



Neutrino mass generation and baryon number in the universe

長谷川, 耕平

(Degree)

博士 (理学)

(Date of Degree)

2004-03-31

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲3107

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1003107>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



【 2 8 3 】

氏 名・(本 籍) 長谷川 耕平 (三重県)

博士の専攻分野の名称 博士(理学)

学 位 記 番 号 博い第253号

学位授与の 要 件 学位規則第4条第1項該当

学位授与の 日 付 平成16年3月31日

【 学位論文題目 】

Neutrino Mass Generation and Baryon Number in the
Universe

(ニュートリノ質量の生成と宇宙のバリオン数)

審 査 委 員

主 査 教 授 林 青司

教 授 森井 俊行

教 授 野崎 光昭

教 授 野海 正俊

近年の Super-Kamiokande, SNO, KamLAND などの大気、太陽ニュートリノ振動に関する実験からニュートリノに質量があることが確定した。しかし、これらのニュートリノ振動実験では二乗質量差しか分からず質量の絶対値の情報は得られない。最近の WMAP による宇宙背景輻射の非一様性の精密な測定はニュートリノ質量固有値の和に対する上限を与え、ニュートリノ質量行列に対するかなり正確な情報が得られるようになった。一方、素粒子標準模型ではニュートリノは質量をもたないので、これを拡張したニュートリノ質量生成のためのモデル (beyond the standard model) を構築することが緊急課題となっている。特に何故ニュートリノの質量のみが極端に小さいのか、という大きな問題が残るが、ニュートリノが中性なために Dirac 型に加えて可能な Majorana 型質量によって説明しようという考え方が有力である。残念ながらニュートリノ振動実験からは質量項が Dirac か Majorana のどちらの型であるかを判別する事は出来ない。

しかしながら、Majorana 質量の存在はレプトン数を破るという (摂動論における) 標準模型にはない性質を持つために宇宙のバリオン数生成 (baryogenesis) に大きな影響を与える。宇宙に目を向けてみると、我々の周りには物質ばかりで、反陽子などの反物質はほぼ存在しない。これは宇宙初期にバリオン数が生成されたことを意味するが、元素合成の理論と観測から現在のバリオン数がよく決定されている。この現存するバリオン数はバリオン数零の初期条件から力学的に生成される可能性があり、そのための条件としてサハロフの三条件が知られている。それは、1. バリオン数を破る相互作用の存在、2. CP の破れの存在、3. 非平衡過程の存在の三つである。こうした条件を満たすバリオン数生成のシナリオがいくつか提唱されている。GUT シナリオ、electroweak シナリオ、Affleck-Dine シナリオなどである。この他に、leptogenesis と呼ばれるニュートリノ質量生成のための seesaw 機構にもつづいたバリオン数生成シナリオがある。このシナリオでは、右巻きニュートリノが大きな Majorana 質量を持つ事によってレプトン数が破られている。このため、右巻きニュートリノの非平衡崩壊でレプトン数が生成される。一方、素粒子標準模型にはスファレロンと呼ばれるゲージ場とヒッグス場の古典解が存在し、アノミーを通じてバリオン数とレプトン数を等量だけ破る ($\Delta B = \Delta L = 1/2$)。このスファレロン過程は 100 GeV から 10^{12} GeV で平衡であり、右巻きニュートリノの崩壊により生成されたレプトン数はスファレロン-アノミー過程によりバリオン数へと変換され、現在のバリオン数が生成される。このシナリオは現在のバリオン数を生成すると同時に、seesaw 機構によりニュートリノに小さな Majorana 質量を自然に与える。しかし、一方でこのモデルは対照的な側面を同時に持ち合わせている。つまり、レプトン数を破る過程が平衡になれば、その時点までに生成されたレプトン数を消去してしまう。さらに平衡なスファレロン-アノミー過程を通じてバリオン数も消去してしまうのである。これは粒子と反粒子が等量ある状態が最大のエントロピーを持つからである。このようなバリオン数消去の可能性は seesaw モデルに限らず、ニュートリノに Majorana 質量を生成する (つまりレプトン数を破る) モデルで一般的に起こりえる。本論文では、 $SU(2)_L \times U(1)_Y$ ゲージ対称性を持った三つの典型的な Majorana

