

# ガンマ線バーストのX線残光を用いた 天の川銀河の星間ガスの評価

小山 恭弘 (広島大学)

水野恒史、深沢泰司、大野雅功 (広島大学)

奥村暁、田島宏康、林克洋、山本宏昭 (名古屋大学)

銀河内には様々な物質がある。

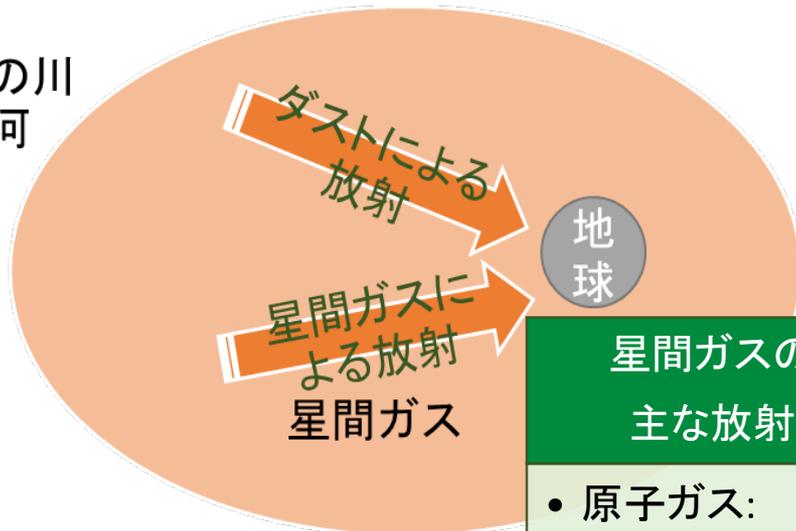
星間物質の一種である星間ガスは星の素であり重要である。また、銀河系外から来る光を吸収し自身も放射を行っている



銀河系内の構造や進化を知るにも、  
銀河系外の天体を解析する上でも重要になってくる

星間ガスは特徴的な波長で輝線を放出  
主に電波観測で分布が調べられてきた

天の川  
銀河



地球

星間ガスの  
主な放射

- 原子ガス:  
水素21cm線
- 分子ガス:  
CO2.6mm線

しかし

従来の原子・分子の輝線を観測  
する方法では多くのガスが  
見逃されていた。(ダークガス)

(Grenier et al. 2005)

星間ガスとよく混在している  
ダストの放射を用いてガスの分  
布を調べるのが可能だが、  
ダストの性質に依存し、手法が  
確立していない

(Planck collaboration 2014, Fukui et al. 2014, 2015)

そこで

単純な冪型のスペクトルをしているガンマ線バーストのX線スペクトル  
を用いて減光量から吸収量を推定し、吸収量から  
ガスの分布を推定する(電波・赤外線観測と独立な評価)

先行研究:(Willingale et al. 2013)

## 本研究の 目的

# ガンマ線バーストのX線残光の吸収を用いて 天の川銀河の星間ガスの密度・分布を評価する

ダスト-ガス比は一定(ダストの柱密度はガスの柱密度に比例)を仮定する

## X線残光を用いることの

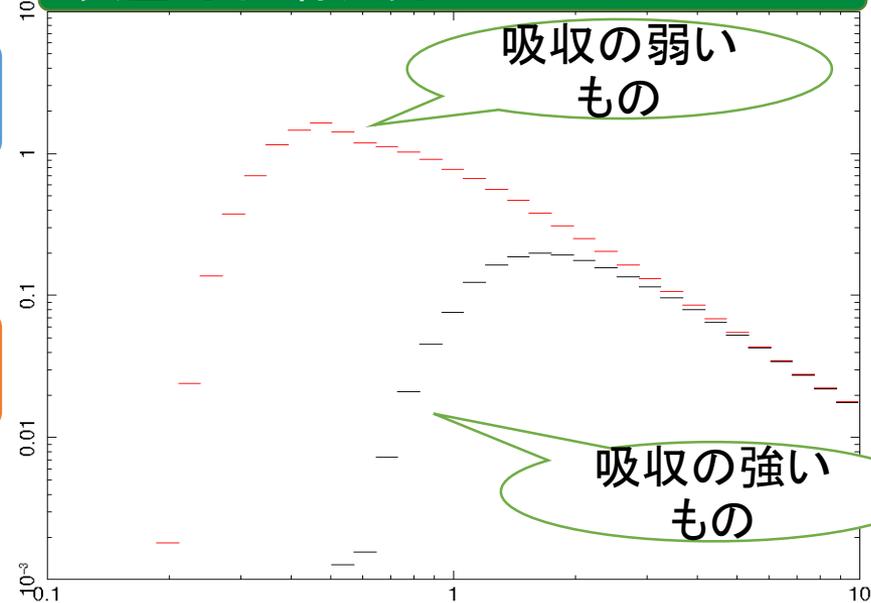
### 長所

- 単純なモデルで表すことが出来る
- ガスの状態に依存せず分布がわかる

### 短所

- 到来方向しか情報が得られない
- 原子・分子の区別が出来ない

### 典型的なX線残光のスペクトルモデル



koyama 6-Sep-2017 14:55

X線残光を用いることで、ガスの状態にあまり依存せずに  
到来方向のガスの密度・分布を推定できる。(他の方法と相補的)

