

宇宙論的な 21cm 線放射の将来観測による ニュートリノ質量とその階層構造への制限

大山祥彦

総合研究大学院大学

高エネルギー加速器科学研究科 素粒子原子核専攻
5 年一貫博士課程 3 年

0.1 Abstract

ニュートリノ振動の観測は、ニュートリノに質量があることを示した。しかしそこから得られる情報は質量の値そのものではなく、各質量固有状態の 2 乗の差だけである。一方 CMB と銀河分布の観測を組み合わせることにより、ニュートリノ質量の和に対し制限を与えることができ、現在得られている質量和の上限は約 0.3eV である。近年、21cm 線と呼ばれる中性水素起源の電波を用いて、宇宙が再電離する時期の密度ゆらぎを観測する方法が提案されている。この 21cm 線観測によってニュートリノが密度ゆらぎに与える効果を精密に測定し、ニュートリノ質量に対し現在の CMB 観測や銀河分布探査以上の制限を与えられる可能性が指摘されている。

本集録では、将来的に 21cm 線観測から、ニュートリノの質量階層構造、及びニュートリノ世代数に対する制限がどの程度得られるのかについて、我々が行った解析の結果について簡潔にまとめていく。

目次

0.1	Abstract	1
第 1 章	Introduction	3
1.1	21cm 線観測の概要	3
1.2	中性水素の 21cm 線	4
第 2 章	21cm 線輝度温度とパワースペクトル [6]	5
2.1	観測される 21cm 線輝度温度	5
2.2	21cm 線パワースペクトル	5
第 3 章	ニュートリノと密度ゆらぎ	6
第 4 章	Fisher Information Matrix を用いた宇宙論パラメータの制限	7
4.1	Fisher Information Matrix の計算結果	7
4.1.1	ニュートリノ世代数 N_ν に対する制限	7
4.1.2	ニュートリノ階層性に対する制限	8
	Conclusion	10

第1章 Introduction

1.1 21cm 線観測の概要

近年，中性水素原子の超微細構造を起源とする 21cm 線を観測することによって，高赤方偏移 ($z \sim 200$ から $z \sim 6$) の時期を直接調べられる可能性が議論され初め，注目を集めている．このような高赤方偏移の時期は，宇宙が中性化され (CMB 最終散乱面)，その後宇宙最初の星ができるまでは光源となる天体が存在せず，そのために宇宙の暗黒時代 (dark age) と呼ばれている．その後，宇宙最初の星が形成されるとその星の輻射によって宇宙は再び電離され，この時期は再電離期 (Epoch of Reionization) と呼ばれる (図 1.1) ．

これまでは暗黒時代及び再電離の時期の観測は困難であった．現在 21cm 線が注目されているのは，この宇宙の暗黒時代と再電離の時期を観測できる可能性があるためである．というのも 21cm 線は中性水素原子が放射する (もしくは吸収する) 電波であるから，水素原子さえ存在すれば，星などの光源がない時期でも探査することが可能なのである．

また 21cm 線を用いた再電離の時期の探査は，宇宙がどのように再電離したのか調べられるだけでなく，この時期の物質の密度揺らぎを測定することも可能である．そのため CMB 観測のように，宇宙論パラメータに制限を与えることができるのである．特に 21cm 線の観測は CMB 観測と違い，異なる赤方偏移を調べることができる (21cm 線断層撮影: 21cm tomography) ．そのため CMB 以上の情報を得られる可能性も指摘されている．現在建設，もしくは将来計画としてある 21cm 線観測では，CMB 観測と組み合わせる事により，宇宙論パラメータに対し CMB 単独の場合と比較し，非常に強い制限を与えられる可能性が示唆されている [1] ．特に現時点では下限しか存在しないニュートリノ質量和に対して，下限まで含めた強い制限を与えられる可能性が指摘されている [2] [3] ．

本集録では，再電離の時期 ($7 \leq z \leq 10$) を 21cm 線で観測することにより，ニュートリノ質量和とニュートリノ有効世代数に対する制限，加えてニュートリノ質量階層構造が決定可能かどうかについて私たちが調べた結果を示す．将来的な 21cm 線観測としては，現在完成し運用が始まりつつある Murchison Widefield Array (MWA)，2016 年に建設開始が予定されている Square Kilometre Array (SKA)，そして M. Tegmark, M. Zaldarriaga らによって提案されている将来的な電波干渉計である Omniscope[4][5] を想定した．

