

[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

2017 10/13 (金)

渡邊 歩

# 1. 研究背景

- 中-高温銀河間ガス(WHIM)とは
  - ▶ missing baryon 問題
  - ▶ missing baryon はどこにあるのか
  - ▶ WHIMについて
- 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
  - ▶ 超微細構造線によるWHIMの観測

# 1. 研究背景

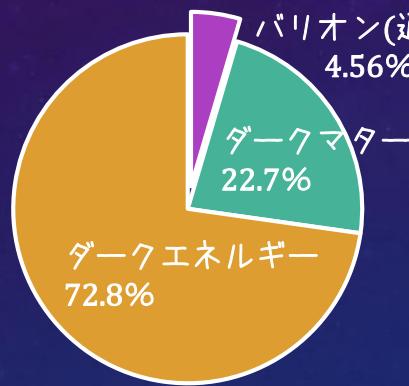
- 中-高温銀河間ガス(WHIM)とは
  - ▶ missing baryon 問題
  - ▶ missing baryon はどこにあるのか
  - ▶ WHIMについて
- なぜ重元素の超微細構造線によるWHIMの観測か
  - ▶ WHIMの観測の現状
  - ▶ 超微細構造線によるWHIMの観測

# 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%

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

CMBの観測  
(Planck 2013)

H<sub>I</sub> Ly $\alpha$ の観測  
(Rauch+1997)



### 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

$$\Omega_{b0} \sim 0.025$$

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

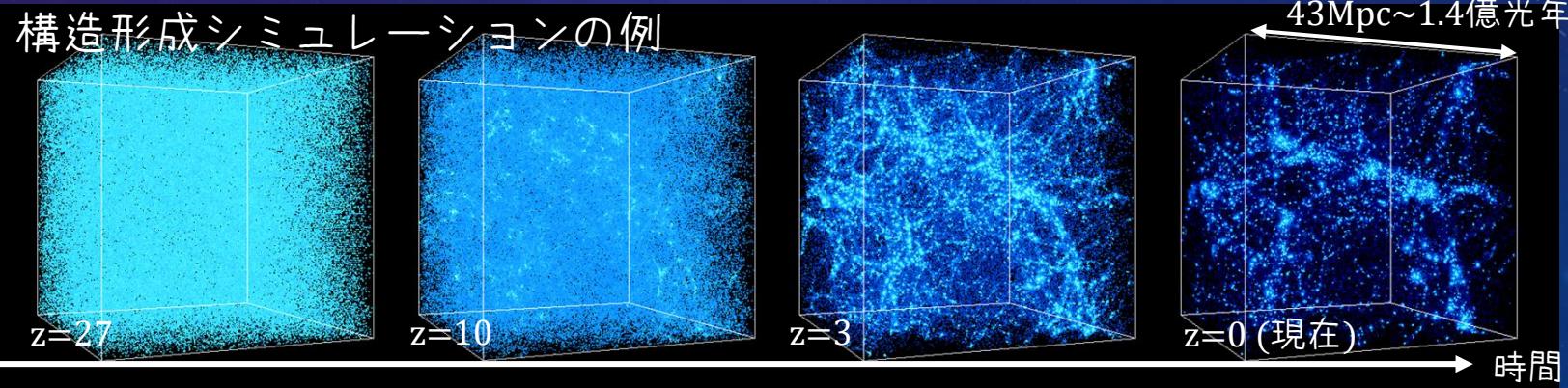
## 1. 研究背景：中-高温銀河間ガス(WHIM)とは

► 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

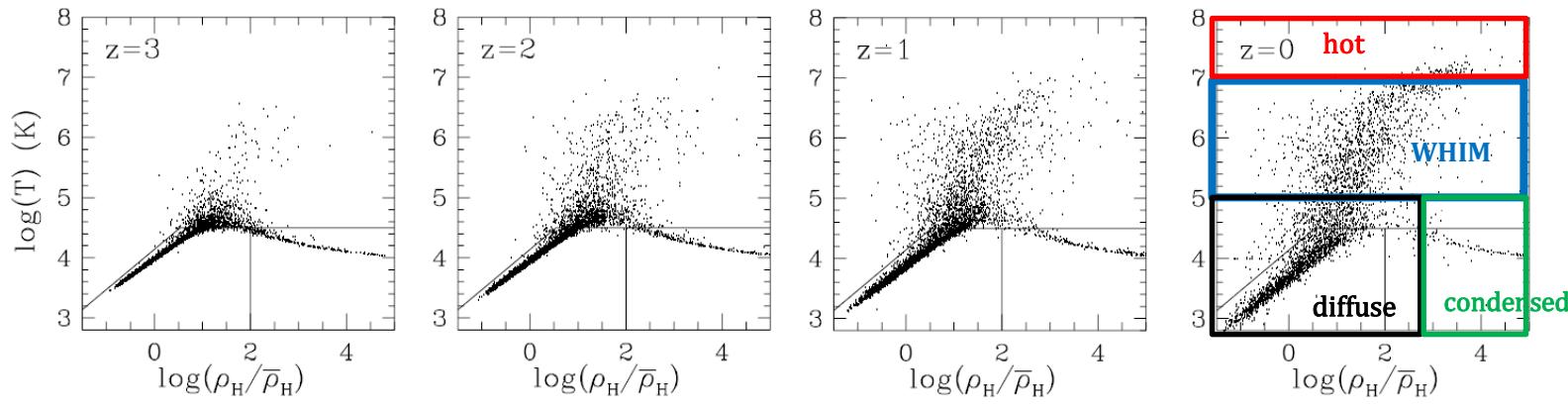
構造形成シミュレーションの例



# 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)



- 現在に近づくにつれて、 $T > 10^5 \text{ [K]}$  の高温ガスが増加
- hot gas ( $T > 10^7 \text{ [K]}$ ) : 銀河団に付随しX線を放射するガスとして観測
  - $T = 10^5 - 10^7 \text{ [K]}$  のガスは Warm-Hot Intergalactic Medium : WHIM と命名された

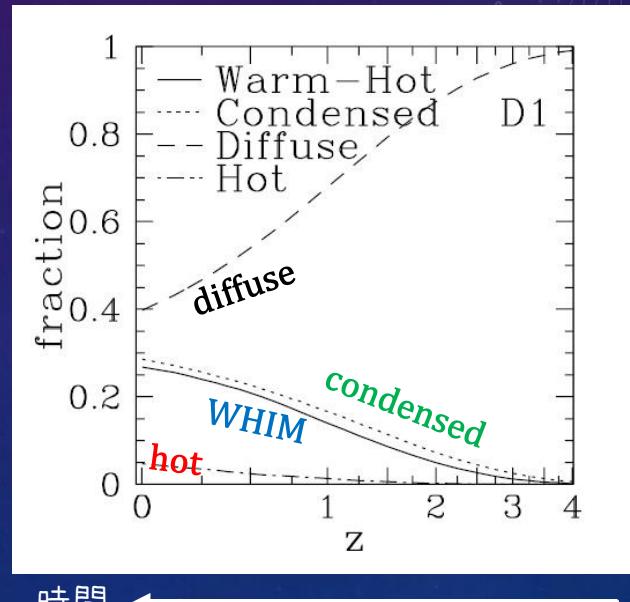
## 1. 研究背景 : 中-高温銀河間ガス(WHIM)とは

► 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)

