

An ALMA Early Science survey of molecular absorption lines toward PKS 1830-211

S. Muller et al. 2014, A&A, 566, A112
(<http://arxiv.org/abs/1404.7667>)

Journal Club 2015. 05. 20.
Ryo Ando (IoA)

Abstract

We present the first results of an ALMA spectral survey of strong absorption lines for common interstellar species in the $z=0.89$ molecular absorber toward the lensed blazar PKS 1830–211. The dataset brings essential information on the structure and composition of the absorbing gas in the foreground galaxy. In particular, we find absorption over large velocity intervals ($\gtrsim 100 \text{ km s}^{-1}$) toward both lensed images of the blazar. This suggests either that the galaxy inclination is intermediate and that we sample velocity gradients or streaming motions in the disk plane, that the molecular gas has a large vertical distribution or extraplanar components, or that the absorber is not a simple spiral galaxy but might be a merger system. The number of detected species is now reaching a total of 42 different species plus 14 different rare isotopologues toward the SW image, and 14 species toward the NE line-of-sight. The abundances of CH, H₂O, HCO⁺, HCN, and NH₃ relative to H₂ are found to be comparable to those in the Galactic diffuse medium. Of all the lines detected so far toward PKS 1830–211, the ground-state line of ortho-water has the deepest absorption. We argue that ground-state lines of water have the best potential for detecting diffuse molecular gas in absorption at high redshift.

- 重力レンズ天体 PKS 1830-211 方向の遠方吸収線系 ($z = 0.89$ の銀河) について、ALMA を用いた spectral survey を行った
- レンズ像は2つ (NE, SW) に分離しており、両者の速度成分は 100 km/s 以上ずれている
 - absorber の銀河の速度勾配か銀河面内の streaming motion?
 - 分子ガスが垂直方向に広く分布?
 - merger system?
- NE 方向で 42 種、SW 方向で 14 種の分子を検出し、その abundance は銀河系内の diffuse medium に似ている
- 最も深い吸収があったのは ortho-water の基底状態
 - 遠方吸収線系において、水の基底状態の吸収線は diffuse molecular gas を検出する指標になりうる

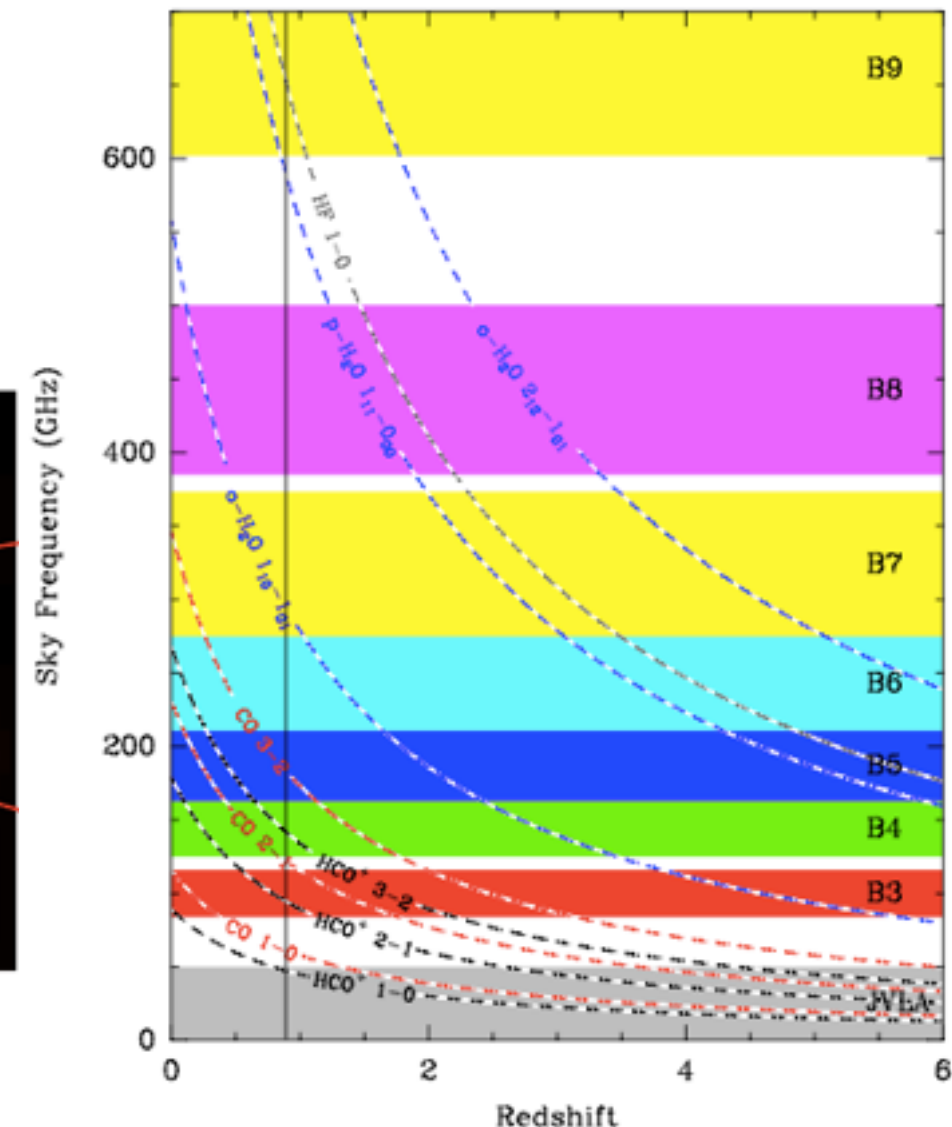
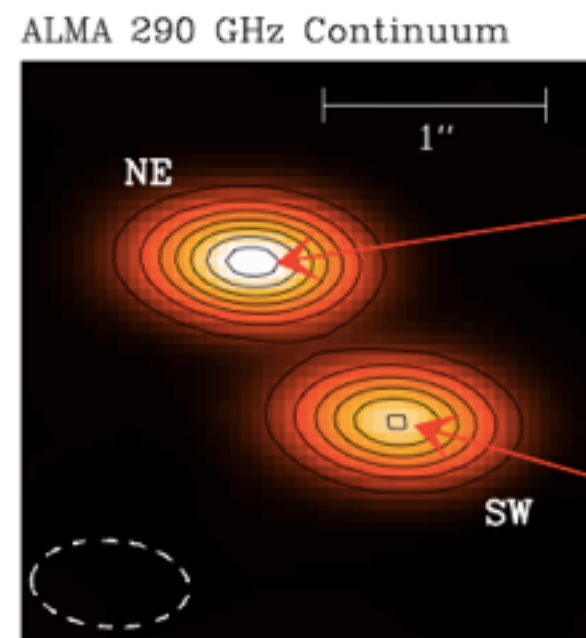
I. Introduction

- 明るい背景光源の視線方向に見られる吸収線 (分子吸収線系):

ISMの組成を調べる上での強力な観測対象

- 吸収線は遠方でもdiluteされない (背景光源の明るさのみで決まる)
- 遠方でのCMB温度を z の関数として測定
- 基本定数 (e.g. 微細構造定数, 陽子電子質量比) の宇宙論的変動
- 異なる z での同位体比の比較から、元素合成のenrichmentも調べられる
- 系内や近傍では大気の窓に入らない分子も検出可能