ニュートリノ質量生成のモデルである、seesaw モデル、 $SU(2)_L$ triplet Higgs モデル、Zee モデルを取り上げ、それまでに作られたレプトン数、バリオン数がレプトン数を破る相互作用によって消去されずに残存できるための条件を調べた。その際に、ニュートリノ振動実験の最新データからの条件、必要に応じてレプトンフレーバーを破る過程、neutrinoless double beta decay、 ρ パラメータに対する現象論的制限、WMAP からの制限も課した。本論文では第 2 章 1 節で上に挙げた 3 つの Majorana ニュートリノ質量モデルを紹介し、第 2 章 2 節でニュートリノ振動実験での観測量とニュートリノ質量モデルでのニュートリノ質量行列の関係を導いている。第 3 章では具体的に $SU(2)_L$ triplet Higgs モデルにおいてバリオン数がどのように消去されるかをボルツマン方程式を用いて解析し、バリオン数残存条件を求めている。本論文全体の流れは図 1 に示されている。

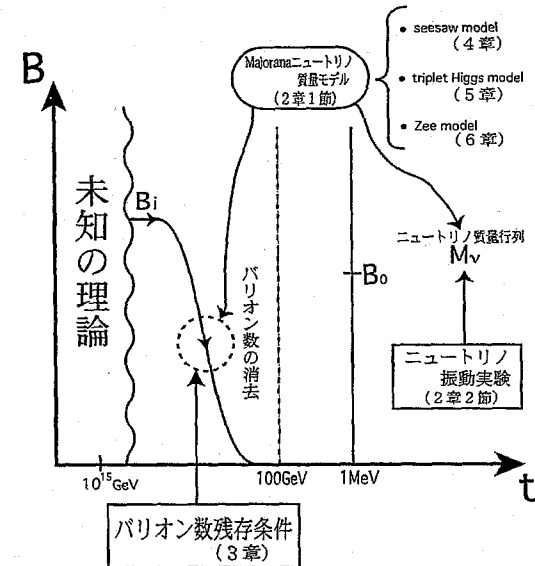


図 1: 本論文の各章でなされていることが示されている。初期バリオン数 B_i は宇宙初期の未知の理論により生成されたと仮定している。現在のバリオン数 B_0 は $B_0 \approx 10^{-10}$ であることが分かっている。また、温度 1MeV は軽元素の合成が始まった温度であり、この時点では現在のバリオン数 $B_0 \approx 10^{-10}$ が存在している必要がある。

まず seesaw モデルについての研究を要約する [第 4 章]。seesaw モデルでは重い Majorana 質量をもつ $SU(2)_L$ singlet の右巻きニュートリノが新たに導入される。このモデルは seesaw 機構により小さな Majorana ニュートリノ質量を自然に出す。一方、大気、太陽ニュートリノ等についての振動実験より、大気質量二乗差 (Δ_a)、大気混合角 (θ_a)、太陽質量二乗差 (Δ_s)、太陽混合角 (θ_s)、 θ_{13} がある程度の精度で決定されているので、質量行列において完全に自由な変数は一つの質量固有値のみになる。まず右巻きニュートリノの左巻きニュートリノと Higgs 場への崩壊、逆崩壊過程が全て非平衡であることを課すと、質量行列の全ての成分の大きさが $3.3 \times 10^{-3} \text{eV}$ 以下となり、質量二乗差 Δ_e を再現できない。そこで、スファレオン課程における三つの独立な保存量である $(B/3 - L_e)$, $(B/3 - L_\mu)$, $(B/3 - L_\tau)$ に注目する。この三つの保存量のある線形結合を破る反応が全て非平衡であるような線形結合 P が一つでも存在すれば、P に比例したバリオン数を残すことができる。このように、ある時刻の宇宙で P を破る反応が非平衡で、その反応が殆ど起こらないために、近似的に保存する量 P を近似的保存量または近似的対称性と呼ぶ。つまり、レプトンセクターで L_e, L_μ, L_τ のいずれかが保存すべしという条件を課せばよい事になる。試みに厳密な対称性を課してみると二つの混合角が零となり振動実験の結果と矛盾するので、やはり近似対称性を課す事になる。まず近似 L_e 対称性を課すと条件 $|M_{ee}| < 3.3 \times 10^{-3} \text{eV}$ のみが出てくる。さらに WMAP の制限を、適当な仮定の下で課すと、質量行列の全成分の大きさについて上限値が出る。この制限をニュートリノ振動実験の要請する一変数の質量行列が満たせるかを、normal と inverted 質量スペクトラムの両方の場合について調べた。さらに近似 L_μ, L_τ 対称性を課した場合にも同様に調べた。その結果、許されるのは近似 L_e 対称性をもつ normal 質量スペクトラムの場合のみである事が分かった。更にニュートリノ質量行列をかなりの精度で決定することが出来た。このようにニュートリノ振動実験だけでは決まらないニュートリノ質量行列をバリオン数残存条件と WMAP からの制限を適用することにより良い精度で求めることができた点はこの仕事の重要な成果であると思われる。この論文は baryogenesis, ニュートリノ質量モデルの専門家である A. E. Nelson により引用されている。