## 手法

他の波長によるガスの密度の指標とX線の吸収量を比較し、適切な指標を探る。

## ガスの柱密度の評価方法

視線方向のガス密度  
→水素柱密度 $n_{\text{H}}$  [ $\text{cm}^{-2}$ ]で表す

galacticな  
ガス密度  
の推定値



intrinsicな  
ガス密度  
の推定値



全ガス  
密度

$n_{\text{H,g}}$   
指標

$n_{\text{H,i}}$

$n_{\text{H,tot}}$   
解析

$n_{\text{H,g}}$ と $n_{\text{H,i}}$ は物理的に無関係



顕著な**相関があれば**  
 $n_{\text{H,g}}$ の見積りは**不正確**

## 解析条件

使用した  
データ

- Swift衛星のPCモード  
(2016年分まで)
- 1027GRB

Fit  
モデル

- TBabs\*powerlaw
- 水素分子を含めて  
星間吸収を考慮

先行研究(Willingale et al. 2013)と同様

Group化することで吸収が濃くイベント数の少ないものを取り込み、GRBの個性を消す。

さらに、銀緯の低い部分ではいろいろな距離の領域が混ざる可能性があるため**銀緯15度**で分けて考えた。

水素 21cm線  
( $W_{\text{HI}}$ )

- Leiden/Argenitne/Bonn HI Survey (通称LABサーベイ)を使用

(Kalberla et al. 2005)

CO 2.6mm線  
( $W_{\text{CO}}$ )

- CfAのCOサーベイを使用

LATチーム内MAP (領域が広い)

(Dame et al. 2001)

$\tau_{353}$   
radiance

- Planck衛星のダストモデルマップを使用。  
 $\tau_{353}$ は353GHzの光学的厚み  
radianceは赤外線的全波長の積分強度

(Planck Collaboration 2014)

