつ。このようにして導入された TeV scale の新粒子によって微小なニュートリノの質量を 1-ループレベルで生成することができ、最も軽い中性でかつ Z_2 対称性の下で奇パリティをもつ粒子が暗黒物質として振る舞うことができる。さらにはこの scotogenic 模型において、特に inert doublet の中性成分が暗黒物質である場合には leptogenesis によって宇宙の baryon 数非対称性を説明できることが知られている。

本研究では、右巻きニュートリノの質量起源の観点からこの scotogenic 模型の拡張を行う。Scotogenic 模型に実 singlet scalar S を追加し、この scalar 場の真空期待値によって右巻きニュートリノが質量を得る。更にこの実 singlet scalar が inflation を引き起こす inflaton となることを考える。CMB の観測結果から、宇宙初期に inflation と呼ばれる宇宙の指数関数的な加速膨張があったことが示唆されている。Inflaton が Ricci scalar との非最小結合をもつ場合、適切な paramter により inflation を実現し、CMB の観測と整合的であることが知られている。Higgs inflation はそのような模型の1つである。本研究では右巻きニュートリノの質量起源を説明するために新たに導入した実 singlet scalar が Ricci scalar と非最小結合を持ち、inflaton として宇宙初期の inflation を実現する場合を考える。こ

のような実 singlet scalar が非最小結合を持ち inflaton として振る舞う模型は *s*-inflation と呼ばれ、Higgs inflation をはじめとする多くの模型に現れるユニタリティ問題を回避できる可能性が示唆されている。本研究における実 singlet scalar は右巻きニュートリノに質量を与えかつ inflaton の役割を果たすだけでなく、暗黒物質の現象や leptogenesis の過程に影響を与える可能性がある。本研究ではこの点に着目して、特に inflaton の質量が暗黒物質の共鳴領域にある場合について調べた。

本研究で考える模型では標準模型に新たに inert doublet $\eta = (\eta^+, (\eta_R^0 + i\eta_I^0)/\sqrt{2})^T$, 右巻きニュートリノ N_i ($i = 1, 2, 3$), 実 singlet scalar S を導入する。また inert doublet と右巻きニュートリノが 1, 実 singlet scalar が 2 の電荷をもつ Z_4 対称性を課す。標準模型粒子はこの対称性の下で電荷を持たない。考える Lagrangian は

$$\begin{aligned}
-\mathcal{L} \supset & \sum_{i=1}^3 \left(\sum_{\alpha=1}^3 h_{\alpha i} \overline{L}_\alpha \tilde{\eta} N_i + \frac{y_i}{2} S \overline{N}_i^c N_i + \text{h.c.} \right) \\
& + \tilde{m}_\phi^2 \phi^\dagger \phi + \tilde{m}_\eta^2 \eta^\dagger \eta + \lambda_1 (\phi^\dagger \phi)^2 + \lambda_2 (\eta^\dagger \eta)^2 + \lambda_3 (\phi^\dagger \phi) (\eta^\dagger \eta) + \lambda_4 (\eta^\dagger \eta) (\phi^\dagger \phi) \\
& + \frac{\tilde{\lambda}_5 S}{2 \Lambda} [(\phi^\dagger \eta)^2 + \text{h.c.}] + \frac{m_S^2}{2} S^2 + \frac{\kappa_1}{4} S^4 + \frac{\kappa_2}{2} S^2 (\eta^\dagger \eta)
\end{aligned} \tag{1}$$

