

重元素の超微細構造線による ダークバリオンの観測可能性

筑波大学 計算科学研究センター

吉川 耕司

渡邊 歩

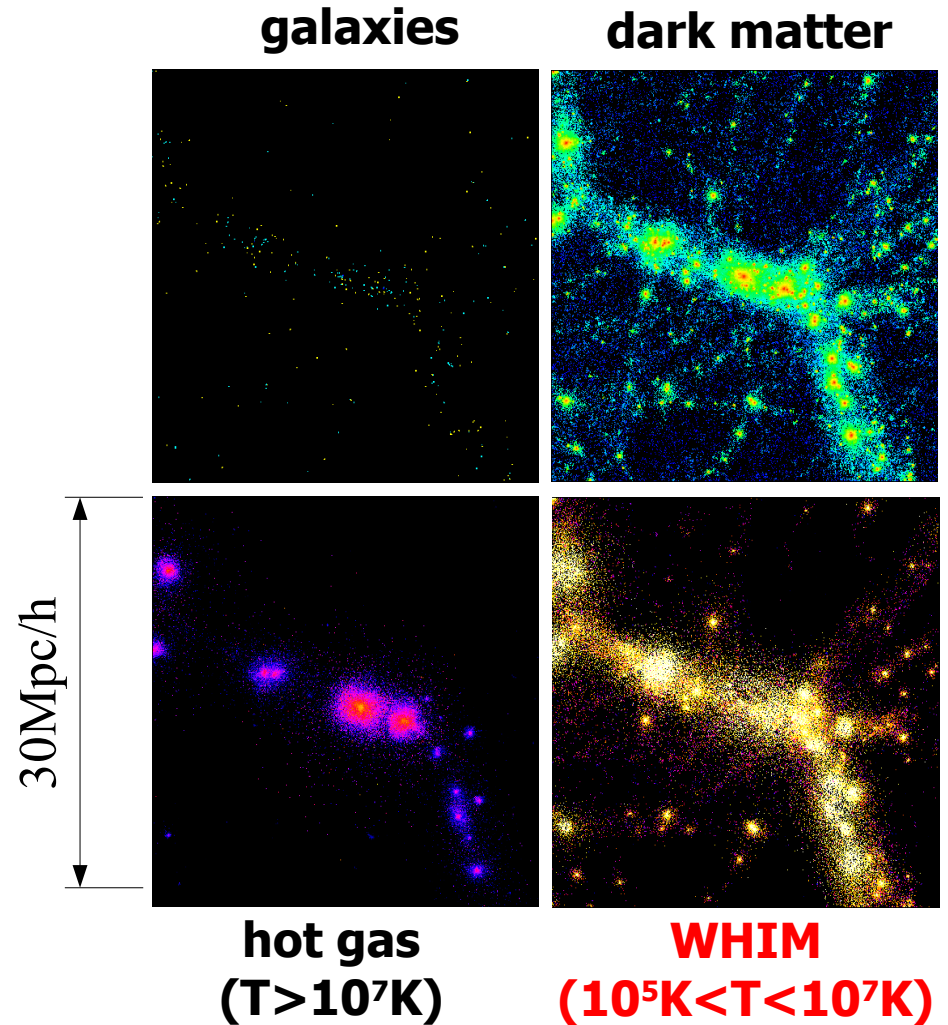
第4回「銀河進化と遠方宇宙」研究会

全部で16ページです！

WHIM as Cosmic Missing Baryons

Warm-Hot Intergalactic Medium

- 温度: $10^5\text{K} < T < 10^7\text{K}$
- 密度: $10^{-6}\text{cm}^{-3} < n_{\text{H}} < 10^{-4}\text{cm}^{-3}$
- 大規模構造形成に伴うショックによって加熱
- 銀河群やフィラメント構造に沿って分布



▶ このWHIMを直接検出するのはきわめて困難

密度が低いため極めて弱い軟X線放射しか出さない。

実際の観測では多くのコンタミネーションが存在する (Galactic emission, CXB)

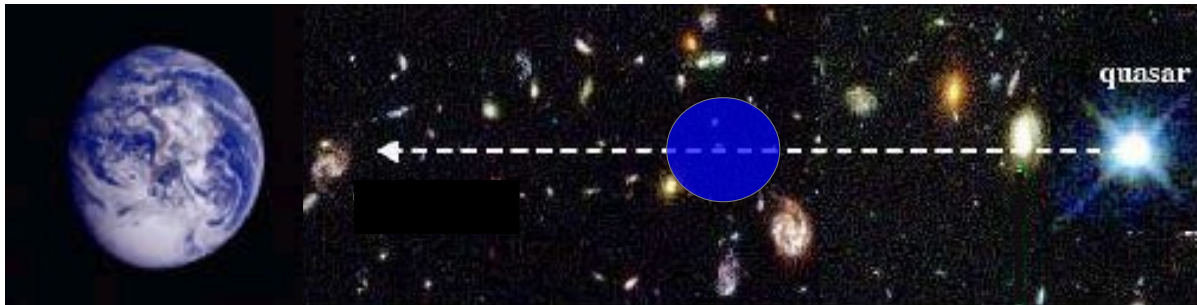
Yoshikawa et al (2003)