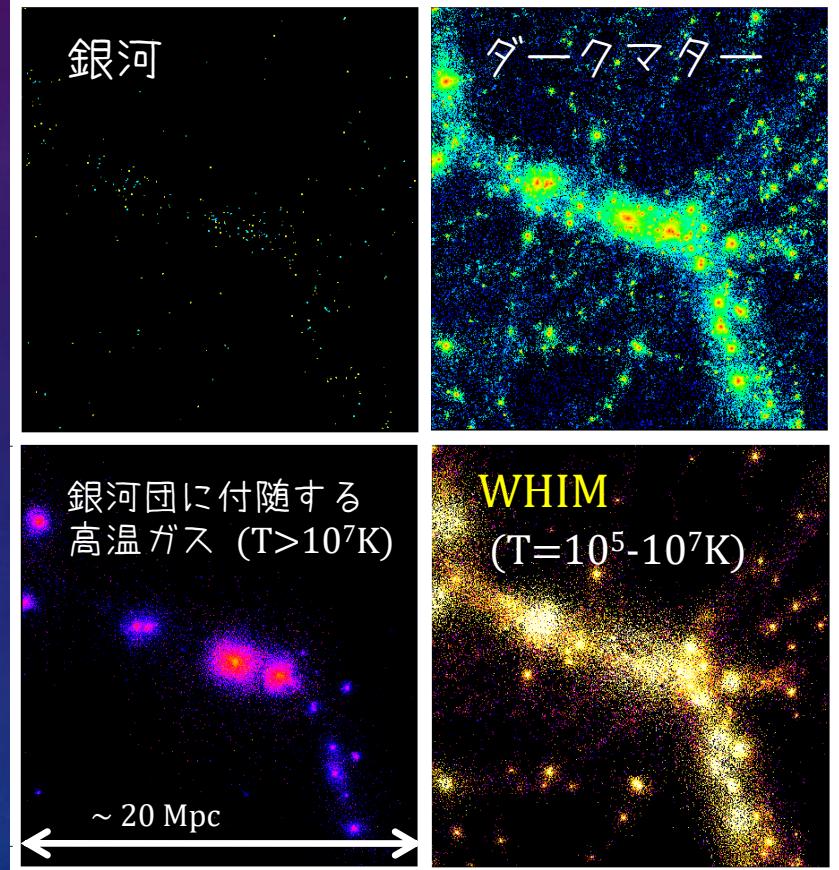


## 1. 研究背景：中-高温銀河間ガス(WHIM)とは

### ► 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  $\delta=1 \sim 10^4$  ( $n_{\text{H}}=10^{-6} \sim 10^{-2} \text{cm}^{-3}$ )
  - ・ 重力崩壊による衝撃波加熱により生じる
    - ・ ダークマター halo 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

- ✓ 中-高温銀河間ガス(WHIM)とは
  - ▶ missing baryon 問題
  - ▶ missing baryon はどこにあるのか
  - ▶ WHIMについて

- 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
  - ▶ 超微細構造線によるWHIMの観測

# 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 $\alpha$ 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<sub>IV</sub>,N<sub>V</sub>,O<sub>VI</sub>,O<sub>IV</sub>,O<sub>V</sub>,Ne<sub>VIII</sub>) および soft-X線 (O<sub>VII</sub>, O<sub>VIII</sub>, Ne<sub>VI</sub>, Ne<sub>IX</sub>)

⇒ 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 $3\sigma$ 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は

- ・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

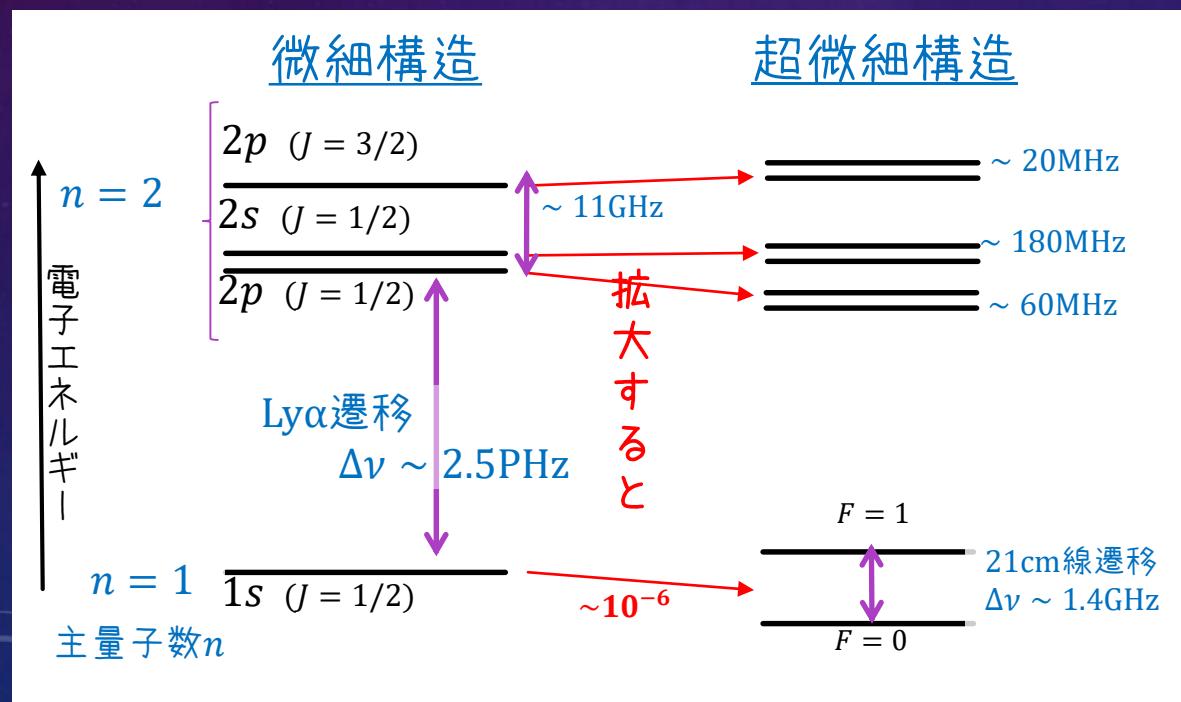
### 手法

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

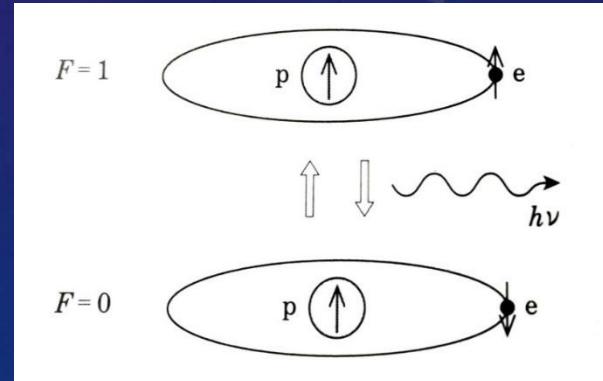
### 3. HFS線の性質

► 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

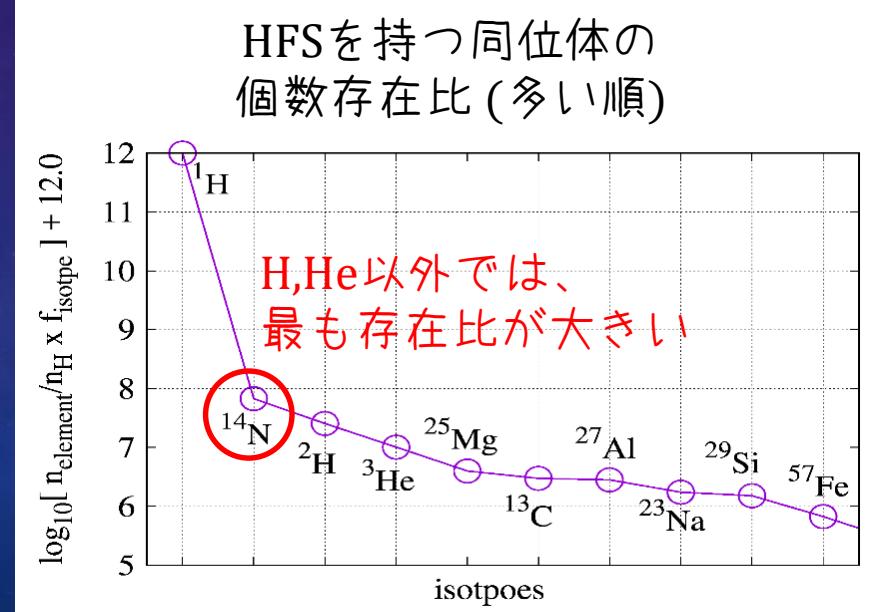
● 原子性イオンのHFS線は、核種と電子数によって異なる  
⇒ どの元素同位体、どの電離階数のイオンが観測に適しているか？