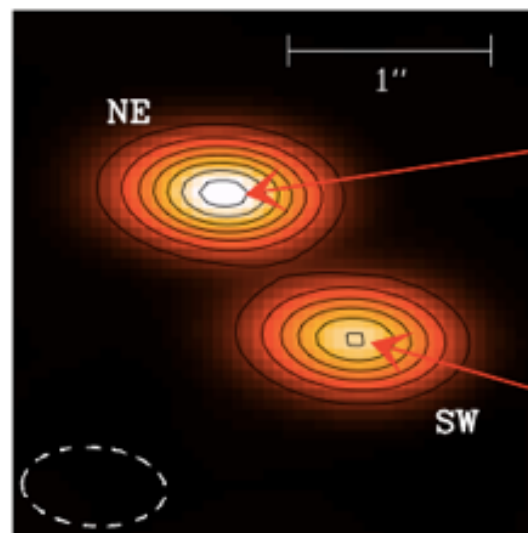
- PKS 1830-211: $z = 2.5$ の blazer



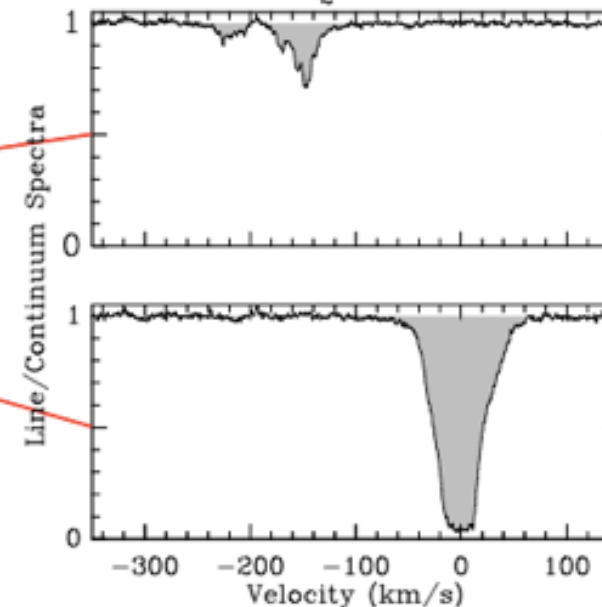
I. Introduction

- ALMAの高感度・高分解能
 - PKS 1830-211方向の2つの視線方向で、吸収線の構造を明らかにする
 - CO, H₂O, CH, HCO⁺, HCN, NH₃などの主要分子の深い吸収をターゲットにする
 - 同時観測できるその他の分子も検出することを期待
- 本サーベイの目的
 1. 吸収線の構造・速度成分を分解し、line profileの高いS/Nを得る
 2. absorbing gasの化学的性質を探る: Galactic diffuse cloudと似ているのか? 速度成分ごとに化学的性質は異なるのか?
 3. 吸収線のprofileの時間変動を調べる
 4. 先行研究でカバーしていない波長帯で新たな分子を検出
 5. 基本定数の宇宙論的変動を制限
 6. 約70億年前の同位体比を測定
- 本論文では1.~4.を議論

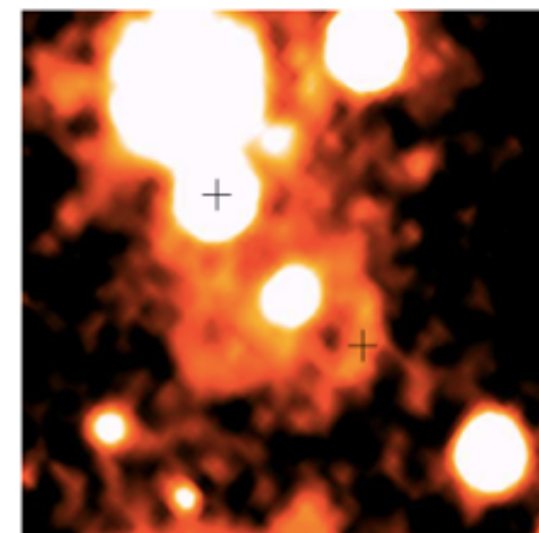
ALMA 290 GHz Continuum



557 GHz o-H₂O line

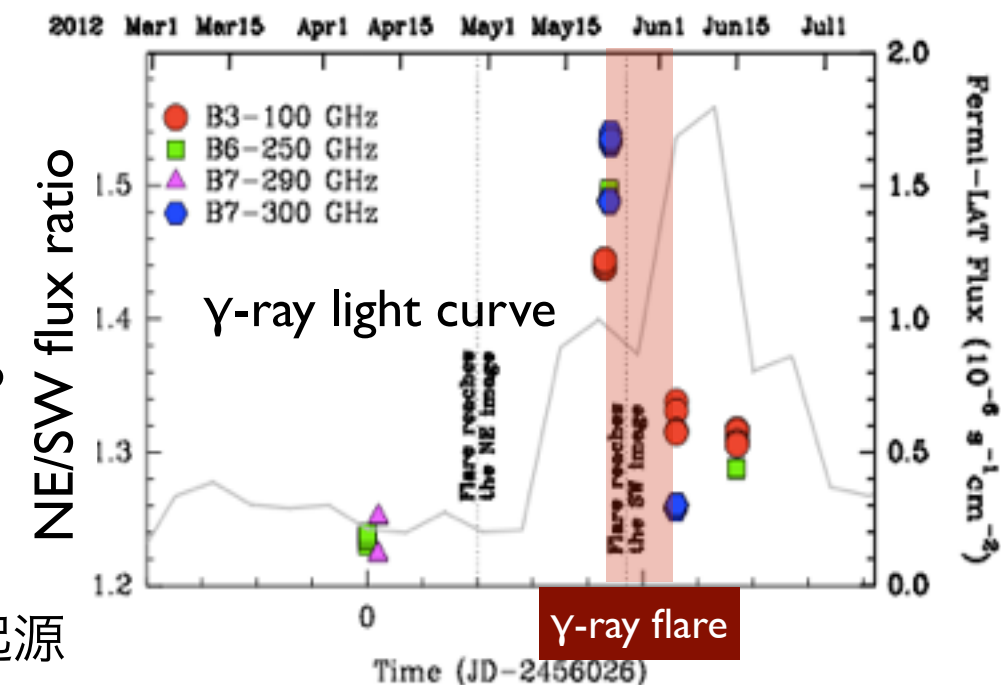
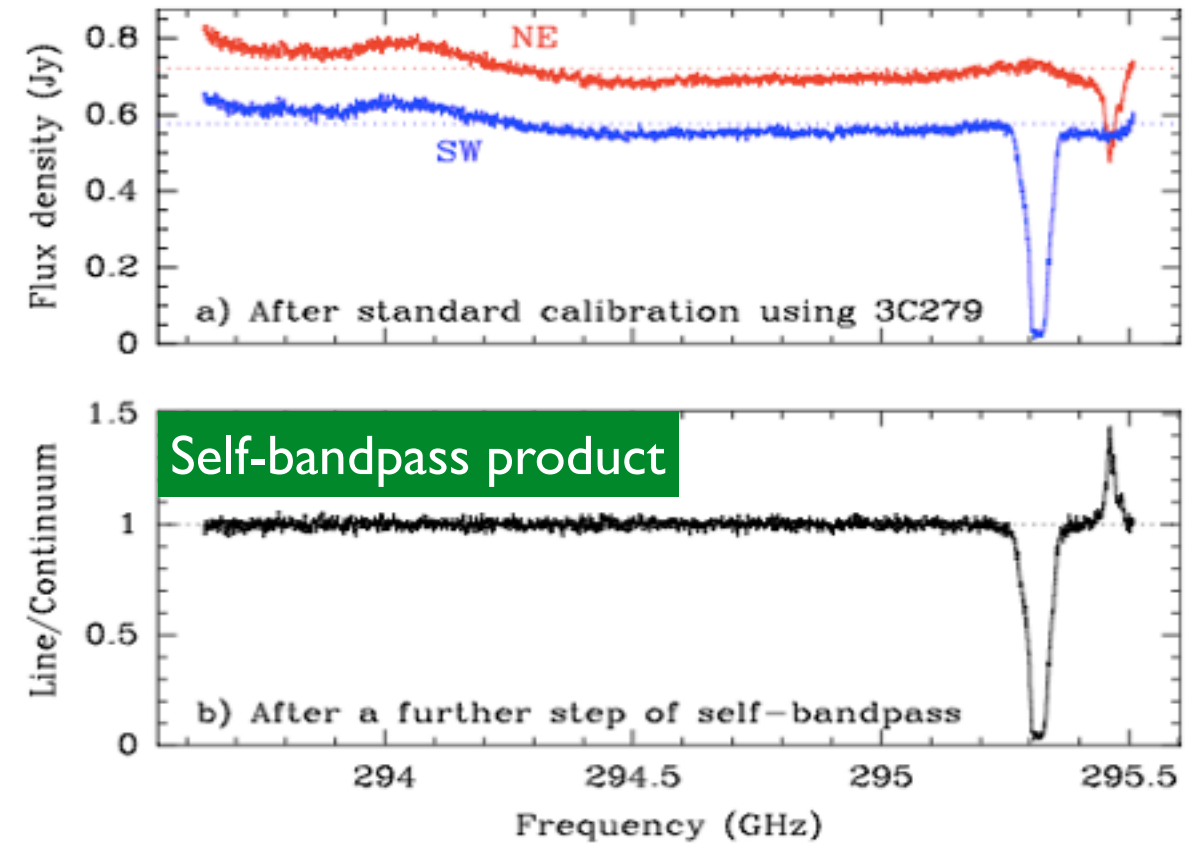