WHIMの観測

▶ 輝線による観測

- OVII, OVIIIの輝線を用いた観測
- 系内放射との分離が大切
- エネルギー分解能が重要

▶ 吸収線による観測

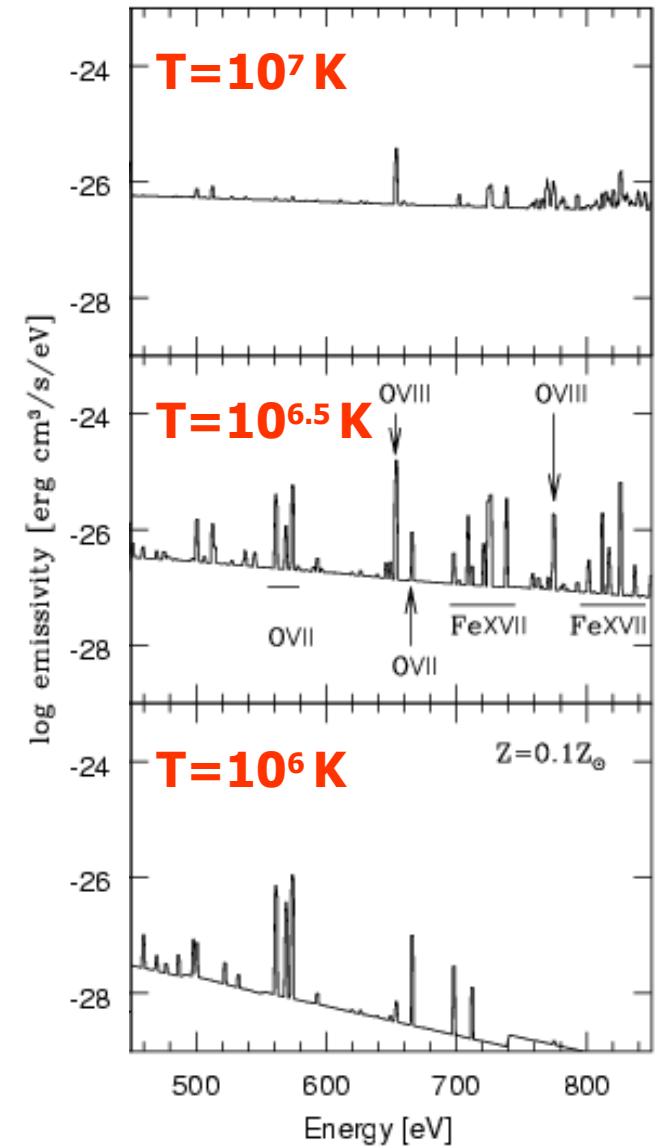


FUV 領域 : CIV, NV, OVI

soft X-ray 領域 : OVII, OVIII, Ne IX

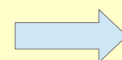
中性水素のBroad Lyman-alpha 吸収

の吸収線を観測



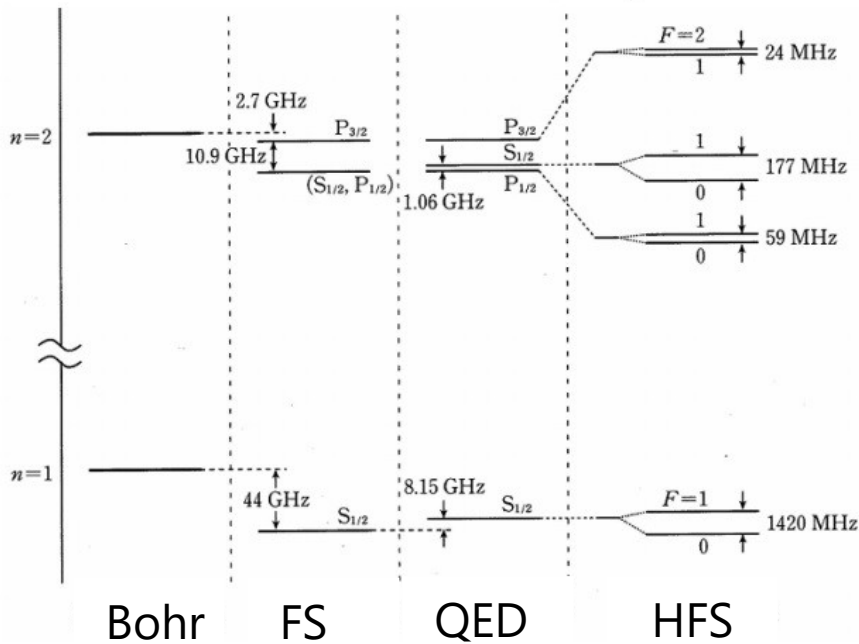
Yoshikawa et al (2003)

FUV/X-ray 領域のatomic な b-b遷移の観測



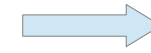
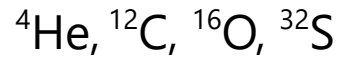
電波領域の超微細構造線の観測