● 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  $^{14}\text{N}$  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



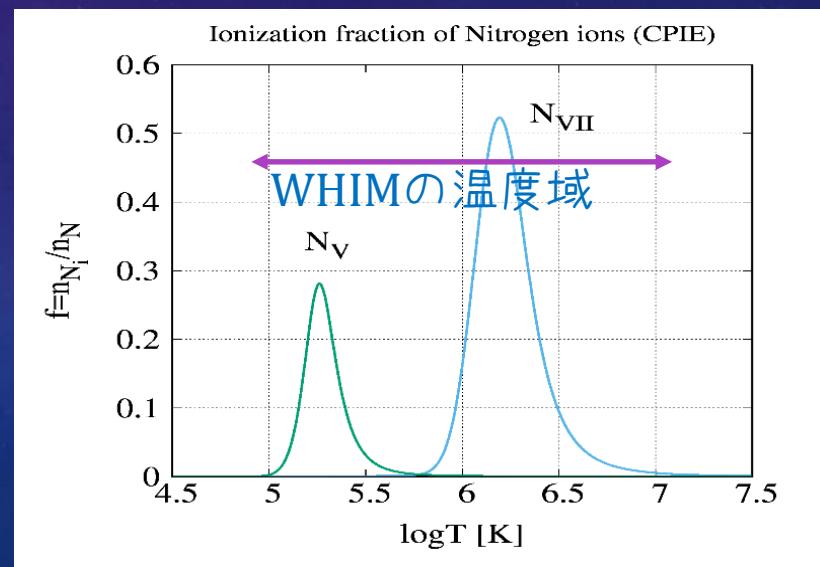
### 3. HFS線の性質

► 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( $\text{N}_{\text{VII}}$ )と4階電離( $\text{N}_{\text{V}}$ )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)

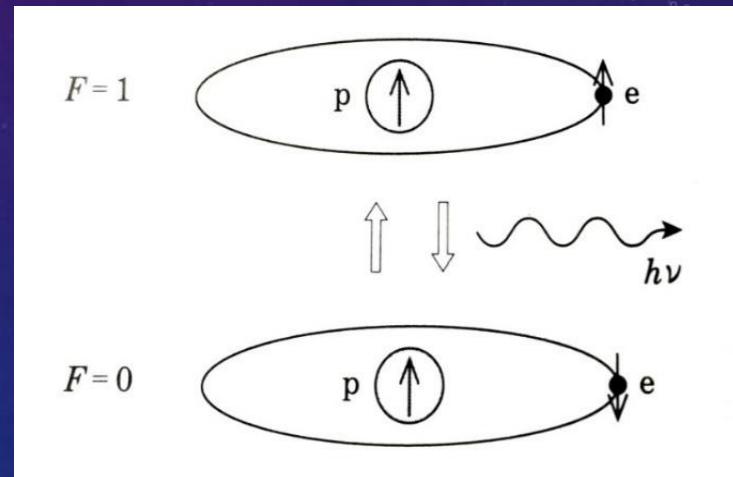
● HFS準位のlevel populationによって、HFS線が吸収線・輝線のどちらになるか決まる。

● 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

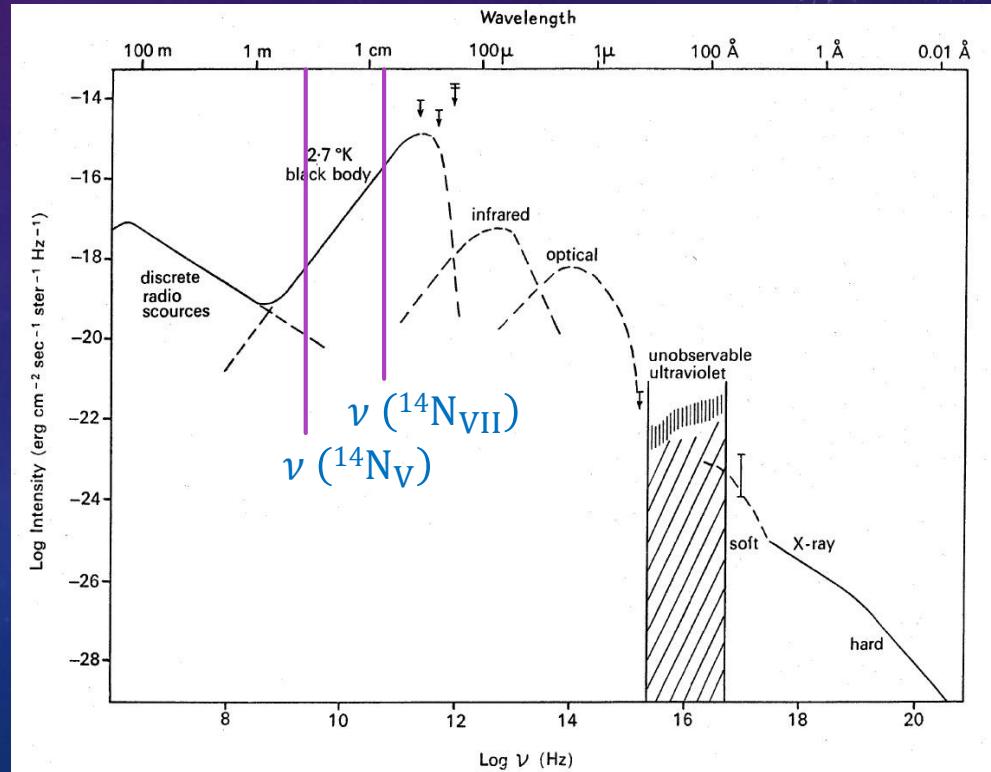
► HFS準位のlevel populationに対する仮定：  
CRE(衝突・輻射平衡)

- $^{14}\text{N}_V$ ,  $^{14}\text{N}_{\text{VII}}$  のHFS線波長ではCMB放射が卓越

⇒ level populationに寄与する外部輻射場はCMB

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

宇宙背景輻射強度と $^{14}\text{N}_V$ ,  $^{14}\text{N}_{\text{VII}}$ のHFS線波長



### 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

### 3. HFS線の性質

#### ▶ 臨界密度：電子衝突と輻射の寄与の競合

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

⇒ level populationに対して電子衝突/輻射が支配的になる境界となる電子の密度

(1)  $n_e \ll n_{\text{cr}}$  のとき ⇒ 輻射との相互作用が支配的

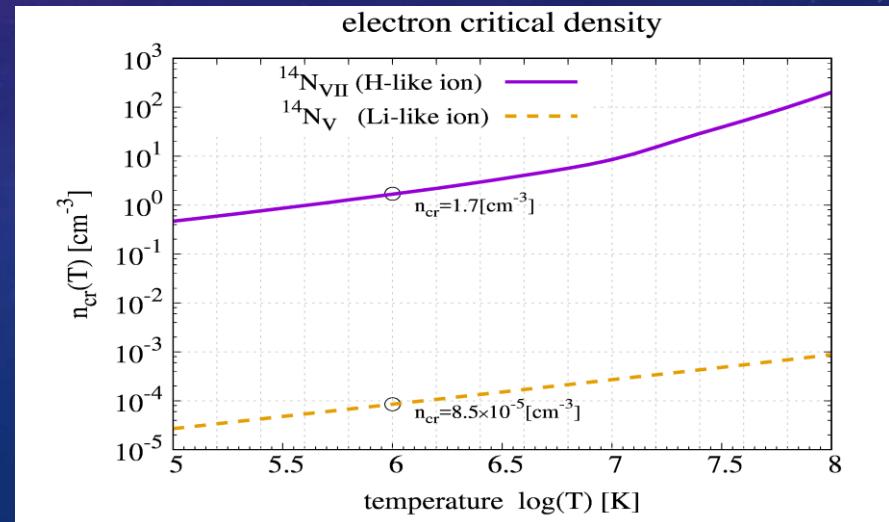
(2)  $n_e \gg n_{\text{cr}}$  のとき ⇒ 電子衝突が支配的