HST I band



2. Observation and data reduction

- ALMA Cycle 0 (2012. April ~ June)
- 4 tunings
 - 100 GHz (B3), 250 GHz (B6), 290 GHz, 300 GHz (B7)
 - spw width: 1.875 GHz
 - 0.488 MHz width $\times$ 3840 channels
 - beam size $\sim 0.5''$ (B6, B7), $2''$ (B3)
- bandpassにresidual rippleが見られる $\rightarrow$ “self-bandpass”
 - NE/SW image (点源と見なせる) の片方をbandpassに用いる
 - 両方の吸収線が入ってしまうが、bandpass residualを除去できる
- 観測期間中に、背景のblazerで強力な γ 線フレアが起こる
 - NE/SW flux ratioに急激な変動: γ 線の活動と一致 $\rightarrow$ γ 線フレア起源
 - 異なる時期のvisibility setsを合成できない代わりに平均 (吸収線に時間変動の影響がないことは確認)



3. Inventory of species

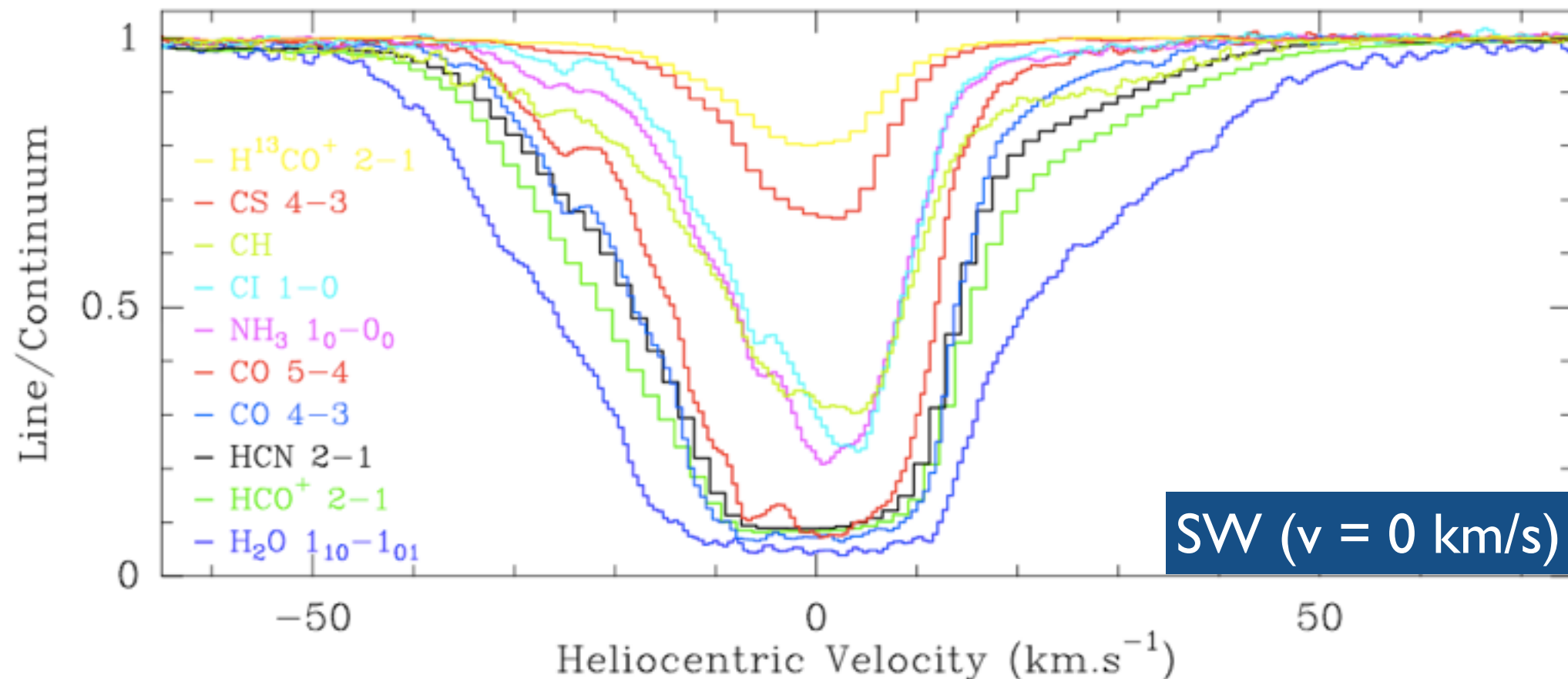
- ATCA 7mm spectral scanによって、PKS 1830-211 SWでの分子種の検出数は圧倒的に増加 (Muller+11)
 - 平均して4 lines / GHz
- SWではALMAによりCH, H₂Cl⁺, NH₂が検出され合計42種に / 14種の同位体種も検出
- NEでは合計14種 (ALMAではC, CH, CO, H₂O, H₂Cl⁺, NH₂がnew-detection)
- 30 GHz の帯域中27の吸収線種を検出 (1 line / GHz, Band 3に限れば 2 lines / GHz)

<i>Toward the SW image</i>	
1 atom	H ^(d) , C ⁽ⁱⁿ⁾
2 atoms	CH ⁽ⁿ⁾ , OH ^(d) , CO ^(bcin) , ¹³ CO ⁽ⁿ⁾ , CS ^(afn) , C ³⁴ S ^(f) , SiO ^(jkmn) , ²⁹ SiO ^(km) , ³⁰ SiO ^(m) , NS ^(k) , SO ^(kmn) , SO ⁺ ^(k)
3 atoms	<u>NH₂</u> ⁽ⁿ⁾ , H ₂ O ^(hn) , <u>H₂¹⁷O</u> ⁽ⁿ⁾ , C ₂ H ^(ekmn) , HCN ^(aefkmn) , H ¹³ CN ^(efkmn) , HC ¹⁵ N ^(fkmn) , HNC ^(aefkm) , HN ¹³ C ^(efkmn) , H ¹⁵ NC ^(fkmn) , N ₂ H ⁺ ^(ak) , HCO ⁺ ^(aefkmn) , H ¹³ CO ⁺ ^(aefkmn) , HC ¹⁸ O ⁺ ^(fkm) , HC ¹⁷ O ⁺ ^(fkmn) , HCO ^(kmn) , HOC ⁺ ^(kmn) , H ₂ S ^(f) , H ₂ ³⁴ S ^(f) , <u>H₂Cl⁺</u> ⁽ⁿ⁾ , <u>H₂³⁷Cl⁺</u> ⁽ⁿ⁾ , HCS ⁺ ^(m) , C ₂ S ^(k)
4 atoms	NH ₃ ^(ghn) , H ₂ CO ^(cek) , l-C ₃ H ^(k) , HNCO ^(km) , HOCO ⁺ ^(m) , H ₂ CS ^(k)
5 atoms	CH ₂ NH ^(kmn) , c-C ₃ H ₂ ^(ekm) , l-C ₃ H ₂ ^(k) , H ₂ CCN ^(k) , H ₂ CCO ^(k) , C ₄ H ^(k) , HC ₃ N ^(ejkm)
6 atoms	CH ₃ OH ^(kln) , CH ₃ CN ^(km) , NH ₂ CHO ^(m)
7 atoms	CH ₃ NH ₂ ^(km) , CH ₃ C ₂ H ^(km) , CH ₃ CHO ^(k)
<i>Toward the NE image</i>	
1 atom	H ^(d) , C ⁽ⁿ⁾
2 atoms	CH ⁽ⁿ⁾ , OH ^(d) , CO ⁽ⁿ⁾
3 atoms	H₂O ⁽ⁿ⁾ , C ₂ H ^(kn) , HCN ^(fkmn) , HNC ^(fk) , HCO ⁺ ^(cfkmn) , <u>H₂Cl⁺</u> ⁽ⁿ⁾
4 atoms	NH₃ ⁽ⁿ⁾ , H ₂ CO ^(k)
5 atoms	c-C ₃ H ₂ ^(k)

