

[天体形成研究会]

重元素の超微細構造線を用いた 中-高温銀河間ガスの観測可能性

渡邊歩, 吉川耕司, 岡本崇

2018 11/3 (水)

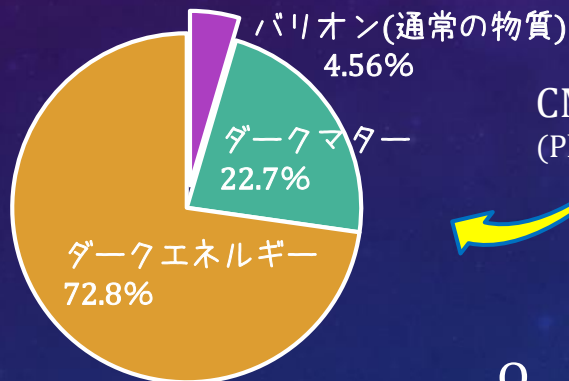
渡邊 歩

1. 研究背景 : 中-高温銀河間ガス(WHIM)とは

▶ missing baryon 問題 : 観測されないバリオン成分



現在の宇宙のエネルギー成分内訳



$\Omega_{b0} \sim 0.05$
宇宙初期のバリオン
は約5%

CMBの観測
(Planck 2013)

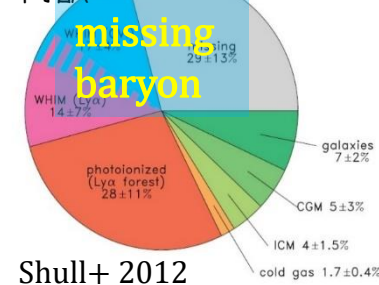
H_I Ly α の観測
(Rauch+1997)

$\Omega_{IGM} \sim 0.05$
バリオンの大部分は
IGM(銀河間ガス)と
して存在

多様なバリオン
成分の観測

- ・ 銀河(恒星+ガス+BH + ...)
- ・ CGM(銀河周辺のガス)
- ・ ICM(銀河団間ガス)
- ... などなど

現在のバリオン成分
内訳



$\Omega_{b0} \sim 0.025$
全部合計しても
5%に届かず、約半分
が未観測のバリオン
(missing baryon)
である

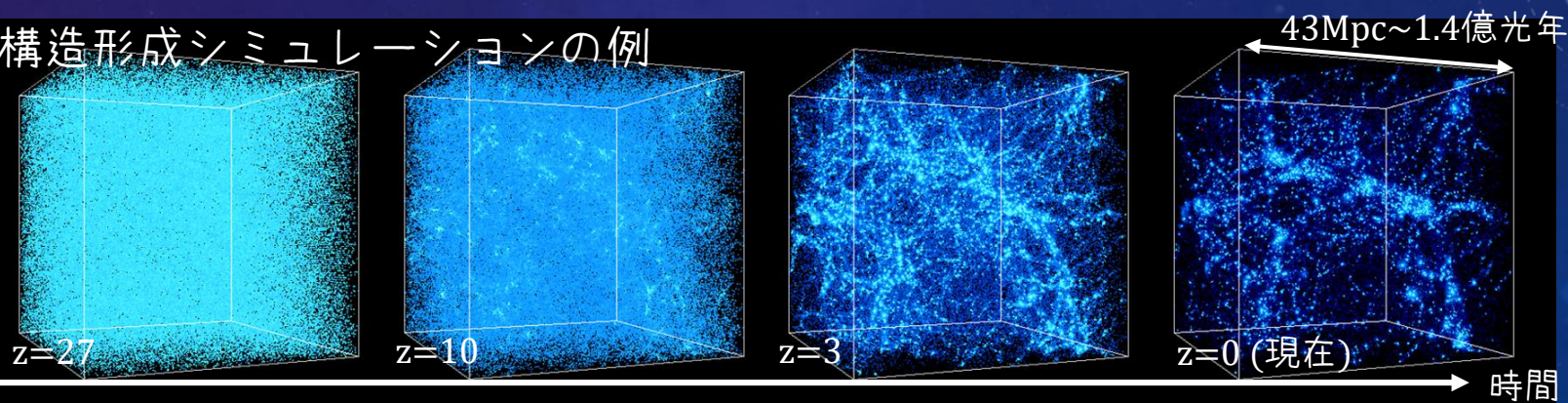
1. 研究背景 : 中-高温銀河間ガス(WHIM)とは

▶ missing baryonはどこにあるのか :
数値計算で予測されるWHIM

宇宙論的流体力学シミュレーション

- ・ 宇宙膨張を考慮し、宇宙論的な時間・空間スケールにおけるガス(バリオン)とダークマターの振る舞いを計算
- ・ 宇宙初期の密度ゆらぎが成長し、宇宙大規模構造が形成される
- ・ 星形成, フィードバックのモデルを組み込むことで、銀河形成も取り扱うことができる

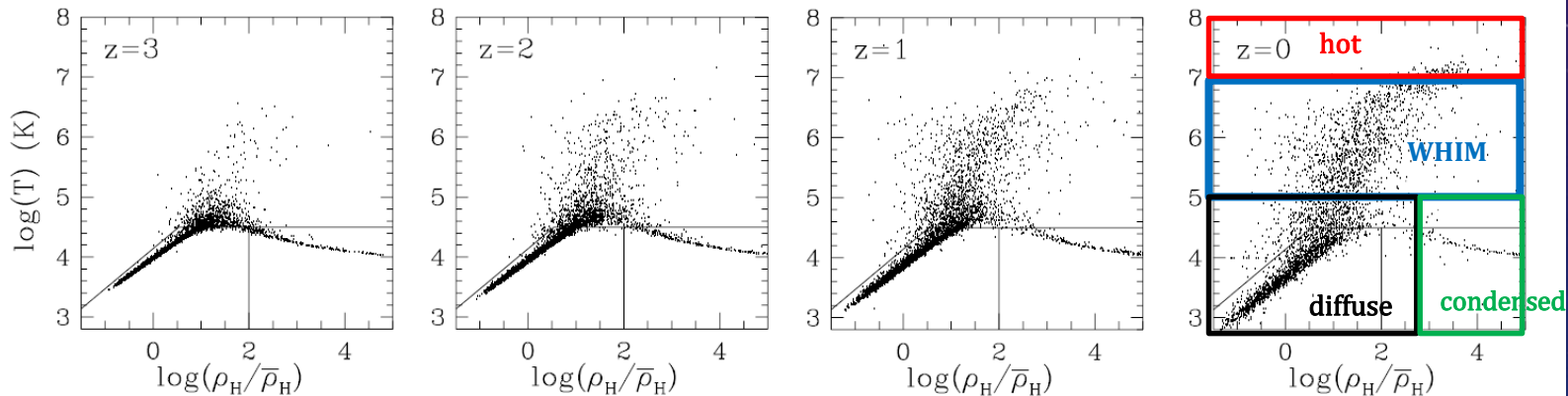
構造形成シミュレーションの例



1. 研究背景 : 中-高温銀河間ガス(WHIM)とは

▶ missing baryonはどこにあるのか :
数値計算で予測されるWHIM

宇宙論的流体計算によるガスの温度・密度の時間進化 (Davé+1999)



時間

▶ 現在に近づくにつれて、 $T > 10^5 [K]$ の高温ガスが増加

- ・ hot gas ($T > 10^7 [K]$) : 銀河団に付随しX線を放射するガスとして観測
- ・ $T = 10^5 - 10^7 [K]$ のガスは Warm-Hot Intergalactic Medium : **WHIM** と命名された

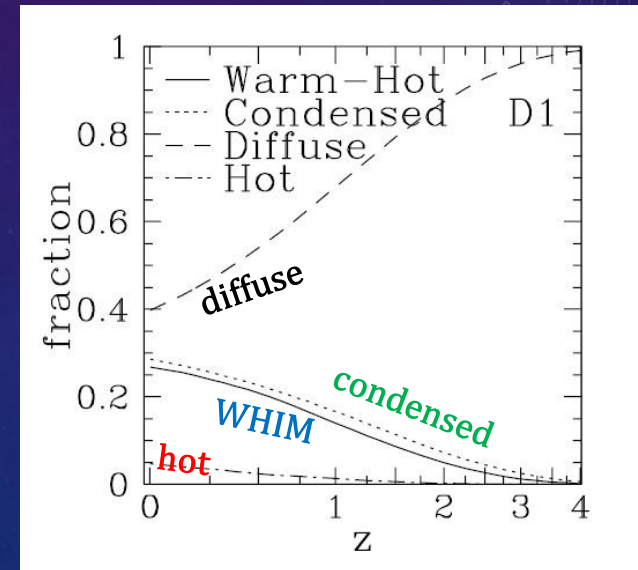
1. 研究背景 : 中-高温銀河間ガス(WHIM)とは

▶ missing baryonはどこにあるのか :
数値計算で予測されるWHIM

▶ WHIMは時間経過とともに増加し、
 $z=0$ ではバリオンの30-50%(質量比)を占める

⇒ missing baryonの有力候補と考えられるようになった

ガス成分の時間進化 (Davé+2001)