臨界密度の温度依存性

$$n_{\text{cr}}(T) = \frac{A_{ul}}{C_{ul}(T)} \propto \sqrt{T}$$

$$C_{ul}(T) = \frac{g_l}{g_u} C_{lu}(T) e^{\frac{h\nu_{ul}}{k_B T}},$$

$$C_{lu}(T) \propto \frac{\gamma_{\text{eff}}(T)}{\sqrt{T}}$$



### 3. HFS線の性質

#### ▶ 臨界密度：吸収・放射率の密度依存性に対する効果

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

⇒ level populationに対して電子衝突/輻射が支配的になる境界となる電子の密度

(1)  $n_e \ll n_{\text{cr}}$  のとき ⇒ 輻射との相互作用が支配的

(2)  $n_e \gg n_{\text{cr}}$  のとき ⇒ 電子衝突が支配的

	HFS線吸収に対する光学的厚み $\tau$	HFS線放射率 $\varepsilon$
$n_e \ll n_{\text{cr}}$	$\propto \Delta s n_e$	$\propto \Delta s n_e^2$
$n_e \gg n_{\text{cr}}$	$\propto \Delta s n_{cr}$	$\propto \Delta s n_e n_{cr}$

	Electron critical density $n_{\text{cr}}$ [cm <sup>-3</sup> ] ( $T = 10^6$ [K])
<sup>14</sup> N <sub>VII</sub>	1.666
<sup>14</sup> N <sub>V</sub>	$8.5 \times 10^{-5}$

非常に  
小さい

⇒ 電子密度が臨界密度より大きくなると、ガス密度( $\propto n_e$ )の増加に対する吸収線・輝線のシグナルの依存性がゆるやかになり不利

## 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
  - ▶ HFS線吸收率・放射率

## 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 :

$$\left( \frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial s} - \frac{v \dot{a}}{c a} \frac{\partial}{\partial v} \right) I_\nu(s, t) = - \left( \underline{\chi_\nu(s, t)} + \frac{3 \dot{a}}{c a} \right) I_\nu(s, t) + \underline{\eta_\nu(s, t)}$$

赤方偏移                    HFS線吸収    光子数密度減少                    HFS線放射

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



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

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

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

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

## 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 ⇒ 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 $\nu_{ul}$ [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

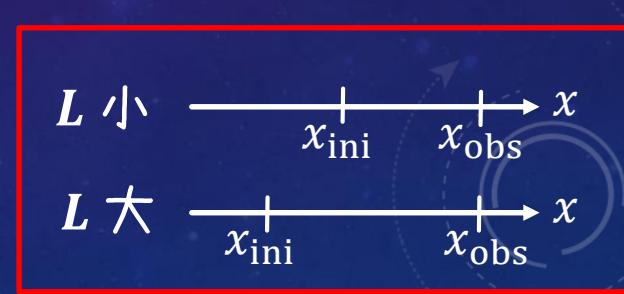
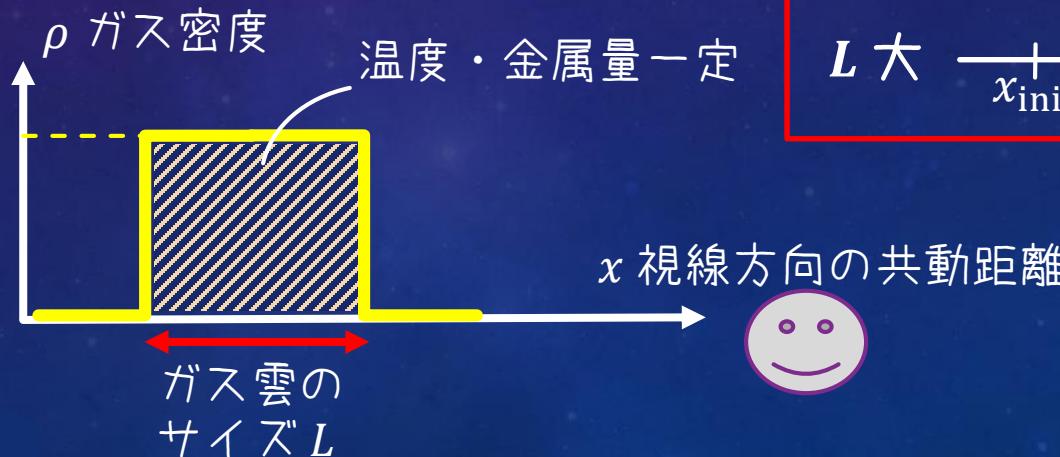
- ▶ モデル設定
- ▶ HFS線吸収率・放射率

## 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。

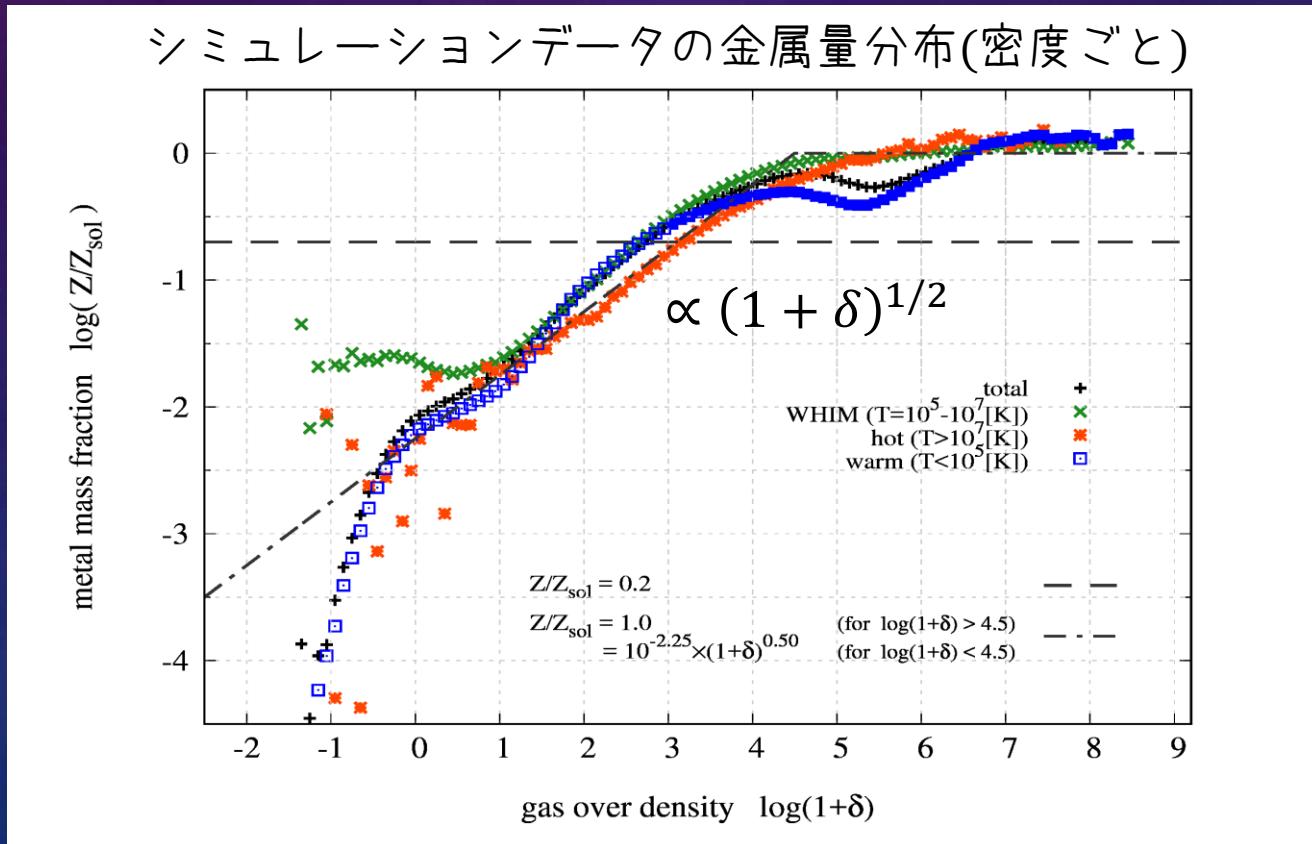
- 金属量：密度の関数  $Z = f(\rho)$
- HFSイオンは  $^{14}\text{N}_{\text{VII}}$  と  $^{14}\text{N}_{\text{V}}$
- 同位体存在比： $f_{^{14}\text{N}} = 0.99771$  (原始太陽系での値, Asplund et al. 2011)
- ガス雲のbulk motion無視 ( $v_{\text{gas}} = 0$ )
- ガス雲の赤方偏移： $z = 0$