# 評価までの流れ

$n_{H,tot}$ を求める

- データをグループ分けし、グループ内で足し合わせたスペクトルから $n_{H,tot}$ を求める

解析で得られたガス密度

例: あるグループ解析の結果  $n_{H,tot}$  が 1.98 と求まる

$n_{H,g}$ を求める

- 天の川銀河のガス密度の指標を用いて $n_{H,g}$ を求める

galacticなガス密度の推定値

例: 21cm線の指標で $n_{H,g}$ が0.80と求まる

$n_{H,i}$ を求める

- 上で求めた値から $n_{H,i}$ を求める

intrinsicなガス密度の推定値

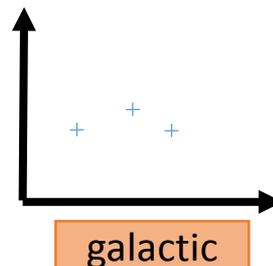
例: 上2つの結果より $n_{H,i}$ が1.18と求まる

評価

- $n_{H,g}$ と $n_{H,i}$ で相関を取り、指標の良し悪しを評価する。

例: プロットとしては(0.8, 1.18)となる。

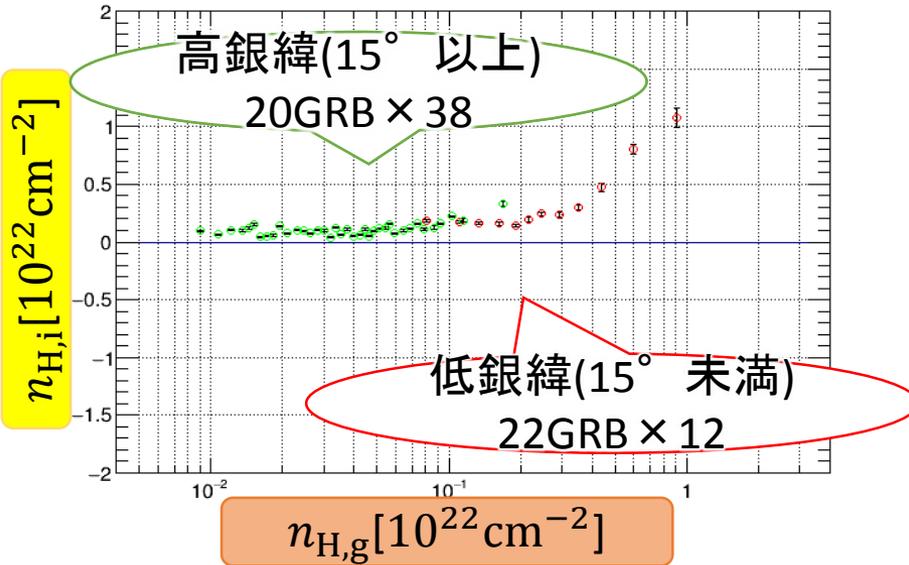
intrinsic



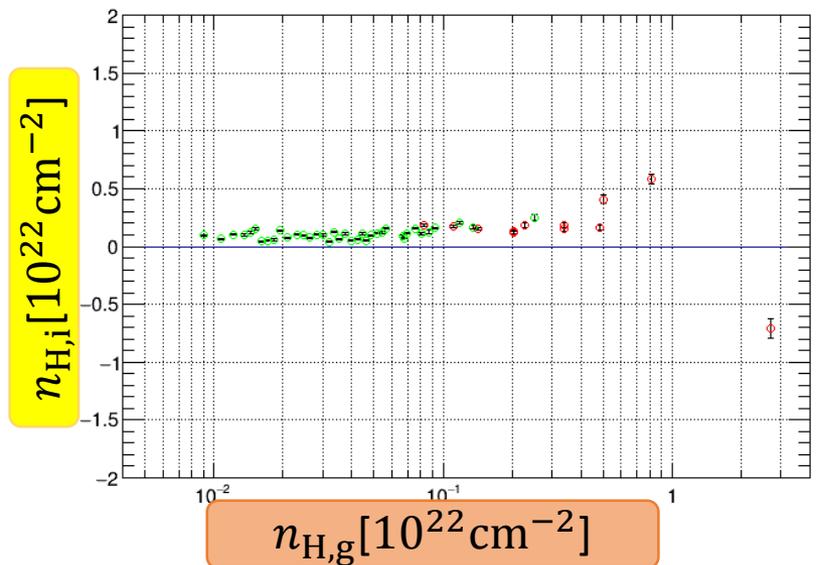
galactic

# 7 水素21cm線とCO2.6mm線で求めた柱密度

$W_{HI}$ で求めた相関



$W_{HI}$ と $W_{CO}$ で求めた相関  $n_{H,g}(X_{CO} = 1.5)$



## HI 21cm線 ( $W_{HI}$ )

- 高銀緯側は正しく見えるが、低銀緯側で右肩上がり(過小評価)の傾向

## HI 21cm線+CO2.6mm線 ( $W_{HI}$ と $W_{CO}$ )

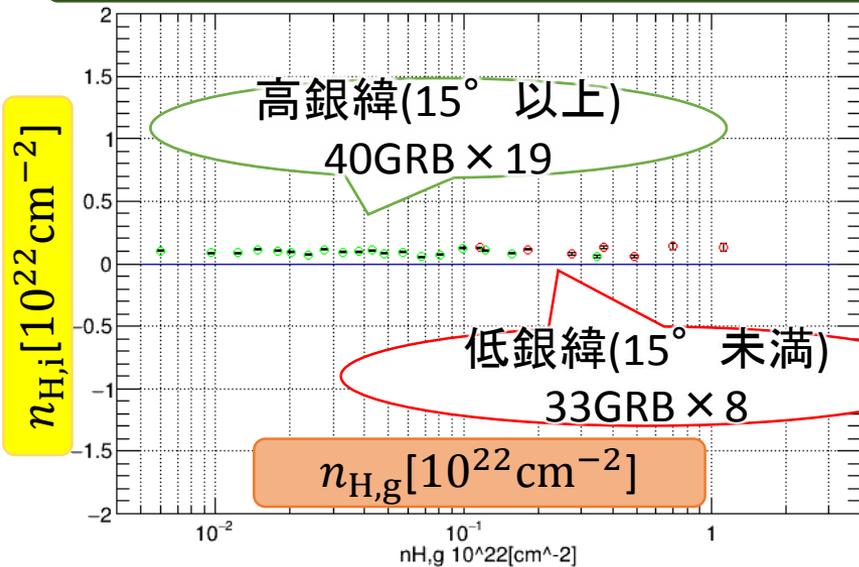
- H21cm線の評価より過小評価が緩和(ガスの見逃しが少なくなった)がまだ不十分
- 最も $n_{H,g}$ が大きいグループでは逆に過大評価

単純に21cm線や2.6mm線だけではガスを見逃していることを確認

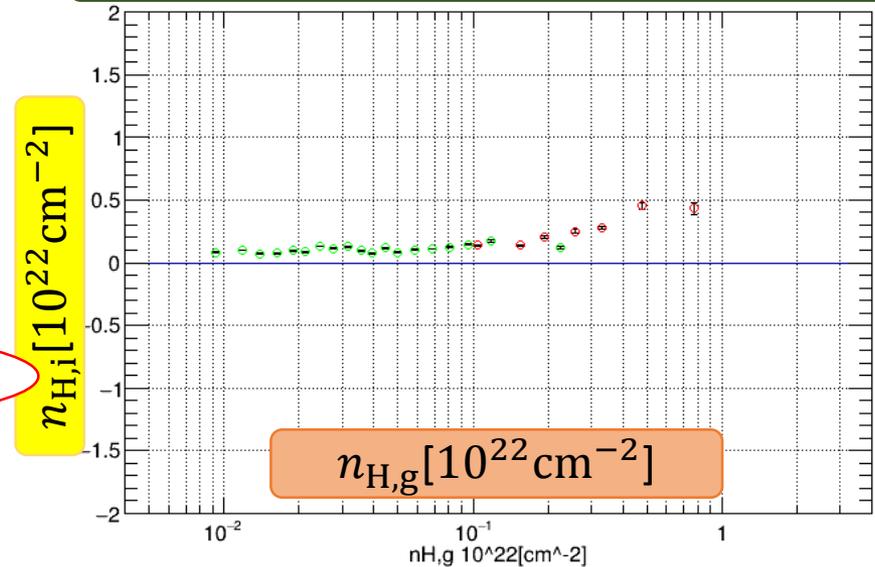
# 8 ダストの指標を用いて求めた水素柱密度

光学的に薄い部分(強度: 20~200[K·km/s])でダスト強度が21cmの強度に比例していると仮定し比例係数を導出 ⇒  $n_{H,g}$ に変換

$\tau_{353}$ で求めた相関



*radiance*で求めた相関



$\tau_{353}$

比例係数

$$\frac{W_{HI}}{\tau_{353}}$$

$$= 67.11 \pm 0.11 \times 10^6 [\text{K} \cdot \text{km/s}]$$

- 顕著な相関が無く良い見積り( $1 \sim 3 \times 10^{22} \text{cm}^{-2}$ の部分で過大評価)