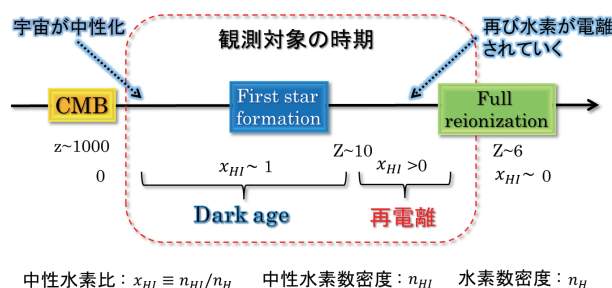


図 1.1: 21cm 線の観測対象の時期

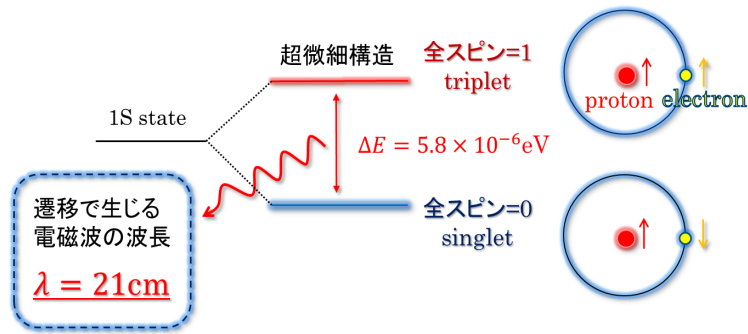


図 1.2: 中性水素の超微細構造

1.2 中性水素の21cm線

中性水素原子はその基底状態（S状態）が、電子と陽子の間のスピン-スピン相互作用によって微細に分裂している。この分裂は微細構造（スピン-軌道相互作用が起源）よりさらに微細に分裂しているため、超微細構造と呼ばれる。水素原子の基底状態はこの超微細構造により、陽子と電子のスピンが平行な状態（spin triplet）と反平行な状態（spin singlet）に分かれており、そのエネルギー差は $\Delta E \sim 5.8 \times 10^{-6} \text{eV}$ である。このエネルギー差を電磁波の振動数に直すと $\nu_{21} = 1.4 \text{GHz}$ であり、波長は $\lambda = 21 \text{cm}$ となる。この波長から名前をとり、超微細構造による状態間の遷移によって放射/吸収される電磁波を21cm線と呼ぶ（図 1.2 参照）。

第2章 21cm 線輝度温度とパワースペクトル^[6]

2.1 観測される 21cm 線輝度温度

IGM (Intergalactic medium) に対する 21cm 線の輝度温度は、赤方偏移の効果等も考慮することで以下のように表すことができる。

$$T_b(\mathbf{x}) \approx 27x_{HI}(1 + \delta_H) \left(\frac{\Omega_b h^2}{0.023} \right) \left(\frac{0.15}{\Omega_m h^2} \frac{1+z}{10} \right)^{1/2} \times \left(\frac{T_S - T_{\text{CMB}}}{T_S} \right) \left(\frac{H(z)/(1+z)}{dv_{\parallel}/dr_{\parallel}} \right) \text{ mK}, \quad (2.1)$$

ここで T_S はガスのスピン温度、 T_{CMB} は CMB (Cosmic microwave background) の温度、 x_{HI} は中性水素比、 δ_H は水素の密度揺らぎ、 $dv_{\parallel}/dr_{\parallel}$ は視線方向に対するガスの固有速度の gradient で、特異速度と宇宙膨張の両方の効果を含んでいる。

2.2 21cm 線パワースペクトル

ここでは 21 線輝度温度揺らぎ δ_{21} の 3 次元パワースペクトルについて考える。21cm 線のパワースペクトル P_{21} は輝度温度揺らぎ δ_{21} を用いて

$$\langle \tilde{\delta}_{21}(\mathbf{k}) \tilde{\delta}_{21}(\mathbf{k}') \rangle = (2\pi)^3 \delta^D(\mathbf{k} + \mathbf{k}') P_{21}(\mathbf{k}) \quad (2.2)$$