Hyper Fine Structure Line



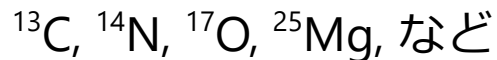
▶ 核スピンと電子の角運動量・スピンの相互作用によるエネルギー準位の分裂

▶ 偶数核で偶数陽子数の原子核は核スピンの0



超微細構造がない

▶ 奇数核か、偶数核でも奇数陽子数の原子核は核スピンの0でない

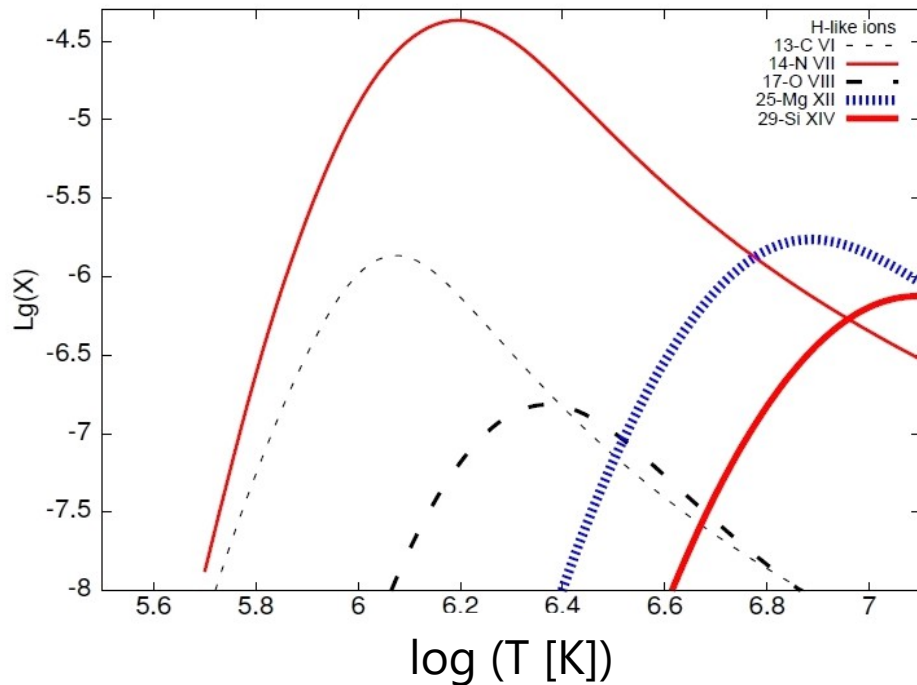


- これらの hydrogen-like もしくは lithium-like イオン等が超微細構造をもつ
- メジャーな安定同位体は ${}^{14}\text{N}$ だけ

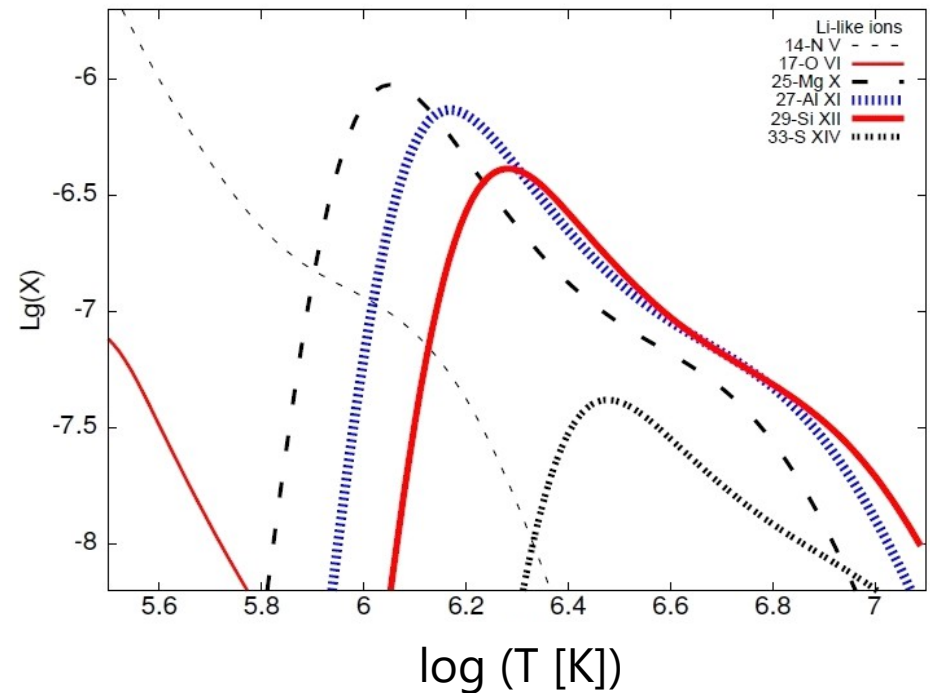
重元素のHyper Fine Strucutre Line

| | isotopic fraction | nuclear spin | λ [mm] / ν [GHz] | A_{10} [s^{-1}] | cross section [cm^2] |
|---------------|-------------------|--------------|------------------------------|-----------------------|--------------------------|
| ^{13}C VI | 3.5e-6 | 1/2 | 3.8 / 78.8 | 4.64e-10 | 6.05e-19 |
| ^{14}N V | 8.3e-5 | 1 | 70.7 / 4.2 | 1.02e-13 | 5.39e-19 |
| ^{14}N VII | 8.3e-5 | 1 | 5.6 / 53.5 | 1.99e-10 | 5.39e-19 |
| ^{17}O VI | 3.2e-7 | 5/2 | 11.8 / 25.4 | 3.82e-11 | 3.37e-19 |
| ^{17}O VIII | 3.2e-7 | 5/2 | 1.0 / 299.8 | 6.13e-8 | 3.37e-19 |

H-like



Li-like



Hyper Fine Structure Line の Level Population

▶ detailed balance

$$n_u(A_{ul} + B_{ul} + n_e C_{ul}) = n_l(B_{lu}J + n_e C_{lu})$$

▶ CMB radiation

$$J = \frac{2h\nu_{ul}^3}{c^2} \frac{1}{\exp[h\nu_{ul}/kT_{\text{CMB}}] - 1} = \frac{2h\nu_{ul}^3}{c^2} N$$

▶ level population

▶ critical density

$$\frac{n_u}{n_l} = \frac{g_u}{g_l} \frac{N + e^{-\kappa} n_e/n_{\text{cr}}}{1 + N + n_e/n_{\text{cr}}} \quad \kappa \equiv \frac{h\nu_{ul}}{kT} \ll 1 \quad n_{\text{cr}} \equiv \frac{A_{ul}}{C_{ul}(T)}$$