*radiance*

比例係数

$$\frac{W_{HI}}{\text{radiance}}$$

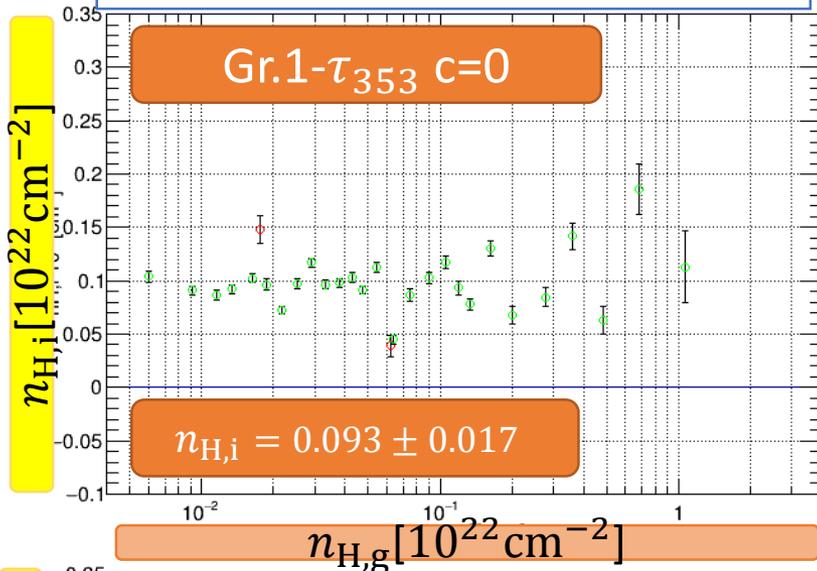
$$= 19.6 \pm 0.2 \times 10^8 [(\text{K} \cdot \text{km/s})(\text{W}/\text{m}^2/\text{sr})^{-1}]$$

- $10^{21} \text{cm}^{-2}$ より濃い部分で右肩上がりとなっており $n_{H,g}$ を過小評価

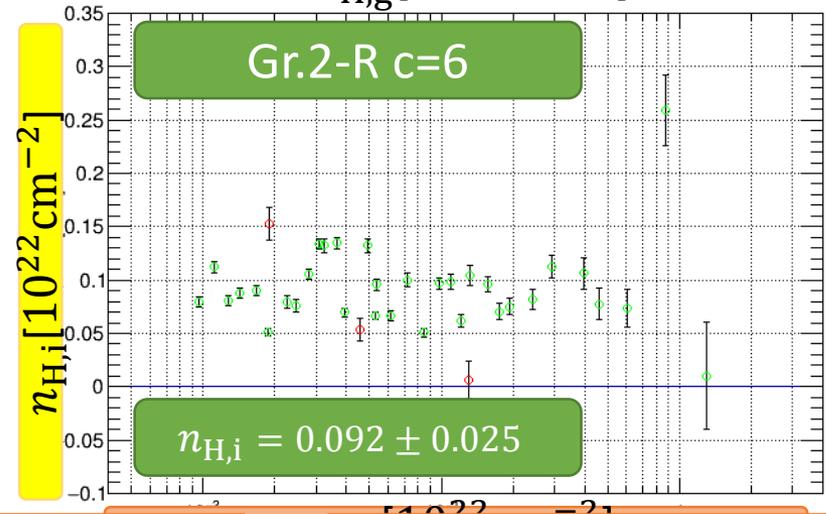
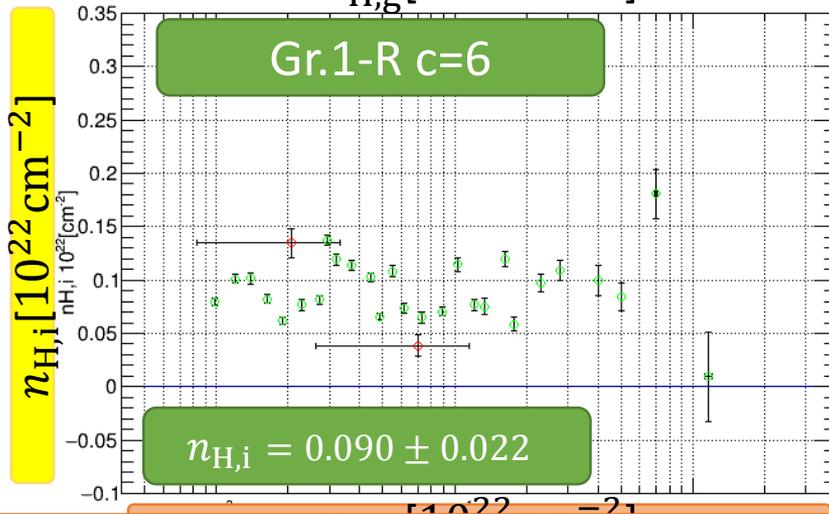
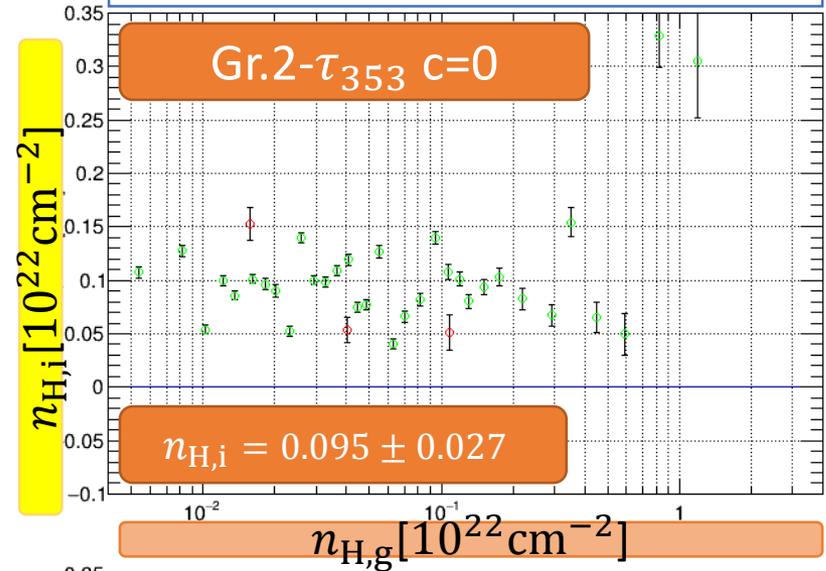
# グルーピングを変化