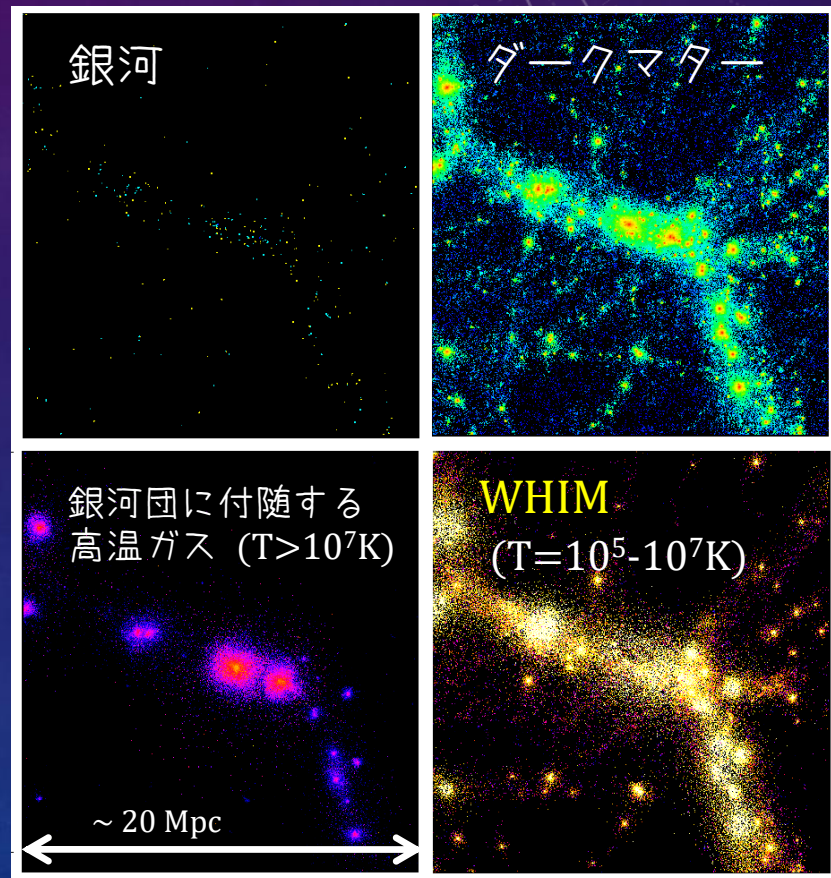


1. 研究背景 : 中-高温銀河間ガス(WHIM)とは

▶ WHIMについて: 数値計算から分かった性質

- 温度 $T=10^5 \sim 10^7 [\text{K}]$
 - 密度 $\delta=1 \sim 10^4$ ($n_{\text{H}}=10^{-6}-10^{-2} \text{cm}^{-3}$)
 - 重力崩壊による衝撃波加熱により生じる
 - ダークマターハロー近傍に加えて、ダークマターのフィラメント構造に沿うように分布
- ⇒ ダークマターの大規模構造分布を知る手掛かりにもなる

各成分の空間分布 ($z=0$)



Yoshikawa+2001の計算データより

1. 研究背景 : なぜ重元素の超微細構造線によるWHIMの観測か

▶ WHIMの観測の現状 : 未だ観測が不十分

(1) 連続放射 (熱制動放射) による観測

⇒ hot gas($T > 10^7$ [K]) よりも温度が低く、密度が小さいため困難

(2) ガス中の重元素のatomic ionのスペクトル線(Ly α など)による観測

- 主流の観測手段
- ガス中に最も多く存在する水素はほとんど電離しているため C, N, O, Ne などの重元素イオンを主に用いる。
- 観測波長は紫外線 ($C_{IV}, N_V, O_{VI}, O_{IV}, O_V, Ne_{VIII}$) および soft-X線 ($O_{VII}, O_{VIII}, Ne_{VI}, Ne_{IX}$)

⇒ 観測機器精度の不足、前景放射との分離の困難などにより、現在でも信頼度が高い観測例はほとんどない

1. 研究背景 : なぜ重元素の超微細構造線によるWHIMの観測か

▶ 超微細構造線によるWHIMの観測 : 有望な(?)新しい観測手段の提案

- Sunyaev & Docenko (2007) : 先行研究で提案
- 重元素の超微細構造線(HFS線)は電波領域にあり、高温ガスの観測手法としては、UV, soft-X線波長域以外の新たな手段
- 観測はまだ試みられていないが、SKA(2023~)などの次世代電波望遠鏡による将来の観測が期待される
- SD07では、 $^{14}\text{N}_{\text{VII}}$ イオンのHFS吸収線を使えば、WHIMが現行の電波望遠鏡GBTでも 3σ で観測可能という結論。
ただし、オーダー評価による粗い見積もり

⇒ より定量的に観測可能性を評価したい(本研究)

2. 研究の目的と手法

目的

WHIMを含む銀河間ガス(IGM)をHFS線で観測したときに

- ・ どの程度の信号強度があるか (観測可能性)
- ・ 観測されるスペクトルとガスの物理状態との関係を知りたい

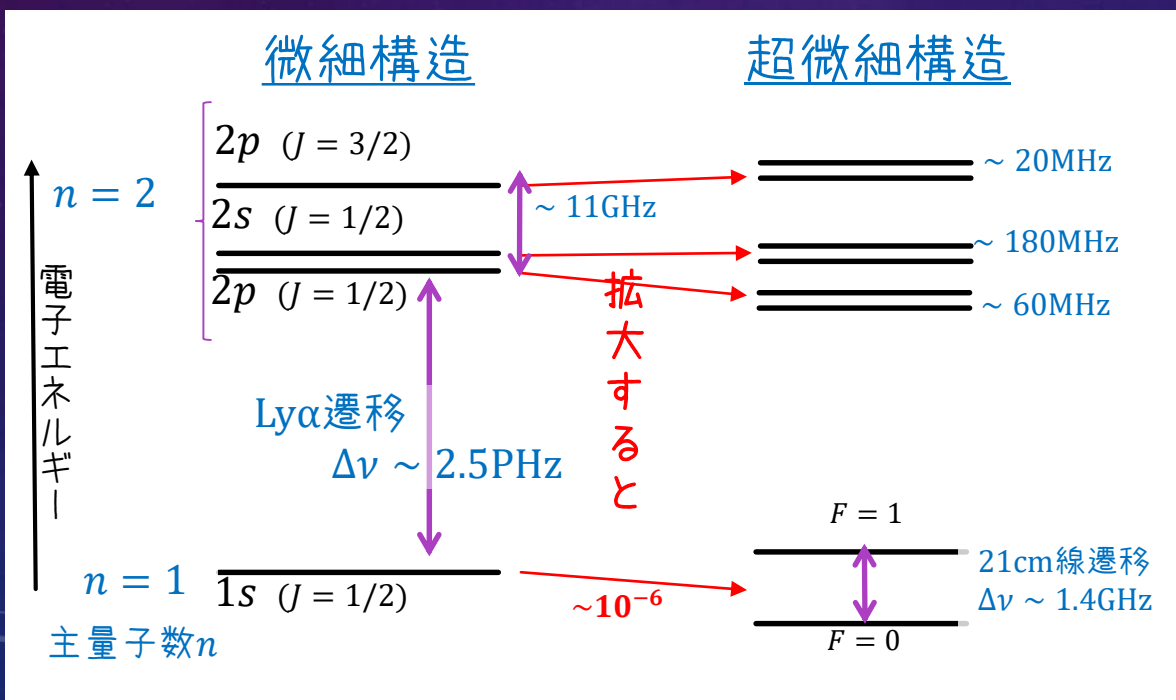
手法

数値計算によってHFS線スペクトルを疑似的に作成し、解析する

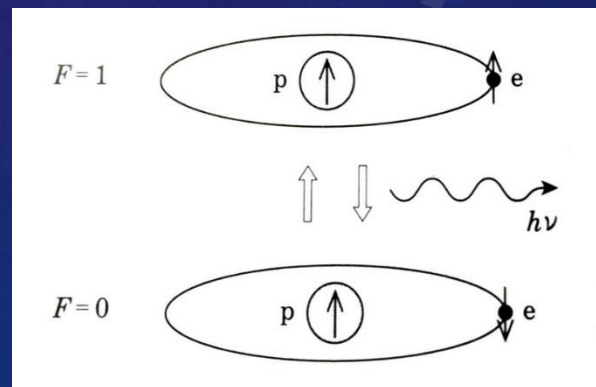
3. HFS線の性質

▶ 超微細構造 (HyperFine Structure) とは：
電子系角運動量-核スピン相互作用により生じる
非常に小さなエネルギー差の電子準位

例：水素原子のエネルギー準位



水素原子の21cm線遷移過程



3. HFS線の性質

▶ HFS線観測に適した重元素同位体イオン：
 $^{14}\text{N}_{\text{VII}}$, $^{14}\text{N}_{\text{V}}$ イオンが有力