となる。ここで L は標準模型の lepton doublet, ϕ は Higgs doublet である。 S が真空期待値 $\langle S \rangle \neq 0$ をもち対称性が $Z_4 \rightarrow Z_2$ に自発的に破れることで右巻きニュートリノが質量をもつと共に scotogenic 模型が再現される。その後 Higgs doublet が真空期待値 $\langle \phi \rangle \neq 0$ をもつことで電弱対称性が自発的に破れる。 $m_\eta^2 \equiv \tilde{m}_\eta^2 + \kappa_2 \langle S \rangle^2 / 2$ を用いると inert doublet の質量は scotogenic 模型と同じく

$$M_{\eta^\pm}^2 = m_\eta^2 + \lambda_3 \langle \phi \rangle^2, \quad M_{\eta_R^0}^2 = m_\eta^2 + \lambda_+ \langle \phi \rangle^2, \quad M_{\eta_I^0}^2 = m_\eta^2 + \lambda_- \langle \phi \rangle^2 \tag{2}$$

で与えられる。ここで $\lambda_\pm \equiv \lambda_3 + \lambda_4 \pm \lambda_5$ である。 S を真空期待値の周りで展開した時の揺らぎを \tilde{s} とすると元の scotogenic 模型にはない新しい寄与として

$$(i) \quad \frac{y_i}{2} \tilde{s} (\overline{N}_i^c N_i + \overline{N}_i N_i^c), \tag{3}$$

$$(ii) \quad \kappa_2 \langle S \rangle \tilde{s} (\eta^\dagger \eta) + \frac{\kappa_2}{2} \tilde{s}^2 (\eta^\dagger \eta) \tag{4}$$

がある。1つ目の寄与は leptogenesis に、2つ目の寄与は暗黒物質の現象論に影響を与える可能性がある。また \tilde{s} を inflaton と考えているため、この相互作用は宇宙の再加熱を考える上でも重要になる。本研究では特に暗黒物質の現象論に興味深い結果を与えられと考えられる

$$2M_{\eta_R^0} \lesssim m_{\tilde{s}} < 2M_i \tag{5}$$

という質量階層に着目して計算を行った。

まず inflation についてである。Inflation に関連する Jordan frame における作用は

$$S_J = \int d^4x \sqrt{-g} \left[-\frac{1}{2} M^2 R - \frac{1}{2} \xi S^2 R + \frac{1}{2} \partial_\mu S \partial^\mu S - \frac{\kappa_1}{4} S^4 - \frac{m_S^2}{2} S^2 \right] \tag{6}$$

で与えられる。ここで ξ は非最小結合と呼ばれる。共形変換を行うことで Einstein frame に移り計算を行うと、CMB の観測から非最小結合と 4 点結合定数 κ_1 に

$$\kappa_1 / \xi^2 \simeq 4 \times 10^{-10} \tag{7}$$

	$m_{\tilde{s}}(\text{GeV})$	κ_1	λ_+	λ_3	ξ	$\langle S \rangle(\text{GeV})$	$T_R(\text{GeV})$	Y_B
(A)	2000	10^{-6}	-0.38	0.2	49	1.4×10^6	3.5×10^5	5.0×10^{-11}
(B)	2000	10^{-7}	-0.38	0.2	16	4.5×10^6	1.1×10^6	9.4×10^{-11}
(C)	2500	10^{-6}	-0.48	0.3	49	1.8×10^6	3.9×10^5	6.3×10^{-11}
(D)	2500	10^{-7}	-0.48	0.3	16	5.6×10^6	1.2×10^6	1.1×10^{-10}
(E)	3000	10^{-6}	-0.58	0.45	49	2.1×10^6	4.3×10^5	7.5×10^{-11}
(F)	3000	10^{-7}	-0.58	0.45	16	6.7×10^6	1.3×10^6	1.3×10^{-10}

表1 Parameter の benchmark と ξ , $\langle S \rangle$, 再加熱温度 T_R および Y_B の値. すべての場合において $\Delta = 10^{-6}$, $\kappa_2 = 4 \times 10^{-6}$ としている.

という関係が得られる. Higgs inflation の場合 4 点結合定数は加速器実験から $\lambda_1 \simeq 0.13$ と測定されているため非最小結合に $\mathcal{O}(10^5)$ という大きな値が要求される. 一方でこのような s -inflation では 4 点結合定数が新しい parameter であるため, より自然な大きさの非最小結合で inflation を実現できる.