Bold: first detection in PKS 1830-211
Underline: first extragalactic detection

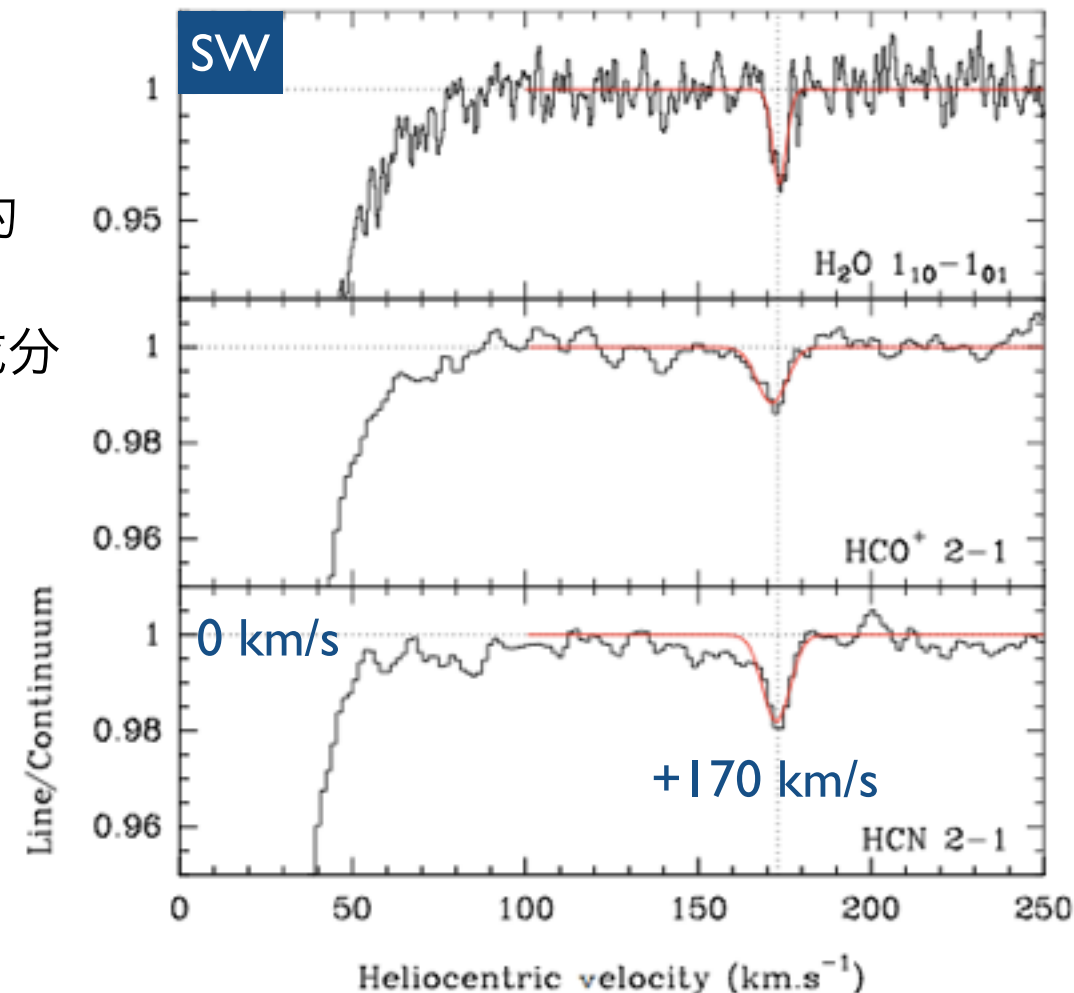
4. Analysis of absorption line profiles

- 吸収線の深さと continuum level から、 τ と column density を導出
- 極性分子 (観測対象のうち CO, CI 以外) は、励起は輻射的に CMB photon と強く couple している
 - $T_{\text{rot}} \sim T_{\text{CMB}} = 5.14 \text{ K}$ ($z = 0.89$)
- CO, CI については、励起は subthermal だが、衝突励起により T_{rot} が上昇
 - $T_{\text{CMB}} < T_{\text{rot}} < T_{\text{kin}} (\sim 80 \text{ K})$
- Non-LTE analysis (RADEX) $\rightarrow$ NE の吸収体は SW よりずっと diffuse



4.1. Velocity components

- 従来から 0 km/s (SW), -147 km/s (NE)は知られていた
- ATCA (Muller+11) では -300 km/s, -224 km/s, +170 km/sの速度成分を検出
- ALMAでは、SWで 0 km/s (very broad), +170 km/sを検出 (H_2O , HCO^+ , HCN)
 - 吸収体の銀河がface-onだとすると特異的 (5.1.で議論)
 - H_2 column density $\sim 3\text{--}4 \times 10^{19} \text{ cm}^{-2}$ (Galactic diffuse component の典型的なabundanceを仮定)
 - +170 km/s の成分は、HI absorptionでの対応物がない
 - HI column density $< 10^{19} \text{ cm}^{-2} \rightarrow$ この成分は分子が支配的
- NEでは -224 km/s に加え、-240 ~ -120 km/s の間に多数の速度成分を検出 (H_2O)
- -300 km/s の成分はSW/NEともにnon-detection
 - ATCAで検出した成分 (HCO^+ (1-0), HCN(1-0)) はspurious?
 - 吸収線強度がATCA観測時 (2010年) より弱まった?



4.2. The absorption along the SW line-of-sight

4.2.1. Saturation and continuum source covering factor

- SWでの強い吸収 (saturateしている) も、continuum emissionを完全に打ち消すほどではない

- 吸収体のcloudsはSW continuum sourceの全体を覆っているわけではない

- saturateしている箇所の吸収の深さ: $\sim 95\%$ (H_2O), $\sim 91\%$ (HCO^+ , HCN)

→ source covering factor f_c の指標

- 分子種ごとに f_c が異なる?

- $1/f_c \sim \text{continuum emission の角径} / \text{absorbing clouds の角径}$

- cm波帯 (VLBI) ではcontinuum size $\propto v^{-2}$: 吸収体の星間プラズマの影響

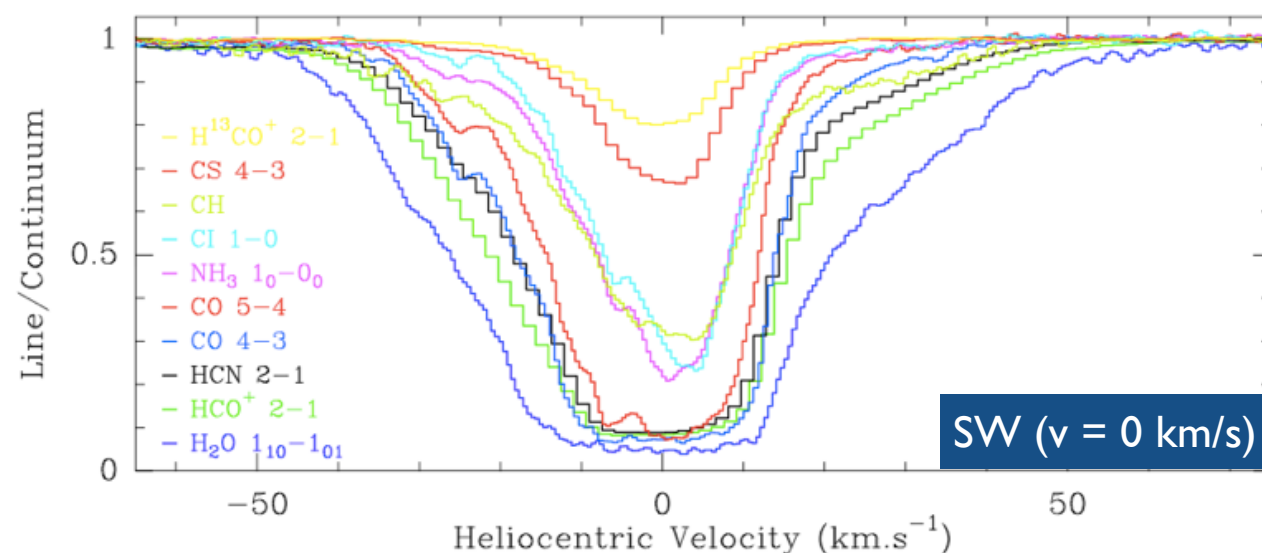
- mm/submm波帯 (ALMA) では周波数依存性なし: プラズマが高周波数で透明になるため