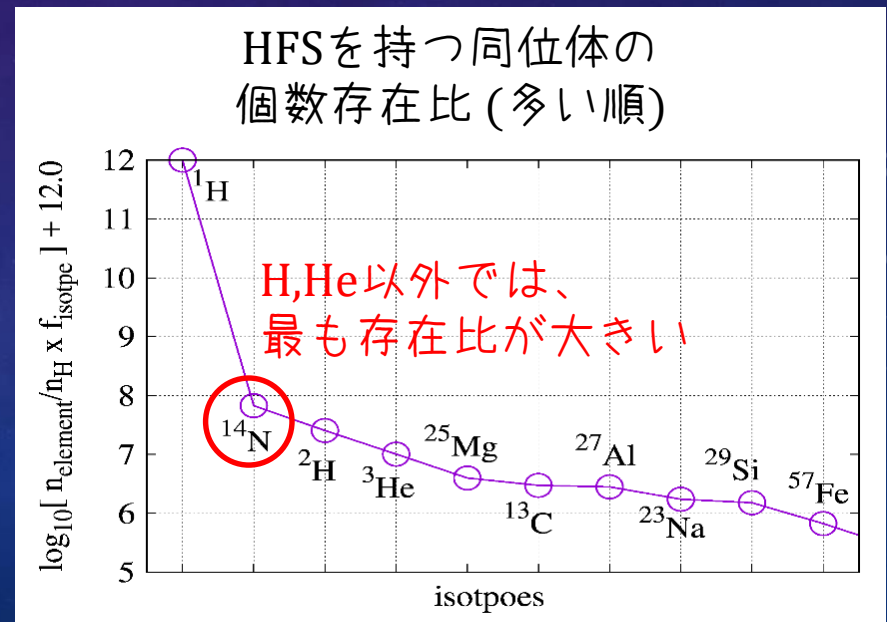
◎ 原子性イオンのHFS線は、核種と電子数によって異なる
⇒ どの元素同位体、どの電離階数のイオンが観測に適しているか？

● 核スピンIが non-zeroのイオン
のみがHFS線を持つ

⇒ HFS線を持つ $I \neq 0$ の同位体はマイナーな同位体が多い

しかし、窒素Nのメジャーな同位体
 ^{14}N は $I \neq 0$ のため、存在比が大きい

※WHIMの温度では、水素とヘリウムはほとんど電離しているため、HFS線の観測には向いていない



3. HFS線の性質

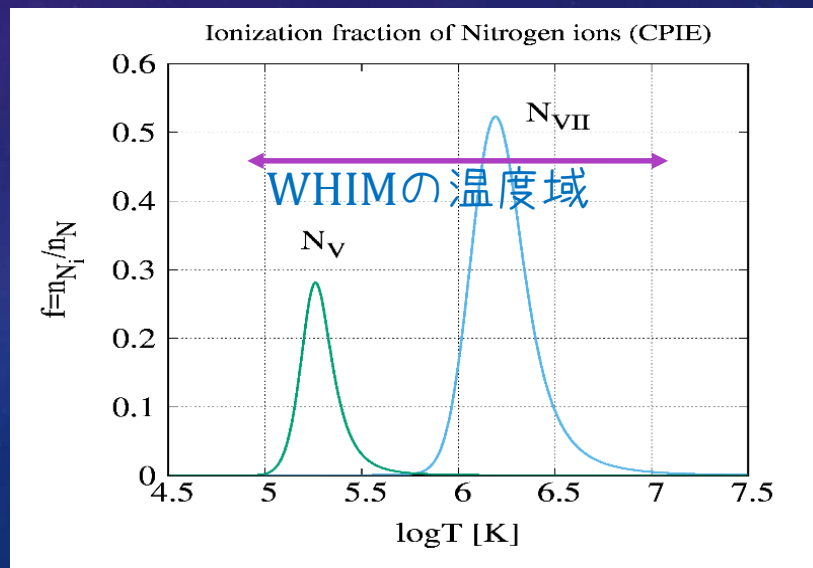
▶ HFS線観測に適した重元素同位体イオン：

$^{14}\text{N}_{\text{VII}}$, $^{14}\text{N}_{\text{V}}$ イオンが有力

- WHIMの温度域では、窒素の6階電離(N_{VII})と4階電離(N_{V})イオンの存在度が高い

⇒ この2つのイオンを計算に用いる ($F = 0 \leftrightarrow 1$ の遷移)

窒素のionization fractionの温度依存性



	$^{14}\text{N}_{\text{VII}}$	$^{14}\text{N}_{\text{V}}$
HFS線の振動数 $\nu_{ul} [\text{GHz}]$	53.04	4.239

3. HFS線の性質

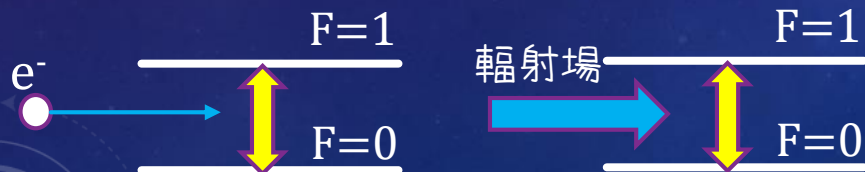
▶ HFS準位のlevel populationに対する仮定：
CRE(衝突・輻射平衡)

● HFS準位のlevel populationによって、HFS線が吸収線・輝線のどちらになるか決まる。

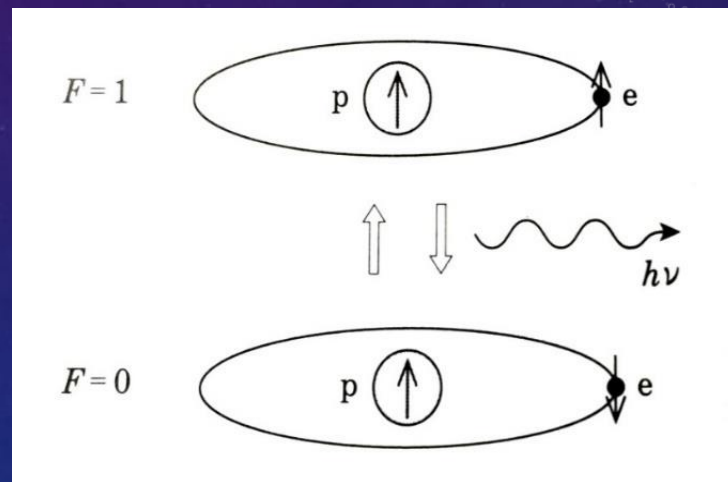
● level populationを決める物理過程

▶ 電子衝突による励起・脱励起

▶ 輻射場による励起・脱励起



水素原子の21cm線遷移過程



level population :
 $F=0,1$ にあるイオンの割合

3. HFS線の性質

▶ HFS準位のlevel populationに対する仮定：
CRE(衝突・輻射平衡)

- CMB光子および電子衝突による励起・脱励起の平衡状態：

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

$J = B_{\nu_{ul}}(T_{CMB})$: HFS線振動数におけるCMB輻射強度
 A, B : HFS遷移に関するEinstein係数
 $C(T)$: 電子衝突によるHFS遷移率係数

- upper / lower 準位の占有比に変形

$$\frac{n_u}{n_l} \sim \frac{g_u}{g_l} \frac{N + n_e/n_{cr}}{1 + N + n_e/n_{cr}}$$

$$J = \frac{2h\nu_{ul}^3}{c^2} \frac{1}{e^{h\nu_{ul}/k_B T_R} - 1} = \frac{2h\nu_{ul}^3}{c^2} N$$

$n_{cr} \equiv A_{ul} / C_{ul}(T)$: 臨界密度

(1) $n_e \ll n_{cr}$ のとき $\frac{n_u}{n_l} \sim \frac{g_u}{g_l} \frac{N}{1+N} \rightarrow$ (CMB)輻射強度で決まる

(2) $n_e \gg n_{cr}$ のとき $\frac{n_u}{n_l} \sim \frac{g_u}{g_l} (1 - n_{cr}/n_e) \rightarrow$ 電子密度で決まる

4. 疑似スペクトル計算の詳細 : HFS線スペクトルの作成

▶ 宇宙論的輻射輸送方程式

- ガス雲によるHFS線吸収とHFS線放射の両方を考慮
- 宇宙膨張の効果を取り入れた1次元輻射輸送方程式:

$$\left(\frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial s} - \underbrace{\frac{v}{c} \frac{\dot{a}}{a} \frac{\partial}{\partial \nu}}_{\text{赤方偏移}} \right) I_\nu(s, t) = - \left(\underbrace{\chi_\nu(s, t)}_{\text{HFS線吸収}} + \underbrace{\frac{3}{c} \frac{\dot{a}}{a}}_{\text{光子数密度減少}} \right) I_\nu(s, t) + \underbrace{\eta_\nu(s, t)}_{\text{HFS線放射}}$$