と定義される。ここで $\langle \cdot \rangle$ はアンサンブル平均を表し $\delta^D(\cdot)$ は Dirac のデルタ関数である。また (\cdot) がついている量はフーリエ空間での量を表している。

21 線パワースペクトルは一般の場合はかなり複雑なものになるが、条件 $T_{\gamma} \ll T_S$ (宇宙の再電離の時期等)、 $\delta_{x_{HI}} \ll 1$ の元では以下のように比較的簡単な形で表すことができる。

$$P_{21}(\mathbf{k}, z) = \bar{T}_b^2(z) (1 + \mu^2)^2 P_{\delta\delta}(k, z). \quad (2.3)$$

ここで $P_{\delta\delta}(k, z)$ は赤方偏移 z における matter のパワースペクトル、また \bar{T}_b は輝度温度の空間平均、 μ は視線方向と波数ベクトル \mathbf{k} のなす角の余弦を表している。(2.3) より 21cm 線パワースペクトルから matter のパワースペクトルの情報が得られると分かる。したがって、21cm 線のパワースペクトルを観測すれば、銀河 survey や CMB 観測と同様に、宇宙論パラメータに対する制限を与えることができる。

第3章 ニュートリノと密度ゆらぎ [7]

質量のあるニュートリノは以下の2つの効果によってパワースペクトルに影響を与える(図3.1). 1つ目の効果は, matter-radiation equality の時期に与える影響である. これは, 質量があるニュートリノであっても, 宇宙初期には放射成分として振る舞うために生じる効果である. matter のエネルギー密度の内, ニュートリノの占める割合が変化すれば, matter-radiation equality の時期も影響を受け, dark-matter の密度揺らぎが成長を始める時期が変化する. 2つ目は, ニュートリノの自由運動 (free-streaming) により, ニュートリノの密度揺らぎがならされてしまう効果である. このニュートリノの free-streaming はニュートリノが非相対論的になる時の horizon scale まで影響を与える. free-streaming によってニュートリノの密度揺らぎがならされる結果, ニュートリノの free-streaming scale より小さな scale では, ニュートリノが matter 全体の密度揺らぎの成長に寄与できなくなる. その結果パワースペクトルが suppress される効果として現れてくる.

さらにニュートリノ世代数 N_ν , 及びニュートリノ質量階層構造の違いによる効果も存在している. ニュートリノ世代数 N_ν は, ニュートリノのエネルギー密度を通して matter-radiation equality に影響を与える. また質量階層構造による各質量固有値の違いは, free-streaming scale, 及び各ニュートリノ質量固有状態の相対論的粒子から非相対論的粒子となる時期に対して影響を与える(図3.2). ただしニュートリノの free-streaming scale に相当する波数は, $k_{\text{free}} \sim 10^{-2} h\text{Mpc}^{-1}$ 程度であり, 21cm 線観測における観測波数の下限 $k_{\text{min}} = 2\pi/(yB) \sim 6 \times 10^{-2} h\text{Mpc}^{-1}$ よりずっと小さいので, free-streaming scale の違いを直接観測することはできない. そのため 21cm 線観測では質量階層性に関して, 各ニュートリノ質量固有状態が相対論-非相対論と変化することによる影響を観測することになる.

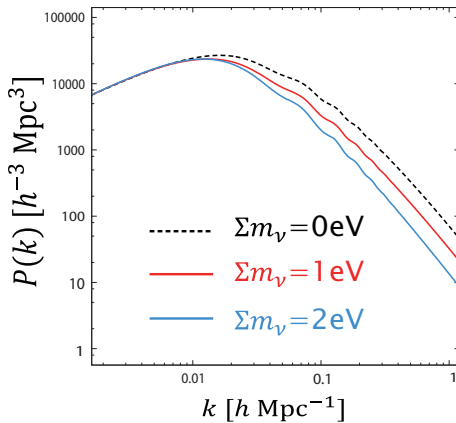


図 3.1: ニュートリノ質量和 Σm_ν を変化させた際の matter パワースペクトル $P(k)$ の受ける影響.