$n_e \gg n_{\text{cr}}$ \longrightarrow level population が密度で決まる

$n_e \ll n_{\text{cr}}$ \longrightarrow level population が輻射で決まる

| Isotope, ion | $D(T_{R0}, 0)$ | $n_{\text{cr}}, \text{cm}^{-3}$ | $l_{\text{min}}, \text{kpc}$ |
|----------------------|----------------|---------------------------------|------------------------------|
| $^{13}\text{C VI}$ | 0.421 | 4.1 | 0.3 |
| $^{14}\text{N V}$ | 0.0252 | $8.5 \cdot 10^{-5}$ | 900 |
| $^{14}\text{N VII}$ | 0.340 | 1.7 | 0.03 |
| $^{17}\text{O VI}$ | 0.247 | 0.0017 | 9000 |
| $^{17}\text{O VIII}$ | 0.991 | 380 | 0.03 |
| $^{25}\text{Mg X}$ | 0.413 | 0.034 | 50 |
| $^{27}\text{Al XI}$ | 0.970 | 10.2 | 0.10 |
| $^{29}\text{Si XII}$ | 0.701 | 0.18 | 25 |
| $^{33}\text{S XIV}$ | 0.624 | 1.77 | 18 |

Radiative Correction Factor

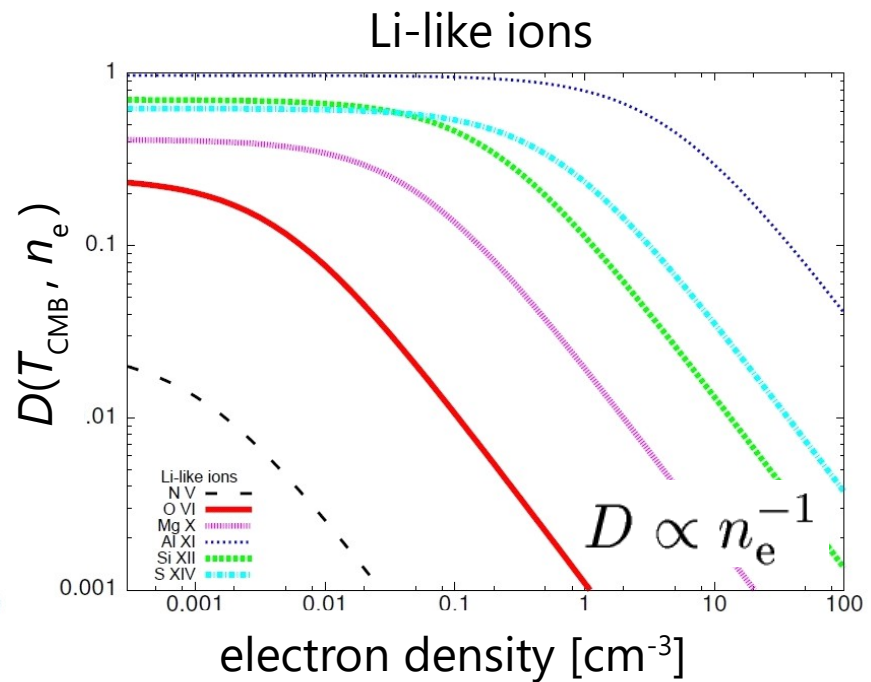
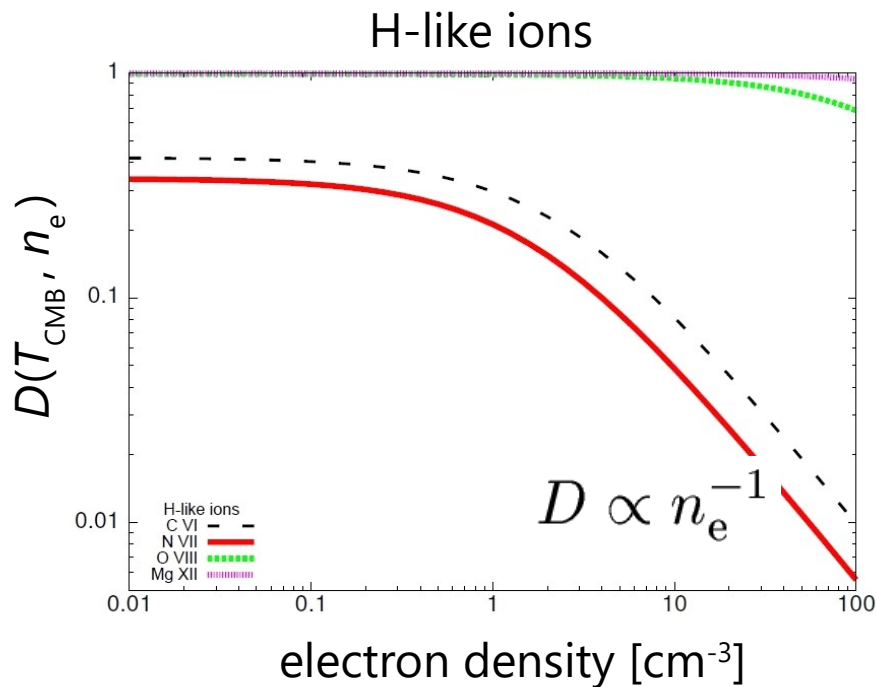
- ▶ emissivity and optical depth of Hyper-fine structure lines

$$\epsilon_i = D(T_{\text{CMB}}, n_e) f_i(T) C_{01}(T)$$

$f_i(T)$: ionization fraction

$$\tau = D(T_{\text{CMB}}, n_e) n f_i(T) \sigma_i L$$

radiative correction factor :
$$D(T_{\text{CMB}}, n_e) = \frac{1 - \frac{g_l n_u}{g_u n_l}}{1 + \frac{n_u}{n_l}} = \left[1 + \left(1 + \frac{g_u}{g_l} \right) \left(N + \frac{n_e}{n_{\text{cr}}} \right) \right]^{-1}$$