形式解 $I_\nu = I_\nu^0 \exp[-\tau_\nu] + I_\nu^{(em)}$



$I_\nu^0 = I_{\nu_{ini}}^{(0)} (1 + z_{ini})^{-3}$: 背景光源の輻射強度

$\tau_\nu = \int_{x_{obs}}^{x_{ini}} dx' \frac{\chi_{\nu'_{gas}}(x')}{1+z(x')}$: HFS線吸収に対する光学的厚み

$$\nu'_{gas} = \nu(1 + z(x')) \left(1 + \frac{v_{gas}(x')}{c} \right)$$

$I_\nu^{(em)} = \int_{x_{obs}}^{x_{ini}} dx' \frac{\eta_{\nu'_{gas}}(x')}{(1+z(x'))^4} \exp \left[- \int_{x'}^{x_{ini}} dx'' \frac{\chi_{\nu''_{gas}}(x'')}{1+z(x'')} \right]$: HFS線放射による輻射強度

4. 疑似スペクトル計算の詳細 : HFS線スペクトルの作成

▶ HFS線吸収率・放射率

● HFS線吸収率 $\chi_\nu = \frac{h\nu}{4\pi} \phi_{ul}(\nu)(n_l B_{lu} - n_u B_{ul}) = \frac{g_u}{g_l} \frac{c^2 A_{ul}}{8\pi\nu^2} \phi_{ul}(\nu) \frac{1 - \frac{g_l n_u}{g_u n_l}}{1 + \frac{n_u}{n_l}} (n_l + n_u)$

● HFS線放射率 $\eta_\nu = \frac{h\nu}{4\pi} \phi_{ul}(\nu) n_u A_{ul} = \frac{h\nu A_{ul}}{4\pi} \phi_{ul}(\nu) \frac{1}{1 + \frac{n_l}{n_u}} (n_l + n_u)$
 $n_l + n_u = n(^{14}\text{N}_{\text{ion}})$

A_{ul} : Einstein係数, $\phi_{ul}(\nu)$: line profile関数, n_l, n_u : HFS遷移の上下準位

◆ line profile function \Rightarrow Doppler profile

$$\phi_{ul}(\nu) = \frac{1}{\Delta\nu_D \sqrt{\pi}} \exp\left[-\left(\frac{\nu - \nu_{ul}}{\Delta\nu_D}\right)^2\right], \quad \Delta\nu_D = \frac{\nu_{ul}}{c} \sqrt{\frac{2k_B T}{m_{\text{ion}}}}$$

	Frequency ν_{ul} [GHz]	Doppler parameter b [km/s] ($T = 10^6$ [K])	Doppler width $\Delta\nu_D$ [MHz] ($T = 10^6$ [K])
$^{14}\text{N}_{\text{VII}}$ (H-like ion)	53.04	34	6
$^{14}\text{N}_{\text{V}}$ (Li-like ion)	4.239	34	0.5

5. 一様ガス雲モデルの疑似スペクトル計算

▶ モデル設定：密度・温度ごとのシグナルを調べる

● 密度・温度・奥行き方向の長さをパラメータとする。

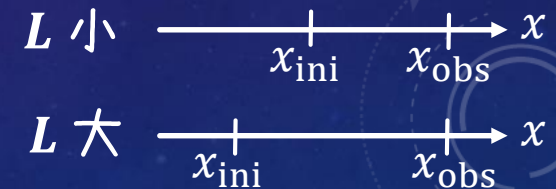
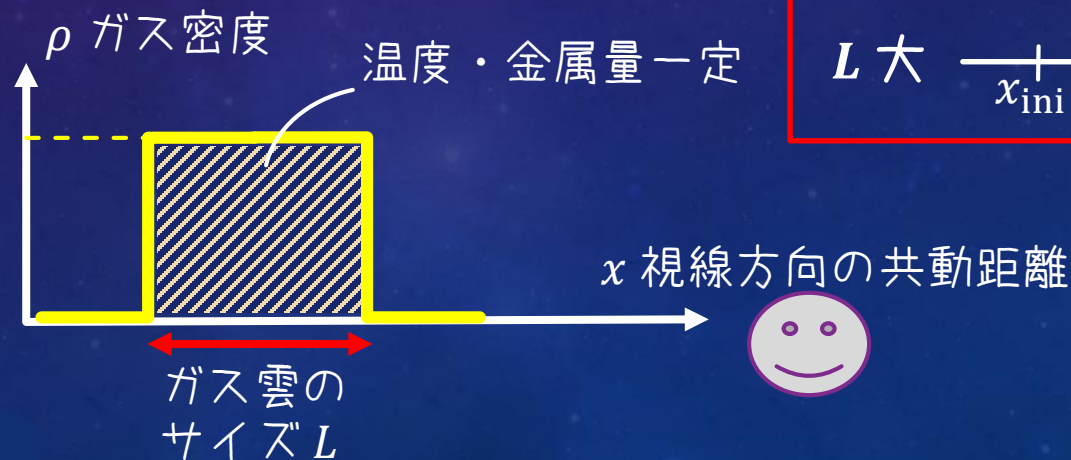
➤ 金属量：密度の関数 $Z = f(\rho)$

➤ HFSイオンは $^{14}\text{N}_{\text{VII}}$ と $^{14}\text{N}_{\text{V}}$

➤ 同位体存在比： $f_{14\text{N}} = 0.99771$ (原始太陽系での値, Asplund et al. 2011)

➤ ガス雲のbulk motion無視 ($v_{\text{gas}} = 0$)

➤ ガス雲の赤方偏移： $z = 0$



5. 一様ガス雲モデルの疑似スペクトル計算

▶ モデル設定：密度・温度ごとのシグナルを調べる

● 背景光源の設定

(A) 光源天体がない方向を観測した場合

⇒ 背景輻射場はCMB : $I_{\nu}^0 = I_{\nu}^{CMB}$

$I_{\nu} = I_{\nu}^{CMB} \exp[-\tau_{\nu}] + I_{\nu}^{(em)}$ 輝線と吸収線の両方がありうる

(B) QSOなどの明るい背景天体を観測した場合

⇒ 背景輻射場がHFS輝線輻射に比べて十分大きいと仮定

$I_{\nu}^{bright\ src} \gg I_{\nu}^{(em)}$ と近似

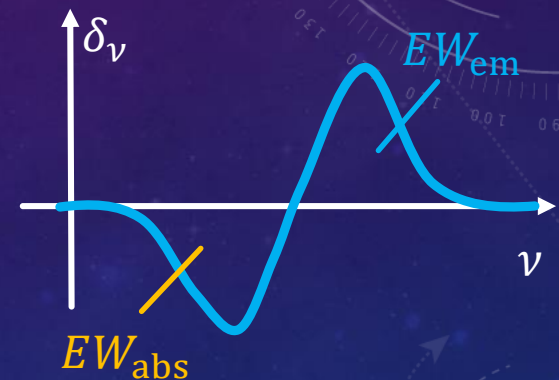
$I_{\nu} = I_{\nu}^{bright\ src} \exp[-\tau_{\nu}]$ 吸収線のみ

5. 一様ガス雲モデルの疑似スペクトル計算

▶ 結果：ケース(A) CMB背景光源の場合
(1) $^{14}\text{N}_{\text{VII}}$ のHFSスペクトルの等価幅

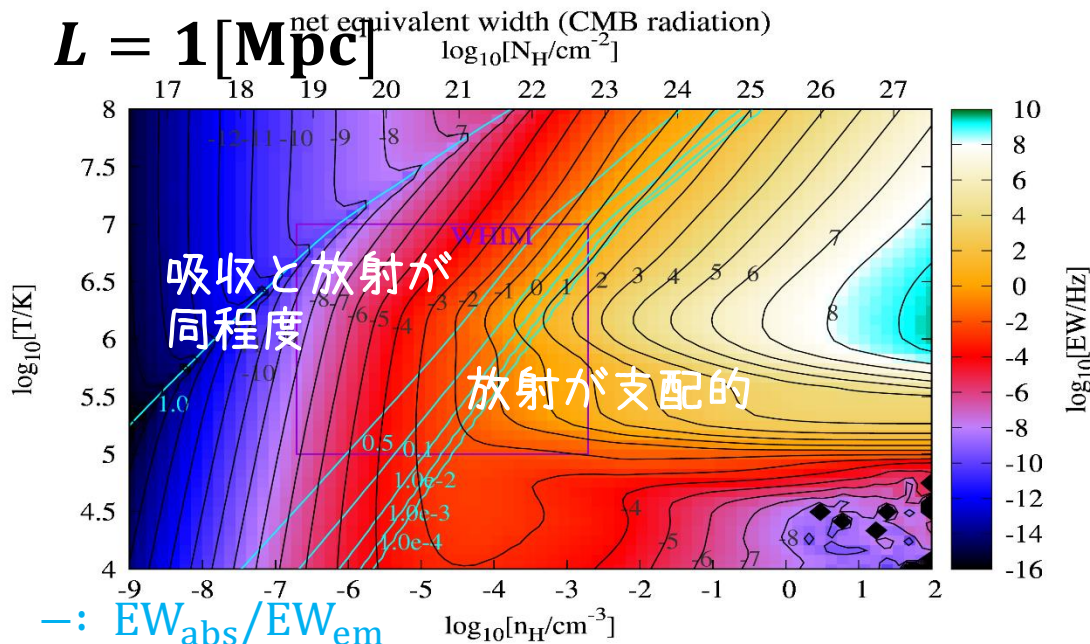
● 等価幅EW (Equivalent Width)

$$\text{EW} \equiv \int \frac{|I_\nu - I_\nu^{(\text{CMB})}|}{I_\nu^{(\text{CMB})}} d\nu = \int |\delta_\nu| d\nu$$