## 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

- 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  $Z = f(\rho)$



## 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 :  $I_\nu^0 = I_\nu^{CMB}$

$I_\nu = I_\nu^{CMB} \exp[-\tau_\nu] + I_\nu^{(em)}$  輝線と吸收線の両方がある

(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

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

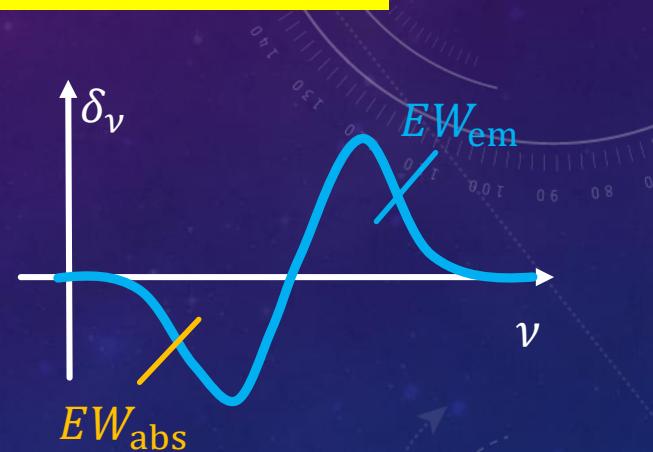
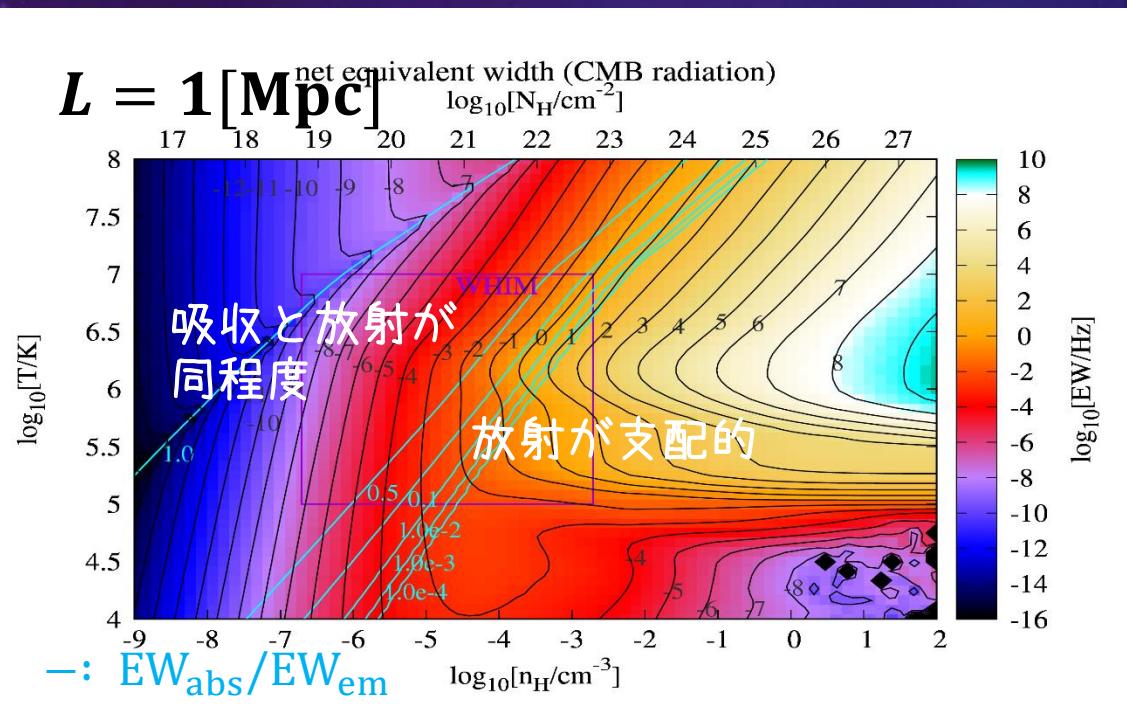
## 5. 一様ガス雲モデルの疑似スペクトル計算

▶ 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

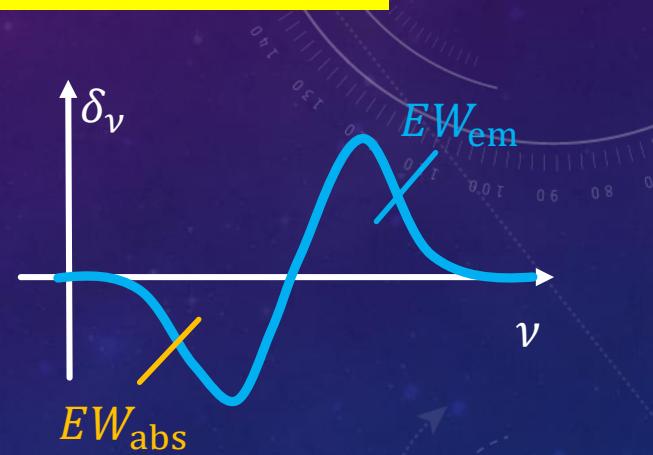
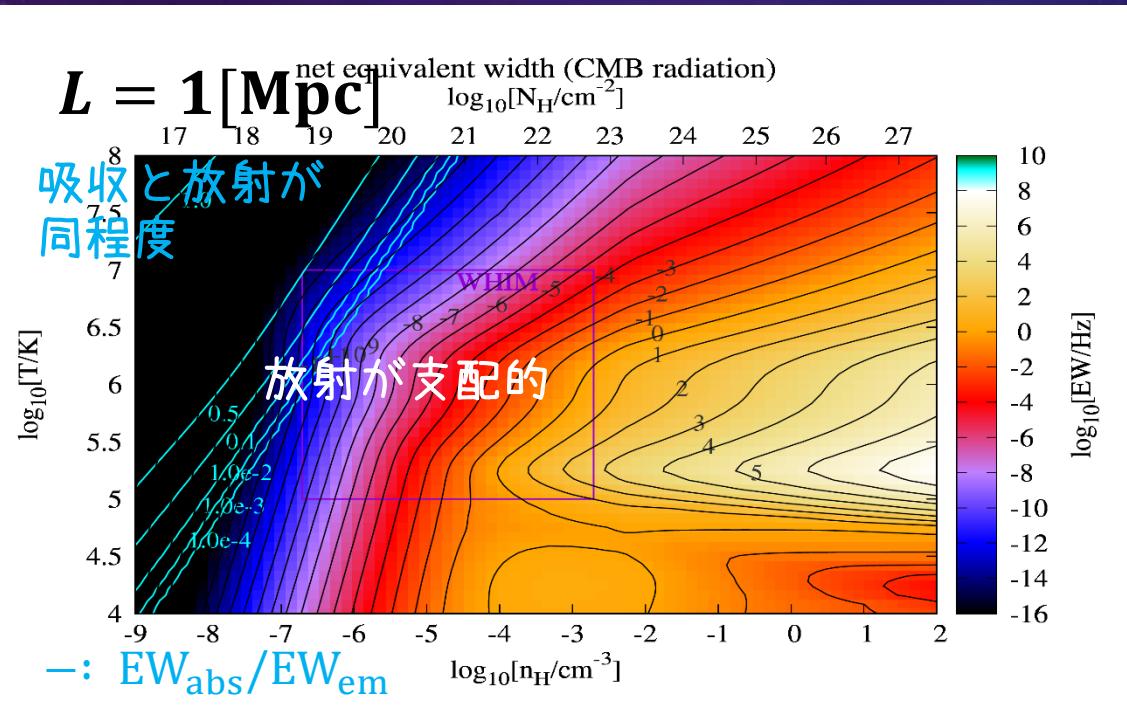
WHIMの領域では  
放射と吸収と同程度か  
放射が支配的