$n_{H,i}$ の値はLong-GRBで $10^{21} [cm^{-2}]$ 以下の平均と分散の値とした

Gr.1: 29GRB × 27+32GRB:28Group



Gr.2: 24GRB × 33+23GRB:34Group



グルーピングによって偶然ばらつきが小さくなることもある



小さいほどいい訳では無い

# 10 よりよく星間ガスを表すために

## 温度補正

$\tau_{353}$  やradiance(ダスト)は、**温度依存性**が原理的に考えられる。

$\tau_{353}$

- Planckのダストモデルには $T_d - \beta$ 依存性

radiance

- ダストが濃いところ(一般にダスト温度が低い)では星間光の吸収

$$n_{H,g} = n_{H,D} * \{1 + (0.05 * c * (20.5 - T_D))\}$$

経験式 (Mizuno et al. 2016) (Dは $\tau_{353}$  及びradiance)

- 指標ごとに $W_{HI}$ を計算し強度の強い順にグループ化後に補正掛け
- cについてはc=0・2・4・6のグリッドサーチで良し悪しを出す。
- ガス温度が低くなればなるほどガスが濃く見積る様に補正

ダスト温度に依存⇒**ダスト温度で補正**

## イベントの選別

イベントは起源の違うものやいろいろな距離のガスが混じってしまう可能性があるためイベントの選別を行うべきである。ここで切り分けの指標として以下のものを使う。

$T_{90}$

- GRBの継続時間を表す指標
- Short/Long GRBの区別を2秒で行っている

$W_{CO}(\text{Dame})$

- CO分子は水素分子と存在するため、水素分子の指標となる

High Velocity Cloud(HVC)

