

氏 名 大山 祥彦

学位(専攻分野) 博士(理学)

学位記番号 総研大甲第 1750 号

学位授与の日付 平成27年3月 24 日

学位授与の要件 高エネルギー加速器科学研究科 素粒子原子核専攻
学位規則第6条第1項該当

学位論文題目 Constraints on the neutrino parameters by
future cosmological 21cm line and precise CMB polarization
observations

論文審査委員 主 査 教授 小玉 英雄
准教授 郡 和範
教授 野尻 美保子
教授 北野 龍一郎
准教授 井岡 邦仁
教授 川崎 雅裕 東京大学

論文内容の要旨
Summary of thesis contents

Observations of the high-redshift Universe ($z \geq 6$) with the 21 cm line from neutral hydrogen are attracting interests of astrophysicists and cosmologists because it is expected to open up a new window to the early phases of the cosmological structure formation. After the recombination of hydrogens ($z \sim 1000$), there existed a period during which any luminous astrophysical object had not been born yet. This era is called “the cosmic dark age”. After the dark age, first luminous objects formed at around $z \sim 30$, and this epoch is called “the cosmic dawn” or just “the late time of the dark age”. After this epoch, X-rays emitted from the remnants of the luminous objects ionize the inter-galactic medium (IGM). This epoch is called the epoch of re-ionization (EOR)”. It is very difficult to observe these past epochs by optical telescopes, because neutral hydrogen gas is not transparent for optical or higher frequency light. However, we can observe these epochs by using the 21 cm line which was emitted by the neutral hydrogen gas itself. This is the reason why the observation of the 21 cm line is attracting attentions recently.

Using the observation of the 21 cm line, we can study not only how the epoch when the Universe was re-ionized, but also we can obtain information about the density fluctuations of matter because the distribution of neutral hydrogen traces that of cold dark matter (CDM). Therefore, as in the case of the cosmic microwave background (CMB) or galaxy surveys, we can utilize the observation of the 21 cm line to constrain cosmological parameters such as the Omega parameter for the energy density of CDM, Ω_c , or that of dark energy, Ω_Λ .

Besides, the 21 cm line observation has some advantages over the others. First, the 21cm line observation enables us to survey very far past eras and wide redshift ranges (21 cm tomography). Secondly, in such a high redshift era, the non-linear effect on the growth of fluctuations is smaller than that in later epochs. Therefore, theoretical uncertainties in the predictions for the 21 cm line observations is much smaller than that for galaxy surveys.

Under this background, in this thesis, the author has discussed the sensitivity of these cosmological observations to the neutrino properties such as the sum of the masses of all neutrino species, Σm_ν , the neutrino mass hierarchy, the effective number of neutrino species N_ν (the extra radiation component) and the lepton asymmetry ξ of our Universe, focusing on future observations of the 21 cm line radiation coming from the epoch of the re-ionization ($7 \leq z \leq 10$), measurements of the CMB polarization produced by a gravitational lensing and the baryon oscillation (BAO) observation. As the target future 21 cm line observations, the Square Kilometer Array (SKA) and the Omniscope are taken up. As the future precise CMB polarization experiments, POLARBEAR-2, Simons Array and CMBPol are considered. As the BAO experiment, the Dark Energy Spectroscopic Instrument (DESI) is selected.

(別紙様式 2)
(Separate Form 2)

The main results on the total neutrino mass are summarized as follows.

- The sensitivity to the total neutrino mass and the number of species can be significantly improved by adding the BAO experiments to the CMB experiments, although for $\Sigma m_\nu \sim 0.1$ eV, it is impossible to detect the nonzero neutrino mass at 2σ level even by using the combination of Simons Array and DESI. By adding the 21 cm experiments (SKA phase I) to the CMB experiment, a substantial improvement is expected.
- By using Planck + Simons Array + BAO (DESI) + SKA phase I, we can detect the nonzero neutrino mass (but it is necessary to remove foregrounds with a high degree of accuracy). For $\Sigma m_\nu \sim 0.06$ eV, corresponding to the lowest value in the normal hierarchy of the neutrino mass, we need the sensitivity of SKA phase II in order to detect the nonzero neutrino mass.

In order to study the determination of the neutrino mass hierarchy, the author has introduced a new parameter $r_\nu = (m_3 - m_1) / \Sigma m_\nu$ as the estimator for the hierarchy and obtained the following results:

- By adopting the combinations of the Planck + Simons Array + BAO (DESI) + SKA phase II, we will be able to determine the hierarchy to be inverted or normal for $\Sigma m_\nu \leq 0.1$ eV or $\Sigma m_\nu \leq 0.06$ eV at 2σ , respectively.

Finally, the author obtained following results for the constraints on the lepton asymmetry.