## 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)  $^{14}\text{N}_\nu$ 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

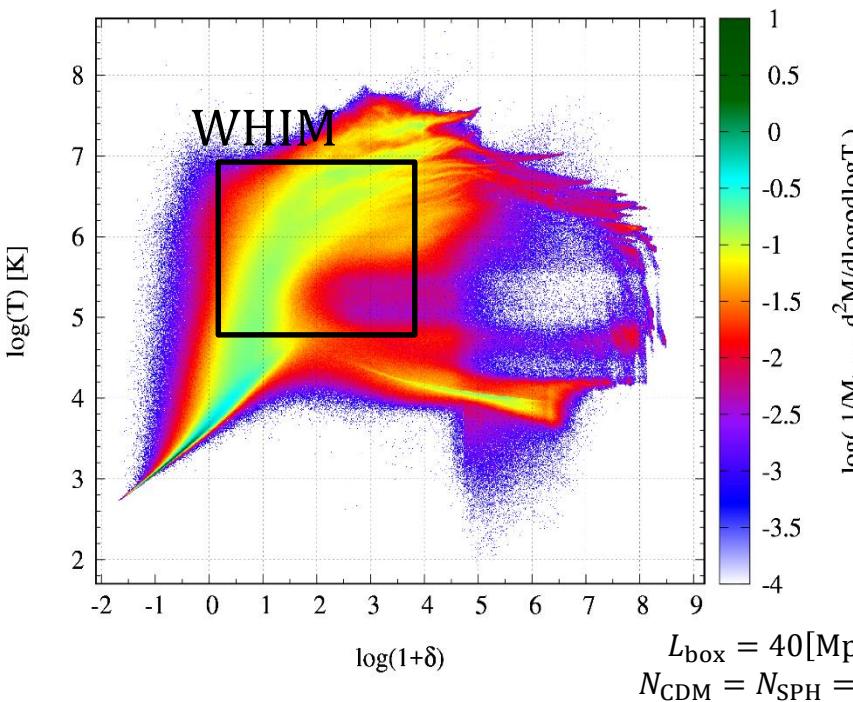
WHIMの領域では  
放射が支配的

## 5. 一様ガス雲モデルの疑似スペクトル計算

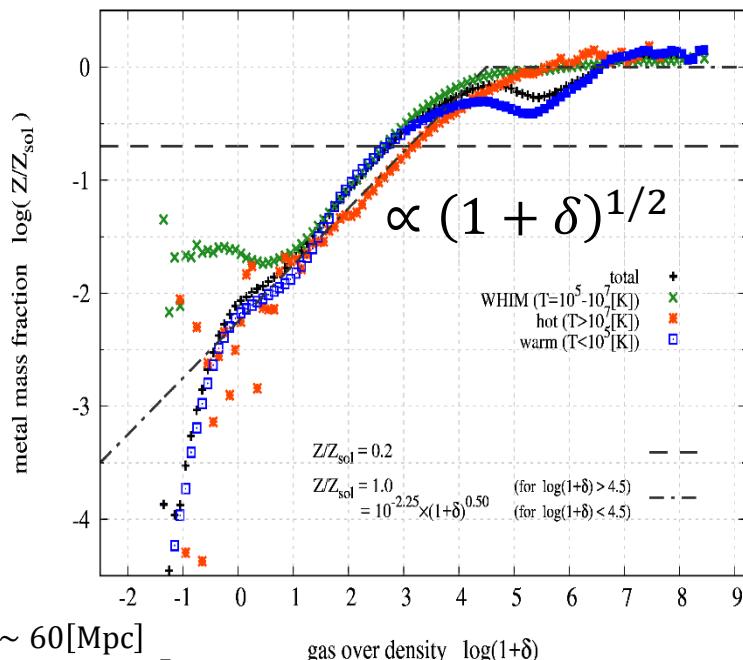
- ▶ 結果：ケース(A) CMB背景光源の場合
- 大規模構造ガス分布中の結果

- 宇宙論的構造形成シミュレーション(Okamoto+2015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 ( $z=0$ )



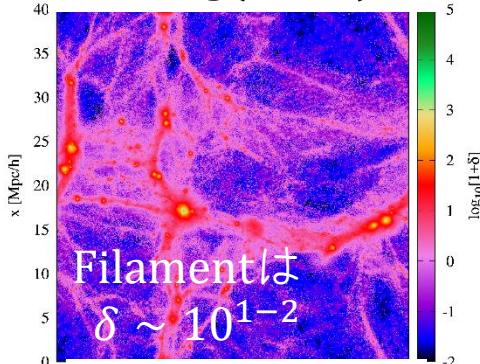
## 5. 一様ガス雲モデルの疑似スペクトル計算

- ▶ 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

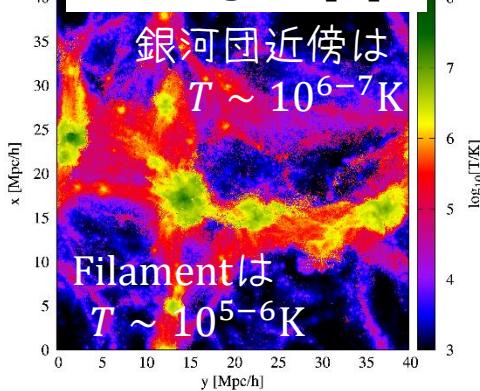
モデル計算の結果  
 $EW(\rho, T, Z_{met})$ を使用

### ガスの空間分布 ( $z=0$ )

密度  $\log(1 + \delta)$

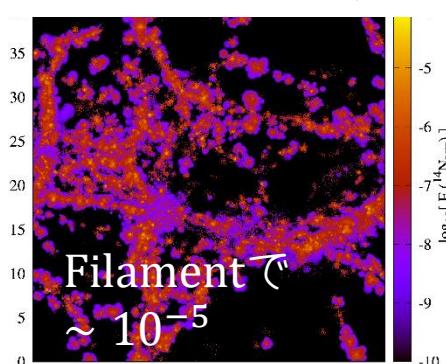


温度  $\log(T)$  [K]

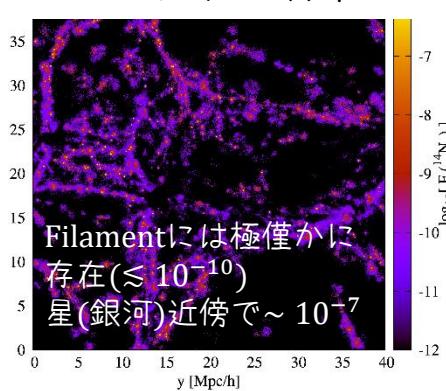


厚さ  $\Delta L = 2.5$  [Mpc/h] ~ 3.7 [Mpc/h]