- 高銀緯にある高速度のガス雲が $n_{H,g}$ に影響を与えるため

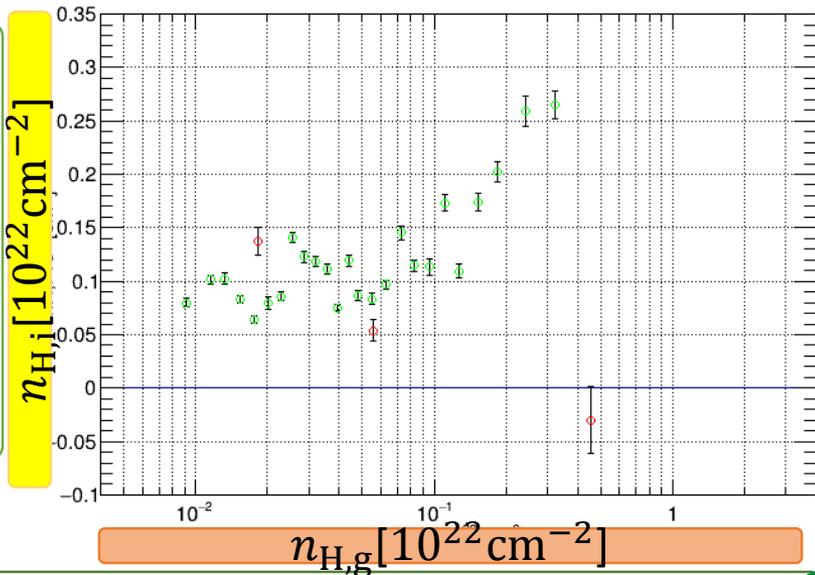
Galactic latitude

- 中心部分の複数の距離を見ることになる領域を外すため

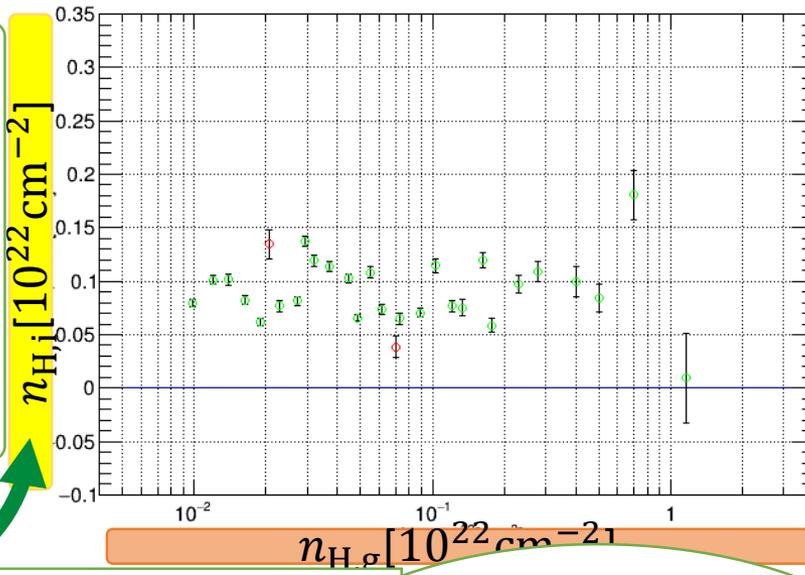
最終的には全てでスレッシュホールドを考える

# 補正・選別 (radiance を一例に)

補正前



選別前

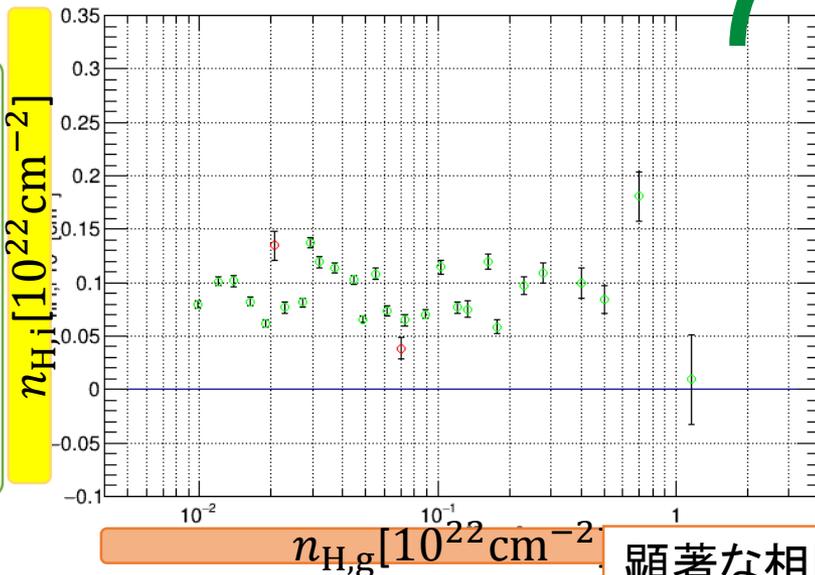


温度補正 ( $n_{H,g} = n_{H,D} * \{1 + (0.05 * c * (20.5 - T_D))\}$ )

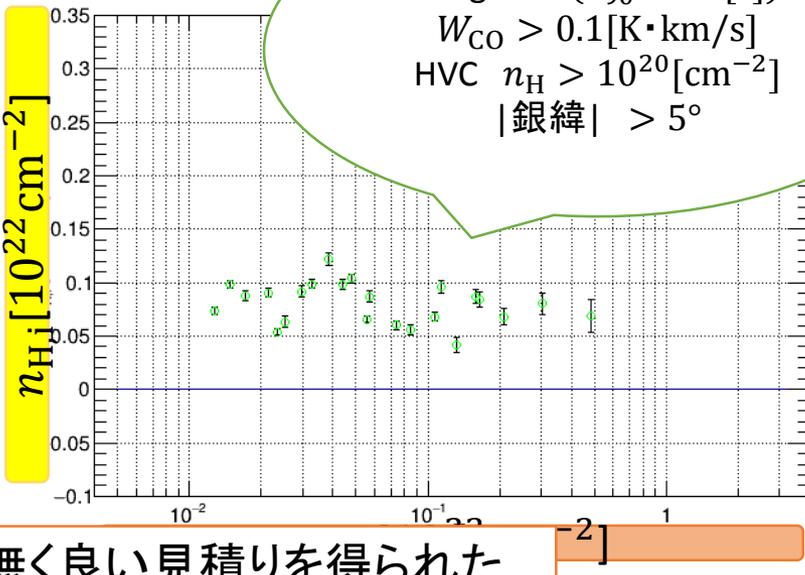
イベントの選別

Long GRB ( $T_{90} > 2.0[s]$ )  
 $W_{CO} > 0.1[K \cdot km/s]$   
 HVC  $n_H > 10^{20}[cm^{-2}]$   
 |銀緯|  $> 5^\circ$

補正後



選別後



顕著な相関が無く良い見積りを得られた

GRBのX線残光の吸収を用いて天の川銀河のガス柱密度の指標の評価を $n_{H,g}$ と $n_{H,i}$ の相関をとることで行った。

- ガスからの典型的な輝線である21cm線や2.6mm線を用いただけではガスの見逃しがあることが確認できた。
- ダストの指標 (Planck  $\tau_{353} \cdot radiance$ ) を用いてガスの柱密度を求めて相関をとり、ダスト温度での補正による影響も調査した。
- Group化の仕方によって誤差が変わるため、もともとの母銀河のばらつきより小さくはならないことがわかった。
- 母銀河の $n_{H,i}$ は $8 \sim 10 \times 10^{20} \text{ cm}^{-2}$ であり母銀河の $n_{H,i}$ のばらつきより小さな系統的な誤差は検地できない問題もある。