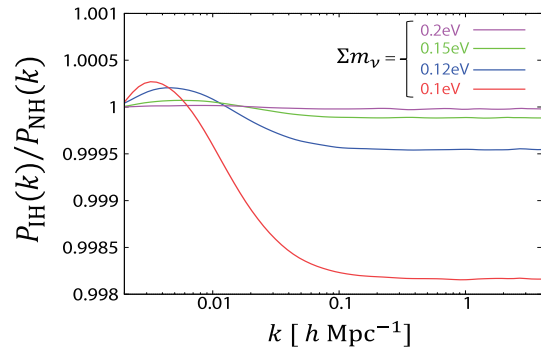


図 3.2: 質量階層構造の違いによる matter パワースペクトルの影響. $P_{NH}(k)$, $P_{IH}(k)$ はそれぞれ, 正常階層 (Normal hierarchy), 逆階層 (Inverted hierarchy) におけるパワースペクトルを表す.

第4章 Fisher Information Matrixを用いた宇宙論パラメータの制限

この章では将来的な 21 線観測によってニュートリノ質量和，世代数，及び質量階層構造がどの程度制限できるのかについて，Fisher Information Matrix を用いて調べた結果を示す．今回想定した 21cm 線観測は MWA(Murtchison Widefield Array), SKA(Square Kilometer Array), Omniscopes [5] の 3 つである．

4.1 Fisher Information Matrix の計算結果

21cm 線観測実験 (MWA, SKA, Omniscopes) 及び CMB 観測実験 (Planck + POLARBEAR, CMBPol) における Fisher matrix の計算を行い，各実験に対して (A) ニュートリノ世代数 N_ν ，(B) ニュートリノ質量階層性の forecast を評価した．なお Fisher matrix の計算において必要となる matter のパワースペクトル $P_{\delta\delta}$ ，及び CMB の非等方性 C_l の計算には CAMB[8] を使用した．また (B) のニュートリノ質量階層性の解析においては，階層性を表すパラメータとして $r_\nu \equiv (m_3 - m_1)/\Sigma m_\nu$ を選んだ (Normal hierarchy では $m_3 \gg m_2 > m_1$ ，Inverted hierarchy では $m_2 > m_1 \gg m_3$ である)．このパラメータ r_ν は Normal hierarchy と Inverted hierarchy において正負の符号が異なっており，階層構造の違いを一目で区別できる点で優れていると考えられる．質量階層構造の違いによる r_ν の振る舞いは，図 4.2 に plot した．

4.1.1 ニュートリノ世代数 N_ν に対する制限

図 4.1 は，Fisher matrix を計算することで評価した，CMB 観測+21cm 線観測の元でのニュートリノ質量和 Σm_ν ，ニュートリノ世代数 N_ν に対する 2 の制限の Forecast である．左側の図が，Planck+POLARBEAR に対し各 21cm 線観測を組み合わせた場合の制限，右側の図は CMBPol と各 21cm 線観測を合わせた場合の同様の図である．また上側の図ではニュートリノの質量和の fiducial value を $\Sigma m_\nu = 0.1\text{eV}$ と設定し，下側の図では $\Sigma m_\nu = 0.05\text{eV}$ としてある．

図 4.1 より，CMB のみの制限に対し 21cm 線観測を組み合わせることで Σm_ν ， N_ν に対する制限が強くなるのが分かる (加えて 21cm 線観測の元では A_s 及び輝度温度 T_b が完全に縮退しているため，CMB 観測によってその間の縮退を解くことが必須となる)．特に SKA, Omniscopes は CMB 単独の制限をかなり改善することができる．

また図 4.1 より Omniscopes の場合は振動実験より制限される normal hierarchy の最小の値 $\Sigma m_\nu = 0.05\text{eV}$ でも，ニュートリノ質量和に対し下限を与えられるということが分かる．また SKA は $\Sigma m_\nu = 0.1\text{eV}$ において，CMBPol と組み合わせた場合にニュートリノ質量和の下限を与えられる．加えて Omniscopes は $\Sigma m_\nu = 0.05\text{eV}$ であれば 2σ の上限が inverted の最小の値 $\Sigma m_\nu = 0.1\text{eV}$ より小さくなっており，この場合はニュートリノ質量階層性まで見分けられることが分かる．