• $\text{EW} = \text{EW}_{\text{em}} + \text{EW}_{\text{abs}}$
と分けて、それぞれ計算

WHIMの領域では
放射と吸収と同程度か
放射が支配的

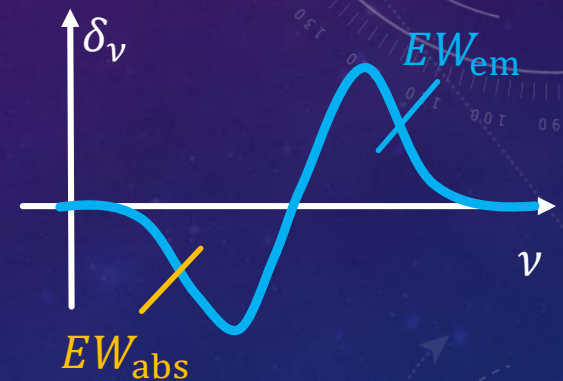


5. 一様ガス雲モデルの疑似スペクトル計算

▶ 結果：ケース(A) CMB背景光源の場合
(2) $^{14}\text{N}_V$ のHFSスペクトルの等価幅

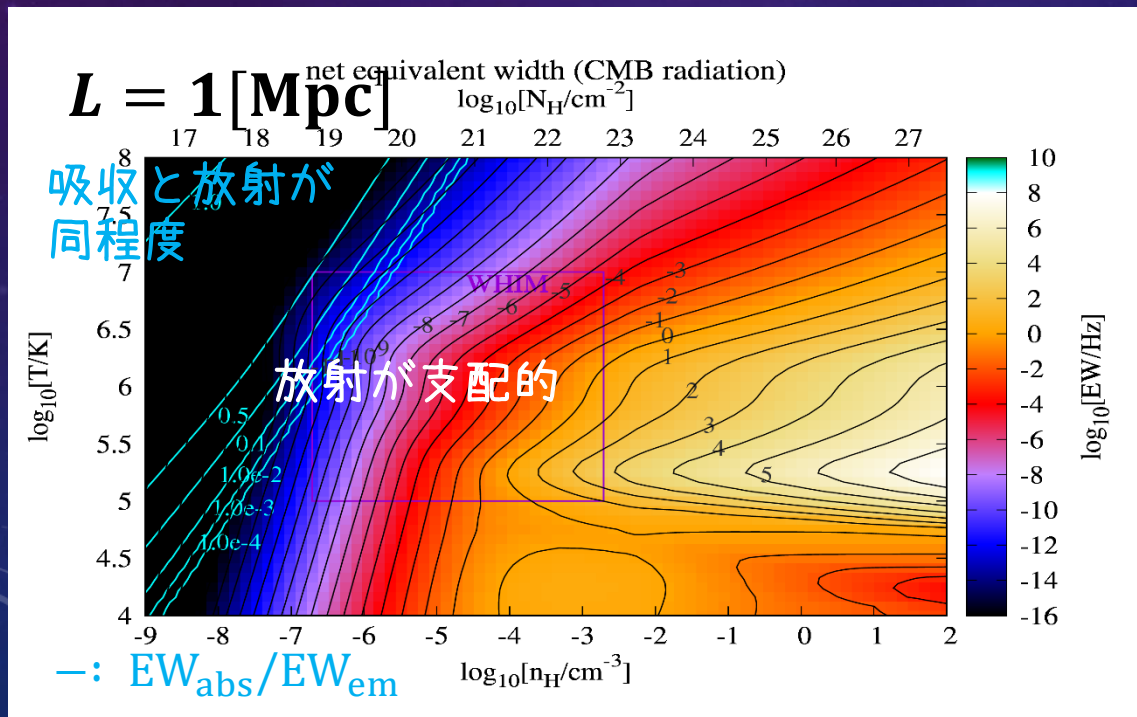
● 等価幅EW (Equivalent Width)

$$\text{EW} \equiv \int \frac{|I_\nu - I_\nu^{(\text{CMB})}|}{I_\nu^{(\text{CMB})}} d\nu = \int |\delta_\nu| d\nu$$



• $\text{EW} = \text{EW}_{\text{em}} + \text{EW}_{\text{abs}}$
と分けて、それぞれ計算

WHIMの領域では
放射が支配的



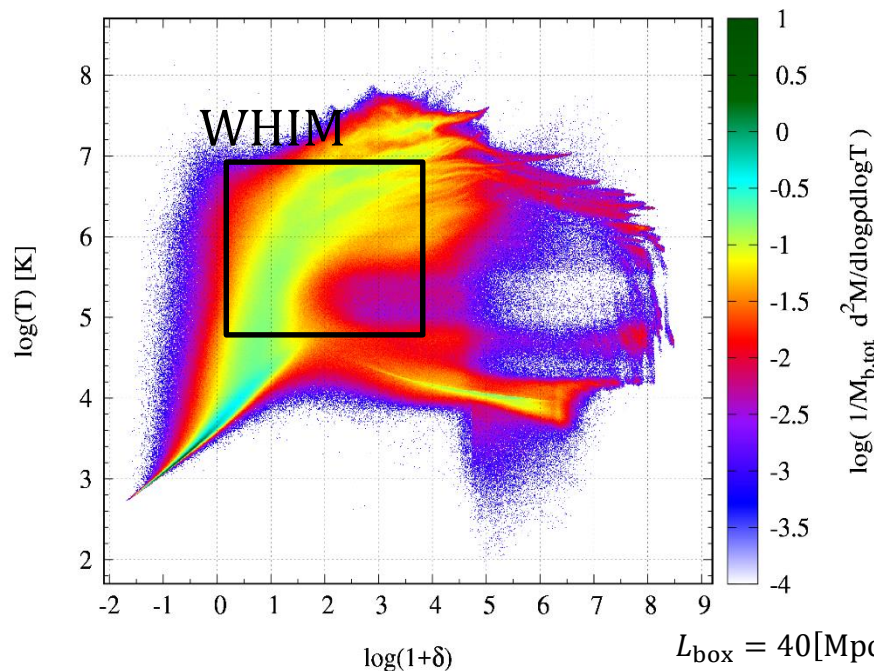
5. 一様ガス雲モデルの疑似スペクトル計算

▶ 結果：ケース(A) CMB背景光源の場合

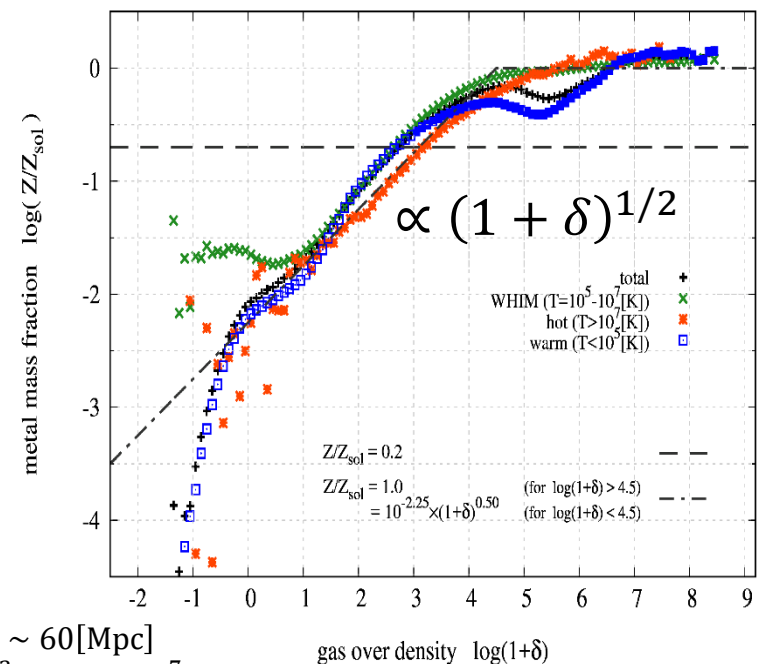
● 大規模構造ガス分布中での結果

● 宇宙論的構造形成シミュレーション(Okamoto+2014など)のガス分布データを用い、どのようなガスがHFS線で観測できるか検証

ガスの密度・温度分布 ($z=0$)



