

2011 年度第 41 回 天文・天体物理若手夏の学校

21cm 線の将来観測により得られるニュートリノ質量への 強い制限の可能性

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 2 年

1 Abstract

近年、宇宙の暗黒時代及び、その後続く再電離の時期を直接観測できる可能性が高まっている。その観測方法の候補として、中性水素（電離してない水素）を起源とする 21cm 線電波の観測があげられる。ここでは、21cm 線を用いて再電離の時期 ($6 \leq z \leq 10$) を観測することで、CMB 観測単独の場合と比較し、ニュートリノ質量に対する強い制限を得られるということを紹介する [1][2]。

この場合 CMB 観測により得られているようなニュートリノ全質量和の制限だけでなく、現在決まっていない質量階層性や質量絶対値の制限を得られる可能性も存在する。

目次

1	Abstract	1
2	21cm 線観測の概要	3
2.1	中性水素の 21cm 線	3
2.2	宇宙論的な 21cm 線の利用法	3
2.3	21cm 線の観測量	4
2.4	具体的な 21cm 線観測実験	5
3	ニュートリノ質量	6
4	21cm 線観測で得られるニュートリノ質量の制限	7
5	Summary	8
6	References	8

2 21cm 線観測の概要

2.1 中性水素の 21cm 線

21cm 線は中性水素原子の基底状態における超微細構造を起源として生じる電波である。この超微細構造は陽子のスピンと電子のスピン間の相互作用が原因となり生じたものである。この 21cm 線の振動数は 1.42GHz であり、波長が 21cm なためこのように呼ばれる。

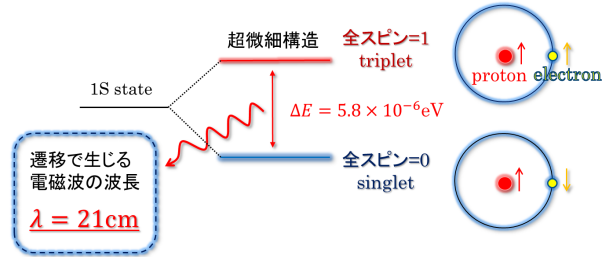
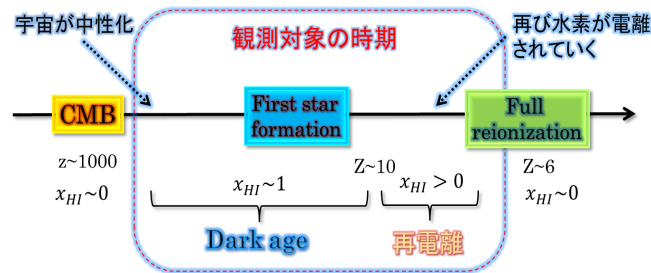


図 1: 中性水素の超微細構造

2.2 宇宙論的な 21cm 線の利用法

21cm 線を用いた観測は、大量の中性水素がある時期なら可能である。そのような時期としては電子が陽子と結合した CMB 最終散乱面の後から、初めの星が形成され始めるまでの時期 (宇宙の暗黒時代; dark age $10 \leq z \leq 1000$)、及び初期の星の X 線によって中性水素が電離されていく時期である再電離時 ($6 \leq z \leq 10$) があげられる。



中性水素比: $x_{HI} \equiv n_{HI}/n_H$ 中性水素数密度: n_{HI} 水素数密度: n_H

図 2: 観測対象の時期

2.3 21cm 線の観測量

21cm 線観測は CMB 放射を背景としてその輝度温度の変化分を観測する。 T_b を 21cm 線輝度温度、 T_γ を CMB 輝度温度、とすればその変化分 δT_b は

$$\delta T_b = T_b - T_\gamma \quad (1)$$

である。したがって 21cm 線吸収線となるか、放射線となるかは 21cm 線輝度温度と CMB 輝度温度に依存して変化する。

この 21cm 線輝度温度は以下で定義される超微細構造の励起温度 T_S （超微細構造の場合はスピン温度とも呼ばれる）に依存する。このスピン温度は中性水素ガスの温度や Ly α の放射によって決定される。

$$\frac{n_u}{n_l} \equiv \frac{g_u}{g_l} \exp\left(-\frac{h\nu_{21}}{k_B T_S}\right) \quad (2)$$

n_u : 励起状態の粒子数, n_l : 基底状態の粒子数

g_u : 励起状態の統計的自由度, g_l : 基底状態の統計的自由度

h : プランク定数, ν_{21} : 21cm 線の振動数, k_B : ボルツマン定数

また実際に観測される輝度温度は赤方偏移による影響があるため、 $1/(1+z)$ 倍になる。以上より実際に観測される輝度温度の差 δT_b^{obs} は輻射輸送方程式

$$\frac{dT_b}{d\tau_\nu} = -T_b + \left(\frac{\nu_{21}}{\nu}\right)^2 T_S \quad : (Rayleigh - Jeans \text{ 近似 } k_B T \gg h\nu) \quad (3)$$