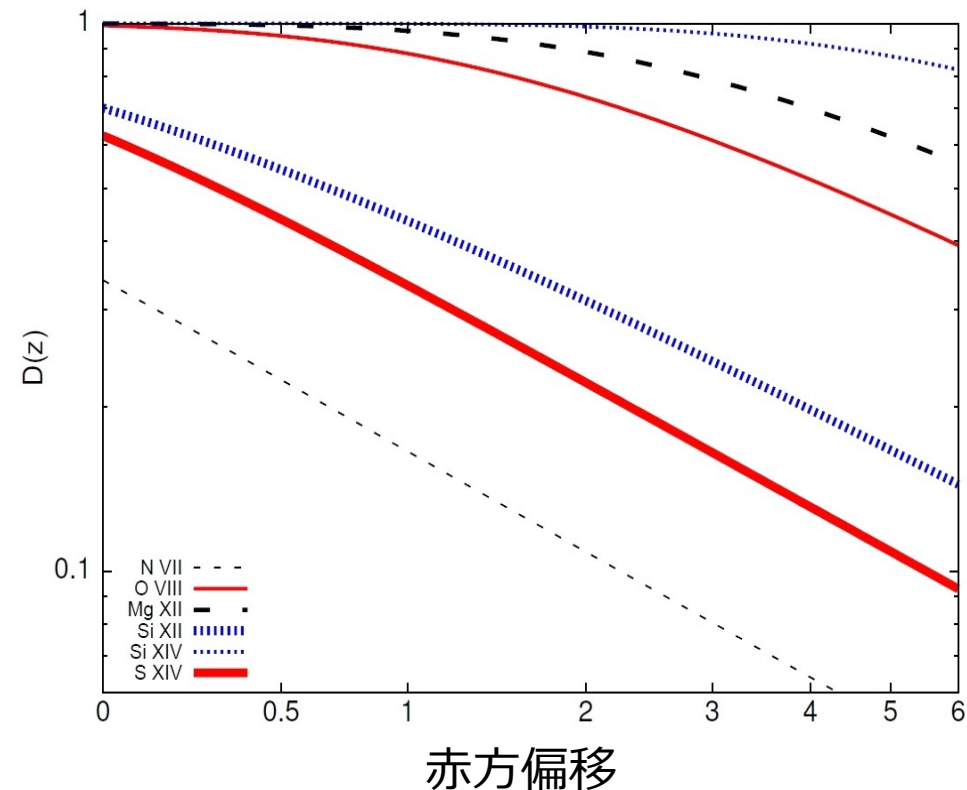


- ▶ critical density より密度の高いガスは観測が困難

Radiative Correction Factor

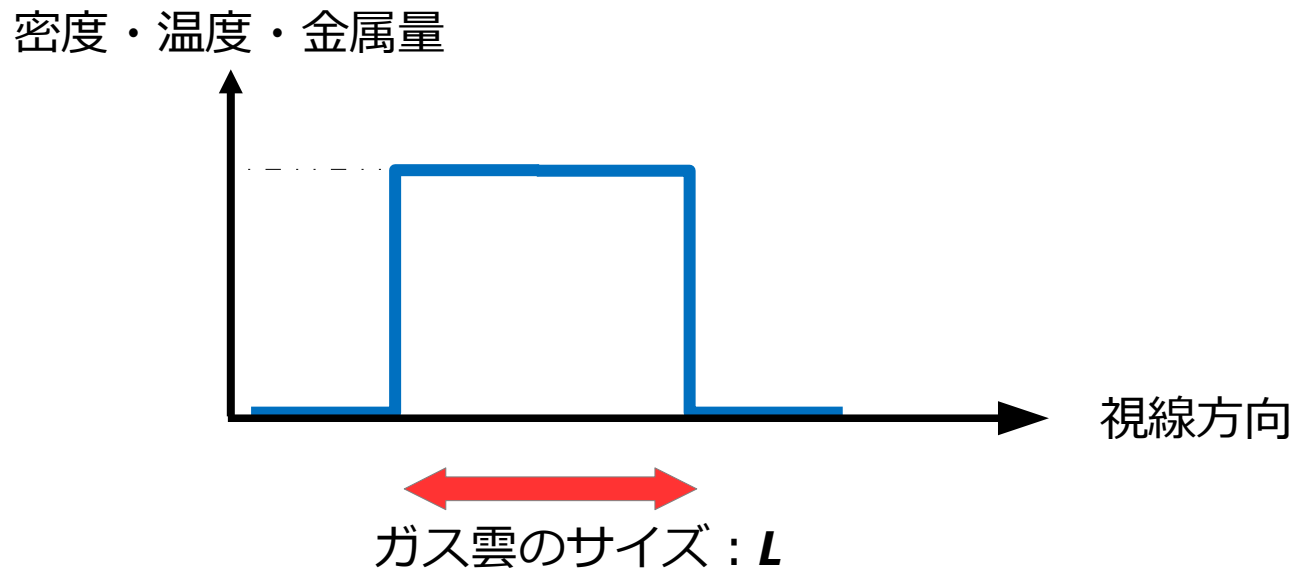
$$D(T_{\text{CMB}}, n_e) = \frac{1 - \frac{g_l n_u}{g_u n_l}}{1 + \frac{n_u}{n_l}} = \left[1 + \left(1 + \frac{g_u}{g_l} \right) \left(N + \frac{n_e}{n_{\text{cr}}} \right) \right]^{-1}$$

- ▶ 高赤方偏移では、CMB放射強度が大きいので $D(T, n)$ は小さくなる
- ▶ 高赤方偏移では、やや検出が困難
- ▶ 以下ではN VII イオンについて考察



銀河間物質のHFS線のモデル計算

- ▶ 一様なガス雲（密度・温度・視線長は一定でパラメータとする）
- ▶ $^{14}\text{NVII}$ (H-like) のHFS線を考える
- ▶ 元素量は $[\text{N}/\text{H}] = -4$
- ▶ ガス雲の赤方偏移は $z=0$
- ▶ ガス雲のbulk motion は無視