ガスの金属量分布 ($z=0$)



5. 一様ガス雲モデルの疑似スペクトル計算

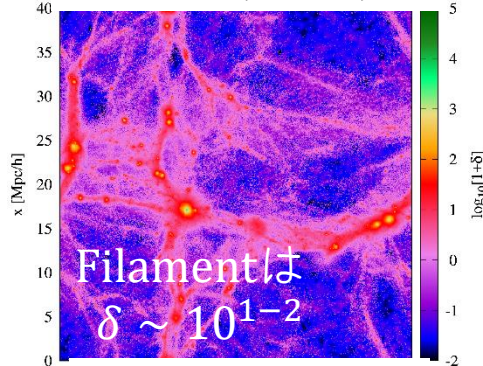
▶ 結果：ケース(A) CMB背景光源の場合

● 大規模構造ガス分布中での結果

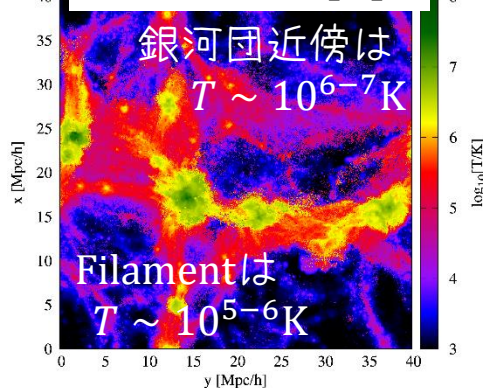
モデル計算の結果
 $EW(\rho, T, Z_{met})$ を使用

ガスの空間分布 ($z=0$) 厚さ $\Delta L = 2.5 [\text{Mpc}/h] \sim 3.7 [\text{Mpc}/h]$

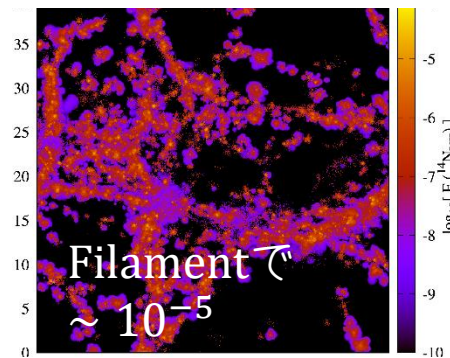
密度 $\log(1 + \delta)$



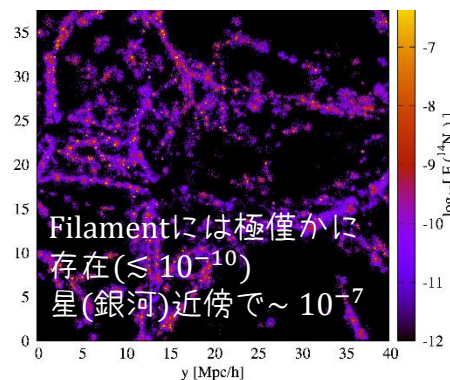
温度 $\log(T) [\text{K}]$



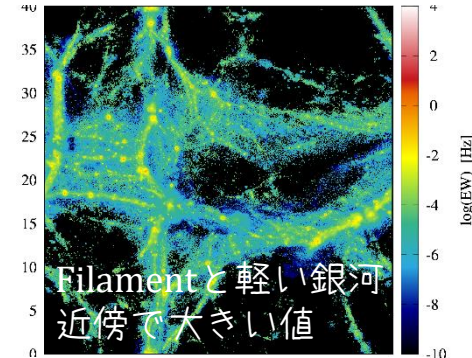
14NVIIイオン存在比



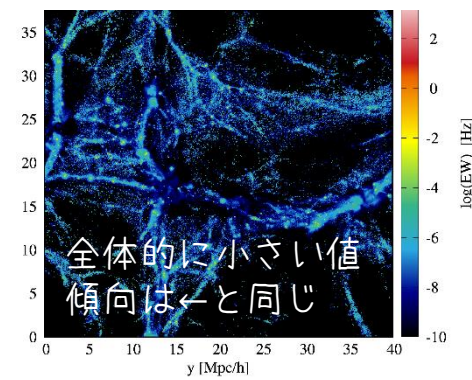
14NVイオン存在比



14NVIIのEW (log)



14NVのEW (log)



5. 一様ガス雲モデルの疑似スペクトル計算

▶ モデル設定：密度・温度ごとのシグナルを調べる

● 背景光源の設定

(A) 光源天体がない方向を観測した場合

⇒ 背景輻射場はCMB : $I_{\nu}^0 = I_{\nu}^{CMB}$

$I_{\nu} = I_{\nu}^{CMB} \exp[-\tau_{\nu}] + I_{\nu}^{(em)}$ 輝線と吸収線の両方がありうる

(B) QSOなどの明るい背景天体を観測した場合

⇒ 背景輻射場がHFS輝線輻射に比べて十分大きいと仮定

$I_{\nu}^{bright\ src} \gg I_{\nu}^{(em)}$ と近似

$I_{\nu} = I_{\nu}^{bright\ src} \exp[-\tau_{\nu}]$ 吸収線のみ

5. 一様ガス雲モデルの疑似スペクトル計算

▶ 結果：ケース(B) 明るい天体を背景光源とする場合

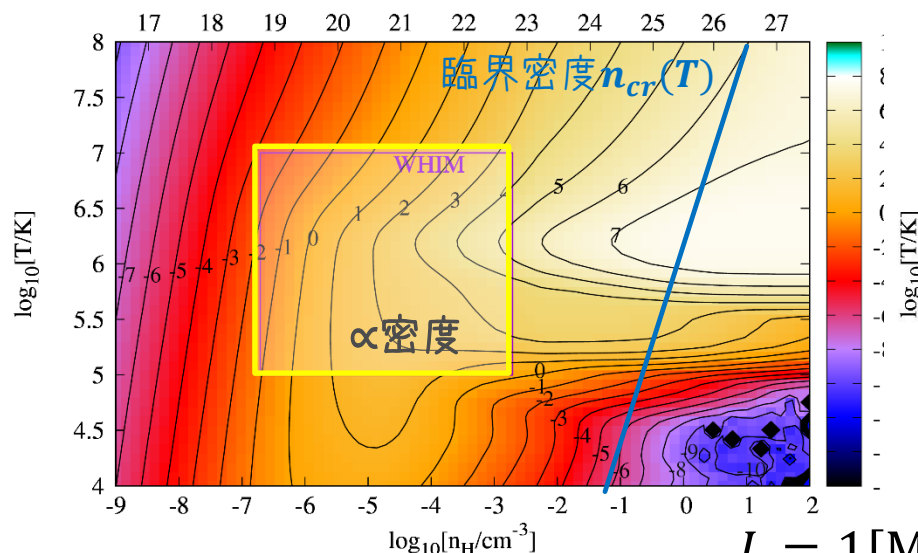
● 14NVIIの等価幅 EW

$$EW \equiv \int \frac{|I_\nu - I_\nu^{(b.s.)}|}{I_\nu^{(b.s.)}} d\nu = \int a_\nu d\nu$$

- ◆ $n_H \sim 10^{-3} \text{ cm}^{-3}$ では、ケース(A)より3-4桁ほど大きい
→ (A)では吸収・放射相殺が起っていたため
- ◆ $T \sim 10^{6.3} \text{ K}$ 付近で値が大きい
→ ionization fraction が大きい領域

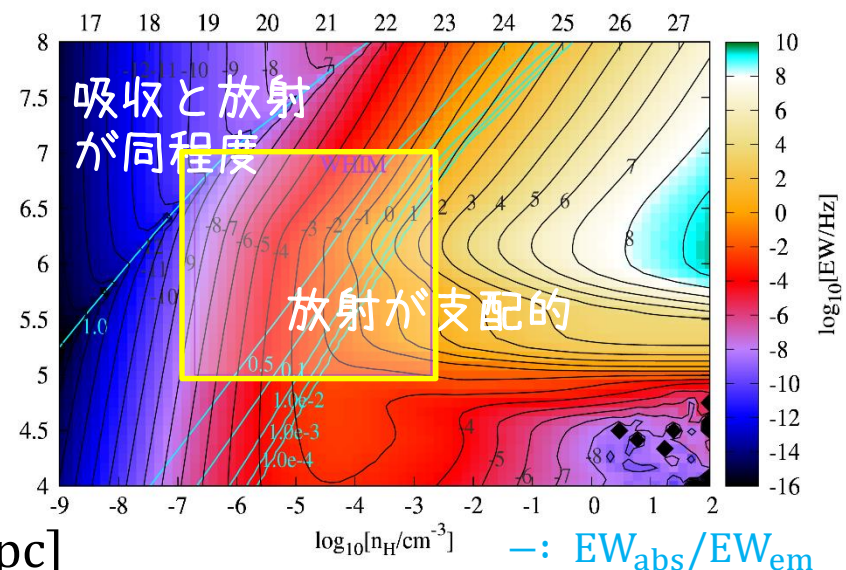
EW ケース(B)

source radiation)