Inflation 後には再加熱と呼ばれる inflaton のもつエネルギーを標準模型の物質や放射に転化し, 宇宙を温める過程が必要となる. 本研究では inflaton が暗黒物質の共鳴領域にあると考えているため, ツリーレベルでの inflaton の崩壊は運動学的に抑制される. 共鳴の度合いを表すために $\Delta \equiv 1 - 4M_{\eta_R}^2/m_{\tilde{s}}^2$ を用いると, $\Delta \ll 10^{-4}$ のときには 1-ループレベルでの過程が優勢となり宇宙の再加熱温度を

$$T_R = \mathcal{O}(10^7) \left(\frac{\kappa_2}{\sqrt{\kappa_1}} \right) \left(\frac{m_{\tilde{s}}}{1 \text{ TeV}} \right)^{1/2} \text{ GeV} \quad (8)$$

と見積もることができる. 主要な parameter における非最小結合 ξ , S の真空期待値 $\langle S \rangle$, 再加熱温度 T_R の結果を表 1 にまとめた.

このモデルでは, 右巻きニュートリノの崩壊を通して leptogenesis によって宇宙の baryon 数非対称性を説明できる可能性がある. 一方で, 元の scotogenic 模型では leptogenesis によって baryon 数非対称性を説明するためには再加熱温度として $T_R > 10^8 \text{ GeV}$ が必要とされるが, 表 1 から本模型では要求される再加熱温度よりも小さな結果が得られている. しかし, 本模型では元の scotogenic 模型にはない新たな寄与として, 右巻きニュートリノと inflaton \tilde{s} との相互作用がある. この相互作用によって熱浴にいる $N_{2,3}$ と最も軽い右巻きニュートリノが相互作用をし熱平衡に入ることができれば, ニュートリノの湯川結合定数 $h_{\alpha 1}$ を小さくとっても右巻きニュートリノが熱平衡状態になり low scale leptogenesis を実現できる可能性がある. これを見るために, Boltzmann 方程式を解くことで生成される lepton 数非対称性を数値的に評価する. 簡単のためにここでは第 0 近似として tri-bimaximal 混合

$$h_{ei} = 0, \quad h_{\mu i} = h_{\tau i} \equiv h_i (i = 1, 2), \quad h_{e3} = h_{\mu 3} = -h_{\tau 3} \equiv h_3 \quad (9)$$

を仮定し, 表 1 に示されている parameter 以外の parameter は

$$y_1 = 10^{-2}, \quad y_2 = 6 \times 10^{-2}, \quad y_3 = 10^{-1}, \quad |\lambda_5| = 7 \times 10^{-5}, \quad h_1 = 5 \times 10^{-8} \quad (10)$$

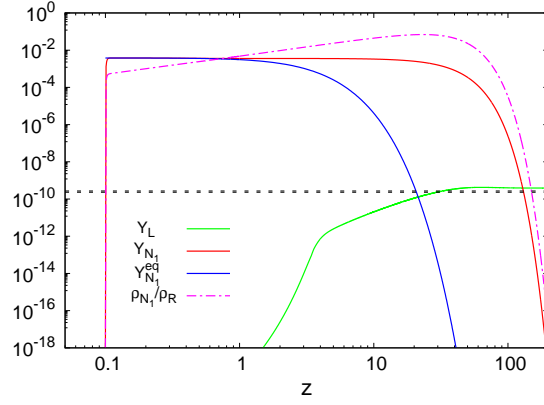


図1 Y_{N_1} と Y_L の時間発展. $z \equiv M_1/T$ で定義されている.