宇宙論的輻射輸送方程式

$$\left(\frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial s} - \frac{\nu}{c} H \frac{\partial}{\partial \nu} \right) I_\nu = - \left(\chi_\nu + \frac{3}{c} H \right) I_\nu + \eta_\nu$$

赤方偏移

膨張による光子数の減少

▶ 吸収係数

$$\chi_\nu = \frac{h\nu}{4\pi} \phi(\nu) (n_l B_{lu} - n_u B_{ul}) = \sigma_{\text{abs}}(\nu) D(T_{\text{CMB}}, n_e) n_i$$

▶ 放射係数

$$\eta_\nu = \frac{h\nu}{4\pi} \phi(\nu) n_u A_{ul}$$

▶ 形式解

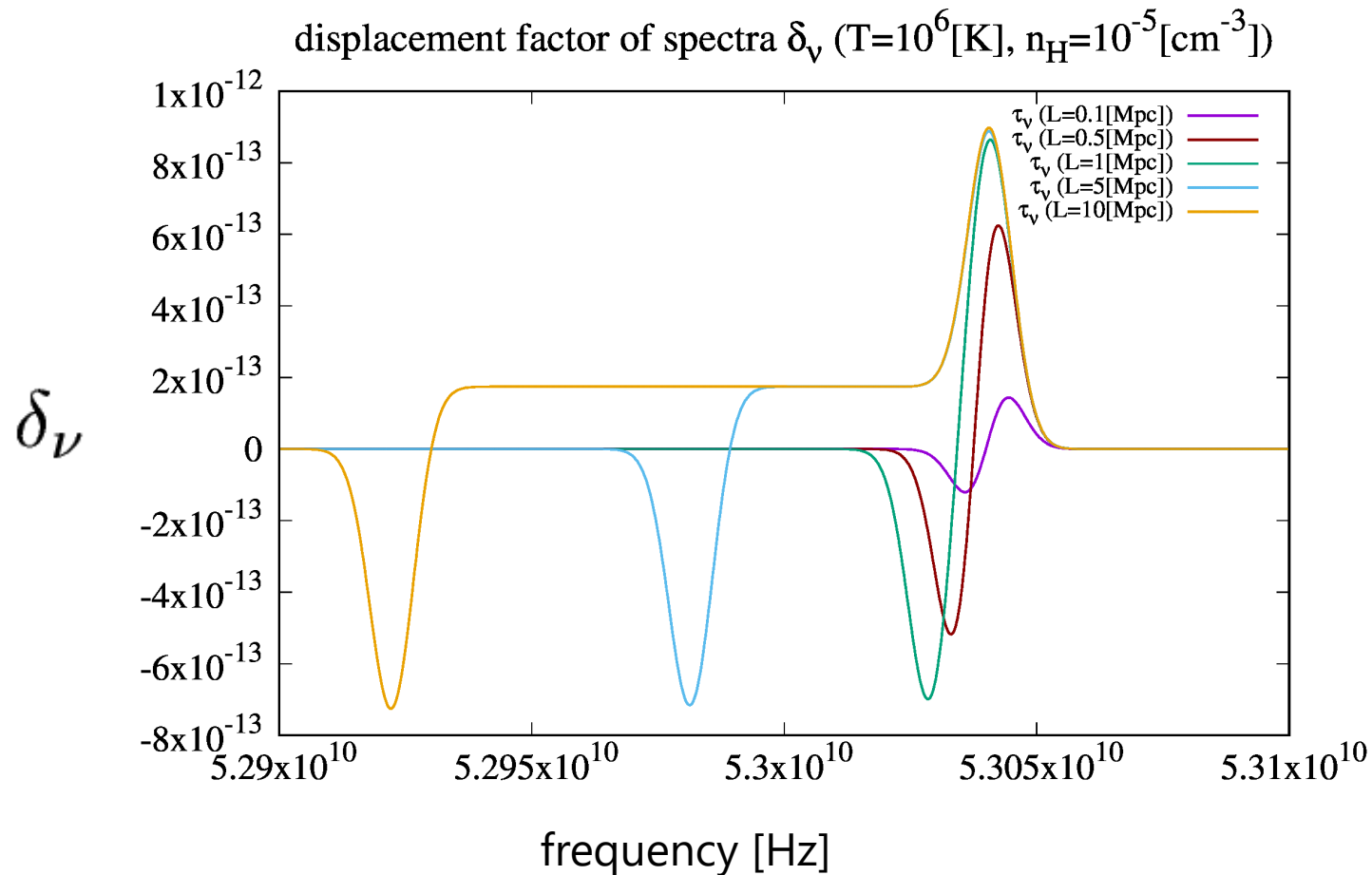
$$I_\nu = I_{\nu_i}^0 (1 + z_i)^{-3} \exp \left[- \int_{x_{\text{obs}}}^{x_i} dx' \frac{\chi_{\nu'}(x')}{1 + z(x')} \right] \\ + \int_{x_{\text{obs}}}^{x_i} dx' \frac{\eta_{\nu'}(x')}{(1 + z(x'))^4} \exp \left[- \int_{x'}^{x_i} dx'' \frac{\chi_{\nu''}(x'')}{1 + z(x'')} \right]$$