次に、 $SU(2)_L$ triplet Higgs モデルでの研究を要約する [第 5 章]。このモデルでは右巻きニュートリノは導入されず、 $SU(2)_L$ triplet Higgs 場が新たに導入され、tree レベルで左巻きニュートリノに関する Majorana 質量が出る。ニュートリノ質量行列は triplet Higgs 場とレプトン doublet との湯川結合 $f^{\alpha\beta}(\alpha, \beta = e, \mu, \text{又は} \tau)$ と triplet Higgs 場の真空期待値 (v_Δ) の積 ($M_{\alpha\beta} = v_\Delta f^{\alpha\beta}$) で与えられる。マヨロン問題を避けるために、triplet Higgs 場と doublet Higgs 場の三点結合 (結合定数 A) を導入してレプトン数を陽に破っておく。triplet Higgs 場の湯川結合 $f^{\alpha\beta}$ を通じた崩壊、逆崩壊過程の反応率を $\Gamma(f)$ と書き、三点結合を通じた崩壊、逆崩壊過程の反応率を $\Gamma(A)$ と書く。バリオン数残存条件は「 $\Gamma(f) < H$ 又は $\Gamma(A) < H$ 」(H はハッブル変数) である。何故ならば、どちらかの反応が起こらない宇宙ではレプトン数は保存量となり消去もされないからである。このバリオン数残存条件を満たし、ニュートリノ振動実験の結果と ρ パラメータに対する LEP 実験の制限を十分に満たせることが分かつ

た。この研究をまとめた論文を 2004 年 1 月末日までに提出する予定である。

最後に Zee モデルについての研究を要約する [第 6 章]。Zee モデルでも右巻きニュートリノは導入されず電荷 1 の $SU(2)_L$ singlet Higgs 場 (Zee singlet) と二つ目の doublet Higgs 場が新たに導入される。tree レベルでは繰り込み可能な (左巻きニュートリノの) Majorana 質量項は存在しないので有限の量子補正により小さな Majorana ニュートリノ質量が自然に与えられる。荷電レプトンが両方の doublet Higgs 場と湯川結合するかどうかで General Zee Model (GZM) と Restricted Zee Model (RZM) に分けられる。RZM は tree レベルの flavor changing neutral current を持たない点では望ましいが、一方でニュートリノ質量行列における対角成分が零であるために bi-maximal 混合を favor する。SNO, KamLAND 実験から太陽混合角は 45 度より小さいことが確定したため、RZM は排除される事になる。そこで RZM を最小に拡張した GZM を扱うことにした。即ち、二番目の doublet Higgs 場との新たな湯川結合は 9 個ありえるが、それを 1 個に限定した。目的はレプトン数を消去しない条件を求めることにあるので簡単のために CP が破れていないと仮定すると、ニュートリノ振動実験の結果よりニュートリノ質量行列は実験精度内で完全に決定される。このニュートリノ質量行列は inverted hierarchy の質量スペクトラムをもつ。次にバリオン数残存条件を課す。Zee モデルでは Higgs 場どうしの三点結合と Zee singlet とレプトン doublet との湯川結合が共存することによりレプトン数が陽に破れる。Higgs 三点結合は十分大きくて平衡になるのでバリオン数を残すためには Zee singlet の湯川結合 $f^{\alpha\beta}(\alpha, \beta = e, \mu, \text{又は} \tau)$ を含む反応が非平衡になる必要がある。ニュートリノ振動実験の結果から決定されたニュートリノ質量行列と矛盾しないためには $f^{\alpha\beta}$ による全ての反応が非平衡になるという条件は不可能であることが分かる。そこで、seesaw モデルと同様に、 $(B/3 - L_e)$, $(B/3 - L_\mu)$, $(B/3 - L_\tau)$ の線形結合を近似的に保存させることにする。この時、レプトン数を破らない反応でも、求める近似的保存量が保存するレプトンフレーバーを破る反応は非平衡である必要がある。こうした非平衡条件を満たせる P を探すと、 $(B/3 - L_e + L_\mu - L_\tau)$ 又は $(B/3 - L_\tau)$ が近似的保存量になることが分かり、これに比例してバリオン数を残すことができる事が分かった。さらに、レプトンフレーバーを破る過程 ($\mu \rightarrow e\gamma$ など)、neutrinoless double beta decay に対する現象論的制限と WMAP, Z-burst シナリオからの制限をも満たすことを確認した。この論文は Zee モデルの提唱者である A. Zee により引用されている。