### 今後

- イベント選別の最適化を行う
- 指標の良し悪しの評価方法の確立
- ダスト-ガス密度変換の係数の不定性の評価

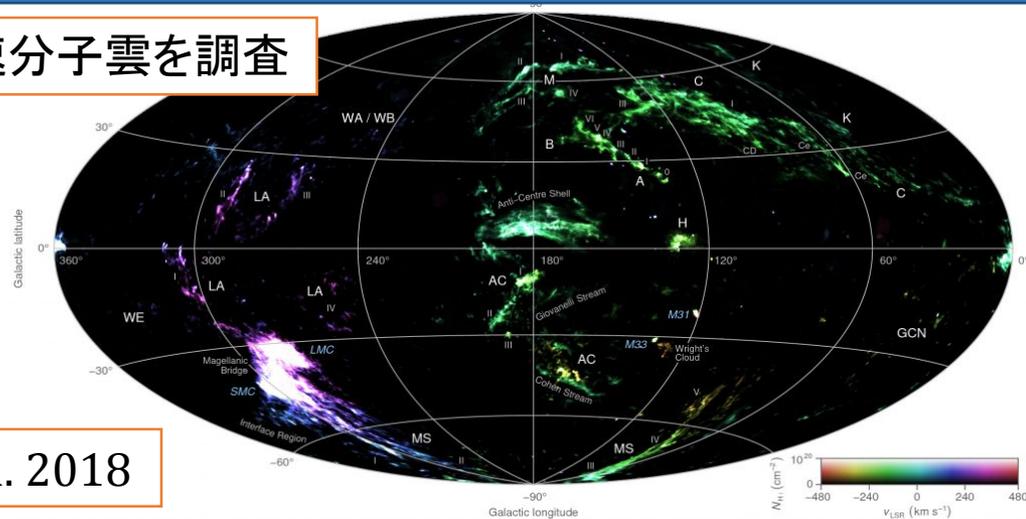


高銀緯に $W_{\text{HI}}$ が高い領域があるため高速分子雲を調査

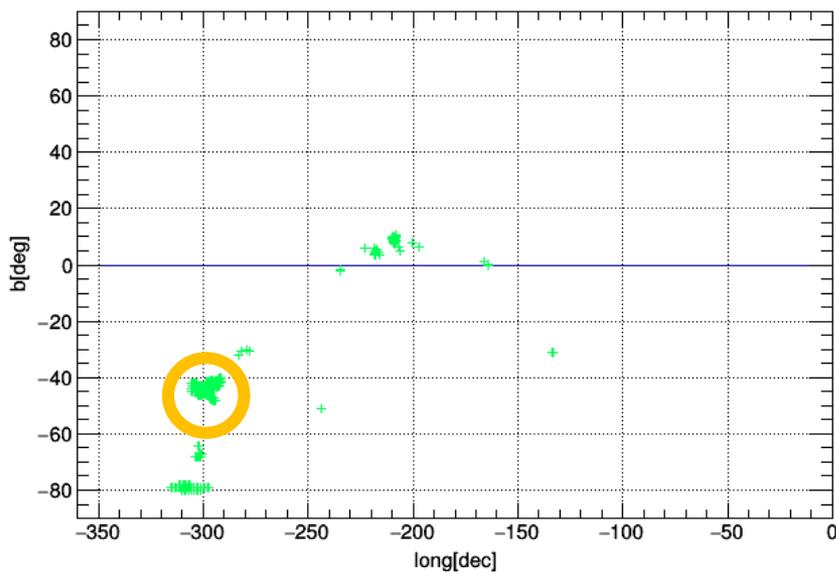
高速度雲は中性or電離した ガス雲であり、天の川銀河近傍に存在している。

ディスクの回転と一致しない速度を持ったガス雲

参考論文:MNRAS474 Westmeier et al. 2018



High- $W_{\text{HI}}(>200)$  Low-radiance/ $W_{\text{HI}}(<0.02)$



## HVCのデータダウンロード

- データは (An all-sky map of high-velocity clouds) を参照
- 上記論文からリンクで辿れる

## HVCの $n_{\text{H}}$ が $10^{20} [\text{cm}^{-2}]$ 以上の領域を抜き出す

- 前回の $W_{\text{HI}}$ のはみ出ている点とほぼ同様の領域である。
- この領域は $W_{\text{HI}}$ に比べてダストが少ないため過小評価の恐れがあるため注意

$\tau_{353}$  やradianceは、ダスト**温度依存性**が原理的に考えられる。

$\tau_{353}$

- Planckのダストモデルには $T_d - \beta$ 依存性

radiance

- ダストが濃いところ(一般にダスト温度が低い)では星間光の吸収

ダスト温度に依存するため

ダスト温度で補正

$$n_{H,g} = n_{H,D} * \{1 + (0.05 * c * (20.5 - T_D))\} \quad (Dは\tau_{353}及びradiance)$$

- 指標ごとに $W_{HI}$ を計算し強度の強い順にグループ化後に補正掛け
- cについてはc=0・2・4・6のグリッドサーチで良し悪しを出す。
- ガス温度が低くなればなるほどガスが濃く見積る様に補正

## Short-Long GRB を分離した補正

Short GRBとLong GRBは発生機構が違うため原理的に分けないといけない可能性がある。

Long GRB

- 巨星の超新星の崩壊が起源

Use data : 816/881

Short GRB

- コンパクト星同士の合体が起源

Use data : 65/881

ホスト銀河の $n_{H,i}$ が系統的に違う可能性がある。

Lost data : 146/1027

イベントは銀河面やHVCから飛んでくるものもあり、他の星間ガスとどのように考えられないため、イベントの選別を行うべきである。ここで切り分けの指標として以下のものを使う。

WCO(Deem)