$L = 1[\text{Mpc}]$

EW ケース(A)：比較のため



—: $EW_{\text{abs}}/EW_{\text{em}}$

5. 一様ガス雲モデルの疑似スペクトル計算

▶ 結果：ケース(B) 明るい天体を背景光源とする場合

● 14NVの等価幅 EW

$$EW \equiv \int \frac{|I_\nu - I_\nu^{(b.s.)}|}{I_\nu^{(b.s.)}} d\nu = \int a_\nu d\nu$$

◆ $n_H \sim 10^{-3} \text{ cm}^{-3}$ で、ケース(A)とオーダーが変わらない

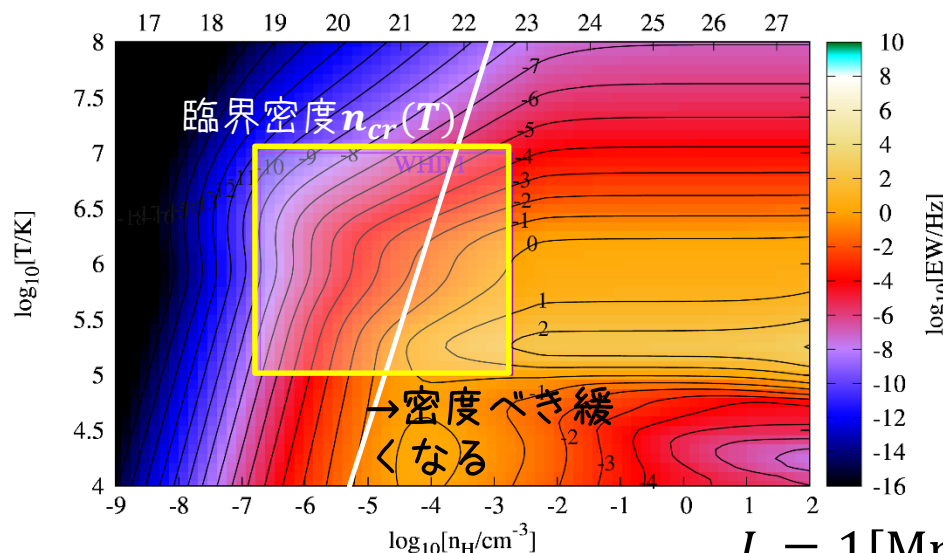
→ (A)で吸収放射相殺が起きていなかったため

◆ $T \sim 10^{5.3} \text{ K}$ 付近で値が大きい

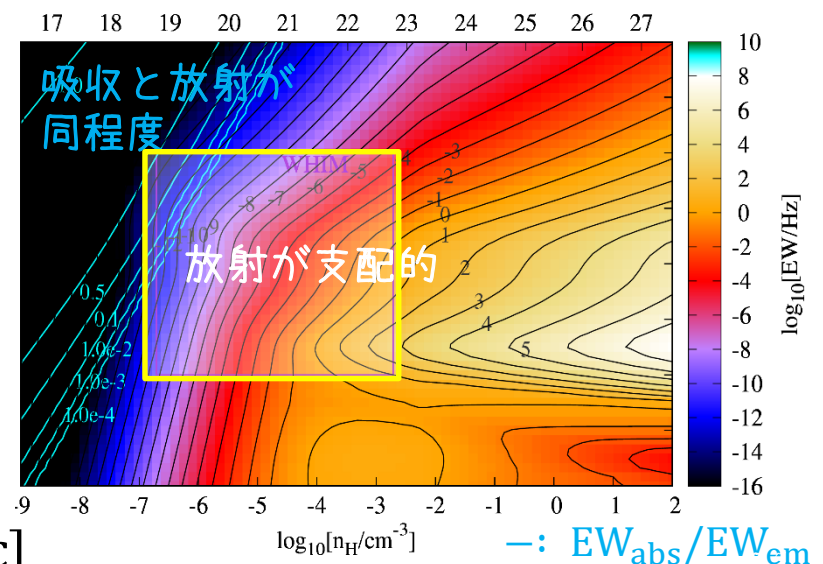
→ ionization fraction が大きい領域

EW ケース(B)

source radiation)



EW ケース(A)：比較のため



5. 一様ガス雲モデルの疑似スペクトル計算

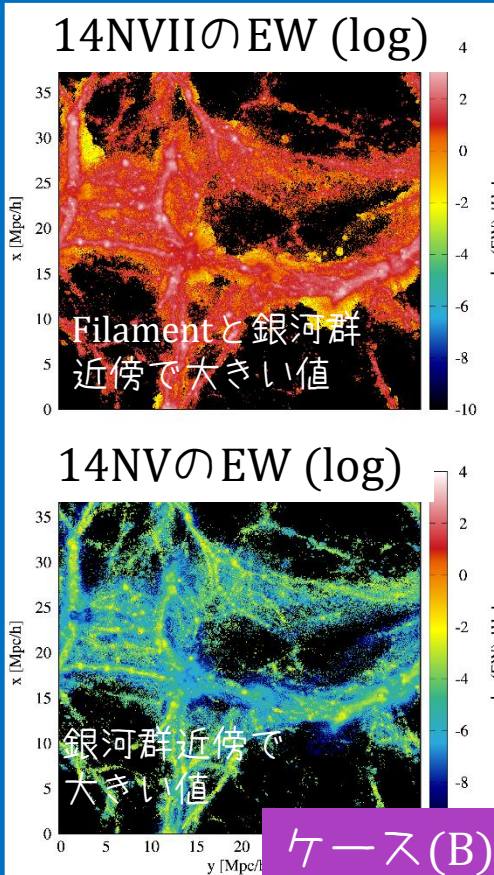
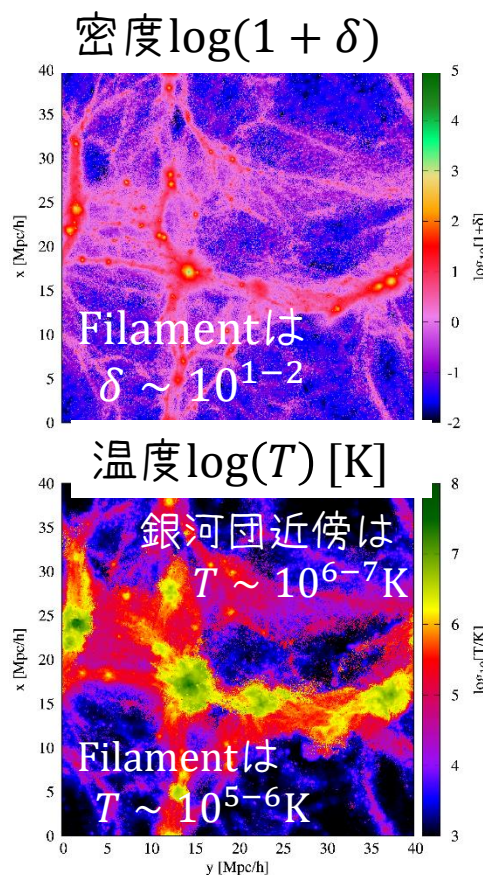
- ▶ 結果：ケース(B) 明るい天体を背景光源とする場合
- 大規模構造ガス分布における結果

モデル計算の結果

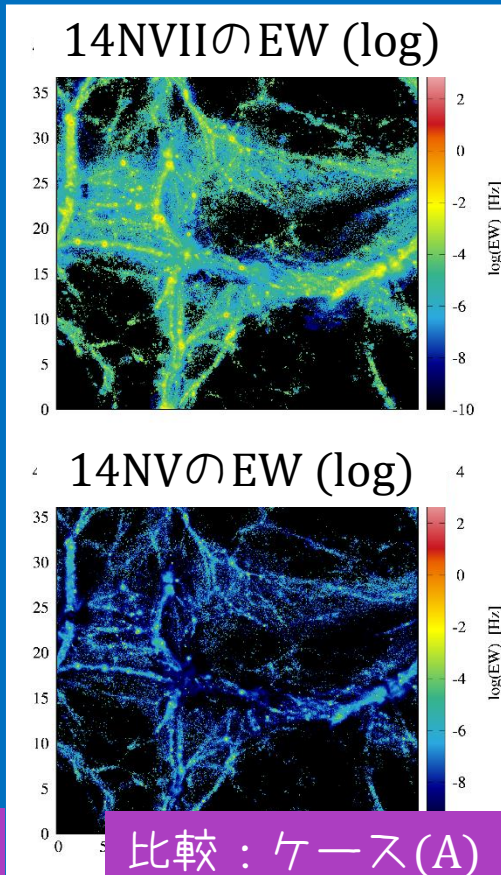
$EW(\rho, T, Z_{met})$ を使用

ガスの空間分布 ($z=0$)

厚さ ΔL



ケース(B)