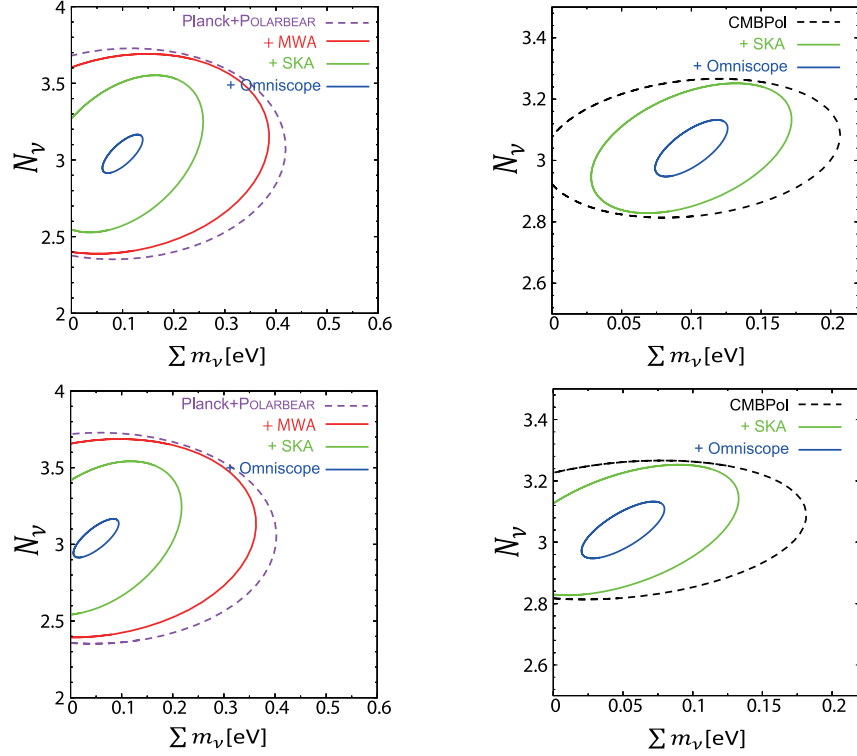


図 4.1: Σm_ν - N_ν 平面における, 95% confidence levels (C.L.) の各 21cm 線観測+CMB 観測の Forecast . (左の 2 図) Planck + POLARBEAR + 各 21 cm 観測 . (右の 2 図) CMBPol + 各 21 cm 観測. Fiducial values は, 上の 2 図が $N_\nu = 3.04$, $\Sigma m_\nu = 0.1$ eV , 下の 2 図が $\Sigma m_\nu = 0.05$ eV である.

4.1.2 ニュートリノ階層性に対する制限

図 4.2 は階層性のパラメータ $r_\nu \equiv (m_3 - m_1) / \Sigma m_\nu$ に対する 2σ の error を Σm_ν , r_ν の fiducial value を変化させ Plot したものである . 右図が Normal hierarchy , 左図が Inverted hierarchy の場合である . 赤/青の実線は振動実験による Normal/Inverted に対する r_ν の 99% CL の範囲であり, 赤/青の破線は Fisher matrix を計算する際に使用した fiducial value である . 21cm 線観測としては Omniscope のみを評価し, 紫の実線が Planck+POLARBEAR+Omniscope , 緑の実線が CMBPol+Omniscope である .

階層性による質量固有値の違いは $\Sigma m_\nu \sim 0.3eV$ 程度では m_1, m_2, m_3 がほとんど縮退しており, 階層性によるパワースペクトルの違いも小さいため, r_ν に対する強い制限を得ることはできない . ただし階層性による質量固有値の違いが顕著になる $\Sigma m_\nu \sim 0.1eV$ 付近では r_ν を制限できるようになる . Normal hierarchy の場合は図 4.2 の右側の図より, fiducial value が $\Sigma m_\nu = 0.1eV$ において, $\Sigma m_\nu \lesssim 0.1eV$ の Inverted hierarchy を 2σ で exclude 出来るということが分かる . Inverted hierarchy の場合は Normal hierarchy より r_ν の制限を強く与えることができ, $\Sigma m_\nu \sim 0.12eV$ 付近でも階層性を制限できるようになるということが分かる .