氏名	長谷川耕平		
論文 題目	Neutrino Mass Generation and Baryon Number in the Universe (ニュートリノ質量の生成と宇宙のバリオン数)		
審査委員	区 分	職 名	氏 名
	主 査	教授	林 青司
	副 査	教授	森井俊行
	副 査	教授	野崎光昭
	副 査	教授	野海正俊
	副 査		
要 旨			
最近の Super-Kamiokande 実験等によってその存在が確実視されるようになった、大気および太陽ニュートリノのニュートリノ振動は、ニュートリノが有限の質量を持ち従って今まで完璧であった素粒子の標準模型を超える理論の必要性を明確に示すものとして分野に非常に大きなインパクトを与えている。 しかしながら、ニュートリノ質量の生成メカニズムに関しては幾つかの説が提唱されているものの確定していない。特にニュートリノの質量が他の物質の質量に比べて極端に小さいのは何故か、という大きな問題が生じるが、電氣的に中性である事からニュートリノのみに許されるマヨラナ質量にその原因がある、というのが有力な考え方である。 残念ながら現在報告されているニュートリノ振動のデータからは、ニュートリノ質量がマヨラナ質量か、電子の場合のようなディラック質量か、あるいはそれらの混合か、について何も手がかりが得られない。しかしながら、こうしたニュートリノ質量の生成機構の違いは宇宙のバリオン数生成に大きな影響を与え得る。即ち、マヨラナ質量の存在はレプトン数の非保存を意味するが、これは宇宙に於けるバリオン、即ち物質の生成、あるいは逆に作られたバリオンの消去にもつながる、という重要な帰結をもたらす。 この論文の主目的は、ニュートリノのマヨラナ質量生成の3つの典型的な機構について、その宇宙のバリオン数に対する帰結を詳細に調べることである。特にマヨラナ質量生成に伴うレプトン数の非保存、および標準模型の古典解としてのスファレロン解（および量子異常）の相乗効果のもとでも、高エネルギー領域で生成されたレプトン数、あるいはバリオン数が残存できる為の条件が、3つのニュートリノ質量生成の機構のそれぞれに対して詳細に議論されている。 1章の序論に続き、2章ではニュートリノ質量項の一般論が展開されている。即ち、どのワイルフェルミオンがマヨラナ質量を持つか、そのディラック質量に対する相対的な大きさ、古典質量が量子効果によるものか、どのような Higgs 粒子が必要とされるか、といった点に着目して系統的な議論が成されている。3章では、初期宇宙におけるバリオン数生成に関する一般論が展開されている。標準宇宙模型、スファレロン解と量子異常によるバリオン数、レプトン数非保存、サハロフの3条件とバリオン数残存のための条件、といった事柄が論じられている。 4～6章は論文の本体を成すものであり、ニュートリノのマヨラナ質量生成の3つの典型的な機構のそれぞれについて、その宇宙のバリオン数に対する帰結を詳細に調べている。まず4章では最も代表的な生成機構である「シーソー機構」を採り上げ、全てのレプトン数非保存過程が非平衡である事を課すとニュートリノ振動や、最近の WMAP の結果と合わないことを示した後、この条件を緩めることで「normal hierarchy」を持ったニュートリノ質量が条件を満たす解として出現することを示し、質量行列のある程度の精度で決める事に成功している。5章で扱うのは左巻きのニュートリノのみと SU(2) triplet の Higgs 粒子を持ったゲージ模型である。この場合、ニュートリノ質量が小さい事によって Higgs のレプトン数を破る自己相互作用も小さくなる為バリオン数が残存できる事を示している。6章では、左巻きのニュートリノのみ存在し、triplet の Higgs が存在しない場合でも量子効果によってマヨラナ質量が生成される、という興味深い Zee 模型におけるバリオン数残存条件を論じている。最もシンプルな模型は既に太陽ニュートリノ振動から示唆される混合角と合わず排除されているので、これを最小に拡張した模型が用いられている。ニュートリノ振動、レプトンフレーバー非保存過程、neutrinoless double-beta-decay からの制限を課した後にも、宇宙のバリオン数残存の条件を満たしうる解が存在する事を、具体的な計算により示している。7章は全体のまとめである。 以上みてきたように、本研究は、ニュートリノ質量、とくにマヨラナ質量生成の3つの代表的機構について、その初期宇宙におけるバリオン数生成への帰結を詳細に研究したもので、最近報告されたニュートリノ振動、WMAP のデータと無矛盾なバリオン数生成がそれぞれの機構で可能なこと、こうした条件からニュートリノ質量行列に有用な情報が得られること、等の素粒子論と宇宙論に関する重要な知見を得たものとして価値ある集積であると認める。 よって、学位申請者の長谷川耕平は、博士（理学）の学位を得る資格があると認める。			