CMBを背景光源とした場合

$$I_\nu = I_\nu^0 \exp(-\tau_\nu) + I_\nu^{\text{em}}$$

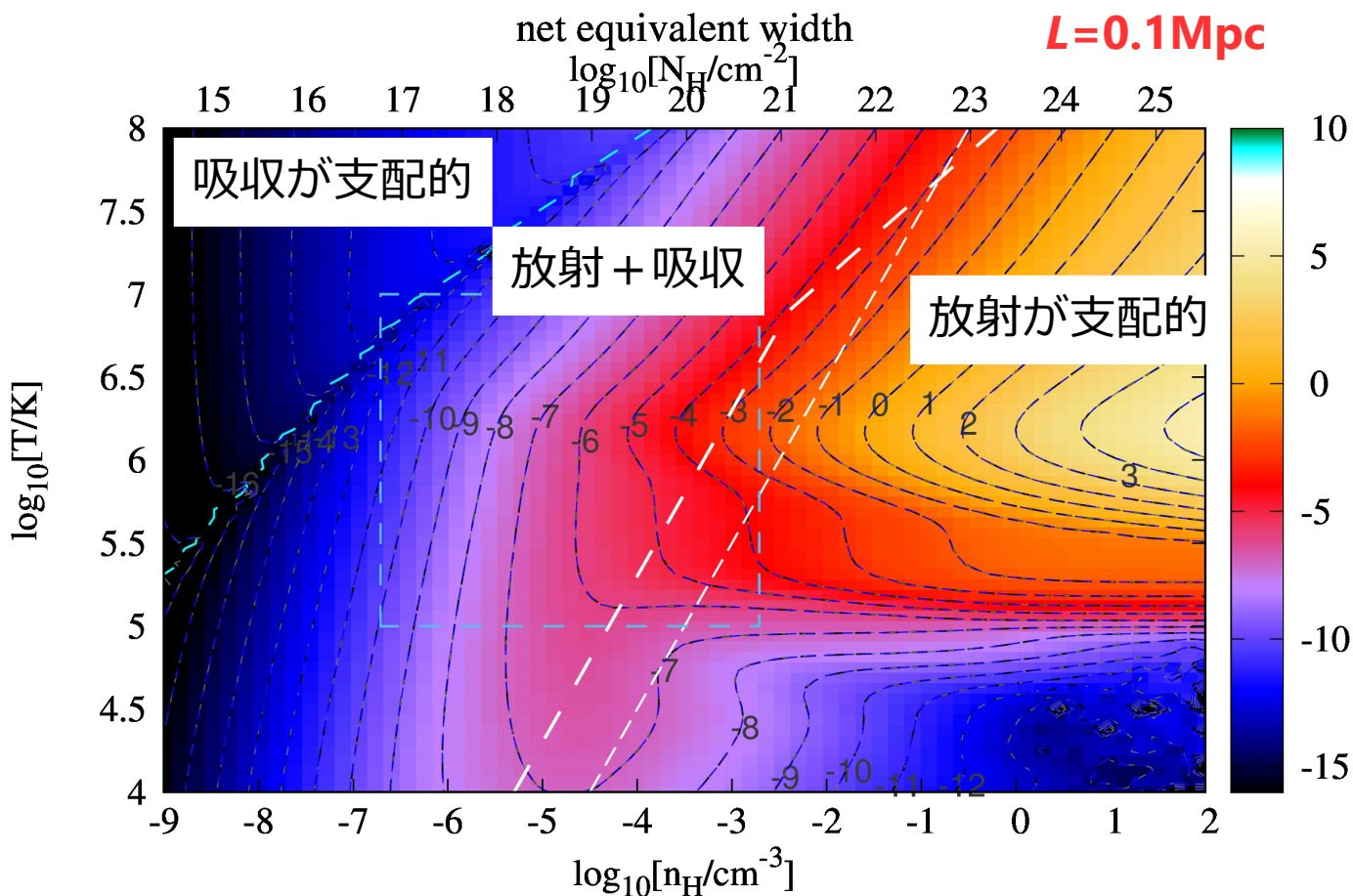
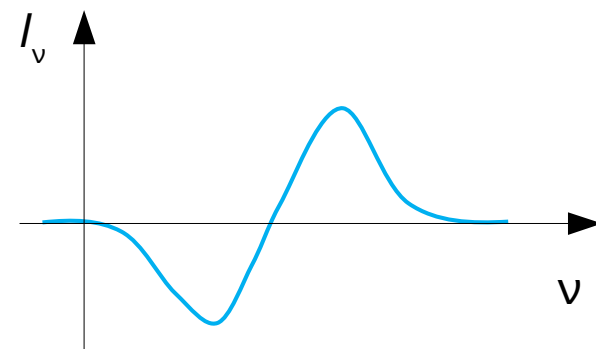
 δ_ν

$$\Rightarrow \frac{I_\nu}{I_\nu^0} = \exp[-\tau_\nu] + \frac{I_\nu^{\text{em}}}{I_\nu^0} = 1 + \left(\frac{I_\nu^{\text{em}}}{I_\nu^0} - (1 - \exp[-\tau_\nu]) \right)$$