- SW continuum emissionは吸収体よりも5 - 10%大きい @ mm/submm

- continuumの形態的な変化により、吸収線に時間変動を生じる

- 速度成分ごとに吸収強度に変動があったが、速度の変化はなし

- 0 km/s と 170 km/s の吸収体は、同一直線 (視線) 上に存在 (隣接したcloudではない)

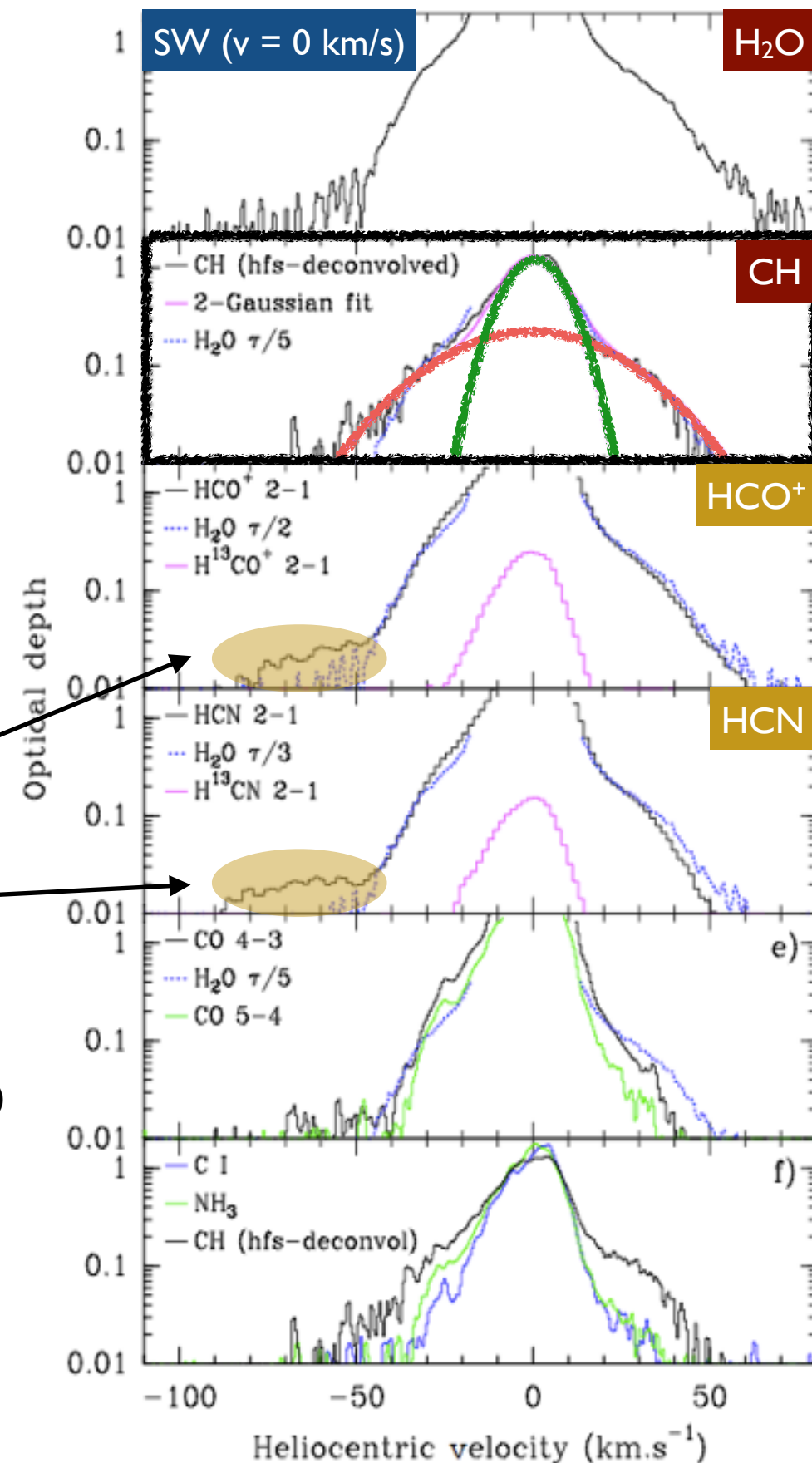


4.2. The absorption along the SW line-of-sight

4.2.2. Line wings

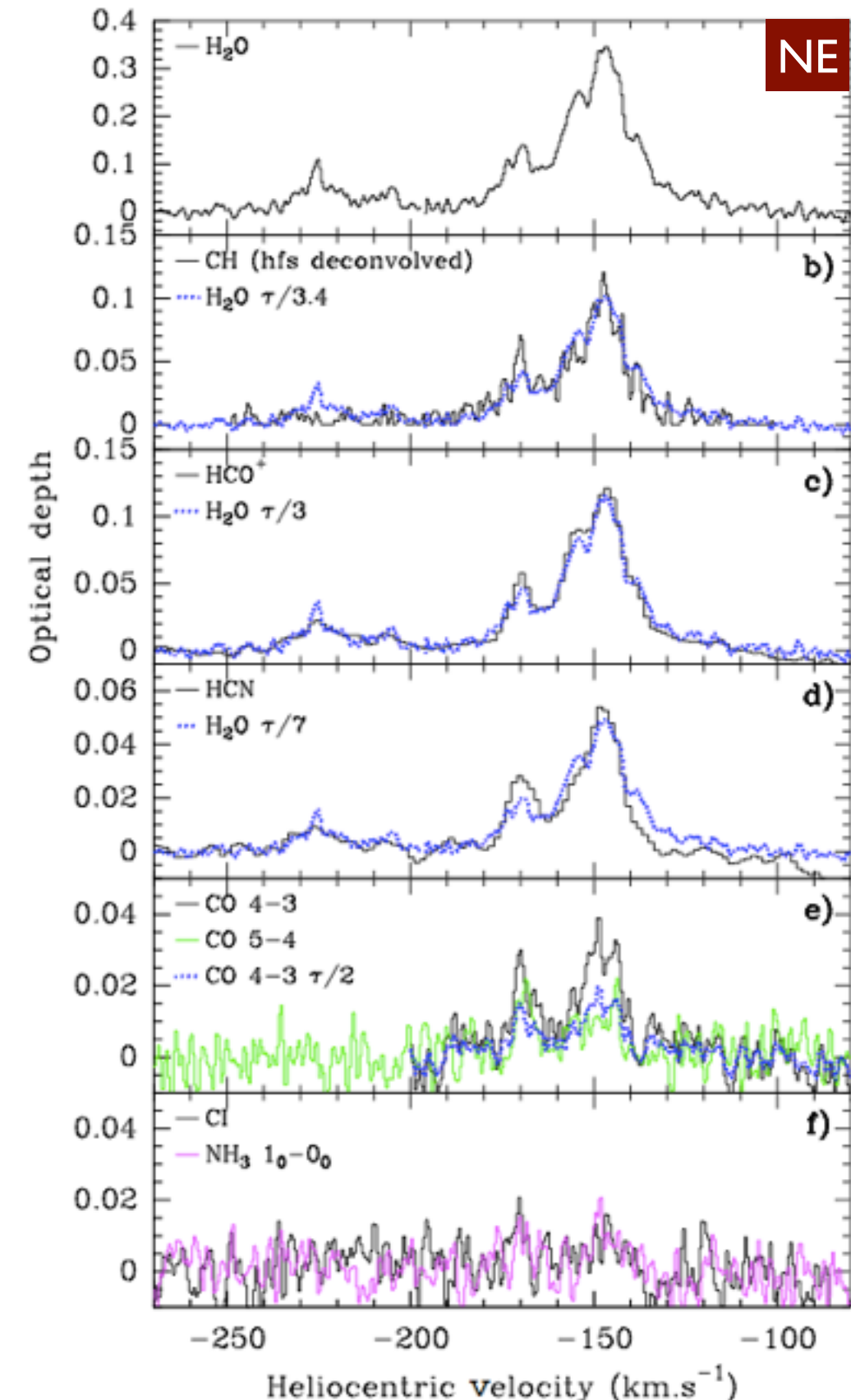
- SW $v = 0$ km/sの吸収線は、FWZP ~ 100 km/s に渡って広がる
 - 吸収体の銀河がface-onだとすると不可解
- CH: diffuse Galactic gasでの H_2 tracer
 - saturateしておらず、profileを調べるのに適している
 - **deep-narrow**と**broad-wide**の2つの成分に分解できる (下表)
 - **deep-narrow**は他のsaturateしていない分子吸収線にも見られる
 - SWの H_2 column density $\sim 2.2 \times 10^{22} \text{ cm}^{-2}$
 - 先行研究では2つの成分は分離されていない
- HCO^+ (2-1), HCN(2-1)で見られる $\tau \sim 0.02$ 付近のbump
 - CH, H_2O では見られない
 - 低周波の背景光にilluminateされたmolecular region由来? (高周波では生じない)