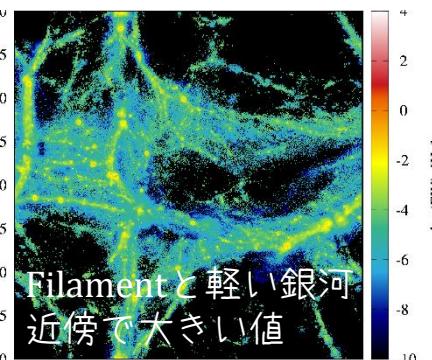
### 14NVIIイオン存在比



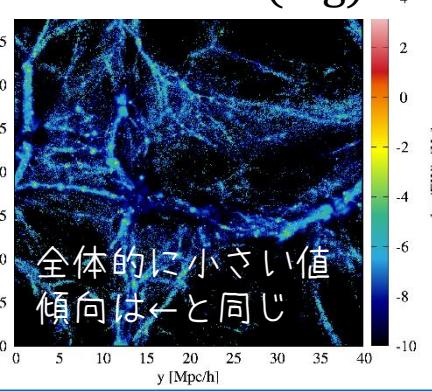
### 14NVイオン存在比



### 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 :  $I_\nu^0 = I_\nu^{CMB}$

$I_\nu = I_\nu^{CMB} \exp[-\tau_\nu] + I_\nu^{(em)}$  輝線と吸收線の両方がある

(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

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

## 5. 一様ガス雲モデルの疑似スペクトル計算

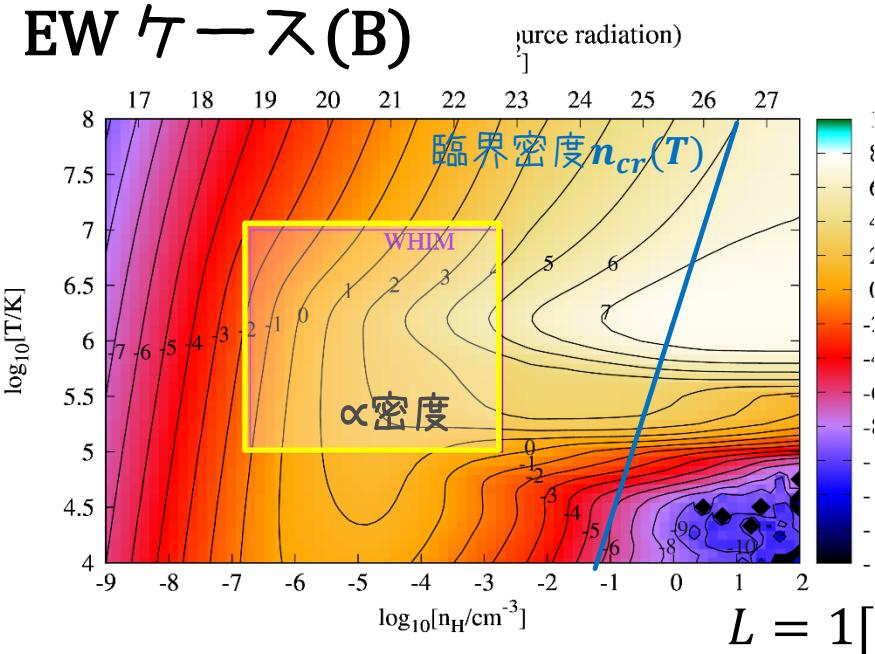
▶ 結果：ケース(B) 明るい天体を背景光源とする場合

### ● 14NVIIの等価幅 EW

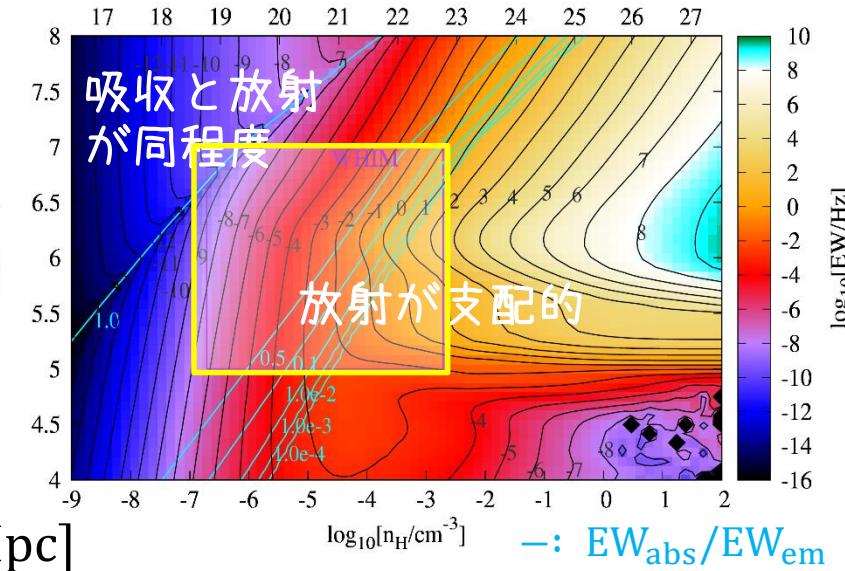
$$EW \equiv \int \frac{|I_\nu - I_\nu^{(b.s.)}|}{I_\nu^{(b.s.)}} d\nu = \int a_\nu d\nu$$

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

### EW ケース(B)



### 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

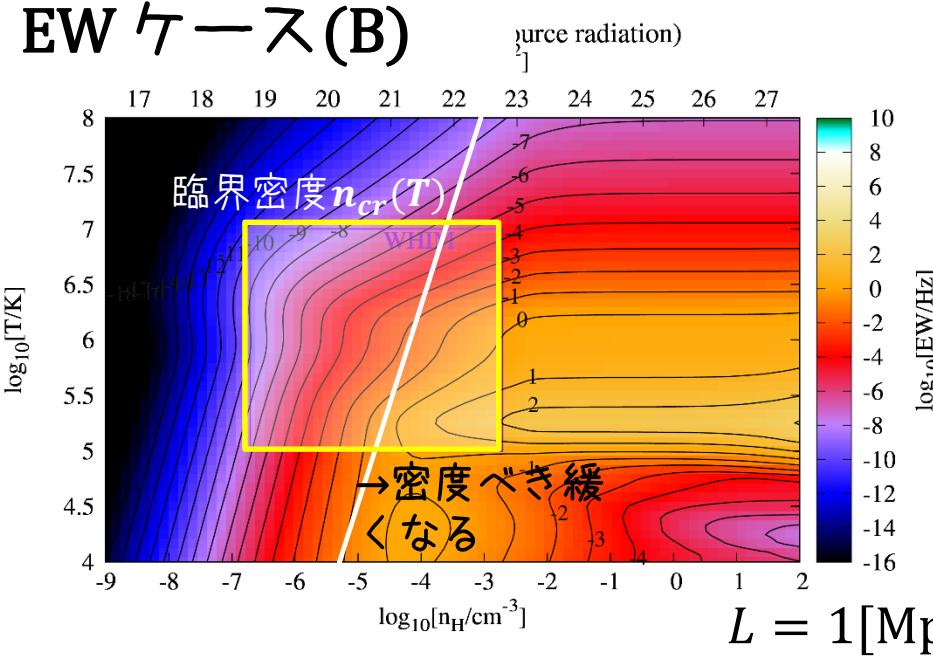
▶ 結果：ケース(B) 明るい天体を背景光源とする場合

### ● 14NVの等価幅 EW

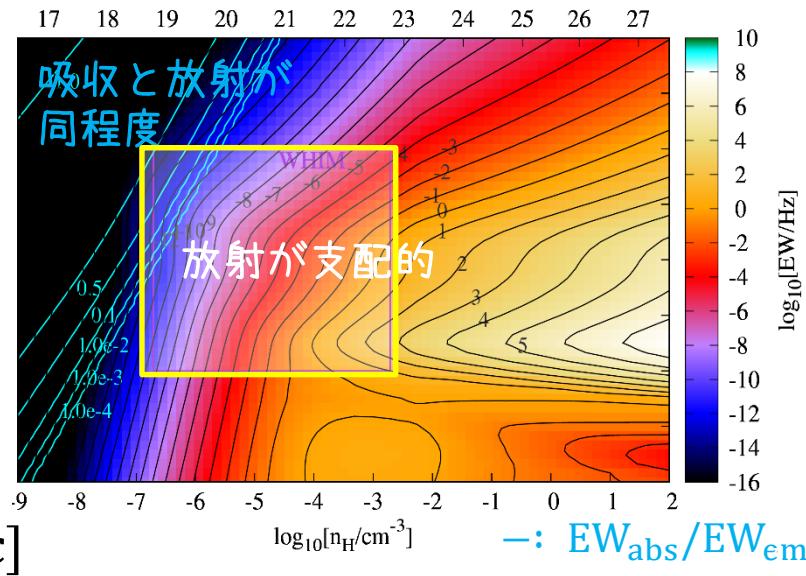
$$EW \equiv \int \frac{|I_\nu - I_\nu^{(b.s.)}|}{I_\nu^{(b.s.)}} d\nu = \int a_\nu d\nu$$