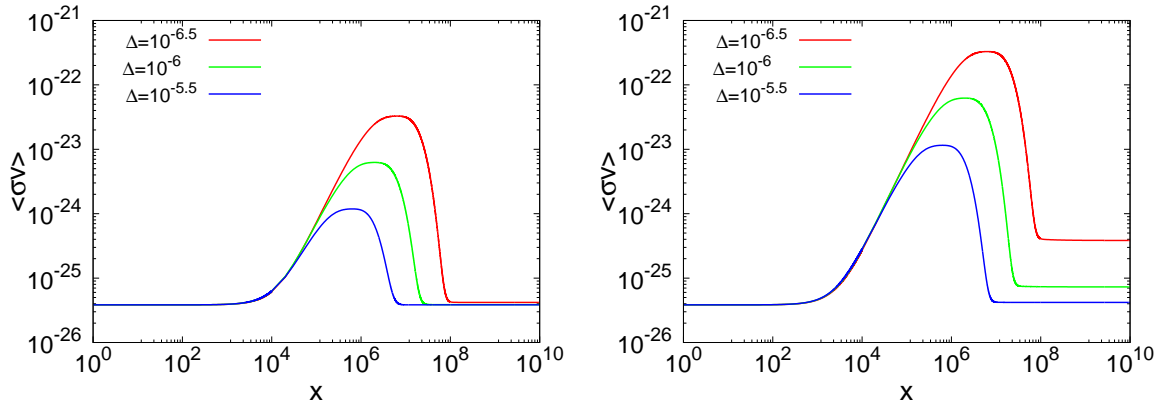


図2 速度分布で平均化された η_R^0 の消滅断積 $\langle \sigma v \rangle$. 速度分散 \bar{v} と x は $x = 3/\bar{v}^2$ という関係にある. (κ_1, κ_2) は左図では $(10^{-6}, 4 \times 10^{-6})$, 右図では $(10^{-7}, 4 \times 10^{-6})$ としている. またこの図における単位は $\text{cm}^3 \text{s}^{-1}$ である. 両方の図において各線は $\Delta = 10^{-6.5}$ (赤), $\Delta = 10^{-6}$ (緑), $\Delta = 10^{-5.5}$ (青) に対応している. その他の模型の parameter は $M_{\eta_R^0} = 1000 \text{ GeV}$, $\lambda_+ = -0.38$, $\lambda_3 = 0.2$, $\lambda_5 = -10^{-4}$ としている.

を用いた. N_1 と lepton の数密度をそれぞれエントロピー密度で割って定義した Y_{N_1} と Y_L に対して表 1 の (F) を用いた結果を図 1 に示す. 横の点線が宇宙の baryon 数非対称性をスファレロン過程を通して実現するために必要な値であり, これから本研究で考えた模型では宇宙の再加熱温度が低くなるものの, low scale leptogenesis によって宇宙の baryon 数非対称性を説明できることが分かった.

具体的な暗黒物質 η_R^0 の残存量などを評価する前に, Breit-Wigner 共鳴による対消滅への影響について議論する. Inflaton の質量が暗黒物質の共鳴領域にある場合, inflaton を介した s -channel の過程が増大される. その中でも特に inflaton の質量が $2M_{\eta_R^0}$ よりも少しだけ重たい場合, 対消滅断面積が非自明な速度依存性をもつ. これを考慮して平均化された対消滅断面積を図 2 に示す. 暗黒物質が freeze-out する際の速度分散 \bar{v} はおおよそ $\bar{v} \simeq 0.2c$, 太陽中心部では $\bar{v} \simeq 5 \times 10^{-5}c$ 程度と考えられる. その下で $\Delta \simeq 10^{-6}$ とすると freeze-out 後に平均化された対消滅断面積が共鳴効果によって増大していることが分かる. また κ_1 を小さくすると, 共鳴効果が大きな x , つまり速度分散の小さな領域で落ち切らずに残る. これによって暗黒物質の間接検出が期待される.