CH absorption compontnts	FWHM (km/s)	τ	$\int \tau dv$ (km/s)	Column density (cm)
deep narrow	17	1.1	20	4.6×10
broad wide	53	0.23	13	3.0×10



4.3. The absorption along the NE line-of-sight

- 浅く狭い吸収線が多数集まったprofile
 - column densityが小さい
 - NE方向は吸収体の銀河の外縁部 ($r \sim 4$ kpc) を見ている ($\Leftrightarrow$ SWでは $r \sim 2$ kpc)
 - 他方、HIの吸収はNEの方がずっと深い
- profileの時間変動 $\rightarrow$ よりdiffuseなgasの吸収を見ている
- NEはSWより増光されている ($\sim 1.3 - 1.5$ 倍, 重力レンズの影響)
 - source covering factor f_c はNEの方が小さい
 - 水の吸収線ピークから下限値0.3を与えられる
- 速度成分ごとに異なる時間変動
 - 各速度成分は同じ視線方向で一直線に並んでいない $\rightarrow f_c$ は100%ではない ($0.3 < f_c < 1.0$)
- H_2O column density $\sim 6 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$
 $\rightarrow \text{H}_2$ column density $\sim 10^{21} \text{ cm}^{-2}$: SWより1桁小さい



4.4. Relative abundances

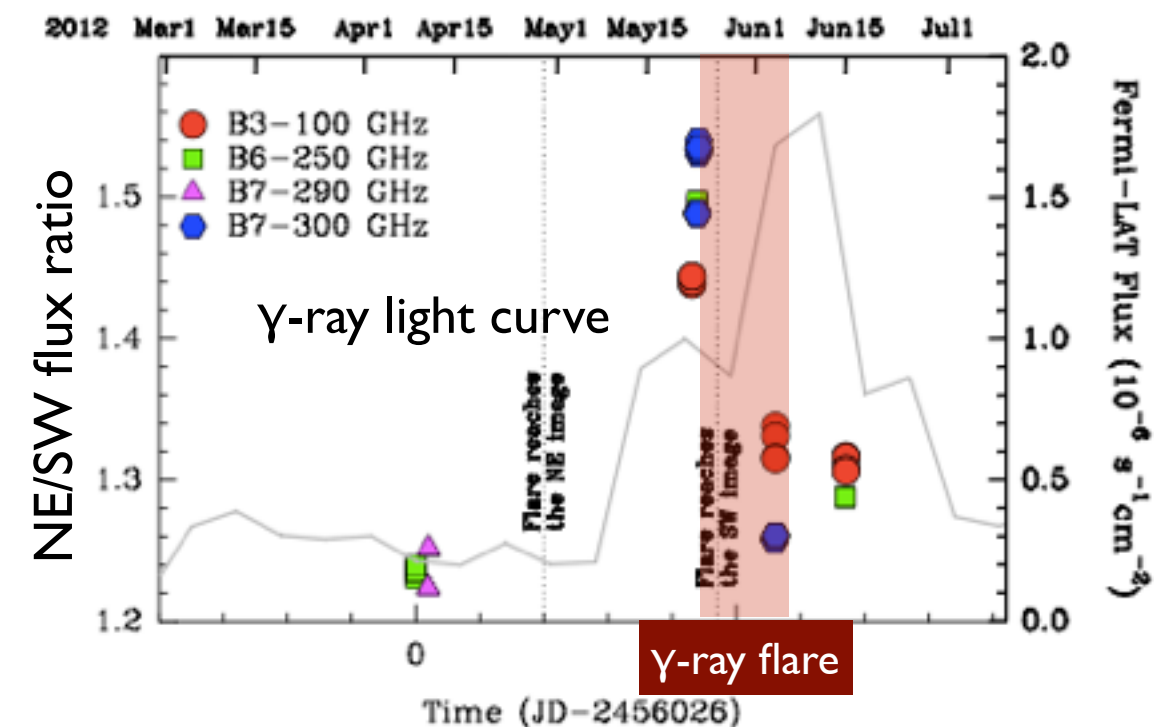
4.5. Time variation of the line profiles

Species	$f_c(\text{SW})^b$	$f_c(\text{NE})^b$	α^c ($\text{cm}^{-2} \text{ km}^{-1} \text{ s}$)	Integrated opacity ^a [Abundances relative to H ₂]			
				SW blue wing ^d (km s^{-1})	SW line center ^e (km s^{-1})	SW red wing ^f (km s^{-1})	NE ^g (km s^{-1})
CH	0.95	1.00	2.3E+13	2.38 [3.5E-08]°	21.17 [3.5E-08]°	2.07 [3.5E-08]°	2.07 [5.2E-08]
H ₂ O	0.95	1.00	6.3E+12 †	11.76 [4.7E-08]	sat. [–]	10.27 [4.8E-08]	7.21 [5.0E-08]°
HCO ⁺	0.91	1.00	2.1E+12	7.08 [9.5E-09]	sat. [–]	4.59 [7.1E-09]	2.55 [5.9E-09]
HCN	0.91	1.00	3.5E+12	5.15 [1.2E-08]	sat. [–]	2.86 [7.4E-09]	1.03 [4.0E-09]
NH ₃	0.95	1.00	1.2E+13 ‡	1.22 [9.3E-09]	23.32 [2.0E-08]	0.51 [4.5E-09]	0.19 [2.6E-09]
CO (4–3)	0.93	1.00	7.8E+15	4.37 [2.2E-05]	sat. [–]	1.39 [8.0E-06]	0.65 [5.5E-06]
CO (5–4)	0.95	1.00	1.5E+16	2.69 [2.6E-05]	sat. [–]	0.57 [6.2E-06]	0.28 [4.6E-06]
CI	0.93	1.00	7.6E+17	0.60 [2.9E-04]	22.32 [1.2E-03]	0.36 [2.0E-04]	0.22 [1.8E-04]

- 各分子種のrelative abundanceを導出
 - SWとNEの各relative abundanceは数倍程度の差
 - いずれもGalactic diffuse mediumのabundanceに似ている (ATCAの結果 (Muller+11) と一致)

短期変動 (γ線フレア)