- ◆  $n_H \sim 10^{-3} \text{ cm}^{-3}$  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)



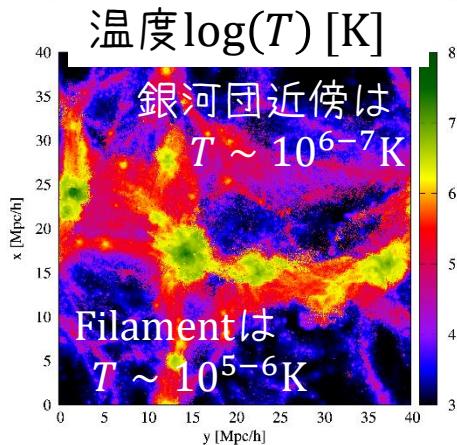
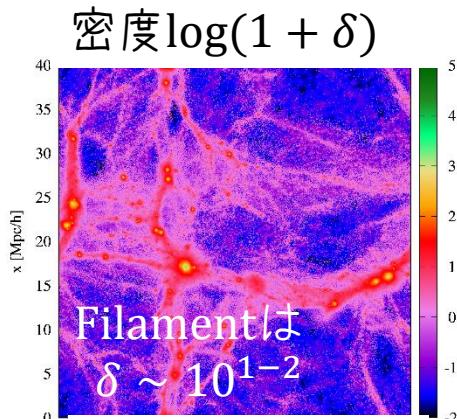
### EW ケース(A)：比較のため



## 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

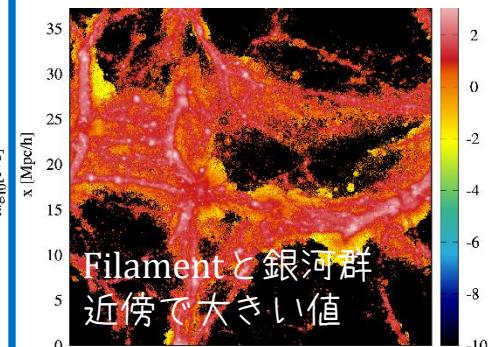
ガスの空間分布 ( $z=0$ )



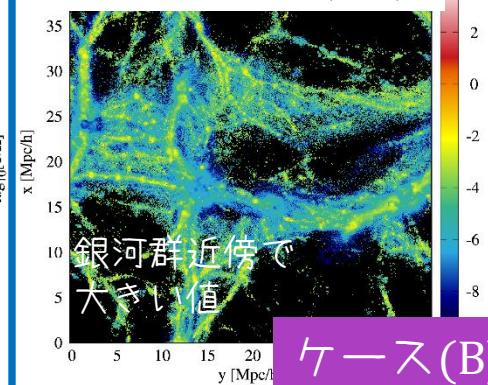
厚さ  $\Delta L =$

モデル計算の結果  
 $EW(\rho, T, Z_{met})$  を使用

14NVIIのEW (log)

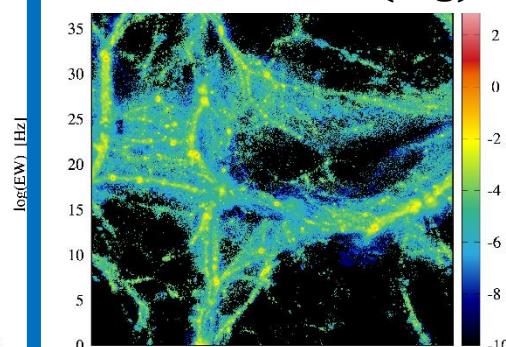


14NVのEW (log)

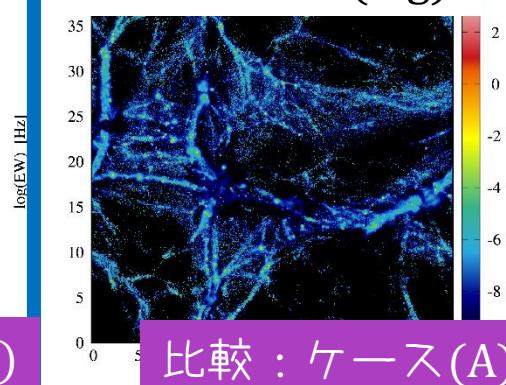


ケース(B)

14NVIIのEW (log)



14NVのEW (log)



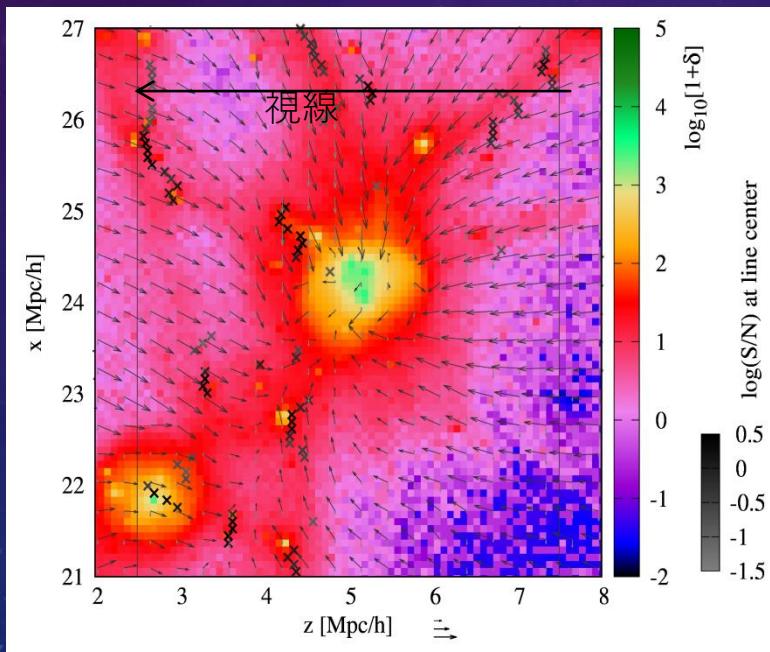
比較 : ケース(A)

## 6. 一様ガス雲モデルの疑似スペクトル計算

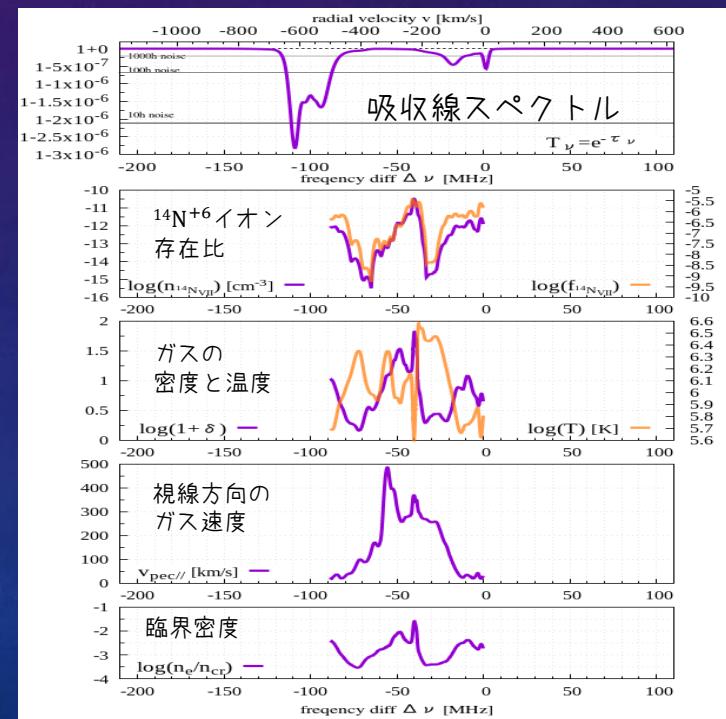
### ▶ 結果：ケース(B) 明るい天体を背景光源とする場合

- 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線の擬似観測結果

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



# 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かかりやすく、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。