•CO分子は水素分子と存在するため、ダークガスの指標となる

High Velocity Cloud

•高銀緯にあるガス雲が $n_{\text{H,g}}$  に影響を与えるため

Galactic latitude

•中心部分の距離の違う領域を外すため

それぞれの指標で  
切ることで  
どの領域を除くこと  
になるか調査する。

最終的には全てを使って切ることになるのだが  
切りすぎることが無いようにするため1つ1つ見ていく。

 $W_{\text{CO}}$ 

•  $0.2[\text{K}\cdot\text{km/s}]$ でカット

HVC

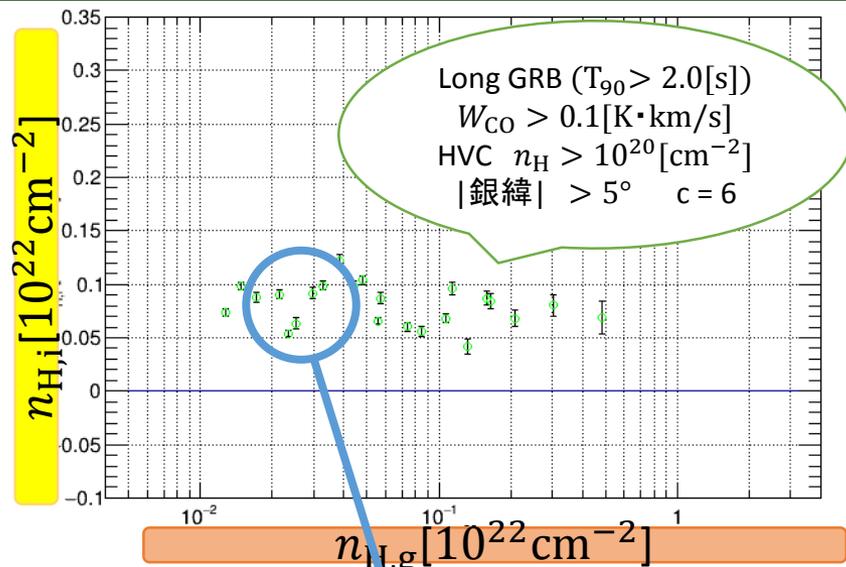
•  $10^{20}[\text{cm}^{-2}]$ でカット

glat

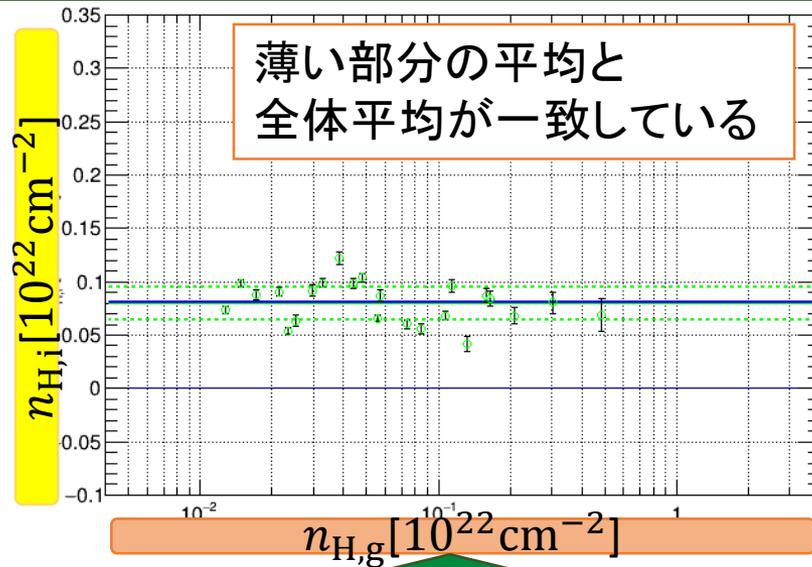
• とりあえず15度でカット

Long GRBのみで解析  
は行っている

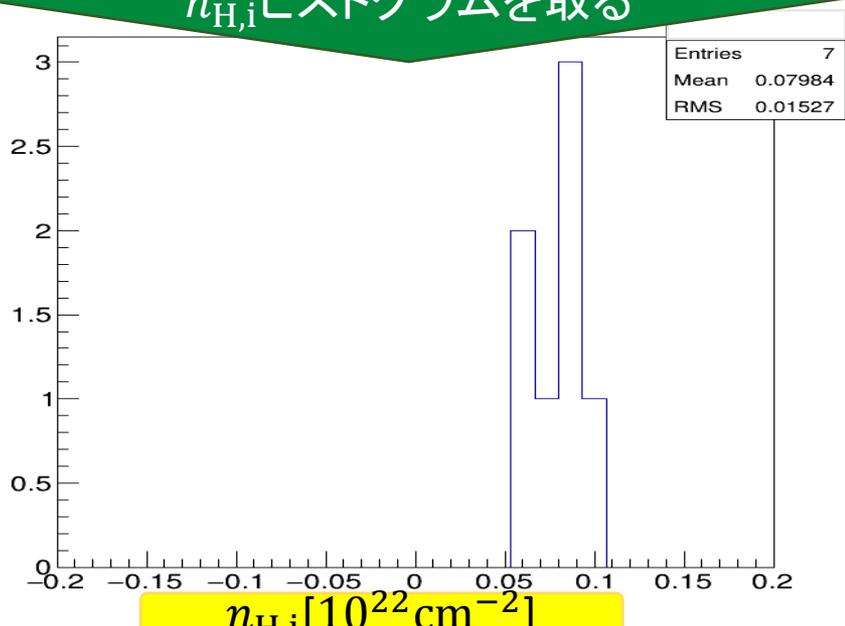
# 12 今考えている評価方法 (radiance を一例に)



平均付き相関図



薄い部分と全体で  
 $n_{H,i}$ ヒストグラムを取る



薄い部分の平均と分散、  
全体の平均を返す