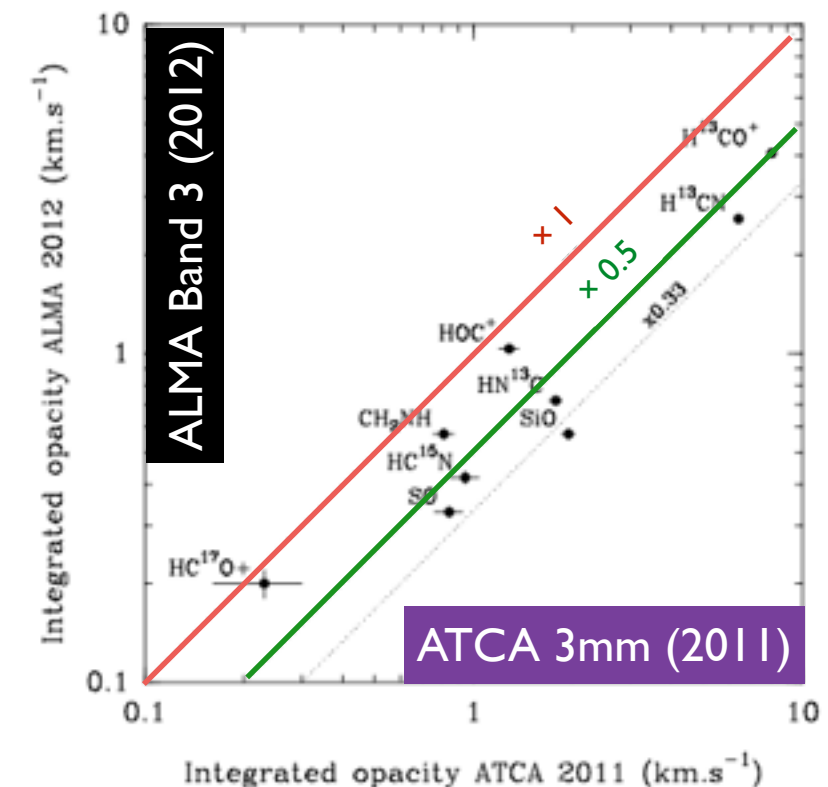
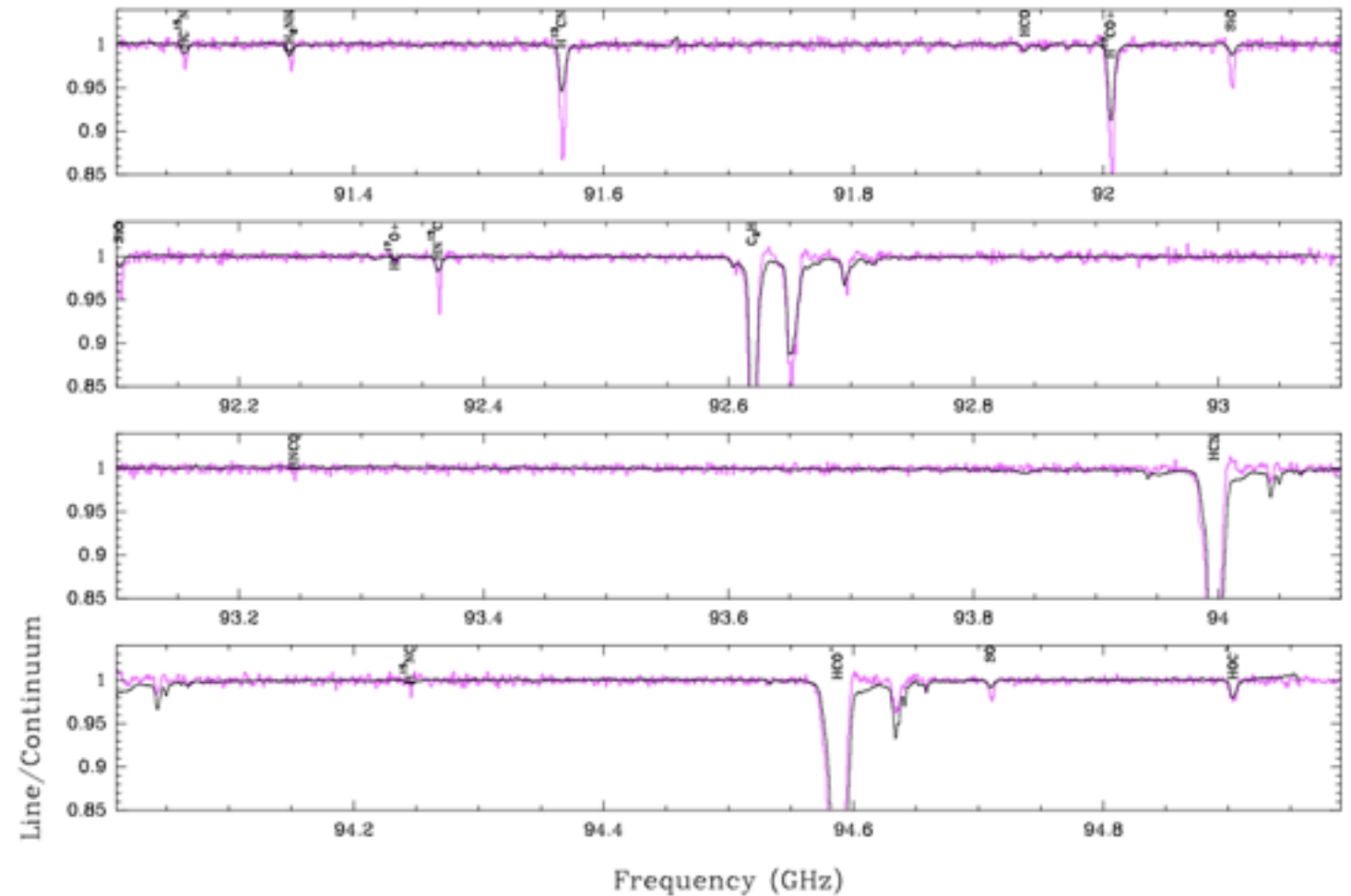
- NE/SW flux ratioの周波数依存性の反転: γ線フレアの兆候
- 高周波ほど変動が大きい: flaring regionが低周波ほど狭くなること (dilution) とconsistent



4.5. Time variation of the line profiles

• 長期変動 (年単位)

- continuum emissionの変動が原因 (precessing jetによるもの?)
- **ALMA Band 3 (2012) & ATCA 3mm (2011)**
 - SWの吸収線は顕著に浅くなっている
 - integrated τ にして約2倍の差
 - NEは少し深くなる
- ATCA 7mm 2009 & 2011
 - 2009 → 2011でSWのfluxが2倍に
 - NEは2011が最も弱い
- 年単位では吸収線の深さに数倍程度の変動
 - 現時点では予測できない
- 今後の観測に向けては、1ヶ月単位で定常的にmonitorするのが望ましい
 - より明るい時に観測することで、高いS/Nで新しい分子種の検出を期待できる