TeV scale の inert doublet においては成分間の質量が自然に縮退する. したがって, η_R^0 の対消滅だ

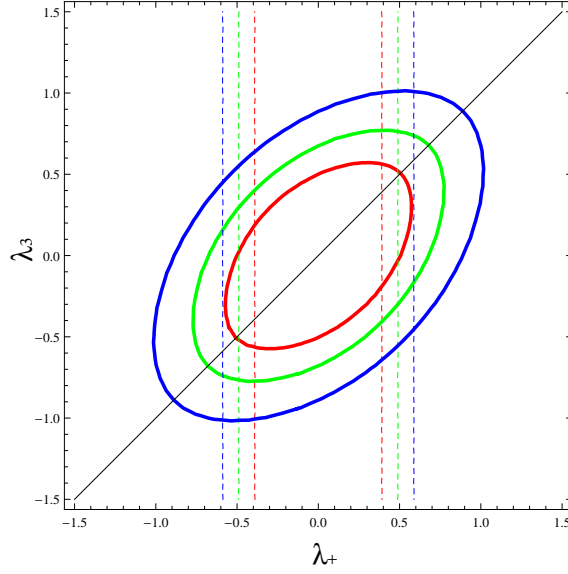


図3 (λ_+, λ_3) 平面における $\Omega h^2 = 0.12$ の等高線. $M_{\eta_1} = 1000$ GeV (赤実線), 1250 GeV (緑実線), 1500 GeV (青実線) に対応している. また $\Delta = 10^{-6}$, $\kappa_1 = 10^{-6}$, $\kappa_2 = 4 \times 10^{-6}$ とした.

けでなく共対消滅も考慮して残存量の見積もりを行う必要がある. また現在考えている $\Delta \simeq 10^{-6}$ のような場合には freeze-out 期の s -channel は共鳴から外れているため残存量に寄与しない. これらを考慮して観測されている暗黒物質の残存量を満たすような等高線を (λ_+, λ_3) 平面に示したものが図3である. 縦の点線は XENON1T による暗黒物質-核子散乱断面積からの制限であり, 質量を固定した場合 $|\lambda_+|$ のみに依存し λ_3 には依存しない. また λ_4 は負の値であるべきなので, $\lambda_4 = \lambda_+ - \lambda_3 - \lambda_5 = 0$ を表す黒線の上側の領域だけが許される. したがって, 縦の線に挟まれた領域のうち等高線上でかつ黒線の上側が許される領域となる. これから $\lambda_3 < 0$ は棄却されることが分かる.

最後に, 許される parameter 領域において太陽からの高エネルギーニュートリノと銀河中心, 矮小楕円体銀河からの単色ガンマ線について計算をおこなった. 現在考えている状況では, 暗黒物質の自己散乱に共鳴が生じる可能性があり, それによって太陽に捕獲される暗黒物質の量が増えることでより多くの暗黒物質由来の宇宙線が観測できると期待される. また 1-ループレベルで s -channel を通して単色ガンマ線に対消滅する過程も存在し, 暗黒物質が多く存在するとされる銀河中心や矮小楕円体銀河からこのような単色ガンマ線が飛来することが考えられる. これらの計算結果を表2に示す. IceCube の制限 $\Gamma_{WW} \leq 9.34 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$ から, WW に対しては現在の上限よりも2桁以上小さな値となり検証することが難しい. また (a) は銀河中心からの単色ガンマ線, (b) は矮小楕円体銀河からのものである. H.E.S.S. による制限から, $m_{DM} = 1$ TeV で Einasto profile をもつ銀河中心では $\langle \sigma_{AV} \rangle_{\gamma\gamma} < 4 \times 10^{-28} \text{ cm}^3/\text{s}$, 矮小楕円体銀河では $\langle \sigma_{AV} \rangle_{\gamma\gamma} < 3 \times 10^{-25} \text{ cm}^3/\text{s}$ となっている. したがって, このモデルにおける矮小楕円体銀河からの単色ガンマ線を観測することは困難であることが分かった. 一方で銀河中心からの単色ガンマ線については, 特定の parameter では現在の制限と同程度の値となる. これは図2の (B) の場合における $\langle \sigma_{AV} \rangle$ の振る舞いから理解することができる. (B) の場合, $\langle \sigma_{AV} \rangle$ が $x \gtrsim 10^7$ で現在の暗黒物質の残存量から求められる値よりも大きいことから, このような場合には特に単色ガンマ線の探索がモデルを検証する有効な手段となる. もし銀河中心からの単色ガ