- In the absence of extra radiation, by combining the 21 cm observations with the CMB observations, we can constrain ξ with a better accuracy than the method using the primordial abundances of light elements, even if the BBN information is not used. Such an improvement cannot be achieved by the CMB observation alone.
- The 21 cm observations can substantially improve the constraints on extra radiation compared with the case of the CMB observations alone, and allow us to distinguish between the lepton asymmetry and extra radiation.

On the basis of these results, the author concludes that the 21cm observations can become a powerful probe of neutrinos and the origin of matter in the Universe and that it is essential to combine the 21cm observation with the precise CMB polarization observations to break various degeneracies in cosmological parameters when we perform the multiple-parameter fittings.

(別紙様式 3)
(Separate Form 3)

博士論文の審査結果の要旨

Summary of the results of the doctoral thesis screening

ニュートリノの種類や質量に対して宇宙論的現象を用いて制限を与える研究は長い歴史をもつが、近年、宇宙観測の精密化により、この宇宙論的方法の威力は急速に増し、地上実験を上回る精度での情報をもたらすようになりつつある。例えば、Planck 衛星実験による宇宙マイクロ波背景放射(CMB)の温度非等方性の観測をバリオン音響振動(BAO)と呼ばれる銀河分布相関関数の構造の観測と組み合わせることにより、ニュートリノ質量の総和に対し 0.23eV 以下という制限が得られているが、これは現時点での地上実験（三重水素のベータ崩壊）による制限より一桁程度強い制限となっている。

将来実験としては、地上実験でも現在の宇宙論的実験を超える 0.1eV 精度の実験が提案されているが、ニュートリノの質量階層構造を直接実験で決定するには不十分である。このような状況を打破する可能性を秘めているのが、中性水素基底状態の超微細構造遷移により放出される 21cm 線を用いた宇宙電波観測である。 21cm 線は CMB が物質と乖離する宇宙の水素中性化以降に放射され、宇宙論的赤方偏移のため、放射時刻の違いが振動数違いとして観測されるため、宇宙初期の宇宙の構造について、CMB や BAO とは異なった情報をもたらす。

大山氏は、この点に着目し、BAO 観測、今後活発になる CMB 偏光観測、将来観測である 21cm 線の強度非等方性観測を組み合わせることにより、質量の総和、質量階層性、不活性成分も含めた世代数などのニュートリノの基本特性および宇宙におけるニュートリノ・反ニュートリノ非対称性をどの程度の精度で決定できるかを世界で初めて組織的に調べた。本学位論文はその成果をまとめたものである。具体的な結果は、Square Kilometer Array (SKA) による 21cm 線観測、KEK が推進している POLARBEAR-II/Simons Array 実験による地上 CMB 偏光観測、Dark Energy Spectroscopic Instrument (DESI) 銀河サーベイ観測など、今後 10 年以内を実現されるプロジェクト（の組み合わせ）によって理論パラメータをどの程度の精度で決定できるかという「予報」としてまとめられている。その中で中心的な成果は、DESI 観測、Planck 観測、Simons Array 観測と SKA 観測の結果を組み合わせることにより、ニュートリノ質量の総和を 0.1eV より高い精度で決定し、さらに、質量階層性について、質量和が 0.1eV 以下で逆階層ないし質量和が 0.06eV 以下で順階層の場合には、その確認が可能であることを示したことである。この結果は、CMB 偏光観測と 21cm 線観測を組み合わせることが、これらの観測によってサイエンスを行ううえで本質的であることを示しており、これら観測実験の具体的仕様を大きく左右する重要な成果と言える。

本論文の構成は次の様になっている。まず、2 章から 5 章において、ニュートリノ物理、 21cm 線、および CMB B モードという鍵となる理論の基礎事項が要領よくまとめられている。次に、6 章から 9 章において、本研究で中心的な役割を果たす Fisher 行列法の解説を行った後、この方法を用いて具体的な将来観測についてどのようにして理論予報を行うかという解析方法が詳しく説明されている。以上の準備の元に、10 章と 11 章において、上で述べた、ニュートリノの諸特性およびレプトン非対称性に対する将来実験による決定精度についての予報が導かれている。全体として、素材の選択、構成が的確で、このテーマについての基本参考文献として使える高いレベルの論文となっている。

このように大山氏の論文は、宇宙物理学による基礎物理の実験的研究に大きな貢献をする最先端の独創的な成果を含んでおり、いずれの研究も共同研究に基づくものであるが、問

(別紙様式 3)

(Separate Form 3)

題設定や具体的な計算，物理的意義の検討すべての面において中心的な寄与をしたと認められる．本論文は，大山氏の深い学識と高い研究能力を明快に示しており，博士論文にふさわしいと判断した．