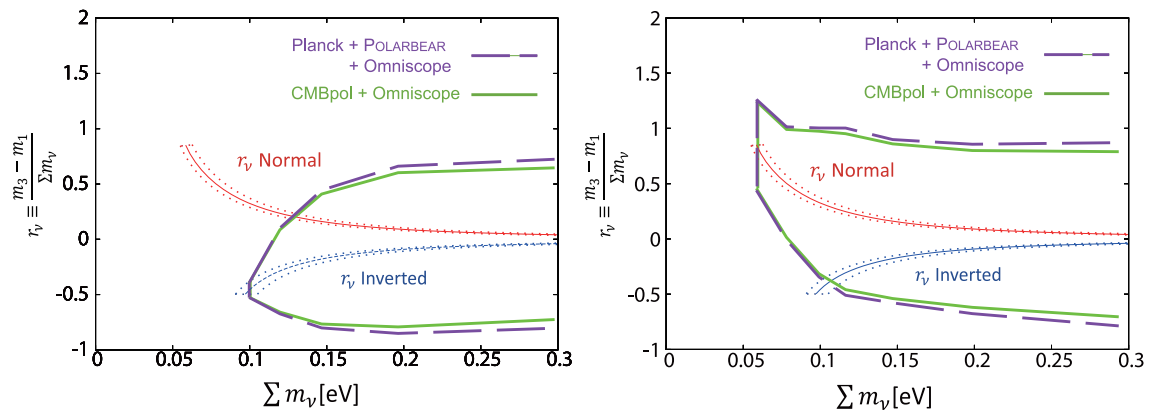


図 4.2: 各 21cm 線観測 + CMB 観測による, 質量階層構造を表すパラメータ $r_\nu = (m_3 - m_1)/\sum m_\nu$ に対する 2σ error の Forecast (紫:Planck+POLARBEAR+Omniscope, 緑:CMBPol+Omniscope). 左図が inverted hierarchy, 右図が normal hierarchy の場合である. 赤/青の実線は振動実験による Normal/Inverted に対する r_ν の 99% CL の範囲であり, 赤/青の破線は Fisher matrix を計算する際に使用した fiducial value である.

Conclusion

この集録では dark age, 及び reionization を探る有力な方法として注目されている, 21cm 線の観測についての概要の説明を初めに行った. その 21cm 線のシグナルは dark age では背景となる CMB に対し吸収線となり, 再電離の時期は放射線となる. 特に再電離の時期は $T_\gamma \ll T_S$ という条件が成り立ち, この場合輝度温度を考える際にスピン温度 T_S と CMB の温度 T_γ の依存性を考えなくてよくなる. またその次に説明した, 21cm 線輝度温度揺らぎのパワースペクトルから, 密度揺らぎのパワースペクトルの情報を抜き出すことができるという点も重要である. この為に 21cm 線観測によって matter の情報を抜き出すことができ, 結果宇宙論パラメータに対する制限を与えることができるのである.

続いて我々は Fisher Information Analysis を用いて 21cm 線の将来観測から, ニュートリノの質量階層構造, 及びニュートリノ世代数に対する制限がどの程度得られるのかについて, 観測装置のエラーを推定できる Fisher 解析を用いて評価を行った. その結果, 将来的な 21cm 線観測実験である SKA(Square Kilometer Array) や Omniscope と, 将来的な CMB 観測を組み合わせることにより, 現在の CMB 観測 (WMAP) と比較し質量和や世代数に非常に強い制限が与えられること, 及び質量階層構造さえ制限できる可能性があることが判明した.

references

- [1] M. McQuinn, O. Zahn, M. Zaldarriaga, L. Hernquist, S. R. Furlanetto, (2006), ApJ, 653, 815.
- [2] J. R. Pritchard, E. Pierpaoli, Phys Rev D 78, 065009
- [3] J. R. Pritchard, E. Pierpaoli, Nuclear Physics B(Proc. Suppl.) 188 (2009) 31-33
- [4] M. Tegmark, M. Zaldarriaga, arXiv:0805.4414v2.
- [5] M. Tegmark, M. Zaldarriaga, Phys. Rev. D 82, 103501 (2010).
- [6] S. R. Furlanetto, S. P. Oh, F. H. Briggs, Phys. Rep. 433 (2006) 182-301.
- [7] J. Lesgourgues, S. Pastor, Phys. rep, 429 (2006) 307-379.
- [8] A. Lewis, A Challinor, <http://camb.info/>