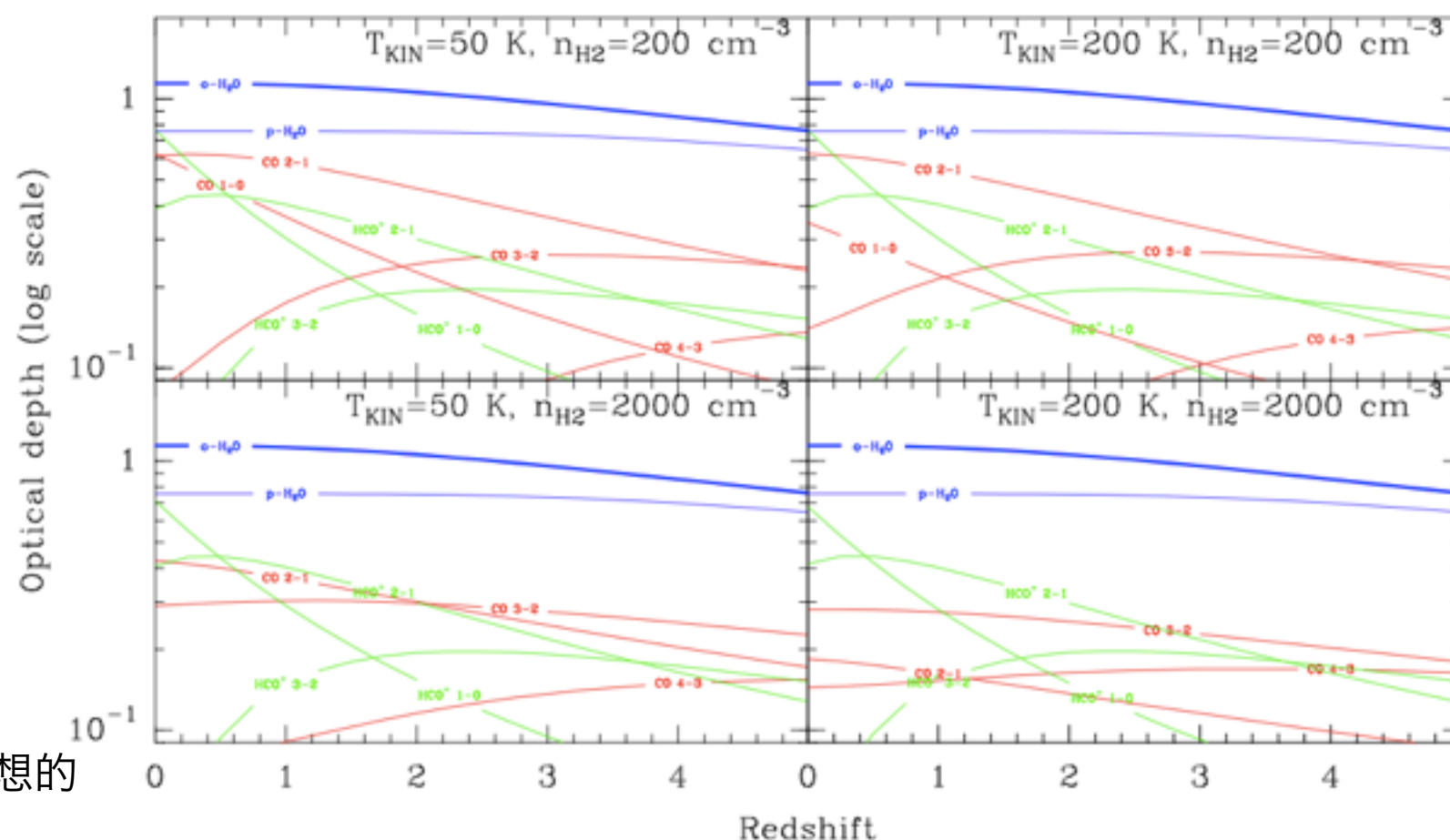
5. Discussion

5.1. On the wide velocity spread of the absorption profiles

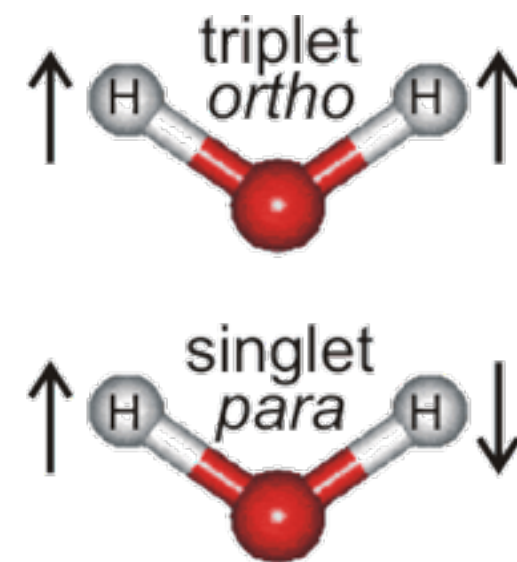
- 2つの視線がレンズ天体 (吸収体) バルジの両側を通っていると仮定 + 広い ($> 100 \text{ km/s}$) 速度幅をもつ吸収線
 - diskの異なる2つの領域を見ている?
 - 広い速度幅はdisk全体のガスの特徴? ($\Leftrightarrow$ 系内では銀河中心にしか見られない特徴)
- HI kinematicsのモデリング (Koopmans & de Bruyn, 2005)
 - azimuth方向に対称 + flat rotation curve $\rightarrow$ inclination = $17^\circ - 32^\circ$ (ほぼface-on): HST観測とconsistent
 - HI linewidth = $39 - 48 \text{ km/s}$ ($>$ 近傍渦巻銀河) $\rightarrow$ diskにおける活発な星形成からのfeedback (高速の乱流) ?
- 分子ガスにおける広い速度幅は何に起因するのか?
 1. **Disk inclination:** inclinationがより大きい?: diskの長いcolumnを通して見ている
(中心近くの速度勾配やstreaming motionを見ている可能性も)
 2. **Extraplanar components:** halo envelopeや高速のcloudsに起因?: molecular outflow/streamerなら相当量の分子ガスをhaloに送れる ($\Leftrightarrow$ 近づく/遠ざかる対称な速度成分は見られない)
 3. **Thick molecular disk:** diffuse molecular gasの厚いdiskの存在?
(近傍銀河では複数知られる、星形成などで生じた垂直方向乱流の結果?)
 4. **Merger system:** 衝突系の可能性? ($\Leftrightarrow$ HST画像ではmergerの兆候はなし)

5.2. Water as a tracer of molecular gas in absorption

- H_2O などの τ の z 依存性をRADEXで予測
 - $T_{\text{kin}} = 50, 200 \text{ K} / n(\text{H}_2) = 200, 2000 \text{ cm}^{-3}$
Galactic diffuse gasのabundanceを仮定
 - $\tau(\text{CO})$ は大きく変動
 - $\tau(\text{para-}\text{H}_2\text{O})$ はほぼ一定で、常に $\tau(\text{CO})$ や $\tau(\text{HCO}^+)$ より高い
- H_2O lines: high- z でのdiffuse gasのtracerとして理想的
 - 多くのhigh- z galaxiesで検出
 - 高励起のCOと同等以上のintensityに達する
 - H_2 column densityを H_2O lineのみから推定できる $\leftarrow T_{\text{ex}}(\text{H}_2\text{O}) \sim T_{\text{CMB}}$
 - ただし H_2O lineがsaturateしておらず、fractional abundanceが一定と仮定
(Galactic diffuse gasでは観測的に確認)
 - ortho- H_2O ($I_{10}-I_{01}$, 557 GHz): ALMA Bandsなら $0.1 < z < 5.6$ で観測可能
 - para- H_2O も $z > 1.2$ で観測可能 $\rightarrow$ ortho-para比も測定できる
 - ALMAの感度なら、多数のsubmm galaxiesが背景光源となりうる



Optical depths of H_2O , CO , HCO^+ as a function of z



6. Summary and conclusions

- ALMA Cycle 0 による PKS 1830-211 方向に存在する分子ガスの spectral survey
 - 4 tunings (100, 250, 290, 300 GHz): CO, H₂O, CH, HCO⁺, HCN, NH₃などの強い吸収線をカバー
 - 本サーベイのfirst resultsのまとめは以下の通り
- 1. NE/SWの両視線方向で**多数の分子をnew-detection** → 累計で42種(SW) / 14種(NE)
 - 系内では大気の窓に入り観測できない分子(CH, H₂O, H₂Cl⁺など)も検出
- 2. 高いS/Nで**NEとSWを空間分解**
 - NE: 多数の狭い速度成分の集合 / SW: 0 km/sの広い (100 km/s以上)成分 + +170 km/sの弱い成分 (velocity offset)
- 3. **吸収線(群)の広い速度幅**
 - 吸収体の銀河が中程度のinclination? / extraplanar componentsの存在? / 単純な銀河回転より複雑な構造 (merger system)?
- 4. **SWのsource covering factorを測定** (周波数依存性は小さい)
 - covering factorが分子種ごとに異なる? / continuum sizeが100 - 300 GHzではほぼ変わらない?
- 5. **吸収線profileの時間変動を捉える**
 - ALMA観測期間中に背景blazarで γ線フレアが発生 → NE/SW flux ratioの変動を確認 (高周波数ほど大きな変動)
 - 長期(2ヶ月以上)の変動はminor
- 6. **o-H₂O (1₁₀-1₀₁, 557 GHz)** が最も深い吸収: high-zでの分子吸収を探る上で良いprobeになる