CMBを背景光源とした場合

$$EW = \int \frac{I_\nu - I_\nu^0}{I_\nu^0} d\nu = \int \delta_\nu d\nu$$

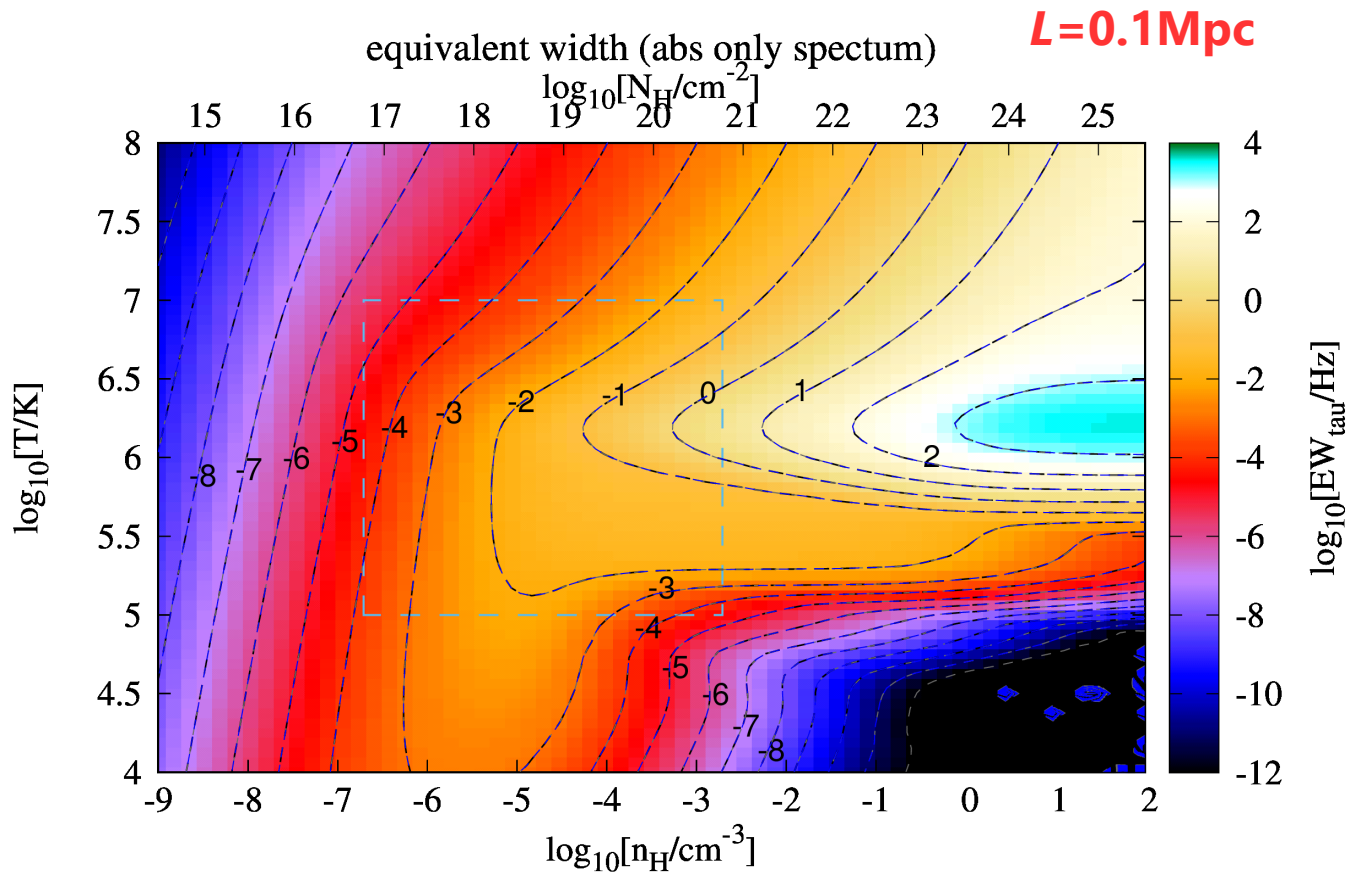


▶ WHIMの領域では、
 $EW = 10^{-10} \sim 10^{-4} [\text{Hz}]$

明るい光源を背景光源とした場合

$$I_\nu^0 \gg I_\nu^{\text{em}}$$

$$EW = \int \frac{I_\nu - I_\nu^0}{I_\nu^0} d\nu = \int d\nu [1 - \exp(-\tau_\nu)]$$



▶ WHIMの領域では、
EW=10⁻⁴ ~ 1 [Hz]

観測可能性の見積もり

▶ single dish での明るい天体を背景光源とした場合のごく簡単な見積もり

- $^{14}\text{N VII}$ のHFS line (rest で $\nu=53.4$ GHz)の吸収線を探す
- WHIMの cloud が $z=0.3$ にあるとする。HFS line の位置は $\nu=40.8$ GHz
- 3C279 ($z=0.54$) を例にして考える。flux density は $\nu=40$ GHz で $S_\nu \sim 10\text{Jy}$ 。
- noise の flux density

GBT みたいなでかい電波望遠鏡を考えると

$$S_{\text{noise}}(\nu) = \frac{2kT_{\text{sys}}}{A_{\text{eff}} \sqrt{2\Delta\nu\Delta t}} \simeq 0.1\text{mJy}$$

$$\Delta\nu = 1\text{MHz} \quad \Delta t = 10\text{h}$$

$$\longrightarrow \frac{S_{\text{noise}}}{S_{\text{src}}} \simeq \frac{0.1\text{mJy}}{10\text{Jy}} = 10^{-5}$$



観測可能性の見積もり

- ▶ EW = 1 [Hz] のWHIM cloud に対して $\Delta\nu = 1$ MHz の観測を10時間行くと
吸収線の振動数方向の広がりが $\Delta\nu$ 程度だとすると

$$\frac{\Delta S_{\text{WHIM}}}{S_{\text{src}}} \simeq \frac{EW}{\Delta\nu} = 10^{-6} \quad \longleftrightarrow \quad \frac{S_{\text{noise}}}{S_{\text{src}}} \simeq \frac{0.1\text{mJy}}{10\text{Jy}} = 10^{-5}$$

- この観測時間ではちょっと検出できない。
- もうちょい (#何を?)

まとめ

- ▶ ダークバリオン(WHIM)中の重元素の超微細構造線を使った検出可能性
- ▶ もっとも有力なのは N の H-like (NVII), Li-like (NV) のイオン
- ▶ 現存の single dish での見積もりだと、ちょっと厳しい。
- ▶ NVII ($\nu=54.2\text{GHz}$)はSKA1では観測が難しい。SKA2で $z>1$ のWHIMなら可能。
- ▶ NV ($\nu=4.2\text{GHz}$) はSKA1でも原理的には観測可能。
- ▶ NVの検出可能性はこれから。(atomic dataが不足)
- ▶ cosmological simulation dataでの模擬観測