	$\Gamma_{WW}(\text{s}^{-1})$	(a) $\langle\sigma_A v\rangle_{\gamma\gamma}(\text{cm}^3\text{s}^{-1})$	(b) $\langle\sigma_A v\rangle_{\gamma\gamma}(\text{cm}^3\text{s}^{-1})$
(A)	4.2×10^{17}	2.3×10^{-29}	2.2×10^{-29}
(B)	3.1×10^{17}	2.3×10^{-27}	2.2×10^{-27}
(C)	2.3×10^{17}	1.4×10^{-29}	1.4×10^{-29}
(D)	2.3×10^{17}	1.4×10^{-27}	1.4×10^{-27}
(E)	1.8×10^{17}	1.0×10^{-29}	9.6×10^{-30}
(F)	1.8×10^{17}	1.0×10^{-27}	9.6×10^{-28}

表 2 WW への消滅率と単色ガンマ線に対する平均化された消滅断面積の予言値. 表 1 に示した parameter の値を用いている. 速度分散は (a) では $\bar{v} = 3 \times 10^{-4}c$, (b) では $\bar{v} = 3 \times 10^{-5}c$ とした.

ンマ線がこのエネルギー領域で発見されれば, 適切な parameter を考えた場合この模型はそのような現象を説明する有力な模型の 1 つとなる.

学位論文審査報告書（甲）

1. 学位論文題目（外国語の場合は和訳を付けること。）

.....拡張 Scotogenic 模型における暗黒物質の現象論と Leptogenesis.....2. 論文提出者 (1) 所 属 数物科学 専攻(2) 氏 名 はしもと つよし
橋本 剛

3. 審査結果の要旨（600～650 字）

多様な実験結果を見事に説明する素粒子標準模型は、模型の枠内では説明不可能なニュートリノ質量や暗黒物質の存在、更にインフレーションと呼ばれる初期宇宙における空間の指数関数的膨張等に関わる実験・観測結果の出現により、その拡張は不可避なものと考えられ、現在拡張模型の探求が精力的に行われている。その一つに、右巻きニュートリノと2重項スカラー場を標準模型に加えることによりニュートリノ質量と暗黒物質の存在を同時に説明する Scotogenic 模型がある。

本博士論文では、右巻きニュートリノの質量起源とインフレーションを説明するために Scotogenic 模型に1重項実スカラー場を加えた拡張模型を提案し、新たに加えた1重項実スカラー場が低エネルギー領域で暗黒物質の現象論と宇宙のバリオン数生成に及ぼす影響について検討を行っている。1重項実スカラー場について、宇宙背景放射の揺らぎの観測からもたらされるデータにより制限される相互作用の強度と暗黒物質となる2重項スカラー場の対消滅に対して共鳴条件を満たす質量領域に注目し、暗黒物質の残存量へ1重項実スカラー場がもたらす影響を評価するとともに、インフレーション後の再加熱温度を評価している。これらの結果をもとに、(1)暗黒物質の残存量を説明するパラメータ領域で銀河中心での暗黒物質の対消滅の結果生じる単色光子が観測される可能性、(2)10⁹GeV より低い再加熱温度でも Leptogenesis により宇宙のバリオン数の説明が可能であることなどを指摘している。これらの内容は博士論文に値するものであると判定した。

4. 審査結果 (1) 判 定 (いずれかに○印) 合 格・ 不合格(2) 授与学位 博 士 (理 学)