τ_ν : 振動数 ν に対する光学的深さ

を用いることで以下のように表すことができる。

$$\delta T_B^{obs} = \frac{T_S - T_\gamma}{1+z} (1 - e^{-\tau_{\nu_{21}}}) \quad (4)$$

さらに赤方偏移及び中性水素ガスの固有運動の効果を考慮して τ_ν を表すことで、最終的に δT_b^{obs} は以下ようになる。

$$\delta T_B^{obs} = 9x_{HI}(1 + \delta_b)(1+z)^{1/2} \left[1 - \frac{T_\gamma}{T_S}\right] \left[\frac{H/(1+z)}{dv_{||}/dr_{||}}\right] mK \quad (5)$$

δ_b : baryon fraction, H : Hubble パラメータ

$dv_{||}/dr_{||}$: 視線方向への中性水素ガスの運動 (赤方偏移 + ガスの固有運動)

この式より $T_S \gg T_\gamma$ の時期であれば輝度温度が、スピン温度の詳細及び CMB 温度に依存しないということがわかる。このような時期としては星の形成から十分時間がたった再電離の時期があげられる。この時期では中性水素ガスが星からの輻射によって十分加熱されており、そのためスピン温度も CMB 温度より十分大きくなっていると期待される。

この場合以下で定義される 21cm 線のパワースペクトル

$$\langle \delta_{\delta T_b^{obs}}(\mathbf{k}) \delta_{\delta T_b^{obs}}(\mathbf{k}') \rangle \equiv (2\pi)^3 \delta(\mathbf{k} + \mathbf{k}') P_{21}(\mathbf{k}) \quad (6)$$

$$\delta_{\delta T_b^{obs}} \equiv \frac{\delta T_b^{obs} - \delta \bar{T}_b^{obs}}{\delta \bar{T}_b^{obs}}$$

\bar{T}_b^{obs} : δT_b^{obs} の全空間における平均値

は中性水素比 x_{HI} の揺らぎを無視した近似で次のように表すことができる。

$$P_{21} = (1 + \mu^2)^2 P_{\delta_m \delta_m} \quad (7)$$

$P_{\delta_m \delta_m}$: Matter のパワースペクトル

$\mu \equiv \mathbf{k} \cdot \hat{x}_{||} / k$, $\hat{x}_{||}$: 視線方向

2.4 具体的な 21cm 線観測実験

現在存在する具体的な 21cm 線観測実験としては以下のものが存在する。

<p>First generation</p> <ul style="list-style-type: none"> LOFAR : オランダ MWA : オーストラリア 21CMA : 中国 PAPER : 南アフリカ 	<p>次世代～2020</p> <div style="border: 2px solid blue; border-radius: 15px; padding: 10px;"> <p>◆ SKA(Square kilometer Array)</p>  <p>アンテナ数 5000</p> <p>全アンテナ 有効面積 $6 \times 10^5 m^2$</p> <p>http://www.skatelescope.org/</p> <p>◆ FFTT(Fast Fourier Transform Telescope)</p> <p>アンテナ数 全アンテナ有効面積 10^6 $10^6 m^2$</p> </div>
--	--

ここでは、次世代の観測実験である SKA,FFTT を考慮する。

3 ニュートリノ質量

現在ニュートリノ振動の観測により、ニュートリノが質量を持つことは分かっている。しかしニュートリノ振動で測定できるのは、ニュートリノの各質量固有状態の2乗差だけである。

ニュートリノ振動

Transition probability

$$P_{\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta} \cong \sin^2 2\theta_{\alpha\beta} \sin^2 \frac{\Delta m_{ij}^2 L}{4E}$$

→

質量2乗差のみ制限

$$\Delta m_{ij}^2 \equiv m_i^2 - m_j^2$$

$$\begin{cases} |\Delta m_{23}^2| = 2.4 \times 10^{-3} eV^2 \\ \Delta m_{12}^2 = 7.6 \times 10^{-5} eV^2 \end{cases}$$

m_i : ニュートリノの質量固有値

さらに現在得られている質量2乗差からは、質量固有状態の階層構造も2つの場合が許されてしまう。

◆ **質量階層構造**も現時点では決められない

$$\begin{cases} m_2 > m_1 > m_3 & \text{normal hierarchy} \\ \text{or} \\ m_3 > m_2 > m_1 & \text{inverted hierarchy } M_\nu < 0.1 \end{cases}$$

Total mass: $M_\nu = m_1 + m_2 + m_3$

しかしニュートリノ質量に対する制限は、ニュートリノ振動だけでなく、宇宙論パラメータの制限を行うことでも得ることができる。実際にWMAPによるCMBの観測によってニュートリノ質量和に対する制限が、 $M_\nu < 0.62 eV$ と与えられている。有限質量のニュートリノがmatter成分として含まれている場合、small scaleの密度揺らぎの成長が弱まるという効果（ニュートリノ free stream）があり、そのためにCMBの揺らぎの観測からニュートリノ質量の制限を得ることができるのである。