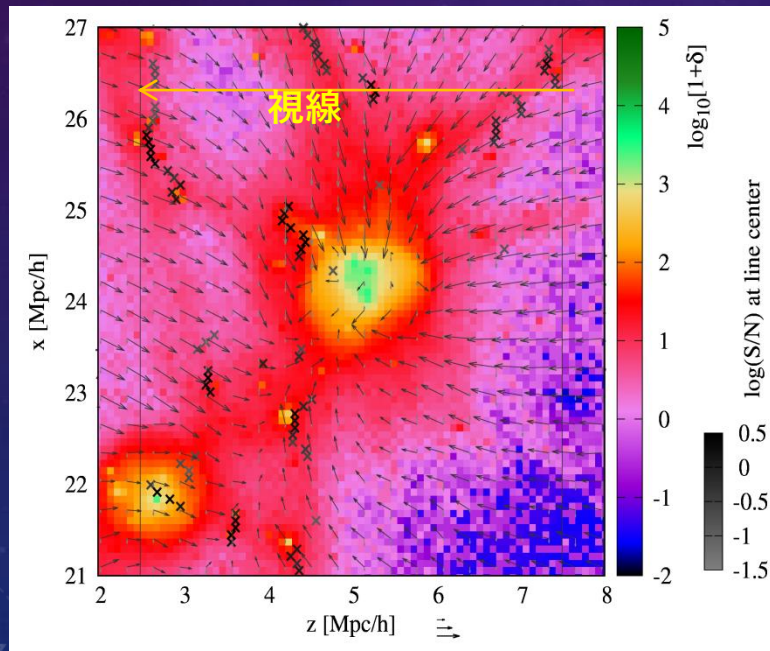


6. 一様ガス雲モデルの疑似スペクトル計算

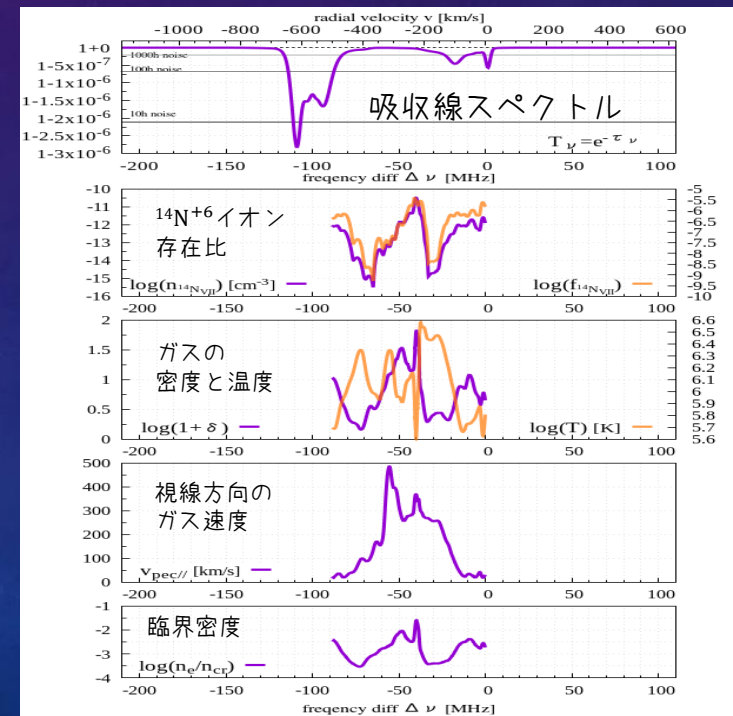
▶ 結果：ケース(B) 明るい天体を背景光源とする場合

● シミュレーションのガス分布($z=0$)を用いた
 $^{14}\text{N}_{\text{VII}}$ HFS線の疑似観測結果

銀河団周辺におけるガス密度分布(スライス)
吸収線がGBT100時間観測におけるS/N



HFS吸収線スペクトルと
視線方向の物理量の例

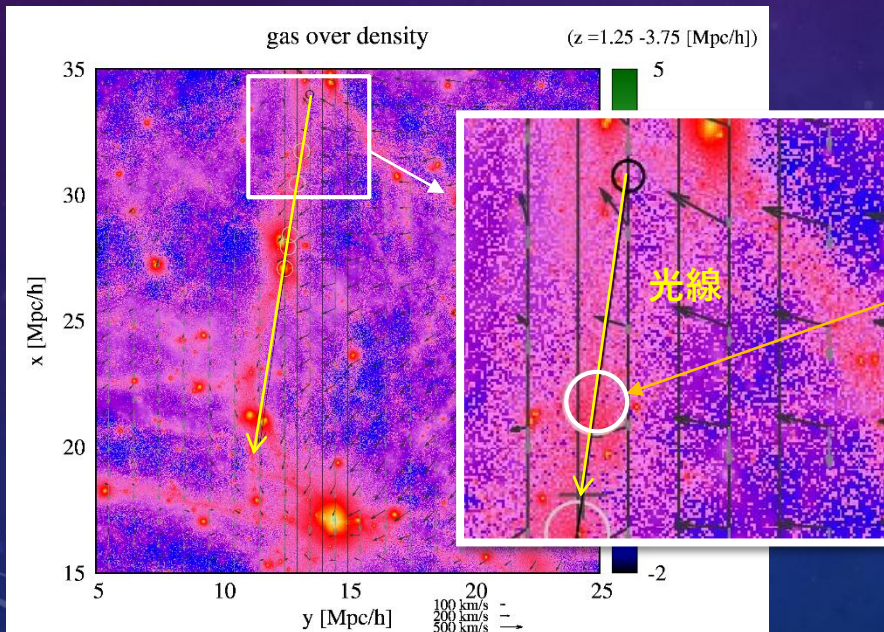


6. 一様ガス雲モデルの疑似スペクトル計算

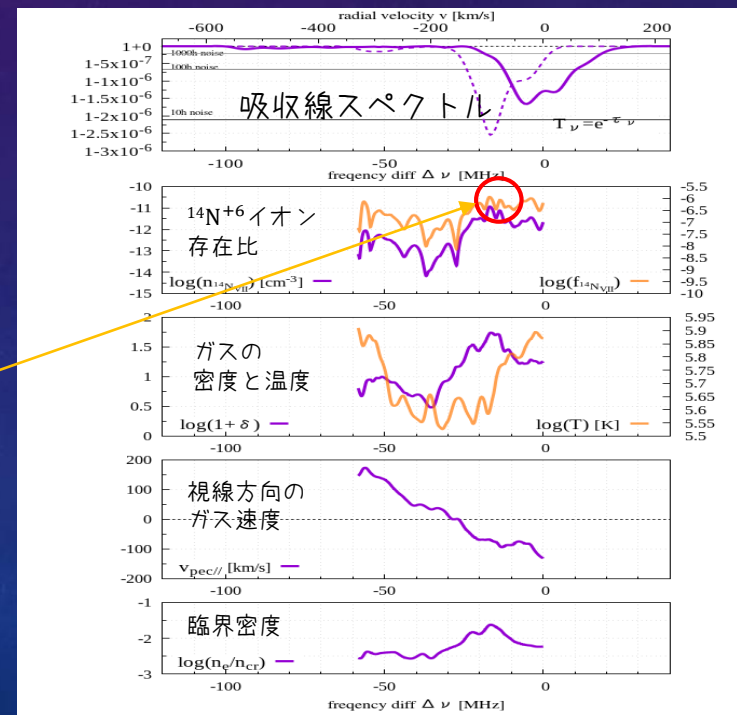
▶ 結果：ケース(B) 明るい天体を背景光源とする場合

● シミュレーションのガス分布($z=0$)を用いた
 $^{14}\text{N}_{\text{VII}}$ HFS線の疑似観測結果

Cosmological filament に沿った視線の場合：
filamentの高密度領域の一部もトレースしている



HFS吸収線スペクトルと
視線方向の物理量の例



まとめ

- WHIMの新たな観測手段として、電波領域($\lambda = 0.1\text{mm} - 10\text{cm}$)の超微細構造(HFS)線に着目。トレーサーに適した重元素イオンとして $^{14}\text{N}_{\text{VII}}$ と $^{14}\text{N}_{\text{V}}$ を採用。
- 一様なガス雲に対して、HFS線スペクトルのモデル計算を行い、線吸収や線放射がどの程度生じるか調べた。
→ 先行研究と比較して、より定量的に調べた。
- EWの比較から、 $^{14}\text{N}_{\text{V}}$ イオンによるHFS線のシグナルは $^{14}\text{N}_{\text{VII}}$ の場合に比べて非常に小さいことが分かった。
- 擬似観測の結果から、 $^{14}\text{N}_{\text{VII}}$ イオンのHFS線は、銀河群の裾野やフィラメント領域で受かりやすく、現行の望遠鏡(GBT)でも同定できそうなシグナル強度を持つことが分かった。
- HFS吸収線スペクトルはガスの密度・速度構造を反映して複雑な形をしているので、スペクトルをsingle lineとしてfittingするのは困難。
→ 個々のスペクトルの形に対し、トレースしているガス雲の物理量を引き出すのは難しい。→ 統計的な結果について調べたい。