Neutrino free stream

ニュートリノは質量が軽く速度分散が大きい

$$\delta'_\nu + \mathcal{H}\delta_\nu + (k^2 c_{sv}^2 - 4\pi G a^2 \bar{\rho}_m) \delta_\nu = 0$$

※ $\delta_\nu \equiv (\rho_\nu - \bar{\rho}_\nu)/\bar{\rho}_\nu$: ニュートリノ密度ゆらぎ
 k : フーリエ成分の波数

速度分散による効果: Small scaleでは正 → 密度ゆらぎが成長しない

↓

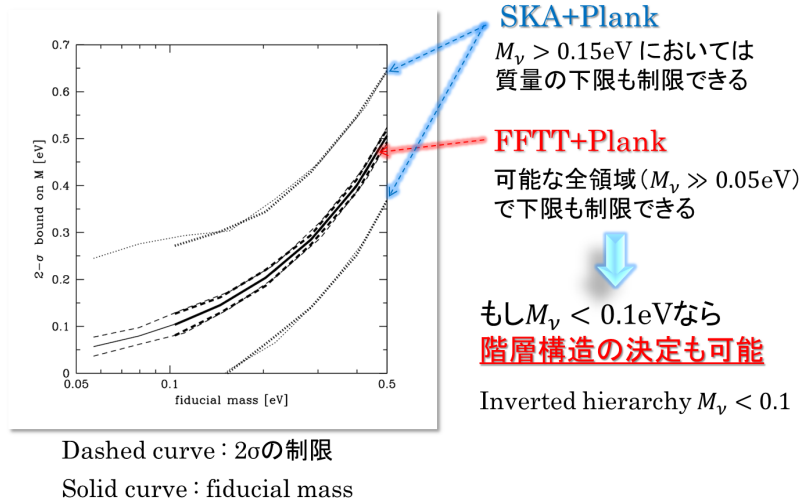
Small scaleにおけるmatterの密度揺らぎの成長が弱まる

このmatterの揺らぎのパワースペクトルは21cm線観測によっても測定できるため、21cm線観測とCMBの観測を組み合わせることで、より強いニュートリノ質量の制限を得られる可能性がある。

4 21cm 線観測で得られるニュートリノ質量の制限

以下は Fisher Information Analysis を用いて推定した 21cm 線観測で得られると期待されるニュートリノ質量に対する制限である。

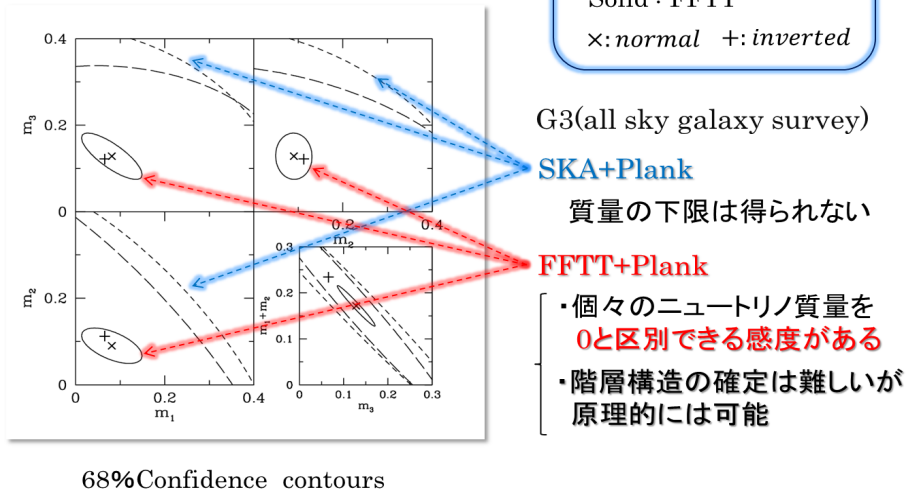
(1) ニュートリノ質量和 M_ν に対する制限



(2) 個々のニュートリノ質量和に対する制限

・個々のニュートリノ質量

$$M_\nu = 0.3\text{eV} \quad (m_1, m_2, m_3) = (0.081, 0.09, 0.13)$$



5 Summary

21cm 線による再電離時 ($6 \leq z \leq 10$) の観測

- ・ 中性水素が多く 21cm 線観測が可能
- ・ スピン温度の詳細によらない

将来的な 21cm 線観測実験 (SKA,FFTT) では、CMB 単独よりも強いニュートリノ質量の制限を得ることができる

- ・ 質量の和 : SKA,FFTT
- ・ 質量階層構造 : FFTT
- ・ 個々の質量の絶対値:FFTT

6 References

- [1]Jonathan R. Pritchard, Elena Pierpaoli, Phys Rev D 78, 065009
[2]Jonathan R. Pritchard, Elena Pierpaoli, Nuclear Physics B (Proc. Suppl.) 188 (2009) 31-33